

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**3 FAZLI 4 TELLİ ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK
SİSTEMLER İÇİN MAKSİMUM GÜÇ İZLEYEN 4 KOLLU
EVİRİCİ TASARIMI**

AHMET AKTAŞ

KOCAELİ 2013

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**3 FAZLI 4 TELLİ ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK
SİSTEMLER İÇİN MAKSİMUM GÜÇ İZLEYEN 4 KOLLU
EVİRİCİ TASARIMI**

AHMET AKTAŞ

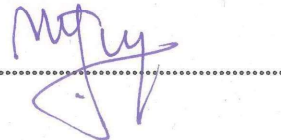
Doç.Dr. Şule ÖZDEMİR
Danışman, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. Ercüment KARAKAŞ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Yrd.Doç.Dr. Mehmet UÇAR
Jüri Üyesi, Düzce Üniv.


.....


.....


.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 01.07.2013

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Alternatif enerji kaynakları arayışı ve bu alanda fotovoltaik güneş sistemlerinin kullanımı, doğrudan kolayca elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi gibi avantajları sebebiyle popülerliğini arttırmaktadır. Bu sistemler şebekeden bağımsız ve şebeke bağlantılı olmak üzere genellikle iki şekilde kullanılmaktadır. Büyük güçlü sistemler için özellikle 3 faz 4 telli topolojilerde maksimum güç ile enerjinin şebekeye senkronizasyonu önemli bir araştırma konusudur. Bu yapılarda minimum donanım gereksinimi ile maksimum enerji ve verim istenilmektedir. Geliştirilen birçok yöntem, teknik, topoloji yapıları ve yüksek verimli sistem tasarlamak mümkün hale gelmektedir.

Çalışma kapsamında fotovoltaik panellerden maksimum enerji almak, 3 fazlı 4 kollu 4 telli yapı ile nötr hattını kontrol ederek değişik tip yüklere cevap vermek amaçlanmaktadır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen maksimum güç izleyen eviricinin tasarım ve uygulama çalışmalarına ve MATLAB/SIMULINK programının güç sistem araç kutusu kullanılarak oluşturulan evirici yapısının simülasyon çalışmalarına yer verilmektedir.

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

Tez çalışmalarım süresince, çalışmalarına yön veren ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Şule ÖZDEMİR ve Doç. Dr. Engin ÖZDEMİR'e, deneysel ve simülasyon çalışmalarda yaptıkları katkılardan dolayı Yrd. Doç. Dr. Mehmet UÇAR ,Yrd. Doç. Dr. Murat KALE ve Öğr. Gör. Serkan SEZEN'e teşekkür ederim.

Haziran – 2013

Ahmet Aktaş

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLOLAR DİZİNİ	vii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	viii
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
GİRİŞ	1
1. GÜNEŞ ENERJİSİ	3
1.1. Dünya ve Avrupa’da Güneş Enerjisi Kullanımı	4
1.2. Türkiye’de Güneş Enerjisi ve Yasal Düzenlemeler	6
1.3. Güneş Pilleri	8
1.3.1. Güneş pillerinin yapısı ve çalışması	9
1.3.2. Güneş pili elektriksel modeli	13
2. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİ	18
2.1. Maksimum Güç Noktası İzleyicisi Çalışma Prensipleri	19
2.2. Maksimum Güç Noktası İzleyicisi Teknikleri	21
2.2.1. Sabit gerilim metodu	22
2.2.2. Kısa devre akım metodu	23
2.2.3. Açık gerilim metodu	24
2.2.4. Saptır-gözle metodu	24
2.2.5. Artan iletkenlik metodu	28
2.2.6. Sıcaklık metodu	31
2.3. MGNİ Tekniklerinin Karşılaştırılması	33
3. 3 FAZLI ŞEBEKE BAĞLANTILI EVİRİCİLER	36
3.1. 3 Fazlı Gerilim Beslemeli Eviriciler	37
3.1.1. 3 fazlı gerilim beslemeli eviricilerde modülasyon yöntemleri	38
3.1.1.1. Sinüzoidal darbe genişlik modülasyon yöntemi	38
3.1.1.2. Histerezis bantlı darbe genişlik modülasyon yöntemi	39
3.1.1.3. Uzay vektör darbe genişlik modülasyon yöntemi	41
3.2. 3 Faz, 4 Kollu, 4 Telli Evirici Yapıları	41
3.3. Tek ve Çift Aşamalı Şebeke Bağlantılı FV Sistemler	44
3.4. Transformatörsüz FV Evirici Yapılarında İzolasyon ve Sızıntı Akımları	47
4. 3 FAZLI 4 TELLİ ŞEBEKE BAĞLANTILI MGNİ FV SİSTEMİ VE SİMÜLASYON SONUÇLARI	53
4.1. FV Panel Dizisi ve Saptır-Gözle Kontrol Algoritması	55
4.2. Kontrol Algoritması	57
4.2.1. Faz kilitleme döngüsü (Phase Locked Loop PLL)	58
4.2.2. Park (dq0/abc) dönüşümü	58
4.3. Akım Denetleyici	59
4.4. Simülasyon Sonuçları	60
5. 3 FAZLI 4 TELLİ ŞEBEKE BAĞLANTILI MGNİ FV SİSTEM TASARIMI VE UYGULAMASI	79

5.1. FV Panel Dizisi ve Yük Grubu	82
5.2. Akım-Gerilim Ölçüm Kartı.....	84
5.3. Sinyal Koşullandırma Ara Birim Kartı	85
5.4. DA Bara Gerilim Ölçüm Kartı.....	85
5.5. Aşırı Akımı ve Gerilim Koruma kartı.....	86
5.6. IGBT Sürücü Modülleri ve Geliştirme Bordları	86
5.7. Sürücü Bordları için Sinyal Yükseltici ve Koruma Kartı	88
5.8. Güç Devresi.....	89
5.9. Güneş Enerjisi Ölçeri ve Piranometre.....	90
5.10. DSPACE Tabanlı Gerçek Zamanlı Denetim Sistemi	92
5.11. Deneysel Sonuçlar	95
5.12. Dengeli Yük Durumunda FV Sistemi	95
5.13. Dengesiz Yük Durumunda FV Sistemi	102
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	108
KAYNAKLAR	111
EKLER.....	115
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	117
ÖZGEÇMİŞ	118

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Güneş, atmosfer ve yeryüzü arasındaki enerji akışı.....	3
Şekil 1.2.	Tek kristal silikon (soldaki) ve Polikristal silikon (sağdaki) güneş panelleri.....	8
Şekil 1.3.	Fotovoltaik pilin çalışması.....	10
Şekil 1.4.	Farklı ışınımında FV panelin akım-gerilim (I-V) karakteristiği.....	11
Şekil 1.5.	Farklı sıcaklıkta FV panelin akım-gerilim (I-V) karakteristiği.....	12
Şekil 1.6.	FV'nin akım-gerilim-güç (I-V-P) karakteristiği.....	13
Şekil 1.7.	Tek diyotlu güneş pili eşdeğer devresi.....	13
Şekil 1.8.	Güneş pili dizisi eşdeğer devresi.....	16
Şekil 2.1.	Güneş pilinin belirli bir güneşlenme durumu için elektriksel karakteristiği.....	19
Şekil 2.2.	Güneş paneli akım-gerilim ve güç-gerilim eğrisi.....	20
Şekil 2.3.	Sabit gerilim blok diyagramı.....	22
Şekil 2.4.	Kısa devre akım blok diyagramı.....	23
Şekil 2.5.	Açık gerilim metodu blok diyagramı.....	24
Şekil 2.6.	Saptır-gözle metodundaki MGN farklılıkları.....	25
Şekil 2.7.	Saptır-gözle algoritmasının akış diyagram şeması.....	27
Şekil 2.8.	Saptır-gözle yöntemi blok diyagramı.....	27
Şekil 2.9.	FV panelin dP/dV değişimini gösteren P-V karakteristik eğrisi.....	28
Şekil 2.10.	Artan iletkenlik metodu algoritmasının akış diyagram şeması.....	30
Şekil 2.11.	Artan iletkenlik metodu blok diyagramı.....	31
Şekil 2.12.	Sıcaklık metodu blok diyagramı.....	32
Şekil 3.1.	3 fazlı gerilim beslemeli eviricinin devre şeması.....	37
Şekil 3.2.	Sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu.....	39
Şekil 3.3.	Histerezis akım kontrol yöntemi blok diyagramı.....	40
Şekil 3.4.	Histerezis akım kontrol DGM üretim prensibi.....	40
Şekil 3.5.	3 faz 3 telli evirici yapısı.....	42
Şekil 3.6.	4 kollu 4 telli evirici yapısı.....	43
Şekil 3.7.	Bölünmüş bağlantılı (split-link) 4 telli yapısı.....	43
Şekil 3.8.	Çift aşamalı (dual-stage) dönüştürücü topolojisi.....	45
Şekil 3.9.	Tek aşamalı (single-stage) dönüştürücü topolojisi.....	45
Şekil 3.10.	3 fazlı tam köprü evirici topolojisi.....	48
Şekil 3.11.	Bölünmüş bağlantılı 3 fazlı tam köprü gerilim kaynaklı evirici topolojisi.....	48
Şekil 3.12.	3 fazlı nötr noktası kenetlenmiş evirici tabanlı modüler topoloji.....	49
Şekil 4.1.	3 fazlı 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı MGNİ FV sistemin MATLAB/SIMULINK blok diyagramı.....	54
Şekil 4.2.	FV panel dizisi ve Saptır-gözle kontrol algoritması blok diyagramı.....	56
Şekil 4.3.	FV panel dizisinin blok diyagramı.....	57
Şekil 4.4.	Kontrol algoritması blok diyagramı.....	57
Şekil 4.5.	Histerezis bant akım denetleyici ile eviricinin anahtarlama sinyallerini üreten simulink blok diyagramı.....	59

Şekil 4.6.	1. durumda ışınım, akım, gerilim ve güç değişimi simülasyon sonuçları	61
Şekil 4.7.	1. durumda dengeli yükte A faz değişimi simülasyon sonuçları	62
Şekil 4.8.	1. durumda dengeli yükte 3 faz değişimi simülasyon sonuçları	63
Şekil 4.9.	1. durumda dengesiz yükte 3 faz değişimi simülasyon sonuçları	65
Şekil 4.10.	1. durumda 0,1-0,2 s'deki dengeli yük grubunda evirici faz ve nötr akımlarının ayrıntılı dalga şekilleri	66
Şekil 4.11.	1. durumda 0,1-0,2 s'deki dengesiz yük grubunda evirici faz ve nötr akımlarının ayrıntılı dalga şekilleri	67
Şekil 4.12.	2. durumda ışınım, akım, gerilim ve güç değişimi simülasyon sonuçları	70
Şekil 4.13.	2. durumda dengeli yükte A faz değişimi simülasyon sonuçları	71
Şekil 4.14.	2. durumda dengeli yükte 3 faz değişimi simülasyon sonuçları	72
Şekil 4.15.	2. durumda dengesiz yükte 3 faz değişimi simülasyon sonuçları	74
Şekil 4.16.	2. durumda 0,1-0,2 s'deki dengeli yük grubunda evirici faz ve nötr akımlarının ayrıntılı dalga şekilleri	75
Şekil 4.17.	2. durumda 0,1-0,2 s'deki dengesiz yük grubunda evirici faz ve nötr akımlarının ayrıntılı dalga şekilleri	76
Şekil 5.1.	3 fazlı 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı MGNI'li FV sistemin deneysel blok diyagramı	79
Şekil 5.2.	3 fazlı 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı FV sistemin test platformunun fotoğrafı	81
Şekil 5.3.	720 W kurulu güce sahip FV panel dizisi fotoğrafı	83
Şekil 5.4.	Omik yük grubu	83
Şekil 5.5.	Hall etkili gerilim sensörü devre bağlantı şeması	84
Şekil 5.6.	Hall etkili akım sensörü devre bağlantı şeması	84
Şekil 5.7.	Gerilim sinyal koşullandırma devresi blok diyagramı	85
Şekil 5.8.	Akım sinyal koşullandırma devresi blok diyagramı	85
Şekil 5.9.	Sürücü modül ve geliştirme bordu fotoğrafı	87
Şekil 5.10.	IGBT sürücü ile üretilen ölü zamanlı kapı sinyalleri	87
Şekil 5.11.	Sinyal yükseltici ve koruma devresi blok diyagramı	88
Şekil 5.12.	Sinyal yükseltici ve koruma kartı fotoğrafı	89
Şekil 5.13.	3 faz 4 kollu 4 telli FV sisteminin gerçekleştirilen güç devresi fotoğrafı	90
Şekil 5.14.	Dijital güneş enerjisi ölçeri (TES-1333) ve ApoGee piranometre (SP-110) fotoğrafları	91
Şekil 5.15.	3 faz 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı FV sisteminin gerçek zamanlı denetim blok diyagramı	94
Şekil 5.16.	ControlDesk çalışma alanında oluşturulan kullanıcı ara yüzü	95
Şekil 5.17.	ControlDesk arayüzünden alınan deneysel sonuçlar	96
Şekil 5.18.	Dengeli yük durumunda yük, evirici, şebeke akımları deneysel sonuçları	97
Şekil 5.19.	Dengeli yük durumunda C fazının yük, şebeke, evirici ve evirici nötr akımı dalga şekilleri	98
Şekil 5.20.	Dengeli yük durumunda şebeke gerilimi, akımı, evirici ve yük akımına ait deneysel dalga şekilleri	99
Şekil 5.21.	Dengeli durumda yük, şebeke ve eviricinin nötr hat akımlarına ait deneysel dalga şekilleri	100
Şekil 5.22.	Dengeli yük durumunda FV sistemin deneysel sonuç özeti	101

Şekil 5.23. Dengeli durumda şebeke ve evirici akımlarının ortalama THB dağılımı	101
Şekil 5.24. Dengesiz yük durumunda yük, evirici, şebeke akımları deneysel sonuçları	102
Şekil 5.25. Dengesiz yük durumunda C fazının yük, şebeke, evirici ve evirici nötr akımı dalga şekilleri	104
Şekil 5.26. Dengesiz yük durumunda şebeke gerilimi, akımı, evirici ve yük akımına ait deneysel dalga şekilleri	104
Şekil 5.27. Dengesiz durumda yük, şebeke ve eviricinin nötr hat akımlarına ait deneysel dalga şekilleri	105
Şekil 5.28. Dengesiz yük durumunda FV sistemin deneysel sonuç özeti.....	107
Şekil 5.29. Dengesiz durumda şebeke ve evirici akımlarının ortalama THB dağılımı	107

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Dünya genelinde 2010-2011 (MW) PV kapasiteleri	4
Tablo 1.2. Avrupa ülkerinde 2012-2020-2030 (MW) PV kapasite tahminleri	5
Tablo 1.3. Bölgelerin Maksimum Kapasiteleri	7
Tablo 1.4. FV teknolojisine bağlı olarak ideal faktör (F) değerleri	16
Tablo 2.1. Saptır-gözle değişim verileri	25
Tablo 2.2. Optimum gerilim denklem parametreleri	32
Tablo 2.3. MGNİ tekniklerinin verim ve ürettikleri enerji miktarlarına göre sıralaması	33
Tablo 2.4. MGNİ tekniklerinin maliyet sınıflandırılması	35
Tablo 3.1. DGÜS’de akım harmonik sınırları	37
Tablo 3.2. 3TK, 3TK-BB, 3NNK topoloji yapılarının karşılaştırılması	52
Tablo 4.1. Simülasyonda kullanılan sistem parametreleri	55
Tablo 4.2. 1.durumda şebeke bağlantılı FV sistemde ölçülen değerlerin özeti	68
Tablo 4.3. 2.durumda şebeke bağlantılı FV sistemde ölçülen değerlerin özeti	77
Tablo 5.1. Kaneka G-EA060 güneş panelinin elektriksel özellikleri	82

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

C_{DA}	: DA bara kondansatörü, (μF)
C_f	: Anahtarlama harmonikleri filtre kondansatörü, (μF)
C_{GFV}	: Parazitik kapasitans kondansatörü, (μF)
dI_{FV}	: FV nin ürettiği akımdaki değişim, (A)
dP_{FV}	: FV nin ürettiği güçteki değişim, (W)
dV_{FV}	: FV nin ürettiği gerilimindeki değişim, (V)
f	: Şebeke frekansı, (Hz)
F	: Hücrenin ideal faktörü
i_{abc}^*	: 3 faz referans akımları, (A)
i_a^*, i_b^*, i_c^*	: a,b,c fazı anlık referans akımları, (A)
i_{eabc}	: 3 faz evirici akımı, (A)
i_{ea}, i_{eb}, i_{ec}	: a, b, c fazı evirici akımı, (A)
$i_{şabc}$: 3 faz şebeke akımı, (A)
$i_{şa}, i_{şb}, i_{şc}$: a, b, c fazı şebeke akımı, (A)
i_{yabc}	: 3 faz yük akımı, (A)
i_{ya}, i_{yb}, i_{yc}	: a, b, c fazı yük akımı, (A)
I_d	: Birleşimdeki (jonksiyon bölgesindeki) diyot akımı, (A)
I_{FV}	: FV panel akımı, (A)
I_{FVd}, I_{FVq}	: d-q koordinatlarında anlık FV panel akımları, (A)
I_m	: FV panel maksimum güçteki akımı, (A)
I_o	: Ters sızıntı akımı, (A)
$I_o \alpha$: Hücrenin ters doyunluk akımı, (A)
I_p	: Paralel kol direncinden geçen akım, (A)
I_{ph}	: Işık fotonlarıyla üretilen akım veya kısa devre akımı, (A)
$I_{şC}$: 1 kW/m^2 ve 25° C 'deki hücrenin kısa devre akımı, (A)
K	: Boltzman sabiti, ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ j/K}^\circ$)
L_f	: Anahtarlama harmonikleri filtre endüktansı, (mH)
L_n	: Şok bobini nötr hattı filtre endüktansı, (mH)
$L_{ş}$: Şebeke endüktansı, (mH)
N_p	: Paralel FV modül sayısı
$N_{ş}$: Seri FV modül sayısı
P_{FV}	: FV panel gücü, (W)
P_m	: FV panel maksimum gücü, (W)
q	: Elektron yükü, ($1,6 \cdot 10^{-19}$ coulomb)
R_p	: Paralel kol direnci, (ohm)
R_s	: Seri direnç, (ohm)
$R_{ş}$: Şebeke iç direnci, (ohm)
S	: Cinsinden güneş radyasyon ışınması, (W/m^2)
$S1-S8$: Güç anahtarlama elemanları
T_{FV}	: Hücrenin mutlak sıcaklığı, (K°)
T_r	: Hücrenin referans sıcaklığı, ($^\circ \text{C}$)

T_{STKfV}	: STK altındaki hücre sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
$V_{\text{Şabc}}$: 3 faz şebeke gerilimi, (V)
$V_{\text{Şa}}, V_{\text{Şb}}, V_{\text{Şc}}$: a, b, c fazı anlık şebeke gerilimi, (V)
V_d	: Diyot gerilimi, (V)
V_{FV}	: FV panel çıkış gerilimi, (V)
V_g	: Yarı iletken bant boşluk gerilimi, (V)
V_m	: FV panel maksimum güçteki gerilimi, (V)
V_{m_STK}	: STK altında MGN gerilimi, (V)
V_{OC}	: Hücrenin açık devre gerilimi, (V)
V_{OCSTK}	: Standart Test Koşulları altındaki FV açık devre gerilimi, (V)
V_{ref}	: FV panelin referans gerilimi, (V)
μ_{sc}	: Hücrenin kısa devre akımında sıcaklık katsayısı

Kısaltmalar

AA	: Alternatif Akım
ADC	: Analog to Digital Converter (Analog Dijital Dönüştürücü)
DA	: Doğru Akım
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
DGÜS	: Dağıtık Güç Üretim Sistemleri
DSP	: Digital Signal Processor (Sayısal İşaret İşlemci)
EMU	: Elektromanyetik uyumluluk
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
FV	: Fotovoltaik
MGN	: Maksimum Güç Noktası
MGNİ	: Maksimum Güç Noktası İzleyicisi
PLL	: Phase Locked Loop (Faz Kilitleme Döngüsü)
P&Q	: Perturbation and Observation Method (Saptır-gözle)
STK	: Standart Test Koşulları
THB	: Toplam Harmonik Bozukluğu
3NNK	: 3 fazlı Nötr Noktası Kenetlenmiş
3TK	: 3 fazlı Tam Köprü
3TK-BB	: Bölünmüş Bağlantılı 3 fazlı Tam Köprü

3 FAZLI 4 TELLİ ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK SİSTEMLER İÇİN MAKSİMUM GÜÇ İZLEYEN 4 KOLLU EVİRİCİ TASARIMI

ÖZET

Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlerde güneş panellerinden maksimum güç alınması ve senkron bir şekilde şebekeye enerji aktarılması önemli bir konudur. Farklı ışım ve sıcaklıkla güneş panelinin maksimum güç noktası sürekli değişmektedir. Değişen bu güç noktasını sürekli maksimum seviyede tutan ve böylece FV panellerden maksimum güç elde etmeyi amaçlayan çeşitli teknik ve yöntemler kullanılmaktadır. Bu teknikler basitlik, yakınsama hızı, donanım uygulaması, sensör gereksinimi, maliyet, etkinlik yelpazesi ve ölçülebilirlikler de dahil olmak üzere birçok açıdan farklılık göstermektedir. Bütün bu farklılıklar performans ve uygulanabilirlik bakımından saptır-gözle yöntemi şebeke bağlantılı tek aşamalı sistemler için yaygın olarak kullanılarak iyi bir çözüm sunmaktadır. 3 fazlı 4 kollu evirici yapısı ile nötr hattı sağlanarak dengeli, dengesiz ve tek faz yüklerine cevap verebilmektedir.

Bu çalışmada, şebeke bağlantılı 3 fazlı 4 kollu 4 telli evirici tasarımı ve uygulanması gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sistem yapısında Saptır-gözle denetim algoritması ve histerezis bant anahtarlama tekniği kullanılmıştır. Ayrıca sistem MATLAB/SIMULINK simülasyon modeli oluşturularak tasarım, uygulama ve simülasyon çalışmaları birlikte yürütülmüŐtür.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik sistemler, Maksimum Güç Noktası İzleyici, Saptır-gözle, Tek Aşamalı Yapılar, 3 faz 4 kollu 4 telli.

3 PHASE 4 WIRE FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS NETWORK CONNECTION MAXIMUM POWER POINT TRACKING 4 LEG INVERTER DESIGN

ABSTRACT

Grid-connected photovoltaic systems, solar panels and energy-transfer maximum power to be an important issue in the network and a synchronous manner. Different radiation and temperature are constantly changing the maximum power point of solar panels. Changing the maximum power point, which constantly aims to achieve maximum power of photovoltaic panels, so that the various techniques and methods are used. These techniques simplicity, speed of convergence, hardware implementation, the sensor requirements, cost, and range of activities including ponderability many ways. All these differences in terms of performance and applicability of the single-phase grid-connected systems Perturbation and Observation method is widely used to provide a better solution. 3 phase 4 leg and the neutral line of the structure of an inverter providing a balanced, unbalanced and able to respond to single-phase loads.

In this study, grid-connected 3 phase 4 leg 4 wire design and implementation of an inverter realized. Perturbation and Observation maximum power point tracking method structure of the algorithm and the hysteresis band switching technique is used for visual inspection. Also, the system MATLAB / SIMULINK simulation model, creating the design, implementation and simulation studies were carried out with.

Keywords: Photovoltaic systems, Maximum Power Point Tracker, Perturbation and Observation, Single stage construction, 3 phase 4 leg 4 wire design.

GİRİŞ

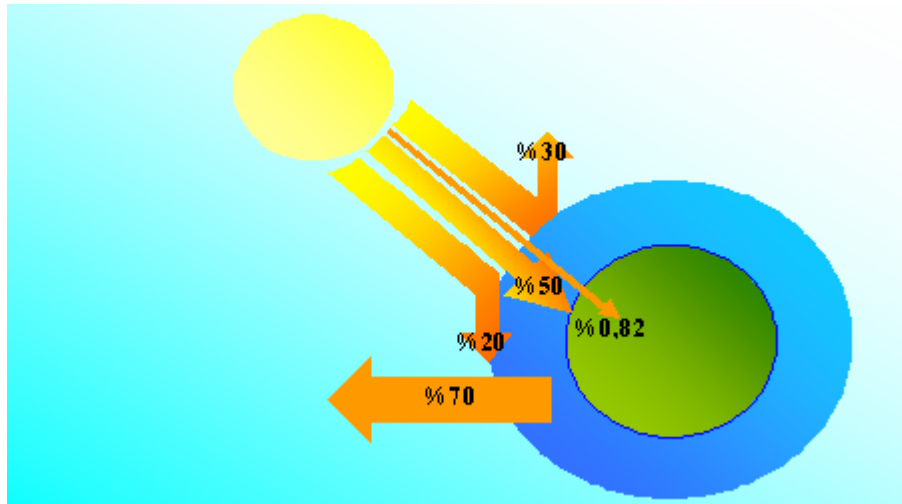
Enerji, insanoğlunun var oluşundan bu yana dünyamızın vazgeçilmez unsurlarından biridir. Günümüzde ihtiyaç duyulan enerjinin büyük bir kısmı fosil ve nükleer kaynaklardan sağlanmaktadır. Her geçen gün enerji ihtiyacının artması, kömür petrol ve yer altı kaynaklarının azalması alternatif enerji kaynak arayışını ortaya çıkarmıştır. Çevresel etkileri, küresel ısınma gibi olumsuz etkenlerden dolayı gelecekte insan yaşamı ve çevre dengeleri üzerindeki tehditlerin önlenmesi, ulusal kaynaklardan en üst düzeyde faydalanması, alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve kullanılmasını gerekli hale getirmektedir. Başlıca kullanılan alternatif enerji kaynaklarından olan güneş, rüzgar, jeotermal, biyokütle, hidrojen üzerinde araştırma ve geliştirme çalışmaları yoğunlaşmıştır.

Günümüzde fosil ve nükleer yakıtlara alternatif olarak araştırma konusu olan enerji kaynaklarının arasında ön sıralarda yer alan çeşitlerden birisi güneş enerjisidir. Güneş enerjisi, sonsuz ve yaygın bir kaynak olarak görülmesi, doğrudan kolayca elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi gibi avantajları sebebiyle hızla yaygınlaşmaktadır. Güneş enerji sistemlerinin diğer bir önemli özelliği ise, birkaç watt (W)'tan megawatt (MW) değerine kadar geniş bir güç yelpazesi sunmasıdır.

Güneş pilleri doğru gerilim üretmektedir. Bu sebeple, elektrikle çalışan uygun güç ve gerilimdeki her türlü alıcı doğrudan veya dönüştürücü yardımı ile beslenebilmektedir. Güneş pili teknolojisinin topoloji yapısı olarak iki tip uygulama alanı mevcuttur. Bu topolojiler, şebekeden bağımsız ve şebeke bağlantılı sistemler başlığı altında incelenebilir. Şebekeden bağımsız sistemleri, küçük güçlü otonom uygulamalar olan sokak yol aydınlatmaları, su pompalama sistemleri, sinyalizasyon sistemleri ile şebekeden uzak bölgelerde bulunan evsel uygulamalar oluşturmaktadır. Bu yapıda fotovoltaik (FV) paneller ve batarya depolama sistemi bulunmaktadır. FV panellerden alınan enerji direkt olarak kullanılır veya bataryalarda depolanır, FV panel enerji üretmediğinde ise bataryalardaki depolanan enerji kullanılmaktadır.

1. GÜNEŞ ENERJİSİ

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile (hidrojen gazının helyuma dönüşmesi) açığa çıkan ışınım enerjisidir. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti, yaklaşık olarak 1370W/m^2 değerindedir, ancak yeryüzüne ulaşan miktarı atmosferden dolayı $0-1100\text{W/m}^2$ değerleri arasında değişim gösterir. Bu enerjinin dünyaya gelen küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır. Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970'lerden sonra hız kazanmış, güneş enerji sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşme göstermektedir. Çevresel etki açısından temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir. Güneş ışınımının tamamı yeryüzüne ulaşmaz, %30 kadarı dünya atmosferi tarafından geriye yansıtılır. Güneş ışınımının %50'si atmosferi geçerek dünya yüzeyine ulaşır. Bu enerji ile dünyanın sıcaklığı yükselir ve yeryüzünde yaşam mümkün olur. Rüzgar hareketlerine ve okyanus dalgalanmalarına neden olur. Güneşten gelen ışınımın %20'si atmosfer ve bulutlarda tutulur. Yeryüzüne gelen güneş ışınımının %1'den azı bitkiler tarafında fotosentez olayında kullanılır. Dünya'ya gelen bütün güneş ışınımı, sonunda ısıya dönüşür ve uzaya geri verilir. Güneş ışınımının atmosfer ve yeryüzü arasındaki enerji akışı ve dağılımı Şekil 1.1'de verilmiştir [45].



Şekil 1.1. Güneş, atmosfer ve yeryüzü arasındaki enerji akışı

1.1. Dünya ve Avrupa’da Güneş Enerjisi Kullanımı

Dünya genelinde 2010 yılında 16,8 GW, 2011 yılında 30,4 GW, 2012 yılında da 31,1 GW’lık FV sistem şebekeye bağlanmıştır. Toplam kurulu FV kapasitesi dünya çapında 2012 yılı sonunda 100 GW’ı aşmıştır. Kurulan bu 100 GW’lık güç ile her yıl 110 TWh elektrik üretilebilir. Bu enerji miktarı 30 milyon hanenin yıllık elektrik enerji ihtiyaçlarını karşılamak için yeterlidir. Tablo 1’de 2011 ve 2012 yıllarında yeni kurulan ve toplam FV kapasitesi ülkelere göre verilmiştir [4].

Tablo 1.1. Dünya genelinde 2010-2011 (MW) FV kapasiteleri [4]

Ülkeler	Eklenen 2011 (MW)	Toplam 2011 (MW)	Eklenen 2012 (MW)	Toplam 2012 (MW)
İtalya	9,454	12,923	3,438	16,361
Almanya	7,485	24,807	7,604	32,411
Çin	2,500	3,300	5,000	8,300
ABD	1,867	4,431	3,346	7,777
Fransa	1,756	2,924	1,079	4,003
Japonya	1,296	4,914	2,000	6,914
Avustralya	837	1,412	1,000	2,412
Büyük Britanya	813	904	925	1,829
Brezilya	5	5	12	17
İspanya	472	4,889	276	5,166
Yunanistan	426	624	912	1,536
Slovakya	321	508	15	523
Kanada	297	497	268	765
Hindistan	190	225	980	1,205
Türkiye	1	7	2	9

Almanya 2012 yılında FV pazarında 7,6 GW’lık yeni bir sistem bağlayarak birinci 5 GW’lık sistem ile Çin ikinci olmuştur. Bu iki büyük FV pazarını İtalya 3,4 GW ve ABD 3,3 GW’lık FV sistem ile takip etmektedir. 2020 sonlarına doğru toplam 27 Avrupa ülkesinde sadece 249,350 MW’tın üzerinde bir FV sistemden enerji üretilmesi planlanıyor. Böylece FV, küresel toplam kurulu güç kapasitesi açısından

hidrolik ve rüzgar enerjisinden sonra gelen en önemli üçüncü yenilenebilir enerji kaynağıdır. Tablo 2’de 2020 ve 2030 yılları için öngörülen toplam FV sistem kapasiteleri verilmiş ve 2020 yılındaki tahmin değeri ile Almanya 65,000 MW’lık FV kapasitesiyle birinci konumdadır [5-7].

Tablo 1.2. Avrupa ülkelerinde 2020-2030 (MW) FV kapasite tahminleri [5]

Ülkeler	Hızlandırılmış 2020 Senaryoları	Hızlandırılmış 2030 Senaryoları
Avusturya	4,000	10,000
Belçika	7,000	13,000
Bulgaristan	3,000	6,500
Kıbrıs	300	800
Çek Cumhuriyeti	4,000	9,000
Danimarka	1,000	2,500
Estonya	400	800
Finlandiya	1,000	2,000
Fransa	30,000	70,000
Almanya	65,000	100,000
Yunanistan	8,000	16,000
Macaristan	2,000	5,000
İrlanda	400	2,000
İtalya	42,000	65,000
Letonya	400	800
Litvanya	400	1,000
Lüksemburg	400	1,000
Malta	250	400
Hollanda	3,000	15,000
Polonya	5,000	20,000
Portekiz	3,000	8,000
Romanya	5,000	10,000
Slovakya	3,000	6,000
Slovenya	1,500	3,000
İspanya	18,000	45,000
İsviçre	1,000	6,000
Büyük Britanya	20,000	40,000
Toplam 27 AB	229,050	458,800

1.2. Türkiye’de Güneş Enerjisi ve Yasal Düzenlemeler

Türkiye’de 10/05/2005 tarihli ve 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına ilişkin kanun hazırlanmıştır. 3/12/2010 tarihinde 27774 sayılı resmi gazetede yayımlanan ve 10/03/2012 tarihinde 28229 sayılı yeniden hazırlanan değişiklik ile yürürlüğe giren “Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik” ile yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı kurulu gücü azami beş yüz kilowattlık üretim tesisi ve elektrik enerjisine dayalı toplam kurulu gücü 50 kW ve altında olan mikro kojenerasyon tesisi kuran tüzel kişilerin ihtiyaçlarının üzerinde ürettikleri elektrik enerjisinin sisteme verilmesi halinde uygulanacak teknik, mali usul ve esaslar belirlenmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları için 5346 sayılı kanunda belirtilen fiyatın uygulanacağı, üretim tesislerinde kullanılan makine ve/veya elektromekanik aksamın yüzde yetmiş beşinin yerli üretim girdilerinden oluştuğunun belgelendirilmesi halinde Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) onaylı perakende satış tarifesi uygulanacaktır.

Kanun teklifinde, güneş enerjisine dayalı üretim tesisleri için on yıl süreyle 13,3 ABD Doları cent/kWh alım garantisi verilmiştir. Yerli üretim durumunda ise üretim tesisinin işletmeye giriş tarihinden itibaren beş yıl süreyle ABD Doları cent/kWh olarak aşağıdaki ilave destekler öngörülmüştür;

- FV panel entegrasyonu ve güneş yapısal mekaniği imalatı 0,8 cent
- FV modülleri 1,3 cent
- FV modülünü oluşturan hücreler 3,5 cent
- Evirici 0,6 cent
- FV modülü üzerine güneş ışınıni odaklayan malzeme 0,5 cent

Güneş enerjisi ile elektrik üretimi için Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından enerji bölgeleri belirlenmiştir. Toplamda 27 bölge 38 şehir belirlenerek elektrik üretimi için teşvik edilmiştir. En yüksek kapasite 92 MW ile Konya olurken Van 77 MW, Mersin 35 MW’la takip etmektedir. Güneş enerjisi,

Türkiye genelinde kurulu güç 600 MW'ı geçmeyecek şekilde belirlenmiştir. Tablo 1.3'te belirlenen bu şehirlerin maksimum elektrik enerjisi üretim kapasiteleri verilmiştir [7, 9].

Tablo 1.3. Bölgelerin Maksimum Kapasiteleri [46]

	BÖLGELER	KAPASİTE(MW)		BÖLGELER	KAPASİTE(MW)
1	Konya (1)	46	15	Isparta Afyon	18
2	Konya (2)	46	16	Denizli	18
3	Van-Ağrı	77	17	Bitlis	16
4	Antalya (1)	29	18	Bingöl Tunceli	11
5	Antalya (2)	29	19	Şırnak	11
6	Karaman	38	20	Adana Osmaniye	9
7	Mersin	35	21	Muş	9
8	Kahramanmaraş Adıyaman	27	22	Siirt Batman Mardin	9
9	Burdur	26	23	Sivas	9
10	Niğde Nevşehir Aksaray	26	24	Elazığ	8
11	Kayseri	25	25	Şanlıurfa Diyarbakır	7
12	Malatya Adıyaman	22	26	Erzurum	5
13	Hakkari	21	27	Erzincan	3

1.3. Güneş Pilleri

Güneş pilleri, yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken maddelerdir. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş hücreleri genellikle 100 cm^2 civarında, kalınlıkları ise 0,1, 0,4 mm arasındadır. Güneş hücreleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar, yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Hücrenin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Güneş enerjisi, güneş hücresinin yapısına bağlı olarak %5 ile %30 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevirebilir. Güç akışını arttırmak amacıyla çok sayıda güneş hücresi birbirine seri yada paralel bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir, bu yapıya güneş hücresi modülü yada fotovoltaik modül adı verilir. Böylece istenilen akım ve gerilim değerlerinde güneş panelleri üretilmiş olur. Güç talebine bağlı olarak modüllerin bağlantıları ile birkaç watt'tan megawatt'a kadar sistem oluşturulur. Şekil 1.2'de farklı malzemelerden yapılmış tek kristal silikon ve polikristal silikon güneş panelleri görülmektedir.



Şekil 1.2. Tek kristal silikon (soldaki) ve Polikristal silikon (sağdaki) güneş panelleri [3]

Güneş pilleri pek çok farklı maddelerden yararlanılarak üretilmektedir. 1cm² lik hücre alanı için laboratuvarlarda ulaşılan en yüksek hücre verimleri, kristalsi güneş hücresi için %24,5, polikristalsi için %19,8, amorfisi için %12,7, çok katlı güneş hücreleri için ise %40'tır [45].

1.3.1. Güneş pillerinin yapısı ve çalışması

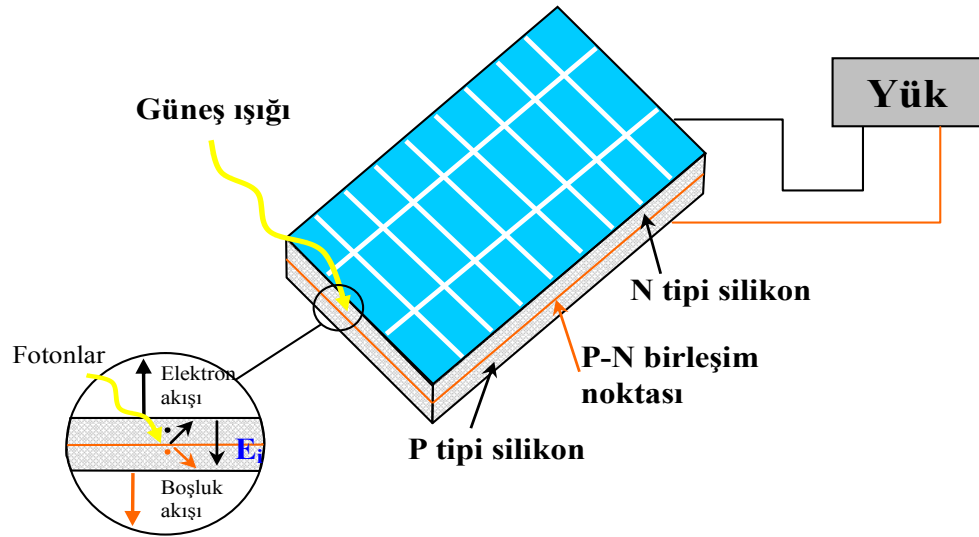
Günümüz elektronik ürünlerinde kullanılan transistörler, doğrultucu diyotlar gibi güneş pilleri de, yarı iletken maddelerden yapılırlar. Yarı iletken özellik gösteren birçok madde arasında güneş pili yapmak için en elverişli olanlar, silisyum, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi maddelerdir.

Yarı iletken maddelerin güneş pili olarak kullanılabilmesi için n ya da p tipi katkılanmaları gereklidir. Katkılama, saf yarı iletken eriyik içerisine istenilen katkı maddelerinin kontrollü olarak eklenmesiyle yapılır. Elde edilen yarı iletkenin n ya da p tipi olması katkı maddesine bağlıdır. En yaygın güneş pili maddesi olarak kullanılan silisyumdan n tipi silisyum elde etmek için silisyum eriyiğine periyodik cetvelin 5. grubundan bir element, örneğin fosfor eklenir. Silisyum'un dış yörüngesinde 4, fosforun dış yörüngesinde 5 elektron olduğu için, fosforun fazla olan tek elektronu kristal yapıya bir elektron verir. Bu nedenle V. grup elementlerine "verici" ya da "n tipi" katkı maddesi denir.

P tipi silisyum elde etmek için ise, eriyiğe 3. gruptan bir element (alüminyum, indiyum, bor gibi) eklenir. Bu elementlerin son yörüngesinde 3 elektron olduğu için kristalde bir elektron eksikliği oluşur, bu elektron yokluğuna hol ya da boşluk denir ve pozitif yük taşıdığı varsayılır. Bu tür maddelere de "p tipi" ya da "alıcı" katkı maddeleri denir. P ya da n tipi ana malzemenin içerisine gerekli katkı maddelerinin katılması ile yarı iletken eklemler oluşturulur. N tipi yarı iletkende elektronlar, p tipi yarı iletkende holler çoğunluk taşıyıcısıdır. P ve n tipi yarı iletkenler bir araya gelmeden önce, her iki madde de elektriksel bakımdan nötrdür. Yani p tipinde negatif enerji seviyeleri ile hol sayıları eşit, n tipinde pozitif enerji seviyeleri ile elektron sayıları eşittir. PN eklem oluştuğunda, n tipindeki çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar, p tipine doğru akım oluştururlar. Bu olay her iki tarafta da yük dengesi oluşana kadar devam eder. PN tipi maddenin ara yüzeyinde, yani eklem bölgesinde, P bölgesi tarafında negatif, N bölgesi tarafında pozitif yük birikir.

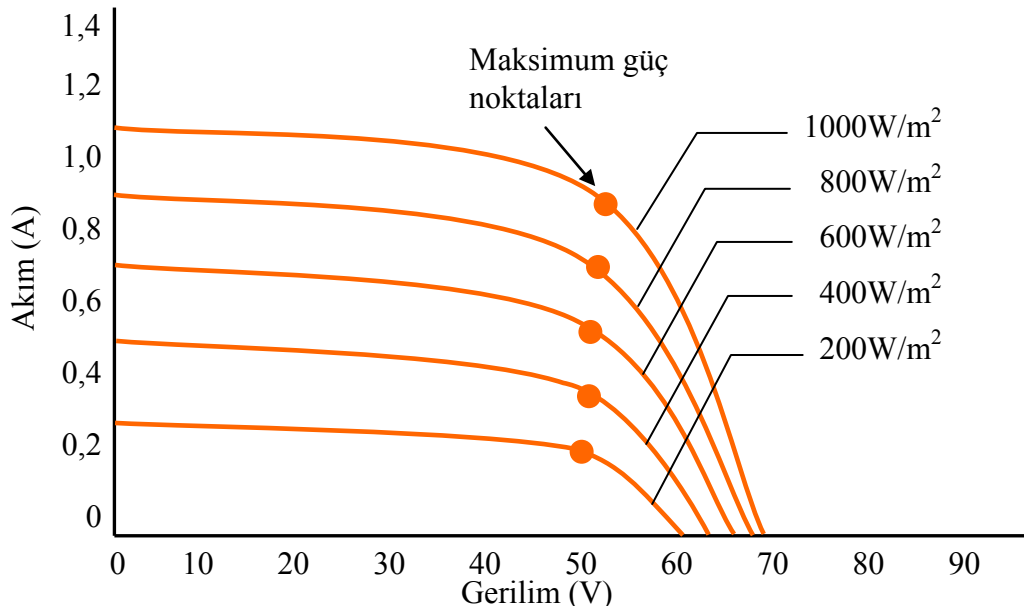
Bu eklem bölgesine "geçiş bölgesi" ya da "yükten arındırılmış bölge" denir. Bu bölgede oluşan elektrik alan "yapısal elektrik alan" olarak adlandırılır. Yarı iletken eklem bölgesinde güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaj dönüşümünün sağlanması gerekir. Bu dönüşüm iki aşamada olur, ilk olarak, eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-boşluk çiftleri oluşturulur, ikinci olarak ise, bunlar bölgedeki elektrik alan yardımıyla birbirlerinden ayrılır.

Enerji dönüşümü fotovoltaj olaya dayanmaktadır. Fotovoltaj olayda, ışık fotonları özellikle eklem bölgesine ulaştığında elektronlara çarparak serbest yük çiftleri oluşturur. Uyarılan negatif yüklü (-) her elektron, gerisinde pozitif yüklü (+) bir boşluk bırakır. Bu yük taşıyıcıları, eklemle kurulan doğal iç ters elektrik alanla (E_i) akım katkısı oluşturmak üzere çoğunlukta oldukları bölgelere sürülür. Doğal E_i alanı, fotonla enerji kazanan yük taşıyıcılarının hareketlerinde hangi tarafa eğilimli olduklarını ifade eden bir enerji engeli olarak düşünülebilir. Böylece fotonlarla üretilen (-) yüklü elektronlar n-bölgesinde, (+) yüklü pozitif taşıyıcılar p-bölgesinde toplanarak bir gerilim üretilmektedir [9]. Bu durum prensip olarak Şekil 1.3 ile verilmektedir.



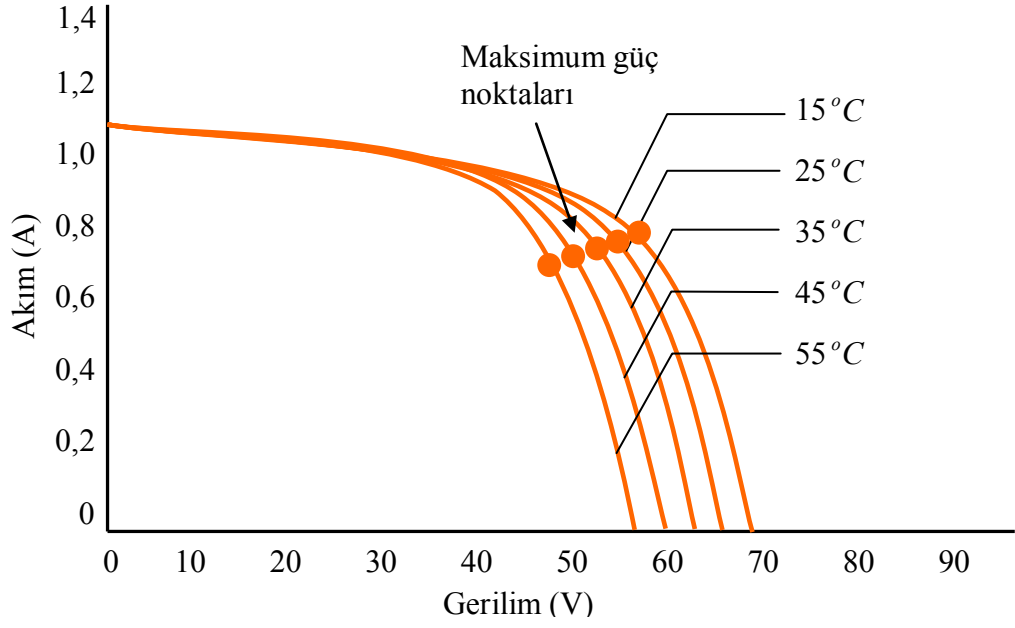
Şekil 1.3. Fotovoltaj pilin çalışması

Bir FV'nin I-V karakteristiği ışınım şiddeti (W/m^2) ile değişmektedir. Bu değişim Şekil 1.4'te verilmektedir. Böylece maksimum güç noktaları da ışınım ile değişmektedir. Bu durumda ışınım şiddeti pilin ürettiği kısa devre akımını doğrudan etkilemektedir. Açık devre gerilimi (V_{oc}) ise kısa devre akımına oranla daha düşük bir oranda değişmektedir. Değişik ışınım şiddeti altında çalışan bir fotovoltaik pilin performansı fotovoltaik güç sistem tasarımlarında göz ardı edilemeyecek bir öneme sahiptir. Değişken ışınımlardaki FV performans tanımlamaları, FV güç sistem tasarımlarında önemli bir etken haline gelmektedir [10, 11].



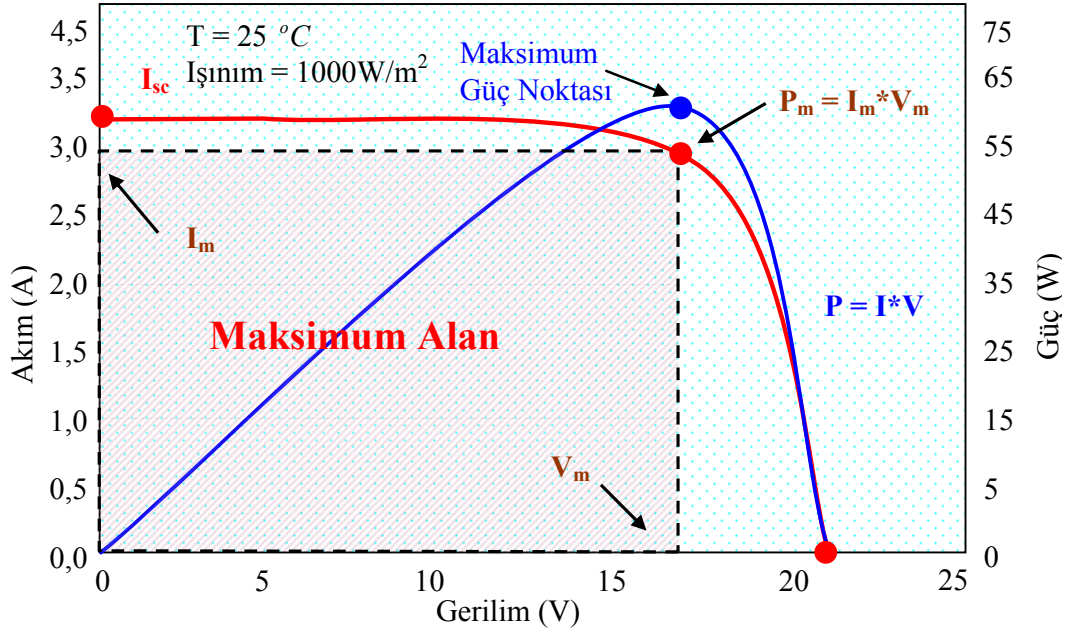
Şekil 1.4. Farklı ışınım şiddetinde FV panelin akım-gerilim (I-V) karakteristiği

Fotovoltaik panellerde ışınım şiddetinin etkisi yanında diğer bir önemli etki ise sıcaklıktır. Belirli bir sıcaklıkta, ışınım ile fotovoltaik pilin kısa devre akımı doğru orantılı olarak artar. Fotovoltaik panellerin çalışma performansına sıcaklık da etki etmektedir. Sabit bir ışınım altında, sıcaklık artışı kısa devre akımının artması yönünde bir etkide bulunurken açık devre geriliminin azalmasına neden olmaktadır [11]. Sıcaklığın FV'ye olan etkisi, Şekil 1.5'te gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Farklı sıcaklıkta FV panelin akım-gerilim (I-V) karakteristiği

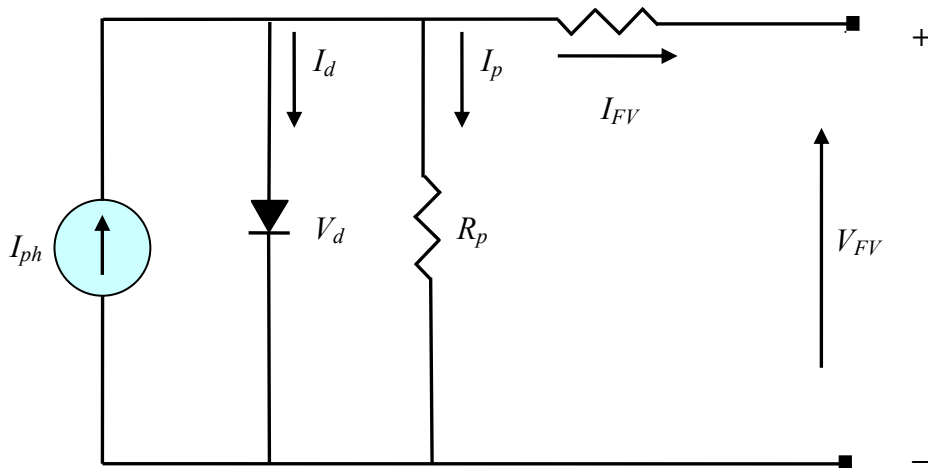
Şekil 1.6'da bir FV'nin 25 °C sıcaklıkta ve 1000W/m² ışınım değerindeki akım gerilim (I-V) karakteristik eğrisi verilmektedir. Maksimum güç noktası, bir FV panelden elde edilebilecek güç değeri, akım ve gerilim değerlerinin çarpımına eşittir. I-V eğrisinin altındaki maksimum dikdörtgen alanı FV'nin o anda üretmiş olduğu maksimum gücü (P_m) verir. Bu güçteki akım I_m , gerilim ise V_m ile gösterilmektedir. Modül uçları açık iken ölçülen terminal gerilimi FV'nin en yüksek gerilim değeridir ve V_{OC} ile gösterilmektedir. Modül yüklenmeye başladığında FV uçlarındaki V_{OC} gerilimi azalmakta ve FV akımı artış göstermektedir. Bu durum Şekil 1.6'da verilmektedir. Fakat bir noktadan sonra akım yükselmeye devam ederken gerilim hızlı bir şekilde azalır. Modül V_m ve I_m değerlerine ulaştığında FV panelden o anda maksimum güç elde edilmektedir.



Şekil 1.6. FV'nin akım-gerilim-güç (I-V-P) karakteristiği

1.3.2. 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 1.7'de verilmektedir. Eşdeğer devrede FV, ışığa göre değişen bir akım kaynağı gibi davranmaktadır. I-V ilişkisi ise Denklem (1.1) ile verilmektedir.



Şekil 1.7. Tek diyotlu güneş pili eşdeğer devresi

$$I_{FV} = I_{ph} - I_d - I_p = I_{ph} - I_o \left[e^{\left(\frac{qV_d}{KFT_{FV}} \right) - 1} \right] - \frac{V_d}{R_p} \quad (1.1)$$

Burada,

I_{ph} = 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 = 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 (1.2)'deki gibi değişmektedir.

$$I_{ph} = [\mu_{sc}(T_c - T_r) + I_{sc}]S \quad (1.2)$$

Buradaki μ_{sc} hücrenin kısa devre akımında sıcaklık katsayısı, T_r hücrenin referans sıcaklığı, I_{sc} 1 kW/m² ve 25°C'deki hücrenin kısa devre akımı ve S ise W/m² cinsinden güneş radyasyonudur.

Tek diyot modeliyle I-V eğrisini belirlemek için ilgili güneş piline ait özel I_0 ve F parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu parametreler genellikle üretici firma kataloglarında yoktur. I_0 sızıntı akımı hassas bir ölçüm olanakları ile ölçülebilir. Ayrıca değişen sıcaklıklara göre, I_0 teriminin yeni değerleri, analizde göz önünde tutulmalıdır. Çünkü I_0 , sıcaklıkla üstel olarak değişmektedir. I_0 doyma akımı Denklem (1.3)'te verilmektedir.

$$I_0 = I_0 \alpha \left[\frac{T_{FV}}{T_r} \right]^3 e \left[\frac{qV_g}{KF} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (1.3)$$

$$I_0 \alpha = \frac{I_{sc}}{e \left(\frac{qV_{FV}}{KFT_c} \right)} \quad (1.4)$$

Buradaki,

$I_0 \alpha$ = Güneş ışınımı ve referans sıcaklığında hücrenin ters doygunluk akımıdır (A)

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

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

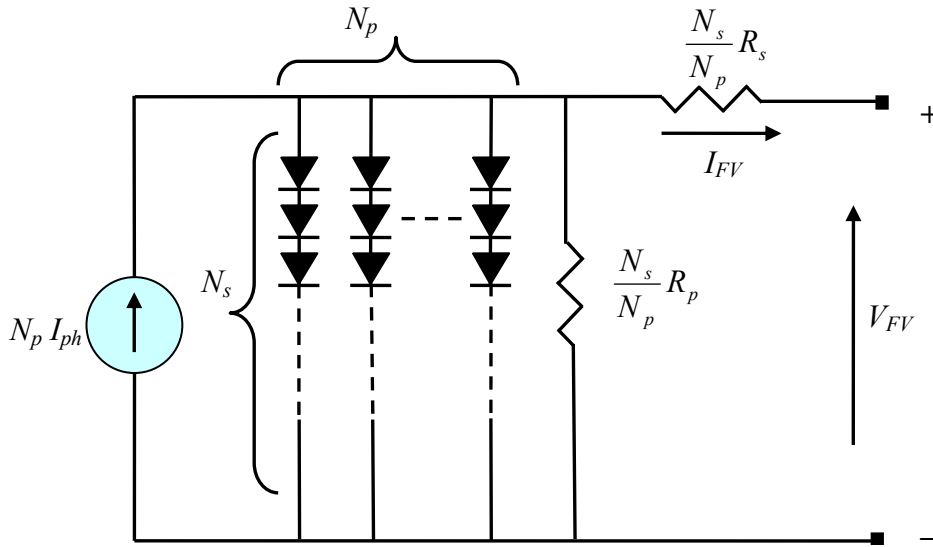
F = Hücrenin ideal faktörü kullanılan hücre teknolojisine bağlı olarak değişmektedir.

Tablo 1.4'te F faktörünün kullanılan hücre kimyasallarına göre değerleri verilmektedir.

Tablo 1.4. FV teknolojisine bağlı olarak ideal faktör (F) değerleri [12]

Hücre Teknolojisi	İdeal Faktör (F)
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 0,5 V 2 W olarak üretilmektedir. Bu gücü arttırmak için hücreler seri veya paralel bağlanarak istenilen gerilim ve akım değerlerinde güneş panelleri üretilebilmektedir. N_s seri ve N_p paralel bir şekilde düzenlenen FV modul devresi Şekil 1.8’de gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Güneş pili dizisi eşdeğer devresi

Parametreleri tek diyot modeline gören tanımlanmış, N_s kadar seri ve buna N_p kadar paralel bağlı paket FV’lerden oluşan sistemin akım-gerilim (I-V) ilişkisi Denklem (1.5)’te verilmektedir.

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - I_o \left[e^{\left(\frac{q \left(\frac{V_d + IR_s}{R_s + R_p} \right)}{N_s K T_{FV}} \right)} - 1 \right] - \frac{N_p V_d / N_s}{R_p} \quad (1.5)$$

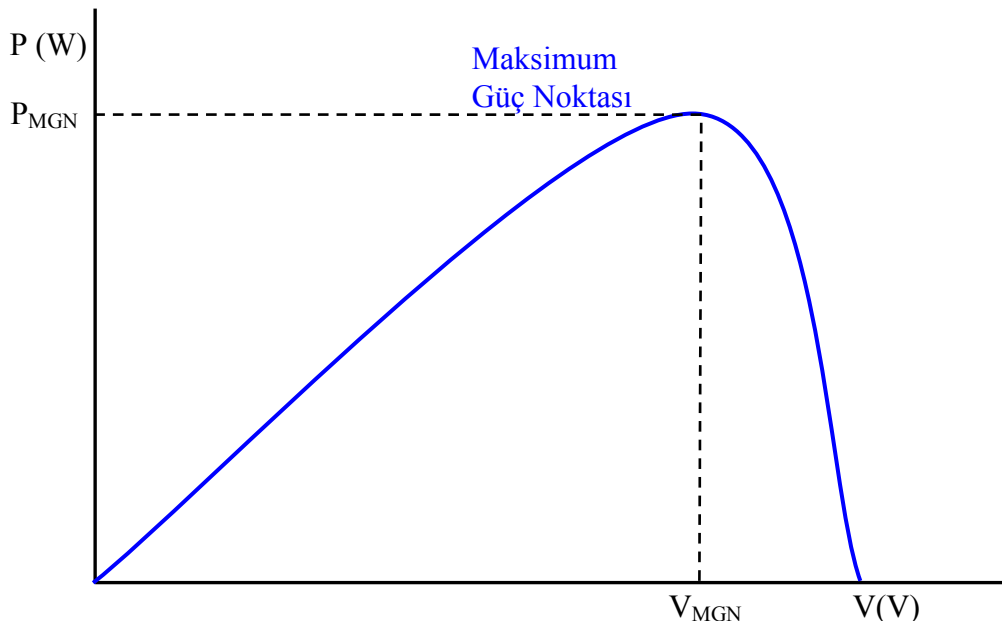
Buradaki N_s seri hücre sayısı, N_p 'de paralel bağlı hücre sayısıdır. Aslında FV modülünün verimini R_s çok az etkilerken R_p 'nin etkisi daha büyüktür [1, 12].

2. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİ

FV elektrik üretim sistemlerinin verim ve düşük ışınım şartları altında çalışması konusunda iki önemli sorunu vardır. Bu güç dönüşüm sistemlerinin verimleri oldukça düşüktür (%9-%17) ve özellikle düşük ışınım şartları altında güneş panelleri tarafından üretilen elektrik enerjisi miktarı hava koşullarına bağlı olarak sürekli değişmektedir. Üstelik güneş panellerinin elektriksel karakteristiği değişen sıcaklık ve ışınım ile doğrusal olmayan bir eğri çizmektedir. Genellikle I-V veya V-P eğrisi üzerindeki sürekli olarak yer değiştiren bu tepe noktası Maksimum Güç Noktası (MGN) olarak adlandırılır. Maksimum Güç Noktası İzleyici (MGNİ) denetim tekniği FV panellerinin verimli kullanılmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem güneş panelinin verdiği en yüksek olduğu noktayı yakalayan bir denetim yapısıdır. Bu tepe noktası ışınım, sıcaklık, FV panel eğimi, FV panel yaşlanması gibi değişkenlerle değişir. Tüm FV sistemi (dizi, dönüştürücü v.b.) bu tepe noktasında çalıştırıldığında maksimum verim ile çalışır ve FV panelden maksimum çıkış gücü alınır. 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 [2, 13, 21]. Sistemde FV panel ile ilgili ne kadar çok girdi birimi olursa denetim sistemi MGN'na o kadar yakın ve kararlı çalışır. Ancak çok fazla girdi, çalışma algoritmasında işlem sayısını arttırmakta ve geç cevap tepki süresine neden olabilmektedir. Bunun sonucu olarak, hızla değişen hava koşullarında MGN'nı yakalamakta gecikebilir ve bu sistem için istenmeyen bir durumdur. Bu yüzden, minimum girdi birimi ile işlem algoritmasını fazla zorlamadan hızlı cevap tepki süresine sahip aynı çalışma verimini sağlayan bir teknik kullanmamız maliyet ve basitlik açısından önem kazanmaktadır.

2.1. Maksimum Güç Noktası İzleyicisi Çalışma Prensibi

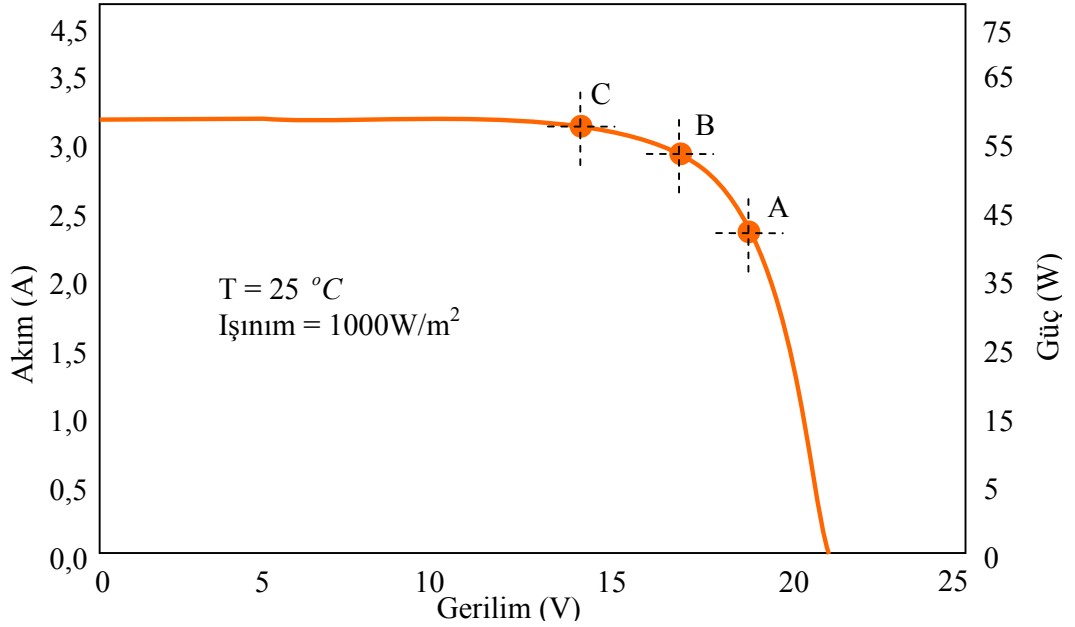
Belirli bir güneşlenme durumunda güneş pilinin elektriksel karakteristiği Şekil 2.1’de görülmektedir. Güneş pilinin iç direnci eğrinin sol tarafında yüksek iken sağ tarafında düşüktür. Maksimum güç noktası bu eğrinin tam tepe noktasındadır. Maksimum güç transferi teorisine göre, kaynak ve yük empedansları eşit olduğunda yüke maksimum güç aktarılır. Böylece anahtarlamalı dönüştürücünün empedansı anahtarlama darbe boşluk oranı ayarlanarak güneş paneli empedansı ile eşit yapıldığında maksimum güç noktasında çalışma şartı sağlanmaktadır.



Şekil 2.1. Güneş pilinin belirli bir güneşlenme durumu için elektriksel karakteristiği

Birçok geleneksel DA-DA çevirici devresi yapısı gereği gerilim düştükçe akım arttığından negatif empedans karakteristiğine sahiptir. Bu davranış sabit giriş gücü karakteri ve güç kaynağının ayarlanabilir çıkış gerilimi nedeniyledir. Eğer sistem güneş paneli karakteristik eğrisinin yüksek empedans tarafında (düşük gerilim tarafı) işletilirse, güneş panel gerilimi çökecektir. Bu nedenle, maksimum güç noktası izleme durumunda güneş paneli karakteristiğinin sağ bölgesinde çalıştırılmalıdır. Aksi halde güneş paneli maksimum darbe boşluk durumunda çalışırken, güneş paneli gerilimi de güneşlenme durumuna göre değişecektir. Böylece sistem maksimum güç noktası izlemeye ulaşamayacak ve yanlış noktada çalışacaktır [14, 15].

Güneş paneli kaynak olarak kullanılan elektrik sistemlerde, panellerin yapısından dolayı çekilen akıma göre çıkış geriliminde doğrusal olmayan bir değişim oluşur. Bu değişim Şekil 2.2’de görülmektedir. Panellerin çıkış gerilimi, çekilen akıma bağlı olduğu gibi, panellerin üzerinde düşen güneş ışığı yoğunluğuna ve ortam sıcaklığına bağlı olarak da farklılık göstermektedir. Ticari güneş panellerinin anılan çıkış gücü, birim alana düşen güneş ışığı yoğunluğunun $1000\text{W}/\text{m}^2$ olduğu ortamda, panelin üretebildiği elektrik enerjisi olarak tespit edilmiştir. Anılan çıkış gücünün güneş panelinin verebileceği maksimum güç olduğu varsayılır. Güneş ışığı yoğunluğu düştükçe güneş panelinden çekilebilecek akımında azaldığı Şekil 2.2’deki eğride görülmektedir.



Şekil 2.2. Güneş paneli akım-gerilim ve güç-gerilim eğrisi

Şekil 2.2’de $1000\text{W}/\text{m}^2$ güneş ışığının olduğu bir ortamda çekilen akım 2,3 A iken gerilimin 19 V olduğu görülmektedir (A noktası). Bu durumda A noktasındaki üretilen güç 43,7 W’tır. Yine aynı güneş ışığı ortamında güneş panelinden çekilen akımın 3A noktasında çalıştırıldığında eğride çıkış geriliminin 17 V’a düştüğü görülmektedir (B noktası). Yeni akım gerilim değerlerine göre üretilen güç 51 W olmaktadır. Aynı durumda C noktasından 3,2 A çekilmesine karşılık çıkış geriliminin 14 V’a düştüğü görülmektedir. C noktasındaki üretilen güç 44,8 W olmaktadır.

Bu değerler sonucunda aynı güneşlenme ortamında, yükün giderek artmasına karşın güneş panelinden alınabilecek güç miktarı doğrusal olmayan bir şekilde farklılık göstermektedir. Bir noktaya kadar üretilen güç yüke bağlı olarak artmakta fakat bir noktadan sonra yükün artmasına rağmen üretilen güçte azalma olmaktadır. Eğer bu durum kontrol altında tutulmazsa sistem düşük bir verimle çalışacaktır. MGNİ sistemleri değişim gösteren bu çıkış gücünü hep tepe noktasında tutmaya çalışmaktadır. MGNİ devreleri basit bir akım sınırlayıcıdan çok daha öte bir tasarım alt yapısını içermektedir [16-18].

2.2. Maksimum Güç Noktası İzleyicisi Teknikleri

Değişen sıcaklık ve ışınım durumlarında, FV panelin MGN'sı sürekli değişmekte dolayısıyla FV sistemin çalışma noktasını maksimum güç üretecek şekilde değiştirmemiz gerekmektedir. Bu nedenle de MGNİ teknikleri FV panellerin MGN'da çalışmasını sağlamak için kullanılır. FV panellerin maksimum güç noktasını yakalamak için birçok MGNİ teknikleri vardır. Yaygın olarak kullanılan bu teknikler [13];

- Sabit gerilim metodu
- Sabit akım metodu
- Kısa devre akım metodu
- Açık gerilim metodu
- Saptır-gözle metodu
- Artan iletkenlik metodu
- Sıcaklık metodu'dur.

2.2.1. Sabit gerilim metodu

Sabit gerilim algoritması basit bir MGNİ kontrol yöntemidir. FV panelin çalışma noktasını ayarlayarak, panel gerilimi ve sabit bir V_{ref} referans gerilimi ile eşleştirip MGN yakınında tutmaya çalışır. Bu V_{ref} değeri, FV modülün karakteristik V_{MGN} veya hesaplanan diğer iyi gerilimdir. Bu yöntem, birbirinden ayrı panellerin yalıtım ve sıcaklık değişimlerinin önemsiz olduğunu, sabit referans geriliminin gerçek MGN'a yeterli bir yaklaşım olduğunu varsayar. Bu nedenle çalışma asla tam MGN'nda işlenemez ve farklı coğrafi bölgeler için farklı veri tahsil edilmesi gerekir. Sabit gerilim metodunda, görev döngüsünü kurabilmek ve Şekil 2.3'de verilen blok diyagramındaki algoritmanın işlenebilmesi için güneş panelinin V_{FV} gerilimini ölçmemiz gereklidir. FV paneli düşük izolasyon koşulları önemli olduğunda, sabit gerilim tekniği, saptır-gözle veya artan iletkenlik metodundan daha fazla etkili olduğunu gözlenmektedir.



Şekil 2.3. Sabit gerilim blok diyagramı

Sabit gerilim metodu oldukça basit, karmaşık devreler gerektirmeyen, ucuz ve kullanışlı bir yöntemdir. Ancak referans işareti oluşturabilmek için gereken V_{FV} gerilim bilgisini okuyabilmek için FV modülden yükü ayırma gerekliliğinin yükler için sorun teşkil etmesi, bu esnada güneş enerjisinden faydalanılamaması, gerçek MNGİ işleminin sürdürülememesi olumsuz etkileridir [2, 13].

2.2.2. Kısa devre akım metodu

Kısa devre akım metodu akım kontrollü güç dönüştürücü I_m çalışma akımını vererek MGN'nda çalışmayı başarır. Aslında, maksimum çıkış gücü için optimum işletme akımı I_m , çeşitli koşullar altındaki ışınma seviyesi S ve kısa devre akımı I_{ph} ile Denklem (2.1) ile orantılıdır.

$$I_m(S) = k \cdot I_{ph}(S) \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'deki k orantılı bir sabittir ve I_{ph} tespit edildiğinde hemen I_m belirlenebilmektedir. Sıcaklık $0^\circ C$ ila $60^\circ C$ 'ye kadar değişmesine rağmen I_m ve I_{ph} arasındaki bu ilişki sürekli orantılıdır. Bu oransal parametrenin yaklaşık %92 olduğu tahmin edilmektedir.

Bu nedenle, bu kontrol algoritması I_{ph} ölçümünü gerektirir. Bu ölçümü elde etmek için, kısa devre akımı oluşturmak amacıyla FV panele paralel bir statik anahtar bağlanması gerekir. Burada dikkat edilmesi gereken kısa devre $V_{FV} = 0$ olduğu durumda FV sistemden hiçbir güç elde edilmez ve güç üretimi durdurulur. Kısa devre akım algoritması için Şekil 2.4'te verilen blok diyagramda V_{FV} ve I_{ph} verilerinin işlenmesi gerekir. Kısa devre akım metodu basit ve karmaşık devreler gerektirmeyen yapıda olmasına rağmen kısa devre akımının ölçülmesi gerekliliğinde, bu esnada enerji kaybı, k sabiti belirleme işlemi ve panel yüzeyinde meydana gelebilecek kirlilik v.b. sebeplerden kaynaklanan k sabiti sapmaları bu yöntemin olumsuz etkilerindedir [13, 14].



Şekil 2.4. Kısa devre akım blok diyagramı

2.2.3. Açık gerilim metodu

Açık gerilim metodu maksimum güç noktasındaki gerilimi her zaman açık devre geriliminin yüzdesine yakın olduğu gözlemine dayanmaktadır. Sıcaklık ve güneş ışına düzeyi maksimum güç noktasının konumu %2 tolerans bandı içinde değiştirmektedir. Genel olarak, açık gerilim metodu optimum çalışma gerilimi olarak panelin açık devre geriliminin %76 sını kullanır ve panelden maksimum çıkış gücü elde edilebilir. Bu kontrol algoritması için Şekil 2.5'te blok diyagramında da gösterilen açık devre gerilimi V_{OC} ölçülmesi gerekir. Bu yöntemde FV panel ile birlikte bir statik anahtar kullanılmaktadır ve anahtar devresini açmak için FV panele seri bağlı olmalıdır. $I_{FV} = 0$ olduğunda FV sistem tarafından hiçbir güç üretilmez ve sonuç olarak FV panellerden alınacak toplam enerji azalır [2, 13].



Şekil 2.5. Açık gerilim metodu blok diyagramı

2.2.4. Saptır-gözle metodu

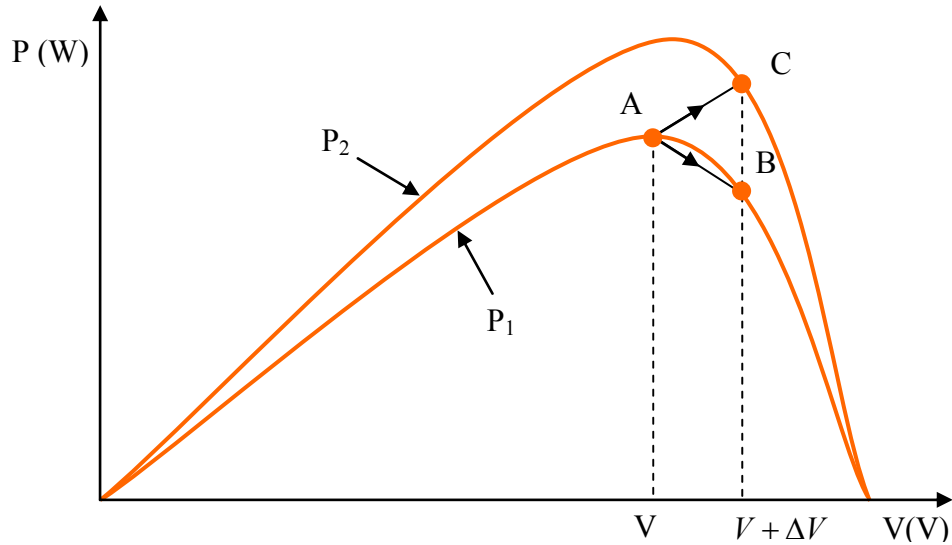
Saptır-gözle metodu en sık kullanılan metotlardan biridir. Saptır-gözle yöntemi dalgalanan (artan veya azalan) FV panel terminal gerilim veya akımını aralıklarla değiştirir ve FV çıkış gücünü bir önceki güç değeri ile karşılaştırarak çalışır. FV panel çalışma gerilimi değişir ve eğer güç yükselirse kontrol sistemi FV çalışma noktası bu yönde değişir aksi takdirde çalışma noktası ters yönde hareket eder. Sonraki diğer çevrimde algoritma aynı şekilde devam eder. Saptır-gözle yönteminde FV çıkış gücü sürekli olarak izlenir ve kontrol değişkeninin hareketi ile gücün hareketi arasında bir bağıntı kurularak referansın azaltılmasına ya da artırılmasına karar verilir. 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.

Şekil 2.6’da MGN noktasının sol tarafında iken gerilim arttığında güç de artarken, MGN noktasının sağ bölgesinde ise gerilim arttığında güç de azalmaktadır. Bu nedenle, eğer güçte bir artma varsa bir sonraki saptırma MGN noktasına ulaşmak için aynı tutulmalı ve eğer güçte bir azalma varsa saptırma terse çevrilmelidir. Bu durum Tablo 2.1’de detaylı olarak açıklanmaktadır.

Tablo 2.1. Saptır-gözle değişim verileri [14]

Saptırma	Güçteki Değişim	Sonraki Referans değişimi
Pozitif	Pozitif	Pozitif
Pozitif	Negatif	Negatif
Negatif	Pozitif	Negatif
Negatif	Negatif	Pozitif

Tablo 2.1’de verilen darbe oranına göre gücün değişimini esas alarak oluşturulmuştur. Saptır-gözle MGNİ algoritması güce göre gerilim ya da güce göre akım değişimi esas alınarak da uygulanabilir. Kıyaslama işlemi sonucunda maksimum güç noktasına ulaşmayı sağlayacak bir sonraki darbe genişlik oranına karar verilir.



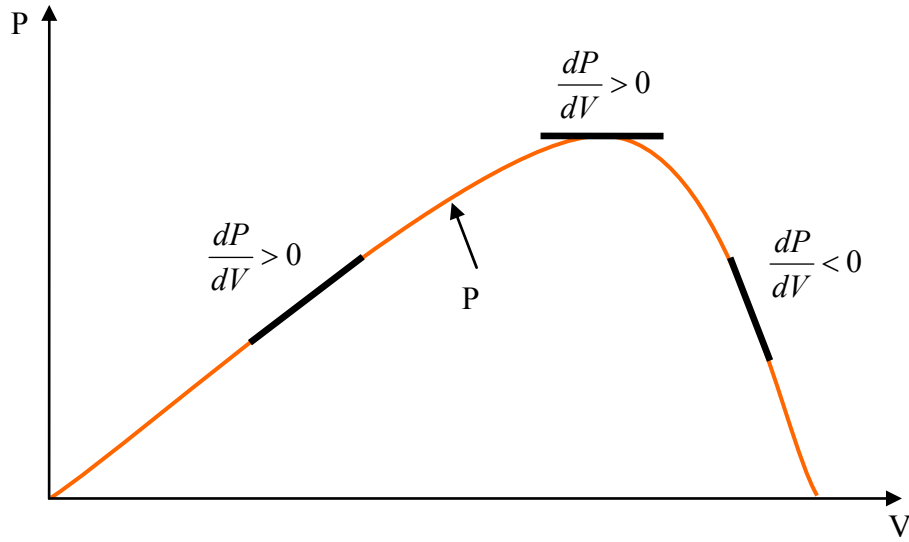
Şekil 2.6. Saptır-gözle metodundaki MGN farklılıkları

Saptır-gözle yöntemi, Şekil 2.6’da görüldüğü gibi hızlı değişen atmosferik koşullarda hatalı çalışabilmektedir. A noktasında çalışmaya başlandığında, atmosferik koşullar yaklaşık sabit kaldığında, FV gerilimindeki ΔV kadar bir saptırma, işletim noktasını B’ye taşıyacak ve güçteki azalma nedeniyle bir sonraki saptırma tersine dönecektir. Bununla birlikte, eğer güneşlenme artarsa, bir örnekleme zamanı içinde güç eğrisi P_1 ’den P_2 ’ye kayar, işletim noktası da A’dan C’ye doğru taşınır. Bu güçte bir artma anlamına gelir ve saptırma aynı tutulur. Bu yüzden, işletim noktası MGN’den ayrılır ve eğer güneşlenme sürekli artarsa işletim noktası MGN’den ayrı kalmaya devam eder. Anlık olarak değişen güneşlenme durumunda bile MGN’nin takip edilmesini sağlamak üzere saptırma işareti kararı vermeden önce gerçek güç noktası iki önceki nokta ile karşılaştırılarak üç nokta ağırlık karşılaştırması yapılır.

Şekil 2.7’de saptır-gözle algoritmasının akış diyagram şeması verilmiştir. Bu algoritmada öncelikle sensörlerden gelen akım ve gerilim değerleri okunarak FV panelin gücü hesaplanır. Bu güç değeri daha önceki değer ile karşılaştırılarak kıyaslama yapılır. Eğer güçte artma veya azalma var ise FV panelin güçteki olduğu gibi gerilimi bir önceki gerilim değeri ile karşılaştırılır. Eğer güçte azalma olup gerilim değerinde de artma meydana gelirse MGN’nin sağ bölgesinde saptır-gözle yapıldığı tespit edilir ve MGN’i yakalayabilmek için referans gerilim değerimizi azaltmamız gerekir. Fakat, aynı şekilde güçte azalma olup gerilim değerinde de azalma meydana gelirse MGN’nin sol bölgesinde saptır-gözle yapıldığı tespit edilir ve MGN’i yakalayabilmek için referans gerilim değerimizi arttırmamız gerekir. Bu işlem MGN’a ulaşılan kadar sürmekte ve ardından sistem MGN etrafında salınmaktadır. Bu örnekleme adımı büyük olursa sistem, MGN’a uzak noktalarda salınım yapacağından panellerden alınacak toplam enerji miktarını azaltır. Bununla birlikte, daha küçük boyutta bir saptırma MGN’i yavaşlatır ve geç tepki süresine neden olur. Bunun çözümü olarak da MGN’a doğru daha değişken saptırma kullanarak küçültmek önerilmektedir [2, 13-15].

2.2.5. Artan iletkenlik metodu

Bu algoritma maksimum güç noktasını gözlemleme tekniğine dayanır. Atmosferik koşullardaki değişimleri hızlı bir şekilde algılamak için önerilmiştir. Artan iletkenlik algoritması FV'nin azar azar artan ve anlık iletkenliğinin karşılaştırılması ile maksimum güç noktasının takip edilmesi prensibine dayanır. FV'nin ürettiği akım ve gerilim değerlerindeki örnek değişimleri azar azar artan iletkenliği de değiştirebilecektir. Bu metot Denklem (2.2)'ye dayanmaktadır. Bu da gerilime bağlı olarak FV gücündeki değişimi görmek ve sonucu sifıra ayarlamaktır [1, 19, 20]. Bu durum Şekil 2.9'da gösterilmektedir.



Şekil 2.9. FV panelin dP/dV değişimini gösteren P-V karakteristik eğrisi

$$\frac{dP_{FV}}{dV_{FV}} = I_{FV} \frac{dV_{FV}}{dV_{FV}} + V_{FV} \frac{dI_{FV}}{dV_{FV}} = I_{FV} + V_{FV} \frac{dI_{FV}}{dV_{FV}} = 0 \quad (2.2)$$

$$-\frac{I_{FV}}{V_{FV}} = \frac{dI_{FV}}{dV_{FV}} \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)'ün sol tarafı anlık iletkenliğin zıtlığını ifade etmektedir. Denklem (2.3)'ün sağ tarafı ise azar azar artan iletkenliği göstermekte ve Denklem (2.4)'te gösterildiği gibi yazılabilir.

$$G = \frac{dP_{FV}}{dV_{FV}} \quad (2.4)$$

Diğer taraftan artan değişkenler olan dV_{FV} ve dI_{FV} nin her ikisi anlık yapılan ölçümlerle bir önceki yapılmış anlık ölçümlerin karşılaştırılması ile elde edilir ve bunlar sırasıyla Denklem (2.5) ve Denklem (2.6)'da verildiği gibi olmaktadır.

$$dV_{FV}(n) = V_{FV}(n) - V_{FV}(n-1) \quad (2.5)$$

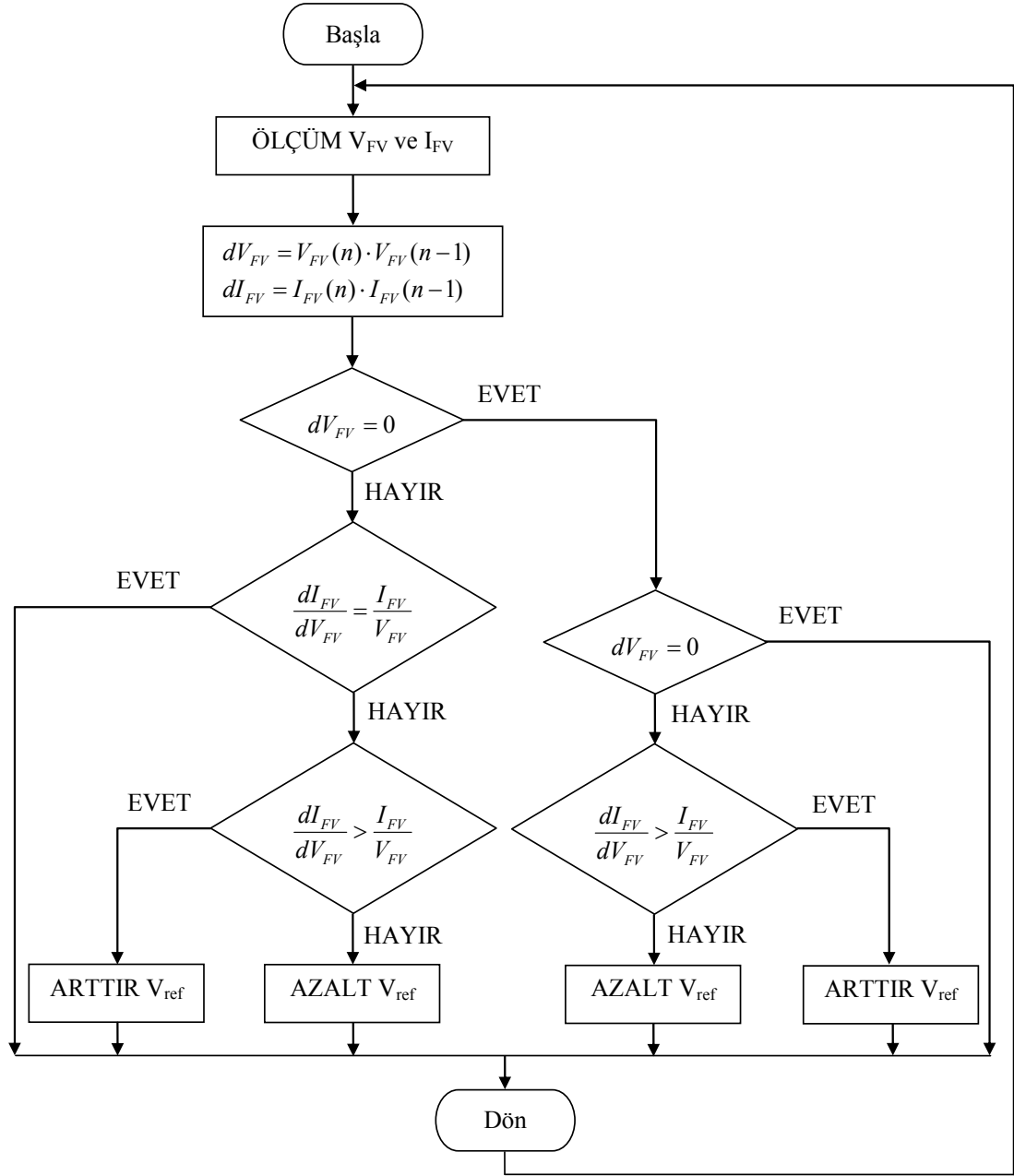
$$dI_{FV}(n) = I_{FV}(n) - I_{FV}(n-1) \quad (2.6)$$

Böylelikle, FV'nin türevinin analiz edilmesi ile FV'nin maksimum güç noktasında yada bu noktadan uzak olarak çalıştığı test edilebilir. Denklem (2.7)'de çalışmanın MGN'nin solunda olduğu ve V_{FV} panel geriliminin V_m MGN'daki gerilimden küçük, Denklem (2.8)'de çalışmanın MGN'da olduğu ve V_{FV} panel geriliminin V_m MGN'daki gerilimine eşit, Denklem (2.7)'de ise çalışmanın MGN'nin sağında olduğu ve V_{FV} panel geriliminin V_m MGN'daki geriliminden büyük olduğu görülmektedir.

$$\frac{dP_{FV}}{dV_{FV}} > 0 \text{ için } V_{FV} < V_m \quad (2.7)$$

$$\frac{dP_{FV}}{dV_{FV}} = 0 \text{ için } V_{FV} = V_m \quad (2.8)$$

$$\frac{dP_{FV}}{dV_{FV}} < 0 \text{ için } V_{FV} > V_m \quad (2.9)$$



Şekil 2.10. Artan iletkenlik metodu algoritmasının akış diyagram şeması

Denklem (2.2)'ye göre, anlık iletkenlik (dI_{FV}/dV_{FV}) ile artan iletkenlik $(\Delta I_{FV}/\Delta V_{FV})$ karşılaştırılarak Şekil 2.10'daki akış diyagramında görüldüğü gibi MGN noktası takip edilebilir. FV modülünün referans gerilimi V_{ref} MGN işletimini sağlar. MGN noktasında referans gerilim V_{ref} maksimum güç noktası gerilimine V_m 'ye eşittir. MGN'na ulaşıldığında, MGN'da veya atmosferik koşullarda bir değişiklik olduğunu gösteren ΔI_{FV} 'de herhangi bir değişiklik görülmez ise FV modül

çalışma noktası bu noktada sürdürülür. Algoritma yeni MGN'nı izlemek için V_{ref} referans gerilimini arttırır veya azaltır.

Bu kontrol algoritmasında gücü hesaplamak için, Şekil 2.11'de blok diyagramında da gösterilen FV modül gerilimi ve akımını ölçmek gerekmektedir.



Şekil 2.11. Artan iletkenlik metodu blok diyagramı

Artan iletkenlik metodunun en önemli avantajı hızlı değişen atmosferik koşullara uyum sağlayabilmesi ve MGN'nda meydana gelen osilasyonun saptır-gözle metodundan çok daha az olmasıdır. Ancak artan iletkenlik kontrol metodu ile denetlenen devreler biraz daha karmaşık ve pahalıdır. Verimleri ise saptır-gözle yöntemi ile yaklaşık olarak aynı fakat sabit gerilim yönteminden daha yüksektir [2, 13, 14].

2.2.6. Sıcaklık metodu

Açık devre gerilimi V_{OC} hücre sıcaklığı ile çoğunlukla değişir, fakat kısa devre akımı, ışıma seviyesi ve hücre sıcaklık değişimleri üzerinde nispeten doğru orantılı olarak değişmez. Denklem (2.9) ile açık devre gerilimi V_{OC} tanımlanmaktadır.

$$V_{OC} \cong V_{OCSTK} + \frac{dV_{OC}}{dT_{FV}} \cdot (T_{FV} - T_{STKFV}) \quad (2.10)$$

Burada, V_{OCSTK} Standart Test Koşulları (STK) altındaki açık devre gerilimi, $(dV_{OC}/dT_{FV}) = 0,08V/K$ sıcaklık gradyanı ve T_{STKFV} ise STK altındaki hücre sıcaklığıdır. Diğer taraftan, her çalışma koşulunda MGN gerilimi V_m Denklem (2.11) ile ifade edilmektedir.

$$V_m \cong [(u + S \cdot v) - T_{FV} \cdot (w + S \cdot y)] \cdot V_{m_STK} \quad (2.11)$$

Burada V_{m_STK} STK altında MGN gerilimidir. Tablo 2.2'de S ışıma seviyesi ile ilgili olarak optimum gerilim denkleminin parametreleri görülmektedir.

Tablo 2.2. Optimum gerilim denklem parametreleri [13]

S (kW/m ²)	u (S)	v (S)	w (S)	y (S)
0,1 % 0,2	0,43404	0,1621	0,00235	-6e-4
0,2 % 0,3	0,45404	0,0621	0,00237	-7e-4
0,3 % 0,4	0,46604	0,0221	0,00228	-4e-4
0,4 % 0,5	0,46964	0,0131	0,00224	-3e-4
0,5 % 0,6	0,47969	-0,0070	0,00224	-3e-4
0,6 % 0,7	0,48563	-0,0169	0,00218	-2e-4
0,7 % 0,8	0,49270	-0,0270	0,00239	-5e-4
0,8 % 0,9	0,49190	-0,0260	0,00223	-3e-4
0,9 % 1,0	0,49073	-0,0247	0,00205	-1e-4

Sıcaklık parametrik denklem metodu Denklem (2.11)'deki eşitliğe göre hesaplama yapar ve T_{FV} ve S değerlerini ölçerek anında MGN gerilimini belirler. Sıcaklık parametrik metodu genel olarak ayrıca S güneş ışınlanmasını gerektirir. Şekil 2.12'de sıcaklık metodu blok diyagramını göstermektedir [13].



Şekil 2.12. Sıcaklık metodu blok diyagramı

2.3. MGNİ Tekniklerinin Karşılaştırılması

MGNİ teknikleri basitlik, yakınsama hızı, donanım uygulaması, sensör gereksinimi, maliyet, etkinlik yelpazesi ve ölçülebilirlikler de dahil olmak üzere birçok açıdan farklılık göstermektedir. FV sistemler için maksimum güç noktası izleyici teknikler ile ilgili Faranda ve Leva [15], yaygın olarak teknikleri bu kriterler doğrultusunda aynı çalışma şartları altında karşılaştırmaktadır. Tablo 2.3'te MGNİ tekniklerinin verim ve ürettikleri enerji miktarlarına göre sıralaması verilmiştir.

Tablo 2.3. MGNİ tekniklerinin verim ve ürettikleri enerji miktarlarına göre sıralaması [13]

MGNİ Teknikleri	Verim	Enerji Üretim Sıralaması
Artan İletkenlik Metodu	% 99,48	1
Saptır-gözle Metodu	% 99,29	2
Sıcaklık Metodu	% 97,01	3
Açık Gerilim Metodu	% 94,56	4
Kısa Devre Akım Metodu	% 90,72	5
Sabit Gerilim Metodu	% 79,51	6

Tablo 2.3'teki verilere göre saptır-gözle ve artan iletkenlik teknikleri diğer yöntemlere göre enerji üretimi daha üstün, kendi aralarında ise benzer bir performans olduğu görülmektedir. Bu sonuç ticari uygulamalarda kullanımının yaygınlaşmasıyla da görülmektedir.

Artan iletkenlik metodu diğer teknikler arasında FV panellerden yüksek bir verim ile enerji alınabilmesini sağlamaktadır. Artan iletkenlik yönteminin çıkışı güneş ışınımı girişi ile aynı şekilde sahiptir, tek fark hızlı güneşlenme anında küçük bir geçiş süresi vardır. Bunun sonucu olarak, bu yöntem diğerlerine göre hızlı atmosferik koşullara uyum sağlayarak kısa cevap tepki süresi ile MGN'daki salınımı çok küçüktür. Böylelikle FV sistemden alınacak toplam enerji miktarı da artmaktadır. Aynı

sonuçlar küçük bir fark ile saptır-gözle yöntemiyle de elde edilir. Bu iki yöntem arasındaki fark, artan iletkenlik tekniğinde kullanılan işlem sayısı saptır-gözle yöntemine göre biraz daha fazladır. Her bir işlem, sistemde kullanılacak donanım ve yazılımsal farklılıklara ve maliyetin artmasına neden olmaktadır.

Açık gerilim ve kısa devre akım metodu donanımsal olarak sisteme ilave bir statik anahtar gerektirir, ancak yine de saptır-gözle ve artan iletkenlik yönlerine göre çok daha düşük enerji aktarımı sağlar. Bu elektronik anahtarlama sırasında enerji kaybı meydana gelmektedir. Üstelik, açık gerilim ve kısa devre akım yöntemleri anlık zaman takibi yapmadığından, anahtarlama sırasında oluşacak ışınım değişimi algılanamaz. Aslında bu teknikler yeni bir ışınım seviyesi olmadığı sürece yeni MGN hesaplayamaz. Ayrıca, bu teknikler için örnekleme zaman seçimi çok kritik rol oynar, srenin kısa seçilmesi durumunda anahtarlama sayısı artacağından enerji üretimi çok düşük olacaktır. Eğer anahtarlama süresi uzun olması durumunda hızlı değişen hava koşullarında MGN'nı yakından takip edemez.

Açık gerilim ve kısa devre akım metodu oldukça basit, karmaşık devreler gerektirmeyen, ucuz ve kullanışlı bir yöntemdir. Ancak referans işareti oluşturabilmek için gereken gerilim ve akım bilgisini okuyabilmek için FV modülden yükü ayırma gerekliliğinin yükler için sorun teşkil etmesi, bu esnada güneş enerjisinden faydalanılamaması, gerçek MGNİ işleminin sürdürülememesi olumsuz etkileridir.

Sıcaklık yöntemi saptır gözle ve artan iletkenlik tekniklerine göre biraz daha az enerji sağlar. Diğer tekniklerden farklı olarak ışınım ve sıcaklık değerleri okunur, fakat FV panelin sadece gerilimi okunduğundan tam olarak MGN takip edilememektedir.

Açık gerilim metodu diğer yöntemlerin içinde verimi en düşük olanıdır. Aslında bu teknik MGN'ı takip etmez, ancak bunun yerine herhangi bir çalışma şartı altında sabit tutarak STK altındaki optimum gerilimi veya başka bir iyi sabit gerilimi referans gerilimi olarak alır.

Maliyet açısından MGNİ masrafları, elektrik parçaları, elektronik bileşenler, panolar, kontrol cihazları, analog ve dijital sensör sayıları, yazılım uygulanabilirliği ve diğer

tüm güç bileşenleridir. MGNİ uygulamaları topolojisi büyük ölçüde son kullanıcıların bilgisine dayanır, kısa devre akım, açık gerilim veya sabit gerilim metotları analog devreleri için iyi bir seçenektir. Mikrodenetleyici kullanımını gerektiren dijital devre ile saptır-gözle, artan iletkenlik ve sıcaklık yöntemleri kolayca uygulanabilir. Ayrıca analog devre uygulamaları dijital devreye (mikrodenetleyici ve gömülü sistemler) göre daha ucuzdur. Aralarındaki tüm maliyeti karşılaştırılabilir hale getirmek için, bu maliyet karşılaştırma hesaplaması MGNİ yöntemleri mevcut yayılmasını dikkate alarak formüle edilir.

MGNİ yöntemini uygulamak için gerekli sensör sayısı aynı zamanda toplam maliyeti etkiler. Çoğu zaman, gerilim ölçmek akım ölçmekten kolay ve daha güvenilirdir, akım sensörleri genellikle daha pahalı ve hantaldır. Işınım ve sıcaklık sensörleri ise çok pahalı ve kolay temin edilemez. Tüm bu maliyet değerlendirmesinden sonra, Tablo 2.4'te sensörler, mikrodenetleyiciler ve ek güç bileşenlerin maliyeti dikkate alındığında basitleştirilmiş bir sınıflandırma verilmektedir [13, 14].

Tablo 2.4. MGNİ tekniklerinin maliyet sınıflandırılması [13]

MGNİ	Ek Güç Bileşeni	Sensör	Mikrodenetleyici Hesaplama	Toplam
Sabit Gerilim	Yok	Düşük	Yok/Düşük	Düşük
Kısa Devre Akımı	Yüksek	Orta	Yok/Düşük	Orta
Açık Gerilim	Yüksek	Düşük/Orta	Yok/Düşük	Düşük/Orta
Saptır-gözle	Yok	Orta	Düşük	Düşük/Orta
Artan İletkenlik	Yok	Yüksek	Orta/Yüksek	Yüksek
Sıcaklık	Yok	Yüksek	Orta/Yüksek	Yüksek

3. 3 FAZLI ŞEBEKE BAĞLANTILI EVİRİCİLER

FV panellerden elde edilen enerjinin Şebekeye aktarılması, Dağıtık Gc retim Sistemleri (DGS) ile sağlanmaktadır. Güneş panellerinin çıkışında doğru gerilim olduğundan Şebekeye enerji verilebilmesi için bu doğru gerilimin alternatif gerilime dönüŐtürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm evirici gc dönüşüm nitesi ile gerçekleştirilir. Yüksek gcl uygulamalarda c fazlı eviriciler kullanılmaktadır. Şebekeye enerji aktarılırken Şebekede bozucu etki oluŐturmamak için evirici yardımıyla üretilen enerjinin yüksek kalitede olması istenmektedir. Yüksek enerji kalitesi için evirici çıkışında üretilen c faz akımları sinzodiale yakın ve ilgili faz gerilimleri ile aynı fazda olmalıdır. Aynı zamanda Şebeke ile senkron bir Şekilde alıŐarak Şebeke için bozucu bir kaynak olmamalıdır. Bu nedenle eviricinin akım kontrolünün uygun Şekilde yapılması gerekmektedir. Yüksek enerji kalitesi yanında eviricinin yüksek gc yoğunluğu, yüksek verim, düşük maliyet, ve basit devre yapısına sahip olması istenmektedir [22-24].

Şebekeye bağlı evirici, gc aktarımının gerçekleştirilmesi için Şebeke ile senkronize olmalı ve aynı fazda akımlar üretmelidir. Bu akımların harmonik içerikleri düşük olmalıdır. IEEE 519 harmonik standardına göre, Şebekeye aktarılan akımların toplam harmonik içerikleri %5'ten kck olması gerekir. Her bir harmonik için sınır değerler Tablo 3.1'de verilmektedir. EN 50160 standardına göre, FV eviriciler için DGS'nde aşağıdaki gerilim ve frekans değerlerine uyulmalıdır [27].

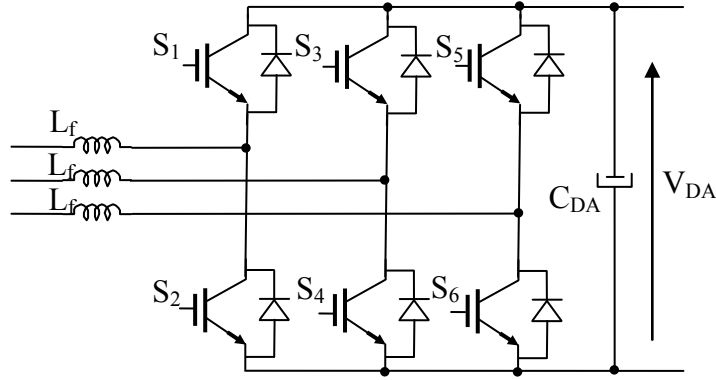
- Maksimum gerilim Toplam Harmonik Bozukluğu (THB) %8,
- 3 fazlı eviriciler için maksimum gerilim dengesizliği %3,
- Gerilim genliğindeki maksimum değerifim \pm %10 ,
- Frekans değerindeki maksimum değerifim \pm %1 ,
- Gerilim okmesi süresi, 1 saniyenin altında ve gerilim değerinin %60'ın altında olmalıdır.

Tablo 3.1. DGÜS’de akım harmonik sınırları [23]

Harmonik	Sınır Değer
3 – 9	< %4
11 – 15	< %2
17 – 21	<%1,5
23 – 33	< %0,6
33 ve üstü	< %0,3

3.1. 3 Fazlı Gerilim Beslemeli Eviriciler

FV panelden üretilen gerilimden üç fazlı AA çıkış gerilimleri üretmek için üç fazlı eviriciler kullanılır. Standart bir üç fazlı gerilim beslemeli evirici yapısı Şekil 3.1’de verilmektedir. Burada, V_{DA} DA kaynak gerilimi ve S_1 - S_6 elemanları ise çıkış geriliminin oluşturulmasını sağlayan altı adet güç anahtarlama elemanıdır. Devrede her bir anahtarlama elemanı 180° süresince iletimde kalmaktadır. Üst koldaki anahtarlama elemanlarından birisi kesime girdikten sonra karşılık gelen alt koldaki anahtarlama elemanı, ölü zaman değeri kadar sonra iletime sokulur. Böylece aynı fazdaki iki anahtarlama elemanının aynı anda iletime girmesi ve DA giriş kaynağının kısa devre olması engellenir [28, 29].



Şekil 3.1. 3 fazlı gerilim beslemeli eviricinin devre şeması

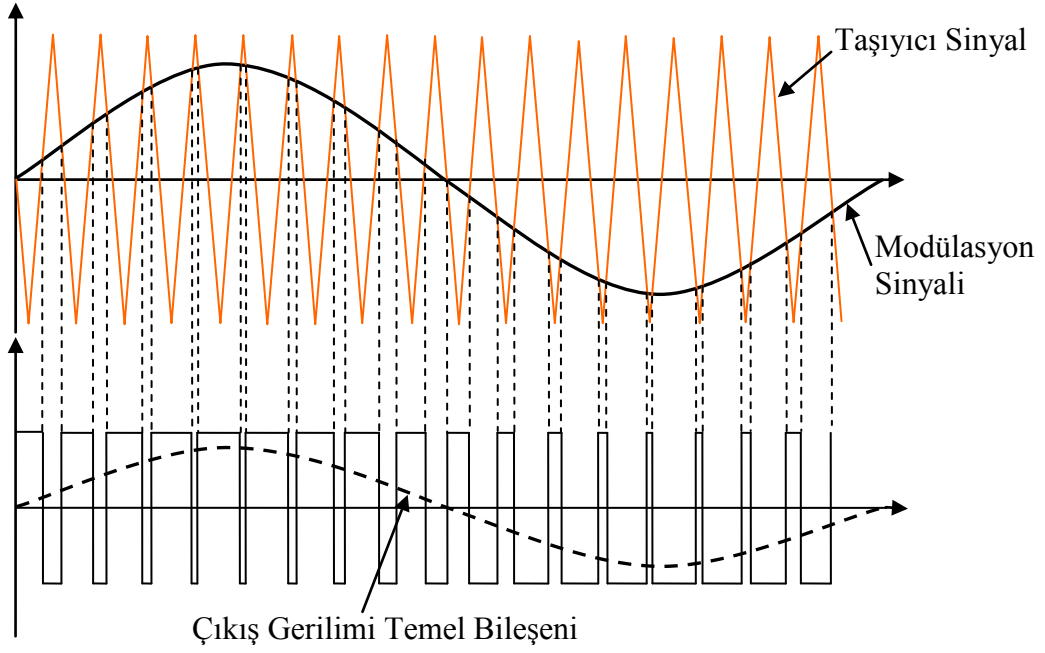
3.1.1. 3 fazlı gerilim beslemeli eviricilerde modülasyon yöntemleri

Darbe genişlik modülasyonu (DGM), istenen çıkış frekansı ve gerilimi için yarı iletken güç elemanlarının uygun şekilde anahtarlanmasıyla gerilim darbelerinin üretildiği bir yöntemdir. Tipik bir modülatör, DGM periyodu içerisinde referans gerilime eşit bir ortalama gerilim değeri üretir. DGM periyodunun çok kısa olduğu dikkate alındığında referans gerilim, anahtarlanan darbe örneğinin temel bileşenini verir. Çıkış geriliminin üretilmesi için kullanılan çok sayıda metot arasında başlıcaları sinüzoidal DGM, histerezis bantlı DGM ve uzay vektör modülasyonu metotlarıdır. Sinüzoidal DGM ve histerezis bantlı DGM metodu analog yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilirken diğer yöntemler mikroişlemci veya sayısal işaret işlemci (DSP) kullanımını gerektirir [28].

3.1.1.1. Sinüzoidal darbe genişlik modülasyon yöntemi

Sinüzoidal DGM yönteminde, sinüzoidal şeklinde bir modülasyon sinyali ile yüksek frekanslı üçgen taşıyıcı dalganın karşılaştırılması sonucunda DGM sinyalleri üretilir. Bu kontrol yöntemi, endüstriyel uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Modülasyon sinyalinin frekansı çıkış geriliminin frekansını, tepe değeri modülasyon indeksini belirlemektedir. Modülasyon indeksi ise çıkış geriliminin efektif değerini değiştirmektedir. Modülasyon indeksinin artması ile beraber evirici çıkış gerilimi de artmaktadır ve indeks değeri en büyük 1 değerini almaktadır. Modülasyon sinyaline göre yüksek frekansta olan taşıyıcı dalga eviricinin anahtarlama frekansını belirlemektedir. Üretilen çıkış harmonikleri anahtarlama frekansı ve katları şeklinde oluşur.

Modülasyon sinyalinin elde edilmesi için ilk olarak referans akımdan ölçülen akım çıkartılarak akım hatası elde edilir. Bu akım hatası PI kontrolöre verilir ve kontrolör çıkışında referans gerilim elde edilir. Bu işlem her faz için ayrı ayrı yapılır. Elde edilen referans gerilimler taşıyıcı dalga ile karşılaştırılarak üç faz anahtarlama sinyalleri üretilir. Şekil 3.2’de taşıyıcı dalga ile modülasyon sinyalinin karşılaştırma sonucunda bir faz için üretilen evirici çıkış gerilimi verilmektedir [23, 28].

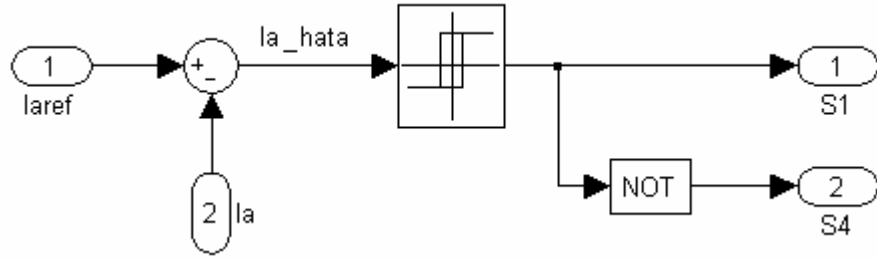


Şekil 3.2. Sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu

3.1.1.2. Histerezis bantlı darbe genişlik modülasyon yöntemi

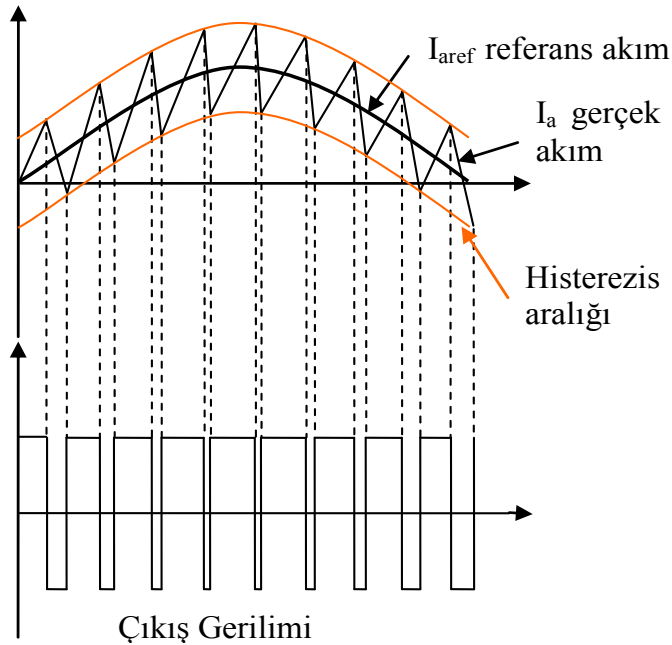
Histerezis akım kontrol yöntemi uygulama kolaylığı bakımından tercih edilen bir kontrol yöntemidir. Hızlı dinamik cevabı ve doğal akım koruması özelliklerinin yanında sistem parametrelerindeki değişimlerden etkilenmemektedir. Ancak sabit bantlı akım kontrolünde, evirici çıkış ve şebeke arasındaki gerilim farkına bağlı olarak eviricinin anahtarlama frekansı değişkendir. Şebekenin sıfır geçişine yakın bölgelerde evirici çıkış gerilimi ile şebeke gerilimi arasındaki fark yüksek olduğundan anahtarlama frekansı artmakta ve şebeke geriliminin tepe değerlerine doğru azalmaktadır. Bu değişken anahtarlama frekansı giriş filtre tasarımını zorlaştırmaktadır. Akımın tanımlanan bant içinde kontrol edilebilmesi için akım örnekleme hızının de hızlı bir şekilde yapılması gerekmektedir.

Şekil 3.3’de histerezis akım kontrol yöntemi blok diyagramı verilmektedir. Bu kontrol yönteminde evirici çıkışında ölçülen faz akımları ile referans faz akımları karşılaştırılarak her faz için akım hatası elde edilir. Bu akım hatası histerezis kontrolöre uygulanarak sinyalleri elde edilir.



Şekil 3.3. Histerezis akım kontrol yöntemi blok diyagramı

Eviricide her fazın akımı, histerezis kontrolör tarafından Şekil 3.4'te verildiği gibi akım hatası ile tanımlanan bant içerisinde tutulmaya çalışılır. Akım hatasının bant içerisinde kalması ile evirici çıkış akımları bant içerisinde hareket eder. Akım hatası bandın üst sınırına geldiğinde ölçülen akım bandın alt sınırına geldiğinden akımın artması için ilgili fazın üst sınır anahtarı iletime sokulur. Artan akım ile beraber hata azalmaya başlar ve üst banda kadar artmaya devam eder. Akım üst banda geldiğinde, akım hatası alt banda ulaşır ve üst anahtar kesime sokularak alt anahtara sinyal gönderilir. Böylece evirici çıkış akımı azalmaya başlar. Her anahtarlama periyodunda bu süreç tekrar eder ve çıkış akımı belirlenen bant içerisinde hareket edecek şekilde üretilir [23, 26].



Şekil 3.4. Histerezis akım kontrol DGM üretim prensibi

3.1.1.3. Uzay vektör darbe genişlik modülasyon yöntemi

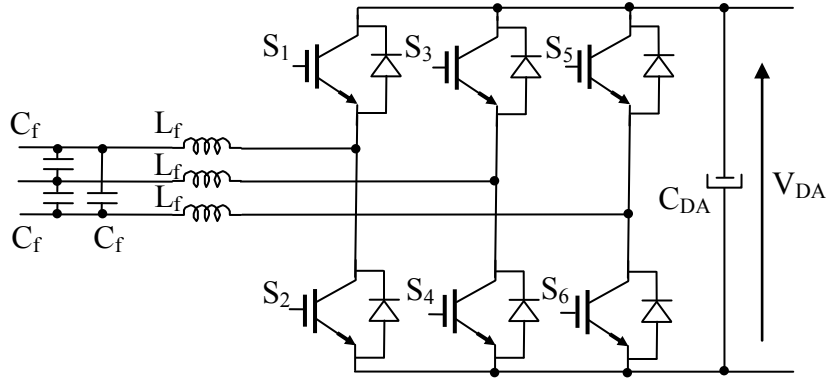
Uzay vektör darbe genişlik modülasyon yöntemi, referans sinüzoidal girişe ihtiyaç duymaması, daha düşük harmonik içeriğe sahip olması ve lineer çalışma bölgesinin daha geniş olması gibi özellikleriyle son yıllarda geniş uygulama alanı bulmuştur. Sinüzoidal DGM metoduna göre DA giriş gerilimi %15 daha verimli şekilde kullanılır. Bu metot, gerilim beslemeli evirici yapısına sahip AA sürücülerdeki kullanımıyla popüler hale gelmektedir. Çıkış geriliminin artırılması imkanı, kullanılacak yükte aynı güç değeri için daha düşük akıma sahip bir kontrol sistemi kullanılmasını sağlayacağından, gerilim beslemeli eviricideki iletim kayıpları azaltılabilir. Ayrıca evirici çıkış gerilimi ve akımlarının harmonik içeriği ve anahtarlama kayıpları azaltılır [23].

3.2. 3 Faz, 4 Kollu, 4 Telli Evirici Yapıları

Dağıtım ağı; düşük gerilimli dört telli dağıtık şebeke birimleri için, üç fazlı bir dönüştürücü topolojisine sahip olması gerekir. Şebeke güç kalitesini arttırmak için dağıtık üretim birimi, aktif güç filtresi olarak da kullanılabilir. Etkin bir aktif güç filtresi istenildiğinde, dönüştürücü yapısı nötr akımı akmasına izin veren bir nötr hattının olması gerekir. Bu yapıya izin veren 4 telli topoloji, 4 kollu topoloji ve (split-link) bölünmüş bağlantı dönüştürücü topolojileri mevcuttur. Karşılaştırma ölçütleri kontrol kolaylığı, devre karmaşıklığı, orta nokta kontrolü, DA bara gerilimi kullanımı ve elektromanyetik uyumluluk performansı olarak sınıflandırılabilir. Bölünmüş bağlantı dönüştürücü topolojisi, 4 kollu yapı ile karşılaştırıldığında en iyi seçenek olduğu sunulmaktadır. Aynı devre karmaşıklığı ve DA bara gerilim kontrolü kullanımı için, bölünmüş bağlantı topolojisi, kolay akım kontrolü ve daha az elektromanyetik uyumluluk problemleri ile sonuçlanmaktadır.

Dönüştürücü topolojisi seçiminde dört telli dağıtım şebekesine bağlantısı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Örneğin, nötr hattı 3 fazlı 3 telli Δ/Y dönüştürücü transformatöre bağlanabilir. Başka bir çözüm ise, 3 fazlı 4 telli dönüştürücülerde bulunabilir. Nötr hattı, dönüştürücüye dördüncü bir kol eklenerek elde edilebilir (4 kollu dönüştürücü) veya DA bara bağlantısını bölerek, orta noktasını nötr hattına bağlanarak yapılabilir (bölünmüş bağlantılı dönüştürücü).

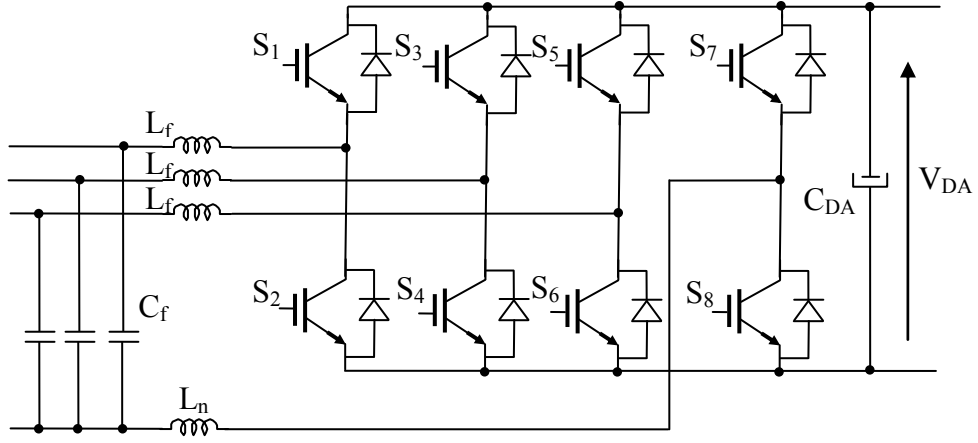
Klasik 3 faz dönüştürücü topolojisi 3 fazlı 3 telli yapısında Şekil 3.5'te verilmektedir. Alçak gerilim dağıtım ağı tipik bir 3 faz 4 tel konfigürasyonu olduğundan, şebekeye bağlanmak için Δ/Y bir dönüştürücü transformatör kullanılır. Bu transformatör ağır ve pahalı olduğundan birçok uygulamada istenilen bir durum değildir. Bununla birlikte, bazı durumlarda transformatör filtre empedansının bir parçası olarak kullanılabilir. Diğer bir dezavantajı ise, çeşitli filtre yöntemleri nötr akımı gerektirdiğinden nötr hattının olmaması aktif güç filtre kullanımını kısıtlamaktadır.



Şekil 3.5. 3 faz 3 telli evirici yapısı

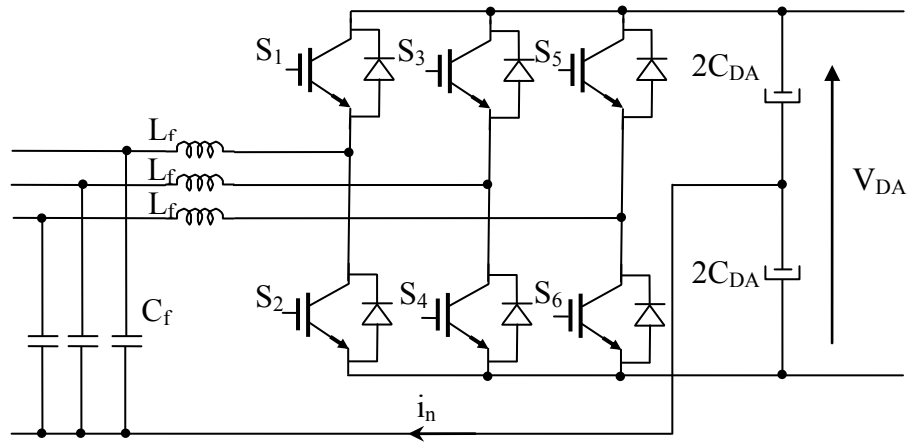
Δ/Y dönüştürücü transformatör kullanmak yerine, 3 fazlı 4 telli dönüştürücü topolojisi nötr hattını kendisi sağlayabilir. Bu, dördüncü bir kol ekleyerek (4 kollu dönüştürücü) veya DA bara bağlantısına iki kapasitör eklenerek orta noktasını nötr hattına bağlayarak yapılabilir (bölünmüş bağlantı dönüştürücü). Nötr tel aktif güç filtreleme tekniklerin kullanımına olanak sağlayacaktır. 4 telli dönüştürücüler 3 telli dönüştürücüler ile karşılaştırıldığında açık bir şekilde tercih edilir.

Şekil 3.6'da 4 kollu dönüştürücü topolojisi verilmektedir. İki ekstra S_7 ve S_8 anahtarları nötr hattını kontrol etmek için kullanılır. Dördüncü kolun anahtarlamasından dolayı oluşacak yüksek frekanslı akımları zayıflatmak için nötr iletkenine L_n şok bobini bağlanması gerekir. DA bara hattındaki gerilim dalgalanmalarını önlemek için DA bara hattına ise bir C_{DA} kondansatörü bağlamak yeterlidir.



Şekil 3.6. 4 kollu 4 telli evirici yapısı

Şekil 3.7’de bölünmüş bağlantılı dönüştürücü topolojisi mevcuttur. Bu yapı 4 kollu dönüştürücü ile karşılaştırıldığında basit topoloji yapısı nedeniyle daha az anahtarlama elemanına sahiptir. DA bara hattı $2 C_{DA}$ kondansatörü ile bölünmüştür. Bu noktada herhangi bir anahtarlama gerçekleşmediğinden, nötr iletken hattına bir şok bobini bağlamaya ihtiyaç yoktur. Bölünmüş bağlantı dönüştürücü, bağımsız olarak kontrol edilebilen 3 fazlı yarım köprü evirici gibi kabul edilebilir. DA bara kondansatörlerin gerilim dengesizliği bölünmüş bağlantı topolojisinde bilinen bir sorundur. Nötr hattı akımları nedeniyle yüksek miktardaki gerilim dalgalanması diğer bir sorundur. Bu dalgalanma, kapasitörler ile zayıflatılmış olmalıdır.



Şekil 3.7. Bölünmüş bağlantılı (split-link) 4 telli yapısı

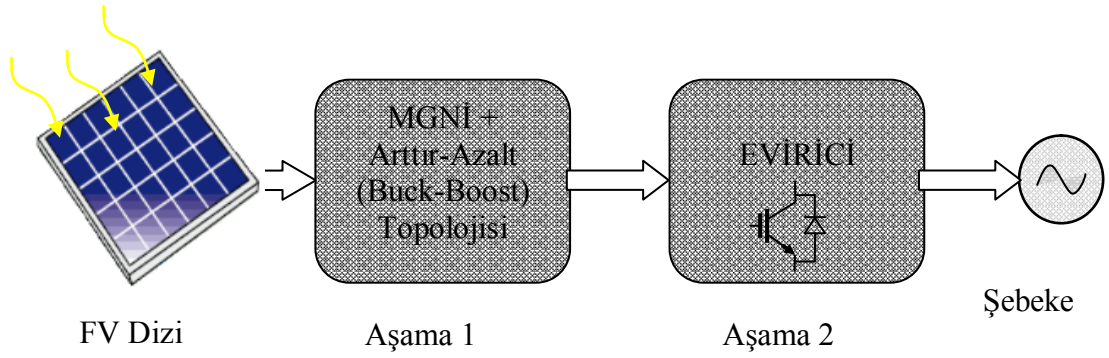
Bir nötr tel, ikincil bir filtre fonksiyonu ile dağıtılmış üretim birimleri programlamak için tercih edilir. 3 telli dönüştürücü yapısında nötr hattı elde etmek için bir Δ/Y transformatöre ihtiyaç vardır. Fakat bu durum sistem boyutunu arttıracığından dezavantajlı hale gelmektedir.

Dağıtık üretim sistemleri şebekede yaygın olarak kullanıldığından, ikincil bir aktif paralel filtre fonksiyonu ile programlandığı zaman bu dönüştürücüler enerji kalitesinde iyileştirme sağlayabilir. Tüm bu filtreleme potansiyelini kullanabilmek için bir nötr hatta ihtiyaç vardır. Bu nedenle, 4 telli dönüştürücüler 3 telli dönüştürücüler üzerinde önemli bir avantaj sunmaktadır [29, 30].

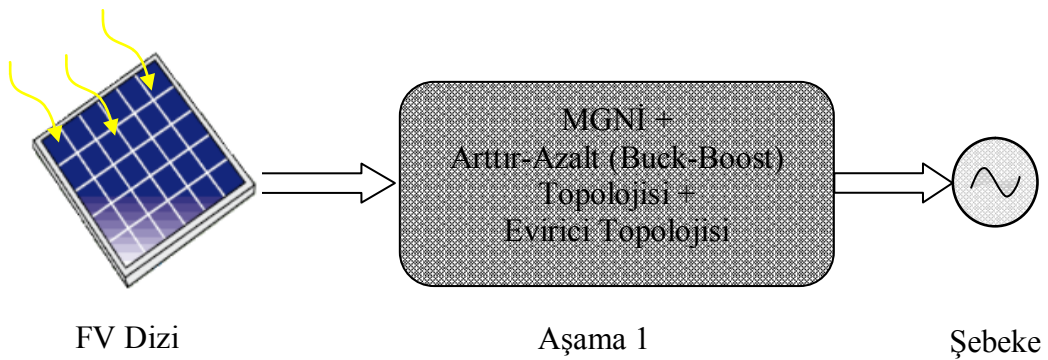
3.3. Tek ve Çift Aşamalı Şebeke Bağlantılı FV Sistemler

Şebeke bağlantılı sistemlerde genellikle iki ve daha fazla aşamalı çevrim ünitesi vardır. Mevcut FV dizisi gerilimine bağlı olarak bu gerilim seviyesini artırmak veya azaltmak gerekebilir. İlk aşamada genellikle, gerilim seviyesi dönüşümü ve MGNİ yapmak için özel bir DA/DA güç dönüştürücü bölümü ile birden fazla güç aşamaları içerir. Çift aşamalı (dual-stage) dönüştürücü sistem yapısı Şekil 3.8'de verilmektedir. Çift aşamalı sistemin, daha düşük verimli, daha büyük boyutlu ve daha yüksek maliyetli olması dezavantajdır. Bu nedenle günümüzde yaygın olan, küçük boyutu, düşük maliyeti, yüksek verimi ve yüksek güvenilirlikleri nedeniyle tek aşamalı şebeke bağlantılı yapı kullanılmaktadır. Bu sistem topolojisinde ise sadece DA/AA güç dönüştürücüsü mevcuttur. Tek aşamalı (single-stage) dönüştürücü sistem yapısı Şekil 3.9'da verilmektedir. Buna ek olarak tek aşamalı FV sistemler, kompakt modülü ve tak-çalıştır türü uygulamaları için kolaylıkla kullanılabilir. Tek aşamalı yapıda MGNİ için DA/DA dönüştürücü aşaması kullanılmaz. Bu nedenle, tek aşamalı şebeke bağlantılı FV sistemlerinde, tek güç kademesi araya konularak artırma veya azaltma ve evirici yapısıyla MGNİ gerçekleştirilmesi gerekir. Şebeke bağlantılı FV sistemine dahil edilen aşama sayısı, bu tür sistemlerde genel verimlilik, güvenilirlik ve kontrol karmaşıklığı gibi etkenler önemli konulardır. Çift aşamalı sistemde bulunan her bir birim, düşük verimlilik ve güvenilirliği nedeniyle istenmeyen bir durum olabilir. Bu nedenle, bu gibi sistemlerin içinde bulunan aşama sayılarını azaltmak istenir. Bunu sağlamak için iki alternatif vardır; ya güç dönüştürücü (şebekeye güç aktarımı yapmadan hemen önce) çıkışına yükseltici bir transformatör kullanmak yada

yüksek doğru gerilime sahip FV panel dizisi kullanılmaktadır. İlk seçenek, kayıpların eklenmesi dışında sistem boyutlarında (güç yoğunluğu) artışa neden olur. İkinci seçenek, güvenliğin azaltılması ve parazitik kapasitans yoluyla kaçak akım olasılığını artırarak FV dizisinin kısmi gölgeleme sırasında tehlikeli noktalar oluşmasına yol açabilir. İdeal bir çözüm, ara bir güç dönüştürücü ile sadece tek aşamalı düşük gerilim FV dizisine sahip yapı ile Şekil 3.9’da verilmektedir. Bu tek aşamada, sadece FV dizi gerilimini arttırmak ve yüksek kaliteli AA dalga şekline dönüştürmek olmamalı, aynı zamanda FV dizisinden maksimum gücü alabilmelidir. Böyle bir sistemin daha az aşamalı olması bakımından daha verimli ve daha güvenli olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.8. Çift aşamalı (dual-stage) dönüştürücü topolojisi



Şekil 3.9. Tek aşamalı (single-stage) dönüştürücü topolojisi

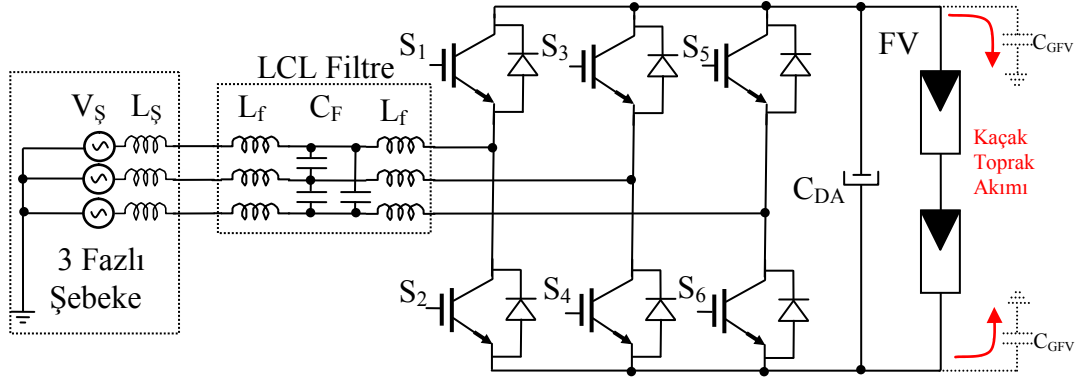
Tek aşamalı sistemler, evirici, şebekeye sinüzoidal güç basmasının dışında MGN'ı takip etmelidir. Tek aşamalı şebeke bağlantılı FV sistemler, her iki döngüyü tek bir güç dönüşüm aşamasında eşzamanlı olarak gerçekleştirmekte ve böylece sistem topolojisi basitleştirilmektedir. Ancak, çıkış akımlarının sinüzoidal dalga şeklini korumak amacıyla, referans çıkış gücünü değiştirmek için minimum periyot, şebeke gerilimi periyodunun yarısı kadar olmalıdır. Sistem kararlılığını korumak amacıyla, MGNİ yöntemi düşük hızda çalışması için modifiye edilmelidir. Bu çalışmada tek aşamalı şebeke bağlantılı FV sisteme saptır-gözle MGNİ yöntemi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Gerilim ve akım sensörleri ile, bu yöntem kullanılarak FV panellerin son güç noktasını hesaplar ve eviricinin çıkış gücüne karar verir. Gerilim çökmesi olaylarını önlemek amacıyla, çıkış gücünün referans değerini değiştirmek için minimum adım uzunluğu, izleme yönüne göre değişir. Bu FV dizisinin doğrusal olmayan I-V karakteristiği nedeniyle oldukça zordur. MGNİ bu işlemi, FV dizisinin çalışma gerilimini veya akımını kontrol ederek sağlayabilir. Buna göre, çalışma noktasındaki referans akım veya gerilim değeri, referans şebeke akımını hesaplamak için kullanılır. Şebeke bağlantılı tek aşamalı FV sistemlerinde MGNİ için bu referans akımını belirlemek amacıyla kullanılan saptır-gözle yöntemi, doğrudan şebeke referans akım değerini sağlamak daha sonra şebekeye uygun sinüzoidal akım beslemek için iyi bir yaklaşımdır. Aynı zamanda, bu MGN'ndaki akım referans salınımını önler, böylece fliker problemlerinin önüne geçilir. Burada referans gerilimi, şebeke referans akımını hesaplamak için kullanılır.

Diğer kontrol yöntemlerinde, FV dizisinin negatif eğim bölgesinde veya P-V karakteristiğinin gerilim kaynağı bölgesinde çalıştığında doğru sonuçlar vermektedir. Bu yöntemlere dayanarak kontrolör, referans gerilimi ve referans şebeke akımı bu bölgede ters orantılı olarak çalışacak şekilde tasarlanır. FV dizisi akım kaynağı bölgesine girmiş gibi bu orantıyı sürdürür. Ancak ani bir hava değişikliği nedeniyle çalışma noktası pozitif eğim bölgesine geçerken sistem çöker ve kontrol başarısız olur. Yöntemlerde artan iletkenlik ve saptır-gözle algoritmaları gibi MGNİ için küçük artımlı adım tekniği kullanılabilir. Ayrıca, şebeke akım bozukluğunu önlemek için, şebeke gerilim çevrimini tamamladıktan sonra sadece adım büyüklüğünde bir değişiklik yapılabilir [31-34].

3.4. Transformatörsüz FV Evirici Yapılarında İzolasyon ve Sızıntı Akımları

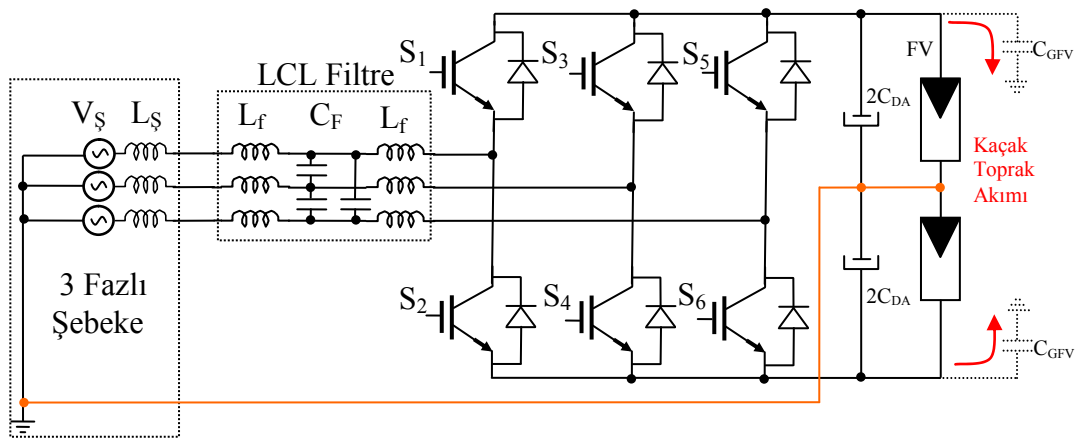
Transformatörsüz şebeke bağlantılı FV sistemlerinde özellikle izolasyon ve güvenlik konusu önemli bir konudur. Küçük güçlü FV tek fazlı sistemler, genellikle 5-6 kW üstü kurulmaktadır. Burada sistemin girişinde FV bir DA kaynağı bulunurken çıkışında AA bir güce dönüştürülmektedir. Büyük güçlü DA kapasitörler sistemin güvenilirliğini ve uzun çalışma ömrünü azaltmaktadır. Diğer yandan 3 fazlı sistemlerde yine çıkışında AA bir güç olurken büyük kapasitörlere ihtiyaç duyulmamaktadır. Küçük bir maliyetle sistemin güvenilirliği ve uzun süre çalışması sağlanabilmektedir. Güvenlik konusunda ise FV sistemlerde galvanik izolasyon kullanılmakta, hem yüksek frekans transformatörü DA/DA yükselten dönüştürücü hem de AA çıkış tarafında alçak frekans transformatörü bulunmaktadır. Galvanik izole transformatörü eklemek, sistemin maliyet ve boyutunu artırmakta ve bütün verimliliği azaltmaktadır. Boyut ve ağırlığı azaltarak ve fiyatını düşürerek izoleli bir transformatör dahil etmeyerek yüksek verime sahip bir evirici yapılabilir. Burada transformatörsüz çözümler tercih edildiğinde genellikle avantajlı bir hale gelmektedir. Fakat, güneş panel parazitik kapasitans topraklaması tarafında güvenlik konuları oluşmaktadır. FV panel terminal uçları ve toprak arasına kondansatör (C_{GFV}) bağlayarak sistem topraklaması yapılmaktadır. Şekil 3.10'da bir FV sisteme parazitik kapasitans kondansatörleri bağlanmış bir model verilmektedir. Sızıntı ve hata akımları topraklanarak şebeke bağlantılı FV sistemin güvenilirliğini sağlamaktadır. Parazitik kapasitans kondansatör (C_{GFV}) değeri birçok faktöre bağlı olarak seçilmektedir. Bunlar;

- FV panel ve dış çerçeve yapısı,
- Hücre yüzeyleri ve hücreler arasındaki mesafe,
- Modül çerçevesi,
- Hava koşulları,
- Nem ve toz,
- Elektromanyetik uyumluluk filtre tipidir.



Şekil 3.10. 3 fazlı tam köprü evirici topolojisi

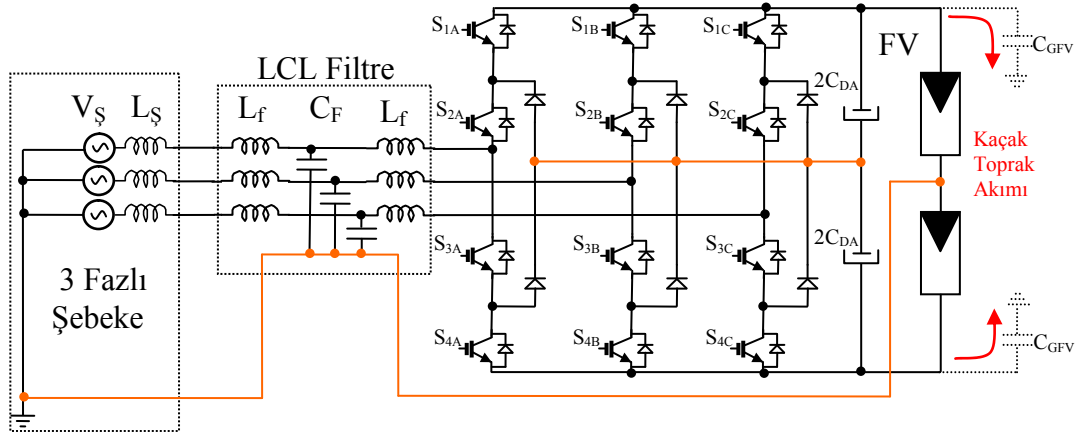
Şekil 3.10’da verilen 3 fazlı tam köprü (3TK) evirici topolojisi şebeke bağlantılı FV sistemler için en basit ve en yaygın olarak kullanılan yapıdır. Eğer parazitik kapasitans kondansatörlerine doğru hiçbir akım akıyor ise, FV dizisi ve AA şebeke arasında galvanik izolasyonlu bir sistem kurulmuştur ve şebeke akımı pürüzsüz bir sinüzoidal eğride olmaktadır. Aynı koşullar altında, FV dizisi ve AA şebeke arasında herhangi bir galvanik izolasyon yok ise, toprağa sızıntı akımı akmakta ve aynı şebeke akımı parazitli bir önceki akım şekline göre daha geniş salınımlı sinüzoidal eğrisi çizmektedir. Yine bu topoloji yapısında ortak-mod geriliminde yüksek frekanslı bileşenler içermektedir. DA bara arasında yüksek anahtarlama frekansından dolayı üretilen kaçak akım değeri de çok yüksek olmaktadır. Bu değerler şebeke bağlantılı FV sistem standartlarının dışına çıkmaktadır.



Şekil 3.11. Bölünmüş bağlantılı 3 fazlı tam köprü gerilim kaynaklı evirici topolojisi

Şekil 3.11’de bölünmüş bağlantılı 3 fazlı tam köprü gerilim kaynaklı (3TK-BB) evirici yapısı verilmektedir. Diğer topoloji yapısından farklı olarak, giriş tarafında benzer şekilde kapasitörler ve FV dizisinin bulunmasının yanında, bu yapıda FV dizisi ve kapasitörler iki eşit parçaya ayrılarak orta noktaları şebekenin nötr noktasına bağlanmaktadır. Bu topoloji üç bağımsız tek fazlı yarım köprü evirici yapısına eşdeğerdir. 3TK evirici yapısı tarafından kullanılan akım kontrolü, bu yapıdaki anahtarların kontrolü içinde uygulanır. DGM modülasyonu için iki strateji kullanılır. İlki her üç faz için tek üçgen taşıyıcı sinyal kullanarak, ikincisi ise 120° fark ile üç tane üçgen sinyal kullanarak anahtarlama yapılmaktadır. Bu yöntemdeki amaç, şebeke nötr akımındaki anahtarlama harmoniklerini ortadan kaldırmaktır. DGM için üçgen sinyalleri kullanarak, üç faz için ortak-mod gerilimi azaltılabilir.

3TK-BB evirici yapısındaki DA bara gerilim dalgalanmaları, kapasitörlerin orta noktası nötr hattına bağlı olduğundan ve bu bağlantı nötrü sıfır potansiyelde tuttuğu için 3TK evirici yapısından çok daha küçüktür. Toprak ve DA terminal geriliminde çok az dalgalanma meydana gelir. DGM için biraz daha küçük, birkaç miliamper değerine sahip bu topoloji ile sızıntı akımı büyük ölçüde azalır. Bu değerler şebeke bağlantılı FV sistem standartlarının içinde olup güvenilir bir yapıya sahiptir.



Şekil 3.12. 3 fazlı nötr noktası kenetlenmiş evirici tabanlı modüler topoloji

Şekil 3.12’de 3 fazlı nötr noktası kenetlenmiş çok seviyeli (3NNK) evirici yapısı verilmektedir. Bu yapı bazı önemli avantajları ile standart altı anahtarlı tam köprü eviricilere göre FV ve diğer yenilenebilir uygulamalar için ilgi çekici hale gelmektedir. Bu avantajlar;

- Anahtarlar seri bağlandığından ve gerilim bölündüğünden dolayı anahtarlar üzerindeki gerilim stresi azalmakta,
- Çıkış faz gerilimi iki düzeye sahip olduğundan, çıkıştaki gerilim daha düşük harmonik içermekte,
- Düşük dv/dt oranı olduğundan çıkış filtre boyutu küçülmekte,
- Düşük anahtarlama gerilimi kullanıldığından, anahtarlama kayıpları azalarak verimlilik artmaktadır.

Tek fazlı üç seviyeli evirici yapısı gibi her kol ayrı ayrı kontrol edilir ve her faz için üç ayrı akım denetleyicisi vardır. Dolayısıyla, çıkış akımı daima kendi faz gerilimi ile senkronize edilir. Bu topoloji yapısı, FV panel terminal uçları arasında hemen hemen hiçbir gerilim dalgalanması ve toprak sızıntı olmadığından, bu sistem, özellikle transformatörsüz FV evirici olarak kullanmak için çok uygundur. Bu değerler şebeke bağlantılı FV sistem standartlarında olduğundan FV sistemler için mükemmel bir çözüm haline gelmektedir.

Güç dönüştürücüleri açısından incelendiğinde, 3NNK evirici yapısı diğer iki topolojiye göre fazladan altı adet anahtarlama elemanı ve altı adet diyot kullanılmaktadır. Bu durumda, anahtarlama elemanlarının diğer iki topolojiye kıyasla gerilim değerinin sadece yarısına ihtiyaç vardır. Gerilim dengeleme kontrolü ile ilgili olarak, kapasitörlerin orta noktası nötr hattına bağlı olduğundan ve FV dizisinin orta noktası bu bağlantı ile birleştirilmediğinden daha sonra girişteki kondansatörlerin gerilim dengesizliğini kontrol etmek amacıyla ekstra bir fonksiyona ihtiyaç gereklidir. Yükün kapasitörlere doğrudan bağlanması durumunda, bu yük akımı, FV panellerin orta noktaları bağlı olmadığından ve kapasitörlerden çekileceğinden alt ve üst kondansatör arasında gerilim dengesizliğine neden olur.

Transformatörsüz FV sistemleri için toprak kaçağı önemli konulardan biridir. 3TK evirici yapısı yüksek ortak-mod gerilimine sahip olması nedeniyle ve galvanik izolasyon olmaması durumunda sızıntı akımı çok yüksektir. Aksine, 3NNK evirici ve 3TK-BB evirici yapısında neredeyse hiç gerilim dalgalanması meydana gelmez. Küçük bir gerilim dalgalanması olduğundan, oluşacak toprak sızıntı akımı şebeke bağlantılı FV sistem standartlarına uyumlu olduğundan kullanılması diğer topolojilere göre daha avantajlıdır. Ayrıca, şebeke akımındaki daha düşük dalgalanma, 3TK evirici topolojisi kullanılması durumunda galvanik izolasyon ile mümkün olmaktadır. Aslında, transformatörlü yapıda sızıntı toprak akımının akması için hiçbir yol olmadığından şebeke akımının eşkutuplu üçlü harmonikleri iptal edilir ve şebeke akımı sınır değerler içindeki alt harmoniklerine maruz kalır.

Transformatörsüz şebekeye bağlanıldığında, şebeke akımındaki dalgalanma, en düşük 3TK-BB evirici daha sonra 3NNK evirici ve en yüksek ise 3TK evirici topolojisinde bulunmaktadır. Her bir topoloji için IEEE 929 standardına uyacak şekilde farklı LCL filtre seçilmesi gerekir. 3NNK evirici yapısı kullanıldığında, 3TK evirici yapısına göre filtre boyutu %20 daha küçük olmaktadır.

%98'e varan yüksek verimlilik ile birlikte transformatörsüz FV evirici için bu 3NNK yapısı en etkili topoloji haline gelmektedir. Tablo 3.2'de bu topoloji yapılarının, anahtarlama sayısı, anahtarlar üzerindeki gerilim stresi, diyot sayısı, gerilim dengesizlik kontrolü, ortak-mod gerilimi, toprak sızıntı akımı, transformatör gereksinimi, şebeke dengesizlik etkisi, nötr sızıntı akımı etkisi ve LCL filtre boyutu karşılaştırmaları verilmektedir [35, 36].

Tablo 3.2. 3TK, 3TK-BB, 3NNK topoloji yapılarının karşılaştırılması [36]

Evirici topolojisi	3TK	3TK-BB	3NNK
Anahtarlama sayısı	6	6	12
Anahtarlar üzerindeki gerilim stresi	V_{DA}	V_{DA}	$V_{DA}/2$
Diyot sayısı	6	6	18
Gerilim dengesizlik kontrolü	Hayır	Evet*	Evet*
Ortak-mod gerilimi	$\pm V_{DA}$	$\pm \%1 V_{DA}$	$\pm \%1 V_{DA}$
Toprak sızıntı akımı	Yüksek**	Düşük	Düşük
Transformatör gereksinimi	Gerekli	Gereksiz	Gereksiz
Şebeke dengesizlik etkisi	Düşük	Yok	Yok
Nötr sızıntı akımı etkisi	Nötr hattı olmadığı için uygulanamaz	Yüksek	Yüksek
LCL filtre boyutu (örnek birim)	1	0,87	0,80

* Sadece FV dizinin orta noktası, girişteki kapasitörlerin orta noktasına bağlanmadığı durumda.

** Transformatörsüz şebekeye bağlandığı durumda.

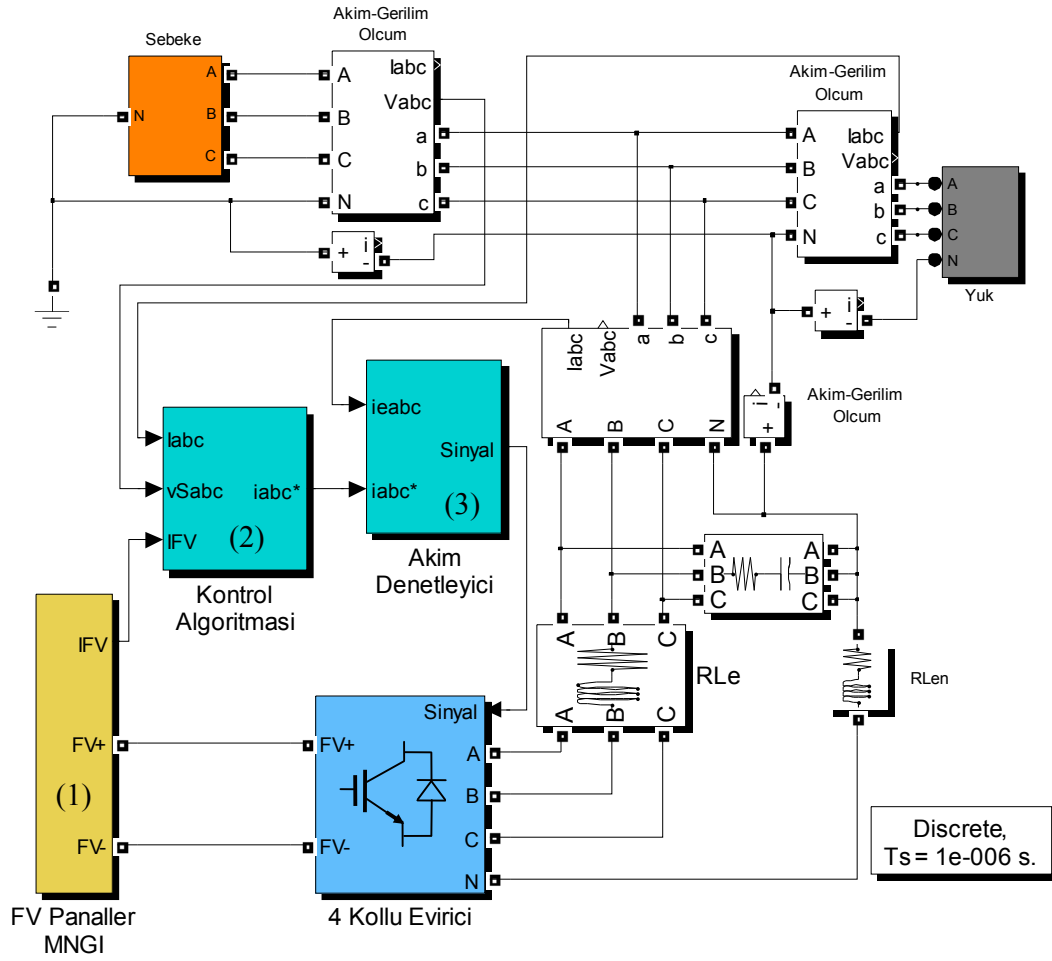
4. 3 FAZLI 4 TELLİ ŞEBEKE BAĞLANTILI MGNİ FV SİSTEMİ VE SİMÜLASYON SONUÇLARI

3 fazlı 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı MGNİ FV sistem Matlab/Simulink blok diyagramı Şekil 4.1’de verilmektedir. Bu simülasyon çalışmasında, FV panel dizisi simüle edilerek MGNİ tekniği, kontrol algoritması ve akım denetleyici ile sistemin benzetimi gerçekleştirilmektedir.

Simülasyon çalışmasında şebeke bağlı FV evirici yapısının, güneş ışınımına bağlı olarak değişen FV panel dizisinin gerilim, akım ve güçteki değişimi MGNİ tekniği ile sürekli MGN’da çalıştırılması amaçlanmaktadır. Yöntem olarak, uygulanabilirlik ve maliyet açısından yaygın olarak kullanılan aynı zamanda hava koşullarındaki değişime karşı hızlı cevap tepki süresine sahip Saptır-gözle algoritması kullanılmaktadır. Bu algoritma ile FV dizilerden maksimum güç olarak sistemin daha verimli çalışması sağlanmaktadır. Saptır-gözle algoritmasında üretilen referans sinyal, kontrol ve akım denetleyici biriminde işlenerek, tek aşamalı evirici için uygun çalışma sinyalleri üretilmektedir.

Simülasyonun gerçek hava koşullarına benzetimi için 3 değişik durum altında, saptır-gözle algoritmasının ve böylelikle sistemin MGN’da çalışma şartları incelenmektedir. Bu 3 değişik durum sistemin 0,3 s’nde değiştirilerek MGNİ algoritmasının cevap süresi ve MGN’ı yakalama hızı tespit edilmektedir.

FV evirici yapısı şebekeye bağlı olarak senkron bir şekilde enerji aktarımı yapmaktadır. Aynı hat üzerine bağlı yük grubunu besleyerek, evirici yapısının şebekeye katkı yaparak yük akımının bir kısmının FV evirici sistem üzerinden sağladığı gösterilmektedir. Sistem nötr hattı yapısı ile dengeli yükleri besleyebildiği gibi tek fazlı ve dengesiz yüklere de cevap verebilmektedir. 3. değişim durumunda aynı koşullar altında sisteme bağlı olan dengeli yük grubu dengesiz yük grubu ile değiştirilerek eviricinin akım ve gerilimi incelenmektedir.



Şekil 4.1. 3 fazlı 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı MNGİ FV sistemin MATLAB/SIMULINK blok diyagramı

Deneysel sistemde kullanılan Kaneka G-EA060 güneş panelleri 6'sı seri olmak üzere 2 sıra paralel kol oluşturularak 12 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 4.1'de verilmektedir.

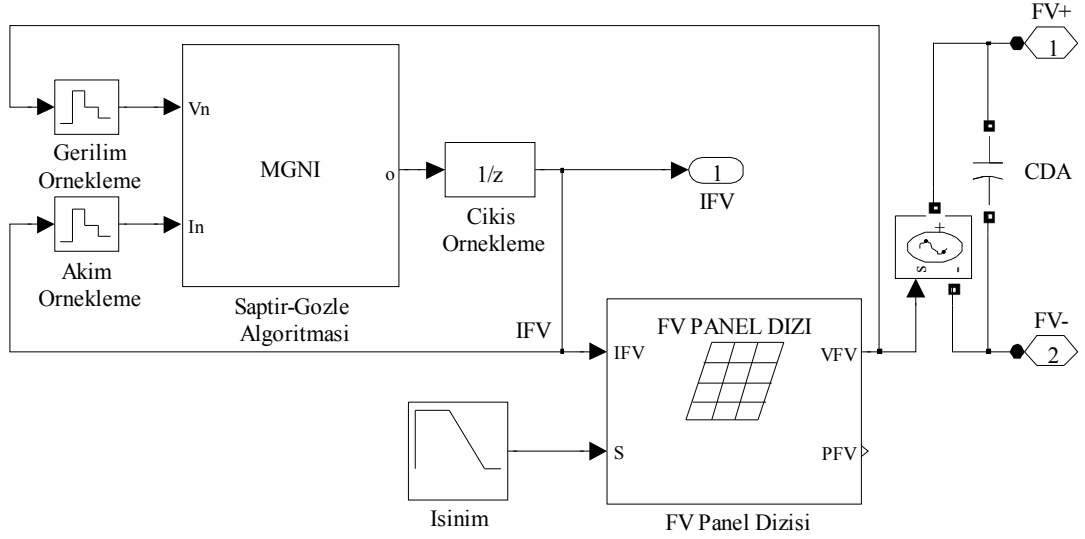
Tablo 4.1. Simülasyonda kullanılan sistem parametreleri

Parametreler		Değeri
FV Panel Dizisi	Açık devre gerilimi (V_{oc})	550,8V
	Kısa devre akımı (I_{ph})	2,38A
	Maksimum güç noktasındaki gerilim değeri (V_m)	402V
	Maksimum güç noktasındaki akım değeri (I_m)	1,8A
Şebeke	Gerilimi ($V_{şabc}$)	110V _{rms} /Faz-Nötr
	Frekansı (f)	50Hz
	Empedansı ($R_ş, L_ş$)	10m Ω ,1mH
Yük	Dengeli omik yük	20 Ω , 3/faz
	Dengesiz omik yük	20 Ω , 2 faz 15 Ω , tek faz

4.1. FV Panel Dizisi ve Saptır-Gözle Kontrol Algoritması

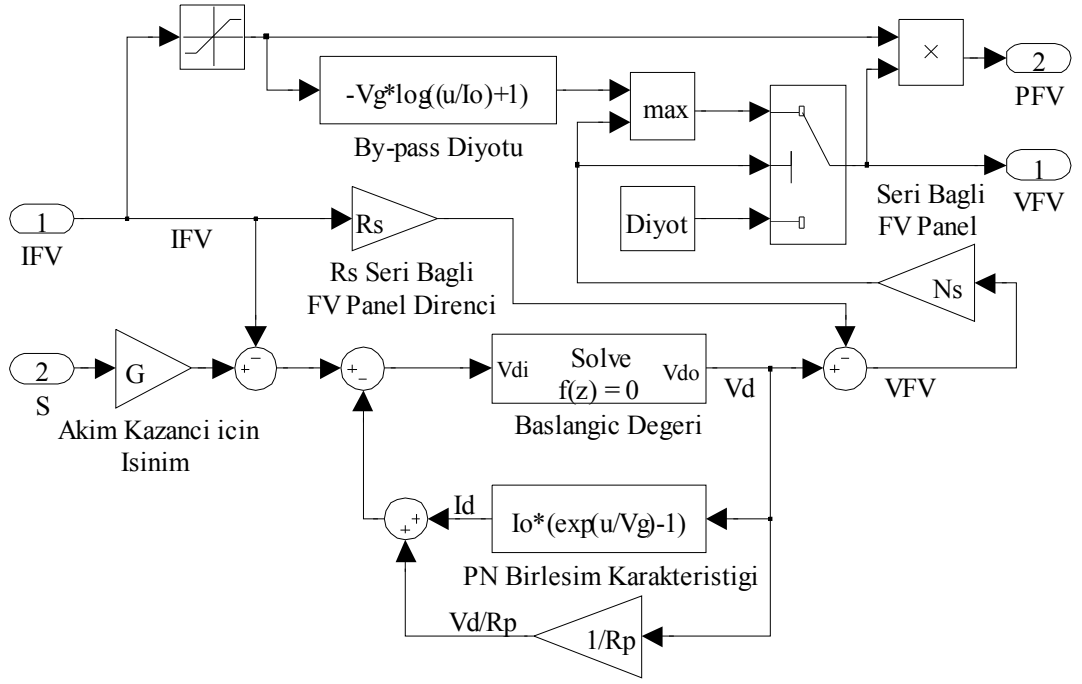
Şekil 4.1’de (1) numaralı blokta FV panel dizisi ve MGNİ yöntemi olan saptır-gözle kontrol algoritması bulunmaktadır. FV panel dizisi ve MGNİ algoritmasının MATLAB/SIMULINK blok diyagramı Şekil 4.2’de verilmektedir. Saptır-gözle yöntemi dalgalanan FV panel dizisi gerilim veya akımını aralıklarla değiştirir 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.

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 [2, 13]. Ek-A'da saptır-gözle algoritmasının program kodları verilmektedir. Bu program kodu Bölüm 2'de verilen saptır-gözle algoritmasının akış diyagramındaki işleyiş ile çalışmaktadır.



Şekil 4.2. FV panel dizisi ve Saptır-gözle kontrol algoritması blok diyagramı

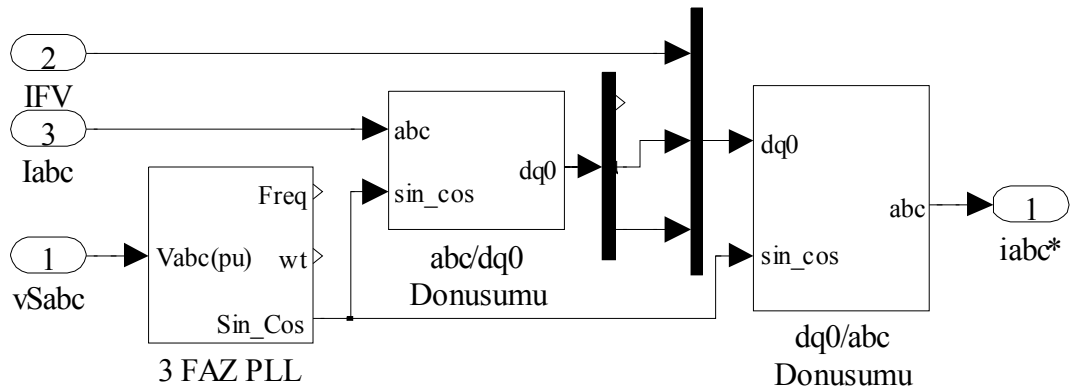
FV panel dizisinin simülasyon ortamında oluşturulması için sistemin giriş ve çıkış parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Güneş pilinin elektriksel modelinden elde edilen Denklem (1.1) - (1.5) kullanılarak FV dizisi benzetimi yapılmaktadır. FV dizi modelinde giriş parametreleri FV giriş akımı ve ışınım, çıkış parametreleri ise akım ve güçtür. FV çıkış akımı kontrol biriminde işlenerek anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. FV güç değeri girilen ışınım değerine göre MGNI algoritması ile FV dizi sürekli olarak MGN'da çalıştırılmaktadır. Şekil 4.3'te FV panel dizisinin blok diyagramı verilmektedir.



Şekil 4.3. FV panel dizisinin blok diyagramı

4.2. Kontrol Algoritması

Şekil 4.1’de (2) numaralı blokta, 3 fazlı eviricinin şebekeye senkron bir şekilde enerji aktarabilmesi için MGNİ’nden gelen FV akım değerini işleyen park dönüşümü ve faz kilitleme döngüsü (Phase Locked Loop PLL) kontrol birimi bulunmaktadır. Şekil 4.4’de kontrol algoritması blok diyagramı verilmektedir.



Şekil 4.4. Kontrol algoritması blok diyagramı

4.2.1. Faz kilitleme döngüsü (Phase Locked Loop PLL)

Şebeke bağlantılı FV güç sistemlerinde önemli konulardan biri şebekeye senkronizasyondur. Kullanılan senkronizasyon algoritması ile şebeke gerilim vektörünün açısı tespit edilmektedir. Bu açı değerine bağlı olarak eviricinin anahtarlama elemanları tetiklenerek sistemde MGNI kontrolü ve üç fazlı değişkenlerin senkron hızda dönen eksen takımına indirgeme işlemi gerçekleştirilir. Şebeke gerilimi ile evirici çıkış akımı senkronizasyonunu sağlayan ve temiz bir sinüzoidal akım referansı vermek, birim güç faktöründe çalışmasını sağlamak için faz kilitleme döngüsü (Phase Locked Loop 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}^* sinyalinin üretmek için çok önemlidir [23, 37].

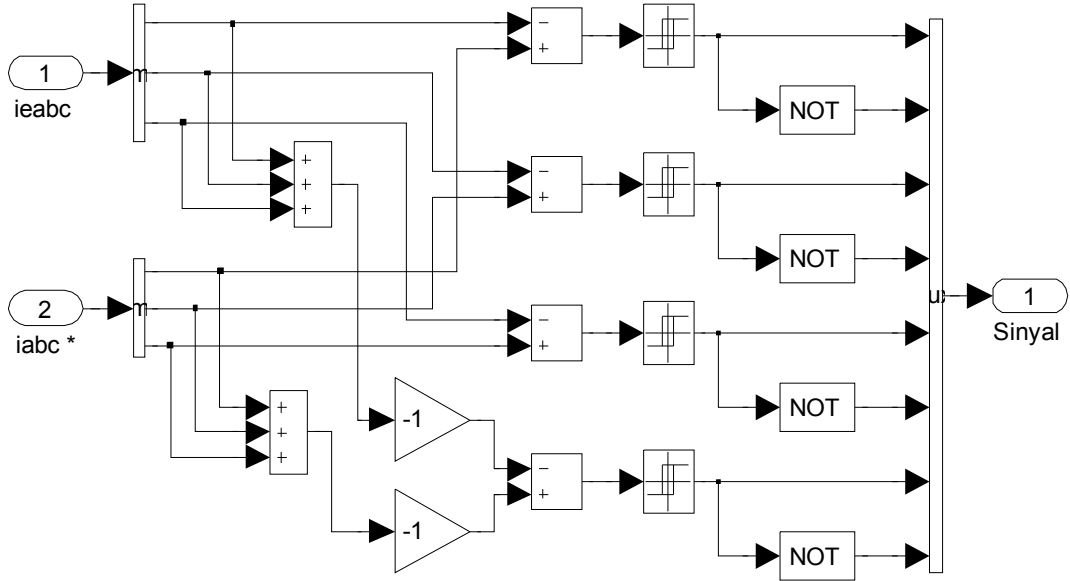
4.2.2. Park (dq0/abc) dönüşümü

Park dönüşümü üç fazlı büyüklükleri senkron hızda dönen eksen takımına (dq0) indirmek için kullanılır. Aynı dönüşüm DA bileşeni ile üç fazlı büyüklükleri elde etmek içinde kullanılmaktadır. Kontrol algoritması bloğunda MGNI yönteminde üretilen I_{FV} değeri kullanılarak, akım denetleyicisine evirici için i_{abc}^* referans sinyalleri 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 olmaktadır. Üç fazlı sistemdeki büyüklükler doğrudan senkron hızda dönen eksen takımına indirgenmek istendiğinde Denklem (4.1) eşitliğinde verilen Park dönüşümü kullanılır. Burada d eksen, FV dizi panel akımı olan I_{FV} ve sistem omik yük içerdiği için q eksen 0 olmaktadır [23].

$$\begin{bmatrix} I_{FVd} \\ I_{FVq} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

4.3. Akım Denetleyici

Şekil 4.1'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 4.5'te histerezis bant akım denetleyici ile ölçülen ve hesaplanan referans akımları kullanarak evirici anahtarlama sinyallerinin üretildiği blok diyagramı verilmektedir [38, 39].



Şekil 4.5. Histerezis bant akım denetleyici ile eviricinin anahtarlama sinyallerini üreten simulink blok diyagramı

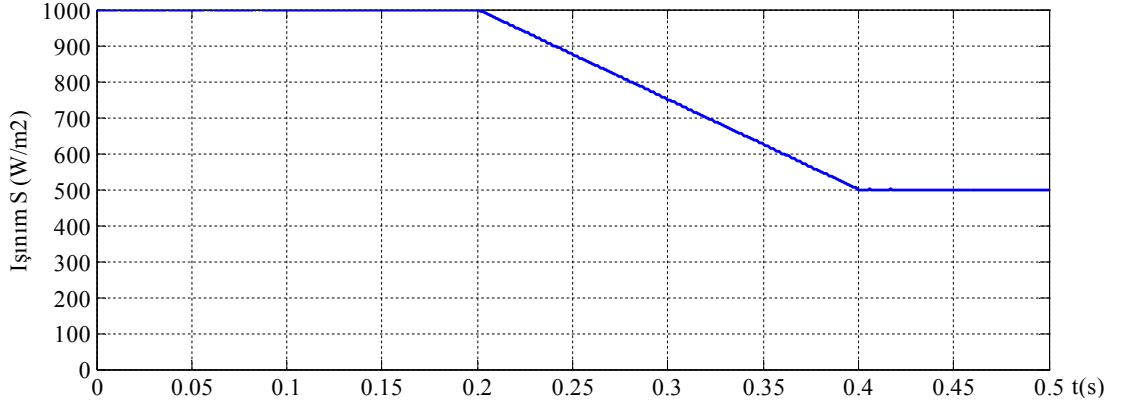
4.4. Simülasyon Sonuçları

Şebeke bağlantılı FV sistem iki farklı ışınım değişimine göre çalıştırılarak FV akım, gerilim, güç, şebeke gerilimi, akımı, evirici akımı ve yük akımları incelenmekte ve karşılaştırılmaktadır. Kontrol yapılarına ait simülasyon sonuçları MATLAB/SIMULINK Power System Toolbox yazılımı kullanılarak elde edilmektedir. Bu iki farklı ışınım değişimine bağlı olarak saptır-gözle algoritmasının tepki cevap süresi ve FV dizi panellerini MGN'da çalıştırdığı gösterilmektedir. Aynı ışınım koşulları altında yük grubu olarak dengeli ve dengesiz olmak üzere FV evirici yapısı çalıştırılmaktadır. Dengeli durumda her fazda 75Ω 'luk bir direnç vardır, dengesiz yük durumunda ise C fazında 90Ω , A ve B 75Ω 'luk direnç bulunmaktadır.

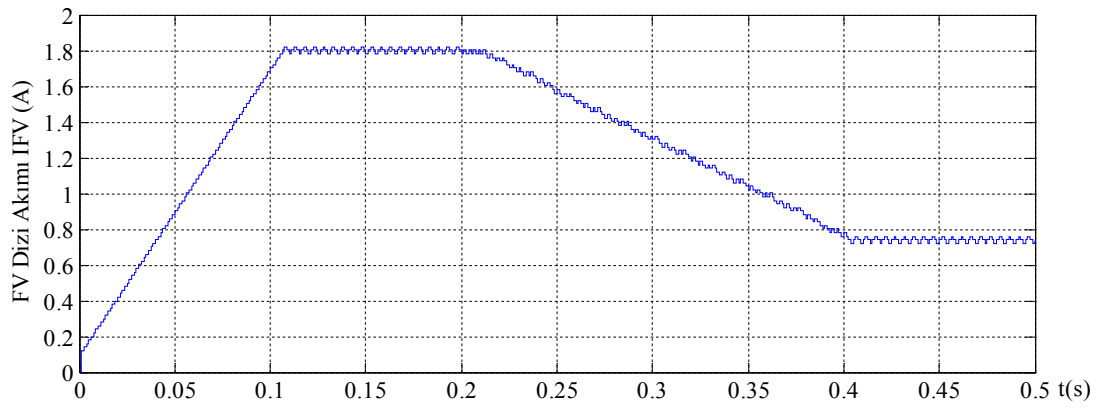
Simülasyon, toplam 0,5 s çalışmakta ve ilk durumda ışınım 1000 W/m^2 ile başlatılarak 0,2 s'de doğrusal bir şekilde 0,4 s sonuna kadar 500 W/m^2 düşürülmekte, daha sonra sistem 0,4 s – 0,5 s aralığında 500 W/m^2 ışınım değerinde çalıştırılmaktadır. İkinci durumda ise hızlı değişen atmosferik koşulları simule edebilmek için ışınım değeri 400 W/m^2 'de başlatılarak sistem 0,3 s'ye kadar aynı ışınım değerinde tutulmakta ve aynı saniye içinde aniden ışınım 1000 W/m^2 'ye çıkarılarak 0,5 s'ye kadar 1000 W/m^2 'de çalıştırılmaktadır. Bu ani değişim doğal ortamda bu kadar hızlı olmamakla birlikte ilk değişim durumu atmosferik koşullara daha yakın olmaktadır. Buradaki amaç MGNİ algoritmasının hızlı cevap süresini görmek ve olası hızlı değişim durumlarında sistemin nasıl bir tepki verebileceğini incelemektir.

Nötr yük akımı, dengeli durumda sıfır olduğundan şebeke ve evirici nötr akımı da sıfırdır. Dengesiz yük durumu olduğunda oluşan nötr akımının FV panel gücüne bağlı olarak eviricivi tarafından sağlanmakta ve şebeke şebekeden sıfıra yakın bir nötr akımı geçmesi sağlanmaktadır.

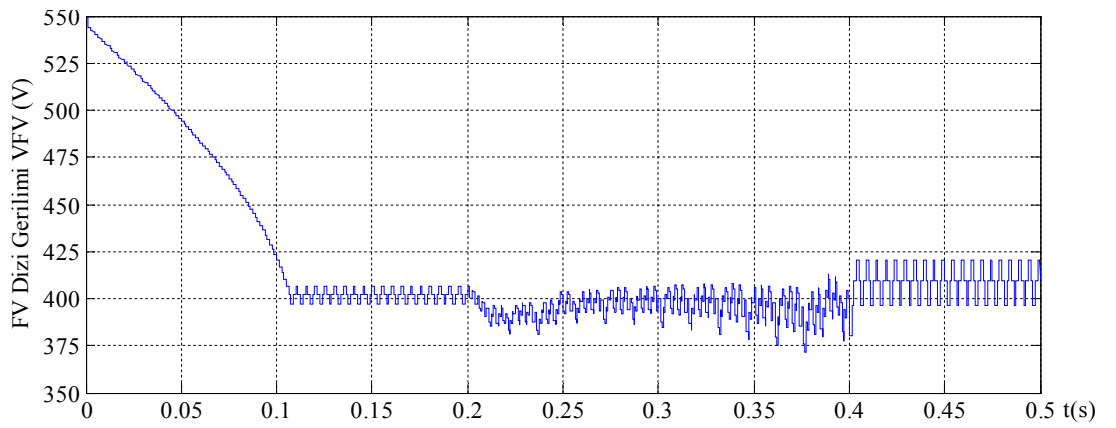
Birinci durum için kapsamlı simülasyon sonuçları Şekil 4.6-4.9'da verilmekte ve Tablo 4.2 ile ayrıntılı bir şekilde incelenmektedir.



(a) Güneş ışınlanma değişim grafiği

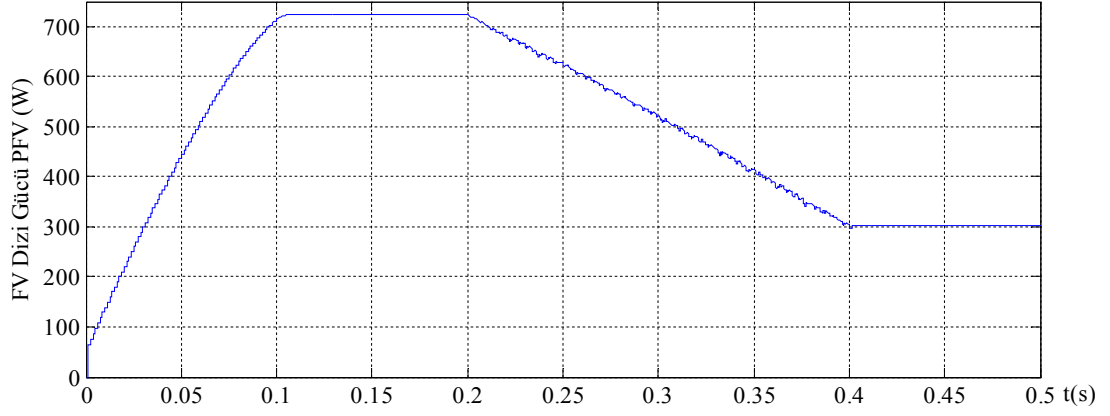


(b) FV dizi panellerin akım değişimi



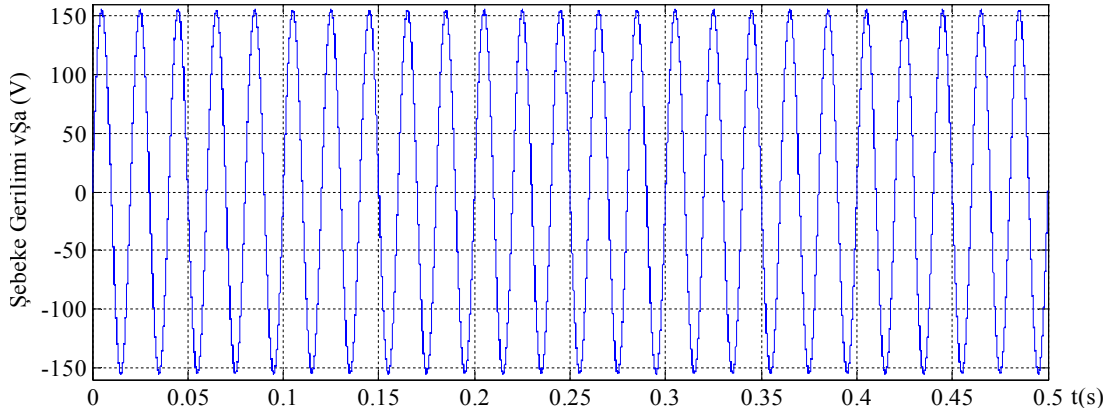
(c) FV dizi panellerin gerilim değişimi

Şekil 4.6. 1. durumda ışınım, akım, gerilim ve güç değişimi simülasyon sonuçları

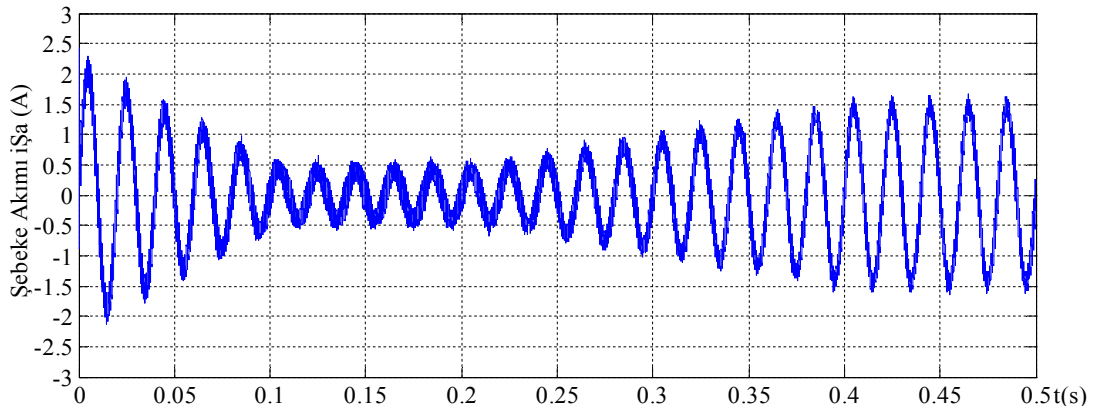


(d) FV dizi panellerin güç değişimi

Şekil 4.6. 1. durumda ışınlım, akım, gerilim ve güç değişimi simülasyon sonuçları (devamı)

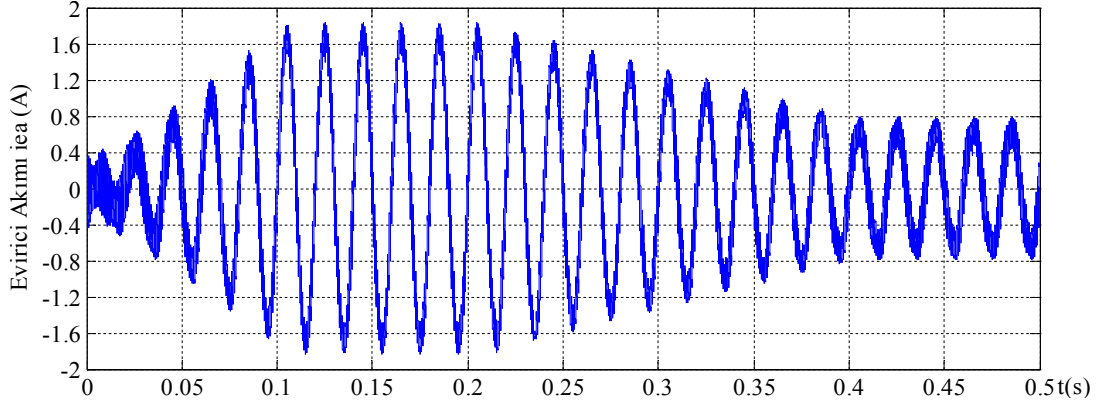


(a) A fazı şebeke gerilimi

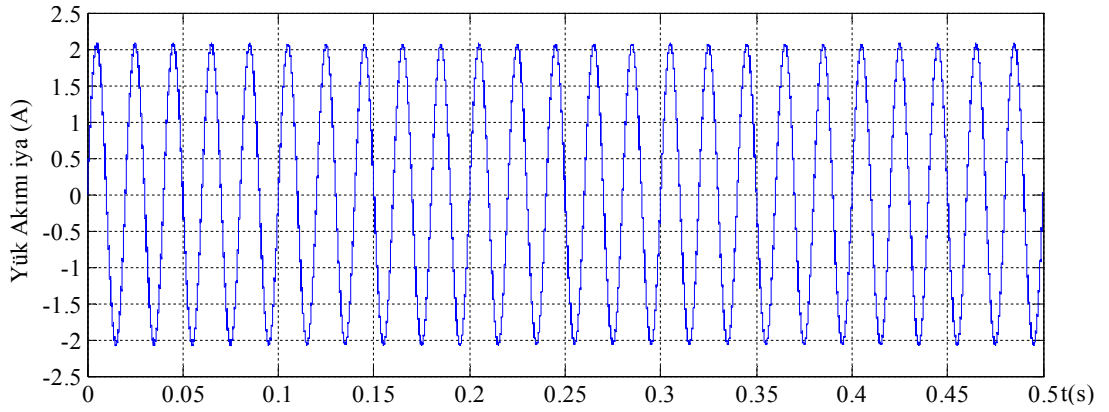


(b) Dengeli yükte A fazı şebeke akımı

Şekil 4.7. 1. durumda dengeli yükte A faz değişimi simülasyon sonuçları

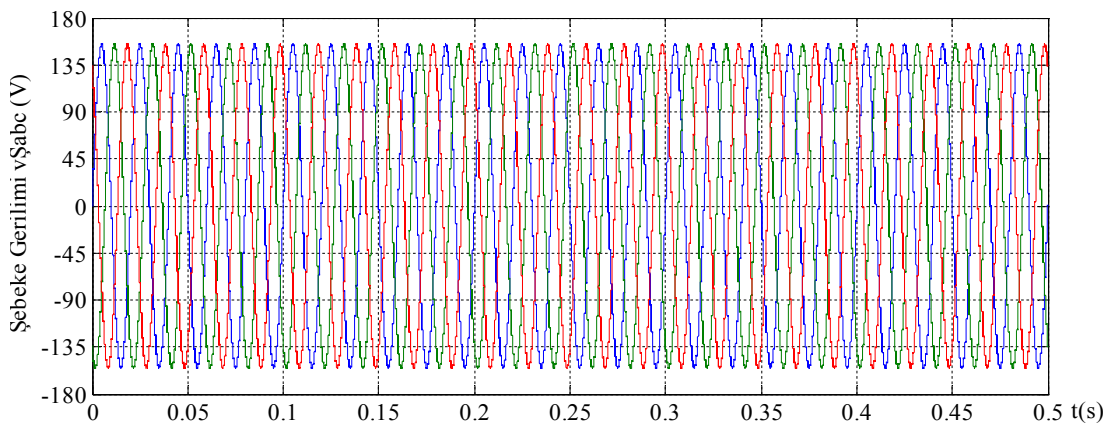


(c) Dengeli yükte A fazı evirici akımı



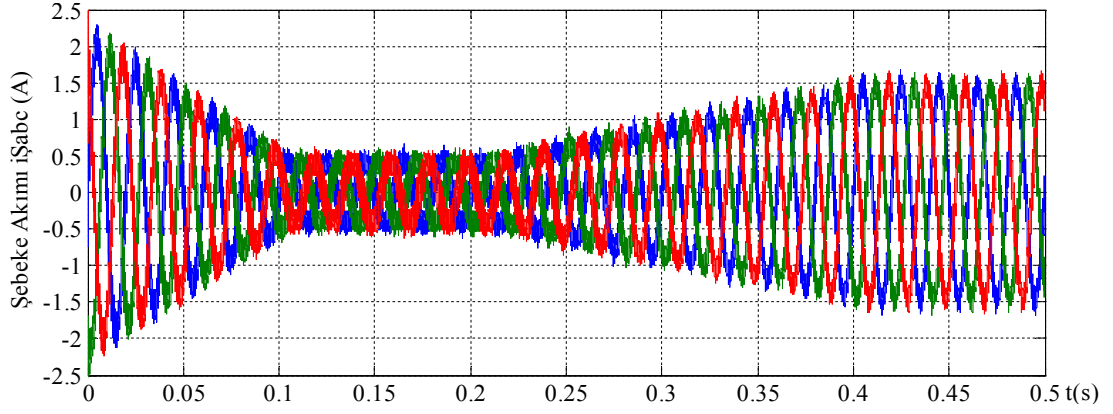
(d) Dengeli yükte A fazı yük akımı

Şekil 4.7. 1. durumda dengeli yükte A faz değişimi simülasyon sonuçları (devamı)

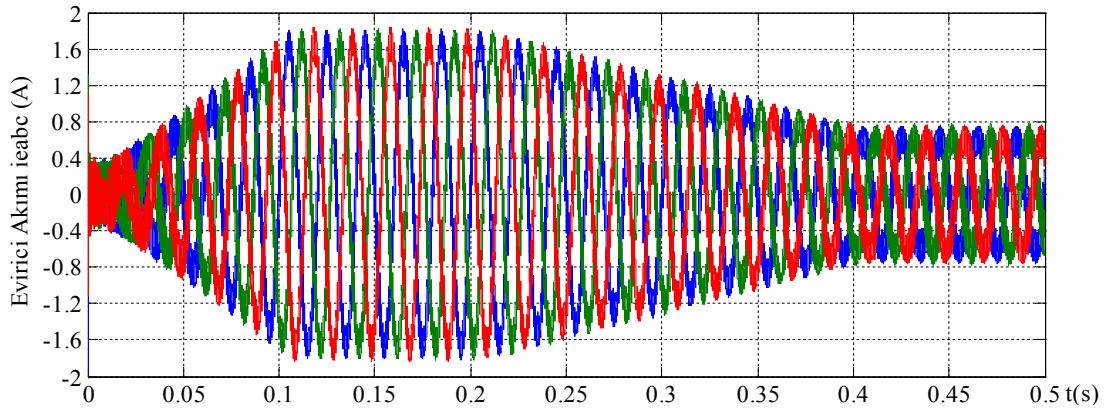


(a) 3 faz şebeke gerilimi

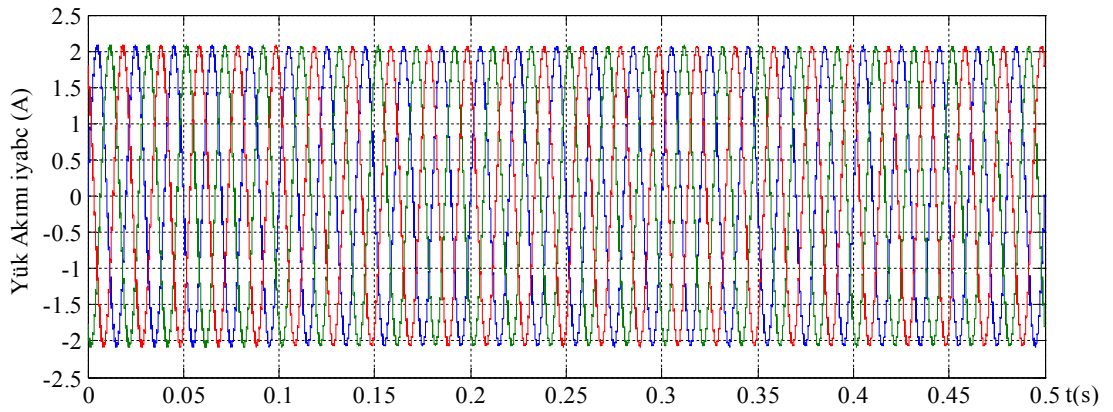
Şekil 4.8. 1. durumda dengeli yükte 3 faz değişimi simülasyon sonuçları



(b) Dengeli yükte 3 faz şebeke akımı

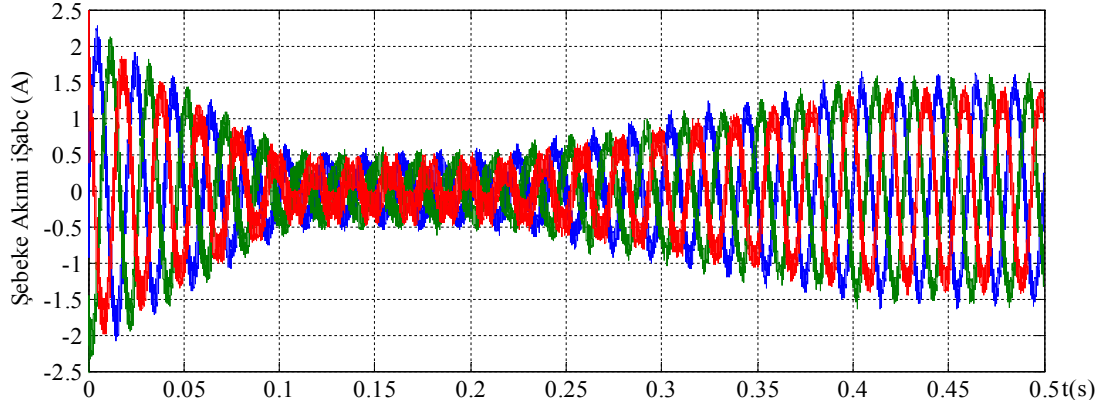


(c) Dengeli yükte 3 faz evirici akımı

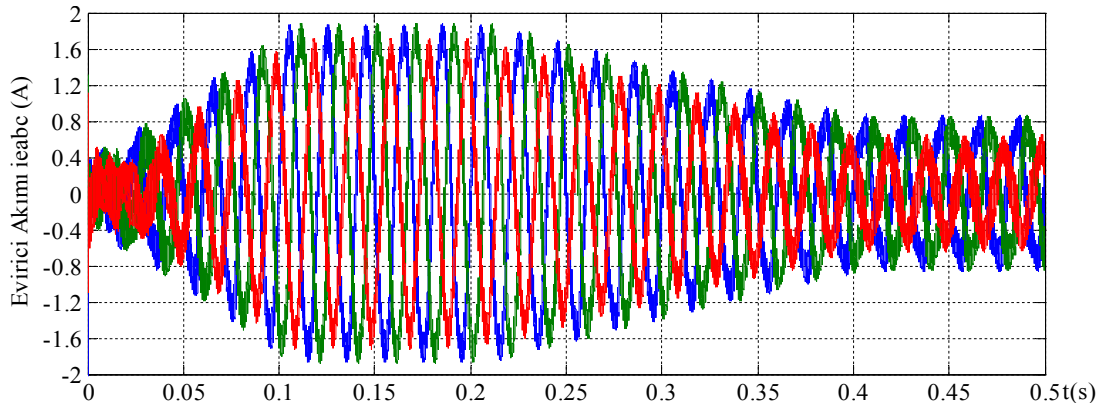


(d) Dengeli yük grubunun akımı

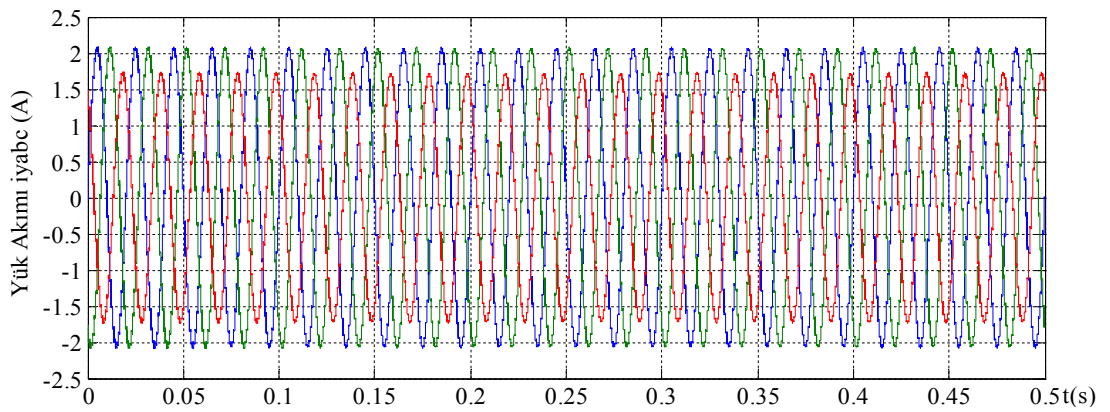
Şekil 4.8. 1. durumda dengeli yükte 3 faz değişimi simülasyon sonuçları (devamı)



(a) Dengesiz yükte 3 faz şebeke akımı

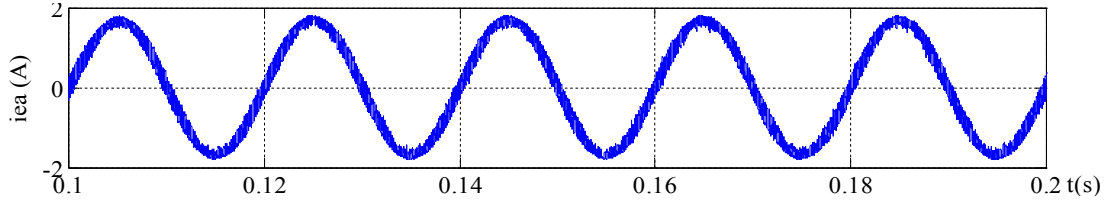


(b) Dengesiz yükte 3 faz evirici akımı

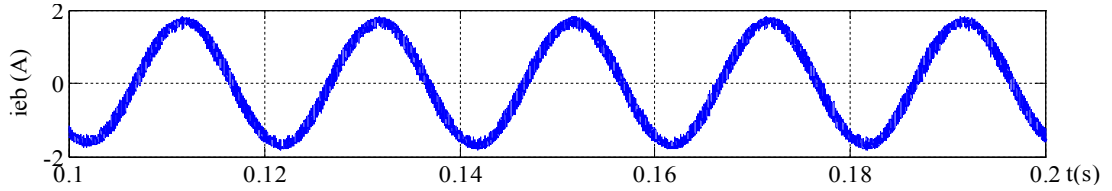


(c) Dengesiz yük grubunun akımı

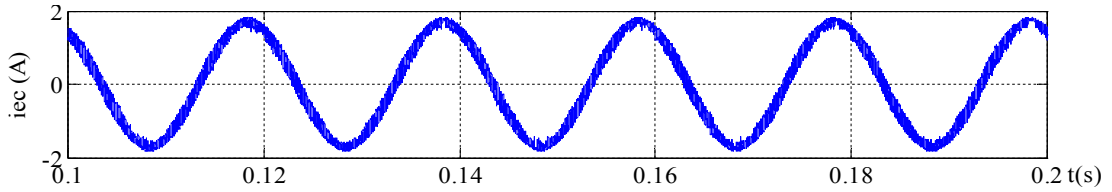
Şekil 4.9. 1. durumda dengesiz yükte 3 faz değişimi simülasyon sonuçları



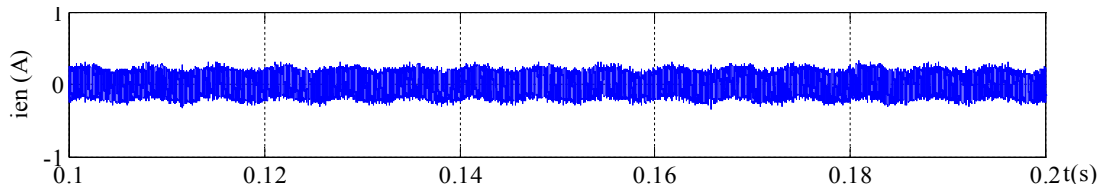
(a) A fazı evirici akımı



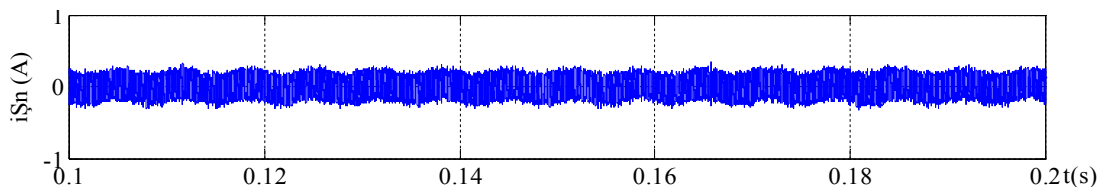
(b) B fazı evirici akımı



(c) C fazı evirici akımı

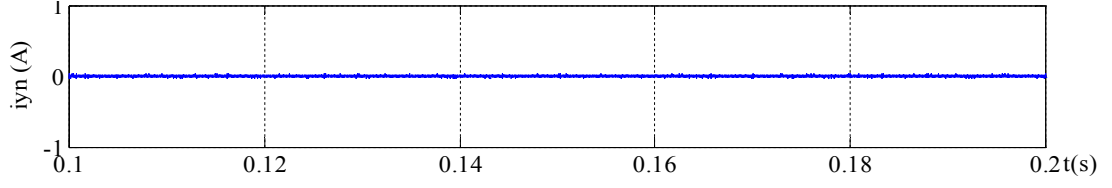


(d) Nötr hat evirici akımı



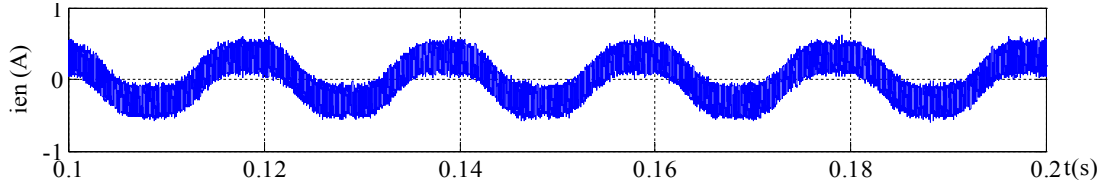
(e) Dengeli durumda nötr hat şebeke akımı

Şekil 4.10. 1. durumda 0,1-0,2 s'deki dengeli yük grubunda evirici faz ve nötr akımlarının ayrıntılı dalga şekilleri

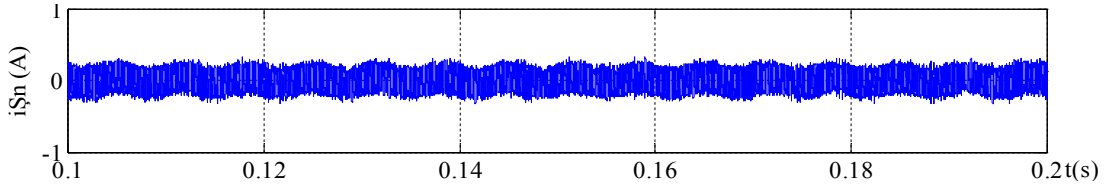


(f) Dengeli durumda nötr hat yük akımı

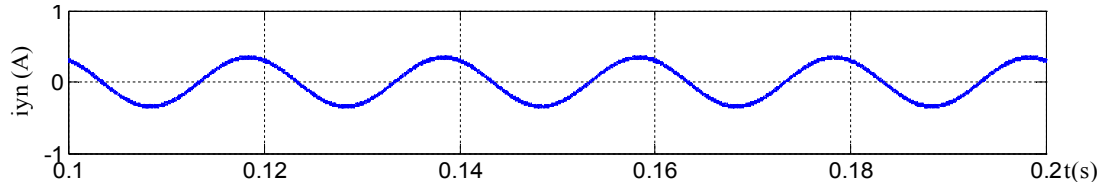
Şekil 4.10. 1. durumda 0,1-0,2 s'deki dengeli yük grubunda evirici faz ve nötr akımlarının ayrıntılı dalga şekilleri (devamı)



(a) Dengesiz durumda nötr hat evirici akımı



(b) Dengesiz durumda nötr hat şebeke akımı



(c) Dengesiz durumda nötr hat yük akımı

Şekil 4.11. 1. durumda 0,1-0,2 s'deki dengesiz yük grubunda evirici faz ve nötr akımlarının ayrıntılı dalga şekilleri

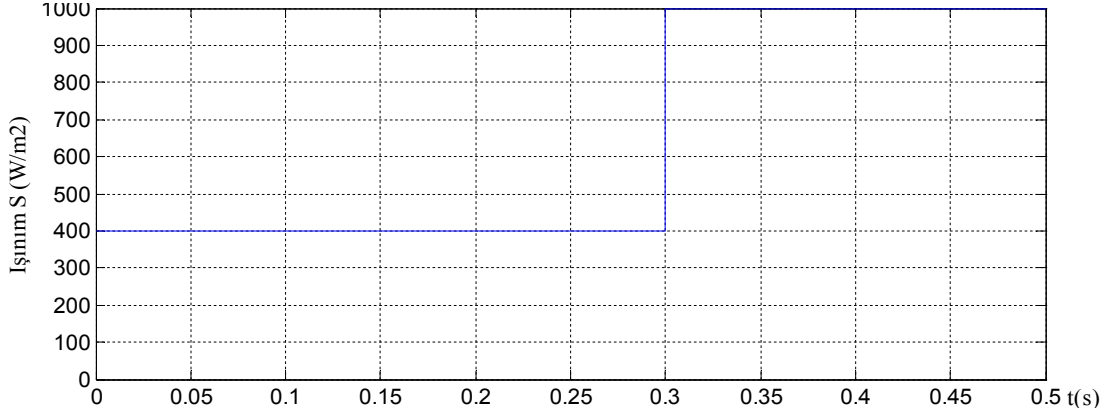
Tablo 4.2. 1.durumda şebeke bağlantılı FV sistemde ölçülen değerlerin özeti

Zamana göre değişim değerleri		0,1 s			0,2 s			0,3 s			0,4 s			0,5 s		
Işınım (W/m ²)		1000			1000			752,5			500			500		
FV dizi akımı (A)		1,69			1,80			1,31			0,74			0,74		
FV dizi gerilimi (V)		420,3			402			400,3			409,7			409,7		
FV dizi gücü (W)		714,5			723,6			528,3			303,2			303,2		
Dengeli 3 faz yük (rms)	Şebeke akımı (A)	0,28			0,18			0,53			0,91			0,91		
	Evirici akımı (A)	1,18			1,28			0,93			0,55			0,55		
	Yük akımı (A)	1,46			1,46			1,46			1,46			1,46		
Dengesiz 3 faz yük (rms)	Fazlar	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
	Şebeke akımı (A)	0,28		0,14	0,18		0,07	0,53		0,43	0,91		0,79	0,91		0,79
	Evirici akımı (A)	1,18		1,08	1,28		1,15	0,93		0,79	0,55		0,43	0,55		0,43
	Yük akımı (A)	1,46		1,22	1,46		1,22	1,46		1,22	1,46		1,22	1,46		1,22

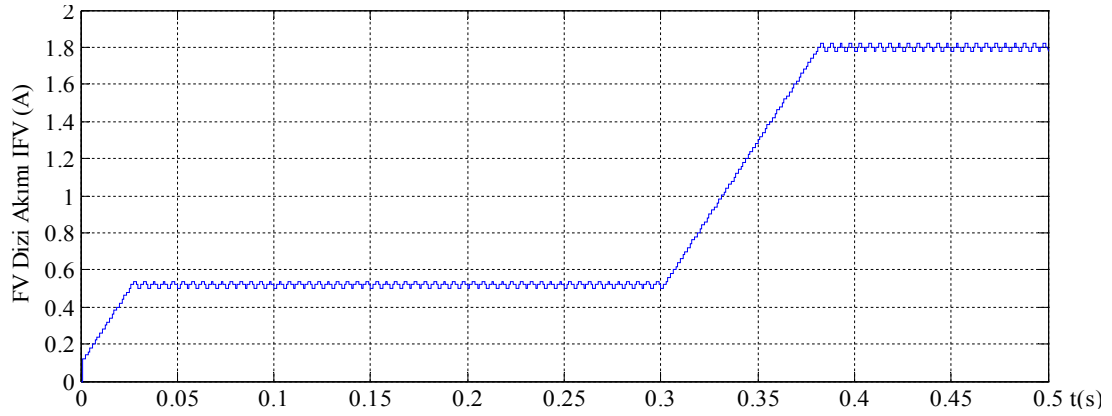
Birinci durumda ışınım 1000 W/m^2 ile başlatılarak 0,2 s'de lineer bir şekilde 0,4 s sonuna kadar 500 W/m^2 düşürülmekte, daha sonra sistem 0,4 s – 0,5 s aralığında 500 W/m^2 ışınım değerinde çalıştırılmaktadır. MGNİ algoritması sistem ilk çalıştığı anda eğer ışınım 1000 W/m^2 ise 0,1 s'de kısa bir süre içinde MGN'ı bulmaktadır. Bu süre, FV dizi akımı ilk anda sıfırdan başladığı için girilen ışınım değerine göre eğri üzerinde MGN'ndaki akım değerini ulaşana kadar geçen süresidir. Bu süre girilen ışınım değerine bağlı olarak değişmektedir. En yüksek 1000 W/m^2 ışınımında 0,1 s olur. Sisteme dengeli omik yük (75Ω , 3/faz) bağlı olduğu durumda yük sürekli toplam 1,46 A çekmektedir. Işınım değişimine bağlı olarak evirici, 0,1 s için 1,18 A şebekeye akım aktarmakta ve yükün çekmesi gereken toplam akımın bir kısmını sağlamaktadır. Kalan 0,28 A ise şebekeden çekilerek FV sistemin bağlı olduğu şebekeye katkısı gösterilmektedir.

Sisteme dengesiz omik yük (A,B fazı 75Ω C fazı 90Ω) bağlı olduğu durumda ise C fazındaki yük 1,22 A, A ve C fazındaki yükler ise 1,46 A akım çekmektedir. FV dizi aynı ışınım koşullarında çalıştırıldığından A,B fazları için aynı akım değerini şebekeye aktarmaktadır. C fazı yüke bağlı olarak değişmektedir. 0,1 s için evirici şebekeye 1,18 A akım aktarmakta ve C fazında bulunan yükün 1,22 A'lik akım değerinin kalan miktarı şebekeden 0,14 A olarak çekilmektedir. A ve B fazındaki toplam 1,46 A çeken yüklerin 1,18 A'ini eviriciden 0,28 A'ini ise şebekeden çekilmektedir. Bu değerler Tablo 4.2'de ayrıntılı bir şekilde verilmektedir. Evirici dengesiz yüke bağlı olarak şebekeye farklı akım aktarmakta yükte dengesizlik olduğu durumda oluşan dengesizlik, FV panel gücüne bağlı olarak evirici tarafından karşılanmaktadır. Dengeli yük durumunda nötr akımı sıfır olduğundan evirici ve şebeke nötr akımı da sıfırdır. Dengesiz yük durumunda ise nötr hattında oluşan fark akımı evirici tarafından verilmekte ve şebeke nötr akımı sıfıra yakın olmaktadır. Bu durum ve evirici faz akımları dalga şekilleri Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de ayrıntılı olarak verilmektedir.

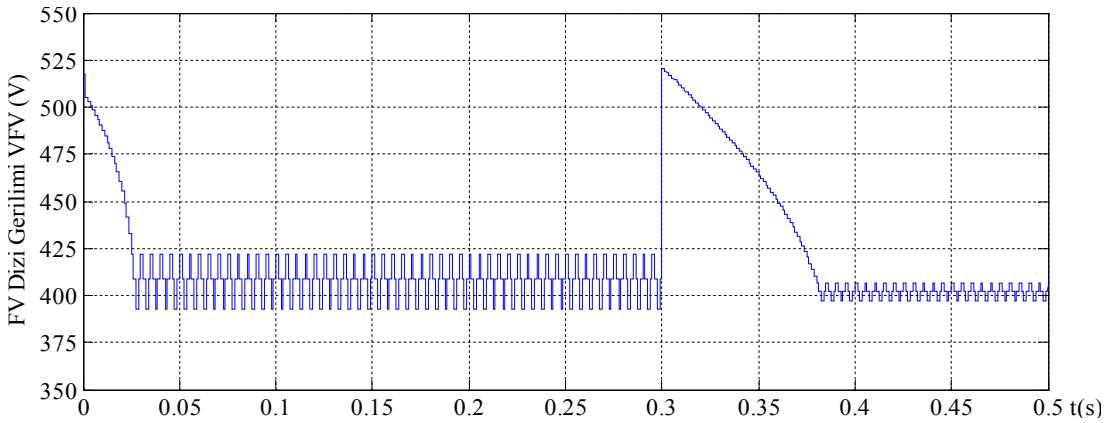
İkinci durum için kapsamlı simülasyon sonuçları Şekil 4.10-4.13'te verilmekte ve Tablo 4.3 ile ayrıntılı bir şekilde incelenmektedir.



(a) Güneş ışınlama değişim grafiği

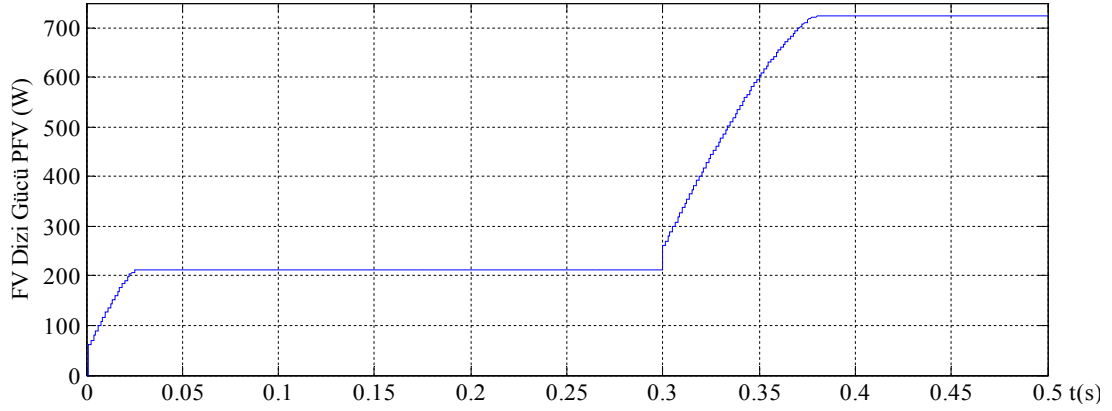


(b) FV dizi panellerin akım değişimi



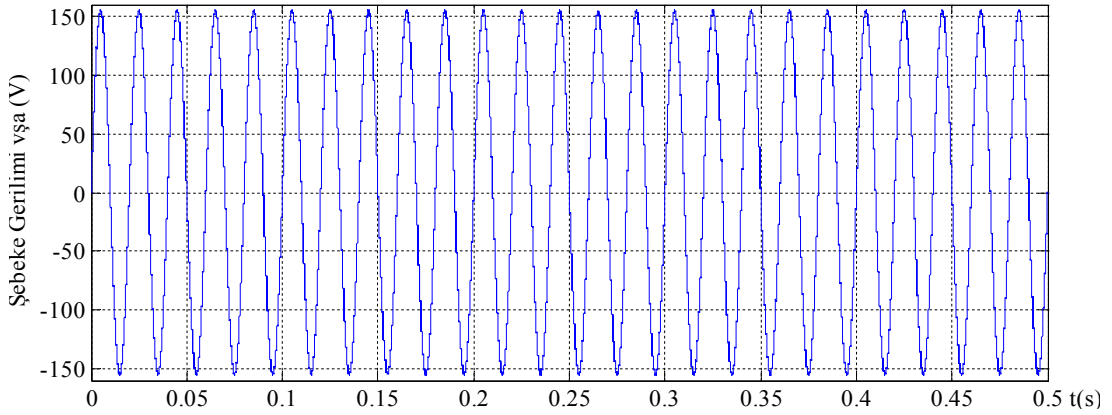
(c) FV dizi panellerin gerilim değişimi

Şekil 4.12. 2. durumda ışınlım, akım, gerilim ve güç değişimi simülasyon sonuçları

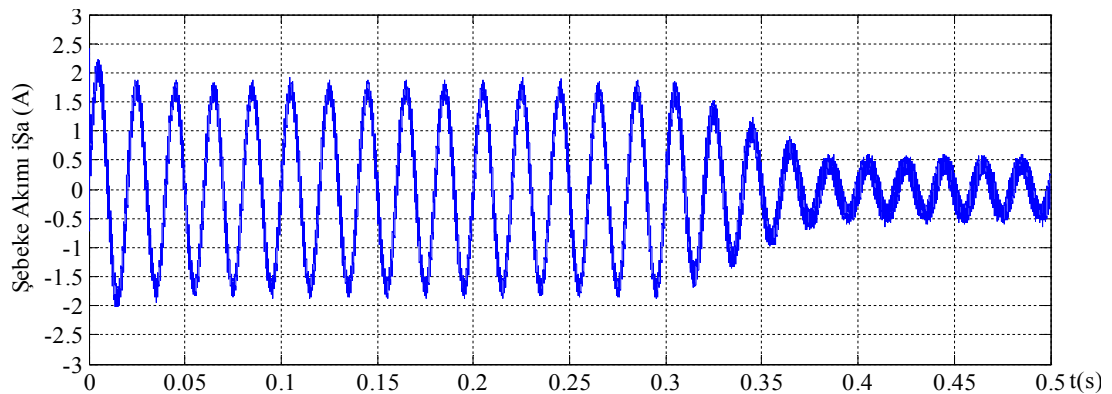


(d) FV dizi panellerin güç değişimi

Şekil 4.12. 2. durumda ışınım, akım, gerilim ve güç değişimi simülasyon sonuçları (devamı)

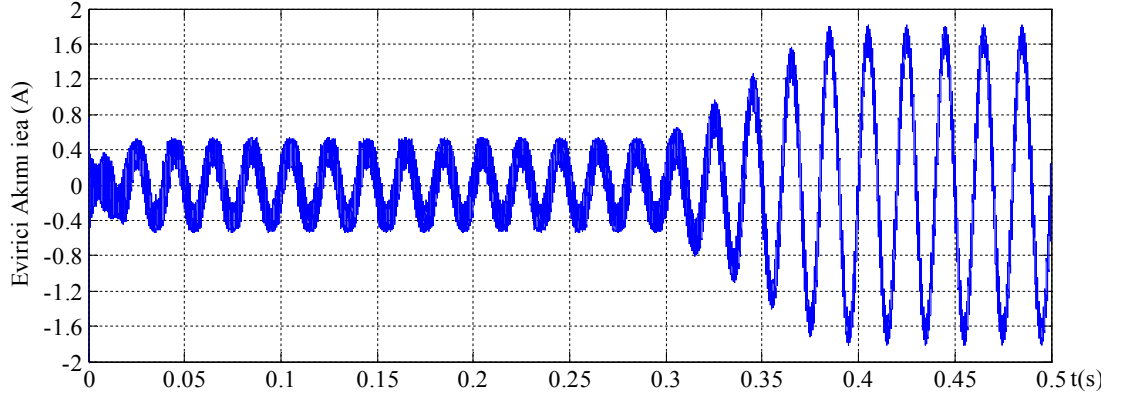


(a) A fazı şebeke gerilimi

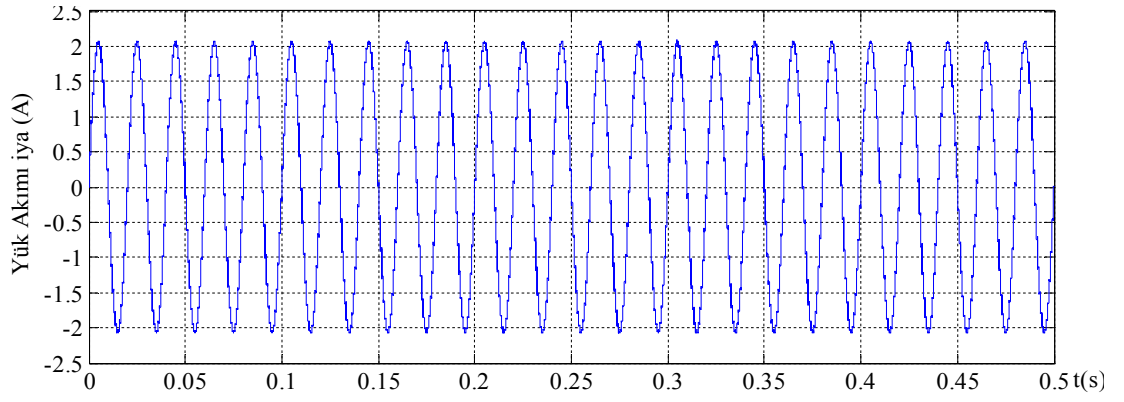


(b) Dengeli yükte A fazı şebeke akımı

Şekil 4.13. 2. durumda dengeli yükte A faz değişimi simülasyon sonuçları

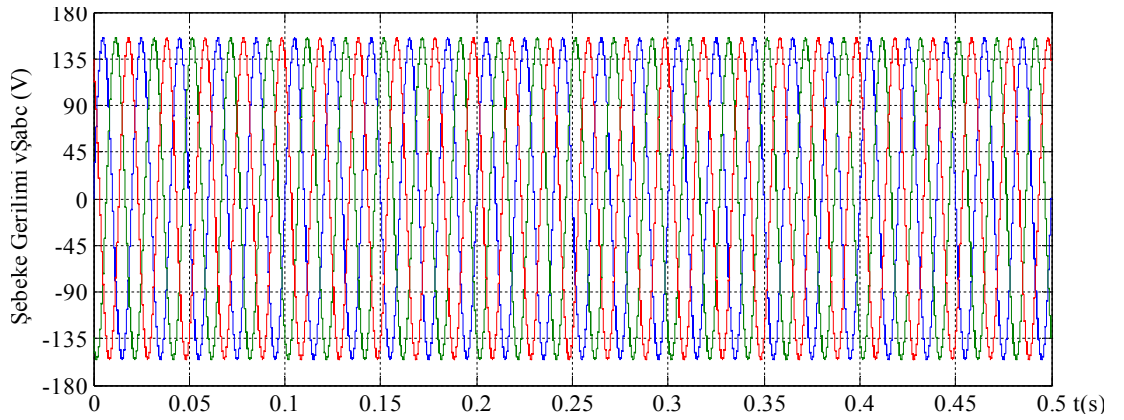


(c) Dengeli yükte A fazı evirici akımı



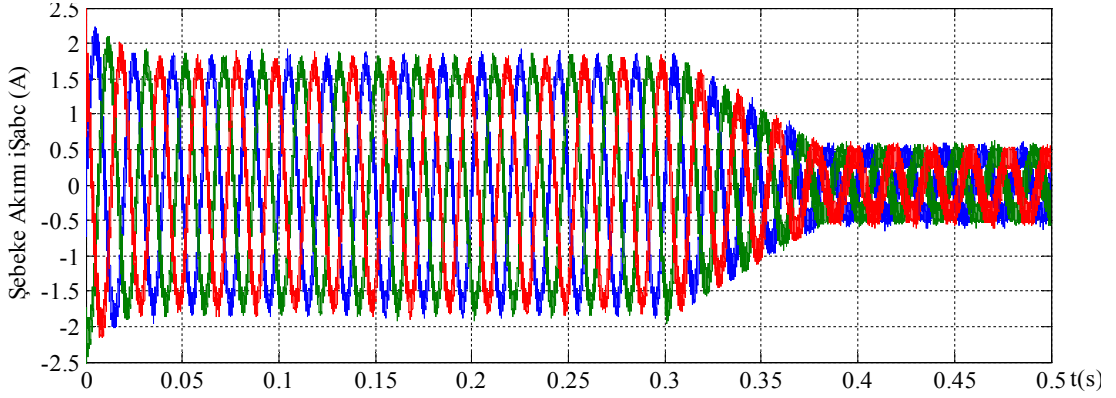
(d) Dengeli yükte A fazı yük akımı

Şekil 4.13. 2. durumda dengeli yükte A faz değişimi simülasyonu sonuçları (devamı)

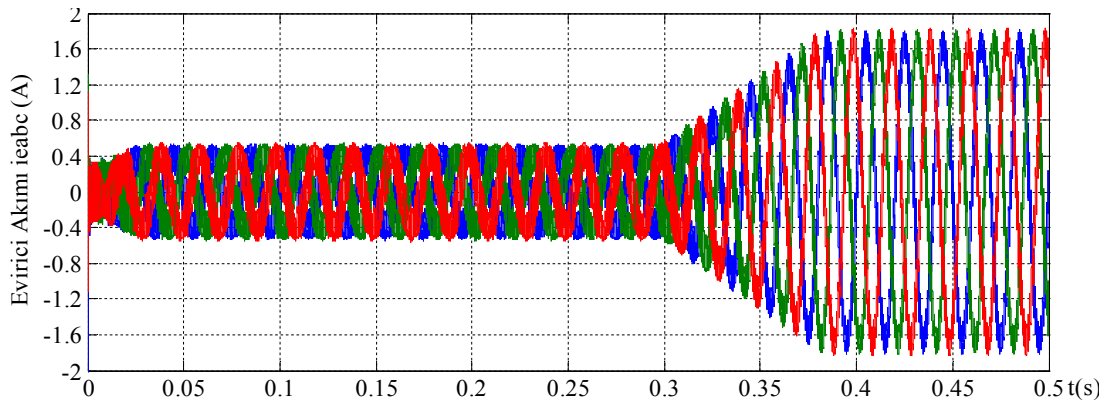


(a) 3 faz şebeke gerilimi

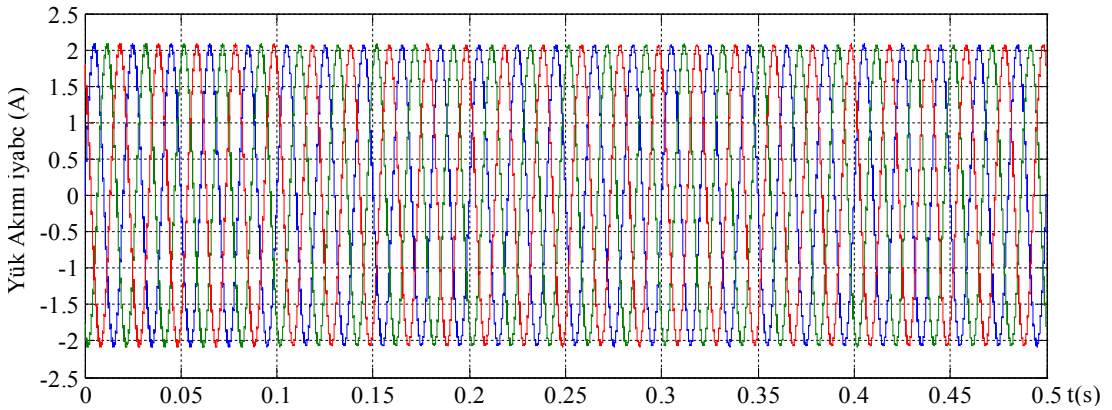
Şekil 4.14. 2. durumda dengeli yükte 3 faz değişimi simülasyonu sonuçları



(b) Dengeli yükte 3 faz şebeke akımı

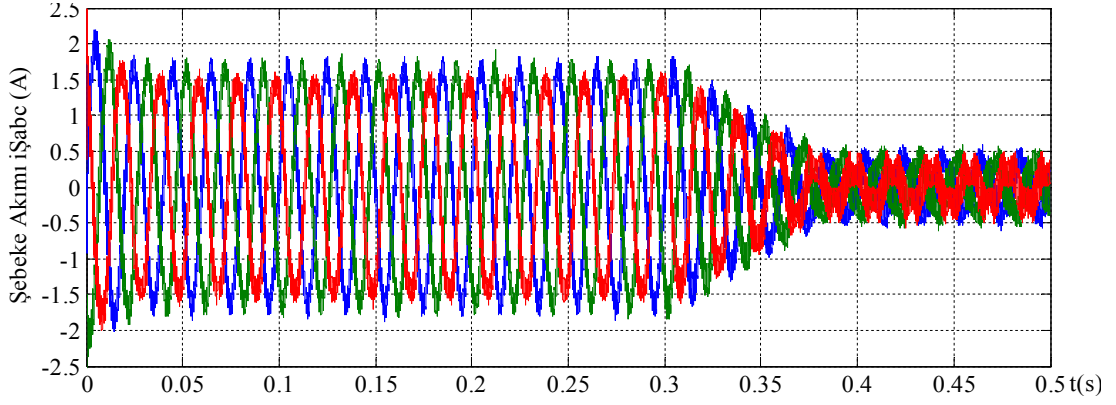


(c) Dengeli yükte 3 faz evirici akımı

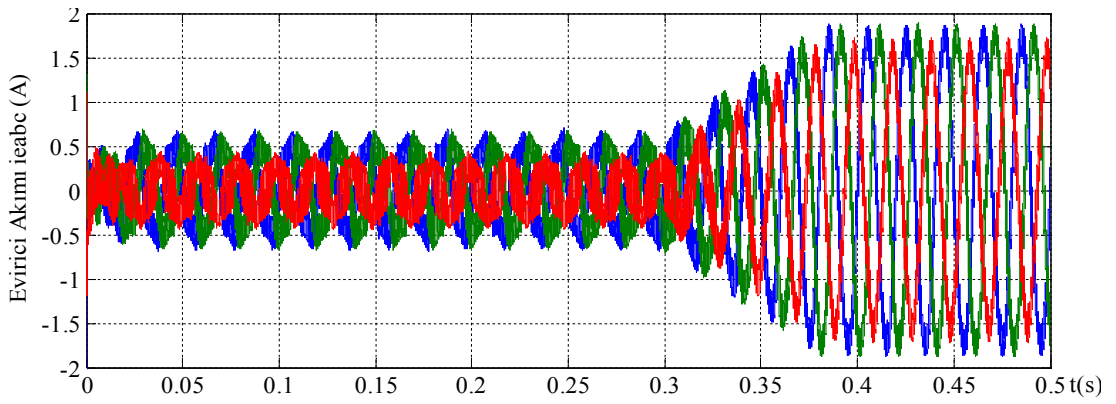


(d) Dengeli yük grubunun akımı

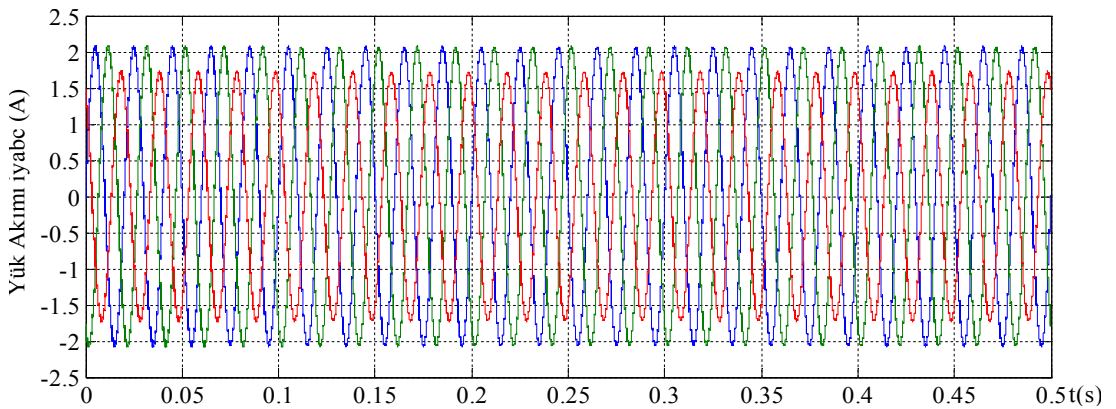
Şekil 4.14. 2. durumda dengeli yükte 3 faz değişimi simülasyon sonuçları (devamı)



(a) Dengesiz yükte 3 faz şebeke akımı

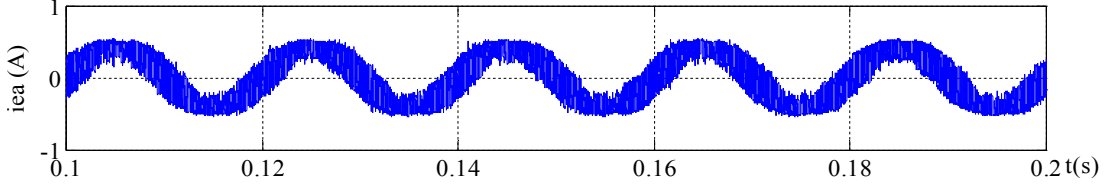


(b) Dengesiz yükte 3 faz evirici akımı

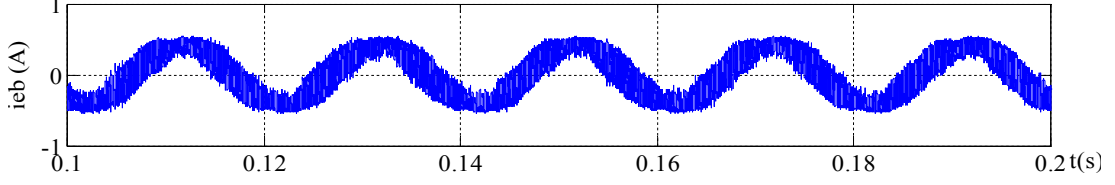


(c) Dengesiz yük grubunun akımı

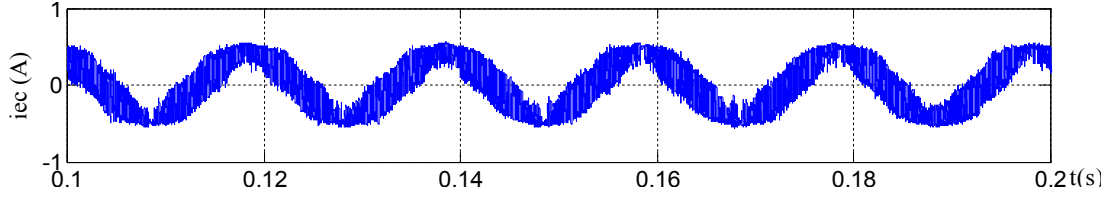
Şekil 4.15. 2. durumda dengesiz yükte 3 faz değişimi simülasyon sonuçları



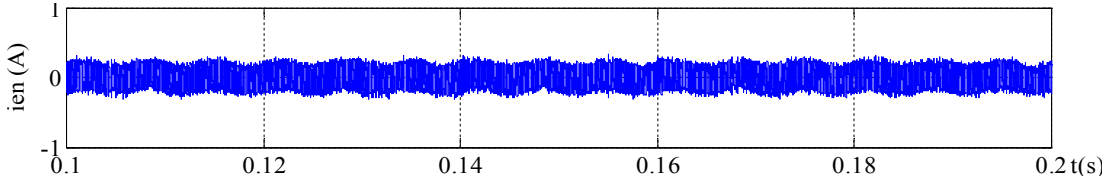
(a) A fazı evirici akımı



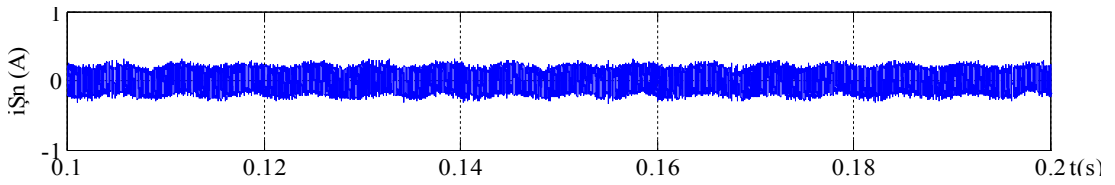
(b) B fazı evirici akımı



(c) C fazı evirici akımı

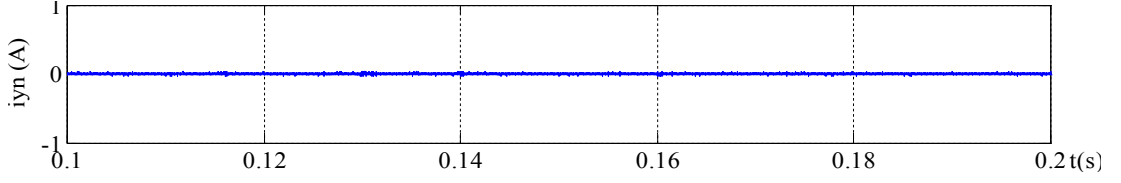


(d) Nötr hat evirici akımı



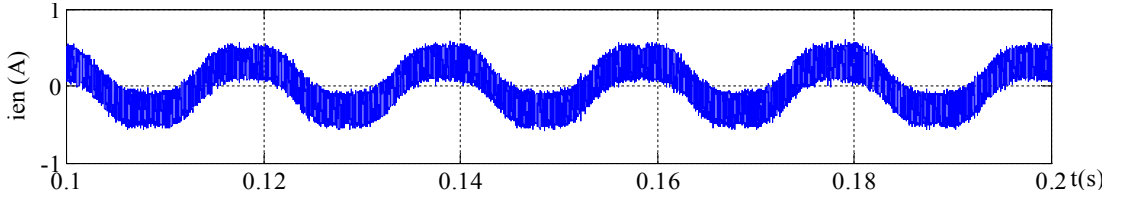
(e) Dengeli durumda nötr hat şebeke akımı

Şekil 4.16. 2. durumda 0,1-0,2 s'deki dengeli yük grubunda evirici faz ve nötr akımlarının ayrıntılı dalga şekilleri

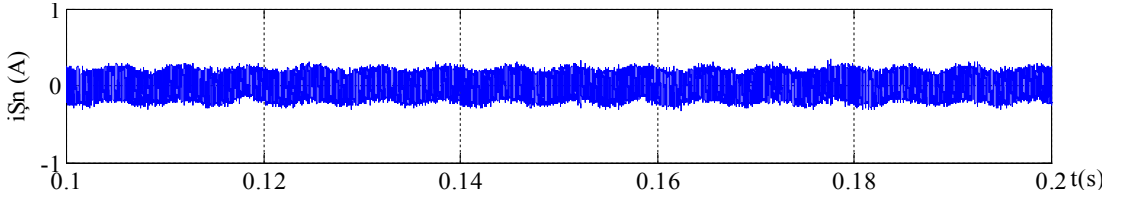


(f) Dengeli durumda nötr hat yük akımı

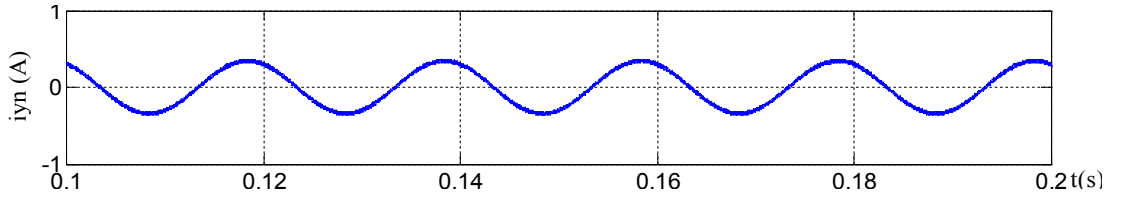
Şekil 4.16. 2. durumda 0,1-0,2 s'deki dengeli yük grubunda evirici faz ve nötr akımlarının ayrıntılı dalga şekilleri (devamı)



(a) Dengesiz durumda nötr hat evirici akımı



(b) Dengesiz durumda nötr hat şebeke akımı



(c) Dengesiz durumda nötr hat yük akımı

Şekil 4.17. 2. durumda 0,1-0,2 s'deki dengesiz yük grubunda evirici faz ve nötr akımlarının ayrıntılı dalga şekilleri

Tablo 4.3. 2.durumda şebeke bağlantılı FV sistemde ölçülen değerlerin özeti

Zamana göre değişim değerleri		0,1 s	0,2 s	0,3 s	0,4 s	0,5 s							
Işınım (W/m ²)		400	400	400	1000	1000							
FV dizi akımı (A)		0,52	0,52	0,52	1,80	1,80							
FV dizi gerilimi (V)		408,7	408,7	408,7	402	402							
FV dizi gücü (W)		212,5	212,5	212,5	723,6	723,6							
Dengeli 3 faz yük (rms)	Şebeke akımı (A)	1,08	1,08	1,08	0,18	0,18							
	Evirici akımı (A)	0,38	0,38	0,38	1,28	1,28							
	Yük akımı (A)	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46							
Dengesiz 3 faz yük (rms)	Fazlar	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
	Şebeke akımı (A)	1,08	0,96	1,08	0,96	1,08	0,96	0,18	0,06	0,18	0,06	0,18	0,06
	Evirici akımı (A)	0,38	0,26	0,38	0,26	0,38	0,26	1,28	1,16	1,28	1,16	1,28	1,16
	Yük akımı (A)	1,46	1,22	1,46	1,22	1,46	1,22	1,46	1,22	1,46	1,22	1,46	1,22

İkinci durumda hızlı değişen atmosferik koşulları simule edebilmek için ışınım değeri 400 W/m^2 'de başlatılarak sistem 0,3 s'ye kadar aynı ışınım değerinde tutulmakta ve aynı saniye içinde ışınım aniden 1000 W/m^2 'ye çıkarılarak 0,5 s'ye kadar 1000 W/m^2 'de çalıştırılmaktadır. Işınımdaki bu kadar hızlı değişimin amacı MNGİ algoritması olan saptır-gözle tekniğinin cevap süresini daha iyi incelemek adına yapılmaktadır. Simülasyonda, FV dizi terminal uçlarındaki gerilimi daha doğru incelemek adına ölçüm DA bara kondansatörlerinden önce yapılmaktadır. Ani ışınım değişiminden dolayı bu FV dizi terminal uçlarındaki gerilim çok hızlı bir şekilde artmakta/azalmakta ve MGN'daki gerilim değerinde sürekli salınım yapmaktadır. Seçilen kapasitörle uygulama ve simülasyonda bu salınım sönümlenmekte ve evirici için daha az salınım yaparak sağlıklı çalışması sağlanmaktadır.

Sisteme dengeli omik yük (75Ω , 3/faz) bağlı olduğu durumda yük sürekli toplam 1,46 A çekmektedir. Işınım değişimine bağlı olarak evirici, 0,1 s için 0,38 A şebekeye akım aktarmakta ve yükün çekmesi gereken toplam akımın bir kısmını sağlamaktadır. Kalan 1,08 A ise şebekeden çekilerek FV sistemin bağlı olduğu şebekeye katkısı gösterilmektedir.

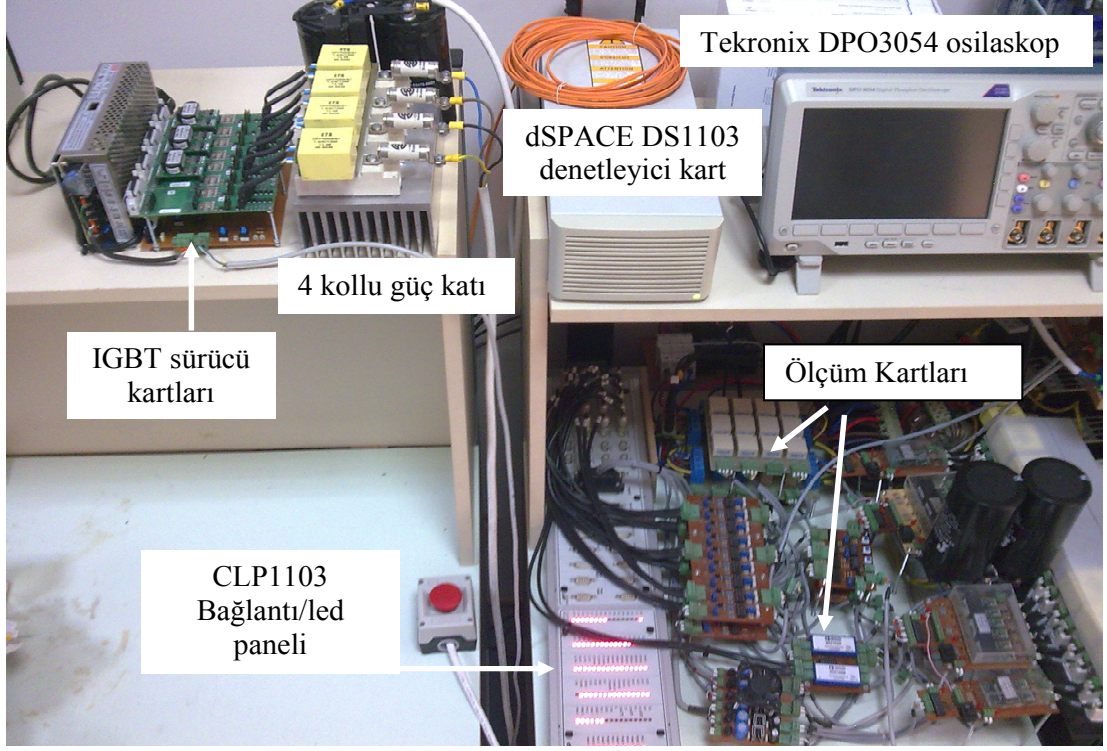
Sisteme dengesiz omik yük (C fazı 75Ω A,B fazı 90Ω) bağlı olduğu durumda ise C fazındaki yük 1,22 A, A ve B fazındaki yükler 1,46 A akım çekmektedir. FV dizi aynı ışınım koşullarında çalıştırıldığından eviriciden A,B fazları için aynı akım değerini şebekeye aktarmaktadır. C fazı yüke bağlı olarak değişmektedir. 0,1 s için evirici şebekeye A ve B fazından 0,38 A akım aktarmakta ve C fazında bulunan dengesiz yükün 1,22 A'lik akım değeri yine eviriciden 0,26 A olarak sağlanmaktadır. A ve B fazındaki toplam 1,46 A çeken yüklerin 0,38 A'i eviriciden 1,08 A'i ise şebekeden çekilmektedir. Bu değerler Tablo 4.3'te ayrıntılı bir şekilde verilmektedir. Evirici dengesiz yüke bağlı olarak şebekeye farklı akım aktarmakta yükte dengesizlik olduğu durumda oluşun dengesizlik FV panel gücüne bağlı olarak evirici tarafından karşılanmaktadır. Evirici faz akımları, yük, şebeke ve evirici nötr akımı dalga şekilleri Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de ayrıntılı olarak verilmektedir.

Her iki ışınım ve yük grubu çalışmasında da FV evirici yapısı dizi panellerden maksimum güç elde edecek şekilde çalışarak şebekeye akım aktarmakta ve yük akımının bir kısmı ışınımına bağlı olarak FV sistemden sağlanmaktadır.

Tablo 5.1’de 3 fazlı 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı MGNI’li FV sisteminde kullanılan deneysel düzeneğin parametreleri verilmektedir. Sistemi şebekeden izole etmek, ve düşük gerilimde deney yapmak için özel olarak tasarlanıp imal ettirilen kademeli 3 fazlı bir trafo kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalarda şebeke gerilimi olarak kademeli besleme trafosu üzerinden alınan $110 V_{rms}$ faz nötr gerilim değeri kullanılmıştır.

Tablo 5.1. Deneyde kullanılan sistem parametreleri

Parametreler		Değeri
FV Panel Dizisi	Açık devre gerilimi (V_{oc})	550,8V
	Kısa devre akımı (I_{ph})	2,38A
	Maksimum güç noktasındaki gerilim değeri (V_m)	402V
	Maksimum güç noktasındaki akım değeri (I_m)	1,8A
Şebeke ve Sistem Arasındaki Trafo	Gerilimi ($V_{şabc}$)	110V _{rms} /Faz-Nötr
	Frekansı (f)	50Hz
	Empedansı ($R_ş, L_ş$)	10m Ω , 1mH
Yük	Dengeli omik yük	45 Ω , 3/faz
	Dengesiz omik yük	45 Ω , 2 faz 90 Ω , C fazı
Evirici Filtresi	Empedansı (R_f, L_f)	0,5 Ω , 7,5 mH



Şekil 5.2. 3 fazlı 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı FV sistemin test platformunun fotoğrafı

Deneysel çalışma kapsamında, 2008-2010 yılları arasında başarı ile yürütmüş 108E083 nolu TÜBİTAK 1001 araştırma projesi ile elde edilen ekipmanla Kocaeli Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünde kurulan Güç Elektroniği ve Güç Kalitesi Araştırma Laboratuvarının (GEGKAL) alt yapısı ve burada cihazlar kullanılmıştır. Bu alt yapıda sistemin bazı ölçüm ve ara birim kartlarından yararlanılmaktadır. Bunlar, akım-gerilim ölçüm kartı, sinyal koşullandırma ara birim kartı, DA bara gerilim ölçüm kartıdır.

3 fazlı 4 kollu 4 telli FV sistemi test platformunun kurulması için 4 kollu 4 telli gerilim kaynaklı evirici tabanlı güç devresi, 8 kanal izole kapılı transistör (Insulated Gate Bipolar Transistör, IGBT) sürücü kartları, FV panel akım ölçüm kartı, aşırı akım ve gerilim koruma kartı tasarlanarak imalatı gerçekleştirilmiştir.

5.1. FV Panel Dizisi ve Yü k Grubu

Deneysel çalışmada FV kaynak olarak Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi bahçesinde 720 W kurulu güce sahip FV panel dizisi kullanılmaktadır. Her biri 60 W gücüne sahip 12 adet (6'sı seri olmak üzere 2 sıra paralel kol) Kaneka G-EA060 ince film silikon FV güneş panelleri bulunmaktadır. Kaneka G-EA060 güneş panelinin elektriksel özellikleri Tablo 5.2'de verilmektedir.

Tablo 5.2. Kaneka G-EA060 güneş panelinin elektriksel özellikleri [40]

Kaneka G-EA060 güneş panel elektriksel özellikleri	
Maksimum güç (P_m)	60W
Maksimum güç noktasındaki gerilim değeri (V_m)	67V
Maksimum güç noktasındaki akım değeri (I_m)	0,90A
Açık devre gerilimi (V_{oc})	92V
Kısa devre akımı (I_{ph})	1,19A
Akımın sıcaklık katsayısı (alpha)	0,0752%/K
Gerilimin sıcaklık katsayısı (beta)	0,0748%/K
Gücün sıcaklık katsayısı	-0,140%/K

Şekil 5.3'te Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi bahçesinde kurulu olan 720 W FV panel fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 5.3. 720 W kurulu güce sahip FV panel dizisi fotoğrafı

FV dizisi yapılan bağlantılar ile 550,8 V açık devre gerilimi (V_{oc}), 2,38 A kısa devre akımı (I_{ph}) ve toplam 720 W gücüne sahip bir sistem kurulmuştur.

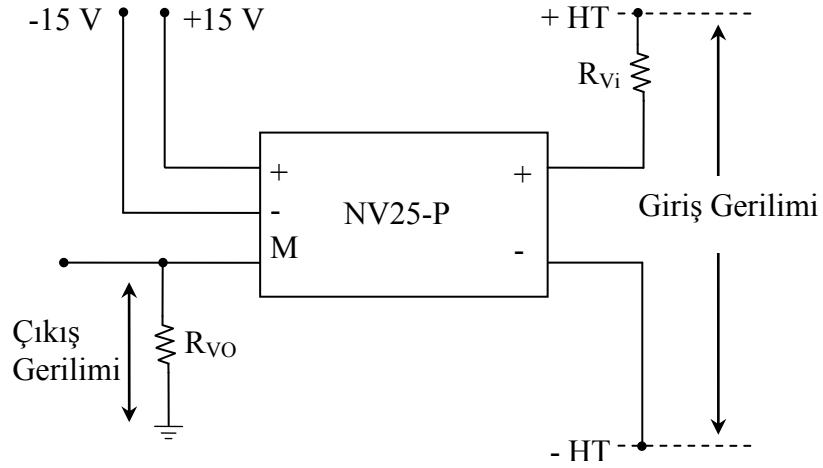
Sistemde yük grubu olarak her biri 90Ω olan Şekil 5.4'te verilen 6 adet omik yük bağlanarak test sonuçları alınmaktadır. Her faza 2 adet omik yük paralel bağlanarak 45Ω 'luk 3 yük gurubu oluşturulmuştur. Dengesiz duruma getirmek için C fazında bulunan bir adet yük bağlantısı kesilerek 90Ω elde edilmektedir.



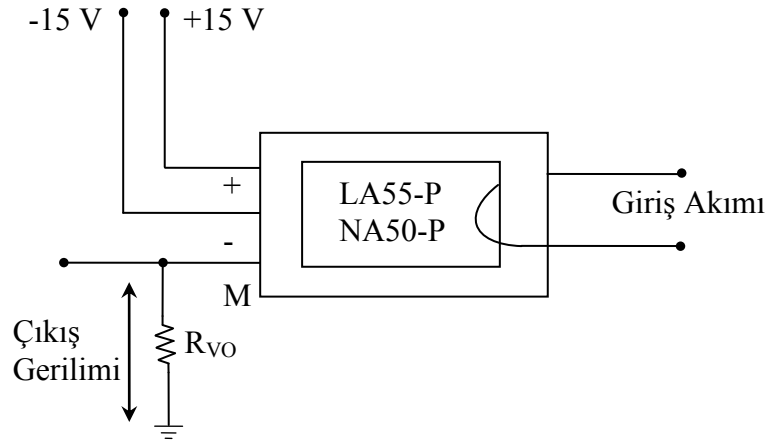
Şekil 5.4. Omik yük grubu

5.2. Akım-Gerilim Ölçüm Kartı

Şebeke bağlantılı FV sisteminde 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 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmektedir [39].



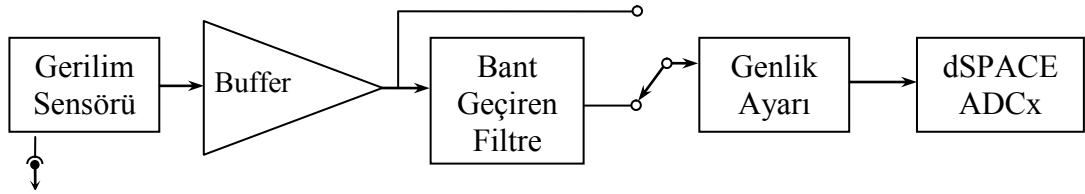
Şekil 5.5. Hall etkili gerilim sensörü devre bağlantı şeması



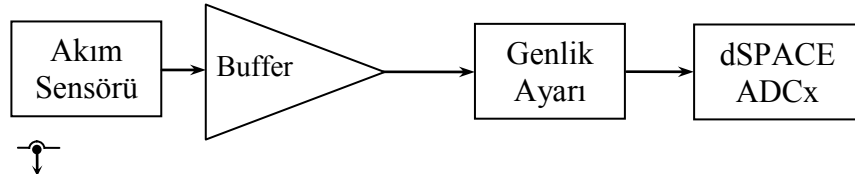
Şekil 5.6. Hall etkili akım sensörü devre bağlantı şeması

5.3. 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 5.7 ve Şekil 5.8’de sırasıyla gerilim ve akım sinyal koşullandırma devresi blok diyagramları gösterilmektedir [39].



Şekil 5.7. Gerilim sinyal koşullandırma devresi blok diyagramı



Şekil 5.8. Akım sinyal koşullandırma devresi blok diyagramı

5.4. DA Bara Gerilim Ölçüm Kartı

3 faz 4 kollu 4 telli FV sistemi güç devresinde, DA barada bulunan kondansatörün gerilimlerinin ölçülmesi amacıyla izolasyon yükseltici (AD210, 2500 V_{rms} yüksek gerilim izolasyonu, giriş, çıkış ve güç izolasyonu, 20 kHz geniş bant genişliği ve 15 V izoleli güç) kullanılmaktadır. DA kondansatör gerilimi, gerilim bölücü dirençler ile 10 V gerilim değerinin altına düşürülerek AD210 girişine uygulanmakta ve çıkışta bu gerilim izoleli olarak alınmaktadır [39].

5.5. Aşırı Akımı ve Gerilim Koruma kartı

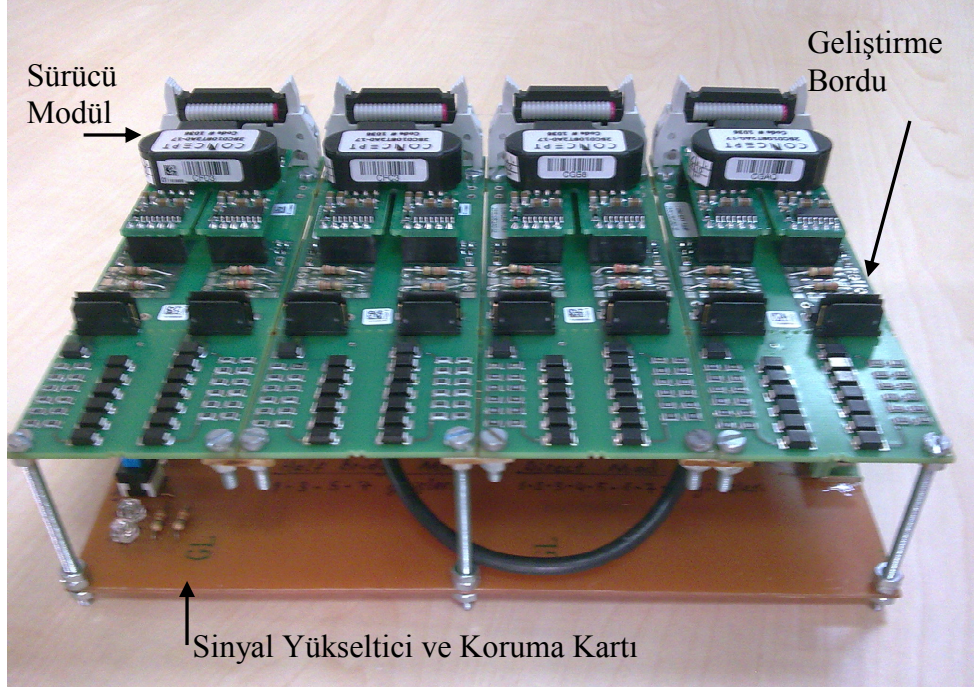
FV sisteminde oluşabilecek aşırı akım ve/veya gerilim gibi olumsuz durumlar, hızlı işlemsel yükselteçler kullanılarak gerçekleştirilen aşırı akım ve gerilim koruma kartı ile tespit edilerek, IGBT sürücü bordlarının reset girişine gönderilen sinyal ile IGBT'ler devreden çıkarılmaktadır. Böylece deneysel sistemin güvenli bir şekilde çalıştırılması sağlanmaktadır [39].

5.6. IGBT Sürücü Modülleri ve Geliştirme Bordları

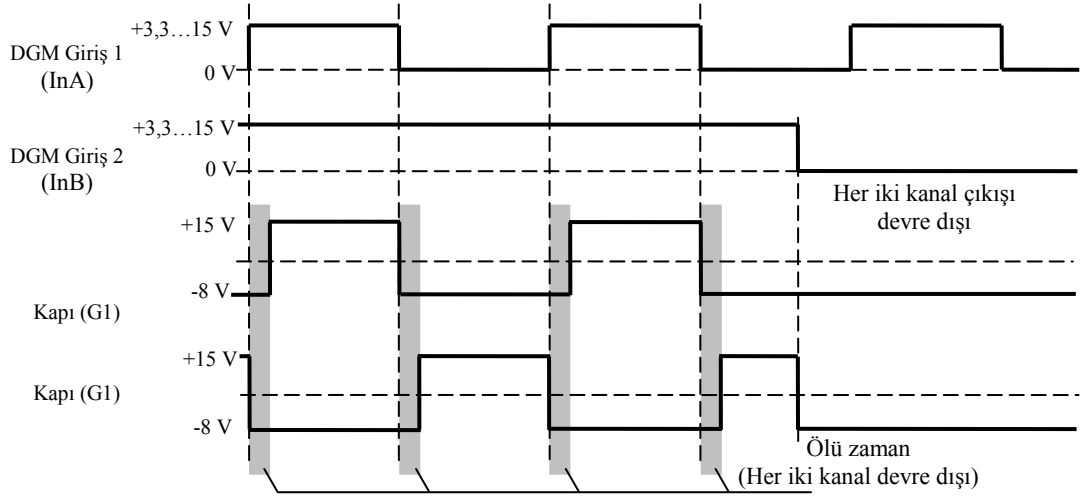
Kontrol sistemi tarafından üretilen anahtarlama sinyalleri ile IGBT'lerin sürülmesi için dört adet 2 kanal sürücü modül (CONCEPT 2SC0108T, tüm anahtarlama sinyallerinin elektriksel izolasyonu, reset girişi) kullanılmaktadır. Bu çalışmada IGBT sürücü yarım köprü modunda çalıştırılarak aynı kolda bulunan IGBT'lerin anahtarlama sinyalleri arasındaki gerekli ölü zaman aralıkları otomatik olarak üretilmektedir. Böylece denetim devresinden 4 kollu gerilim kaynaklı eviricinin sadece üstteki IGBT'leri için DGM çıkışları üretmek yeterli olmaktadır. Alttaki IGBT'lere uygulanan DGM sinyalleri IGBT sürücü kartı tarafından ölü zaman eklenerek oluşturulmaktadır.

CONCEPT 2SC0108T sürücü modülleri, geliştirme bordları (CONCEPT 2BB0108T, 1200V çok seviyeli 2 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 borddur. Şekil 5.9'da sürücü modül ve geliştirme bordu fotoğrafı birlikte verilmektedir.

Ayrıca geliştirme bordu ile sürücü kartı, IGBT'lerin ilettime geçiş sırasında kolektör-emitör gerilim düşümünü ölçerek IGBT'lerin kısa devre ve aşırı akıma karşı korunması sağlanmaktadır. Şekil 5.10'da IGBT sürücü ile üretilen ölü zamanlı kapı sinyalleri gösterilmektedir [41, 42].



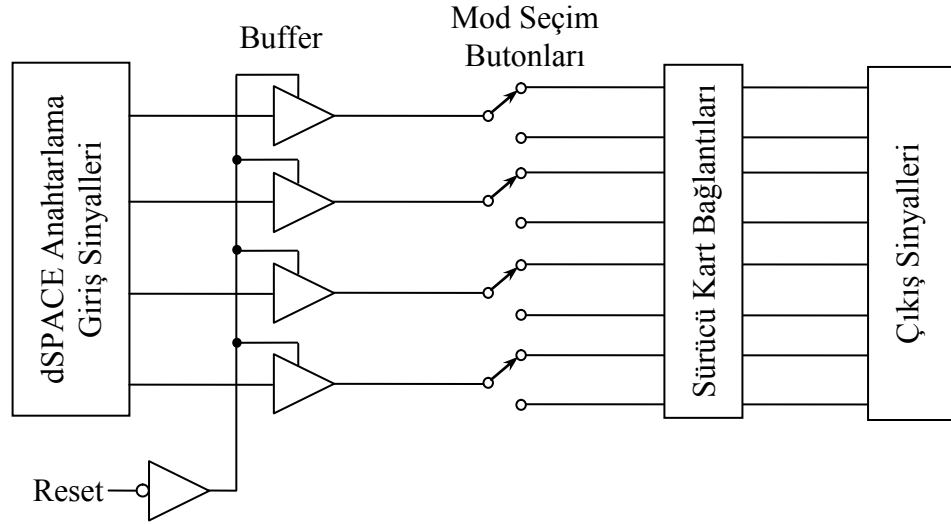
Şekil 5.9. Sürücü modül ve geliştirme bordu fotoğrafı



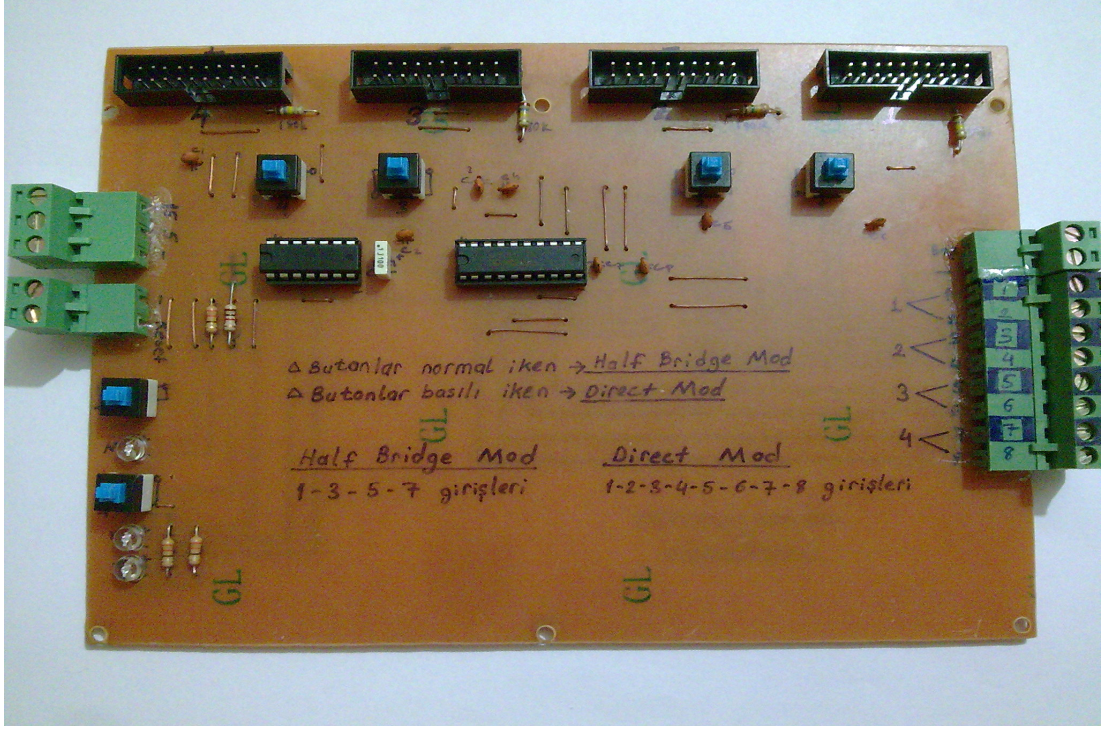
Şekil 5.10. IGBT sürücü ile üretilen ölü zamanlı kapı sinyalleri [41]

5.7. 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 5.11'de sinyal yükseltici ve koruma kartı blok diyagramı, Şekil 5.12'de de fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 5.11. Sinyal yükseltici ve koruma devresi blok diyagramı



Şekil 5.12. Sinyal yükseltici ve koruma kartı fotoğrafı

5.8. Güç Devresi

3 faz 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı FV sisteminin güç katında güç katında 8 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 μF ($2 \times 2350 \mu\text{F}$, 450 V seri bağlı), DA kondansatörleri, evirici çıkışına AA hat üzerine endüktansı 7,5 mH, 25 A toroid nüve üzerine sarılı filtre bobinleri ve RC pasif filtreleri kullanılmaktadır.

Şekil 5.13'de 3 faz 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı FV sisteminin soğutucuya montajı yapılan güç devresi fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 5.13. 3 faz 4 kollu 4 telli FV sisteminin gerçekleştirilen güç devresi fotoğrafı

5.9. Güneş Enerjisi Ölçeri ve Piranometre

Dijital güneş enerjisi ölçeri (TES-1333), bölge içerisindeki mevcut güneş ışınımını hassas ve doğru bir şekilde ölçmek için kullanılan silikon fotovoltaiik dedektörlü bir cihazdır. Güneş enerjisinin açısız değerine yönelik tamamen kosinüs düzeltmesine sahiptir. Güneş ışınımı ölçü birimi olarak W/m^2 cinsinden ölçmektedir ve saniyede dört örnek alma frekansına sahiptir.

Piranometre, güneş radyasyonunun kısa dalga boyunda ölçüm yapan sensördür. Işınım ölçümü için ApoGee Instruments firmasının SP-110 modeli piranometre algılayıcısı kullanılmıştır. Bu algılayıcı, yaklaşık 300-1200 nm dalga boyu aralığında ölçüm yapabilmekte ve $0.2 \text{ mV} / W/m^2$ hassasiyetle çıkış vermektedir. 1100 W/m^2 ışınım altında 220 mV çıkış gerilimi elde edilmektedir. 1600 W/m^2 'ye kadar (350 mV çıkış gerilimi) doğrusal dönüşüm gerçekleştirmektedir.

Kendinden beslemeli olup, -44°C - $+55^{\circ}\text{C}$ arası sıcaklık ve %0 - %100 nem değerlerinde dış ortamda ve su altında çalışabilmektedir. Sensörün standart kalibrasyonu her 1 mV başına $5,00\text{ W/m}^2$ 'dir. Sensör çıkış gerilimi 220 mV ile standart kalibrasyonu $5,00\text{ W/m}^2 / \text{mV}$ çarpıldığında 1100 W/m^2 ışınım değeri elde edilmektedir. Sensörden alınan gerilim değeri dSPACE ADC girişine bağlanarak deneysel çalışma sırasında FV panel dizisinin MGN'nda çalıştığını göstermek için kullanılmaktadır. Dijital güneş enerjisi ölçerin (TES-1333) kullanılmasındaki amaç ise sensörden aldığımız gerilim değerinin standart kalibrasyon değeri ile işlendikten sonra deneysel çalışmada kullanılan ışınım değerinin doğruluğunu göstermektir. Şekil 5.14'de dijital güneş enerjisi ölçeri (TES-1333) ve pironometre (SP-110) fotoğrafları verilmektedir [43].



Şekil 5.14. Dijital güneş enerjisi ölçeri (TES-1333) ve Apogee pironometre (SP-110) fotoğrafları

5.10. 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. 3 faz 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı FV sisteminin tasarım ve uygulama aşamaları MATLAB/Simulink ortamında ve dSPACE DS1103 gerçek zamanlı işlemci donanımında yürütülmektedir.

DSPACE sistemi donanım bileşenleri aşağıda açıklanmaktadır.

DS1103 denetleyici kartı: Bu kart üzerinde PowerPC 750GX/1 GHz ana işlemci ve Texas Instruments TMS320F240/20 MHz 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 [44]. 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.

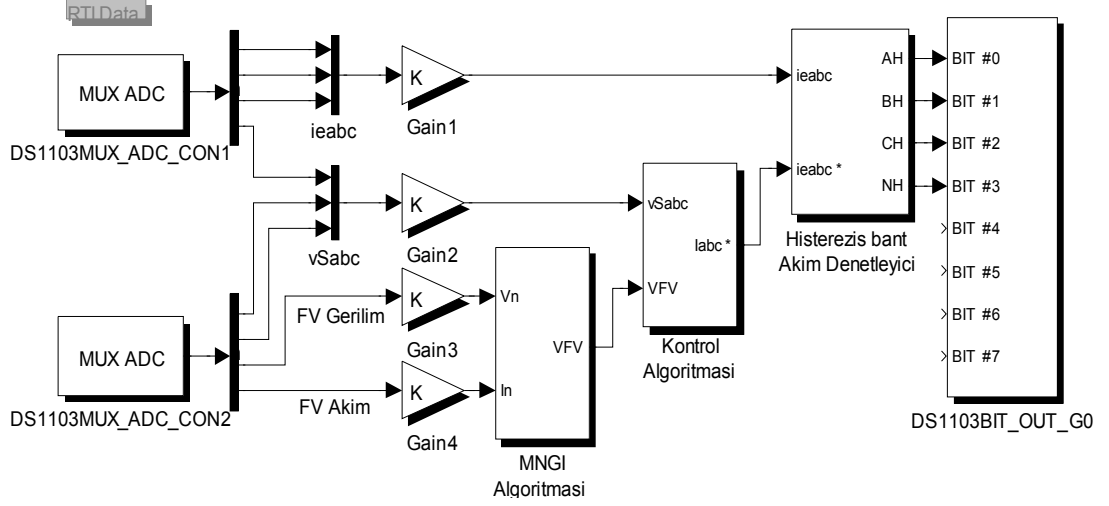
MATLAB: Denetlenecek sistemin teorik modelinden yararlanılarak çevrimdışı olarak bilgi işlemenin gerçekleştirildiği, analiz, tasarım ve sistem optimizasyon işlemlerinin yerine getirildiği ve ilk denetim tasarımının oluşturulduğu yazılımdır. Simulink: Çevrimdışı benzetim algoritmalarının blok diyagramlar 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 [39].

3 faz 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı FV sistemi denetim algoritmasının gerçek zamanlı uygulaması için simülasyon modelindeki giriş ve çıkış blokları, Simulink blok kütüphanesinde gerçek-zamanlı modele dönüştürmede kullanılan dSPACE blokları (analog, sayısal giriş/çıkış) ile değiştirilerek deneysel modeller oluşturulmaktadır. Matlab/Simulink ortamında DS1103 ana işlemci RTI blokları kullanılarak oluşturulan 3 faz 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı FV sisteminin geliştirilmiş gerçek zamanlı denetim blok diyagramı Şekil 5.15'te verilmektedir. CLP1103 bağlantı paneli aracılığıyla DS1103 denetleyici kartının analog girişlerinden DS1103MUXADC_CON blokları kullanılarak Matlab/Simulink ortamına alınan şebeke ve FV akım ve gerilim bilgileri kazanç (gain) ile çarpılarak normalize edilmekte ve MGNİ, akım denetim algoritmalarında kullanılmaktadır.

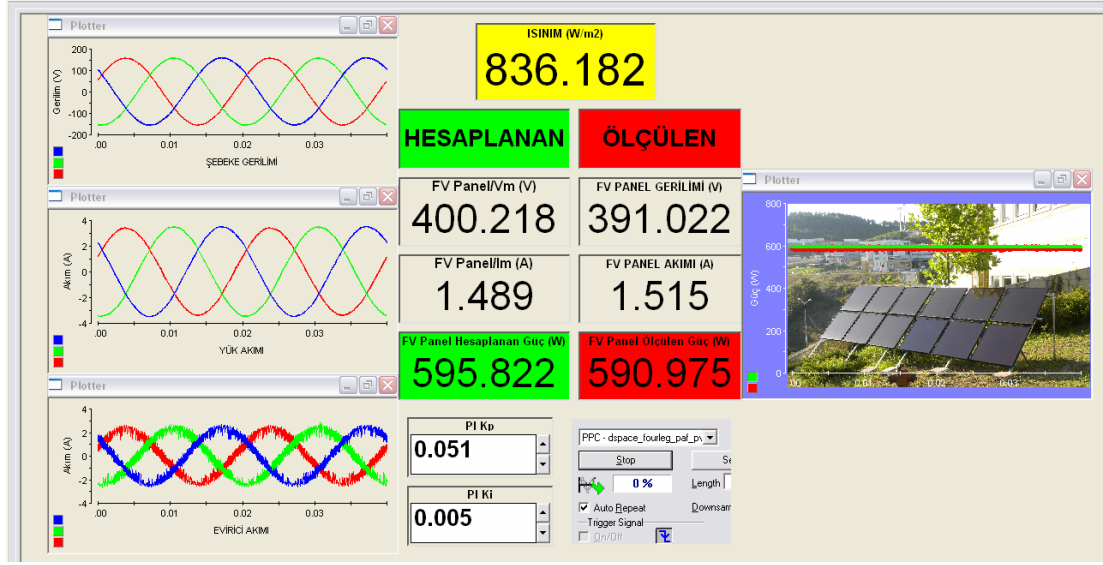


Şekil 5.15. 3 faz 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı FV sisteminin gerçek zamanlı denetim blok diyagramı

Kontrol algoritmasında analog girişlerden alınan şebeke ve FV gerilimleri kullanılarak dq0/abc park dönüşümü ile referans akım değerleri elde edilmektedir. Elde edilen referans akım değerleri histerezis akım denetleyicisinde üçgen karşılaştırma yöntemi kullanılarak, sayısal çıkış kanalları üzerinden IGBT sürücüye anahtarlama sinyalleri üretilmektedir.

Bu anahtarlama sinyalleri DS1103BIT_OUT_G0 bloğu kullanılarak Matlab/Simulink ortamından DS1103 kartının sayısal çıkış kanallarıyla eviriciye ait IGBT sürücüye gönderilmektedir. Sadece üst kollarda bulunan IGBT'ler için gönderilen 4 anahtarlama sinyali, IGBT sürücü yardımıyla ölü zaman gecikmesi de eklenerek alt kollar için otomatik olarak üretilmektedir.

3 faz 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı FV sisteminin geliştirilmesinde ControlDesk yazılımıyla şebeke akımı, şebeke gerilimi, FV akımı ve FV gerilim verileri gerçek zamanlı olarak izlenmiştir. Şekil 5.16'te ControlDesk çalışma alanında oluşturulan kullanıcı ara yüzü verilmektedir.



Şekil 5.16. ControlDesk çalışma alanında oluşturulan kullanıcı ara yüzü

5.11. Deneysel Sonuçlar

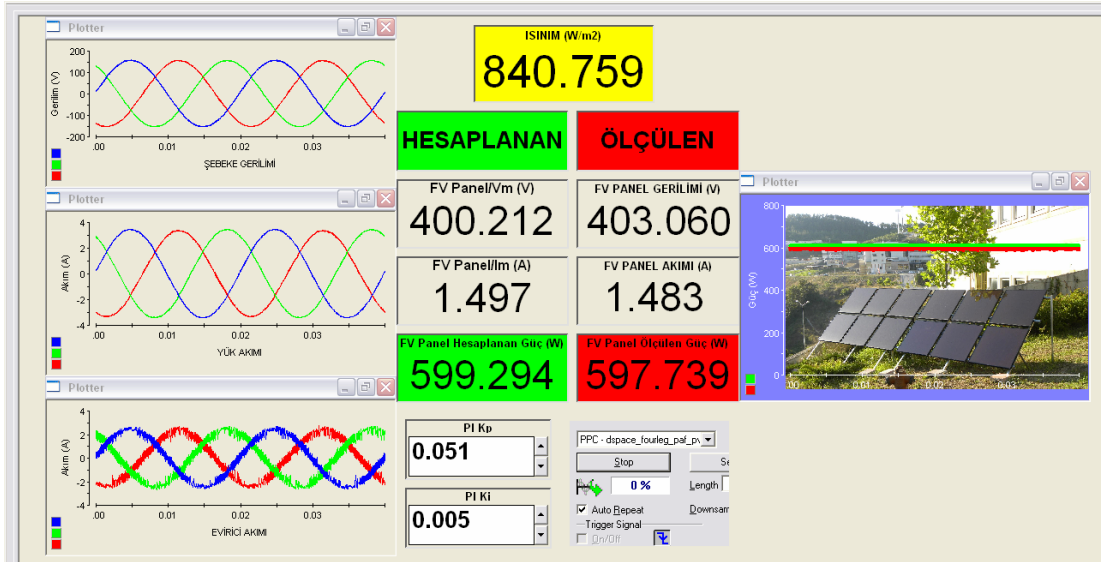
Tez çalışmasında 3 fazlı 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı MGNİ'li FV sistemi dengeli ve dengesiz omik yük gurubu ile çalıştırılıp deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen dalga şekilleri Tektronix DPO3054 osiloskop ile kaydedilmiştir. Güç ve harmonik analizi sonuçları ise Fluke 434 güç kalite analizörü ile alınmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar aşağıda sunulmaktadır.

5.12. Dengeli Yük Durumunda FV Sistemi

3 fazlı 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı MGNİ'li FV sistem Şekil 5.17'de verilen ControlDesk ekran görüntüsündeki ışınım, FV panel akım ve gerilim değerlerinde deney yapılmıştır. Ekran görüntüsünde pironometreden alınan ışınım değerine bağlı olarak FV panellerin çalışması gereken akım, gerilim ve güç değerleri simüle edilerek hesaplanmaktadır. Aynı zamanda ölçüm kartlarından alınan gerçek zamanlı FV panellerin akım, gerilim ve gücü ölçülmektedir. Böylelikle tek bir arayüz ile sistem gerçek zamanlı olarak izlenmekte ve maksimum güç noktasında çalıştığı takip edilmektedir.

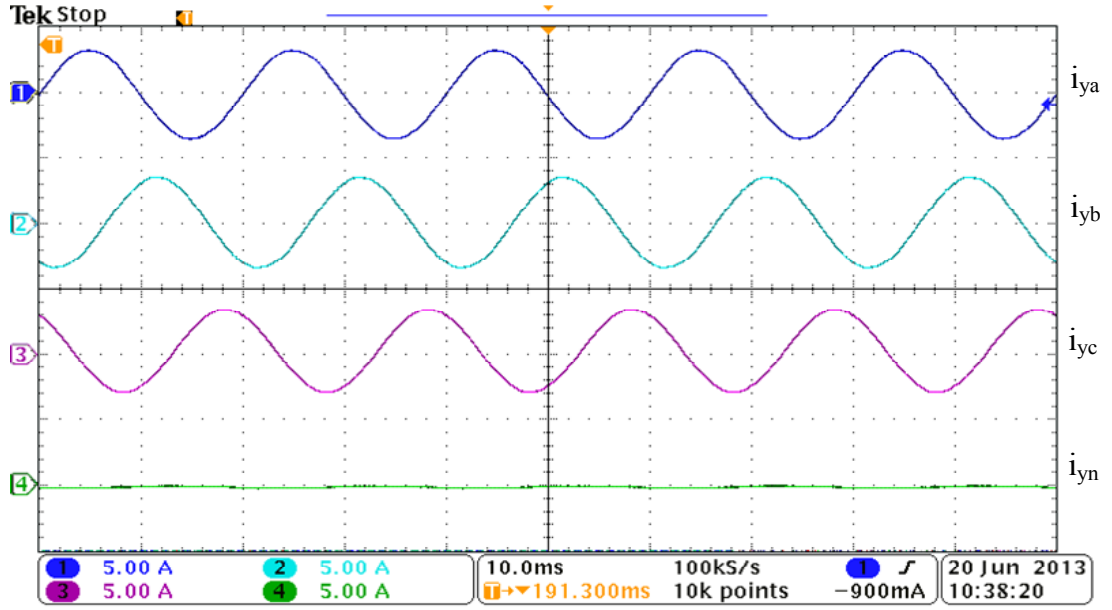
3 fazlı 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı MGNİ'li FV sistem 755 W/m^2 ışınım değerinde, FV panelleri 403 V ve 1,4 A'de çalıştırarak 597 W DA güç üretmektedir. Işınım değerine göre hesaplanan ve ölçülen gerçek değerler birbirleri ile örtüşmektedir. Aynı arayüzde şebeke gerilimleri, evirici ve yük akımları gerçek zamanlı olarak izlenmektedir.

Deney ortamında aynı ölçüm cihazı ile farklı noktalardan (şebeke, evirici, yük) aynı anda ölçüm yapmak mümkün olmamaktadır. Bu yüzden, sonuçları alma esnasında güneşlenmeden dolayı ışınım değerlerinde çok küçük değişiklik olmakla birlikte FV paneller yaklaşık olarak aynı ışınım değerinde (755 W/m^2) çalıştırılarak deney yapılmıştır.

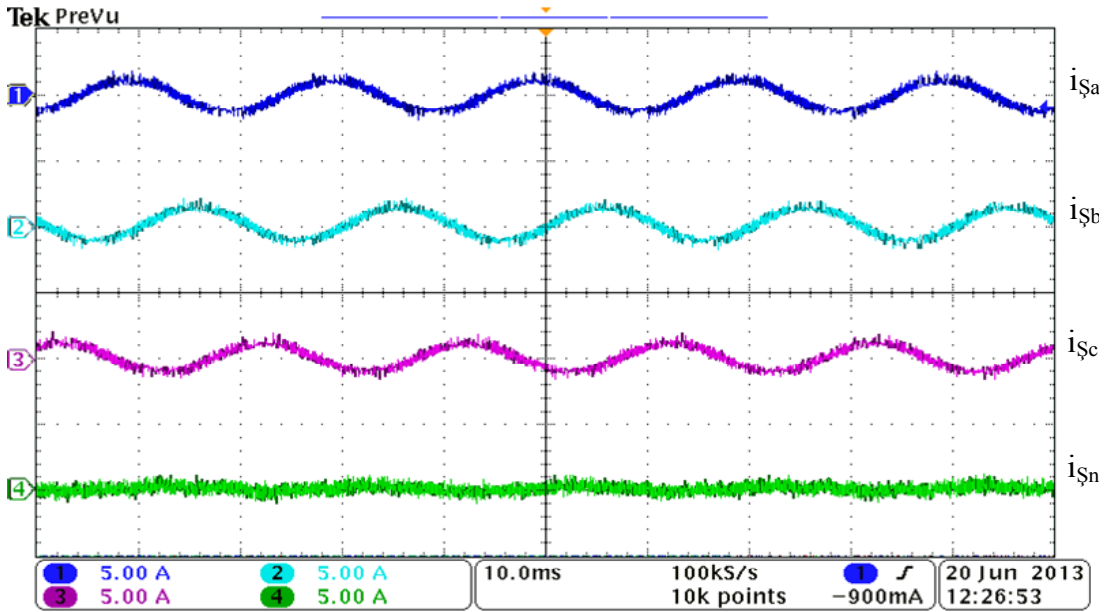


Şekil 5.17. ControlDesk arayüzünden alınan deneysel sonuçlar

FV sistemi dengeli yük gurubunda (3 faz 45Ω) çalıştırıldığında yük akımları, şebeke akımları ve evirici akımlarının dalga şekilleri Şekil 5.18'de sırası ile verilmektedir.

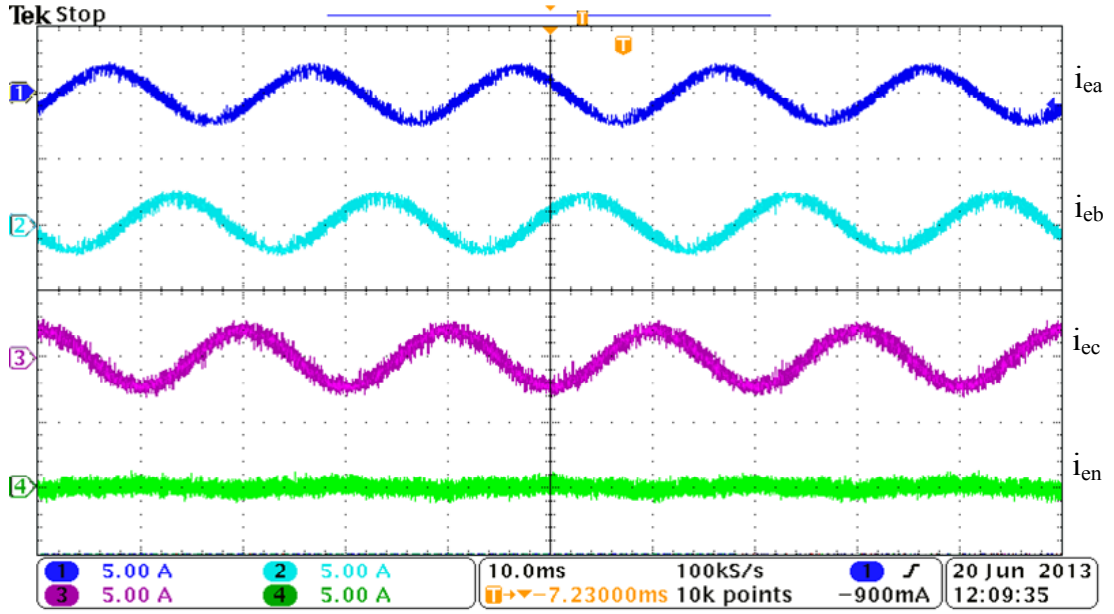


(a) Yük akımı dalga şekilleri



(b) Şebeke akımı dalga şekilleri

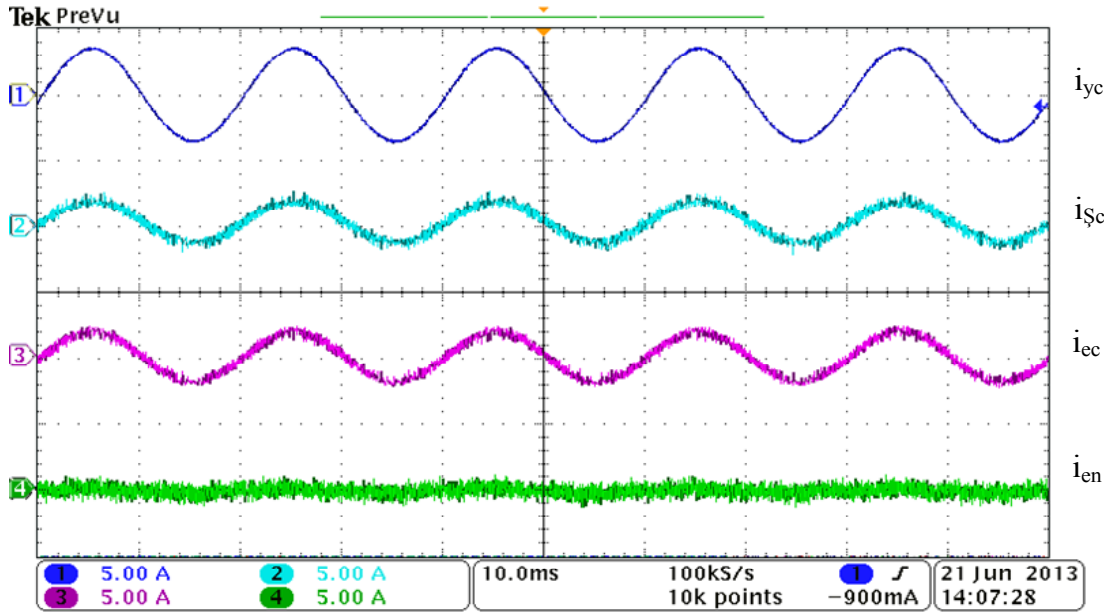
Şekil 5.18. Dengeli yük durumunda yük, evirici, şebeke akımları deneysel sonuçları



(c) Evirici akımı dalga şekilleri

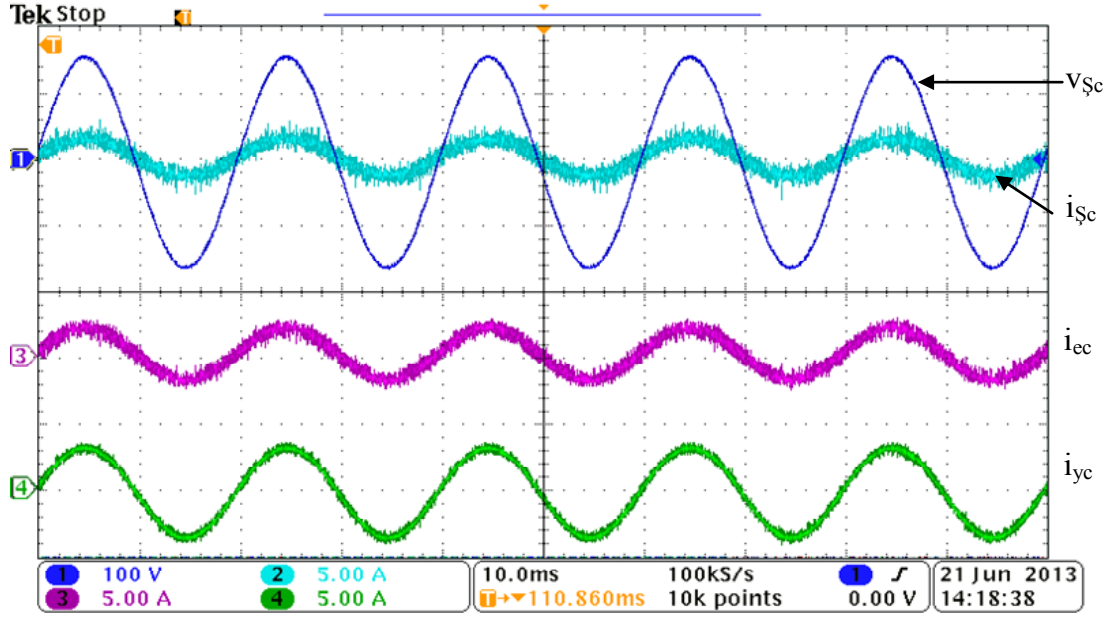
Şekil 5.18. Dengeli yük durumunda yük, evirici, şebeke akımları deneysel sonuçları (devamı)

Dengeli yük durumunda C fazı için üstten alta doğru olmak üzere yük akımı, şebeke akımı, evirici ve evirici nötr hat akımına ait deneysel dalga şekilleri Şekil 5.19'da gösterilmektedir.



Şekil 5.19. Dengeli yük durumunda C fazının yük, şebeke, evirici ve evirici nötr akımı dalga şekilleri

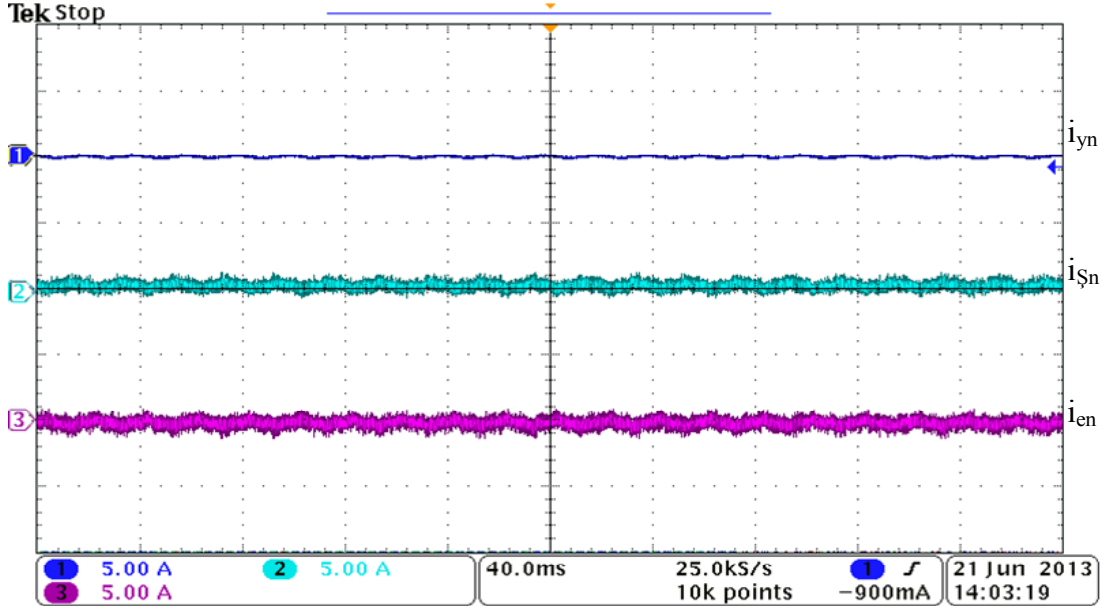
Dengeli yük durumunda C fazı için üstten alta doğru olmak üzere şebeke gerilimi, akımı, evirici akımı ve yük akımına ait deneysel dalga şekilleri Şekil 5.20’de gösterilmektedir.



Şekil 5.20. Dengeli yük durumunda şebeke gerilimi, akımı, evirici ve yük akımına ait deneysel dalga şekilleri

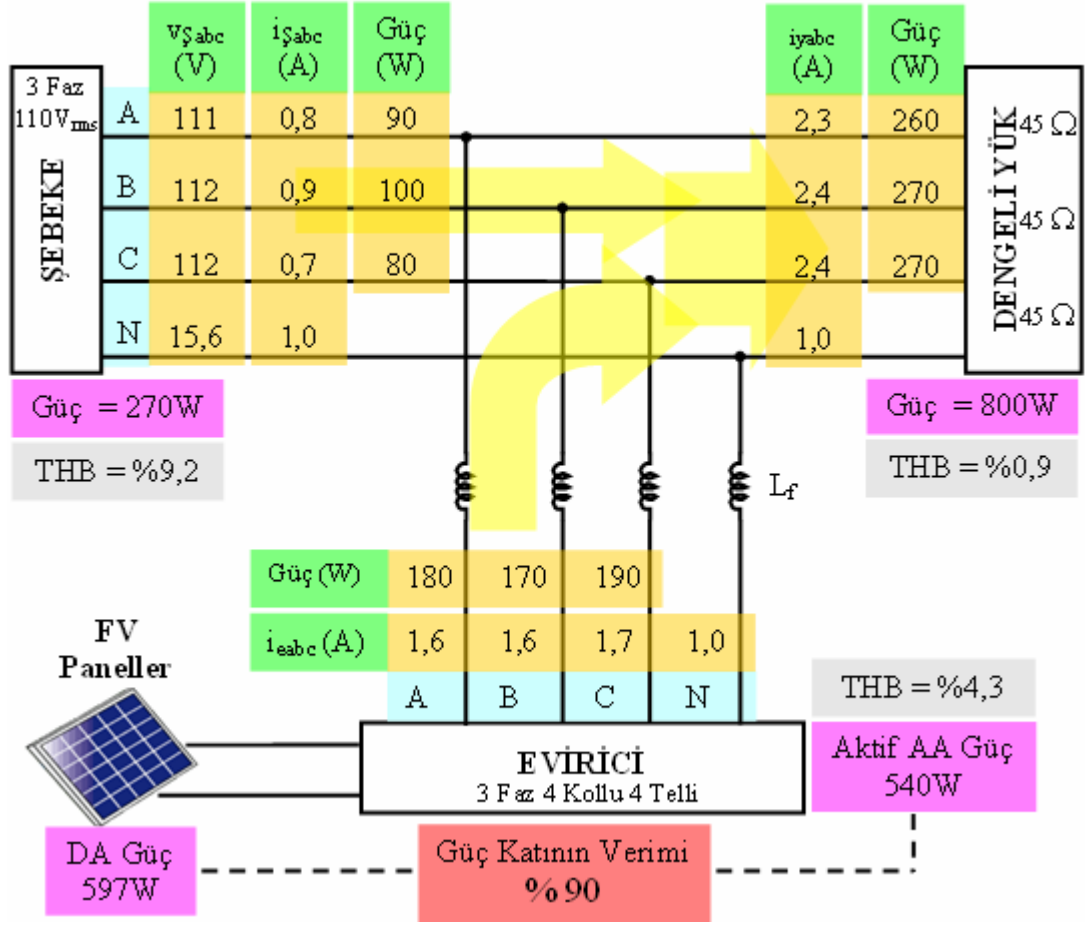
Şekil 5.18 a’da dengeli yük durumunda sırası ile yük akımları verilmektedir. Şekil 5.18 b’de şebekeden çekilen akımlar ve Şekil 5.18 c’de ise evirici çıkışındaki şebekeye aktarılan akım dalga şekilleri ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Evirici ve şebekenin toplam akımı yük gurubundan çekilen akıma eşit olmaktadır. Dengeli bir yük gurubu olduğundan nötr hattından geçen akım sıfırdır. Şekil 5.19’da ve Şekil 5.20’de C fazı için yük, şebeke, evirici, nötr hat akımları ve şebeke gerilimi dalga şekilleri verilmektedir. Böylelikle evirici çıkışının şebeke ile senkronize şekilde çalışarak aynı fazda olduğu ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Yük akımının çok büyük bir kısmı evirici tarafından sağlanmakta ve şebekeden çok az bir akım ve güç talep edilmektedir. Sistem, şebekeye güç sağlayarak FV paneller yardımı ile ışınlama bağlı olarak yüklerin beslenmesinde katkıda bulunmaktadır.

Dengeli durumda iken yük, şebeke ve evircinin nötr hat akımlarının dalga şekilleri Şekil 5.21’de ayrıntılı bir şekilde gösterilmektedir. Yük gurubu dengeli olduğundan nötr hattından neredeyse hiç akım geçmemektedir. Böylece şebeke ve evirici nötr akımlarında sıfıra yakın olmaktadır.

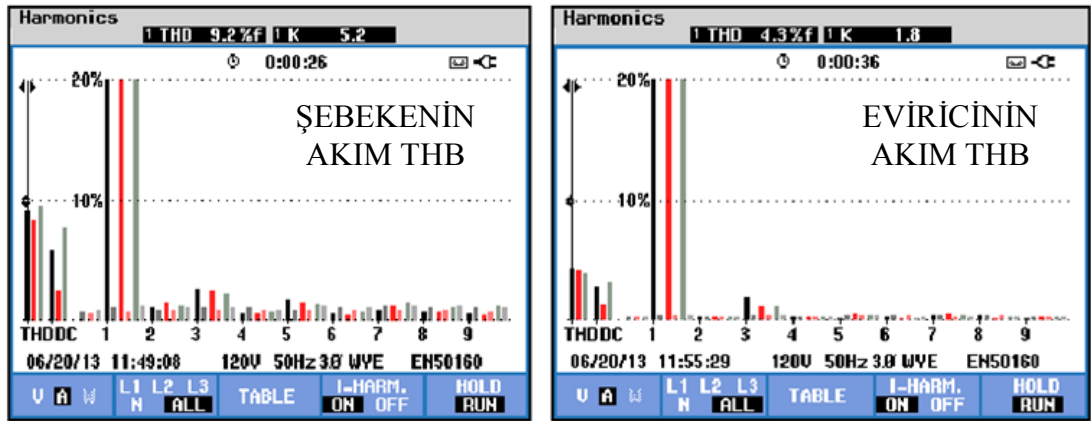


Şekil 5.21. Dengeli durumda yük, şebeke ve eviricinin nötr hat akımlarına ait deneysel dalga şekilleri

Şekil 5.22’de güç kalite analizörü ile alınan şebekenin, eviricinin ve yükün akım, gerilim, güç, akımın ortalama THB sonuçları ayrıntılı olarak verilmektedir. Sistem topolojisini temsil eden şekil üzerinde şebekenin, eviricinin ve yükün ölçülen değerleri tablo olarak açıklanmaktadır. FV paneller 755 W/m^2 ışınım değerinde MGN’da çalıştırılarak 597 W DA güç üretilmektedir. FV panellerden alınan bu güç evirici tarafından 3 faz AA güce dönüştürülerek 540 W aktif AA güç sağlanmaktadır. Güç değerleri ile güç katının verimi %90 olarak hesaplanmıştır. Evirici tarafından üretilen 540 W AA güç şebekeye aktarılarak yükü beslemesinde katkıda bulunmaktadır. Dengeli omik yük gurubu ($3 \times 45 \Omega$) toplamda 800 W ’lık güç çekmektedir. 800 W gücün 270 W ’ı şebekeden kalan 530 W ’ı ise evirici tarafından sağlanmaktadır. Eviricideki 10 W ’lık güç farkı ise evirici çıkışında bulunan filtrede harcanmaktadır. Şebeke ve evirici akımlarının ortalama THB dağılım sonuçları Şekil 5.23’de ayrıntılı olarak verilmektedir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde dengeli omik yükte THB akım değerinin ortalama olarak eviricinin %4,3 şebekenin %9,2 olduğu görülmektedir.



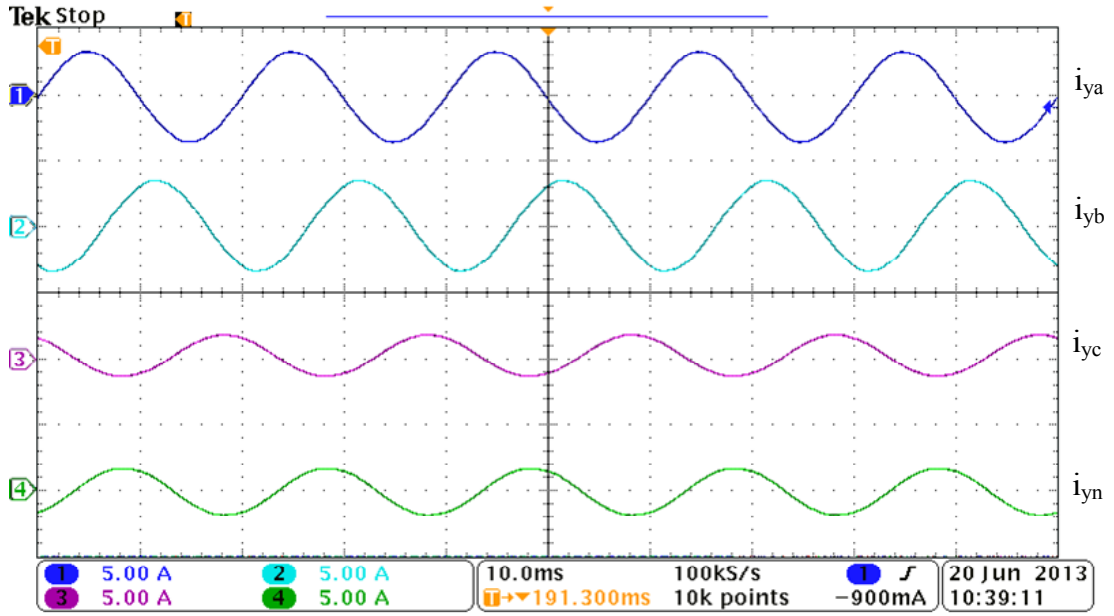
Şekil 5.22. Dengeli yük durumunda FV sistemin deneysel sonuç özeti



Şekil 5.23. Dengeli durumda şebeke ve evirici akımlarının ortalama THB dağılımı

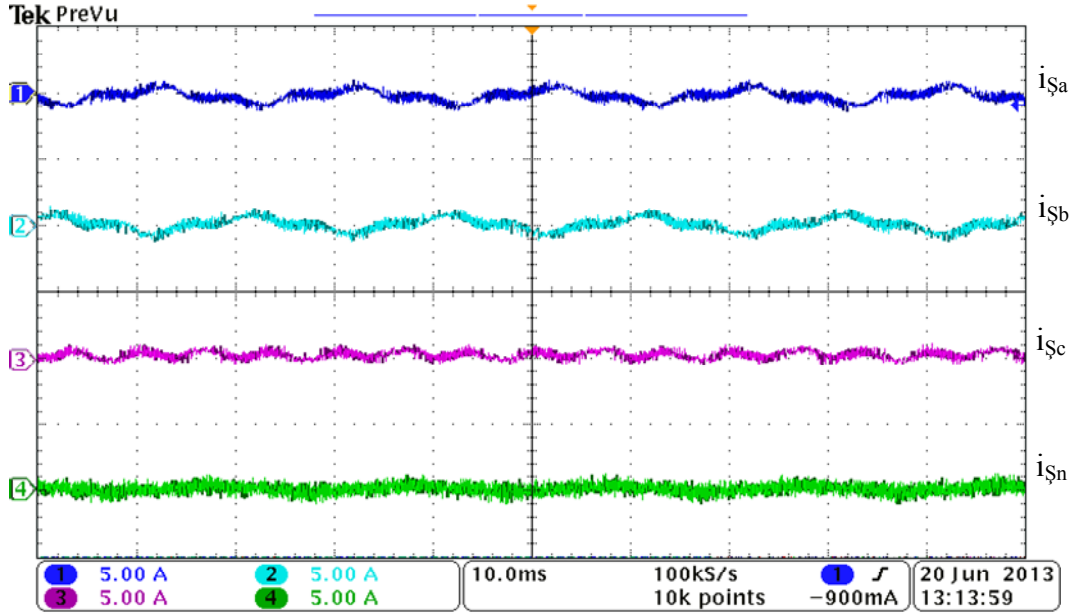
5.13. Dengesiz Yük Durumunda FV Sistemi

3 fazlı 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı MGNI'li FV sistemi dengeli yük durumundaki aynı ışınım değerlerinde çalıştırılarak deneysel sonuçlar alınmıştır. FV sistemi dengesiz yük gurubunda (A,B fazı $45\ \Omega$ C fazı $90\ \Omega$) çalıştırıldığında yük akımları, şebeke akımları ve evirici akımlarının dalga şekilleri Şekil 5.24'de sırası ile verilmektedir. C fazının akımı, A ve B fazlarına göre daha düşük olduğundan dolayı yük gurubunu dengesiz hale getirmektedir.

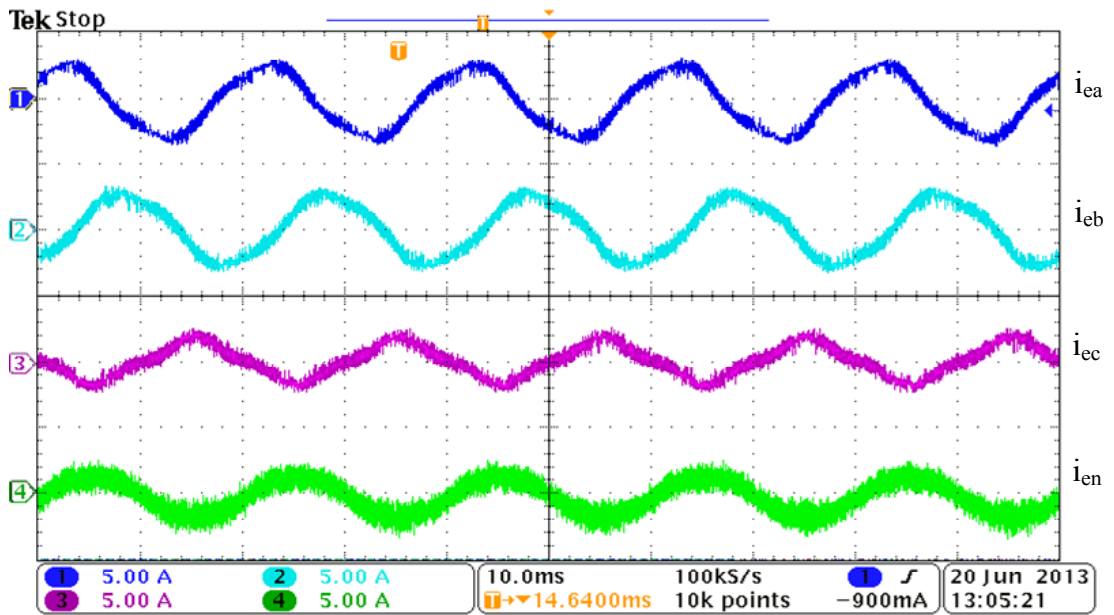


(a) Yük akımı dalga şekilleri

Şekil 5.24. Dengesiz yük durumunda yük, evirici, şebeke akımları deneysel sonuçları



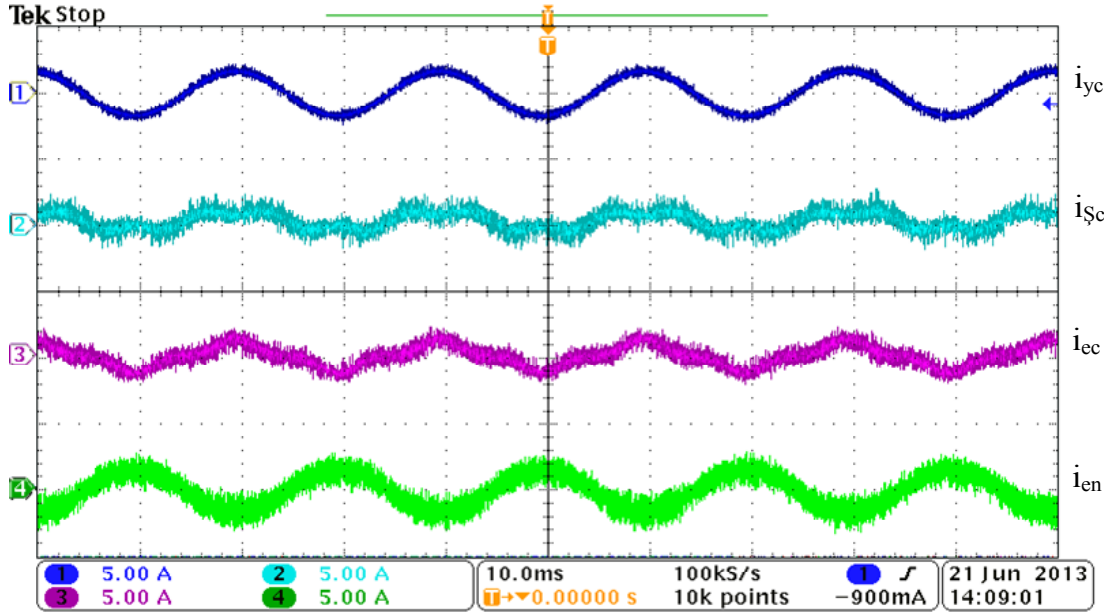
(b) Şebeke akımı dalga şekilleri



(c) Evirici akımı dalga şekilleri

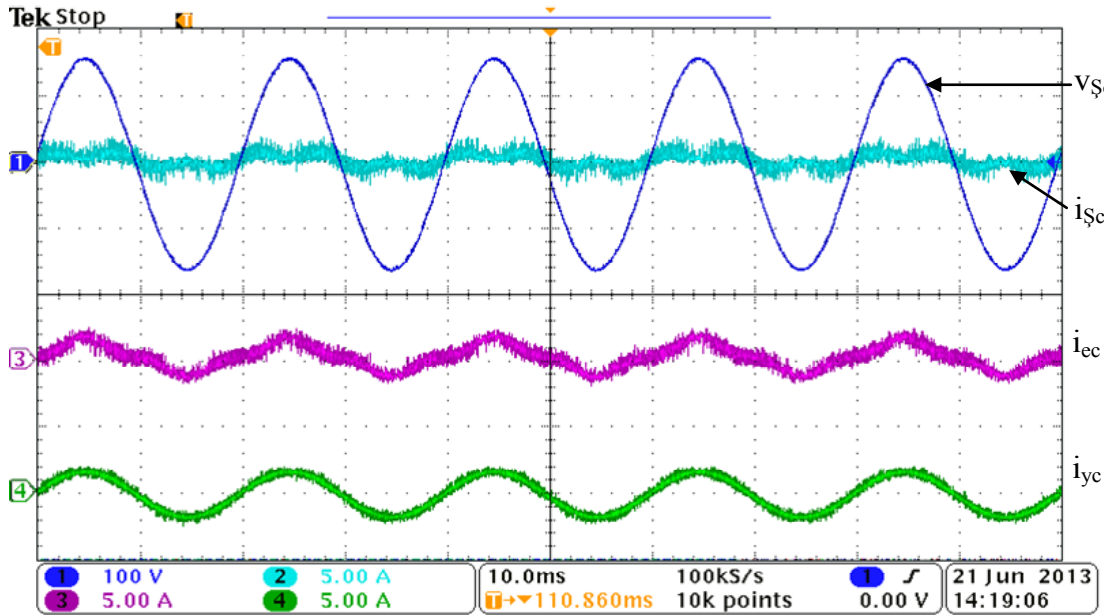
Şekil 5.24. Dengesiz yük durumunda yük, evirici, şebeke akımları deneysel sonuçları (devamı)

Dengesiz yük durumunda C fazı için üstten alta doğru olmak üzere yük akımı, şebeke akımı, evirici ve evirici nötr hat akımına ait deneysel dalga şekilleri Şekil 5.25’de gösterilmektedir.



Şekil 5.25. Dengesiz yük durumunda C fazının yük, şebeke, evirici ve evirici nötr akımı dalga şekilleri

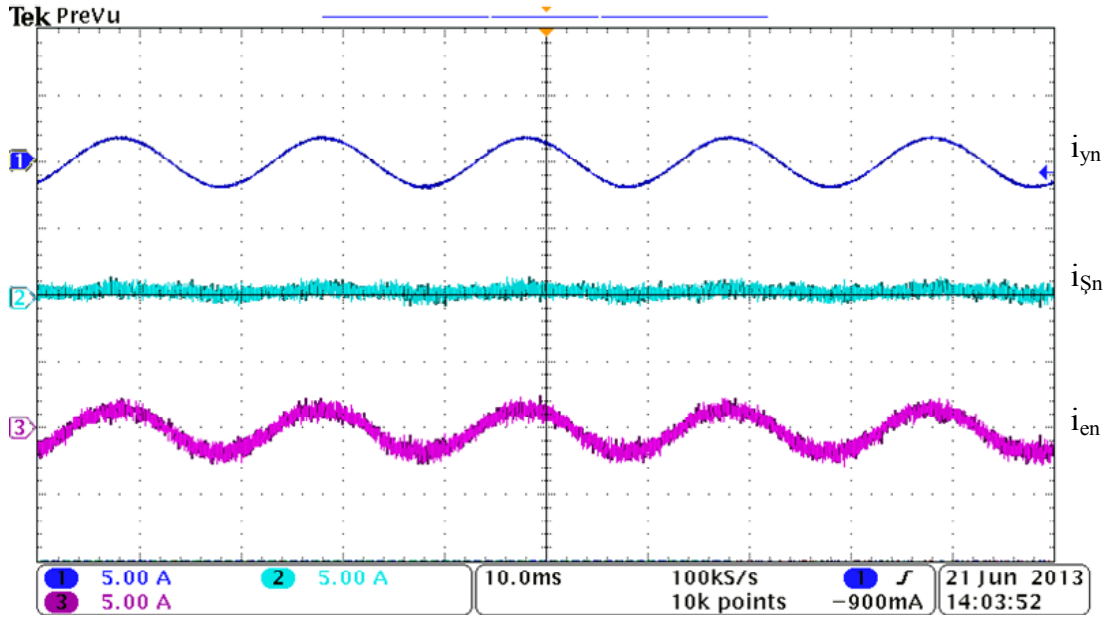
Dengesiz yük durumunda C fazı için üstten alta doğru olmak üzere şebeke gerilimi, akımı, evirici akımı ve yük akımına ait deneysel dalga şekilleri Şekil 5.26'da gösterilmektedir.



Şekil 5.26. Dengesiz yük durumunda şebeke gerilimi, akımı, evirici ve yük akımına ait deneysel dalga şekilleri

Şekil 5.24 a’da dengesiz yük durumunda sırası ile yük akımları verilmektedir. Şekil 5.24 b’de şebekeden çekilen akımlar ve Şekil 5.24 c’de ise evirici çıkışındaki şebekeye aktarılan akım dalga şekilleri ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Evirici ve şebekenin toplam akımı yük gurubundan çekilen akıma eşit olmaktadır. Şekil 5.25’te ve Şekil 5.26’da C fazı için yük, şebeke, evirici, nötr hat akımları ve şebeke gerilimi dalga şekilleri verilmektedir. Böylelikle evirici çıkışının şebeke ile senkronize şekilde çalışarak aynı fazda olduğu ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Ancak yük gurubu dengesiz olduğundan evirici çıkışında buna bağlı olarak akım üretmekte ve sinüs eğrisinde yükten dolayı dengesizliğe neden olmaktadır.

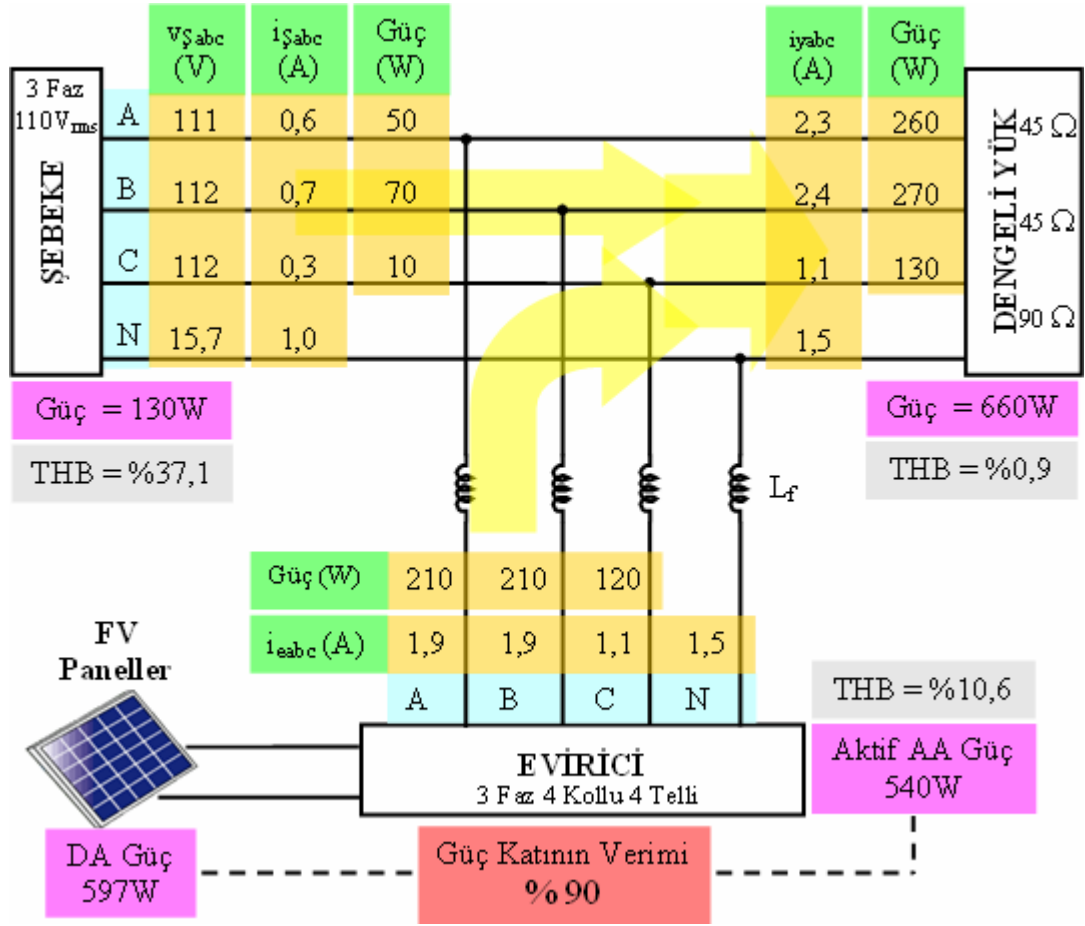
Dengesiz durumda iken yük, şebeke ve evricinin nötr hat akımlarının dalga şekilleri Şekil 5.27’de verilmektedir. Yük gurubu dengesiz olduğundan nötr hattından akım geçmektedir. Bu nötr akımı evirici tarafından üretilerek şebekeden sıfıra yakın bir nötr akımı geçmesi sağlanmıştır. Böylece yük dengesiz olsa dahi evirici, FV panellerin gücüne bağlı olarak nötr akımı üretilip şebekeden dengeli bir yük talep etmesini sağlamaktadır. Sistemin dördüncü kolunun etkisi Şekil 5.27’de verilen dalga şekilleri ile ayrıntılı bir şekilde gösterilmektedir.



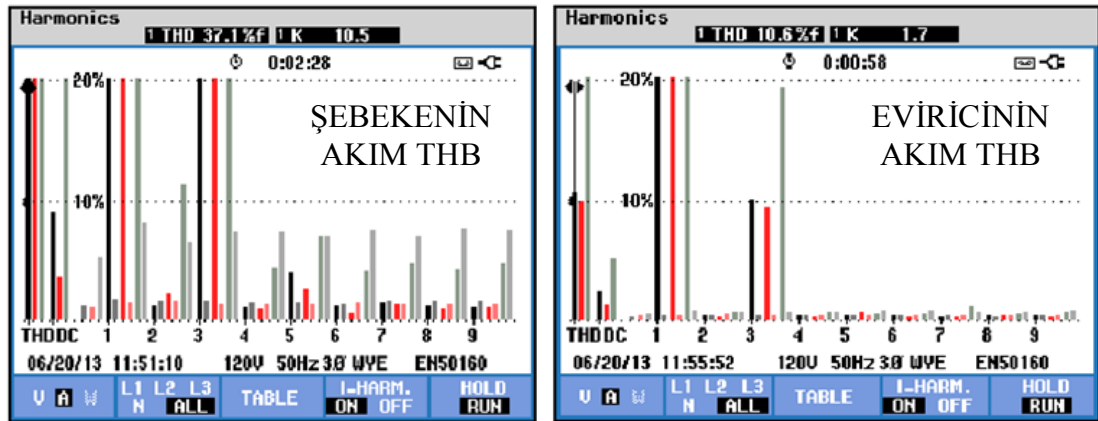
Şekil 5.27. Dengesiz durumda yük, şebeke ve evricinin nötr hat akımlarına ait deneysel dalga şekilleri

Şekil 5.28’de güç kalite analizörü ile sistemin dengesiz yük gurubunda alınan şebekenin, eviricinin ve yükün akım, gerilim, güç, akımın ortalama THB sonuçları ayrıntılı olarak verilmektedir. Sistem topolojisini temsil eden şekil üzerinde şebekenin, eviricinin ve yükün ölçülen değerleri tablo olarak açıklanmaktadır. FV paneller dengeli durumdaki ışınlım şartları ile yaklaşık olarak aynı değerde çalıştırılarak 597 W DA güç üretilmektedir. FV panellerden alınan bu güç evirici tarafından 3 faz AA güce dönüştürülerek 540 W aktif AA güç sağlanmaktadır. Ölçülen güç değerleri ile güç katının verimi %90 olarak hesaplanmıştır. Dengesiz omik yük gurubu (A,B fazı 45Ω C fazı 90Ω) toplamda 660 W’lık güç çekmektedir. 660 W gücün 130 W’ı şebekeden kalan 530 W’ı ise evirici tarafından sağlanmaktadır. Eviricideki 10 W’lık güç farkı ise evirici çıkışında bulunan filtrede harcanmaktadır.

Şebeke ve evirici akımlarının ortalama THB dağılım sonuçları Şekil 5.29’da ayrıntılı olarak verilmektedir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde dengesiz omik yükte THB akım değerinin ortalama olarak eviricinin %10,6 şebekenin %37,1 olduğu görülmektedir. Bu THB değeri dengeli yük durumuna göre daha yüksektir. Bunun nedeni, dengesiz olan yük gurubunda nötr hatından çekilen akımın evirici tarafından üretilmesidir.



Şekil 5.28. Dengesiz yük durumunda FV sistemin deneysel sonuç özeti



Şekil 5.29. Dengesiz durumda şebeke ve evirici akımlarının ortalama THB dağılımı

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Şebeke bağlantılı fotovoltaik elektrik üretim sisteminin maksimum güç noktasında çalıştırılması ve senkron olarak şebekeye bağlanması önemli bir konudur. Değişen atmosferik koşullar, sıcaklık ve kirlenmeden dolayı güneş panellerinin maksimum güç noktası sürekli olarak değişmektedir. Karalı olmayan bu güç noktasını izlemek amacıyla birçok teknik kullanılmaktadır. Bu teknikler arasında basitlik, yakınsama hızı, donanım uygulaması, sensör gereksinimi, maliyet, etkinlik yelpazesi gibi birçok açıdan karşılaştırma yapılmaktadır. MGNİ algoritmaları FV güç sistemleri için en önemli konulardan biri olmakla birlikte kontrol mekanizmalarının temelini oluşturmaktadır. Literatürde çeşitli MGNİ teknikleri bulunmakta olup bunlardan en çok tercih edileni ve yüksek verime sahip olanı saptır gözle algoritmasıdır. Değişen atmosferik koşullara olan kısa cevap süresi ve sadece panel akım ve gerilim değerlerini kullanarak maksimum güç noktası tespiti yaptığından bu çalışmada saptır-gözle yöntemi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda şebeke bağlantılı FV sistemin hızla değişen ışınım değerlerinde maksimum güç noktasını minimum cevap süresi ile takip ettiği gözlenmiştir.

Büyük güçlü sistemlerde özellikle 3 fazlı yapılarda güç yoğunluğu, verim ve maliyet araştırılması devam eden konular arasındadır. Bu çalışmada, güç yoğunluğunu arttırmak, verimi arttırmak ve maliyeti düşürmek için 3 fazlı 4 kollu 4 telli yapıda tek aşamalı evirici topolojisi kullanılmıştır. Böylece, çift aşamalı yapıda kullanılan arttır-azalt dönüştürücü kısmı ortadan kaldırılarak donanımsal olarak daha az malzeme kullanarak çalışma yapılmıştır. Bu sayede tek bir evirici yapısı kullanılarak, sadece kontrol algoritması ile aynı anda hem arttır-azalt dönüştürücü hem de 3 faz 4 kollu evirici olarak çalıştırılmaktadır. Eviricide kontrol yöntemi olarak histeresiz bant akım kontrolü kullanılmıştır.

Şebeke bağlantılı FV sistemin evirici yapısı 3 fazlı 4 kollu 4 telli yapıda yapılmıştır. Böylece nötr hattı elde edilerek dengesiz yüklerle cevap vermesi amaçlanmıştır. 3 fazlı 4 kollu 4 telli yapı kullanılarak şebeke bağlantılı FV sistemler için yenilik

kazandırılmıştır. Sistemde dengeli bir yük gurubu bağlı olduğunda nötr hattından geçen akım sıfırdır. Yük gurubu dengesiz olduğunda ise nötr hattından akım geçmektedir. Bu nötr akımı evirici tarafından üretilerek şebekeden sıfıra yakın bir nötr akımı geçmesi sağlanmıştır. Böylece yük dengesiz olsa dahi evirici, FV panellerin gücüne bağlı olarak nötr akımı üretilip şebekeden dengeli bir yük talep etmesini sağlamıştır. Yük gurubu olarak omik yükler kullanılmıştır. Dengeli durumda her fazda 45 Ω 'luk yük grubu bulunmaktadır. Dengesiz durumda ise C fazında 90 Ω 'luk yük bağlanmıştır. FV sistem şebekeye bir trafo üzerinden bağlanmaktadır. Böylece güvenlik amacıyla deneysel çalışmalar 110 V_{rms} değerinde yapılmıştır.

Bu çalışma, 3 fazlı 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı MGNİ'li FV sistemi laboratuvar ortamında gerçekleştirilen yapının tasarım ve uygulama çalışmaları MATLAB/SIMULINK programının güç sistem araç kutusu kullanılarak oluşturulmuştur.

Deneysel laboratuvar ortamında sistem parametrelerini gözlemlemek ve kontrol etmek için ControlDesk yazılımı kullanılmıştır. Piranometreden alınan ışınım bilgisi ile FV panellerin maksimum güç noktası hesaplanmakta ve ölçüm kartlarından okunan değerler ile karşılaştırılarak gerçek zamanlı olarak izlenmiştir. Dijital güneş enerjisi ölçer kullanılarak piranometreden aldığımız gerilim değerinin standart kalibrasyon değeri ile işlendikten sonra deneysel çalışmada kullanılan ışınım değerinin doğruluğu kanıtlanmıştır. Deneysel sonuçlarda hesaplanan ve alınan gerçek değerler birbirini hızlı bir şekilde takip etmektedir. Böylece FV panellerin maksimum güç noktasında sağlıklı olarak çalıştığı gözlenmiştir.

Deneysel çalışmada FV kaynak olarak Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi bahçesinde 720 W kurulu güce sahip FV panel dizisi kullanılmıştır. Sistem değişik hava koşullarında dengeli ve dengesiz yük gurubu ile test edilerek sonuçlar alınmıştır. Sonuçlar doğrultusunda şebeke bağlantılı FV yapısının güç katı verimi %90 olarak hesaplanmıştır.

İleriki çalışmalarda, FV panellerde üretilen elektrik enerjisi sabit olmaması ve sürekli değişkenlik göstermesinden dolayı üretilen enerjinin gerektiğinde depolanarak ve istenildiğinde tekrar kullanılabilmesi için hibrit enerji depolama sistemi yapılması hedeflenmektedir.

3 fazlı 4 kollu 4 telli şebeke bağlantılı MGNI'li FV sistemi düşük kurulu güce sahip olduğundan gücün düşmesi durumunda düzgün bir sinüzoidal akım üretmekte zorlanmaktadır. Bu sorunu çözebilmek için evirici çıkışına yüksek değerde filtre bağlanması gerekmektedir. Ayrıca, sistem aktif filtre yapacak şekilde çalıştırılıp incelenebilir. Endüktans değerinin artması maliyet ve boyutun artması anlamına gelmektedir ve istenmeyen bir durumdur. Burada öneri olarak, kurulu güç değerini yüksek tutarak ve değişik anahtarlama teknikleri kullanarak filtre değeri azaltılabilir. FV sisteme doğrusal olmayan yükler bağlanarak evirici çıkışındaki akımlar incelenebilir. Böylece farklı yük grupları ile evirici yapısının davranışı gözlemlenebilir.

Hızlı değişen atmosferik koşullarda MGNI'sinin MGN'ı daha kısa sürede yakalayabilmesi için artan iletkenlik algoritması önerilmektedir. Böylece MGN arama esnasında FV panellerden alınacak toplam güç arttırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Güneroğlu A., Fotovoltaik sistemlerde FPGA kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2008, 233148.
- [2] Özdemir Ş., Fotovoltaik sistemler için mikrodenetleyicili en yüksek güç noktasını izleyen bir konvertörün gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007, 212683.
- [3] ABB, Technical application papers no: 10, Photovoltaic plants.
- [4] Global market outlook for photovoltaics 2013-2017, European Photovoltaic Industry Association (EPIA), May 2012.
- [5] Connecting the sun solar photovoltaics on the road to large-scale grid integration full report, European Photovoltaic Industry Association (EPIA), September 2012.
- [6] Market report 2011, European Photovoltaic Industry Association (EPIA), 2011.
- [7] Aktaş A., Engin Ö., Abdulkakim K., Mehmet U., Operation and performance of grid-connected solar photovoltaic power system in Kocaeli University, *Solar TR-2 Solar Electricity Conference and Exhibition*, Antalya, Türkiye, 7-9 Kasım 2012.
- [8] Samet Ç., Engin Ö., Mehmet U., Şebeke bağlantılı fotovoltaik elektrik üretim sistemlerinin güç kalitesine etkileri, *4. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu EVK*, Kocaeli, Türkiye, 12-13 Mayıs 2011.
- [9] Rappaport P., The photovoltaic effect and its utilization, *Elsevier Solar Energy*, 1959, **3**, 8-18.
- [10] Wang N., Wu Mei Y., Shi G., Study on characteristics of photovoltaic cells based on matlab simulation, *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Asia-Pacific, 25-28 March 2011.
- [11] Güneroğlu A., Sunan M., Atlam Ö., Fotovoltaik pillerin değişken ışınım ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak modellenmesi, *Ulusal Teknik Eğitim Mühendislik ve Eğitim Bilimleri Genç Araştırmacılar Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 20-22 Haziran 2007.

- [12] Natsheh E. M., Albarbar A., Photovoltaic model with mpp tracker for standalone/grid connected applications, *Renewable Power Generation (RPG)*, UK, 6-8 September 2011.
- [13] Roberto F., Sonia L., Energy comparasion of MPPT tecniques for PV systems, *WSEAS Transactions on power systems*, 2008, **3**, 446-455.
- [14] Efram T., Patrick L. C., Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, **22**, 439-449.
- [15] Kwon J. M., Nam K. H., Kwon B. H., Photovoltaic power conditioning system with line connection, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, **53**, 1048-1054.
- [16] Sera D., Real-time Modelling, Diagnostics and Optimised MPPT for Residential Photovoltaic systems, PhD thesis, Aalborg University, Institute of Energy Technology, Aalborg, 2009.
- [17] Sunan M., Güneş enerjisi ile çalışan aracın elektrik ve elektronik sisteminin mikrodenetleyiciler ile tasarımı ve uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2006, 197920.
- [18] Yusof Y., Sayuti S. H., Abdul Latif M., Wanik M. Z. C., Modeling and simulation of maximum power point tracker for photovoltaic system, *National Power and Energy Conference (PECon)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 29-30 November 2004.
- [19] Khaehintung N., Pramotung K., Tuvirat B., Sirisuk P., Risc-microcontroller built-in fuzzy logic controller of maximum power, *The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Busan, Korea, 2-6 November 2004.
- [20] Hua C., Lin J., Shen C., Implementetion of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1998, **45**, 99-107.
- [21] Salas V., Olias E., Barrado A., Lazaro A., Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems, *Elsevier Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006, **90**, 1555-1578.
- [22] Lu L., Liu P., Research and simulation on photovoltaic power system maximum power control, *International Conference on Electrical and Control Engineering*, Yichang, China, 16-18 September 2011.
- [23] İşen E., Alternatif enerji kaynakları için şebekeye bağlı düşük harmonikli ve yüksek verimli üç fazlı inverter sisteminin geliştirilmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011, 302584.

- [24] Pinto J. G., Pregitzer R., Luis F. 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Teodorescu R., Liserre M., Rodriuez P., Grid requirements for PV, Editors: Teodorescu R., Liserre M., Rodriuez P., *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*, 1. ed., John Wiley & Sons., United Kingdom, 31-42, 2011.
- [28] Kulaksız A. A., Maksimum güç noktası izleyicili ve UVM inverterli fotovoltaik sistemin yapay sinir ağları tabanlı kontrolü, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2007, 212386.
- [29] De Kooning 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, Wales, UK, 31 August-3 September 2010.
- [30] Bellini A., Bifaretti S., A simple control technique for three-phase four-leg inverters, *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Taormina, Italy, 23-26 May 2006.
- [31] Jain S., Agarwal V., Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single-stage grid-connected photovoltaic systems, *IET Electric Power Applications*, 2007, **1**, 753-762.
- [32] Jain S., Agarwal V., New current control based MPPT technique for single stage grid connected pv systems, *Elsevier Energy Conversion and Management*, 2007, **48**, 625-644.
- [33] 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.
- [34] Libo W., Zhao Zhao Z., Jianzheng L., A single-stage three-phase grid-connected photovoltaic system with modified MPPT method and reactive power compensation, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, **22**, 881-886.

- [35] 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.
- [36] Kerekes T., Teodorescu R., Klumpner C., Summer M., Floricau D., Rodriguez P., Evaluation of three-phase transformerless photovoltaic inverter topologies, *European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Denmark, 2-5 September 2007.
- [37] Ciobotaru M., Teodorescu R., Blaabjerg F., Control of single-stage single-phase PV inverter, *European Conference on Power Electronics and Applications*, Dresden, Germany, 2005.
- [38] Uçar M., 3-fazlı 4-telli paralel aktif güç filtresinin tasarımı ve uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2005, 168841.
- [39] 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.
- [40] Kaneka G-EA060 Solar Module Thin-Film Technical Data Sheet, Osaka, Japan, 2013.
- [41] Concept 2SC0108T Description and Application Manual Technical Data Sheet, Bienne, Switzerland, 2013.
- [42] Concept 2BB0108T Description and Application Manual Technical Data Sheet, , Bienne, Switzerland, 2013.
- [43] ApoGee Instruments Pyranometer SP-110 Technical Data Sheet, Logan, USA, 2013.
- [44] DSPACE GmbH, Catalog 2008, Paderborn, Germany, 2008.
- [45] www.eie.gov.tr (Ziyaret tarihi: 03 Mart 2013).
- [46] www.enerji.gov.tr (Ziyaret tarihi: 03 Mart 2013).

EKLER

Ek-A

```
function o = MPPT_PO(vn,in)
persistent io;
persistent po;
persistent vo;
persistent iro ;
persistent dsign;
if isempty(io)
io = 0;
po = 0;
vo = 0;
iro = 0.6;
dsign = 1;
end
delta=0.02;
pn=vn*in;
if pn>=po
dsign=dsign;
else
dsign=0-dsign;
end
irn=iro+dsign*delta;
vo=vn;
io=in;
po=pn;
iro=irn;
o=irn;
end
```

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Aktaş A.**, Engin Ö., Abdulkakim K., Mehmet U., Operation and performance of grid-connected solar photovoltaic power system in Kocaeli University, Solar TR-2 Solar Electricity Conference and Exhibition, Antalya, Turkey, 7-9 November 2012.
- [2] **Aktaş A.**, Engin Ö., Abdulkakim K., Mehmet U., Operation and performance of grid-connected solar photovoltaic power system in Kocaeli University, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2013, **15**, 565-570.

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 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı.