

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK TABANLI BATARYA  
VE ULTRAKAPASİTÖRLÜ HİBRİT SİSTEMİN AKILLI ENERJİ  
YÖNETİMİ**

**AHMET AKTAŞ**

**KOCAELİ 2016**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK TABANLI BATARYA VE  
ULTRAKAPASİTÖRLÜ HİBRİT SİSTEMİN AKILLI ENERJİ  
YÖNETİMİ**

**AHMET AKTAŞ**

**Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR**  
Danışman, Kocaeli Üniv.

**Prof. Dr. Bekir ÇAKIR**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

**Prof. Dr. Ercüment KARAKAŞ**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

**Doç. Dr. Murat KALE**  
Jüri Üyesi, Düzce Üniv.

**Doç. Dr. Metin KESLER**  
Jüri Üyesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniv.

  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 21.10.2016**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından (YEK) üretilen enerjinin elektrik güç sistemlerine eklenmesindeki en önemli sorun, bu kaynaklardan üretilen enerjinin iklim koşullarına bağlı olarak genellikle kararsız ve değişken olmasıdır. Güneş enerjisinden güneş çok iyi parladığında ve bulutsuz bir günde yüksek miktarda elektrik üretilebilmekte, rüzgâr enerjisinde ise rüzgâr hızı belli bir değerin üzerinde olduğunda yüksek verimle elektrik elde edilmekte ve en önemlisi enerji üretim değerleri iklim koşullarına (güneş parlaklığı, rüzgâr hızı vb.) göre sürekli değişmektedir. Bu tezin amacı, Hibrit Enerji Depolama Sisteminin (HEDS) güneş enerjisinden elektrik üretim sistemine eklenmesiyle bu probleme çözüm getirmektir. Akıllı mikro şebeke teknolojisi sözü edilen yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi ve enerji depolama sistemlerinin entegrasyonu için en uygun çözümdür.

Güneş, rüzgâr ve diğer yenilenebilir enerji kaynakları günümüz elektrik şebekesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. HEDS'in yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyonu, oldukça kesintili ve kararsız olan yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjinin daha fazla sevk edilebilir olmasını sağlayacaktır. Bu çalışmanın amacı, şebeke bağlantılı 3-fazlı 4-telli elektrik güç sistemlerinde, ultrakapasitör ve bataryadan oluşan HEDS'in YEK'e entegrasyonunu sağlayarak geliştirilen akıllı enerji yönetim algoritma dinamik davranışını incelemektir. Bu amaca yönelik olarak, HEDS'nin bulunduğu şebeke bağlantılı 3 fazlı 4 telli elektrik güç sisteminin tasarımı ve denetimi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada akıllı mikro şebeke alt yapısı ile güneş enerjisinden elektrik üretim sisteminin HEDS ile entegrasyonu yapılarak oluşturulan prototip sistemi geliştirilen özgün akıllı enerji yönetim algoritmasıyla kontrol edilmesi sağlanmıştır. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen HEDS farklı çalışma durumlarında test edilerek geliştirilen akıllı enerji yönetim algoritmasının kararlılık ve tepkisi incelenmektedir.

Bu tez çalışması, "Fotovoltaik kaynaktan beslenen 3-fazlı 4-telli akıllı mikro şebeke yapısının batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji depolama sistemi ile geliştirilmesi" adlı TÜBİTAK 113E143 nolu 1001 projesi tarafından desteklenmiştir.

Tez çalışmalarına ayırdığım zamanı anlayışla karşılayıp beni destekleyen, maddi ve manevi her türlü destekleriyle yanımda olan Yağmur KIRÇIÇEK'e ve aileme, bugüne kadar öğrettikleriyle bana katkıda bulunan herkese teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım süresince, çalışmalarına yön veren ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR ve tez izleme komitesinde yer alan Prof. Dr. Ercüment KARAKAŞ ve Doç. Dr. Murat KALE'ye teşekkür ederim.

Ekim – 2016

Ahmet AKTAŞ

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ .....	xiii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR .....	xiv
ÖZET.....	xvii
ABSTRACT .....	xviii
GİRİŞ .....	1
1. AKILLI, MİKRO VE DAĞITIK ŞEBEKELER .....	12
1.1. Akıllı Şebeke Yapıları .....	13
1.2. Mikro Şebeke Yapıları.....	16
1.2.1. Mikro şebekelerde dinamik kontrol .....	19
1.3. Dağıtık Üretim Şebeke Yapıları .....	21
1.3.1. Şebeke bağlantılı dağıtık FV sistemler .....	21
1.3.2. Dağıtık FV sistemlerinde depolama uygulaması .....	24
2. ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ .....	27
2.1. Enerji Depolama Uygulamaları .....	27
2.1.1. Pompalamalı hidroelektrik ile enerji depolama .....	29
2.1.2. Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama .....	30
2.1.3. Volan enerji depolama .....	31
2.1.4. Ultrakapasitör enerji depolama .....	33
2.1.5. Süperiletken manyetik enerji depolama .....	33
2.1.6. Bataryalar .....	34
2.1.7. Akıllı bataryalar .....	37
2.1.8. Hidrojen ile enerji depolama .....	38
2.1.9. Termal enerji depolama.....	39
2.2. Enerji Depolama Teknolojilerinin Karşılaştırması .....	40
2.3. Enerji Depolama Teknolojisinin Faydaları.....	42
2.3.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarında enerji depolamanın faydaları .....	45
2.3.2. Dağıtık enerji depolama faydaları .....	46
2.3.3. Son tüketici için enerji depolamanın faydaları.....	47
2.3.4. Enerji depolama ile yük kaydırma .....	48
2.4. Dünyadaki Enerji Depolama Sistemlerinin Son Durumu .....	49
2.5. Hibrit Enerji Depolama Sistemi.....	50
3. HEDS SİMÜLASYON ÇALIŞMALARİ.....	56
3.1. FV Panel Dizisi, DA/DA Yükseltici Dönüştürücü ve Saptır-Gözle Kontrol Algoritması .....	57
3.1.1. Güneş pili elektriksel modeli.....	58
3.1.2. DA/DA yükseltici dönüştürücü modeli.....	62
3.2. Batarya ve Çift Yönlü DA/DA Dönüştürücü.....	66
3.2.1. Batarya modeli .....	67
3.2.2. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü modeli .....	68
3.2.3. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü kontrolü.....	71

3.2.4. Ultrakapasitör .....	72
3.3. Evirici Kontrol Algoritması ve Akım Denetleyici.....	74
3.3.1. Evirici kontrol algoritması .....	74
3.3.2. Faz kilitleme döngüsü (Phase Locked Loop PLL).....	74
3.3.3. Park (dq0/abc) dönüşümü.....	75
3.3.4. Akım denetleyici .....	75
3.4. Akıllı Enerji Yönetim Algoritması .....	76
3.5. Güç Akış Diyagramları .....	79
3.5.1. Durum 1 $P_{FV} \approx P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu düşük.....	79
3.5.2. Durum 2 $P_{FV} \approx P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu yüksek.....	80
3.5.3. Durum 3 $P_{FV} > P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu düşük.....	85
3.5.4. Durum 4 $P_{FV} > P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu yüksek.....	92
3.5.5. Durum 5 $P_{FV} < P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu düşük .....	95
3.5.6. Durum 6 $P_{FV} < P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu yüksek.....	96
3.5.7. Durum 7 $P_{FV} = 0$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu düşük .....	100
3.5.8. Durum 8 $P_{FV} = 0$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu yüksek.....	101
4. HEDS DENEYSEL ÇALIŞMALARİ .....	106
4.1. Deneysel Test Platformunun Tasarımı .....	106
4.2. DA Güç Devresi Bağlantı Şeması .....	108
4.3. AA Güç Devresi Bağlantı Şeması .....	109
4.4. FV Paneller, Simülatör ve DA Güç Kontrol Panoları .....	111
4.5. Batarya Grubu.....	114
4.6. Ultrakapasitör Grubu .....	115
4.7. Akım/Gerilim Ölçüm Kartı.....	116
4.8. Sinyal Koşullandırma Ara Birim Kartı .....	118
4.9. Aşırı Akımı ve Gerilim Koruma kartı.....	119
4.10. Sürücü Bordları için Sinyal Yükseltici ve Koruma Kartı .....	119
4.11. IGBT Sürücü Modülleri ve Geliştirme Bordları.....	120
4.12. DA ve AA Güç Devresi .....	122
4.13. Akıllı Enerji Yönetim Algoritma Kontrol Kartı .....	123
4.14. Evirici için Kademeli Filtre Tasarımı ve Üretimi .....	125
4.15. AA SSR Kontrol Kartı Tasarımı ve Üretimi .....	129
4.16. Güç Analizörü Ölçüm Kartı.....	130
4.17. Yük Gruplarının Tasarımı ve Üretimi.....	130
4.17.1. 3 fazlı yarı kontrollü tristörlü doğrultucu.....	131
4.17.2. 3 fazlı tam dalga diyot doğrultucu .....	133
4.17.3. Tek fazlı tam dalga diyot doğrultucu .....	135
4.18. Kademeli Omik Yük Grubu.....	137
4.19. Programlanabilir DA Elektronik Yük.....	138
4.20. dSpace Tabanlı Gerçek Zamanlı Denetim Sistemi .....	140
5. HEDS DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI.....	143
5.1. Durum 1-2 Dengeli Yük $P_{FV} \approx P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ SOC Düşük-Yüksek Durumu .....	152
5.2. Durum 1 ve Durum 2 Dengesiz Yük, $P_{FV} \approx P_{YÜK}$ Durumu .....	158
5.3. Durum 3 640W $P_{FV} > P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ SOC Düşük Durumu.....	162
5.4. Durum 3 1830W $P_{FV} > P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ SOC Düşük Durumu .....	169
5.5. Durum 4 $P_{FV} > P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ SOC Yüksek Durumu .....	174
5.6. Durum 5 $P_{FV} < P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ SOC Düşük Durumu.....	180
5.7. Durum 6 $P_{FV} < P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ SOC Yüksek Durumu .....	187

5.8. Durum 7 ve Durum 8 $P_{FV}=0$ ve $P_{BAT}$ SOC Düşük/Yüksek Durumu .....	193
5.9. Durum 9 Şebekeden Batarya Grubunun Şarj Durumu .....	198
5.10. Durum 10 $P_{YÜK}=0$ ve $P_{FV}$ Gücünün Şebekeye Aktarılma Durumu .....	204
5.11. Ada Modu Deneysel Çalışması.....	209
5.12. FV Panellerin Bulutlanma Durumu .....	214
5.13. Durum 5'ten Durum 3'e Geçiş Durumu .....	217
5.14. Ani Yük Değişim Durumu.....	221
5.15. Durum 8'den Durum 7'ye Geçiş Durumu .....	224
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	228
KAYNAKLAR .....	232
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER .....	247
ÖZGEÇMİŞ .....	250



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Konvansiyonel elektrik şebeke iletim yapısı .....	12
Şekil 1.2.	Akıllı şebeke elektrik iletim yapısı .....	14
Şekil 1.3.	Mikro şebeke elektrik iletim yapısı.....	17
Şekil 1.4.	Dinamik yük kontrol uygulamalarına örnek grafikler .....	20
Şekil 1.5.	FV sistemin farklı günlerdeki güç üretim grafikleri .....	22
Şekil 1.6.	Örnek bir konutun günlük yük ve FV güç değişim grafiği.....	23
Şekil 1.7.	FV ve enerji depolama sisteminin şebeke etkisi.....	25
Şekil 2.1.	Enerji depolama teknolojilerinin sınıflandırılması .....	28
Şekil 2.2.	Enerji depolama sistemleri diyagram gösterimi .....	28
Şekil 2.3.	Pompalamalı hidroelektrik ile enerji depolama topolojisi.....	29
Şekil 2.4.	Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama topolojisi.....	31
Şekil 2.5.	Volan enerji depolama teknoloji topolojisi.....	32
Şekil 2.6.	Akışlı batarya çalışma topolojisi.....	38
Şekil 2.7.	Enerji depolama teknolojilerinin kapasite pozisyonları.....	40
Şekil 2.8.	Yük kaydırma prensibi ile işletilen depolama uygulamasının güç sistemine etkisini gösteren günlük güç-zaman grafiği.....	48
Şekil 2.9.	2015 yılına ait küresel enerji depolama kapasite dağılımı.....	50
Şekil 2.10.	Batarya ve ultrakapasitörün zamana göre şarj/deşarjı .....	51
Şekil 3.1.	3 fazlı 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı HEDS sistemin Matlab/Simulink blok diyagramı .....	56
Şekil 3.2.	FV panel dizisi ve Saptır-gözle kontrol algoritması blok diyagramı.....	58
Şekil 3.3.	Tek diyetli güneş pili eşdeğer devresi.....	59
Şekil 3.4.	Güneş pili dizisi eşdeğer devresi.....	61
Şekil 3.5.	FV panel dizisinin blok diyagramı.....	62
Şekil 3.6.	DA/DA yükseltici dönüştürücü yapısı .....	63
Şekil 3.7.	Saptır-gözle MGNİ kontrol algoritması blok diyagramı .....	66
Şekil 3.8.	Batarya grubu, çift yönlü DA/DA dönüştürücü ve kontrol birimi blok diyagramı .....	67
Şekil 3.9.	Batarya eşdeğer devresi .....	68
Şekil 3.10.	Çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısı .....	69
Şekil 3.11.	Çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısının kontrol ünitesinin simulink blok diyagramı .....	71
Şekil 3.12.	(a) Düşürücü ve (b) yükseltici mod kontrol simulink blok diyagramı .....	72
Şekil 3.13.	Ultrakapasitör eşdeğer devresi ve simulink blok diyagramı.....	73
Şekil 3.14.	Evirici kontrol algoritması blok diyagramı.....	74
Şekil 3.15.	Histerezis bant akım denetleyici ile eviricinin anahtarlama sinyallerini üreten simulink blok diyagramı .....	76
Şekil 3.16.	Akıllı enerji yönetim algoritması simulink blok diyagramı.....	79
Şekil 3.17.	Durum $P_{FV} \approx P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ SOC düşük olduğu durumdaki güç akış diyagramı.....	80
Şekil 3.18.	Durum 2 $P_{FV} \approx P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ SOC yüksek olduğu durumdaki güç akış diyagramı.....	81

Şekil 3.19.	Durum 1 $P_{FV} \approx P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu düşük .....	82
Şekil 3.20.	Durum 2 $P_{FV} \approx P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu yüksek.....	82
Şekil 3.21.	Durum 1-2 $P_{FV} \approx P_{YÜK}$ için FV panel akımı .....	82
Şekil 3.22.	Durum 1-2 $P_{FV} \approx P_{YÜK}$ için batarya akımı .....	83
Şekil 3.23.	Durum 1-2 $P_{FV} \approx P_{YÜK}$ için FV panel ve batarya toplam akımı .....	83
Şekil 3.24.	Durum 1-2 $P_{FV} \approx P_{YÜK}$ için şebeke gerilimi .....	83
Şekil 3.25.	Durum 1-2 $P_{FV} \approx P_{YÜK}$ için yük akımı .....	84
Şekil 3.26.	Durum 1-2 $P_{FV} \approx P_{YÜK}$ için evirici akımı.....	84
Şekil 3.27.	Durum 1-2 $P_{FV} \approx P_{YÜK}$ için şebeke akımı .....	84
Şekil 3.28.	Durum 3 $P_{FV} > P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ SOC düşük olduğu durumdaki güç akış diyagramı .....	85
Şekil 3.29.	Durum 3 $P_{FV} > P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu düşük .....	86
Şekil 3.30.	Durum 3 $P_{FV} > P_{YÜK}$ için FV panel akımı .....	86
Şekil 3.31.	Durum 3 $P_{FV} > P_{YÜK}$ için batarya akımı .....	87
Şekil 3.32.	Durum 3 $P_{FV} > P_{YÜK}$ için FV Panel ve batarya toplam akımı .....	87
Şekil 3.33.	Durum 3 $P_{FV} > P_{YÜK}$ için yük akımı .....	87
Şekil 3.34.	Durum 3 $P_{FV} > P_{YÜK}$ için evirici akımı .....	88
Şekil 3.35.	Durum 3 $P_{FV} > P_{YÜK}$ için şebeke akımı .....	88
Şekil 3.36.	Durum 3 $P_{FV} > P_{YÜK}$ artan yük için batarya doluluk durumu .....	89
Şekil 3.37.	Durum 3 $P_{FV} > P_{YÜK}$ artan yük için FV panel akımı .....	90
Şekil 3.38.	Durum 3 $P_{FV} > P_{YÜK}$ artan yük için batarya akımı .....	90
Şekil 3.39.	Durum 3 $P_{FV} > P_{YÜK}$ artan yük için ultrakapasitör akımı .....	90
Şekil 3.40.	Durum 3 $P_{FV} > P_{YÜK}$ artan yük için yük akımı .....	91
Şekil 3.41.	Durum 3 $P_{FV} > P_{YÜK}$ artan yük için evirici akımı .....	91
Şekil 3.42.	Durum 3 $P_{FV} > P_{YÜK}$ artan yük için şebeke akımı .....	91
Şekil 3.43.	Durum 4 $P_{FV} > P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ SOC yüksek olduğu durumdaki güç akış diyagramı .....	92
Şekil 3.44.	Durum 4 $P_{FV} > P_{YÜK}$ için batarya doluluk durumu yüksek .....	93
Şekil 3.45.	Durum 4 $P_{FV} > P_{YÜK}$ için FV panel akımı .....	93
Şekil 3.46.	Durum 4 $P_{FV} > P_{YÜK}$ için batarya akımı .....	93
Şekil 3.47.	Durum 4 $P_{FV} > P_{YÜK}$ için FV panel ve batarya toplam akımı.....	94
Şekil 3.48.	Durum 4 $P_{FV} > P_{YÜK}$ için yük akımı .....	94
Şekil 3.49.	Durum 4 $P_{FV} > P_{YÜK}$ için evirici akımı .....	94
Şekil 3.50.	Durum 4 $P_{FV} > P_{YÜK}$ için şebeke akımı .....	95
Şekil 3.51.	Durum 5 $P_{FV} < P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ SOC düşük olduğu durumdaki güç akış diyagramı .....	95
Şekil 3.52.	Durum 6 $P_{FV} < P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ yüksek olduğu durumdaki güç akış diyagramı .....	96
Şekil 3.53.	Durum 5 $P_{FV} < P_{YÜK}$ için batarya doluluk oranı düşük .....	97
Şekil 3.54.	Durum 6 $P_{FV} < P_{YÜK}$ için batarya doluluk oranı yüksek.....	98
Şekil 3.55.	Durum 5-6 $P_{FV} < P_{YÜK}$ için FV panel akımı .....	98
Şekil 3.56.	Durum 5-6 $P_{FV} < P_{YÜK}$ için batarya akımı .....	98
Şekil 3.57.	Durum 5-6 $P_{FV} < P_{YÜK}$ için FV panel ve batarya toplam akımı .....	99
Şekil 3.58.	Durum 5-6 $P_{FV} < P_{YÜK}$ için yük akımı .....	99
Şekil 3.59.	Durum 5-6 $P_{FV} < P_{YÜK}$ için evirici akımı.....	99
Şekil 3.60.	Durum 5-6 $P_{FV} < P_{YÜK}$ için şebeke akımı .....	100
Şekil 3.61.	Durum 7 $P_{FV} = 0$ ve $P_{BAT}$ SOC düşük olduğu durumdaki güç akış diyagramı .....	101
Şekil 3.62.	Durum 8 $P_{FV} = 0$ ve $P_{BAT}$ SOC yüksek olduğu durumdaki	



	güç akış diyagramı .....	102
Şekil 3.63.	Durum 7 $P_{FV}=0$ için batarya doluluk oranı düşük.....	103
Şekil 3.64.	Durum 8 $P_{FV}=0$ için batarya doluluk oranı yüksek.....	103
Şekil 3.65.	Durum 7-8 $P_{FV}=0$ için FV panel akımı .....	103
Şekil 3.66.	Durum 7-8 $P_{FV}=0$ için batarya akımı .....	104
Şekil 3.67.	Durum 7-8 $P_{FV}=0$ için FV panel ve batarya toplam akımı .....	104
Şekil 3.68.	Durum 7-8 $P_{FV}=0$ için yük akımı .....	104
Şekil 3.69.	Durum 7-8 $P_{FV}=0$ için evirici akımı.....	105
Şekil 3.70.	Durum 7-8 $P_{FV}=0$ için şebeke akımı .....	105
Şekil 4.1.	HEDS güç sistemi ve denetim sistemi blok diyagramı.....	106
Şekil 4.2.	HEDS laboratuvar test platformunun fotoğrafı a) deney masasının üstten görünüşü b) deney masasının alt kısmının görünüşü .....	107
Şekil 4.3.	HEDS test platformunun DA güç devresinin ayrıntılı şeması .....	108
Şekil 4.4.	HEDS test platformunun AA güç devresinin ayrıntılı şeması.....	110
Şekil 4.5.	5kW FV panel kurulumu ve şebeke bağlantılı evirici fotoğrafı .....	111
Şekil 4.6.	Chroma FV simülatör fotoğrafı .....	111
Şekil 4.7.	Chroma FV simülatör arayüzü.....	112
Şekil 4.8.	DA güç panolarının bağlantı şeması.....	113
Şekil 4.9.	DA güç panolarının fotoğrafları.....	114
Şekil 4.10.	Batarya grubu ve bağlantı fotoğrafı .....	115
Şekil 4.11.	Deneysel çalışmalarda kullanılacak ultrakapasitör gruplarının fotoğrafı .....	115
Şekil 4.12.	Hall etkili gerilim sensörü devre bağlantı şeması .....	117
Şekil 4.13.	Hall etkili akım sensörü devre bağlantı şeması .....	117
Şekil 4.14.	Akım/gerilim sensör kart fotoğrafı .....	118
Şekil 4.15.	Gerilim sinyal koşullandırma devresi blok diyagramı.....	118
Şekil 4.16.	Akım sinyal koşullandırma devresi blok diyagramı .....	118
Şekil 4.17.	Sinyal yükseltici ve koruma devresi blok diyagramı.....	119
Şekil 4.18.	Sinyal yükseltici ve koruma kartı fotoğrafı .....	120
Şekil 4.19.	IGBT sürücü ile üretilen ölü zamanlı kapı sinyalleri.....	121
Şekil 4.20.	Sürücü modül ve geliştirme bordu fotoğrafı.....	122
Şekil 4.21.	HEDS'nin gerçekleştirilen güç devresi fotoğrafı.....	123
Şekil 4.22.	Akıllı enerji yönetim algoritma kontrol kart bağlantı şeması .....	124
Şekil 4.23.	Akıllı enerji yönetim algoritması kontrol kartı fotoğrafları.....	124
Şekil 4.24.	L filtrenin evirici çıkışına bağlantısı .....	125
Şekil 4.25.	Evirici için tasarlanan kademeli L filtre bobin devresi .....	126
Şekil 4.26.	Evirici çıkışı için kademeli L filtre tasarım fotoğrafı .....	127
Şekil 4.27.	RC filtrenin evirici çıkışına bağlantısı .....	128
Şekil 4.28.	Evirici çıkışı için RC filtre tasarım fotoğrafı .....	128
Şekil 4.29.	Sistemde kullanılacak SSR kontrol kartı fotoğrafı.....	129
Şekil 4.30.	Güç analizör ölçüm kartı fotoğrafı.....	130
Şekil 4.31.	3 faz yarı kontrollü tristörlü doğrultucu devre şeması .....	132
Şekil 4.32.	3 faz yarı kontrollü tristörlü doğrultucu fotoğrafı.....	132
Şekil 4.33.	3 faz tristörlü doğrultucu a-fazı kaynak gerilimi ve akımı dalga şekilleri .....	133
Şekil 4.34.	3 faz tristörlü doğrultucu (a) gerilim, (b) akım harmonik dağılımı .....	133
Şekil 4.35.	3 faz tam dalga diyot doğrultucu devre şeması.....	134
Şekil 4.36.	3 faz tam dalga diyot doğrultucu fotoğrafı .....	134
Şekil 4.37.	3 faz tam dalga diyot doğrultucu a-fazı akım/gerilim dalga	

	şekilleri.....	135
Şekil 4.38.	3 faz tam dalga diyot doğrultucu (a) gerilim, (b) akım harmonik dağılımı .....	135
Şekil 4.39.	Tek faz tam dalga diyot doğrultucu devre şeması .....	136
Şekil 4.40.	Tek faz tam dalga diyot doğrultucu fotoğrafı .....	136
Şekil 4.41.	Tek faz tam dalga diyot doğrultucu a-fazı akım/gerilim dalga şekilleri.....	137
Şekil 4.42.	Tek faz tam dalga doğrultucu (a) gerilim, (b) akım harmonik dağılımı .....	137
Şekil 4.43.	Sistemde kullanılan kademeli omik yük fotoğrafı .....	138
Şekil 4.44.	Programlanabilir DA elektronik yük fotoğrafı .....	140
Şekil 4.45.	Programlanabilir DA elektronik yük bilgisayar ara yüzü .....	140
Şekil 4.46.	dSpace ControlDesk ortamı .....	142
Şekil 4.47.	DS1103 ana işlemci RTI blokları .....	142
Şekil 5.1.	HEDS güç ve denetim sistem blok diyagramı .....	143
Şekil 5.2.	HEDS'nin dSpace ADC sensör, AEYA ve güç hesap ekran görüntüsü .....	144
Şekil 5.3.	HEDS'nin dSpace evirici, MGNİ, çift yönlü dönüştürücü kontrol ve çıkış sinyallerinin ekran görüntüsü .....	145
Şekil 5.4.	HEDS dSpace güç hesaplama blokları .....	146
Şekil 5.5.	dSpace batarya SOC hesaplama bloğu .....	146
Şekil 5.6.	AEYA akış diyagramı.....	147
Şekil 5.7.	Batarya grubu referans akım hesaplama akış diyagramı .....	148
Şekil 5.8.	HEDS deneysel güç akış diyagramları .....	149
Şekil 5.9.	Çalışma durumlarının bir günlük güç grafiği dağılımı .....	151
Şekil 5.10.	Durum 1-2 dengeli yük için deneysel güç akış diyagramı.....	152
Şekil 5.11.	Durum 1-2 dengeli yük için FV panel akım, gerilim ve güç değerleri .....	153
Şekil 5.12.	Durum 1-2 dengeli yük için ControlDesk şebeke, evirici, yük akım ekranı .....	154
Şekil 5.13.	Durum 1-2 dengeli yük için DA/DA yükseltici giriş/çıkış akım gerilimleri.....	155
Şekil 5.14.	Durum 1-2 dengeli yük için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı .....	155
Şekil 5.15.	Durum 1-2 dengeli yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları.....	156
Şekil 5.16.	Durum 1-2 dengeli yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu.....	156
Şekil 5.17.	Durum 1-2 dengeli yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji tablosu.....	157
Şekil 5.18.	Durum 1-2 dengeli yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği .....	157
Şekil 5.19.	Durum 1-2 dengeli yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu.....	157
Şekil 5.20.	Durum 1-2 dengeli yük için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti .....	158
Şekil 5.21.	Durum 1 ve Durum 2 dengesiz yük için deneysel güç akış diyagramı .....	158
Şekil 5.22.	Durum 1-2 dengesiz yük için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı .....	159

Şekil 5.23.	Durum 1-2 dengesiz yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları .....	160
Şekil 5.24.	Durum 1-2 dengesiz yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu .....	160
Şekil 5.25.	Durum 1-2 dengesiz yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji tablosu .....	160
Şekil 5.26.	Durum 1-2 dengesiz yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği .....	161
Şekil 5.27.	Durum 1-2 dengesiz yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu.....	161
Şekil 5.28.	Durum 1-2 dengesiz yük için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti .....	162
Şekil 5.29.	Durum 3 640W yük için deneysel güç akış diyagramı .....	163
Şekil 5.30.	Durum 3 640W yük grubu için FV panel akım, gerilim güç değerleri .....	163
Şekil 5.31.	Durum 3 640W yük grubu için ControlDesk şebeke, evirici, yük akım ekranı .....	164
Şekil 5.32.	Durum 3 640W yük grubu için DA/DA yükseltici giriş/çıkış akım ve gerilimleri.....	165
Şekil 5.33.	Durum 3 640W yük grubu için DA/DA çift yönlü dönüştürücü giriş/çıkış akım ve gerilimleri .....	166
Şekil 5.34.	Durum 3 640W yük grubu için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı .....	166
Şekil 5.35.	Durum 3 640W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları .....	167
Şekil 5.36.	Durum 3 640W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu .....	168
Şekil 5.37.	Durum 3 640W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji.....	168
Şekil 5.38.	Durum 3 640W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği .....	168
Şekil 5.39.	Durum 3 640W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu.....	168
Şekil 5.40.	Durum 3 640W yük grubu için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti .....	169
Şekil 5.41.	Durum 3 1830W yük için deneysel güç akış diyagramı .....	170
Şekil 5.42.	Durum 3 1830W yük grubu için ControlDesk şebeke, evirici, yük akım ekranı .....	170
Şekil 5.43.	Durum 3 1830W yük grubu için DA/DA çift yönlü dönüştürücü giriş/çıkış akım gerilimleri.....	171
Şekil 5.44.	Durum 3 1830W yük grubu için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı .....	172
Şekil 5.45.	Durum 3 1830W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları .....	173
Şekil 5.46.	Durum 3 1830W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu .....	173
Şekil 5.47.	Durum 3 1830W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji.....	173
Şekil 5.48.	Durum 3 1830W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke	

	akım harmonik bar grafiği .....	173
Şekil 5.49.	Durum 3 1830W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu.....	174
Şekil 5.50.	Durum 3 1830W yük için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti .....	174
Şekil 5.51.	Durum 4 için deneysel güç akış diyagramı.....	175
Şekil 5.52.	Durum 4 için FV panel akım, gerilim güç değerleri.....	175
Şekil 5.53.	Durum 4 için ControlDesk şebeke, evirici, yük akım ekranı.....	176
Şekil 5.54.	Durum 4 için DA/DA yükseltici giriş/çıkış akım gerilimleri .....	177
Şekil 5.55.	Durum 4 için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı .....	177
Şekil 5.56.	Durum 4 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları .....	178
Şekil 5.57.	Durum 4 için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu .....	178
Şekil 5.58.	Durum 4 için 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji tablosu .....	178
Şekil 5.59.	Durum 4 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği.....	179
Şekil 5.60.	Durum 4 için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu.....	179
Şekil 5.61.	Durum 4 için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti .....	179
Şekil 5.62.	Durum 5 için deneysel güç akış diyagramı.....	180
Şekil 5.63.	Durum 5 için FV panel akım, gerilim güç değerleri.....	181
Şekil 5.64.	Durum 5 için ControlDesk şebeke, evirici, yük akım ekranı.....	182
Şekil 5.65.	Durum 5 için DA/DA yükseltici giriş/çıkış akım gerilimleri .....	183
Şekil 5.66.	Durum 5 için DA/DA çift yönlü dönüştürücü giriş/çıkış akım gerilimleri.....	184
Şekil 5.67.	Durum 5 için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı .....	184
Şekil 5.68.	Durum 5 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları .....	185
Şekil 5.69.	Durum 5 için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu .....	185
Şekil 5.70.	Durum 5 için 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji tablosu .....	185
Şekil 5.71.	Durum 5 için 3 faz yük, akım harmonik bar grafiği .....	186
Şekil 5.72.	Durum 5 için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu.....	186
Şekil 5.73.	Durum 5 için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti .....	187
Şekil 5.74.	Durum 6 için deneysel güç akış diyagramı.....	187
Şekil 5.75.	Durum 6 için FV panel akım, gerilim güç değerleri.....	188
Şekil 5.76.	Durum 6 için ControlDesk şebeke, evirici, yük akım ekranı.....	189
Şekil 5.77.	Durum 6 için DA/DA yükseltici giriş/çıkış akım gerilimleri .....	190
Şekil 5.78.	Durum 6 için DA/DA çift yönlü dönüştürücü giriş/çıkış akım gerilimleri.....	190
Şekil 5.79.	Durum 6 için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı .....	191
Şekil 5.80.	Durum 6 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları .....	192
Şekil 5.81.	Durum 6 için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu .....	192
Şekil 5.82.	Durum 6 için 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji tablosu .....	192
Şekil 5.83.	Durum 6 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği.....	192
Şekil 5.84.	Durum 6 için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu.....	193
Şekil 5.85.	Durum 6 için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti .....	193
Şekil 5.86.	Durum 7-8 için deneysel güç akış diyagramı .....	194
Şekil 5.87.	Durum 7-8 için ControlDesk şebeke, evirici, yük akım ekranı .....	195
Şekil 5.88.	Durum 7-8 için DA/DA çift yönlü dönüştürücü giriş/çıkış akım gerilimleri.....	195
Şekil 5.89.	Durum 7-8 için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı .....	196

Şekil 5.90.	Durum 7-8 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları.....	197
Şekil 5.91.	Durum 7-8 için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu.....	197
Şekil 5.92.	Durum 7-8 için 3 faz ve şebeke güç ve enerji tablosu .....	197
Şekil 5.93.	Durum 7-8 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği.....	197
Şekil 5.94.	Durum 7-8 için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu .....	198
Şekil 5.95.	Durum 7-8 için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti.....	198
Şekil 5.96.	Durum 9 için deneysel güç akış diyagramı.....	199
Şekil 5.97.	Durum 9 için ControlDesk şebeke, evirici, yük akım ekranı.....	200
Şekil 5.98.	Durum 9 için DA/DA çift yönlü dönüştürücü giriş/çıkış akım gerilimleri.....	201
Şekil 5.99.	Durum 9 için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı .....	201
Şekil 5.100.	Durum 9 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları .....	202
Şekil 5.101.	Durum 9 için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu .....	202
Şekil 5.102.	Durum 9 için 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji tablosu .....	203
Şekil 5.103.	Durum 9 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği .....	203
Şekil 5.104.	Durum 9 için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu.....	203
Şekil 5.105.	Durum 9 için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti .....	204
Şekil 5.106.	Durum 10 için deneysel güç akış diyagramı.....	204
Şekil 5.107.	Durum 10 için FV panel akım, gerilim güç değerleri.....	205
Şekil 5.108.	Durum 10 için ControlDesk şebeke, evirici, yük akım ekranı.....	205
Şekil 5.109.	Durum 10 için DA/DA yükseltici giriş/çıkış akım gerilimleri .....	206
Şekil 5.110.	Durum 10 için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı .....	207
Şekil 5.111.	Durum 10 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları .....	208
Şekil 5.112.	Durum 10 için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu .....	208
Şekil 5.113.	Durum 10 için 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji tablosu .....	208
Şekil 5.114.	Durum 10 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği.....	208
Şekil 5.115.	Durum 10 için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu.....	209
Şekil 5.116.	Durum 10 için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti .....	209
Şekil 5.117.	Ada modu çalışma durumunda güç akış diyagramı .....	210
Şekil 5.118.	Ada modunda FV panel akım, gerilim güç değerleri.....	210
Şekil 5.119.	Ada modunda DA/DA yükseltici giriş/çıkış akım gerilimleri .....	211
Şekil 5.120.	Ada modunda şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı .....	212
Şekil 5.121.	Ada modunda 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları .....	213
Şekil 5.122.	Ada modunda 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu .....	213
Şekil 5.123.	Ada modunda 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji tablosu .....	213
Şekil 5.124.	Ada modunda 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği.....	213
Şekil 5.125.	Ada modunda 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu .....	214
Şekil 5.126.	Ada modunda sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti.....	214
Şekil 5.127.	FV panellerin bulutlanma durumunda güç akış diyagramı .....	215
Şekil 5.128.	FV panellerin bulutlanma testi Chroma bulutlanma arayüz ekranı .....	216
Şekil 5.129.	FV panellerin bulutlanma durumunda şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı ve yakınlştırılmış sonuçlar .....	217
Şekil 5.130.	Durum 5'ten Durum 3'e geçiş durumunda güç akış diyagramı.....	218

Şekil 5.131. Durum 5'ten Durum 3'e geçiş durumunda DA/DA yükseltici giriş/çıkış akım gerilimleri.....	218
Şekil 5.132. Durum 5'ten Durum 3'e geçiş durumunda batarya gerilim, akım ve mod bilgisi.....	220
Şekil 5.133. Durum 5'ten Durum 3'e geçiş durumunda şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı .....	220
Şekil 5.134. Ani yük değişim durumunda güç akış diyagramı .....	222
Şekil 5.135. Ani yük değişim durumunda batarya ve ultrakapasitör akım, gerilimi.....	222
Şekil 5.136. Ani yük değişim durumunda evirici gerilimi, yük ve evirici akımı ve yakınlaştırılmış sonuçlar .....	224
Şekil 5.137. Durum 8'den Durum 7'ye geçiş durumunda güç akış diyagramı.....	225
Şekil 5.138. Durum 8'den Durum 7'ye geçiş durumunda şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı .....	225
Şekil 5.139. Çalışma durumlarında batarya grubunun güç ve SOC değerleri .....	227

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Konvansiyonel ve akıllı şebeke yapılarının karşılaştırılması .....	15
Tablo 2.1. Enerji depolama teknolojilerinin karşılaştırılması .....	42
Tablo 3.1. Simülasyonda kullanılan sistem parametreleri .....	57
Tablo 3.2. FV panel ideal faktör (F) değerleri .....	61
Tablo 3.3. DA/DA yükseltici dönüştürücü parametreleri .....	65
Tablo 3.4. DA/DA yükseltici dönüştürücü parametreleri .....	70
Tablo 4.1. Chroma FV Simülatör 62050H-600S teknik özellikleri .....	113
Tablo 4.2. Ultrakapasitörlerin teknik özellikleri .....	116
Tablo 4.3. Kademeli filtre bobin kombinasyon değerleri .....	127
Tablo 4.4. Doğrultucu yüklerin deneysel ölçüm değerleri .....	131
Tablo 4.5. 63108A yük modülünün teknik özellikleri .....	139
Tablo 5.1. HEDS’inde bulunan birimlerin güç ve durum değerleri .....	226

## SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

A	: Üstel gerilim, (V)
$A_{UK}$	: Elektrot ve elektrolit arasındaki yüzey alanı, ( $m^2$ )
B	: Üstel kapasite, ( $Ah$ ) <sup>-1</sup>
BAT_SSR	: Batarya katı hal rölesi
c	: Molar konsantrasyonu, $c = 0,86/(8NAr^3)$
$C_{BAT}$	: Bataryanın nominal kapasitesi, (Ah)
$C_f$	: Evirici filtre kondansatörü, ( $\mu F$ )
$C_{UK}$	: Ultrakapasitör nominal kapasitesi, (F)
E	: Yüksüz batarya gerilimi, (V)
$E_0$	: Sabit batarya gerilimi, (V)
f	: Şebeke frekansı, (Hz)
$f_p$	: Anahtarlama frekansı, (kHz)
F	: Faraday sabiti
$F_{FV}$	: Fotovoltaik hücrenin ideal faktörü
FV_SSR	: Fotovoltaik panel katı hal rölesi
$i_{eabcn}$	: Evirici a,b,c faz akımları, (A)
$i_{şabcn}$	: Şebeke a,b,c faz akımları, (A)
$i_{yabcn}$	: Yük a,b,c faz akımları, (A)
$I_{BAT}$	: Batarya akımı, (A)
$I_{BAT}^*$	: Referans batarya akımı, (A)
$I_{BAT\_C}^*$	: Referans batarya şarj akımı, (A)
$I_{BAT\_D}^*$	: Referans batarya deşarj akımı, (A)
$I_{BD}$	: DA/DA çift yönlü dönüştürücü akımı, (A)
$I_{BST}$	: DA/DA yükseltici akımı, (A)
$I_{UK}$	: Ultrakapasitör akımı, (A)
$I_{ç}$	: DA/DA yükseltici çıkış akımı, (A)
$I_d$	: Birleşimdeki (jonksiyon bölgesindeki) diyot akımı, (A)
$I_{FV}$	: Fotovoltaik panel akımı, (A)
$I_g$	: DA/DA yükseltici giriş akımı, (A)
$I_m$	: Fotovoltaik maksimum güç noktasındaki akımı, (A)
$I_o$	: Ters sızıntı akımı, (A)
$I_{o\alpha}$	: Fotovoltaik hücresinin ters doygunluk akımı, (A)
$I_p$	: Fotovoltaik panel paralel kol direncinden geçen akım, (A)
$I_{sc}$	: Fotovoltaik panel kısa devre akımı, (A)
K	: Boltzman sabiti, ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ j/K}^\circ$ )
$K_B$	: Polarizasyon gerilimi, (V)
$L_{BD}$	: DA/DA çift yönlü dönüştürücü bobini, (mH)
$L_f$	: Evirici filtre bobini, (mH)
$L_{FV}$	: DA/DA yükseltici bobini, (mH)
$L_{ş}$	: Şebeke endüktansı, (mH)
N	: Elektrot katman sayısı
$N_p$	: Paralel bağlı güneş hücre sayısı



$N_s$	: Seri bağı güneş hücre sayısı
$N_P$	: Paralel bağı ultrakapasitör sayısı
$N_S$	: Seri bağı ultrakapasitör sayısı
$P_{BAT}$	: Batarya grup gücü, (W)
$P_{BAT^*}$	: Referans batarya gücü, (W)
$P_{BD}$	: DA/DA çift yönlü dönüştürücü çıkış gücü, (W)
$P_{BST}$	: DA/DA yükseltici çıkış gücü, (W)
$P_{FV}$	: Fotovoltaik panel gücü, (W)
$P_{YÜK}$	: Yük grup gücü, (W)
$r$	: Moleküler yarıçapı
$R$	: İdeal gaz sabiti
$R_f$	: Evirici filtre direnci, ( $\Omega$ )
$R_p$	: Güneş hücresi paralel kol direnci, ( $\Omega$ )
$R_s$	: Güneş hücresi seri direnci, ( $\Omega$ )
$R_\$$	: Şebeke direnci, ( $\Omega$ )
$S_{1-8}$	: Evirici güç anahtarları
$S_{BD1-2}$	: DA/DA çift yönlü dönüştürücü güç anahtarları
$S_{FV}$	: DA/DA yükseltici güç anahtarı
$T_b$	: S anahtar kesim süresi, ( $\mu s$ )
$T_d$	: S anahtar iletim süresi, ( $\mu s$ )
$T_{FV}$	: Hücresinin mutlak sıcaklığı, ( $K^\circ$ )
$T_p$	: Çalışma periyodu, ( $\mu s$ )
$UK\_SSR$	: Ultrakapasitör katı hal rölesi
$V_{\$abcn}$	: Şebeke gerilimi, (V)
$V_{BAT}$	: Batarya grup gerilimi, (V)
$V_d$	: Diyot gerilimi, (V)
$V_{DA}$	: DA bara gerilimi, (V)
$V_{DA^*}$	: Referans DA bara gerilimi, (V)
$V_{FV}$	: Fotovoltaik panel gerilimi, (V)
$V_g$	: DA/DA yükseltici giriş gerilimi, (V)
$V_m$	: Fotovoltaik maksimum güç noktasındaki gerilim değeri, (V)
$V_{oc}$	: Fotovoltaik hücresinin açık devre gerilimi, (V)
$V_{UK}$	: Ultrakapasitör gerilimi, (V)
$q$	: Elektron yükü, ( $1,6 \cdot 10^{-19}$ )
$Q$	: Elektrik yükü, (C)
$Q_B$	: Batarya kapasitesi, (Ah)
$x_2$	: Helmholtz tabaka uzunluğu, (m)
$\alpha$	: Şarj transfer katsayısı
$\epsilon$	: Malzemenin geçirgenliği
$\epsilon_0$	: Boşluğun geçirgenliği
$\lambda$	: Doluluk oranı
$\Delta I_L$	: Endüktans akım dalgalanması, (A)

### Kısaltmalar

AA	: Alternatif Akım
ADC	: Analog to Digital Converter (Analog Sayısal Dönüştürücü)
AEYA	: Akıllı Enerji Yönetim Algoritması

AGM	: Absorption Glass Mat (Emme Gücü Olan Mikro Cam Elyaf Keçe)
A/D	: Analog/Dijital
BEDS	: Batarya Enerji Depolama Sistemi
DA	: Doğru Akım
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
FV	: Fotovoltaik
HEDS	: Hibrit Enerji Depolama Sistemi
LiCoO <sub>2</sub>	: Lityum-Kobalt Oksit
LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	: Lityum-Mangan Oksit
LiNiO <sub>2</sub>	: Lityum-Nikel Oksit
MGN	: Maksimum Güç Noktası
MGNİ	: Maksimum Güç Noktası İzleme
PCC	: Point of Common Coupling (Ortak Bağlantı Noktası)
PHED	: Pompalamalı Hidroelektrik ile Enerji Depolama
PLL	: Phase Locked Loop (Faz Kilitleme Döngüsü)
SHED	: Sıkıştırılmış Hava ile Enerji Depolama
SMED	: Süperiletken Manyetik Enerji Depolama
SOC	: State of Charge (Batarya Doluluk Durumu)
SSR	: Solid State Relay (Katı Hal Röle)
THB	: Toplam Harmonik Bozunumu
UK	: Ultrakapasitör Grubu
VEDS	: Volan Enerjisi Depolama Sistemi
VRLA	: Valve Regulated Lead Acid (Valf Ayarlı Kurşun Asit)
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları

# ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK TABANLI BATARYA VE ULTRAKAPASİTÖRLÜ HİBRİT SİSTEMİN AKILLI ENERJİ YÖNETİMİ

## ÖZET

Günümüzde, yenilenebilir enerji kaynakları elektrik şebekesini beslemede çok önemli bir rol oynamaktadır. Enerji depolamanın yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyonu, oldukça kesintili ve kararsız olan yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin daha fazla sevk edilebilir olmasını sağlayabilmektedir. Bu tez çalışmasında, şebeke bağlantılı 3 fazlı 4 telli elektrik güç sistemlerinde, ultrakapasitör ve bataryadan oluşan HEDS'in fotovoltaik kaynaklı yenilenebilir enerji üretim sistemine entegrasyonu amacıyla akıllı bir enerji kontrol yöntemi önerilmektedir.

Bu tezin amacı, kararsız ve değişken yapıya sahip YEK'dan üretilen elektrik güç sistemine HEDS entegrasyonu ve akıllı kontrolünü sağlayarak sürekli ve kaliteli elektrik enerjisi üretmektir. Tez çalışması kapsamında geliştirilen HEDS'nin olası çalışma durumları belirlenerek bu şartlarda sistemin kararlı çalışmasını sağlamak için özgün bir akıllı enerji yönetim algoritması gerçekleştirilmiştir. Akıllı enerji yönetim algoritması sayesinde sistemdeki bütün güçler değerlendirilerek istenilen çalışma durumları için bileşenlerin kontrolleri yapılmaktadır. Böylece batarya ve ultrakapasitör grubu DA barada dalgalanma olmadan eviricinin güç kalitesini artıracak şekilde kontrol edilmesini sağlamaktadır.

Geliştirilen HEDS, denetim ve anahtarlama algoritmaları Matlab/Simulink Simpower Systems yazılımları aracılığıyla tasarlanmakta ve benzetimi yapılmaktadır. 3 fazlı 4 telli şebeke bağlantılı HEDS'nin laboratuvar prototipi, uygulamanın test edilmesi amacıyla deneysel olarak kurulmuştur. HEDS, dSpace DS1103 denetleyici kartı ile sayısal olarak denetlenmekte, gerilim ve akım sensörleri ile ölçülerek Analog/Dijital (A/D) dönüştürücüler aracılığıyla denetleyici karta uygulanmaktadır. Matlab\Simulink'te geliştirilen gerçek zamanlı denetim algoritmaları Matlab Real Time Workshop ve dSpace Real-Time Interface yazılımları ile DS1103 denetleyici kartına doğrudan yüklenmektedir. Deneysel test çalışmaları doğrultusunda özgün olarak geliştirilen akıllı enerji yönetim algoritmasının dinamik davranışı ayrıntılı olarak incelenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** 3 fazlı 4 telli Şebeke, Akıllı Enerji Yönetim, Akıllı Mikro Şebeke, Batarya ve Ultrakapasitör, Hibrit Enerji Depolama.

# **SMART ENERGY MANAGEMENT OF GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC BASED HYBRID SYSTEM INCLUDING BATTERY AND ULTRACAPACITOR**

## **ABSTRACT**

Nowadays renewable energy sources are becoming an important part of energy supply to the power grid. Integrating energy storage with renewable energy sources can make these intermittent renewable energy sources more dispatchable. In this thesis, a new smart energy management algorithm for integrating photovoltaic based renewable energy source with energy storage for 3 phase 4 wire grid connected electrical power systems was proposed for this purpose.

Main aim of this thesis is integration and smart control of Hybrid Energy Storage System (HESS) to the renewable energy sources that produce unstable and variable electric power, and provide continuous and high quality electric power to the grid. Smart energy control algorithm originally developed in this thesis determines possible working conditions and controls the HESS in a stable way. The smart energy control algorithm decides which component working conditions by using measurement power of the all components including load, battery and photovoltaic. Thus, battery and ultracapacitor provide power to the inverter increasing the power quality without any fluctuation in the common DC bus.

Developed HESS, control and switching algorithms are designed and simulated in Matlab/Simulink Simpower Systems software. 3 phase 4 wire grid connected HESS prototype is experimentally tested in test bench developed in this project. HESS is controlled digitally with dSpace DS1103 controller board via voltage and current measurements with analog digital converters. Real time control algorithms developed in Matlab/Simulink is loaded to DS1103 controller card by using Matlab Real Time Workshop and dSpace Real-Time Interface software. Hence developed control algorithms are easily and very fast applied and validated in experimental set-up. Experimental test operation in accordance with developed as unique is analyzed smart energy management algorithm dynamic behavior in detail.

**Keywords:** 3 Phase 4 Wire Grid, Smart Energy Management, Smart Micro Grid, Battery and Ultracapacitor, Hybrid Energy Storage.

## **GİRİŞ**

Yüzyıldan uzun bir süredir elektrik enerjisi büyük miktarlarda fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Ancak fosil yakıtlar sonsuz bir kaynak olmadığından, dünyanın rezervleri hakkında kesin bir bilgiye sahip olunamadığından ve en önemlisi fosil yakıtların karbon emisyonunun dünyanın dengesini bozacak kadar tehlikeli boyutlara varmasından dolayı Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK) arayışları başlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynağı dendiğinde ilk sıralarda hidrolik kaynaklar gelmektedir. Ancak hidroelektrik santraller sadece doğal yapının izin verdiği yerlerde uygulanabilmektedir. Uzun zamandır bilinmelerine rağmen son yıllarda iki önemli yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgar ve güneş enerjisini kullanmak için yapılan çalışmalar hızlandırılmış ve bu konuda büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Fosil yakıtlar dünya rezervleri ile sınırlı olmasına rağmen kaynağı güneş olan rüzgâr ve güneş enerjisi sürdürülebilirlik bakımından eşsizdir. Son yıllarda rüzgâr ve güneş enerjisinden elektrik üretimi yapılan tarlalar hızla artmakta ve özellikle Avrupa ülkelerinde kayda değer oranlarda şebekenin yükünü üstlenmektedir. Ancak her enerji kaynağında olduğu gibi rüzgâr ve güneş enerjisinin de bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunların başında ilk kurulum maliyeti ve enerji arzlarının güvenilir olmaması gelmektedir.

YEK, fosil yakıtlara alternatif bir kaynak olarak sunulmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en yaygın olarak kullanılan sistemler, güneş ve rüzgâr kaynaklı sistemlerdir. Bu yenilenebilir enerji kaynakları çevre dostu ve sürdürülebilir bir yapıya sahip olduklarından kullanım oranı giderek artmaktadır. Güneşin en parlak olduğu durumda Fotovoltaik (FV) sistemler kararlı bir şekilde elektrik enerjisi üretirken, bulutlu ve akşam saatlerinde elektrik üretimi durmaktadır. Rüzgâr enerji sistemleri de aynı şekilde rüzgâr hızına bağlı olarak üretim gerçekleştirmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının bu kararsız ve kesintili yapısı enerjinin sürekliliği konusunda önemli problemler ortaya çıkarmaktadır. Böylece YEK'dan üretilen enerji, genel enerji talebi ile örtüşmemektedir.

Bundan dolayı kullanıcılar tarafından enerjinin talep edilmediği ve YEK'dan üretilen tepe enerji miktarının çok olduğu durumda enerji depolama sistemlerinin önemi ortaya çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji sistemleri depolama birimleri ile birlikte kullanılırsa, üretilen enerji depolanarak kullanıcılar için enerjinin sürekliliği sağlanmış olmaktadır. Böylelikle enerji depolama sistemleri kullanılarak YEK'na bağlı yük talebi sürekli olarak karşılanabilmektedir.

Enerji depolama uygulamaları elektrik şebekeleri için farklı tipte faydalar sağlayabilmektedir. Büyük ölçekli enerji depolama uygulamaları günümüz elektrik şebekeleri için çok daha verimli bir işletme sağlanmasına imkân vermektedir. Daha verimli bir sistem, maliyetlerin düşmesi anlamına gelir ve daha güvenilir ve çevreci bir sistem sağlanmış olur. Geleneksel enerji kaynakları; kömür veya doğalgaz santralleri gibi, yük talebinin tepe değerleri için devreye alınıp çıkarılmakta ve neredeyse hiçbir zaman tam kapasitede çalıştırılmamaktadırlar. Bunun anlamı yatırım aşamasında gereğinden büyük boyutlandırma ile enerji maliyetlerinin artışı ve daha fazla kirlenici etki yaratılması anlamına gelir. Ayrıca bu tip santrallerin yavaş devreye girme karakteri ani yükselen talep değerlerinin karşılanmasına tam olarak cevap verememekte ve ufak çaplı kesintilere veya güç kalitesi problemlerine neden olabilmektedir. YEK enerji depolamada, anahtar eleman olmaktadır. Sıklıkla YEK'ları kesintili ve sürekli değişken güç karakterine sahiptir. Ayrıca geleneksel enerji santralleri gibi istenilen zamanda ulaşılabilir değildirler, akşam saatlerinde güneş enerjisi ulaşılabilir değildir veya rüzgâr esmeyen bir gün rüzgâr santralinden güç elde edilemez ancak geleneksel santraller istenilen zamanda devreye alınıp çıkarılabilmektedir. Bu özellik sevkedilebilirlik (dispatchable) olarak adlandırılmaktadır. Enerji depolama uygulamaları ile YEK'lerden elde edilen enerji depolanarak ihtiyaç duyulan zamanda kullanıma sunulabilir böylece YEK'lere sevkedilebilirlik kazandırılmış olur. Ayrıca depolama uygulamaları ile frekans regülasyonu gerçekleştirilerek güç kalitesi iyileştirilmesi de sağlanabilmektedir. Elektrik dağıtım şirketleri, enerji depolama uygulamaları ile elektrik tarifesindeki farklılardan yararlanarak elektriğin ucuz olduğu zamanlarda depolanmasını ve kritik yüklerin ihtiyaç duyulduğunda buradan beslenmesini sağlayabilirler [1-6].

Hibrit Enerji Depolama Sistemlerinin (HEDS) amacı farklı depolama teknolojilerinin avantajlarını birleştirmektir. Batarya ve ultrakapasitör kullanılan hibrit enerji

depolama sisteminde, bataryanın enerji yoğunluğu, ultrakapasitörün ise güç yoğunluğu bakımından sağladığı avantajlardan faydalanılmaktadır. Anlık yüksek güç ihtiyacının olduğu sürede yükün gereksinim duyduğu akımı karşılamada batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji depolama sisteminin kullanılması önem arz etmektedir. Bu özelliği ile ultrakapasitör, aşırı akım çeken yüklerin devreye girmesi ile yaşanan gerilim düşümlerinin ortadan kaldırılmasında etkili olmaktadır. Tez çalışmasında da batarya ve ultrakapasitör grubundan oluşan bir HEDS tasarlanarak deneysel sonuçları incelenmektedir. Fotovoltaik kaynaktan beslenen 3-fazlı 4-telli akıllı şebeke yapısının batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji depolama sistemi ile desteklenmesi ve geliştirilen özgün Akıllı Enerji Yönetim Algoritmasıyla (AEYA) oluşturulan sistemin dinamik davranışlarını her çalışma şartında kontrol etmesi çalışmanın ana konusudur. Böylelikle, fotovoltaik kaynak ile hibrit enerji depolama biriminin birleşimi ve geliştirilen AEYA ile sistem kontrolü akılcı bir şekilde yönetilerek enerjinin sürekliliği ve kaliteli üretimi sağlanmaktadır.

#### Literatür özeti:

Tüm dünyada birçok ülke geleceğe yönelik enerji planlamalarında büyük ölçekli enerji depolama birimlerine yer vermektedir. Bu konuda yakın dönemli enerji depolama yüzdesi hedefi olarak Japonya %15, Almanya %10 ABD ise %2 olarak belirlemiştir. Güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının, maliyetlerinin dışındaki en önemli dezavantajı ürettikleri enerjinin kesintili, değişken ve kararsız olmasıdır. Kesintili olma aralığı, saniyelerden dakikalara kadar süren hızlı değişimlerden, gün ışığı süresi ve mevsimsel değişimlere kadar uzun süreli değişimlerdir. Gerilim dalgalanmaları ve çökmeleri, sistem frekans değişimleri gibi kararsızlıklara yol açabildiği için özellikle kısa ve orta düzeyli güç değişimleri, sistem operatörlerinin en önemli kaygılarından biridir. YEK'nın kararsızlık probleminin en yaygın çözümü, rüzgârın bir bölgede sürekli estiği ve güneşin bir bölgede sürekli parladığı teorisinden yola çıkarak bu tür kaynakların coğrafi olarak farklı bölgelere dağılımıdır. Aslında bu tür kaynakların çok geniş bir alana dağılımı, yenilenebilir enerji kaynaklarının kararsızlık probleminin bir çözümü olmadığı sadece elektrik şebekesine olan olumsuz etkilerini azaltabileceği oldukça açıktır. YEK'lerin kararsızlık probleminin en önemli çözümü ise enerji depolamadır. Enerji depolama, kontrollü bir şekilde güç alış verişini yapabilir böylece güç yönetiminde

büyük bir esneklik sağlayarak ayrı bir aktif ve reaktif güç kaynağı gibi davranabilir. Bu esneklik enerji depolama sistemlerinden, güç kalitesi, gerilim ve frekans regülasyonu ve YEK desteği ile yük seviyelendirme gibi yardımcı hizmetlere destek sunmaya olanak sağlar. Enerji depolamanın en önemli dezavantajı ise %85 dolayında olan bir toplam alıp verme verimi sağlayabilmesidir. Enerji depolama sistemleri, tek başına güç üretmeyip diğer kaynaklardan güç aldıkları için etkin olarak toplam kazancı bir miktar düşürmektedir. YEK'lerde olduğu gibi yeni teknolojik gelişmelerle birlikte performansı artan enerji depolama sistemleri literatürde oldukça ilgi çekmektedir. Son yıllarda elektrik şebekesinde enerji depolama uygulamalarıyla ilgili çok sayıda lisansüstü teze ve bilimsel çalışmaya rastlanmaktadır. Batarya temelli enerji depolama uygulamaları son yıllarda oldukça ilgi görmektedir. Lityum iyon, sodyum sülfür ve vanadyum redox gibi yeni teknolojiler ile batarya verimleri oldukça gelişmiştir. Özellikle maliyetleri çok yüksek olan lityum iyon tipi bataryaların şarj deşarj verimi neredeyse %100'e ulaşmıştır. Bataryalar, herhangi bir noktada uygulanabilen, saatlerce yüksek miktarda güç sağlayabilen, modüler çözümler sunmaktadır. Ayrıca bataryalar, içinde oluşan elektro-kimyasal reaksiyon, cevap hızı ve güç miktarını sınırlasa da oldukça hızlı cevap verebilirler. Ancak bataryalar enerjiyi Doğru Akım (DA) olarak depoladığı için Alternatif Akım (AA) elektrik şebekesine bağlanabilmesi için güç elektroniği ekipmanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, enerji dönüşümü nedeniyle oluşan kayıplar sonucu verimlerinin düşmesine neden olmaktadır. Ultrakapasitör ise içinde herhangi bir hareketli parçasının ve kimyasal bir reaksiyonun olmaması nedeniyle uzun ömürlü ve bakım maliyetleri düşük oldukça verimli ve dayanıklı enerji depolama çözümüdür. Ayrıca kurşun asit bataryalar ile karşılaştırıldığında enerji yoğunluğu düşük, maliyetleri yüksek fakat özellikle kısa süreli yüksek güçlü uygulamalarda dayanıklı olmaları ve cevap sürelerinin kısa olması ultrakapasitörleri, düşük enerji ve yüksek güçlü uygulamalarda oldukça rekabetçi kılmaktadır.

Mikro şebeke uygulamaları ve yenilenebilir enerji kaynaklarından güç üretiminin yaygınlaşmasıyla birlikte artan güç talebini karşılamak için enerji verimliliğinin yanında gerekli enerji tamponu olarak görev yapacak sistemler ve verimli enerji depolama sistemleri oldukça önem kazanmıştır. Günümüzde su pompalama, bataryalar, sıkıştırılmış hava, volanlar, ultrakapasitörler gibi bir çok enerji depolama



teknolojileri şebekeyi kontrol etmek için kullanılmaktadır [7-13]. Enerji depolama sistemleri, net yük değişimlerini izlemek, gerilim ve frekansı sabitlemek, tepe yükleri karşılamak, güç kalitesini iyileştirmek, yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş, rüzgâr vb.) entegrasyonunu kesin bir şekilde desteklemek amacıyla ve elektrikli araçlarda kullanılmaktadır [14-17].

Dağıtık üretimde güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye bağlantısı günümüzde oldukça önem kazanmıştır. Mikro şebekelerde dağıtık üretimlerin hızlı bir şekilde artması kurulu üretim kapasitesinin yüzdesinde artışa neden olmuştur. Fakat, bu enerji kaynaklarının dalgalı ve kesintili doğası, elektrik şebekesinin çalışması ve kararlılığını önemli şekilde etkileyen güç akışında dalgalanmalara neden olmaktadır [18-21]. Bu problemleri çözmek için, süper iletken manyetik enerji depolama, ultrakapasitör enerji depolama, volan enerji depolama gibi gelişmiş teknoloji temelli kısa süreli dağıtık enerji depolama sistemleri mikro şebekede şebeke ve yük arasındaki anlık karşılaştırmayı dengelemek için alternatif potansiyel çözümler olarak bulunmaktadır [22-26].

Birden fazla enerji depolama sistemi birbirini tamamlayıcı performans özellikleri ile birlikte kullanıldığında ortaya çıkan sistem bir hibrit enerji depolama sistemi olmaktadır. Bataryalar maliyet bakımından en uygun enerji depolama teknolojilerinden biridir. Ancak bataryaların anlık güç dalgalanmalarını karşılamak amacıyla enerji tamponu olarak kullanılması mümkün olmasa da, bu durumda kullanım ömründe ciddi oranda azalma olmaktadır. Bir ultrakapasitörde enerjinin depolanması, bataryadaki gibi bir elektrokimyasal süreç yerine statik yüklenme ile yapıldığından bataryaya göre daha yüksek güç yoğunluğuna sahiptir. Bu yüzden daha iyi güç ve enerji performansı sağlamak için bu iki depolama cihazını birleştirmek oldukça avantajlı olmaktadır. Batarya ve ultrakapasitör, akım veya gücün uygun şekilde ikisi arasında paylaşılması ile aynı anda şarj veya deşarj olabilirler. Batarya şarj veya deşarj modlarının ikisinde de baskın olabilir. Hibrit enerji depolama sisteminde iki depolama elemanı arasında güç paylaşımı için farklı kontrol yöntemleri geliştirilmiştir [27-30]. Literatürde, güç akışının düzenlenmesi, batarya ömrünü uzatırken enerji verimliliği ve performans iyileştirmesi için tasarlanmış kontrol yöntemleri bulunmaktadır [31-35].

Geleneksel enerji kaynaklarının tükenmesi ve yenilenebilir enerji teknolojisindeki hızlı gelişim dolayısıyla, dağıtık üretim kavramı toplumun sürdürülebilir gelişimi için en önemli seçeneklerinden biri olarak giderek daha fazla ilgi çekici hale gelmektedir. Dağıtık üretim teknolojisi farklı şartlara esneklik gösterir ve çevre dostudur, ancak güç dalgalılığı ve düşük güç kalitesi gibi bazı dezavantajları vardır. Bu problemleri çözmek için ise mikro şebeke kavramı ortaya çıkmıştır ve bu konuda çalışmalar yapılmaktadır. Genel olarak bir mikro şebeke; dağıtık enerji kaynakları, depolama cihazları, güç dönüştürücüleri, yükler ve koruma cihazları bağlı olan bir alçak gerilim dağıtım şebekesi olarak tanımlanabilir. Bir mikro şebeke için enerji depolama sistemi çok önemlidir. Bu sistemdeki yükün doğru çalışmasının sağlanması sistemin güç kalitesini yükseltebilir.

Aynı zamanda enerji depolama uygulamaları ile gücü hava şartlarına bağlı değişen rüzgâr türbinleri ve yalnız gündüz çalışabilen ve hava şartlarına göre değişen güneş enerji sistemleri gibi yenilenebilir enerji sistemlerinden kaynaklanan güç değerlerindeki değişimler ile başa çıkılabilir [36].

Yenilenebilir enerji temelli mikro şebekeler yenilenebilir kaynaklardan faydalanmak ve fosil yakıt tüketiminin azaltılması için iyi bir yoldur. Enerji depolama uygulamalarının kullanımı, yüklere kaliteli güç sağlanması için mikro şebekelerin kullanılmasıyla zorunlu hale gelmektedir. Mikro şebekelerde; şebeke bağlantılı ve ada modu olarak iki işletme modu bulunmaktadır. Ada modunda işletme süresince enerji depolama biriminin temel sorumluluğu enerji dengesinin sağlanmasıdır. Şebeke bağlantılı modda ise yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili ve yük dalgalanmasının şebekeyi etkilemesinin önlenmesidir. Tek tip bir enerji depolama sistemi ile yenilenebilir güç kullanan mikro şebekede bu işlevlerin tümü etkili ve verimli bir şekilde gerçekleştirilemez. Fotovoltaik gibi kesintili yapıdaki yenilenebilir enerji kaynakları, yüksek enerji yoğunluklu enerji depolama kullanımı gerektirir. Aynı zamanda yükteki hızlı değişimler yüksek güç yoğunluklu enerji depolama kullanımını gerektirir. Batarya ve ultrakapasitör yüksek enerji ve yüksek güç yoğunluğuna sahip bir hibrit enerji depolama sistemi olarak tasarlanmıştır ve bu birleşim mikro şebeke uygulamaları için birleşik enerji depolama sistemlerinin gerçekleştirilmesinde oldukça gelecek vadeden bir seçenektir [37-40].

Batarya ve ultrakapasitörden oluşan HEDS, şebekeye bağlı veya bağımsız yenilenebilir enerji sisteminde sistem kararlılığını artırmak üzere ortaya konmuştur. Bazı kontrol stratejileri batarya ultrakapasitör sisteminde batarya ömrünü uzatmak için batarya yükünü hafifletmeyi ve bataryanın şarj/deşarj periyodunu düşürmeyi amaçlamaktadır [41, 42].

Tüm bağımsız çalışan dağıtılmış enerji üretim sistemleri, hazır bulunan ve ihtiyaç duyulan enerji talebi arasındaki uyumsuzlukları gidermek için bir enerji tamponuna ihtiyaç duyarlar. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip kurşun-asit batarya en popüler enerji depolama elemanlarından biridir. HEDS sayesinde bataryanın yüksek enerji yoğunluklu ve ultrakapasitörün yüksek güç yoğunluklu karakteristikleri birleştirilerek ultrakapasitörün uzun çevrim ömrünün en iyi kullanımını mümkün kılınmıştır. Ayrıca, üretilen ve yük gücünün hızlı değişimlerinde bataryanın şarj/deşarj frekansı azaltıldığı için batarya ömrü uzatılabilir [43, 44]. Ultrakapasitör ve batarya bileşiminin tamamlayıcı teknik karakteristiklerine bağlı olarak her iki bileşenin kusurlarının azaltılması ve HEDS performansının en iyi hale getirilmesinde ultrakapasitör ve batarya bileşiminin kullanılması son zamanlarda büyük ilgi görmektedir. Ultrakapasitör ve batarya hibrit sistemi, uygun enerji yönetimi sayesinde uzun çevrim ömrü ile yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek güç yoğunluğu gibi üstünlüklere sahiptir [45-47]. Batarya ve ultrakapasitör temelli HEDS'ler, gelişmiş güç ve enerji performanslarına bağlı olarak yenilenebilir enerji sektöründe popüler hale gelmektedirler. Bu hibrit sistemlerde bunların şebeke bağlantılı eviricinin DA barasına bağlanması için ayrı ayrı DA/DA dönüştürücülere veya ultrakapasitör bankası için en az bir DA/DA dönüştürücüye gereksinim vardır. Bu geleneksel DA/DA dönüştürücüler güç kayıplarını, karmaşıklığı ve maliyeti artırır [48, 49].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının hızla yaygınlaşması, mevcut elektrik şebekesi için kararlılık, güvenilirlik ve güç kalitesi problemlerine neden olabilmektedir. Mikro şebeke, bu sorunların çözümünde uygun alternatif olmaktadır. Gerçekte elektrik şebekesi zayıf olduğundan mikro şebeke tüm değişkenliğe karşı çok hassas olur ve bu etkileri azaltmak için ise enerji depolama sistemi gerektirir. Bir mikro şebekede enerji depolama sistemi hem yüksek güç yoğunluğu hem de yüksek enerji yoğunluğu özelliklerine sahip olmalıdır ancak hiçbir depolama elemanı bu özellikleri bir arada

bulundurmaz. Dolayısıyla bu ihtiyacı karşılamak için ancak farklı özellikte birden fazla enerji depolama cihazı ile hibrit enerji depolama sistemi oluşturulur [50, 51].

Bir enerji depolama cihazında yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek güç yoğunluğuna, demiryolu istasyonları, rüzgâr veya güneş santralleri gibi dağıtık üretim birimlerinin sebep olduğu dalgalılığın kompanzasyonu için ihtiyaç duyulur. Çünkü dalgalanan güç, elektrik güç sisteminin gerilim ve/veya frekansının bozulmasına sebep olabilir. Süper iletken manyetik enerji depolama enerjisiyi magnetik olarak depolar ve dolayısıyla depolanan enerji çok hızlı şarj ve deşarj edilebilir ve yüksek değerlerde güç çekilebilir. Ancak süper iletken manyetik enerji depolamanın enerji yoğunluğu, ikincil batarya ve volan gibi diğer depolama cihazları kadar yüksek değildir [52, 53].

Gelişen hidrojen teknolojileri ile geleneksel bataryaların bağlanması bir hibrit sistem meydana getirir. Hidrojen enerji depolama sistemi; bir elektrolizör, hidrojen deposu ve bir yakıt hücresi içerir. Hidrojen enerji depolama sistemi, yüksek verimli, pahalı enerji depolama cihazları (bataryalar) ile birleştirildiğinde kısa süreli depolama için; daha düşük verimli, daha yüksek enerji depolayabilen, daha az pahalı olan (hidrojen) uzun süreli depolamalara göre en az maliyetli tasarım olduğu görülmüştür [54, 55].

Güneş enerjisi, güvenli ve sürdürülebilir çevre sağlaması bakımından gelecek vadede bir teknolojidir. Ancak güneş enerjisinin kesintili ve fotovoltaik hücrelerin ise doğrusal olmayan karakterlere sahip olması gibi dezavantajları vardır. Bir çözüm olarak bataryaların kullanılması, özellikle tepe yük akımlarının karşılanmasında büyük boyutlu bir tasarım gerektirir, bu da maliyet ve sistem boyutlarını artırmaktadır. Diğer dezavantajları ise bataryaların kısa çevrim ömürleri, kimyasal reaksiyonların ilerleyen zamanla bozulması/performansın düşmesi ve düşük sıcaklık şartlarında kötü performans göstermeleridir. Bu dezavantajların aşılmasında ultrakapasitörler uzun çevrim ömürleri ve büyük kapasiteleri ile önemli paya sahiptir [56-58].

Uzak bölgelerde şebekeden bağımsız çalışan fotovoltaik sistemler en yaygın sistemlerdir. Böyle tipik bir bağımsız enerji sistemi, fotovoltaik paneller, regülatör, enerji depolama cihazı ve yüklerden oluşur. Düşük fiyatı ve geniş uygulama alanı sayesinde bu tip sistemlerde en sık kullanılan depolama cihazı valf ayarlı kurşun asit bataryalardır. Batarya şarjı için fotovoltaik panellerin çıkışı hava şartlarına bağlı

değiştirdiğinden optimum şarj/deşarj döngüsü garanti edilemez ve sonuçta düşük şarj durumu oluşabilir. Batarya ve ultrakapasitör hibrit sisteminden faydalanarak hem batarya boyutlar düşürülebilir hem de daha yüksek şarj durumu sağlanabilir. Ultrakapasitör bataryaya göre çok daha yüksek güç yoğunluğuna sahip olduğundan daha kısa zaman periyodunda çok daha yüksek güç desteği sağlayabilir. Buna karşın batarya daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir, ultrakapasitör ile karşılaştırıldığında daha yüksek enerji depolayabilir ve daha uzun süre enerji sağlayabilir. Hibrit sistemde tepe güç ihtiyacı ultrakapasitörlerden karşılanır ve valf ayarlı kurşun asit bataryalar daha uzun süreli/sürekli, daha düşük güç ihtiyacını karşılar [59-61]. Hibrit enerji depolama sisteminde valf ayarlı kurşun asit bataryalar ve ultrakapasitörlerin birlikte kullanımı tüm sistemin güç yoğunluğunu yükseltir. Batarya bankası yüke bataryanındeşarj değerlerine bağlı olan kapasitesi ile kimyasal reaksiyonlarla güç sağlar. Hibrit sistemdeki ultrakapasitör tepe gücü sağlarken, bataryadaki gerilim düşümü etkisini hafifletir, yükün daha uzun süre için korunmasını ve beslenmesini sağlar [62-64].

Yakıt hücreleri bir elektrolizör, bir komprasör ve bir hidrojen tankı birleşimi ile hidrojen enerjisinin üretim, depolama ve dönüştürmesini barındıran yeni bir enerji depolama yöntemidir. Ayrıca batarya ve hidrojen sisteminin birleşimi ile oluşturulan hibrit depolama sistemleri fotovoltaik enerji santralleri için farklı bir depolama seçeneği olmaktadır [65]. Çift taraflı/ters çevrilebilir yakıt hücreleri, batarya ile birlikte hibrit sistem tasarımında güneş enerjisi uygulamaları için yeni bir enerji depolama cihazıdır [66, 67].

Küresel ısınmaya karşı yenilenebilir enerji üretimi, özellikle rüzgâr santrallerinin güç kapasitesi, son yıllarda giderek artmıştır. Rüzgâr gücünün tamamen rüzgâr hızına bağlı olmasından dolayı çıkış gücü kontrol edilemez. Kontrol edilemeyen doğrusal olmayan çıkış karakteristiğinin sebep olduğu güç değerlerindeki dalgalanmalar yerel olarak gerilim sorunlarına sebep olurken tüm sistemde ise frekans problemlerine yol açar. Rüzgâr gücü sistemindeki enerji depolama sistemi yük ve generatör tarafındaki güç farklarını ayarlamalı ve dengelemelidir. Tek depolama elemanı ile bu amaç tam anlamıyla gerçekleştirilemez. Bu yüzden iki farklı özellikte depolama cihazı kullanılarak hibrit enerji depolama sistemi oluşturulur ve böylece tek depolama elemanına göre daha üstün performans sağlanır[68, 69]. Rüzgâr enerjisi güç

sistemlerinin çıkışındaki dalgalılık, güç kalitesine büyük etki yapabilmektedir. Bunun sonucu olarak, rüzgârın kontrol edilemeyen ve kestirilemeyen karakteri açısından hibrit enerji depolama sistemi temelli (batarya ve ultrakapasitör teknolojilerinin birleşimi ile oluşturulmuş) güç düzgünleştirme ve optimize edilmiş kapasite paylaşırma metotları geliştirilmiştir [70]. Ayrıca, bu problemleri çözmek için büyük kapasiteli batarya enerji depolama sistemi ve yüksek hızlı süper iletkenli volan enerji depolama sistemi birlikte kullanılabilir [71, 72].

Enerji depolama sistemleri elektrikli, hibrit elektrikli, prize takılabilir hibrit elektrikli taşıtlar için kritik öneme sahiptir. Tüm enerji depolama sistemlerinden en geniş kullanımı olan bataryalardır. Batarya temelli enerji depolama sisteminde batarya güç yoğunluğu tepe güç talebini karşılayacak yeterlilikte olmalıdır. Yüksek güç yoğunluklu bataryalar bulunmasına rağmen bunlar genellikle daha düşük güç yoğunluklu emsallerine/diğer depolama cihazlarına göre çok daha yüksek fiyatlıdır. Bu sorunun çözümü batarya boyutunu büyütmektir. Bu da maliyeti artırır. Ayrıca ısı yönetim de bataryalar için yüksek güçlü yük altında işletme durumunda güvenli çalışma açısından zorluklar oluşturur. Yalnız soğutma değil ayrıca çok soğuk şartlarda ısıtma da istenen güç değerlerinin sağlanması açısından karşılaşılan güçlüklerdendir. Bu problemlerin çözümü için hibrit enerji depolama sistemleri kullanılır. Hibrit enerji depolamada daha üstün performans için ultrakapasitör ve bataryalar birleştirilebilir. Bunun nedeni ultrakapasitörün bataryaya göre daha yüksek güç yoğunluğuna sahip olması ama daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olmasıdır. Bu birleşim iki farklı depolama elemanı ile ayrı ayrı kıyaslandığında daha iyi performans sunar [73-75].

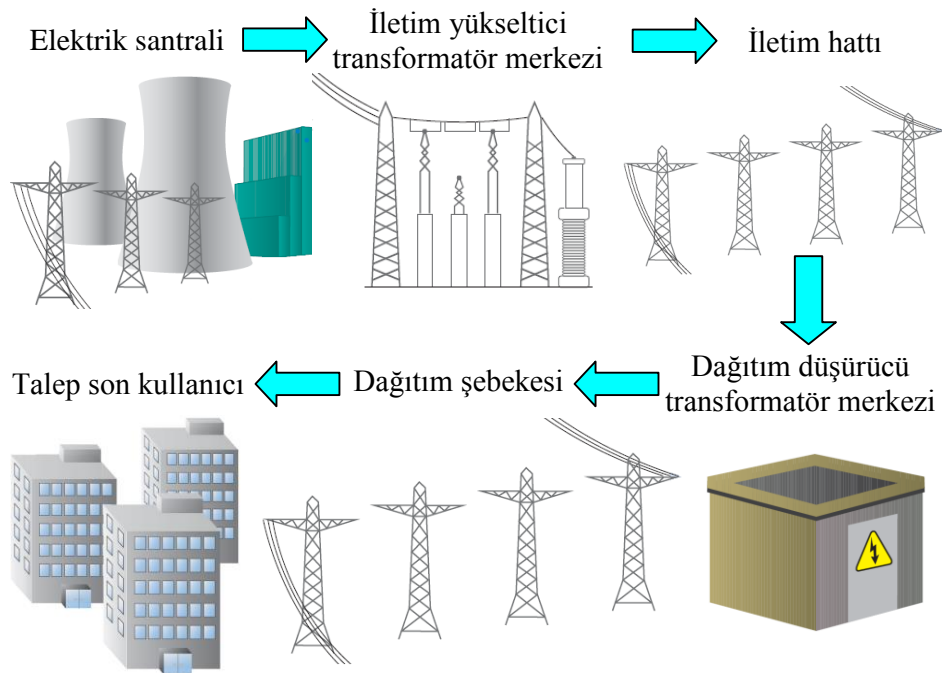
Hibrit elektrikli araçlar elektrik gücünden mekanik motorlarda olduğu şekilde faydalanmaktadır. Dolayısıyla hibrit elektrikli araçların performansı doğrudan enerji depolama sisteminin karakteristiğine bağlıdır. Elektrikli araçlarda genellikle yüksek güç performansı, uzun çevrim ömrü ve güvenilirlik, verimlilik kadar önemli gerekliliklerdir. Hibrit enerji depolama sistemi farklı depolama birimlerini birleştirerek maliyet ve performans koşullarını en iyi hale getirir [76]. Elektrikli araçlar gibi çekme uygulamalarında enerji depolama temel zorluktur. Yüksek güç ve enerji yoğunluğuna sahip, hacimsel ve boyut olarak küçük, uzun ömürlü, düşük maliyetli bir enerji depolama elemanı kullanılması gerekmektedir. Bu doğrultuda

ultrakapasitör ve batarya birleşiminden meydana gelen hibrit enerji depolama sisteminin kullanılması iyi bir çözüm olarak görülmektedir [77-79].

Hibrit elektrikli araç, prize takılabilen hibrit elektrikli araç ve elektrikli araçlar için enerji depolama sistemleri; yeterli kalitede/şartlarda enerji depolayabilecek ve gerekli ivmelenme performansı sağlamaya uygun/yeterli tepe gücü sağlayabilecek şekilde boyutlandırılmalı, tasarlanmalıdır. Bu konuda dünya genelinde araştırmalar temel olarak ultrakapasitör ve batarya veya yakıt hücresi ve ultrakapasitör içeren hibrit enerji depolama sistemlerinde yoğunlaşmıştır [80, 81]. Aktif batarya ultrakapasitör hibrit enerji depolama sistemi, verimli güç kontrol yönetimi ve kontrol esnekliği ile birlikte daha iyi bir çözüm sağlar. Ayrıca, batarya grubunun gerilimi ultrakapasitörünkinden farklı seçilmesiyle batarya grubunda boyutlandırma ve maliyet düşürme gibi esneklik sağlanabilir. Batarya ani değişimleri ve tepe güç sağlamasını üstlenmez, batarya üzerindeki zorlama azalır ve batarya ömrü artar [82-85]. Ülkemizde ise enerji depolamanın önemi, amacı ve faydaları, yöntemleri, batarya ve ultrakapasitörler ile elektrik enerji depolama hakkında bilgi verilen ve depolama sistemlerinin karşılaştırılması yapılan çalışmalar [86-88], elektrikli araçlar için kullanılan enerji depolama teknolojileri incelenen makale ve bildirimler [89-91], lisansüstü tezler [92-95] ve proje [96] bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında 3 fazlı 4 telli akıllı mikro şebeke uygulamaları için fotovoltaik kaynaktan beslenen batarya ve ultrakapasitör kullanılarak oluşturulmuş hibrit enerji depolama sistemi geliştirilmektedir.

## 1. AKILLI, MİKRO VE DAĞITIK ŞEBEKELER

Elektrik enerjisi 19. yüzyılın sonlarında kullanılabilir formda ortaya konulduğunda, sadece tüketicilere hizmet sağlayan bölgesel santraller şeklindeydi. Güç tüketimi ve üretimi belli bölgelerde olmakla birlikte uzun mesafeli iletim söz konusu değildi. Talep ihtiyacı arttıkça buna bağlı olarak dağıtım ağı hattı da giderek artmıştır. Sistemler öncelikle birbirinden izole edilmiş ve tek bir noktadan birbirlerine bağlanmıştır. Şekil 1.1’de konvansiyonel elektrik şebekesinin temel işletim yapısı görülmektedir. Büyük güç santrallerinde elektrik üretilmekte ve elektriği uzak mesafelere taşımak için yükseltici transformatörler yardımıyla iletim hattına aktarmaktadır. İletim hatlarındaki elektrik enerjisi, dağıtıcı düşürücü transformatörler ile dağıtım hattındaki gerilim seviyesine indirilerek son kullanıcılara iletmektedir. Şebekenin temel işletim yapısı genel anlamda uzun yıllardır aynı kalırken planlaması ve işletimi için kullanılan uygulama yapıları zamanla değişmiştir. Konvansiyonel elektrik şebekesinde talep edilen enerji miktarı dikkate alınarak güç santrallerinin devreye girip çıkmasıyla elektrik enerjisinin üretiminin kontrolü sağlanmaktadır.



Şekil 1.1. Konvansiyonel elektrik şebeke iletim yapısı



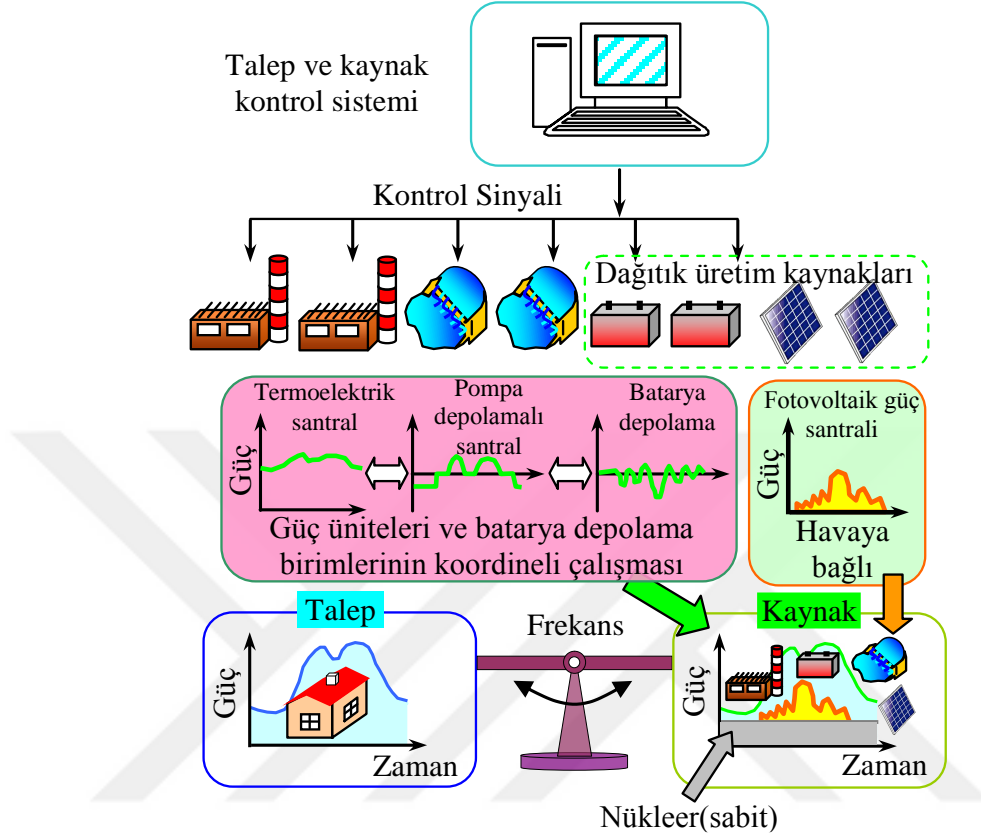
Burada temel talep gücünü karşılayan büyük güçlü elektrik santralleri ve pik talep anlarında devreye girip çıkan pik güç elektrik santralleri bulunmaktadır. Özellikle pik güç elektrik santrallerinin işletim maliyeti oldukça yüksektir ve bu durum toplam işletim maliyetini etkilemektedir.

### **1.1. Akıllı Şebeke Yapıları**

Akıllı şebeke; elektrik güç sistemindeki tüm birimlerin veya düğümlerin (üretim birimleri, trafo merkezleri, dağıtım merkezleri, tüketim birimleri gibi) aktif, adaptif (değişen şartlara uyabilen), esnek ve her türlü üretim veya tüketim biriminin kolayca bağlanabileceği, güçlü bir yapıda olması olarak tanımlanabilir [97]. Ayrıca Akıllı Şebeke terimi; merkezi ve dağıtık üretim tesislerinden yüksek gerilim hatları vasıtasıyla endüstriyel kullanıcılara, bina enerji yönetim sistemlerine, enerji depolama uygulamalarına, son kullanıcı olan tüketiciler ile onların elektrikli taşıtlarına, cihazlarına ve diğer ev aletlerine kadar birbirine bağlı bütün bileşenlerinin işletimini görüntüleyerek, koruma yapacak ve otomatik olarak optimize edecek şekilde elektrik güç sisteminin modernizasyonuna karşılık gelmektedir. Mevcut iletim ve dağıtım şebekeleri, akıllı şebeke mantığında tasarlanmamışlardır. Akıllı şebekelerin gereksinimleri oldukça farklıdır ve bu nedenle konvansiyonel şebeke için yeniden detaylı bir çalışmaya ihtiyaç vardır. Konvansiyonel şebekenin geliştirilip büyütülmesi, denetleme-bakım faaliyetleri, dağıtık üretim ve depolamanın entegrasyonu ile kapsamlı bir iki yönlü haberleşme sisteminin geliştirilmesine yönelik birçok adım içermektedir. Bu bağlamda akıllı şebeke elektrik iletim yapısı Şekil 1.2’de görülmektedir.

Akıllı bir şebeke yapısı ile elektrik enerjisinin tüm tüketicilere yeterli, sürekli, kaliteli, düşük maliyetli ve çevre konusundaki duyarlılıkları dikkate alan bir şekilde sunulması gerekmektedir. Elektrik iletim ve dağıtım hizmetlerinin tüketici memnuniyetini karşılayacak kalitede ve yeterlilikte verilmesi sağlanmalıdır. İklim değişikliği ve çevresel etkilerin, sektörün her alanındaki faaliyetleri göz önünde bulundurularak gerekli tedbirler alınmalıdır. Elektrik enerjisi, üretimi, iletimi, dağıtımını ve kullanımında kayıpların asgariye indirilmesi, verimliliğin artırılması akıllı şebeke yapısı için önemli bir konudur. Kaynak çeşitliliğinin sağlanması, yerli

ve yenilenebilir kaynakların azami ölçüde kullanılması akıllı şebeke yapısını güçlendirici etkilerde bulunacaktır [98].



Şekil 1.2. Akıllı şebeke elektrik iletim yapısı [98]

Bir akıllı şebeke, seçici olmakla birlikte ihtiyaç duyulan sistemleri gerektiği şekilde devreye alıp çıkarabilmektedir. Akıllı şebeke yapısı içerisinde farklı birimler birbirleri ile haberleşebilmektedir. Sistemdeki tüm güçler kontrol altında alınarak, güç akışı gerekli şekilde yönlendirilebilmektedir. Akıllı bir şebeke mevcut durumları analiz ederek, tahminler oluşturabilir, bunlara göre tedbirler oluşturarak, işletme-bakım kolaylığı sağlar. Ayrıca akıllı şebeke yapısı, üstün güç kalitesi, güvenilirlik ve verimlilik sağlamaktadır. Akıllı şebeke olgusunda, enerji arz güvenliğinin sağlanması, dışa bağımlılıktan kaynaklı risklerin azaltılması, iklim değişikliği ile mücadelenin etkinliğinin artırılması ve çevrenin korunması hedefleri çerçevesinde, enerji üretiminden kullanımına kadar olan süreçte birçok düzenlemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Akıllı şebeke yapısıyla birlikte elektrik üretimi, iletimi, dağıtımında teknik kayıpların asgariye indirilmesi ve dağıtımda kaçak kullanımın engellenmesi

sağlanmaktadır. Ayrıca talep tarafı yönetimi ile ilgili düzenlemeler yapılarak son kullanıcı memnuniyeti artırılabilir.

Görüldüğü üzere akıllı şebeke elektrik sistemimizin geleceğini oluşturan bir kavramdır ve birçok farklı disiplinden teknoloji bileşenlerini içermektedir. Bu bileşenler; üst düzey bir enerji yönetimi, iletim sistemi, izleme ve kontrol sistemi, dijital kontrol teknolojisi ve şalt otomasyonu, akıllı dağıtım sistemi, enformasyon teknolojisi tabanlı enerji servisleri, dağıtık enerji üretim sistemleri ve bunların güç elektroniği ara yüzleri, mikro şebeke yapıları gibi sıralanabilir. Tablo 1.1’de akıllı elektrik şebeke vizyonunun günümüz konvansiyonel elektrik şebekesinde ayrılan yönleri verilmektedir [99].

Tablo 1.1. Konvansiyonel ve akıllı şebeke yapılarının karşılaştırılması [99]

<b>Konvansiyonel şebeke yapısı</b>	<b>Akıllı şebeke yapısı</b>
Tüketiciler enerji tüketimi ve maliyetlerini azaltmak konusunda yeterince opsiyona sahip değildir.	Detaylı fiyat bilgisi mevcuttur; birçok program, fiyat ve ödeme süresi arasından seçim yapılır.
Büyük oranda merkezi üretim kullanılmaktadır, oldukça kısıtlı dağıtık üretim ve depolama mevcuttur.	Çeşitli dağıtık üretim kaynakları merkezi üretime ek olarak sistem içerisinde yer almaktadır.
Yeni teknolojik gelişmelerin entegrasyonu açısından sınırlı bir toptan satış pazarı mevcuttur.	Teknolojik gelişmeleri ve farklı üretim opsiyonlarını dikkate alan yeni elektrik pazarlarının gelişimi sağlanmaktadır.
Güç kalitesinden daha çok kesintilere odaklanır.	Güç kalitesi, akıllı şebekeler açısından bir önceliktir.
Sınırlı şebeke yapay zekâsı ve otomatik kontrol mevcuttur.	Şebeke yapay zekâsının varlık yönetimi uygulamalarına entegrasyonu ile birlikte verimlilik ve etkinlik artar.
Arızadan sonra varlıkların korunmasına odaklanır.	Arızadan önce arıza durumunu önleyecek önlemler alır, arıza durumlarındaki etkileri minimize eder ve işletim sürekliliği sağlar.
Doğal afetlere ve diğer tehlikelere karşı oldukça zayıftır.	Doğal afet ve saldırı gibi durumlarda sistem kendini hızlı bir şekilde toparlayarak işleme devam eder.

Elektrik şebekesinin modernleşme aşamasına geçiş sürecinde bazı etkenler bulunmaktadır. Akıllı şebekelerin gelişiminde, özellikle hükümet düzenlemeleri ile oluşan politik ve kanuni etkenler büyük önem arz etmektedir. Akıllı şebeke kapsamında ortaya çıkacak yapı, yeni iş imkânlarını ve iş modelleri ortaya

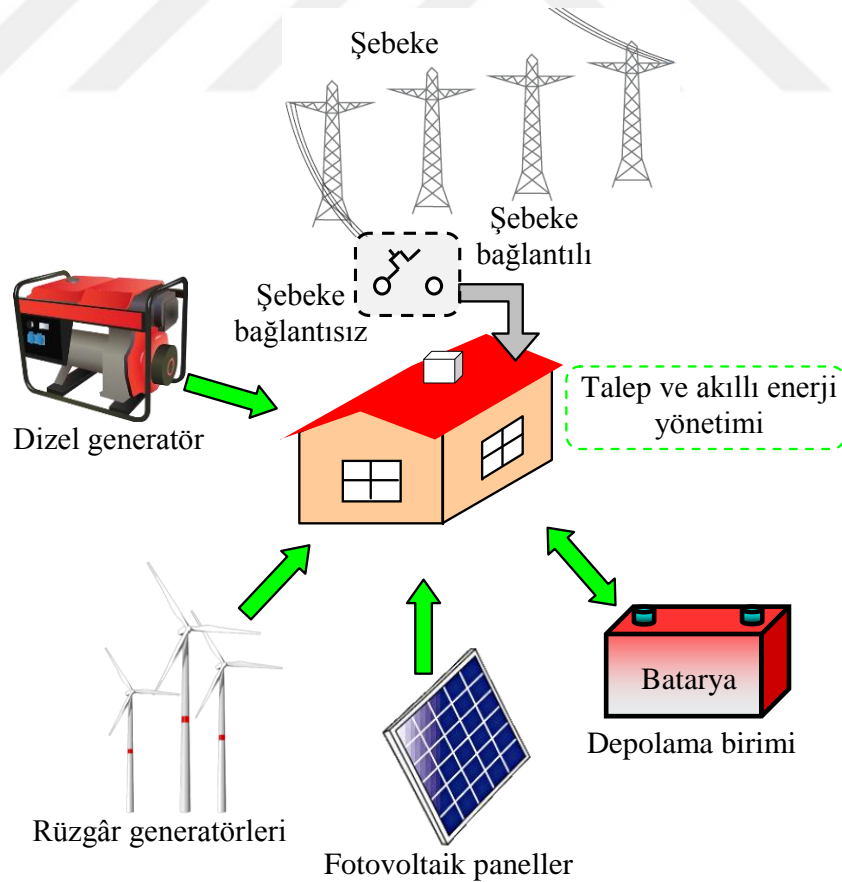
koyacaktır. Tüketici memnuniyeti, hizmet kalitesi ve sürekliliği açısından, enerji güvenilirliği ve güvenliğinin her zaman sağlanması konusu akıllı şebekelere ihtiyaç doğuran önemli bir etkidir. Akıllı şebeke olgusunun başlıca hedef alanlarından biri de talep tarafındaki gelişmeler olur tüketicinin güçlendirilmesi gerekmektedir. Yenilenebilir ve dağıtık üretimin şebekeye eklenmesinin desteklenmesi ile birlikte, akıllı şebeke kapsamında çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli atılımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

## **1.2. Mikro Şebeke Yapıları**

Akıllı şebekeyi oluşturan en önemli alt bileşenlerden biri de tez çalışma konusu da olan mikro şebeke yapısıdır. Mikro şebeke kavramına farklı tanımlar getirilebilmektedir. Mikro şebeke, akıllı enerji yönetim birimi ile yerel enerji üretim birimlerinde kendi enerjisini üretilip yüklerin dengeli ve kontrollü bir şekilde beslenmesini sağlayan ve bu işlemi şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız durumlarda da sürdürebilen ticari veya konut binalarının enerji sistemleri de mikro şebeke olarak tanımlanabilmektedir. Amerika kökenli bazı kaynaklar için mikro şebeke kavramı; üretim ve tüketim birimlerinin uyum içerisinde tek bir sistem olarak işletilebildiği ve tüketicilere aynı anda hem ısı hem de güç sunulabilen sistemler olarak tanımlanmaktadır [88]. Bununla birlikte, kendi içerisinde üretim ve tüketim birimlerini akıllı sistemlerle kontrol edilebilen ve ana elektrik şebekesi ile bağlantısı kopduğunda da dengeli bir işletme sağlayabilen bölgesel bir dağıtım sistemi mikro şebeke olarak tanımlanabilir. Mikro şebeke yapısına örnek bir topoloji Şekil 1.3'te verilmektedir.

Mikro şebeke, yerinde güç üretim kaynağı (dağıtık üretim), yerel yükler ve elektrik anahtarlama devresinden oluşmaktadır. Akıllı mikro şebeke, elektrik üretimi, dağıtım ve yerel elektriksel tüketicilere verilen elektrik akışının ayarlanmasını daha akıllı bir yol ile yapan elektrik şebekesi olarak tanımlanabilir. Akıllı mikro-şebekenin avantajları, artan güvenilirlik, verim artışı, artan sürdürülebilirlik ve kazanç olarak ifade edilebilir. Böylece, elektrik güç sistemlerinde yeni dağıtılmış enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu kolaylaşmakta, enerji maliyetleri ve kesintilerin azalması ve güç kalitesinin artması sağlanabilmektedir.

Mikro şebeke yapısındaki en önemli sorunlar, dağıtılmış enerji üretim kaynaklarının senkronizasyonu, yüklerin (transformatör ve motor tipi yükler) çektiği başlangıç akımları ve üç fazlı dengesizlik problemleridir (3-fazlı sistemdeki tek fazlı yükler ve küçük güçlü fotovoltaik elektrik üretim kaynakları vb.). Bir akıllı şebeke yapısında dağıtık enerji üretim kaynakları ile enerji depolama sistemlerinin senkronizasyonu gerçekleştirilerek sistemdeki kaynak sayısı artırılabilir. Akıllı şebekede elektrik üretiminde ve tüketiminde meydana gelen dalgalanmalar DA hatta bağlı enerji depolama ünitesi yardımıyla kolaylıkla karşılanabilir. Sistemde bulunan dağıtık üretim yapısı ile yükler yüksek güç kalitesi sağlanarak talep tarafındaki yükler gerilim dalgalanması ve çökmesi, üç fazlı dengesizlik ve gerilim harmoniklerinden etkilenmez. Uzun süreli bir kesinti sırasında eğer güç tüketimi üretimden fazla ise, mikro akıllı şebeke yapısı önemli yükleri beslemeye devam etmek için bazı yükleri devreden çıkartarak enerjinin sürekliliği sağlanmış olur. Sistemde bulunan bir yükte geçici olarak aşırı yüklenme meydana geldiğinde, yükü besleyen birim ilave bir güç hattı üzerinden elektrik gücünü karşılayabilir.



Şekil 1.3. Mikro şebeke elektrik iletim yapısı

Mikro şebeke yapısı çok fazla birimden oluştuğundan dolayı bir sınıflandırma ihtiyacı duyulmaktadır. Bundan dolayı mikro şebeke yapıları, konut tipi, dağıtım tesisi, ticari ve endüstriyel ve uzak yerleşim mikro şebekeler olarak sınıflandırılır [100, 101].

Konut tipi mikro şebekeler, akıllı uygulamalar ile üretim ve tüketim elemanlarının yönetilebildiği enerji yönetim birimi bulunduran akıllı ev sistemlerinin gelişimi ile oldukça örtüşen bir gelişim içerisinde. Mikro şebeke kavramının tanımında olduğu gibi akıllı evlerde de kontrol edilebilir bir ara yüz ile akıllı ev sistemindeki yerel üretim birimleri, enerji depolama birimleri ve yükler yerel dağıtım şebekesine bağlanmaktadır. Konut tipi mikro şebeke yapısında, kullanım süresi, enerji fiyatları veya tarife bilgisi gibi etkenleri değerlendirerek yerel üretim biriminde üretilen enerji, enerji depolama biriminde depolanan enerji veya şebekeden çekilebilecek enerji arasında en ekonomik ve güvenilir işletmeyi sağlamaya yönelik tercihler gerçekleştirir.

Dağıtım tesisi mikro şebeke sistemlerinin konut bölgesi için veya endüstriyel bir bölge için kısmi bir bölümü de olarak ele alınabilir. Bu tarz mikro şebekelerde büyüyen yerel yüklerle karşı yerel dağıtım üretim sistemlerinin (rüzgâr türbinleri, biyogaz tesisleri, enerji depolama uygulamaları v.b.) uygun şekilde işletilmesi ile dağıtım şebekesindeki olası tıkanıklıklar (aşırı yüklenme gibi) yönetilebilir. Dağıtım şebekesinin belli kısımlarının mikro şebeke olarak işletilebilmesi, bakım veya arıza durumlarında bu kısımları ada modunda çalıştırma kabiliyeti ile tüketicilere sağlanan hizmet kalitesi açısından büyük bir avantaj sağlar [100, 101].

Ticari ve endüstriyel mikro şebekelerde ise özellikle kritik ve hassas yükler içeren tüketiciler için mikro şebeke yapısı enerji güvenilirliği sağlayabilir. Özellikle üniversite, hastane, okul, alışveriş merkezleri gibi büyük tüketim birimlerinde mikro şebeke uygulamaları ile sistemlerindeki tüm enerji tüketim birimlerini tam olarak kontrol edebilme avantajı yaratılabilir. Bu şekilde tam kontrollü bir sistemde çeşitli uygulamalarla enerji tasarrufu sağlanabileceği gibi ekonomik fayda da sağlanabilir [100, 101].

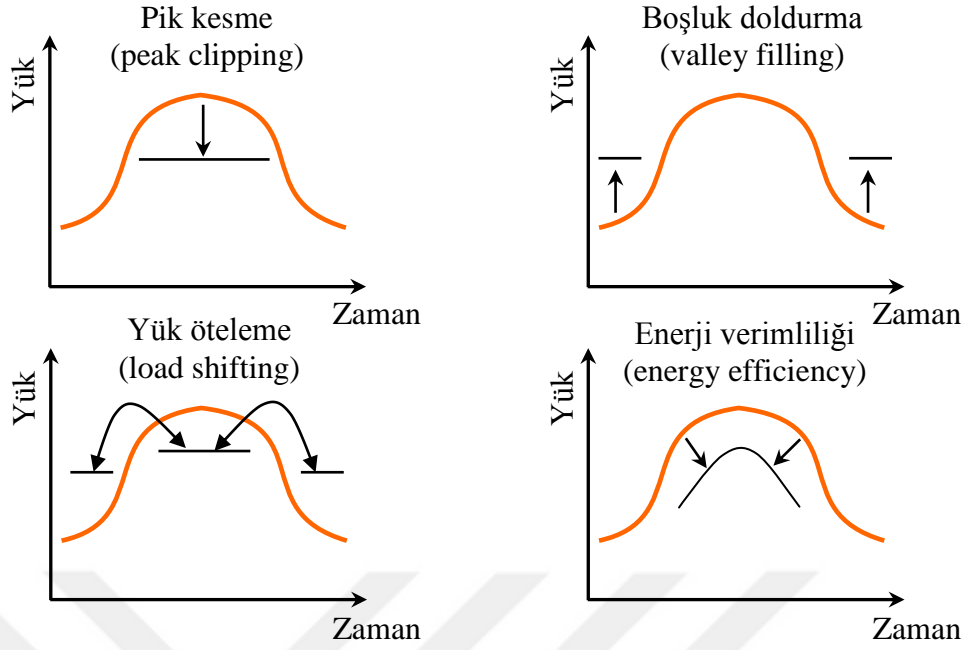
Uzak yerleşimler için mikro şebekeler, ana elektrik şebekesi ile zayıf bir bağlantısı bulunan veya hiç bağlantısı bulunmayan uzak yerleşim bölgeleri olabilir. Bu tip

yerlerde mümkün olduğunca yerel enerji kaynaklarından yararlanmaları sağlanarak ana şebekeye mümkün olduğunca az yüklenmeleri sağlanmalıdır. Bu tip yerleşim bölgeleri için yenilenebilir yerel dağıtık üretim tesislerinin entegrasyonu ve tüm sistemin kontrol altında olması bakımından mikro şebeke uygulaması çok uygun olabilir [100, 101].

### **1.2.1. Mikro şebekelerde dinamik kontrol**

Bir mikro şebekenin en önemli özelliği, gerekli durumlarda çok hızlı bir şekilde ana şebekeden ayrılabilmesi, ada modunda işletmeye geçebilmesi ve gerektiğinde de ada modundan tekrar şebekeye bağlı duruma geçebilmesidir. Bu durumda mikro şebeke yüklerin enerji ihtiyacını dinamik olarak yüklerden gelecek bilgiye ihtiyaç duymaksızın sağlayabilmelidir. Bu durum sistemde enerji depolama birimleri kullanmayı gerektirmektedir. Kontrol yöntemi açısından bakıldığında şebeke bağlı durum ile şebekeden bağımsız durumlarda farklı kontrol stratejileri uygulanması gerekmektedir. Şebeke bağlantılı durumda şebeke, gerilim ve frekans için referans değerleri sağlamaktadır. Ancak şebekeden bağımsız duruma geçildiğinde mikro şebeke, yük talebi ile üretim dengesini sağlaması gerektiği gibi, gerilim ve frekans referans değerlerini de kendi içerisinde oluşturmak durumundadır. Bu şekilde farklı iki işletme modu ve her farklı işletme modu için farklı kontrol stratejisi ihtiyacı modlar arası geçiş işlemlerinin başlıca zorluklarıdır. Ayrıca asıl endişe gerektiren nokta ada işletme modundan şebekeye bağlı moda geçiş işlemidir, çünkü ada modunda kullanılan referans değerler ile şebeke bağlı moda kullanılan referans değerler farklı olmaktadır [100, 102, 103].

Çalışma modlarına karar verecek ve belirlenen çalışma modu için referans değerlerin üretilmesini sağlayan bir üst denetim birimi gerekmektedir. Sistemin şebekeye bağlantı noktasından alınacak sinyaller ile şebeke bağlı mod veya ada modu çalışma modlarına karar verilir. Şebekeye bağlı çalışma modunda mikro şebeke, güç üreticisi olarak çalışır. Şebeke bağlı mod için; pik kesme (peak clipping), boşluk doldurma (valley filling), enerji verimliliği (energy efficiency) durumları vardır. Bu durumlar yalnız şebeke bağlı çalışma modu için geçerlidir. Şebekeden bağımsız, ada modu çalışmasında yük öteleme (load shifting) esastır. Dinamik yük kontrol uygulamalarına örnek grafikler Şekil 1.4'te verilmektedir [100, 102, 104].



Şekil 1.4. Dinamik yük kontrol uygulamalarına örnek grafikler

Pik kesme, sistemdeki pik yüklerin azaltılmasıdır. Yük kontrol yönetiminin klasik yollarından biridir. Pik kesme modu kullanıcı tercihli ve kullanıcı tarafından değerleri tanımlanan bir moddur. Kullanıcı şebekeden sürekli beslenmesi gereken bir talep yük değeri tanımlar ve bu yük değerini aşan fazladan yük olduğu durumlarda bu fazla yüklerin enerjisi şebekeden çekilmez, yenilenebilir kaynaklardan veya depolanmış enerjiden sağlanır.

Boşluk doldurma, yük kontrol yönetiminin ikinci klasik şeklidir. Boşluk doldurma, pik olmayan zaman dilimleri için yükler oluşturmayı kapsamaktadır. Bu durum özellikle bir zaman periyodundaki yük faktörünün (baz yükün pik yüke oranı) arttırmak için, sonradan yararlanılabilecek enerji depolaması gibi yüklerin devreye alınması ile sağlanmaktadır.

Yük öteleme, yük kontrol yönetiminin son şeklidir. Bu yaklaşım, yüklerin pik saatlerden pik olmayan saatlere ötelenmesini içermektedir. Bu sayede pik talebin karşılanması için gereken üretim tarafı düzenlemelerinin önüne geçilebilecektir.

Enerji verimliliği, yük kontrol yönetimi kapsamında değerlendirilebilmektedir. Genellikle kullanılan cihazın teknolojik ya da kullanımsal özelliklerine göre ortaya çıkan bir değişim durumudur. Tüketicinin konfor şartlarını azaltmadan bir hizmet için harcanan birim enerjinin azaltılması, dolayısıyla da yük şeklinin aşağı yönde



ötelenmesidir. Tüketiciler ve tedarikçiler yük şeklini değiştirmek için bağımsız hareket edebilir. Fakat talep tarafı etkileşimi, tedarikçiler ve tüketiciler arasında iki taraflı kazanç sağlayan bir birlikteliği hedeflemektedir [100, 102, 104].

### **1.3. Dağıtık Üretim Şebeke Yapıları**

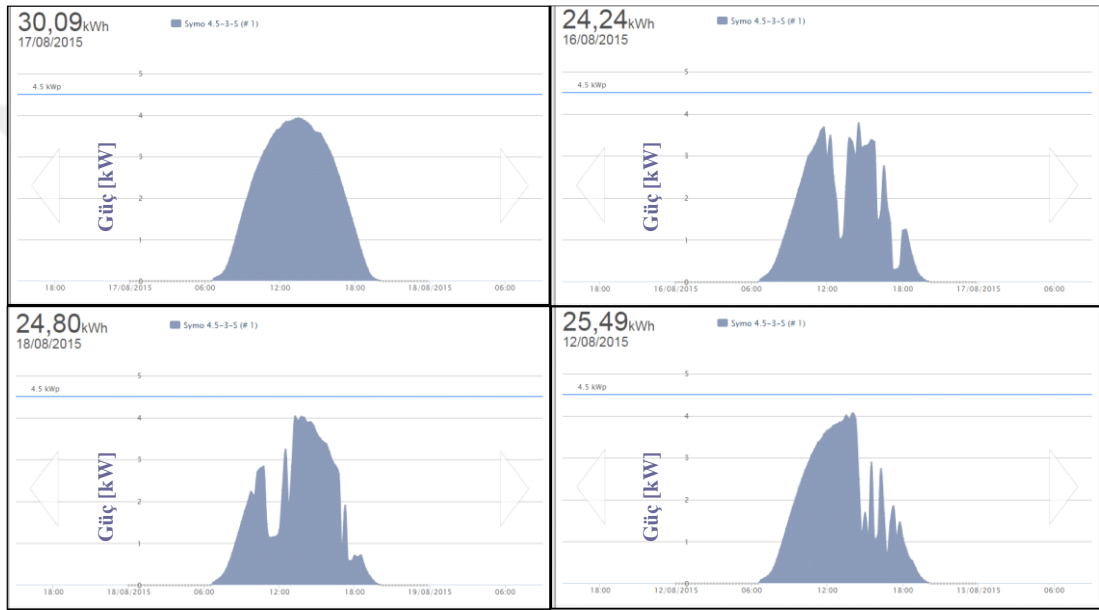
Dağıtık üretim şebeke yapıları, akıllı ve mikro şebekelerin bir parçası olmaya başlamıştır. Elektrik güç sisteminde son yıllarda yaşanan gelişmeler, dağıtım seviyesinden güç sistemine bağlanan enerji üretim birimlerini ve enerji depolama birimlerini teşvik eder durumdadır. Bu uygulamalar birlikte ele alındığında dağıtık üretim birimleri olarak tanımlanırlar. Dağıtık üretim birimi olarak uygulanabilecek yeni teknolojiler ticari olarak pazarlanıp uygulanmaya başlamış olmakla birlikte bu sistemlerin şebekeye entegrasyonu, daha verimli kullanılabilmesi ve maliyetlerin azaltılabilmesi adına çeşitli çalışmalar sürmektedir. Dağıtık üretim birimlerine örnek olarak mikro türbinler, yakıt hücreleri, fotovoltaik sistemler, rüzgar türbinleri, dizel jeneratörler, gaz türbini sistemleri sayılabilir.

Yaşanan bu teknolojik gelişmelerle beraber, elektrik güç sistemi tamamıyla bir değişim geçirmektedir. Bu değişimin hedefleri; temiz ve yenilenebilir enerji potansiyelinin en yüksek oranda değerlendirilmesi, tüketicilere daha güvenilir ve kaliteli enerji sağlanması, akıllı sistemlerin kullanılması ile ölçüm, denetim, işletme, bakım işlemlerinin daha başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi, sistemde yaşanan arızalar ve kesintilerin önlenmesi olarak sayılabilir [104, 105].

#### **1.3.1. Şebeke bağlantılı dağıtık FV sistemler**

Tez çalışma konusunun bir parçası olan şebeke bağlantılı FV enerji üretim sistemleri dağıtık üretim şebeke yapılarına bir örnek teşkil etmektedir. Şebeke bağlantılı dağıtık FV enerji üretim sistemleri enerji kaynağı olarak sistem içerisinde tamamlayıcı bir konumu olan ve giderek artan bir öneme sahiptir. Bununla birlikte FV sistemlerin yaygınlaşması şebeke tasarımcıları, işletmecileri ve bu konuda çalışan mühendisler için önemli bir güçlük yaratmaktadır. Bu güçlük; FV enerji üretim sistemlerinin sürekli değişken ve kesintili güç çıkışı sebebiyle bağlandıkları şebekede yaygınlaşmaları sonucu oluşturacakları olumsuz güç kalitesi etkileri olarak özetlenebilir. Ayrıca FV enerji üretim sistem çıkış gücü ile talep güç tepe

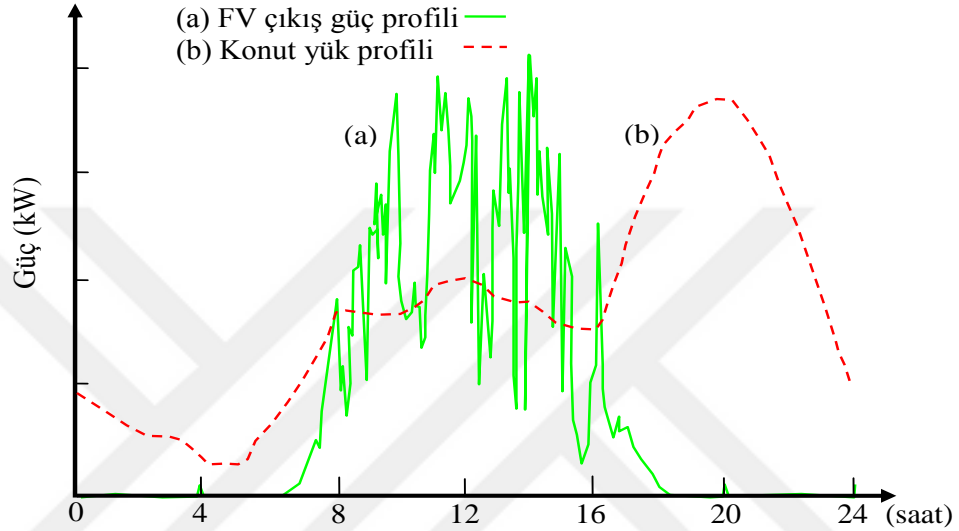
değerlerinin eşleşmemesi gibi bir dezavantaj verimsiz kullanıma yol açabilmekte ve bu da çözülmesi gereken bir problem olarak gündeme gelmektedir. Bu sorunların çözümünde, FV enerji üretim sistemine entegre şekilde veya FV enerji üretim sistemlerin yakın yerlerde konumlandırılmış şebeke bağlantılı enerji depolama uygulamaları oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Şekil 1.5'te FV enerji üretim sistemlerinin dalgali güç çıkışına örnek olarak, Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü kapsamında bulunan 5,1kW'lık kurulu güce sahip bir FV sistemin farklı günlerdeki güç grafikleri verilmektedir.



Şekil 1.5. FV sistemin farklı günlerdeki güç üretim grafikleri

FV enerji üretim sisteminde çıkış gücünün bu şekilde kararsız olmasındaki neden; bulut geçişleri, hava sıcaklığı, mevsimsel değişimler gibi doğal şartlardır. Bu gibi etkilerle FV sistem çıkış gücünde büyük ve ani düşmeleri görülebilmektedir. Bu büyük güç değişimleri şebeke işletmecileri için giderilmesi gereken önemli sorunlardır. Özellikle yaz mevsiminde görülebilen parçalı bulut geçişleri keskin bir gölge geçişine sebep olmakta ve FV panellerde birkaç saniye içerisinde değişen, aşağı yukarı %25 civarı bir güç değişimine sebep olabilmektedir ve bu değişimler önceden tahmin edilememesi sebebiyle oldukça zorlu etkenler olmaktadır. FV sistem güç çıkışında görülen bu şekilde ani düşmelerinin destekleyici bir sistem ile doldurulması gerekmektedir. Ayrıca bilindiği üzere FV sistemler yalnızca gün içerisinde güneşin doğuşundan batışına kadar güç üretebilmekte ve özellikle güneşin dik açığa ulaştığı öğlen saatlerinde güç üretimi tepe değerlerine ulaşmaktadır. Şekil

1.6'da örnek olarak bir konutun günlük yük ihtiyacı ve FV sistem tarafından üretilen güç grafiği verilmektedir. Yük ve FV güç eğrisi ile karşılaştırıldığında gündüz saatlerinde talep değerlerinin düşük olduğu ve talep değerlerinin tepe değerlere ulaştığı akşam saatlerinde ise FV güç üretiminin ulaşılabilir olmadığı görülmektedir. Bu durumda FV sistem güç üretimi ile talep eğrisinin denkleştirilebilmesi için sevk edilebilirliğin sağlanması ihtiyacı doğmaktadır [40].



Şekil 1.6. Örnek bir konutun günlük yük ve FV güç değişim grafiği

Özellikle konut yüklerinin ağır bastığı, dağıtım sistemlerinde yaygınlığı artan FV sistemlerden kaynaklanan dikkate değer bir diğer risk ise, dağıtım şebekesinde dağılmış küçük güçlü FV sistemlerin üretim değerlerinin o bölgedeki talep değerlerini aşmasının, bölgedeki gerilim seviyesi üzerinde ciddi etkisinin olmasıdır. Bu durumda meydana gelen diğer bir sorun da ters güç akışı olarak adlandırılmaktadır. Bu olayda dağıtım bölgesinde tüketilemeyen fazlalık FV güç üretimi şebekeye aktarılır ve dağıtım transformatörünün sekonderinden, primer ucuna DA akışı gerçekleşir. Geleneksel dağıtım transformatörleri tek yönlü akım geçişine göre tasarlanmaktadır, bu şekilde çift yönlü güç akışına uygun tasarlanmamışlardır. FV sistem kurulum maliyetlerinin düşmesi ile ilerleyen yıllarda bu sorunun giderek önem kazanacağı düşünülmektedir. Bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda dağıtık FV sistem uygulamaları doğası gereği kesintili ve dalgalı güç üretmekte ve talep olmadığı zamanda ise ihtiyaç fazlası güç üretmektedir.

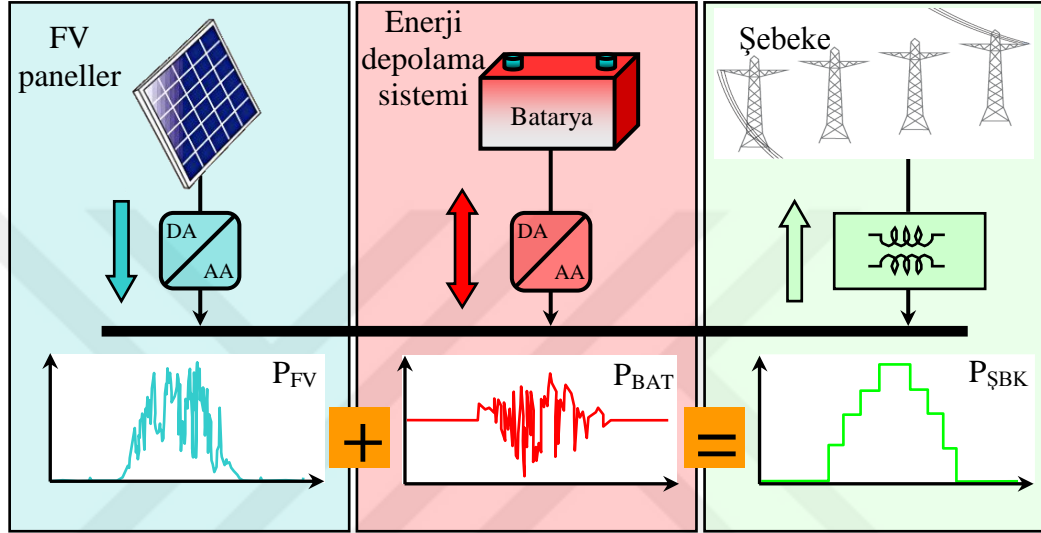
### 1.3.2. Dağıtık FV sistemlerinde depolama uygulaması

Bir akıllı mikro şebeke yapısı için enerji depolama sistemi oldukça önemlidir. Şebekedeki yüklerin doğru çalışmasını sağlamak için kullanılan enerji depolama sistemi aynı zamanda güç kalitesini de yükseltebilir. Enerji depolama uygulamaları ile çıkış gücü, iklim şartlarına bağlı değişen rüzgâr türbinleri, yalnız gündüz çalışabilen ve hava şartlarına göre değişen güneş enerji sistemleri gibi yenilenebilir enerji sistemlerinden kaynaklanan güç değerlerindeki değişim/dalgallılıkla başa çıkılabilir. Yenilenebilir enerji temelli akıllı mikro şebeke kavramı, kaynaklardan faydalanmanın ve fosil yakıt tüketiminin azaltılmasında iyi bir yoldur. Enerji depolama uygulamalarının kullanımı, yüklere kaliteli güç sağlanması için mikro şebekelerin kullanılmasıyla zorunlu hale gelmektedir. Mikro şebekelerde; şebekeye bağlı ve izole/ada modu olarak adlandırabileceğimiz iki işletme modu vardır. İzole/ada modu işletme süresince enerji depolama biriminin temel sorumluluğu enerji dengesinin sağlanmasıdır. Şebekeye bağlı mod süresince amaç yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili ve yük dalgalanmasının şebekeyi etkilemesinin/yayılmasının önlenmesidir. Tek tip bir enerji depolama ile yenilenebilir güç kullanan mikro şebekede bu işlevlerin tümü etkili/verimli bir şekilde gerçekleştirilemez. Fotovoltaik gibi kesintili yapıdaki yenilenebilir enerji kaynakları; yüksek enerji yoğunluklu depolama kullanımını gerektirmektedir. Aynı zamanda yükteki hızlı/ani değişimler/dalgalanmalar yüksek güç yoğunluklu depolama kullanımı ister. Bu tez çalışmasında önerilen batarya ve ultrakapasitörden oluşan HEDS, yüksek enerji ve yüksek güç yoğunluğuna sahip bir birleşik enerji depolama birimi olarak tasarlanmıştır. Bu hibrit yapı akıllı mikro şebeke uygulamaları için enerji depolama sistemlerinin gerçekleştirilmesinde oldukça gelecek vaat eden bir seçenektir.

FV sistem entegrasyonunda depolama uygulaması, doğrudan FV sistem ile bir bütün olarak şebekeye bağlanabildiği gibi, FV sistem kurulumlarının yoğunlaştığı bölgelerde, merkezi veya dağıtık olarak bağımsız depolama birimleri şeklinde şebekeye bağlanmaları da mümkündür. Bu seçeneklerin tümünde FV sistem kaynaklı şebeke riskleri önlenebilecektir.

Öncelikle depolama ile FV sistem güç çıkış grafiğinin daha düzgün bir karakter edinmesi sağlanabilir. Belirli limitler üzerindeki güç depolanabilir ve belirli limitler

altında kalan güç değerleri için deşarj sağlanabilir böylece FV sistem ve depolama birimi çıkışında belli bir aralık içerisinde daha düzgün bir güç eğrisine ulaşılabilir. Bu şekilde ani dalgalı güç yapısının şebeke üzerinde yaratacağı olumsuz etkiler bastırılabilir. Şekil 1.7’de FV enerji üretim sistemi ve enerji depolama sisteminin birlikte kullanılmasıyla sistemin şebekeye yapmış olduğu olumlu etki verilmektedir [106].



Şekil 1.7. FV ve enerji depolama sisteminin şebeke etkisi

FV enerji üretim sistemi ile depolama birimi birlikte kullanılarak talep değerlerinin düşük olduğu ve FV güç üretiminin yüksek olduğu aralıklarda enerji depolanmaktadır. Daha sonra FV güç üretiminin mümkün olmadığı ve talep değerlerinin tepe değerlerine ulaştığı aralıkta ise depolanan enerji tüketime sunulmaktadır. Böylece FV sistem için geleneksel enerji santrallerinin sevk edilebilirlik özelliği sağlanmış olur. Ayrıca bu şekilde bir uygulama ile tüketici tarafında en ekonomik işletme sağlanmış olurken şebeke tarafında da yüklenme oranı düşürülmüş ve böylece sistem yatırım maliyetleri için bir erteleme yapılmış olur.

Eğer depolama sistemi, güç elektroniği veya güç dönüştürücü yapısına sahipse; depolama birimi güç kalitesi kontrolü yaparak, gerilim ve reaktif güç düzenlemesine imkân veren bir araç olarak da işletilebilir. Bu şekilde güç kalitesi şartlarının önemli bir bileşeni olan gerilim kararlılığı sağlanabilir.

FV enerji sistemleri, çevre dostu yapıları, basit, bakım gerektirmeyen, masrafsız işletme imkânları ile geleceğin güç sistemleri içerisinde vazgeçilmez güç kaynakları

olarak yerini almışlardır. Şebeke yapısı, yoğunlukta olan yük karakteri, öncelikli ihtiyaçlar ve enerji üretim birimlerinin karakteristikleri gibi konular iyi incelenerek planlanacak dağıtım bölgeleri içerisinde; ihtiyaca en uygun şekilde cevap verebilecek özellikte farklı enerji depolama uygulamaları tesis edilmesi kaçınılmaz görünmektedir. Geleceğin dağıtık üretim temelli akıllı şebekelerinin en önemli anahtar unsurlarından biri enerji depolama uygulamaları olarak görülmektedir. Enerji depolama uygulamalarının yaygınlaşmasının önündeki en büyük engel maliyetleridir. Ancak FV sistem kurulum maliyetlerinin giderek düşmesi ile yaygınlığı artan küçük güçlü konut tipi FV sistem uygulamaları içerisine entegre edilebilen depolama uygulamalarının teşvik edilmesi sağlanabilirse, depolama uygulamalarının yaygınlaşması ve bahsedilen faydalara ulaşım çok daha ekonomik bir yoldan elde edilecektir. Çünkü bu tarz uygulamalarda kablo tesisatı, haberleşme, kontrol sistemi, güç elektroniği düzenekleri, işçilik vs gibi maliyetler FV sistem ve depolama uygulaması için ortak olmaktadır [107].

Kritik yüklerin kesintisiz bir şekilde beslenmesini garanti altına alabilmek için, enerji depolama sistemlerinin enerji yönetim sistemleri ile kontrol edilmesi gerekmektedir. Mikro şebekenin başarılı bir şekilde yönetilmesi, arıza ve bozucu etkilerin meydana geldiği durumlarda depolama sistemlerinin uygun kontrolü ve işletilmesi ile mümkündür. Elektronik olarak birbirine bağlı mikro kaynaklar, düşük atalet ve şebekenin kesintiye uğramadan sürdürülebilmesi bakımından avantajlıdır. Depolama sistemleri bu durumu destekler nitelikte, düşük gerilimli geçici durumlar oluştuğunda, motor kalkışlarında ve diğer kısa süreli aşırı yüklenme durumlarında, özellikle ada modu işletmesinde mikro kaynaklara yardımcı olmaktadır. Enerji depolama sistemleri genellikle DA gerilim kaynaklarıdır. Bu yüzden AA kaynak olarak kullanmak için mutlaka DA/AA çeviriciler kullanılmalıdır. Depolama sistemleri yük talebindeki değişikliklere anında cevap verebilmelidirler. Bu nedenle yerel kontrol birimleri tarafından yönetilmelidirler. Ultrakapasitör gibi bazı depolama kaynakları yüksek güç yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen kısa zamanda deşarj olurlar. Volan gibi bazı depolama kaynakları ise düşük güç yoğunluğuna sahip olsalar bile uzun bir süre enerji sağlayabilirler [108-116].

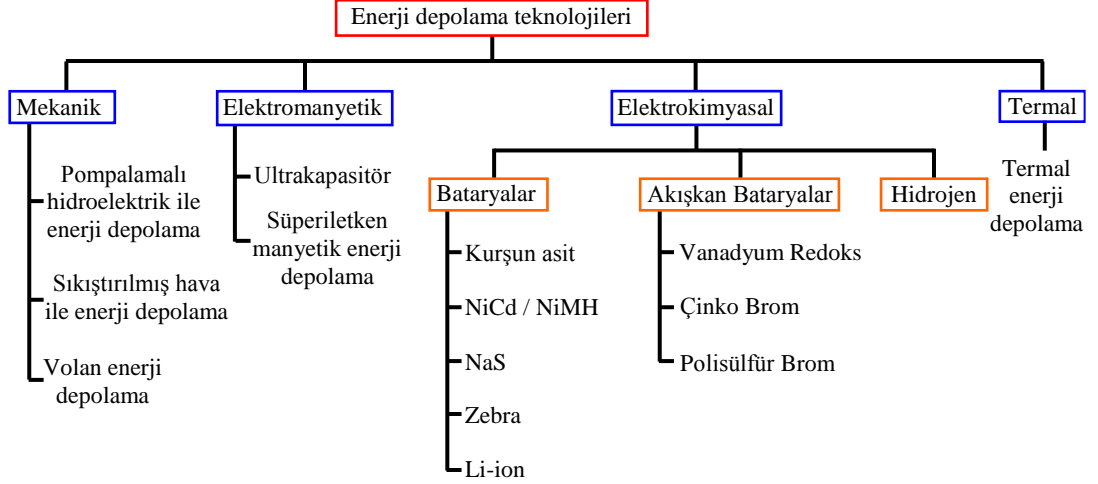
## **2. ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ**

Yenilenebilir enerji kaynakları, çevresel olarak pozitif olsa da, güneş ve rüzgâr enerjisi kesintili olduğundan şebeke geriliminde ve frekansında dalgalanmalara sebep olmaktadır. Bu durum taban talep yükünün fosil yakıt kaynaklardan karşılanmasına yol açmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemine entegrasyonu, güç sistemlerinin yönetimi konusunda yeni gelişmelere yol açmaktadır. Talep yük ve üretim arasındaki dengesizlikler geliştirilmesi gereken durumların başında gelmektedir. YEK'lerin kesintili olması probleminin çözümünde klasik yöntemlerin izlenmesi enerji depolama sistemine göre daha karmaşık ve zor olmaktadır. Bu da enerji ihtiyaçlarını %10-20 arasında YEK'lerden karşılayan başta Almanya, Danimarka, İspanya gibi ülkeler için büyük sorun teşkil etmektedir [117]. Büyük ve güvenilir enerji depolama kapasitesi yenilenebilir kaynakların kullanımını desteklemektedir. Güvenilir güç sistemleri kurmak isteniyorsa geleneksel kaynaklar ile yenilenebilir kaynaklar birlikte kullanılmalıdır. Bununla birlikte depolama sistemine de mutlaka yer verilmelidir. Teknolojik gelişmelerle birlikte enerji depolama kapasiteleri 1-100MW gücü saatlerce besleyecek büyüklüklere ulaşmaktadır.

### **2.1. Enerji Depolama Uygulamaları**

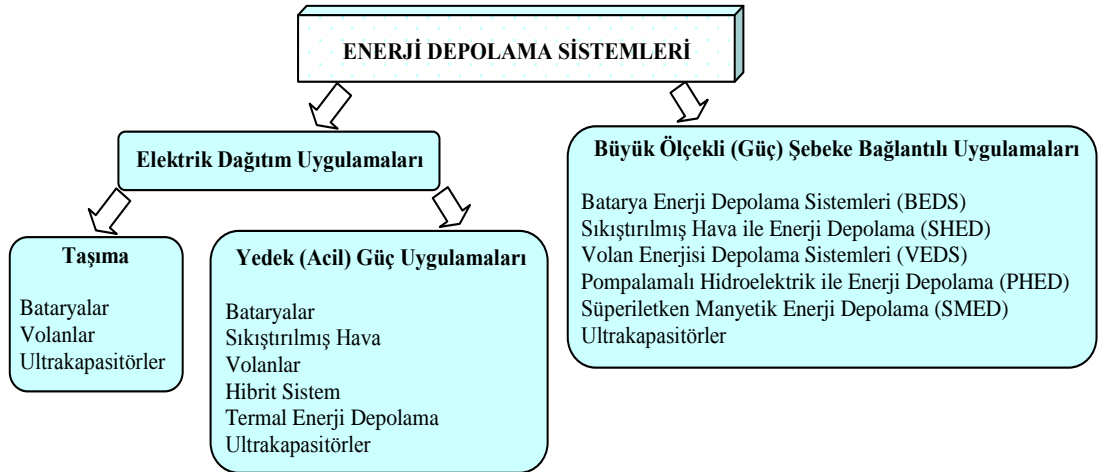
Enerji depolama uygulamaları elektromanyetik, mekanik, elektrokimyasal ve termal olmak üzere dört sınıfta gruplandırılmaktadır. Bu sınıflandırma depolama teknolojilerinde kullanılan yöntem ve malzeme alt yapısına bağlı olarak yapılmaktadır. Şekil 2.1'de kullanılan enerji depolama teknoloji gruplandırılması ayrıntılı olarak verilmektedir.

Farklı enerji depolama teknolojileri içinden ihtiyaca en uygun özellikteki teknoloji, maliyet-performans oranı dikkate alınarak seçilmektedir. Enerji depolama uygulamaları enerji ve güç temelli uygulamalar olarak temel ihtiyaca cevap verecek şekilde sınıflandırılmaktadır [106].



Şekil 2.1. Enerji depolama teknolojilerinin sınıflandırılması [106]

Enerji temelli uygulamalar, birkaç saatlik servis (deşarj) süresi gerektiren, uzun süreli enerji ihtiyacına cevap verebilecek ve ihtiyaç anında cevap süresi (devreye girmesi) çok hassas yükler dışında 1dk civarında olması kabul edilebilen depolama uygulamalarıdır. Güç temelli uygulamalar ise yük talebinin karşılanmasından ziyade, güç kalitesi düzeltilmesine yönelik kullanılan depolama uygulamalarıdır. Şebeke frekans kararlılığının sağlanması, ani güç değişimleri ve gerilim değişimlerinin bastırılması gibi amaçlarla kullanılan depolama uygulamalarıdır. Bu uygulamalarda cevap süresi ms düzeyinde olması beklenirken uzun servis süresine gerek duyulmayabilir ve birkaç dk civarı servis süreleri ihtiyaca göre kabul edilebilmektedir. Güç sistemlerinde uygulanan farklı enerji depolama teknolojileri, depolama uygulamalarının çeşitliliği ve uygulama alanlarının genişliği göz önüne alınarak Şekil 2.2’de ayrıntılı olarak listelenmektedir [7].

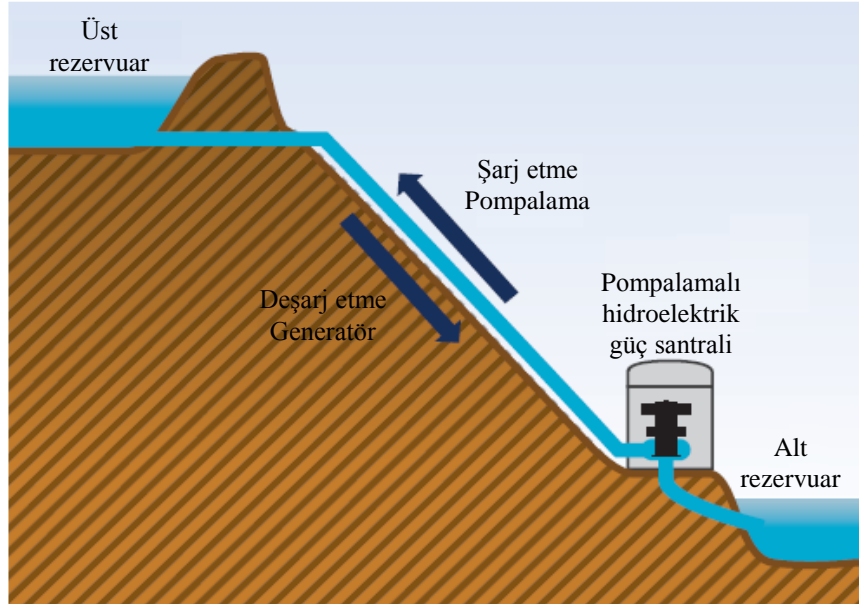


Şekil 2.2. Enerji depolama sistemleri diyagram gösterimi [7]



### 2.1.1. Pompalamalı hidroelektrik ile enerji depolama

Pompalamalı hidroelektrik enerji depolama teknolojisi için farklı yüksekliklerde bulunan iki su rezervuarı kullanılır. Sistemin şarj olma durumunda; alçak rezervuarda bulunan su yüksekteki depolama alanına pompalar aracılığıyla taşınır. Deşarj olma durumunda ise yüksekte bulunan su yerçekimi serbestiyle bırakılır ve daha alçaktaki rezervuara akar ve bu sırada elektrik türbinleri çalışarak elektrik enerjisi üretilmiş olur. Pompalamalı hidroelektrik ile enerji depolama yöntemindeki iki farklı rezervuar yatağının yüksekliği iyi hesaplanmalıdır. Sistemin şarj olması sırasında suyun yükseğe taşınması sırasında elektriğin ucuz olduğu zaman dilimleri veya YEK kullanılmaktadır. Sistemin deşarj olma sırasında ise elektriğin birim maliyetinin yüksek olduğu veya pik yüklerin olduğu zaman dilimlerinde kullanılarak elektrik şebekesinde bulunan diğer santrallere destek olunmaktadır. Pompalamalı hidroelektrik ile enerji depolama teknolojisi rezervuar kapasitesine de bağlı olarak saatler veya haftaları aşan bir enerji desteği sağlayabilir. Bu depolama teknolojisi, elektrik üretim sektöründeki en yaygın olarak kullanılan depolama yöntemidir. Şekil 2.3'te pompalamalı hidroelektrik ile enerji depolama teknolojisinin genel topoloji şeması verilmektedir.



Şekil 2.3. Pompalamalı hidroelektrik ile enerji depolama topolojisi

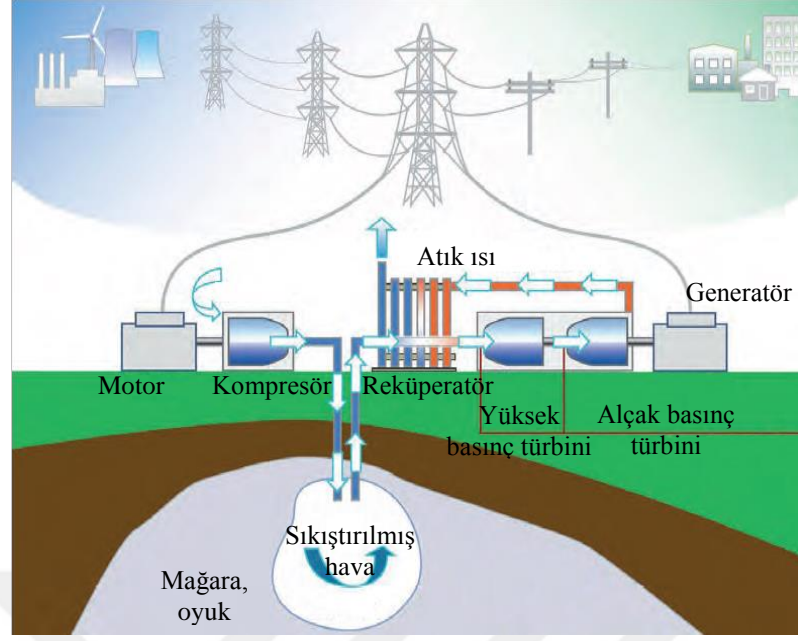
Doğal koşullara bağımlı bir sistem olmakla beraber, sistemin kurulum maliyetini düşürmek için genel olarak nehir veya göller kullanılır. Bununla birlikte geçtiğimiz

yıllarda yenilikçi metotlar da ortaya çıkmıştır. Yenilikçi bu yöntemler ile deniz ya da yeraltındaki bir rezervuar düşük rezervuar yatağı olarak kullanılmaktadır [106, 118, 119].

Dünya çapında kullanılan yüksek dayanıklılığa sahip bir teknolojidir. Kütle enerji depolama teknolojileri arasında yüksek bir verime sahiptir ve şu anda sistem verimi %75 civarındadır. Daha eski sistemlerin verimliliği kullanılan parçalar, örneğin; türbin ve pompaları değiştirilerek artırılabilir. Dezavantajları çevresel sınırlamalar, uzun teslim süresi, çevresel etkiler ve yüksek yatırım maliyetleridir. Dünyada pompalamalı hidroelektrik ile enerji depolama teknolojisi; İngiltere Dinorwig'de 1984 yılında kurulmuş 1728MW kapasitede Dinorwig Power Station, Amerika Georgia'da 1995 yılında kurulmuş 2011'de revize edilmiş 1095MW kapasitede Rocky Mountain Hydroelectric Plant, Japonya Okinawa'da 1999 yılında kurulmuş 30MW kapasitede Yanbura Seawater Pumped Storage Hydropower, Almanya Goldisthal'da 2004 yılında kurulmuş 1060MW kapasitede Goldisthal Pumped Storage Station isimli uygulamaları mevcuttur [119].

### **2.1.2. Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama**

Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama teknolojisi, elektrik enerjisinin ucuz olduğu zaman dilimlerinde havanın yeraltında bulunan bir rezervuara depolanması, daha sonra pik yük devreye girdiği saatlerde depolanan enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle elde edilir. Bir basınçlı hava ile depolama sistemi şarj olurken, doğal mağara veya yapay rezervuar içine havayı sıkıştırır. Döngü ters çevrildiği zaman türbinler tarafından elektrik üretilir. Sıkıştırma işlemi boyunca atmosfere ısı salımı nedeniyle bir konvansiyonel sistem etkisi oluşturulur. Deşarj sırasında doğal gaz ya da başka bir yakıt kullanılarak bu etki dengelenir. Sıkıştırılmış hava ile depolama teknoloji sistemde deşarj sırasında oluşan ısı özel bir rezervuarda depo edilir ve deşarj verimini arttırmak için tekrar kullanılır. Bu ısı katı ya da sıvı ortamda depolanır. Bir izotermal sistem içinde, ısı dönüştürücüsü ve bir kompresör gibi özel bir cihazın kullanımıyla hemen hemen hiç ısı salımı olmaz. Kullanılan basınçlı hava kompresörü ve generatör türbin ekipmanlarına bağlı olarak sistem verimi yaklaşık olarak %80 civarındadır. Şekil 2.4'te sıkıştırılmış hava ile enerji depolama teknolojisinin genel topoloji şeması verilmektedir.



Şekil 2.4. Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama topolojisi

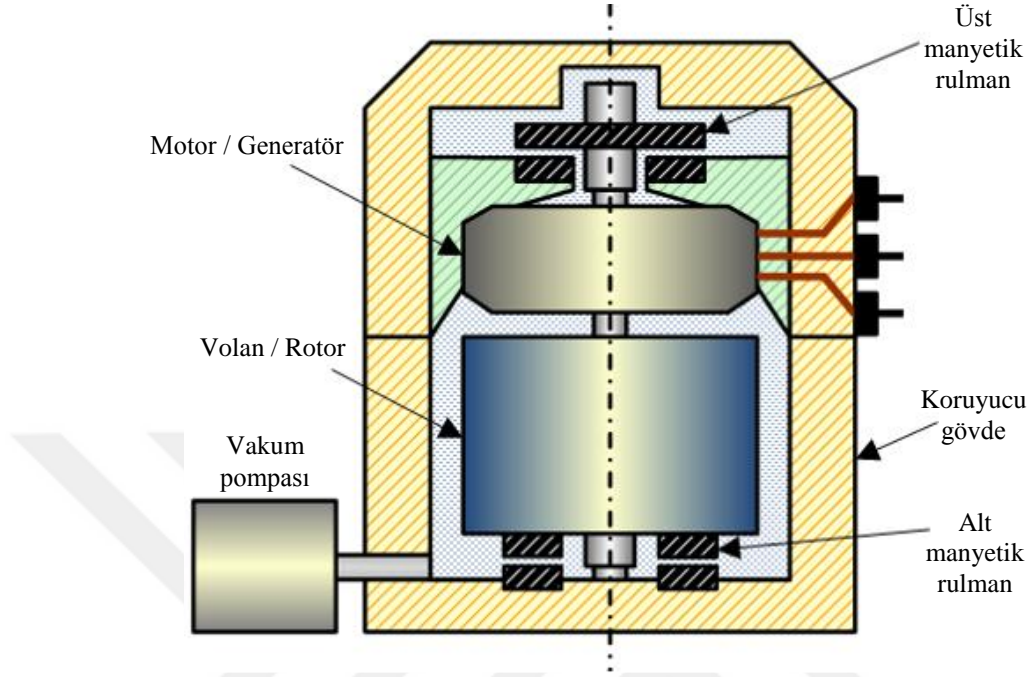
Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama teknolojisinin avantajları dayanıklılık ve esnek ölçülerde olabilmesidir. Dezavantajları ise ilk yatırım maliyetleri, düşük cevap verme hızı ve kurulacağı yerle ilgili sınırlamalardır. Bu sakıncaların üstesinden gelmek için, özellikle küçük ölçekli sıkıştırılmış hava ile depolama sistemlerinin yerleştirilmesi için depolama tanklarının kurulması önerilmektedir [106, 118, 119].

Dünya çapında konvansiyonel sıkıştırılmış hava ile enerji depolama sistemleri bulunmakla birlikte, gerçekleştirilen uygulamalar genellikle büyük ölçekli depolama için kullanılmaktadır. Almanya Huntrof'da 1979 yılında kurulmuş, Huntorf Compressed Air Energy Storage Facility isimli 290MW'lık kapasiteye sahip sistem 2006 yılında revize edilerek 321MW kapasiteye çıkartılmıştır. Amerika Alabama'da 1991 yılında kurulmuş McIntosh Compressed Air Energy Storage Facility isimli depolama sistemi 110MW'lık kapasiteye sahiptir [119].

### 2.1.3. Volan enerji depolama

Volan (Flywheel) enerji depolama teknolojisi enerjiyi kinetik olarak depolama özelliğine sahiptir. Bu depolama teknolojisinin temelinde basit bir fizik kuralı yatmaktadır. Volan enerji depolama sistemini şarj ederken rotor olarak belirlenmiş kütle yüksek bir hızla döndürülür. Deşarj edilme sırasında döner kütle bağlı

olduğu generatörden elektrik enerjisi olarak geri alınır. Şekil 2.5'te volan enerji depolama teknolojisinin topoloji yapısı verilmektedir [106, 118, 119].



Şekil 2.5. Volan enerji depolama teknoloji topolojisi [106]

Düşük hız (yüksek güç) ve yüksek hız (yüksek enerji) olmak üzere iki temel çeşidi vardır. Düşük hızlı olanları ucuzdur fakat saniye ile birkaç dakika gibi kısa deşarj süresi vardır. İkinci çeşidi daha uzun süre (birkaç saate kadar) enerji sağlayabilir, ancak yaklaşık 100 kat daha pahalıdır. Bu teknolojinin avantajı çevrim sayısı, şarj ve deşarj hızı, güç oranları ve sistemin modüler olmasıdır. Düşük-hızlı olan çeşidinde enerji depolamanın sınırlı olması ve yüksek-hızlı tipinin maliyetli olması dezavantajlarıdır. Bu depolama teknolojisi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte başarıyla kullanılmaktadır. Talep yük gücü pik olduğu zamanlarda hızlı bir şekilde devreye girerek bulunduğu elektrik sistemine destek olmaktadır. Volan enerji depolama sisteminin verimi, günümüz teknolojisinde kullanılan malzeme sayesinde (tasarlanan rotor, manyetik rulman) %90 civarındadır. Amerika New York'ta 2011 yılında kurulmuş Flywheel in the PJM Interconnection isimli depolama sistemi 20MW'lık kapasiteye sahiptir. Diğer bir uygulama örneği ise yine Kanada'da 2014 yılında kurulmuş depolama sistemi 2MW'lık kapasiteye sahiptir [119].

#### **2.1.4. Ultrakapasitör enerji depolama**

Ultrakapasitörler klasik kapasitörlerin geliştirilmiş olanlarıdır. Klasik kapasitörlere kıyasla enerji yoğunlukları yüksektir. Diğer depolama teknolojilerine kıyasla enerji yoğunlukları az fakat deşarj süreleri hızlı ve çevrim ömrü daha fazladır (8-15 yıldır). Ancak kapasitörlerin asıl olarak boyut problemleri vardır. Kapasitörlerin kapasitesi ve dielektrik malzeme arasında lineer bir bağlantı vardır. Bu yüzden büyük kapasite gerekli olduğunda zorunlu olarak dielektrik malzeme de büyük olmak zorundadır. Ultrakapasitörler yüksek güç yoğunluğuna sahip depolama birimleridir (5,5kW/kg). Temel özellikleri, olağanüstü verimlilik, düşük sıcaklıklardaki performansları, bakıma gerek duymaması, hızlı cevap süresi ve aşırı dayanıklılıktır. Ultrakapasitörler bir milyon defadan daha çok doldurulup deşarj edilebilir. Dezavantajları, yüksek maliyet, kendi kendine deşarj ve düşük enerji yoğunluğudur. Bu teknoloji göreceli olarak genç, ama olağanüstü bir hızda gelişmektedir ve gerilim regülasyonu için mükemmel bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Ultrakapasitörlerin, batarya ve kapasitörlerin kullanılmadığı yüksek enerji ve güç yoğunluğu gerektiren uygulamalar için bir alternatif olarak kullanılmaları önemlerini arttırmaktadır. Bu sistemlerin, gerilim çökmesi regülatörlerindeki kullanımı hızlı bir şekilde artmaktadır.

Ultrakapasitörler birçok uygulama alanında kullanılmaktadır ve yaygınlaştırılması hedeflenmektedir. Bu kullanım alanlarından bazıları, vinç, otobüs, trolleybüs araçlarda start-stop ve motor çalıştırma, kesintisiz güç kaynakları, internet sunucuları ve rüzgâr türbinlerindeki kanatların kontrolüdür. Almanya'da 2002-2003 yıllarında otobüslerde kullanılmaya başlanmıştır. Aynı şekilde İspanya'da Haziran 2003 ve 2008 yıllarında trolleybüs ve otobüs toplu taşıma alanlarında kullanılmaya başlanmıştır [106, 118, 119].

#### **2.1.5. Süperiletken manyetik enerji depolama**

Süperiletken manyetik enerji depolama teknolojisinde, süperiletken bir nüvede doğru akımın oluşturduğu bir manyetik alanda enerji depolanmaktadır. Bu nüvelerin kullanılma ya da zamana bağlı olarak performansı azalmaz, böylece dayanıklılık ve güvenilirlik sadece güç dönüştürücüler gibi yardımcı ekipmanlara bağlı olmaktadır. Süperiletken manyetik enerji depolama teknolojisinin avantajları yüksek verimlilik ve

dayanıklılık, kısa cevap süresi, kendi kendine deşarj olmaması ve düşük bakım masraflarıdır. Dezavantajları ise yüksek maliyet ve manyetik alanın etkileridir. Süperiletken manyetik enerji depolama teknolojisi kısa süreli enerji depolama ihtiyacında, özellikle güç kalite uygulamalarında ve küçük ölçekli uygulamalarda kullanılabilirler. Bu teknoloji dağıtım seviyesine bağlantıda veya son kullanıcılar için uygundur. Süperiletken manyetik enerji depolama uygulama örnekleri dünyada mevcuttur. Amerika’da 2002 yılında kurulmuş Distributed SMES and Power Quality Industrial Voltage Regulator isimli depolama sistemi 800kW’lık kapasiteye sahiptir. Bu uygulama entegre olduğu sistemde talep edilen güç fazla olduğunda devreye girerek gerilim çökmesini engellemektedir [119].

### **2.1.6. Bataryalar**

Kurşun asit bataryalar en eski ve özellikle araç endüstrisinde kullanılan olgun teknolojiye sahiptir. Negatif kurşun ve pozitif kurşun dioksit elektrotlarının sülfürik asit elektrolitinin içerisine konulmasıyla oluşturulan düşük maliyetli ilk hareket bataryasıdır. Kullanım amacına bağlı olarak elektrotlardaki plaka sayısı artırılıp azaltılır veya büyüklükleri değiştirilir. Kurşun-asit batarya birçok yıllık bir gelişim evresinden geçmesine rağmen 25-35Wh/kg gibi düşük bir enerji yoğunluğuna sahiptir. Buna rağmen güç yoğunluğu 150W/kg gibi yüksek bir değerdir. Kurşun asit bataryalar düşük sıcaklıklarından çok etkilenmektedirler. 10°C’nin altındaki çevre sıcaklıklarında hem enerji hem de güç yoğunluğunda ciddi düşüş yaşanır. Buna rağmen kurşun asit bataryaların verimleri %65 ile %80 arasındadır [106, 118, 119].

Günümüzde kurşun asit batarya teknolojisi gelişmekte ve bataryaları daha verimli ve daha uzun ömürlü hale getirmek için çeşitli yöntemler geliştirilmektedir. Bunlardan biri olan VRLA (Valve Regulated Lead Acid) bataryalar ismini, şarj ve deşarj sırasında gazların yüksek oranda akü içerisinde tutulmasını sağlayan valf sisteminden almaktadır. Bu aküler sulu tip akülere göre çok daha az gaz çıkışına izin verirler. Bu sayede, akülerin su kaybı ve muhafaza edildiği yerde havalandırma ihtiyacı minimum düzeye indirilmiştir. Bir diğer geliştirilen yöntem ise AGM (Absorption Glass Mat) kurşun asit bataryalardır. Bu bataryaların içyapısı sulu kurşun asit bataryalardan farklıdır. Batarya içerisindeki sıvı elektrolit, araç görevi de gören yüksek gözenekli cam elyafına emdirilmiştir. Batarya plakaları ve bu ayrılar özel

bir yöntemle minimum alan kaplayacak şekilde batarya hücrelerine yerleştirilmiştir. Bu sayede AGM kurşun asit bataryaların birim hacminin sulu bataryalara kıyasla daha az yer kaplaması sağlanmıştır. Kurşun asit batarya uygulamaları dünya genelinde oldukça fazladır. Amerika'da Notrees Wind Storage Demonstration Project isimli proje ile rüzgâr enerjisine entegre edilen kurşun asit bataryalar rüzgârın olmadığı zaman dilimlerinde enerji aktarmaya devam etmektedir. 2013 yılında kurulmuş olan bu proje 36MW kapasiteye sahiptir. Diğer bir uygulama örneği ise; Japonya Tappi Wind Park'ında kurulu olan rüzgâr enerji kaynağına bağlı kurşun asit batarya depolama sistemidir. Bu kurşun asit batarya enerji depolama projesi, 2001 yılında kurulmuş ve 10,4MWh depolama kapasitesine sahiptir [119].

Nikel kadmiyum bataryalar, sinterlenmiş pozitif nikel elektrot ve negatif kadmiyum elektrot potasyum hidroksit sulu çözeltisinin içine konularak oluşturulur. Son yıllarda özgül enerji, özgül güç, çevrim ömrü ve güvenilirlik bakımından dengeyi iyi sağlayan bataryalar olarak kabul edilir. Kadmiyum toksik ve çevreye zararlı olmasından dolayı, nikel kadmiyum bataryaların geri kazanımı oldukça önemli bir o kadarda karmaşıktır. Bu bataryalar yüksek şarj/deşarj oranına sahiptir ve derindeşarj çevrim sayısı 2000 civarındadır. Çalışma şartlarına ve batarya tasarımına bağlı olarak toplam çalışma ömürleri 8 ile 25 yıl arasında değişmektedir. Tipik bir nikel-kadmiyum hücresinin enerji yoğunluğu 20Wh/kg ve 40Wh/l'dir. Nikel kadmiyum bataryalar nominal kapasitesini kaybetmeden yüksekdeşarj oranlarında kullanılabilirler. Nikel-kadmiyum bataryalar ayrıca yüksek geniş çalışma sıcaklığı yelpazesine sahiptir. Standart bir nikel-kadmiyum batarya hücresi -20°C ile +50°C arasında çalışabilir. Amerika Alaska'da 2003 yılında Golden Valley Electricity Association of Fairbanks için yapılmış 40MW/10MWh kapasitesinde bir uygulama örneği bulunmaktadır [119].

Nikel metal hidrür bataryalar, toksik özelliği olmayıp daha iyi performansa sahip olduklarından son zamanlarda birçok elektrikli araba uygulamalarında nikel kadmiyum bataryanın yerini almıştır. Nikel metal hidrür, nikel kadmiyum bataryalara göre daha fazla enerji depolamaktadır. 70Wh/kg'dan fazla enerji yoğunluğuna ve 200W/kg'dan daha fazla güç yoğunluğuna sahip bu bataryalar, kurşun asit bataryalardan yaklaşık beş kat daha pahalıdır. Batarya %80 derindeşarj durumunda 600'ün üzerinde tam şarj/deşarj çevrimine sahiptir ve hızlı bir şekilde %80 tekrar şarj

olması yaklaşık 35 dakikadır. Standart bir nikel-metal hidrür batarya hücresinin çalışma sıcaklığı 0°C ile +40°C arasındadır. Nikel metal hidrür bataryaların yüksek sıcaklıklarda çalışması bataryaların performans karakteristiklerini etkiler [106, 118, 119]. Honda tarafından 2000 yılında tasarlanan ilk insansı prototip robotu ASIMO’da 10Ah’lik bir nikel metal hidrür batarya kullanılmıştır.

Sodyum sülfür batarya, negatif sodyum ve pozitif sülfür elektrotlarının sıvı hallerinin birleştirilmesiyle oluşur. Her iki elektrot bileşenleri de sıvı durumdadır. Optimum çalışma sıcaklığı 350°C’dir ve 200°C’nin altında çalışması durmaktadır. Bu sıcaklığın altında sodyum elektroliti donduğu için reaksiyon yavaşlamaktadır. Sodyumun donması reaksiyonu yavaşlatarak, mekanik gerilmelere yol açması nedeniyle bataryaya zarar vermektedir. Çalışma sıcaklığının belirlenebilmesi için batarya ısıtıcısına ihtiyaç duyulur. Kolay bakım yapılabilmesi ve sıcaklığının tehlike yaratmaması için yalıtımının iyi yapılması gerekir. Sodyum sülfür bataryasının şarj süresi 4-5 saattir. Ömürleri kurşun asit bataryasının ömründen daha fazladır. Bu bataryanın yapısında kullanılan maddeler sağlığa zararlıdır. Sodyum sülfür bataryaları 110Wh/kg gibi yüksek enerji yoğunluğu ile 150W/l gibi güç yoğunluğu sağlamaktadır. Japonya’da Rokkasho Futamata Project isimli rüzgâr enerjisine destek amaçlı bir sodyum sülfür batarya depolama ünitesi kurulmuştur. 2008’de kurulan bu depolama birimi 34MW depolama kapasitesine sahiptir. Amerika Texas’ta 2010 yılında Presidio bölgesinin elektrik kesintilerini önlemek amacıyla 4MW/32MWh kapasiteye sahip bir depolama ünitesi kurulmuştur [106, 118, 119].

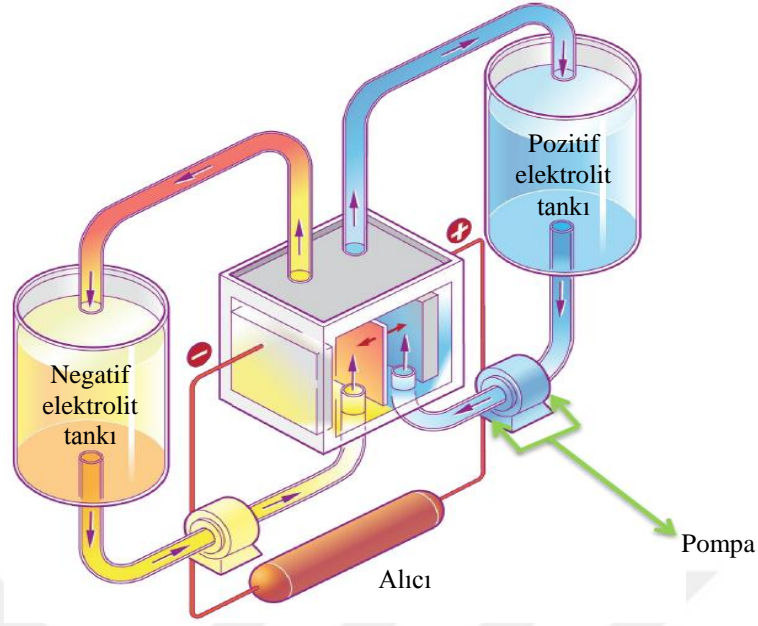
Lityum iyon bataryalar, yaklaşık 150Wh/kg enerji yoğunluğuna ve 1000 çevrimlik derin deşarj çevrimine sahiptir. Bu bataryalar %80 şarj durumuna 1 saatten daha kısa sürede tekrar şarj edilebilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle lityum özellikle şarj edilebilir batarya teknolojilerinin en tercih edilen elementlerinden biri haline gelmiştir. Lityum-metal oksit ve lityum-metal fosfat tabanlı “katot” (pozitif elektrot) malzemeleri şarj edilebilir batarya olarak çok yüksek enerji depolama yoğunluğu sağlayabildiği için özellikle mobil ekipmanlarda ve elektrikli vasıtalarda tercih edilmektedir. Lityum iyon bataryaların şarj durumunda iken çalışma sıcaklığı -20°C ile +60°C arasında, deşarj olurken ise -40°C ile +65°C arasındadır. Tipik bir lityum-iyon bataryanın hücre gerilimi 2,5V ile 4,2V’tur ve bu gerilim değeri nikel kadmiyum nikel metal hidrür bataryalar içerisinde hücre geriliminin yaklaşık olarak



üç katıdır. Gelişim aşamasında olan lityum iyon bataryalar kullanılan kimyasallara göre çeşitlilik göstermektedir. Örneğin; Lityum kobalt oksit ( $\text{LiCoO}_2$ ) yerine Lityum mangan oksit ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) kullanıldığında kobaltın yarattığı aşırı şarjda patlama riski ortadan kalkar. Ancak bu tip bataryalarda  $50^\circ\text{C}$  üzerine çıkıldığında performans çok hızlı bir şekilde düşmektedir. Diğer yandan, mangan kullanıldığında enerji yoğunluğu %20 kadar düşmektedir. Ancak mangan kobalta göre çok daha güvenli ve çevre dostu bir elementtir. Buna rağmen kobalt tabanlı lityum iyon bataryalar enerji yoğunlukları sebebiyle tercih edilmektedir. Nikel oksit metal ( $\text{LiNiO}_2$ ) kullanımda lityum iyon bataryanın enerji yoğunluğu kobalta göre %30 daha artar. Ancak buna karşılık oluşan ekzotermik reaksiyon çok daha yüksek ısı ürettiğinden nikel tabanlı bataryalarda soğutma problemleri oluşmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan lityum iyon bataryaların uygulama alanı giderek artmaktadır. Özellikle elektrik araçlarda kullanılan bu depolama teknolojisi Teslamotor firmasının elektrikli araçlarında tercih edilmektedir. 2015 yılında üretimi gerçekleştirilen 430km menzile sahip Tesla Model S Ludicrous aracında 397kW/90kWh kapasiteli bir lityum iyon batarya kullanılmaktadır [106, 118, 119].

### **2.1.7. Akışlı bataryalar**

Akışlı bataryalar, çözünmüş elektro aktif türleri içeren çözeltiler (elektrolitler) içinde enerji depolayan elektrokimyasal cihazlardır. Enerjiyi açığa çıkarmak için, elektrokimyasal pillere dönüşen elektrotlara yerleştirilen iki elektrolit arasında tersinir elektrokimyasal bir reaksiyondur. Reaktif pilleri içeren geleneksel bataryaların aksine, redox akış bataryaları, dış tanklarda depolanan elektrolit çözeltileri kullanılır. Böylece sistemin kapasitesi elektrolit tanklarının boyutu ile belirlenir. Sistem gücü ise batarya kümeleri ile belirlendiği için güç ve enerji kapasiteleri birbirinden bağımsızdır. Şekil 2.6'da akışkan batarya enerji depolama teknolojisinin çalışma topolojisi verilmektedir [106, 118, 119].



Şekil 2.6. Akışlı batarya çalışma topolojisi

Akışlı bataryaların enerjisi, kullanılan elektrolit miktarıyla orantılı olduğundan, enerji açısından oldukça esneklerdir. Diğer bataryalarla karşılaştırıldığında kısa cevap süresi, simetrik şarj/deşarj ve yüksek verim gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca aktif ve reaktif güç kontrolü için optimize edilebilirler. Dezavantajları düşük güç yoğunluğuna sahip olması, bazı maddelerin toksik olması, ticari seviyesinin yetersiz olmasıdır. Vanadium redox ve çinko bromide piyasada rahatlıkla temin edilmektedir. Diğer alt tipleri, vanadyum bromür batarya, çinko seryum batarya veya polisülfid bromürdür. Fakat bu batarya türleri gelişmelerinin erken aşamasında bulunmaktadır. Japonya'da Sumitomo's Densetsu Office'de 200kW'lık konsantre fotovoltaik sisteme destek amacıyla bir vanadium redox batarya depolama ünitesi kurulmuştur. 2000 yılında kurulan bu akışkan batarya depolama sistemi 50kW kapasiteye sahiptir [119].

### 2.1.8. Hidrojen ile enerji depolama

Hidrojen doğada yalın halde bulunmamaktadır. Bu yüzden hidrojen öncelikle dolaylı olarak üretilmelidir, daha sonra üretilen hidrojen depolanır ve son olarak depolanan hidrojen elektrik enerjisine dönüştürülür. Hidrojen, fosil yakıtların metanlı buharın reaksiyona girmesiyle veya suyun elektrolizi yöntemiyle elde edilir. Elektroliz metodu elektrik depolamaya direkt olarak izin verir. Hidrojen enerjisinin kullanımı uygun maliyetli ve kirlilik yaratmayan bir yöntemdir. Hidrojenin depolanması

aşamasında üç teknik kullanılmaktadır. Bunlar, basınçla buharlaştırılmış hidrojen, soğuk sıvı hidrojen ve fiziksel ve kimyasal yapılarda hidrojendir. Birinci yöntem büyük tesislerde enerji depolama uygulamaları için uygundur. İkinci yöntem taşıt uygulamaları için uygun iken, üçüncü yöntem ise uzayla ilgili çalışmalar için uygundur. Sonuç olarak hidrojen, yakıt pilinin elektrik üretebilmesi için kullanılan bir kaynaktır. Yakıt piline girdi olarak bir tarafından hidrojen diğer tarafından oksijen girdisi verilerek elektrik üretmesi sağlanır. Bu depolama teknolojisinde özellikle hidrojen üretirken YEK'lerin kullanımı bu depolama teknolojisini daha temiz hale getirmektedir. Aksi takdirde fosil yakıtlar ile üretilen hidrojenin daha fazla doğaya zarar vereceği göz ardı edilmemelidir. Hidrojen enerjisi günümüzde gelişmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Norveç'te Utsira hidrojen projesinde rüzgâr enerjisinden elde edilen 1200kW'lık elektrik enerjisiyle hidrojen elde edilmektedir. 2004'te kurulan bu hidrojen depolama sistemi 48kW'lık hidrojen yakıt pilleri ile uzak bölgelerdeki kullanıcılara sürekli elektrik sağlamaktadır. Almanya'da 2013'te kurulan ECS H2Herten hidrojen depolama projesi rüzgâr enerjisi ve lityum iyon bataryalar ile birlikte kullanılmıştır. Avrupa Birliği tarafından desteklenen bu projenin amacı, sera gazı emisyonlarını azaltmak, enerji verimliliğini arttırmak ve şebekeden alınan pik enerji talebini azaltmaktır. Hidrojen depolama projesi kapsamında 50kW'lık bir yakıt pili ünitesi bulunmaktadır [106, 118, 119].

### **2.1.9. Termal enerji depolama**

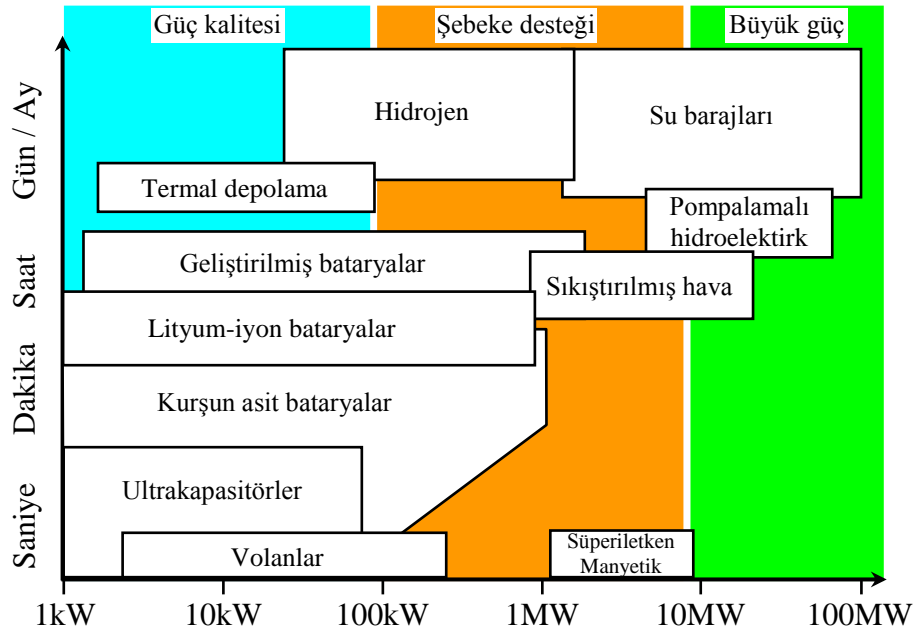
Termal enerji depolama sistemleri, düşük veya yüksek sıcaklıklarda ısı olarak enerjiyi depolar. Gerekli olduğunda depolanan enerji, dönüştürme işlemlerinin ardından generatörler tarafından elektrik enerjisine dönüştürülür. Genel anlamda, iki türde ısı depolama işlemi kullanılmaktadır. Bunlardan biri depolama ortamının ısı kapasitesine, diğeri depolama ortamının faz değişimine dayanır. Depolama ortamı olarak su da dâhil olmak üzere erimiş tuz ve lityum florür gibi çeşitli malzemeler kullanılabilir.

Bazı termal enerji depolama sistemleri, bütün gece ya da gündüz için gerekli dondurma kapasitesinin bir kısmını kullanarak buz ya da soğuk su olarak depolarlar. Bu termal depolama teknolojisi fosil ya da biokütle termal güç santralleriyle birlikte kullanılabilir. Kullanıcıların düşük güç taleplerinde ısı depolayarak, sonra yüksek

güç taleplerinde bunu kullanıp elektrik enerjisine dönüştürerek verimliliği arttırlar. Benzer depolama sistemleri bazı yoğunlaştırılmış güneş enerji santrallerinde kullanılmaktadır. Güneşin olduğu zaman dilimlerinde ısıyı depolayıp, daha fazla talep anında kullanılabilir. Bulutların güneş enerji santrallerine olan etkilerini en aza indirmede de kullanılmaktadırlar. Termal enerji depolama sistemlerinin diğer bir uygulama alanı ise elektriği ısıya dönüştürmek, saklamak ve daha sonra enerji gerektiğinde işlemi geriye döndürmektir. Norveç Nydalen Industrial Park'a 200metre derinliğe sondaj yapılarak kurulan termal enerji depolama sitemi bulunmaktadır. 2004 yılında kurulan bu termal enerji depolama sistemi toplamda 6MW ısıtma kapasitesine ve 0,5MW soğutma kapasitesine sahiptir [106, 118, 119].

## 2.2. Enerji Depolama Teknolojilerinin Karşılaştırması

Enerji depolama teknolojileri kapasiteleri bakımından saniye, dakika, saat ve gün/ay zaman dilimlerinde talebi karşılayabilmektedirler. Enerji depolama teknolojilerinin kendi karakteristiği bu süreleri oluşturmaktadır. Şekil 2.7'de bazı farklı enerji depolama teknolojilerinin uygulama alanları, depoladıkları güç miktarları ve enerji aktarabilme sürelerine göre grafik üzerinde karşılaştırmaları gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Enerji depolama teknolojilerinin kapasite pozisyonları [120]

Uygulanabilirlik ve kullanılacak yer açısından bakıldığında, hızlı tepki verebilen depolama teknolojileri güç kalitesi alanında, biraz daha yüksek güç ve uzun süre

enerji sağlayabilen depolama teknolojileri şebeke desteği alanında ve daha uzun süre daha yüksek enerji sağlayabilen depolama teknolojileri ise büyük güç ihtiyacı olan alanlarda kullanılmaktadır. Buna göre orta ve uzun süreli enerji ihtiyacı için yüksek güç ve enerji yoğunluğuna sahip uzun süre enerji sağlayabilecek enerji depolama uygulamaları tercih edilirken, kısa süreli ihtiyaçlar için batarya, ultrakapasitör veya volan uygulamaları gibi düşük enerji yoğunluğuna sahip depolama uygulamaları tercih edilmektedir [120-122].

Pompalamalı hidroelektrik ve sıkıştırılmış hava ile enerji depolama teknolojileri uzun süreli enerji talebini karşılamak için uygulanabilir bir depolama çeşididir. Ayrıca bu depolama birimleri şebeke desteği ve büyük güç uygulamalarında kullanılmaktadır. Hidrojen ve süperiletken manyetik enerji depolama teknolojileri şebeke desteği uygulamalarında kullanılmaktadır. Fakat enerji sağlayabilme süreleri açısından bakıldığında süperiletken manyetik enerji depolama teknolojisi, saniye bazında destek olurken, hidrojen teknolojisi gün ve ay bazında destek olmaktadır. Günümüzdeki, mevcut çeşitli batarya teknolojileri arasında akışkan bataryalar uzun süre ve yüksek enerji gerektiren sistemlerde şarj deşarj gerektirmeyen uygulamalarda kullanılmaktadır. Kurşun asit bataryalar ile sodyum sülfür ve nikel kadmiyum gibi diğer ileri batarya teknolojileri yüksek güç yoğunluğu gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Orta vadeli uygulamalar (uzun süre için fazla güç gerektirmeyen) için tasarlanan nikel kadmiyum bataryalar anlık enerji gerektiren uygulamalarda da (kısa süre için büyük miktarda gücün sağlanması) kullanılabilir. Lityum iyon bataryalar mobil cihazlar ve yüksek enerji yoğunluğu ile büyük batarya enerji depolama uygulamalarında, verimin önemli olduğu alanlar için uygun gözükmektedir. Ultrakapasitör depolama teknolojisi ise diğer depolama teknolojilere göre çok daha hızlı devreye girip çıkabildiği için özellikle güç kalitesi alanında yaygın olarak uygulanmaktadır. Ultrakapasitörler ve volanlar bataryalara kıyasla yüksek güç yoğunluğuna sahiptir ve bu özelliği sayesinde çok kısa zaman dilimlerinde çok yüksek akımlarla şarj/deşarj olabilmektedirler. Bunun yanında ise ultrakapasitörler ve volanlar bataryalara kıyasla düşük enerji yoğunluğuna sahiptir ve bu yüzden uzun süre enerji sağlayamazlar. Tablo 2.1’de enerji depolama teknolojilerinin güç, verim, çalışma alanı ve ömür başlıklarındaki karşılaştırılması ayrıntılı olarak verilmektedir [123].

Tablo 2.1. Enerji depolama teknolojilerinin karşılaştırılması [123]

Enerji depolama teknolojisi	Güç	MWh	Deşarj Süresi	Verim	Maliyet \$/kWh	Çalışma Ömrü (yıl)	Uygulama Alanı
Pompalamalı hidroelektrik	< 2 GW	< 24 GWh	Gün	% 87	45 - 85	40	Büyük güç
Sıkıştırılmış hava	100 - 300 MW	0,4 - 7 GWh	Gün	% 80	12 - 85	30	Büyük güç Şebeke desteği
Volan	< 100 kW	< 100 kWh	Sn/Dk	% 90	170 - 420	20 - 30	Güç kalitesi Şebeke desteği
Ultrakapasitör	< 250 kW	< 3 MWh	Sn/Dk	% 95	85 - 480	30 - 40	Güç kalitesi
Süperiletken manyetik	0,3 - 3 MW	< 250 kWh	Sn/Dk	% 90	240 - 600	40	Şebeke desteği
Bataryalar	< 20 MW	< 200 MWh	Dk/Saat	% 70 - 90	85 - 4800	2 - 10	Güç kalitesi Şebeke desteği
Akışkan bataryalar	< 15 MW	< 200 MWh	Dk/Saat	% 70 - 85	620 - 830	5 - 20	Güç kalitesi Şebeke desteği
Hidrojen	< 20 MW	< 200 MWh	Dk/Saat	% 70 - 90	1 - 15	2 - 10	Şebeke desteği Güç kalitesi

### 2.3. Enerji Depolama Teknolojisinin Faydaları

Enerji depolama faydaları olarak, enerji satışlarından sağlanabilecek doğrudan elde edilen gelirler olarak sayılabilir. Eğer depolama üretim, iletim ve dağıtım düzeyinde daha büyük ölçekli bir yapıda yer alıyorsa, şebekenin üretim, iletim veya dağıtım kapasitesi bakımından ihtiyaç duyulacak ek yatırımların önlenmesini sağlayabilir. Bir son tüketici ürünü olarak enerji depolama kullanılıyorsa, amacı elektrik faturasını düşürmek ve/veya kesintisiz güç kaynağı olarak kullanılması olabilir.

Enerji depolama faydalarından bahsederken bazı güçlüklerle karşılaşmak mümkündür. Bunun sebepleri henüz yeterli deneyimin yaşanmamış olması ve bahsedilen faydaların değerlendirilmesi için gerekli nicel verilerin sağlanma zorluğu olarak gösterilebilir. Örnek vermek gerekirse; depolama kullanımı elektrik üretiminden kaynaklanan emisyon değerlerinin azaltılmasına katkı sağlayabilir ancak elektriksiz üretimde kirlilik değerlerini yansıtan kesin maliyet değerlendirmeleri bulunmamaktadır. Depolama kullanımı son tüketici için yakıt tüketimini de azaltabilir ancak son tüketici açısından bakıldığında burada sağlanan fayda oldukça önemsiz görülebilmektedir. Yine de, bu şekilde etkileri açıkça ifade edilemeyen dağıtım bireysel depolama uygulamaları bir bütün olarak değerlendirmeye alındığında, şebeke işletmesi tarafından bakılırsa büyük ölçekte önemli faydalar sağlandığı görülebilir.

Bazen birden fazla depolama uygulamasının faydalarının bir araya getirilerek kullanılması uygun olabilmektedir. Bu gibi durumlarda bir arada kullanılan sistemlerin faydalarının birleştirilmesi ile sistemin maliyeti ve geri ödeme süresi daha avantajlı olabilmektedir. Bazı durumlarda ise yalnız bir sistem ekonomik olarak yeterince uygun olabilmektedir. Buna rağmen, genellikle toplam faydanın toplam maliyetleri aşabilmesi için birkaç sistemin birlikte kullanılması gerekmektedir. Bu şekilde farklı sistemlerin bir arada kullanıldığı uygulamalarda faydalar bakımından teknik ve işletme özelliklerinde uyumluluk sağlanmalıdır. Yani amaçlanan teknik faydaların sağlanmasında ve bunların sağlanabilmesi için gereken işletme özelliklerine uygun cevap verebilecek sistemler bir arada kullanılabilir.

Enerji depolamanın kaynak olarak kullanıldığında, elektrik enerjisinin değerinin veya fiyatının ucuzken depolanmasını sağlamaktadır. Daha sonra depolanmış enerjinin, elektrik değeri veya fiyatının yüksek olduğu zaman kullanılması enerjinin zaman kaydırma konusunda fayda sağlayacaktır.

Depolama uygulamalarının cevap süreleri oldukça kısa süreli olabilmekte ve güç elektroniği ara devreleri sayesinde giriş çıkış değerleri çok hızlı bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Bu özellikleri sayesinde enerji depolama teknolojileri güç kaynağı olarak kullanılmaya elverişli bir karakteristik göstermektedir. Depolama sistemleri giriş çıkış değerlerindeki değişim miktarına göre ömür ve yıpranma bakımından geleneksel güç sistemlerine oranla daha dayanıklıdırlar. Enerji depolama uygulamaları farklı güç taleplerine daha kolay cevap verebilirken geleneksel üretim birimleri ancak nominal değerlerde sabit güç ile çalıştırıldıklarında verimli ve ekonomik olmaktadır. Nominal değerler dışında çalışmaları halinde verimsiz bir çalışma meydana gelmekte, enerji maliyetleri yükselmekte, işletme ömürlerine zarar verilebilmekte ve olumsuz çevresel etkilerde artış görülebilmektedir. Depolama uygulamaları ek üretim ihtiyacını önleyebilir böylece geleneksel santrallerin yükünü almış olur. Ek üretim ihtiyacı depolama birimlerinden sağlandığı takdirde enerji maliyetleri sabit tutulabilir ve olumsuz çevresel etkiler ve verimsiz işletme şartları önlenmiş olur.

Enerji depolama uygulamalarının çoğu, tepe güç taleplerinin karşılanması için kullanılan belirli aralıklarda kısa süreli devreye giren güç kaynakları olarak

kullanıma elverişli olmaktadır. Tepe güç kaynağı olarak adlandırılan güç kaynakları geleneksel yapıda kısa süreli devreye alınıp çıkarılabilen enerji santralleri iken gelecek gelişmiş güç sistemleri içerisinde bu amaçla enerji depolama uygulamalarının kullanılması mümkündür. Geleneksel yapıda bu tip tepe güç kaynakları olarak doğalgaz kaynaklı gaz türbini sistemlerinden oluşan santraller, hidroelektrik santraller kullanılmakta veya enerji ithalatı gerçekleştirilmektedir. Bu santraller yüksek yatırım maliyetleri olan sistemlerdir, doğal gaz yakıt kullanımı sera gazı salınımı sebep olmaktadır. Bunun yerine enerji depolama uygulamaları ile desteklenmiş YEK kullanımı veya doğrudan geleneksel enerji santralleri ile birlikte enerji depolama kullanılması yöntemi bir alternatif olabilir.

Geleneksel sistemde tepe güç talebinin karşılanmasında doğalgaz santralleri veya hidroelektrik santraller kullanılmaktadır. Bu sistemlere alternatif olarak depolama uygulamaları kullanılması oldukça önemli bir çözüm niteliğindedir. Hidroelektrik santrallerin pompalamalı hidroelektrik santraller olarak kullanılması ile bir depolama uygulaması sağlanabilir. Böylece talep güç eğrisinin daha sınırlı bir aralıkta değişimi sağlanmış olmaktadır. Enerji depolama uygulamalarının çoğu geleneksel tepe güç santrallerinden çok daha hızlı tepki sürelerine sahiptir. Dağıtık olarak tesis edilen depolama uygulamalarının şebeke işletmecileri tarafından merkezi kontrolü ile talep tarafı yönetimi işlevleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu tarz bir işletim sisteminde dağıtık depolama uygulamaları bütün bir blok halinde işletilebileceği gibi, ihtiyaca göre bağımsız birimler olarak da işletilebilmektedir. Tepe güç ihtiyacının depolama sistemlerinden sağlanması ile geleneksel üretim santrallerinin optimum kapasitede işletilmesi sağlanabilecek böylece hem işletme ömrü bakımından fayda sağlanabilecek hem de sera gazı salım değerlerinin düşürülmesine katkı sağlanabilecektir [124].

Enerji depolama uygulamalarının şebeke altyapısına faydaları; basit bir ifade ile dağıtık üretim prensibinin desteklenmesi ve dolayısıyla merkezi santrallerden son tüketicilere doğru iletim ve dağıtım hatlarından taşınan güç değerlerinin azaltılması, tepe değerlerin düşürülmesi gibi verimlilik sağlayan etkenlerden oluşmaktadır. Özellikle iletim ve dağıtım hatlarında yetersizlik görülen noktaların desteklenmesine yönelik bir planlama gerekirse, depolama birimlerinin bu noktalar yakınına konumlandırılması ve hatta sistemin YEK entegrasyonu ile desteklenmesi oldukça



faydalı olacaktır ve iletim dağıtım hatları için düşünölen yeni veya ek yatırım planlarını erteleyebilecektir. Enerji depolama sistemleri güç sistemine ihtiyaç duyulan her noktadan bağlanabilmektedir. Şebekede aşırı yüklü durumda olan veya tepe talep değeri için yetersiz kalan iletim dağıtım hatlarının yükünün azaltılması için gereken noktalardan depolama uygulamalarının şebeke entegrasyonu sağlanabilmektedir. Böyle bir sistemde aşırı yüklenmelerin önlenmesi depolama uygulamalarının zaman/yük kaydırma işlevi ile sağlanmaktadır. Talebin düşük olduğu zamanlarda veya doğrudan YEK'lerden depolanan enerjinin talep değeri yükseldiği dönemlerde kullanıma sunulması sayesinde şebekeden çekilen tepe talep değeri bastırılmış olmakta şebeke yüklenmesi düşürölmekte böylece verimlilik sağlandığı gibi, ekipman performansları ve işletme ömürleri desteklenmektedir. Sonuç olarak iletim dağıtım sistemleri için gerekebilecek ek yatırımlar ertelenmiş olmaktadır.

### **2.3.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarında enerji depolamanın faydaları**

Enerji depolama uygulamaları özellikle akıllı şebeke işlevselliği ve dağıtık üretim prensibinin uygulanabilmesi konusunda YEK entegrasyonu için anahtar çözüm niteliğindedir. YEK entegrasyonunda depolama uygulamaları tampon görevi üstlenerek YEK çıkış gücündeki değışimin sınırlanmasını sağlayabilir. Enerji üretimi ile tüketim arasında dengeli işletme sağlayarak, frekans regölasyonu yapar. Rüzgâr ve güneş kaynaklı yenilenebilir enerji üretim birimlerinde çıkış gücü gün içerisindeki hava şartlarına bağlı olarak kısa süreli ani değışimler gösterebildiği gibi mevsimsel şartlara bağlı olarak da uzun süreli değışimler de gösterebilmektedir. Bu güç dalgalanmalarının her türünün önlenmesine yönelik uygun karakteristik yapıya sahip enerji depolama uygulamaları gerçekleştirmek mümkündür. Kısa süreli ani güç salınımlarının bastırılması için batarya, volan, ultrakapasitör gibi enerji depolama teknolojileri kullanılabildiği gibi uzun dönemlere etki eden mevsimsel değışimleri yönetebilmek için de pompalı hidroelektrik enerji depolama, sıkıştırılmış hava ile enerji depolama gibi farklı uygulamalar tercih edilebilmektedir. Çok daha etkin bir depolama karakteristiği sağlamak üzere çeşitli depolama uygulamalarının bir arada kullanıldığı hibrit enerji depolama sistemleri de uygulanabilmektedir. Bu tarz hibrit enerji depolama uygulamalarından olan ultrakapasitör ve batarya birleşiminden oluşan sistemler özellikle rüzgâr türbinleri veya FV sistemlerin ürettiği ani değışim

gösteren dalgalı güç çıkışının düzenlenmesi bakımından gelecek vaat etmektedir. Enerji depolama uygulamalarının faydaları ve kullanım alanlarına genel bir bakış açısı oluşturulmasına yönelik verilen bu bilgiler doğrultusunda ilerleyen bölümlerde enerji depolama teknolojilerinin uygulama alanları ve işletme prensipleri daha detaylı açıklanarak sağlanabilecek faydalar her uygulama konusu sonunda değerlendirilmektedir [125].

### **2.3.2. Dağıtık enerji depolama faydaları**

Dağıtık enerji depolama olarak tarif edilen uygulama, elektrik dağıtım sistemi içerisinde dağıtık şekilde ve son tüketicilere yakın konumlarda yerleştirilen enerji depolama sistemlerinden oluşmaktadır. Bir veya birkaç büyük kapasiteli depolama birimi yerine dağıtım bölgesinde bu şekilde küçük güçlü çok sayıda depolama sistemi kullanılması daha verimli olabilmektedir. Bu sistem geleceğin akıllı şebekeleri ve enerji piyasası için oldukça uygun bir zemine oturmaktadır, modüler, akıllı, dağıtık sistem olarak akıllı şebeke konseptine uygun özelliktedir. Bu sistem özellikle şebeke işletmecileri tarafından uygulanması halinde dağıtım sistemleri için oldukça önemli bileşenler olabilmektedir.

Dağıtık enerji depolama, dağıtım şebekeleri içerisinde, konut veya ticari binalar gibi son tüketicilere yakın konumlandırılmış, modüler, dağıtık enerji depolama birimlerinden oluşmaktadır. Dağıtık enerji depolama sistemi, dağıtım şebekesi bir arada bir ada işletme modu oluşturabilecek şekilde düzenlenmiştir. Herhangi bir sebeple dağıtım bölgesinin ana şebekeden ayrılması halinde, bataryalar deşarj olduğu müddetce ada modunda çalışarak bölgenin enerji kesintisi önlenmektedir.

Dağıtık enerji depolama birçok muhtemel kombinasyon ile oldukça fazla fayda yaratabilmektedir; güçlü, hızlı cevap yeteneği olan, esnek bir güç kaynağı olarak yedek güç olarak kullanılabilir. Elektrik tarifesindeki farklılara göre depolama ve deşarj sağlanarak elektriğin ucuz olduğu aralıkta şarj sağlayıp, elektriğin pahalı olduğu aralıkta tüketicilere depolanmış enerjiyi sunabilir. Ayrıca bu sistemin özellikle önemli bir işlevi olarak, şebeke güç kalitesi şartlarının sağlanmasına, kararlılık ve güvenilirlik sağlanmasına hizmet edebilir. Tepe talep değerlerine depolamadan hizmet sağlaması ve bu enerji ihtiyacını talebin düşük olduğu aralıkta elde etmesi sayesinde yükselen talep değerlerine cevap verebilmek için gereken

muhtemel iletim ve dağıtım tesisi yatırımlarının ertelenmesini sağlayabilir. Yine bu uygulama, YEK entegrasyonu konusunda önemli bir görev üstlenebilir. Özellikle dağıtım şebekelerine bağlı çatı tipi dağıtık FV sistemlerin yaygınlaşması halinde veya benzer şekilde dağıtım şebekesinde bulunan rüzgâr türbinleri olması halinde bu sistemlerin şebekede oluşturdukları güç dalgalanması ve güç kalitesi problemlerinin önlenmesinde dağıtık enerji depolama yöntemi ile enerji arz ve talep dengesinin sağlanması, YEK dalgalılık etkilerinin bastırılması konularında başarılı bir etki gösterebilmektedir.

Dağıtık enerji depolama sisteminde esas önemli nokta; depolama sisteminin boyutlandırılması ve dağıtım şebekesi içerisinde konumlandırılması olduğundan enerji depolama sistemi olarak ele alınmasının dışında uygulamaya özel, farklı bir değer tanımı yapılmamıştır. Uygulama yöntemi olarak ele alındığında ise özellikle şebeke işletmecileri tarafından ele alınması gereken, güçlü bir yöntem olarak dikkat çekmektedir. Akıllı şebeke ve dağıtık üretim kavramlarına yapısal uygunluğu ile bu sistemlerle bütünleşen bir altyapı özelliği taşımaktadır [126].

### **2.3.3. Son tüketici için enerji depolamanın faydaları**

Son tüketici uygulaması olarak enerji depolama, elektrik faturalarından tasarruf amaçlı kullanılabilir. Çok zamanlı tarife uygulanan elektrik faturalarında tasarruf sağlayabilmek için şebeke tarife değerlerine ve sürelerine uygun ayarlanmış enerji depolama birimleri içeren enerji yönetim sistemleri ile tarifinin ucuz olduğu aralıklarda depolanan enerjinin, tarifinin pahalı olduğu ve talep değerinin yükseldiği zamanlarda kullanılması sağlanabilir, böylece faturada tasarruf sağlanabilmektedir. Bu ekonomik faydanın yanı sıra depolama sisteminin sunduğu kesintisiz güç kaynağı özelliği ile de enerji sürekliliği sağlanabilmektedir. Özellikle endüstriyel ve ticari tüketiciler için uygulanan sözleşme gücü ve güç aşımı durumlarında ödenen ceza bedellerinin önlenmesinde yine depolama uygulamalarından yararlanılabilir, böyle bir uygulamada güç aşımına sebep olan tepe güç talepleri depolama biriminden sağlanarak şebekeden fazla güç çekilmesi önlenmiş olur. Gerek konut yüklerinde gerekse endüstriyel ve ticari yüklerde, yukarıda bahsedilen şekilde depolama uygulamaları YEK kullanımı ile entegre şekilde daha etkin sonuçlar sağlayabilmektedir [127].



çok zamanlı tarife sistemi uygulanan bir ücretlendirme yapısı söz konusu ise bu uygulama ile tarifenin ucuz olduğu aralıkta depolama yapılmış, tarifenin pahalı olduğu aralıkta ise talep gücün bir kısmı şebekeden çekilirken bir kısmı da depolama biriminden karşılanarak ekonomik tasarruf sağlanmış olmaktadır. Bu uygulama ara kazanç (arbitraj) olarak adlandırılmaktadır [128].

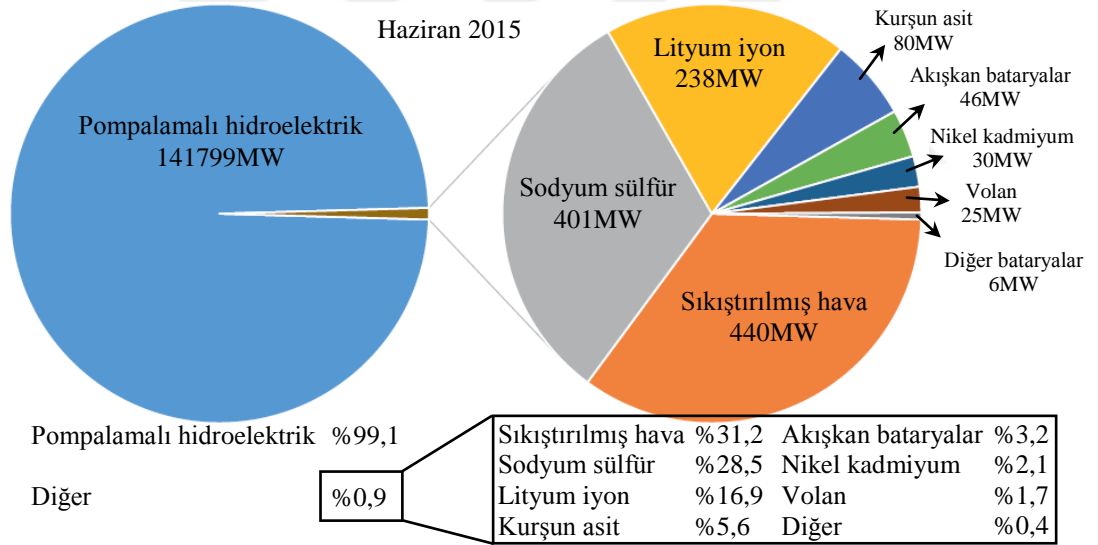
#### **2.4. Dünyadaki Enerji Depolama Sistemlerinin Son Durumu**

Gelişen teknoloji enerji depolama sistemlerini daha verimli hale getirirken maliyetlerinin de azalmasını sağlamaktadır. Bu durum depolama sistemlerinin hem son tüketici hem de yatırımcı açısından kullanılabilirliğini arttırmaktadır. Enerji endüstrisinde modern şebeke yapılarının nasıl düzenlenmesi gerektiği sorununa, depolama teknolojisi önemli bir çözüm sunmaktadır. Sonuç olarak enerji depolama sistemleri küresel olarak ticari canlılığını daha önce olmadığı kadar kazanmıştır. 2015'in ilk çeyreğinde dünya genelinde, yeni kurulan enerji depolama projelerinin 1,1GW'ın üzerinde olduğu açıklanmıştır [122].

Enerji sürekliliğinin ve güvenliğinin sağlanması açısından büyük önem arz eden enerji depolama sistemleri henüz emekleme aşamasında olmakla birlikte hızla büyümektedir. Dünyada Amerika, enerji depolama teknoloji ve pazar gelişiminde ön sıradadır. Bataryaların gelişmesi, özellikle Amerika firmaları için artan ihracat fırsatlarına liderlik ederken maliyetleri de aşağıya çekmektedir. Ocak 2014 itibariyle, ABD'de, Enerji Bakanlığı verilerine göre çalışmakta olan 180 enerji depolama sistemi mevcuttur. Belirtilen sistemlerin neredeyse yarısı (%48), piyasanın dikkatini çekmeye çalışan üreticiler tarafından kurulan batarya enerji depolama sistemidir. Proje bazında bakıldığında, %29'luk kısmı ısı depolama sistemleri, %20'lik kısmı pompalamalı su depolama sistemleri, yaklaşık %1,5'lik kısmı ise sıkıştırılmış hava ve volan enerji depolama sistemlerinden oluşmaktadır. Ancak proje sayısı yerine depolama kapasitesi açısından durum incelendiğinde 20,3GW kurulu güç ile pompalamalı su enerji depolama sistemlerinin büyük bir ağırlığı görülmektedir. Diğer teknolojiler için kapasite durumu ise 50MW ısı depolama, 20MW batarya depolama, 11MW sıkıştırılmış hava depolama ve 2MW volan enerji depolama sistemi şeklinde sıralanmaktadır. Projeler ile ilgili diğer önemli bir veri de 2000 yılından önceki enerji depolama projelerinin çoğunun pompalamalı su depolama

projeleri, son beş yıl içerisinde hazırlanan projelerin ise yüksek teknoloji gerektiren diğer depolama yöntemleri ile ilgili pilot projeler olduğu görülmektedir. Pilot projeler, seçilen yöntemin gerçek hayatta çalışıp çalışmadığını göstermesi açısından önemli bir adım olup sonraki aşama olan ticarileştirmeye ön ayak olmaktadır.

Enerji depolama teknolojilerine yatırım yapan ülkeler arasında Amerika'nın ardından sırasıyla Çin, Japonya, Hindistan, Almanya ve Avustralya gelmektedir. Dünya genelinde enerji depolama teknolojilerinin 2015 yılına ait dağılımına baktığımızda, pompalamalı hidroelektrik ile enerji depolama teknolojisi %99,1'lik oran ile 141GW depolama kapasitesine sahiptir. Küresel anlamda çok büyük öneme sahip bu depolama teknolojisi, Japonya'da 26GW, Çin'de 23GW ve Amerika'da 20GW'lık büyük güçlü uygulamaları mevcuttur. Avrupa'da 230 pompalamalı hidroelektrik ile enerji depolama 41GW kapasiteye sahiptir. Şekil 2.9'da dünya genelinde kullanılan depolama teknolojilerinin 2015 yılına ait toplam kapasiteleri verilmektedir [129].

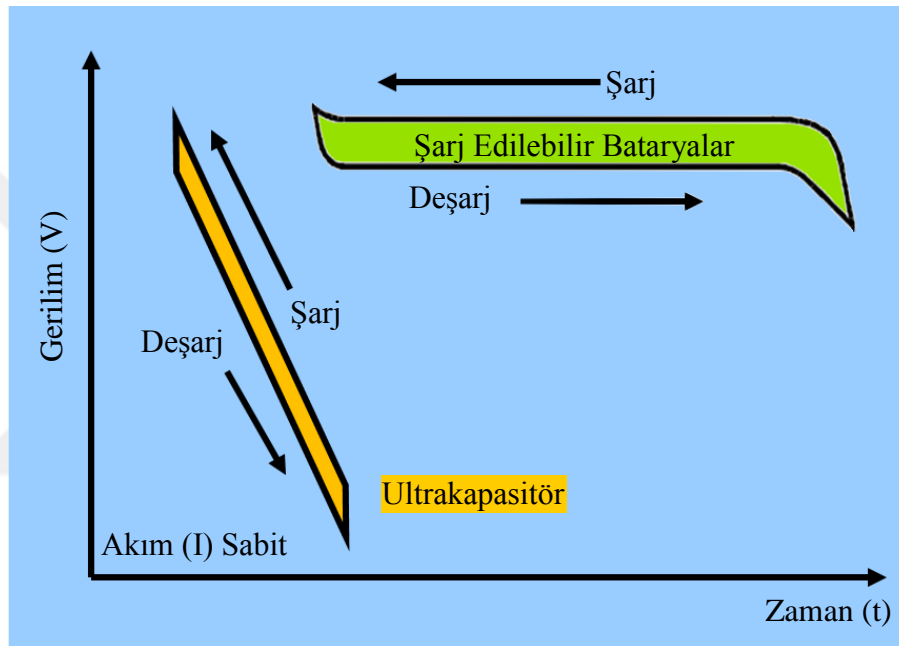


Şekil 2.9. 2015 yılına ait küresel enerji depolama kapasite dağılımı [129]

## 2.5. Hibrit Enerji Depolama Sistemi

Birden fazla enerji depolama sistemi birbirini tamamlayıcı performans özellikleri ile birlikte kullanıldığında ortaya çıkan sistem bir HEDS olmaktadır. Batarya; maliyet bakımından en uygun enerji depolama teknolojilerinden biridir. Bununla beraber bataryaların enerji sağlayıcısı olarak kullanılması, ani güç değişimlerine cevap verebilmektedirler. Fakat bu ani güç değişimleri bataryaların kullanım ömrünü ciddi oranda azaltmaktadır. Bir ultrakapasitörde enerji depolanması, bataryadaki gibi bir

elektrokimyasal süreç yerine bir statik yüklenme olayı ile gerçekleşmektedir. Bu nedenle ultrakapasitörler bataryalara göre daha yüksek güç yoğunluğuna sahiptir. Bundan dolayı daha iyi güç ve enerji performansı için bu iki depolama cihazını birleştirmek avantajlı olacaktır. Batarya ve ultrakapasitör, akım veya gücün uygun şekilde ikisi arasında paylaşılması ile aynı anda şarj veya deşarj olabilmektedir. Şekil 2.10'da batarya ve ultrakapasitör depolama teknolojisinin zamana bağlı olarak terminal uçlarındaki değişimi verilmektedir. Bataryanın daha uzun süre enerji sağladığı görülürken ultrakapasitörler çok kısa sürede enerji verebilmektedir.



Şekil 2.10. Batarya ve ultrakapasitörün zamana göre şarj/deşarjı

Anlık yüksek güç ihtiyacının olduğu anlarda yükün gereksinim duyduğu akımı karşılamada batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji depolama sisteminin kullanılması önem arz etmektedir. Böyle bir durumda bataryanın ve ultrakapasitörün güç yoğunluklarına bakmak aydınlatıcı olacaktır. Bataryalar genelde 10-1000W/kg güç yoğunluğuna sahipken, ultrakapasitörler 10-10<sup>6</sup>W/kg'lık güç yoğunluğuna sahiptirler. HEDS kullanıldığında ultrakapasitör, bataryanın tek başına karşılayamayacağı büyüklükteki güç talebine destek verecektir. Bu durumun bir getirisi de aşırı zorlanmalara maruz kalmayan bataryaların ömrünün uzamasıdır.

Bazı durumlarda uzun süreli ancak yüksek güç talebi olmayan yüklerin taleplerinin karşılanması gerekmektedir. Böyle bir durumda enerji depolama sistemi olarak

sadece ultrakapasitör kullanmak yeterli olmayacaktır. Düşük enerji yoğunluğuna sahip ultrakapasitörler uzun süreli yüklerin taleplerini karşılamakta yetersiz kalmaktadırlar. Bataryalar ultrakapasitörlere göre 100 kata kadar daha fazla enerji yoğunluğuna sahiptirler. Bu nedenle ultrakapasitör ünitesinin yanında yüksek enerji yoğunluğuna sahip batarya grubunun da eklenmesi yerinde olacaktır.

Batarya enerji depolama sistemleri birçok alanda kullanılmaktadırlar. Ancak bu sistemlerin iki önemli dezavantajı bulunmaktadır. Bunlardan biri sınırlı deşarj derinliği diğeri ise çevrim ömrü olarak adlandırılan her bir çevrimde azalan depolama kapasitesidir. Ultrakapasitör enerji depolama sistemleri ise bu dezavantajlardan hiçbirine sahip değildir. Bununla birlikte ultrakapasitörlü enerji depolama sistemleri hızlı tepkiye sahiptir ve yüksek güç değerlerine çıkabilirler. İlave olarak ultrakapasitörler yüksek sıcaklığa ve vibrasyona da bataryalardan daha dayanıklıdırlar. Ultrakapasitörlerin önemli özelliklerinden bir tanesi de büyük güç değerlerini çok kısa bir zamanda üzerlerine alabilmeleridir. Ultrakapasitörlerin kullanıldığı en büyük alanlardan birisi de elektrikli taşıtlardır. Özellikle dünyada çığır açıcı nitelikte yeraltı treni sistemlerinde kullanılmaktadır. Bilinen yeraltı treni enerji ağlarının ortadan kaldırılmasında ultrakapasitörler büyük rol oynamaktadır. Duraklarda yolcu indirme-bindirme esnasında şarj olarak bir diğeri durağa kadar herhangi bir havai hattan enerji almayan yeraltı treni sistemleri gelişmiş ülkelerde uygulanmaya başlanmıştır. Bunun dışında ultrakapasitörlerin elektrikli taşıtlardaki bir diğeri uygulama alanı ise faydalı frenlemedir. Büyük kütlelere sahip taşıtların kısa zamanda durdurulması anlık olarak büyük güçlerin ortaya çıkması demektir. Bu yüksek enerji değerlerinin birkaç on saniye içerisinde bataryalara depolanması mümkün olmamaktadır. Ancak ultrakapasitörler yapıları itibariyle bu enerjiyi depolayabilmektedirler. Bu sayede enerji verimliliğine katkı sağlamaktadırlar.

FV ve rüzgâr enerji kaynakları kesintili ve sürekli olmayan bir yenilenebilir enerji türüdür. Bu nedenle batarya ve ultrakapasitör hibrit enerji depolama sistemi ile enerjinin sürekliliğinden yararlanılarak, YEK'nın daha etkin bir şekilde kullanılması sağlanabilir. Batarya ve ultrakapasitörden oluşan HEDS ile bataryaların ömrünü ve depolama kapasitesini maksimum şekilde kullanmayı ve şarj/deşarj çevrimini de minimum seviyeye getirmeyi amaçlamaktadır. Bu sistemlerde enerjinin sürekliliği olmadığı için HEDS ile özellikle şebekeden bağımsız güç sistemlerinde daha



kapsamlı kullanılabilir. Batarya ve ultrakapasitör depolama teknolojisi şebeke bağlantılı olarak da HEDS’de kullanılabilir [130-136].

Bir hibrit enerji depolama birimi oluşturmak için, birbirinden farklı özellik ve teknolojik alt yapıya sahip iki depolama ünitesinin direkt veya dönüştürücü birimler ile birleştirilmesi yeterlidir. Depolama teknolojileri birbirleri açısından değişik özellikler göstermektedir.

Teknik olarak bakıldığında; kimyasal, kinetik, manyetik ve elektriksel olarak depolama yeteneğine sahip yapılar bulunmaktadır. Ayrıca her bir depolama birimi enerjisini elektriksel olarak farklı formlarda verebilmektedir. Batarya, ultrakapasitör, hidrojenli yakıt pilleri ve manyetik enerji depolama birimleri elektriksel olarak DA yapıda depolarken, pompalamalı su, sıkıştırılmış hava ve volan depolama birimi AA olarak enerjisini depolayabilmektedir. Kullanılacak sistem ve gereksinime göre bu depolama teknolojileri DA veya AA bir barada gerekliyse güç dönüştürücüleri de kullanarak birleştirilmektedir.

Hacimsel ve boyut olarak bakıldığında; pompalamalı su ve sıkıştırılmış hava genellikle, batarya, ultrakapasitör, hidrojenli yakıt pilleri, manyetik ve volan enerji depolama birimlerine göre daha geniş bir kullanım alanı gerektiren depolama teknolojileridir. Pompalamalı su ve sıkıştırılmış hava depolama teknolojileri coğrafik açıdan her yere kurulması mümkün olmamaktadır. Pompalamalı su depolama teknolojisi için yüksek ve geniş alana ihtiyaç duyulmaktadır. Sıkıştırılmış hava depolama teknolojisi ise özel zemin altyapısı gerektirdiğinden her yere kurulması mümkün olmamaktadır. Depolama ihtiyacının gücüne bağlı olarak farklı depolama teknolojileri birlikte kullanılarak talep gücünü karşılayacaktır. Batarya, ultrakapasitör, hidrojenli yakıt pilleri, manyetik ve volan enerji depolama teknolojileri diğer depolama birimlerine göre daha kompakt olduklarından dolayı hem büyük güçlü hem de küçük güçlü uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kurulum ve kullanım kolaylığı açısından bakıldığında; pompalanmış su ve sıkıştırılmış hava depolama birimleri kurulum maliyeti ve zorluğu oldukça fazladır. Ayrıca kurulum aşamasında yüksek teknolojik ve mühendislik gereksinime ihtiyaç duyulmaktadır. Manyetik, hidrojenli yakıt pilleri ve volan enerji depolama

teknolojileri ise ileri teknoloji alt yapısı gerektiren depolama birimleridir. Özellikle hidrojenli yakıt pilleri ve volan enerji depolama teknolojilerinde kullanım aşamasında alınması gereken tedbirler söz konusudur. Hidrojenli yakıt pil depolama teknolojisinde yakıt tankı olan hidrojenin aşırı yanıcı madde olmasından dolayı güvenli bir çalışma ortamı sağlanmalıdır. Volan enerji depolama teknolojisinde ise enerjii kinetik olarak çok yüksek hızlarda depoladığından dolayı fiziksel olarak koruyucu önlemlerin alınması gerekmektedir. Büyük güçlü volan depolama uygulamaları güvenlik sebebiyle yeraltına yerleştirilerek kullanılmaktadır. Batarya ve ultrakapasitör depolama teknolojileri kullanım kolaylığı açısından oldukça kolay yapıya sahip depolama birimleridir. Batarya depolama teknolojisinde dikkat edilmesi gereken en önemli konu şarj/deşarj sırasında kontrollü bir şekilde yapılmasıdır. Kontrolsüz ve düzgün olmayan şarj/deşarj işlemleri bataryaya zarar vermektedir. Batarya ve ultrakapasitör depolama birimi enerjii direkt olarak DA elektrik enerjisi olarak depolar. Bu özelliğinden dolayı bu iki depolama birimi bazı uygulamalar için paralel bağlanarak kullanılabilir. Batarya teknolojisi yaygın olarak kullanılan depolama birimi olduğundan maliyetleri gelişen teknolojik yeniliklerle birlikte düşmektedir. Ultrakapasitör depolama teknolojisi ise yeni gelişen bir yapıya sahip olduğundan günümüz teknolojisinde maliyetleri bataryalara kıyasla oldukça yüksektir.

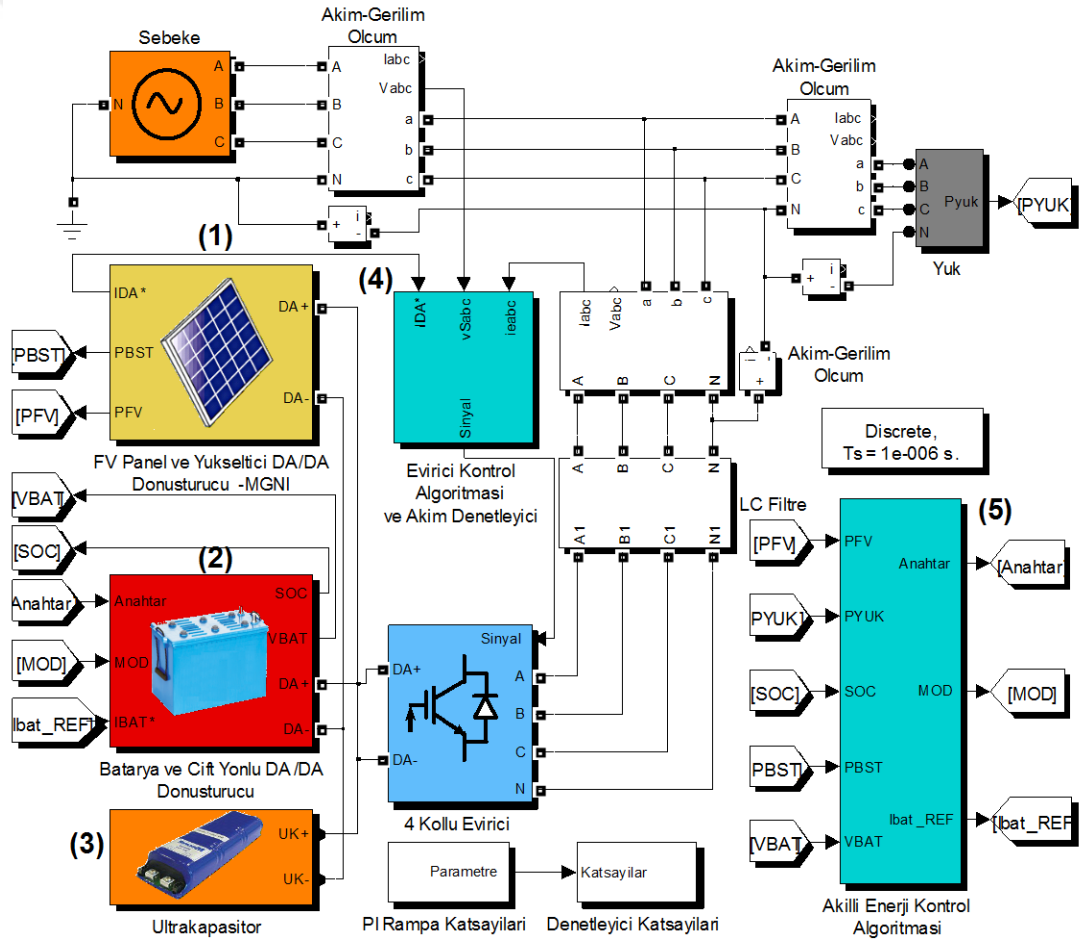
Depolanan enerji miktarı açısından bakıldığında, pompalamalı su ve sıkıştırılmış hava depolama teknolojileri genellikle çok yüksek güçlerde yapılmaktadır. Bu depolama birimleri sadece bir konut değil daha çok bölgesel bir enerji ihtiyacı karşılamak adına kurulmaktadır. Böylece depolama süresi açısından saat ve günler olarak uzun süreli enerji ihtiyacı karşılanmaktadır. Batarya depolama teknolojisi de genellikle uzun süreli enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan depolama birimidir. Kullanılan batarya kapasitesi ve sayısında göre enerji ihtiyacı saatler bazında karşılanabilmektedir. Ultrakapasitör, hidrojenli yakıt pilleri, manyetik ve volan enerji depolama teknolojileri ise daha çok ani güç ihtiyacında çözüm olarak kullanılmaktadır. Yüksek güçlü sistemlerin birden devreye girmesi durumda sistemde oluşabilecek güç çökmesini engellemek adına, bu depolama teknolojileri kullanılarak talep edilen enerjinin sürekliliği kaliteli bir şekilde sağlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında iyi bir performans sağlamak için batarya ve ultrakapasitör içeren bir hibrit enerji depolama sistemi gerçekleştirilmektedir. Batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji depolama sisteminden faydalanarak hem batarya boyutları düşürülebilir hem de daha yüksek şarj durumu sağlanabilir. Ultrakapasitör bataryaya göre çok daha büyük güç yoğunluğuna sahip olduğundan daha kısa zaman periyodunda çok daha büyük güç desteği sağlayabilir. Buna karşın batarya daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir, ultrakapasitörle karşılaştırıldığında daha yüksek enerji depolayabilir ve daha uzun süre enerji sağlayabilir. HEDS ile tepe güç ihtiyacı ultrakapasitörlerden karşılanır ve bataryalar daha uzun süreli/sürekli, daha düşük güç ihtiyacını karşılarlar.



### 3. HEDS SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Tez çalışması kapsamında önerilen, 3 fazlı 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı HEDS Matlab/Simulink blok diyagramı Şekil 2.1’de verilmektedir. Bu simülasyon çalışmasında, FV panel dizisi, DA/DA yükseltici dönüştürücü, batarya, çift yönlü DA/DA dönüştürücü simüle edilerek Maksimum Güç Noktası İzleme (MGNI) tekniği, kontrol algoritması, akım denetleyici ve enerji kontrol algoritması ile sistemin benzetimi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.1. 3 fazlı 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı HEDS sistemin Matlab/Simulink blok diyagramı

Deneysel sistemde kullanılan Yingli YGE-60 güneş panelleri 10’u seri olmak üzere 2

sıra paralel kol oluşturularak 20 adet FV panel kullanılmıştır. Simülasyon ortamında, kurulan FV dizi grubu simüle edilerek aynı akım, gerilim ve güç değerleri elde edilmektedir. Simülasyonda kullanılan sistem parametreleri Tablo 2.1’de verilmektedir.

Tablo 3.1. Simülasyonda kullanılan sistem parametreleri

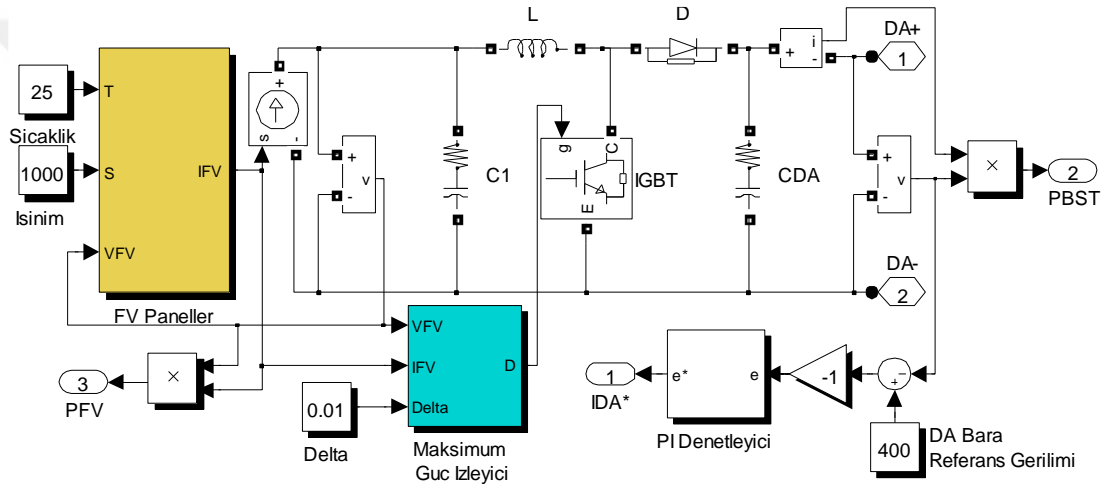
Parametreler		Değeri
<b>FV Panel Dizisi</b>	Açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ )	377V
	Kısa devre akımı ( $I_{sc}$ )	18,02A
	Maksimum güç noktasındaki gerilim değeri ( $V_m$ )	300V
	Maksimum güç noktasındaki akım değeri ( $I_m$ )	16,98A
<b>Şebeke</b>	Gerilimi ( $v_{şabc}$ )	110V <sub>rms</sub> /Faz- Nötr
	Frekansı (f)	50Hz
	Empedansı ( $R_ş, L_ş$ )	10m $\Omega$ ,1mH
<b>Yük</b>	Dengeli omik yük	20 $\Omega$ , 3/faz
	Dengesiz omik yük	20 $\Omega$ , 2 faz 15 $\Omega$ , tek faz
<b>Batarya</b>	Batarya gerilimi ( $V_{BAT}$ )	200V
<b>Grubu</b>	Batarya kapasitesi ( $C_{BAT}$ )	160Ah
<b>Ultrakapasitör</b>	Ultrakapasitör gerilimi ( $V_{UK}$ )	400V
<b>Grubu</b>	Ultrakapasitör kapasitesi ( $C_{UK}$ )	3,93F

### 3.1. FV Panel Dizisi, DA/DA Yükseltici Dönüştürücü ve Saptır-Gözle Kontrol Algoritması

Şekil 3.1’de, (1) numaralı blokta FV panel dizisi, DA/DA yükseltici dönüştürücü ve MGNİ yöntemi olan saptır-gözle kontrol algoritması bulunmaktadır. FV panel dizisi, DA/DA yükseltici dönüştürücü ve MGNİ algoritmasının Matlab/Simulink blok diyagramı Şekil 3.2’de verilmektedir. Saptır-gözle yöntemi dalgalanan FV panel dizisi gerilim veya akımını aralıklarla değiştirir ve FV çıkış gücünü bir önceki güç değeri ile karşılaştırarak çalışır. FV panel çalışma gerilimi değişir ve eğer güç

yükselirse kontrol sistemi FV çalışma noktası bu yönde değişir aksi takdirde çalışma noktası ters yönde hareket eder. Sonraki diğer çevrimde algoritma aynı şekilde devam eder.

Sistemin DA bara gerilim kontrolü Şekil 3.2’de (1) numaralı blok diyagramında verilmektedir. FV paneller, batarya grubu ve ultrakapasitör DA baraya bağlanarak tek bir hat üzerinden eviriciye enerji aktarımı yapılmaktadır. DA bara gerilim kontrolü tek bir PI denetleyici ile sağlanarak 400V’ta sabit tutulmaktadır. Böylece DA bara gerilim kontrolü hem yükseltici hem batarya grubu hem de ultrakapasitör için sağlanarak eviricinin şebeke ve yüke aktarması gereken akımı belirlemektedir.

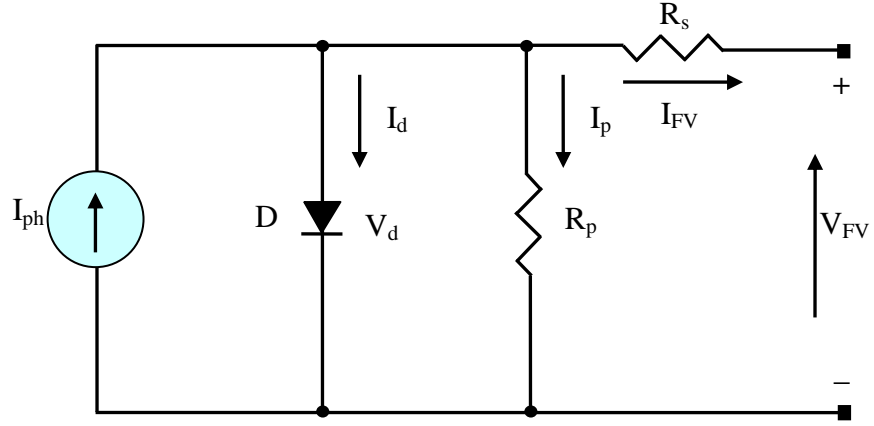


Şekil 3.2. FV panel dizisi ve Saptır-gözle kontrol algoritması blok diyagramı

### 3.1.1. Güneş pili elektriksel modeli

Bir güneş pilinin akım–gerilim (I-V) karakteristiği ve bu eğriden çıkarılabilecek güç tanımlamaları için, yaygın olarak tek diyot (single exponent equation) modeli kullanılmaktadır. Bu modelin dayandığı eşdeğer devre prensip olarak Şekil 3.3’te verilmektedir. Eşdeğer devrede güneş paneli, ışığa göre değişen bir akım kaynağı gibi davranmaktadır. I-V ilişkisi ise Denklem (3.1) ile verilmektedir.

$$I_{FV} = I_{ph} - I_d - I_p = I_{ph} - I_o \left[ e^{\left( \frac{qV_d}{KFT_{FV}} \right) - 1} \right] - \frac{V_d}{R_p} \quad (3.1)$$



Şekil 3.3. Tek diyotlu güneş pili eşdeğer devresi

Bu denklemde,

$I_{sc}$  = Işık fotonlarıyla üretilen akım veya kısa devre akımı, (A)

$I_o$  = Ters sızıntı akımı, (A)

$I_d$  = Birleşimdeki (jonksiyon bölgesindeki) diyot akımı, (A)

$I_p$  = Paralel kol direncinden geçen akım, (A)

$R_p$  = Paralel kol direnci, (ohm)

$R_s$  = Seri direnç, (ohm)

$q$  = Elektron yükü, ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  c.)

$K$  = Boltzman sabiti, ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  j/K°)

$T_{FV}$  = Hücrenin mutlak sıcaklığı, (K°)

$F_{FV}$  = Hücrenin ideal faktörü

$I_{FV}$  = FV panel akımı, (A)

$V_d$  = Diyot gerilimi, (V)

$V_{FV}$  = FV panel çıkış gerilimi, (V)

$I_{ph}$ , ışık fotonları ile üretilen akım esas olarak hücre üzerine düşen ışınım ve hücre sıcaklığına bağlı olarak Denklem (3.2)'deki gibi değişmektedir.

$$I_{ph} = [\mu_{sc}(T_c - T_r) + I_{sc}]S \quad (3.2)$$

Buradaki  $\mu_{sc}$  hücrenin kısa devre akımında sıcaklık katsayısı,  $T_r$  hücrenin referans sıcaklığı,  $I_{sc}$   $1kW/m^2$  ve  $25^\circ C$ 'deki hücrenin kısa devre akımı ve  $S$  ise  $W/m^2$  cinsinden güneş radyasyonudur.

Tek diyot modeliyle I-V eğrisini belirlemek için ilgili güneş piline ait özel  $I_o$  ve  $F_{FV}$  parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu parametreler genellikle üretici firma kataloglarında yoktur.  $I_o$  sızıntı akımı hassas ölçüm olanakları ile ölçülebilir. Ayrıca değişen sıcaklıklara göre,  $I_o$  teriminin yeni değerleri, analizde göz önünde tutulmalıdır. Çünkü  $I_o$ , sıcaklıkla üstel olarak değişmektedir.  $I_o$  doyma akımı Denklem (3.3)'te verilmektedir.

$$I_o = I_{o\alpha} \left[ \frac{T_{FV}}{T_r} \right]^3 e \left[ \frac{qV_{og}}{KF} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (3.3)$$

$$I_{o\alpha} = \frac{I_{sc}}{e^{\left( \frac{qV_{FV}}{KFT_c} \right)}} \quad (3.4)$$

Buradaki,

$I_{o\alpha}$  = Güneş ışınımı ve referans sıcaklığında hücrenin ters doygunluk akımı, (A)

$V_g$  = Hücre tarafından kullanılan yarı iletken bant boşluk gerilimi, (V)

$V_{oc}$  = Hücrenin açık devre gerilimi, (V)

$F_{FV}$  = Hücrenin ideal faktörü kullanılan hücre teknolojiye bağlı olarak değişmektedir.

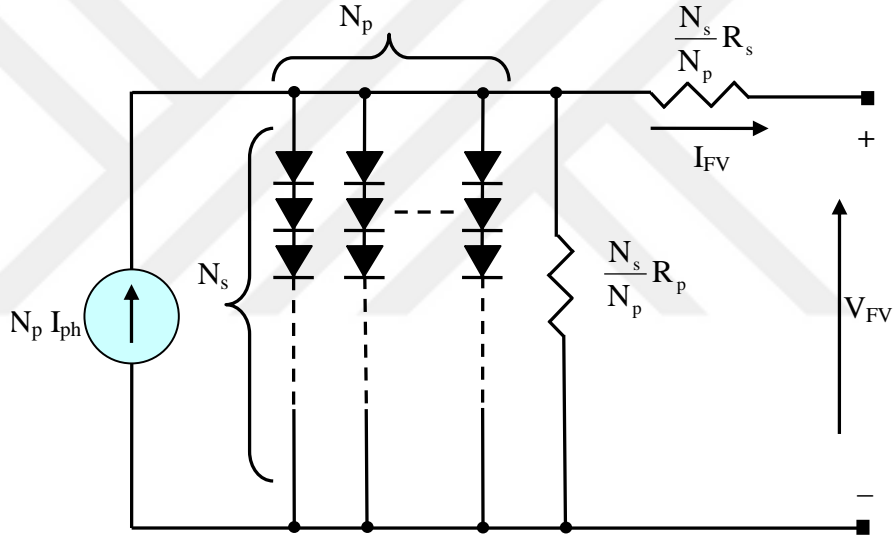
Tablo 3.2'de F faktörünün kullanılan hücre kimyasallarına göre değerleri verilmektedir.



Tablo 3.2. FV panel ideal faktör (F) değerleri [137]

Hücre Teknolojisi	İdeal Faktör (F <sub>FV</sub> )
Si-poly	1,3
Si-mono	1,2
a-Si-triple	5
a-Si:tandem	3,3
a-Si:H	1,8

Bir güneş hücresi genellikle 0,5V 2W olarak üretilmektedir. Bu gücü arttırmak için hücreler seri veya paralel bağlanarak istenilen gerilim ve akım değerlerinde güneş panelleri üretilebilmektedir. N<sub>s</sub> seri ve N<sub>p</sub> paralel bir şekilde düzenlenen FV modül devresi Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



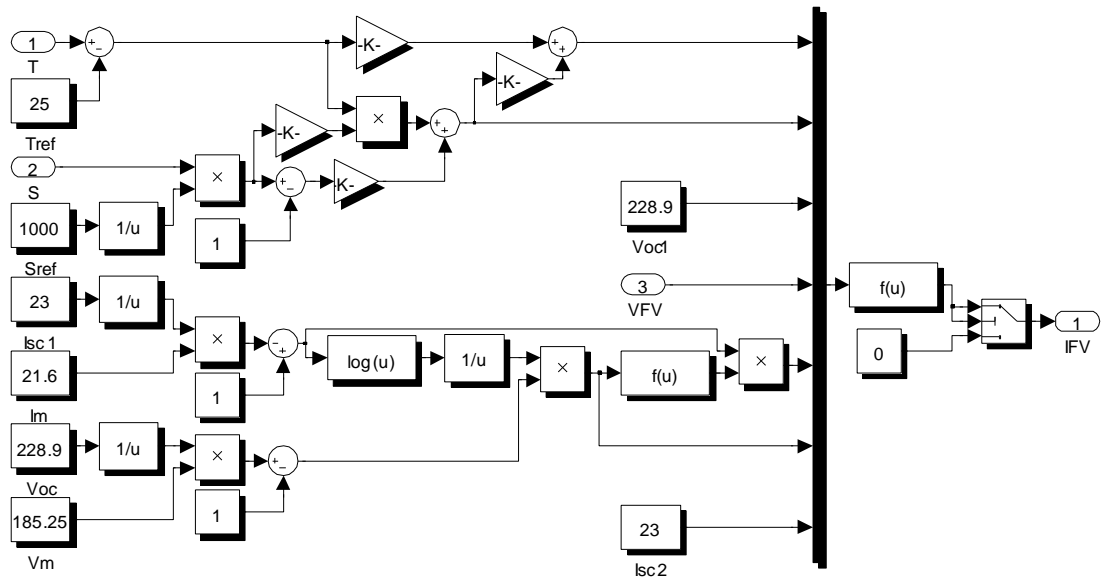
Şekil 3.4. Güneş pili dizisi eşdeğer devresi

Parametreleri tek diyot modeline göre tanımlanmış, N<sub>s</sub> kadar seri ve buna N<sub>p</sub> kadar paralel bağlı güneş panellerinden oluşan sistemin akım-gerilim (I-V) ilişkisi Denklem (3.5)'te verilmektedir.

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - I_o \left[ e^{\left( \frac{q \left( \frac{V_d + I R_s}{R_s + R_p} \right)}{N_s K F T_{FV}} \right)} - 1 \right] - \frac{N_p V_d / N_s}{R_p} \quad (3.5)$$

Buradaki  $N_s$  seri hücre sayısı,  $N_p$ 'de paralel bağlı hücre sayısını göstermektedir. Aslında FV modülünün verimini  $R_s$  çok az etkilerken  $R_p$ 'nin etkisi daha büyüktür [137-140].

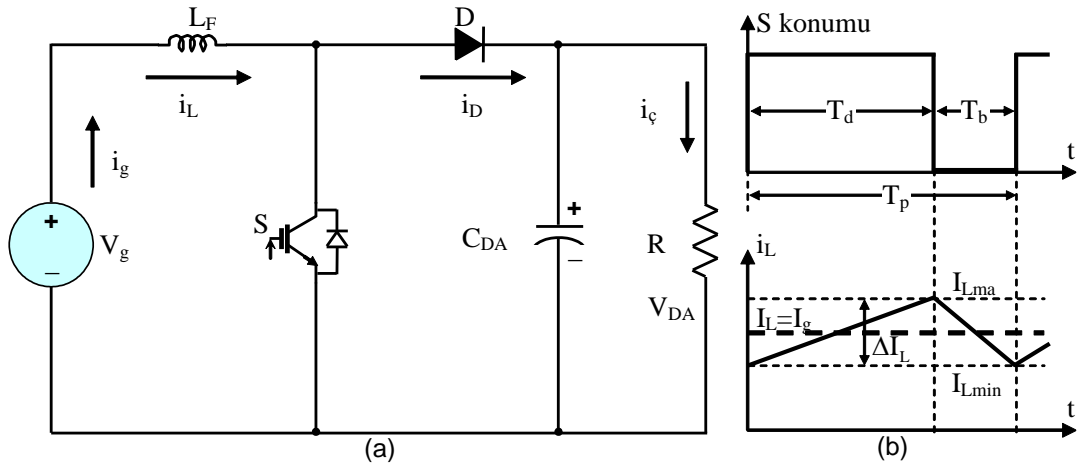
FV panel dizisinin simülasyon ortamında oluşturulması için sistemin giriş ve çıkış parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Güneş pilinin elektriksel modelinden elde edilen Denklem (2.1) - (2.5) kullanılarak FV dizisi benzetimi yapılmaktadır. FV dizi modelinde giriş parametreleri FV giriş akımı ve ışınım, çıkış ise akım ve güçtür. FV çıkış akımı kontrol biriminde işlenerek anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. FV güç değeri girilen ışınım değerine göre MGNİ algoritması ile FV dizi sürekli olarak Maksimum Güç Noktası (MGN)'da çalıştırılmaktadır. Şekil 3.5'te FV panel dizisinin blok diyagramı verilmektedir.



Şekil 3.5. FV panel dizisinin blok diyagramı

### 3.1.2. DA/DA yükseltici dönüştürücü modeli

DA/DA yükseltici dönüştürücüler, değişken veya sabit düşük DA giriş gerilimini çıkışta istenilen gerilim seviyesine yükselterek sabit bir DA çıkış gerilimi sağlamak için kullanılmaktadır. Tipik bir DA/DA yükseltici dönüştürücü yapısı Şekil 3.6'da verilmektedir. Dönüştürücü yapısı yarı iletken anahtar, diyot, bobin ve kondansatör elemanlarından oluşmaktadır.



Şekil 3.6. DA/DA yükseltici dönüştürücü yapısı [141]

DA/DA yükseltici içerisindeki yarı iletken anahtar birinci aralıkta iletimdedir.  $V_g$  kaynağı tarafından endüktans beslenir, endüktanstan geçen akım doğrusal olarak artar ve endüktansın enerji seviyesi de yükselir. Bu aralıkta yükün beslemesini kondansatör üstlenir. Yarı iletken anahtarın sinyalinin kesilmesiyle, enerjili olan endüktansın ürettiği emk ile D diyodu iletme geçer. İkinci aralıkta, diyot iletimdedir,  $V_g$  kaynağı ve endüktansta biriken enerji tarafından yük beslenir, endüktanstan geçen akım doğrusal olarak azalır ve endüktansın enerji seviyesi de düşer. Ayrıca, bu devrede güç elemanları  $V_ç$  çıkış gerilimine maruz kalır.

$\lambda$  = Doluluk oranı

$f_p$  = Anahtarlama frekansı, (kHz)

$T_d$  = S anahtar iletim süresi, ( $\mu$ s)

$T_b$  = S anahtar kesim süresi, ( $\mu$ s)

$T_p$  = Çalışma periyodu, ( $\mu$ s)

$V_g$  = DA giriş gerilimi, (V)

$V_{DA}$  = DA çıkış gerilimi, (V)

$I_g$  = DA giriş akımı, (A)

$I_ç$  = DA çıkış akımı, (A)

$\Delta I_L$  = Endüktans akım dalgalanması, (A)

Kararlı rejimde endüktans geriliminin pozitif ve negatif alanlarının eşitliğinden, ortalama DA çıkış gerilimi Denklem (3.6) ile elde edilir. Denklem (3.7)'de doluluk oranı eşitliği verilmektedir.

$$V_{DA} = \frac{1}{1-\lambda} V_g \quad (3.6)$$

$$\lambda = \frac{T_d}{T_p} \quad (3.7)$$

Giriş ve çıkıştaki güçlerin eşitliğinden, giriş akımı Denklem (3.8) ile elde edilir. Endüktans akımındaki dalgalanma miktarı ise Denklem (3.9)'da verilmektedir.

$$I_g = \frac{1}{1-\lambda} I_\zeta \quad (3.8)$$

$$\Delta I_L = \lambda(1-\lambda) \frac{V_{DA}}{f_p L_{FV}} \quad (3.9)$$

DA/DA yükseltici dönüştürücüde, sürekli, sınırdaki ve kesintili çalışmalar Denklem (3.10) ile özetlenebilir.

$$I_g \begin{cases} > \Delta I_L / 2 & \text{Sürekli iletim modunda çalışma} \\ = \Delta I_L / 2 & \text{Sınırdaki çalışma} \\ < \Delta I_L / 2 & \text{Kesintili iletim modunda çalışma} \end{cases} \quad (3.10)$$

DA/DA yükseltici dönüştürücüde birinci aralıkta çıkış akımını tamamen kondansatör üstlenir, birinci aralıkta boşalan kondansatör ikinci aralıkta dolar. Kararlı durumda kondansatör geriliminin artma ve azalma miktarları eşit olduğundan, dalgalanma miktarı sadece birinci aralık göz önünde tutularak Denklem (3.11)'deki gibi hesaplanmaktadır [141-143].

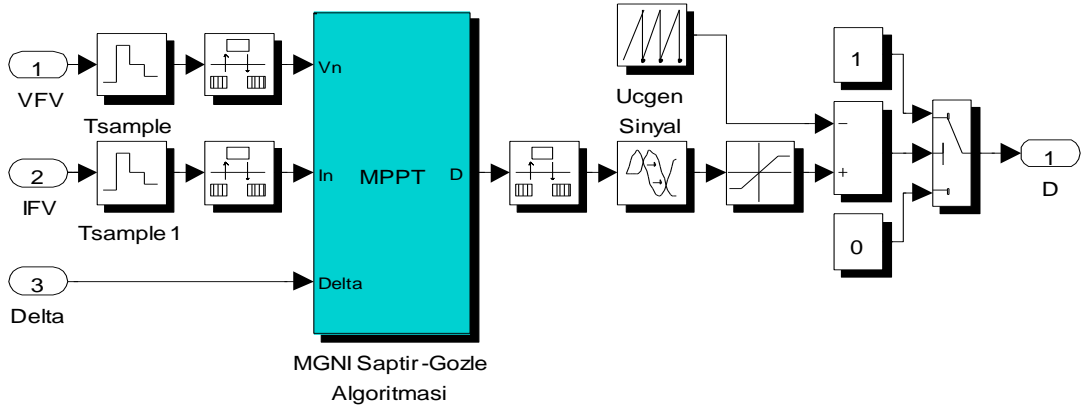
$$\Delta V_{DA} = \frac{\lambda I_\zeta}{f_p CDA} \quad (3.11)$$

Bu çalışmada tasarlanan DA/DA yükseltici dönüştürücü verilen Denklem (3.6) – (3.11) kullanılarak gerekli olan bobin ve kondansatör değerleri hesaplanmıştır. Tasarlanan dönüştürücüde hesaplanan değerler simülasyon ortamında test edilerek sisteme uygunluğu sağlanmıştır. Tablo 3.3'te hesaplanan DA/DA yükseltici dönüştürücü parametreleri verilmektedir.

Tablo 3.3. DA/DA yükseltici dönüştürücü parametreleri

Parametreler	Değeri
$T_p$	100 $\mu$ s
$f_p$	10kHz
$I_{\zeta}$	10A
$I_g$	20A
$V_g$	200-300V
$V_{DA}$	400V
$L_{FV}$	>500 $\mu$ H
$C_{DA}$	125 $\mu$ F

MGNİ denetim tekniği FV panellerinin verimli kullanılmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem güneş panelinin verdiği gücün en yüksek olduğu noktayı yakalayan bir denetim yapısıdır. MGN ancak hesaplama modelleri yoluyla veya arama algoritmaları tarafından tespit edilebilmektedir. Bu işlemi gerçekleştirebilmek için denetim mekanizması denetim tekniğine bağlı olarak FV panel değişkenlerini değerlendirip güç dönüştürücüsünün referansını gücün en yüksek olduğu noktaya ulaşmayı sağlayacak şekilde değiştirir. Literatürde MGN bulmak için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu çalışmada kontrol edilebilirlik ve yüksek verimlilikle takip eden saptır-gözle algoritması kullanılmaktadır. Şekil 3.7'de çalışmada kullanılan saptır-gözle MGNİ kontrol algoritması blok diyagramı verilmektedir.

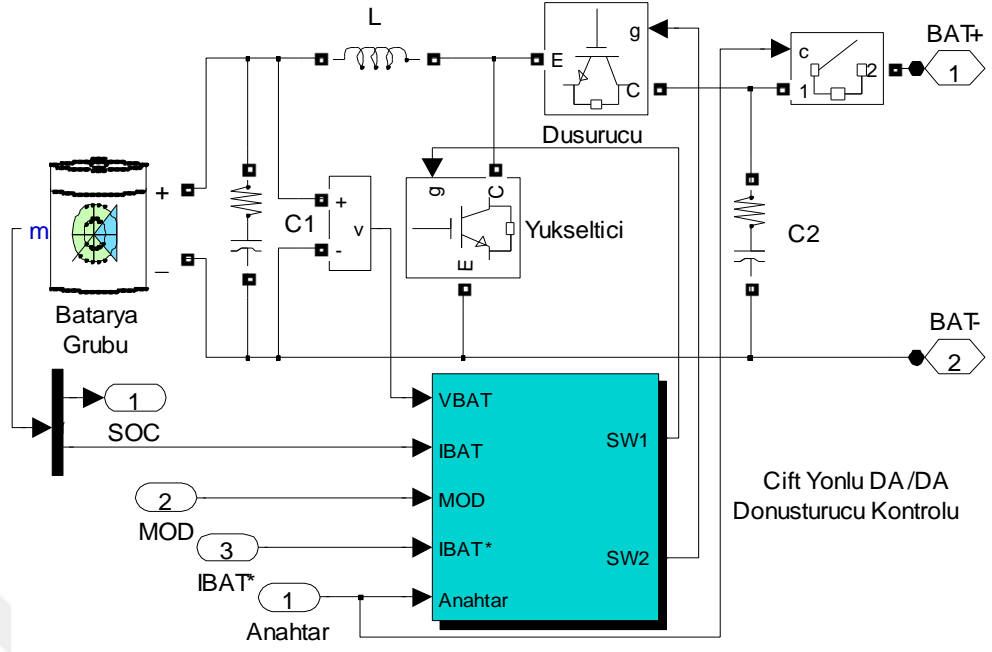


Şekil 3.7. Saptır-gözle MGNİ kontrol algoritması blok diyagramı

Saptır-gözle yönteminde FV çıkış gücü sürekli olarak izlenir ve kontrol değişkeninin hareketi ile gücün hareketi arasında bir bağıntı kurularak referansın azaltmasına ya da artırılmasına karar verilir. Saptır-gözle yöntem en sık kullanılan yöntemlerden biridir. Saptır-gözle yöntemi dalgalanan (artan veya azalan) FV panel terminal gerilim veya akımını aralıklarla değiştirir ve FV çıkış gücünü bir önceki güç değeri ile karşılaştırarak çalışır. FV panel çalışma gerilimi değişir ve eğer güç yükselirse kontrol sistemi FV çalışma noktası bu yönde değişir aksi takdirde çalışma noktası ters yönde hareket eder. Sonraki diğer çevrimde algoritma aynı şekilde devam eder. Yöntemin atmosferik koşulların hızla değişimine karşı tepkisinin yavaş olması ve ani değişimlerde maksimum güç noktasını yanlış yönde arama gibi zayıflıkları mevcuttur. Sistem sürekli olarak değiştir gözle işlemini yaptığından MGN'a ulaştığında burada sabitlenmez. MGN civarında sürekli olarak osilasyon yapar ve sistemde bir miktar güç kaybı olur.

### 3.2. Batarya ve Çift Yönlü DA/DA Dönüştürücü

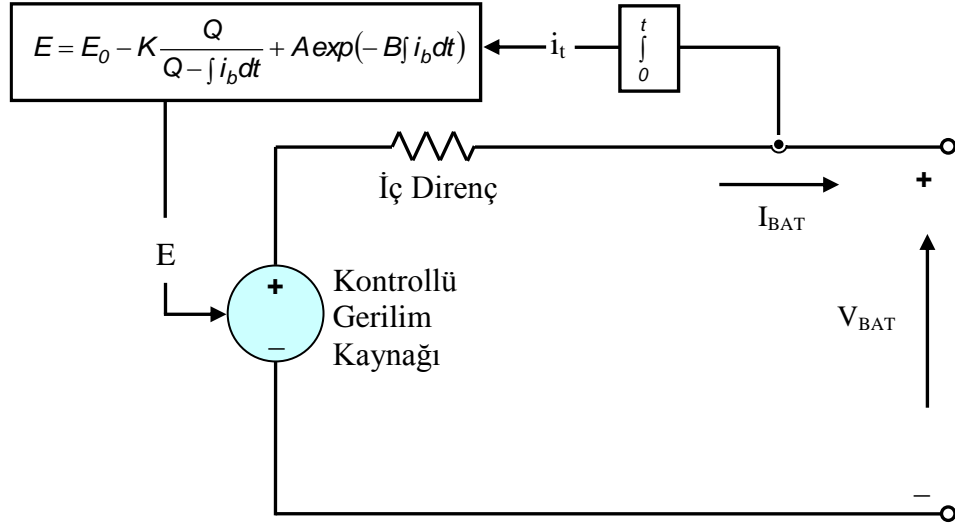
Bu çalışmada, batarya olarak öncelikle kurşun-asit batarya grubu kullanılması öngörülmüştür. Sistemde depolama birimi olan batarya grubu DA baraya bir çift yönlü DA/DA dönüştürücü aracılığıyla bağlanmıştır. Depolama biriminde 32 adet 12V, 80Ah kurşun-asit kuru tip batarya kullanılmaktadır. Deneysel sistemde kullanılan Vision bataryalar, 16'sı seri olmak üzere 2 sıra paralel kol oluşturularak 32 adettir. Bataryaların bağlantısı ile 192V gerilim seviyesi elde edilmiştir. Şekil 3.8'de batarya grubu, çift yönlü DA/DA dönüştürücü ve çift yönlü DA/DA dönüştürücü kontrol birimi Matlab/Simulink benzetim modeli verilmektedir.



Şekil 3.8. Batarya grubu, çift yönlü DA/DA dönüştürücü ve kontrol birimi blok diyagramı

### 3.2.1. Batarya modeli

Batarya benzetiminde Matlab/Simulink kütüphanesinde bulunan batarya modeli kullanılmıştır. Bu model, çeşitli batarya tiplerini gerilimi, kapasitesini ve Bataryanın Doluluk Durum (State of Charge SOC) parametrelerini girerek benzetimini gerçekleştirmektedir, benzetimde kullanılan batarya eşdeğer devresi denklem Şekil 3.9'da verilmektedir.



Şekil 3.9. Batarya eşdeğer devresi

Buradaki;

$E$  = Yüksüz batarya gerilimi, (V)

$E_0$  = Sabit batarya gerilimi, (V)

$K_B$  = Polarizasyon gerilimi, (V)

$Q_B$  = Batarya kapasitesi, (Ah)

$A$  = Üstel gerilim, (V)

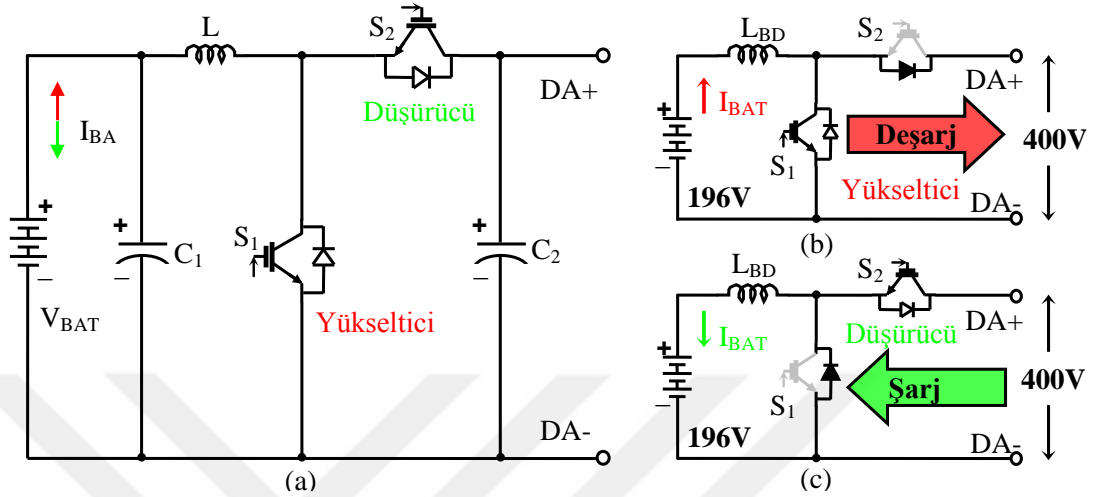
$B$  = Üstel kapasite, (Ah)<sup>-1</sup> dir.

### 3.2.2. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü modeli

Sistemde, DA bara gerilim 400V olarak belirlenmiştir ve bataryaların gerilim seviyesi DA baradan daha düşük 196V'tur. Sistemde sadece düşürücü veya yükseltici DA/DA dönüştürücü kullanılması bu işlemler için uygun değildir. Bu amaçla bataryaların kontrolünü, şarj ve deşarj edilmesini, her iki yönde de enerji aktarımı sağlayabilen çift yönlü DA/DA dönüştürücü kullanılmaktadır. Bataryaların gerilim seviyesini 400V'a yükseltmeyi yani DA baraya enerji aktarım işlemini, çift yönlü DA/DA dönüştürücü birimi üstlenmektedir. Aynı şekilde, fotovoltaik panellerden üretilen fazla enerji ile bataryaların şarj olmasını sağlamak, yani 400V'u 196V'a düşürmek için çift yönlü DA/DA dönüştürücü kullanılmaktadır. Çift yönlü



DA/DA dönüştürücü yapısında bobin, iki adet yarı iletken anahtarlama elemanı ve kondansatör kullanılmaktadır. Tipik bir çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısı Şekil 2.10'da verilmektedir.



Şekil 3.10. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısı

Şekil 3.10 (a)'da verilen çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısı, hem DA/DA yükseltici hem de DA/DA düşürücü yapısının tek bir devre ile gerçekleştirilmesine izin vermektedir. Bu çalışmada, önerilen topoloji yapısı kullanılarak bataryanın şarj ve deşarj işlemi yapılabilmektedir. Dönüştürücü yapısında bulunan iki yarı iletken anahtar ile devrenin yükseltici ve düşürücü modda çalışmasına imkân sağlanmaktadır. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısının yükseltici modunda çalışmasını sağlamak için, S1 anahtarına kontrolcünün uyguladığı Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) anahtarlama sinyalleri uygulanıp, S2 anahtarına sıfır sinyali uygulanarak açık devre olmalıdır. Böylece S2 anahtarının üzerindeki diyot ile dönüştürücü yapısı DA/DA yükseltici dönüştürücü modunda çalışmaktadır. Bu modda, dönüştürücü 196V olan bataryaya gerilimini DA bara gerilimine 400V'a yükseltecek şekilde çalışmaktadır. Bu modda bataryaya deşarj olmaktadır ve durum Şekil 3.10 (b)'de gösterilmektedir. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısının düşürücü modunda çalışmasını sağlamak için, S2 anahtarına kontrolcünün uyguladığı DGM anahtarlama sinyalleri uygulanıp, S1 anahtarına sıfır sinyali uygulanarak açık devre olmalıdır. Böylece S1 anahtarının üzerindeki diyot ile dönüştürücü yapısı DA/DA düşürücü modunda çalışmaktadır. Bu modda, dönüştürücü 400V DA bara gerilimini bataryaya gerilimi olan 196V'a düşürecek şekilde çalışarak bataryayı şarj etmektedir. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısının düşürücü modda çalışması

Şekil 2.10 (c)'de verilmektedir. Tasarlanan çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısında bulunan  $C_1$ ,  $C_2$  kondansatörleri giriş ve çıkıştaki gerilim dalgalanmalarını engellemek amacıyla kullanılmıştır. Yükseltici dönüştürücüde kullanılan  $125\mu\text{F}$ 'lık kondansatör değerleri, hesaplanarak belirlenmiştir. Her iki modda da giriş ve çıkış güçleri eşittir [144-153]. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü tasarımı için gerekli olan bobinin hesabı Denklem (3.12)'de verildiği biçimde yapılmıştır.

$$L_{BD}f_p = \frac{2V_{BAT}^2}{P_{BD}} \quad (3.12)$$

Buradaki;

$L_{BD}$  = Çift yönlü DA/DA dönüştürücü bobini, (mH)

$f_p$  = Anahtarlama frekansı, (kHz)

$V_{BAT}$  = Çift yönlü DA/DA dönüştürücü giriş gerilimi, (V)

$V_{DA}$  = Çift yönlü DA/DA dönüştürücü çıkış gerilimi, (V)

$P_{BD}$  = Çift yönlü DA/DA dönüştürücü çıkış gücü, (W)'dür.

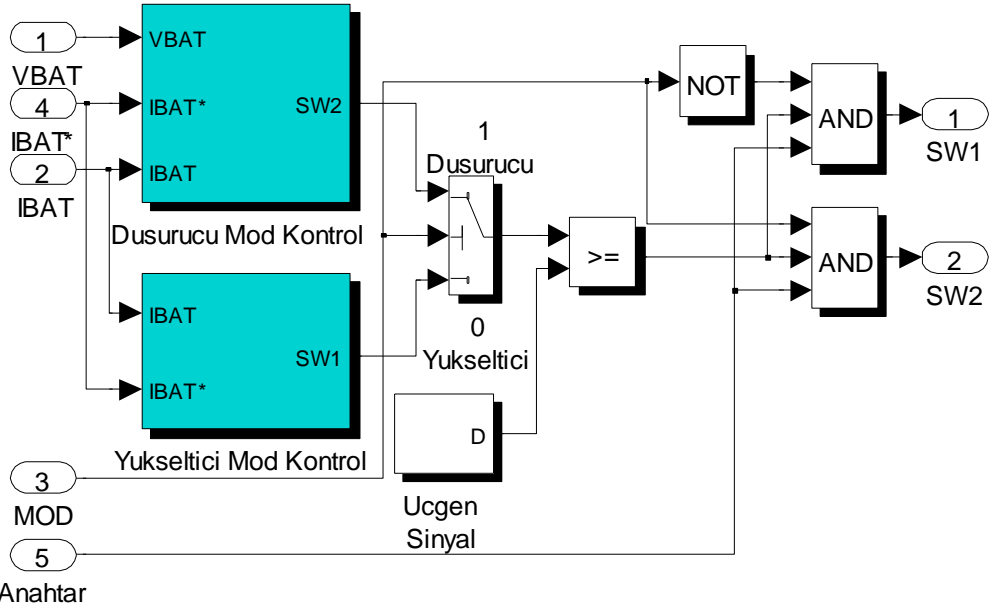
Bu çalışmada kullanılan çift yönlü DA/DA dönüştürücü parametreleri Tablo 3.4'te verilmektedir.

Tablo 3.4. DA/DA yükseltici dönüştürücü parametreleri

Parametreler	Değeri
$V_{BAT}$	176-196V
$V_{DA}$	400V
$P_{BD}$	4000W
$f_p$	10kHz
$L_{BD}$	1,2mH
$C_1$	125 $\mu\text{F}$
$C_2$	125 $\mu\text{F}$

### 3.2.3. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü kontrolü

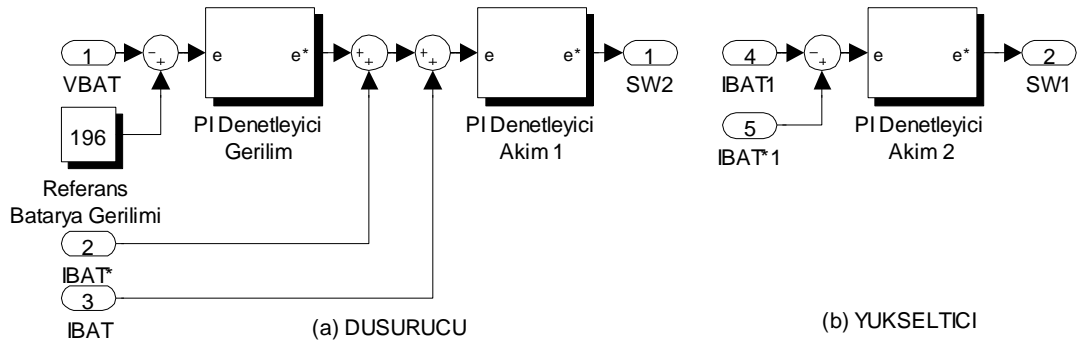
Şekil 3.11’de çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısının kontrol ünitesinin simulink blok diyagramı verilmektedir. Burada, dönüştürücüde bulunan iki yarı iletken anahtarlama elemanı ile yapının yükseltici veya düşürücü modda çalıştırılmasını sağlayan kontrol algoritması bulunmaktadır. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısının düşürücü modda çalışmasını sağlamak için S2 anahtarına DGM uygulanması ve S1 anahtarının açık devre konumda olması gerekir. Bu kontrol algoritması enerji yönetim algoritmasına bağlı olarak çalışmaktadır. 3 nolu mod seçimine gelen bilgi 1 olduğu zaman kontrol algoritması sistemin düşürücü moda geçmesini sağlamaktadır. Buradaki 5 nolu giriş olan anahtar bilgisi ise batarya grubunun devreden çıkması gerektiği zaman, çift yönlü DA/DA dönüştürücünün hem DA baradan ayrılmasını hem de dönüştürücü yapısında bulunan S1 ve S2 anahtarlarını kapalı konuma getirmesini sağlamaktadır. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısının yükseltici modda çalışmasını sağlamak için de şekilde S1 anahtarına DGM uygulanması ve S2 anahtarının kapalı konumda olması gerekir. Aynı şekilde 5 nolu giriş bilgisi değerlendirilerek sistemi devreye alıp çıkartmaktadır.



Anahtar

Şekil 3.11. Çift yönlü DA/DA dönüştürücü yapısının kontrol ünitesinin simulink blok diyagramı

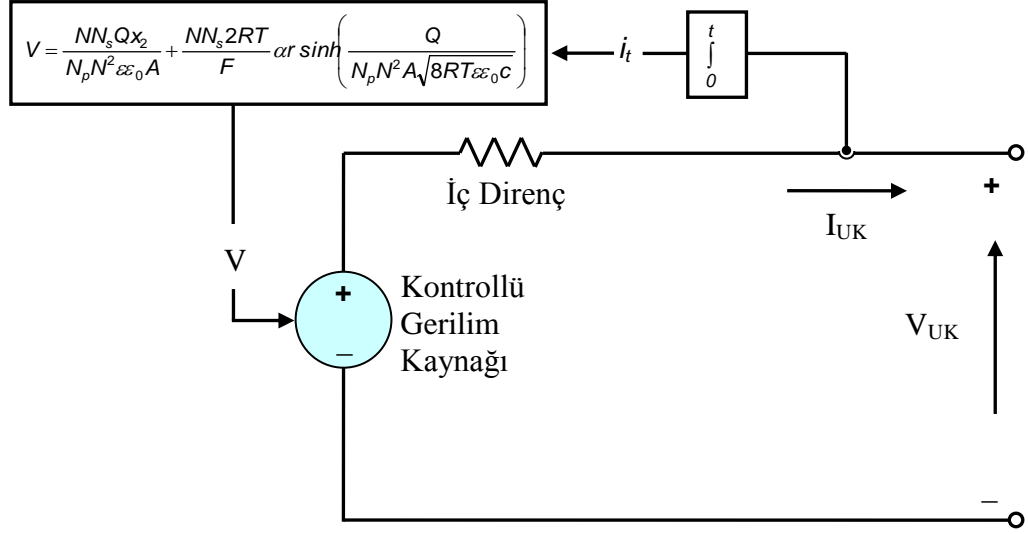
Şekil 3.12’de verilen düşürücü ve yükseltici mod kontrolünde batarya grubunun şarj ve deşarj olurken akım ve gerilim kontrolü yapılmaktadır. Düşürücü modda kaskad PI denetleyici kullanılmıştır. İlk PI denetleyici batarya grubunun şarj olması yani sistemin düşürücü modda çalışırken batarya grubunun gerilimini şarj seviyesinde 196V’da tutmayı sağlamaktadır. İkinci kaskad PI denetleyici ise batarya grubunun şarj akımını kontrol etmektedir. Şarj akımını ise enerji yönetim algoritmasında hesaplanan akım değeri ile belirlemektedir. Düşürücü mod kontrol birimi Şekil 3.12 (a)’da verilmektedir. Yükseltici mod kontrol biriminde ise sadece batarya grubunun deşarj akım bilgisine göre DA baraya aktarılmaktadır. Burada PI denetleyici ölçülen ve referans akım değerini karşılaştırarak çıkış üretmektedir. PI çıkışı 10kHz lik üçgen dalga ile karşılaştırılarak anahtarlama sinyali üretilmektedir. Yine burada akım değeri enerji yönetim algoritması ile hesaplanmaktadır. Yükseltici mod kontrol birimi Şekil 3.12 (b)’de verilmektedir.



Şekil 3.12. (a) Düşürücü ve (b) yükseltici mod kontrol simulink blok diyagramı

### 3.2.4. Ultrakapasitör

Ultrakapasitör benzetiminde Matlab/Simulink kütüphanesinde bulunan ultrakapasitör modeli kullanılmıştır. Bu model ultrakapasitörün nominal kapasitansını, eşdeğer DA seri iç direncini, nominal ve başlangıç gerilimini, sızıntı akımını, çalışma sıcaklığı ve seri-paralel kapasite gibi parametreleri girerek benzetimi gerçekleştirmektedir. Benzetimde kullanılan ultrakapasitör eşdeğer devresi denklem Şekil 3.13’te verilmektedir.



Şekil 3.13. Ultrakapasitör eşdeğer devresi ve simulink blok diyagramı

Burada;

$A_{UK}$  = Elektrot ve elektrolit arasındaki yüzey alanı, ( $m^2$ )

$c$  = Molar konsantrasyonu,  $c = 0,86/(8NAr^3)$

$F$  = Faraday sabiti

$N$  = Elektrot katman sayısı

$N_P$  = Paralel bağlı ultrakapasitör sayısı

$N_S$  = Paralel bağlı ultrakapasitör sayısı

$Q$  = Elektrik yükü, (C)

$R$  = İdeal gaz sabiti

$r$  = Moleküler yarıçapı

$x_2$  = Helmholtz tabaka uzunluğu, (m)

$\alpha$  = Şarj transfer katsayısı, ( $0 < \alpha < 1$ )

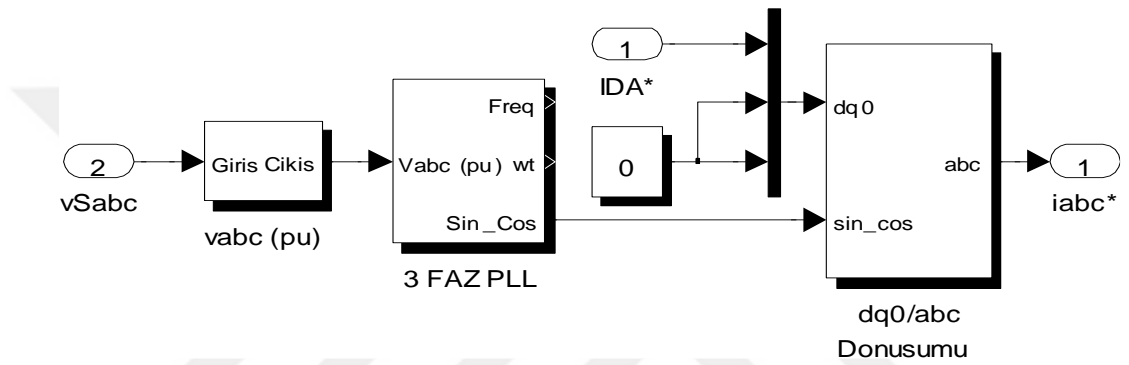
$\epsilon$  = Malzemenin geçirgenliği

$\epsilon_0$  = Boşluğun geçirgenliği'dir.

### 3.3. Evirici Kontrol Algoritması ve Akım Denetleyici

#### 3.3.1. Evirici kontrol algoritması

Şekil 3.1’de (2) numaralı blokta, 3 fazlı eviricinin şebekeye senkron bir şekilde enerji aktarabilmesi için FV, batarya ve ultrakapasitör ortak olarak bağlandığı DA baradan gelen akım değerini işleyen park dönüşümü ve Faz Kilitleme Döngüsü (Phase Locked Loop PLL) kontrol birimi bulunmaktadır. Şekil 3.14’de evirici kontrol algoritması blok diyagramı verilmektedir.



Şekil 3.14. Evirici kontrol algoritması blok diyagramı

#### 3.3.2. Faz kilitleme döngüsü (Phase Locked Loop PLL)

Şebeke bağlantılı FV güç sistemlerinde önemli konulardan biri şebeke ile senkronizasyonun sağlanabilmesidir. Kullanılan senkronizasyon algoritması ile şebeke gerilim vektörünün açısı tespit edilmektedir. Bu açı değerine bağlı olarak eviricinin anahtarlama elemanları sürülerek sistemde MGNİ kontrolü ve üç fazlı değişkenlerin senkron hızda dönen eksen takımına indirgeme işlemi gerçekleştirilir. Şebeke gerilimi ile evirici çıkış akımı senkronizasyonunu sağlamak ve saf bir sinüzoidal akım referansı vermek, birim güç faktöründe çalışmasını sağlamak için PLL kullanılır. PLL yapının PI kontrol parametreleri ile doğrudan yerleşme zamanı ve sönümlenme katsayılarını belirlemek mümkündür. PLL yapısı ayrıca genlik ve şebeke gerilim frekans değerlerini elde etmek, şebeke gerilimini izlemek için kullanılır. Burada üretilen açı dq0/abc dönüşümünde (park dönüşümü) referans  $i_{abc}^*$  sinyalini üretmek için çok önemlidir [154-157].

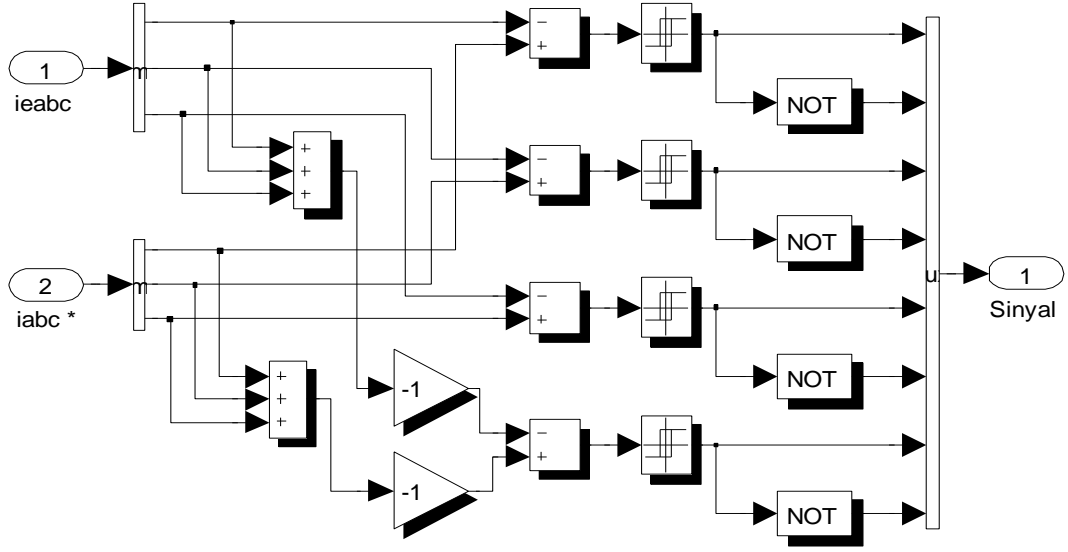
### 3.3.3. Park (dq0/abc) dönüşümü

Park dönüşümü üç fazlı büyüklükleri senkron hızda dönen eksen takımına (dq0) indirgemek için kullanılır. Aynı dönüşüm DA bileşeni ile üç fazlı büyüklükleri elde etmek için de kullanılmaktadır. Kontrol algoritması bloğunda DA baradan okunan gerilim değeri ile referans DA bara gerilimi olan 400V farkı alınır. Daha sonra PI denetleyici tarafından  $i_{DCd}^*$  akım sinyali üretilmektedir. Bu dönüşüm ile sabit eksen takımındaki dönen vektör sabit değer alır. d eksen bileşeni üç fazlı büyüklüklerin genliğine eşit olurken q eksen bileşeni dengeli sistemde sıfır olmaktadır. dq eksen takımı, üç fazlı sistemdeki değişkenler ile aynı hızda döner ve dönüşüm için PLL'de üretilen açı kullanılır. Bileşke vektör sabit eksen takımına göre sabit hızla hareket ederken dq eksen takımına göre sabit kalmaktadır. Bu nedenle dq eksen takımında büyüklükler DA genliğinde olmaktadır. Üç fazlı sistemdeki büyüklükler doğrudan senkron hızda dönen eksen takımına indirgenmek istendiğinde Denklem (3.13) eşitliğinde verilen Park dönüşümü kullanılır. Burada d eksen, PI denetleyici ile üretilen  $i_{DA d}^*$  ve sistem omik yük içerdiği için q eksen 0 olmaktadır [158-160].

$$\begin{bmatrix} I_{DA d} \\ I_{DA q} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

### 3.3.4. Akım denetleyici

Şekil 3.1'in (3) numaralı bloğunda, kontrol biriminde hesaplanan  $i_{abc}^*$  referans akımlar ile o anda gerilim kaynaklı evirici çıkışında var olan  $i_{eabc}$  akımları karşılaştırılarak histerezis bant akım denetleyici ile eviricinin anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. Eviricide her fazın akımı, histerezis kontrolör tarafından akım hatası tanımlanan bant içerisinde tutmaya çalışır. Şekil 3.15'te histerezis bant akım denetleyici ile ölçülen ve hesaplanan referans akımları kullanarak evirici anahtarlama sinyallerinin üretildiği blok diyagramı verilmektedir [161-163].



Şekil 3.15. Histerezis bant akım denetleyici ile eviricinin anahtarlama sinyallerini üreten simulink blok diyagramı

### 3.4. Akıllı Enerji Yönetim Algoritması

Bu tez çalışmasında hibrit enerji depolama sisteminin en önemli kontrol birimi olan akıllı enerji yönetim algoritması simulink blok diyagramı Şekil 3.16'da verilmektedir. Bu bölümde sistemin olası çalışma şartları incelenmektedir. Bu çalışma şartlarını sistemde bulunan kaynak ve yüklerin akım ve güç değerleri belirlemektedir. Bütün çalışma şartları ele alındığında toplamda 10 adet durum ortaya çıkmaktadır. Bunlar;

Durum 1 )  $P_{FV} \approx P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu düşük,

Durum 2 )  $P_{FV} \approx P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu yüksek,

Durum 3 )  $P_{FV} > P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu düşük,

Durum 4 )  $P_{FV} > P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu yüksek,

Durum 5 )  $P_{FV} < P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu düşük,

Durum 6 )  $P_{FV} < P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu yüksek,

Durum 7 )  $P_{FV} = 0$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu düşük,

Durum 8 )  $P_{FV} = 0$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu yüksek,

Durum 9 ) Şebekeden batarya grubunun şarj durumu,

Durum 10 )  $P_{YÜK} = 0$  ve  $P_{FV}$  gücünün şebekeye aktarılma durumlarıdır.



Akıllı enerji yönetim algoritması bu durumlara göre karar vererek sistemdeki güç akışlarını kontrol etmektedir. Akıllı enerji yönetim algoritması her durumu şartlandırarak çalışmaktadır. Burada sistemin sağlıklı ve güvenli çalışabilmesi için bazı sınırlandırma ve bant aralıkları belirlenmiştir. FV panel gücünün yük gücüne yaklaşık eşit olduğu durumda bu bant aralığı  $\pm 400W$  olarak seçilmiştir. Bunun nedeni ise FV panel gücündeki dalgalanma sırasında kontrol algoritmasının belli bantta tutarak kararlı çalışmasını sağlamaktır. Böylece küçük bir güç değişiminde bataryanın sürekli olarak devreye girip çıkmasını engelleyerek bataryanın şarj/deşarj periyodunu azaltıp batarya grubunun daha uzun çevrim ömrüne sahip olması amaçlanmaktadır. Aynı zamanda sistemin sürekli anahtarlama yapması önlenerek güç kaybı azaltılmaktadır. Bunun yanı sıra bataryanın sağlığı açısından batarya grubunun doluluk oranı kontrol algoritmasında işlenerek, batarya grubudeşarj durumunda SOC'nin %20 doluluk oranına kadar akım çekilmesi sağlanmaktadır. Şarj durumunda ise batarya grubunun SOC'nin %95 olduğunda şarj akımı kesilerek aşırı şarj akımından korunması sağlanmaktadır.

FV panel gücü  $50W$ 'ın altına düştüğünde yani bu durumda akşam olduğu FV panelin devreden çıkması gerektiği algoritma tarafından algılanmaktadır. Diğer bir durum ise yük gücünün  $400W$ 'ın altına düştüğünde batarya grubunun yükü beslemek için devreye girmeyip küçük güçlerde enerjisini şebekeden alması sağlanmıştır. Bunun nedeni de yine batarya grubunu sürekli devreye alıp çıkartmayı önleyerek hem anahtarlama kaybını azaltmak hem de batarya grubunun çevrim ömrünü arttırmaktır.

Bütün bu şartlar ele alınarak sistemin akıllı enerji yönetim algoritması geliştirilmiştir. Algoritma sayesinde bataryanın devreye girip çıkması "Anahtar" bilgisi ile sağlanmaktadır. Aynı şekilde batarya grubunun şarj/deşarj yapmasına imkan sağlayan çift yönlü DA/DA dönüştürücü devresinin düşürücü veya yükseltici moda çalışmasını "MOD" bilgisi sağlamaktadır. Batarya grubunun devreye girip çıkması şarj/deşarj modu belirlendikten sonra batarya grubunun hangi akım değerinde şarj/deşarj olması gerektiği hesaplanmaktadır. Hesaplanan akım değeri ile FV panel akım farkı bataryanındeşarj akımını belirlemektedir. Batarya grubunun şarj durumu sadece  $P_{FV} > P_{YÜK}$  şartları altında gerçekleşmektedir.

Akıllı enerji yönetim algoritması içerisinde bulunan batarya akım hesaplama bloğu ile batarya grubunun şarj/deşarj akım bilgisi hesaplanarak çift yönlü DA/DA dönüştürücü devresine gönderilmektedir. Bu blokta bataryadeşarj durumunda yük gücü ve FV panellere bağlı olan DA/DA yükseltici gücü farkı Denklem (3.14) ile referans batarya grup gücü  $P_{BAT^*}$  hesaplanmaktadır. Hesaplanan referans batarya gücü Denklem (3.15) ile batarya grubunundeşarj akımını  $I_{BAT\_D^*}$  hesaplanmaktadır.

$$P_{BAT^*} = P_{YÜK} - P_{BST} \quad (3.14)$$

$$I_{BAT\_D^*} = \frac{P_{BAT^*}}{V_{BAT}} \quad (3.15)$$

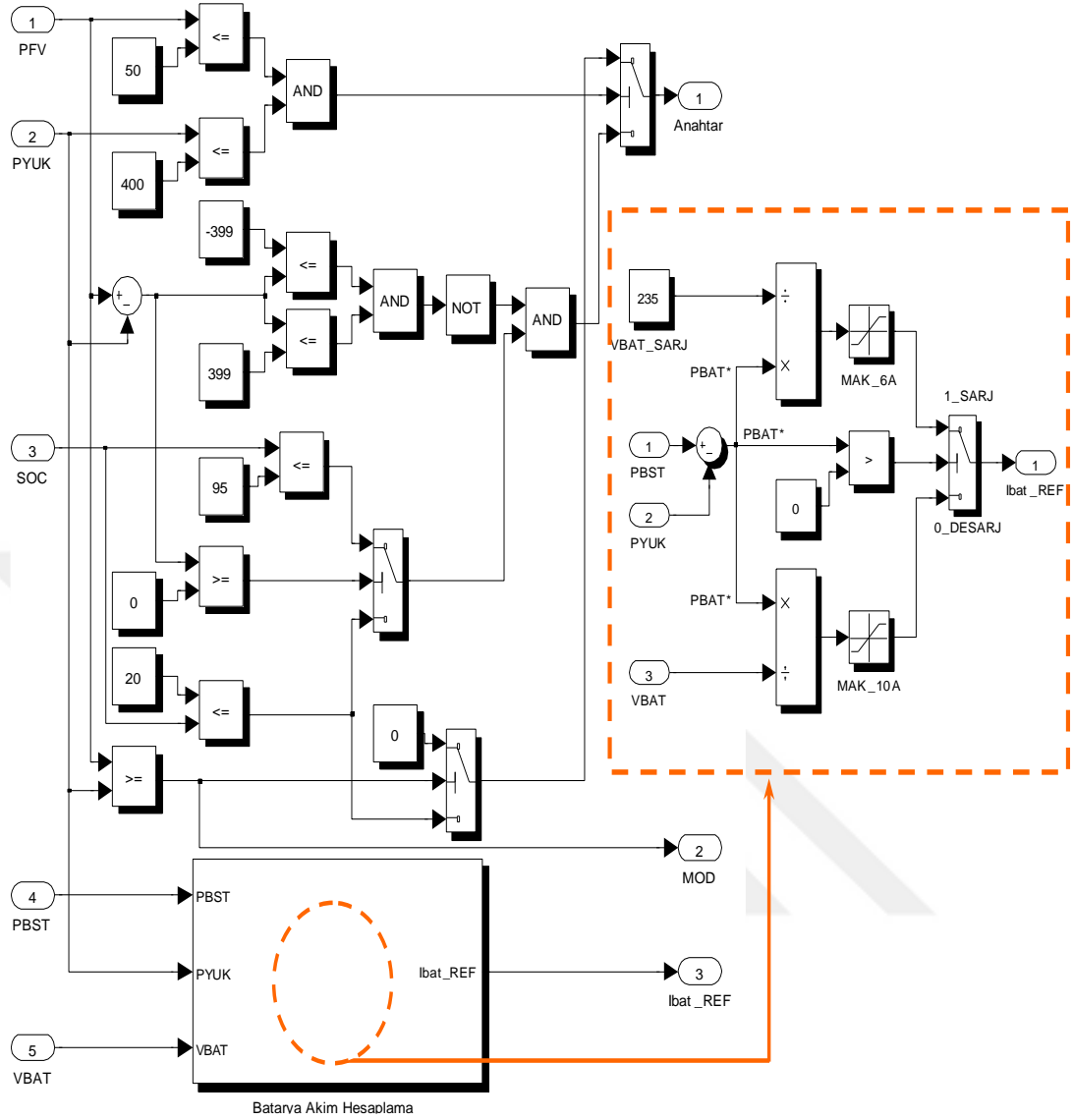
Deneysel test düzeneğinin çalışma durumu da göz önüne alınarak sistemde bulunan batarya grubu ve dönüştürücülerin zarar görmemesi için 10A'lık bir limit koyulmaktadır. Eğer yük talebi batarya grubunun belirlenen maksimumdeşarj akım sınırından fazla ise kalan talep yük gücü şebekeden sağlanır.

Batarya gurubu şarj olurken DA/DA yükseltici gücü ile talep edilen yük gücü farkı ile bataryanın şarj olması gereken gücü Denklem (3.16)'deki şekilde hesaplanır. Elde edilen batarya güç değeri Denklem (3.17) ile batarya grubunun şarj olması gereken  $I_{BAT\_C^*}$  akımını hesaplanır.

$$P_{BAT^*} = P_{BST} - P_{YÜK} \quad (3.16)$$

$$I_{BAT\_C^*} = \frac{P_{BAT^*}}{V_{BAT}} \quad (3.17)$$

Deşarj durumunda olduğu gibi şarj durumunda da batarya grubuna limit akım değeri belirlenmiştir. FV panellerden üretilen güç öncelikle yük gücünü karşılamakta kalan fazla enerji miktarı batarya grubuna aktarılmaktadır. Batarya grubunun limit şarj akım değerinden sonra FV paneller tarafından eğer hala üretilen enerji varsa şebekeye aktarılır. Batarya grubunu şarj ederken batarya firmasının üretici katalog bilgilerine bağlı olarak her bir batarya için maksimum 14,7V olacak şekilde toplamda batarya grubuna 235V şarj gerilimi uygulanmaktadır.



Şekil 3.16. Akıllı enerji yönetim algoritması simulink blok diyagramı

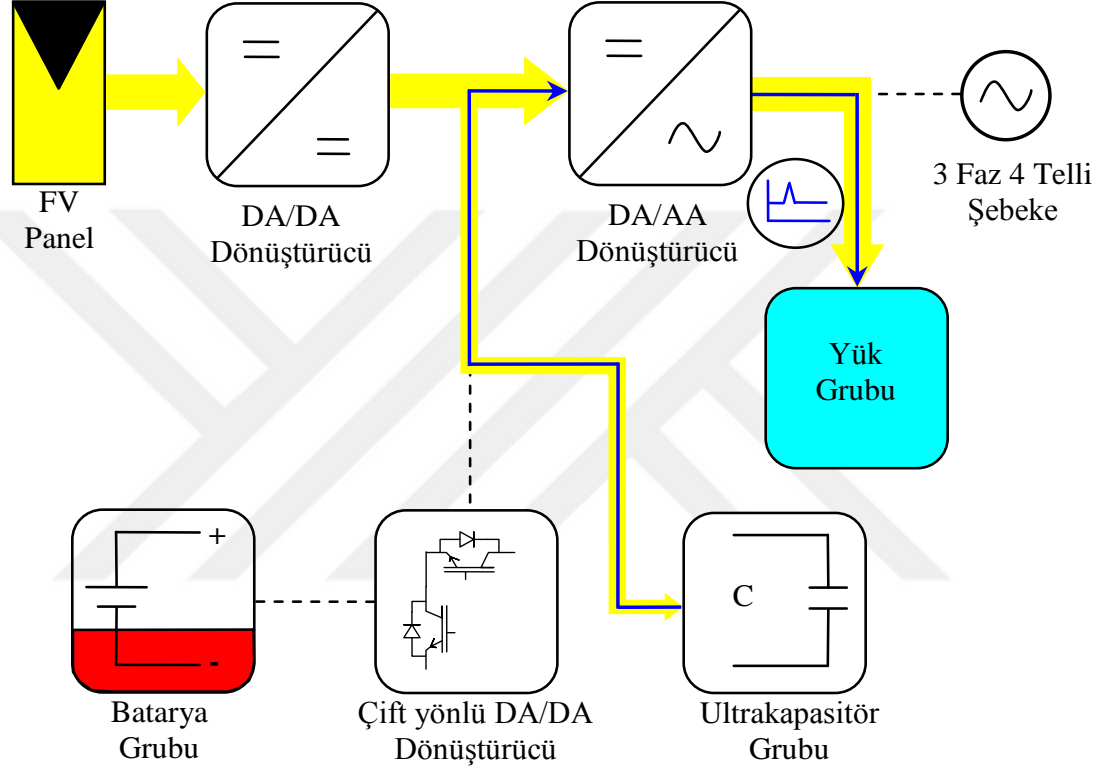
Akıllı enerji yönetim algoritması olası bütün şartlar altında çalışmaktadır ve bu şartların her biri arasında sağlıklı şekilde geçiş yapılmasına izin vermektedir. Belirtilen durumların güç akış diyagramları bu bölümünde ayrıntılı olarak açıklanmış ve bu durumların simülasyon sonuçları verilmiştir.

### 3.5. Güç Akış Diyagramları

#### 3.5.1. Durum 1 $P_{FV} \approx P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu düşük

Durum 1'de  $P_{FV} \approx P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu düşük olduğu durum incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 3.17'de verilmektedir. Bu durumda FV panel gücü sistemde bulunan yükün gücüne yaklaşık olarak eşittir. FV

panelde üretilen gücün tamamı yüke aktarılarak şebekeden enerji akışı olmamaktadır. Batarya grubu ise pasif durumda kalmakta ne şarj ne de deşarj olmaktadır. Batarya doluluk oranı düşük olduğundan batarya grubundan yüke enerji akışı olmamaktadır. Ultrakapasitör ise DA baraya direkt olarak bağlı olduğundan sürekli olarak aktif durumdadır. Ani yük değişiminde çok hızlı bir şekilde deşarj olarak yük gücünü karşılamaktadır.



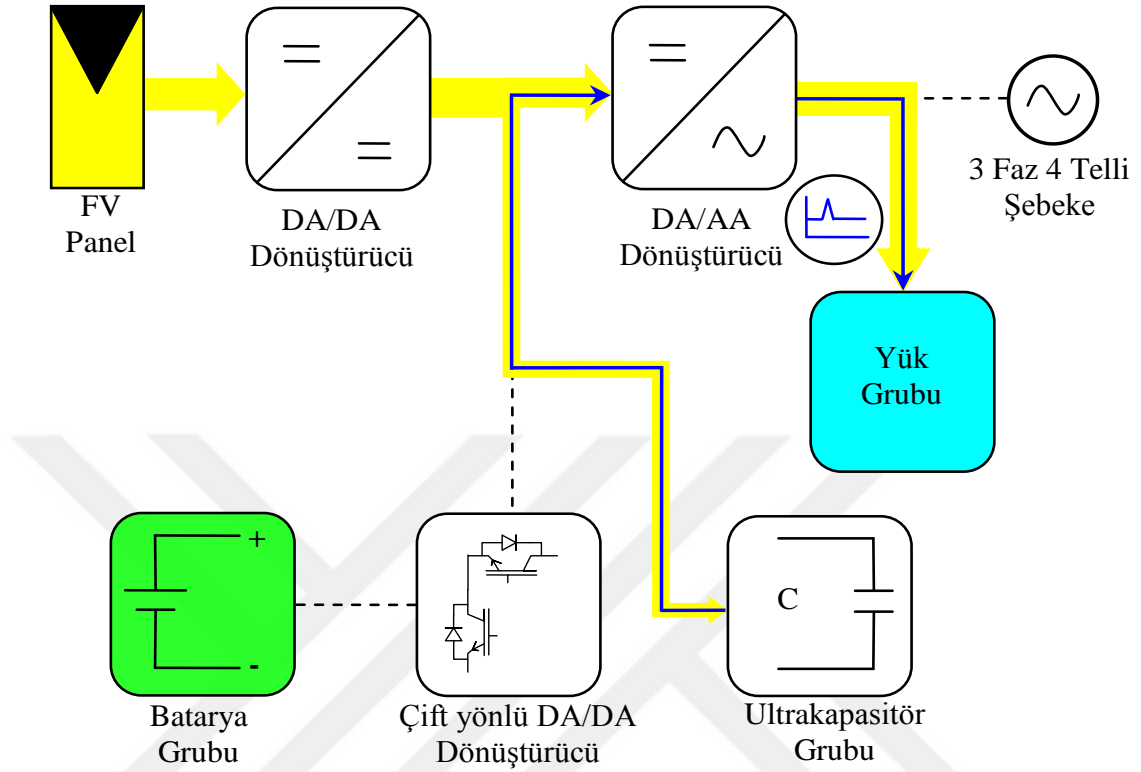
Şekil 3.17. Durum  $P_{FV} \approx P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  SOC düşük olduğu durumdaki güç akış diyagramı

### 3.5.2. Durum 2 $P_{FV} \approx P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu yüksek

Durum 2'de  $P_{FV} \approx P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu yüksek olduğu durum incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 3.18'de verilmektedir. Bu durum bir önceki Durum 1'in sadece bataryanın tam dolu olması halidir. Burada FV panel gücü yük gücüne yaklaşık olarak eşit olduğundan yükü yalnızca FV paneller besleyerek şebekeden bir güç aktarımı yoktur. Burada ultrakapasitör Durum1'deki gibi davranarak ani yüklenme durumunda deşarj olarak katkı sağlamaktadır.

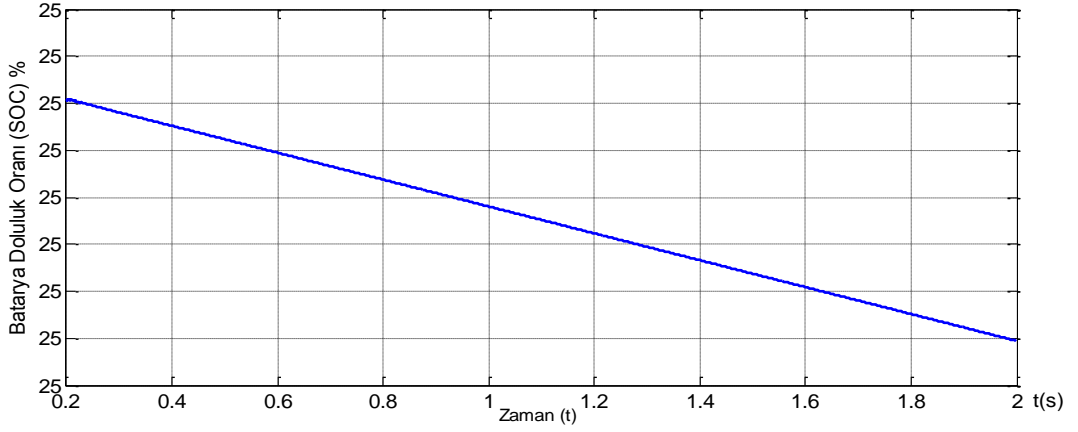
Durum 1 ve Durum 2'deki şartlar ele alınarak simülasyon benzetimi yapılmıştır. Simülasyon sonuçları Şekil 3.19-3.27'de verilmektedir. İki durum arasındaki fark

batarya doluluk oranlarının düşük ve yüksek olmasıdır. Bu doluluk oranları Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

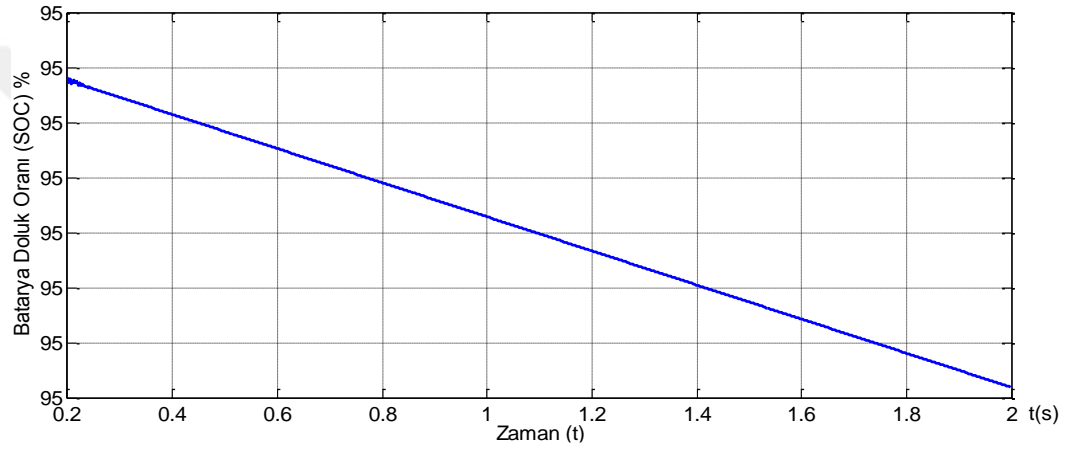


Şekil 3.18. Durum 2  $P_{FV} \approx P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  SOC yüksek olduğu durumdaki güç akış diyagramı

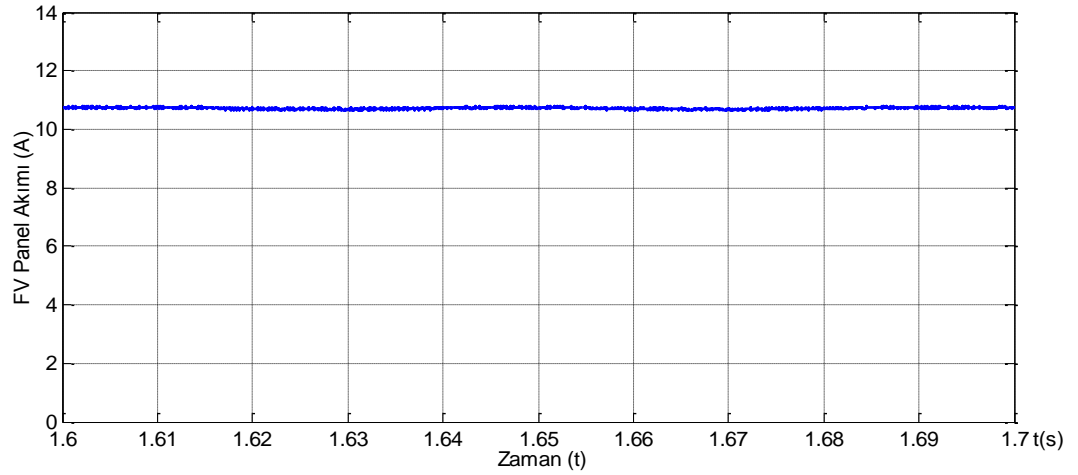
Şekil 3.21’de FV panellerin üretmiş olduğu akım yaklaşık olarak 11A’dır. Batarya grubu her iki durumda da pasif olduğundan şarj/deşarj olmamakta DA barayla bağlantısı kesilmektedir. Batarya grubunun akımı 0’dır ve Şekil 3.22’de görülmektedir. FV panel ve batarya grup toplam akımı Şekil 2.23’te verilmekte ve batarya grubunun akımı sıfır olduğunda bu toplam akım FV panel akımına eşittir. Bu durumda FV panel gücü yük gücüne yaklaşık olarak eşit olduğundan evirici sadece yükü beslemekte ve şebekeden enerji akışı olmamaktadır. Şebeke gerilimi bütün simülasyon sonuçlarında aynıdır ve şebeke gerilim sonucu Şekil 3.24’te verilmektedir. Şebeke gerilimi  $V_{RMS}=110V$ ’tur. Deneysel çalışmalar güvenlik nedeniyle düşük gerilim ile yapılacağından simülasyon sonuçları da düşük gerilimde incelenmiştir. Yük, evirici ve şebeke akımı sırasıyla Şekil 3.25-3.27’de verilmektedir. Durum 1 ve 2’de FV panel gücü yük gücüne yaklaşık olarak eşit olduğundan evirici çıkış akımı yük akımına eşittir ve şebekeden akım çekilmemektedir.



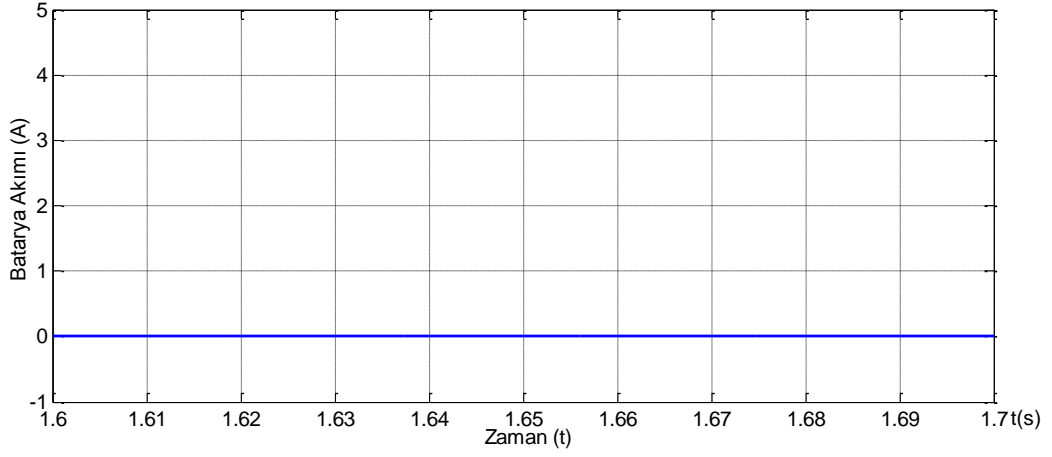
Şekil 3.19. Durum 1  $P_{FV} \approx P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu düşük



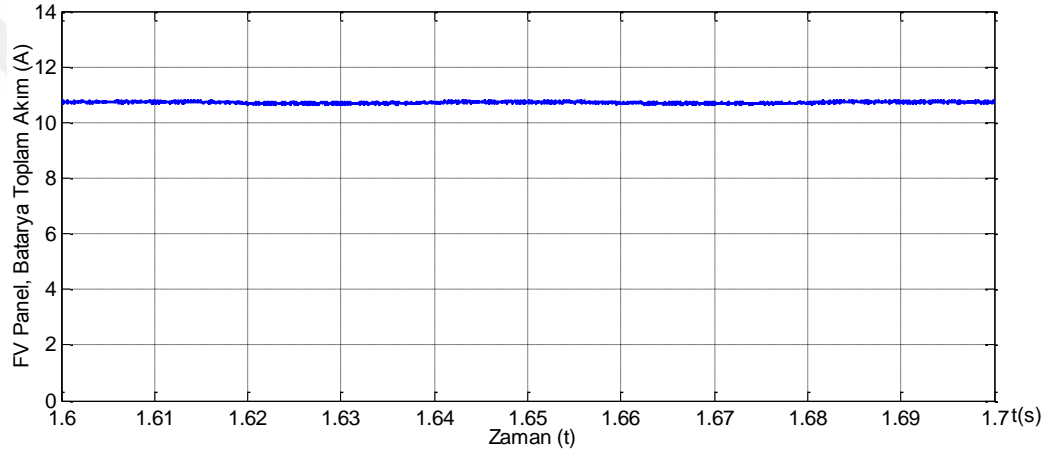
Şekil 3.20. Durum 2  $P_{FV} \approx P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu yüksek



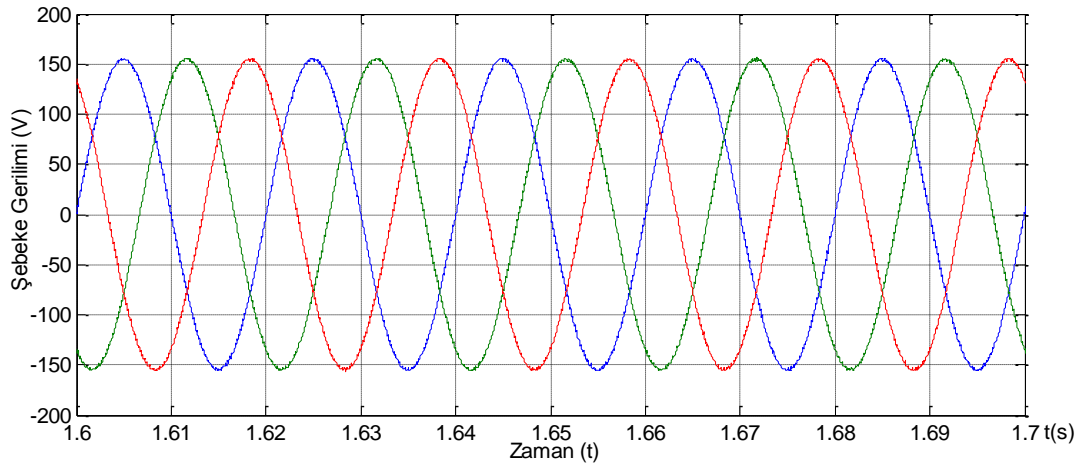
Şekil 3.21. Durum 1-2  $P_{FV} \approx P_{YÜK}$  için FV panel akımı



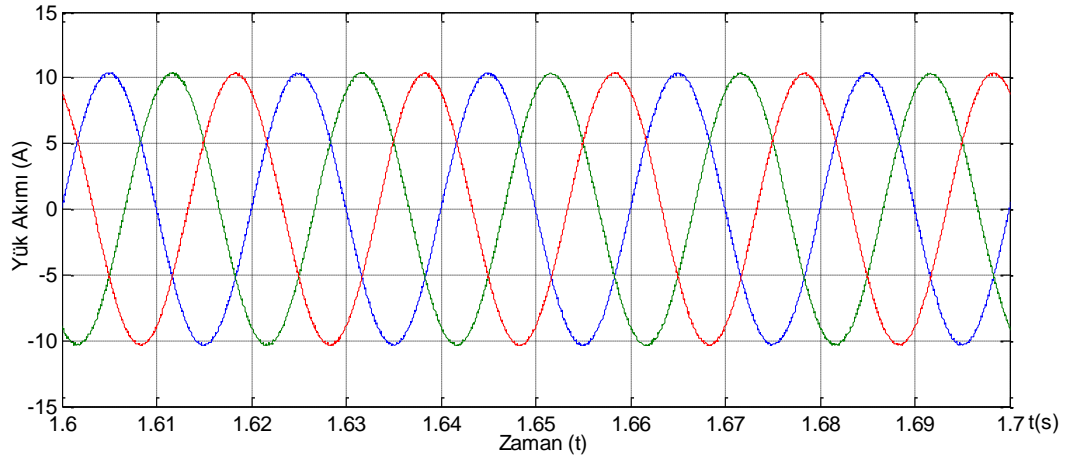
Şekil 3.22. Durum 1-2  $P_{FV} \approx P_{YÜK}$  için batarya akımı



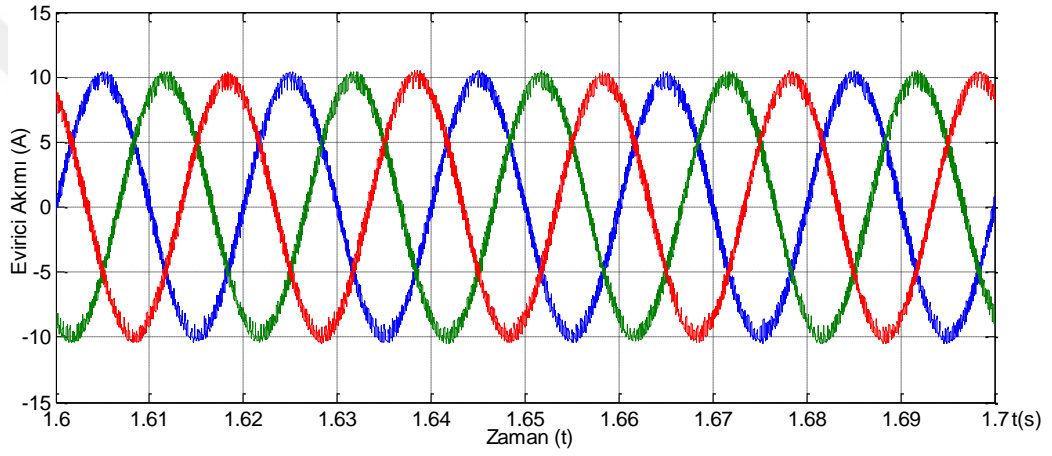
Şekil 3.23. Durum 1-2  $P_{FV} \approx P_{YÜK}$  için FV panel ve batarya toplam akımı



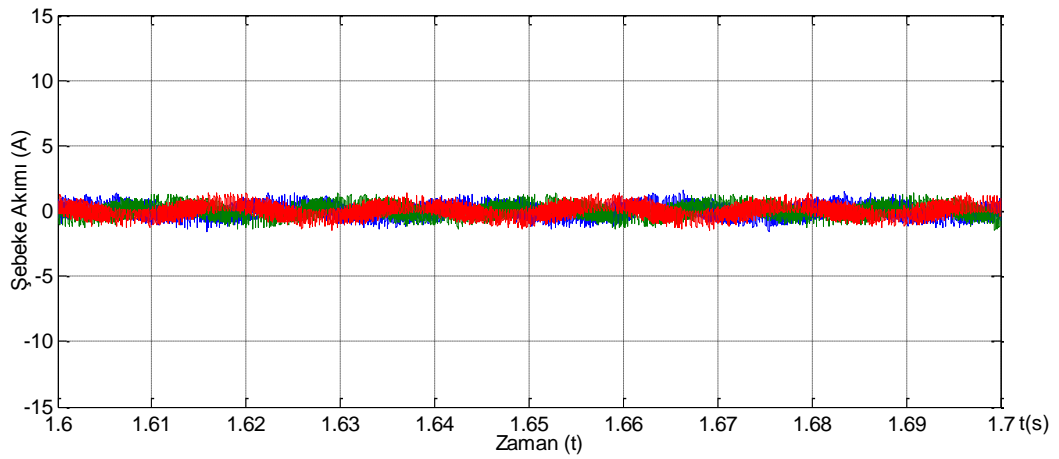
Şekil 3.24. Durum 1-2  $P_{FV} \approx P_{YÜK}$  için şebeke gerilimi



Şekil 3.25. Durum 1-2  $P_{FV} \approx P_{YÜK}$  için yük akımı



Şekil 3.26. Durum 1-2  $P_{FV} \approx P_{YÜK}$  için evirici akımı

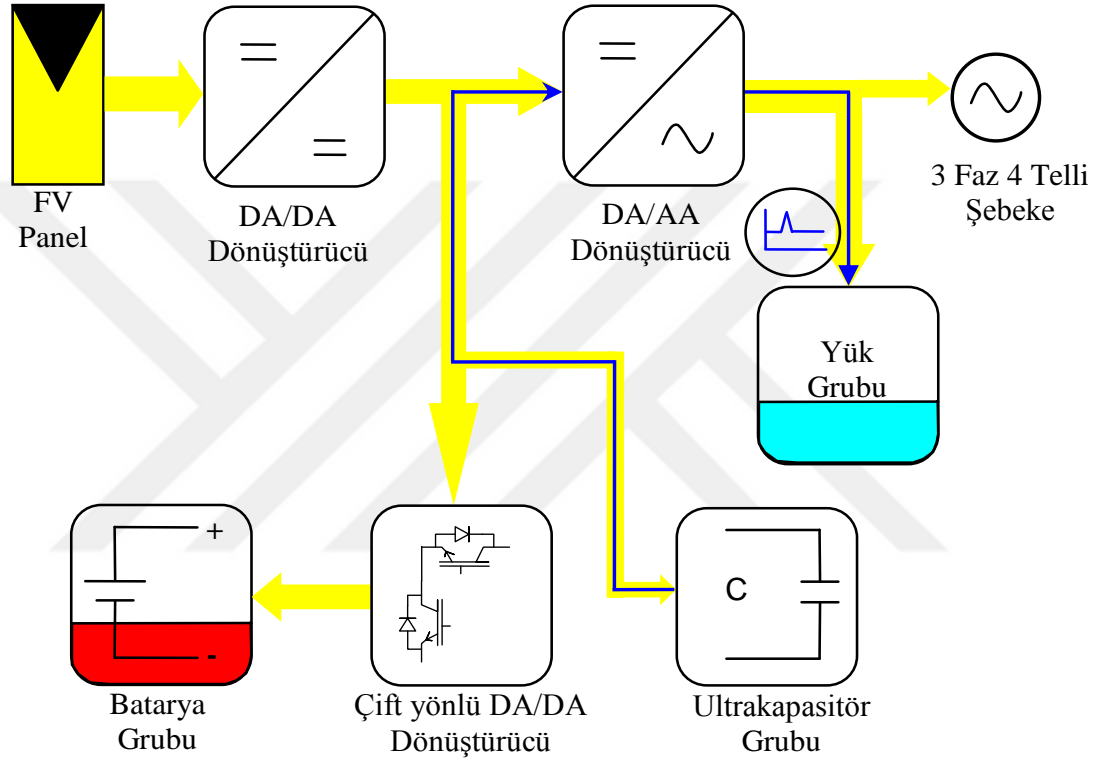


Şekil 3.27. Durum 1-2  $P_{FV} \approx P_{YÜK}$  için şebeke akımı



### 3.5.3. Durum 3 $P_{FV} > P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu düşük

Durum 3'de  $P_{FV} > P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu düşük olduğu durum incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 3.28'de verilmektedir. Bu durumda FV panel gücü yük gücünden fazla olduğundan yükün tamamını besledikten sonra kalan enerji ile batarya grubunu şarj etmekte ve şebekeye enerji aktarmaktadır.

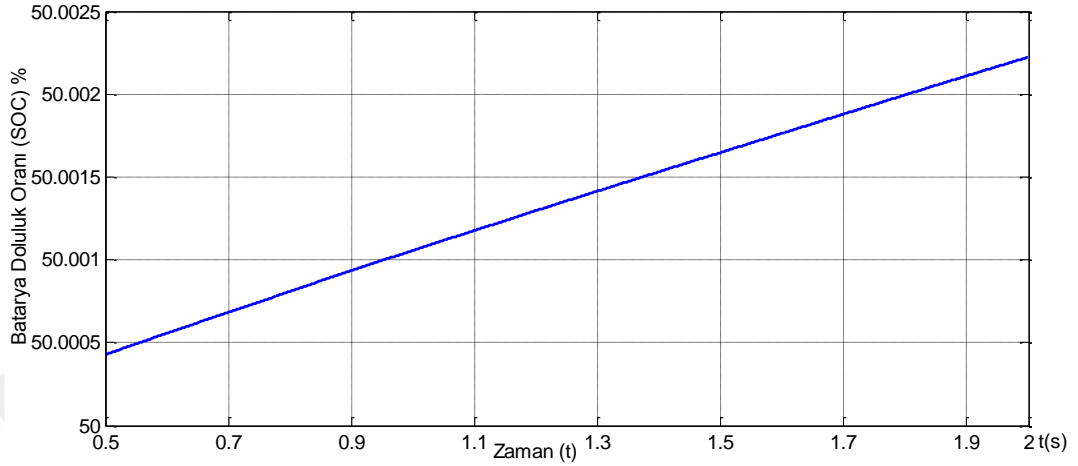


Şekil 3.28. Durum 3  $P_{FV} > P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  SOC düşük olduğu durumdaki güç akış diyagramı

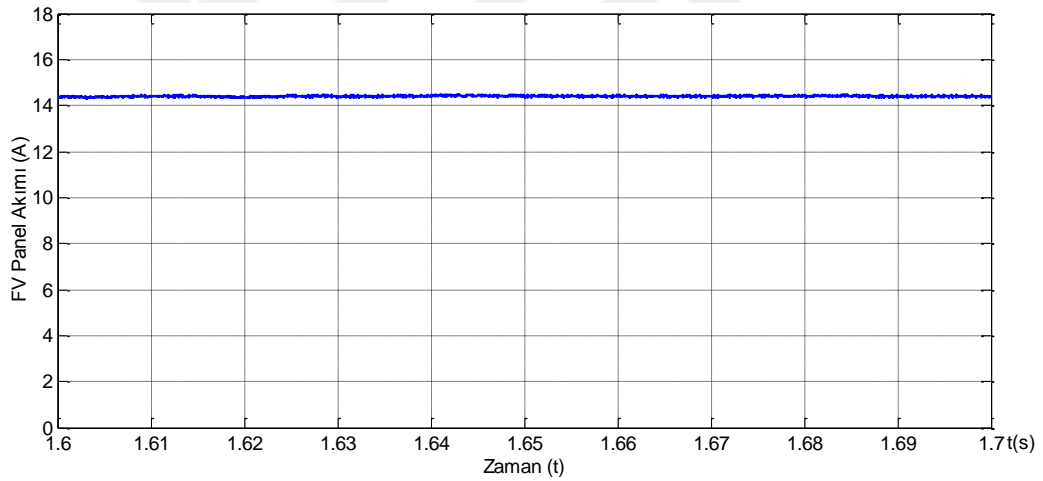
Batarya grubunun doluluk oranı %50 iken şarj olduğu sürece doluluk oranı artmaktadır ve bu artış Şekil 3.29'da ayrıntılı olarak verilmiştir. Şekil 3.30'da FV panellerin ürettiği akım yaklaşık olarak 14,5A'dir. Şekil 3.31'te batarya grubunun şarj akımı verilmektedir ve bu akım değeri yaklaşık olarak 3,5A'dir. FV panel ve batarya toplam akımı Şekil 3.32'de verilmektedir ve yaklaşık olarak 11A'dir.

Şebeke gerilimi, yük akımı ve evirici akımı sırasıyla Şekil 3.33-3.35'te verilmektedir. Yük akımı 5A, evirici akımı 11A, şebeke akımı 6A'dir. FV panel gücü yük gücünden fazla olduğu için yükün tamamı evirici ile beslenmekte ve şebekeye

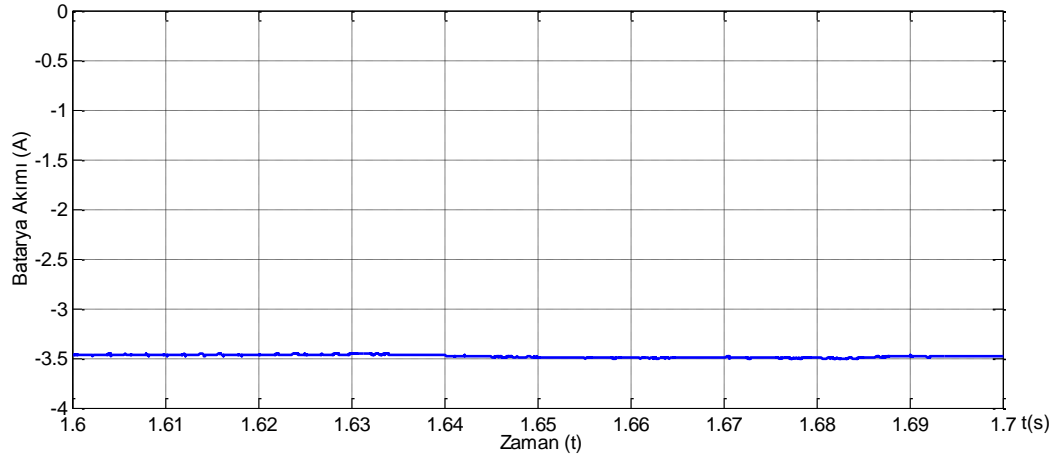
enerji aktarımı yapılmaktadır. Şekil 3.35'te şebekeye verilen akım değeri verilmektedir. Bu durumda FV panel birincil kaynak olmakta ve batarya grubuna, yük grubuna ve şebekeye enerji aktarılmaktadır.



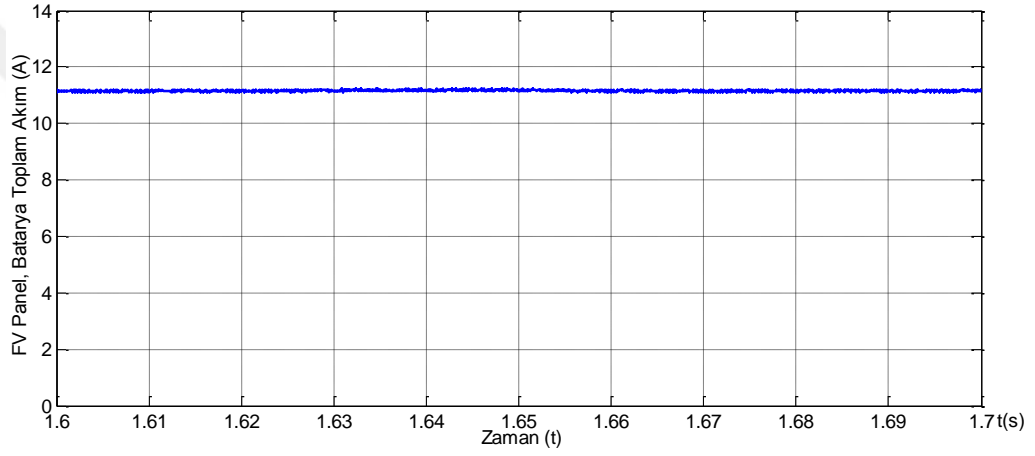
Şekil 3.29. Durum 3  $P_{FV} > P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu düşük



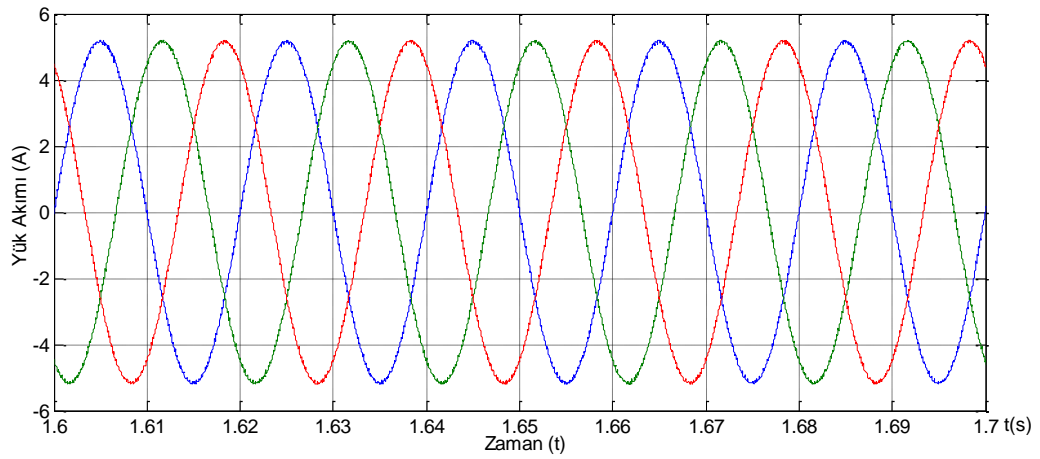
Şekil 3.30. Durum 3  $P_{FV} > P_{YÜK}$  için FV panel akımı



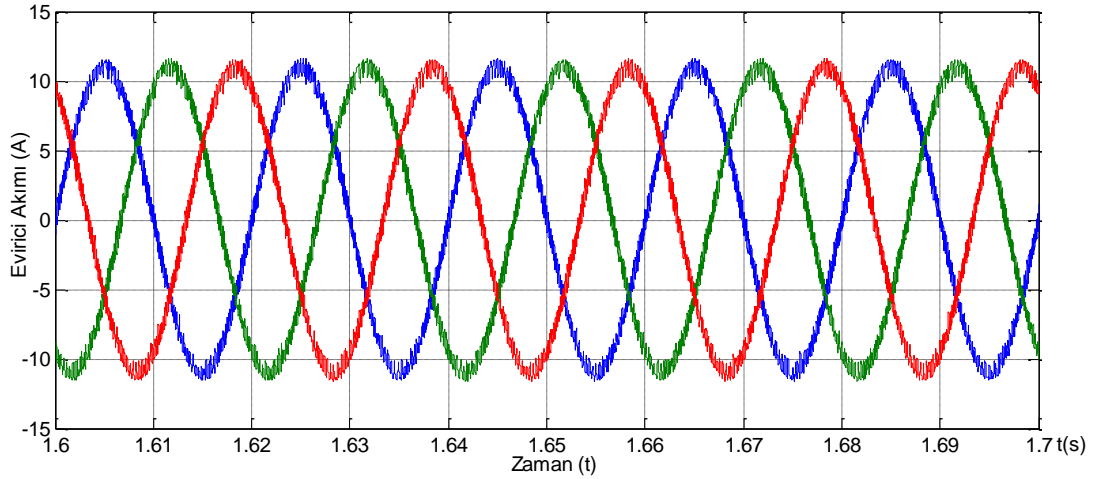
Şekil 3.31. Durum 3  $P_{FV} > P_{YÜK}$  için batarya akımı



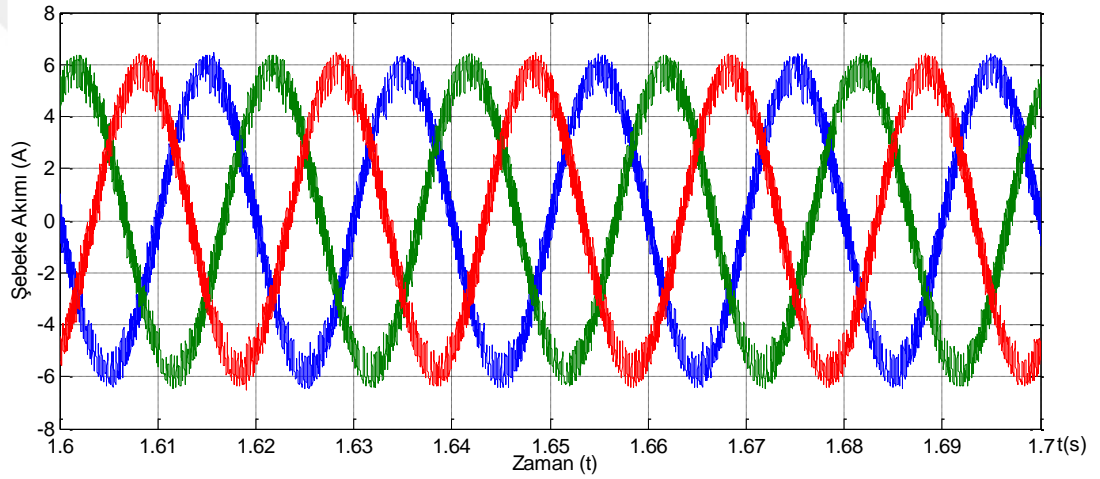
Şekil 3.32. Durum 3  $P_{FV} > P_{YÜK}$  için FV Panel ve batarya toplam akımı



Şekil 3.33. Durum 3  $P_{FV} > P_{YÜK}$  için yük akımı



Şekil 3.34. Durum 3  $P_{FV} > P_{YÜK}$  için evirici akımı



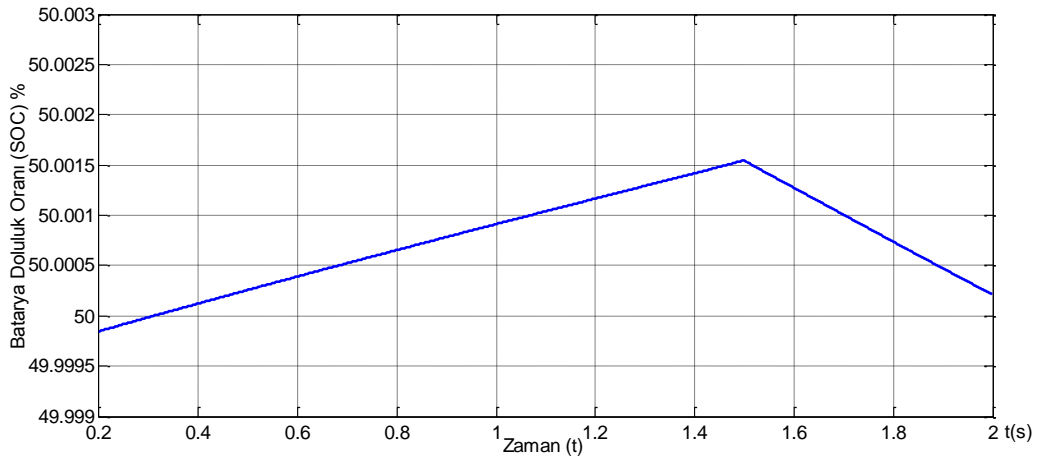
Şekil 3.35. Durum 3  $P_{FV} > P_{YÜK}$  için şebeke akımı

Durum 3'te yükün birden artış gösterdiği sonuçlar ele alınmıştır. Bu durumda yük akımı Şekil 3.40'de verildiği gibi 5A'den 21A'e ani olarak arttırılmaktadır. Yükün birden artması sonucu gerekli akım, şebeke ve eviriciden sağlanarak verilmektedir. Şekil 3.37'de FV panel akımı 14.5A'dir. Bu durumda yük akımı 1,5'inci saniyede bir anda artmaktadır. Yükteki bu güç artışını FV panel tek başına karşılayamamaktadır. Bu nedenle batarya grubu şarj durumunda iken yükü beslemek için Şekil 3.36'da görüldüğü gibi deşarj durumuna geçmektedir. Yükteki artış miktarı çok hızlı olduğundan batarya grubunun tepki süresi yavaş kalmaktadır. Batarya grubunun yavaş olan tepki süresi Şekil 3.38'de verilmektedir. Ayrıca bataryanın doluluk oranı da yükün aniden artması sonucu şarjdan deşarj durumuna geçmektedir. Şekil 3.36'da ayrıntılı olarak verilen batarya grubunun doluluk oranı %50 seviyesinden zamanla

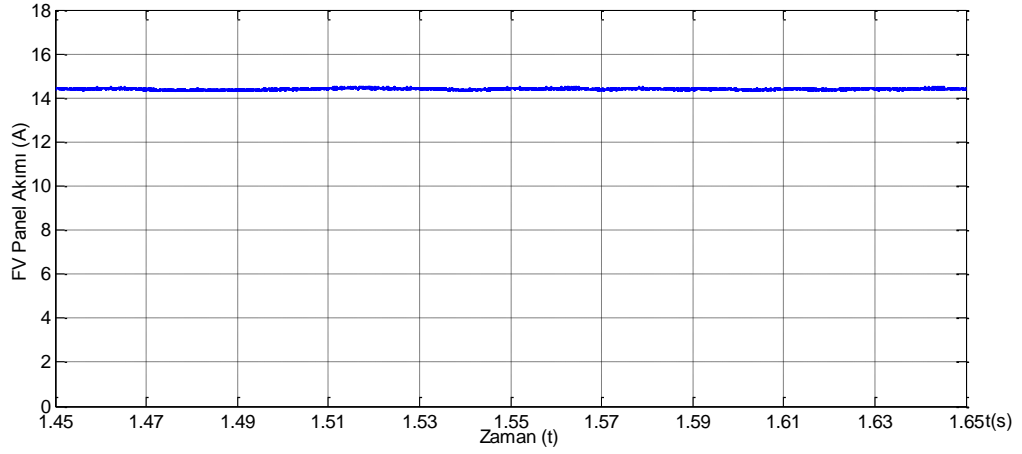
artarken 1,5s'den sonra deşarj durumuna geçtiğinden batarya doluluk oranı düşüşe geçmektedir.

Proje kapsamında önerilen hibrit enerji depolama sisteminin bir özelliği olarak ultrakapasitör çok hızlı bir şekilde yükün talep ettiği akımı vermeye başlar. Ultrakapasitörün çok hızlı olan tepki süresi Şekil 3.39'da görülmektedir. Ultrakapasitörün artan akıma hızlı tepki vermesi sistemdeki DA baranın gerilim çökmesini engeller. Ayrıca batarya grubunun derin deşarj (Deep of Discharge) olmasını engelleyerek çevrim ömrünü artırır. Yükün çektiği akım, evirici akımı ve şebeke akımı Şekil 3.40-3.41'de sırasıyla verilmektedir.

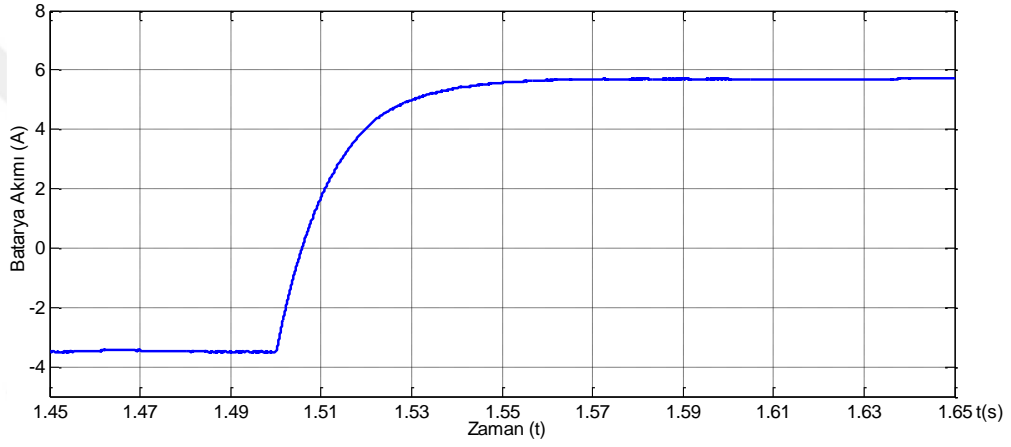
Yükün talep ettiği akımın artmasıyla birlikte evirici akımı da Şekil 3.41'de verildiği gibi artmaktadır. Ancak eviricinin tepki cevap süresi uzun olduğundan, anlık yük taleplerine çok hızlı cevap verememektedir. Bu durumda artan anlık yük akımının bir kısmı şebekeden karşılanmaktadır. Şekil 3.42'deki grafiğe bakıldığında, 1,5s'ye kadar eviriciden şebekeye doğru bir güç akışı olmaktadır, 1,5s sonrasında ise şebekeden yüke doğru bir enerji akmaktadır. Yükün ani olarak artması sırasında belirli bir süre boyunca şebekeden ve eviriciden yüke doğru ortak bir güç akışı olmaktadır. Böylece ani yük artışlarında şebeke üzerine düşen talep miktarını azaltarak şebeke üzerinde oluşabilecek gerilim dalgalanması azaltılabilir. Buradaki amaç hibrit bir enerji depolama sistemi oluşturularak batarya grubuna destek olarak, yükün uzun süreli ihtiyaçlarında batarya grubu ile ani yük talebinde ise ultrakapasitör ile son kullanıcıya cevap vermektir.



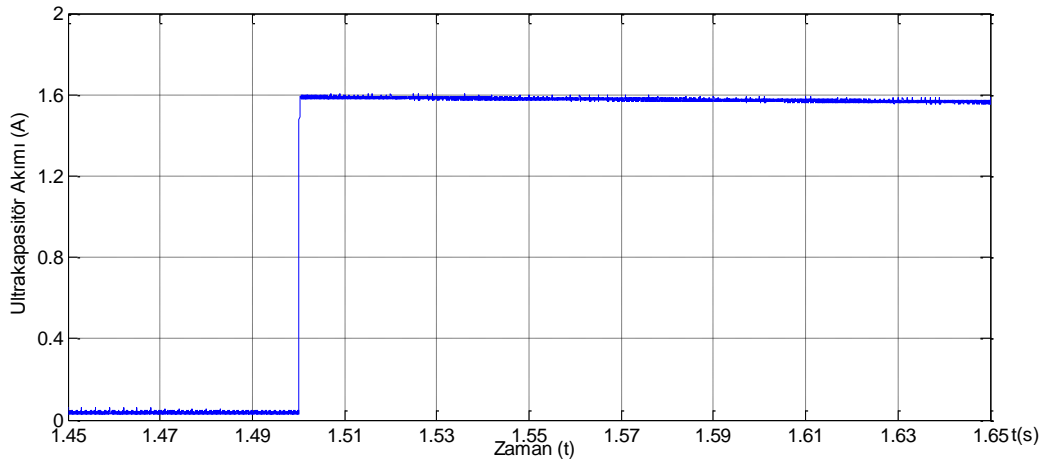
Şekil 3.36. Durum 3  $P_{FV} > P_{YÜK}$  artan yük için batarya doluluk durumu



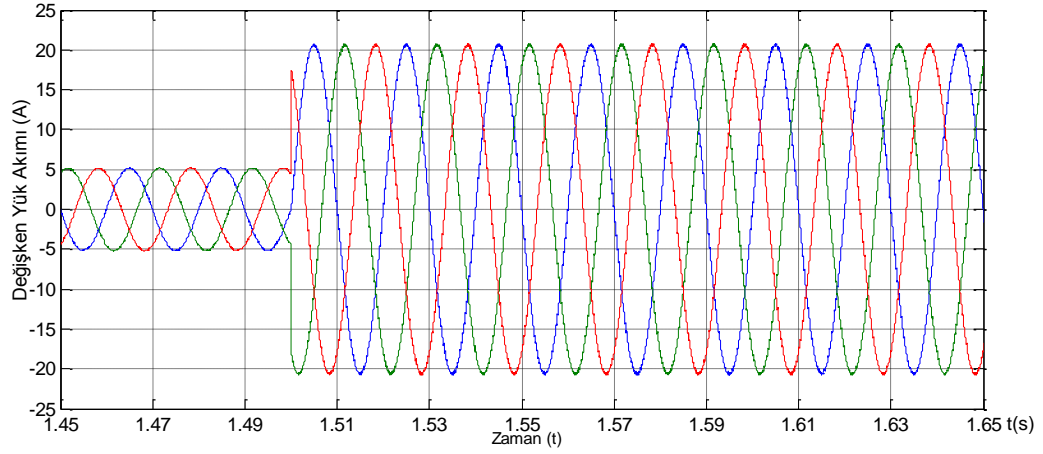
Şekil 3.37. Durum 3  $P_{FV} > P_{YÜK}$  artan yük için FV panel akımı



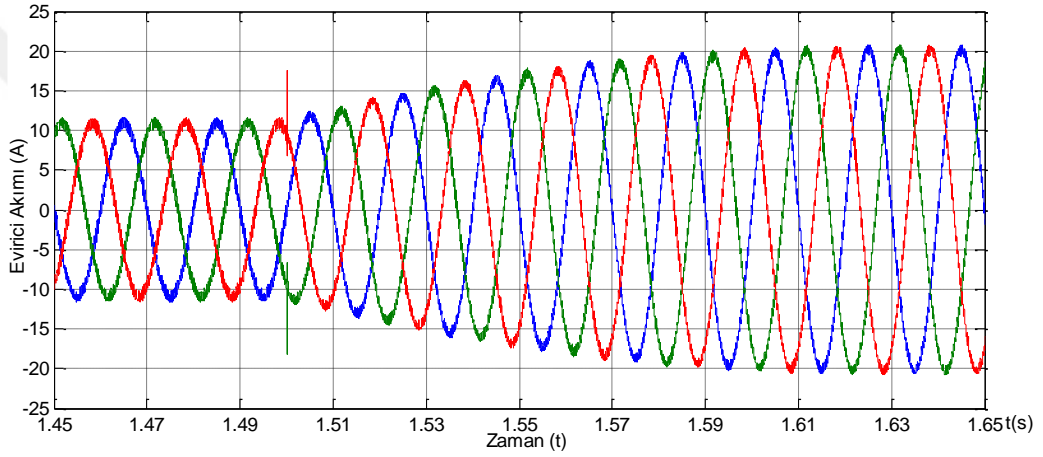
Şekil 3.38. Durum 3  $P_{FV} > P_{YÜK}$  artan yük için batarya akımı



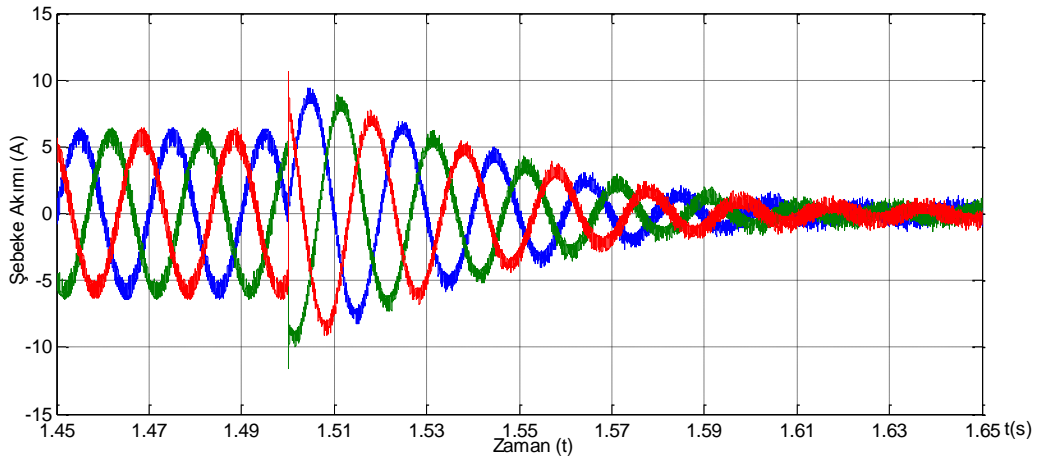
Şekil 3.39. Durum 3  $P_{FV} > P_{YÜK}$  artan yük için ultrakapasitör akımı



Şekil 3.40. Durum 3  $P_{FV} > P_{YÜK}$  artan yük için yük akımı



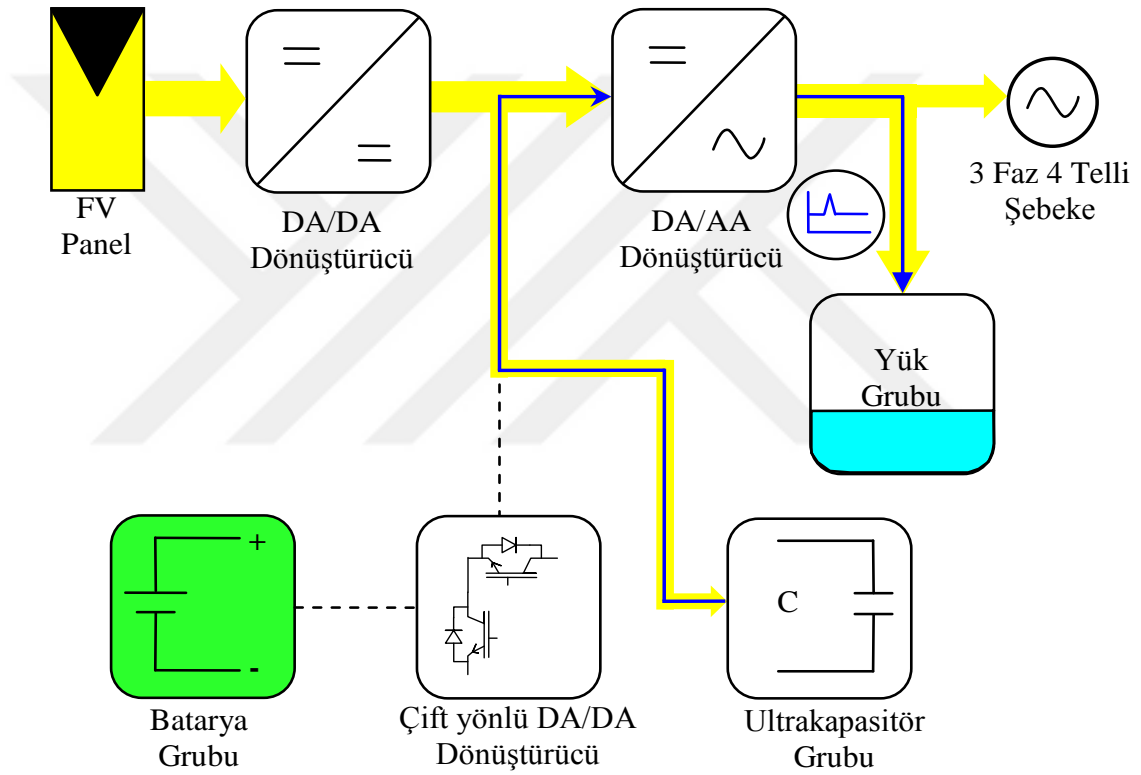
Şekil 3.41. Durum 3  $P_{FV} > P_{YÜK}$  artan yük için evirici akımı



Şekil 3.42. Durum 3  $P_{FV} > P_{YÜK}$  artan yük için şebeke akımı

### 3.5.4. Durum 4 $P_{FV} > P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu yüksek

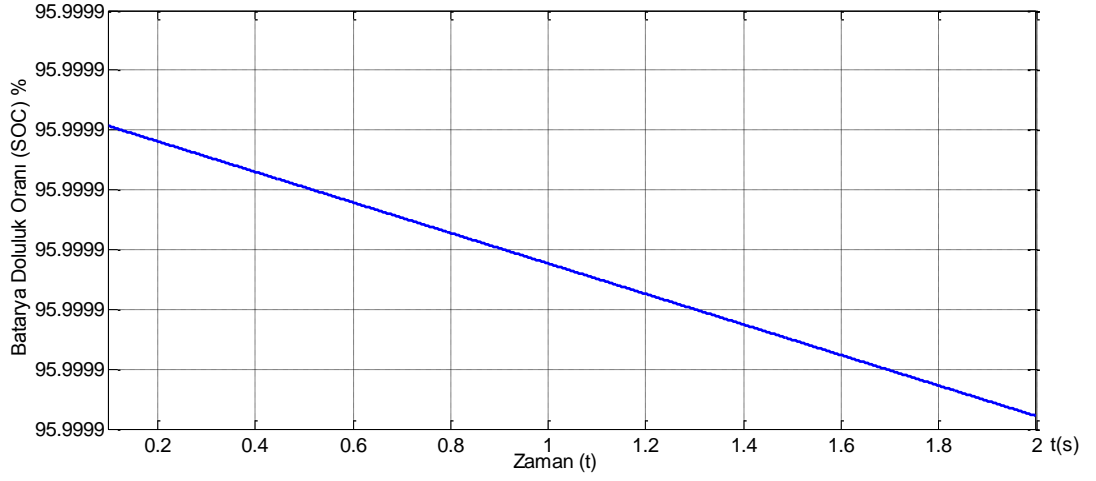
Durum 4'de  $P_{FV} > P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu yüksek olduğu durum incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 3.43'te verilmektedir. Bu durum bir önceki Durum 3'ün sadece bataryanın tam dolu olması halidir. Burada FV panel birincil kaynak durumundadır ve FV panel gücü yük gücünden fazladır. Batarya grubu dolu olduğundan DA bara ile bağlantısı yoktur. Şekil 3.44'te batarya grubunun doluluk oranı verilmektedir ve %95 doluluk seviyesinden başlayarak giderek deşarj olmaktadır.



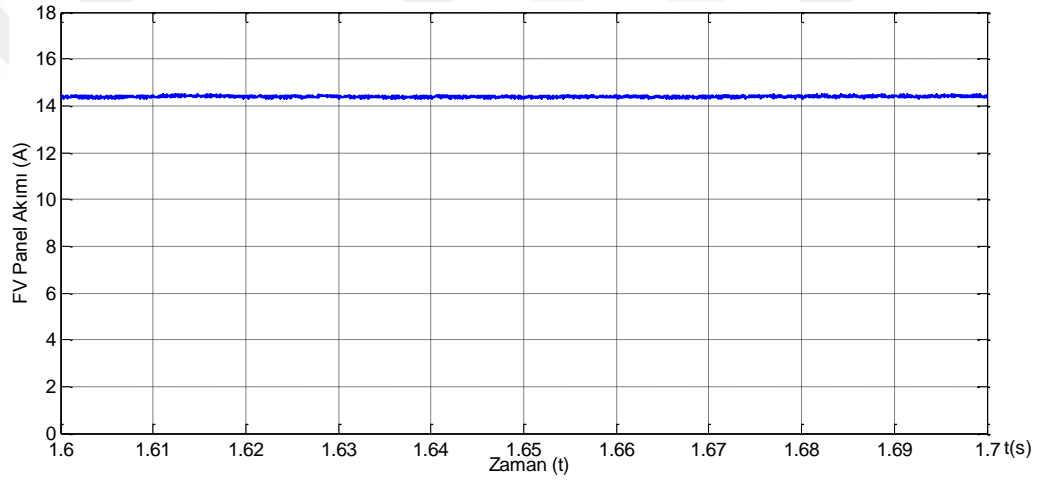
Şekil 3.43. Durum 4  $P_{FV} > P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  SOC yüksek olduğu durumdaki güç akış diyagramı

FV panel akımı Şekil 3.45'te 14,5A, batarya akımı Şekil 3.46'da 0A ve FV panel batarya toplam akımı ise Şekil 3.47'de 1,5A olarak verilmektedir. Yük ve evirici akımı sırasıyla Şekil 3.48-3.49'da 5A ve 13A olarak görülmektedir. FV panel gücü yük gücünden fazla olduğu için yükün tamamı evirici ile beslenmekte ve kalan enerji şebekeye aktarılmaktadır. Şekil 3.50'de şebekeye verilen akım değeri verilmektedir ve 8A'dir. Bu durumda FV panel birincil kaynak olmakla birlikte yüke ve şebekeye verilen akımların toplamı evirici çıkışındaki akıma eşittir.

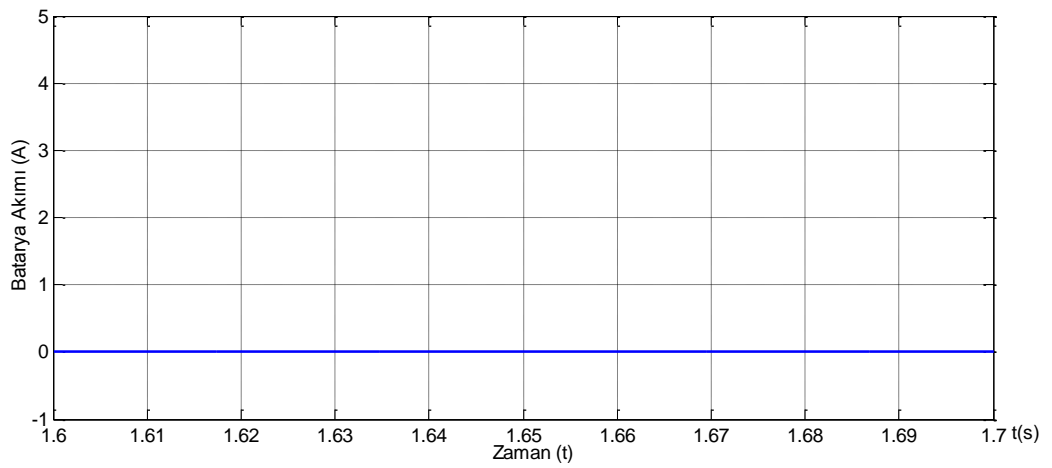




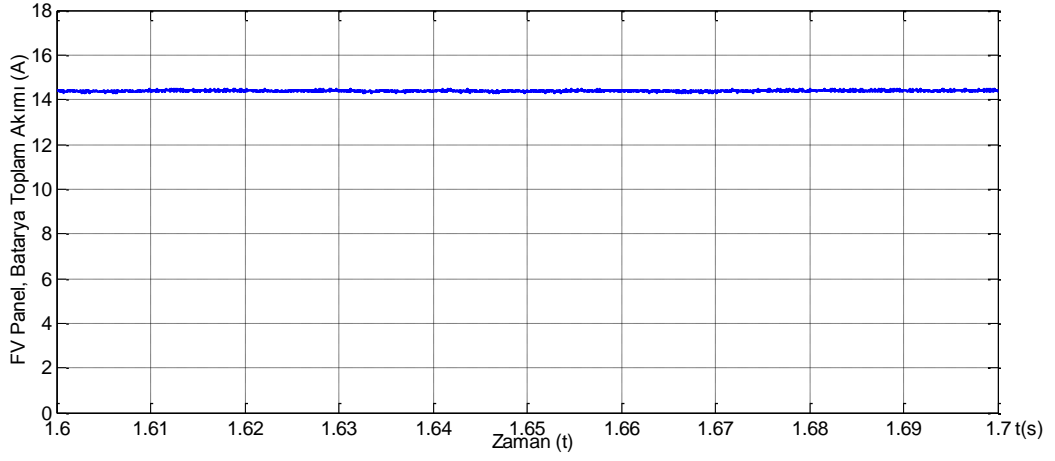
Şekil 3.44. Durum 4  $P_{FV} > P_{YÜK}$  için batarya doluluk durumu yüksek



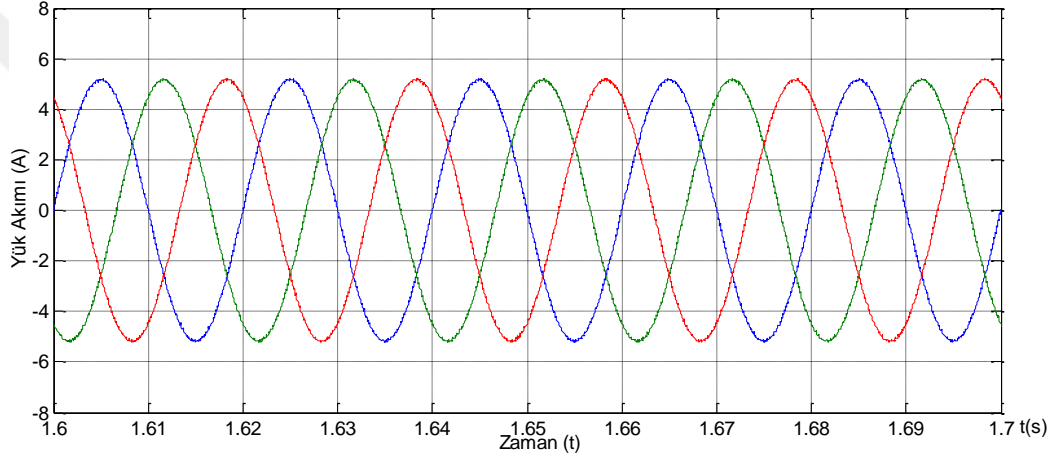
Şekil 3.45. Durum 4  $P_{FV} > P_{YÜK}$  için FV panel akımı



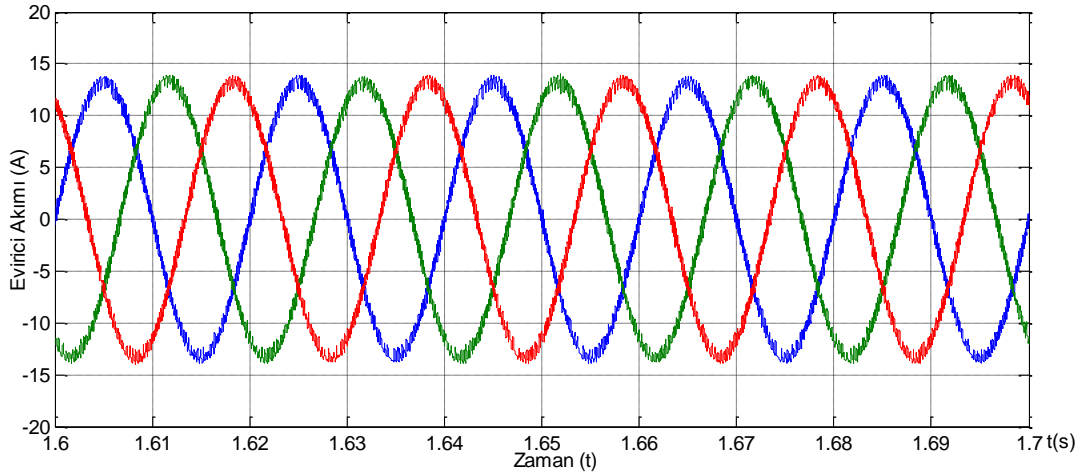
Şekil 3.46. Durum 4  $P_{FV} > P_{YÜK}$  için batarya akımı



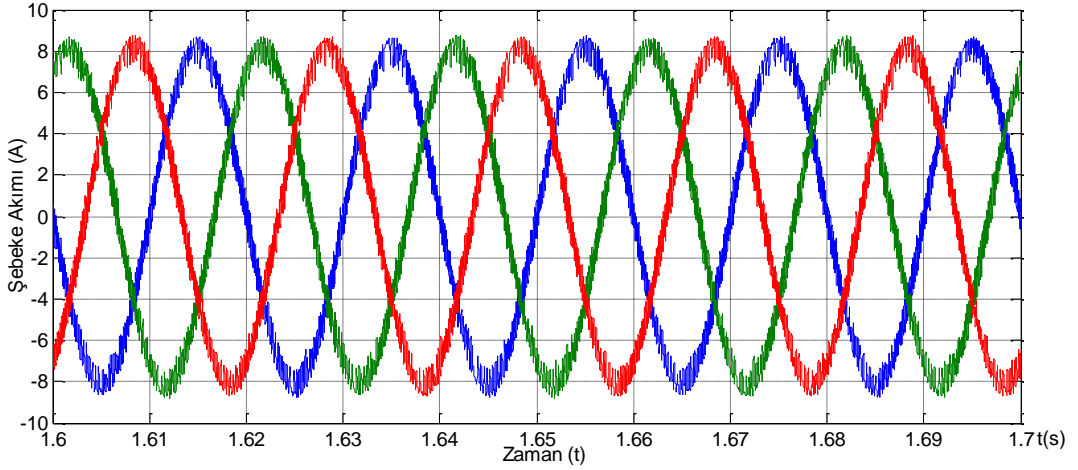
Şekil 3.47. Durum 4  $P_{FV} > P_{YÜK}$  için FV panel ve batarya toplam akımı



Şekil 3.48. Durum 4  $P_{FV} > P_{YÜK}$  için yük akımı



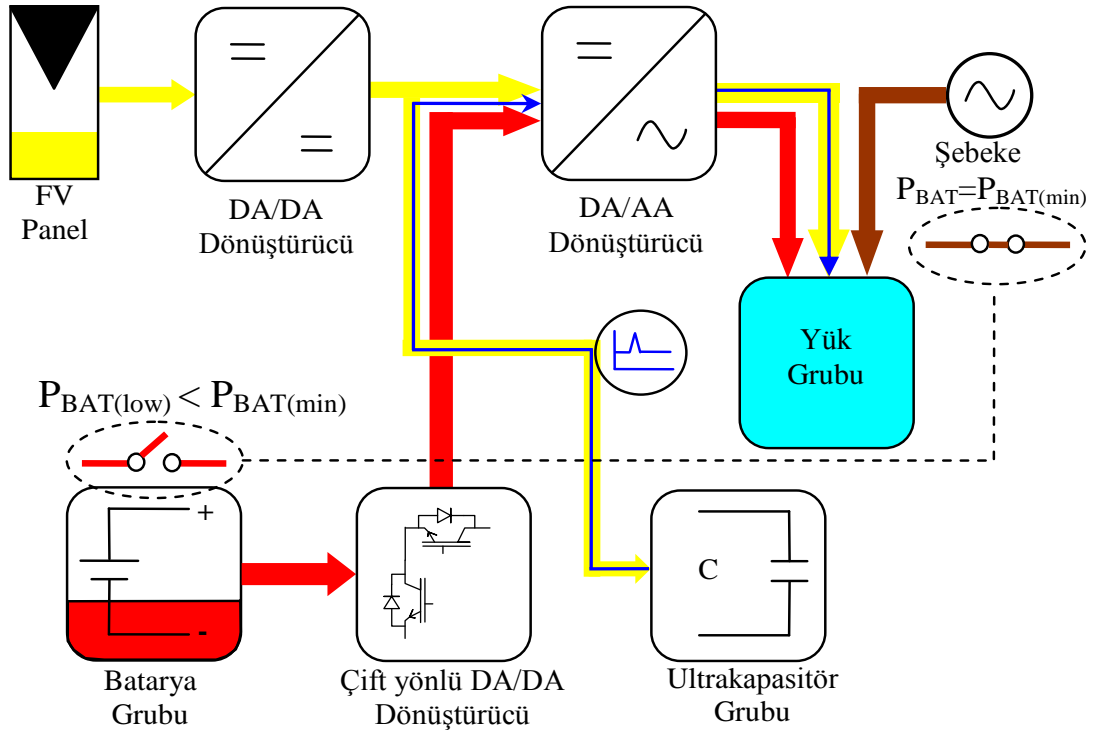
Şekil 3.49. Durum 4  $P_{FV} > P_{YÜK}$  için evirici akımı



Şekil 3.50. Durum 4  $P_{FV} > P_{YÜK}$  için şebeke akımı

### 3.5.5. Durum 5 $P_{FV} < P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu düşük

Durum 5’de  $P_{FV} < P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu düşük olduğu durum incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 3.51’de verilmektedir. Bu durumda FV panel gücü sistemde bulunan yükün gücünden küçüktür. FV panelde üretilen gücün tamamı yük grubuna aktarılmaktadır. Batarya grubundan da yük grubuna enerji akışı olmaktadır.

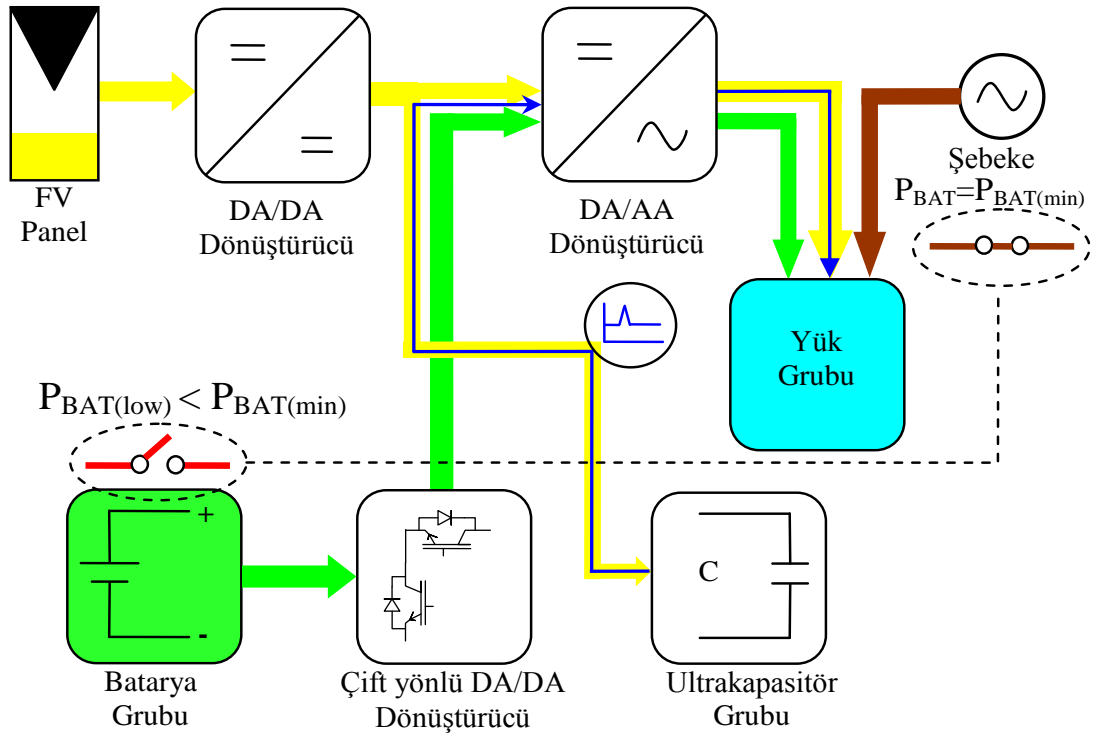


Şekil 3.51. Durum 5  $P_{FV} < P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  SOC düşük olduğu durumdaki güç akış diyagramı

Yükün talep ettiği güç çok fazla olduğundan kalan güç talebi şebekeden sağlanmaktadır. Batarya grubu bu durumda deşarj olmaktadır. Fakat batarya grubunun deşarj akımı bataryaların sağlığı açısından sınırlanarak verilmekte olup bu durumda belirlenen maksimum deşarj akımı ile enerji aktarmaktadır. Burada batarya grubunun doluluk oranı sürekli olarak takip edilerek SOC %20'nin altına geldiğinde çift yönlü DA/DA dönüştürücü DA bara ile bağlantısını kesip, kontrol algoritması anahtarlama sinyallerini sıfır konumuna getirmektedir. Ultrakapasitör ise DA baraya direkt olarak bağlı olduğundan sürekli olarak aktif durumdadır. Ani yük değişiminde çok hızlı bir şekilde deşarj olarak yük gücünü karşılamaktadır.

### 3.5.6. Durum 6 $P_{FV} < P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu yüksek

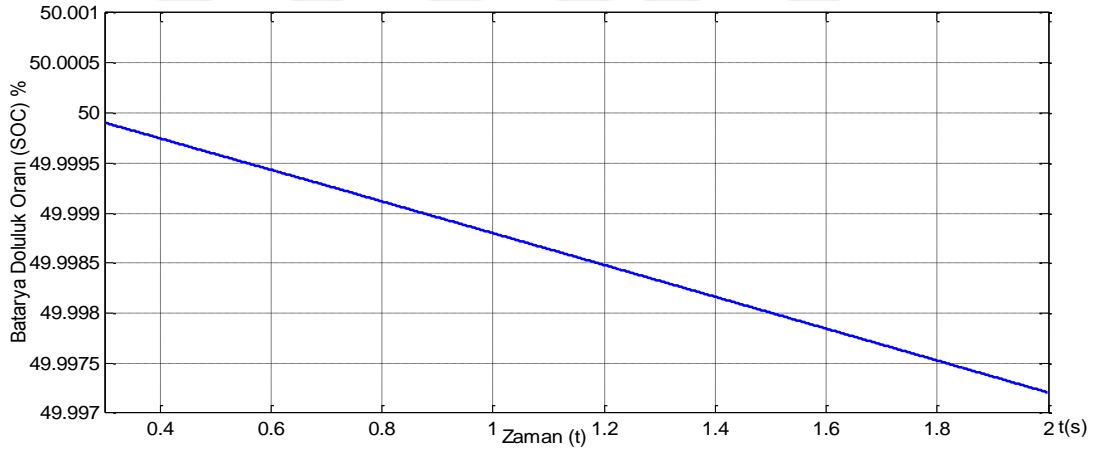
Durum 6'da  $P_{FV} < P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu yüksek olduğu durum incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 3.52'de verilmektedir. Bu durum bir önceki Durum 5'in sadece bataryanın tam dolu olması halidir. Burada FV panel gücü yük gücünden küçük olduğundan yük grubunu FV panel, batarya grubu ve şebeke ile beslemektedir. Burada ultrakapasitör Durum 5'teki gibi davranarak ani yüklenme durumunda deşarj olarak katkı sağlamaktadır.



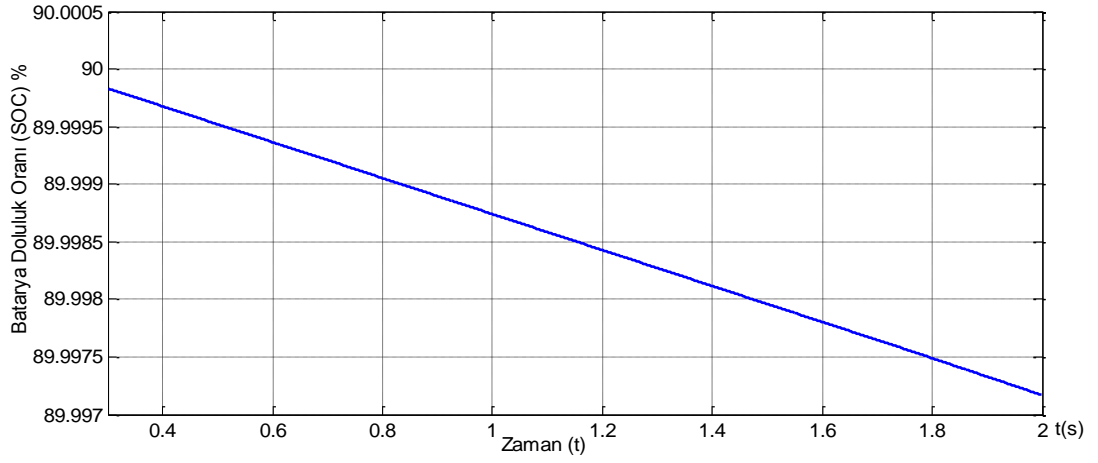
Şekil 3.52. Durum 6  $P_{FV} < P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  yüksek olduğu durumdaki güç akış diyagramı

Durum 5 ve Durum 6'daki şartlar ele alınarak simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonuçları Şekil 3.53-3.61'de verilmektedir. İki durum arasındaki fark batarya doluluk oranlarının düşük ve yüksek olmasıdır. Bu doluluk oranları Şekil 3.53 ve Şekil 3.54'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

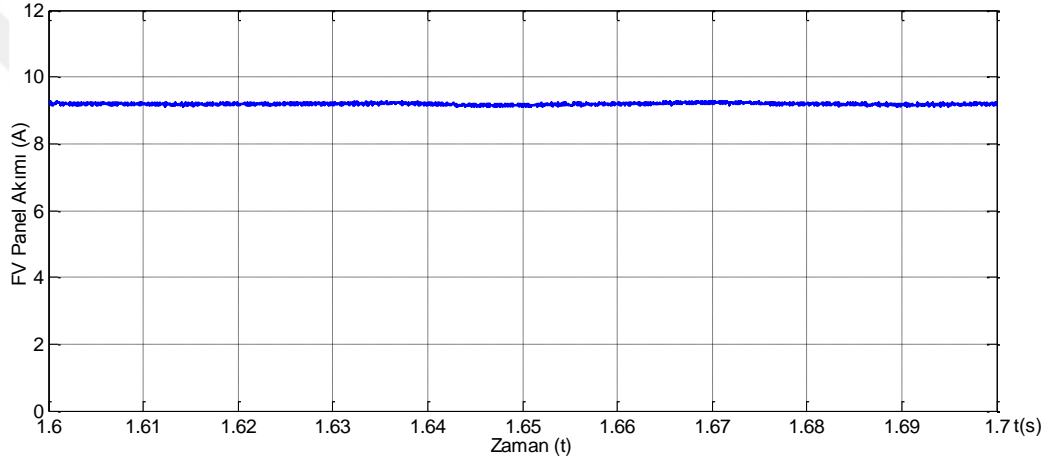
Şekil 3.55'te FV panellerin ürettiği akım yaklaşık olarak 9A'dır. Batarya grubu bu her iki durumda da deşarj olmaktadır ve deşarj akımı yaklaşık 3,25A'dır ve Şekil 3.56'da görülmektedir. FV panel ve batarya grup toplam akımı Şekil 3.57'de verilmektedir ve toplam akım 12,5A'dır. Bu durumda yük grubunun gücü çok fazla olduğundan yükü FV panel, batarya grubu ve şebeke birlikte beslemektedir. Yük, evirici ve şebeke akımı sırasıyla simülasyon sonuçlarında ayrıntılı olarak görülmektedir. Yük akımı 22,5A, evirici akımı 12A ve şebeke akımı ise 10,5A'dır. Sonuçlar Şekil 3.58-3.60'te verilmektedir. Yük akımı Durum 5 ve 6'da yük grubunun akım toplamı evirici çıkışındaki ve şebekeden çekilen akımların toplamına eşittir.



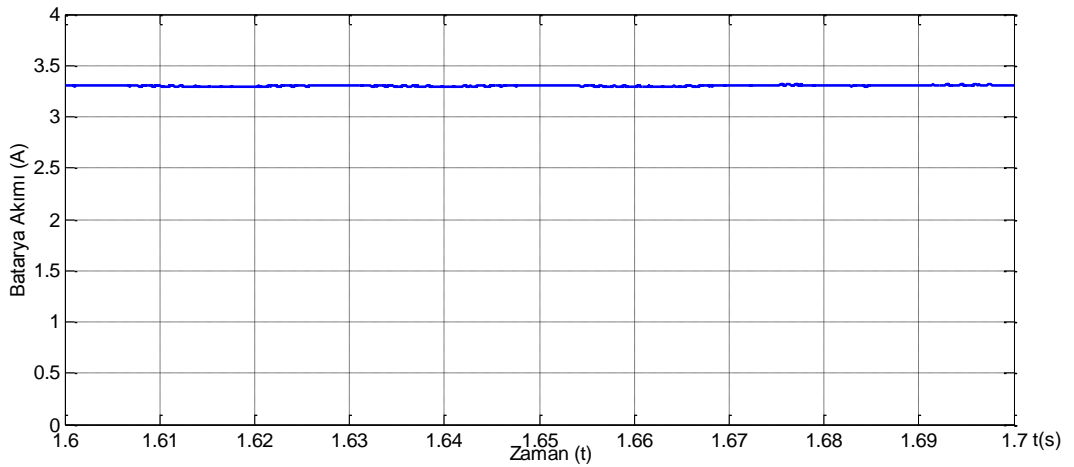
Şekil 3.53. Durum 5  $P_{FV} < P_{YÜK}$  için batarya doluluk oranı düşük



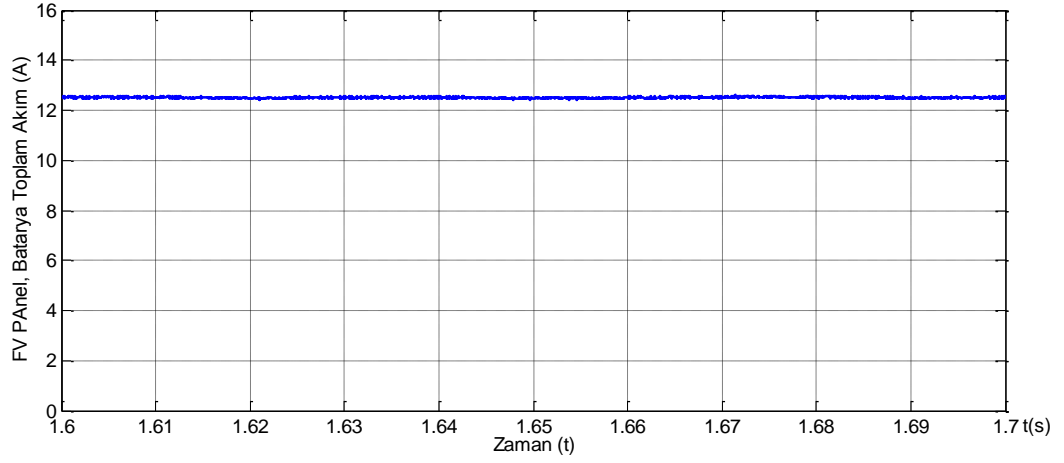
Şekil 3.54. Durum 6  $P_{FV} < P_{YÜK}$  için batarya doluluk oranı yüksek



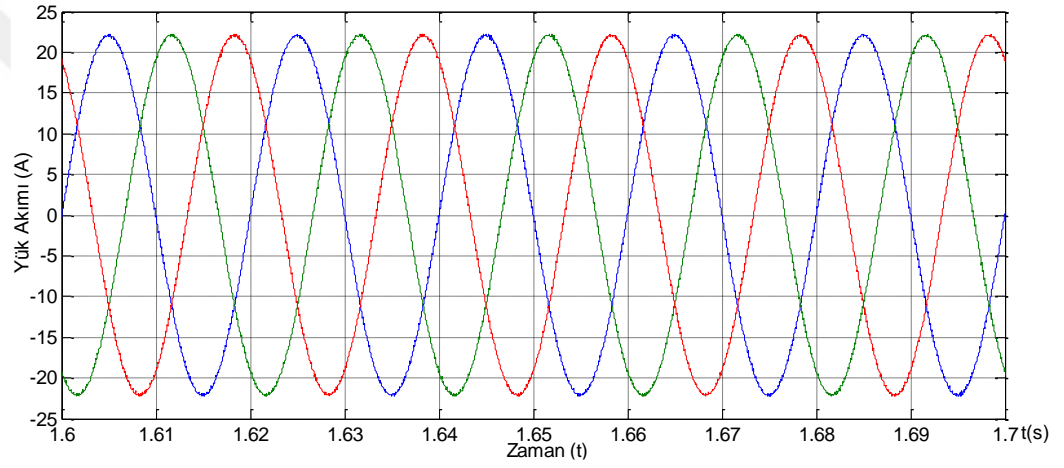
Şekil 3.55. Durum 5-6  $P_{FV} < P_{YÜK}$  için FV panel akımı



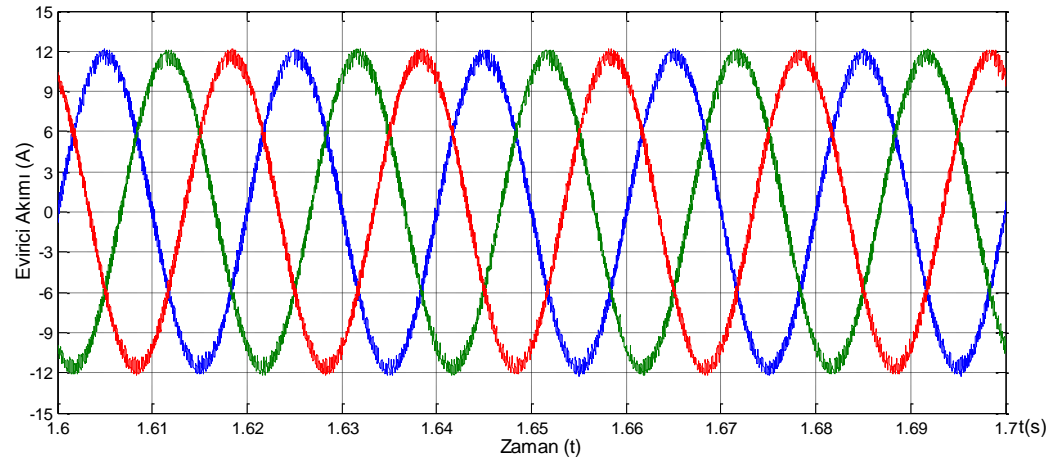
Şekil 3.56. Durum 5-6  $P_{FV} < P_{YÜK}$  için batarya akımı



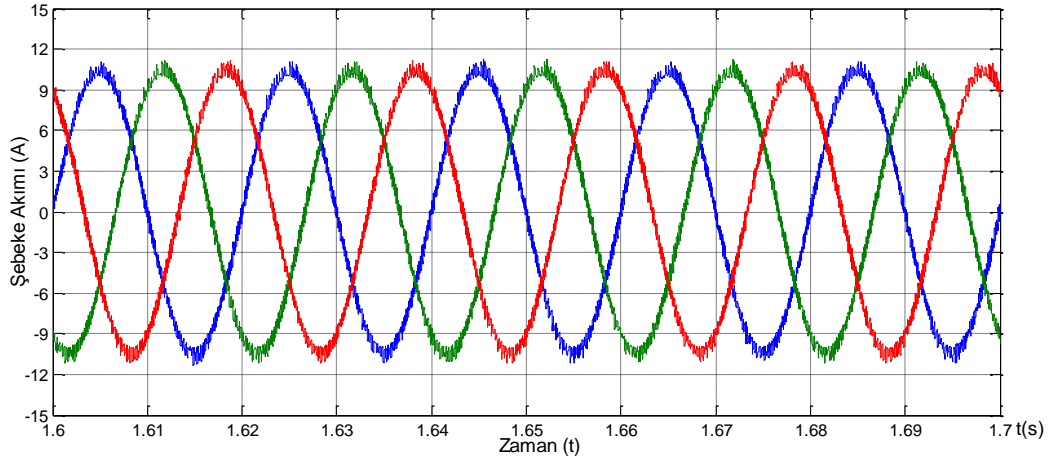
Şekil 3.57. Durum 5-6  $P_{FV} < P_{YUK}$  için FV panel ve batarya toplam akımı



Şekil 3.58. Durum 5-6  $P_{FV} < P_{YUK}$  için yük akımı



Şekil 3.59. Durum 5-6  $P_{FV} < P_{YUK}$  için evirici akımı

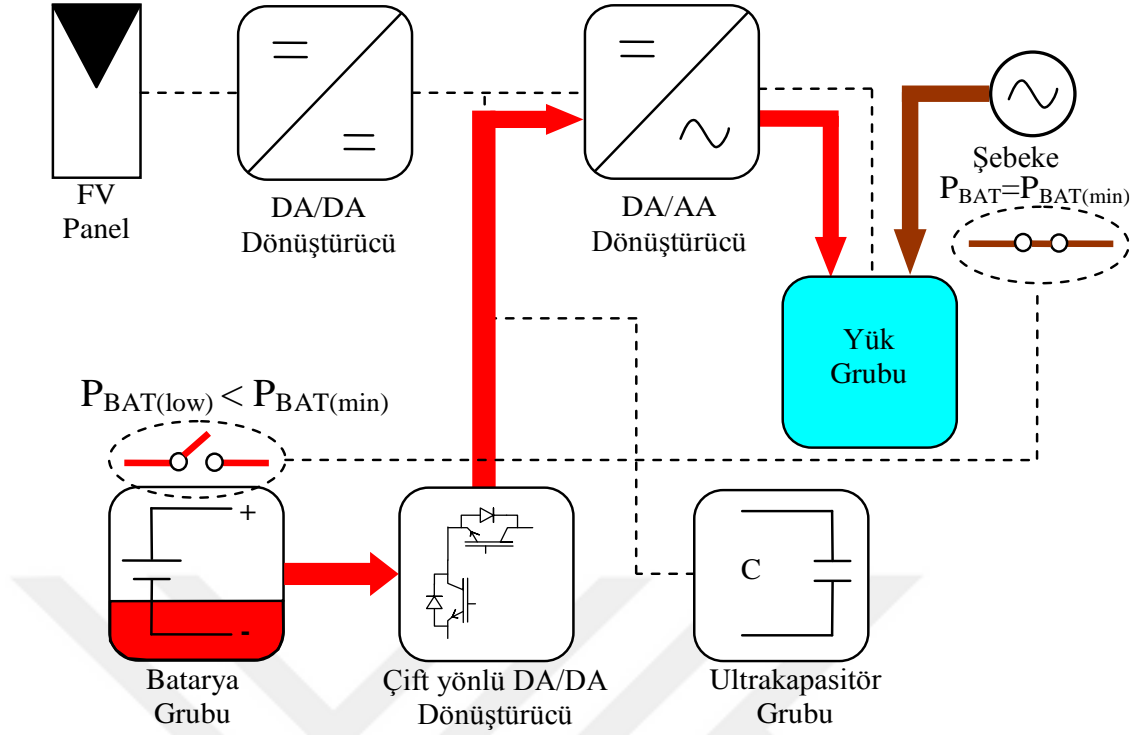


Şekil 3.60. Durum 5-6  $P_{FV} < P_{YÜK}$  için şebeke akımı

### 3.5.7. Durum 7 $P_{FV}=0$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu düşük

Durum 7’de  $P_{FV}=0$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu düşük olduğu durum incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 3.61’de verilmektedir. Bu durumda FV panel gücü sıfırdır yani FV paneller tamamen bulutlanmış veya gece olmuştur. Bu durumda FV panellerden hiçbir şekilde enerji akışı olmamakta ve birincil kaynak batarya grubu olmaktadır. Batarya grubu belirlenen maksimum deşarj akımı ile tük grubunu beslemektedir. Yük grubunun talep ettiği gücün bir kısmı batarya grubu ile kalan kısmı ise şebeke tarafında sağlanmaktadır. Batarya grubu bu durumda deşarj olmaktadır. Burada batarya grubunun doluluk oranı sürekli olarak takip edilerek SOC %20’nin altına geldiğinde çift yönlü DA/DA dönüştürücü DA bara ile bağlantısını kesip, kontrol algoritması anahtarlama sinyallerini sıfır konumuna getirmektedir. Ultrakapasitör ise DA baraya direkt olarak bağlı olduğundan sürekli olarak aktif durumdadır. Ani yük değişiminde çok hızlı bir şekilde deşarj olarak yük gücünü karşılamaktadır.



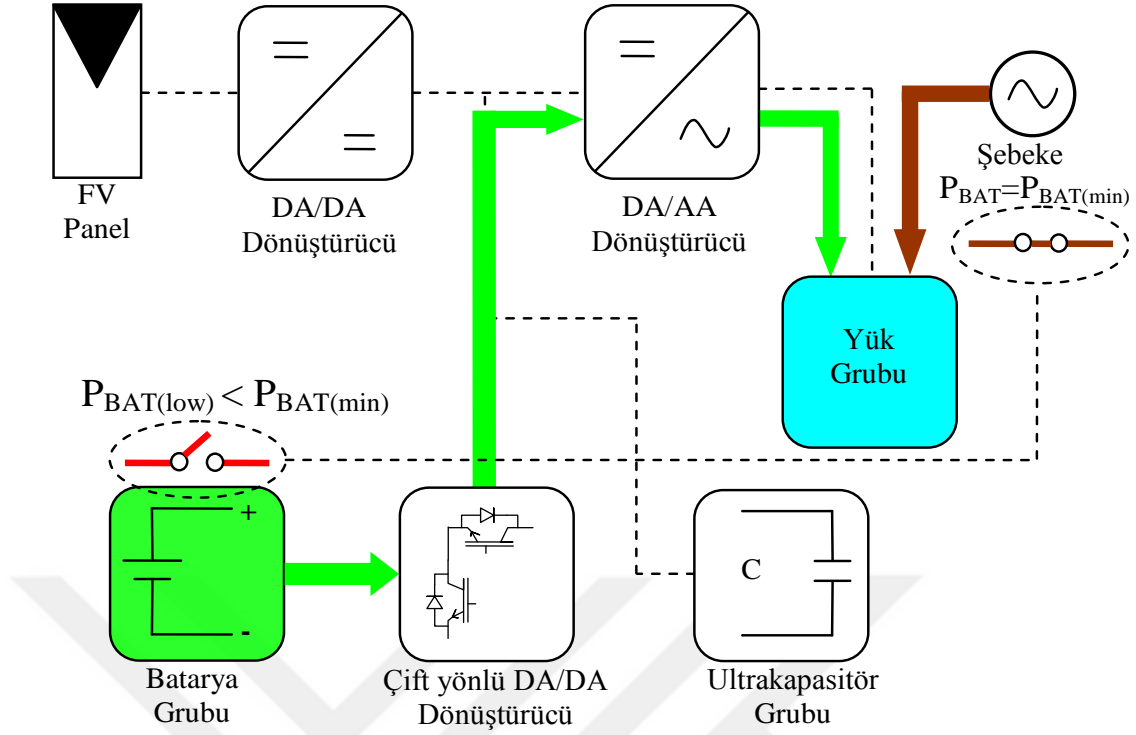


Şekil 3.61. Durum 7  $P_{FV}=0$  ve  $P_{BAT}$  SOC düşük olduğu durumdaki güç akış diyagramı

### 3.5.8. Durum 8 $P_{FV}=0$ ve $P_{BAT}$ batarya doluluk durumu yüksek

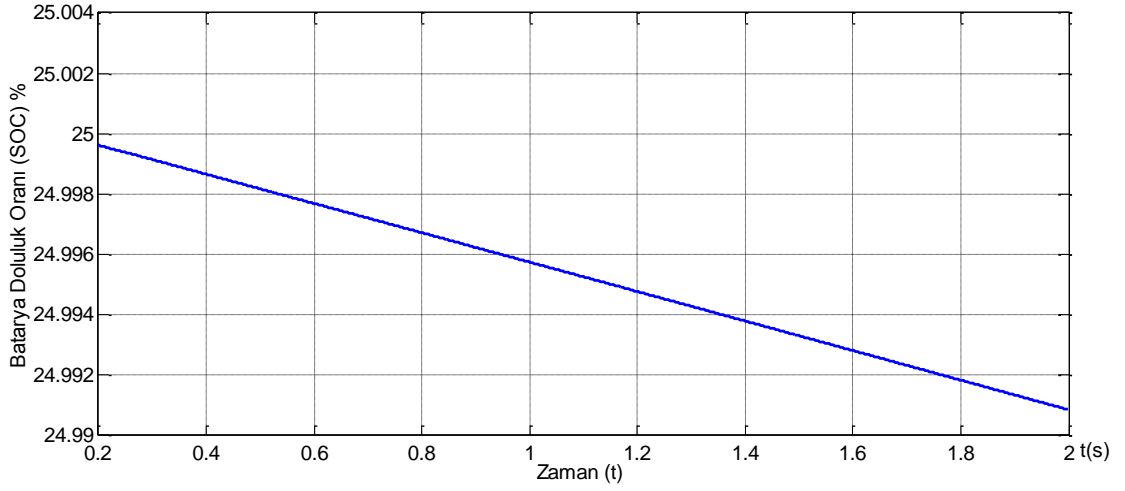
Durum 8’de  $P_{FV}=0$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu yüksek olduğu durum incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 3.62’de verilmektedir. Bu durum bir önceki Durum 7’nin sadece bataryanın tam dolu olması halidir. Burada FV panel gücü sıfırdır ve DA bara ile bağlantısı kesilmiştir. Yük grubunu batarya ve şebeke beslemektedir. Burada ultrakapasitör Durum 7’teki gibi davranarak ani yüklenme durumunda deşarj olarak katkı sağlamaktadır.

Durum 7 ve Durum 8’deki şartlar ele alınarak simülasyon yapılmıştır. Simülasyon sonuçları Şekil 3.63-3.70’te verilmektedir. İki durum arasındaki fark batarya doluluk oranlarının düşük ve yüksek olmasıdır. Bu doluluk oranları Şekil 3.63 ve Şekil 3.64’te ayrıntılı olarak verilmiştir.

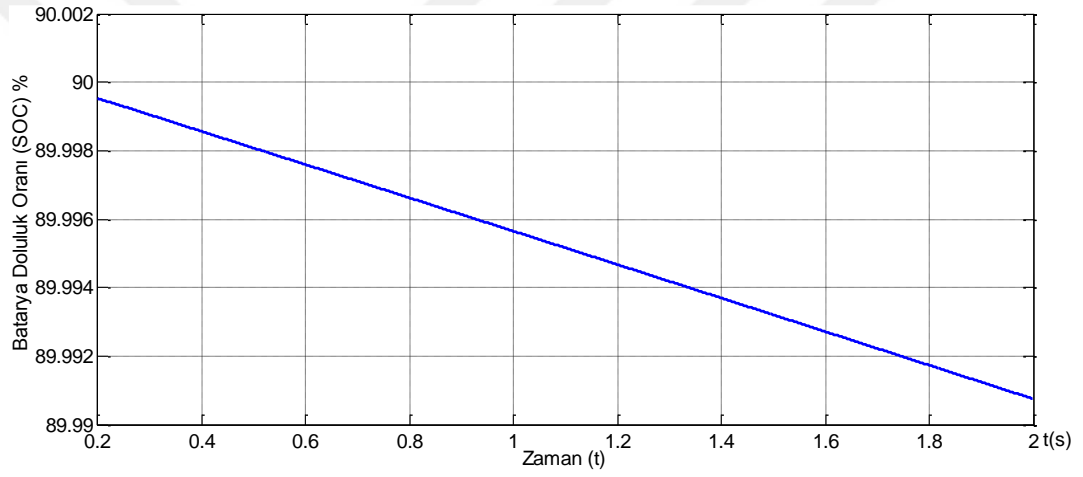


Şekil 3.62. Durum 8  $P_{FV}=0$  ve  $P_{BAT}$  SOC yüksek olduğu durumdaki güç akış diyagramı

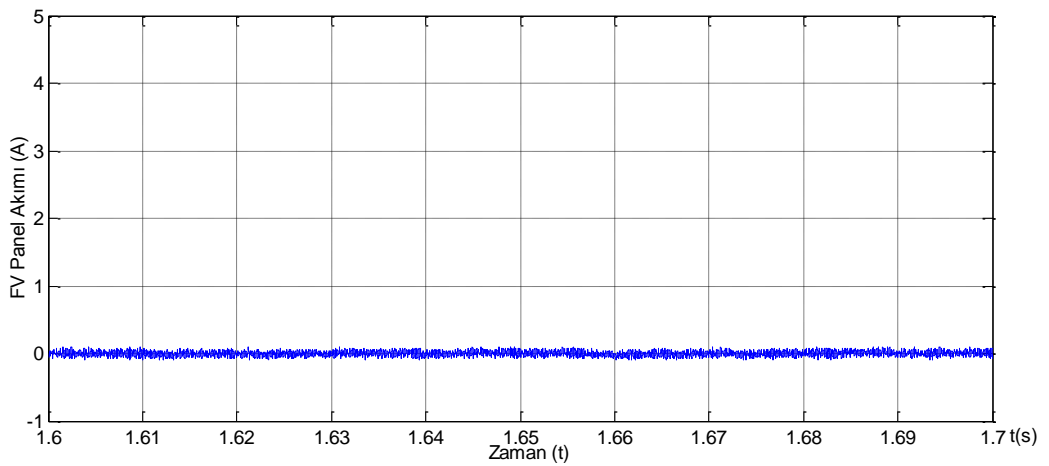
Şekil 3.65'te FV panel akımı verilmektedir ve FV paneller pasif durumda olduğundan DA baraya bir akım akışı yoktur. Batarya grubu bu her iki durumda da deşarj olmaktadır ve deşarj akımı yaklaşık 11,5A'dir ve Şekil 3.66'da görülmektedir. FV panel akımı sıfır olduğundan, DA bara toplam akımı batarya grup akımına eşittir ve 12,5A olup Şekil 3.67'de verilmektedir. Bu durumda yük grubunun gücü, batarya grubu ve şebeke tarafından karşılanmaktadır. Yük, evirici ve şebeke akımı sırasıyla simülasyon sonuçlarında ayrıntılı olarak görülmektedir. Yük akımı 22,5A, evirici akımı 11A ve şebeke akımı ise 11,5A'dir sonuçlar Şekil 3.69-3.70'te verilmektedir. Yük akımı Durum 7 ve 8'de yük grubunun akımı, evirici çıkışındaki ve şebekeden çekilen akımların toplamına eşittir.



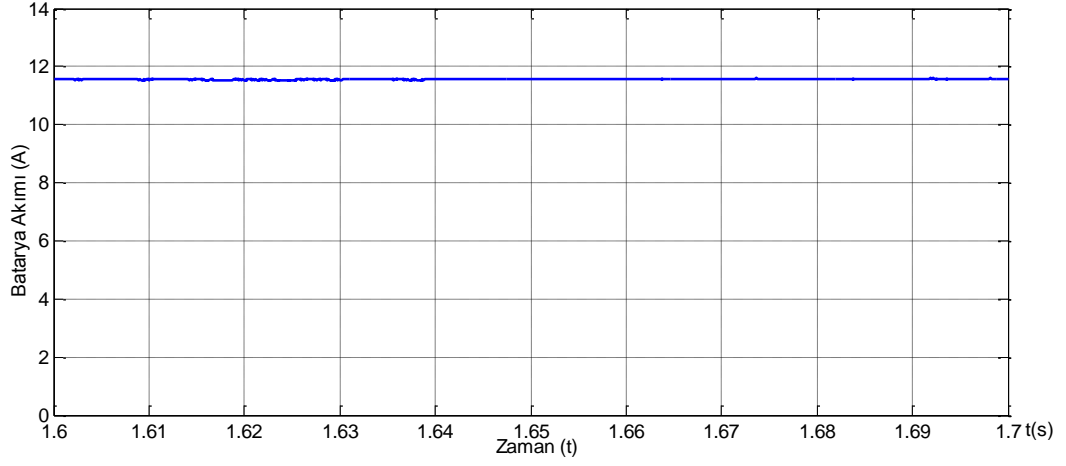
Şekil 3.63. Durum 7  $P_{FV}=0$  için batarya doluluk oranı düşük



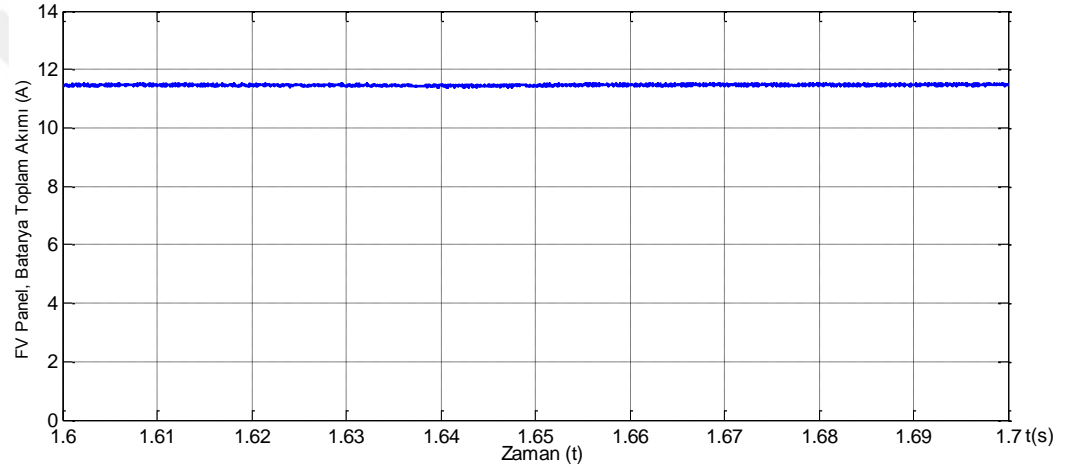
Şekil 3.64. Durum 8  $P_{FV}=0$  için batarya doluluk oranı yüksek



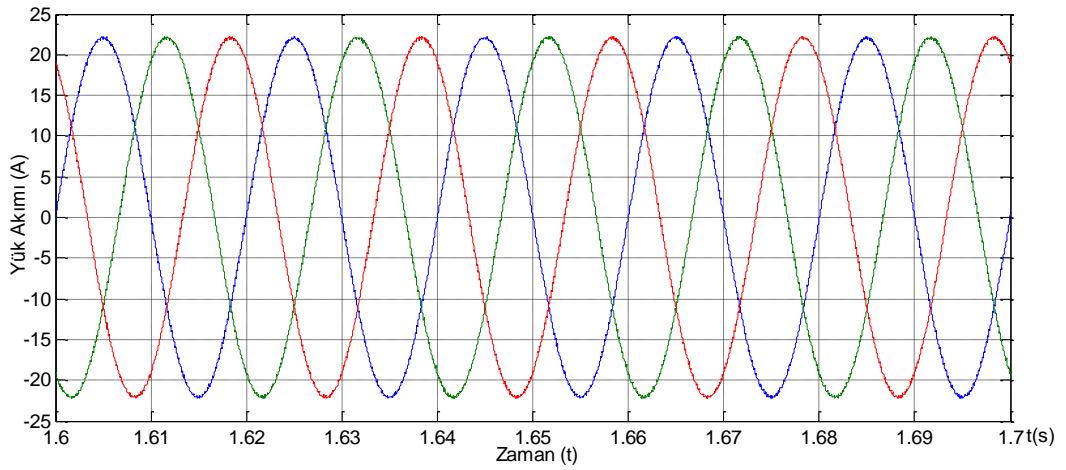
Şekil 3.65. Durum 7-8  $P_{FV}=0$  için FV panel akımı



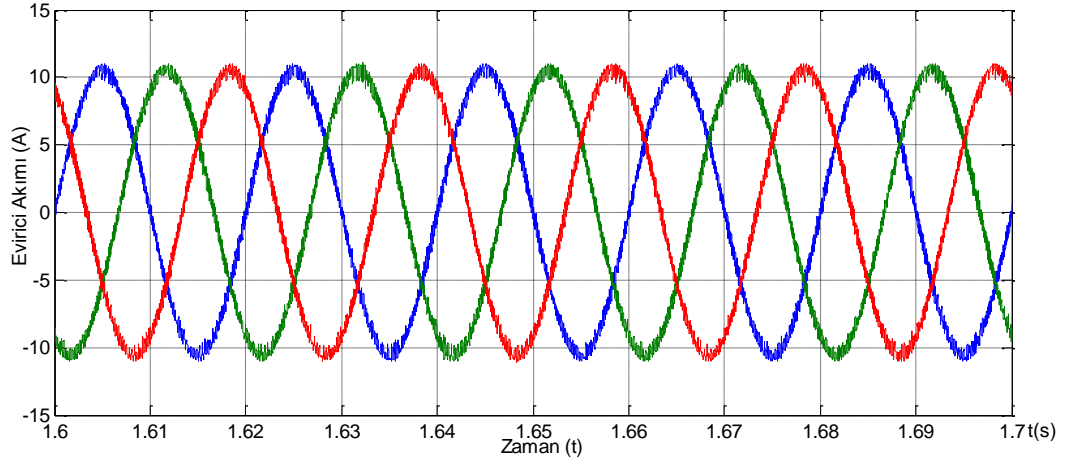
Şekil 3.66. Durum 7-8  $P_{FV}=0$  için batarya akımı



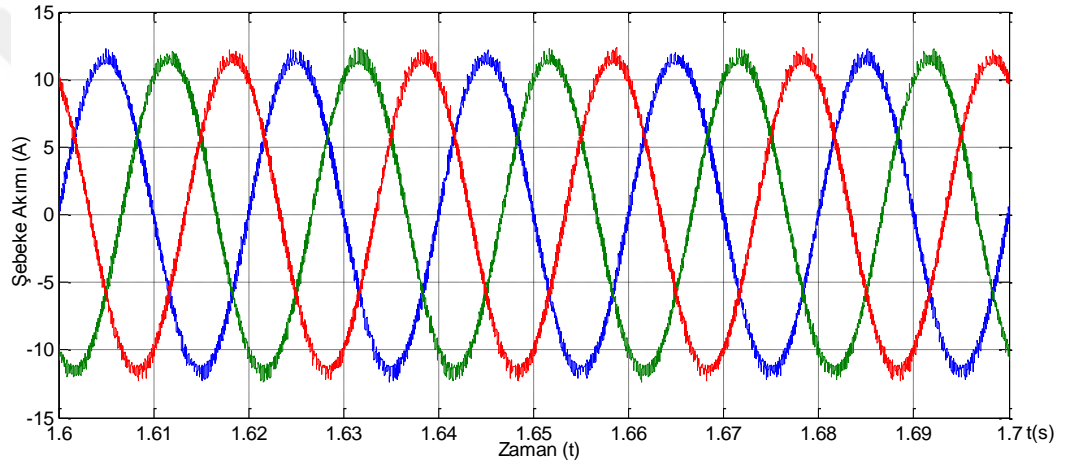
Şekil 3.67. Durum 7-8  $P_{FV}=0$  için FV panel ve batarya toplam akımı



Şekil 3.68. Durum 7-8  $P_{FV}=0$  için yük akımı



Şekil 3.69. Durum 7-8  $P_{FV}=0$  için evirici akımı

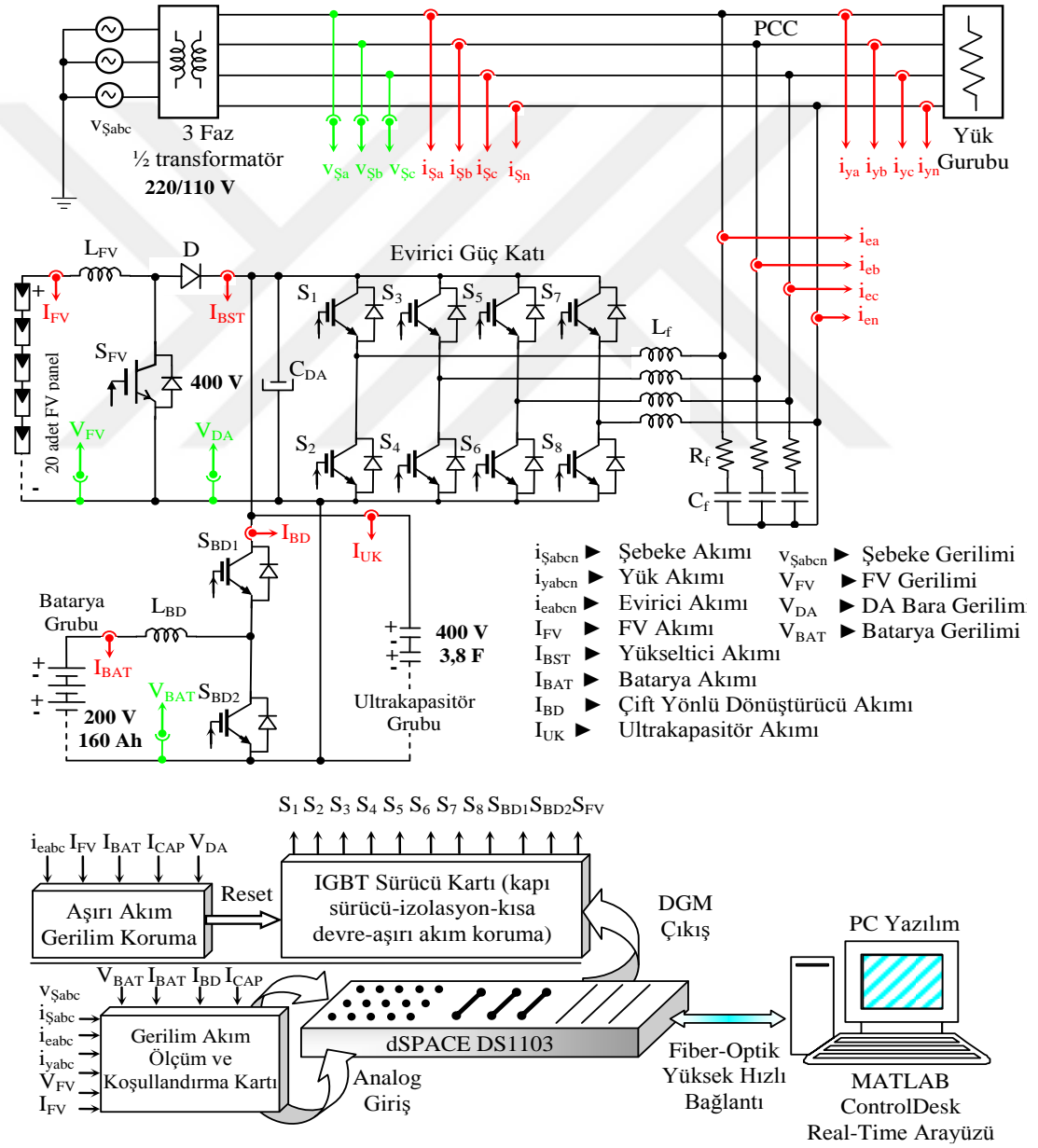


Şekil 3.70. Durum 7-8  $P_{FV}=0$  için şebeke akımı

## 4. HEDS DENEYSEL ÇALIŞMALARI

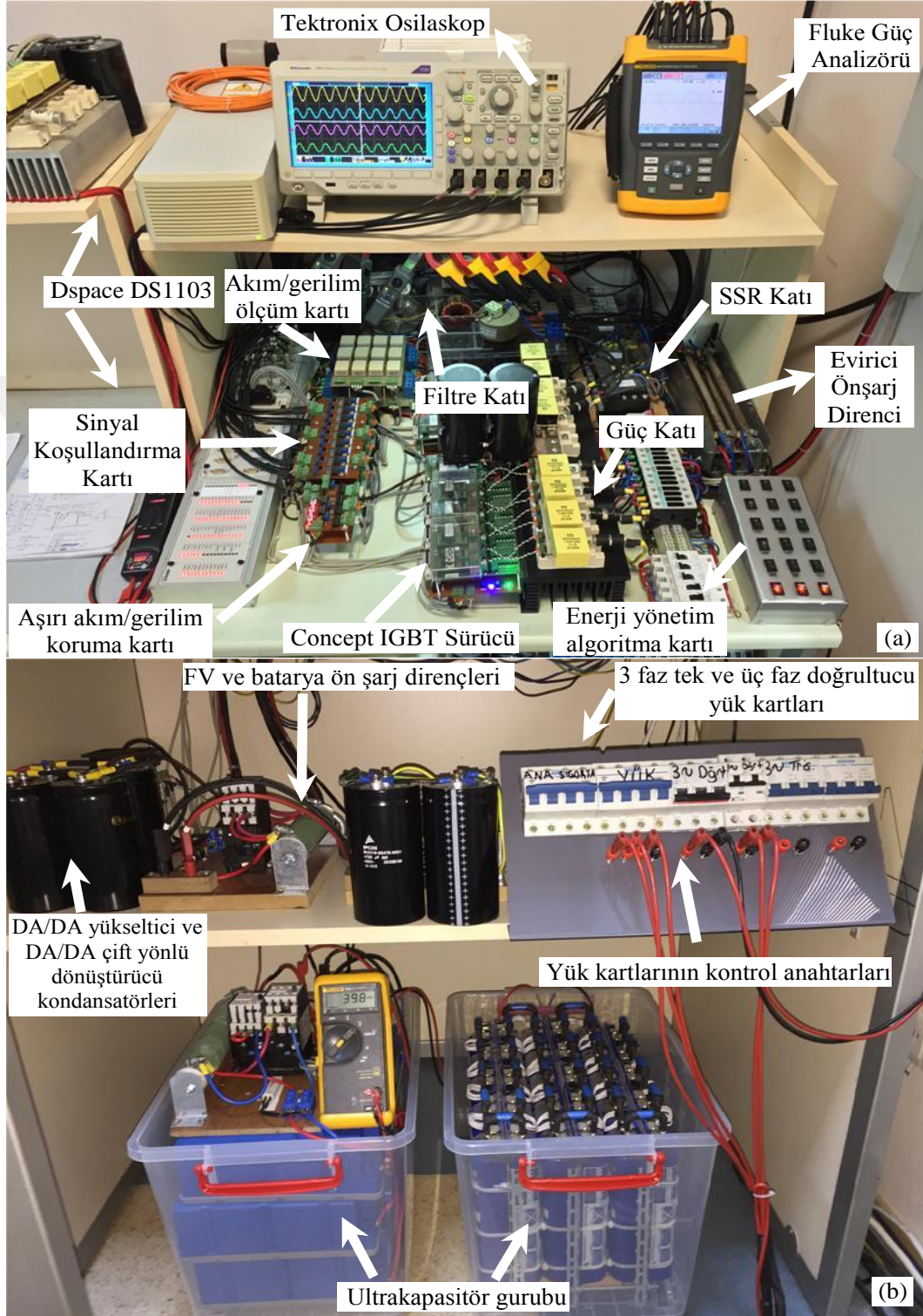
### 4.1. Deneysel Test Platformunun Tasarımı

Tez çalışması kapsamında önerilen, 3 fazlı 4 telli şebeke bağlantılı HEDS'nin güç sistemi ve denetim sistemi blok diyagramı Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1. HEDS güç sistemi ve denetim sistemi blok diyagramı

3 fazlı 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı HEDS laboratuar test platformunun fotoğrafı Şekil 2.2’de görülmektedir.

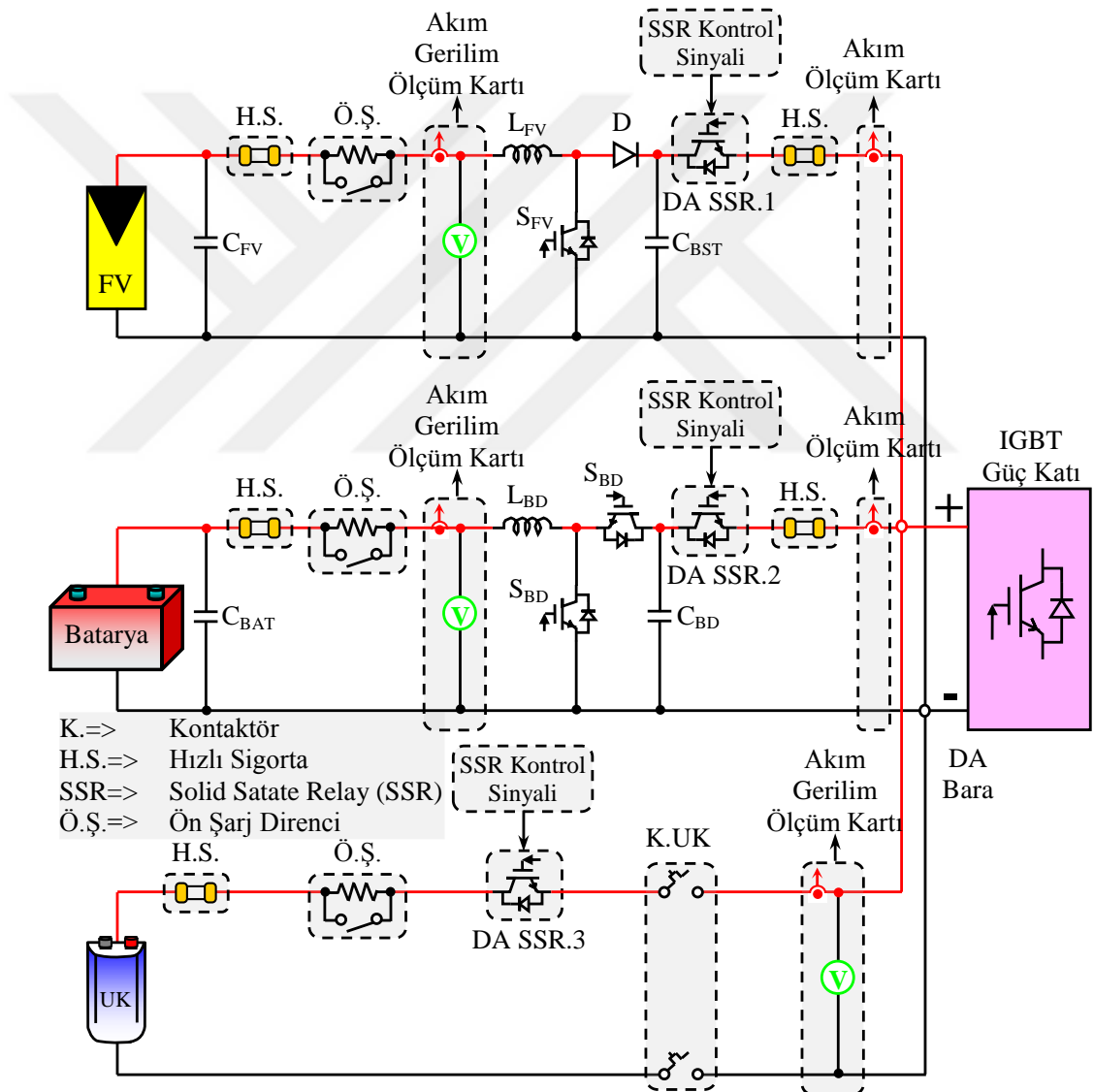


Şekil 4.2. HEDS laboratuar test platformunun fotoğrafı a) deney masasının üstten görünüşü b) deney masasının alt kısmının görünüşü

3 fazlı 4 telli şebeke bağlantılı HEDS güç sistemi için güç devresi bağlantıları, ölçüm noktaları, R-C ve L filtreleri, Yarı İletken Anahtarlar (Solid State Relay SSR) kontrol katı, yük grupları tasarlanarak imalatı gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma için gerçekleştirilen birimler aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

#### 4.2. DA Güç Devresi Bağlantı Şeması

HEDS’de laboratuvar test platformunun kurulması sırasında gerçekleştirilen DA güç devresinin ayrıntılı şeması Şekil 4.3’te verilmektedir.



Şekil 4.3. HEDS test platformunun DA güç devresinin ayrıntılı şeması

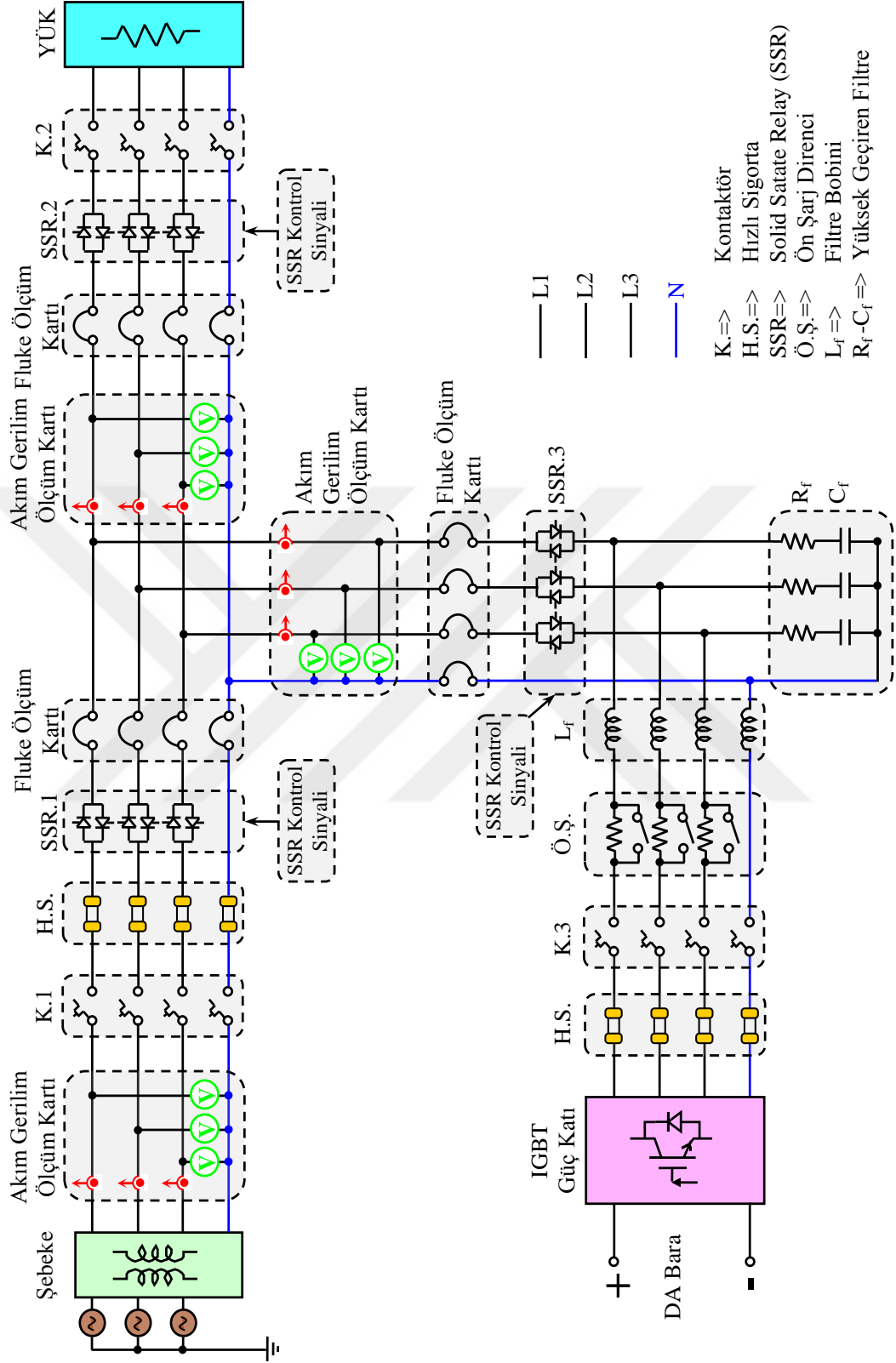
Fotovoltaik panellerin ve batarya grubunun terminal uçlarına gerilim dalgalanmalarını engellemek için kondansatör bağlanmıştır. FV panelleri, batarya ve



ultrakapasitör grubunun sistemde bulunan yarı iletken güç anahtarları ve diğer ekipmanlara zarar vermemesi için her birinde hızlı sigorta kullanılmaktadır. FV panelleri, batarya ve ultrakapasitör grubu devreye alınırken ön şarj dirençleri kullanılmaktadır. Sistem güvenli ve kararlı olarak çalıştıktan sonra ön şarj dirençleri baypas edilmektedir. HEDS’de FV paneller için DA/DA yükseltici devresi, batarya grubu için DA/DA çift yönlü dönüştürücü devresi bulunmaktadır. Sistemde ayrıca SSR’ler kullanılarak pasif olan kaynağın DA baradan ayrılmasını sağlamaktadır. DA/DA yükseltici ve DA/DA çift yönlü dönüştürücü devrelerinin giriş ve çıkışlarında akım/gerilim sensörleri bulunmaktadır. Böylece dönüştürücü devrelerinin kontrolü sensörlerden alınan bilgiler doğrultusunda gerçekleştirilmektedir. Ultrakapasitör grubunun DA bara ile ayrıca kontaktör aracılığıyla birbirine bağlantısı yapılmaktadır. Bunun nedeni olası bir tehlike anında ultrakapasitör grubu devreden tamamen izole edilerek sistem ve insan sağlığına zararı önlenmektedir. FV paneller, batarya ve ultrakapasitör grubu DA barada toplanarak eviricinin girişine bağlanmaktadır.

#### **4.3. AA Güç Devresi Bağlantı Şeması**

Şekil 4.4’te HEDS test platformunun AA güç devresi için oluşturulan devrenin ayrıntılı şeması verilmektedir. Deneysel çalışmalar sırasında eviricinin şebekeye ilk bağlantısında kısa devre olmasını önlemek için hızlı sigortalar kullanılmaktadır. Böylece herhangi bir kısa devre veya aşırı akım çekmesi durumunda sistemde bulunan yarı iletken elemanlarının zarar görmesi engellenmektedir. Şebeke, evirici ve yük grubunun her bir fazının akım ve gerilimi gerçekleştirilen tek bir sensör kart devresi ile okunmaktadır. Şebeke, evirici ve yük grubu güvenlik nedeniyle hem SSR hem de kontaktörlerle kontrol edilmektedir. HEDS’de ayrıca ölçüm kolaylığı sağlamak için Fluke ölçüm kartı tasarlanmıştır. Bu ölçüm kartı ile Fluke güç analizörü ile okunmak istenen değerler hızlı bir şekilde alınmaktadır. Eviricinin üretmiş olduğu anahtarlama akım harmoniklerini azaltmak için test platformuna ayarlanabilir filtre tasarlanarak üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.4. HEDS test platformunun AA güç devresinin ayrıntılı şeması

#### 4.4. FV Paneller, Simülatör ve DA Güç Kontrol Panoları

Tez çalışması kapsamında deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere TÜBİTAK 1001, 113E143 nolu projesiyle, Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Bölümü çatısına 5kW'lık şebeke bağlantılı FV panel kurulumu gerçekleştirilmiştir. Deneysel sistemde Yingli YGE-60 güneş panelleri 10'u seri olmak üzere 2 sıra paralel kol oluşturularak 20 adet FV panel kullanılması hedeflenmektedir. Kurulan FV paneller ve şebeke bağlantılı evirici fotoğrafı Şekil 4.5'te görülmektedir.



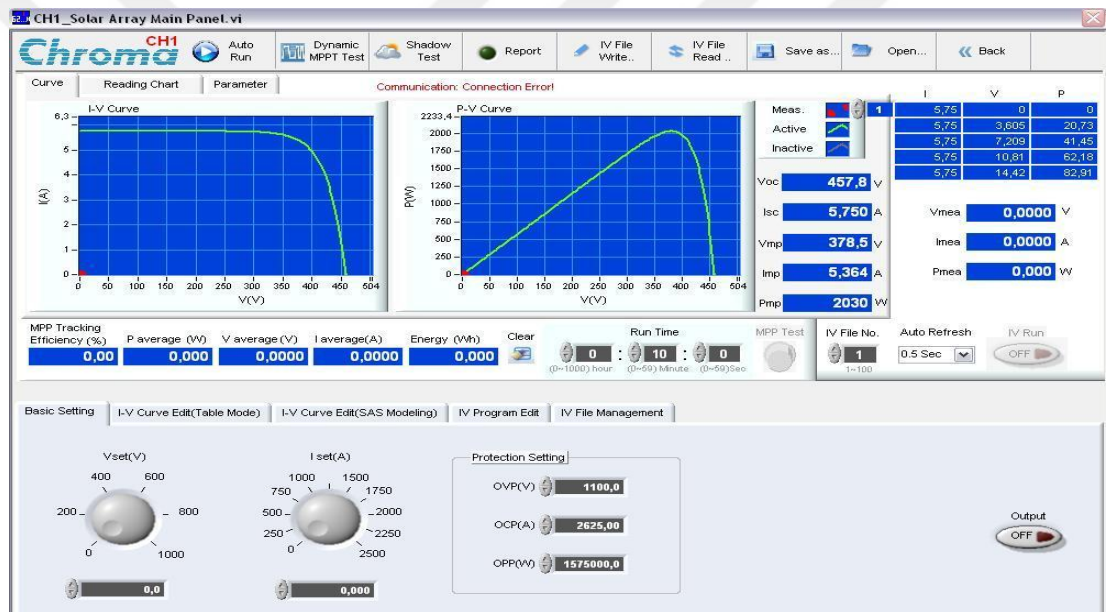
Şekil 4.5. 5kW FV panel kurulumu ve şebeke bağlantılı evirici fotoğrafı

Proje kapsamında ayrıca Chroma FV panel simülatörü alımı yapılmıştır. FV panel simülatörünün, havanın güneşli olmadığı ve akşam saatlerinde deneysel çalışmaya imkân sağlamak ve ayrıca DA kaynak olarak kullanılmak üzere deney platformuna kurulumu gerçekleştirilmiştir. FV simülatör fotoğrafı Şekil 4.6'da verilmektedir.



Şekil 4.6. Chroma FV simülatör fotoğrafı

FV simülör tez çalışmalarında kullanılması hedeflenen saptır-göze algoritmasının çalışmasını anlamak ve gözlemek için kullanılmaktadır. FV simülör kullanıcı ara yüzü sayesinde, istenilen FV paneli modelleyerek MGN'de çalışıp çalışmadığını anlamak için online olarak MGN'nı izlemeye imkan sağlamaktadır. Böylece önerilen saptır-göze algoritmasının doğruluk ve hız oranını izleyerek daha sağlıklı parametreler kullanılmasına yardımcı olmaktadır. FV simülör sayesinde gerçek bir FV panel kullanmadan önce benzetimi yapılan FV panelin hangi noktada maksimum güç elde edildiği öğrenilebilmektedir. FV simülörün arayüzü sayesinde sanal bulutlanma olayları yapılarak saptır-göze algoritmasının hızı gözlenmiştir. Şekil 4.7'de Chroma FV simülör arayüz ekranı verilmektedir.



Şekil 4.7. Chroma FV simülör arayüzü

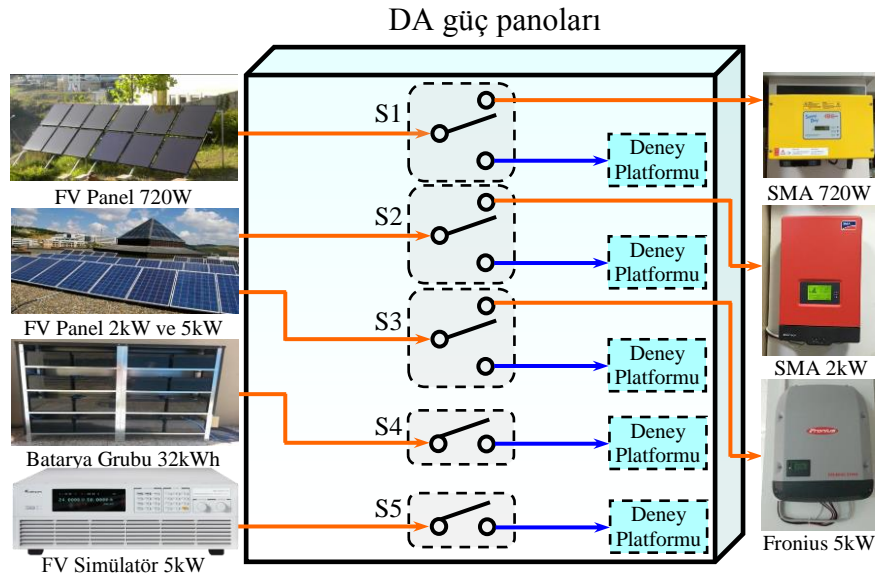
Tez deneysel çalışmalarında Chroma FV Simülör 62050H-600S programlanabilir güç kaynağı aracılığıyla güneş panellerinden alınan DA gücün benzetimi sağlanmaktadır. Bu cihaz açık devre gerilimi (Voc) 600V'a ve kısa devre akımı (Isc) 8,5A'e kadar olan maksimum 5kW gücündeki FV panelleri benzetimini yapabilmektedir. FV panel simülörü yüksek kararlılık ve hızlı cevap verebilme özellikleri ile MGNİ ve evirici performanslarının değerlendirilmesi açısından avantajlara sahiptir. 16 bit sayısal denetimli olan cihaz yüksek doğrulukta akım ( $\pm 0,1\%$ ) ve gerilim ( $\pm 0,05\%$ ) ölçme devreleri ile donatılmıştır [164]. Ayrıca cihaz sayesinde farklı güneşlenme koşulları altında FV modül karakteristiklerinin benzetimi, statik ve dinamik MGNİ testleri yapılabilmekte, gerektiğinde veriler

kaydedilebilmektedir. Cihaza ait bilgisayar arayüz programı sayesinde FV panel karakteristik eğrisi ve çalışma noktası grafiksel olarak ekranda görüntülenebilmektedir. Chroma FV Simülatör 62050H-600S modelinin teknik özellikleri Tablo 4.1’de verilmektedir.

Tablo 4.1. Chroma FV Simülatör 62050H-600S teknik özellikleri [164]

Parametreler	Chroma FV Simülatör 62050H-600S
Çıkış Gerilimi	0-600V
Çıkış Akımı	0-8,5A
Çıkış Gücü	5000W
Gerilim Dalgalanması	600mV
Akım Dalgalanması	15mA
Tepki Süresi (Tam Yükte)	60mS
Gerilim Ölçme Hassasiyeti	10mV
Akım Ölçme Hassasiyeti	1mA

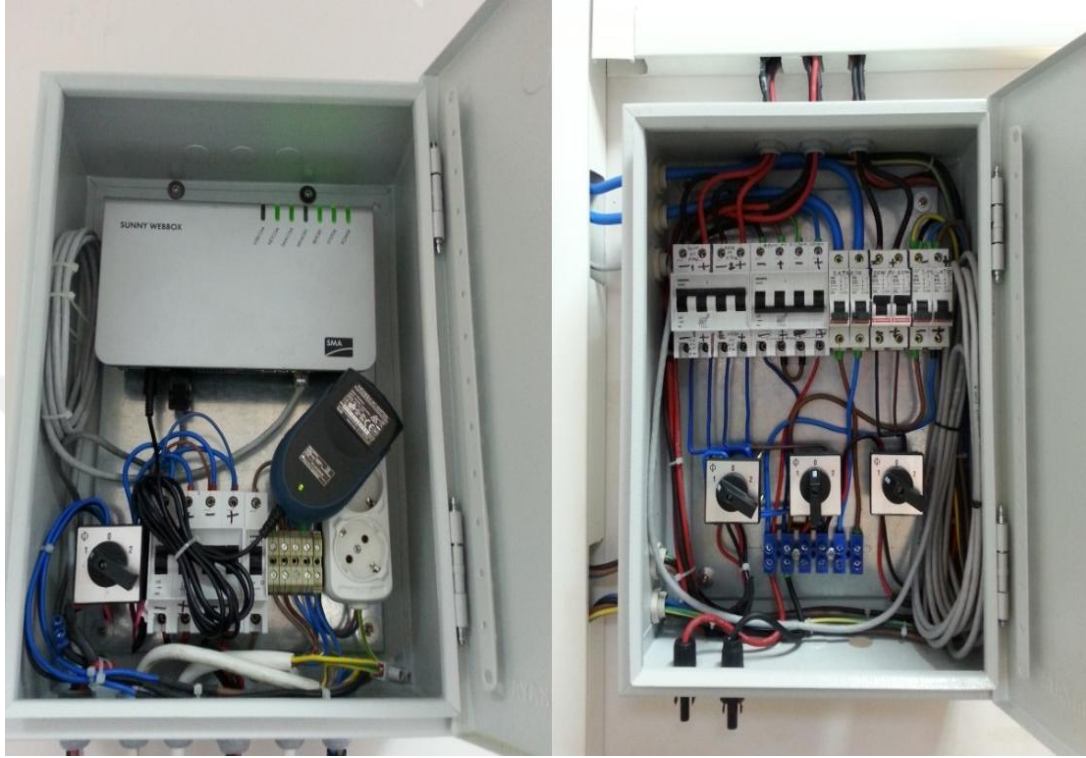
Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü’nde kurulu olan 720W, 2kW ve 5kW FV panellerin, FV simülatörün ve batarya grubunun deneysel olarak kullanılmak üzere bağlantı panoları tasarlanarak üretilmiştir. DA güç panolarının bağlantı şeması Şekil 4.8’de verilmektedir.



Şekil 4.8. DA güç panolarının bağlantı şeması

Kontrol panoları ile hem şebeke bağlantılı eviricilerin hem de deney yapılması sırasında bağlantı yönünü panolarda bulunan anahtarlar aracılığıyla kolaylıkla değiştirilerek deney platformuna yönlendirmektedir. İki adet kontrol panosu

sayesinde farklı yerlerde kurulu olan FV panellerin ortak bir barada toplayarak deneysel platforma bağlantısı sağlanmaktadır. Üretimi gerçekleştirilen fotoğrafları Şekil 4.9’da ayrıntılı olarak görülmektedir.



Şekil 4.9. DA güç panolarının fotoğrafları

#### 4.5. Batarya Grubu

HEDS’nde öngörülen depolama birimi olan batarya grubu için koruyucu kabin tasarımı gerçekleştirilerek olumsuz çevre şartlarından korunması sağlanmıştır. Depolama biriminde 32 adet 12V, 80Ah kurşun-asit kuru tip batarya kullanılmaktadır. Deneysel sistemde kullanılması hedeflenen Vision bataryalar 16’sı seri olmak üzere 2 sıra paralel kol oluşturularak 32 adet batarya grup bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Bataryaların bağlantısı ile 200V gerilim seviyesi elde edilmiştir. Kullanılan batarya grubu ve bağlantı fotoğrafı Şekil 4.10’da görülmektedir.



Şekil 4.10. Batarya grubu ve bağlantı fotoğrafı

#### 4.6. Ultrakapasitör Grubu

Tez çalışması kapsamında hibrit enerji depolama biriminin diğer parçası olan ultrakapasitör grubu gerilim ve kapasite hesaplamaları yapılarak teknik parametre verileri elde edilmiştir. Maxwell marka BMOD0006 E160 B02 model ultrakapasitör 160V gerilim ve 6F kapasite değerine sahiptir [165]. 3 adet ultrakapasitör seri bağlanarak 480V gerilim seviyesine ve 2F kapasiteye ulaşmaktadır. Deneysel çalışmalarda kullanılacak ultrakapasitör gruplarının fotoğrafı Şekil 4.11’de verilmektedir.



Şekil 4.11. Deneysel çalışmalarda kullanılacak ultrakapasitör gruplarının fotoğrafı

400V DA bara gerilimine sahip sistemde seri bağlanan ultrakapasitörler kullanılacaktır. Laboratuvar alt yapısında daha önceden, tasarlanan 30 adet ultrakapasitör paketi seri bağlanarak 450V 1,93F değerinde bir enerji depolama sistemi elde edilmiştir. Her bir ultrakapasitör Maxwell marka BPAK0058 B01 modeli 15V 58F kapasite değerine sahiptir [166]. Kullanılan ultrakapasitörlerin teknik özellikleri Tablo 4.2’de verilmektedir.

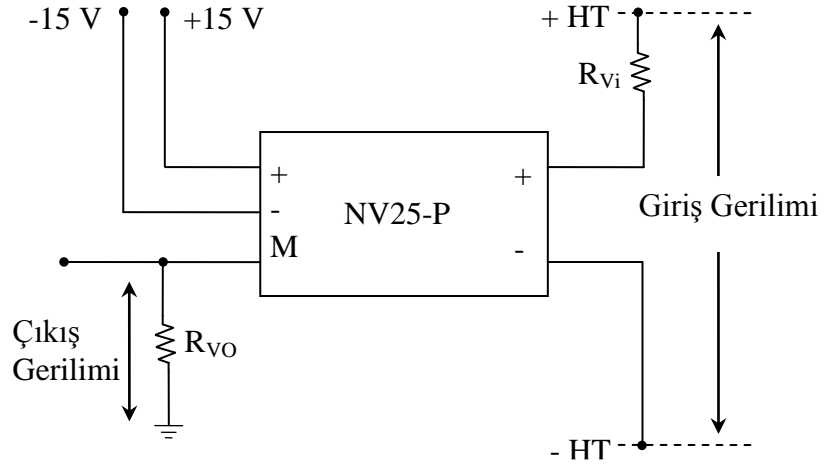
Tablo 4.2. Ultrakapasitörlerin teknik özellikleri [165, 166]

<b>Parametreler</b>	<b>Ultrakapasitör BPAK0058 B01 (15V)</b>	<b>Ultrakapasitör BMOD0006 B02 (160V)</b>
Nominal Kapasite	58F	6F
Kapasite Toleransı	±%20	±%20
Gerilim	15V	160V
Maksimum işletme gerilimi	50V	170V
İzolasyon Gerilimi	1100V	5600V
Direnç (ESR), DA	19mΩ	240mΩ
Direnç Toleransı	±%25	±%100
Isıl Direnç (Rth)	1,8°C/W	1,1°C/W
Çalışma Sıcaklığı	-40°C ~ 65°C	-40°C ~ 65°C
Güç (Pd)	3000W/kg	2500W/kg
Güç (Pmak)	11200W/kg	5100W/kg
Enerji (Emak)	3,63Wh/kg	4Wh/kg
Sızıntı Akımı	1mA	25mA
Kısa Devre Akımı (Iscuk)	1500A	670A
Maksimum Sürekli Akım	20A	12A
Maksimum Tepe Akım	80A	170A
Gerilim Dengeleme	Aktif	Pasif
Ağırlık	560g	5200g

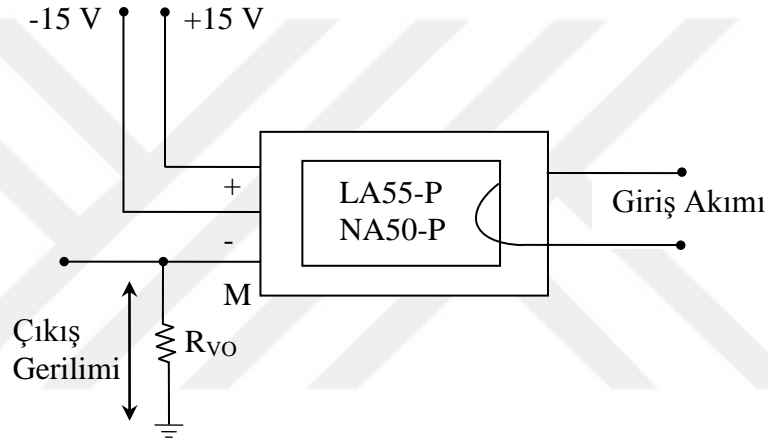
#### 4.7. Akım/Gerilim Ölçüm Kartı

HEDS’nde akım ve gerilimlerin ölçülmesinde elektrik sisteminden galvanik olarak izolasyon sağlayan hall etkili akım (LEM LA55-P ve TEG NA50-P, 50A, 1:1000 dönüştürme oranı) ve hall etkili gerilim (TEG NV25P, 500V, 2500:1000 dönüştürme oranı) sensörleri kullanılmaktadır. Akım ve gerilim ölçümlerinde sensörlerin çıkış gerilimi  $R_{vo}$  direnci ile elde edilmektedir. Hall etkili gerilim ve akım sensörü devre bağlantı şeması sırasıyla Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’te verilmektedir [163].





Şekil 4.12. Hall etkili gerilim sensörü devre bağlantı şeması



Şekil 4.13. Hall etkili akım sensörü devre bağlantı şeması

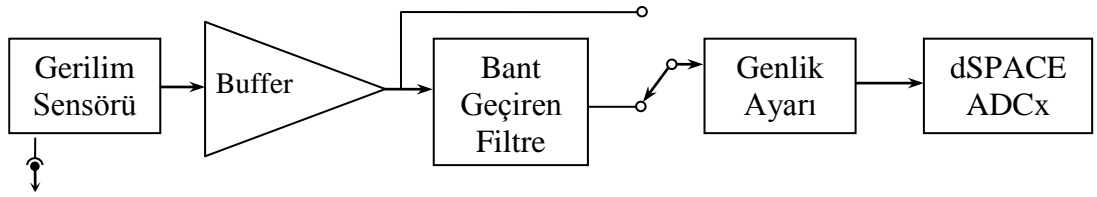
HEDS'nde kullanılan akım/gerilim sensör ölçüm kartının fotoğrafı Şekil 4.14'te verilmektedir. Bu kart ile sistemde bulunan bütün DA ve AA akım/gerilimleri ölçülmektedir. Akım ve gerilimlerin tek bir kart ile ölçülmesi sistemin tasarım aşamasında kolaylıklar sağlamaktadır. Aynı zamanda bütün sensörlerin hızlı bir şekilde kalibrasyon ayarları yapılabilir. Sensörlerin tek bir katta toplanması, sistemde bulunan Point of Common Coupling (PCC) noktasının bu kartta oluşturulmasını sağlamaktadır. Ayrıca sistemdeki bütün DA akım/gerilim ölçümleri bu kartta yapılarak DA sensörlerinin kalibrasyonunu kolaylıkla yapılmaktadır.



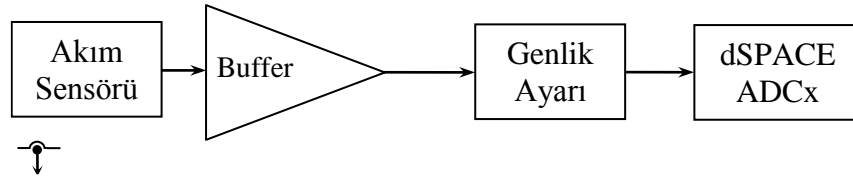
Şekil 4.14. Akım/gerilim sensör kart fotoğrafı

#### 4.8. Sinyal Koşullandırma Ara Birim Kartı

Akım ve gerilim sensörlerinden elde edilen sinyaller, sinyal koşullandırma arabirim kartları ile uygun seviyelere getirilerek dSpace CLP1103 bağlantı panelindeki, Analog Sayısal Dönüştürücü (Analog to Digital Converter, ADC) girişlerine uygulanmaktadır. Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da sırasıyla gerilim ve akım sinyal koşullandırma devresi blok diyagramları gösterilmektedir [163].



Şekil 4.15. Gerilim sinyal koşullandırma devresi blok diyagramı



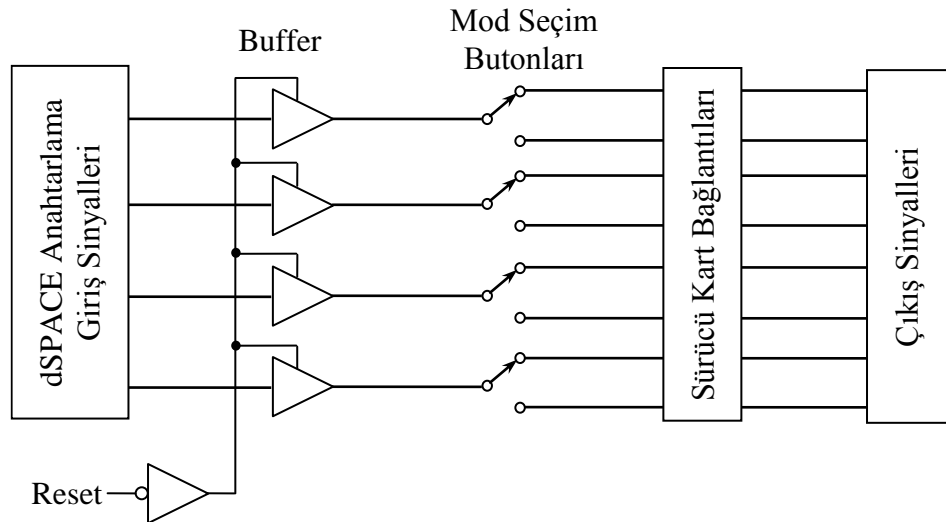
Şekil 4.16. Akım sinyal koşullandırma devresi blok diyagramı

#### 4.9. Aşırı Akımı ve Gerilim Koruma kartı

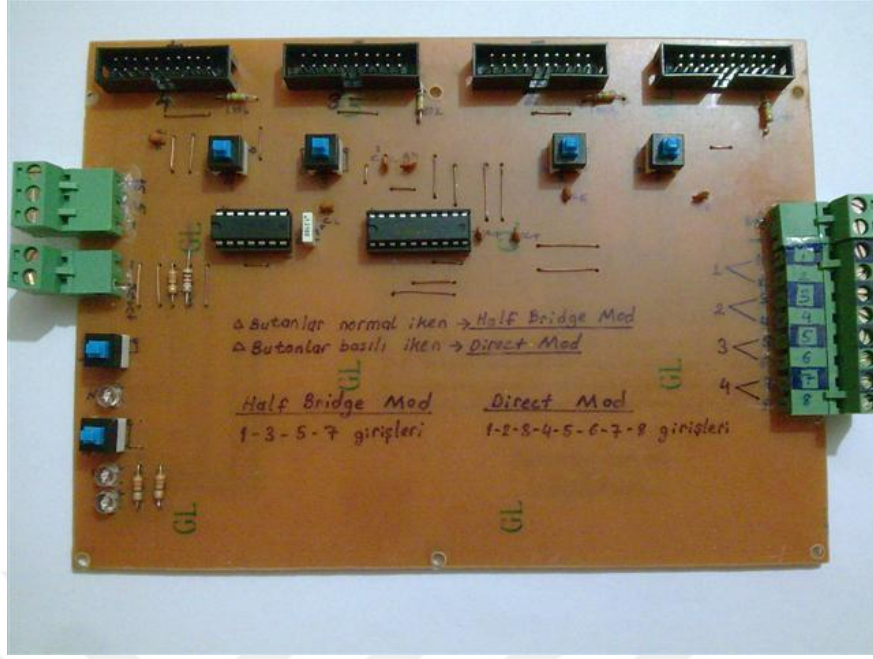
FV paneller, batarya grubu, ultrakapasitör ve eviricide oluşabilecek aşırı akım veya gerilim gibi olumsuz durumlar, hızlı işlemsel yükselteçler kullanılarak gerçekleştirilen aşırı akım ve gerilim koruma kartı ile tespit edilerek, IGBT sürücü bordlarının reset girişine gönderilen sinyal ile IGBT'ler devreden çıkarılmaktadır. Böylece deneysel sistemin güvenli bir şekilde çalıştırılması sağlanmaktadır.

#### 4.10. Sürücü Bordları için Sinyal Yükseltici ve Koruma Kartı

Sürücü boardları için dSpace'den gelen IGBT anahtarlama sinyalleri güvenlik ve yükseltmek amacıyla kartta bulunan hızlı işlemsel yükselteçler kullanılarak işlenir. Bu kart ile sinyaller sürücü kartları için uygun bir seviyeye getirilir. Sürücü bordların beslemesi bu kart üzerinden sağlanmaktadır. Kartın üzerinde bulunan reset butonu ile güvenlik amacıyla dSpace'den gelen bütün sinyaller kesilebilmektedir. Ayrıca kartta bulunan mod seçim butonları ile sürücü kartları için tam ve yarım köprü mod seçimi yapılabilmektedir. Böylece herhangi ek bir donanımsal ekipmana ihtiyaç duymadan sistem istenilen sinyaller için uygun hale getirilerek çalıştırılmaktadır. Şekil 4.17'de sinyal yükseltici ve koruma kartı blok diyagramı, Şekil 4.18'de de fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 4.17. Sinyal yükseltici ve koruma devresi blok diyagramı



Şekil 4.18. Sinyal yükseltici ve koruma kartı fotoğrafı

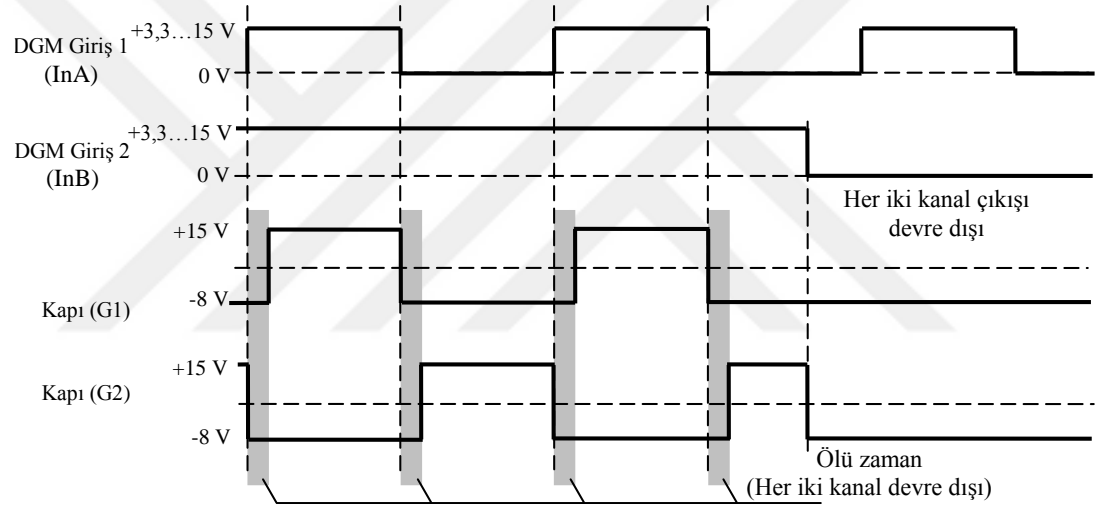
#### 4.11. IGBT Sürücü Modülleri ve Geliştirme Bordları

Sistemde DA/DA yükseltici, DA/DA çift yönlü dönüştürücü ve evirici için sürücü kartları tasarlanmıştır. DA/DA yükseltici devresi için tasarlanan kart dSpace'den gelen anahtarlama sinyallerini IGBT'lere tam köprü modunda iletmektedir. DA/DA çift yönlü dönüştürücü devresi için tasarlanan kartta aynı şekilde tam köprü modunda çalışmaktadır. Fakat çift yönlü dönüştürücü devre topoloji yapısında bulunan iki adet anahtarlama elemanının kontrolü için ayrıca güvenlik önlemi alınmaktadır. DA/DA çift yönlü dönüştürücü devresinde bulunan IGBT'ler mod geçişleri sırasında aynı anahtarın iletimde olmasının önüne geçmek için iki sinyal arasında gecikme devresi tasarlanmıştır. IGBT sürücü modüllerinin kendi ölü zaman aralıkları bulunmaktadır fakat güvenlik önlemi olarak ayrıca donanımsal olarak tedbir alınmaktadır. Bu sinyal geciktirme kartı, DA/DA çift yönlü dönüştürücü devresinin düşürücü modan yükseltici veya yükseltici modan düşürücü moda geçişi sırasında iki IGBT'yi de 10ms süre kadar sıfıra çekmektedir. Daha sonra dSpace tarafından gelen sinyaller DA/DA çift yönlü dönüştürücü devresine uygulanmaktadır.

Kontrol sistemi tarafından üretilen anahtarlama sinyalleri ile eviricide bulunan IGBT'lerin sürülmesi için dört adet iki kanal sürücü modül (CONCEPT 2SC0108T, tüm anahtarlama sinyallerininin elektriksel izolasyonu, reset girişi) kullanılmaktadır.

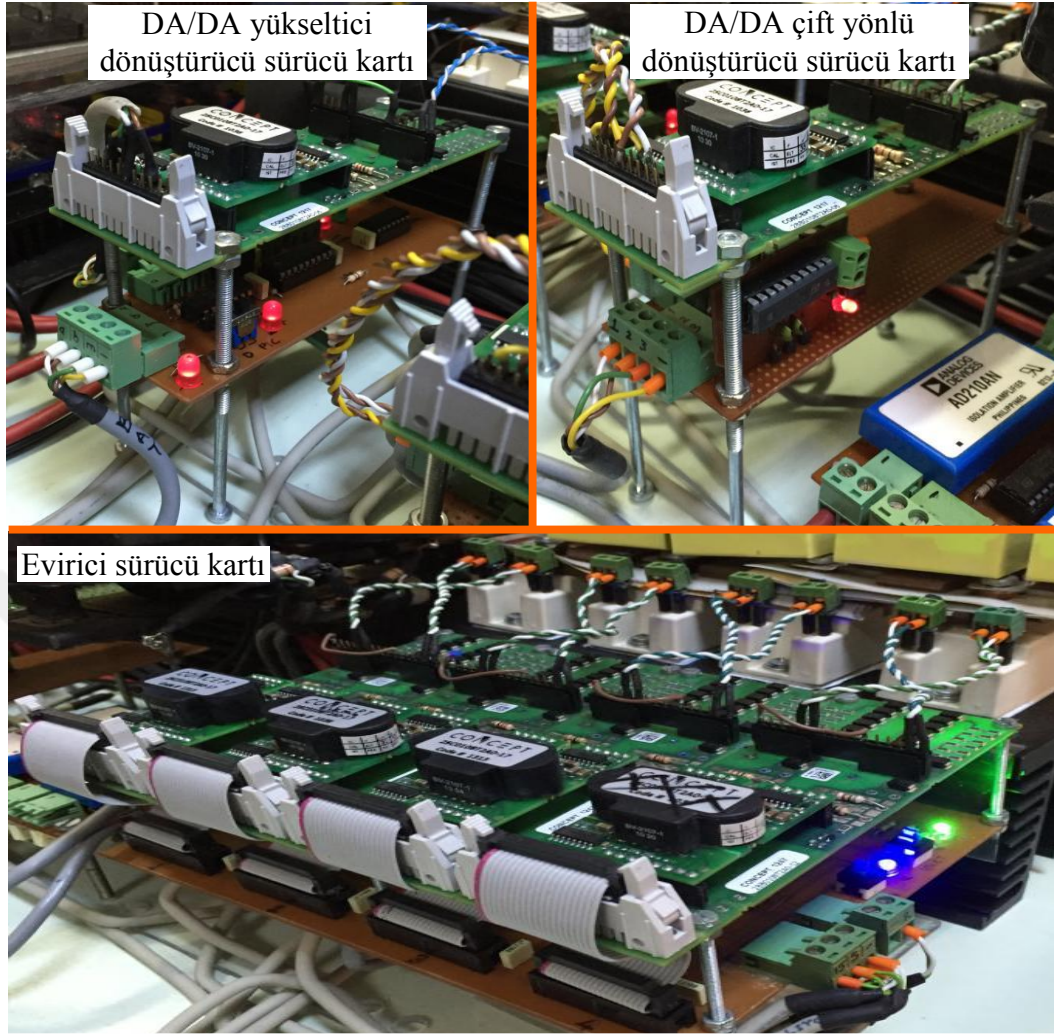
Bu çalışmada IGBT sürücü yarım köprü modunda çalıştırılarak aynı kolda bulunan IGBT'lerin anahtarlama sinyalleri arasındaki gerekli ölü zaman aralıkları otomatik olarak üretilmektedir. Böylece denetim devresinden dört kollu gerilim kaynaklı eviricinin sadece üstteki IGBT'leri için DGM çıkışları üretmek yeterli olmaktadır. Altındaki IGBT'lere uygulanan DGM sinyalleri IGBT sürücü katı tarafından ölü zaman eklenerek oluşturulmaktadır.

Ayrıca geliştirme bordu ile sürücü kartı, IGBT'lerin iletme geçiş sırasında kolektör-emitör gerilim düşümünü ölçerek IGBT'lerin kısa devre ve aşırı akıma karşı korunması sağlanmaktadır. Şekil 4.19'da IGBT sürücü ile üretilen ölü zamanlı kapı sinyalleri gösterilmektedir [167, 168].



Şekil 4.19. IGBT sürücü ile üretilen ölü zamanlı kapı sinyalleri [167]

CONCEPT 2SC0108T sürücü modülleri, geliştirme bordları (CONCEPT 2BB0108T, 1200V çok seviyeli iki kanal çıkışlı bord) kullanılarak IGBT'lere sinyal çıkışları verilmektedir. Bu geliştirme bordu IGBT'ler için gerekli olan güvenlik önlemlerini içermektedir. Her bir IGBT için kısa devre ve aşırı akım koruma, hata seviyesinde kapama, yarım köprü çalışma modunda gerekli ölü zaman aralıkları otomatik üretme ve tak-çalıştır özelliğine sahip bir karttır. Şekil 4.20'de sürücü modül ve geliştirme bordu fotoğrafı birlikte verilmektedir.

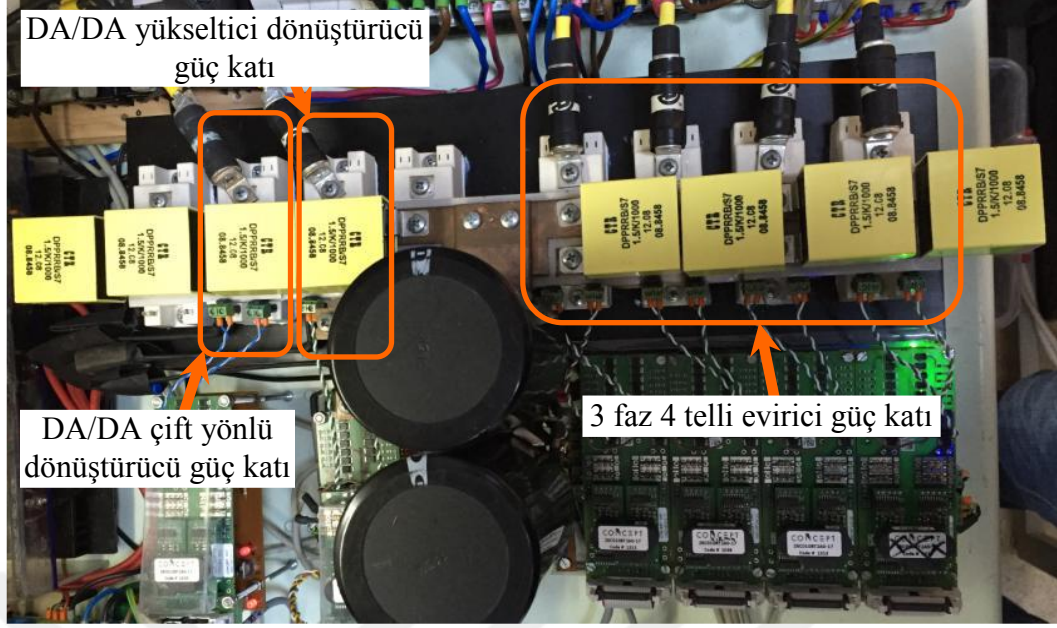


Şekil 4.20. Sürücü modül ve geliştirme bordu fotoğrafı

#### 4.12. DA ve AA Güç Devresi

HEDS'nin DA/DA yükseltici güç devresinde ve DA/DA çift yönlü dönüştürücü güç devresinde ikişer adet evirici güç katında sekiz adet yarım köprü (Semikron, SKM 75GB128D 75A, 1200V) IGBT modülleri kullanılmaktadır. Ayrıca, IGBT elemanlarını kesim esnasında yüksek gerilimlerden korumak amacıyla her birinin DA uçlarına paralel bastırma kondansatörleri bağlanmaktadır. DA baraya iki adet seri bağlı 4500 $\mu$ F (2x2350 $\mu$ F, 450V seri bağlı), DA kondansatörleri, evirici çıkışına AA hat üzerine endüktansı 8,9mH, 25A toroid nüve üzerine sarılı filtre bobinleri ve RC pasif filtreleri kullanılmaktadır.

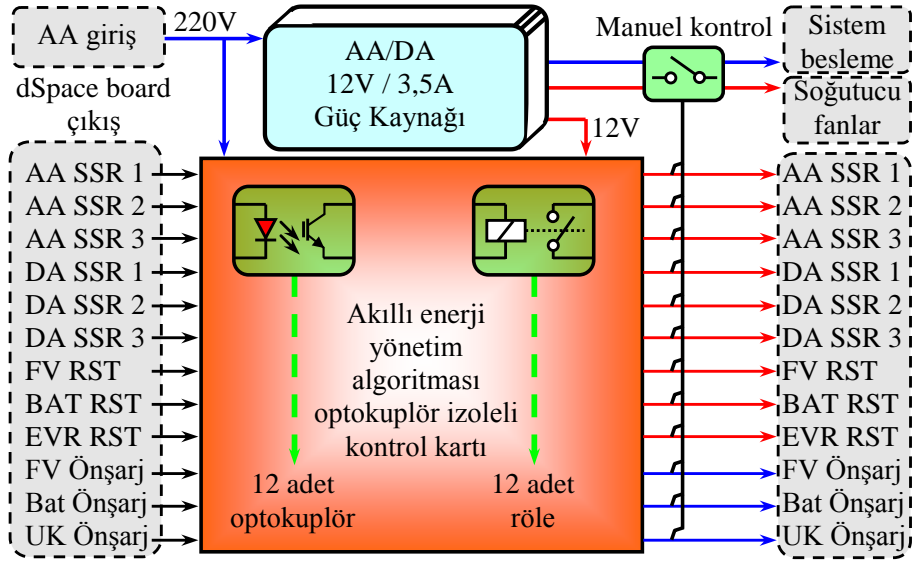
Şekil 4.21'de 3 faz 4 telli şebeke bağlantılı HEDS'nin soğutucuya montajı yapılan güç devrelerinin fotoğrafı görülmektedir.



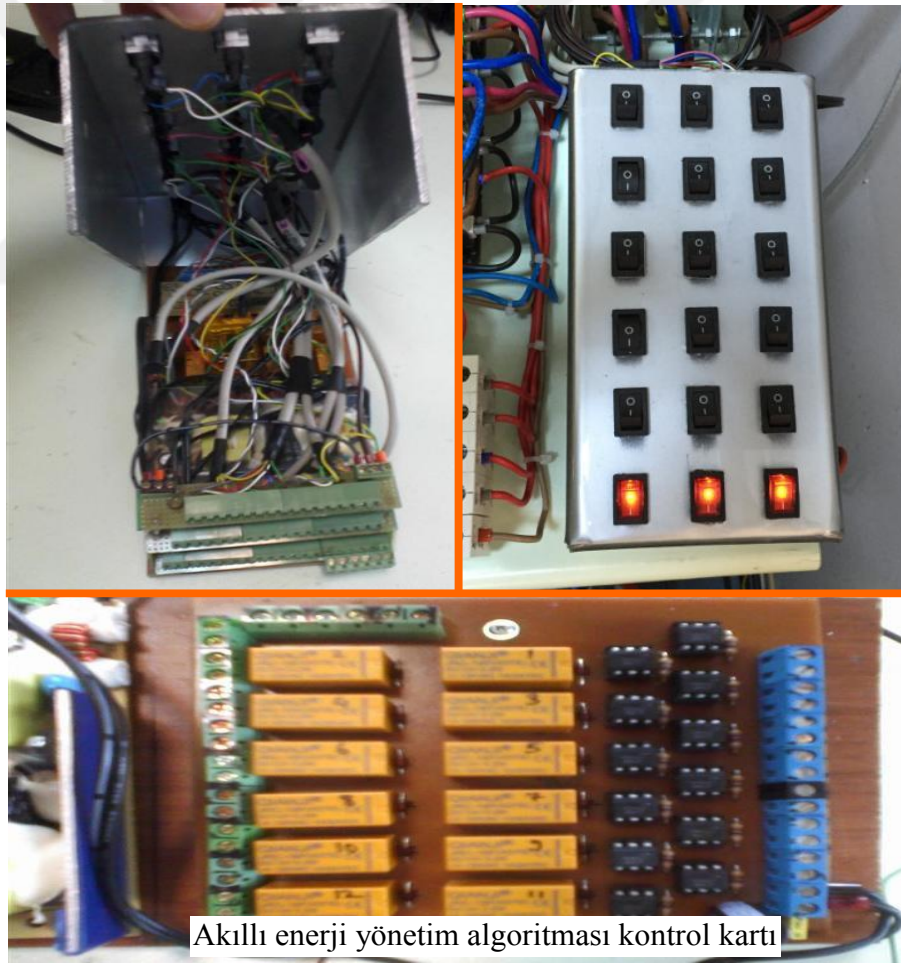
Şekil 4.21. HEDS'nin gerçekleştirilen güç devresi fotoğrafı

#### 4.13. Akıllı Enerji Yönetim Algoritma Kontrol Kartı

Tez çalışmasında geliştirilen özgün akıllı enerji yönetim algoritması için kart tasarlanarak üretilmiştir. Tasarlanan akıllı enerji yönetim algoritması kontrol kartı ile sistemde bulunan bütün DA ve AA SSR'leri, DA/DA yükseltici devresinin reseti, DA/DA çift yönlü dönüştürücü devresinin reseti, FV panellerin, batarya ve ultrakapazitör grubunun ön şarj dirençlerinin kontrolü yapılmaktadır. Akıllı enerji yönetim algoritmasının çalışma durumlarına bağlı olarak ürettiği sinyaller dSpace'den kontrol kartına gelmektedir. Kontrol kartı içerisinde optokuplörler kullanılarak dSpace'nin çıkış ünitesini korumak için izole edilmektedir. Böylece enerji yönetim algoritmasından gelen sinyaller güvenli ve hızlı bir şekilde kontrol birimlerine iletilmektedir. Ayrıca kontrol kartı üzerinde bulunan anahtarlar ile bütün birimler manuel olarak da kontrol edilebilmektedir. Deneysel test platformunda bulunan enerji beslemeleri, soğutucu fanlar, aydınlatma gibi diğer birimlerin kontrolü de tasarlanan bu kart ile gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.22'de akıllı enerji yönetim algoritma kontrol kartının bağlantı şeması ve Şekil 4.23'te devre fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 4.22. Akıllı enerji yönetim algoritma kontrol kartı bağlantı şeması



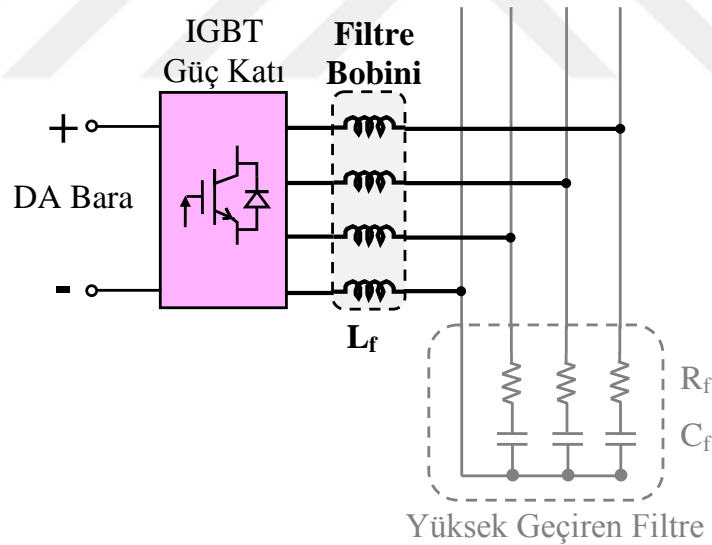
Şekil 4.23. Akıllı enerji yönetim algoritma kontrol kartı fotoğrafları



#### 4.14. Evirici için Kademeli Filtre Tasarımı ve Üretimi

Şebeke bağlantılı sistemlerde filtrelerin işlevi iki boyutludur. Bir tarafta filtre yeterince endüktif olmalıdır çünkü bu gerilim kaynağına bağlı dönüştürücünün doğru çalışması için önemlidir. Bu açıdan şebeke bağlantılı sistemler senkron jeneratörlere benzerler. Diğer taraftan şebeke bağlantılı sistemler gerilim harmonikleri üretirler. Bu gerilimler şebekeye harmonik akımları akmasına neden olurlar ve bu akımlar hassas yüklere zarar verebilir veya kayıpları arttırabilir. Sadece bir bobinden oluşan filtre bu iki gereksinimin karşılanması için en basit çözümdür.

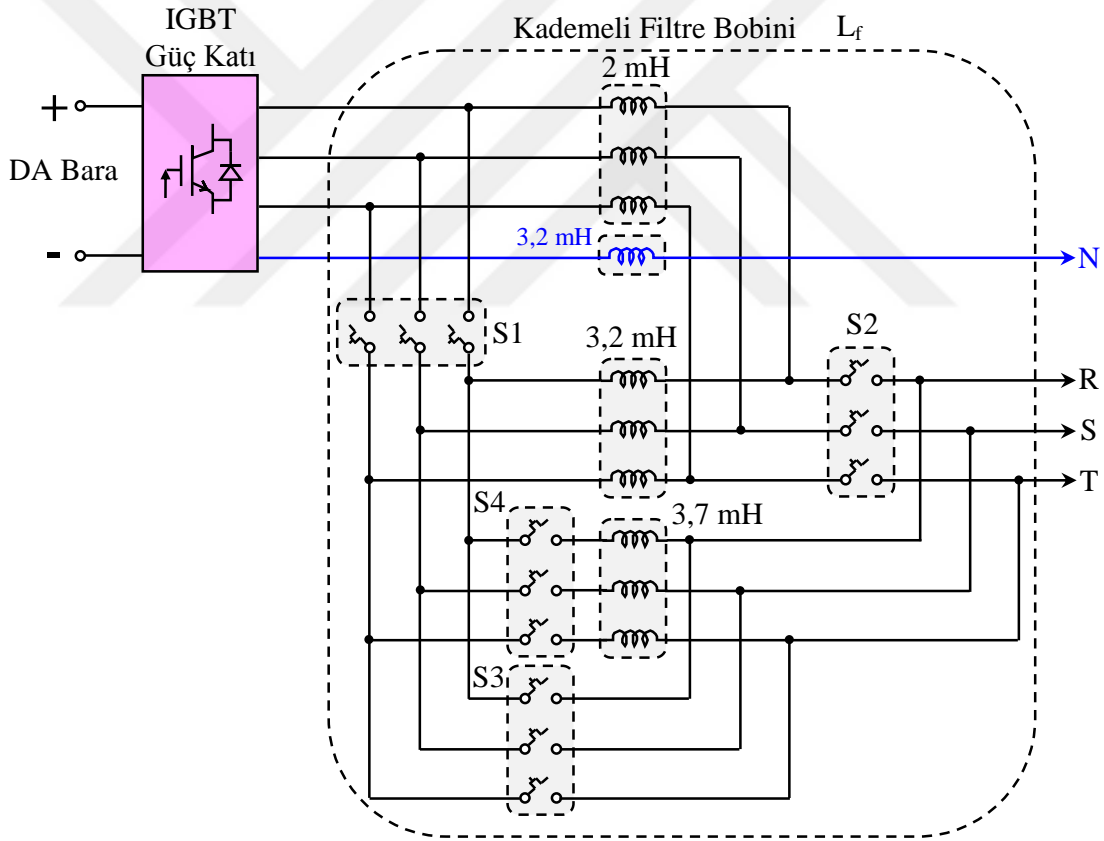
Birkaç kW'a kadarki şebeke bağlantılı uygulamalarda anahtarlama frekansı yüksektir. Bu nedenle daha düşük değerlikli bir endüktans harmonik gereksinimleri için yeterli olabilir [169]. Evirici tarafından meydana gelen anahtarlama harmonikleri Şekil 4.24'te L filtre kullanılarak kolaylıkla filtrelenebilmektedir. Deneysel test platformu için tasarlanan ve üretilen kademeli L bobin filtre fotoğrafı Şekil 4.25'te verilmektedir.



Şekil 4.24. L filtrenin evirici çıkışına bağlantısı

Tez çalışması kapsamında evirici kontrol algoritması olarak histerisiz akım kontrollü denetleyici kullanılmaktadır. Histerisiz akım kontrollü denetleyici yapısında anahtarlama frekansı sürekli olarak değişkendir. Anahtarlama meydana gelecek harmonikleri gidermek için tez çalışması kapsamında ayarlanabilir bobin tasarlanarak üretilmiştir. Çeşitli değerlikte bobin grupları kullanılarak değişik kombinasyonlar elde edilmektedir. Bobin değerleri sırasıyla 2mH, 3,2mH ve

3,7mH'dir. Bobin grupları her bir faza Şekil 4.25'teki gibi tasarlanan devreyle evirici çıkışına bağlanmıştır. Dört adet anahtar kullanarak bobin gruplarından kombinasyonlar elde edilmektedir. Anahtarlar yardımı ile kullanılması planlanan beş adet filtre değeri sağlanmaktadır. Böylece değişik güç ve akım değerlerinde filtre bobin değeri değiştirilerek test sonuçları alınacak ve deneysel olarak filtre karşılaştırması yapılacaktır. 3 fazlı 4 telli şebeke bağlantılı evirici çıkışında ayrıca nötr hattına da filtre bobini eklenmiştir. Ancak nötr hattındaki filtre bobini 3,2mH olarak sabit seçilmiştir. Tasarlanan filtre bobin kombinasyon değerleri Tablo 4.3'te verilmektedir. Tabloda belirtilen dört adet anahtar konumlarına göre sırasıyla 1,2mH, 2mH, 3,7mH, 5,2mH ve 8,9mH değerlerinde filtre bobin grupları elde edilerek ayarlı bir filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir.

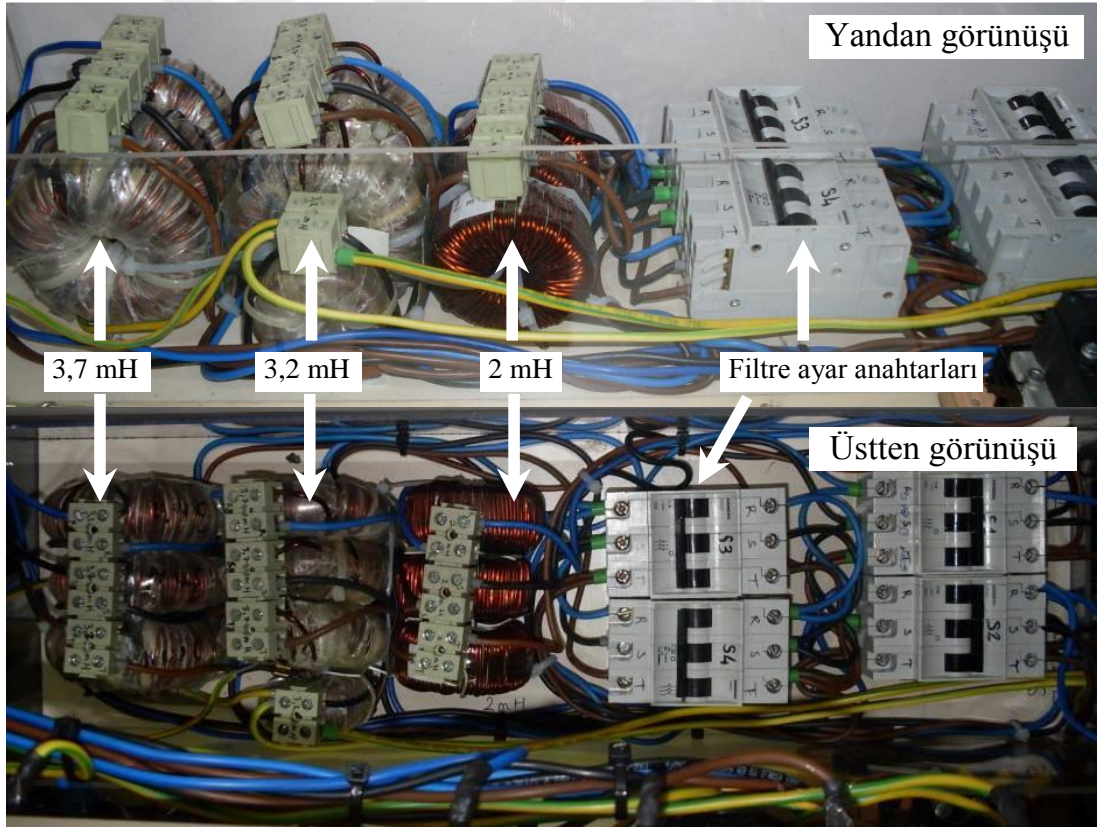


Şekil 4.25. Evirici için tasarlanan kademeli L filtre bobin devresi

Tablo 4.3. Kademeli filtre bobin kombinasyon değerleri

Bobin Değerleri	S1	S2	S3	S4
1,2mH	1	1	0	0
2mH	0	1	0	0
3,7mH	1	0	0	1
5,2mH	0	0	1	0
8,9mH	0	0	0	1

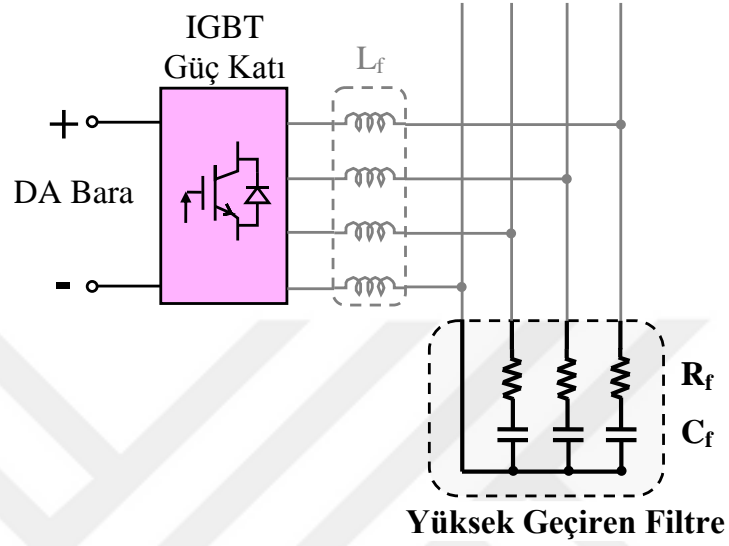
Şekil 4.26'da 3 fazlı 4 telli şebeke bağlantılı evirici çıkışı için tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen kademeli L filtre bobin fotoğrafı verilmektedir. Filtre bobin grubu tek bir platform üzerine montajı gerçekleştirilerek anahtarların konumlarını kolaylıkla değiştirmek suretiyle çeşitli değerlerdeki bobin değerleri elde edilmektedir.



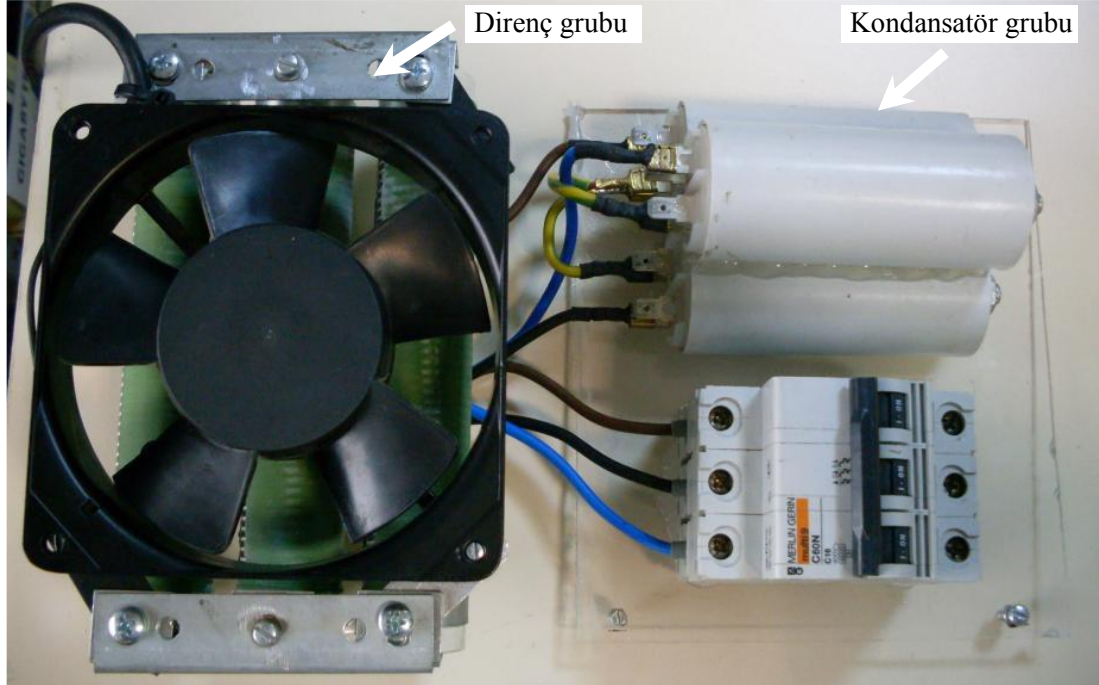
Şekil 4.26. Evirici çıkışı için kademeli L filtre tasarım fotoğrafı

Histerisiz kontrol tabanlı eviriciler tarafından üretilen akımlar, güç yarı iletken elemanlarının anahtarlanması sonucunda yüksek sıralı harmonik bileşenlere sahip

olmaktadır [170]. Bu anahtarlama harmonikleri Şekil 4.27’de  $R_f$  ve  $C_f$  ile gösterilen bir yüksek geçiren filtre kullanılarak kolaylıkla filtrelenebilmektedir. Deneysel test platformu için tasarlanan ve üretilen RC yüksek geçiren filtre fotoğrafı Şekil 4.28’de verilmektedir.



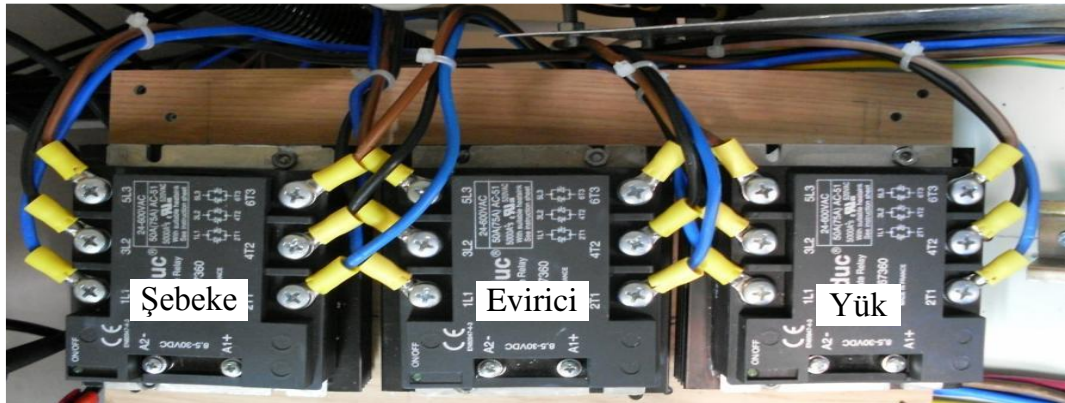
Şekil 4.27. RC filtrenin evirici çıkışına bağlantısı



Şekil 4.28. Evirici çıkışı için RC filtre tasarım fotoğrafı

#### 4.15. AA SSR Kontrol Kartı Tasarımı ve Üretimi

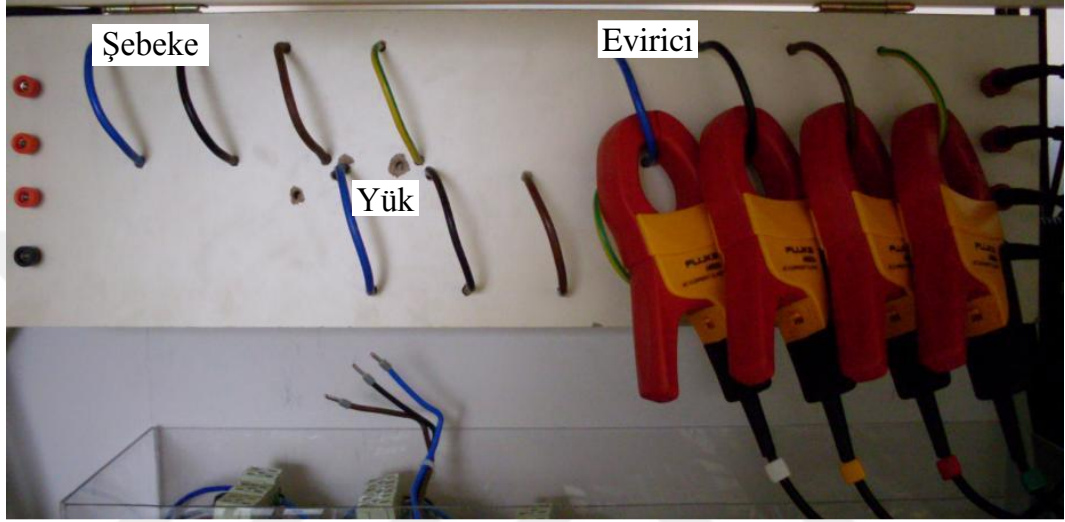
3 fazlı 4 telli şebeke bağlantılı HEDS’nde şebeke, evirici ve yük güç devresinin kontrolünü sağlamak için AA SSR’ler kullanılmıştır. Güç devresi kademeli olarak güvenlik açısından mekanik ve elektronik anahtarlar yardımı ile devreye alınmaktadır. İlk olarak kontaktörler ile enerji akışı mekanik şekilde aktarılmakta daha sonra AA SSR ile kontrol sinyalleri yardımıyla tamamlanmaktadır. AA SSR’lerin kontrol sinyalleri dSpace ve mikroişlemci ile sağlanabilmektedir. Test platformunda Celduc marka SGT865350 modeli kullanılmaktadır. AA SSR’ler 520V gerilime ve 50A akım değerine sahiptirler. Ayrıca 8,5-30V giriş gerilimi ile kontrolü sağlanmaktadır ve test platformunda AA SSR’lerin kontrolü 12V ile gerçekleştirilecektir. Enerji yönetim algoritmasından gelen bilgiye göre eviriciyi devreye almak, adalama moduna geçerken şebekeyi devreden çıkarmak ve yüklerin kontrolünü sağlamak için AA SSR’ler kullanılmıştır. AA SSR’lerin en büyük avantajı, dışarıdan dijital bir bilgi ile 3 fazlı güç kontrolü kolaylıkla sağlanmaktadır. Diğer bir avantajı ise sıfır geçiş noktasında enerji akışını gerçekleştirerek, eviricinin şebekeye bağlanması esnasında faz geçişlerinde hızlıca senkron olmasına imkan sağlamaktadır. Kontaktörlerin aksine 3 fazı da aynı anda iletme geçirerek şebekeye senkron olma sırasında tek veya çift fazda kalma hatasını ortadan kaldırmaktadır. AA SSR’ler sessizdir, dâhili gerilim kenetlenme (clamping voltage) özelliği ve donanımsal olarak RC koruma elemanları mevcuttur. Deneysel test platformu için bağlantıları ve soğutucu üniteleri takılan AA SSR’lerin kontrol ünitesinin fotoğrafı Şekil 4.29’da verilmektedir.



Şekil 4.29. Sistemde kullanılacak SSR kontrol kartı fotoğrafı

#### 4.16. Güç Analizörü Ölçüm Kartı

Sistem çalışma sırasında güç analizörünün akım ve gerilim problemlerini bağlamak için özel bir ölçüm kartı tasarlanmıştır. Böylelikle kolaylıkla şebeke, evirici ve yük akım gerilim harmonik, güç gibi değerleri okumasına yardımcı olmaktadır. Şekil 4.30'da tasarlanan güç analizör ölçüm kartı fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 4.30. Güç analizör ölçüm kartı fotoğrafı

#### 4.17. Yük Gruplarının Tasarımı ve Üretimi

Tez çalışması kapsamında, 3 fazlı 4 telli şebeke bağlantılı HEDS'ne yük çeşidi olarak, 110Vrms faz nötr gerilimindeki, sisteme tetikleme açısı  $\alpha=30^\circ$  olan, 3 faz RL yüklü, yarı denetimli tristörlü doğrultucu bağlanmaktadır. Diğer bir yük çeşidi olarak 3 faz tam dalga diyotlu RL yüklü doğrultucu kullanılmaktadır. Fazlardan dengesiz akım çekilmesini sağlamak amacıyla R fazına tek faz RL yüklü diyotlu doğrultucu bağlanmaktadır. Tasarlanan 4 telli evirici nötr hattı yapısı ile dengeli yükleri besleyebildiği gibi tek fazlı ve dengesiz yüklerle de cevap verebilmektedir. Sistemde kullanılmak üzere tasarlanan ve üretimi gerçekleştirilen yük çeşitleri aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Tablo 4.4'te doğrultucu yüklerin deneysel ölçüm değerleri özeti verilmektedir.

Tablo 4.4. Doğrultucu yüklerin deneysel ölçüm değerleri

Parametreler	3 Faz Tristörlü Doğrultucu (RL yüklü, $\alpha=30^\circ$ )	3 Faz Diyotlu Doğrultucu (RL yüklü)	Tek Faz Diyotlu Doğrultucu (RL yüklü)
Kaynak Gerilimi (V)	115,5	115,4	114,9
Kaynak Akımı (A)	4,7	4,8	9
Görünür Güç (kVA)	1,61	1,65	1,04
Aktif Güç (kW)	1,47	1,55	0,65
Reaktif Güç (kVAr)	0,64	0,54	0,80
Güç Faktörü	0,92	0,94	0,63
THB <sub>V</sub> (%)	1,4	2,0	2,2
THB <sub>A</sub> (%)	31,0	23,5	30,1
DA yük	R: 40 $\Omega$ , L: 5,32mH	R: 40 $\Omega$ , L: 5,32mH	R: 40 $\Omega$ , L: 5,32mH
L <sub>Y</sub>	3,2mH	3,2mH	3,2mH

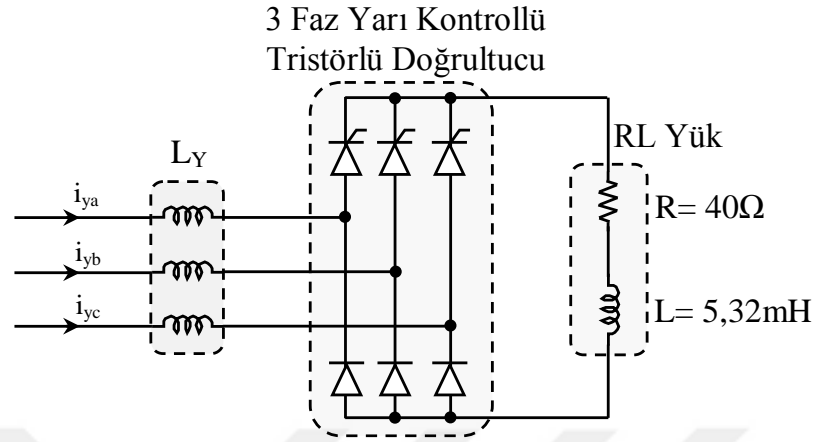
#### 4.17.1. 3 fazlı yarı kontrollü tristörlü doğrultucu

3 faz yarı kontrollü tristörlü doğrultucu olarak Semikron marka 68A, 1600V, SK70DH16 modülü kullanılmıştır. Yarı kontrollü doğrultucunun tetikleme açısı  $30^\circ$  olarak modül uçlarına RL yük bağlanarak test sonuçları alınmıştır. Harmonik kaynağı olan tristörlü ve diyotlu doğrultucuların AA girişine şok bobinleri bağlanmaktadır. Bu şok bobinleri ile komütasyonun olumsuz etkileri giderilmekte ve aynı zamanda harmoniklerin şebekeye verilmesi bir miktar azaltılmaktadır. Bu amaçla tipik olarak %3 ve %5 empedans değerleri arasında şok bobinleri kullanılmaktadır [171]. %5 empedans değerindeki bir şok bobininin endüktans değeri Denklem (4.1)'de görüldüğü gibi hesaplanmaktadır. Bu şok bobinleri bütün diyotlu doğrultucularda kullanılmaktadır. 3 faz yarı kontrollü tristörlü doğrultucu devre şeması Şekil 4.31'de ve gerçekleştirilen doğrultucu fotoğrafı Şekil 4.32'de verilmektedir.

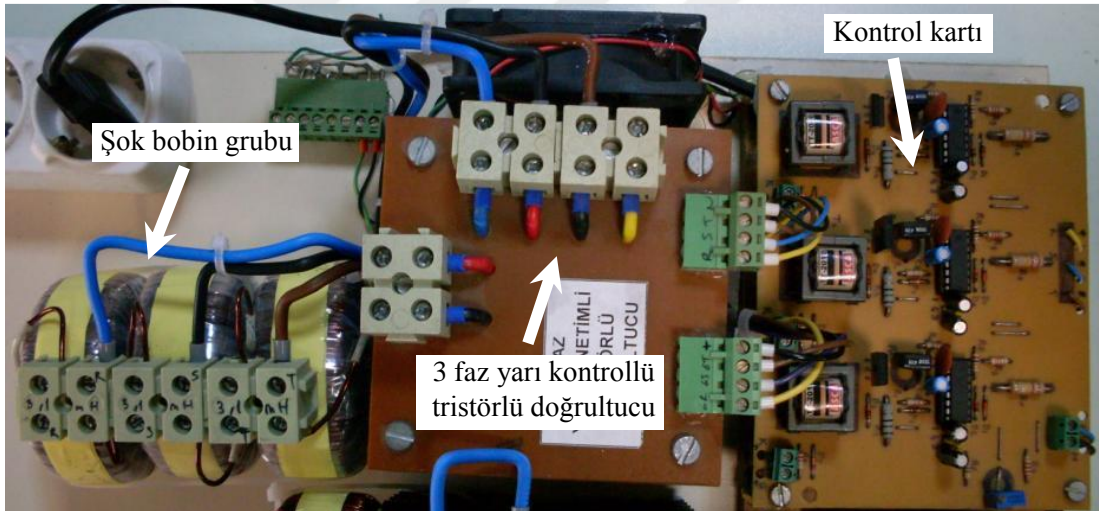
$$L_Y \cong 0.05 \frac{V_{La}}{\omega I_{La}} \quad (4.1)$$

Sistemde oluşacak anlık yüklenmelerde filtre çekirdeğinin doyuma gitmesi, endüktans değerinin düşmesine yol açıp sistemi kararsızlığa sürükleyebilir. Bu nedenle reaktör nominal akım değerlerinde doymayacak şekilde dizayn edilmelidir. Uygulama çalışmasında 3 faz filtre bobini, 3 ayrı toroid nüve üzerine uygun kesitli

bobinin el ile sarılmasıyla elde edilmektedir. Sistemde kullanılacak  $L_Y$  bobin değeri 3,2mH'dir.



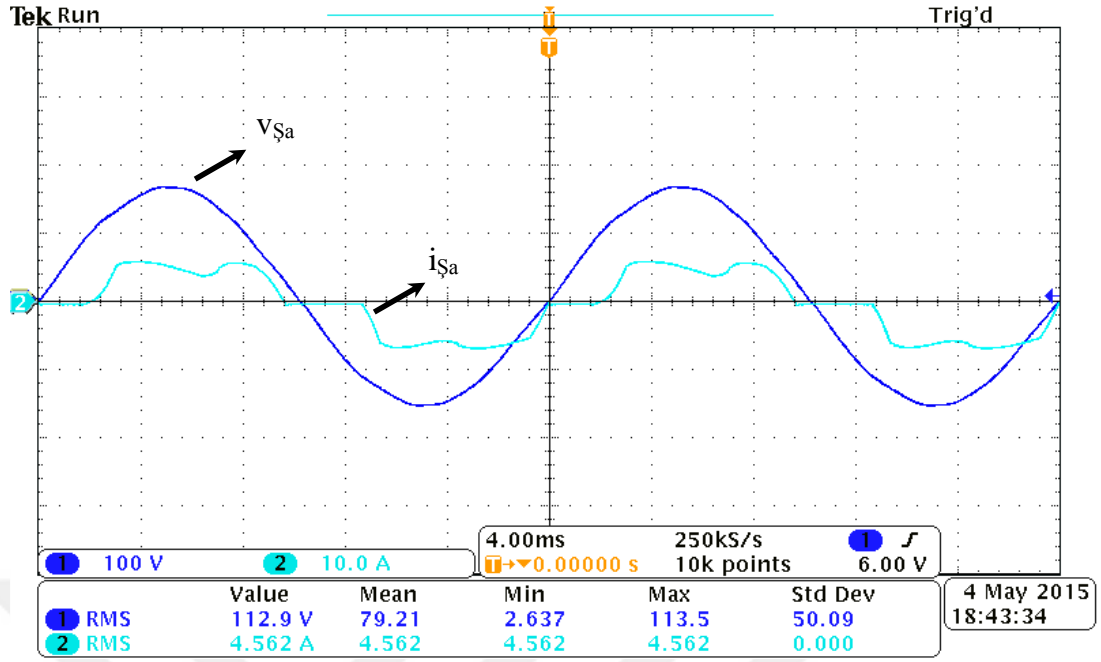
Şekil 4.31. 3 faz yarı kontrollü tristörlü doğrultucu devre şeması



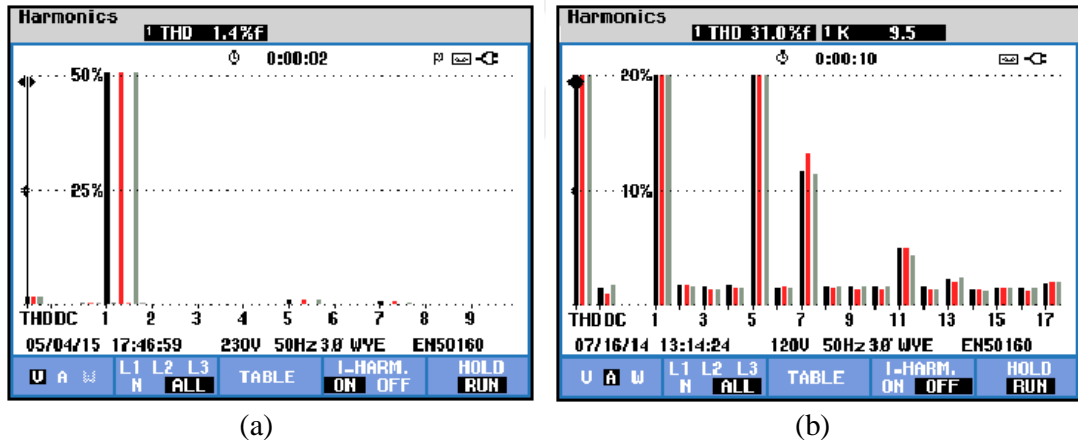
Şekil 4.32. 3 faz yarı kontrollü tristörlü doğrultucu fotoğrafı

Şekil 4.33'te RL yüklü 3 faz yarı kontrollü tristörlü doğrultucuya ait deneysel dalga şekilleri görülmektedir. Ayrıca, 3 faz yarı kontrollü doğrultucunun çektiği akımlarda yarı dalga simetrisi olmadığından çift harmoniklerin de bulunduğu Şekil 4.34'te görülmektedir.





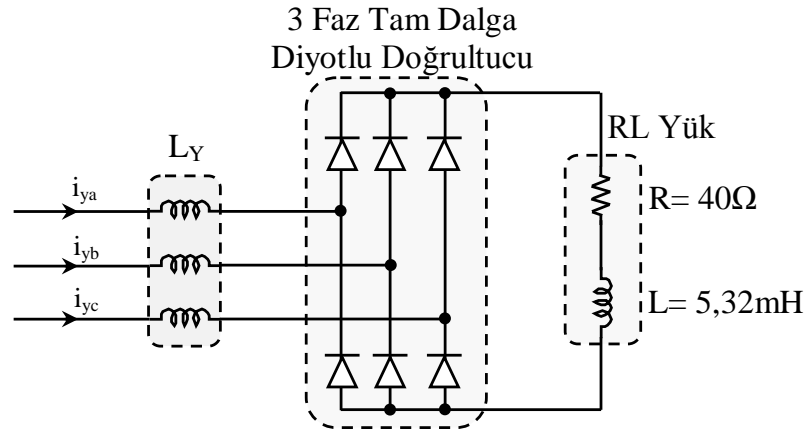
Şekil 4.33. 3 faz tristörlü doğrultucu a-fazı kaynak gerilimi ve akımı dalga şekilleri



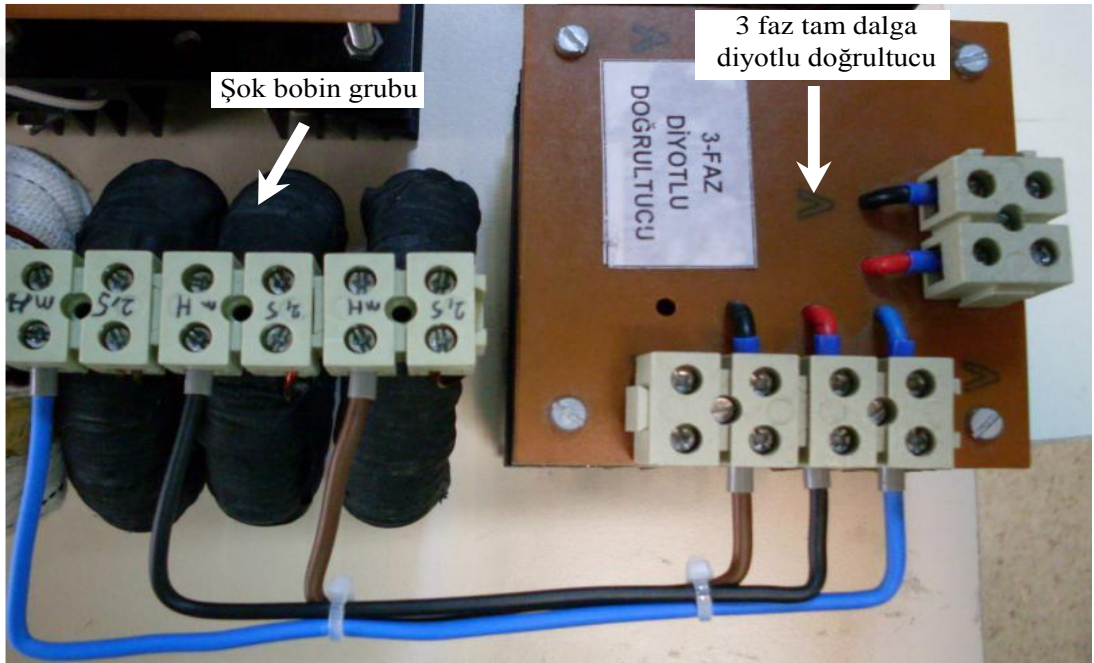
Şekil 4.34. 3 faz tristörlü doğrultucu (a) gerilim, (b) akım harmonik dağılımı

#### 4.17.2. 3 fazlı tam dalga diyot doğrultucu

3 faz tam dalga diyot doğrultucu olarak IXYS marka 35A, 1600V, VUO36-16NO8 modülü kullanılmıştır. 3 faz yarı kontrollü tristörlü doğrultucu yapısında olduğu gibi 3 faz tam dalga diyot doğrultucuda da şok bobin grupları kullanılmıştır. 3 faz tam dalga diyot doğrultucu devre şeması Şekil 4.35'te ve gerçekleştirilen doğrultucu fotoğrafı Şekil 4.36'da verilmektedir.

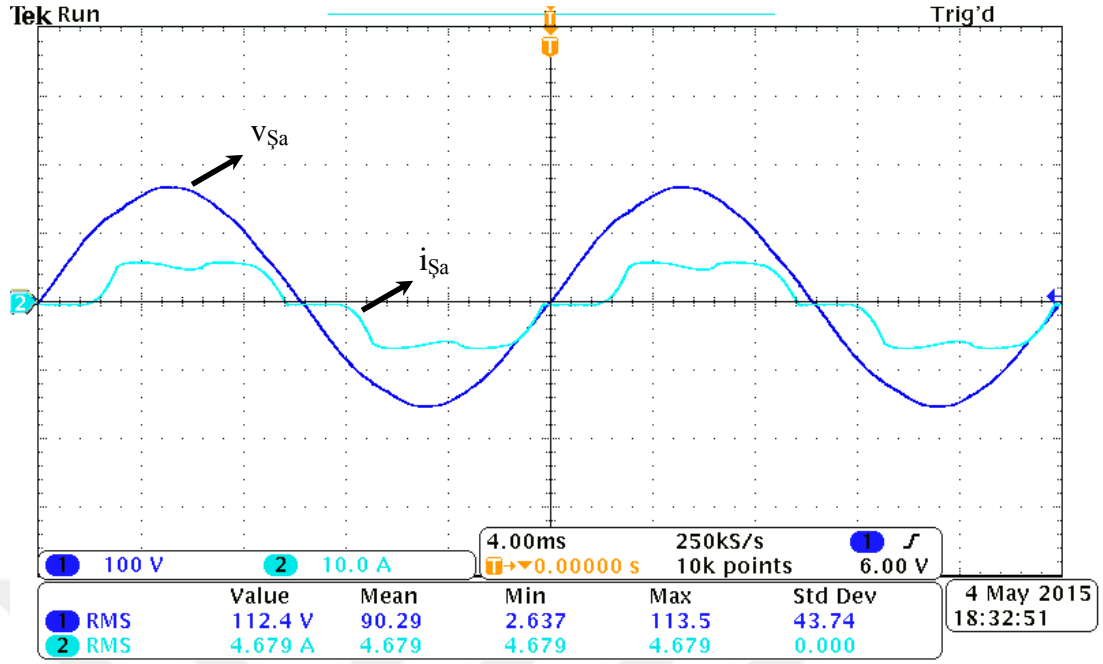


Şekil 4.35. 3 faz tam dalga diyot doğrultucu devre şeması

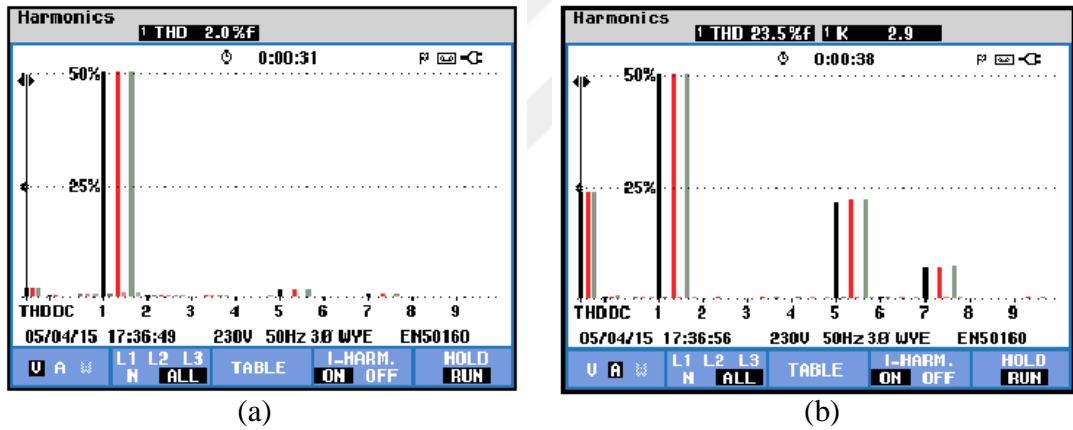


Şekil 4.36. 3 faz tam dalga diyot doğrultucu fotoğrafı

Şekil 4.37’de RL yüklü 3 faz tam dalga diyot doğrultucuya ait deneysel dalga şekilleri görülmektedir. 3 faz tam dalga diyot doğrultucunun gerilim ve akım harmonikleri Şekil 4.38’de görülmektedir.



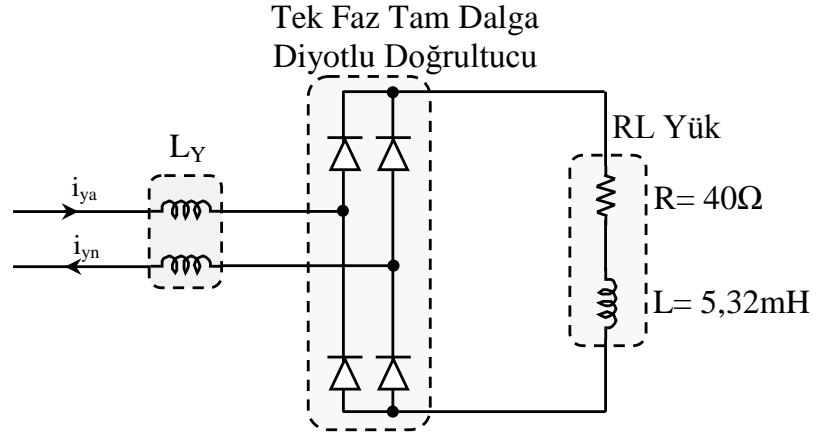
Şekil 4.37. 3 faz tam dalga diyot doğrultucu a-fazı akım/gerilim dalga şekilleri



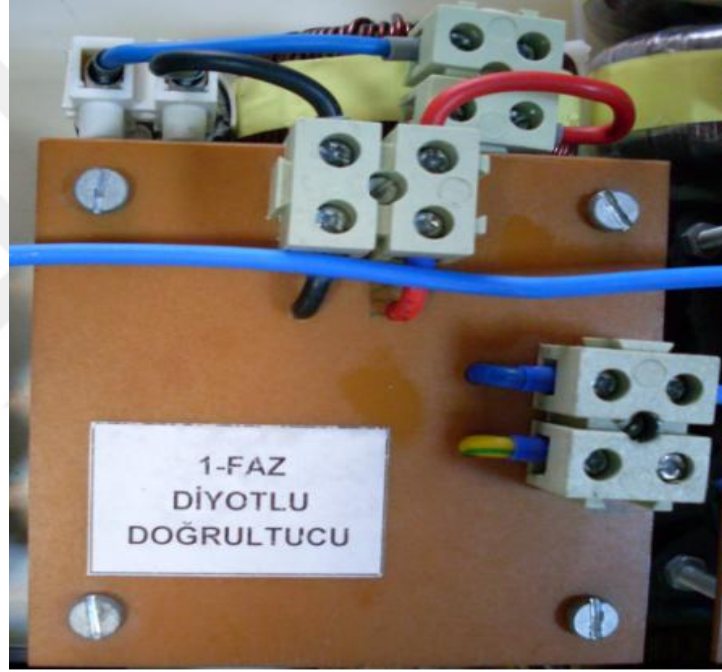
Şekil 4.38. 3 faz tam dalga diyot doğrultucu (a) gerilim, (b) akım harmonik dağılımı

### 4.17.3. Tek fazlı tam dalga diyot doğrultucu

Tek faz tam dalga diyot doğrultucu olarak iki adet Sirectifier marka 120A, 1600V, SDD120N16B modülü kullanılmıştır. 3 faz yarı kontrollü tristörlü doğrultucu yapısında olduğu gibi tek faz tam dalga diyot doğrultucuda da şok bobin grupları kullanılmıştır. Tek faz tam dalga diyot doğrultucu devre şeması Şekil 4.39'da ve gerçekleştirilen doğrultucu fotoğrafı Şekil 4.40'ta verilmektedir.

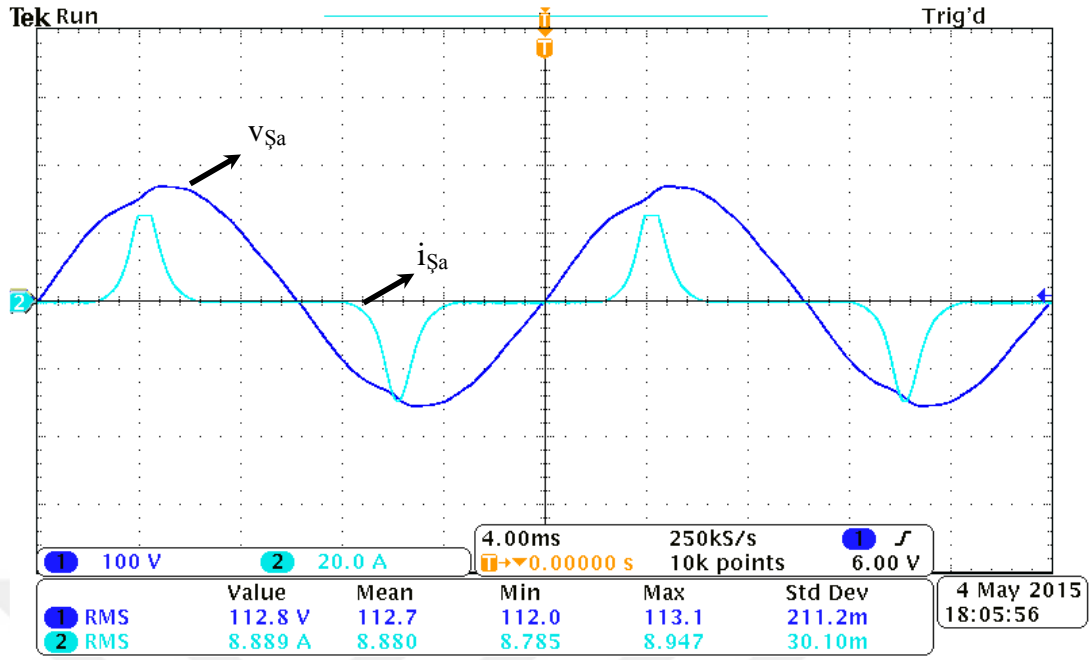


Şekil 4.39. Tek faz tam dalga diyot doğrultucu devre şeması

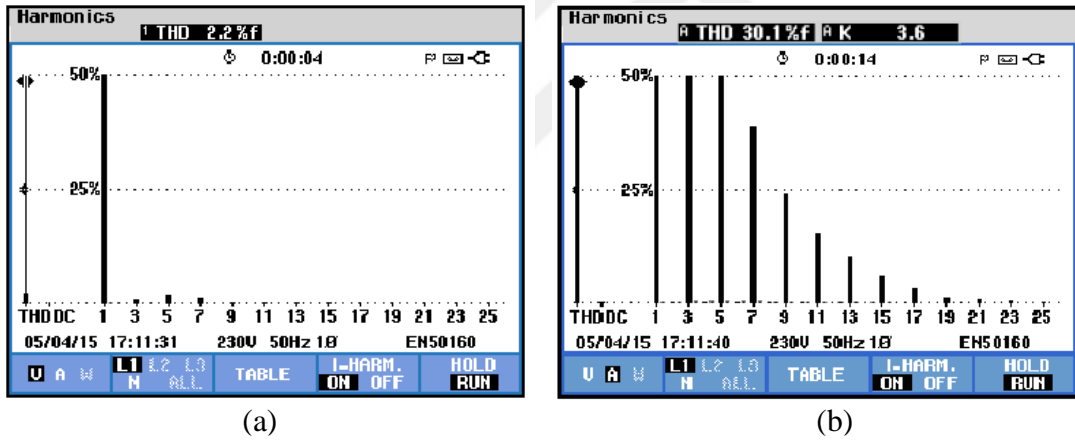


Şekil 4.40. Tek faz tam dalga diyot doğrultucu fotoğrafı

Şekil 4.41'de RL yüklü tek faz tam dalga diyot doğrultucuya ait deneysel dalga şekilleri görülmektedir. Ayrıca, tek faz tam dalga diyot doğrultucunun gerilim ve akım harmonikleri Şekil 4.42'de görülmektedir.



Şekil 4.41. Tek faz tam dalga diyot doğrultucu a-fazı akım/gerilim dalga şekilleri



Şekil 4.42. Tek faz tam dalga doğrultucu (a) gerilim, (b) akım harmonik dağılımı

#### 4.18. Kademeli Omik Yük Grubu

3 fazlı 4 telli şebeke bağlantılı HEDS yük grubu olarak kullanılmak üzere kademeli yük tasarlanarak üretilmiştir. Kademeli yük grubunda altı adet  $90\Omega$  1000W, sekiz adet  $100\Omega$  2500W omik direnç kullanılmaktadır. Şekil 4.43'te direkt olarak ve tek faz, 3 faz doğrultucuların çıkışlarına bağlanan kademeli omik yük grup fotoğrafı gösterilmektedir. Kademeli yük grubu kolaylıkla taşınabilir olması sayesinde deney sırasında istenilen güç değeri elde edilerek test sonuçları alınmıştır.



Şekil 4.43. Sistemde kullanılan kademeli omik yük fotoğrafı

#### 4.19. Programlanabilir DA Elektronik Yük

Tez çalışması kapsamında kullanılmak üzere Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü proje kurum hissesi kapsamında Chroma marka programlanabilir DA elektronik yük ünitesi alınmıştır. Programlanabilir DA elektronik yük ünitesi ile tez çalışmasında deney sonuçlarının alınması hedeflenen enerji yönetim algoritmasının çalışma modlarını test etmek için kullanılmaktadır. Programlanabilir DA elektronik yük ünitesi sayesinde istenilen anda yük grubu devreye alınarak veya yük gücü belirlenen periyotlar ile değiştirilerek gerçek zamanlı yük grubu benzetimi yapılabilmektedir. Örneğin, bir evin günlük olarak yük talebinin benzetimi yapılarak sistemin bu değişim durumunda tepkisi gözlenmektedir.

Programlanabilir DA elektronik yük ünitesi olarak Chroma marka 6410A ana kontrol ünitesi ve yardımcı 63108A yük modülü alınmıştır. Programlanabilir DA elektronik yük, dört yük ray ünitesi ve sekiz kanal yük modülünün çalışmasını

desteklemektedir. 6410A ana kontrol ünitesi yardımcı olarak takılan yük modüllerinin kontrolünü sağlamaktadır. Yardımcı modül olarak alınan 63108A yük ünitesi 600W yük kapasitesindedir. 63108A yük modülünün güç aralığı 60W-600W, akım aralığı 2A–20A ve gerilim aralığı 0–500V'tur. Program arayüzü sayesinde değişik şekilde test düzeneği oluşturulmaktadır. Bu modlar başlıca sabit akım modu, sabit direnç modu, sabit gerilim modu, sabit güç modu, dinamik mod ve statik mod olmak üzere birçok test imkânı sağlamaktadır. 63108A yük modülünün teknik özellikleri Tablo 4.5'te verilmektedir [172].

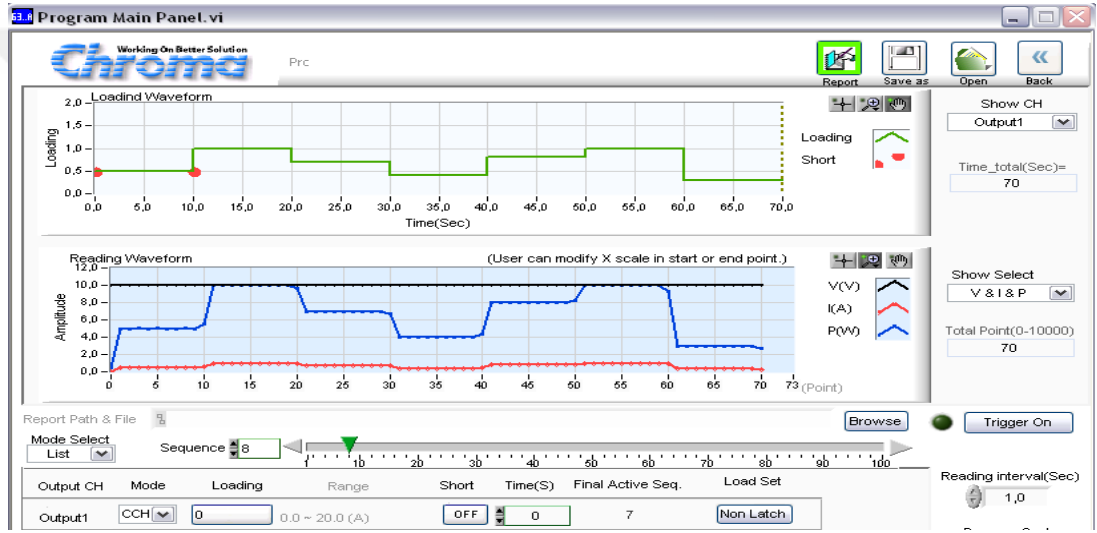
Tablo 4.5. 63108A yük modülünün teknik özellikleri [172]

Parametreler	Chroma 63108A yardımcı yük modül	
Güç	60W	600W
Akım	0-2A	0-20A
Gerilim	0-500V	
<b>Sabit Akım Modu</b>		
Akım Aralığı	0-2A	0-20A
Çözünürlük	0,5mA	5mA
<b>Sabit Direnç Modu</b>		
Direnç Aralığı	25Ω – 100kΩ	
Çözünürlük	10μS	
<b>Sabit Gerilim Modu</b>		
Gerilim Aralığı	0-500V	
Çözünürlük	125mV	
<b>Sabit Güç Modu</b>		
Güç Aralığı	0-60W	0-600W
Çözünürlük	15mW	150mW

Chroma marka programlanabilir DA elektronik yük modül fotoğrafı Şekil 4.44'te verilmektedir. Programlanabilir DA elektronik yük ünitesinin bilgisayar arayüzü Şekil 4.45'te verilmektedir. 6410A ana kontrol ünitesi RS232 ile haberleşmektedir.



Şekil 4.44. Programlanabilir DA elektronik yük fotoğrafı



Şekil 4.45. Programlanabilir DA elektronik yük bilgisayar ara yüzü

#### 4.20. dSpace Tabanlı Gerçek Zamanlı Denetim Sistemi

dSpace gerçek zamanlı kontrol sistemi, Simulink bloklarıyla oluşturulan gerçek-zamanlı modelden otomatik olarak C kodları ürettiği için, programın hazırlanma sürecini kısaltırken, aynı zamanda hataların kolay bir şekilde belirlenmesiyle benzetim algoritmaları üzerinden doğrudan müdahalede bulunarak hızlı bir şekilde modifikasyonunun gerçekleştirilmesini de sağlamaktadır.

dSpace sistemi donanım bileşenleri aşağıda açıklanmaktadır.

DS1103 denetleyici kartı: Bu kart üzerinde PowerPC 750GX/1GHz ana işlemci ve Texas Instruments TMS320F240/20MHz yardımcı işlemci bulunmaktadır. Ana işlemcide, 20 kanal 16 bit ADC, 8 kanal 16 bit sayısal analog dönüştürücü (Digital to



Analog Converter, DAC), 32 kanal sayısal giriş/çıkış, yardımcı işlemcide ise 16 kanal 10 bit analog giriş, 18 bit sayısal giriş/çıkış, 1 adet 3 faz ve 4 adet tek-faz DGM ve 4 yakalama girişi bulunmaktadır [173]. DS1103 denetleyici kart, ISA veri yolu üzerinden bilgisayara bağlanmaktadır.

CLP1103 bağlantı ve led paneli: Analog sinyallere erişim BNC konektörleri ile sayısal sinyallere erişim ise Sub-D konektörleri ile yapılmaktadır. LED panel, kartın sayısal sinyallerinin durumunu göstermektedir.

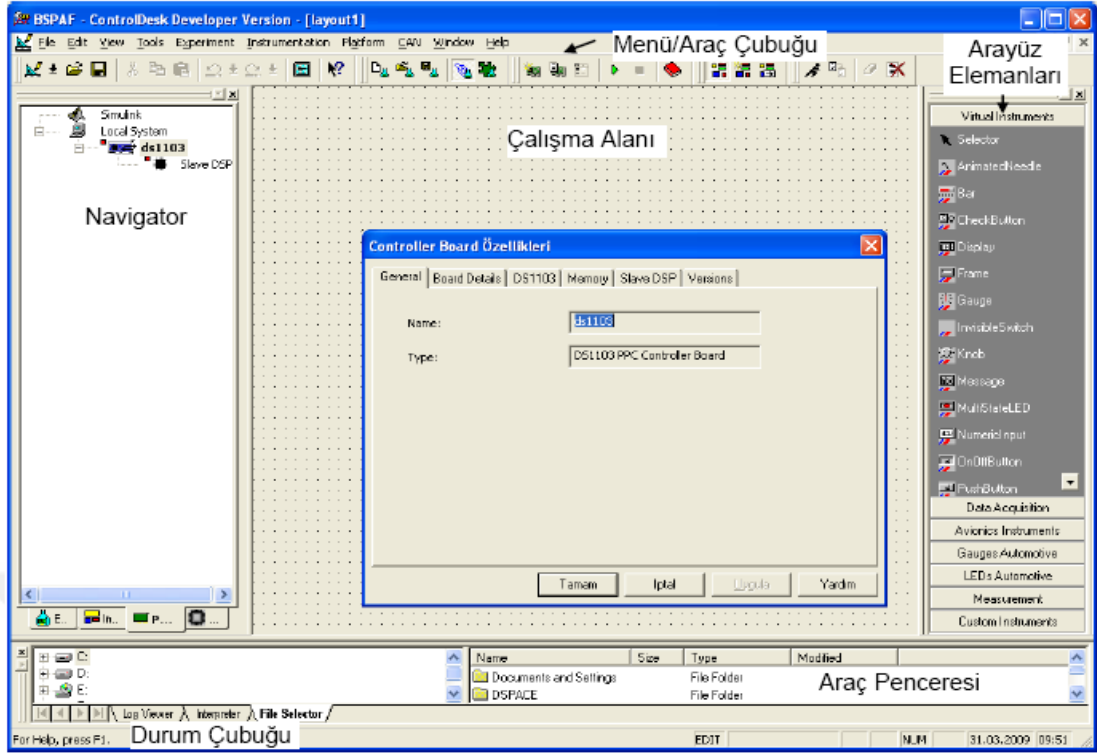
dSpace sistemi yazılım bileşenleri aşağıda açıklanmaktadır.

Matlab: Denetlenecek sistemin teorik modelinden yararlanılarak çevrimdışı olarak bilgi işlemenin gerçekleştirildiği, analiz, tasarım ve sistem optimizasyon işlemlerinin yerine getirildiği ve ilk denetim tasarımının oluşturulduğu yazılımdır. Simulink: Çevrimdışı benzetim algoritmalarının blok diyagramlar kullanılarak modellenmesinin yapıldığı yazılımdır.

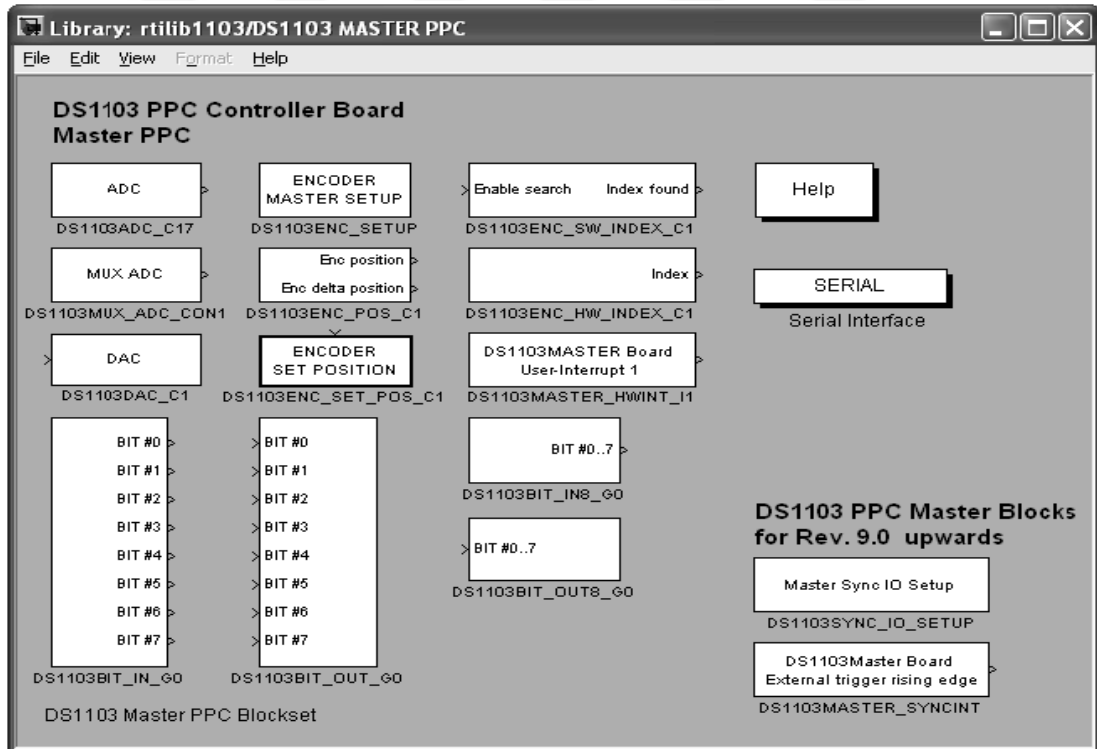
Real-Time Workshop: Simulink ortamında oluşturulan bloklardan C kod üretiminin gerçekleştirildiği yazılımdır.

ControlDesk Developer: Denetimi gerçekleştirilen sistemin deneysel denetiminin ve test otomasyonunun yapıldığı yazılımdır. Ayrıca dSpace ControlDesk Developer yazılımı ile, denetleyici kart tarafından hesaplanan ve ölçülen devre parametreleri grafiksel bir platform üzerinden gözlenebilmekte ve bu veriler sonradan istenmek üzere MAT dosyası olarak kaydedilebilmektedir.

Real-Time Interface: Simulink ve dSpace donanımı arasında bir ara yüzdür. Gerçek zamanlı kodun oluşturulması, yüklenmesi ve dSpace donanımı üzerinde yürütülmesini sağlamaktadır. Bu işlem, Matlab/Simulink blok kütüphanesine eklenen dSpace'in DS1103 gerçek zamanlı ara yüz I/O blokları ile yapılmaktadır [12]. Şekil 4.46'da dSpace ControlDesk ortamı ve Şekil 4.47'de DS1103 ana işlemci RTI blokları görülmektedir.



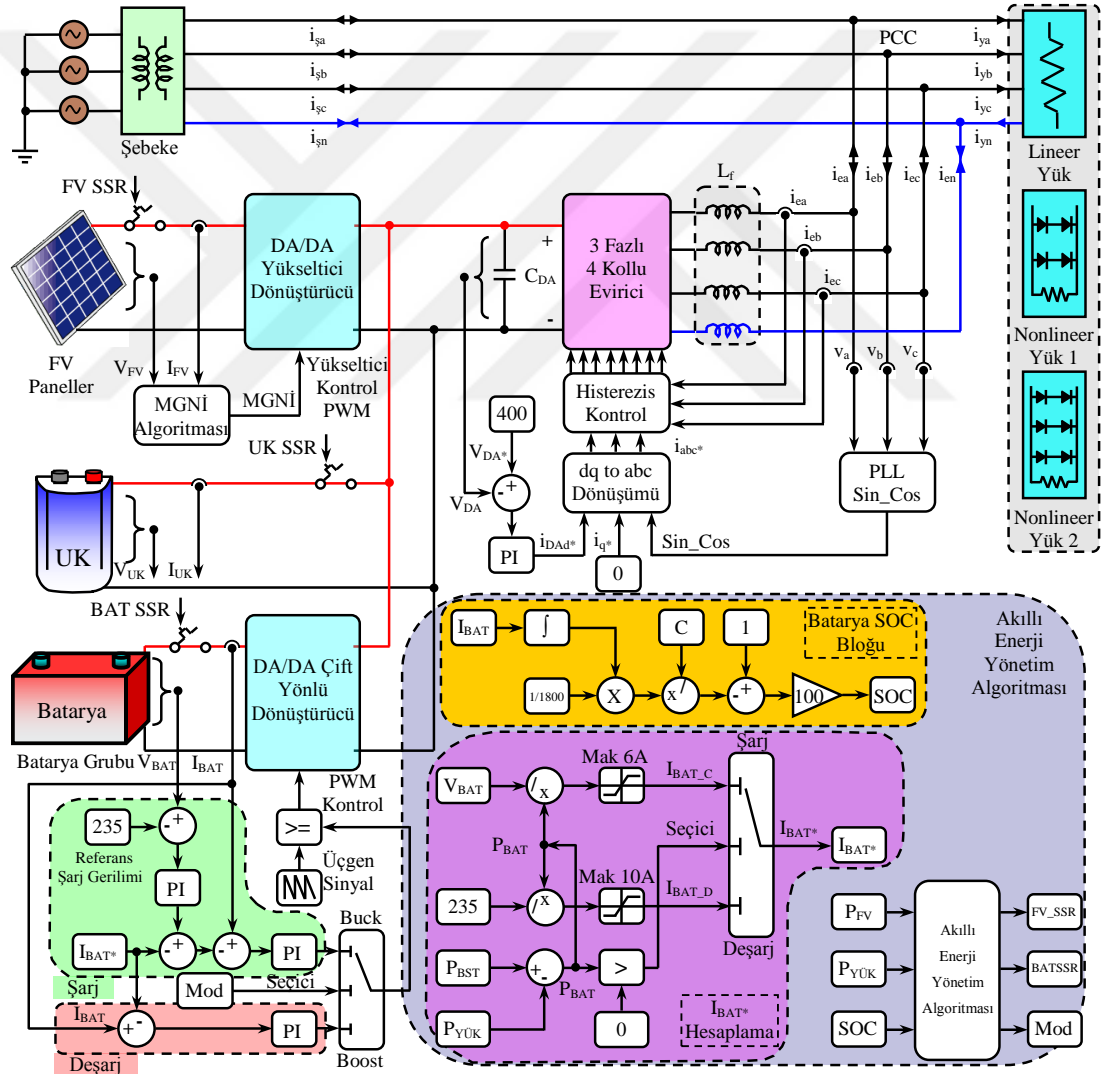
Şekil 4.46. dSpace ControlDesk ortamı



Şekil 4.47. DS1103 ana işlemci RTI blokları

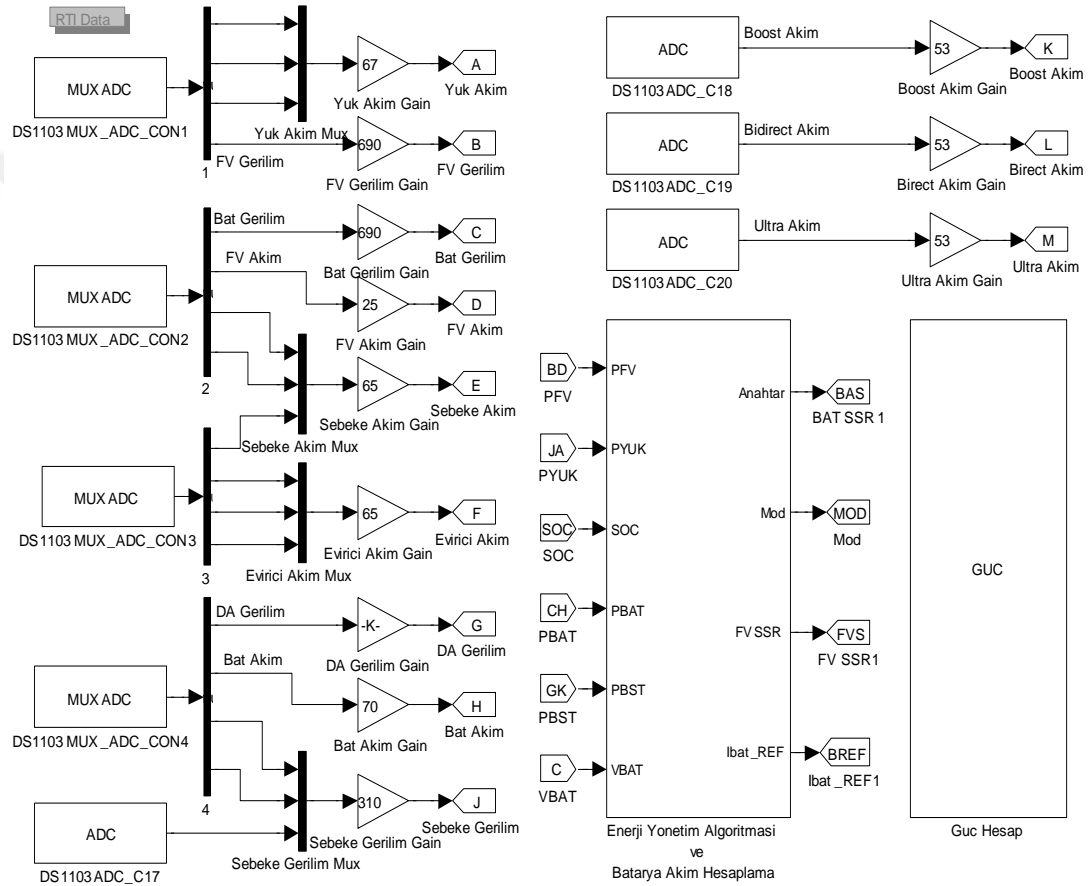
## 5. HEDS DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

Tez çalışması kapsamında deneysel çalışmaların kontrolleri Şekil 5.1’de verilen HEDS’nin güç ve denetim sistem blok diyagramıyla gerçekleştirilmiştir. Sistemin simülasyon çalışmaları sonucunda alınan veriler dikkate alınarak kontrol algoritmaları deneysel test sistemine aktarılmaktadır. Bu kontrol yapılarının çalışma yöntemi simülasyon çalışmaları bölümünde ayrıntılı olarak verilmektedir.

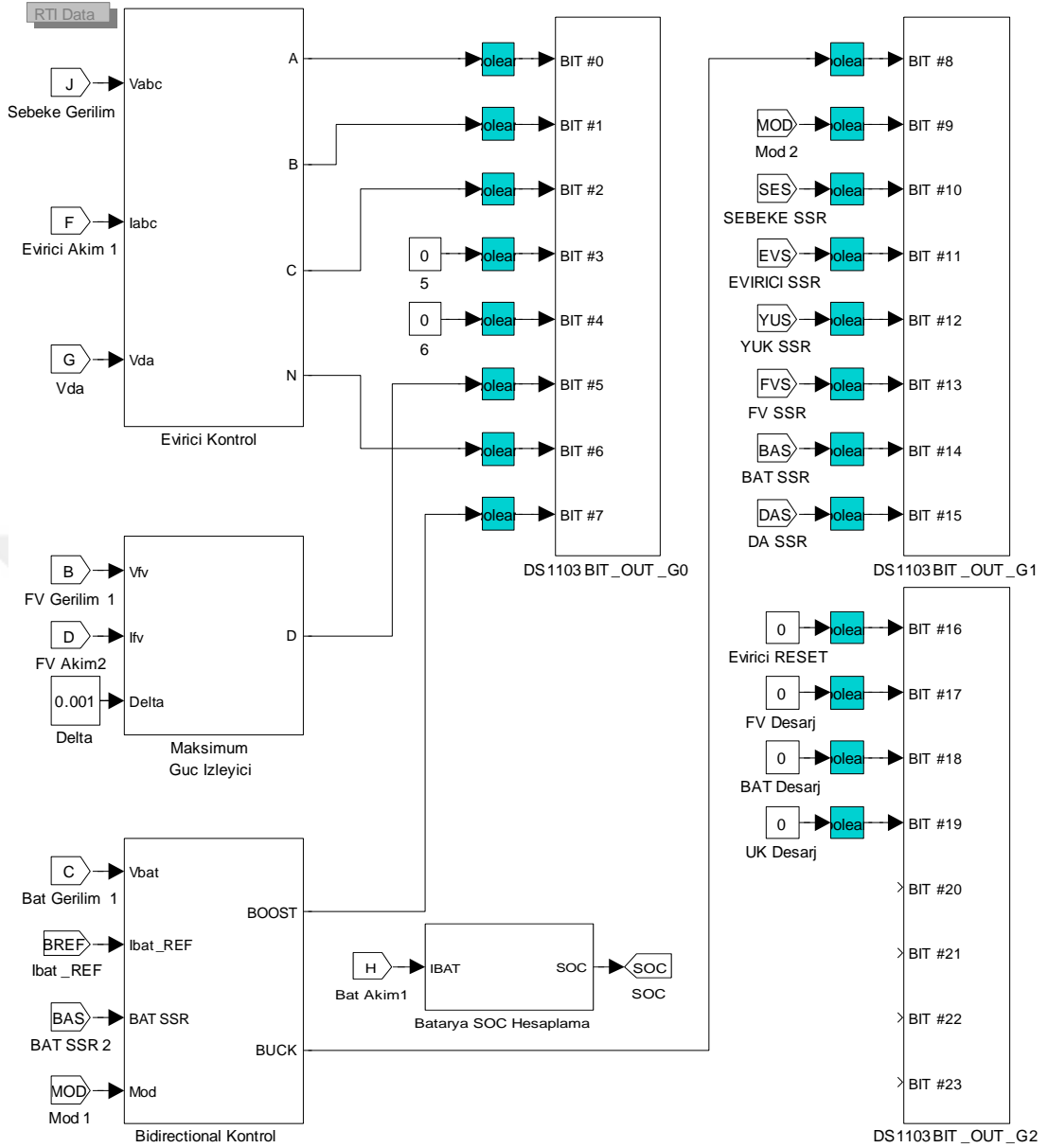


Şekil.5.1. HEDS güç ve denetim sistem blok diyagramı

Tez çalışması kapsamında önerilen, 3 fazlı 4 telli şebeke bağlantılı HEDS dSpace ControlDesk Developer yazılımı blok diyagramı Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te verilmektedir. dSpace ControlDesk Developer yazılımı ile simülasyonu gerçekleştirilen kontrol algoritma blokları arayüze aktarılarak gerçek ölçümler ile testler yapılmıştır. Akım, gerilim sensör kartlarından okunan değerler gerçek zamanlı olarak işlenerek gerekli anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. Ayrıca bu arayüz ile sistemde bulunan SSR kontrolleri de gerçekleştirilmektedir.

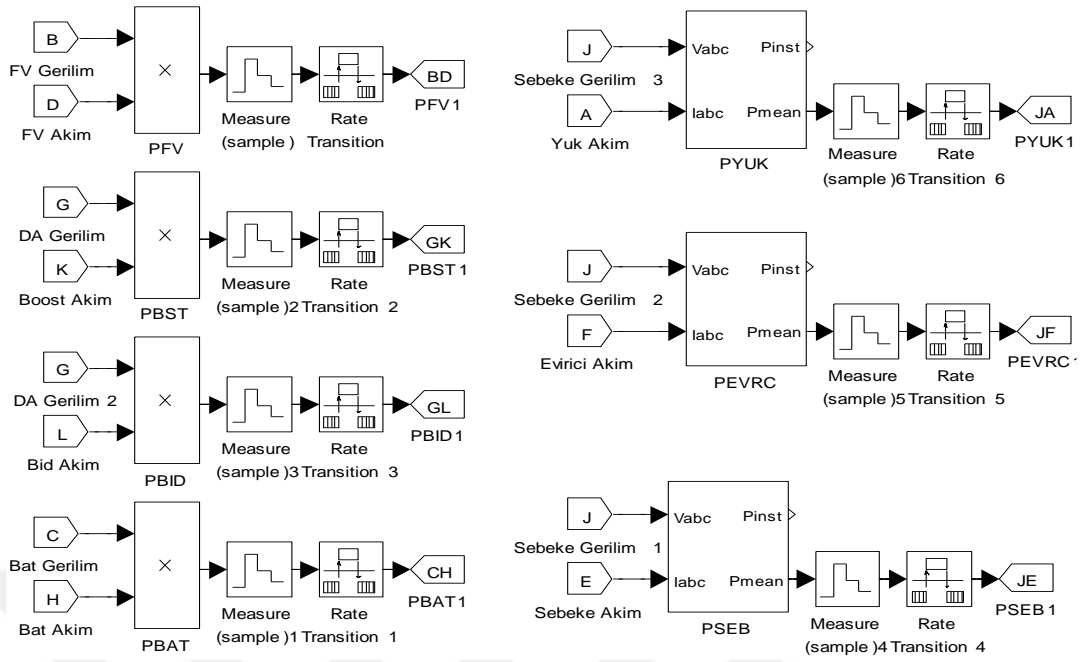


Şekil 5.2. HEDS'nin dSpace ADC sensör, AEYA ve güç hesap ekran görüntüsü



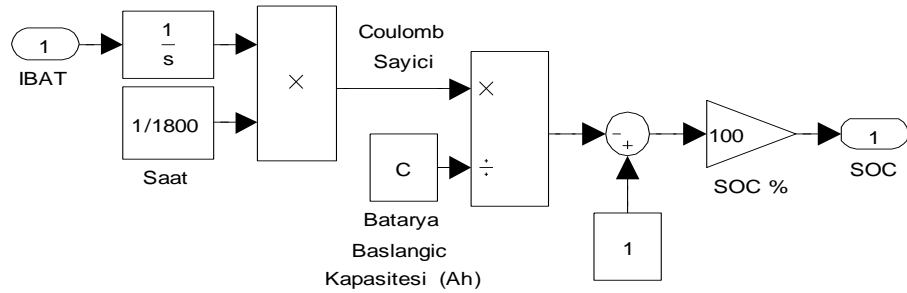
Şekil 5.3. HEDS'nin dSpace evirici, MGNI, çift yönlü dönüştürücü kontrol ve çıkış sinyallerinin ekran görüntüsü

Deneysel çalışmalar sırasında AEYA ve kontrol blokları için gerekli olan güç değerleri Şekil 5.4'te verilen dSpace bloklarıyla hesaplanmaktadır. Gerçek zamanlı olarak okunan bu güç değerleri gerekli denetim yapılarında değerlendirilerek sistemin kararlı ve doğru çalışmasını sağlamaktadır.



Şekil 5.4. HEDS dSpace güç hesaplama blokları

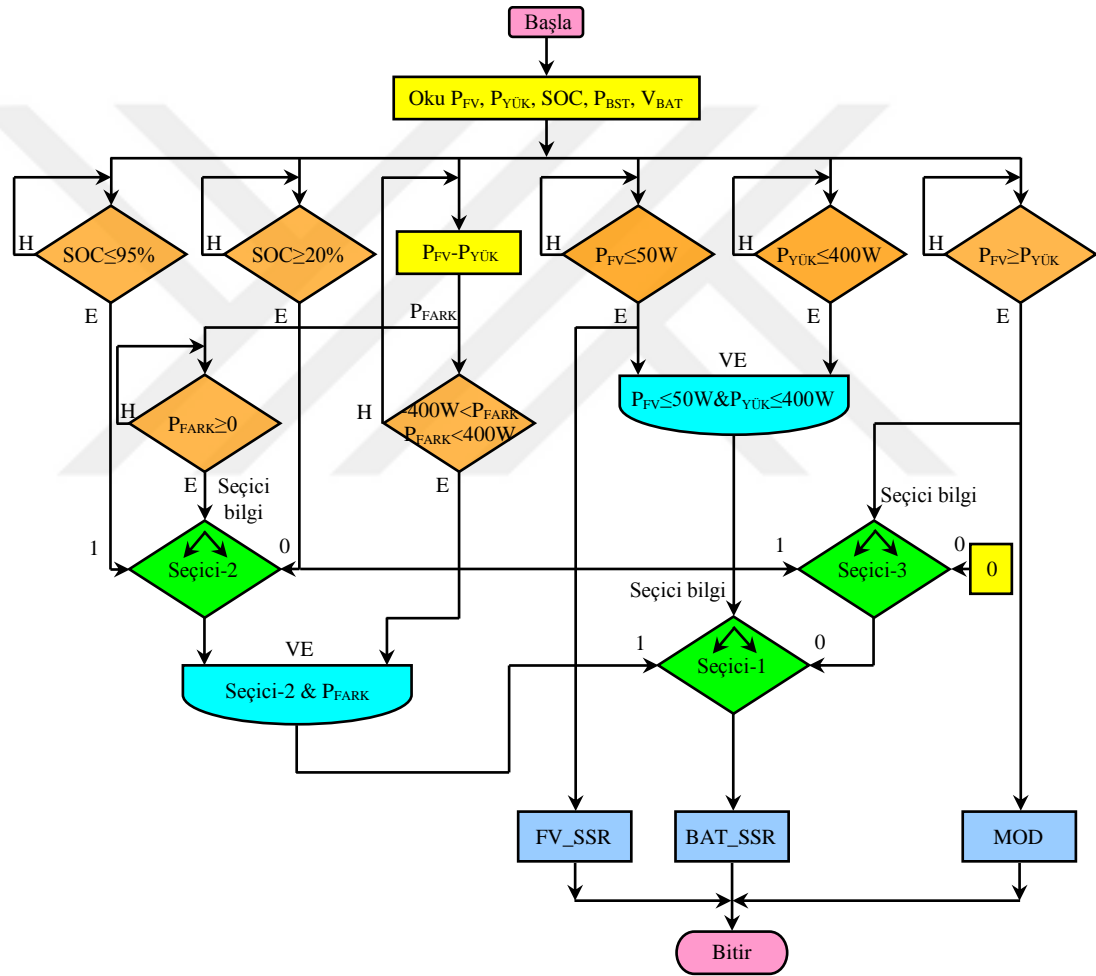
DeneySEL çalışmalarda batarya grubunun doluluk durumunu belirlemek için tipik bir coulomb sayıcı yöntemi kullanılmaktadır. Batarya grubunun SOC değerini hesaplayan bloğa giriş olarak batarya grubunun akım değeri girilmektedir. Bu akım değeri integral işlemine alınmaktadır. Batarya grubunun akım değerinin okuma periyodu gerçek zamanlı olarak 2 saniyede bir yapılmaktadır. Daha sonra 1800 katsayısı ile çarpılarak saat cinsinden akım miktarı sayılmaktadır. Diğer bir adımda ise bu coulomb miktarı batarya grubunun başlangıç kapasite miktarına (Ah) bölünerek batarya grubunun yeni kapasite miktarı elde edilmektedir. Batarya grubunun SOC dSpace hesaplama blok diyagramı Şekil 5.5'te verilmektedir. Ayrıca batarya grubunun SOC değerinin hesaplandığı formül Denklem (5.1)'de verilmektedir.



Şekil 5.5. dSpace batarya SOC hesaplama bloğu

$$SOC = \left( 1 - \frac{1}{1800} \cdot \int I_{BAT} \right) \cdot 100 \quad (5.1)$$

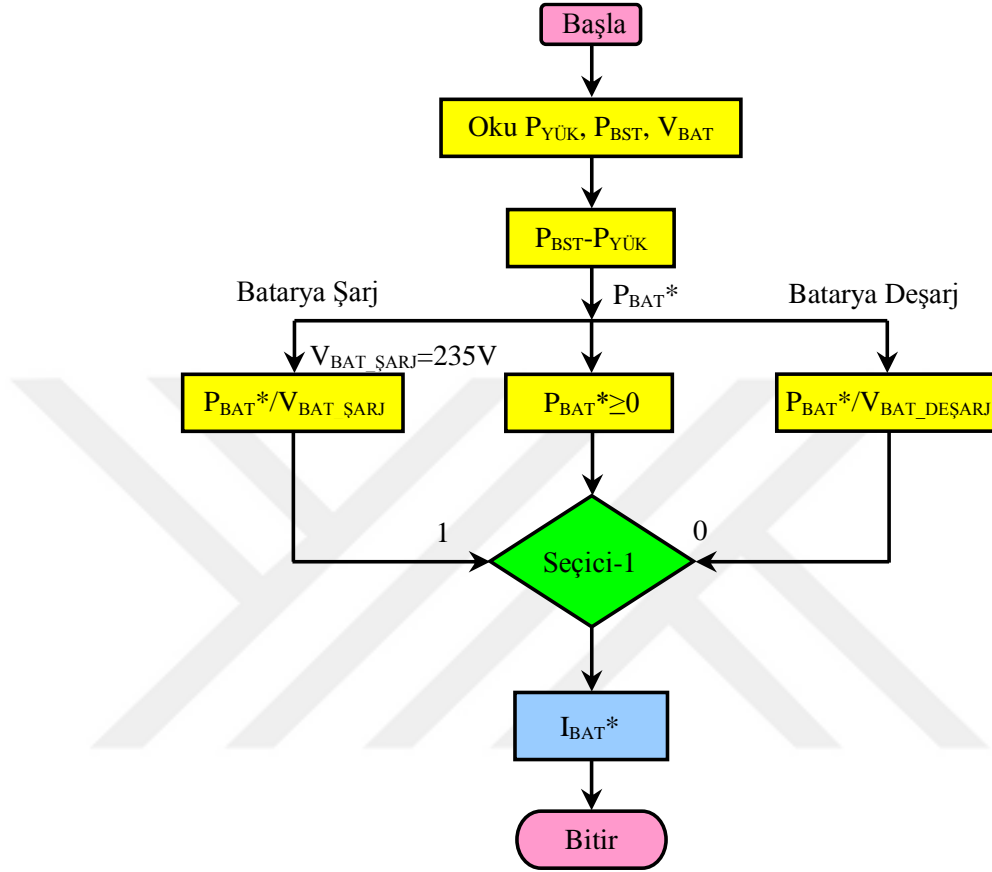
Tez çalışmasının simülasyon bölümünde ayrıntılı olarak anlatılan AEYA'nın akış diyagramı Şekil 5.6'da verilmektedir. Simülasyon çalışmalarında kullanılan algoritma dSpace arayüz birimine aktarılarak deneysel çalışmalarda AEYA'nın dinamik davranışı incelenmiştir.



Şekil 5.6. AEYA akış diyagramı

Şekil 5.7'de batarya grubunun referans akım hesaplama algoritmasının akış diyagramı verilmektedir. Bu algoritma, batarya grubunun şarj veya deşarj olması gerektiğine karar verildikten sonra her iki durumda da batarya grubunun referans akım değerini hesaplayarak DA/DA çift yönlü dönüştürücü kontrol yapısına aktarılmaktadır. Batarya grubunun şarj gerilim değeri sabit olduğu için tezde

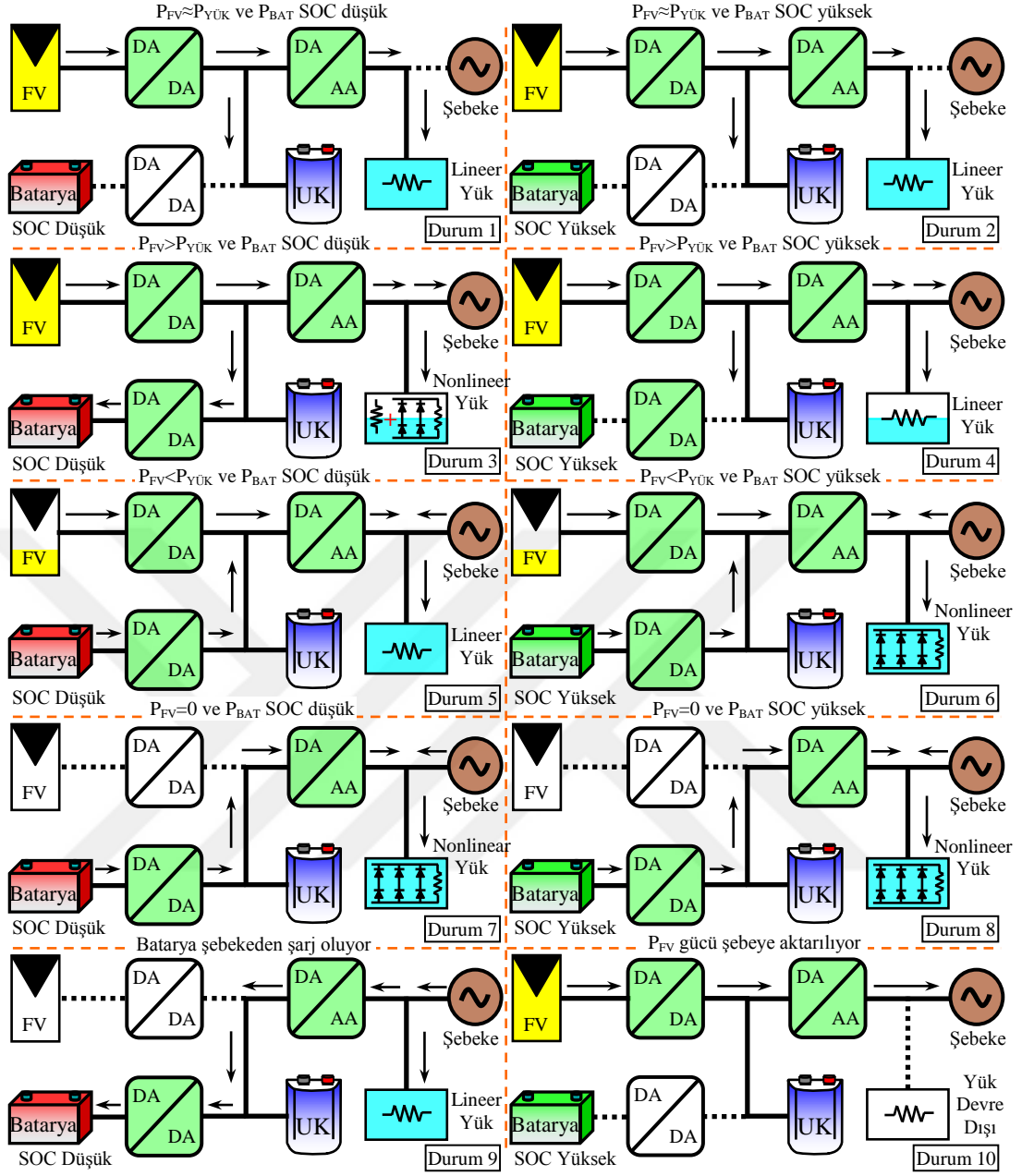
kullanılan deneysel çalışma sisteminde 235V olarak girilmektedir. Batarya grubu deşarj sırasında ise anlık olarak bataryanın gerilim değeri okunarak referans deşarj akım miktarı hesaplanmaktadır.



Şekil 5.7. Batarya grubu referans akım hesaplama akış diyagramı

Tez çalışma kapsamında gerçekleştirilen HEDS'nde öngörülen olası 10 deneysel çalışma durumları için güç akış diyagram özeti Şekil 5.8'de verilmektedir. Güç akış diyagramında deneysel sonuçların alındığı olası çalışma durumlarında FV paneller, batarya, ultrakapasitör, şebeke, evirici ve yük grubunun ayrıntılı anlık durumları verilmektedir. Böylelikle deneysel çalışma sırasında sistemde bulunan birimlerin durum takibi kolaylıkla yapılabilmektedir.

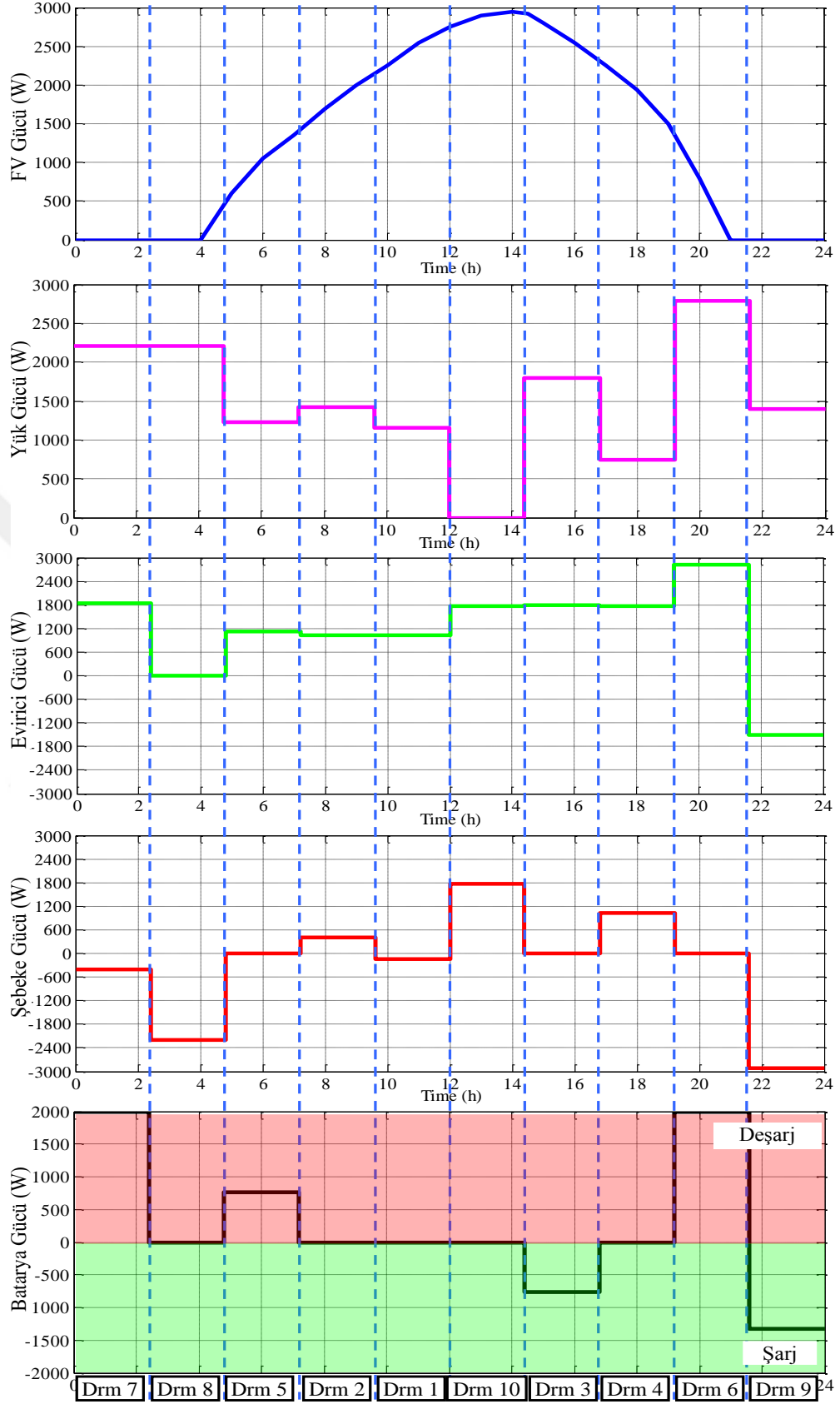




Şekil 5.8. HEDS deneysel güç akış diyagramları

Şekil 5.9’da bir gün boyunca sırasıyla FV, yük, evirici, şebeke ve batarya grubunun güç grafik dağılımı verilmektedir. Yük grubunun güç değeri değişken seçilerek gün içinde önerilen 10 adet çalışma durumunun oluşturulması sağlanmıştır. Çalışma durumlarının hangi zaman aralığında olduğu ayrıntılı olarak gözükmemektedir. FV panelleri için maksimum 3kW olacak şekilde bir güç zaman grafiği hazırlanmıştır. Sistemin bütün olası çalışma durumlarını sergilemesi ve AEYA’nın bu durumlardaki davranış ve tepkisini incelemek için özellikle Şekil 5.9’daki gibi bir yük profili seçilmiştir.

Bu güç grafik dağılımında FV panel ve yük grup gücünün dinamik davranışlarına bağlı olarak HEDS AEYA'nın evirici, şebeke ve batarya grubunun güç grafikleri görülmektedir. Durum 7'de FV panel gücü sıfır değerindedir. Yük grubunun gücü 2210W'tır ve bu durumda batarya grubu deşarj olarak evirici yük grubunu beslemektedir. Batarya grubu 2000W gücünde deşarj olmaktadır. Yük grubunun beslenmesi için kalan 400W'lık enerji şebeke tarafından sağlanmaktadır. Durum 8'de de FV güç sıfırdır ve batarya grubunun SOC değeri düşük olduğundan batarya grubu da devre dışıdır. Yük grubunun 2210W'lık güç talebi tamamen şebeke tarafından sağlanmaktadır. Durum 5'te ise FV güç değeri giderek artmakta ve 504W değerinde güç elde edilmektedir. Yük grubunun 1120W olduğu bu durumda batarya grubu 765W gücünde deşarj olarak şebekeden enerji talep edilmeden yük grubu beslenmektedir. Durum 2'de ise FV panel güç değeri giderek artmakta ve 1192W olmaktadır. Yük grubu 1420W güç talep etmektedir. Şebekeden 410W güç değeri alınarak yük grubu şebeke ve evirici tarafından birlikte beslenmektedir. Batarya grubu bu durumda devre dışıdır. Bu çalışmada ayrıntılı olarak deney sonuçlarının verildiği Durum 3'te ise FV panellerden 2930W güç üretilmektedir. Yük grubu 620W enerji talep etmektedir. FV panel gücü yük grubunun talep ettiği güçten çok büyük olduğundan yük grubu beslenmekte, batarya grubu 770W ile şarj olmakta ve şebekeye de kalan 634W'lık güç aktarılmaktadır. Dinamik bir FV ve yük grup güç değişimleri oluşturularak sistemin her durumdaki çalışması ve davranışı ayrıntılı olarak incelenmiştir.

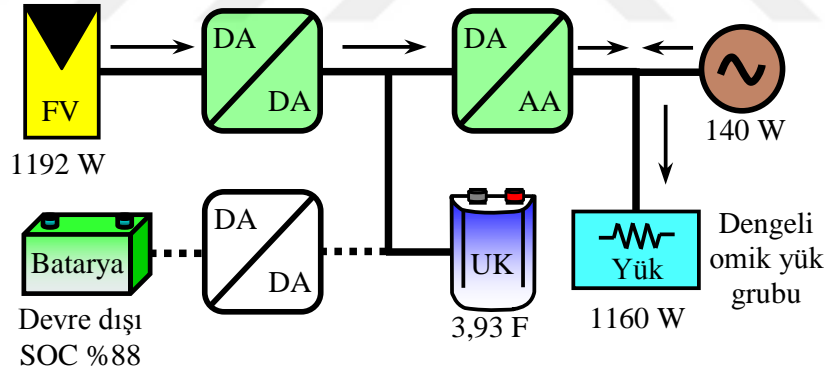


Şekil 5.9. Çalışma durumlarının bir günlük güç grafiği dağılımı

### 5.1. Durum 1-2 Dengeli Yük $P_{FV} \approx P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ SOC Düşük-Yüksek Durumu

Durum 1 ve Durum 2’de  $P_{FV} \approx P_{BAT}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu düşük-yüksek olduğu durum incelenmiştir ve bu durumların güç akış diyagramları Şekil 5.10’da verilmektedir. Bu durumda FV panel gücü sistemde bulunan yükün gücüne yaklaşık olarak eşittir. FV panelde üretilen gücün tamamı yüke aktarılacak şekilde şebekeden enerji akışı olmamaktadır. Batarya grubu ise pasif durumda kalmakta ne şarj ne de deşarj olmaktadır. Batarya doluluk oranı düşük olduğundan batarya grubundan yüke enerji akışı olmamaktadır.

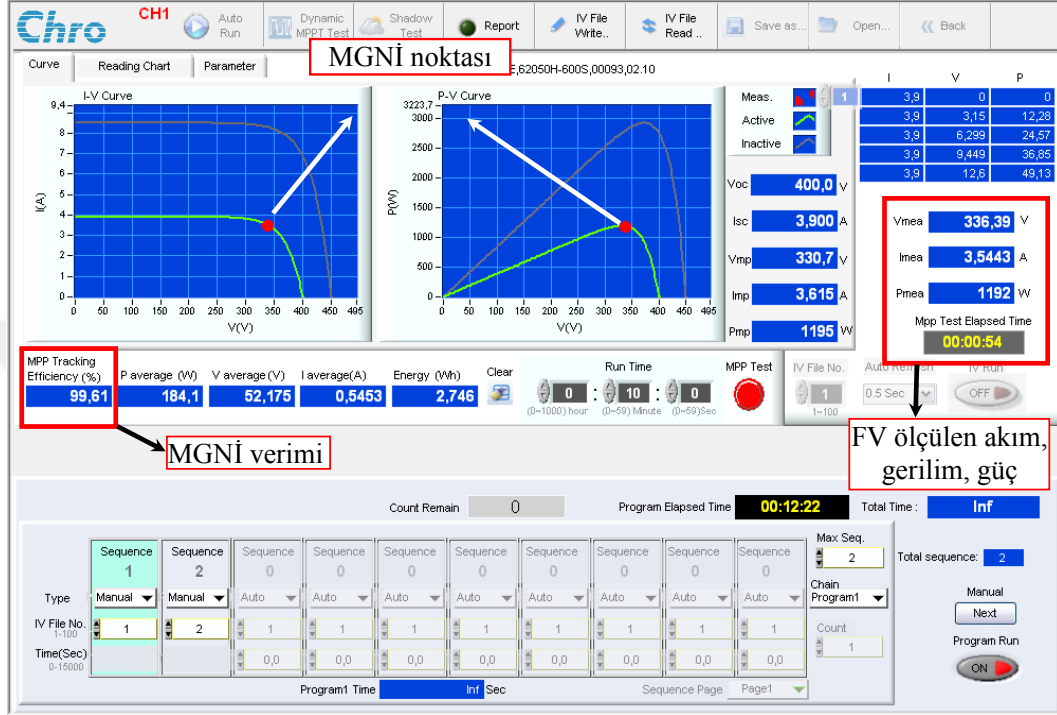
Durum 2’de  $P_{FV} \approx P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu yüksek olduğu durum bir önceki Durum 1’in sadece bataryanın tam dolu olması halidir. Burada FV panel gücü yük gücüne yaklaşık olarak eşit olduğundan yükü yalnızca FV paneller besleyerek şebekeden bir güç aktarımı yoktur. Durum 1 ve Durum 2’deki şartlar ele alınarak dengeli yük durum deney çalışmaları yapılmıştır. Deneysel çalışma sonuçları Şekil 5.11-5.20’de verilmektedir. İki durum arasındaki fark batarya doluluk oranlarının düşük ve yüksek olmasıdır. Her iki çalışma durumunda da batarya devre dışıdır.



Şekil 5.10. Durum 1-2 dengeli yük için deneysel güç akış diyagramı

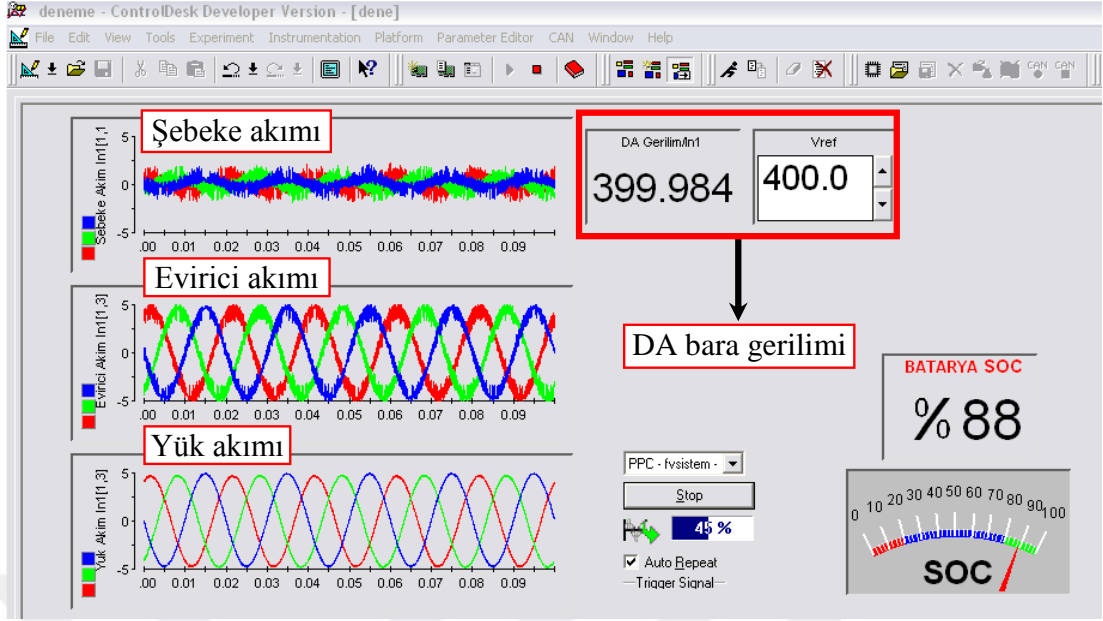
Şekil 5.11’de Durum 1 ve Durum 2 dengeli yük için Chroma FV panel simülör ekranı verilmektedir. Bu arayüz ile istenilen güçteki FV panel dizisi elde edilerek gerçek zamanlı olarak çalışma gerilimi, akımı, MGNİ noktasını ve bu MGNİ noktasının takip verimi alınmaktadır. FV simülör ekranına girilen FV panel verilerine göre 1192W’lık bir FV kaynak elde edilmiştir. Chroma FV simülör arayüzü sayesinde I/V ve P/W eğrileri çizdirilmekte ve sistemin çalışma noktası kırmızı bir nokta ile gerçek zamanlı olarak izlenmektedir. Saptır-gözle algoritmasının

kararlı ve hızlı çalıştığı, MNGİ verimi bu bölümden görülmektedir ve saptır-gözle algoritması %99,61 gibi yüksek bir oranla çalışmaktadır. Program ile ayrıca anlık bulutlanma geçiş test çalışması yapılarak saptır-gözle algoritmasının hızı da gözlenmiştir.



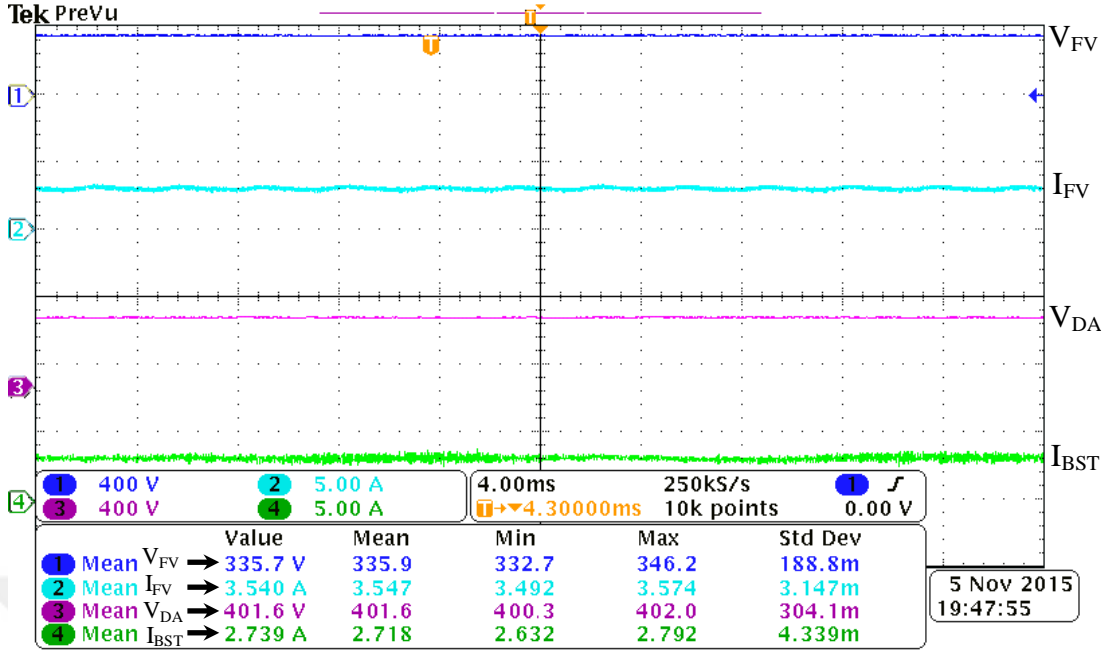
Şekil 5.11. Durum 1-2 dengeli yük için FV panel akım, gerilim ve güç değerleri

Şekil 5.12’de Durum 1 ve Durum 2 dengeli yük için dSpace ControlDesk program arayüzü verilmektedir. ControlDesk programı ile sistemde bulunan bütün gerilim, akım sensörlerinden alınan veriler gerçek zamanlı olarak izlenmektedir. Ayrıca program sayesinde sistemde bulunan parametrelere çalışırken müdahale edilebilmesi böylece sistemin başlangıç anında kararlı çalışması sağlanmaktadır. DA/DA yükseltici ve DA/AA eviricinin PI katsayılarını ayarlayarak şebekeye bağlanırken DA/AA eviricinin kısa devre olmasının önüne geçilmektedir. ControlDesk program arayüzü ile batarya grubu için oluşturulan batarya doluluk algoritmasının hesapladığı SOC değeri anlık olarak izlenebilmektedir. Batarya grubunun doluluk durumu deney çalışması sırasında % 88 olarak hesaplanmaktadır.



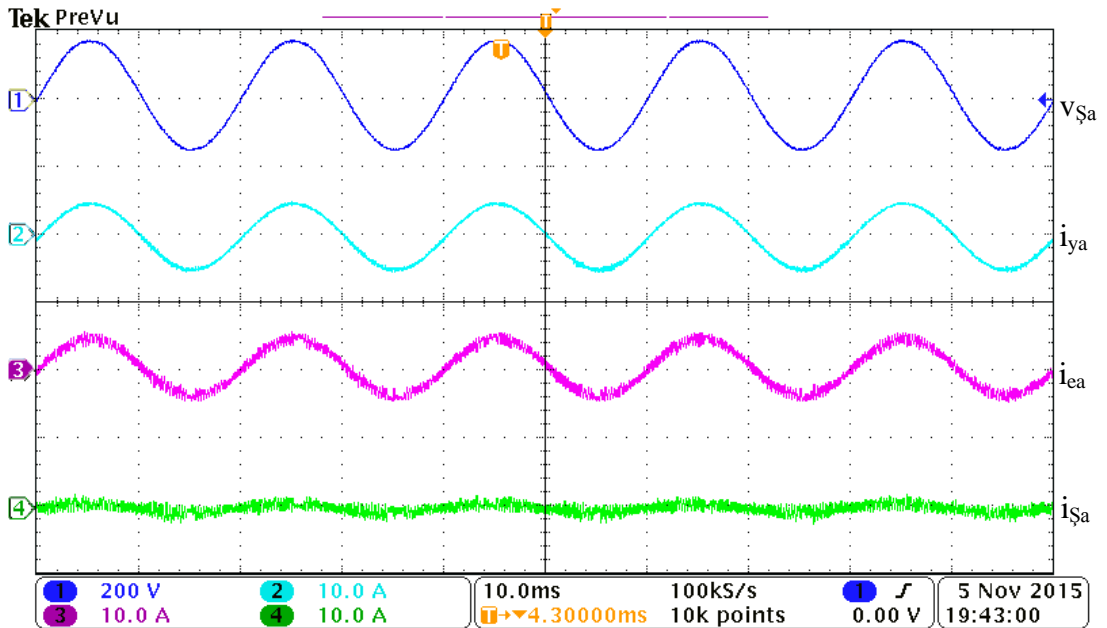
Şekil 5.12. Durum 1-2 dengeli yük için ControlDesk şebeke, evirici, yük akım ekranı

Şekil 5.13'te Durum 1 ve Durum 2 dengeli yük için FV panel gerilim, akım ve DA/DA yükseltici gerilim, akım osiloskop ekranı görülmektedir. FV panel sabit ışınım şiddetinde olduğu kabul edilerek test sonuçları alınmıştır. Buna göre FV panel dizisinin maksimum güç noktasındaki akım ve gerilim değerlerinde MGN takibi yaparak FV panel çalıştırılmaktadır. FV panel çıkışındaki DA/DA yükseltici devresi MGNİ işlemi yerine getirerek eviriciye enerji aktarımı yapmaktadır. DA/DA yükseltici çıkışındaki gerilim ve akım değerleri Şekil 2.7'de verilmektedir. DA/DA yükseltici verimi bu sonuçlardan %92 olarak hesaplanmaktadır.



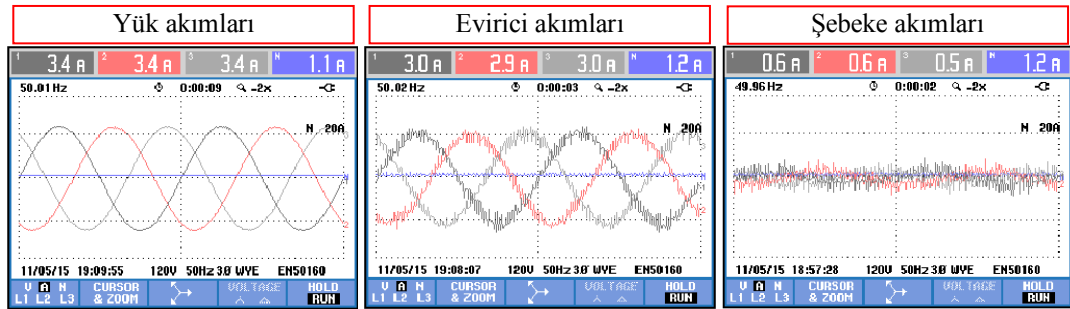
Şekil 5.13. Durum 1-2 dengeli yük için DA/DA yükseltici giriş/çıkış akım gerilimleri

Şekil 5.14'te Durum 1 ve Durum 2 dengeli yük için şebeke, evirici ve yük a fazının akım, gerilim sonuçları verilmektedir. Eviricinin ürettiği akım ve gerilim şebeke ile senkron ve frekansı 50Hz'dir. Durum 1 ve Durum 2'de batarya pasif durumda olduğundan eviricinin ürettiği güç yükün gücüne yaklaşık olarak eşittir ve şebekeden çok az miktarda enerji akışı vardır.



Şekil 5.14. Durum 1-2 dengeli yük için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı

Şekil 5.15'te Durum 1 ve Durum 2 dengeli yük için sırasıyla yük, evirici ve şebekenin her bir fazın akım sonuçları verilmektedir. Bu sonuçlardan da görüldüğü üzere FV panel gücü yük gücüne yaklaşık olarak eşit olduğundan şebekeden çekilen akım her faz başına 0,6A'dır. Yük faz başına 3,4A çekmekte ve evirici faz başına yaklaşık 3A üretmektedir. Şekil 5.16'da Durum 1 ve Durum 2 dengeli yük için şebeke, evirici ve yükün ayrıntılı olarak akım, gerilim ve frekans değerleri verilmektedir. Şekil 5.17'de Durum 1 ve Durum 2 dengeli yük için şebeke, evirici ve yükün güç, enerji,  $\cos\theta$  ve güç faktör verileri tablo olarak verilmektedir. Evirici aktif güç ürettiğinden  $\cos\theta$  değeri 1'dir. Şekil 5.18'de Durum 1 ve Durum 2 dengeli yük için şebeke, evirici ve yük akımlarının harmonik bar grafiği verilmektedir. Evirici tarafından üretilen güç değeri az olduğundan bu durum için akım harmoniği %5 olarak ölçülmektedir. IEEE 519 akım harmonik standardına göre, şebekeye verilen akımların toplam akım harmonik içerikleri %5'e eşit ve küçük olması gerekir. Ölçülen evirici akım harmonik değeri şebeke senkronizasyon standartlarında kabul edilen bir değerdedir. Şekil 5.19'da Durum 1 ve Durum 2 dengeli yük için şebeke, evirici ve yük akımlarının harmonik değerleri her bir faz için ayrıntılı olarak tablo halinde verilmektedir.

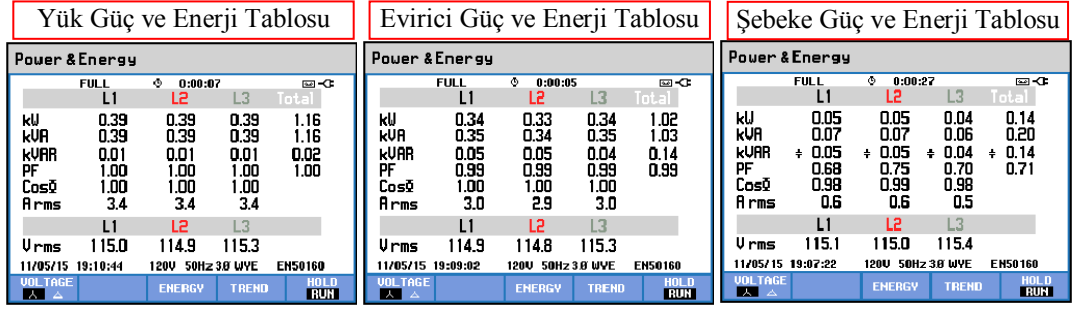


Şekil 5.15. Durum 1-2 dengeli yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları

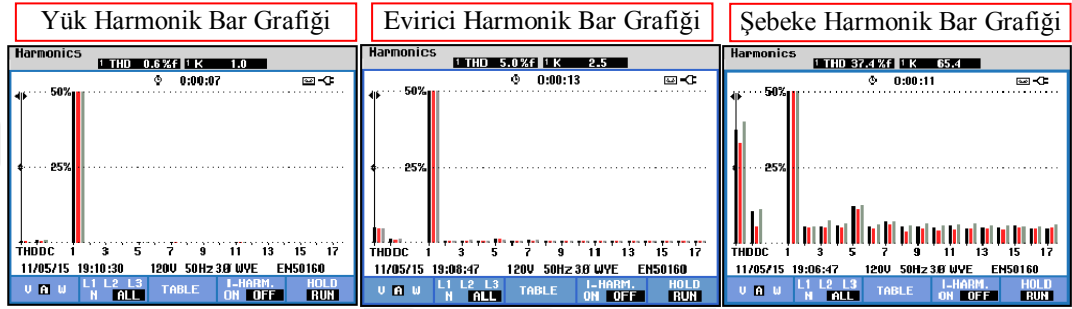
Yük V/A/Hz Tablosu					Evirici V/A/Hz Tablosu					Şebeke V/A/Hz Tablosu				
Volts/Amps/Hertz					Volts/Amps/Hertz					Volts/Amps/Hertz				
	L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N
U <sub>rms</sub>	115.0	114.8	115.3	19.9	U <sub>rms</sub>	115.1	114.9	115.4	19.5	U <sub>rms</sub>	115.1	115.0	115.4	19.4
U <sub>pk</sub>	163.9	163.7	164.0	75.6	U <sub>pk</sub>	163.9	163.9	164.4	61.8	U <sub>pk</sub>	163.9	163.7	164.2	65.3
CF	1.43	1.43	1.42	3.79	CF	1.42	1.43	1.42	3.18	CF	1.42	1.42	1.42	3.41
Hz	50.02				Hz	50.02				Hz	50.01			
	L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N
A <sub>rms</sub>	3.4	3.4	3.4	1.1	A <sub>rms</sub>	3.0	2.9	3.0	1.2	A <sub>rms</sub>	0.6	0.6	0.5	1.2
A <sub>pk</sub>	4.9	4.8	4.8	1.1	A <sub>pk</sub>	5.0	4.9	5.1	2.5	A <sub>pk</sub>	1.9	2.0	1.7	2.4
CF	1.44	1.44	1.44	1.06	CF	1.66	1.67	1.68	2.11	CF	3.16	3.39	3.27	2.01

Şekil 5.16. Durum 1-2 dengeli yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu

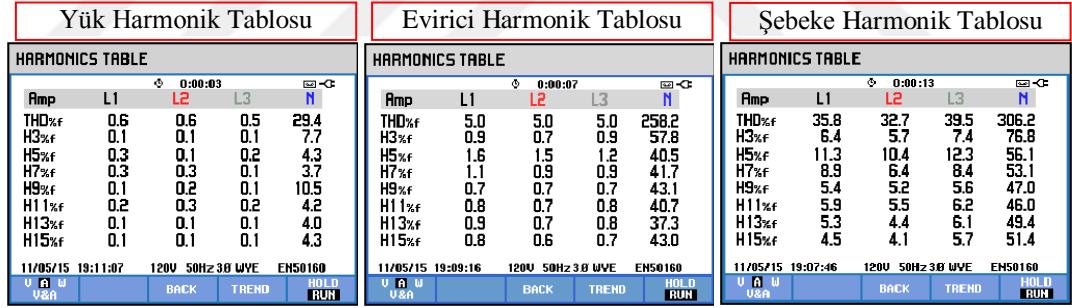




Şekil 5.17. Durum 1-2 dengeli yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji tablosu

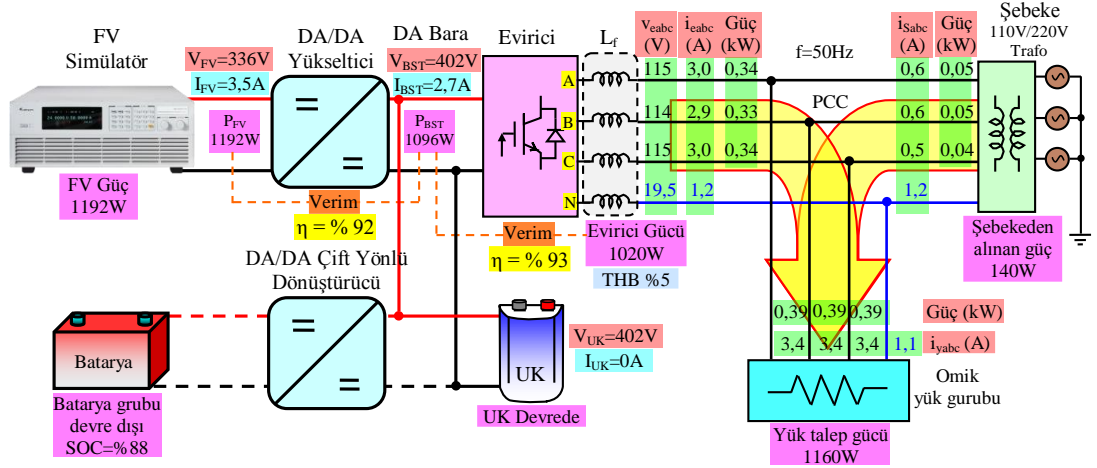


Şekil 5.18. Durum 1-2 dengeli yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği



Şekil 5.19. Durum 1-2 dengeli yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu

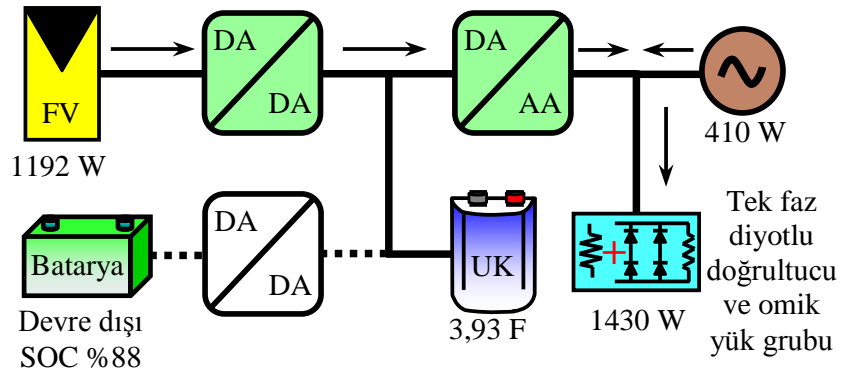
Şekil 5.20'de Durum 1 ve Durum 2 dengeli yük için sistemde ölçülen bütün akım, gerilim, Toplam Harmonik Bozunumu (THB), güç ve DA/DA yükseltici, DA/AA evirici verim değerleri görülmektedir. Burada sistemde bulunan DA/DA yükseltici güç devresinin verimi %92 olarak DA/AA evirici güç devresinin verimi %93 değerinde hesaplanmıştır.



Şekil 5.20. Durum 1-2 dengeli yük için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonucu özeti

## 5.2. Durum 1 ve Durum 2 Dengesiz Yük, P<sub>FV</sub>≈P<sub>YÜK</sub> Durumu

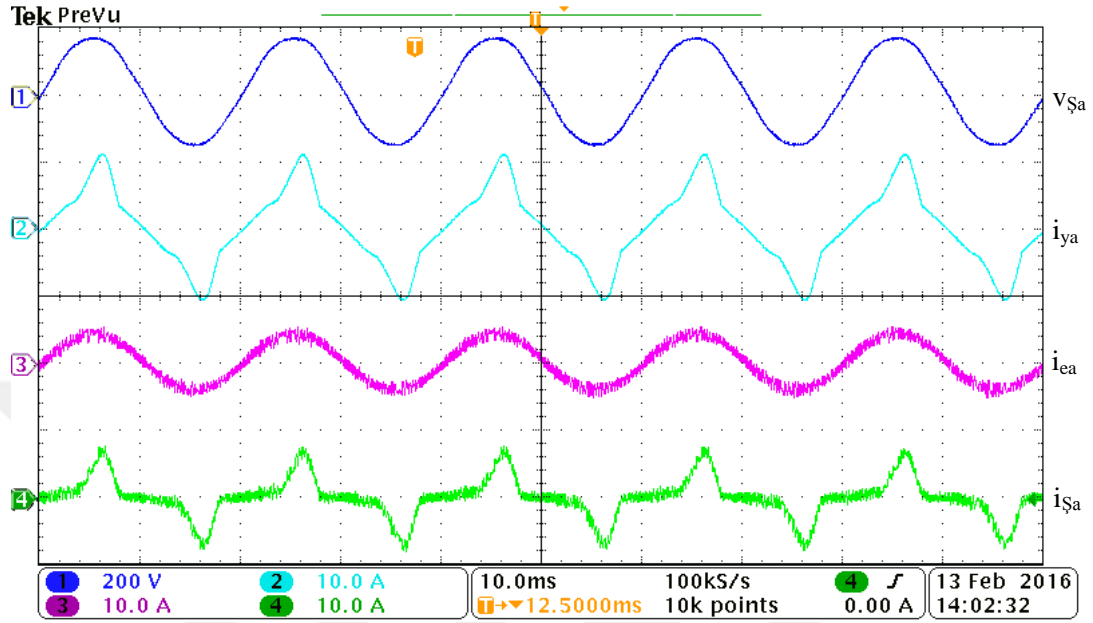
Bu deney çalışmasında Durum 1 ve Durum 2 dengeli yük durumlarından farklı olarak sisteme dengesiz yük bağlanarak çalıştırılmıştır ve deneysel güç akış diyagramı Şekil 2.21'de verilmektedir. Bu deneyin amacı kurulan HEDS'nin sadece dengeli yük durumlarını değil aynı zamanda dengesiz yük koşullarında da çalıştığını göstermektir. Bu deneyde de sisteme yük olarak 3 fazlı 1200W gücünde dengeli omik yük grubu ve a fazına ilave olarak 230W gücünde tek fazlı tam dalga doğrultucu RL yük bağlanmıştır. Sistemde bulunan 3 fazlı 4 kollu evirici yapısı ile dengesiz ve doğrusal olmayan yük grupları da evirici sayesinde çalıştırılabilmektedir. Durum 1 ve Durum 2 için aynı FV panel gücü kullanılmıştır.



Şekil 5.21. Durum 1 ve Durum 2 dengesiz yük için deneysel güç akış diyagramı

Şekil 5.22'de şebeke, evirici ve a fazının doğrusal olmayan yük akım, gerilim sonuçları verilmektedir. Durum 1 ve Durum 2 dengesiz yük deneyinde de batarya

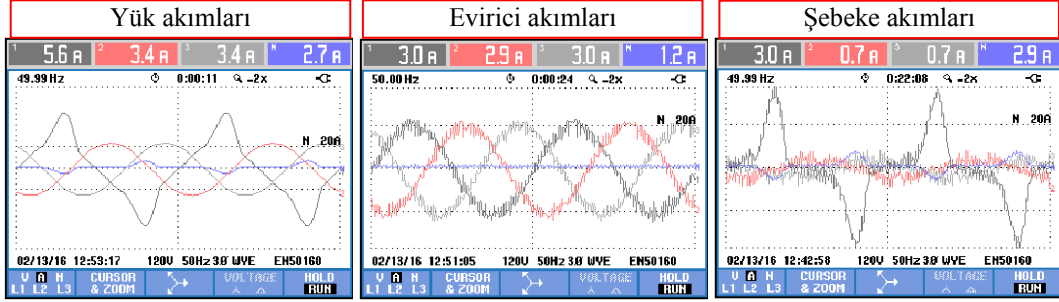
pasif durumda olduğundan eviricinin ürettiği güç yükün gücüne yaklaşık olarak eşittir ve sadece a fazındaki fazla enerji talebi batarya grubu devrede olmadığından şebekeden alınmaktadır.



Şekil 5.22. Durum 1-2 dengesiz yük için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı

Sistemde dengesiz ve doğrusal olmayan yük olduğundan nötr hattında da gerilim farkı oluşmaktadır. Şekil 5.23'te Durum 1 ve Durum 2 dengesiz yük için sırasıyla yük, evirici ve şebekenin her bir fazın akım sonuçları verilmektedir. Yük faz başına omik yük grubu için 3,4A çekmekte ve a fazına ilave edilen doğrusal olmayan yük grubu a fazından 5,6A civarında akım talep etmektedir. Evirici faz başına yaklaşık 3A üretmektedir. FV panel gücü yük gücüne yaklaşık olarak eşit olduğundan şebekeden çekilen akım her faz başına 0,6A'dır. Fakat sistemde bulunan a fazındaki dengesiz yük güç talebi şebeke tarafından karşılanmaktadır. Şekil 5.24'te Durum 1 ve Durum 2 dengesiz yük için şebeke, evirici ve yükün ayrıntılı olarak akım, gerilim ve frekans değerleri verilmektedir. Şekil 5.25'te Durum 1 ve Durum 2 dengesiz yük için şebeke, evirici ve yükün güç, enerji,  $\cos\theta$  ve güç faktör verileri tablo olarak verilmektedir. Evirici aktif güç ürettiğinden  $\cos\theta$  değeri 1'dir. Yük grubunda ise a fazında doğrusal olmayan RL yükten dolayı Güç Faktörü (Power Factor PF) 0,95 olarak ölçülmektedir. Şekil 5.26'da Durum 1 ve Durum 2 dengesiz yük için şebeke, evirici ve yük akımlarının harmonik bar grafiği verilmektedir. Evirici tarafından üretilen güç değeri az olduğundan bu durum için akım harmoniği %5 olarak

ölçülmektedir. Ölçülen evirici akım harmonik değeri şebeke senkronizasyon standartlarında kabul edilen bir değerdedir. Şekil 5.27’de Durum 1 ve Durum 2 dengesiz yük için şebeke, evirici ve yük akımlarının harmonik değerleri her bir faz için ayrıntılı olarak tablo halinde verilmektedir.



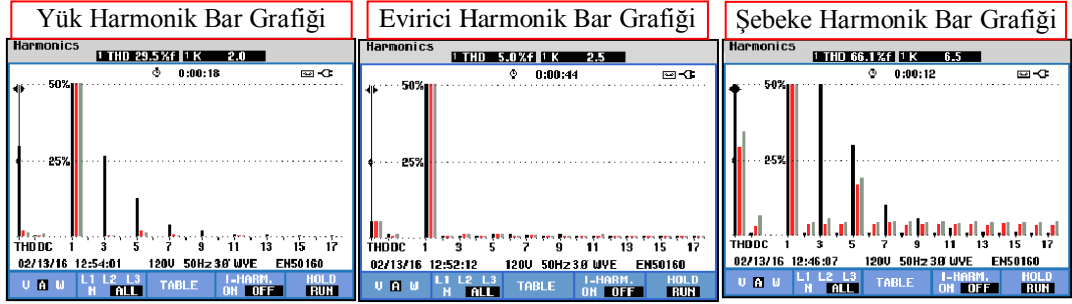
Şekil 5.23. Durum 1-2 dengesiz yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları

Yük V/A/Hz Tablosu					Evirici V/A/Hz Tablosu					Şebeke V/A/Hz Tablosu				
Volts/Amps/Hertz					Volts/Amps/Hertz					Volts/Amps/Hertz				
	L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N
Urms	116.1	116.3	116.5	17.8	Urms	116.3	116.5	116.8	17.1	Urms	116.5	116.7	116.9	17.6
Upk	162.5	163.7	163.8	57.2	Upk	163.0	164.4	164.8	61.0	Upk	163.3	165.0	165.1	55.4
CF	1.40	1.41	1.41	3.22	CF	1.40	1.41	1.41	3.57	CF	1.40	1.41	1.41	3.16
Hz	49.98				Hz	49.98				Hz	49.98			
	L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N
Arms	5.6	3.4	3.4	2.8	Arms	3.0	2.9	3.0	1.2	Arms	3.0	0.7	0.6	2.8
Apk	10.8	4.9	4.9	7.2	Apk	5.2	4.9	4.9	2.4	Apk	8.0	2.1	1.9	8.2
CF	1.93	1.42	1.42	2.62	CF	1.77	1.67	1.64	1.99	CF	2.62	2.85	2.93	2.88

Şekil 5.24. Durum 1-2 dengesiz yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu

Yük Güç ve Enerji Tablosu					Evirici Güç ve Enerji Tablosu					Şebeke Güç ve Enerji Tablosu					
Power & Energy					Power & Energy					Power & Energy					
	L1	L2	L3	Total		L1	L2	L3	Total		L1	L2	L3	Total	
kW	0.63	0.40	0.40	1.43	kW	0.34	0.34	0.34	1.02	kW	0.29	0.07	0.06	0.41	
kVA	0.65	0.40	0.40	1.50	kVA	0.34	0.34	0.35	1.03	kVA	0.35	0.08	0.07	0.64	
kVAR	0.19	0.01	0.01	0.46	kVAR	0.05	0.05	0.05	0.15	kVAR	0.20	0.05	0.05	0.49	
PF	0.95	1.00	1.00	0.95	PF	0.99	0.99	0.99	0.99	PF	0.82	0.82	0.78	0.64	
cos $\phi$	1.00	1.00	1.00		cos $\phi$	1.00	1.00	1.00		cos $\phi$	0.99	0.99	0.99		
Arms	5.6	3.4	3.4		Arms	3.0	2.9	3.0		Arms	3.0	0.7	0.6		
	L1	L2	L3		L1	L2	L3		L1	L2	L3		L1	L2	L3
Urms	116.3	116.5	116.8		Urms	116.6	116.8	117.0		Urms	116.4	116.6	116.8		

Şekil 5.25. Durum 1-2 dengesiz yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji tablosu

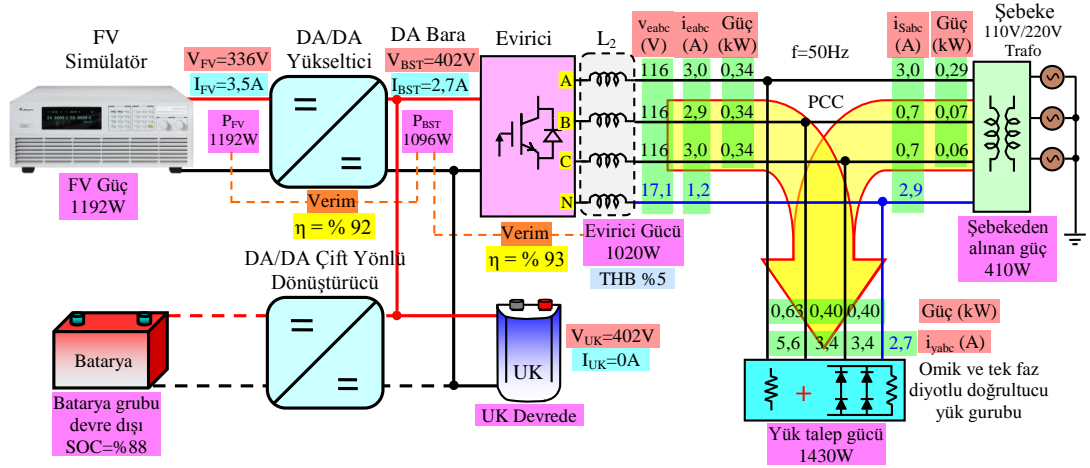


Şekil 5.26. Durum 1-2 dengesiz yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği

Yük Harmonik Tablosu					Evirici Harmonik Tablosu					Şebeke Harmonik Tablosu					
HARMONICS TABLE					HARMONICS TABLE					HARMONICS TABLE					
Amp	L1	L2	L3	N	Amp	L1	L2	L3	N	Amp	L1	L2	L3	N	
THD%f	30.6	1.4	1.3	84.4	4.9	5.0	5.0	286.8	67.5	29.8	35.1	83.4	67.5	29.8	35.1
H3%f	26.7	0.3	0.3	73.8	0.9	1.0	1.1	75.6	58.2	4.1	5.6	72.5	58.2	4.1	5.6
H5%f	13.8	1.2	1.1	38.1	1.6	1.6	1.4	50.0	31.4	16.9	17.0	37.7	31.4	16.9	17.0
H7%f	4.5	0.5	0.3	13.2	0.9	0.8	0.8	43.3	10.8	4.2	5.0	13.5	10.8	4.2	5.0
H9%f	2.4	0.1	0.1	6.6	0.8	0.8	0.7	43.3	5.7	3.9	4.6	7.5	5.7	3.9	4.6
H11%f	1.0	0.3	0.3	2.8	0.9	0.8	0.8	37.6	2.5	4.1	5.0	3.0	2.5	4.1	5.0
H13%f	0.5	0.1	0.1	1.2	0.8	0.7	0.8	40.0	1.3	3.6	5.0	1.4	1.3	3.6	5.0
H15%f	0.4	0.1	0.1	1.3	0.8	0.7	0.8	44.4	1.4	3.8	4.8	1.5	1.4	3.8	4.8

Şekil 5.27. Durum 1-2 dengesiz yük için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu

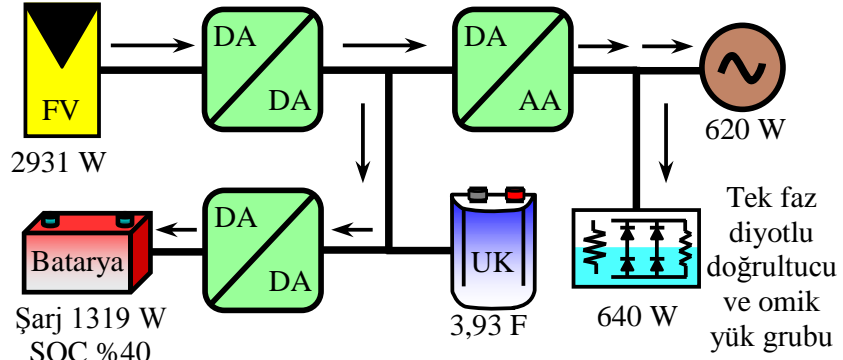
Şekil 5.28'de Durum 1 ve Durum 2 dengesiz yük durumu için sistemde ölçülen bütün akım, gerilim, THB, güç ve DA/DA yükseltici, DA/AA evirici verim değerleri görülmektedir. Evirici toplamda 1020W enerji üretmekte, yük grubu 1430W yük talep etmekte ve kalan 410W güç şebekeden karşılanmaktadır. Sistemde bulunan DA/DA yükseltici güç devresinin verimi %92 olarak DA/AA evirici güç devresinin verimi %93 değerinde hesaplanmıştır. Ultrakapasitör bütün çalışma durumları için DA baraya sürekli bağlı durumdadır. Ani yük değişimlerinde devreye girerek batarya grubuna destek olacak şekilde çalışmaktadır.



Şekil 5.28. Durum 1-2 dengesiz yük için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonucu özeti

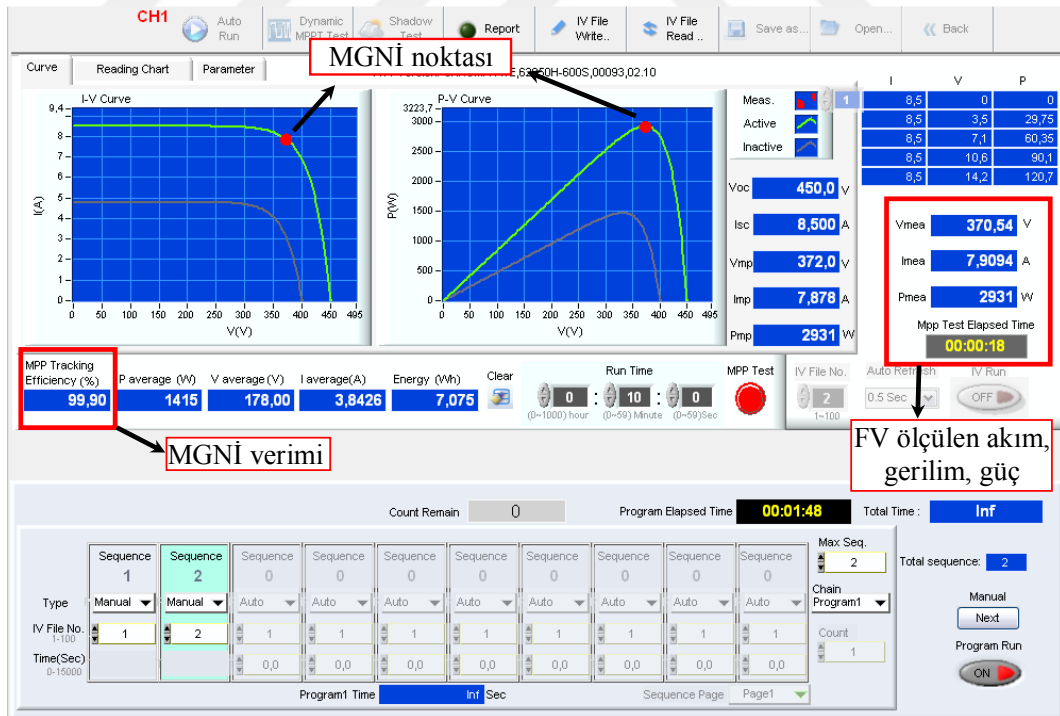
### 5.3. Durum 3 640W $P_{FV} > P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ SOC Düşük Durumu

Durum 3'te  $P_{FV} > P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu düşük olduğu durum incelenmektedir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 5.29'da verilmektedir. Bu durumda FV panel gücü sistemde bulunan yükün gücünden fazladır. FV panellerde üretilen güç, yük grubunu beslemekte, batarya grubunu şarj etmekte ve kalan enerji şebekeye aktarılmaktadır. Batarya grubunun doluluk durumu %40 civarlarındadır. Batarya grubunun şarj olması gerekmektedir. Akıllı enerji yönetim algoritması FV panellerden elde edilen güç ile yük grubunun beslenmesini sağlayarak kalan gücü hesaplamaktadır. Hesaplanan kalan güç ile batarya grubunun maksimum şarj akımını geçmemek şartıyla batarya grubunu dolana kadar şarj etmektedir. Durum 3, akıllı enerji yönetim algoritmasının batarya grubunu şarj edeceği akımı belirlediği örnek bir çalışma durumudur. Bu yüzden bu çalışma durumu iki farklı yük güç değeri ile deneysel sonuçlar alınmıştır. İlk olarak sistem 640W'lık yük grubu ile daha sonra yük grubunun gücü artırılarak 1830W'lık bir güçte deney sonuçları alınmıştır.



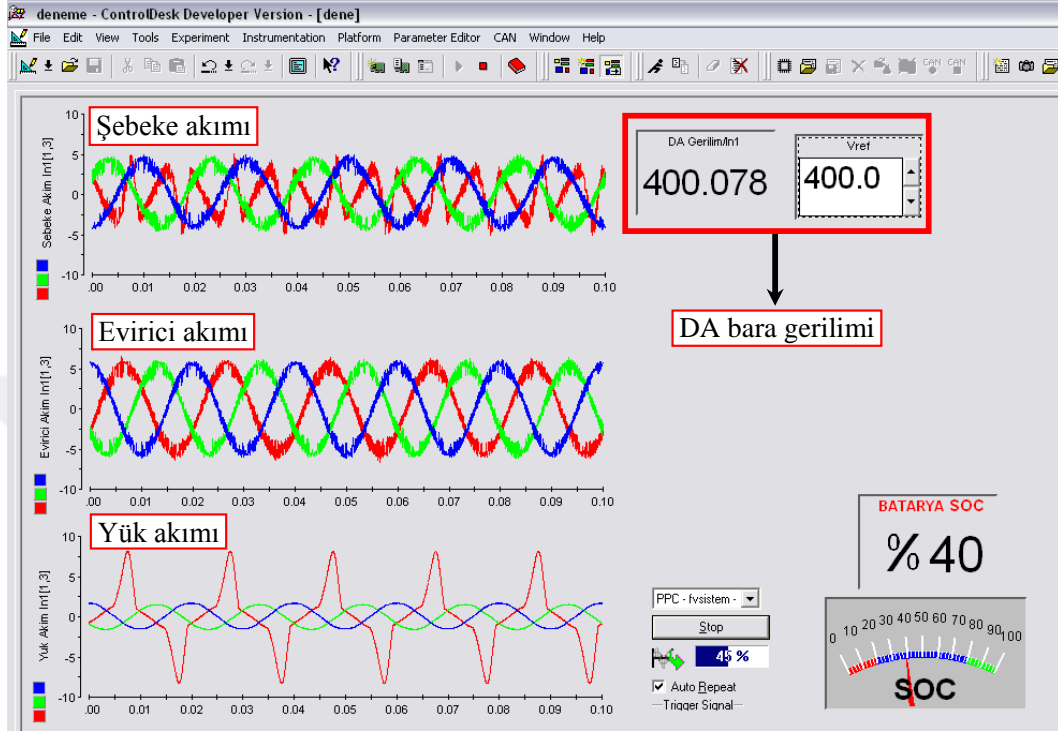
Şekil 5.29. Durum 3 640W yük için deneysel güç akış diyagramı

Şekil 5.30'da Durum 3 640W yük grubu için Chroma FV panel simülör ekranı verilmektedir. FV simülör ekranına girilen FV panel verilerine göre 2931W'lık bir FV kaynak elde edilmiştir. Saptır-gözle algoritmasının kararlı ve hızlı çalıştığı, MNGİ verimi bu bölümden görülmektedir. 2931W'lık toplam FV gücünü saptır-gözle algoritması %99,90 gibi yüksek bir oranla takip etmektedir. FV panellerin MGN anındaki çalıştığı maksimum güç gerilimi  $V_{MG}$  370V, maksimum güç akımı  $I_{MG}$  7,9A olarak ölçülmektedir.



Şekil 5.30. Durum 3 640W yük grubu için FV panel akım, gerilim güç değerleri

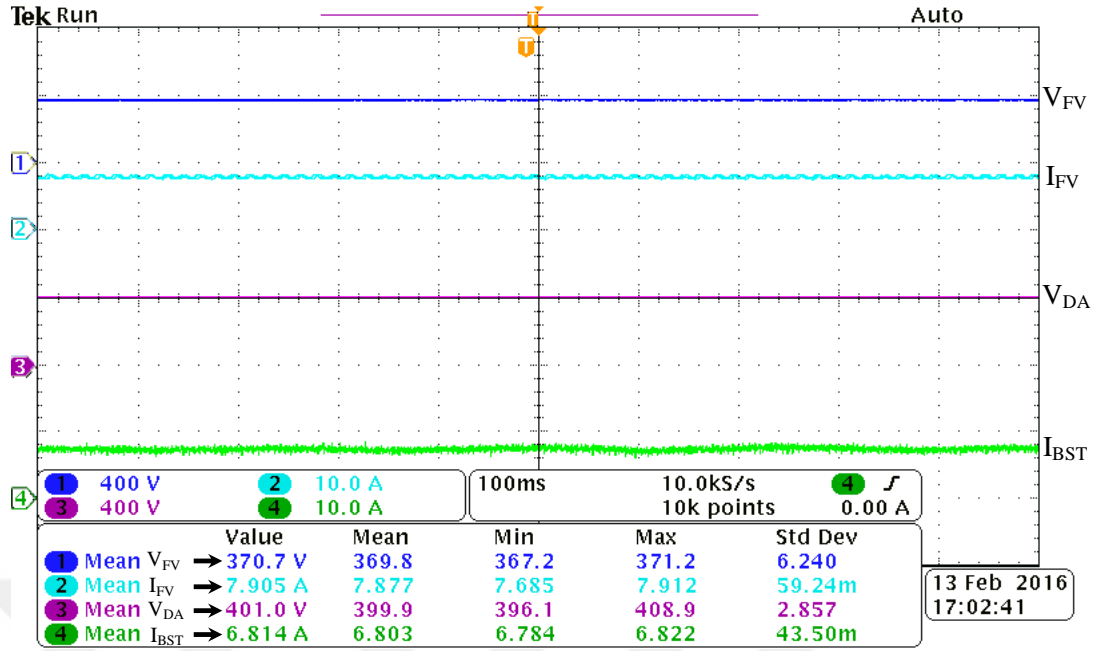
Şekil 5.31’de Durum 3 640W yük grubu için dSpace ControlDesk program arayüzü verilmektedir. ControlDesk programı; evirici, şebeke, yük akımları, DA bara gerilimi ve batarya SOC oranını gerçek zamanlı olarak izlememizi sağlamaktadır.



Şekil 5.31. Durum 3 640W yük grubu için ControlDesk şebeke, evirici, yük akım ekranı

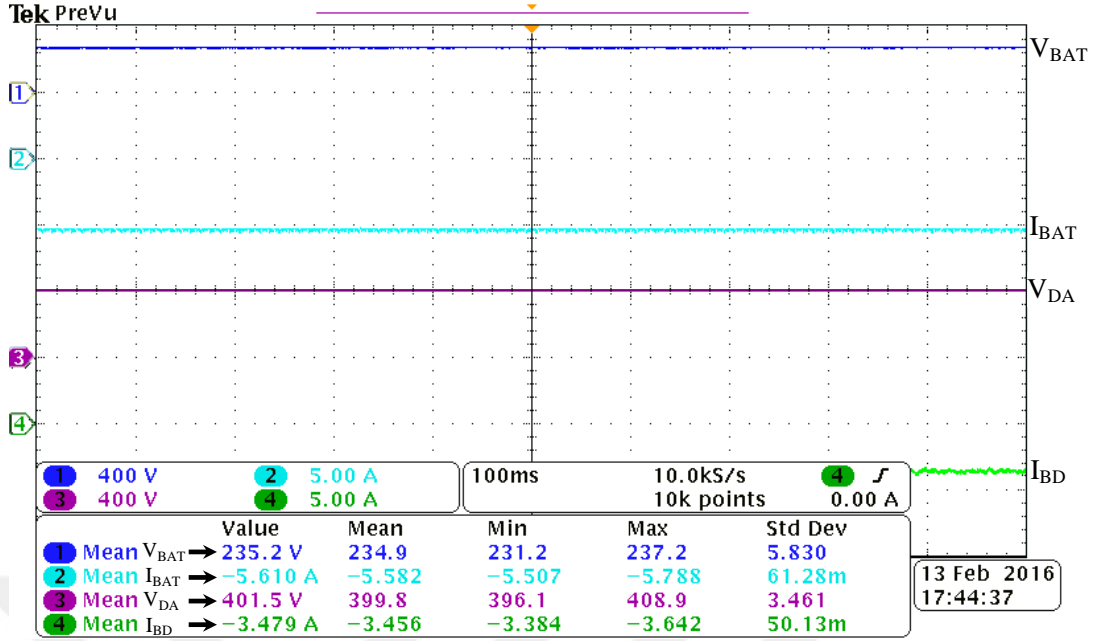
Şekil 5.32’de Durum 3 640W yük grubu için FV panel gerilim, akım ve DA/DA yükseltici gerilim, akım osiloskop ekranı görülmektedir. DA/DA yükseltici giriş ve çıkışındaki akım/gerilim değerleri ölçülerek DA/DA yükseltici verimi %95 olarak hesaplanmaktadır. DA/DA yükseltici çıkışı FV panelleri MGN’da olacak şekilde çalıştırmaktadır. Bu durumda DA/DA yükseltici çıkış akımı  $I_{BST}$  akımı 6,81A olmaktadır.





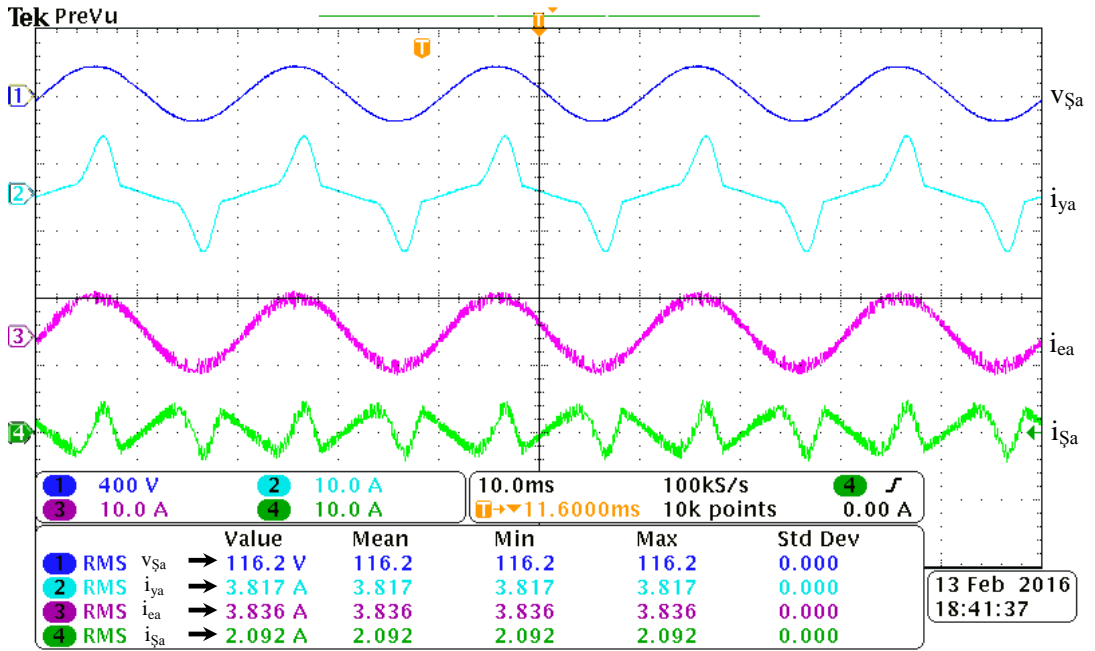
Şekil 5.32. Durum 3 640W yük grubu için DA/DA yükseltici giriş/çıkış akım ve gerilimleri

Şekil 5.33'te Durum 3 640W yük grubu için batarya akım, gerilimi, DA/DA çift yönlü dönüştürücü akım, gerilim osiloskop ekranı görülmektedir. Durum 3 640W yük grubunda DA/DA çift yönlü dönüştürücü düşürücü modunda çalışarak 400V olan DA bara gerilimi batarya grubunun şarj gerilime ayarlayacak şekilde 235V'a indirmektedir. Bu gerilim değeri bir kurşun-asit bataryanın maksimum şarj gerilimi olan 14,7V'un sistemde bulunan 16 adet seri batarya için hesaplanan gerilim seviyesidir. Batarya grubu yaklaşık olarak 1320W gücünde şarj edilmektedir. Akıllı enerji yönetim algoritması tarafından belirlenen akım miktarı oranında, batarya grubu şarj olmaktadır. Durum 3 640W yük grubu deneyinde FV panellerin gücü yüksek olduğundan evirici yük grubunu besledikten sonra batarya grubunu da şarj etmektedir. Fakat batarya grubu için maksimum şarj akımı sistemde 6A olarak sınırlandırılmıştır. Kurşun-asit bataryaların dinamik davranışından dolayı çok yüksek akımlarda şarj edilmesine imkân verilememektedir. Bu yüzden bu durum içinde batarya grubu 5,6A değerinde şarj olmaktadır. DA/DA çift yönlü dönüştürücü verimi çıkış ve girişindeki güçler oranlandığında %94 olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 5.33. Durum 3 640W yük grubu için DA/DA çift yönlü dönüştürücü giriş/çıkış akım ve gerilimleri

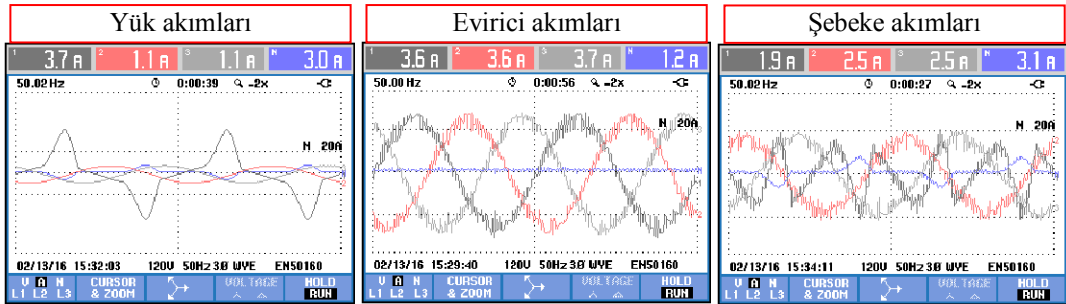
Şekil 5.34'te Durum 3 640W yük grubu için şebeke, evirici ve yük a fazının akım, gerilim sonuçları verilmektedir. Durum 3 640W yük deneyinde yük grubu olarak her bir fazda 130W gücünde omik yük ve a fazına ilave olarak 250W gücünde tek fazlı tam dalga diyotlu doğrultucu RL yükü bağlıdır.



Şekil 5.34. Durum 3 640W yük grubu için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı

Doğrusal olmayan yükün gücü evirici tarafından karşılanmaktadır. Yük akımının çektiği doğrusal olmayan akım şekli evirici tarafından tamamlandığı Şekil 5.34'te ayrıntılı olarak verilmektedir.

Şekil 5.35'te Durum 3 640W yük grubu için sırasıyla yük, evirici ve şebekenin her bir fazın akım sonuçları verilmektedir. Bu sonuçlardan da görüldüğü üzere FV panellerin gücü yükü beslemekte kalan enerji de şebekeye aktarılmaktadır. Evirici kol başına 3,6A üretmektedir. Şebekeye verilen akımların evirici akımların tam tersi olduğu gözlenmektedir. Bu da enerjinin sistemden yani eviriciden şebekeye doğru aktığını göstermektedir. Şekil 5.36'da Durum 3 640W yük grubu için şebeke, evirici ve yükün ayrıntılı olarak akım, gerilim ve frekans değerleri verilmektedir. Şekil 5.37'de Durum 3 640W yük grubu için şebeke, evirici ve yükün güç, enerji,  $\cos\theta$  ve güç faktör verileri tablo olarak verilmektedir. Evirici aktif güç ürettiğinden  $\cos\theta$  değeri 1'dir. Şekil 5.38'de Durum 3 640W yük grubu için şebeke, evirici ve yük akımlarının harmonik bar grafiği verilmektedir. Evirici tarafından üretilen akım harmoniği %5 olarak ölçülmektedir. Ölçülen evirici akım harmonik değeri şebeke senkronizasyon standartlarında kabul edilen bir değerdedir. Şekil 5.39'da Durum 3 640W yük grubu için şebeke, evirici ve yük akımlarının harmonik değerleri her bir faz için ayrıntılı olarak tablo halinde verilmektedir.



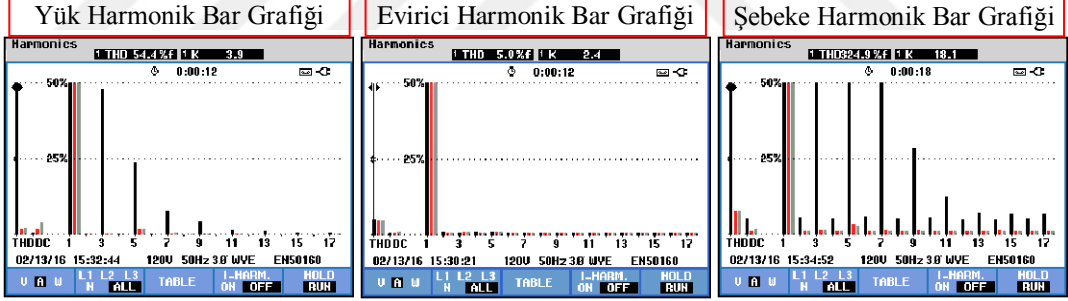
Şekil 5.35. Durum 3 640W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları

Yük V/A/Hz Tablosu					Evirici V/A/Hz Tablosu					Şebeke V/A/Hz Tablosu				
Volts/Amps/Hertz					Volts/Amps/Hertz					Volts/Amps/Hertz				
	L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N
U <sub>rms</sub>	117.4	117.6	117.9	18.8	U <sub>rms</sub>	117.7	117.8	118.0	18.9	U <sub>rms</sub>	117.3	117.6	117.9	19.2
U <sub>pk</sub>	164.0	165.4	166.1	62.7	U <sub>pk</sub>	165.0	167.0	166.3	64.3	U <sub>pk</sub>	164.4	166.1	166.2	63.5
CF	1.40	1.41	1.41	3.33	CF	1.40	1.42	1.41	3.40	CF	1.40	1.41	1.41	3.31
Hz	50.01				Hz	49.97				Hz	50.01			
A <sub>rms</sub>	3.7	1.1	1.1	3.0	A <sub>rms</sub>	3.6	3.6	3.7	1.2	A <sub>rms</sub>	1.9	2.5	2.5	3.1
A <sub>pk</sub>	8.3	1.6	1.6	7.9	A <sub>pk</sub>	6.3	6.0	5.9	2.5	A <sub>pk</sub>	4.7	4.3	4.4	9.1
CF	2.23	1.45	1.46	2.61	CF	1.73	1.67	1.62	2.06	CF	2.42	1.75	1.72	2.97

Şekil 5.36. Durum 3 640W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu

Yük Güç ve Enerji Tablosu					Evirici Güç ve Enerji Tablosu					Şebeke Güç ve Enerji Tablosu				
Power & Energy					Power & Energy					Power & Energy				
	L1	L2	L3	Total		L1	L2	L3	Total		L1	L2	L3	Total
kW	0.38	0.13	0.13	0.64	kW	0.42	0.42	0.43	1.27	kW	-0.04	-0.29	-0.29	-0.62
kVA	0.44	0.13	0.13	0.83	kVA	0.43	0.42	0.43	1.28	kVA	0.23	0.29	0.30	0.82
kVAr	0.22	0.00	0.01	0.52	kVAr	0.06	0.05	0.05	0.17	kVAr	0.22	0.05	0.05	0.54
PF	0.87	1.00	1.00	0.78	PF	0.99	0.99	0.99	0.99	PF	-0.19	-0.98	-0.98	-0.76
cosφ	0.99	1.00	1.00		cosφ	1.00	1.00	1.00		cosφ	-0.67	-1.00	-1.00	
A <sub>rms</sub>	3.7	1.1	1.1		A <sub>rms</sub>	3.6	3.6	3.7		A <sub>rms</sub>	1.9	2.5	2.5	
U <sub>rms</sub>	117.7	117.8	118.2		U <sub>rms</sub>	117.5	117.7	118.0		U <sub>rms</sub>	117.3	117.6	117.9	

Şekil 5.37. Durum 3 640W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji

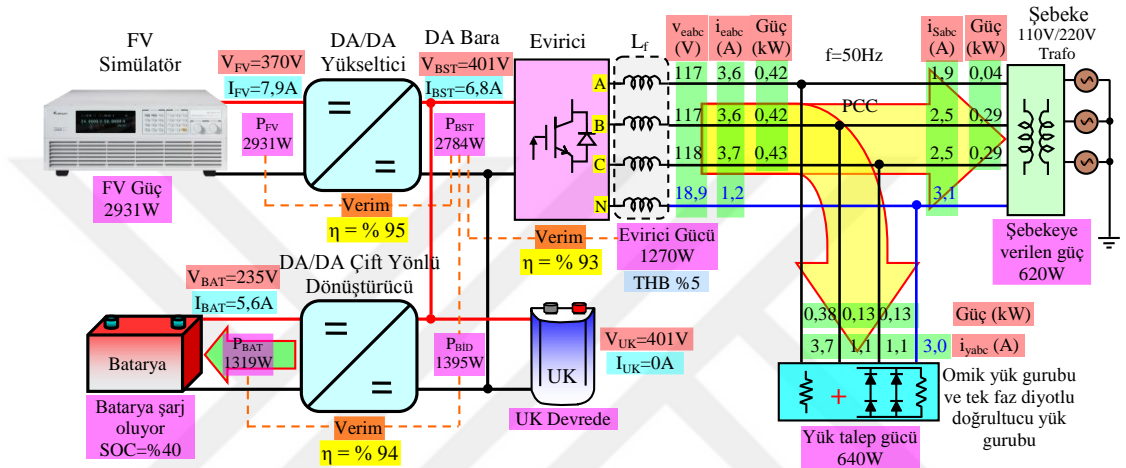


Şekil 5.38. Durum 3 640W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği

Yük Harmonik Tablosu					Evirici Harmonik Tablosu					Şebeke Harmonik Tablosu				
HARMONICS TABLE					HARMONICS TABLE					HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N	Amp	L1	L2	L3	N	Amp	L1	L2	L3	N
THD <sub>%f</sub>	54.6	1.9	2.1	82.5	THD <sub>%f</sub>	5.0	5.0	4.9	232.6	THD <sub>%f</sub>	320.1	7.8	7.6	80.7
H3 <sub>%f</sub>	48.2	0.4	0.5	72.7	H3 <sub>%f</sub>	0.8	0.9	0.9	69.6	H3 <sub>%f</sub>	278.9	1.3	1.6	70.8
H5 <sub>%f</sub>	24.0	1.6	1.8	36.3	H5 <sub>%f</sub>	1.3	1.6	1.5	37.0	H5 <sub>%f</sub>	142.1	3.6	3.1	35.2
H7 <sub>%f</sub>	7.9	0.5	0.7	12.3	H7 <sub>%f</sub>	1.0	0.9	1.0	42.3	H7 <sub>%f</sub>	50.6	1.2	1.2	12.4
H9 <sub>%f</sub>	4.2	0.2	0.2	6.4	H9 <sub>%f</sub>	0.8	0.6	0.7	38.2	H9 <sub>%f</sub>	27.6	1.3	1.0	7.3
H11 <sub>%f</sub>	1.4	0.3	0.2	2.2	H11 <sub>%f</sub>	0.8	0.8	0.8	38.1	H11 <sub>%f</sub>	12.6	1.2	1.2	2.7
H13 <sub>%f</sub>	0.9	0.1	0.1	1.3	H13 <sub>%f</sub>	0.8	0.8	0.7	39.9	H13 <sub>%f</sub>	6.9	1.3	1.2	1.7
H15 <sub>%f</sub>	0.7	0.1	0.1	1.1	H15 <sub>%f</sub>	0.8	0.8	0.7	41.6	H15 <sub>%f</sub>	6.4	1.2	1.1	1.3

Şekil 5.39. Durum 3 640W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu

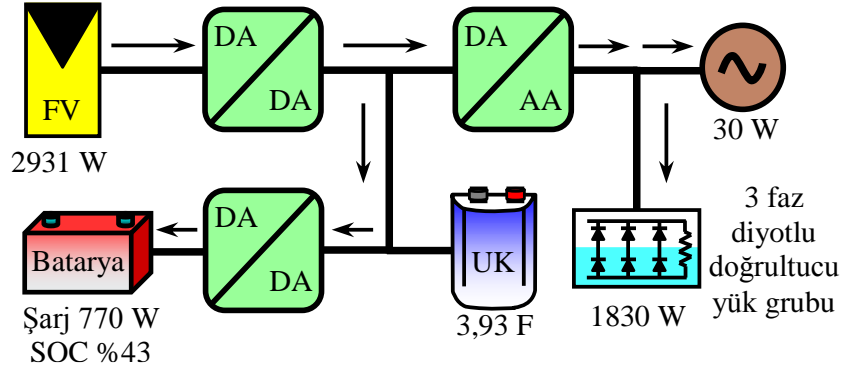
Şekil 5.40'ta Durum 3 640W yük grubu için sistemde ölçülen bütün akım, gerilim, THB, güç ve DA/DA yükseltici, DA/DA çift yönlü dönüştürücü ve DA/AA evirici verim değerleri görülmektedir. Evirici toplamda 1270W enerji üretmekte, yük grubu 640W yük talep etmekte ve kalan 640W güç şebekeye aktarılmaktadır. Burada sistemde bulunan DA/DA yükseltici güç devresinin verimi %93, DA/DA çift yönlü güç devresinin verimi %94 ve DA/AA evirici güç devresinin verimi %93 değerinde hesaplanmıştır.



Şekil 5.40. Durum 3 640W yük grubu için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti

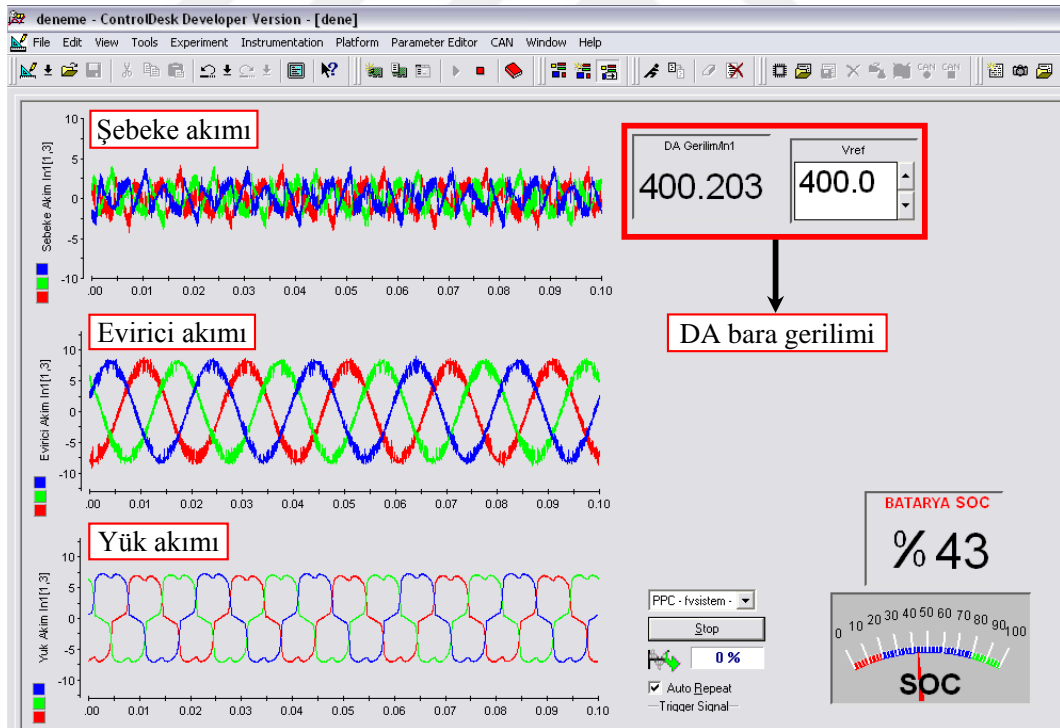
#### 5.4. Durum 3 1830W $P_{FV} > P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ SOC Düşük Durumu

Durum 3 1830W deneysel çalışması bir önceki 640W deneyinden farklı olarak sadece yük grubunun talep ettiği güç miktarının artmasıdır. Şekil 5.41'de 1830W yük durumdaki deneysel güç akış diyagramı verilmektedir. Bu durumda FV panellerin ürettiği güç aynıdır. Bu durumda yükün artmasına bağlı olarak akıllı enerji yönetim algoritması, güç dönüştürücü birimlerinin kontrol yapısını nasıl değiştirdiğini göstermektedir. Akıllı enerji yönetim algoritması yük grubunun talebinin arttığını algılayarak batarya grubunun şarj akım değerini azaltarak sistemdeki önceliğin ilk olarak yük grubunu beslemek olduğunu göstermektedir. Buna bağlı olarak bir önceki 640W deneyine göre şebekeye enerji aktarılmaktadır. Şebeke sadece yükün talep ettiği doğrusal olmayan akım talebini karşılamaktadır. Batarya grubu şarj olarak doluluk durumu SOC %43 olmaktadır. Durum 3 1830W deneyinde Durum 3 640W deneyinden farklı olarak değişen güçlerin sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.41. Durum 3 1830W yük için deneysel güç akışı diyagramı

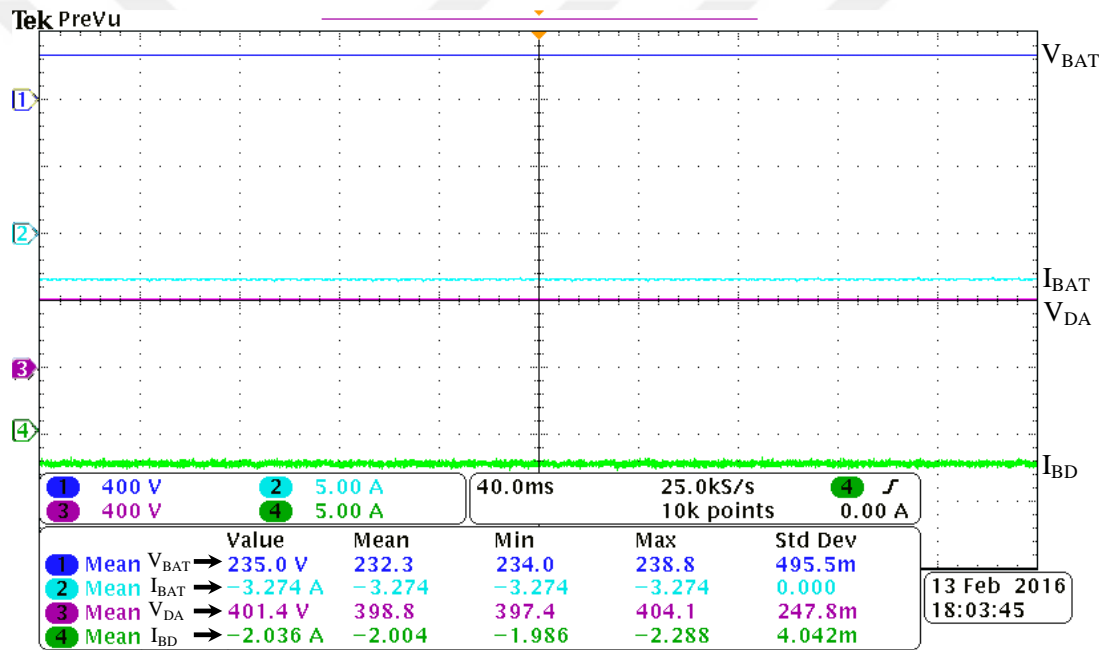
Şekil 5.42’de Durum 3 1830W yük grubu için dSpace ControlDesk program arayüzü verilmektedir. Şebeke, evirici ve yük 3 faz akımları aynı anda görülebilmektedir. Evirici yükün tamamını beslemekte kalan enerji bataryalara aktarılmaktadır. Batarya grubunun doluluk durumu SOC sürekli olarak hesaplanarak çalışma ekranından takip edilmektedir.



Şekil 5.42. Durum 3 1830W yük grubu için ControlDesk şebeke, evirici, yük akım ekranı

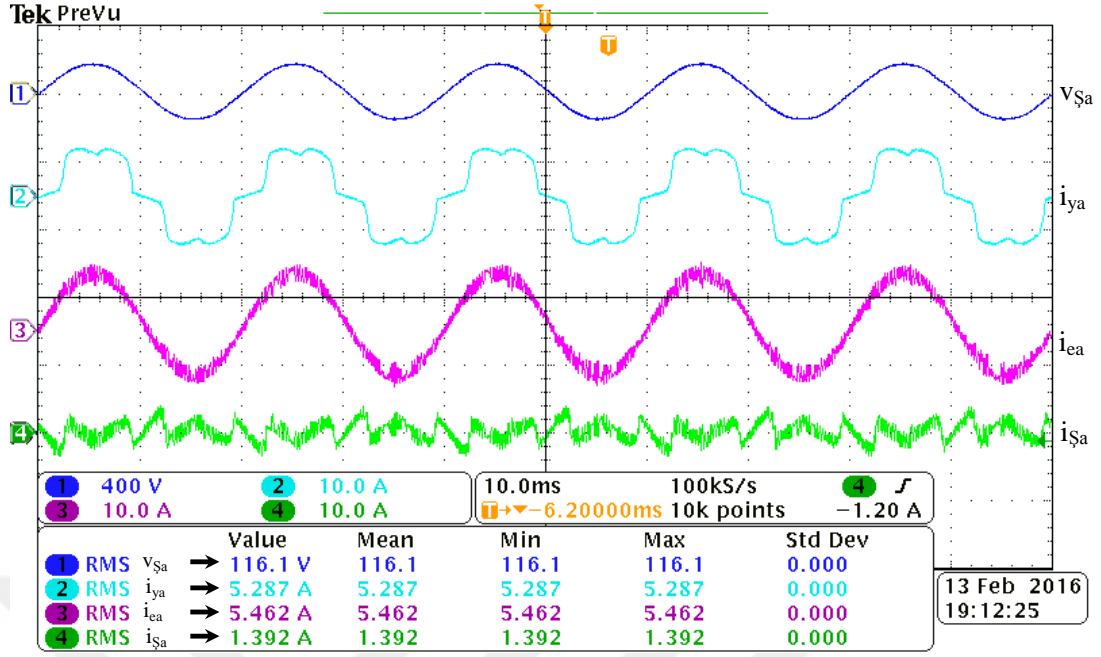
Şekil 5.43’te Durum 3 1830W yük grubu için batarya akım, gerilimi, DA/DA çift yönlü dönüştürücü akım, gerilim osiloskop ekranı görülmektedir. Durum 3 1830W yük grubu deneyinde bir önceki deneyde olduğu gibi DA/DA çift yönlü dönüştürücü

düşürücü modunda çalışarak, batarya grubunu şarj gerilime ayarlayarak 235V elde edilmektedir. Batarya grubu yaklaşık olarak 770W gücünde şarj edilmektedir. Akıllı enerji yönetim algoritması yük gücünün arttığını belirleyerek batarya grubunun şarj olma akımını belirlemektedir. Durum 3 1830W yük grubu deneyinde FV panellerin gücü yüksek olduğundan evirici yük grubunu besledikten sonra batarya grubunu da şarj etmektedir. DA/DA çift yönlü dönüştürücü şarj akımı batarya grubunun sınır şarj akım değerinin altında olduğundan yükün beslenmesinden sonra kalan bütün enerji batarya grubuna aktarılmaktadır. DA/DA çift yönlü dönüştürücünün çıkış gücü  $P_{BAT}$  770W ve giriş gücü  $P_{BD}$  810W olmakta ve bu durumda dönüştürücü güç verimi %94 olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 5.43. Durum 3 1830W yük grubu için DA/DA çift yönlü dönüştürücü giriş/çıkış akım gerilimleri

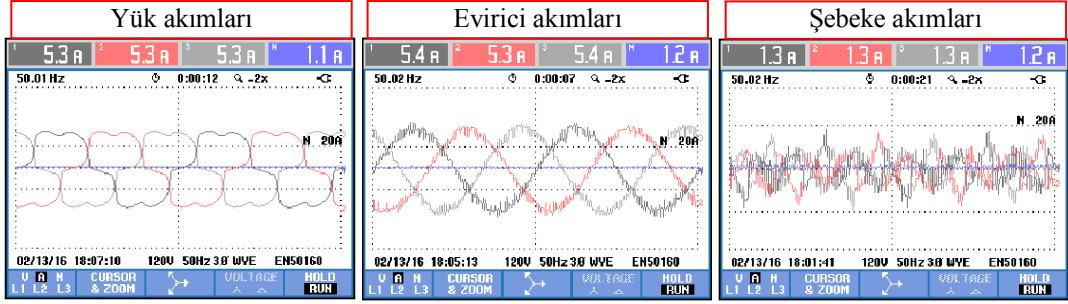
Şekil 5.44'te Durum 3 1830W yük grubu için a fazının şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke ve yük akımlarının sonuçları verilmektedir. Durum 3 1830W yük grubu deneyinde yük grubu olarak 1830W gücünde 3 faz tam dalga diyotlu doğrultucu RL yükü bağlıdır. Yük akımının çektiği doğrusal olmayan akım şekli evirici tarafından tamamlandığı Şekil 5.44'te ayrıntılı olarak verilmektedir.



Şekil 5.44. Durum 3 1830W yük grubu için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı

Şekil 5.45'te Durum 3 1830W yük grubu için sırasıyla yük, evirici ve şebekenin her bir fazın akım sonuçları verilmektedir. FV panellerden elde edilen güç ile öncelikle yük grubu beslenmektedir. Evirici faz başına yaklaşık 5,4A üretmektedir ve yük grubu da faz başına 5,3A çekmektedir. Şekil 5.46'da Durum 3 1830W yük grubu için şebeke, evirici ve yükün ayrıntılı olarak akım, gerilim ve frekans değerleri verilmektedir. Şekil 5.47'de Durum 3 1830W yük grubu için şebeke, evirici ve yükün güç, enerji,  $\cos\theta$  ve güç faktör verileri tablo olarak verilmektedir. Şekil 5.48'de Durum 3 1830W yük grubu için şebeke, evirici ve yük akımlarının harmonik bar grafiği verilmektedir. Evirici tarafından üretilen akım harmoniği %4,3 olarak ölçülmektedir ve bu akım harmonik değeri şebeke senkronizasyon standartlarında kabul edilen bir değerdedir. Şekil 5.49'da Durum 3 1830W yük grubu için şebeke, evirici ve yük akımlarının 3., 5., 7., 9., 11., 13. ve 15. harmonik değerleri her bir faz için ayrıntılı olarak tablo halinde verilmektedir. Yük grubu doğrusal olmayan 3 faz diyotlu tam dalga doğrultucu olduğundan özellikle 5. akım harmonik değeri olmak üzere 7., 11. ve 13. akım harmonik değerleri yüksek değerlerdedir.





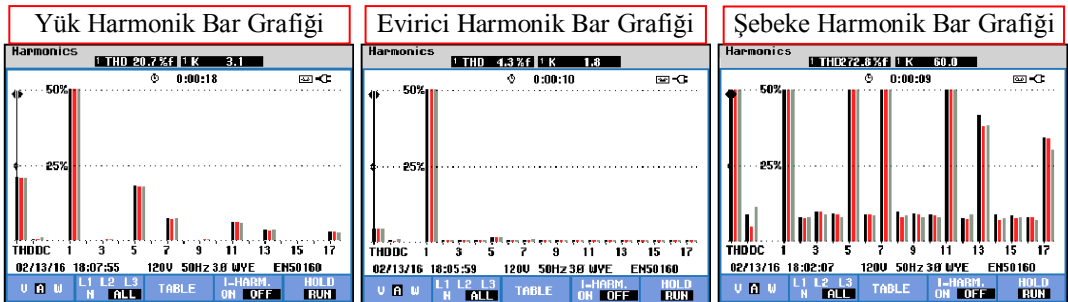
Şekil 5.45. Durum 3 1830W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları

Yük V/A/Hz Tablosu					Evirici V/A/Hz Tablosu					Şebeke V/A/Hz Tablosu				
Volts/Amps/Hz					Volts/Amps/Hz					Volts/Amps/Hz				
	L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N
Urms	116.6	116.4	116.7	18.0	Urms	116.0	116.0	116.3	17.0	Urms	115.9	115.8	116.1	17.4
Upk	166.0	165.8	166.0	58.2	Upk	164.7	165.0	165.1	61.2	Upk	164.3	164.3	165.1	57.0
CF	1.42	1.42	1.42	3.24	CF	1.42	1.42	1.42	3.59	CF	1.42	1.42	1.42	3.28
Hz	50.00				Hz	50.01				Hz	50.02			
Arms	5.3	5.3	5.3	1.1	Arms	5.4	5.3	5.4	1.2	Arms	1.4	1.3	1.3	1.2
Apk	7.1	7.1	7.2	1.2	Apk	9.1	8.7	8.8	2.8	Apk	3.9	3.7	3.9	2.6
CF	1.35	1.35	1.36	1.06	CF	1.70	1.65	1.62	2.30	CF	2.87	2.84	2.97	2.09

Şekil 5.46. Durum 3 1830W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu

Yük Güç ve Enerji Tablosu					Evirici Güç ve Enerji Tablosu					Şebeke Güç ve Enerji Tablosu				
Power & Energy					Power & Energy					Power & Energy				
	L1	L2	L3	Total		L1	L2	L3	Total		L1	L2	L3	Total
kW	0.61	0.61	0.61	1.83	kW	0.62	0.61	0.63	1.86	kW	-0.01	-0.00	-0.02	-0.03
kVA	0.61	0.61	0.61	1.83	kVA	0.62	0.61	0.63	1.87	kVA	0.16	0.15	0.15	0.46
kVAR	0.13	0.13	0.13	0.39	kVAR	0.08	0.07	0.07	0.23	kVAR	0.16	0.15	0.15	0.46
PF	0.98	0.98	0.98	0.98	PF	0.99	0.99	0.99	0.99	PF	-0.06	-0.02	-0.14	-0.07
cosφ	1.00	1.00	1.00		cosφ	1.00	1.00	1.00		cosφ	-0.20	-0.09	-0.39	
Arms	5.3	5.3	5.3		Arms	5.4	5.3	5.4		Arms	1.3	1.3	1.3	
Urms	116.1	116.0	116.4		Urms	116.0	115.8	116.1		Urms	116.5	116.3	116.6	

Şekil 5.47. Durum 3 1830W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji

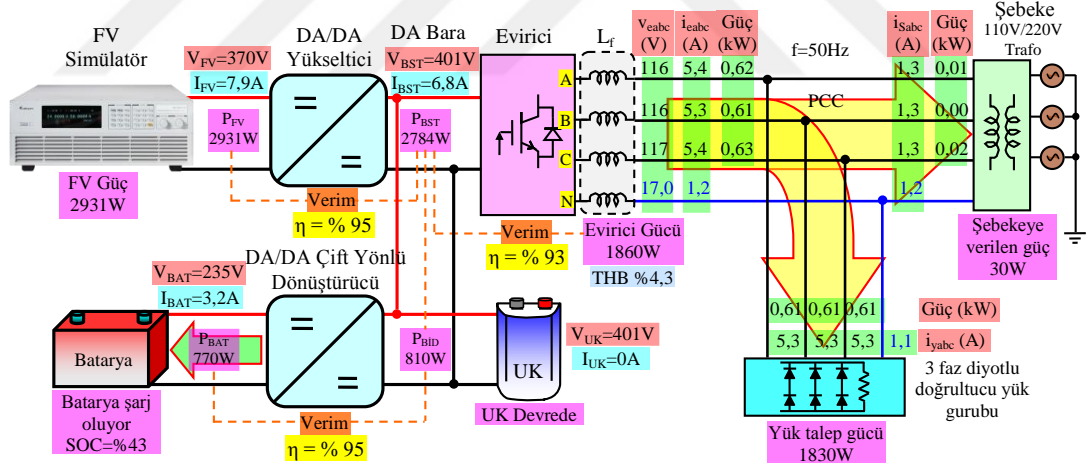


Şekil 5.48. Durum 3 1830W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği

Yük Harmonik Tablosu					Evirici Harmonik Tablosu					Şebeke Harmonik Tablosu				
HARMONICS TABLE					HARMONICS TABLE					HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N	Amp	L1	L2	L3	N	Amp	L1	L2	L3	N
THD% <sub>f</sub>	20.9	20.7	20.6	31.2	4.3	4.1	4.2	179.6		268.6	255.7	244.6	209.0	
H3% <sub>f</sub>	0.1	0.2	0.2	8.5	0.8	0.8	0.8	36.7		10.3	10.6	8.3	39.4	
H5% <sub>f</sub>	18.0	17.8	17.6	13.2	1.4	1.4	1.4	30.9		227.7	218.1	206.7	35.2	
H7% <sub>f</sub>	7.1	7.1	7.4	6.4	0.7	0.7	0.8	30.8		92.3	85.6	86.0	34.8	
H9% <sub>f</sub>	0.1	0.3	0.2	4.5	0.7	0.7	0.7	24.5		105	9.6	8.8	36.7	
H11% <sub>f</sub>	5.9	5.9	5.7	5.9	0.7	0.6	0.7	29.8		73.0	70.0	66.4	36.8	
H13% <sub>f</sub>	3.4	3.3	3.5	5.9	0.7	0.6	0.7	25.4		42.0	38.2	38.6	35.0	
H15% <sub>f</sub>	0.1	0.2	0.2	4.3	0.6	0.7	0.7	28.8		8.9	9.0	8.6	31.4	

Şekil 5.49. Durum 3 1830W yük grubu için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu

Şekil 5.50'de Durum 3 1830W yük grubu için sistemde ölçülen bütün akım, gerilim, THB, güç ve DA/DA yükseltici, DA/DA çift yönlü dönüştürücü ve DA/AA evirici verim değerleri görülmektedir. Evirici toplamda 1860W enerji üretmekte, yük grubu 1830W enerji talep etmekte ve kalan 30W güç şebekeye aktarılmaktadır. Burada sistemde bulunan DA/DA yükseltici güç devresinin verimi %95, DA/DA çift yönlü güç devresinin verimi %95 ve DA/AA evirici güç devresinin verimi %93 değerinde hesaplanmıştır.

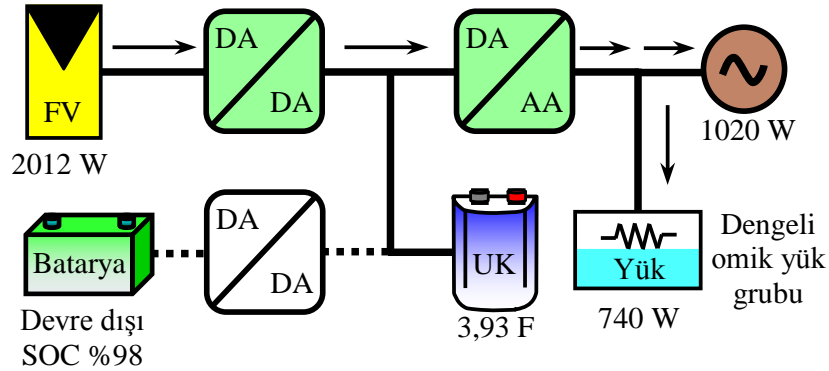


Şekil 5.50. Durum 3 1830W yük için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti

## 5.5. Durum 4 $P_{FV} > P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ SOC Yüksek Durumu

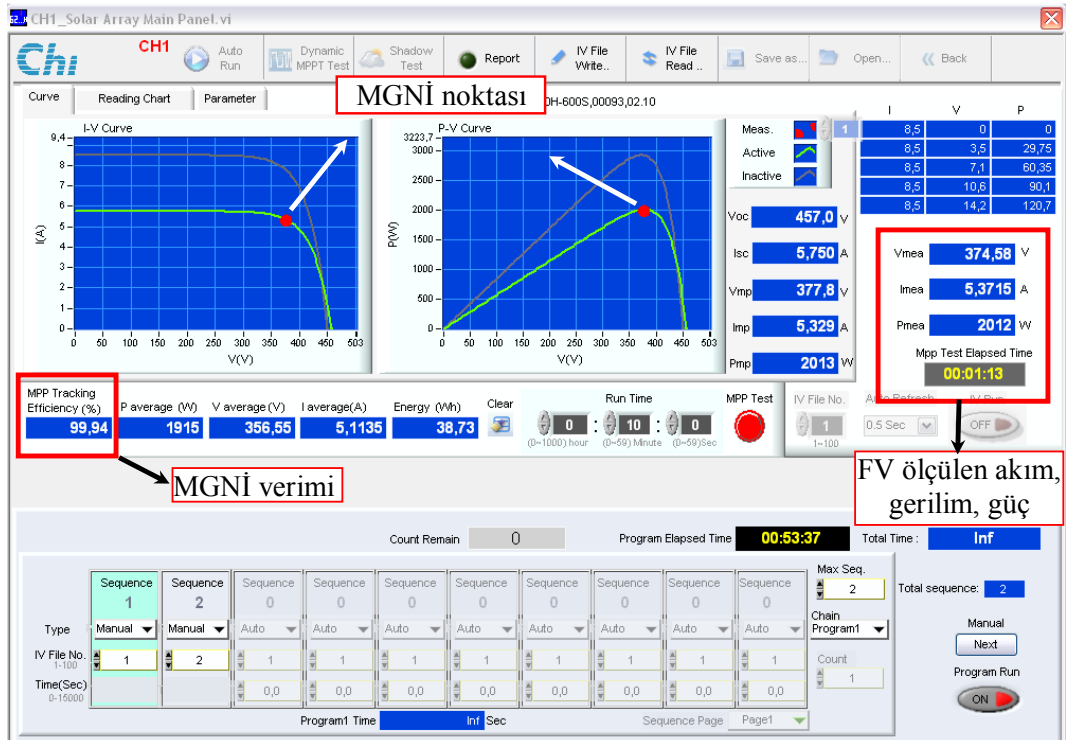
Durum 4'de  $P_{FV} \approx P_{BAT}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu yüksek olduğu durum incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 5.51'de verilmektedir. Bu durumda FV panel gücü yük gücünden fazla olduğundan yükün tamamını besledikten sonra kalan enerji şebekeye aktarılmaktadır. Bu durum da sadece bataryanın tam dolu olması halidir. Burada FV panel birincil kaynak durumundadır

ve FV panel gücü yük gücünden fazladır. Batarya grubu dolu olduğundan DA bara ile bağlantısı yoktur.



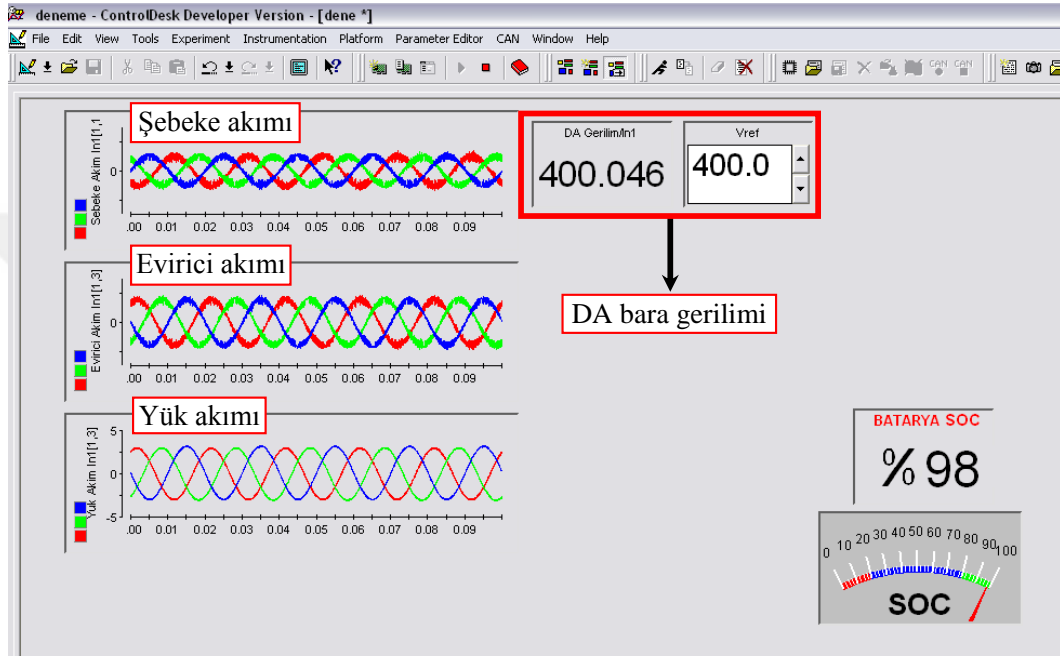
Şekil 5.51. Durum 4 için deneysel güç akış diyagramı

Şekil 5.52'de Durum 4 için Chroma FV panel simülör ekranı verilmektedir. FV simülör ekranına girilen FV panel verilerine göre 1192 W'lık bir FV kaynak elde edilmiştir. Saptır-gözle algoritmasının kararlı ve hızlı çalıştığı, MNGİ verimi bu bölümden görülmektedir. 2012W'lık toplam FV gücünü saptır-gözle algoritması %99,94 gibi yüksek bir oranla çalışmaktadır. FV panellerin MGN anındaki çalıştığı maksimum güç gerilimi  $V_{MG}$  374V, maksimum güç akımı  $I_{MG}$  5,37A olarak ölçülmektedir.



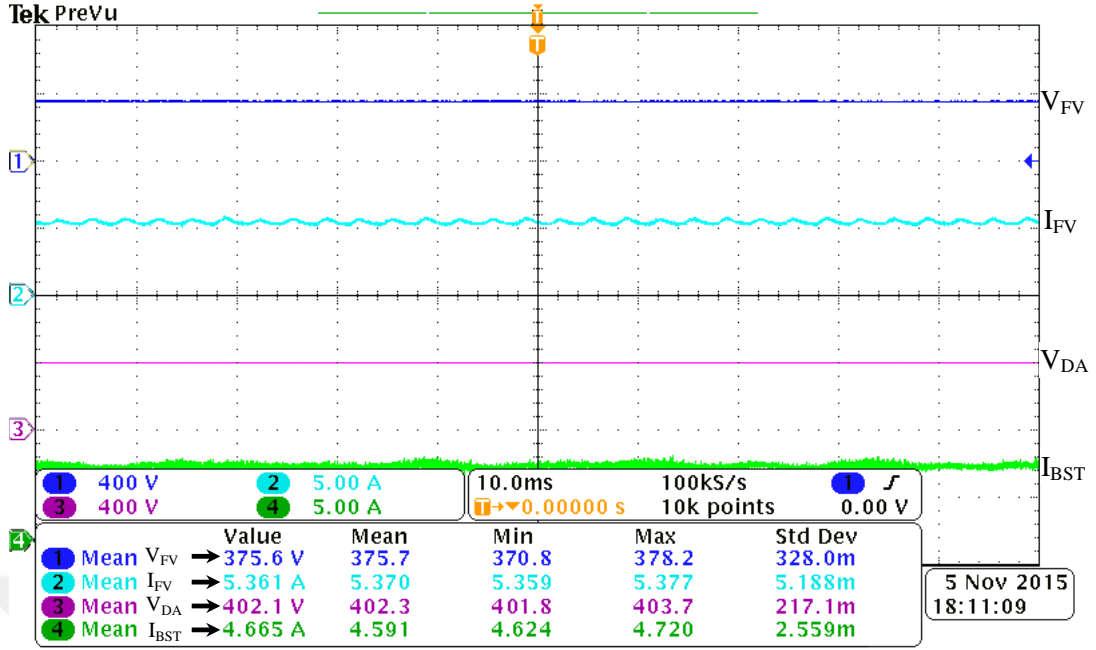
Şekil 5.52. Durum 4 için FV panel akım, gerilim güç değerleri

Şekil 5.53'te Durum 4 için dSpace ControlDesk program arayüzü verilmektedir. Durum 4'te evirici yük grubunun güç talebini karşıladıktan sonra batarya grubunun doluluk durumu yüksek olduğundan şebekeye aktarmaktadır. Şebekeye verilen akımların yönlerinden enerji akışının yönü dSpace ControlDesk program arayüzü ile kolaylıkla anlaşılmaktadır. Batarya grubunun doluluk durumu SOC sürekli olarak hesaplanarak bu durum için SOC %98 olarak belirlenmiştir.



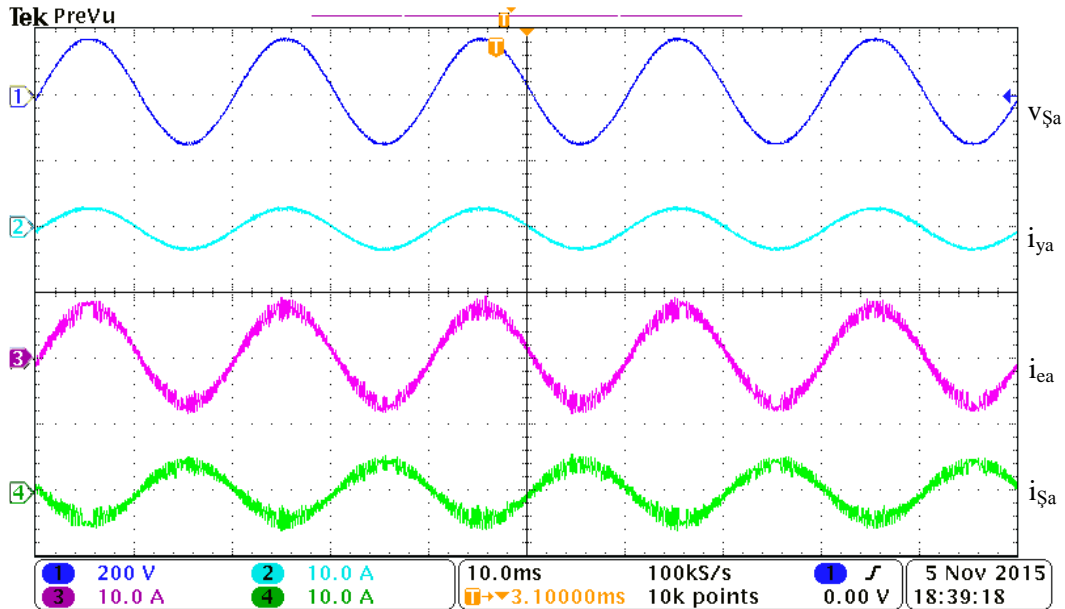
Şekil 5.53. Durum 4 için ControlDesk şebeke, evirici, yük akım ekranı

Şekil 5.54'te Durum 4 için FV panel gerilim, akım ve DA/DA yükseltici gerilim, akım osiloskop ekranı görülmektedir. DA/DA yükseltici giriş ve çıkışındaki akım/gerilim değerleri ölçülerek DA/DA yükseltici verimi %95 olarak hesaplanmaktadır. DA/DA yükseltici çıkışı her zaman FV panelleri MGN'da olacak şekilde çalıştırmakta ve DA/DA yükseltici çıkış akımını  $I_{BST}$  akımı 6,81A olmaktadır.



Şekil 5.54. Durum 4 için DA/DA yükseltici giriş/çıkış akım gerilimleri

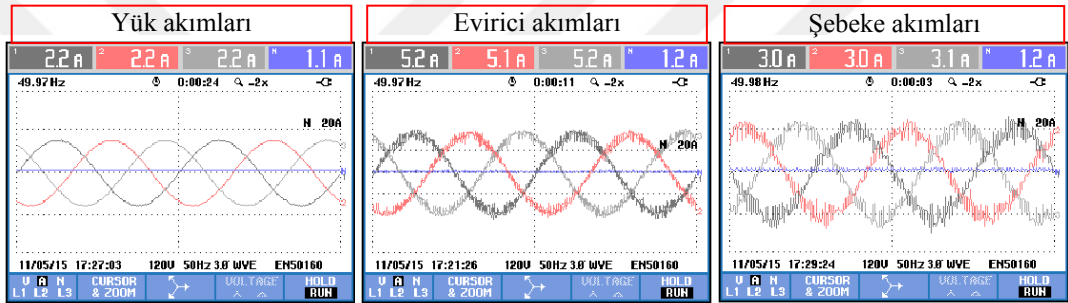
Şekil 5.55'te Durum 4 için şebeke, evirici ve yük a fazının akım, gerilim sonuçları verilmektedir. Durum 4'te batarya pasif durumda olduğundan eviricinin ürettiği güç ile yük beslenmekte kalan güç ise şebekeye senkron bir şekilde aktarılmaktadır. Şebekeye verilen güç osiloskop akım yönünden de görülmektedir.



Şekil 5.55. Durum 4 için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı

Şekil 5.56'da Durum 4 için sırasıyla yük, evirici ve şebekenin her bir fazın akım sonuçları verilmektedir. Bu sonuçlardan da görüldüğü üzere FV panellerin gücü yük

grubunun talep ettiği güçten fazladır ve evirici kol akımları 5,2A, yük kol akımları 2,2A ve şebekeye verilen kol akımları ise 3A'dır. Şekil 5.57'de Durum 4 için şebeke, evirici ve yükün ayrıntılı olarak akım, gerilim ve frekans değerleri verilmektedir. Şekil 5.58'de Durum 4 için şebeke, evirici ve yükün güç, enerji,  $\cos\theta$  ve güç faktör verileri tablo olarak verilmektedir. Şekil 5.59'da Durum 4 için şebeke, evirici ve yük akımlarının harmonik bar grafiği verilmektedir. Durum 4'te evirici tarafından üretilen akım değerleri yükseldikçe akım harmonik değeri düştüğü gözlenmiştir ve Durum 4 için THB değeri %4,3'tür. Şekil 5.60'ta Durum 4 için de şebeke, evirici ve yük akımlarının harmonik değerleri her bir faz için ayrıntılı olarak tablo halinde verilmektedir.



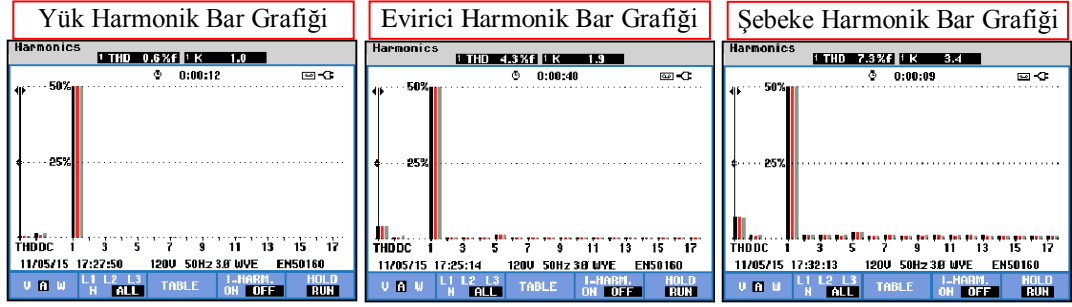
Şekil 5.56. Durum 4 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları

Yük V/A/Hz Tablosu					Evirici V/A/Hz Tablosu					Şebeke V/A/Hz Tablosu				
Volts/Amps/Hertz					Volts/Amps/Hertz					Volts/Amps/Hertz				
	L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N
Urms	114.0	113.9	114.2	17.6	Urms	113.5	113.6	113.8	16.9	Urms	113.9	113.7	114.1	17.3
Upk	163.5	163.0	162.9	60.0	Upk	162.8	162.5	162.8	58.1	Upk	163.3	163.2	162.9	59.2
CF	1.43	1.43	1.43	3.41	CF	1.43	1.43	1.43	3.43	CF	1.43	1.43	1.43	3.42
Hz	49.96				Hz	49.99				Hz	49.99			
Arms	2.2	2.2	2.2	1.1	Arms	5.2	5.1	5.2	1.2	Arms	3.1	3.0	3.1	1.2
Apk	3.1	3.1	3.1	1.1	Apk	8.6	8.5	8.7	2.5	Apk	5.8	5.3	5.4	2.6
CF	1.45	1.44	1.46	1.06	CF	1.65	1.66	1.66	2.06	CF	1.89	1.79	1.77	2.18

Şekil 5.57. Durum 4 için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu

Yük Güç ve Enerji Tablosu					Evirici Güç ve Enerji Tablosu					Şebeke Güç ve Enerji Tablosu				
Power & Energy					Power & Energy					Power & Energy				
	L1	L2	L3	Total		L1	L2	L3	Total		L1	L2	L3	Total
kW	0.25	0.25	0.25	0.74	kW	0.59	0.58	0.59	1.76	kW	-0.34	-0.33	-0.34	-1.02
kVA	0.25	0.25	0.25	0.74	kVA	0.59	0.58	0.60	1.77	kVA	0.35	0.34	0.35	1.04
kVARR	0.01	0.01	0.01	0.02	kVARR	0.07	0.06	0.06	0.19	kVARR	+0.07	+0.06	+0.06	+0.19
PF	1.00	1.00	1.00	1.00	PF	0.99	0.99	1.00	0.99	PF	-0.98	-0.98	-0.99	-0.98
Cos $\theta$	1.00	1.00	1.00		Cos $\theta$	1.00	1.00	1.00		Cos $\theta$	-1.00	-1.00	-1.00	
Arms	2.2	2.2	2.2		Arms	5.2	5.1	5.2		Arms	3.1	3.0	3.1	
Urms	114.2	114.0	114.3		Urms	114.2	114.2	114.5		Urms	113.6	113.5	113.9	

Şekil 5.58. Durum 4 için 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji tablosu

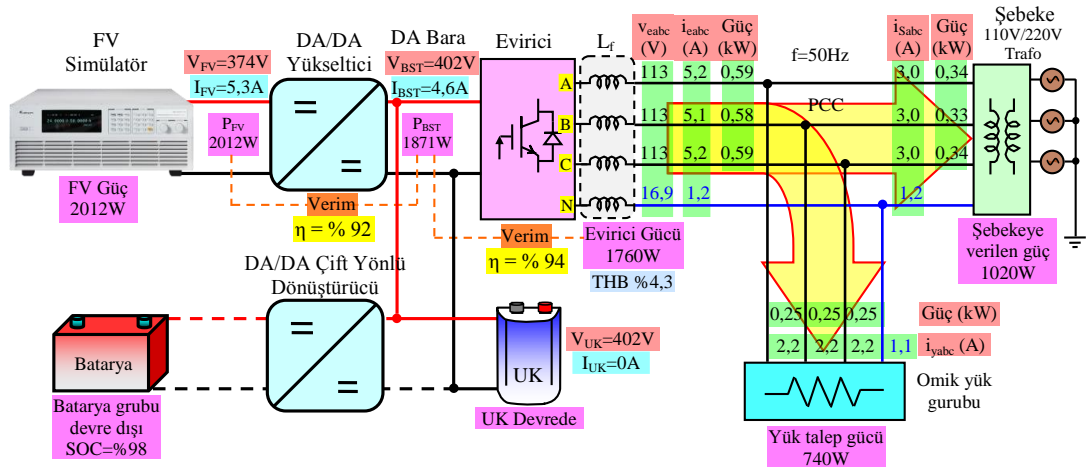


Şekil 5.59. Durum 4 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği

Yük Harmonik Tablosu						Evirici Harmonik Tablosu						Şebeke Harmonik Tablosu					
HARMONICS TABLE						HARMONICS TABLE						HARMONICS TABLE					
Amp	L1	L2	L3	N		Amp	L1	L2	L3	N		Amp	L1	L2	L3	N	
THD% <sub>f</sub>	1.1	1.1	0.9	34.4		THD% <sub>f</sub>	4.3	4.2	4.2	194.3		THD% <sub>f</sub>	7.4	7.3	7.2	210.2	
H3% <sub>f</sub>	0.4	0.4	0.4	8.3		H3% <sub>f</sub>	0.9	0.9	0.8	41.3		H3% <sub>f</sub>	1.5	1.4	1.5	42.2	
H5% <sub>f</sub>	0.4	0.3	0.4	5.6		H5% <sub>f</sub>	1.5	1.5	1.3	38.0		H5% <sub>f</sub>	2.3	2.5	2.3	37.7	
H7% <sub>f</sub>	0.3	0.3	0.2	5.1		H7% <sub>f</sub>	0.7	0.8	0.8	32.1		H7% <sub>f</sub>	1.4	1.3	1.4	33.3	
H9% <sub>f</sub>	0.1	0.1	0.1	9.0		H9% <sub>f</sub>	0.6	0.6	0.7	33.3		H9% <sub>f</sub>	1.2	1.1	1.1	38.0	
H11% <sub>f</sub>	0.2	0.3	0.2	5.2		H11% <sub>f</sub>	0.7	0.6	0.7	35.5		H11% <sub>f</sub>	1.2	1.1	1.2	37.7	
H13% <sub>f</sub>	0.2	0.1	0.2	4.9		H13% <sub>f</sub>	0.6	0.7	0.6	30.4		H13% <sub>f</sub>	1.2	1.2	1.1	35.1	
H15% <sub>f</sub>	0.1	0.1	0.1	5.2		H15% <sub>f</sub>	0.6	0.6	0.6	26.9		H15% <sub>f</sub>	1.2	1.2	1.1	31.3	

Şekil 5.60. Durum 4 için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu

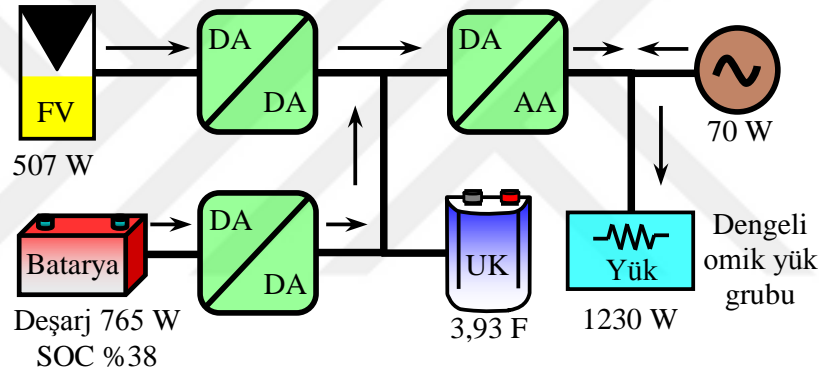
Şekil 5.61’de Durum 4 için sistemde ölçülen bütün akım, gerilim, THB, güç ve DA/DA yükseltici, DA/AA evirici verim değerleri görülmektedir. Burada sistemde bulunan DA/DA yükseltici güç devresinin verimi %92 olarak DA/AA evirici güç devresinin verimi %94 değerinde hesaplanmıştır. Evirici toplamda 1760W enerji üretmekte, yük grubu 740W enerji talep etmekte ve kalan 1020W güç şebekeye senkron bir şekilde aktarılmaktadır.



Şekil 5.61. Durum 4 için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti

## 5.6. Durum 5 $P_{FV} < P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ SOC Düşük Durumu

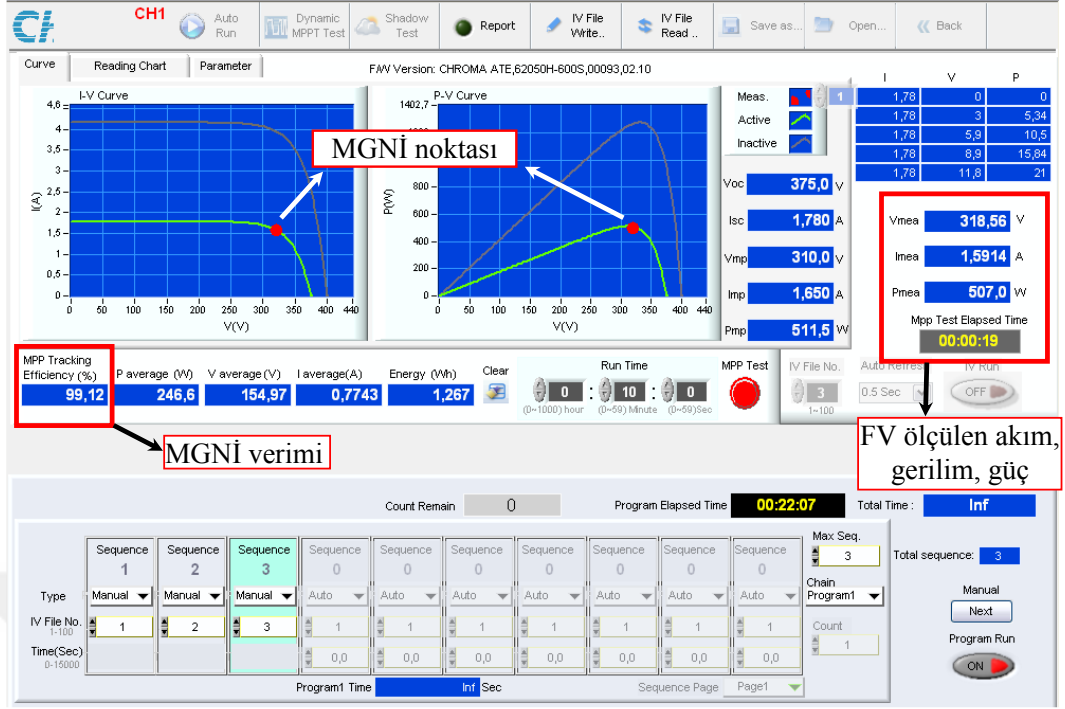
Durum 5'te  $P_{FV} < P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu düşük olduğu durum incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 5.62'de verilmektedir. Bu durumda FV panellerin gücü sistemde bulunan yük grubunun gücünden küçüktür. Yük grubunun talep ettiği güç fazla olduğundan FV panellerin gücüne ilave olarak batarya grubu devreye girip deşarj olarak öncelikli olan yük grubunu beslemektedir. Eğer yük grubunun talep ettiği güç çok fazla ise kalan enerji şebekeden talep edilmektedir. Böylelikle akıllı enerji yönetim algoritmasının önceliği olan yük grubunun talep gücü her zaman sağlanmış olmaktadır. Batarya grubunun doluluk durumu SOC önceden belirlenen kritik seviyeye geldiğinde akıllı enerji yönetim algoritması batarya grubunu devre dışı bırakmaktadır.



Şekil 5.62. Durum 5 için deneysel güç akış diyagramı

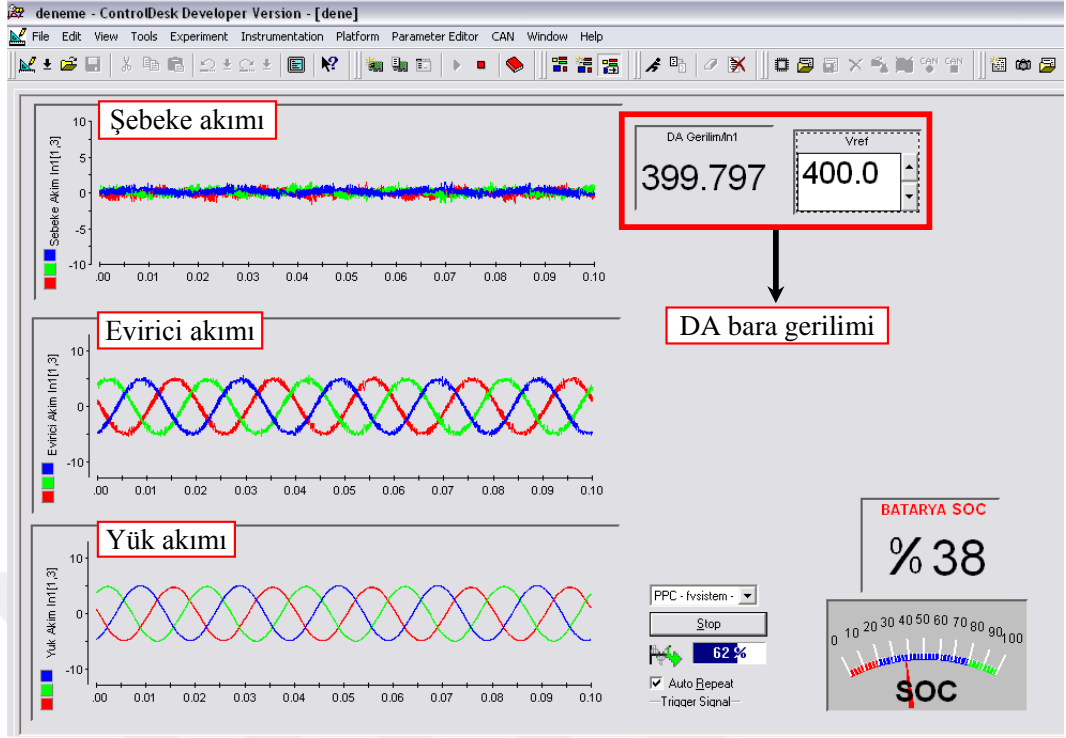
Şekil 5.63'te Durum 5 için Chroma FV panel simülatör ekranı verilmektedir. FV simülatör ekranına girilen FV panel verilerine göre 507W'lık bir FV kaynak elde edilmiştir. Chroma FV panel simülatör ile oluşturulan 507W'lık toplam FV gücünü saptır-gözle algoritması %99,12 gibi yüksek bir oranla takip etmektedir. FV panellerin MGN anında çalıştığı maksimum güç gerilimi  $V_{MG}$  318V, maksimum güç akımı  $I_{MG}$  1,59A olarak ölçülmektedir.





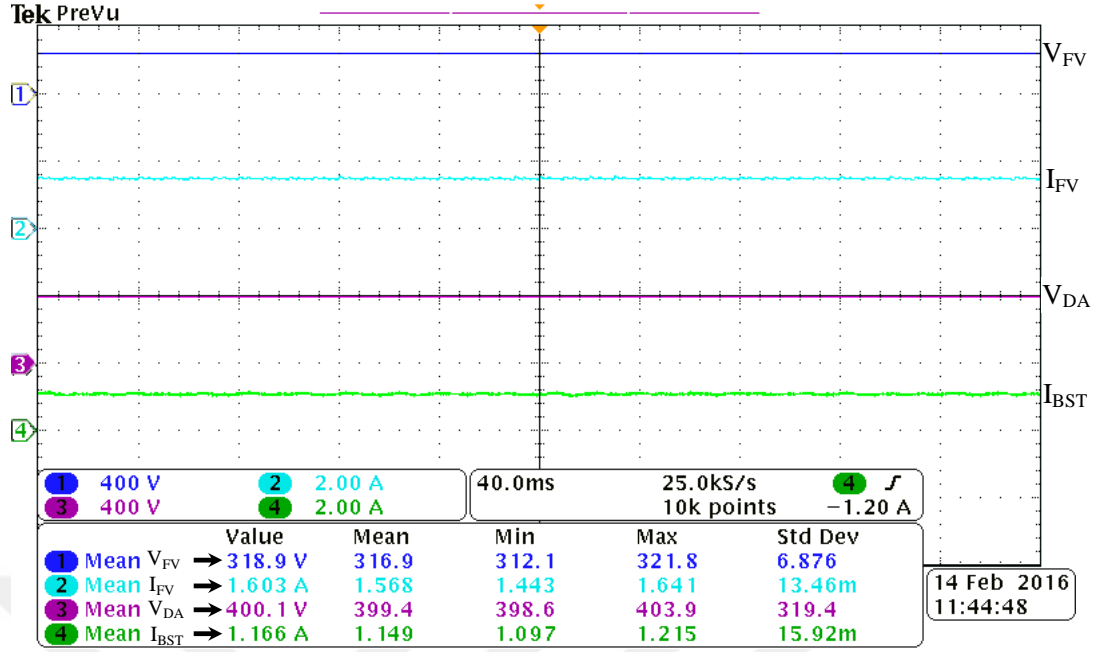
Şekil 5.63. Durum 5 için FV panel akım, gerilim güç değerleri

Şekil 5.64'te Durum 5 için dSpace ControlDesk program arayüzü verilmektedir. Durum 5'te evirici akımları FV paneller ve batarya grubunun aktardığı güçler ile üretilmektedir. Böylelikle akıllı enerji yönetim algoritması gerekli yük talep gücünü doğru bir şekilde hesaplayarak şebekeden enerji almadan yük talep önceliğini karşılamaktadır. Batarya grubunun doluluk durumu SOC, sürekli olarak hesaplanarak bu durum için SOC %38 olarak belirlenmiştir ve deşarj oldukça bu değer azalmaktadır. Batarya grubunun doluluk durumu SOC %20'nin altına düştüğünde akıllı enerji yönetim algoritması bataryanın daha fazla deşarj olarak zarar görmemesi için batarya grubunu devreden çıkartmaktadır. Bu yüzden batarya grubunun sağlıklı deşarj edilebilmesi için batarya doluluk durumu SOC bilgisi akıllı enerji yönetim algoritması için önemlidir.



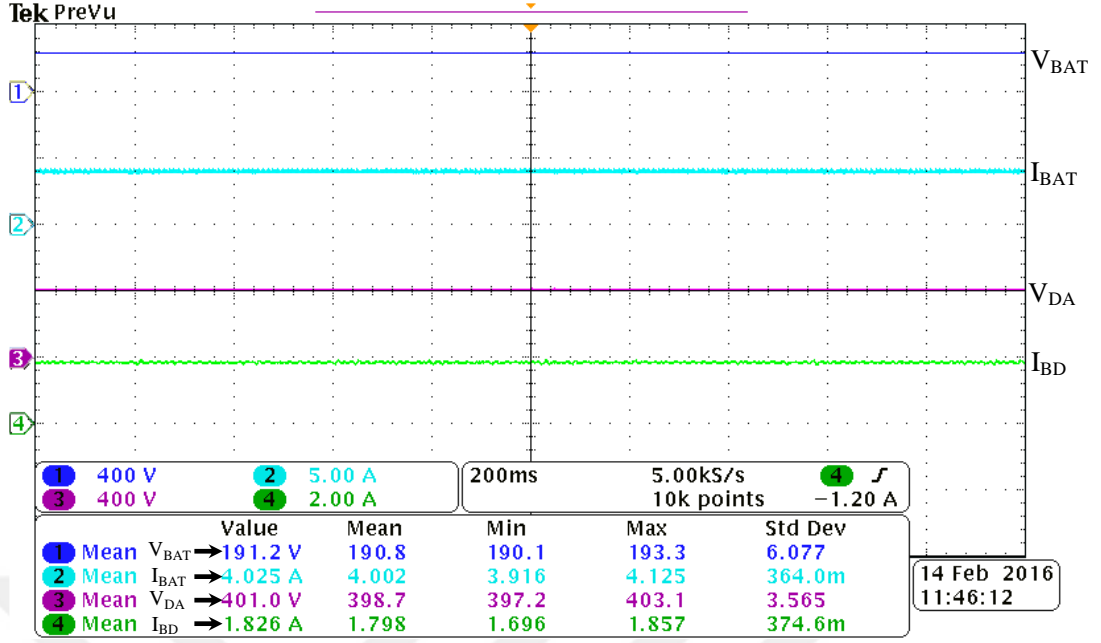
Şekil 5.64. Durum 5 için ControlDesk şebeke, evirici, yük akım ekranı

Şekil 5.65'te Durum 5 için FV panel gerilim, akım ve DA/DA yükseltici gerilim, akım osiloskop ekranı görülmektedir. DA/DA yükseltici devresi FV panelleri şekilde çalıştırarak DA baraya enerji aktarmaktadır. DA/DA yükseltici çıkışındaki gerilim ve akım değerleri ayrıntılı olarak Şekil 5.65'te verilmektedir. DA/DA yükseltici verimi dönüştürücünün çıkış ve girişinde güçler oranlandığında güç dönüştürücüsünün verimi %92 olarak hesaplanmaktadır.



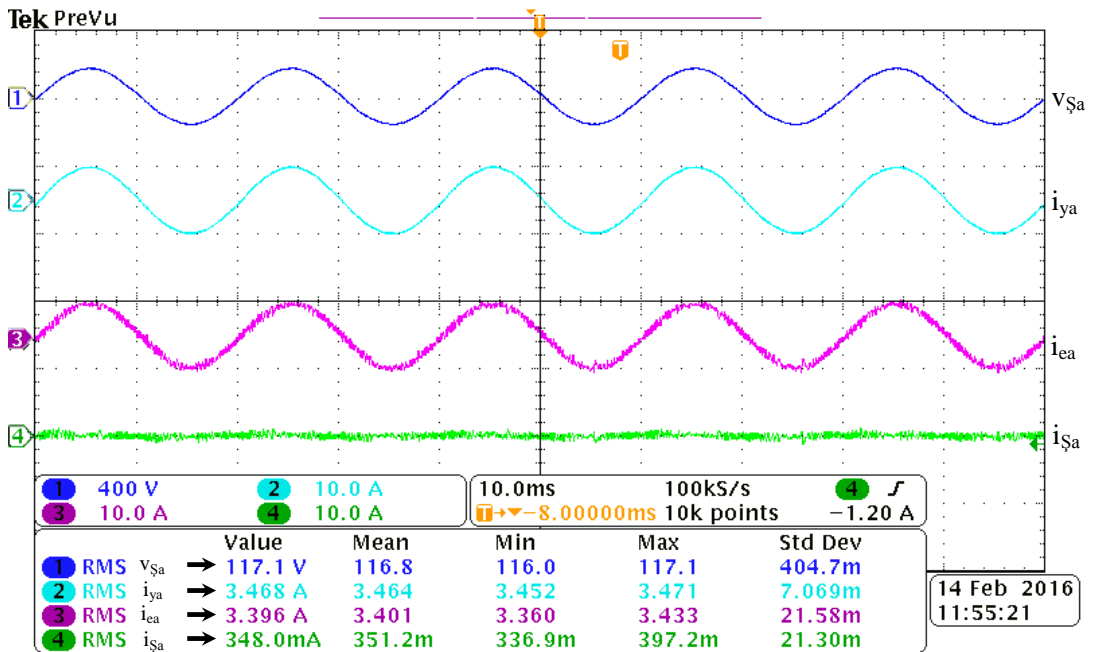
Şekil 5.65. Durum 5 için DA/DA yükseltici giriş/çıkış akım gerilimleri

Şekil 5.66'da Durum 5 için batarya akım, gerilimi, DA/DA çift yönlü dönüştürücü akım, gerilim osiloskop ekranı görülmektedir. Durum 5'te DA/DA çift yönlü dönüştürücü yükseltici modunda çalışarak batarya grubunun deşarj olmasını sağlamaktadır. DA/DA çift yönlü dönüştürücü çıkış akımı akıllı enerji yönetim algoritmasının belirlediği akım miktarı kadar deşarj edilmektedir. Batarya grubunun %38'lik doluluk oranında terminal uçlarındaki gerilimi yaklaşık olarak 191V'tur. Batarya grubu deşarj edildikçe bu gerilim seviyesi giderek azalmaktadır ve batarya terminal uçlarındaki gerilim seviyesi 185V'a ulaştığında, bu gerilim seviyesinde batarya doluluk durumunda SOC %20 civarında olmakta ve akıllı enerji yönetim algoritması batarya grubunu devre dışı bırakmaktadır. Batarya grubu yaklaşık olarak 765W gücünde deşarj edilmektedir. DA/DA çift yönlü dönüştürücünün çıkış gücü  $P_{BD}$  727W ve giriş gücü  $P_{BAT}$  765W olmakta ve bu durumda dönüştürücü güç verimi %95 olarak hesaplanmaktadır.



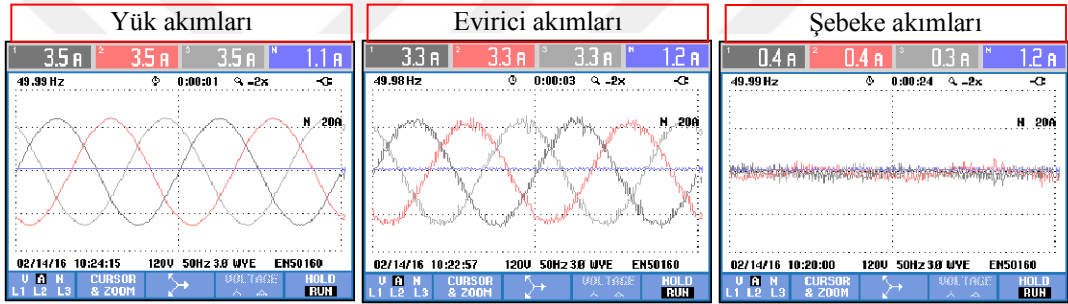
Şekil 5.66. Durum 5 için DA/DA çift yönlü dönüştürücü giriş/çıkış akım gerilimleri

Şekil 5.67’de Durum 5 için şebeke, evirici ve yük a fazının akım, gerilim sonuçları verilmektedir. Akıllı enerji yönetim algoritması tarafından hesaplanarak belirlenen evirici toplam akım değeri yük grubunun talep ettiği güce eşit olduğu ayrıntılı olarak verilmektedir. Evirici yük grubunu tamamen besleyerek şebeken neredeyse hiç enerji almamaktadır.



Şekil 5.67. Durum 5 için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı

Şekil 5.68'de Durum 5 için sırasıyla yük, evirici ve şebekenin her bir fazın akım sonuçları verilmektedir. Evirici kol akımlarının her biri 3,3A'dır ve yük grubunun talep ettiği kol akım miktarları 3,5A'dır. Evirici ile yük grubunun kol akımlarındaki bu küçük fark akımları şebeke tarafından karşılanmaktadır. Şekil 5.69'da Durum 5 için şebeke, evirici ve yükün ayrıntılı olarak akım, gerilim ve frekans değerleri verilmektedir. Şekil 5.70'te Durum 5 için şebeke, evirici ve yükün güç, enerji,  $\cos\theta$  ve güç faktör verileri tablo olarak verilmektedir. Şekil 5.71'de Durum 5 için şebeke, evirici ve yük akımlarının harmonik bar grafiği verilmektedir. Evirici tarafından üretilen akım harmoniği %4,2 olarak ölçülmektedir. Şekil 5.72'de Durum 5 için şebeke, evirici ve yük akımlarının 3., 5., 7., 9., 11., 13. ve 15. harmonik değerleri her bir faz için ayrıntılı olarak tablo halinde verilmektedir.



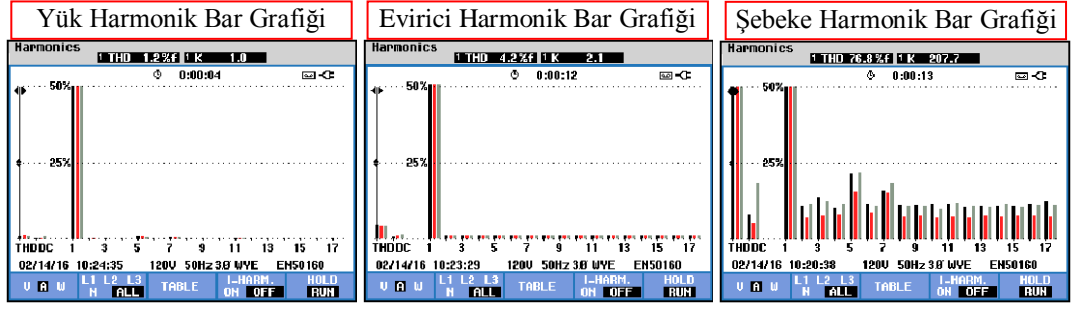
Şekil 5.68. Durum 5 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları

Yük V/A/Hz Tablosu					Evirici V/A/Hz Tablosu					Şebeke V/A/Hz Tablosu				
Volts/Amps/Hz					Volts/Amps/Hz					Volts/Amps/Hz				
	L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N
Urms	117.5	117.3	117.7	15.9	Urms	117.4	117.3	117.7	15.5	Urms	117.6	117.5	117.8	15.5
Upk	166.6	167.8	167.8	46.9	Upk	167.2	168.0	168.3	46.0	Upk	167.3	168.2	168.3	51.2
CF	1.42	1.43	1.43	2.95	CF	1.42	1.43	1.43	2.96	CF	1.42	1.43	1.43	3.30
Hz	50.00				Hz	49.97				Hz	49.97			
Arms	3.5	3.5	3.5	1.1	Arms	3.4	3.3	3.3	1.2	Arms	0.4	0.4	0.3	1.2
Apk	5.0	5.0	5.0	1.2	Apk	5.3	5.3	5.3	2.3	Apk	1.4	1.4	1.5	2.1
CF	1.42	1.44	1.44	1.06	CF	1.57	1.61	1.60	1.93	CF	0L	3.57	0L	1.80

Şekil 5.69. Durum 5 için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu

Yük Güç ve Enerji Tablosu					Evirici Güç ve Enerji Tablosu					Şebeke Güç ve Enerji Tablosu				
Power & Energy					Power & Energy					Power & Energy				
	L1	L2	L3	Total		L1	L2	L3	Total		L1	L2	L3	Total
kW	0.41	0.41	0.41	1.23	kW	0.39	0.38	0.39	1.16	kW	0.02	0.03	0.02	0.07
kVA	0.41	0.41	0.41	1.23	kVA	0.39	0.38	0.39	1.17	kVA	0.04	0.05	0.04	0.13
kVAR	0.01	0.01	0.01	0.02	kVAR	0.04	0.03	0.03	0.10	kVAR	± 0.04	± 0.03	± 0.03	± 0.11
PF	1.00	1.00	1.00	1.00	PF	1.00	1.00	1.00	1.00	PF	0.49	0.66	0.53	0.56
Cos $\phi$	1.00	1.00	1.00		Cos $\phi$	1.00	1.00	1.00		Cos $\phi$	0.89	0.96	0.96	
Arms	3.5	3.5	3.5		Arms	3.3	3.3	3.3		Arms	0.4	0.4	0.3	
Urms	117.5	117.5	117.7		Urms	117.7	117.5	117.9		Urms	117.7	117.6	117.9	

Şekil 5.70. Durum 5 için 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji tablosu

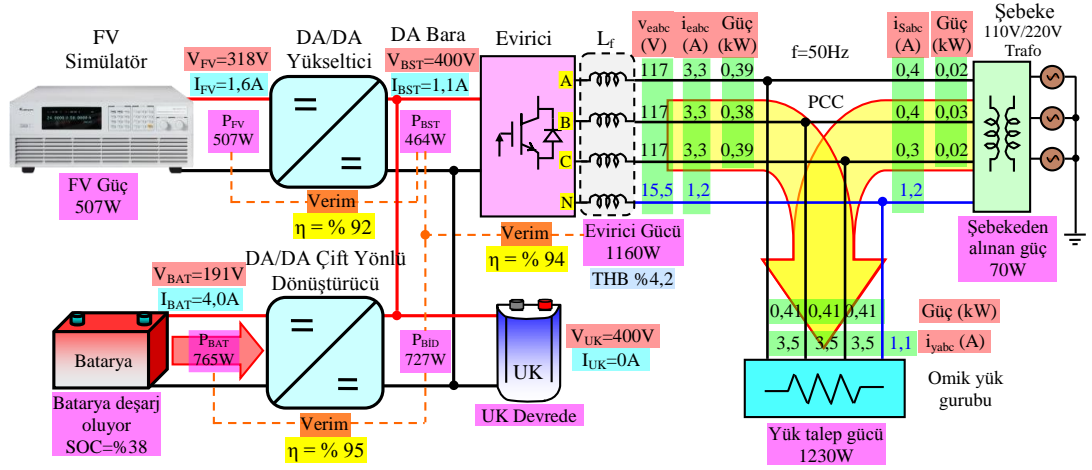


Şekil 5.71. Durum 5 için 3 faz yük, akım harmonik bar grafiği

Yük Harmonik Tablosu					Evirici Harmonik Tablosu					Şebeke Harmonik Tablosu				
HARMONICS TABLE					HARMONICS TABLE					HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N	Amp	L1	L2	L3	N	Amp	L1	L2	L3	N
THD% <sub>f</sub>	1.3	1.4	1.3	27.8	THD% <sub>f</sub>	3.8	3.9	3.8	201.5	THD% <sub>f</sub>	78.4	54.5	74.1	313.1
H3% <sub>f</sub>	0.2	0.1	0.1	6.2	H3% <sub>f</sub>	0.5	0.7	0.5	43.3	H3% <sub>f</sub>	13.6	8.1	11.6	67.0
H5% <sub>f</sub>	1.0	1.0	1.0	4.3	H5% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.8	32.1	H5% <sub>f</sub>	22.9	17.6	22.8	52.7
H7% <sub>f</sub>	0.7	0.8	0.6	3.9	H7% <sub>f</sub>	0.7	0.6	0.6	33.3	H7% <sub>f</sub>	16.7	16.8	18.6	46.6
H9% <sub>f</sub>	0.1	0.1	0.1	4.0	H9% <sub>f</sub>	0.7	0.6	0.6	31.6	H9% <sub>f</sub>	11.4	7.8	11.0	55.3
H11% <sub>f</sub>	0.2	0.3	0.3	4.2	H11% <sub>f</sub>	0.7	0.6	0.6	28.9	H11% <sub>f</sub>	12.3	7.5	10.7	52.3
H13% <sub>f</sub>	0.1	0.1	0.2	4.4	H13% <sub>f</sub>	0.6	0.7	0.6	31.9	H13% <sub>f</sub>	11.4	7.8	11.4	46.8
H15% <sub>f</sub>	0.1	0.1	0.0	4.8	H15% <sub>f</sub>	0.7	0.6	0.5	36.8	H15% <sub>f</sub>	10.4	7.6	9.4	52.3

Şekil 5.72. Durum 5 için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu

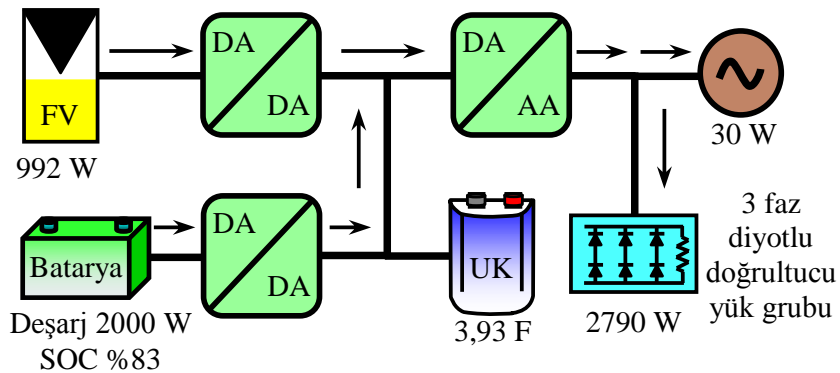
Şekil 5.73'te Durum 5 için sistemde ölçülen bütün akım, gerilim, THB, güç ve DA/DA yükseltici, DA/DA çift yönlü dönüştürücü ve DA/AA evirici verim değerleri görülmektedir. FV paneller toplamda 507W enerji üretmektedir. DA/DA yükseltici güç devresi %92 verimle bu gücü DA baraya aktarmaktadır. DA/DA çift yönlü dönüştürücü devresi bataryayı 765W gücünde deşarj ederek %95 verimle bu gücü DA baraya aktarmaktadır. Evirici DA/DA yükseltici ve DA/DA çift yönlü dönüştürücünden aldığı toplam 1191W'lık enerjiyi %94 güç devresi verimi ile yük grubuna vermektedir. Aynı zamanda eviricinin kol akımlarının THB değeri %4,2'dir. Yük grubunun talep gücü 1230W'tır, eviriciden kalan 70W güç farkı şebekeden sağlanarak yük grubu beslenmektedir.



Şekil 5.73. Durum 5 için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti

### 5.7. Durum 6 $P_{FV} < P_{YÜK}$ ve $P_{BAT}$ SOC Yüksek Durumu

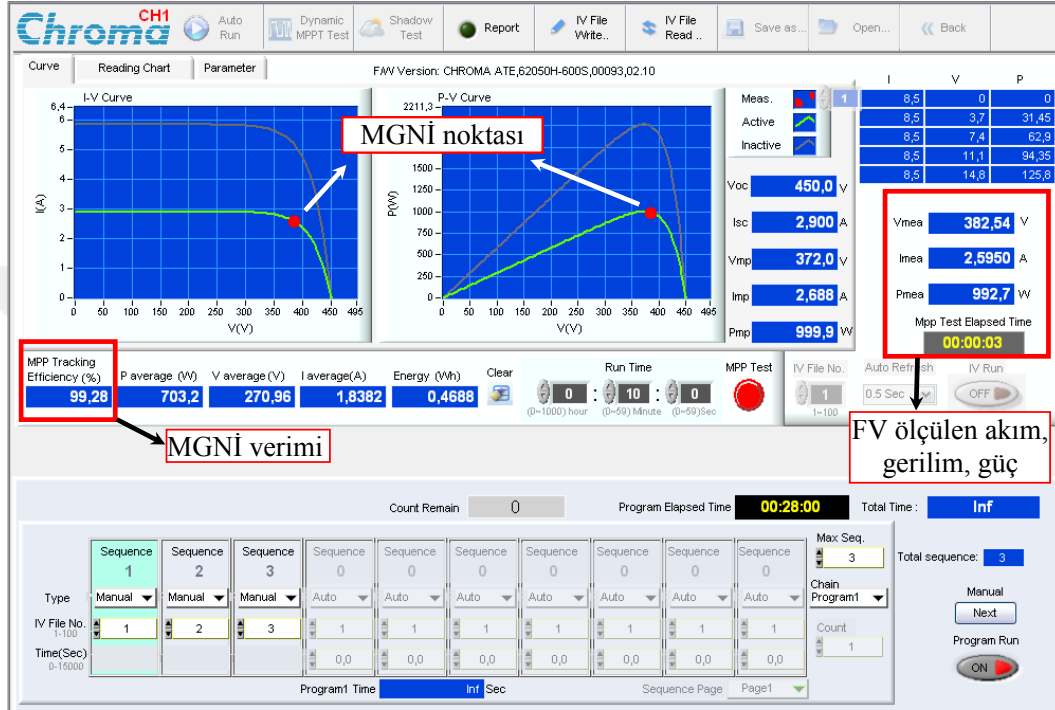
Durum 6'da  $P_{FV} < P_{YÜK}$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu düşük olduğu durum incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 5.74'te verilmektedir. Durum 6'nın Durum 5'ten farkı batarya grubunun doluluk durumu SOC değerinin daha yüksek olmasıdır. Durum 6 için geçerli olan çalışma şartları Durum 5'in benzeridir. Bu durumda da FV panellerin gücü sistemde bulunan yük grubunun gücünden küçüktür ve batarya grubu yine deşarj olarak yükü beslemektedir. Durum 6'da FV panellerin ve yük grubunun güç değerleri farklı seçilerek, akıllı enerji yönetim algoritmasının batarya grubu için deşarj olması gereken akım miktarını belirlemesi gözlenmiştir. Böylece farklı çalışma şartları altında sistemin deneysel olarak sonuçları alınmaktadır.



Şekil 5.74. Durum 6 için deneysel güç akış diyagramı

Şekil 5.75'te Durum 6 için Chroma FV panel simülasyon ekranı verilmektedir. Durum 6 için FV panellerinin gücü 992W'lık bir FV kaynak elde edecek şekilde

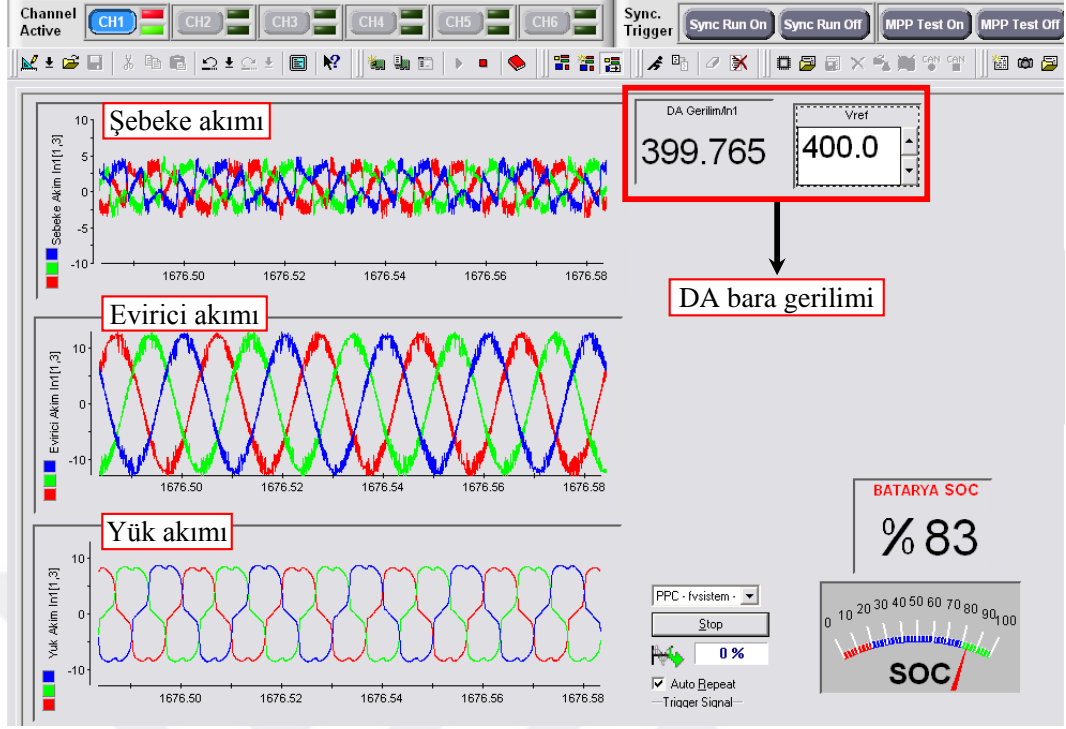
ayarlanmıştır. Saptır-gözle algoritmasının kararlı ve hızlı çalıştığı, MNGİ verimi bu bölümünden görülmektedir. 992W'lık toplam FV gücünü saptır-gözle algoritması %99,28 gibi yüksek bir oranla takip etmektedir. FV panellerin MGN anında çalıştığı maksimum güç gerilimi  $V_{MG}$  382V, maksimum güç akımı  $I_{MG}$  2,59A olarak ölçülmektedir.



Şekil 5.75. Durum 6 için FV panel akım, gerilim güç değerleri

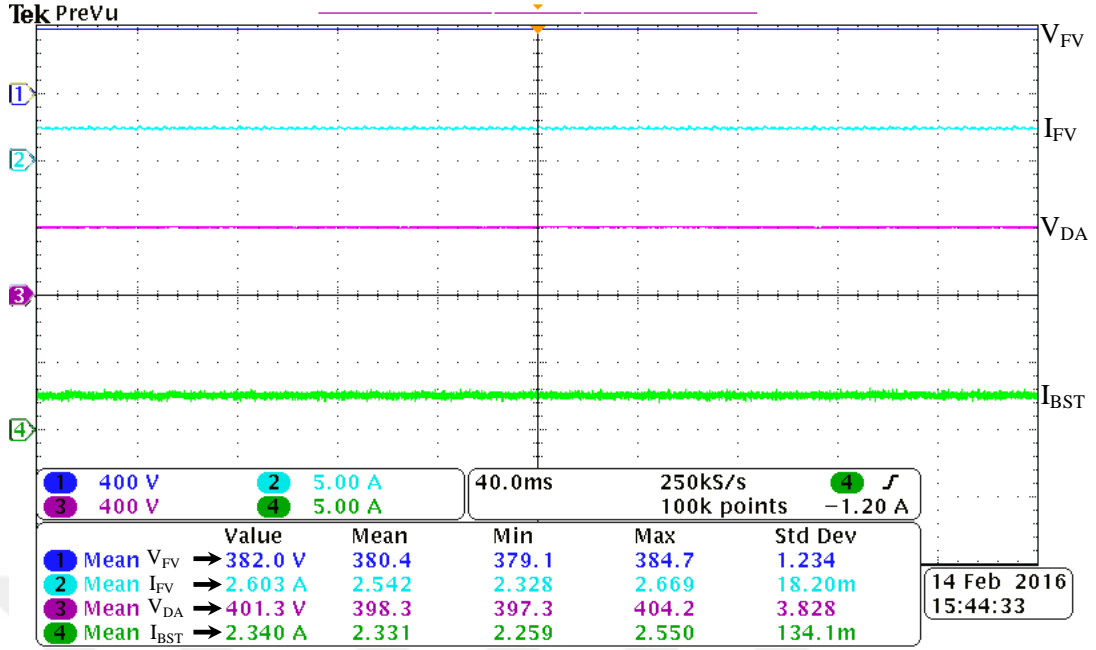
Şekil 5.76'da Durum 6 için dSpace ControlDesk program arayüzü verilmektedir. Durum 6'da evirici akımları FV paneller ve batarya grubunun aktardığı güçler ile üretilmektedir. Batarya grubunun doluluk durumu SOC sürekli olarak hesaplanarak bu durum için SOC %83 olarak belirlenmiştir ve deşarj oldukça bu değer azalmaktadır. Sisteme Durum 6'da Durum 5'ten farklı olarak 3 faz diyotlu tam dalga doğrultucu RL yük grubu bağlanmıştır. Böylece sistemin doğrusal olmayan yük gruplarındaki tepkisi de incelenmektedir. dSpace ControlDesk program arayüzünde evirici kol akımları yük grubunu beslemekte bir miktar enerji fazlalığını da şebekeye aktarmaktadır. Sistemden doğrusal olmayan yük akımları çekildiğinden şebeke burada tamamlayıcı görev yaparak doğrusal olmayan kol akımlarını kompanze etmektedir.





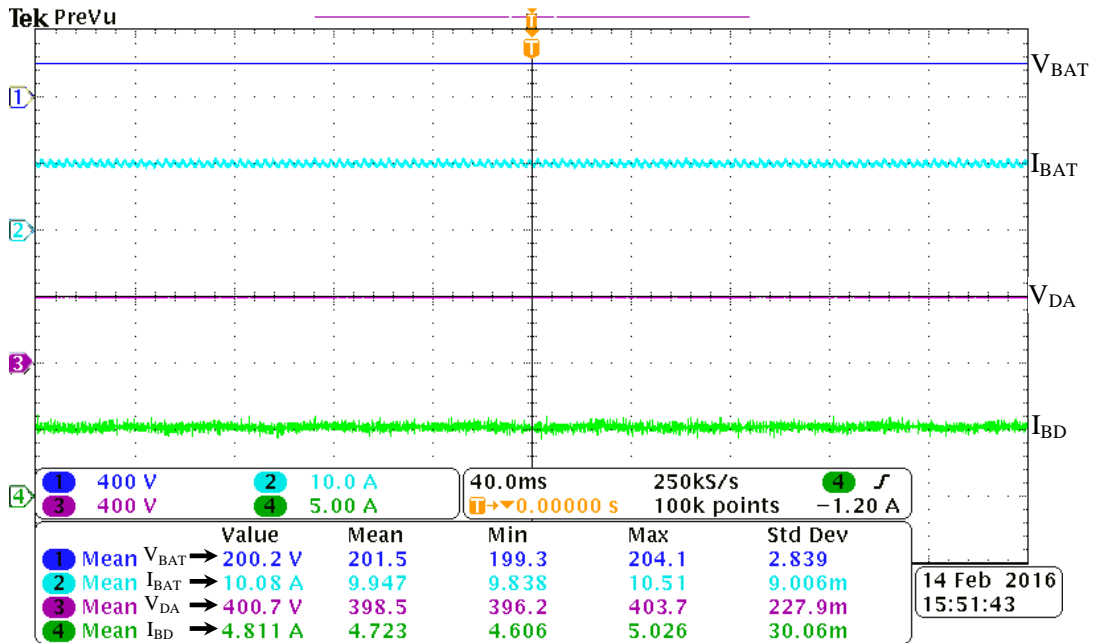
Şekil 5.76. Durum 6 için ControlDesk şebeke, evirici, yük akım ekranı

Şekil 5.77’de Durum 6 için FV panel gerilim, akım ve DA/DA yükseltici gerilim, akım osiloskop ekranı görülmektedir. FV panel çıkışındaki DA/DA yükseltici devresi MGNİ işlemini yerine getirerek 992W’lık enerjiyi eviriciye aktarmaktadır. DA/DA yükseltici çıkış ve girişindeki güçler oranlandığında verimi %94 olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 5.77. Durum 6 için DA/DA yükseltici giriş/çıkış akım gerilimleri

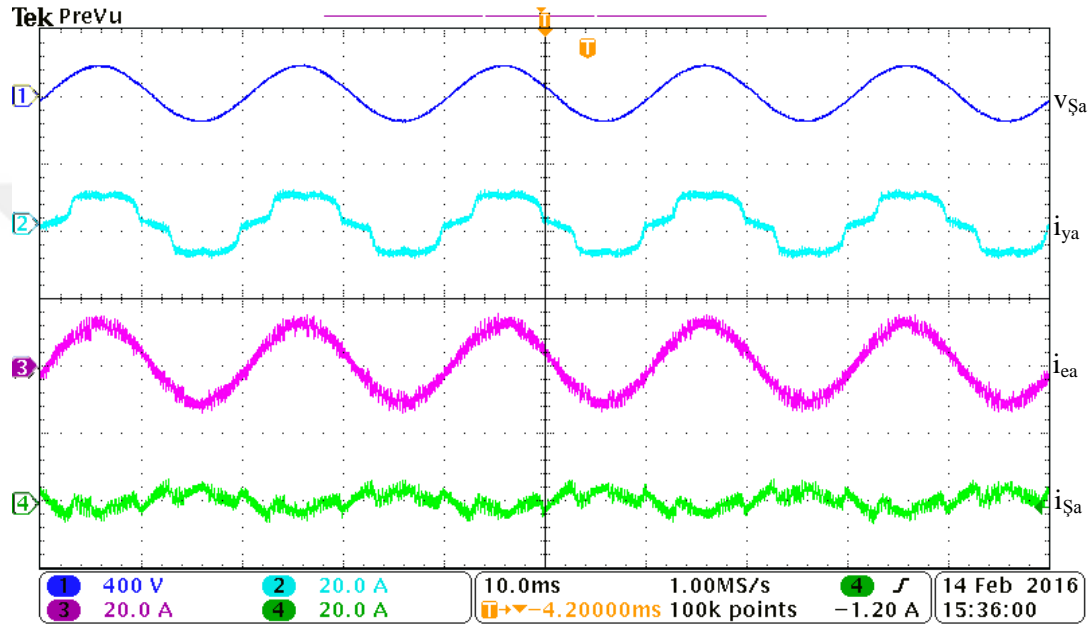
Şekil 5.78’de Durum 6 için batarya akım, gerilimi, DA/DA çift yönlü dönüştürücü akım, gerilim osiloskop ekranı görülmektedir. Durum 6’da DA/DA çift yönlü dönüştürücü yükseltici modunda çalışarak batarya grubunun deşarj olmasını sağlamaktadır. Batarya grubunun %83’lük doluluk oranında terminal uçlarındaki gerilimi yaklaşık olarak 200V’tur. Batarya grubu yaklaşık olarak 2000W gücünde deşarj edilmektedir.



Şekil 5.78. Durum 6 için DA/DA çift yönlü dönüştürücü giriş/çıkış akım gerilimleri

DA/DA çift yönlü dönüştürücünün çıkış gücü  $P_{BD}$  1920W ve giriş gücü  $P_{BAT}$  2000W olmakta ve bu durumda dönüştürücü güç verimi %96 olarak hesaplanmaktadır.

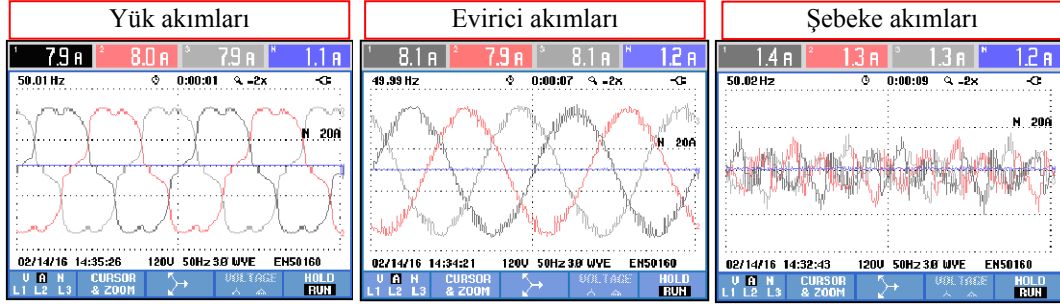
Şekil 5.79'da Durum 6 için şebeke, evirici ve yük a fazının akım, gerilim sonuçları verilmektedir. Evirici toplam akım değeri yük grubunun talep ettiği güce eşit olduğu ayrıntılı olarak verilmektedir. Şebekeden doğrusal olmayan yük akımını talebini karşılayarak aynı zamanda küçük bir miktar şebekeye enerji akışı olmaktadır.



Şekil 5.79. Durum 6 için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı

Şekil 5.80'de Durum 6 için sırasıyla yük, evirici ve şebekenin her bir fazın akım sonuçları verilmektedir. Evirici faz başına yaklaşık olarak 8A değerinde akım üreterek yük grubunun talep ettiği kol başına 8A değerini karşılamaktadır. Şebeke ise burada hem tamamlayıcı görev yapmakta hem de şebekeye enerji akışı olmaktadır. Şekil 5.81'de Durum 6 için şebeke, evirici ve yükün ayrıntılı olarak akım, gerilim ve frekans değerleri verilmektedir. Eviricinin ürettiği akım ve gerilim şebeke ile senkron ve frekansı 50Hz'dir. Şekil 5.82'de Durum 6 için şebeke, evirici ve yükün güç, enerji,  $\cos\theta$  ve güç faktör verileri tablo olarak verilmektedir. Evirici toplamda 2820W aktif güç üretmektedir, yük grubu 2790W güç talep etmektedir ve kalan 30W şebekeye aktarılmaktadır. Şekil 5.83'te şebeke, evirici ve yük akımlarının harmonik bar grafiği verilmektedir. Evirici tarafından üretilen akım harmoniği %4,1 olarak ölçülmektedir. Sistemde doğrusal olmayan yük grubu olduğundan akım harmonik

değeri %17,2 olarak ölçülmektedir. Şekil 5.84'te Durum 6 için şebeke, evirici ve yük akımlarının harmonik değerleri her bir faz için ayrıntılı olarak tablo halinde verilmektedir.



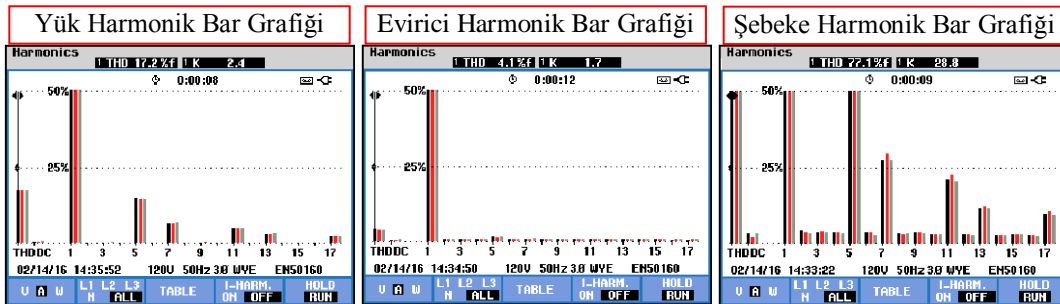
Şekil 5.80. Durum 6 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları

Yük V/A/Hz Tablosu					Evirici V/A/Hz Tablosu					Şebeke V/A/Hz Tablosu				
Volts/Amps/Hertz					Volts/Amps/Hertz					Volts/Amps/Hertz				
	L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N
U <sub>rms</sub>	117.4	117.2	117.5	15.3	U <sub>rms</sub>	117.2	117.1	117.3	14.6	U <sub>rms</sub>	116.6	116.5	116.9	14.9
U <sub>pk</sub>	169.1	169.3	169.1	67.6	U <sub>pk</sub>	169.1	168.7	168.7	59.0	U <sub>pk</sub>	168.4	168.4	168.5	57.8
CF	1.44	1.44	1.44	4.43	CF	1.44	1.44	1.44	4.05	CF	1.44	1.45	1.44	3.87
Hz	50.00				Hz	49.98				Hz	49.98			
A <sub>rms</sub>	7.9	8.0	7.9	1.1	A <sub>rms</sub>	8.1	7.9	8.1	1.2	A <sub>rms</sub>	1.4	1.3	1.3	1.2
A <sub>pk</sub>	8.9	8.8	8.9	1.2	A <sub>pk</sub>	13.0	12.8	12.7	2.9	A <sub>pk</sub>	5.2	5.0	5.0	2.7
CF	1.35	1.35	1.35	1.04	CF	1.60	1.61	1.56	2.30	CF	2.41	2.46	2.35	2.16

Şekil 5.81. Durum 6 için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu

Yük Güç ve Enerji Tablosu					Evirici Güç ve Enerji Tablosu					Şebeke Güç ve Enerji Tablosu				
Power & Energy					Power & Energy					Power & Energy				
	L1	L2	L3	Total		L1	L2	L3	Total		L1	L2	L3	Total
kW	0.93	0.93	0.93	2.79	kW	0.94	0.92	0.95	2.82	kW	-0.01	-0.00	-0.02	-0.03
kVA	0.93	0.93	0.93	2.80	kVA	0.95	0.93	0.95	2.83	kVA	0.16	0.15	0.15	0.46
kVARR	0.09	0.08	0.08	0.26	kVARR	0.09	0.08	0.08	0.26	kVARR	0.16	0.15	0.15	0.46
PF	1.00	1.00	1.00	1.00	PF	1.00	1.00	1.00	1.00	PF	-0.07	-0.02	-0.12	-0.07
cos <sup>2</sup>	1.00	1.00	1.00	1.00	cos <sup>2</sup>	1.00	1.00	1.00	1.00	cos <sup>2</sup>	-0.26	-0.08	-0.38	-0.38
A <sub>rms</sub>	7.9	7.9	7.9		A <sub>rms</sub>	8.1	7.9	8.1		A <sub>rms</sub>	1.3	1.3	1.3	
U <sub>rms</sub>	117.3	117.1	117.4		U <sub>rms</sub>	117.1	116.9	117.2		U <sub>rms</sub>	116.5	116.3	116.6	

Şekil 5.82. Durum 6 için 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji tablosu

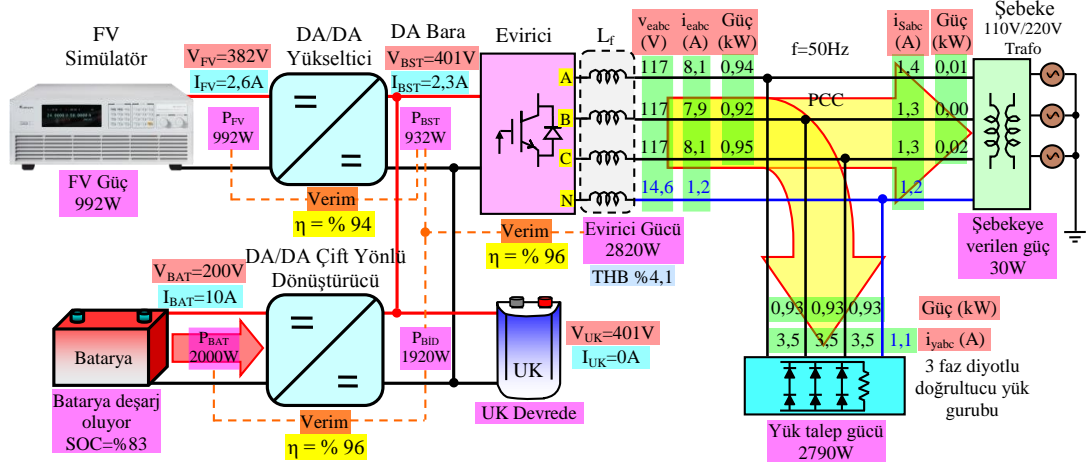


Şekil 5.83. Durum 6 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği

Yük Harmonik Tablosu					Evirici Harmonik Tablosu					Şebeke Harmonik Tablosu				
HARMONICS TABLE					HARMONICS TABLE					HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N	Amp	L1	L2	L3	N	Amp	L1	L2	L3	N
THD% <sub>f</sub>	17.0	17.1	17.1	44.4	THD% <sub>f</sub>	4.1	3.9	3.8	133.2	THD% <sub>f</sub>	77.3	81.4	77.0	188.4
H3% <sub>f</sub>	0.1	0.1	0.2	15.3	H3% <sub>f</sub>	0.8	0.8	0.7	43.9	H3% <sub>f</sub>	3.9	4.3	3.7	61.4
H5% <sub>f</sub>	14.5	14.6	14.4	12.9	H5% <sub>f</sub>	1.5	1.5	1.5	29.1	H5% <sub>f</sub>	64.9	67.8	64.9	38.4
H7% <sub>f</sub>	6.3	6.3	6.6	7.3	H7% <sub>f</sub>	0.8	0.8	0.8	24.8	H7% <sub>f</sub>	26.1	29.7	27.0	34.8
H9% <sub>f</sub>	0.2	0.2	0.1	6.5	H9% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.6	23.6	H9% <sub>f</sub>	4.3	4.0	3.4	31.2
H11% <sub>f</sub>	4.8	5.0	4.8	6.4	H11% <sub>f</sub>	0.7	0.6	0.6	23.4	H11% <sub>f</sub>	21.3	21.8	20.5	35.4
H13% <sub>f</sub>	2.9	2.8	3.0	6.7	H13% <sub>f</sub>	0.6	0.6	0.6	24.4	H13% <sub>f</sub>	12.0	11.7	11.8	27.3
H15% <sub>f</sub>	0.1	0.2	0.1	6.1	H15% <sub>f</sub>	0.6	0.6	0.5	19.3	H15% <sub>f</sub>	3.2	2.8	2.8	28.6

Şekil 5.84. Durum 6 için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu

Şekil 5.85'te Durum 1 ve Durum 2 için sistemde ölçülen bütün akım, gerilim, THB, güç ve DA/DA yükseltici, DA/DA çift yönlü dönüştürücü ve DA/AA evirici verim değerleri görülmektedir. FV paneller toplamda 992W enerji üretmektedir. DA/DA yükseltici güç devresi %94 verimle bu gücü DA baraya aktarmaktadır. DA/DA çift yönlü dönüştürücü devresi bataryayı 2000W gücünde deşarj ederek %96 verimle bu gücü DA baraya aktarmaktadır. Evirici DA/DA yükseltici ve DA/DA çift yönlü dönüştürücünden aldığı toplam 2852W'lık enerjiyi %96 güç devresi verimi ile yük grubuna vermektedir. Aynı zamanda eviricinin kol akımlarının THB değeri %4,1'dir. Yük grubunun talep gücü 2790W'tır, eviriciden kalan 30W güç farkı şebekeye aktarılmaktadır.

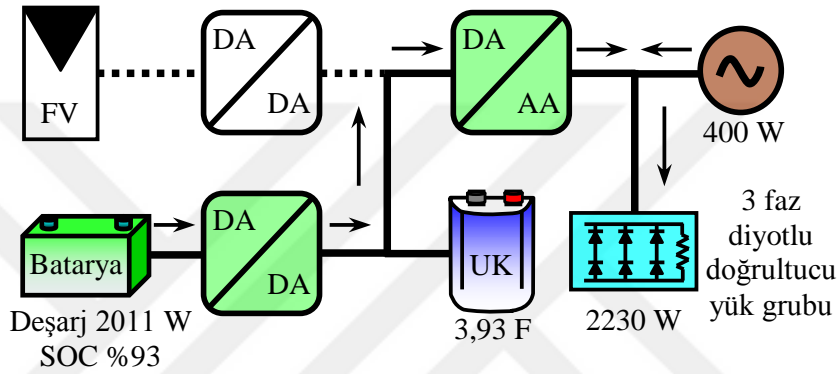


Şekil 5.85. Durum 6 için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti

## 5.8. Durum 7 ve Durum 8 $P_{FV}=0$ ve $P_{BAT}$ SOC Düşük/Yüksek Durumu

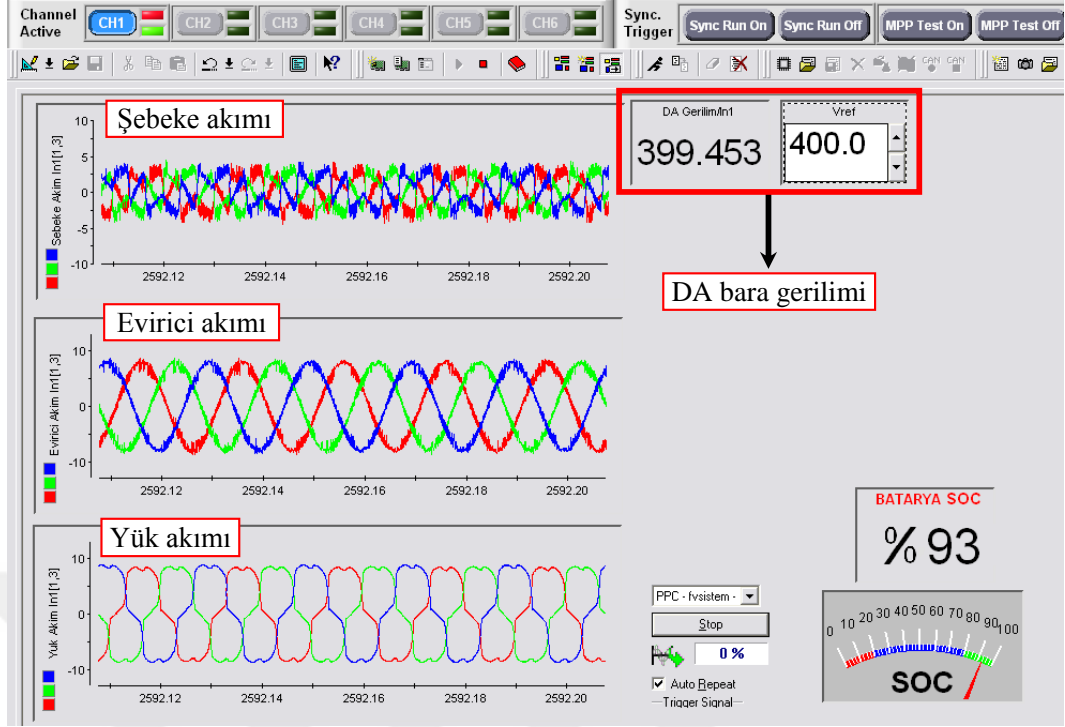
Durum 7 ve Durum 8  $P_{FV}=0$  ve  $P_{BAT}$  batarya doluluk durumu düşük/yüksek olduğu durum incelenmiştir ve bu durumların güç akış diyagramı sırasıyla Şekil 5.86'da verilmektedir. Bu iki durumda da FV panellerin gücü sıfırdır. Bu çalışma durumları

aslında sistemin gece olma durumunu ve havanın aşırı bulutlanma durumunu temsil etmektedir. FV panellerden üretilen enerji yeterli olmadığından sistem yük grubunun enerji ihtiyacını karşılamak için batarya grubunu devreye almaktadır. Batarya grubu deşarj olarak yük grubunu beslemektedir. Batarya grubunun doluluk oranı SOC %20 oranına geldiğinde batarya grubu da devre dışı kalarak yük grubunun talep ettiği enerji şebekeden karşılanmaktadır. Durum 7 ve Durum 8 arasındaki tek fark batarya grubunun doluluk oranının Durum 7’de düşük Durum 8’de yüksek olmasıdır. Bu yüzden tek bir deneysel çalışma ile iki durum için çalışma şartları incelenmiştir.



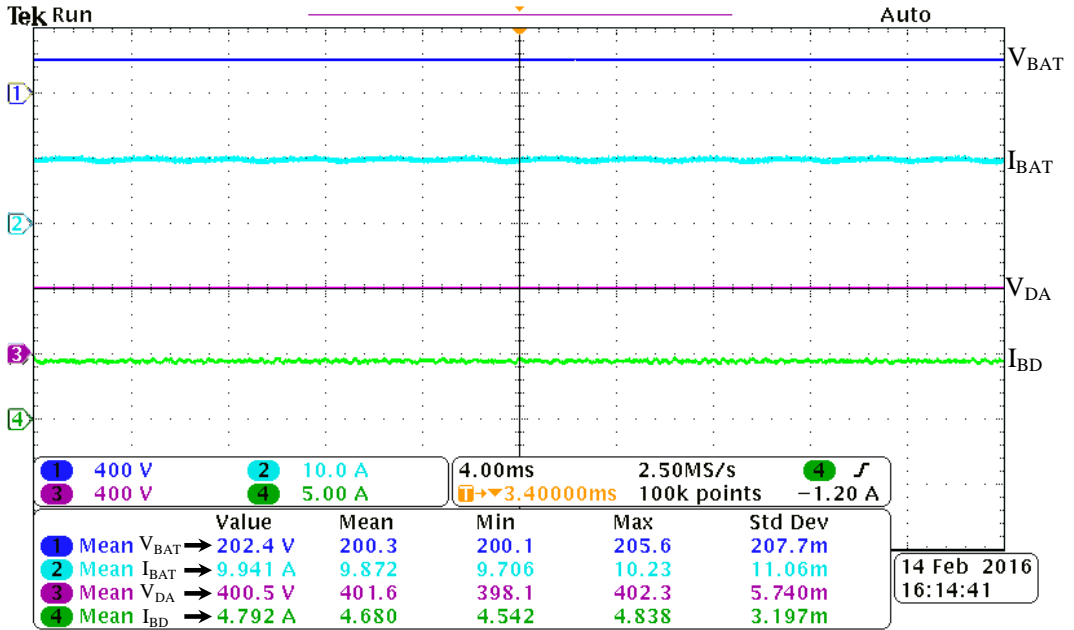
Şekil 5.86. Durum 7-8 için deneysel güç akış diyagramı

Şekil 5.87’de Durum 7-8 için dSpace ControlDesk program arayüzü verilmektedir. Durum 7-8’de evirici akımları sadece batarya grubunun aktardığı güç ile sağlanmaktadır. Akıllı enerji yönetim algoritması gerekli yük talep gücünü doğru bir şekilde hesaplayarak şebekeden enerji almadan yük talep önceliğini karşılamaktadır. Fakat yük grubunun talep ettiği güç miktarı batarya grubu için belirlenen maksimum deşarj akım seviyesini geçmesi durumunda akıllı enerji yönetim algoritması batarya grubunun deşarj akımını sınırlamaktadır. Batarya grubunun sağlığı açısından maksimum deşarj akım değeri 10A olarak belirlenmiştir. Yük grubunun talep ettiği fazla güç miktarı şebekeden sağlanmaktadır. Batarya grubunun doluluk durumu SOC Durum 7-8 için %93 olarak hesaplanmıştır ve deşarj oldukça bu değer azalmaktadır. Batarya grubunun doluluk durumu SOC %20’nin altına düştüğünde akıllı enerji yönetim algoritması bataryanın daha fazla deşarj olarak zarar görmemesi için batarya grubunu devreden çıkartmaktadır.



Şekil 5.87. Durum 7-8 için ControlDesk şebeke, evirici, yük akım ekranı

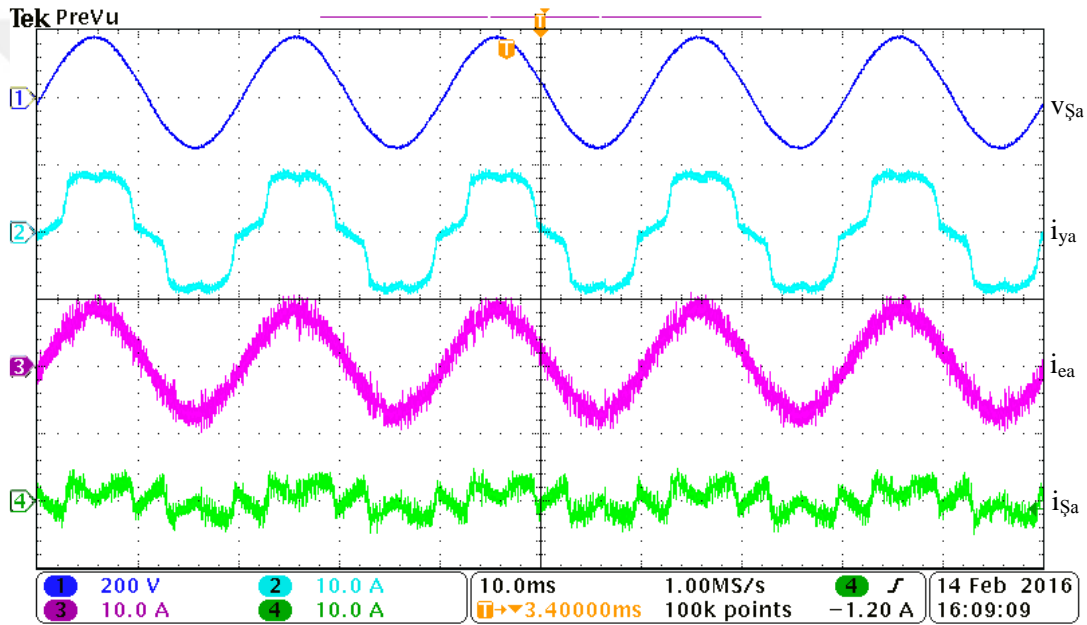
Şekil 5.88’de Durum 7-8 için batarya akım, gerilimi, DA/DA çift yönlü dönüştürücü akım, gerilim osiloskop ekranı görülmektedir. Durum 7-8’de DA/DA çift yönlü dönüştürücü yükseltici modunda çalışarak batarya grubunun deşarj olmasını sağlamaktadır.



Şekil 5.88. Durum 7-8 için DA/DA çift yönlü dönüştürücü giriş/çıkış akım gerilimleri

Batarya grubunun %93'lük doluluk oranında terminal uçlarındaki gerilimi yaklaşık olarak 202V'tur. Batarya grubu yaklaşık olarak 2011W gücünde deşarj edilmektedir. DA/DA çift yönlü dönüştürücünün çıkış gücü  $P_{BD}$  1916W ve giriş gücü  $P_{BAT}$  2011W olmakta ve bu durumda dönüştürücü güç verimi %95 olarak hesaplanmaktadır.

Şekil 5.89'da Durum 7-8 için şebeke, evirici ve yük a fazının akım, gerilim sonuçları verilmektedir. Durum 7-8'de yük grubunun talep ettiği doğrusal olmayan akım miktarı evirici tarafından karşılanmaktadır. Fakat yük grubunun talep ettiği güç miktarı fazla olduğundan kalan enerji şebekeden alındığı Şekil 5.89'da ayrıntılı olarak görülmektedir.

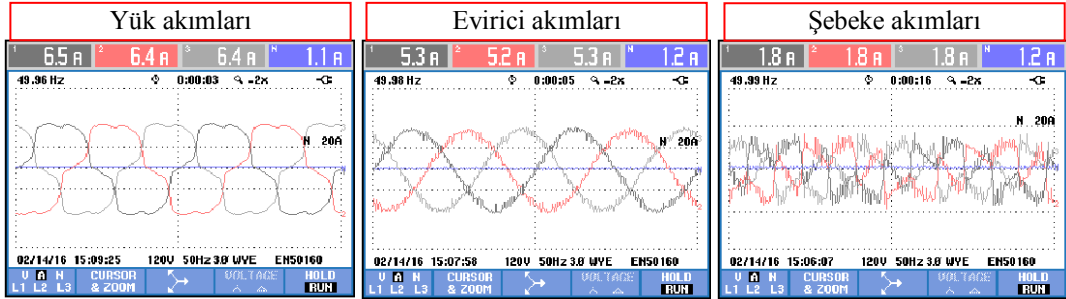


Şekil 5.89. Durum 7-8 için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı

Şekil 5.90'da Durum 7-8 için sırasıyla yük, evirici ve şebekenin her bir fazın akım sonuçları verilmektedir. Eviricinin kol akımları faz başına yaklaşık olarak 5,3A civarındadır. Yük grubunun talep ettiği güç miktarı ise faz başına 6,4A'dir ve aradaki fark akım miktarı şebekeden sağlanmaktadır. Şekil 5.91'de Durum 7-8 için şebeke, evirici ve yükün ayrıntılı olarak akım, gerilim ve frekans değerleri verilmektedir. Şekil 5.92'de Durum 7-8 için şebeke, evirici ve yükün güç, enerji,  $\cos\theta$  ve güç faktör verileri tablo olarak verilmektedir. Evirici tarafından toplamda 1830W güç üretilirken, yük grubu 2230W'lık güç talep etmektedir ve şebeke tarafından 400W'lık güç farkı yük grubuna aktarılmaktadır. Şekil 5.93'te şebeke, evirici ve yük akımlarının harmonik bar grafiği verilmektedir. Yük grubu 3 fazlı tam dalga RL



yüklü diyotlu doğrultucu olduğundan akım harmonik değeri %17,1 olarak ölçülmektedir. Şekil 5.94'te Durum 7-8 için şebeke, evirici ve yük akımlarının harmonik değerleri her bir faz için ayrıntılı olarak tablo halinde verilmektedir.



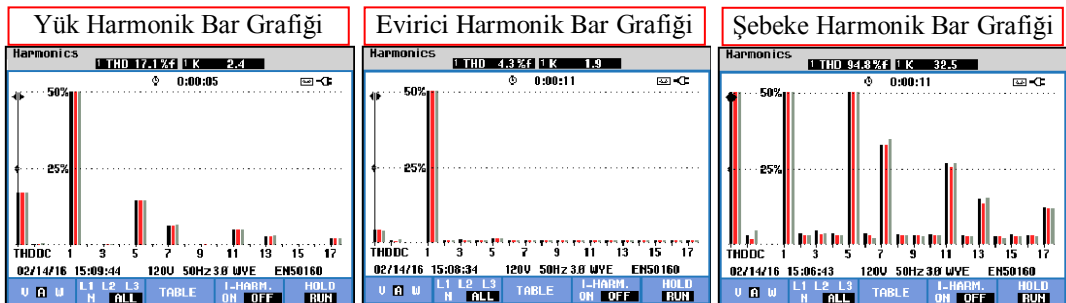
Şekil 5.90. Durum 7-8 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları

Yük V/A/Hz Tablosu					Evirici V/A/Hz Tablosu					Şebeke V/A/Hz Tablosu				
Volts/Amps/Hertz					Volts/Amps/Hertz					Volts/Amps/Hertz				
	L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N
U <sub>rms</sub>	116.5	116.4	116.9	17.1	U <sub>rms</sub>	116.7	116.5	116.9	16.2	U <sub>rms</sub>	116.5	116.3	116.8	16.8
U <sub>pk</sub>	166.8	167.1	167.2	69.8	U <sub>pk</sub>	167.9	166.5	166.3	52.4	U <sub>pk</sub>	166.9	166.2	167.6	62.6
CF	1.43	1.44	1.43	4.08	CF	1.44	1.43	1.42	3.23	CF	1.43	1.43	1.43	3.73
Hz	49.96				Hz	49.96				Hz	49.99			
A <sub>rms</sub>	6.4	6.5	6.5	1.1	A <sub>rms</sub>	5.3	5.2	5.3	1.2	A <sub>rms</sub>	1.7	1.7	1.7	1.2
A <sub>pk</sub>	8.7	8.6	8.7	1.2	A <sub>pk</sub>	8.8	8.3	8.3	2.6	A <sub>pk</sub>	3.8	3.8	4.1	2.5
CF	1.36	1.34	1.35	1.07	CF	1.67	1.59	1.56	2.07	CF	2.17	2.18	2.37	2.02

Şekil 5.91. Durum 7-8 için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu

Yük Güç ve Enerji Tablosu					Evirici Güç ve Enerji Tablosu					Şebeke Güç ve Enerji Tablosu				
Power & Energy					Power & Energy					Power & Energy				
	L1	L2	L3	Total		L1	L2	L3	Total		L1	L2	L3	Total
kW	0.75	0.74	0.74	2.23	kW	0.62	0.60	0.62	1.83	kW	0.13	0.14	0.13	0.40
kVA	0.75	0.74	0.75	2.25	kVA	0.62	0.60	0.62	1.84	kVA	0.20	0.20	0.20	0.61
kVAr	0.14	0.14	0.14	0.42	kVAr	0.06	0.06	0.05	0.17	kVAr	0.15	0.15	0.15	0.46
PF	0.98	0.98	0.98	0.98	PF	0.99	1.00	1.00	1.00	PF	0.65	0.68	0.65	0.66
cosφ	1.00	1.00	1.00		cosφ	1.00	1.00	1.00		cosφ	0.93	0.95	0.93	
A <sub>rms</sub>	6.4	6.4	6.5		A <sub>rms</sub>	5.3	5.2	5.3		A <sub>rms</sub>	1.7	1.7	1.7	
U <sub>rms</sub>	116.7	116.5	117.0		U <sub>rms</sub>	116.5	116.3	116.7		U <sub>rms</sub>	116.7	116.5	117.0	

Şekil 5.92. Durum 7-8 için 3 faz ve şebeke güç ve enerji tablosu

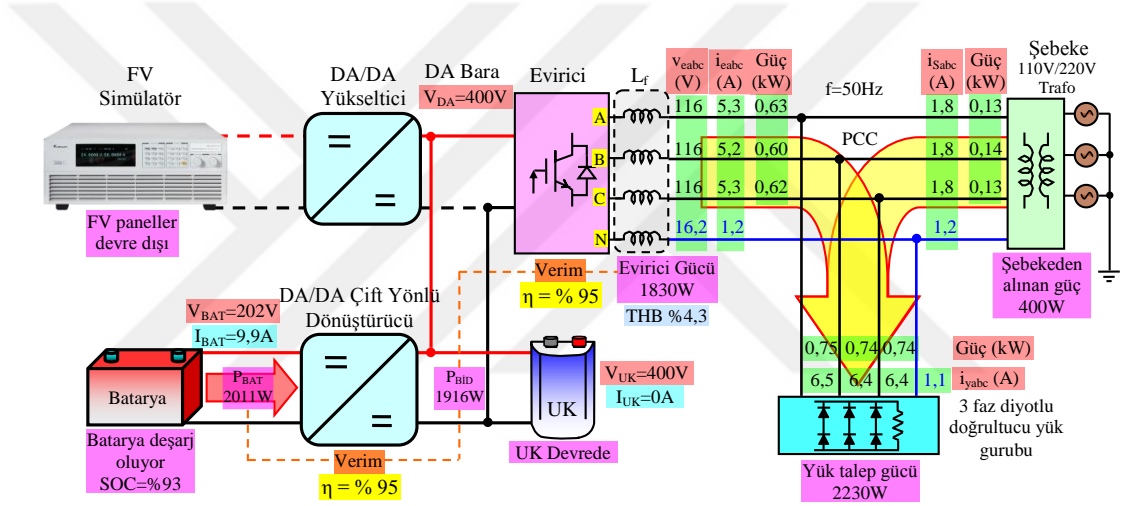


Şekil 5.93. Durum 7-8 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği

Yük Harmonik Tablosu					Evirici Harmonik Tablosu					Şebeke Harmonik Tablosu				
HARMONICS TABLE					HARMONICS TABLE					HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N	Amp	L1	L2	L3	N	Amp	L1	L2	L3	N
THD% <sub>f</sub>	17.0	17.1	17.1	37.0	4.3	4.1	4.0	191.6		94.6	90.7	93.2	271.8	
H3% <sub>f</sub>	0.2	0.2	0.3	10.5	0.9	0.7	0.7	79.3		4.8	3.2	3.3	118.3	
H5% <sub>f</sub>	14.5	14.5	14.4	9.6	1.6	1.5	1.5	30.9		79.9	76.4	78.2	49.2	
H7% <sub>f</sub>	6.3	6.3	6.6	6.7	0.9	0.8	0.8	33.6		33.4	32.7	34.7	45.2	
H9% <sub>f</sub>	0.2	0.3	0.1	5.5	0.7	0.6	0.6	29.8		3.1	2.6	2.7	43.7	
H11% <sub>f</sub>	4.9	5.0	4.8	6.8	0.7	0.7	0.6	30.2		26.5	26.1	26.0	40.9	
H13% <sub>f</sub>	2.9	2.8	3.0	6.0	0.6	0.6	0.6	27.1		14.6	13.4	14.0	42.2	
H15% <sub>f</sub>	0.1	0.2	0.1	4.9	0.6	0.6	0.6	29.9		2.8	2.6	2.7	39.8	

Şekil 5.94. Durum 7-8 için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu

Şekil 5.95'te Durum 7 ve Durum 8 için sistemde ölçülen bütün akım, gerilim, THB, güç ve DA/DA çift yönlü dönüştürücü, DA/AA evirici verim değerleri görülmektedir.



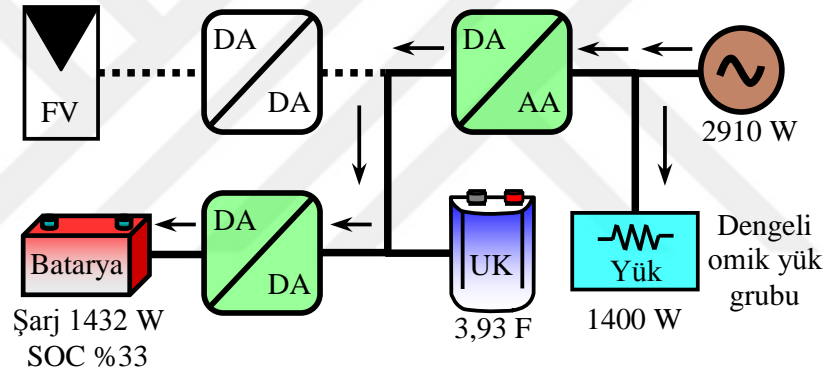
Şekil 5.95. Durum 7-8 için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti

FV panellerde güç olmadığından DA/DA yükseltici güç devresi devre dışıdır. DA/DA çift yönlü dönüştürücü devresi bataryayı 2011W gücünde deşarj ederek %95 verimle bu gücü DA baraya aktarmaktadır. Evirici, DA/DA çift yönlü dönüştürücünden aldığı 1916W'lık enerjiyi %95 güç devresi verimi ile yük grubuna vermektedir. Aynı zamanda eviricinin kol akımlarının THB değeri %4,3'tür. Yük grubunun talep gücü 2230W'tır, eviriciden kalan fark gücü 400W şebekeden yük grubuna aktarılmaktadır.

## 5.9. Durum 9 Şebekeden Batarya Grubunun Şarj Durumu

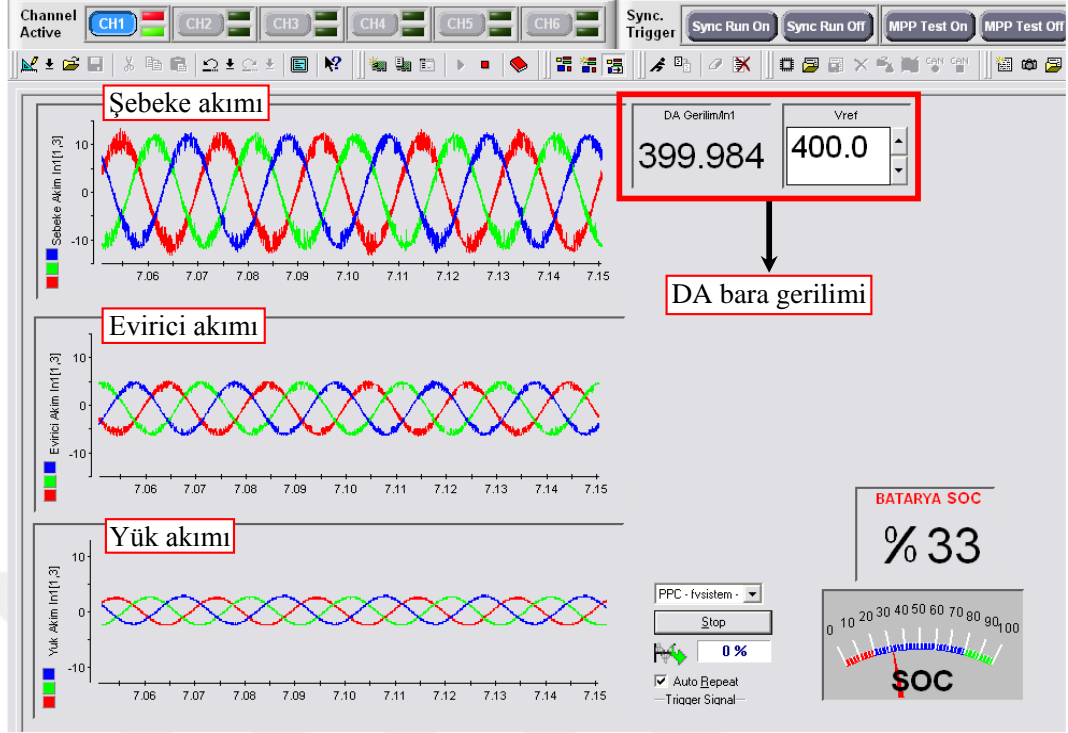
Durum 9'da P<sub>FV</sub>=0 ve P<sub>BAT</sub> batarya doluluk durumu düşük olduğu durum incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 5.96'da verilmektedir. Bu durumda FV panellerden güç üretilmemektedir ve gece modunu temsil etmektedir.

Sistemde bulunan batarya grubunun doluluk durumu SOC düşük seviyelerdedir. Durum 9’da gece elektrik enerjisinin ucuz olduğu tarifeli zaman dilimleri içerisinde şebeke tarafından batarya grubu şarj edilmektedir. Sistemde bulunan evirici ters yönde enerji akışı sağlayarak şebekeden aldığı AA enerjisini kontrollü doğrultucu modunda çalışarak çift yönlü DA/DA dönüştürücüsüne aktarır. Batarya grubu maksimum şarj akımı olan 6A ile şebekeden aldığı enerjiyle şarj olmaktadır. Eğer sisteme yük grubu bağlıysa şebeke aynı zamanda yük grubunu da beslemektedir. Böylelikle yük grubu hem şebekeden beslenerek çalışmakta hem de batarya grubu şarj edilmektedir. Batarya grubunun doluluk oranı SOC %95 seviyelerine geldiğinde bataryaları korumak adına şarj işlemi kesilmektedir. Böylece bataryalar aşırı şarj edilmeden sağlığı korunmuş olacaktır. Bunun yanı sıra şebekeden elektrik enerjisinin ucuz olduğu tarife ile de batarya grubu şarj edilecektir.



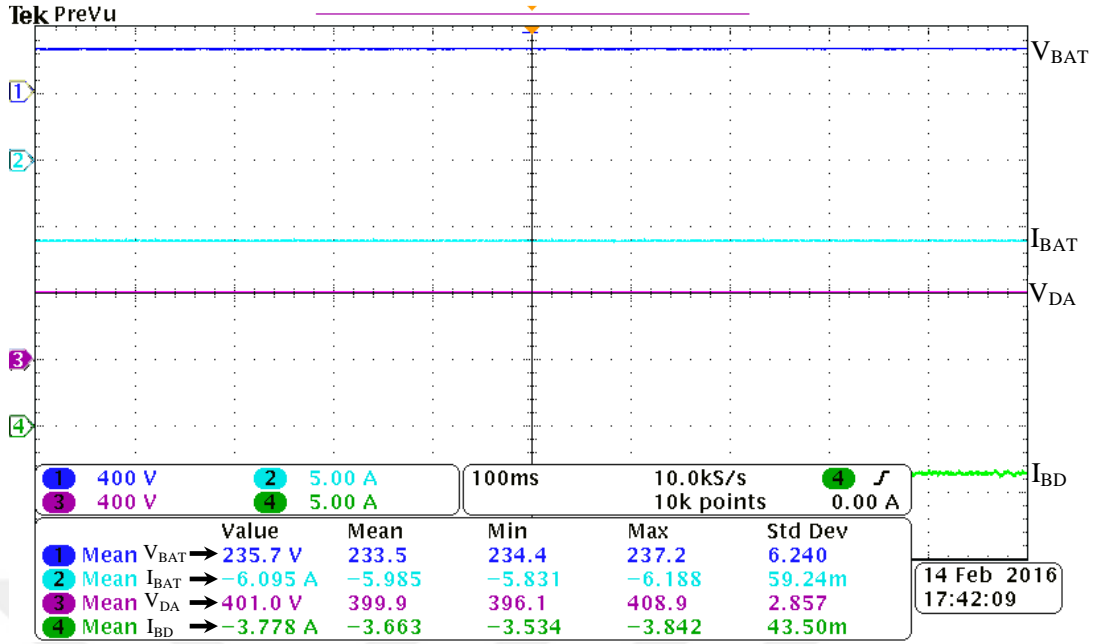
Şekil 5.96. Durum 9 için deneysel güç akış diyagramı

Şekil 5.97’de Durum 9 için dSpace ControlDesk program arayüzü verilmektedir. Durum 9’da evirici akımları şebekeden alınarak DA/DA çift yönlü dönüştürücüye aktarıldığından şebeke akımları ile ters yöndedir. Sistemde bulunan yük grubunun akımları ise şebeke ile aynı yönde olup şebeke tarafından beslenmektedir. Batarya grubunun doluluk durumu SOC Durum 9 için %33 olarak hesaplanmıştır ve şarj oldukça bu değer artmaktadır.



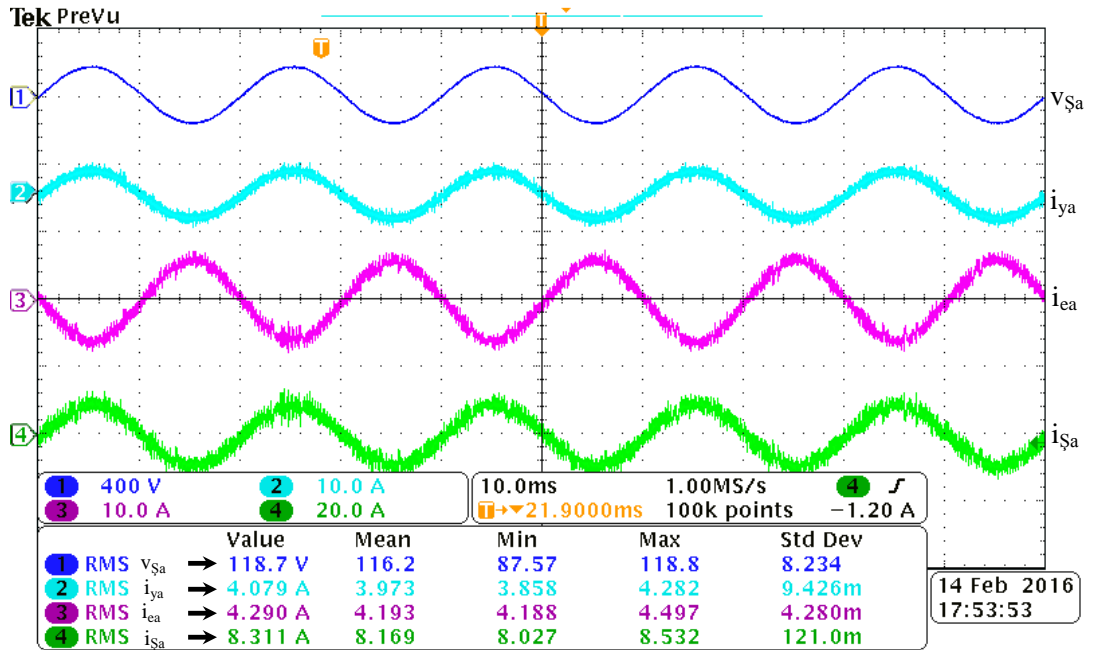
Şekil 5.97. Durum 9 için ControlDesk şebeke, evirici, yük akım ekranı

Şekil 5.98’de Durum 9 için batarya akım, gerilimi, DA/DA çift yönlü dönüştürücü akım, gerilim osiloskop ekranı görülmektedir. Durum 9’da DA/DA çift yönlü dönüştürücü düşürücü modunda çalışarak batarya grubunun şarj olmasını sağlamaktadır. Batarya grubunu şarj etmek için DA/DA çift yönlü dönüştürücü çıkış gerilimini şarj gerilim seviyesi olan 235V olarak ayarlamaktadır. Batarya grubu yaklaşık olarak 1432W gücünde şarj edilmektedir. DA/DA çift yönlü dönüştürücünün çıkış gücü  $P_{BD}$  1483W ve giriş gücü  $P_{BAT}$  1432W olmakta ve bu durumda dönüştürücü güç verimi %95 olarak hesaplanmaktadır.



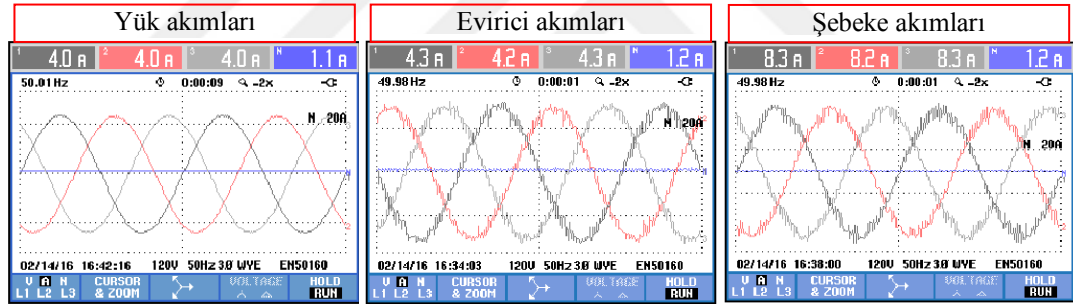
Şekil 5.98. Durum 9 için DA/DA çift yönlü dönüştürücü giriş/çıkış akım gerilimleri

Şekil 5.99’da Durum 9 için şebeke, evirici ve yük a fazının akım, gerilim sonuçları verilmektedir. Durum 9’da yük grubunun talep ettiği güç miktarı şebeke tarafından sağlanmaktadır. Evirici kontrollü doğrultucu modunda çalışarak batarya grubu için enerji sağlamaktadır. Evirici akımının şebekeye ters yönde çalıştığı Şekil 5.99’da ayrıntılı olarak görülmektedir. Yük akımının da şebeke ile aynı fazda olduğu görülmektedir.



Şekil 5.99. Durum 9 için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı

Şekil 5.100'de Durum 9 için sırasıyla yük, evirici ve şebekenin her bir fazın akım sonuçları verilmektedir. Eviricinin kol akımları faz başına yaklaşık olarak 4,2A civarındadır. Yük grubunun talep ettiği güç miktarı ise faz başına 4A'dır. Bu durumda şebeke hem yükü beslemekte hem de evirici için enerji sağlayarak her bir faz başına yaklaşık olarak 8,2A akım sağlanmaktadır. Şekil 5.101'de Durum 9 için şebeke, evirici ve yükün ayrıntılı olarak akım, gerilim ve frekans değerleri verilmektedir. Şekil 5.102'de Durum 9 için şebeke, evirici ve yükün güç, enerji,  $\cos\theta$  ve güç faktör verileri tablo olarak verilmektedir. Evirici tarafından toplamda 1510W güç, yük tarafından toplamda 1400W'lık güç talep edilmektedir ve şebeke her ikisini de besleyerek yaklaşık 2910W'lık güç aktarmaktadır. Şekil 5.103'te Durum 9 için şebeke, evirici ve yük akımlarının harmonik bar grafiği verilmektedir. Evirici kontrollü doğrultucu modunda çalışırken şebekeden %4,4'lük akım harmoniği çekmektedir. Şekil 5.104'te Durum 9 için şebeke, evirici ve yük akımlarının harmonik değerleri her bir faz için ayrıntılı olarak tablo halinde verilmektedir.



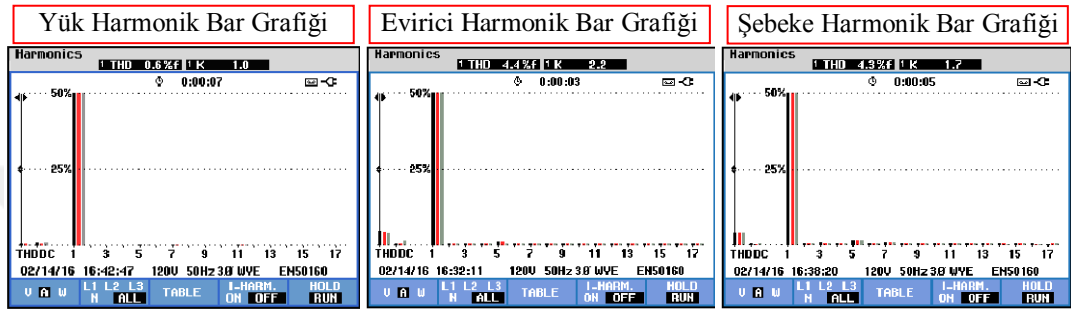
Şekil 5.100. Durum 9 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları

Yük V/A/Hz Tablosu					Evirici V/A/Hz Tablosu					Şebeke V/A/Hz Tablosu				
Volts/Amps/Hz					Volts/Amps/Hz					Volts/Amps/Hz				
	L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N
Urms	115.0	114.8	115.3	19.9	Urms	117.9	117.6	118.1	16.5	Urms	118.2	117.9	118.3	17.0
Upk	163.9	163.7	164.0	75.6	Upk	167.4	168.3	168.1	53.1	Upk	170.5	170.0	170.3	67.8
CF	1.43	1.43	1.42	3.79	CF	1.42	1.43	1.42	3.22	CF	1.44	1.44	1.44	4.00
Hz	50.02				Hz	49.98				Hz	49.97			
Arms	4.0	4.0	4.0	1.1	Arms	4.3	4.2	4.3	1.2	Arms	8.3	8.2	8.3	1.3
Apk	4.9	4.8	4.8	1.1	Apk	6.9	6.7	6.9	2.3	Apk	13.4	13.2	13.1	2.8
CF	1.44	1.44	1.44	1.06	CF	1.59	1.59	1.60	1.87	CF	1.62	1.61	1.58	2.25

Şekil 5.101. Durum 9 için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu

Yük Güç ve Enerji Tablosu	Evirici Güç ve Enerji Tablosu	Şebeke Güç ve Enerji Tablosu																																																																																																																																	
<b>Power &amp; Energy</b> FULL 0:00:07 <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>L1</th> <th>L2</th> <th>L3</th> <th>Total</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>kW</td> <td>0.46</td> <td>0.46</td> <td>0.46</td> <td>1.40</td> </tr> <tr> <td>kVA</td> <td>0.46</td> <td>0.46</td> <td>0.46</td> <td>1.40</td> </tr> <tr> <td>kVAR</td> <td>0.01</td> <td>0.01</td> <td>0.01</td> <td>0.02</td> </tr> <tr> <td>PF</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> </tr> <tr> <td>Cosφ</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> </tr> <tr> <td>Arms</td> <td>4.0</td> <td>4.0</td> <td>4.0</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>L1</th> <th>L2</th> <th>L3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Urms</td> <td>115.0</td> <td>114.9</td> <td>115.3</td> </tr> </tbody> </table> 02/14/16 16:43:13 120V 50Hz 3Ø WYE ENS0160 VOLTAGE ENERGY TREND HOLD RUN		L1	L2	L3	Total	kW	0.46	0.46	0.46	1.40	kVA	0.46	0.46	0.46	1.40	kVAR	0.01	0.01	0.01	0.02	PF	1.00	1.00	1.00	1.00	Cosφ	1.00	1.00	1.00	1.00	Arms	4.0	4.0	4.0			L1	L2	L3	Urms	115.0	114.9	115.3	<b>Power &amp; Energy</b> FULL 0:00:03 <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>L1</th> <th>L2</th> <th>L3</th> <th>Total</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>kW</td> <td>-0.51</td> <td>-0.50</td> <td>-0.51</td> <td>-1.51</td> </tr> <tr> <td>kVA</td> <td>0.51</td> <td>0.50</td> <td>0.51</td> <td>1.52</td> </tr> <tr> <td>kVAR</td> <td>±0.05</td> <td>±0.04</td> <td>±0.04</td> <td>±0.14</td> </tr> <tr> <td>PF</td> <td>-1.00</td> <td>-1.00</td> <td>-1.00</td> <td>-1.00</td> </tr> <tr> <td>Cosφ</td> <td>-1.00</td> <td>-1.00</td> <td>-1.00</td> <td>-1.00</td> </tr> <tr> <td>Arms</td> <td>4.3</td> <td>4.2</td> <td>4.3</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>L1</th> <th>L2</th> <th>L3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Urms</td> <td>118.2</td> <td>117.8</td> <td>118.3</td> </tr> </tbody> </table> 02/14/16 16:32:20 120V 50Hz 3Ø WYE ENS0160 VOLTAGE ENERGY TREND HOLD RUN		L1	L2	L3	Total	kW	-0.51	-0.50	-0.51	-1.51	kVA	0.51	0.50	0.51	1.52	kVAR	±0.05	±0.04	±0.04	±0.14	PF	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	Cosφ	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	Arms	4.3	4.2	4.3			L1	L2	L3	Urms	118.2	117.8	118.3	<b>Power &amp; Energy</b> FULL 0:00:04 <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>L1</th> <th>L2</th> <th>L3</th> <th>Total</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>kW</td> <td>0.97</td> <td>0.96</td> <td>0.98</td> <td>2.91</td> </tr> <tr> <td>kVA</td> <td>0.98</td> <td>0.96</td> <td>0.98</td> <td>2.92</td> </tr> <tr> <td>kVAR</td> <td>0.10</td> <td>0.09</td> <td>0.09</td> <td>0.28</td> </tr> <tr> <td>PF</td> <td>0.99</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> </tr> <tr> <td>Cosφ</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> </tr> <tr> <td>Arms</td> <td>8.3</td> <td>8.1</td> <td>8.3</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>L1</th> <th>L2</th> <th>L3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Urms</td> <td>118.6</td> <td>118.2</td> <td>118.6</td> </tr> </tbody> </table> 02/14/16 16:38:41 120V 50Hz 3Ø WYE ENS0160 VOLTAGE ENERGY TREND HOLD RUN		L1	L2	L3	Total	kW	0.97	0.96	0.98	2.91	kVA	0.98	0.96	0.98	2.92	kVAR	0.10	0.09	0.09	0.28	PF	0.99	1.00	1.00	1.00	Cosφ	1.00	1.00	1.00	1.00	Arms	8.3	8.1	8.3			L1	L2	L3	Urms	118.6	118.2	118.6
	L1	L2	L3	Total																																																																																																																															
kW	0.46	0.46	0.46	1.40																																																																																																																															
kVA	0.46	0.46	0.46	1.40																																																																																																																															
kVAR	0.01	0.01	0.01	0.02																																																																																																																															
PF	1.00	1.00	1.00	1.00																																																																																																																															
Cosφ	1.00	1.00	1.00	1.00																																																																																																																															
Arms	4.0	4.0	4.0																																																																																																																																
	L1	L2	L3																																																																																																																																
Urms	115.0	114.9	115.3																																																																																																																																
	L1	L2	L3	Total																																																																																																																															
kW	-0.51	-0.50	-0.51	-1.51																																																																																																																															
kVA	0.51	0.50	0.51	1.52																																																																																																																															
kVAR	±0.05	±0.04	±0.04	±0.14																																																																																																																															
PF	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00																																																																																																																															
Cosφ	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00																																																																																																																															
Arms	4.3	4.2	4.3																																																																																																																																
	L1	L2	L3																																																																																																																																
Urms	118.2	117.8	118.3																																																																																																																																
	L1	L2	L3	Total																																																																																																																															
kW	0.97	0.96	0.98	2.91																																																																																																																															
kVA	0.98	0.96	0.98	2.92																																																																																																																															
kVAR	0.10	0.09	0.09	0.28																																																																																																																															
PF	0.99	1.00	1.00	1.00																																																																																																																															
Cosφ	1.00	1.00	1.00	1.00																																																																																																																															
Arms	8.3	8.1	8.3																																																																																																																																
	L1	L2	L3																																																																																																																																
Urms	118.6	118.2	118.6																																																																																																																																

Şekil 5.102. Durum 9 için 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji tablosu

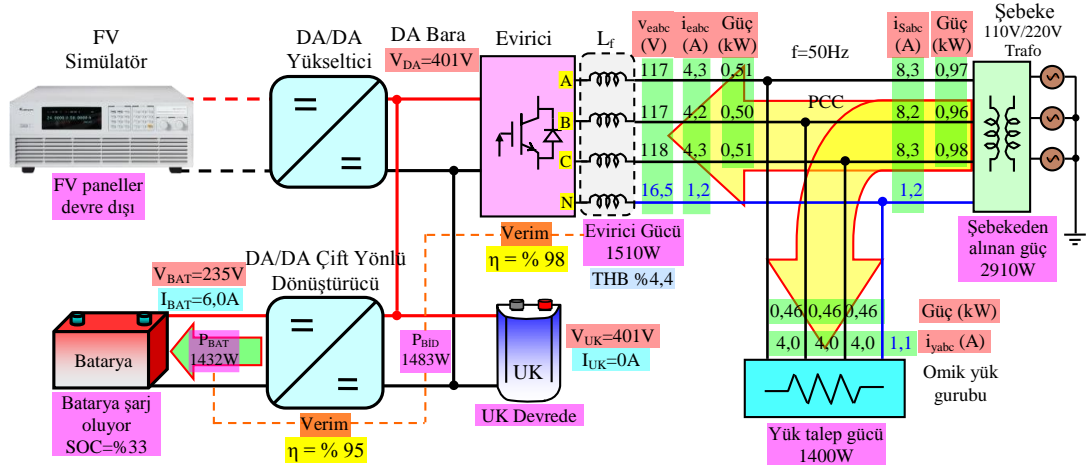


Şekil 5.103. Durum 9 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği

Yük Harmonik Tablosu	Evirici Harmonik Tablosu	Şebeke Harmonik Tablosu																																																																																																																																							
<b>HARMONICS TABLE</b> 0:00:03 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Amp</th> <th>L1</th> <th>L2</th> <th>L3</th> <th>N</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>THD%<sub>f</sub></td> <td>0.6</td> <td>0.6</td> <td>0.5</td> <td>29.4</td> </tr> <tr> <td>H3%<sub>f</sub></td> <td>0.1</td> <td>0.1</td> <td>0.1</td> <td>7.7</td> </tr> <tr> <td>H5%<sub>f</sub></td> <td>0.3</td> <td>0.1</td> <td>0.2</td> <td>4.3</td> </tr> <tr> <td>H7%<sub>f</sub></td> <td>0.3</td> <td>0.3</td> <td>0.1</td> <td>3.7</td> </tr> <tr> <td>H9%<sub>f</sub></td> <td>0.1</td> <td>0.2</td> <td>0.1</td> <td>10.5</td> </tr> <tr> <td>H11%<sub>f</sub></td> <td>0.2</td> <td>0.3</td> <td>0.2</td> <td>4.2</td> </tr> <tr> <td>H13%<sub>f</sub></td> <td>0.1</td> <td>0.1</td> <td>0.1</td> <td>4.0</td> </tr> <tr> <td>H15%<sub>f</sub></td> <td>0.1</td> <td>0.1</td> <td>0.1</td> <td>4.3</td> </tr> </tbody> </table> 02/14/16 16:42:57 120V 50Hz 3Ø WYE ENS0160 V A W U&A BACK TREND HOLD RUN	Amp	L1	L2	L3	N	THD% <sub>f</sub>	0.6	0.6	0.5	29.4	H3% <sub>f</sub>	0.1	0.1	0.1	7.7	H5% <sub>f</sub>	0.3	0.1	0.2	4.3	H7% <sub>f</sub>	0.3	0.3	0.1	3.7	H9% <sub>f</sub>	0.1	0.2	0.1	10.5	H11% <sub>f</sub>	0.2	0.3	0.2	4.2	H13% <sub>f</sub>	0.1	0.1	0.1	4.0	H15% <sub>f</sub>	0.1	0.1	0.1	4.3	<b>HARMONICS TABLE</b> 0:00:18 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Amp</th> <th>L1</th> <th>L2</th> <th>L3</th> <th>N</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>THD%<sub>f</sub></td> <td>4.4</td> <td>4.1</td> <td>4.0</td> <td>172.2</td> </tr> <tr> <td>H3%<sub>f</sub></td> <td>0.8</td> <td>0.6</td> <td>0.6</td> <td>51.3</td> </tr> <tr> <td>H5%<sub>f</sub></td> <td>0.8</td> <td>0.8</td> <td>0.7</td> <td>24.4</td> </tr> <tr> <td>H7%<sub>f</sub></td> <td>0.7</td> <td>0.6</td> <td>0.6</td> <td>27.3</td> </tr> <tr> <td>H9%<sub>f</sub></td> <td>0.7</td> <td>0.7</td> <td>0.7</td> <td>25.2</td> </tr> <tr> <td>H11%<sub>f</sub></td> <td>0.7</td> <td>0.6</td> <td>0.7</td> <td>28.1</td> </tr> <tr> <td>H13%<sub>f</sub></td> <td>0.7</td> <td>0.6</td> <td>0.7</td> <td>25.9</td> </tr> <tr> <td>H15%<sub>f</sub></td> <td>0.6</td> <td>0.6</td> <td>0.7</td> <td>27.3</td> </tr> </tbody> </table> 02/14/16 16:31:56 120V 50Hz 3Ø WYE ENS0160 V A W U&A BACK TREND HOLD RUN	Amp	L1	L2	L3	N	THD% <sub>f</sub>	4.4	4.1	4.0	172.2	H3% <sub>f</sub>	0.8	0.6	0.6	51.3	H5% <sub>f</sub>	0.8	0.8	0.7	24.4	H7% <sub>f</sub>	0.7	0.6	0.6	27.3	H9% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.7	25.2	H11% <sub>f</sub>	0.7	0.6	0.7	28.1	H13% <sub>f</sub>	0.7	0.6	0.7	25.9	H15% <sub>f</sub>	0.6	0.6	0.7	27.3	<b>HARMONICS TABLE</b> 0:00:12 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Amp</th> <th>L1</th> <th>L2</th> <th>L3</th> <th>N</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>THD%<sub>f</sub></td> <td>4.4</td> <td>4.2</td> <td>4.0</td> <td>133.5</td> </tr> <tr> <td>H3%<sub>f</sub></td> <td>0.9</td> <td>0.8</td> <td>0.7</td> <td>47.0</td> </tr> <tr> <td>H5%<sub>f</sub></td> <td>1.9</td> <td>1.8</td> <td>1.7</td> <td>29.7</td> </tr> <tr> <td>H7%<sub>f</sub></td> <td>0.8</td> <td>0.9</td> <td>0.9</td> <td>22.7</td> </tr> <tr> <td>H9%<sub>f</sub></td> <td>0.8</td> <td>0.7</td> <td>0.6</td> <td>25.4</td> </tr> <tr> <td>H11%<sub>f</sub></td> <td>0.7</td> <td>0.7</td> <td>0.7</td> <td>21.8</td> </tr> <tr> <td>H13%<sub>f</sub></td> <td>0.7</td> <td>0.6</td> <td>0.7</td> <td>20.6</td> </tr> <tr> <td>H15%<sub>f</sub></td> <td>0.6</td> <td>0.6</td> <td>0.5</td> <td>21.3</td> </tr> </tbody> </table> 02/14/16 16:38:27 120V 50Hz 3Ø WYE ENS0160 V A W U&A BACK TREND HOLD RUN	Amp	L1	L2	L3	N	THD% <sub>f</sub>	4.4	4.2	4.0	133.5	H3% <sub>f</sub>	0.9	0.8	0.7	47.0	H5% <sub>f</sub>	1.9	1.8	1.7	29.7	H7% <sub>f</sub>	0.8	0.9	0.9	22.7	H9% <sub>f</sub>	0.8	0.7	0.6	25.4	H11% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.7	21.8	H13% <sub>f</sub>	0.7	0.6	0.7	20.6	H15% <sub>f</sub>	0.6	0.6	0.5	21.3
Amp	L1	L2	L3	N																																																																																																																																					
THD% <sub>f</sub>	0.6	0.6	0.5	29.4																																																																																																																																					
H3% <sub>f</sub>	0.1	0.1	0.1	7.7																																																																																																																																					
H5% <sub>f</sub>	0.3	0.1	0.2	4.3																																																																																																																																					
H7% <sub>f</sub>	0.3	0.3	0.1	3.7																																																																																																																																					
H9% <sub>f</sub>	0.1	0.2	0.1	10.5																																																																																																																																					
H11% <sub>f</sub>	0.2	0.3	0.2	4.2																																																																																																																																					
H13% <sub>f</sub>	0.1	0.1	0.1	4.0																																																																																																																																					
H15% <sub>f</sub>	0.1	0.1	0.1	4.3																																																																																																																																					
Amp	L1	L2	L3	N																																																																																																																																					
THD% <sub>f</sub>	4.4	4.1	4.0	172.2																																																																																																																																					
H3% <sub>f</sub>	0.8	0.6	0.6	51.3																																																																																																																																					
H5% <sub>f</sub>	0.8	0.8	0.7	24.4																																																																																																																																					
H7% <sub>f</sub>	0.7	0.6	0.6	27.3																																																																																																																																					
H9% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.7	25.2																																																																																																																																					
H11% <sub>f</sub>	0.7	0.6	0.7	28.1																																																																																																																																					
H13% <sub>f</sub>	0.7	0.6	0.7	25.9																																																																																																																																					
H15% <sub>f</sub>	0.6	0.6	0.7	27.3																																																																																																																																					
Amp	L1	L2	L3	N																																																																																																																																					
THD% <sub>f</sub>	4.4	4.2	4.0	133.5																																																																																																																																					
H3% <sub>f</sub>	0.9	0.8	0.7	47.0																																																																																																																																					
H5% <sub>f</sub>	1.9	1.8	1.7	29.7																																																																																																																																					
H7% <sub>f</sub>	0.8	0.9	0.9	22.7																																																																																																																																					
H9% <sub>f</sub>	0.8	0.7	0.6	25.4																																																																																																																																					
H11% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.7	21.8																																																																																																																																					
H13% <sub>f</sub>	0.7	0.6	0.7	20.6																																																																																																																																					
H15% <sub>f</sub>	0.6	0.6	0.5	21.3																																																																																																																																					

Şekil 5.104. Durum 9 için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu

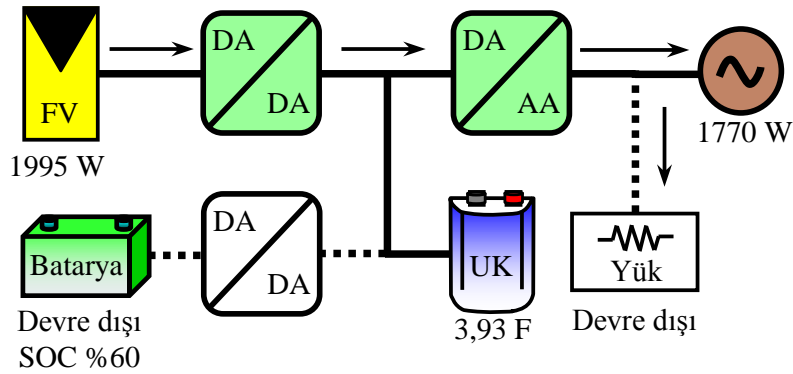
Şekil 5.105'te Durum 9 için sistemde ölçülen bütün akım, gerilim, THB, güç ve DA/DA çift yönlü dönüştürücü, DA/AA evirici verim değerleri görülmektedir. Gece modu olduğundan DA/DA yükseltici güç devresi devre dışıdır. DA/DA çift yönlü dönüştürücü devresi bataryayı 1432W gücünde şarj ederek %95 verimle bu gücü batarya grubuna aktarmaktadır. Evirici şebekeden aldığı 1510W'lık enerjiyi %98 güç devresi verimi ile DA/DA çift yönlü dönüştürücüsüne vermektedir. Aynı zamanda eviricinin kol akımlarının THB değeri %4,4'tür. Yük grubunun talep gücü 1400W'tır, şebeke hem yük grubuna hem de sisteme enerji akışı sağlayarak toplamda 2910W'lık güç akışını sisteme sağlamaktadır.



Şekil 5.105. Durum 9 için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti

### 5.10. Durum 10 $P_{YÜK}=0$ ve $P_{FV}$ Gücünün Şebekeye Aktarılma Durumu

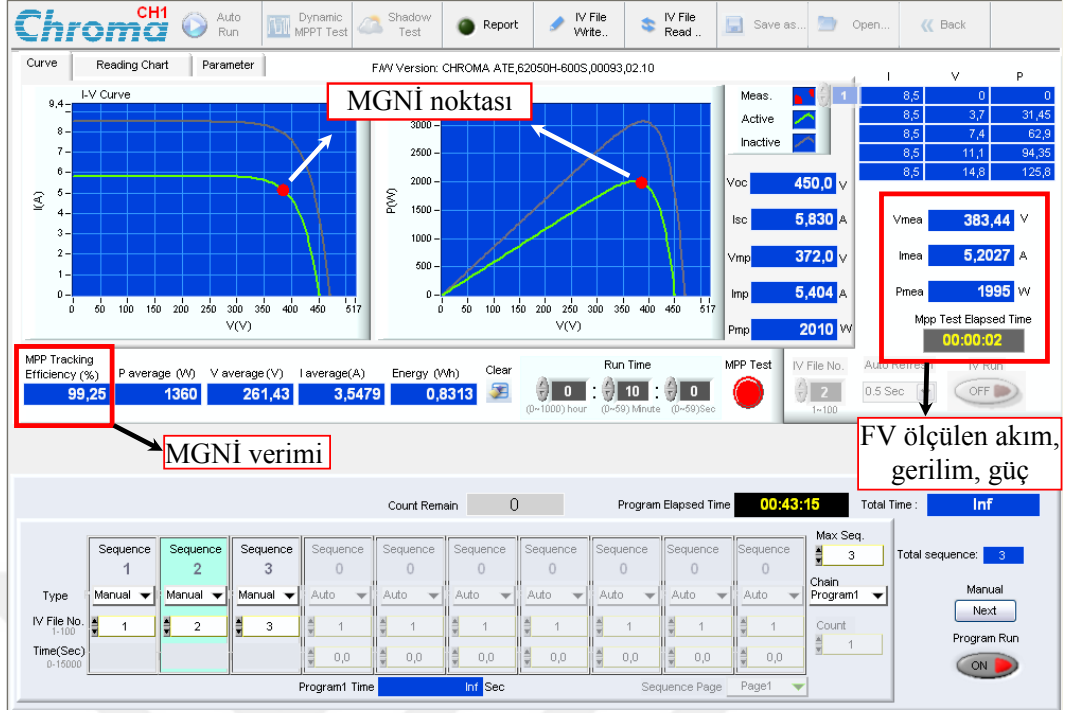
Durum 10'da  $P_{YÜK}=0$  ve  $P_{FV}$  panel gücünün sadece şebekeye aktarıldığı durum incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 5.106'da verilmektedir. Bu durumda sadece FV panel gücü vardır ve sistemde yük grubu olacak herhangi bir alıcı bulunmamaktadır. FV panellerinden üretilen gücün tamamı şebekeye senkron bir şekilde aktarılmaktadır.



Şekil 5.106. Durum 10 için deneysel güç akış diyagramı

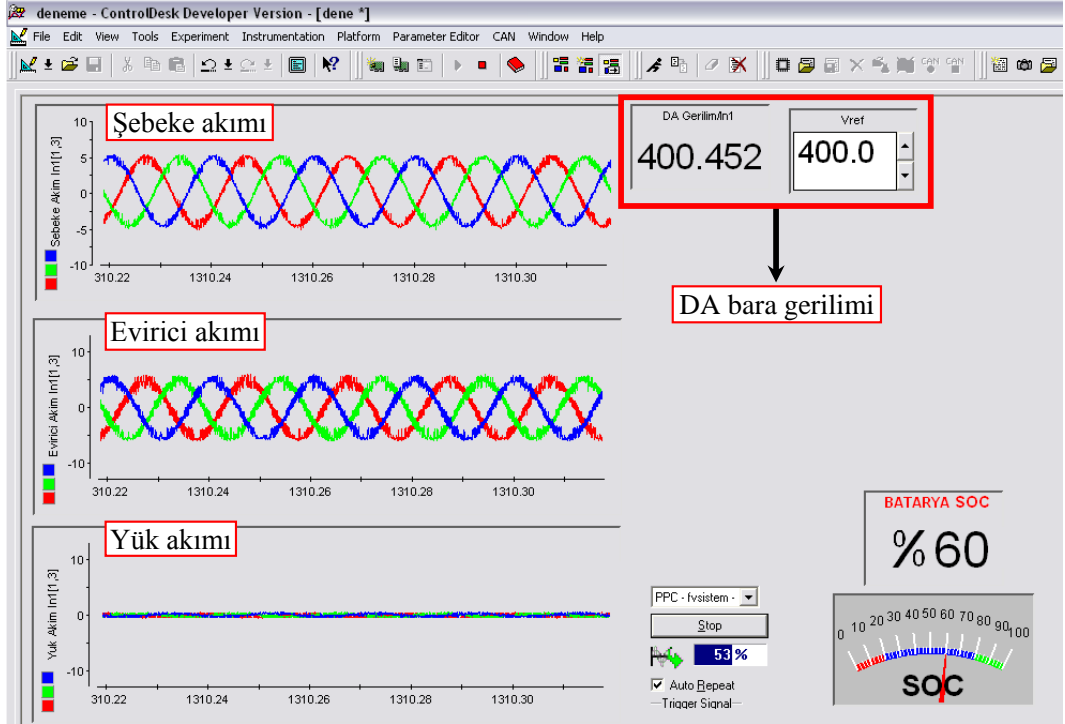
Şekil 5.107'de Durum 10 için Chroma FV panel simülatör ekranı verilmektedir. FV simülatör ekranına girilen FV panel verilerine göre 1995W'lık bir FV kaynak elde edilmiştir. Saptır-gözle algoritması FV panellerinden üretilen 1995W'lık gücü %99,25 gibi yüksek bir oranla takip etmektedir. FV panellerin MGN anında çalıştığı maksimum güç gerilimi  $V_{MG}$  383V, maksimum güç akımı  $I_{MG}$  5,2A olarak ölçülmektedir.





Şekil 5.107. Durum 10 için FV panel akım, gerilim güç değerleri

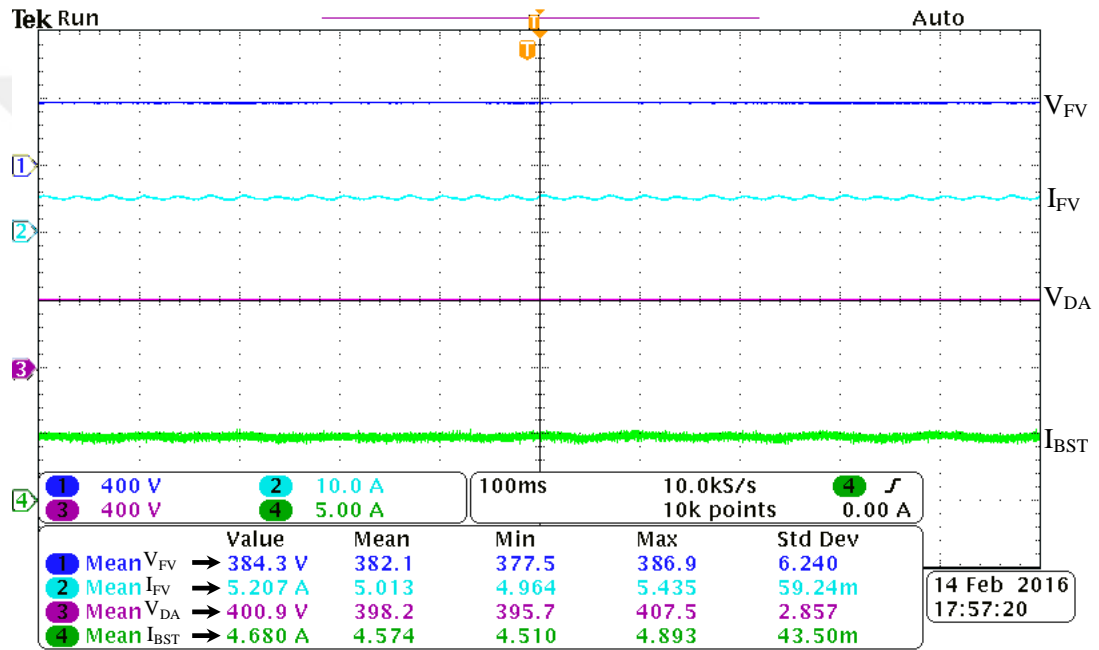
Şekil 5.108'de Durum 10 için dSpace ControlDesk program arayüzü verilmektedir. Durum 10'da sistemde yük grubu olmadığından evirici tarafından üretilen akımların tamamı şebekeye aktarılmaktadır.



Şekil 5.108. Durum 10 için ControlDesk şebeke, evirici, yük akım ekranı

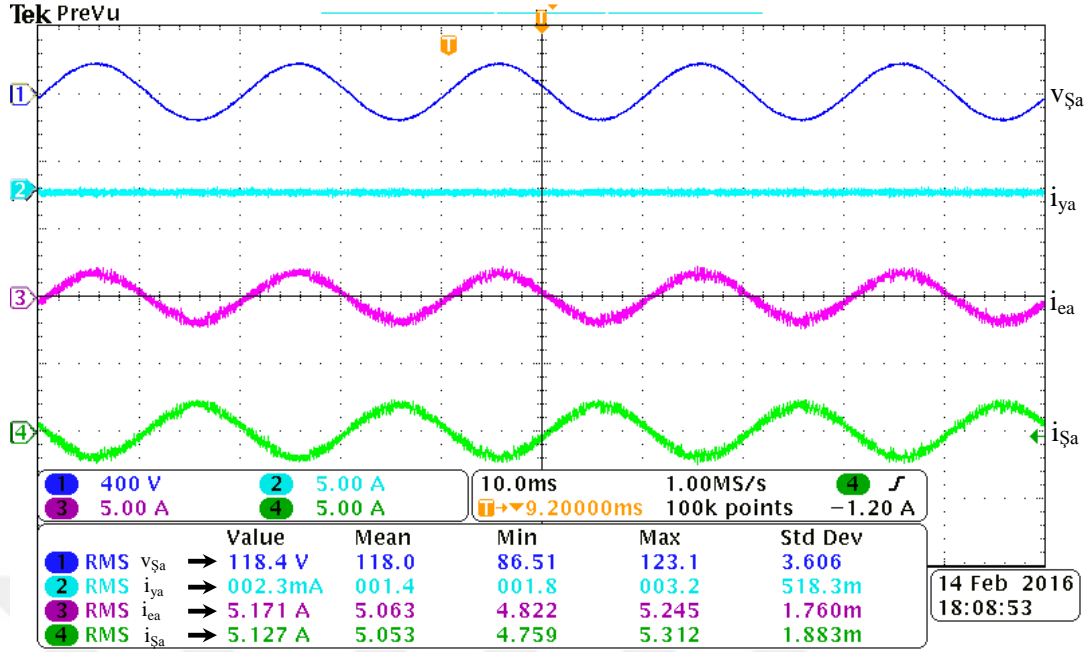
Evirici akımları şebekeye senkron bir şekilde aktarıldığı dSpace ControlDesk program arayüzü ile ayrıntılı olarak görülmektedir. Batarya grubunun doluluk durumu SOC Durum 10 için %60 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.109’da Durum 10 için FV panel gerilim, akım ve DA/DA yükseltici gerilim, akım osiloskop ekranı görülmektedir. FV panel çıkışındaki DA/DA yükseltici devresi MGNİ işlemini yerine getirerek 1874W’lık enerjiyi eviriciye aktarmaktadır. DA/DA yükseltici çıkış ve girişindeki güçler oranlandığında verimi %94 olarak hesaplanmaktadır.



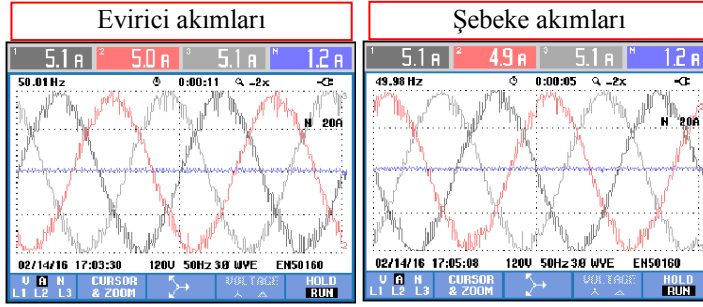
Şekil 5.109. Durum 10 için DA/DA yükseltici giriş/çıkış akım gerilimleri

Şekil 5.110’da Durum 10 için şebeke, evirici ve yük a fazının akım, gerilim sonuçları verilmektedir. Durum 10’da FV panellerden elde edilen gücün tamamı evirici ile şebekeye aktarılmaktadır. Şebeke akımının evirici akımına göre ters yönde olacak şekilde çalıştığı Şekil 5.110’da ayrıntılı olarak görülmektedir buda şebekeye enerji aktarıldığı anlamına gelmektedir.

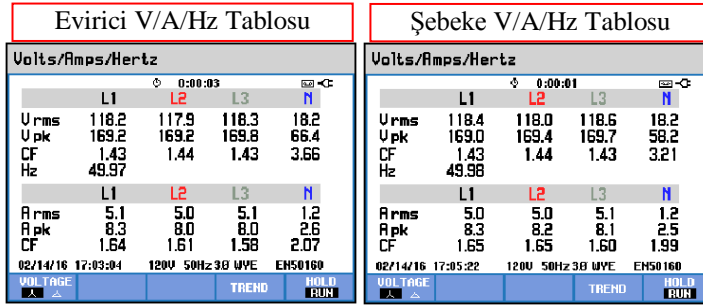


Şekil 5.110. Durum 10 için şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı

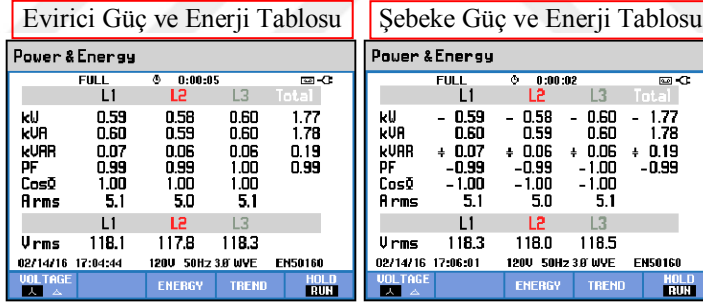
Şekil 5.111’de Durum 10 için sırasıyla evirici ve şebekenin her bir fazın akım sonuçları verilmektedir. Eviricinin kol akımları faz başına yaklaşık olarak 5A civarındadır. Yük grubunun talep ettiği güç miktarı ise faz başına 4A civarındadır. Bu durumda evirici akımlarının tamamı şebekeye aynı miktarda 4A olarak aktarılmaktadır. Şekil 5.112’de Durum 10 için şebeke ve eviricinin ayrıntılı olarak akım, gerilim ve frekans değerleri verilmektedir. Şekil 5.113’te Durum 10 için şebeke ve eviricinin güç, enerji,  $\cos\theta$  ve güç faktör verileri tablo olarak verilmektedir. Evirici tarafından toplamda 1770W’lık güç şebekeye aktarılmaktadır. Şekil 5.114’te şebeke ve evirici akımlarının harmonik bar grafiği verilmektedir. Evirici tarafından üretilen akım harmoniği %4,6 olarak ölçülmektedir. Şekil 5.115’te Durum 10 için şebeke ve evirici akımlarının harmonik değerleri her bir faz için ayrıntılı olarak tablo halinde verilmektedir.



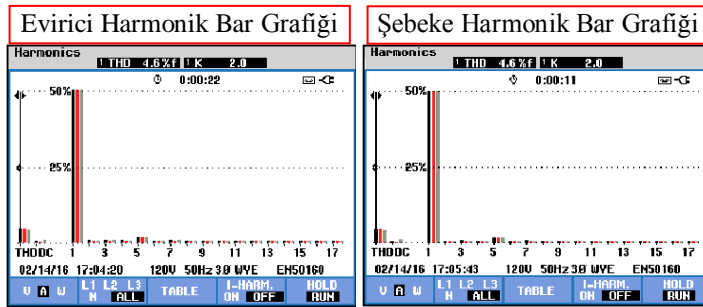
Şekil 5.111. Durum 10 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları



Şekil 5.112. Durum 10 için 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu



Şekil 5.113. Durum 10 için 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji tablosu

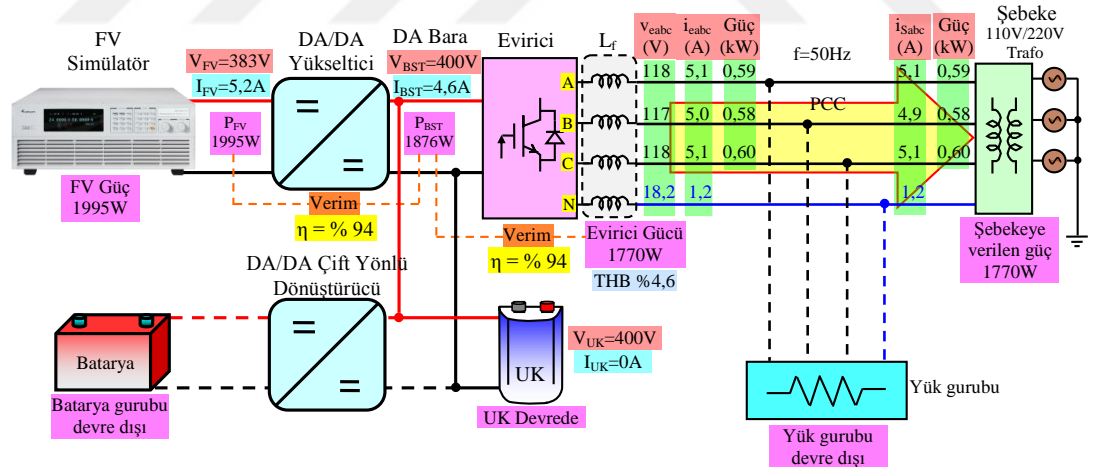


Şekil 5.114. Durum 10 için 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği

Evirici Harmonik Tablosu						Şebeke Harmonik Tablosu					
HARMONICS TABLE						HARMONICS TABLE					
Amp	L1	L2	L3	N		Amp	L1	L2	L3	N	
THD% <sub>f</sub>	4.6	4.4	4.3	199.2		THD% <sub>f</sub>	4.7	4.5	4.3	183.0	
H3% <sub>f</sub>	0.9	0.8	1.0	67.3		H3% <sub>f</sub>	0.8	0.8	0.8	63.6	
H5% <sub>f</sub>	1.6	1.6	1.6	36.3		H5% <sub>f</sub>	1.6	1.6	1.6	31.6	
H7% <sub>f</sub>	0.9	0.7	0.9	33.8		H7% <sub>f</sub>	1.0	0.9	0.9	29.9	
H9% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.7	34.9		H9% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.7	30.2	
H11% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.6	29.9		H11% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.6	29.1	
H13% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.7	27.9		H13% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.7	25.6	
H15% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.6	33.1		H15% <sub>f</sub>	0.7	0.6	0.7	29.6	

Şekil 5.115. Durum 10 için 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu

Şekil 5.116'da Durum 10 için sistemde ölçülen bütün akım, gerilim, THB, güç ve DA/DA yükseltici, DA/AA evirici verim değerleri görülmektedir. FV paneller tarafından üretilen güç 1995W'tır. DA/DA yükseltici güç devresi %94 verim ile 1874W'lık gücü eviriciye aktarmaktadır. DA/DA çift yönlü dönüştürücü devresi batarya grubu devrede olmadığından devre dışıdır. Evirici DA/DA yükseltici dönüştürücüsünden aldığı 1874W'lık enerjiyi %94 güç devresi verimi ile şebekeye aktarmaktadır. Eviricinin ürettiği kol akımlarının THB değeri %4,6'dır. Evirici üretmiş olduğu 1770W'lık enerjinin tamamını şebekeye aktarmaktadır.

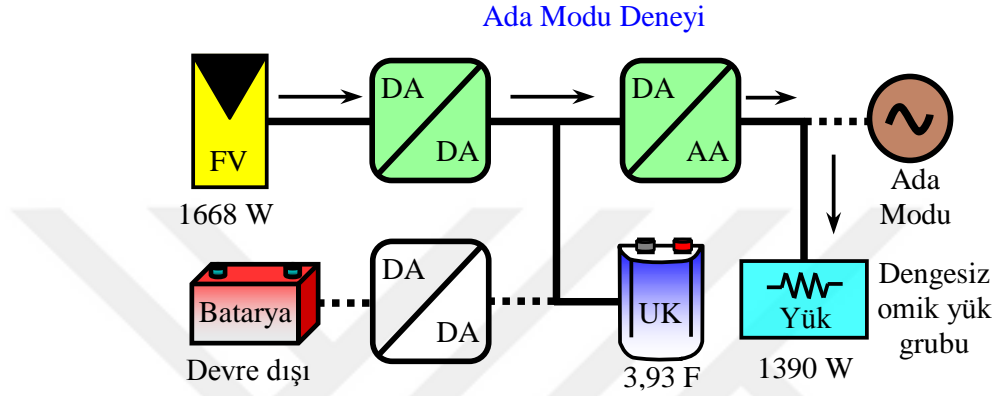


Şekil 5.116. Durum 10 için sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti

### 5.11. Ada Modu Deneysel Çalışması

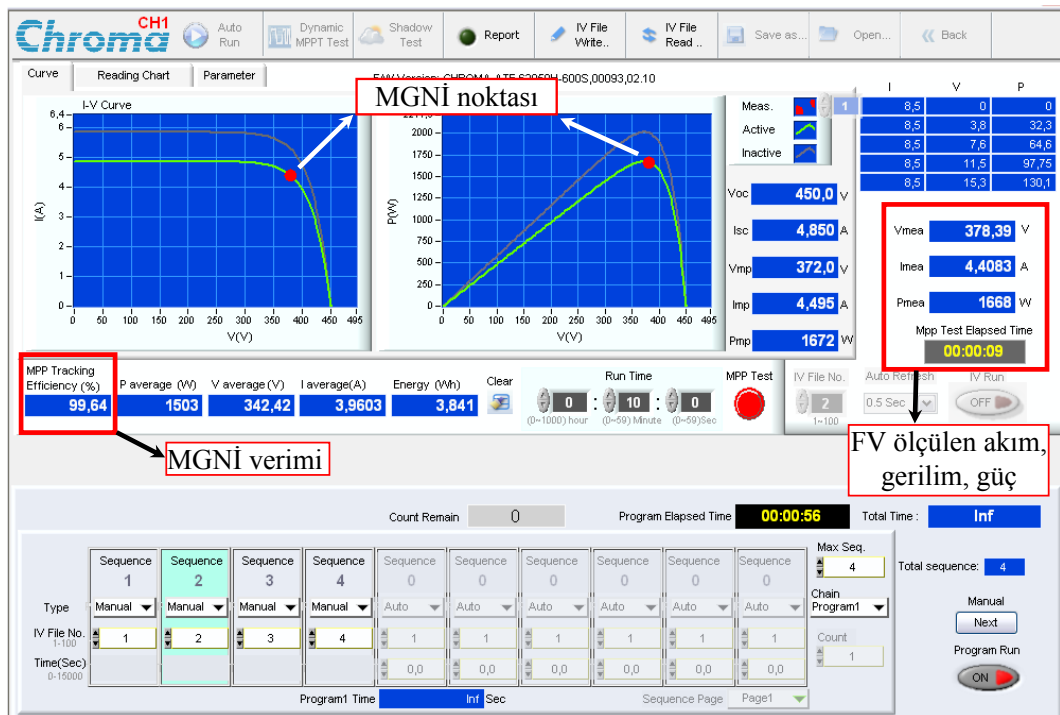
Bu deneysel çalışmada sistem şebekeden tamamen ayrılarak ada modunda çalışma durumu incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 5.117'de verilmektedir. Bu durumda FV panellerden üretilen güç sadece yükü beslemektedir. Eğer FV panellerin ürettiği güç yük grubunun talep ettiği güçten fazlaysa kalan enerji

batarya grubunun şarj olması için kullanılmaktadır. Bu ada modu deneysel çalışmasında FV panellerin gücü yük grubunun talep gücüne yaklaşık olarak eşittir. Ada modunda şebeke kesildiğinde yük grubunu şebeke olmadan da çalışma durumu incelenmiştir. Böylece şebeke olmadan da sistem kararlı bir şekilde çalışabilmektedir. Evirici kontrol algoritması ile şebeke frekansının aynı faz açıları üretilerek aynı şebeke frekansında evirici tarafından enerji akışı sağlanmaktadır.



Şekil 5.117. Ada modu çalışma durumunda güç akışı diyagramı

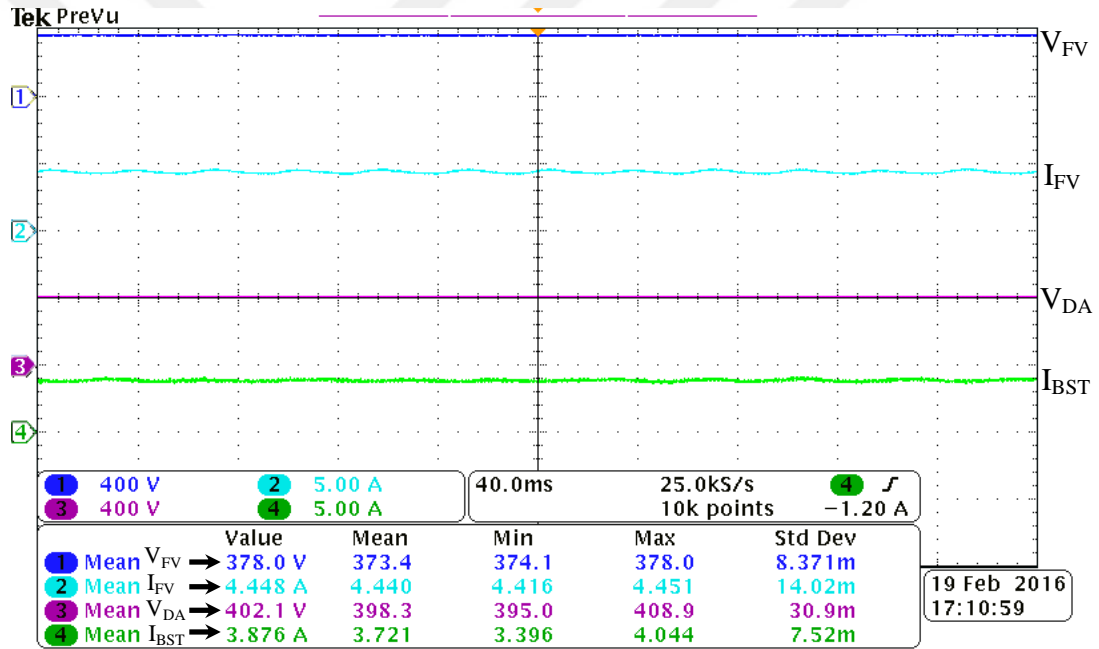
Şekil 5.118'de ada modu için Chroma FV panel simülör ekranı verilmektedir. FV simülör ekranına girilen FV panel verilerine göre 1668W'lık bir FV kaynak elde edilmiştir.



Şekil 5.118. Ada modunda FV panel akım, gerilim güç değerleri

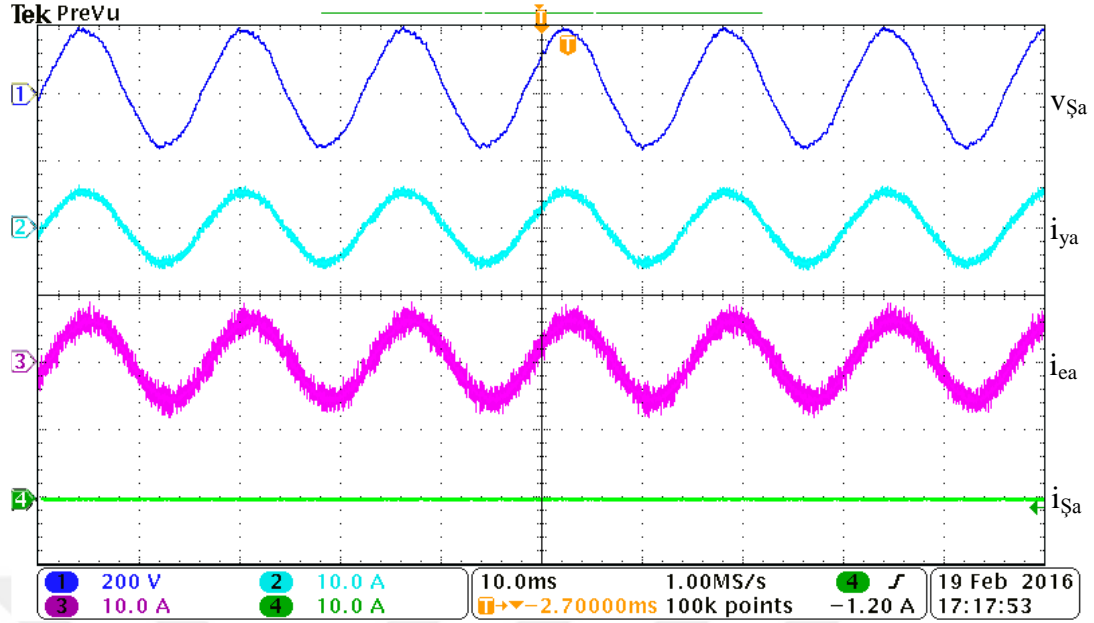
Saptır-gözle algoritması FV panellerinden üretilen 1668W'lık gücü %99,64 gibi yüksek bir oranla takip etmektedir. Saptır-gözle algoritmasının ada modu durumunda da kararlı ve hızlı çalıştığı gözlenmiştir. FV panellerin MGN anındaki çalıştığı maksimum güç gerilimi  $V_{MG}$  378V, maksimum güç akımı  $I_{MG}$  4,4A olarak ölçülmektedir.

Şekil 5.119'da ada modu için FV panel gerilim, akım ve DA/DA yükseltici gerilim, akım osiloskop ekranı görülmektedir. DA/DA yükseltici giriş ve çıkışındaki akım/gerilim değerleri ölçülerek DA/DA yükseltici verimi %93 olarak hesaplanmaktadır. DA/DA yükseltici çıkışı her zaman FV panelleri MGN'da olacak şekilde çalıştırmakta ve DA/DA yükseltici çıkış akımı  $I_{BST}$  akımı 3,87A olmaktadır.



Şekil 5.119. Ada modunda DA/DA yükseltici giriş/çıkış akım gerilimleri

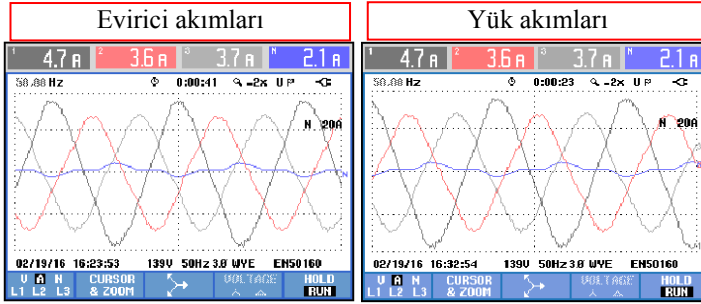
Şekil 5.120'de ada modu çalışma durumu için a fazının şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke ve yük akımlarının sonuçları verilmektedir. Ada modunda yük grubu olarak sisteme omik yük bağlanmıştır. Fakat sistemin dengesiz yükleri ada modunda da çalıştırdığını göstermek için a fazına ilave olarak 130W omik yük bağlanmıştır. Ada modunda eviricinin yükü beslediği Şekil 5.120'de ayrıntılı olarak görülmektedir.



Şekil 5.120. Ada modunda şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı

Şekil 5.121’de ada modu çalışma durumu için sırasıyla evirici ve yükün grubunun her bir faz akım sonuçları verilmektedir. FV panellerden elde edilen güç ile yük grubu beslenmektedir. Evirici faz başına yaklaşık 3,6A üretmektedir ve a fazında bulunan dengesiz yük akımı için 4,7A üreterek sistemin dengesiz yük gruplarının da çalışmasına imkân sağlamaktadır. Şekil 5.122’de ada modu çalışma durumu için yük ve eviricinin ayrıntılı olarak akım, gerilim ve frekans değerleri verilmektedir. Şekil 5.123’te ada modu çalışma durumu için yük ve eviricinin güç, enerji,  $\cos\theta$  ve güç faktör verileri tablo olarak verilmektedir. Sistemde dengesiz yük grubu olduğundan eviricinin 4. kolu olan nötr hattından 2,1A akmaktadır. Şekil 5.124’te ada modu çalışma durumu için yük ve evirici akımlarının harmonik bar grafiği verilmektedir. Evirici tarafından üretilen akım harmoniği %4,3 olarak ölçülmektedir ve bu akım harmonik değeri şebeke senkronizasyon standartlarında kabul edilen bir değerdedir. Şekil 5.125’te ada modu çalışma durumu için yük ve evirici akımlarının 3., 5., 7., 9., 11., 13. ve 15. harmonik değerleri her bir faz için ayrıntılı olarak tablo halinde verilmektedir. Sistem şebekeden bağımsız çalıştığından ve sadece omik yük grubu olduğundan PCC noktasında eviricinin ürettiği THB değeri gözükmemektedir.





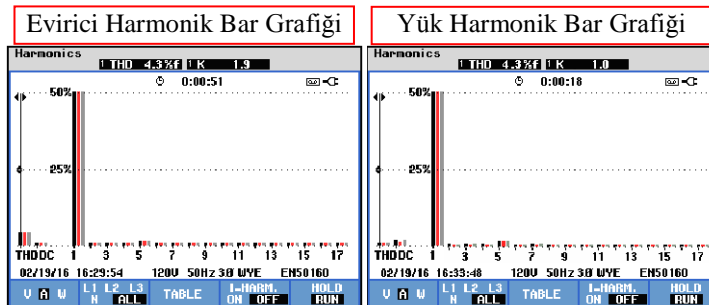
Şekil 5.121. Ada modunda 3 faz yük, evirici ve şebeke akımları

Evirici V/A/Hz Tablosu					Yük V/A/Hz Tablosu				
Volts/Amps/Hertz					Volts/Amps/Hertz				
	L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N
Urms	113.1	112.2	115.7	19.8	Urms	113.6	112.2	116.2	19.8
Upk	138.0	192.5	198.4	57.5	Upk	131.6	139.3	138.1	61.6
CF	1.34	1.58	1.58	3.18	CF	1.37	1.55	1.57	3.11
Hz	50.00				Hz	50.01			
	L1	L2	L3	N		L1	L2	L3	N
Arms	4.7	3.6	3.7	2.1	Arms	4.7	3.6	3.7	2.1
Apk	7.8	5.3	5.6	2.4	Apk	7.2	5.6	5.8	4.6
CF	1.55	1.49	1.51	1.93	CF	1.56	1.55	1.59	2.20

Şekil 5.122. Ada modunda 3 faz yük, evirici ve şebeke gerilim, akım tablosu

Evirici Güç ve Enerji Tablosu					Yük Güç ve Enerji Tablosu				
Power & Energy					Power & Energy				
	L1	L2	L3	Total		L1	L2	L3	Total
kW	0.55	0.42	0.42	1.39	kW	0.55	0.42	0.42	1.39
kVA	0.56	0.42	0.42	1.40	kVA	0.55	0.42	0.42	1.39
kVAR	0.10	0.14	0.06	0.35	kVAR	0.11	0.01	0.01	0.34
PF	0.98	0.96	0.99	0.97	PF	0.98	1.00	1.00	0.97
Cosφ	0.99	0.98	1.00		Cosφ	1.00	1.00	1.00	
Arms	4.7	3.6	3.7		Arms	4.7	3.6	3.7	
	L1	L2	L3			L1	L2	L3	
Urms	113.4	115.1	116.0		Urms	115.5	114.2	116.1	

Şekil 5.123. Ada modunda 3 faz yük, evirici ve şebeke güç ve enerji tablosu

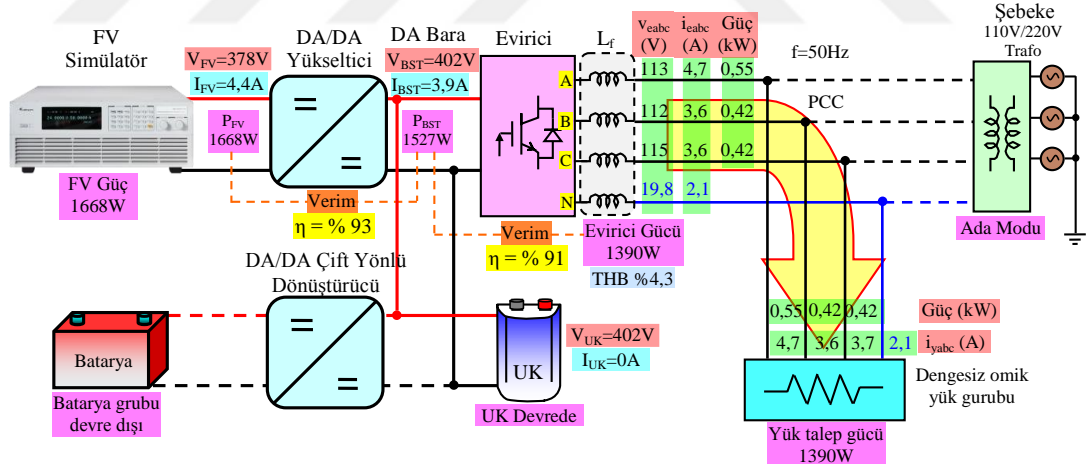


Şekil 5.124. Ada modunda 3 faz yük, evirici ve şebeke akım harmonik bar grafiği

Evirici Harmonik Tablosu					Yük Harmonik Tablosu				
HARMONICS TABLE					HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N	Amp	L1	L2	L3	N
THD% <sub>f</sub>	4.3	4.3	4.3	199.2	THD% <sub>f</sub>	4.4	4.3	4.3	183.0
H3% <sub>f</sub>	0.9	0.8	1.0	67.3	H3% <sub>f</sub>	0.8	0.8	0.8	63.6
H5% <sub>f</sub>	1.5	1.5	1.5	36.3	H5% <sub>f</sub>	1.6	1.6	1.6	31.6
H7% <sub>f</sub>	0.9	0.7	0.9	33.8	H7% <sub>f</sub>	1.0	0.9	0.9	29.9
H9% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.7	34.9	H9% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.7	30.2
H11% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.6	29.9	H11% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.6	29.1
H13% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.7	27.9	H13% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.7	25.6
H15% <sub>f</sub>	0.7	0.7	0.6	33.1	H15% <sub>f</sub>	0.7	0.6	0.7	29.6

Şekil 5.125. Ada modunda 3 faz yük, evirici ve şebeke harmonik tablosu

Şekil 5.126'da ada modu çalışma durumu için sistemde ölçülen bütün akım, gerilim, THB, güç ve DA/DA yükseltici, DA/AA evirici verim değerleri görülmektedir. Evirici toplamda 1390W enerji üretmekte, yük grubu 1390W enerji talep etmekte evirici yük grubunun talep gücünün tamamını karşılamaktadır. Burada sistemde bulunan DA/DA yükseltici güç devresinin verimi %93 ve DA/AA evirici güç devresinin verimi %91 değerinde hesaplanmıştır. Ultrakapasitör sürekli olarak DA baraya bağlıdır ve ani yük değişiminde deşarj olarak sistemin kararlı çalışmasını sağlamaktadır.

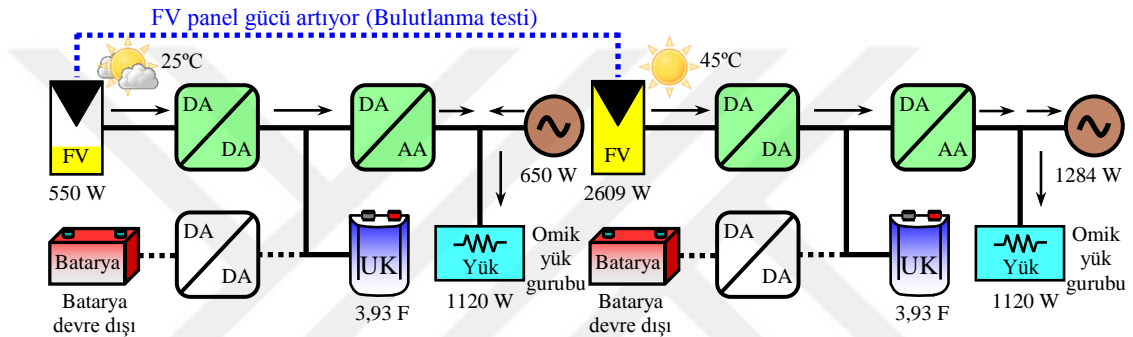


Şekil 5.126. Ada modunda sistemde ölçülen değerlerin deneysel sonuç özeti

## 5.12. FV Panellerin Bulutlanma Durumu

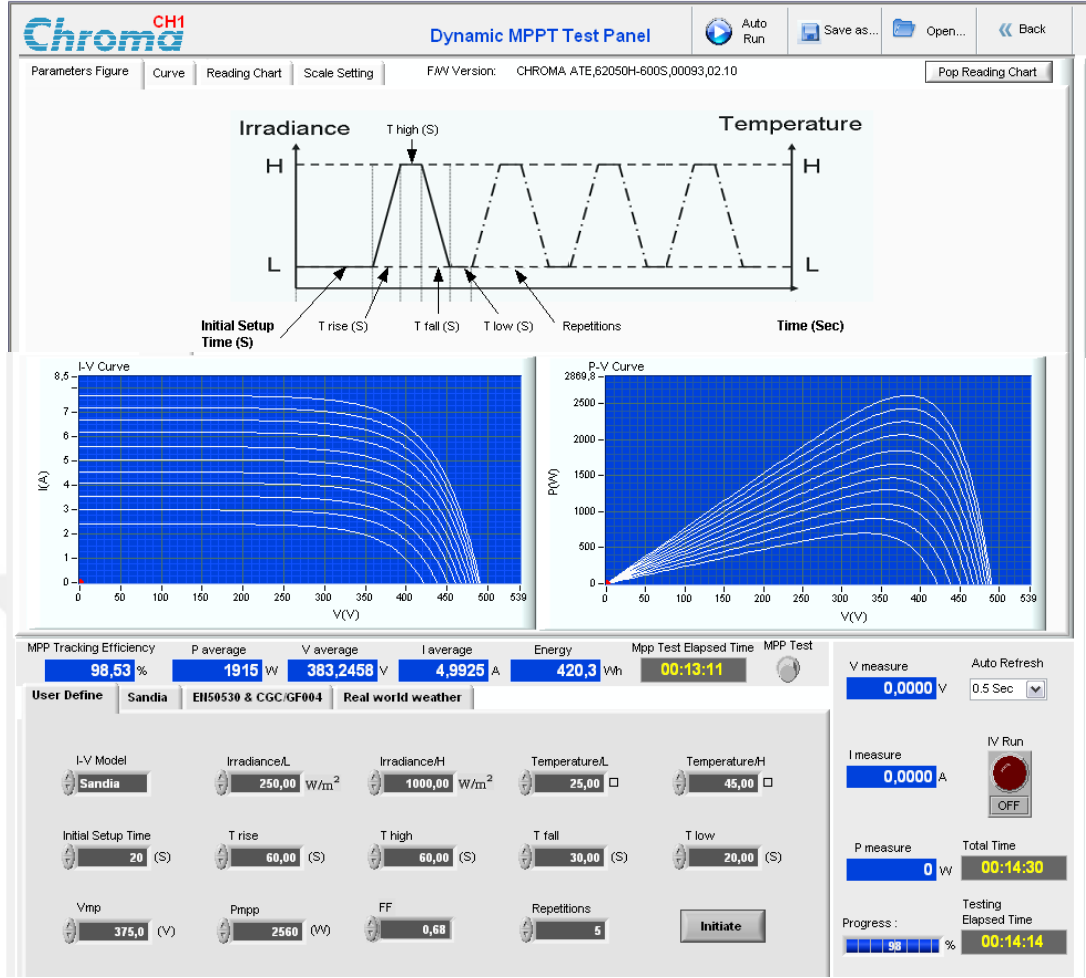
Bu deneysel çalışmada FV panellerin bulutlanma durumu incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 5.127'de verilmektedir. FV panellerin bulutlanma deneyinde eviricinin, yük grubu ve şebeke tarafındaki davranışını incelemek için batarya grubu devre dışı bırakılmaktadır. Bu durumda FV panellerden üretilen güç

miktarı yük grubunun talep ettiği yük miktarından az olduğundan kalan enerji şebekeden sağlanmaktadır. İlk olarak FV panellerin gücü 500W olacak şekilde belirlenmiştir. Daha sonra FV paneller üzerindeki bulutlanmalar giderek FV panellerin gücü 2609W olmaktadır. Sistemde batarya grubu devre dışı bırakıldığından ve yük grubunun gücü sabit kaldığından FV paneller öncelikle yük grubunu beslemekte fazla enerjiyi miktarını da şebekeye aktarmaktadır. Yük grubunun gücü her iki çalışma durumunda da 1120W gücünde dengeli omik yük seçilmiştir. İlk durumda şebekeden yük grubunu beslemek için 650W enerji alınırken ikinci durumda şebekeye 1284W enerji aktarılmaktadır.



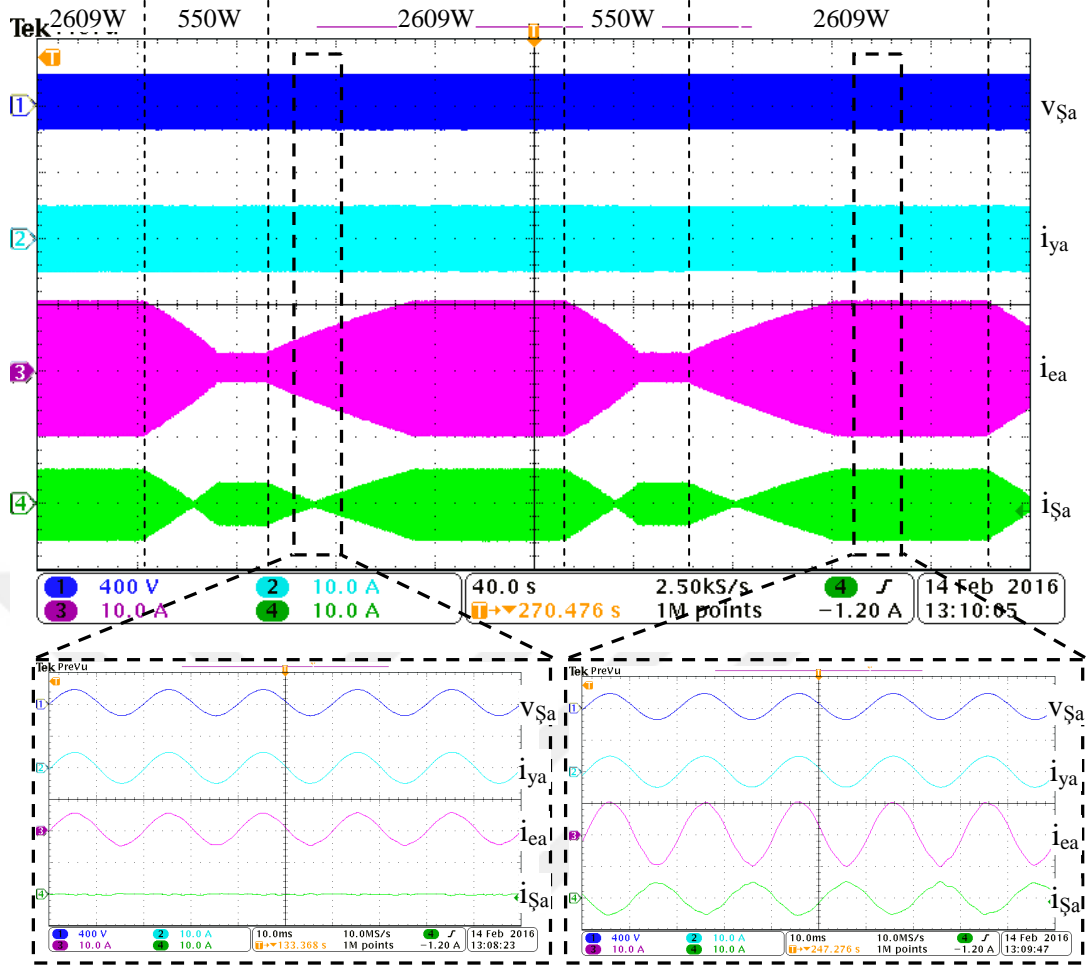
Şekil 5.127. FV panellerin bulutlanma durumunda güç akış diyagramı

Şekil 5.128'de FV panellerin bulutlanma durumu için Chroma FV panel simülatör bulutlanma ayarlarının yapıldığı arayüz ekranı verilmektedir. Chroma FV bulutlanma arayüz ekranı ile FV panellerin ışınım miktarını, FV panellerin sıcaklığını ve istenilen ışınımında kalma sürelerini ayarlama imkânı vermektedir. Chroma FV bulutlanma arayüz ekranı ile başlangıçta FV panellerinin ışınım miktarı  $250\text{W}/\text{m}^2$  ve sıcaklığı  $25^\circ\text{C}$ 'de 20sn çalışacak şekilde başlatılmıştır. FV paneller bu ışınım ve sıcaklıkta 550W enerji üretmektedir. Daha sonra FV paneller 60sn içerisinde  $1000\text{W}/\text{m}^2$  ışınım miktarına ve FV panellerin sıcaklığı  $45^\circ\text{C}$ 'ye çıkacak şekilde programlanmıştır. FV paneller bu ışınım ve sıcaklıkta 2609W enerji üretmektedir. FV paneller  $1000\text{W}/\text{m}^2$  ışınım miktarında 60sn kaldıktan sonra tekrar ışınım miktarı  $250\text{W}/\text{m}^2$  ve sıcaklığı  $25^\circ\text{C}$  olacak değere 30sn içerisinde gelecektir. Bu işlem sürekli olarak tekrarlanmaktadır. Böylece sürekli değişen FV panel gücünde hem MGNİ verimi hem de eviricinin şebekeye enerji aktarma sırasında davranışı ayrıntılı olarak incelenmiştir.



Şekil 5.128. FV panellerin bulutlanma testi Chroma bulutlanma arayüz ekranı

Şekil 5.129’da FV panellerin bulutlanma durumunda şebeke, evirici ve yük a fazının akım, gerilim sonuçları verilmektedir. FV panellerin bulutlanma deneyinde FV panellerin ürettiği güce bağlı olarak eviricinin davranışı ayrıntılı olarak incelenmektedir. Sistemde yük grubu evirici tarafından beslenmekte, enerjinin yetmediği durumda şebekeden almaktadır. FV panellerin bulutlanma geçişi sırasında enerji fazlalığı olduğu durumda şebekeye aktarıldığı Şekil 5.129’da yakınlaştırılmış ekran sonuçları ile ayrıntılı olarak anlaşılmaktadır. FV panellerin bulutlanma durumunda geçiş sırasında yük grubunun talep ettiği güç evirici tarafından karşılandığı anda şebekeden enerji almamaktadır. Bu durum yakınlaştırılmış osiloskop ekran sonuçları ile gösterilmektedir.

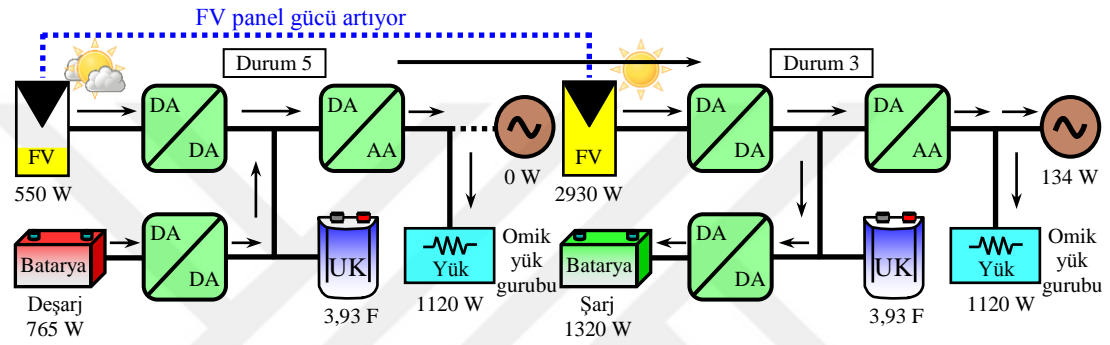


Şekil 5.129. FV panellerin bulutlanma durumunda şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı ve yakınlaştırılmış sonuçlar

### 5.13. Durum 5'ten Durum 3'e Geçiş Durumu

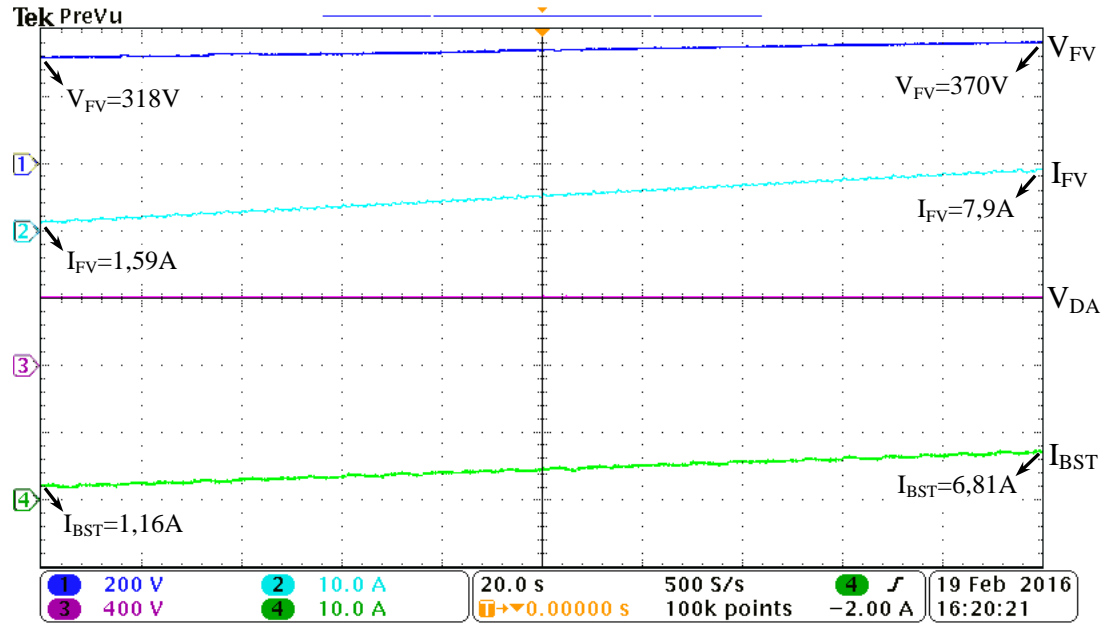
Bu deneysel çalışmada Durum 5'ten Durum 3'e geçiş durumu incelenmiştir ve bu durumların güç akış diyagramı Şekil 5.130'da verilmektedir. Durum 5'te FV panellerden üretilen güç 550W seviyesinden 2930W seviyesine çıkarak Durum 3'e geçiş sağlanmış olur. Bu geçişler sırasında sistemde bulunan yük grubunun gücü sabittir ve 1120W'tır. Durum 5 modunda  $P_{FV} < P_{YÜK}$  olduğundan batarya grubu deşarj olarak yük grubunu beslemektedir. Fakat FV panellerin ürettiği güç arttığında sistem Durum 3 moduna geçmiş olmaktadır. Bu durumda ise  $P_{FV} > P_{YÜK}$  olduğundan FV paneller yük grubunu beslemekte, batarya grubunu şarj etmekte ve kalan enerji varsa şebekeye aktarılmaktadır. Durum 5'ten Durum 3'e geçiş durumu ilk olarak FV panellerin bulutlu bir havada çalıştığı, sonra bulutlanmanın giderek FV panellerin gücünün artması olayına bir örnektir. Bulutlanma testleri Chroma FV simülör ile

programlanarak 200sn'lik bir geçiş ayarlanmıştır. FV simülatör aracılığıyla 500W'lık FV panel gücü 200sn içerisinde artarak 2930W'a ulaşmaktadır. Durum 5'te batarya grubu ilk olarak deşarj modunda çalışırken Durum 3'e geçiş sırasında şarj moduna geçmektedir. Akıllı enerji yönetim algoritması bu güçlere sürekli bakarak batarya grubunun şarj veya deşarjda çalışma durumunu, şarj/deşarj akımlarını belirleyerek sistemin istenilen algoritma çerçevesinde çalışmasını sağlamaktadır. Durum 5'ten Durum 3'e geçiş durumu ile DA/DA ift yönlü dönüştürücünün şarj ve deşarj çalışma durum geçişlerindeki davranışı ayrıntılı olarak incelenmektedir.



Şekil 5.130. Durum 5'ten Durum 3'e geçiş durumunda güç akış diyagramı

Şekil 5.131'de Durum 5'ten Durum 3'e geçiş durumunda FV panel gerilim, akım ve DA/DA yükseltici gerilim, akım osiloskop ekranı görölmektedir.

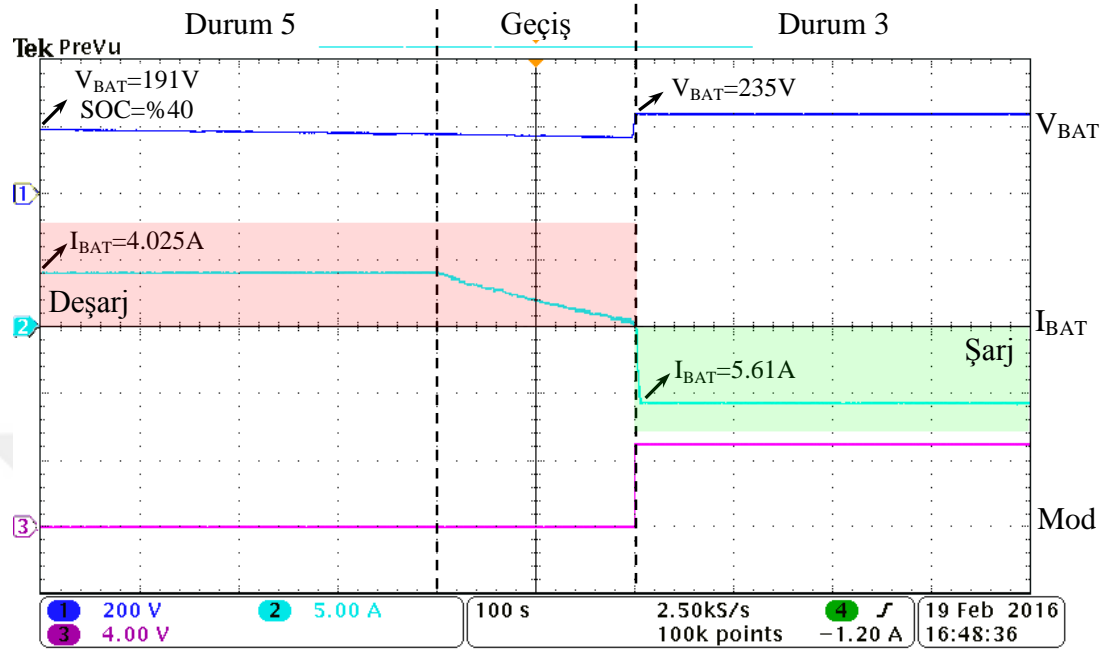


Şekil 5.131. Durum 5'ten Durum 3'e geçiş durumunda DA/DA yükseltici giriş/çıkış akım gerilimleri

Durum 5'te FV paneller 550W gücünde MGN'daki çalışma gerilimi  $V_{FV}=318V$  ve akımı  $I_{FV}=1,59A$ 'dir. FV panellerin üzerindeki bulutlanma gittiğinde Durum 3'e geçiş olduğunda 2930W gücünde FV panellerin MGN'daki çalışma gerilimi  $V_{FV}=370V$  ve akımı  $I_{FV}=7,9A$ 'dir. DA bara evirici tarafından sürekli olarak 400V'ta tutulmaktadır. DA/DA yükseltici çıkışındaki  $I_{BST}$  akımı Durum 5'te 1,16A iken bulutlanma kalktığında 6,81A olmaktadır. DA/DA yükseltici dönüştürücüsü geçiş sırasında FV panelleri MGN'da çalıştırarak MNGİ işlemini %99'luk verim ile takip ettiği gözlenmiştir.

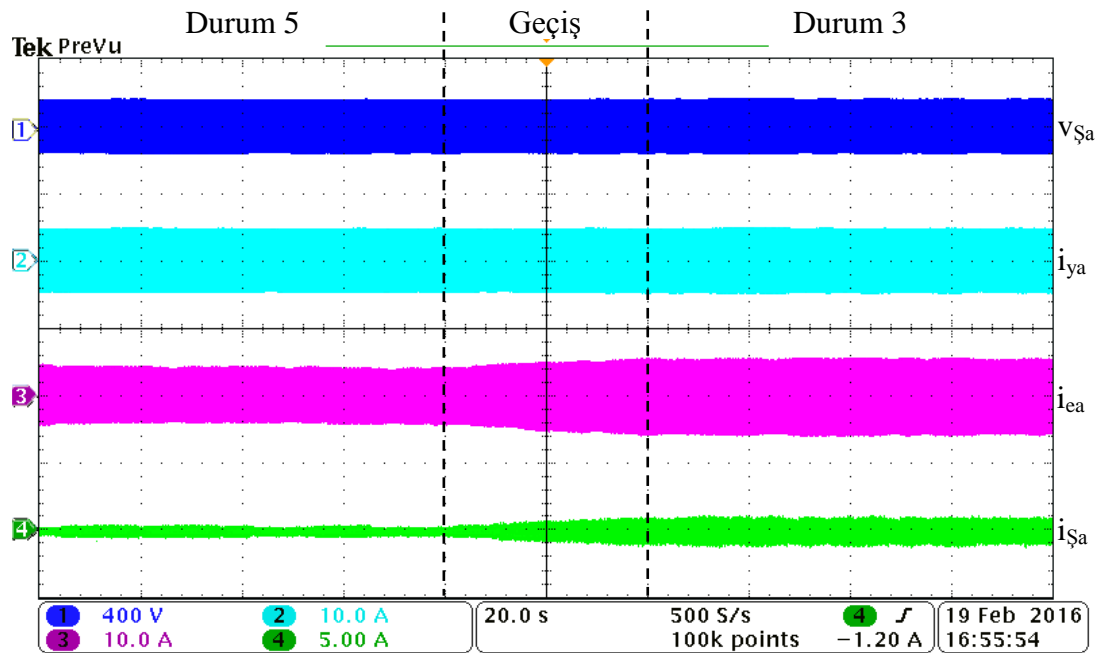
Şekil 5.132'de Durum 5'ten Durum 3'e geçiş durumunda batarya akım, gerilimi ve DA/DA çift yönlü dönüştürücünün mod bilgisi osiloskop ekranı görülmektedir. Durum 5'te batarya grubu yükseltici modunda çalışarak akıllı enerji yönetim algoritmasının belirlediği akım miktarı ile deşarj olmaktadır. Batarya grubu yükseltici modunda 765W gücünde deşarj olarak yük grubunun talep ihtiyacının kalan kısmını karşılamaktadır. Durum 5'te batarya grubunun doluluk durumu SOC %40 civarında ve terminal uçlarındaki gerilim seviyesi 191V'tur. Deşarj akımı ise akıllı enerji yönetim algoritması tarafından 4A olarak belirlenmiştir. Durum 5'ten Durum 3'e geçiş sırasında akıllı enerji yönetim algoritması güçleri anlık olarak sürekli hesaplayıp bataryanın deşarj akımını giderek azaltmaktadır. Deşarj durumunda DA/DA çift yönlü dönüştürücü kontrol algoritmasında dönüştürücünün hangi modda çalışmasını belirleyen mod bilgisi 0 olduğu grafikte görülmektedir.  $P_{FV}=P_{YÜK}$  olduğu anda batarya grubundan enerji alınmamakta ve batarya grubunun akımı  $I_{BAT}=0$  olmaktadır. FV panellerin gücü artarak 2930W'a ulaştığında yani Durum 3'e geçiş yapıldığı anda akıllı enerji yönetim algoritması batarya grubunun şarj olması gerektiğine karar vererek DA/DA çift yönlü dönüştürücünün düşürücü modda çalışması gereken mod bilgisini 1 yapar. Böylece mod bilgisi sayesinde DA/DA çift yönlü dönüştürücünün düşürücü veya yükseltici modda çalışması sağlanır. Aynı zamanda DA/DA çift yönlü dönüştürücü kontrol algoritması Durum 5'ten Durum 3'e geçiş olduğu anda dönüştürücü çıkışını batarya grubunu şarj edecek gerilim seviyesine 235V'a ayarlar. Durum 5'ten Durum 3'e geçiş süresi 200sn sürmektedir ve akıllı enerji yönetim algoritması da bu süre içerisinde hızlı kontrol mekanizması sayesinde geçişler arasında sıkıntı yaşanmadan sistemin kararlı olarak çalışmasını sağlamaktadır. Durum 5'ten Durum 3'e geçiş olayı ile DA/DA çift yönlü

dönüştürü devre ve kontrol algoritmasının akıllı enerji yönetim algoritması ile uyumlu şekilde çalıştığı Şekil 5.132’de ayrıntılı olarak görülmektedir.



Şekil 5.132. Durum 5’ten Durum 3’e geçiş durumunda batarya gerilim, akım ve mod bilgisi

Şekil 5.133’te Durum 5’ten Durum 3’e geçiş sırasında şebeke, evirici ve yük a fazının akım, gerilim sonuçları verilmektedir.



Şekil 5.133. Durum 5’ten Durum 3’e geçiş durumunda şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı

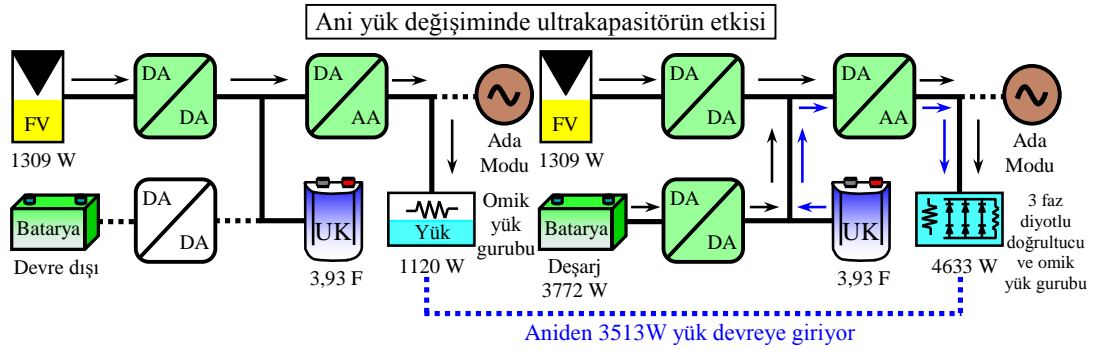


Durum 5 ve Durum 3'te yük grubunun gücü aynıdır ve omik yük grubunun toplam gücü 1120W'tır. Durum 5'te yük grubunun gücü sistem tarafından sağlanarak şebekeden neredeyse hiç enerji alınmamaktadır. FV panellerin gücü arttığında sistemdeki güç fazlalığı şebekeye aktarıldığı Şekil 2.127'de ayrıntılı olarak görülmektedir. Durum 5'te evirici 1120W güç üretmektedir ve bu evirici gücü yük grubunun gücüne eşittir. Durum 3'te ise evirici tarafından 1254W enerji üretilmektedir ve yük grubunun enerji ihtiyacı karşılandıktan sonra kalan enerji şebekeye aktarıldığı görülmektedir. Durum 5'ten Durum 3'e geçiş sırasında akım değişimlerinin gözlenmesi için AA osiloskop zaman oranı yüksek tutulmuştur.

#### **5.14. Ani Yük Değişim Durumu**

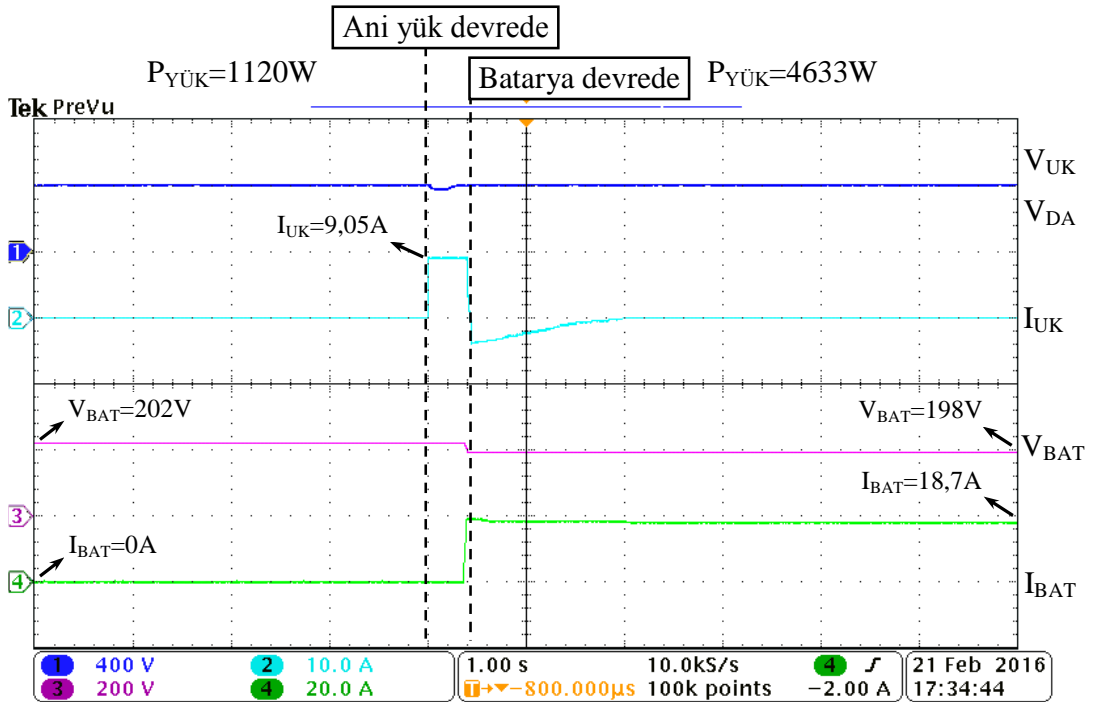
Ani yük değişim durumunda sistemin hibrit enerji depolama bileşenlerinin birbirlerinin üzerindeki etkisi, davranış ve faydası incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 5.134'te verilmektedir. Bu durumda FV panellerinin gücü sabit tutulmaktadır ve 1309W olarak belirlenmiştir. Sistemde, yük grubu olarak 1120W gücünde dengeli omik yük grubu vardır. FV panellerden üretilen güç yük grubunun gücüne yaklaşık olarak eşit olduğundan batarya grubu devre dışıdır. Ani yük değişiminde sistemde bulunan hibrit enerji depolama birimleri olan ultrakapasitör ve batarya grubunun etkileşimini görmek için sistem ada modunda çalıştırılmaktadır. Sistem bu şartlar altında çalışırken sisteme aniden 3 faz diyotlu tam dalga doğrultuculu 3513W gücünde RL yük ilave edilerek yük grubunun toplam gücü 4633W olmaktadır. Sistemde DA baraya sürekli olarak bağlı olan ultrakapasitörün etkisi tam bu ani yük değişiminde görülmektedir. Ani yük değişiminde ultrakapasitör grubu deşarj olarak yük grubundaki güç farkını batarya grubu devreye girene kadar ultrakapasitör grubu üstlenmektedir. Böylelikle batarya grubu aniden deşarj edilmeyerek derin deşarj oranı azaltılarak bataryanın sağlığına katkı sağlayacak şekilde kullanım ömrü uzatılmış olur. Ultrakapasitör grubu böylece değişen yük talep durumlarında sistemdeki gerilim dalgalanmalarının önüne geçmektedir. Evirici daha kararlı çalışarak yük güç talebini kaliteli bir şekilde karşılamaktadır. Ultrakapasitör grubu sadece ada modunda değil şebekeye senkron olarak çalışırken de sistemdeki DA bara ve evirici çıkışındaki gerilim dalgalanmalarının önüne geçmektedir. Ani yük değişiminden sonra FV panellerin toplam gücü yük grubunun toplam gücünden fazla olmaktadır. Akıllı enerji yönetim algoritması bu değişimi çok hızlı bir şekilde

algılayarak batarya grubunu deşarj modunda çalıştırarak devreye almaktadır. Yük grubunun talep ettiği güç hesaplanarak, FV panellerden elde edilen güç farkı kadar batarya grubundan yük grubuna güç akışı sağlanmaktadır.



Şekil 5.134. Ani yük değişim durumunda güç akış diyagramı

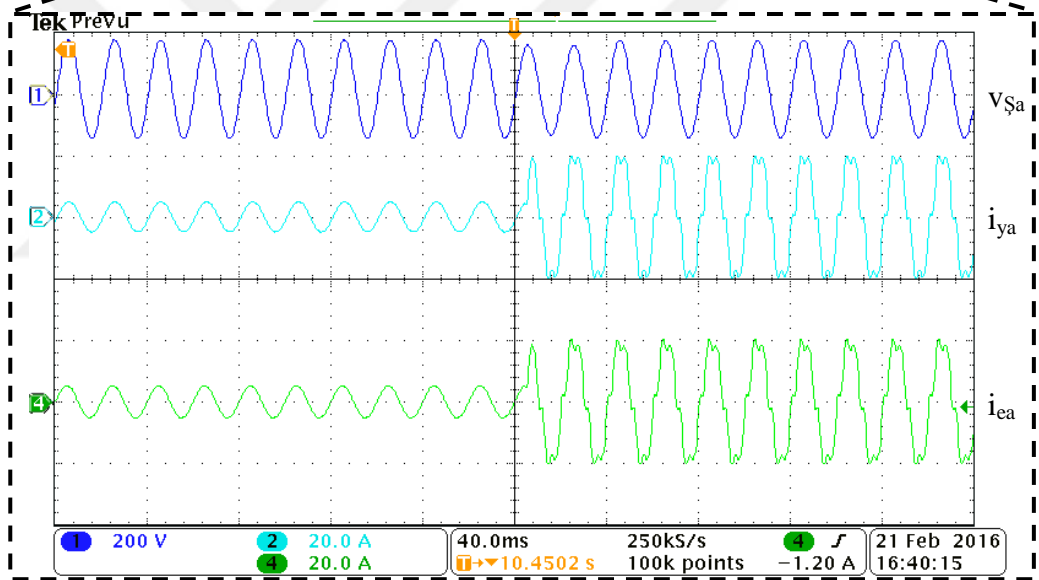
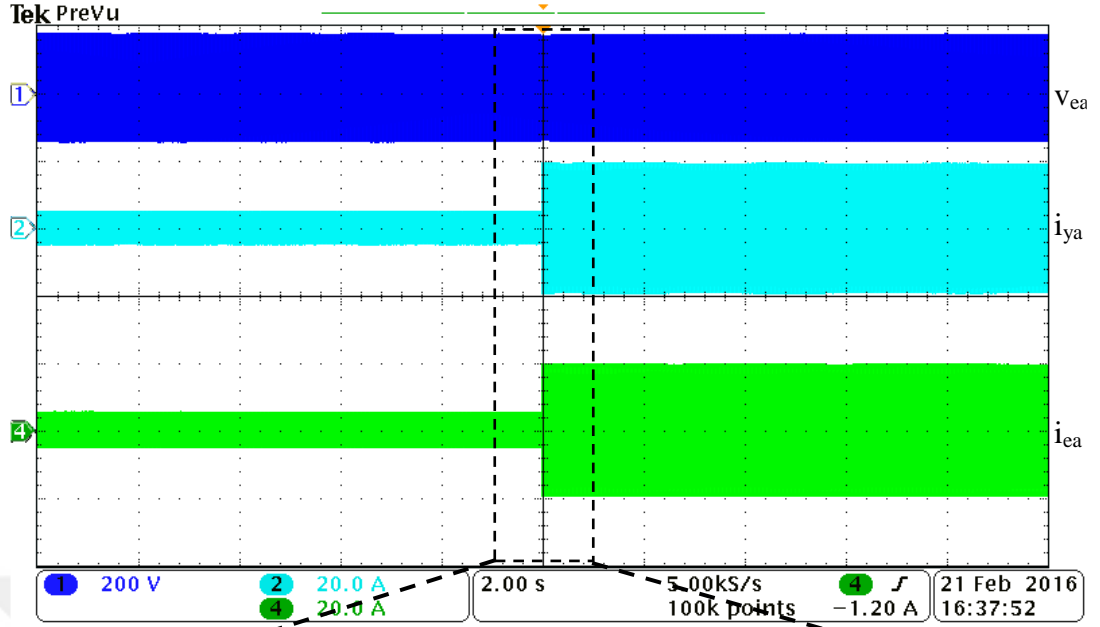
Şekil 5.135'te ani yük değişim durumunda ultrakapasitör ve batarya grubunun gerilim, akım osiloskop ekranı görülmektedir. Ultrakapasitör grubu sistemdeki DA baraya direkt olarak bağlı olduğundan DA bara gerilimi ile ultrakapasitör grubunun gerilimine eşittir ( $V_{UK}=V_{DA}$ ). Evirici kontrol algoritması ile DA bara gerilimi sürekli olarak 400V'ta sabit tutulmaktadır. Ultrakapasitör grubunun normalde akımı sıfırdır fakat ani yük değişimi olduğu anda yük grubunun o anda talep ettiği güç miktarı kadar deşarj akımı ile eviriciye güç akışı sağlamaktadır.



Şekil 5.135. Ani yük değişim durumunda batarya ve ultrakapasitör akım, gerilimi

Ultrakapasitör grubu ani yük değişimi anından itibaren 200msn boyunca yaklaşık olarak 9,05A deşarj akımı ile eviriciye güç vermektedir. Aslında bu süre, akıllı enerji yönetim algoritmasının tepki süresini belirlemektedir. Bu süre içerisinde algoritmada güç hesapları yapılarak batarya grubunun devreye girmesi belirlenerek DA/DA çift yönlü dönüştürücü devresi batarya grubunu yükseltici modda çalıştırmaktadır. Batarya grubu devreye girerek güç akışı sağlamaya başladıktan sonra ultrakapasitör grubunun akımı negatif değerlere gitmektedir. Tam bu durumda ultrakapasitör grubu vermiş olduğu enerjiyi DA baradan geri alarak şarj olmaktadır ve ultrakapasitör grubunun akımı sıfıra gitmektedir. Batarya grubu da akıllı enerji yönetim algoritmasının hesapladığı yaklaşık 18,7A deşarj akım değeriyle eviriciye toplamda 3772W güç aktarmaktadır. Batarya grubunun terminal uçlarındaki gerilim değeri boşa iken 202V civarındadır. Batarya grubu birden devreye alınarak yüklendiğinde terminal uçlarındaki gerilim değeri yüklenmeden dolayı bir miktar düşmektedir ve çalışma sırasında 198V olmaktadır.

Şekil 5.136'da ani yük değişim durumunda a fazının evirici gerilimi, evirici ve yük akım sonuçları verilmektedir. Ani yük değişim durumunda sistemde 1120W gücünde omik yük grubu vardır ve evirici yük grubunu beslemektedir. Ani yük değişim durumunda sisteme ilave olarak a fazına 3 faz diyotlu tam dalga doğrultuculu 3513W gücünde RL yük eklenmektedir. Bu durum Şekil 5.136'da a fazı için ayrıntılı olarak gözükmektedir. Ani yük değişim sırasında akım değişimlerinin gözlenmesi için AA osiloskop zaman oranı yüksek tutulmuştur ve ayrıca tam geçiş anındaki durum yakınlştırılarak incelenmiştir. Buna göre ani yük değişimi sırasında evirici çıkışındaki gerilim değerinde yüklenme anında çok küçük bir çökme olmaktadır. Fakat ultrakapasitör ve batarya grubunun devreye enerji sağlamasıyla bu çökme hemen giderildiği yakınlştırılan osiloskop ekranında ayrıntılı olarak anlaşılmalıdır.

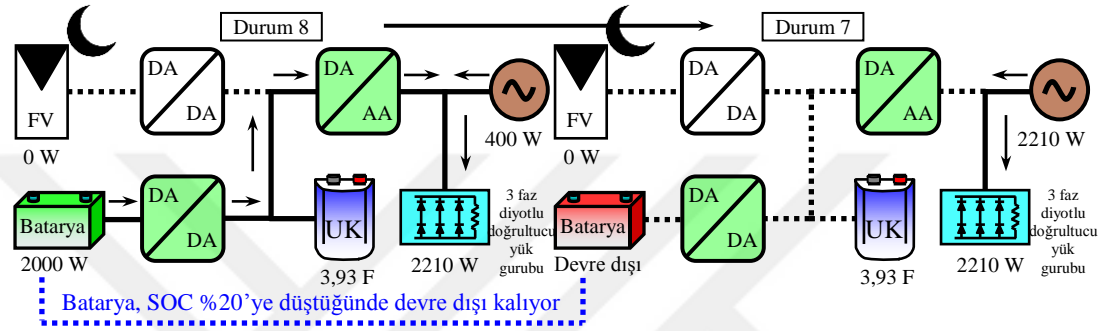


Şekil 5.136. Ani yük değişim durumunda evirici gerilimi, yük ve evirici akımı ve yakınlaştırılmış sonuçlar

### 5.15. Durum 8'den Durum 7'ye Geçiş Durumu

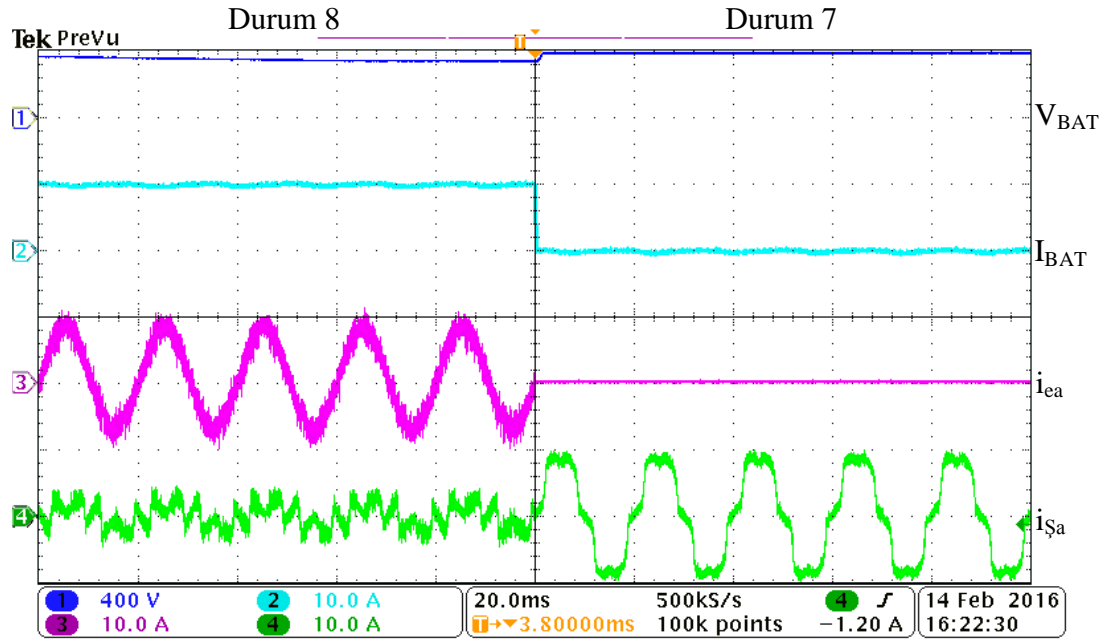
Bu deneysel çalışmada Durum 8'den Durum 7'ye geçiş durumu incelenmiştir ve bu durumun güç akış diyagramı Şekil 5.137'de verilmektedir. Bu durumda FV panellerden üretilen güç yoktur gece modu olarak ta isimlendirilebilir. Sistemde sadece batarya grubu kaynak olarak bulunmaktadır. Durum 8'de 3 faz tam dalga diyotlu doğrultucu RL yük grubunun talep ettiği enerji 2210W'tır ve batarya grubu 2000W'lık enerjiyi eviriciye aktarmaktadır. Sistemde bulunan güç dönüştürücü

devrelerinin verimlerinden sonra 400W'lık bir enerjiye daha ihtiyaç vardır ve kalan enerji miktarı şebeke tarafından sağlanmaktadır. Batarya grubu bu durumda deşarj olmakta ve doluluk durumu SOC giderek azalmaktadır. Batarya grubunun doluluk durumu SOC %20'nin altına düştüğünde akıllı enerji yönetim algoritması batarya grubunu sistemden ayırmaktadır ve Durum 7'de tam bu anda dereye girmektedir. Durum 7'de batarya grubu devreden çıkarak yük grubunun talep ettiği 2210W'lık enerjinin tamamı şebeke tarafından karşılanmaktadır.



Şekil 5.137. Durum 8'den Durum 7'ye geçiş durumunda güç akış diyagramı

Şekil 5.138'de Durum 8'den Durum 7'ye geçiş durumu için batarya gerilim ve akımı, evirici ve şebeke a fazının akım, gerilim sonuçları verilmektedir.



Şekil 5.138. Durum 8'den Durum 7'ye geçiş durumunda şebeke gerilimi, yük, evirici, şebeke akımı

Durum 8’de batarya grubu deşarj modunda çalışarak eviriciye güç aktararak yük grubunun beslenmesini sağlamaktadır. Bu durumda şebekeden doğrusal olmayan yük akımı için tamamlayıcı yük akımı talep edilmektedir. Batarya grubunun doluluk oranının SOC %20’nin altına düştüğü anda akıllı enerji yönetim algoritması batarya grubunu devre dışı bırakarak DA baradan ayırır. Batarya grubu deşarj olmadığı yani yüklenmediği için terminal uçlarındaki gerilim seviyesi küçük bir miktar arttığı gözlenmiştir. Durum 7’ye geçildiği anda batarya grubu devreden çıktığı için evirici güç akışı da kesilmektedir. Bu durumda şebeke yük grubunun talep ettiği bütün gücü üstlenerek yük grubu artık şebekeden beslenmiş olur.

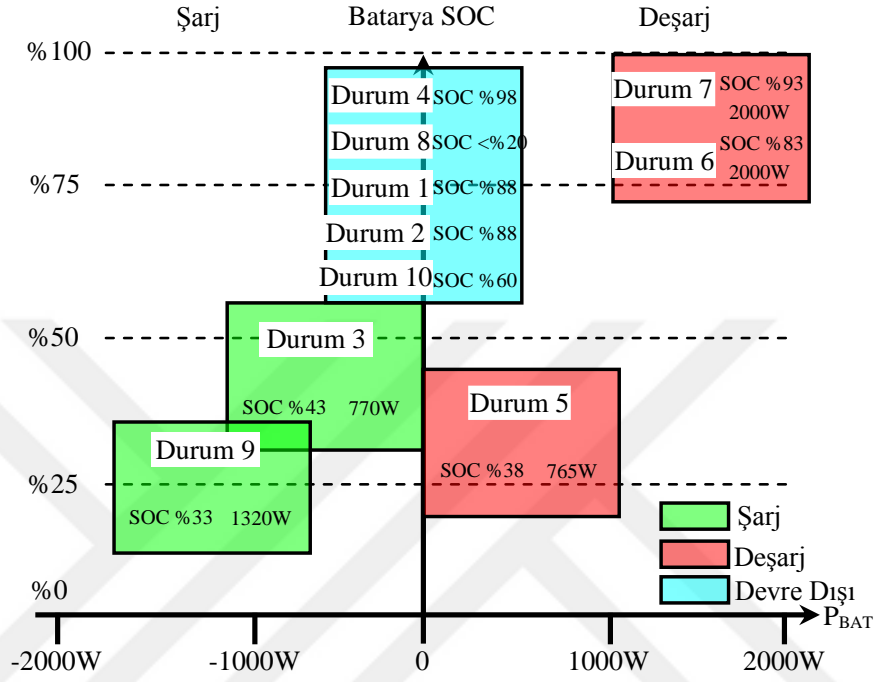
Tablo 5.1’de tez çalışmasında gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçlarından alınan ve sistemde dinamik davranış sergileyen birimlerin durum ve güçleri verilmektedir. Deneysel çalışma şartlarında öngörülen 10 durum için güç değerleri bu tablo ile özetlenerek sistem takibi rahatlıkla yapılabilmektedir. Örneğin; Durum 8 incelendiğinde devrede nonlinear yük grubu 2210W güç talep etmektedir. Bu durumda FV paneller gece olduğundan dolayı enerji sağlayamamaktadır. Sistemde bulunan diğer enerji kaynağı batarya grubu SOC oranı sınır değerinin altına indiğinden devre dışı bırakılmıştır. Yük grubunun enerji talebi tamamen şebeke tarafından karşılanmaktadır.

Tablo 5.1. HEDS’inde bulunan birimlerin güç ve durum değerleri

Durumlar	Şebeke Durumu	Evirici Durumu	Yük Durumu	FV Durumu	Batarya Durumu
Durum 1	Alınan güç 140W	1020W	Lineer Yük 1160W	Güneşli 1192W	Devre Dışı/SOC %88
Durum 2	Verilen güç 410W	1020W	Lineer Yük 1430W	Güneşli 1192W	Devre Dışı/SOC %88
Durum 3	Verilen güç 620W	1270W	Nonlinear Yük 640W	Güneşli 2931W	Şarj/SOC %43 770W
Durum 4	Verilen güç 1020W	1760W	Lineer Yük 740W	Güneşli 2012W	Devre Dışı/SOC %98
Durum 5	Alınan güç 70W	1160W	Lineer Yük 1230W	Bulutlu 507W	Deşarj/SOC %38 765W
Durum 6	Verilen güç 30W	2820W	Nonlinear Yük 2790W	Bulutlu 992W	Deşarj/SOC %83 2000W
Durum 7	Alınan güç 400W	1830W	Nonlinear Yük 2230W	Gece	Deşarj/SOC %93 2011W
Durum 8	Alınan güç 2210W	Devre Dışı	Nonlinear Yük 2210W	Gece	Devre Dışı/SOC <%20
Durum 9	Alınan güç 2910W	1510W	Lineer Yük 1400W	Gece	Şarj/SOC %33 1320W
Durum 10	Verilen güç 1770W	1770W	Devre Dışı	Güneşli 1995W	Devre Dışı/SOC %60

Şekil 5.139’da deneysel çalışma sırasında batarya grubunun güç ve SOC eksenine bağlı olarak durumu ayrıntılı olarak verilmektedir. Bu grafiğe göre Durum 1, 2, 4, 8

ve 10'da batarya grubu devre dışıdır ve hiçbir enerji akışı (şarj/deşarj) olamamaktadır. Durum 5, 6 ve 7'de ise batarya grubudeşarj modunda çalışmaktadır ve AEYA'nın belirlemiş olduğu akım değerindedeşarj edilmektedir. Durum 3 ve 9'da ise batarya grubu AEYA'nın belirlediği akım miktarında şarj olmaktadır.



Şekil 5.139. Çalışma durumlarında batarya grubunun güç ve SOC değerleri

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında, 3 fazlı 4 telli şebeke bağlantılı batarya ve ultrakapasitör depolama birimlerinden oluşan HEDS tasarlanarak akıllı mikro şebeke alt yapısı oluşturulmuştur. Tasarlanan HEDS'nde kullanılan dönüştürücü birimleri için kontrol algoritmaları oluşturularak özgün bir akıllı enerji yönetim algoritması geliştirilmiştir. Bu çalışmalar, Matlab/Simulink simülasyonları ve tasarlanan laboratuvar test platformu ile deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında, omik, tek fazlı ve 3 fazlı, sinüzoidal veya sinüzoidal olmayan, dengeli veya dengesiz yük grupları bağlanarak sistemin her türlü yüke verdiği cevap ve bu durumlardaki dinamik davranışı incelenmiştir.

Tezde yenilenebilir enerji kaynağı olarak fotovoltaik güç kaynağı kullanılmıştır. Chroma marka FV simülatör kullanılarak deneysel test çalışmaları sırasında her zaman istenilen FV kaynak benzetimi elde edilerek çalışma kolaylığı sağlanmıştır. FV simülatör ile istenilen değerde FV güç elde edilirken ayrıca FV simülatör arayüzü sayesinde sistemde kullanılan DA/DA yükseltici dönüştürücüsünün MGNİ verimi anlık olarak incelenmiştir. FV simülatör ile bulutlanma testleri yapılarak DA/DA dönüştürücü kontrol algoritmasının ve sistemin dinamik değişimi gözlenmiştir. Sistemde FV panelleri sürekli MNG'da çalıştırmak için DA/DA yükseltici devresi kullanılmaktadır. Bu dönüştürücü saptır gözle algoritmasıyla kontrol edilerek FV panellerin tepe güç noktasında çalıştırarak DA baraya güç akışı sağlamaktadır. DA/DA dönüştürücünün bütün çalışma şartları altında yüksek güç verimi ile (>%92) çalıştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca DA/DA dönüştürücünün güç oranı arttıkça veriminin de arttığı gözlenmiştir. Tasarlanan HEDS'nde depolama birimi olarak 32 adet 12V 80Ah kurşun-asit batarya kullanılmıştır. Oluşturulan batarya grubu bir DA/DA çift yönlü dönüştürücü ile kontrol edilerek sistemde şarj ve deşarj olması sağlanmaktadır. DA/DA çift yönlü dönüştürücü, batarya grubunu akıllı enerji yönetim algoritmasının belirlediği akım ve gerilimlerde çalıştırarak kontrollü bir şekilde enerji akışını sağlamaktadır. Geliştirilen dönüştürücü algoritmasıyla batarya grubu ile DA bara arasında çift taraflı enerji aktarımı yapılmaktadır.



Bu dönüştürücü batarya grubunu şarj ederken maksimum şarj geriliminde 235V'ta ve deşarj olurken maksimum deşarj akımı 10A'de tutarak batarya grubunun sağlıklı bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Burada yine güç dönüştürücüsünün güç oranı arttıkça veriminin de arttığı (>%92) gözlenmiştir. Sistemde bulunan diğer bir depolama birimi olan ultrakapasitör grubu ise 400V 3,8F bir depolama ünitesidir. Bu ultrakapasitör grubu DA baraya direkt bağlıdır ve sürekli olarak 400V olacak şekilde çalışmaktadır. Ultrakapasitör grubunda bir dönüştürücü birimi olmadığından ani yük değişim durumlarında çok hızlı şekilde devreye girerek enerji akışı sağlamaktadır. Bu durum simülasyon ve deneysel çalışmalarda ayrıntılı olarak verilmektedir. Bu tez çalışmasındaki amaç anlık güç durumlarında ultrakapasitör grubu devreye girerek sistemin daha hızlı cevap vermesini sağlamak ve batarya ömrünü uzatmaktır.

HEDS'nde 3 faz 4 telli evirici topolojisi kullanılmakta ve histerezis bant anahtarlama yöntemi ile kontrol edilmektedir. Evirici için Concept marka IGBT sürücü kullanılmaktadır. Bu IGBT sürücüler yarım köprü modunda çalıştırılarak aynı kolda bulunan IGBT'lerin anahtarlama sinyalleri arasındaki gerekli ölü zaman aralıkları otomatik olarak üretilmektedir. Böylece denetim devresinden 4 kollu gerilim kaynaklı eviricinin sadece üstteki IGBT'ler için DGM çıkışları üretmek yeterli olmaktadır. Evirici, DA baradan aldığı gücü şebekeye senkron bir şekilde akım THB değerlerinin IEEE 519 standartlarında belirtilen %5 sınırının altında olacak şekilde aktarmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda eviricinin ürettiği akım harmonik değerleri %5'in altında olduğu gözlenmiştir. Ayrıca eviricinin ürettiği akım değeri arttıkça akım harmonik değerlerinin de düştüğü görülmektedir.

HEDS sistemi test platformunun kurulması için 3 faz 4 telli güç katı devresi, dört adet iki kanal ve iki adet iki kanal IGBT sürücü kartları, akım-gerilim ölçüm kartı, sinyal koşullandırma ara birim kartı, DA bara gerilim ölçüm kartı, aşırı akım ve gerilim koruma kartı, besleme devresi ve akıllı enerji yönetim algoritmasının kontrol edildiği kart tasarlanarak imalatı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tez çalışmasında, HEDS'nin denetimi için model tabanlı gerçek zamanlı dSpace kontrol geliştirme sisteminin kurulması ve test platformu ile ilişkilendirilmesi aşamaları açıklanmaktadır. HEDS'nin gerçek zamanlı denetimi amacıyla dSpace DS1103 denetleyici kartı kullanılmıştır. Matlab/Simulink ortamında tasarlanan HEDS denetim modelleri doğrudan dSpace denetleyici donanımı ile uygulamaya

aktarılmaktadır. Böylece HEDS gerçek zamanlı olarak doğrudan, kolay ve hızlı bir şekilde test edilmiştir.

Tasarlanan deneysel test düzeneğinde güvenlik bakımından bazı önlemler alınmaktadır. Sistemde bulunan dönüştürücü birimlerini aşırı akım ve gerilimden korumak için donanımsal ve yazılımsal olarak koruması yapılmıştır. DA bara yükselmesini önlemek, batarya grubunun aşırı akım ve gerilimden korumak, şebekeye senkron işlemi sırasında kısa devre olmasını önlemek adına güvenlik önlemleri alınmıştır.

HEDS için özgün bir akıllı enerji yönetim algoritması oluşturulmuştur. Akıllı enerji yönetim algoritması ile sistemin olası bütün çalışma durumları gerçekleştirilerek kontrol mekanizması ve tepkisi incelenmiştir. Simülasyon ve deneysel sonuçlar incelendiğinde geliştirilen akıllı enerji yönetim algoritmasının kararlı çalıştığı görülmektedir. Özellikle sistemin hem kaynak tarafında hem de yük tarafında dinamik davranış testleri yapılmaktadır. FV simülatör dinamik davranışı olarak bulutlanma testine tabi tutulmuştur. FV panellerin sürekli olarak artan ve azalan bir FV güç grafiği izlemesi sağlanmıştır. Bu durumda akıllı enerji yönetim algoritmasının belirlenen doğrultuda kararlar vererek sistemdeki güç akışlarını doğru bir şekilde kontrol ettiği gözlenmiştir. Ayrıca yük grubu içinde dinamik davranış durumları oluşturulmuştur. Değişken güçte yük grafikleri oluşturularak ve ani yük geçiş durumları meydana getirilerek akıllı enerji yönetim algoritmasının tepkisi incelenmiştir. Her durumda da sistemde bulunan dönüştürücüleri istenilen şekilde kontrol altında tutmaktadır.

HEDS ayrıca ada ve gece modunda çalıştırılarak deneysel sonuçları incelenmiştir. Ada modunda şebekeden bağımsız bir şekilde yük grubunu beslemektedir. Ada modunda akıllı enerji yönetim algoritması sistem güçlerini değerlendirerek yükün sürekli olarak beslenmesini sağlamaktadır. Bu durumda ani yük değişimi olduğunda ultrakapasitör grubunun etkili bir şekilde batarya grubuna destek olacak şekilde çalıştığı gözlenmiştir. Gece modunda HEDS'nde bulunan evirici birimi tersine çalışarak batarya grubunu şarj etmektedir. Böylece batarya grubu elektrik enerjisinin daha ucuz olduğu zaman dilimlerinde şarj edilerek sistemde enerji depolamasını sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu tez ile FV kaynak ile beslenen, batarya ve ultrakapasitör grubunun bulunduğu HEDS davranışı geliştirilen algoritmalarla ayrıntılı olarak incelenmiş simülasyon ve deneyler ile başarımları doğrulanmıştır. Böylece farklı çalışma koşullarında HEDS'nin güç değişimlerine bağlı olarak verim ve dinamik davranışları incelenmiştir. Ayrıca bu tez çalışmasında geliştirilen özgün kontrol teknikleri ile batarya ve ultrakapasitör grubunun birlikte kullanılarak gerçekleştirilen deneysel uygulamalarla literatüre yenilik getirilerek yeni teknolojiler geliştirilmiştir. Tezde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile benzer HEDS'nin ülkemiz şartlarında ve ticari olarak üretilmesi için gerekli olabilecek bilgi, beceri ve deneysel uygulama altyapısı oluşturulmuştur.

İleriki çalışmalarda, tez çalışmasında 3 faz 4 telli besleme sisteminde 110V faz-nötr gerilimine göre tasarlanarak laboratuvar test platformu kurulan 3 faz 4 telli HEDS'nin 220V faz-nötr nominal gerilim düzeyinde test edilmesine yönelik çalışmalara devam edilmesi planlanmaktadır. Böylece HEDS gibi ileri teknolojik bir ürünün dağıtım sisteminde ve endüstriyel tesislerde kullanılır hale getirilmesi amaçlanmaktadır.

dSpace kontrol geliştirme donanımı ile gerçek zamanlı denetimi yapılan 3 faz 4 telli HEDS test platformları için farklı denetim ve anahtarlama algoritmalarının geliştirilmesi ve yeni tekniklerin test edilmesi oldukça kolay hale geldiğinden gelecek dönemlerde de yeni çalışmalara devam edilmesi mümkün olacaktır. HEDS'nin güç katında çok seviyeli eviriciler kullanarak sistemin anahtarlama kayıplarının azaltılmasının evirici akım THB değerlerinde daha fazla iyileşme sağlanmasının araştırılması önerilmektedir.

3 faz 4 telli HEDS'nin DA barasına FV paneller, batarya ve ultrakapasitör grubunun yanı sıra YEK'dan olan rüzgâr generatörleri, depolama olarak hidrojen depolama, volan enerji depolama birimlerinin bağlanmasıyla farklı birimlerin kontrolü sağlanmış olacaktır. Ayrıca gerçekleştirilecek sistemin şebeke ile olan etkileşimi incelenmiş olacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] Divya K. C., Ostergaard J., Battery energy storage technology for power systems-An overview, *Electric Power Systems Research*, 2009, **79**, 511-520.
- [2] Ferreira H. L., Garde R., Fulli G., Lopes J. P., Characterization of electrical energy storage technologies, *Energy*, 2013, **53**, 288-298.
- [3] Kamali S. K., Tyagi V. V., Rahim N. A., Panwar N. L., Mokhlis H., Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, **25**, 135-165.
- [4] Gaurav H. S., Energy Storage Technology for Power Systems-An Overview, *International Journal of Innovative Research in Technology*, 2014, **1**, 1863-1868.
- [5] Chen H., Cong T. N., Tan C., Li Y., Ding Y., Progress in electrical energy storage system: A critical review, *Progress in Natural Science*, 2009, **19**, 291-312.
- [6] Barsali S., Ceraolo M., Giglioli R., Poli D., Storage applications for Smartgrids, *Electric Power Systems Research*, 2015, **120**, 109-117.
- [7] Smith S. C., Sen P. K., Kroposki B., Advancement of energy storage devices and applications in electrical power system, *Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in The 21st Century*, Pittsburgh, USA, 20-24 July 2008.
- [8] Castillo A., Gayme D. F., Grid-scale energy storage applications in renewable energy integration: A survey, *Energy Conversion and Management*, 2014, **87**, 885-894.
- [9] Kousksou T., Bruel P., Jamil A., Rhafiki T. E., Zeraouli Y., Energy storage: Applications and challenges, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2014, **120**, 59-80.
- [10] Guerrero M. A., Romero E., Barrero F., Milanés M. I., Gonzalez E., Overview of medium scale energy storage systems, *6<sup>th</sup> International Conference Compatibility and Power Electronics (CPE)*, Badajoz, Spain, 20-22 May 2009.
- [11] Eyer J., Corey G., Energy storage for the electricity grid: Benefits and market potential assessment guide, *Sandia National Laboratories*, SAND2010-0815, 1-160, 2010.

- [12] Rastler D., Electricity energy storage technology options: A White Paper Primer on Applications, Costs and Benefits, *Electric Power Research Institute (EPRI)*, 1020276, 1-34, 2010.
- [13] Martinez J. A., Modeling and characterization of energy storage devices, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, USA, 24-28 July 2011.
- [14] Vazquez S., Lukic S. M., Galvan E., Franquelo G. F., Juan M. C., Energy storage systems for transport and grid applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, **57**(12), 3881-3895.
- [15] Rajasekharan J., Koivunen V., Optimal Energy Consumption Model for Smart Grid Households With Energy Storage, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2014, **8**(6), 1154-1166.
- [16] Denholm P., Ela E., Kirby B., Milligan M., The role of energy storage with renewable electricity, *National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-6A2-47187*, 6-44, 2010.
- [17] Diaz G. F., Sumper A., Gomis B. O., Villafafila R., A review of energy storage technologies for wind power applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, **16**, 2154-2171.
- [18] Connolly D., A Review of Energy Storage Technologies for the Integration of Fluctuating Renewable Energy, PhD Thesis, University of Limerick, Department of Energy Engineering, Ireland, 2010.
- [19] Alamri B. R., Alamri A. R., Technical review of energy storage technologies when integrated with intermittent renewable energy, *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN)*, Nanjing, China, 06-07 April 2009.
- [20] Quan X., Dou X., Wu Z., Hu M., Yuan J., Harmonic voltage resonant compensation control of a three-phase inverter for battery energy storage systems applied in isolated microgrid, *Electric Power Systems Research*, 2016, **131**, 205-217.
- [21] Yeleti S., Yong Fu., Impacts of energy storage on the future power system, *North American Power Symposium (NAPS)*, Arlington, USA, 26-28 September 2010.
- [22] Wade N. S., Taylor P. C., Lang P. D., Jones P. R., Evaluating the benefits of an electrical energy storage system in a future smart grid, *Energy Policy*, 2010, **38**(11), 7180-7188.
- [23] Roberts B. P., Sandberg C., The role of energy storage in development of smart grids, *Proceedings of the IEEE*, 2011, **99**(6), 1139-1144.

- [24] Rajasekharan J., Koivunen V., Optimal Energy Consumption Model for Smart Grid Households With Energy Storage, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2014, **8**(6), 1154-1166.
- [25] Wei Z., Garrett D., Butkowski J., Yang W., Overview of distributive energy storage systems for residential communities, *IEEE EnergyTech*, Cleveland, Ohio, 29-31 May 2012.
- [26] Tan X., Li Q., Wang H., Advances and trends of energy storage technology in Microgrid, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, **44**(1), 179-191.
- [27] Zhang Y., Jiang Z. H., Yu X. W., Control strategies for battery/supercapacitor hybrid energy storage systems, *IEEE Energy 2030 Conference*, Atlanta, Georgia, USA, 17-18 November 2008.
- [28] Wu H., Wang S., Zhao B., Zhu C., Energy management and control strategy of a grid-connected PV/battery system, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2015, **25**(8), 1590-1602.
- [29] Khajesalehi J., Hamzeh M., Sheshyekani K., Afjei E., Modeling and control of quasi Z-source inverters for parallel operation of battery energy storage systems: Application to microgrids, *Electric Power Systems Research*, 2015, **125**, 164-173.
- [30] Zhang Y., Jiang Z. H., Yu X. W., Small-signal modeling and analysis of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems, *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, Minnesota, USA, 25-29 July 2010.
- [31] Garcia F. S., Ferreira A. A., Pomilio J. A., Control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system, *24th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Washington, USA, 15-19 February 2009.
- [32] Govindaraj A., King M., Lukic S. M., Performance characterization and optimization of various circuit topologies to combine batteries and ultra-capacitors, *36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Glendale, USA, 7-10 Nov 2010.
- [33] Miveh M. R., Rahmat M. F., Ghadimi A. A., Mustafa M. W., Control techniques for three-phase four-leg voltage source inverters in autonomous microgrids: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **54**, 1592-1610.
- [34] Kanchev H., Lu D., Colas F., Lazarov V., Francois B., Energy Management and Operational Planning of a Microgrid With a PV-Based Active Generator for Smart Grid Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, **58**(10), 4583-4592.

- [35] Bolborici V., Dawson F. P., Lian K. K., Sizing considerations for ultracapacitors in hybrid energy storage systems, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Phoenix, USA, 17-22 Sep 2011.
- [36] Baoquan L., Fang Z., Xianwen B., Control method of the transient compensation process of a hybrid energy storage system based on battery and ultra-capacitor in micro-grid, *21st IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Hangzhou, China, 28-31 May 2012.
- [37] Liu B., Zhuo F., Bao X., Fuzzy control for hybrid energy storage system based on battery and ultra-capacitor in micro-grid, *7th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*, Harbin, China, 2-5 June 2012.
- [38] Choudar A., Boukhetala D., Barkat S., Brucker J. M., A local energy management of a hybrid PV-storage based distributed generation for microgrids, *Energy Conversion and Management*, 2015, **90**, 21-33.
- [39] Bizon N., Oproescu M., Raceanu M., Efficient energy control strategies for a Standalone Renewable/Fuel Cell Hybrid Power Source, *Energy Conversion and Management*, 2015, **90**, 93-110.
- [40] Zhou H., Bhattacharya T., Tran D., Siew T. S. T., Khambadkone A. M., Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, **26**(3), 923-930.
- [41] Hu X., Tseng K. J., Srinivasan M., Optimization of battery energy storage system with super-capacitor for renewable energy applications, *IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE)*, Jeju, Korea, 29 May-2 Jun 2011.
- [42] Yuana Y., Suna C., Lib M., Choic S. S., Lid Q., Determination of optimal supercapacitor-lead-acid battery energy storage capacity for smoothing wind power using empirical mode decomposition and neural network, *Electric Power Systems Research*, 2015, **127**, 323-331.
- [43] Zhang J. C., Ji L. T., An effective hybrid energy storage system based on battery-EDLC for distributed generation systems, *5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Taichung, Taiwan, 15-17 June 2010.
- [44] Bocklisch T., Hybrid energy storage systems for renewable energy applications, *9th International Renewable Energy Storage Conference*, Dusseldorf, Germany, 9-11 March 2015.
- [45] Tang X. S., Qi Z. P., Economic analysis of EDLC/Battery hybrid energy storage, *11th International Conference on Electrical Machines and Systems*, Wuhan, China, 17-20 October 2008.

- [46] Lahyania A., Sarib A., Lahbiba I., Venet P., Optimal hybridization and amortized cost study of battery/supercapacitors system under pulsed loads, *Journal of Energy Storage*, 2016, **6**, 222-231.
- [47] Bae S., Jeon S. U., Park J. W., A Study on Optimal Sizing and Control for Hybrid Energy Storage System with SMES and Battery, *International Federation of Automatic Control Papers On-Line*, 2015, **48**(30), 507-511.
- [48] Jayasinghe S. D. G., Vilathgamuwa D. M., Madawala U. K., A direct integration scheme for battery-supercapacitor hybrid energy storage systems with the use of grid side inverter, *Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference And Exposition (APEC)*, Honolulu, USA, 12-13 Nov 2011.
- [49] Fathima A. H., Palanisamy K., Optimization in microgrids with hybrid energy systems-A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **45**, 431-446.
- [50] Etxeberria A., Vechiu I., Camblong H., Vinassa J. M., Comparison of three topologies and controls of a hybrid energy storage system for microgrids, *Energy Conversion and Management*, 2012, **54**(1), 113-121.
- [51] Trivino P. G., Mena A. J., Iborra F. L., Vazquez C. A., Ramirez L. M., Jurado F., Power control based on particle swarm optimization of grid-connected inverter for hybrid renewable energy system, *Energy Conversion and Management*, 2015, **91**, 83-92.
- [52] Ise T., Kita M., Taguchi A., A hybrid energy storage with a SMES and secondary battery, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2005, **15**(2), 1915-1918.
- [53] Subburaj A. S., Pushpakaran B. N., Bayne S. B., Overview of grid connected renewable energy based battery projects in USA, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **45**, 219-234.
- [54] Reihani E., Sepasi S., Roose L. R., Matsuura M., Energy management at the distribution grid using a Battery Energy Storage System (BESS), *Electrical Power and Energy Systems*, 2016, **77**, 337-344.
- [55] Wang C., Chen W., Shao S., Chen Z., Zhu B., Li H., Energy Management of Stand-alone Hybrid PV System, *Energy Procedia*, 2011, **12**, 471-479.
- [56] Singo T. A., Martinez A., Saadate S., Using ultracapacitors to optimize energy storage in a photovoltaic system, *International Symposium on Power Electronics*, Bangalore, India, 11-13 August 2008.
- [57] Pavkovic D., Lobrovic M., Hrgetic M., Komljenovic A., A design of cascade control system and adaptive load compensator for battery/ultracapacitor hybrid energy storage-based direct current microgrid, *Energy Conversion and Management*, 2016, **114**, 154-167.



- [58] Singo T. A., Martinez A., Saadate S., Rael S., An optimized photovoltaic system using an effective energy conversion, *8th International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems*, Lille, France, 1-3 July 2009.
- [59] Glavin M. E., Chan P. K. W., Armstrong S., Hurley W. G., A stand-alone photovoltaic supercapacitor battery hybrid energy storage system, *13th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Poznan, Poland, 1-3 September 2008.
- [60] Liua N., Zoua F., Wangb L., Wangc C., Chenc Z., Chena Q., Online energy management of PV-assisted charging station undertime-of-use pricing, *Electric Power Systems Research*, 2016, **137**, 76-85.
- [61] Mahto T., Mukherjee V., Energy storage systems for mitigating the variability of isolated hybrid power system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **51**, 1564-1577.
- [62] Glavin M. E., Hurley W. G., Optimization of a photovoltaic battery ultracapacitor hybrid energy storage system, *Solar Energy*, 2012, **86**(10), 3009-3020.
- [63] Ettahir K., Boulon L., Agbossou A., Optimization-based energy management strategy for a fuel cell/battery hybrid power system, *Applied Energy*, 2016, **163**, 142-153.
- [64] Glavin M. E., Chan P. K. W., Hurley W. G., Optimization of autonomous hybrid energy storage system for photovoltaic applications, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, California, USA, 20-24 September 2009.
- [65] Li C. H., Zhu X. J., Cao G. Y., Sui S., Hu M. R., Dynamic modeling and sizing optimization of stand-alone photovoltaic power systems using hybrid energy storage technology, *Renewable Energy*, 2009, **34**(3), 815-826.
- [66] Maclay J. D., Brouwer J., Samuelsen G. S., Dynamic modeling of hybrid energy storage systems coupled to photovoltaic generation in residential applications, *Journal of Power Sources*, 2007, **163**(2), 916-925.
- [67] Maclay J. D., Brouwer J., Samuelsen G. S., Experimental results for hybrid energy storage systems coupled to photovoltaic generation in residential applications, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, **36**(19), 12130-12140.
- [68] Liu F. C., Liu J. J., Zhou L. Y., A novel control strategy for hybrid energy storage system to relieve battery stress, *2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, Hefei, China, 16-18 June 2010.
- [69] Ahmed O. A., Bleijs J. A., Power flow control Methods for an ultracapacitor bidirectional converter in DC microgrids-A comparative study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, **26**, 727-738.

- [70] Han X. J., Chen F., Cui X. W., Li Y., Li X. J., A power smoothing control strategy and optimized allocation of battery capacity based on hybrid storage energy technology, *Energies*, 2012, **5**(5), 1593-1612.
- [71] Lee H., Shin B. Y., Han S., Jung S., Park B., Jang G., Compensation for the power fluctuation of the large scale wind farm using hybrid energy storage applications, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2012, **22**(3), 1051-1054.
- [72] Mendis N., Muttaqi K. M., Perera S., Management of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage and Synchronous Condenser for Isolated Operation of PMSG Based Variable-Speed Wind Turbine Generating Systems, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, **5**(2), 944-953.
- [73] Wu Z., Zhang Z., Yin C., Zhao Z., Design of a soft switching bidirectional DC-DC power converter for ultracapacitor-battery interfaces, *International Journal of Automotive Technology*, 2012, **13**(2), 325-336.
- [74] Ahmed O. A., Bleijs J. A., An overview of DC-DC converter topologies for fuel cell-ultracapacitor hybrid distribution system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **42**, 609-626.
- [75] Cao J., Emadi A., A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, **27**(1), 122-132.
- [76] Lee B. H., Shin D. H., Song H. S., Heo H., Kim H. J., Development of an advanced hybrid energy storage system for hybrid electric vehicles, *Journal of Power Electronics*, 2009, **9**(1), 51-60.
- [77] Romaus C., Bocker J., Witting K., Seifried A., Znamenshchykov O., Optimal energy management for a hybrid energy storage system combining batteries and double layer capacitors, *IEEE Energy Conversion Congress And Exposition*, California, USA, 20-24 September 2009.
- [78] Chia Y. Y., Lee L. H., Shafiabady N., Isa D., A load predictive energy management system for supercapacitor-battery hybrid energy storage system in solar application using the Support Vector Machine, *Applied Energy*, 2015, **137**, 588-602.
- [79] Allegre A. L., Bouscayrol A., Trigui R., Influence of control strategies on battery/supercapacitor hybrid Energy Storage Systems for traction applications, *5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Dearborn, Michigan, 7-11 September 2009.
- [80] Song H. S., Jeong J. B., Shin D. H., Lee B. H., Kim H. J., Heo H., Dynamic SOC compensation of an ultracapacitor module for a hybrid energy storage system, *Journal of Power Electronics*, 2010, **10**(6), 769-776.

- [81] Dwi T., Amina A., Energy storage system using battery and ultracapacitor on mobile charging station for electric vehicle, *Energy Procedia*, 2015, **68**, 429-437.
- [82] Lukic S. M., Wirasingha S. G., Rodriguez F., Cao J., Emadi A., Power management of an ultracapacitor/battery hybrid energy storage system in an HEV, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Windsor, United Kingdom, 6-8 September 2006.
- [83] Mohamed A., Mohammed O., Real-time energy management scheme smart grid applications, *Electric Power Systems Research*, 2013, **96**, 133-143.
- [84] Kostkova K., Omelina L., Kycina P., Jamrich P., An introduction to load management, *Electric Power Systems Research*, 2013, **95**, 184-191.
- [85] Onar O. C., Khaligh A., A novel integrated magnetic structure based dc/dc converter for hybrid battery/ultracapacitor energy storage systems, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, **3**(1), 296-307.
- [86] Tutuş A., Türkiye enerji sistemi için bir zorunluluk, Enerji depolama sistemleri, *DEK 11. Enerji Kongresi ve Sergisi*, İzmir, Türkiye, 21-23 Ekim 2012.
- [87] Erdinç O., Uzunoğlu M., Vural B., Hibrit alternatif enerji sistemlerinde kullanılan enerji depolama üniteleri, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, Elazığ, Türkiye, 05-07 Ekim 2011.
- [88] Kuşdoğan Ş., Elektrikli otomobillerde enerji depolama sistemlerindeki gelişmeler, *Mühendis ve Makina*, 2009, **50**(596), 2-11.
- [89] Keskin A., Hibrid taşıt teknolojileri ve uygulamaları, *Mühendis ve Makina*, 2009, **50**(597), 12-20.
- [90] Mazman M., Uzun D., Kaypmaz C., Biçer E., Elektrikli araçlar için enerji depolama çözümleri, *Mühendis ve Makina*, 2012, **53**(628), 21-25.
- [91] Atabay M., Lityum-Iyon Bataryaların Fotovoltaik Sistemlerde Uygulanabilirliğinin Diğer Batarya Tipleri ile Karşılaştırılmalı Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006, 197358.
- [92] Onar Ö. Ç., Rüzgar türbini/yakıt hücresi/ultra-kapasitör hibrid güç üretim sisteminin dinamik modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 201509.
- [93] Yağcıtekin B., Rüzgar enerjisi üretiminde depolama tekniği ve tahmin sistemleri kullanılarak enerji yönetim sisteminin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 223097.

- [94] Ateş Y., Hibrit yakıt hücresi/ultra-kapasitörlü taşıt güç sisteminin yapay sinir ağları ile kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 244071.
- [95] Gözüküçük M. A., Seri hibrid araçlarda ultrakapasitör destekli DC bara güç kontrolü: Tasarımı, analizi ve simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2011, 287154.
- [96] Uzunoğlu M., Yakıt hücreli ve ultra-kapasitörlü hibrit taşıtlar için enerji yönetim sisteminin tasarım ve uygulaması, *TÜBİTAK 1001 Projesi*, 107M355, 1-156, 2010.
- [97] Çetinkaya H. B., Enerji Yönetimi ve Enerji Verimliliği Açısından Akıllı Şebekeler ve SCADA Uygulamaları, 3. *Ulusal Enerji Verimliliği Forumu ve Fuarı*, İstanbul, Türkiye, 12-13 Ocak 2012.
- [98] Shawkat A. B., *Smart Grids, Opportunities, Developments and Trends*, 1st ed., Springer, New York, 2013.
- [99] Uzunoğlu M., Erdinç O., *Akıllı Şebekelere Giriş*, 1. Basım, Nobel, Ankara, 2013.
- [100] Moore A. T., Design, Implementation and Evaluation of A Microgrid In Island and Grid Connected Modes With A Fuel Cell Power Source, Master Thesis, University of Western Ontario, Electrical and Computer Engineering, Canada, 2012.
- [101] Damjanovic N., Smart Grid Functionality of a PV- Energy Storage System, Master Thesis, University of South Florida, Department of Electrical Engineering, USA, 2011.
- [102] Charles R., Primer on Demand-Side Management with an Emphasis on Price-Responsive Programs, *The World Bank*, D06090, 4-20, 2005.
- [103] Pires V. F., Romero E., Vinnikov D., Roasto I., Martins J. F., Power converter interfaces for electrochemical energy storage systems-A review, *Energy Conversion and Management*, 2014, **86**, 453-475.
- [104] Mohamed F. A., Microgrid Modelling and Online Management, PhD Thesis, Helsinki University of Technology, Department of Control Engineering, Finland, 2008.
- [105] Kethani A., Marwali M., *Smart Power Grids*, 1st ed., Springer, New York, 2011.
- [106] Segundo H. B. S., Energy storage systems integration PV power plants, PhD Thesis, University of Polytechnic Catalunya, Department of Electrical Engineering, Spain, 2011.
- [107] <http://energystorage.org/energy-storage/technology-applications/electricity-storage-and-plug-vehicles> (Ziyaret tarihi: 14 Şubat 2016).

- [108] Sasaki T., Kadoya T., Enomoto K., Study on load frequency control using Redox flow batteries, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Detroit, USA, 24-28 July 2011.
- [109] Abbey C., Joos G., Supercapacitor energy storage for wind energy applications, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2007, **43**(3), 769-776.
- [110] IEEE Std., IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, *IEEE*, Std-1547, 1-16, 2003.
- [111] Baroudi J. A., Dinavahi V., Knight A. M., Are view of power converter topologies for wind generators, *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, San Antonio, USA, 15-18 May 2005.
- [112] Hayashi H., Hatabe Y., Nagafuchi T., Taguchi A., Terazono K., Ishii T., Test Results of Power System Control by Experimental SMES, *IEEE Transactions on Applied Super Conductivity*, 2006, **16**(2), 598-601.
- [113] Suvire G. O., Mercado P. E., DSTATCOM with Flywheel Energy Storage System for wind energy applications: control design and simulation, *Electric Power Systems Research*, 2010, **80**(3), 345-353.
- [114] Barrado J. A., Grino R., Valderrama B. H., Power-quality improvement of astand-alone induction generator using a STATCOM with battery energy storage system, *IEEE Transactionson Power Delivery*, 2010, **25**(4), 2734-2741.
- [115] Katiraei F., Iravani M. R., Lehn P. W., Micro-grid autonomous operation during and sub-sequent to islanding process, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, **20**(1), 248-257.
- [116] Chowdhury S., Crossley P., *Microgrids and active distribution networks*, 1st ed., IET Digital Library, London, 2009.
- [117] Masson G., Latour M., Rekinge M., Theologitis T., Papoutsis M., Global market outlook for photovoltaics 2013-2017, *European Photovoltaic Industry Association (EPIA)*, EPIA-2013-2017, 12-48, 2012.
- [118] Akhil A., Huff G., Currier B., Kaun B. C., Rastler M., Chen S. B., Cotter A. L., Bradshaw D. T., Gauntlett W. D., DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA, *SANDIA Report*, SANDIA2013-5131, 1-150, 2013.
- [119] Elzinga D., Heinen S., Munuera L., Remme U., Energy Storage Technology Roadmap, *International Energy Agency*, IEA-2014, 1-46, 2014.
- [120] Farret F. A., Simoes M. G., *Integration of alternative sources of energy, Printed in the United States of America*, 1st ed., John Wiley & Sons., New Jersey, 2006.

- [121] Christiansen C., Murray B., Energy Storage Study, Funding And Knowledge Sharing Priorities, *Australian Renewable Energy Agency*, ABN-35-931, 8-80, 2015.
- [122] Gunderson V., 2016 Top Markets Report Smart Grid, *Industry & Analysis (I&A)*, ITA-2016-34, 12-70, 2016.
- [123] Masaud T. M., Keun L., Sen P. K., An overview of energy storage technologies in electric power systems: What is the future?, *North American Power Symposium (NAPS)*, Arlington, USA, 26-28 September 2010.
- [124] <http://energystorage.org/energy-storage/technology-applications/frequency-regulation> (Ziyaret tarihi: 18 Temmuz 2016).
- [125] <http://energystorage.org/energy-storage/energy-storage-benefits/benefit-categories> (Ziyaret tarihi: 18 Temmuz 2016).
- [126] <http://energystorage.org/energy-storage/technology-applications/community-energy-storage> (Ziyaret tarihi: 18 Temmuz 2016).
- [127] <http://energystorage.org/energy-storage/technology-applications/flexible-peaking-resource> (Ziyaret tarihi: 18 Temmuz 2016).
- [128] Whittingham M. S., History, evolution, and future status of energy storage, *Proceedings of the IEEE*, 2012, **100**, 1518-1534.
- [129] Kempener R., Vivero G., Renewable and Electricity Storage, A technology roadmap for REmap 2030, *International Renewable Energy Agency (IRENA)*, Remap-2030, 20-40, 2015.
- [130] Wu D., Tang F., Dragicevic T., Vasquez J. C., Guerrero J. M., A control architecture to coordinate renewable energy sources and energy storage systems in islanded microgrids, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, **6**(3), 1156-1166.
- [131] Wu D., Tang F., Dragicevic T., Vasquez J. C., Guerrero J. M., An autonomous active power control for islanded AC microgrids with photovoltaic generation and energy storage system, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2014, **29**(4), 882-892.
- [132] Marzband M., Parhizi N., Savaghebi M., Guerrero J. M., Distributed smart decision-making for a multimicrogrid system based on a hierarchical interactive architecture, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2016, **31**(1), 637-648.
- [133] Nguyen H. K., Song J. B., Han Z., Distributed Demand Side Management with Energy Storage in Smart Grid, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2015, **26**(12), 3346-3357.

- [134] Thounthonga P., Chunkag V., Sethakul P., Sikkabut S., Pierfederici S., Davat B., Energy management of fuel cell/solar cell/supercapacitor hybrid power source, *Journal of Power Sources*, 2011, **196**, 313-324.
- [135] Pincetia P., Vantia M., Broccab C., Carnesecchib M., Macera C. P., Design criteria for a power management system for microgrids with renewable sources, *Electric Power Systems Research*, 2015, **122**, 168-179.
- [136] Dash V., Bajpai P., Power management control strategy for a stand-alone solar photovoltaic-fuel cell–battery hybrid system, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2015, **9**, 68-80.
- [137] Güneroğlu A., Fotovoltaik sistemlerde FPGA kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2008, 233148.
- [138] Hoffmann W., Connecting the sun solar photovoltaics on the road to large-scale grid integration full report, *European Photovoltaic Industry Association (EPIA)*, EPIA-2012, 23-77, 2012.
- [139] Wang N., Wu M. Y., Shi G., Study on characteristics of photovoltaic cells based on Matlab simulation, *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Wuhan, China, 25-28 March 2011.
- [140] Natsheh E. M., Albarbar A., Photovoltaic model with MPPT for standalone/grid connected applications, *Renewable Power Generation (RPG)*, Edinburgh, UK, 6-8 September 2011.
- [141] Ang S., Oliva A., *Power-Switching Converters*, 2nd ed., CRC Press, USA, 2005.
- [142] Sathya P., Natarajan R., Design and Implementation of 12V/24V Closed loop Boost Converter for Solar Powered LED Lighting System, *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, 2013, **5**, 254-264.
- [143] Bodur H., *Güç Elektroniği Temel Analiz ve Sayısal Uygulamalar*, 1. Basım, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2010.
- [144] Adhiraki S., Li F., Coordinated V-f and P-Q Control of Solar Photovoltaic Generators with MPPT and Battery Storage in Microgrids, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, **5**, 1270-1281.
- [145] Garimella N., Nair N. C., Assessment of Battery Energy Storage Systems for Small Scale Renewable Energy Integration, *IEEE TENCON Region 10 Conference*, Singapore, 23-26 November 2009.
- [146] Baoquan L., Fang Z., Xianwen B., Control Method of the Transient Compensation Process of a Hybrid Energy Storage System Based on Battery and Ultra-Capacitor in Micro-grid, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Hangzhou, China, 28-31 May 2012.

- [147] Ding F., Li P., Gao F., Ding C., Modeling and Simulation of Grid-connected Hybrid Photovoltaic/Battery Distributed Generation System, *2010 China International Conference on Electricity Distribution*, Nanjing, China, 13-16 September 2010.
- [148] Liu F., Liu J., Zhou L., A Novel Control Strategy for Hybrid Energy Storage System to Relieve Battery Stress, *2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, Hefei, China, 16-18 June 2010.
- [149] Xiong X., Chi K., Ruan X., Bifurcation Analysis of Standalone Photovoltaic-Battery Hybrid Power System, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2013, **60**(5), 1354-1365.
- [150] Liu B., Zhuo F., Bao X., Fuzzy Control for Hybrid Energy Storage System Based on Battery and Ultra-capacitor in Micro-grid, *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*, Harbin, China, 2012, 2-5 June 2012.
- [151] Pany P., Singh R. K., Tripathi R. K., Bidirectional DC-DC converter fed drive for electric vehicle system, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2011, **3**, 101-110.
- [152] Pham C., Biris V. C., Teodorescu R., SiC-based High Efficiency Bidirectional Battery Converter for Smart PV Residential Systems, *Power Conversion Intelligent Motion (PCIM) Europe*, Nuremberg, Germany, 14-16 May 2013.
- [153] Inoue S., Akagi H., A Bidirectional DC-DC Converters for Energy Storage Systems, *Applied Power Electronics Conference (APEC)*, Anaheim, California, 25 February-1 March 2007.
- [154] Pinto J. G., Pregitzer R., Luis C. M., Joao L. A., 3-phase 4-wire shunt active power filter with renewable energy interface, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Seville, Spain, 28-30 March 2007.
- [155] Singh M., Khadkikar V., Chandra A., Varma R. K., Grid interconnection of renewable energy sources at the distribution level with power-quality improvement features, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, **26**, 307-315.
- [156] Franke W. T., Kürtz C., Fuschs F. W., Analysis of control strategies for a 3 phase 4 wire topology for transformerless solar inverters, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Bari, Italy, 4-7 July 2010.
- [157] Teodorescu R., Liserre M., Rodriuez P., *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*, 1st ed., John Wiley & Sons., United Kingdom, 2011.
- [158] De K. J., Meersman B., Vandoorn T., Renders B., Vandeveldel L., Comparison of three-phase four-wire converters for distributed generation, *Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Cardiff, UK, 31 August-3 September 2010.



- [159] Amataoul F. Z., Lamchich T. M., Outzourhit A., Design control of dc/ac converter for a grid connected pv systems with maximum power tracking using matlab/simulink, *International Conference on Multimedia Computing and System*, Ouarzazate, Maroc, 7-9 April 2011.
- [160] Kerekes T., Teodorescu R., Rodriguez P., Vazquez G., Aldabas E., A new high-efficiency single-phase transformerless PV inverter topology, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, **58**, 184-191.
- [161] Ciobotaru M., Teodorescu R., Blaabjerg F., Control of single-stage single-phase PV inverter, *European Conference on Power Electronics and Applications*, Dresden, Germany, 2-5 September 2007.
- [162] Uçar M., 3-fazlı 4-telli paralel aktif güç filtresinin tasarımı ve uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2005, 168841.
- [163] Uçar M., 3-fazlı 4-telli sistemlerde güç kalitesi düzeltimi için birleşik seri-paralel aktif filtre sisteminin tasarımı, denetimi ve gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2010, 283044.
- [164] Chroma A. I., Programmable DC Power Supply (with Solar Array Simulation) 62000H Series Operation & Programming Manual, *Chroma Ate Inc.*, 62000H, 1-10, 2013.
- [165] [http://www.maxwell.com/images/documents/160vmodule\\_ds\\_3000246-5.pdf](http://www.maxwell.com/images/documents/160vmodule_ds_3000246-5.pdf) (Ziyaret tarihi: 08 Ağustos 2016).
- [166] <http://www.e-kart.fr/images/stories/technique/maxwell/bpak-15v-series.pdf> (Ziyaret tarihi: 08 Ağustos 2016).
- [167] Scale P. I., Concept 2SC0108T Description and Application Manual Technical Data Sheet, *Power Integrations*, 2SC0108T, 1-15, 2013.
- [168] Scale P. I., Concept 2BB0108T Description and Application Manual Technical Data Sheet, *Power Integrations*, 2BB0108T, 1-15, 2013.
- [169] Araujo S. V., Engler A., Sahan B., Antunes F., LCL filter design for grid-connected NPC inverters in offshore wind turbines, *7th International Conference on Power Electronics ICPE07*, Daegu, South Korea, 22-26 October 2007.
- [170] Aredes M., Hafner J., Heumann K., Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter Control Strategies. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1997, **12**, 311-318.
- [171] IEEE Std., IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, *IEEE*, Std-519-1992, 55-60, 1993.
- [172] Chroma A. I., Programmable DC Electronic Load 6310A Series Operation & Programming Manual, *Chroma Ate Inc.*, 6310A, 1-7, 2013.

[173] Dspace GmbH., dSPACE Release New Features and Migration, *DSPACE*, Release-6.2, 9-39, 2008.



## KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Aktas A.**, Ozdemir E., Karakaya A., Ucar M., Operation and Performance of Grid-Connected Solar Photovoltaic Power System in Kocaeli University, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2013, **15**, 559-564.
- [2] Sezen S., **Aktas A.**, Ucar M., Ozdemir E., Design and operation of multi-function photovoltaic power system with shunt active filtering using a single-stage three-phase multilevel inverter, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2016, **1**, 1-20.
- [3] Özdemir E., Özdemir Ş., Erhan K., **Aktaş A.**, Akıllı Şebekelerde Enerji Depolama Uygulamalarının Önündeki Fırsatlar ve Karşılaşılan Zorluklar, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2016, **1**, 1-22.
- [4] **Aktas A.**, Erhan K., Ozdemir S., Ozdemir E., Experimental Investigation of a New Smart Energy Management Algorithm for a Hybrid Energy Storage System in Smart Grid Applications, *Electric Power Systems Research*, 2016, **1**, 1-20.
- [5] Ozdemir E., **Aktas A.**, Karakaya A., Ucar M., Operation and Performance of Grid Connected Solar Photovoltaic Power System in Kocaeli University, *SOLAR TR2 Solar Electricity Conference and Exhibition*, Antalya, Turkey, 7-9 November 2012.
- [6] Erhan K., **Aktas A.**, Ozdemir E., Analysis of a Hybrid Energy Storage System Composed from Battery and Ultra-capacitor, *7th International Ege Energy Symposium & Exhibition*, Usak, Turkey, 18-20 June 2014.
- [7] Kircicek Y., **Aktas A.**, Ucar M., Ozdemir S., Ozdemir E., Modeling and Analysis of a Battery Energy Storage System Supplied from Photovoltaic Power Source, *7th International Ege Energy Symposium & Exhibition*, Usak, Turkey, 18-20 June 2014.
- [8] **Aktas A.**, Erhan K., Ozdemir E., Ozdemir S., Development of a Hybrid Energy Storage System Composed Battery and Ultracapacitor Supplied from Photovoltaic Power Source for 3-phase 4-wire Smart Micro Grid Structure, *SolarTR 2014*, Izmir, Turkey, 19-21 November 2014.
- [9] Sezen S., **Aktas A.**, Ucar M., Ozdemir E., A Three-Phase Three-Level NPC Inverter Based Grid-Connected Photovoltaic System with Active Power Filtering, *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC)*, Antalya, Turkey, 21-24 September 2014.

- [10] Koç İ. M., Erhan K., **Aktaş A.**, Özdemir E., Özdemir Ş., Akıllı Şebeke Standartlarında Enerji Depolama Uygulamalarının İncelenmesi, 6. *Enerji Verimliliği, Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi EVK*, Sakarya, Türkiye, 04-06 Haziran 2015.
- [11] Erkurt S., Özdemir E., Koç İ. M., **Aktaş A.**, Erhan K., Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Elektrik Üretim Sistemlerinin Güç Kalitesine Etkileri ve Performans Analizi, 6. *Enerji Verimliliği, Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi EVK*, Sakarya, Türkiye, 04-06 Haziran 2015.
- [12] **Aktaş A.**, Erhan K., Koç İ. M., Özdemir E., Özdemir Ş., Uçar M., Akıllı Şebekelerde Enerji Depolama Çözümleri, *Enerjide AR-GE Çalıştayı*, İstanbul, Türkiye, 30 Kasım 2015.
- [13] Özdemir E., Özdemir Ş., **Aktaş A.**, Koç İ. M., Erhan K., Fotovoltaik Kaynaktan Beslenen 3-Fazlı 4-Telli Akıllı Mikro Şebeke Yapısının Batarya Ve Ultra-Kapasitörden Oluşan Hibrit Enerji Depolama Sistemi İle Geliştirilmesi, *Doğu Marmara Genel Sanayi ve Teknoloji Fuarı SANTEK'14*, Kocaeli, Türkiye, 25-28 Eylül 2014.
- [14] **Aktaş A.**, Ozdemir E., Erhan K., Ozdemir S., Design and Analysis of Hybrid Energy Storage System Supplied from Photovoltaic Power Source, *8th International Ege Energy Symposium & Exhibition*, Afyonkarahisar, Turkey, 11-13 May 2016.
- [15] Erhan K., Ozdemir E., **Aktaş A.**, Design and Analysis of Ultra-Capacitor Regenerative Braking Energy Storage System for Hybrid and Electrical Vehicles, *8th International Ege Energy Symposium & Exhibition*, Afyonkarahisar, Turkey, 11-13 May 2016.
- [16] Erhan K., Ozdemir E., **Aktaş A.**, Design and Analysis of Flywheel Regenerative Braking Energy Storage System for Hybrid and Electrical Vehicles, *8th International Ege Energy Symposium & Exhibition*, Afyonkarahisar, Turkey, 11-13 May 2016.
- [17] Ozdemir E., Ozdemir S., Erhan K., **Aktaş A.**, Energy Storage Technologies, Opportunities and Challenges in Smart Grids, *International Smart Grid Workshop and Certificate Program*, Istanbul, Turkey, 21-25 March 2016.
- [18] **Aktaş A.**, Özdemir E., Özdemir Ş., Uçar M., Koç İ. M., Erhan K., Fotovoltaik Kaynaktan Beslenen 3-Fazlı 4-Telli Akıllı Mikro Şebeke Yapısının Batarya Ve Ultra-Kapasitörden Oluşan Hibrit Enerji Depolama Sistemi İle Geliştirilmesi, *Doğu Marmara Genel Sanayi ve Teknoloji Fuarı SANTEK'16*, Kocaeli, Türkiye, 2016.
- [19] Ozdemir E., Koc I. M., Erhan K., **Aktaş A.**, Energy Storage Technologies, Opportunities and Challenges in Smart Grids, *Smart Grids Workshop*, Istanbul, Turkey, 22-23 January 2015.

- [20] Kırecek Y., Aktaş A., zdemir ř., Yenilenebilir Enerji Desteği için Kullanılan Farklı Tip Bataryaların Modellenmesi ve Karşılaştırılmal Analizi, *Politeknik Dergisi*, 2016, **1**, 1-8.
- [21] Ayaz M., Erhan K., Aktaş A., zdemir E., Salihoğlu H., Araç Yakıt Tankı Montajı için Otomasyon Sistem Tasarımı ve Uygulaması, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2015, **3**, 357-366.



## ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Bursa’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Bursa’da tamamladı. 2005 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü’nden 2010 yılında Elektrik Teknik Öğretmeni olarak mezun oldu. 2011-2013 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. Kasım 2013 - Mayıs 2015 yılları arasında Prof. Dr. Engin Özdemir yürütücülüğündeki 113E143 no’lu TÜBİTAK 1001 araştırma projesinde tam zamanlı bursiyer olarak görev almıştır.

