

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YAKIT PİLİ İLE MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİ
KULLANARAK AKÜ ŞARJ DEVRESİ TASARIMI VE
UYGULAMASI**

SEÇKİN ŞOLA

KOCAELİ 2021

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAKIT PİLİ İLE MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİ
KULLANARAK AKÜ ŞARJ DEVRESİ TASARIMI VE
UYGULAMASI

SEÇKİN ŞOLA

Dr.Öğr. Üyesi Tarık ERFİDAN

Danışman, Kocaeli Üniv

.....

Prof.Dr. Bekir ÇAKIR

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv

.....

Doç.Dr. Yasemin ÖNER

Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniv

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 24.06.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, Proton değişim membranlı yakıt pili ile kullanılmak üzere maksimum güç noktası izleyebilen akü şarj sistemi tasarımı yapılmış ve gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sistem ile akü şarj edilmiş ve sonuçlar incelenmiştir.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana destek olan başta değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Tarık ERFİDAN olmak üzere tüm Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü hocalarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca bana destek vererek yanımda olan başta Arş. Gör. Onur KIRCIOĞLU olmak üzere tüm Elektrik Mühendisliği Bölümü araştırma görevlilerine teşekkür ederim.

Hayatım boyunca yanımda olarak her zaman bana destek veren annem Münevver ŞOLA'ya, babam Yücel ŞOLA'ya ve abim Çağdaş ŞOLA'ya teşekkür ediyorum.

Son olarak, uzun süredir benimle beraber olan ve her zorluğu birlikte aştığım sevgili eşim Burcu ŞOLA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Haziran – 2021

Seçkin ŞOLA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
GİRİŞ	1
1. YAKIT HÜCRELERİ	4
1.1. Fosforik Asit Yakıt Hücresi	5
1.2. Ergimiş Karbonat Yakıt Hücresi	6
1.3. Katı Oksit Yakıt Hücresi	8
1.4. Alkali Yakıt Hücresi	9
1.5. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi	10
2. PDM YAKIT HÜCRESİNİN MATEMATİKSEL MODELİ VE KARAKTERİSTİK ERĞİLERİ	12
2.1. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresinin Gerilim-Akım ve Güç-Akım Eğrileri	14
3. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİ	18
3.1. Dolaylı Kontrollü MGNİ Algoritmaları	18
3.2. Doğrudan Kontrollü MGNİ Algoritmaları	18
3.2.1. Değişir ve Gözle algoritması	18
3.2.2. Artan İletkenlik algoritması	20
4. DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLER	21
4.1. DA-DA Dönüştürücü Topolojileri	21
4.1.1. Yalıtımsız dönüştürücüler	21
4.1.1.1. Buck (düşürücü) dönüştürücü	21
4.1.1.2. Boost (yükseltici) dönüştürücü	22
4.1.1.3. Buck-boost (düşürücü-yükseltici) dönüştürücü	23
4.1.1.4. Cuk dönüştürücü	23
4.1.1.5. SEPIC dönüştürücü	24
4.1.2. Yalıtımlı dönüştürücüler	24
4.1.2.1. Half-full bridge dönüştürücü	24
4.1.2.2. Flyback dönüştürücü	25
4.2. Flyback dönüştürücü analizi	26
4.3. DA-DA Dönüştürücülerde Kontrol	29
4.3.1. Akım modu kontrol	29
4.3.2. Gerilim modu kontrol	30
5. FLYBACK DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI VE BENZETİMİ	32
6. TASARLANAN DENEYSEL SİSTEM	34
6.1. Malzeme Seçimi	36
7. DENEYSEL SONUÇLAR	42
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	46

KAYNAKLAR	48
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	50
ÖZGEÇMİŞ	51



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Yakıt hücresi temel gösterimi.....	4
Şekil 1.2.	Fosforik asit yakıt hücresi temel görünümü.....	6
Şekil 1.3.	Ergimiş karbonat yakıt hücresi temel görünümü.....	7
Şekil 1.4.	Katı oksit yakıt hücresi temel görünümü.....	9
Şekil 1.5.	Alkali yakıt hücresi temel görünümü.....	10
Şekil 1.6.	Proton değişim membranlı yakıt hücresi temel görünümü.....	11
Şekil 2.1.	Horizon H-60 gerilim-akım karakteristik eğrisi.....	15
Şekil 2.2.	Model gerilim-akım karakteristik eğrisi.....	15
Şekil 2.3.	Horizon H-60 güç-akım karakteristik eğrisi.....	16
Şekil 2.4.	Model güç-akım karakteristik eğrisi.....	16
Şekil 2.5.	Gerilim-akım karakteristik eğrisinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	17
Şekil 2.6.	Güç-akım karakteristik eğrisinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	17
Şekil 3.1.	Değiştir ve Gözle algoritması akış şeması.....	19
Şekil 3.2.	Artan iletkenlik algoritması akış şeması.....	20
Şekil 4.1.	Buck dönüştürücü devre şeması.....	21
Şekil 4.2.	Boost dönüştürücü devre şeması.....	22
Şekil 4.3.	Buck-boost dönüştürücü devre şeması.....	23
Şekil 4.4.	Cuk dönüştürücü devre şeması.....	23
Şekil 4.5.	SEPIC dönüştürücü devre şeması.....	24
Şekil 4.6.	Half-bridge dönüştürücü devre şeması.....	25
Şekil 4.7.	Flyback dönüştürücü devre şeması.....	26
Şekil 4.8.	S anahtarı iletimde iken akım yolları.....	27
Şekil 4.9.	S anahtarı kesimde iken akım yolu.....	38
Şekil 4.10.	(a) Süreksiz çalışma durumunda indüktör akımları (b) Sürekli çalışma durumunda indüktör akımları.....	29
Şekil 4.11.	Akım modu kontrol yöntemi uygulanan bir flyback dönüştürücü.....	30
Şekil 4.12.	Gerilim modu kontrol yöntemi uygulanan bir flyback dönüştürücü.....	30
Şekil 5.1.	Flyback dönüştürücü çıkış geriliminin zamana bağlı değişimi.....	33
Şekil 5.2.	Flyback dönüştürücü (a) Primer akımı (b) Sekonder akımı zamana bağlı değişimi.....	33
Şekil 6.1.	Tasarlanan deneysel sistemin blok şeması.....	34
Şekil 6.2.	Akü kümesi.....	34
Şekil 6.3.	Geliştirilen akü şarj algoritması.....	35
Şekil 6.4.	KOKAM SLPB526495 referans şarj karakteristiği.....	36
Şekil 6.5.	TC4420 entegresi pin yapısı.....	38
Şekil 6.6.	TC4420 entegresi iç yapısı.....	38
Şekil 6.7.	ACS712 entegresi temel bağlantı şeması.....	39
Şekil 6.8.	ACS712 entegresi iç yapısı.....	39
Şekil 6.9.	LV25-P gerilim sensörü blok şeması.....	40
Şekil 6.10.	Uygulama düzeneği.....	40
Şekil 7.1.	Doluluk oranı 0.5 için çıkış geriliminin zamana bağlı değişimi.....	42
Şekil 7.2.	Doluluk oranı 0.5 için dönüştürücünün (a) Giriş gerilimi (b) Akımı zamana göre değişimi.....	42

Şekil 7.3.	Yük değişimine göre (a) Giriş gerilimi (b) Giriş akımı zamana bağlı değişimi.....	43
Şekil 7.4.	Giriş gerilimi değişiminin çıkış gerilimine etkisi (a) Giriş gerilimi (b) Çıkış gerilimi zamana bağlı değişimi.....	43
Şekil 7.5.	Yük değişiminin çıkış gerilimine etkisi (a) Giriş gerilimi (b) Çıkış gerilimi zamana bağlı değişimi.....	44
Şekil 7.6.	MGNİ şarj esnasında akü akımı ve gerilimi zamana bağlı değişimi.....	44
Şekil 7.7.	Tam döngü şarj esnasında akü akımı ve gerilimi zamana bağlı değişimi.....	45



TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Horizon H-60 PDM yakıt hücresi özellikleri.....	14
Tablo 5.1. Flyback dönüştürücü tasarım parametreleri.....	32



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ΔH	: Entalpi değişimi
Δi_{Lp}	: Primer akımı dalgalılığı
ΔS	: Entropi değişimi
α	: Transfer katsayısı
D	: Doluluk oranı
F	: Faraday sabiti
f_{sw}	: Anahtarlama frekansı
G_0	: Gibbs serbest enerjisi
I_L	: Akım limiti
$I_{p(max)}$: Maksimum primer akımı
$I_{s(max)}$: Maksimum sekonder akımı
L_p	: Primer indüktans değeri
L_s	: Sekonder indüktans değeri
n	: Elektron sayısı
N_p	: Primer indüktans sarım sayısı
N_s	: Sekonder indüktans sarım sayısı
P_{H_2}	: Hidrojen kısmi basıncı
P_{H_2O}	: Su kısmi basıncı
P_{O_2}	: Oksijen kısmi basıncı
Q_h	: Elektriksel yük değeri
R_i	: İ direnç
T	: Periyot
T_d	: Sıcaklık (Kelvin)
t_{off}	: Anahtarın kesimde olduğu süre
t_{on}	: Anahtarın iletimde olduğu süre
V_{akt}	: Aktivasyon kayıpları
V_D	: Diyot üstüne düşen ters gerilim
V_h	: Yakıt hücresi potansiyeli
V_{in}	: Giriş gerilimi
V_{kon}	: Konsantrasyon kayıpları
V_{nerst}	: Nerst gerilimi
V_{ohm}	: Omik kayıplar
V_{out}	: Çıkış gerilimi
V_{ref}	: Referans gerilim değeri
V_{sw}	: Anahtarlama elemanı üstüne düşen gerilim
V_{th}	: Tek hücre gerilimi
W_{elk}	: Elektriksel güç

Kısaltmalar

ESL	: Equivalent Series Inductance (Eşdeğer Seri İndüktans)
ESR	: Equivalent Series Resistor (Eğdeğer Seri Direnç)

FPU : Floating Point Unit (Kayan Nokta Birimi)
MCU : Micro Controller Unit (Mikro İşlemci Birimi)
MGNI : Maksimum Güç Noktası İzleyici
PDM : Proton Değişim Membranı



YAKIT PİLİ İLE MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİ KULLANARAK AKÜ ŞARJ DEVRESİ TASARIMI VE UYGULAMASI

ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan hidrojen enerjisinin, kullanım alanlarından biri hidrojen yakıt pilleridir. Hidrojen yakıt pillerinin performansı sıcaklık, hidrojen ve oksijenin kısmi basıncı, elektrolit nem oranı ve yakıt saflığı gibi faktörlere bağlıdır. Bu faktörler hidrojen yakıt pilinin karakteristiğini değiştirerek maksimum güç noktasının değişmesine neden olmaktadır. Hidrojen yakıt pilinde maksimum güç noktasındaki bu değişimin takip edilebilmesi için, maksimum güç noktası izleyici kullanılmaktadır.

Maksimum güç noktası izleyici, hidrojen yakıt pilinin çıkışına bağlanan uygun bir dönüştürücünün maksimum güç noktası izleyici algoritması ile kontrol edilmesi olarak tanımlanabilir. Maksimum güç noktası izleyiciler tüm DA-DA dönüştürücü topolojilerine uygulanabilmektedir. Maksimum güç noktası izleyici uygulamalarında genellikle düşürücü-yükseltici tip DA-DA dönüştürücüler tercih edilmektedir.

Flyback dönüştürücü, yükseltici ve düşürücü olarak çalışabilmesi, devre elemanı sayısının az olması, giriş ve çıkış katı arasında yalıtım olması ve 150W güçlere kadar iyi performans vermesi gibi özelliklere sahiptir.

Yapılan tez çalışmasında hidrojen yakıt pili türleri arasında bulunan proton değişim membranlı yakıt pilinin matematiksel modeli elde edilmiştir. Elde edilen model üzerinden sıcaklık değişiminin, yakıt pilinin çıkış gücü üzerine etkisi incelenmiştir. Sıcaklık etkisiyle değişen maksimum güç noktasının takip edilmesi için Flyback dönüştürücü kullanılarak maksimum güç noktası izleyici tasarlanmış ve Tasarlanan dönüştürücünün MATLAB/Simulink ortamında simülasyonu yapılmıştır.

Daha sonra maksimum güç noktası izleyebilen akü şarj uygulaması için deneysel düzenek kurulmuş, maksimum güç noktası izleyici ve gerilim modu kontrol uygulaması yapılmıştır. Son olarak akü şarj uygulaması yapılarak elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Akü Şarjı, Flyback Dönüştürücü, Hidrojen Yakıt Hücreleri, Maksimum Güç Noktası İzleyici, Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi.

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF BATTERY CHARGER USING A MAXIMUM POWER TRACKING WITH FUEL CELL

ABSTRACT

One of the usage areas of hydrogen energy, which is one of the renewable energy sources, is hydrogen fuel cells. The performance of hydrogen fuel cells depends on factors such as temperature, hydrogen and oxygen partial pressure, electrolyte humidity and fuel purity. These factors affect the fuel cell output characteristics and change the maximum power point. Hence, MPPT (maximum power point tracker) should be used.

The maximum power point tracker can be defined as the control of a converter connected to the output of the hydrogen fuel cell by the maximum power point tracker algorithm. Maximum power point trackers can be applied to all DC-DC Converter topologies. Buck-Boost type DC-DC Converters are generally preferred in maximum power point tracker applications.

The flyback converter has features such as low number of circuit elements, insulation between input and output stages, and good performance up to 150W power.

In this thesis, the mathematical model of the proton exchange membrane fuel cell has been obtained. The effect of temperature change on the output power of the fuel cell was investigated using a mathematical model. The maximum power point tracker has been designed using a Flyback converter to keep track of the maximum power point changing with the effect of temperature. The designed converter was simulated in MATLAB / Simulink environment.

Then, an experimental setup was established for the maximum power tracking battery charger application. On this setup, maximum power point tracker and voltage mode control applications were done. Finally, the MPPT battery charge performed and the results were explained.

Keywords: Battery Charging, Flyback Converter, Hydrogen Fuel Cells, Maximum Power Point Tracker, Proton Exchange Membrane Fuel Cell.

GİRİŞ

Yakın gelecekte günümüze dünya nüfusunun artışıyla birlikte enerji ihtiyacına olan talep artmaktadır. Var olan enerji kaynaklarının bu talebi karşılayamaması nedeniyle, yapılan çalışmalar çevre dostu ve sonsuz olan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir [1].

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında hidrojen enerjisi, ters elektroliz olarak adlandırılan tepkime ile elektrik üretimine katkı sağlamaktadır. Ters elektroliz, hidrojenin havada bulunan oksijen ile tepkimeye girmesi ve bu tepkime sonucunda elektrik ve su açığa çıkması olarak tanımlanabilir. Bu tepkime yakıt hücresi olarak adlandırılan yapı içerisinde gerçekleşir. Yakıt hücresi genel olarak katalizörlerle kaplanmış anot ve katot tabakası arasına, elektrolit olarak adlandırılan iyon geçişini sağlayan tabakanın yerleştirilmesiyle oluşmaktadır. Yakıt hücrelerinin seri ve paralel olarak birbirlerine bağlanması ile yakıt pilleri meydana gelmektedir.

Proton değişim membranlı (PDM) yakıt pili düşük sıcaklıklı yakıt pilleri arasında yer alıp, düşük ve orta güçlü uygulamalar arasında kendine yer bulmaktadır [2-4]. PDM yakıt pili çıkış karakteristiği lineer olmamakla birlikte; sıcaklık, hidrojen ve oksijen kısmi basıncı, elektrolit nem oranı ve yakıt saflığı gibi faktörlerle değişmektedir [5,6]. Genel olarak enerji dönüşüm verimi %60'lara kadar çıkabilen PDM yakıt pilinden maksimum güç elde etmek önemlidir.

PDM yakıt pilinden maksimum güç elde etmek için, maksimum güç noktası izleyici kullanılması gerekmektedir. Maksimum güç noktası izleyici (MGNİ), yakıt pilinin çıkışına bağlanan bir dönüştürücünün MGNİ algoritması ile kontrol edilmesi olarak tanımlanabilir. MGNİ algoritmaları tüm DA-DA dönüştürücü topolojilerine uygulanabilmektedir. Yakıt pilinin çıkış gücüne göre, uygun DA-DA dönüştürücü topolojisi seçilmelidir.

DA-DA dönüştürücülerde çıkış gerilimi, giriş gerilimi ve yük değişimlerine göre değişmektedir. Değişimlere karşı çıkış gerilimini sabit tutmak için geri beslemeli kontrol yöntemleri kullanılmalıdır. Gerilim modu kontrol yönteminde, çıkış gerilimi sürekli izlenerek referans gerilim değeri ile karşılaştırılır. Aradaki fark, hata sinyali olarak kontrolöre aktarılır. Ardından kontrolör dönüştürücünün doluluk oranını değiştirerek çıkış geriliminin referans gerilim değerinde kalmasını sağlar. Gerilim modu kontrol yöntemi, bir geri besleme döngüsüne sahip olduğu için uygulaması kolaydır. Ancak çıkış gerilimindeki değişime, diğer kontrol yöntemlerine karşı daha geç cevap vermektedir.

Yapılan çalışmada, düşük güçlerdeki performansı iyi olan ve giriş-çıkış arasında yalıtım avantajına sahip Flyback dönüştürücü tercih edilmiştir.

Bu çalışmada, ilk önce 60W gücündeki PDM yakıt pilinin matematiksel modellemesi yapılmış ve karakteristik eğrileri MATLAB programı kullanılarak elde edilmiştir. Ardından sıcaklık değişimine bağlı olarak PDM yakıt pilinin karakteristiğindeki değişim irdelenmiştir. Daha sonra MGNİ uygulaması için Flyback dönüştürücü analizi yapılmış ve tasarım parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen tasarım parametreleri ile dönüştürücünün MATLAB/Simulink ortamında simülasyonu yapılmıştır. Maksimum güç noktası izleyebilen akü şarj uygulaması için malzeme seçimi gerçekleştirilmiş, ardından deneysel sistem oluşturulmuştur. Deneysel sistemin MGNİ ve gerilim modu kontrol performansları incelenmiş sonrasında akü şarjı gerçekleştirilerek sonuçlar açıklamıştır.

Çalışmanın birinci bölümünde, hidrojen yakıt hücreleri açıklanmış ve hidrojen yakıt pilleri türlerinden bahsedilmiştir.

İkinci bölümde, PDM yakıt pilinin matematiksel modeli çıkartılmış ve elde edilen modele dayalı karakteristik eğriler elde edilmiştir. Ayrıca sıcaklığın, yakıt pili karakteristiğine etkisi gösterilmiştir.

Üçüncü bölümde, PDM yakıt pilinin sıcaklık ile değişen maksimum güç noktasının takibi için güç noktası izleyici algoritmaları tanıtılmıştır.

Dördüncü bölümde DA-DA dönüştürücüler açıklanmış ve PDM yakıt pili karakteristiği baz alınarak DA-DA dönüştürücü topolojisi seçilmiştir. Seçilen Flyback topolojisinin analizi yapılmış ve çalışma durumları açıklanmıştır.

Beşinci bölümde, Flyback dönüştürücü tasarımı yapılmış ve MATLAB/Simulink ortamında simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.

Altıncı bölümde deneysel sistem açıklanmış ve malzeme seçimleri yapılmıştır.

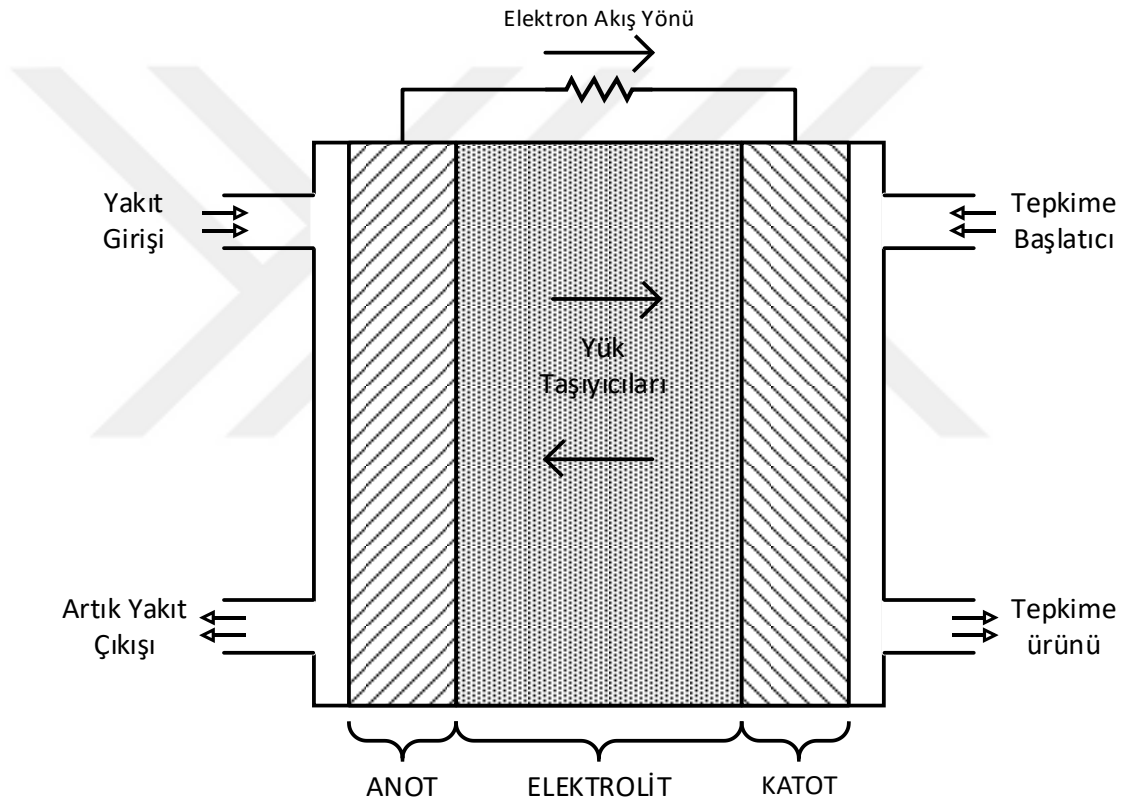
Yedinci bölümde deneysel sistemin sonuçları verilmiştir.

Son bölümde ise deneysel çalışma sonuçları açıklanmış ve yorumlanmıştır.



1.YAKIT HÜCRELERİ

Yakıt hücreleri kimyasal enerjiyi, içten yanmalı motorlar gibi çok aşamalı dönüştürücülerin aksine direkt olarak elektrik enerjisine çevirir. Dönen parçalara sahip olmaması, sessiz çalışması ve kolay imal edilmeleri diğer çok aşamalı dönüştürücülere göre avantaj sağlamaktadır [7].



Şekil 1.1. Yakıt hücresi temel gösterimi

Yakıt hücreleri temel olarak, Şekil 1.1'de görüldüğü gibi üç bileşenden oluşur bunlar; Yakıt elektrotu (Anot), oksitleyici elektrot (Katot) ve bu ikisinin arasında yakıt hücresinin türüne göre elektron veya protonların geçişini sağlayan elektrolittir [7].

Yakıt hücresinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonun basitleştirilmiş hali aşağıdaki gibidir.



Yakıt hücresinin anodunda gerçekleşen reaksiyon (Denklem 1.1) sonrası hidrojen iyonları ve elektronlar ortaya çıkar. Elektronlar bir yük üzerinden geçerek katoda iletilir. Aynı zamanda hidrojen iyonları elektrolitten geçerek, katotta oksijen ile kimyasal tepkimeye girer ve bu tepkime sonucunda su açığa çıkar (Denklem 1.2).

Tek başına bir yakıt hücresi 0.4-0.8 V arası gerilim üretir. Hücreler paralel ve seri bağlanarak istenilen gerilim seviyesi elde edilir. Hücre sıcaklığı, hücre nem durumu ve yakıt basıncı gibi parametreler yakıt hücrelerinin performansını etkileyen faktörlerdendir.

Yakıt pillerinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar ve oluşan ürün yakıt pillerinin türüne göre farklılık göstermektedir.

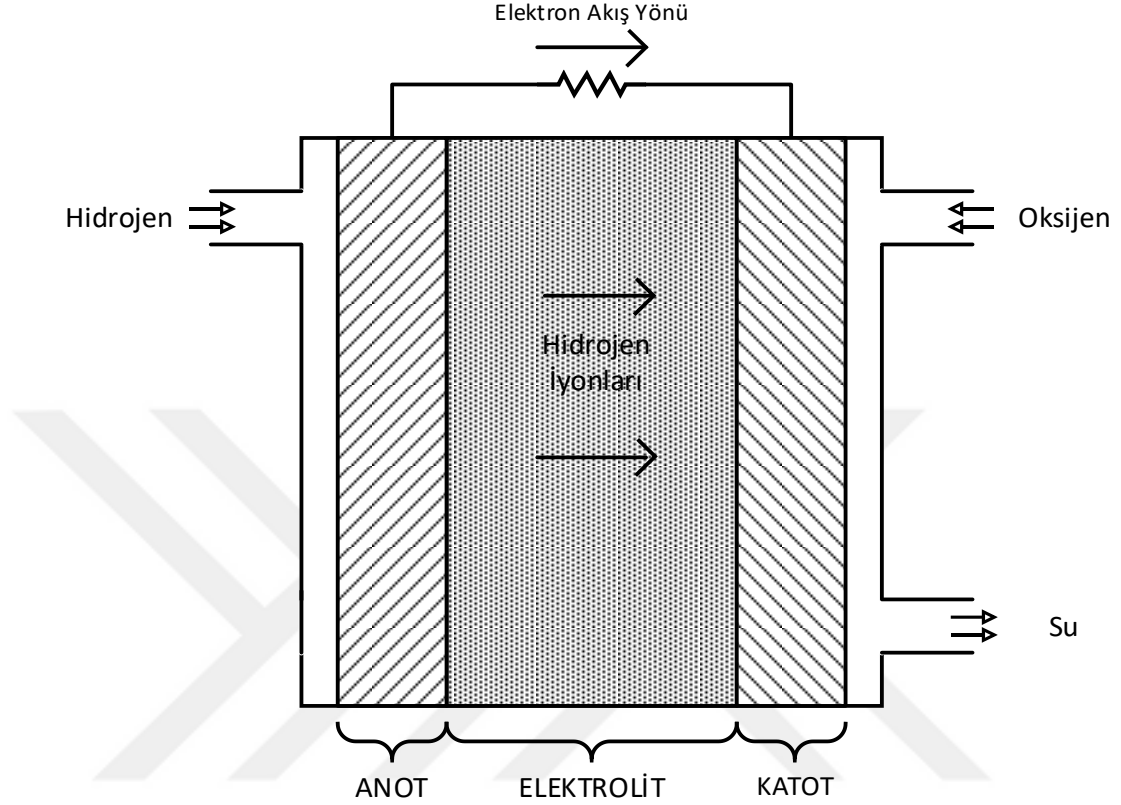
Yakıt pilleri, kullanılan elektrolit türüne göre beş ana grupta incelenebilir.

- 1- Fosforik Asit Yakıt Hücresi
- 2- Ergimiş Karbonat Yakıt Hücresi
- 3- Katı Oksit Yakıt Hücresi
- 4- Alkali Yakıt Hücresi
- 5- Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi

1.1. Fosforik Asit Yakıt Hücresi

Fosforik asit yakıt hücreleri, elektrolit olarak teflon ile birbirlerine tutturulmuş silisyum karbür taneciklerinden oluşan bir tabaka üzerinde dağıtılmış fosforik asitten ve platin kaplı karbon elektrotlardan oluşmaktadır. Elektrolit olarak fosforik asit kullanılması yakıt hücresinin çalışma sıcaklığının 160-220 santigrat derece aralığında olmasına neden olmaktadır. Fosil yakıtlardan veya hidrokarbonlardan üretilen yüksek saflıkta hidrojen gazı yakıt olarak kullanılmaktadır. Tek hücre gerilimi 0.6-0.8 V arasında olup ihtiyaca göre hücrelerin seri ve paralel olarak kullanılması ile daha yüksek gerilimler elde edilebilmektedir. Tek başına verimi %35-%40 arasındadır. Kojenerasyon teknolojisi ile verimi %80'e kadar çıkmaktadır. İlk ticarileştirilmiş hidrojen yakıt pili olmakla beraber diğer yakıt hücrelerine nazaran hacim-güç yoğunluğu veya ağırlık-güç yoğunluğu kötü olduğu için büyük ve ağırdırlar, genellikle

dağıtılmış üretim için kullanılmaktadır. Fosforik asit yakıt hücresinin temel görünümü Şekil 1.2 de görülmektedir.



Şekil 1.2. Fosforik asit yakıt hücresi temel görünümü

Fosforik asit yakıt hücresinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir.

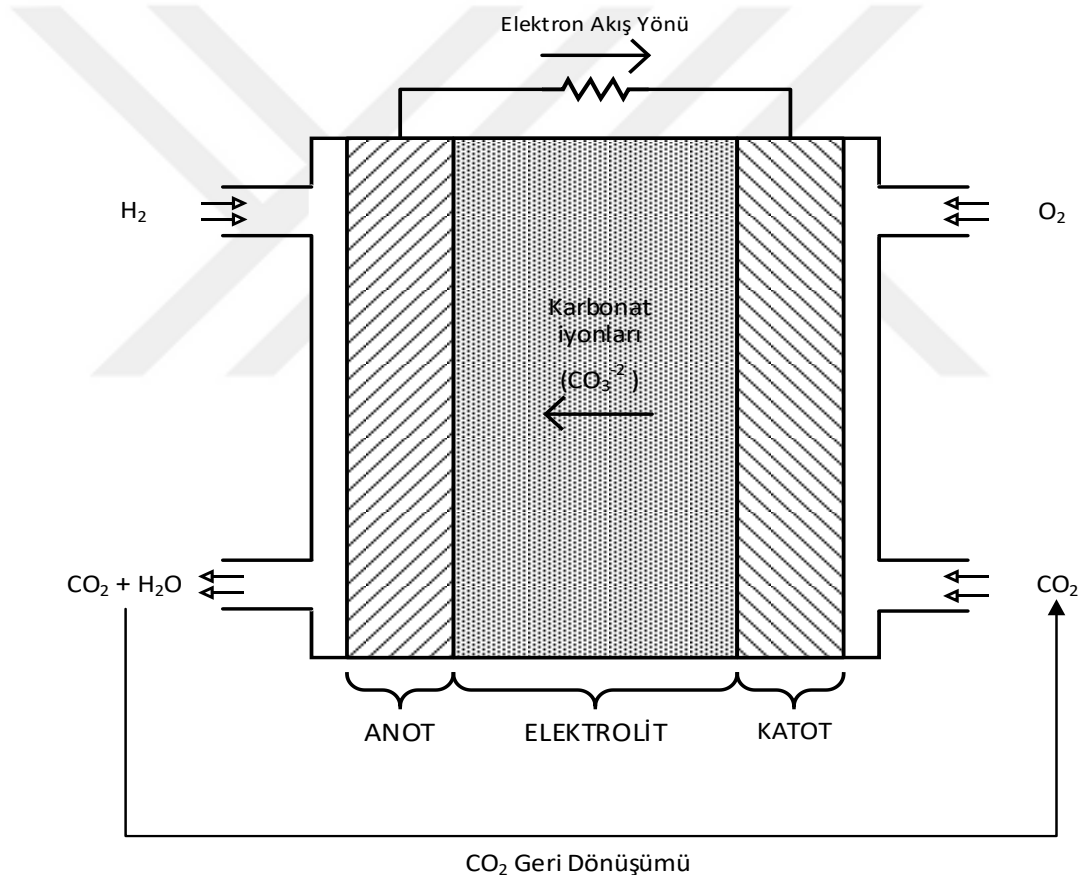


1.2. Ergimiş Karbonat Yakıt Hücresi

Ergimiş karbonat yakıt hücresi, elektrolit olarak lityum alüminyum oksit tabaka üzerinde ergimiş karbonat ve nikel-krom veya nikel-alüminyum alaşım elektrotlardan oluşmaktadır. Elektrolit olarak kullanılan ergimiş karbonatın düşük sıcaklıklarda kötü iletkenlik göstermesi, yüksek sıcaklıklarda ise materyallerin bozulma hızının artışı ve elektrolit buharlaşması meydana gelmesi nedenleriyle çalışma sıcaklığı 580 ile 700 derece arasındadır. Çalışma sıcaklığının yüksek olması, düşük sıcaklıkta çalışan yakıt hücrelerine kıyasla pahalı olan platin elektrotlar yerine daha ucuz olan nikel bazlı

elektrotların kullanımına olanak sağlamaktadır. Yüksek saflıktaki hidrojenin yanı sıra harici bir dönüştürücüye ihtiyaç duymadan, Kömür gazı, Metan, Biyogaz ve Karbon Monoksit gibi karbon bazlı bileşikler yakıt olarak kullanılabilir.

Hücre gerilimi 0.7 ile 0.8 V arası olan yakıt hücresi tek başına kullanıldığında %45-%55 arası verime sahiptir. Kojenerasyon teknolojisi ile verimi %60-%70 arasındaki değerlere çıkabilmektedir. Yakıt hücreleri arasında en çok pazar payına sahip olan ergimiş karbonat yakıt hücresi, genellikle kömür santrallerinde ve su arıtma tesislerinde kullanılmaktadır. Ergimiş karbonat yakıt hücresinin temel görünümü Şekil 1.3'te görülmektedir.



Şekil 1.3. Ergimiş karbonat yakıt hücresi temel görünümü

Ergimiş Karbonat Yakıt Hücresinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir.

Yakıt olarak Hidrojen kullanıldığında,



Yakıt olarak Metan kullanıldığında,



1.3. Katı Oksit Yakıt Hücresi

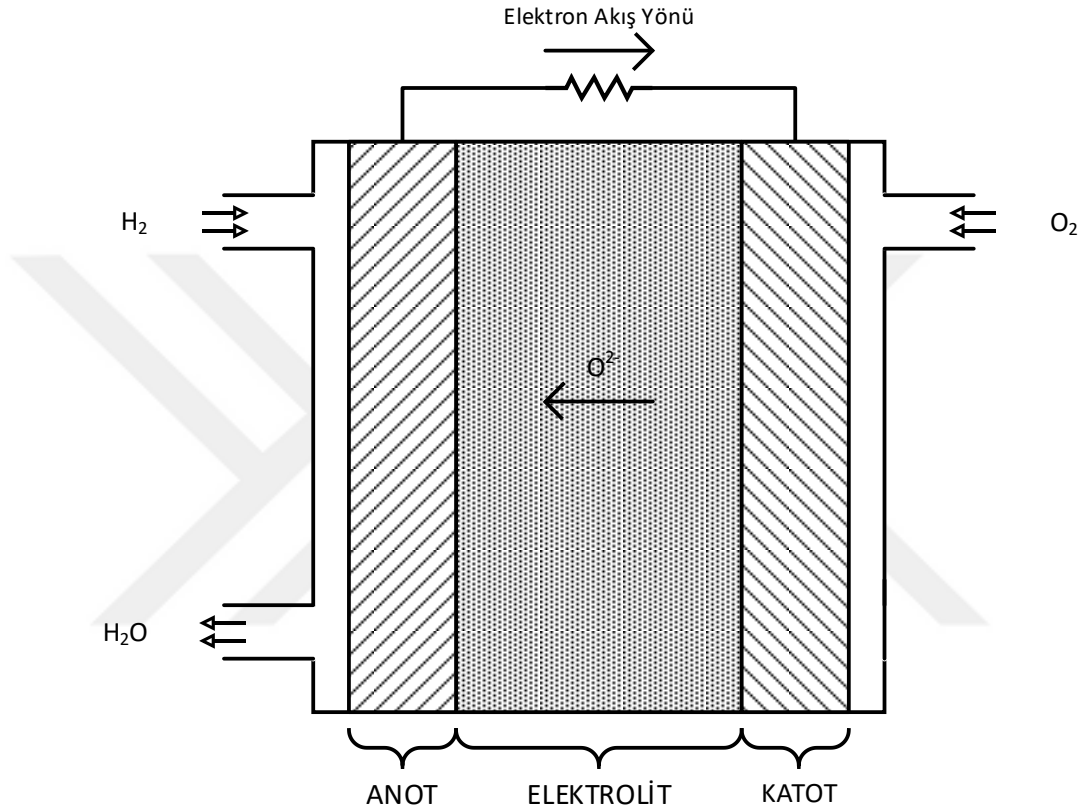
Katı oksit yakıt hücresi, elektrolit olarak itriya bileşeni ile dengelenmiş zirkonyum seramik ve kobalt-zirkonyum veya nikel-zirkonyum kompozit materyal elektrotlardan oluşmaktadır. Katı elektrolit kullanılması, sıvı elektrolit kullanılan yakıt hücrelerinin etkilendiği sıvı korozyonundan etkilenmemesini sağlamaktadır. Çalışma sıcaklıkları, yakıt hücrelerinin arasında en yüksek değer olan 600 ile 1000 santigrad derece arasındadır. Yüksek sıcaklıklarda çalışması, yakıt olarak saf hidrojen haricinde hidrokarbonlarında kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Tek başına kullanıldığında %40'ın altında olan verimleri, gaz türbini ile hibrit kullanıldığında %75'e kadar çıkabilmektedir. Gaz türbini ile hibrit kullanılması 100MW seviyesinde güç üretmesini sağlamaktadır, bu güç yakıt hücreleri arasındaki en yüksek değerdir. Uygulama alanları genellikle elektrik santralleridir. Katı oksit yakıt hücresinin temel görünümü Şekil 1.4'te görülmektedir.

Katı Oksit Yakıt Hücresinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir.

Yakıt olarak Hidrojen kullanıldığında,



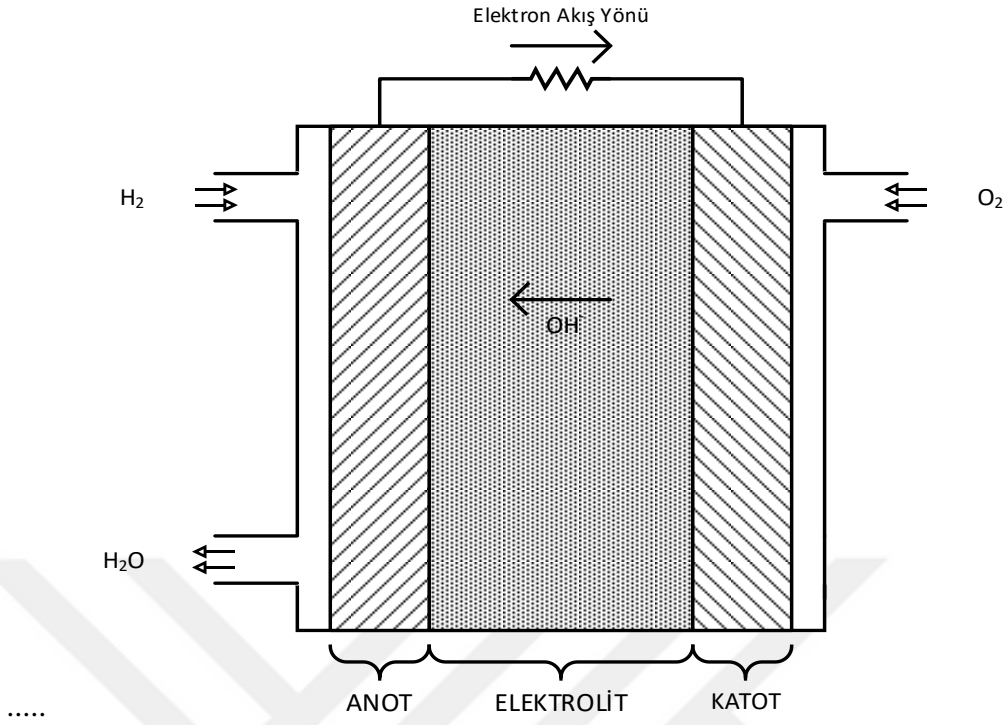
Yakıt olarak Metan kullanıldığında,



Şekil 1.4. Katı oksit yakıt hücresi temel görünümü

1.4. Alkali Yakıt Hücresi

Alkali yakıt hücresi, elektrolit olarak su ile karışık sıvı potasyum hidroksit ve karbonplastik bazlı elektrotlardan oluşmaktadır. Çalışma sıcaklıkları, potasyum hidroksit elektrolitin çözelti yüzdesine göre 60 ile 250 derece arasındadır. Yakıt olarak saf hidrojen ve oksitleyici olarak saf oksijen kullanılmaktadır. %60 a kadar çıkan verimleriyle, uzay gemilerinde birincil enerji ve su kaynağı olarak yer bulmuştur. Alkali yakıt hücresinin temel görünümü Şekil 1.5'te görülmektedir.



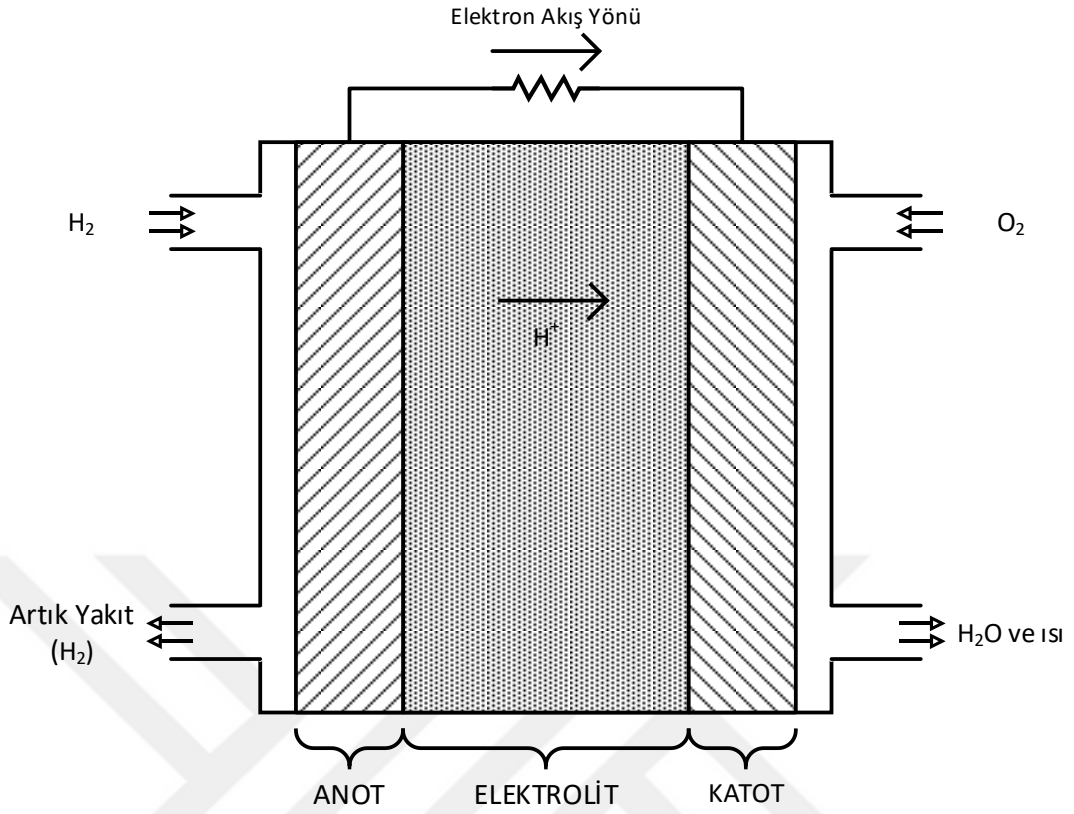
Şekil 1.5. Alkali yakıt hücresi temel görünümü

Alkali Yakıt Hücresinde gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir.



1.5. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi

Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi veya genel adıyla Polimer Elektrolit Yakıt Hücresi, elektrolit olarak porfluorasülfonik asit veya ticari ismiyle nafion ve platin ile kaplanmış karbon bazlı elektrotlardan oluşmaktadır. Çalışma sıcaklığı 50 ile 100 derece arasında değişen yakıt pili bu özelliği ile hızlı başlama ve elektriksel yük değişimine hızlı cevap verme özelliğine sahiptir. Yakıt olarak saf hidrojen kullanılmaktadır. Düşük sıcaklıklarda çalışması ve %60'a kadar verime sahip bu yakıt hücresi elektrikli araçlardan portatif uygulamalara kadar birçok alanda kendine yer bulmaktadır. Proton değişim membranlı yakıt hücresi temel görünümü Şekil 1.6'da görülmektedir.



Şekil 1.6. Proton değişim membranlı yakıt hücresi temel görünümü

Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresinde gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir.



2. PDM YAKIT HÜCRESİNİN MATEMATİKSEL MODELİ VE KARAKTERİSTİK ERĞİLERİ

PDM yakıt hücresinde gerçekleşen kimyasal reaksiyon sonucunda enerji açığa çıkar. Reaksiyon sonrası, sistemdeki toplam enerji değişimi gibbs serbest enerjisi değişimi olarak adlandırılır. Reaksiyon sonucu ortaya çıkan elektriksel güç, sabit basınç ve sabit sıcaklık altında gibbs serbest enerjisindeki değişime eşittir.

$$W_{elk} = G_0 \quad (2.1)$$

Gibbs serbest enerjisi, sistemin Entalpi (H) ve Entropi (S) değişimine bağlı olarak farklı sıcaklıklar (T_d) için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$G_0 = \Delta H - T_d \Delta S \quad (2.2)$$

Yakıt hücresinde ortaya çıkan elektriksel güç, yakıt hücresinde taşınan elektrik yük miktarı ile hücresinin potansiyel farkının çarpımıdır.

$$W_{elk} = Q_h \cdot V_h \quad (2.3)$$

Yakıt hücresinde taşınan elektrik yük miktarı, 1 mol hidrojenin tepkimeye girmesiyle ortaya çıkan elektron sayısı ve Faraday sabiti ile yazılabilir.

$$Q_h = F \cdot n \quad (2.4)$$

Elde edilen eşitlik Denklem 2.3'te yerine yazılırsa,

$$G_0 = F \cdot n \cdot V_h \quad (2.5)$$

Elde edilir, hücre gerilimi ise aşağıda verildiği şekilde elde edilir.

$$V_h = \frac{G_0}{F \cdot n} \quad (2.6)$$

Böylelikle tek bir hücre geriliminin, reaksiyon sonucu gibbs serbest enerji değişimine ve 1 mol hidrojenin reaksiyona girmesi sonucu hücredeki hareketli elektronların yük değerine bağlı denklemini ortaya çıkar.

25 santigrad derece sıcaklıkta Denklem 1.17'de gerçekleşen reaksiyon sonucu oluşan gibbs serbest enerjisi -237.3 kJ/mol dür [8]. Değerin negatif olması reaksiyonun dışarıdan bir müdahale gerekmeksizin kendiliğinden gerçekleştiğini belirtmektedir. Değerler Denklem 2.6'da yerlerine konulduğunda hücre gerilimi 1.2288 volt bulunur. Bu değer Nerst Gerilimi olarak ta adlandırılır.

Farklı basınç ve sıcaklık değerleri için Nerst Gerilimi aşağıdaki gibi yazılabilir [9].

$$V_{nerst} = -\frac{G_0}{2.F} - \frac{R.T_d}{2.F} \ln\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} \cdot \sqrt{P_{O_2}}}\right) \quad (2.7)$$

Genel olarak yakıt hücresinin uçlarına iletilen gerilim, kimyasal reaksiyon sonucunda ortaya çıkan Nerst Geriliminden küçüktür. Bunun nedeni reaksiyon sırasında yakıt hücresi içinde yaşanan kayıplardır. Bu kayıplar üç başlıkta incelenebilir.

1. Aktivasyon kayıpları

Aktivasyon kayıpları tepkime başlangıcında anot ve katotta meydana gelen kayıplardır [10]. Tafel eşitliği ile ifade edilir.

$$V_{akt} = \frac{R.T_d}{n.a.F} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (2.8)$$

Tafel eşitliği anot ve katottaki akım yoğunluk değişiminin akım yoğunluğundan küçük olduğu durumlarda geçerlidir.

2. Konsantrasyon kayıpları

Kimyasal reaksiyon sırasında reaksiyona giren ve reaksiyon sonucu ortaya çıkan ürünlerin elektrot ve elektrolit yüzeyindeki dağılım ve akışı ile ortaya çıkan kayıplardır.

$$V_{kon} = \frac{R.T_d}{nF} \ln\left(\frac{I_L}{I_L - I}\right) \quad (2.9)$$

Denklem 2.9 da görüldüğü üzere konsantrasyon kayıpları elektrot ve elektrolit yüzeyindeki Akım yoğunluğu limiti (I_L), akım yoğunluğu (I) ve sıcaklığa (T) bağlıdır.

3. Omik kayıplar

Elektrolitin iyon geçirme direnci ve elektrot direncinin ortaya çıkardığı kayıplardır.

$$V_{ohm} = R_i \cdot I \quad (2.10)$$

Olarak ifade edilebilir, burada R_i dirençlerin toplamını ifade etmektedir. Literatürde $m\Omega$ değerlerinde alınmaktadır [11,12].

2.1. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresinin Gerilim-Akım ve Güç-Akım Eğrileri

Önceki bölümde görüldüğü üzere PDM yakıt hücresi hücre sıcaklığı, hidrojen kısmi basıncı ve oksijen kısmi basıncı gibi değişkenlere bağlı olarak performans değişiklikleri göstermektedir. Yapılan çalışma için MATLAB ortamında 60W gücünde PDM yakıt hücresi modellenmiştir. Modellenen yakıt hücresinde piyasada ticari olarak satılan Horizon markasının 60W güç değerindeki H-60 PDM yakıt pili verileri kullanılmıştır. Horizon H-60 PDM Yakıt Pili bilgileri Tablo 2.1 de görülmektedir.

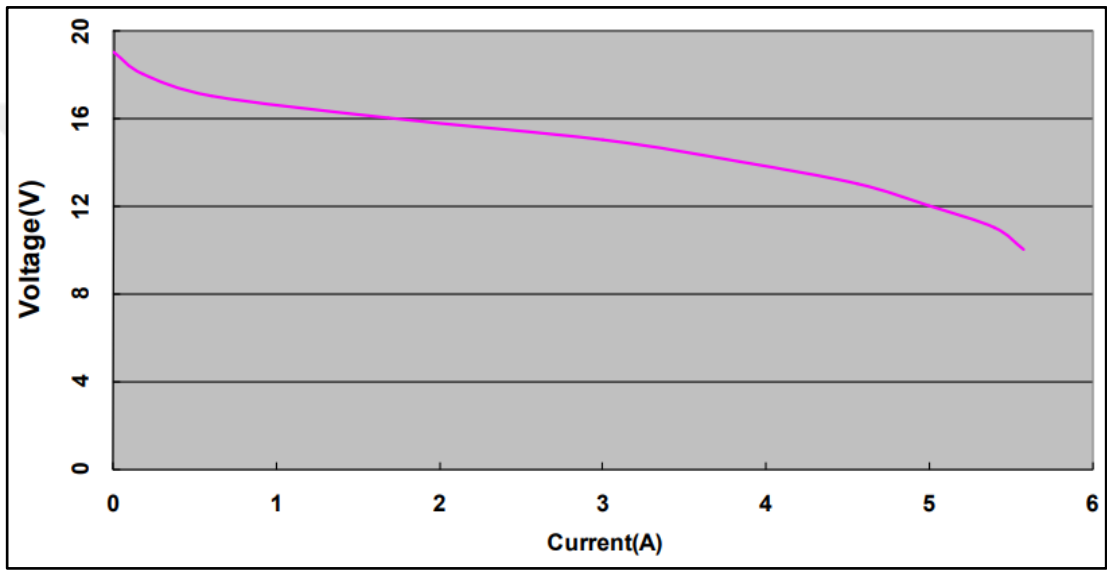
Tablo 2.1. Horizon H-60 PDM yakıt hücresi özellikleri

Hücre Tipi	PDM
Hücre Sayısı	20
Nominal Güç	60 W
Performans	12 V @ 5 A
Düşük Gerilim Koruması	10 V
Yüksek Akım Koruması	12 A
Maksimum Hücre Sıcaklığı	65°C
Hidrojen Kısmi Basıncı	0,4441 ATM
Oksijen Kısmi Basıncı	0,2095 ATM
Soğutma Tipi	Doğal Soğutma

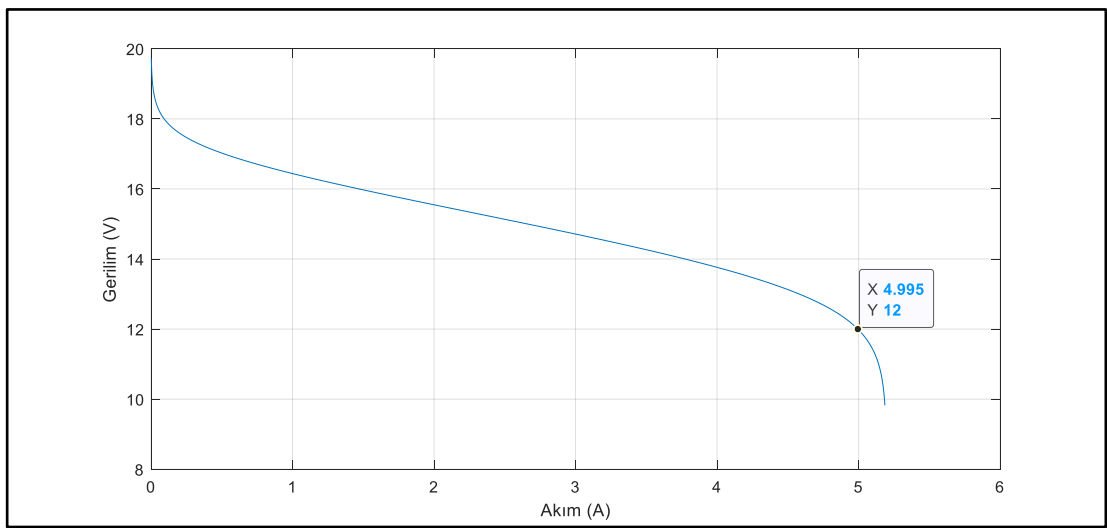
PDM yakıt pilinin tek hücre gerilimi (V_{th}), Nerst geriliminden hücre kayıplarının çıkarılmasıyla elde edilir.

$$V_{th} = V_{nerst} - V_{akt} - V_{kon} - V_{ohm} \quad (2.11)$$

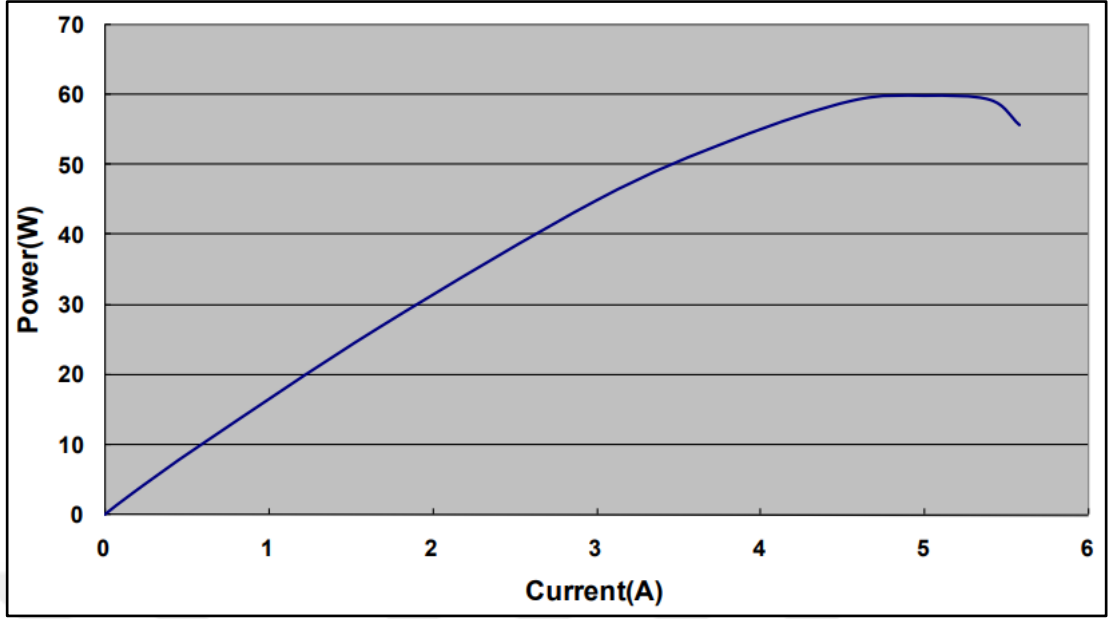
Yakıt pilinin tek hücre gerilimi, sabit sıcaklık ve basınç altında hücre akımı ile değişmektedir. Yakıt pilinin karakteristik eğrilerinin elde edilmesi için Denklem 2.11’de verilen eşitlik MATLAB m-file ortamına aktarılmıştır. Denklem içerisindeki akım bilinmeyen, $h = 0.0001$ adım değeriyle arttırılarak denklem çözülmüş ve her bir adım için gerilim değeri elde edilmiştir. Elde edilen akım ve gerilim bilgileri ile Gerilim-Akım ve Güç-Akım eğrileri oluşturulmuştur. 25°C de Horizon H-60 yakıt pilinin ve elde edilen modelin Gerilim-Akım ve Güç-Akım eğrileri Şekil 2.1, Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4 de görülmektedir.



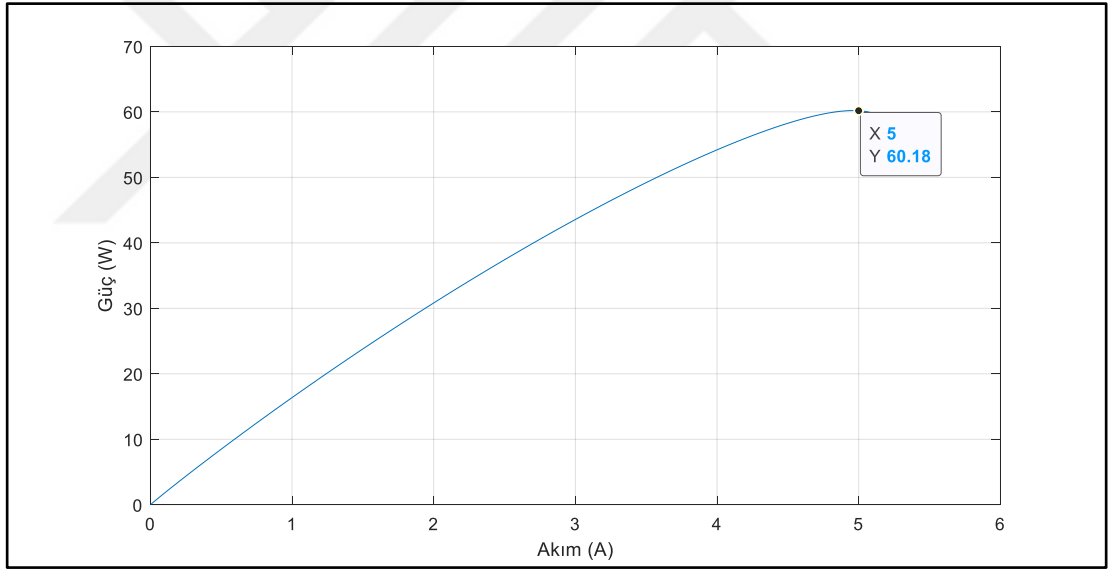
Şekil 2.1. Horizon H-60 gerilim-akım karakteristik eğrisi



Şekil 2.2. Model gerilim-akım karakteristik eğrisi

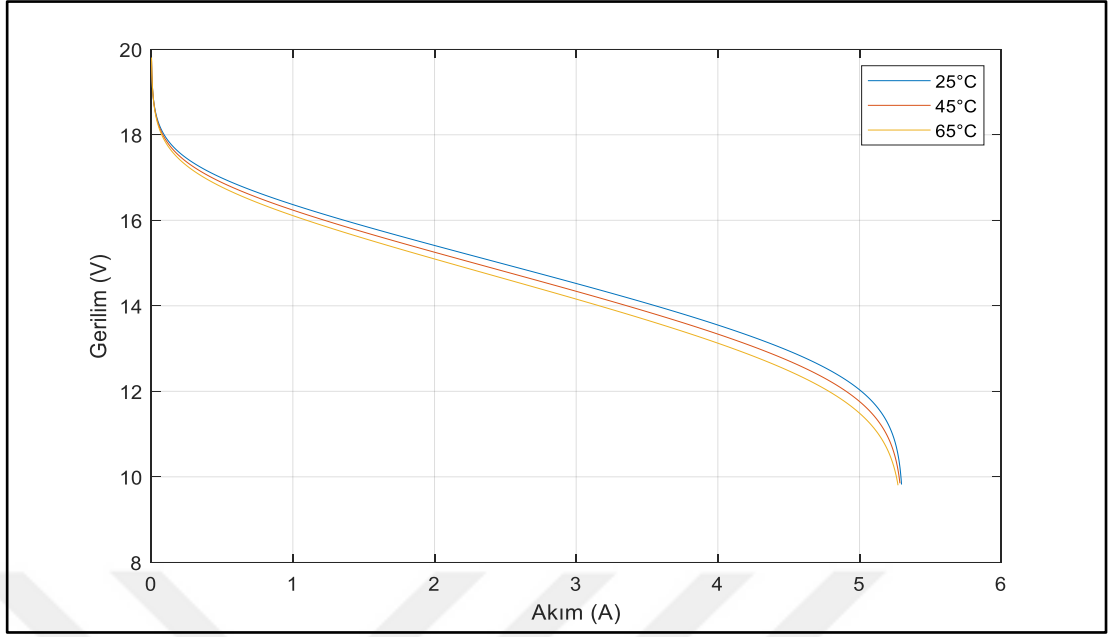


Şekil 2.3. Horizon H-60 güç-akım karakteristik eğrisi

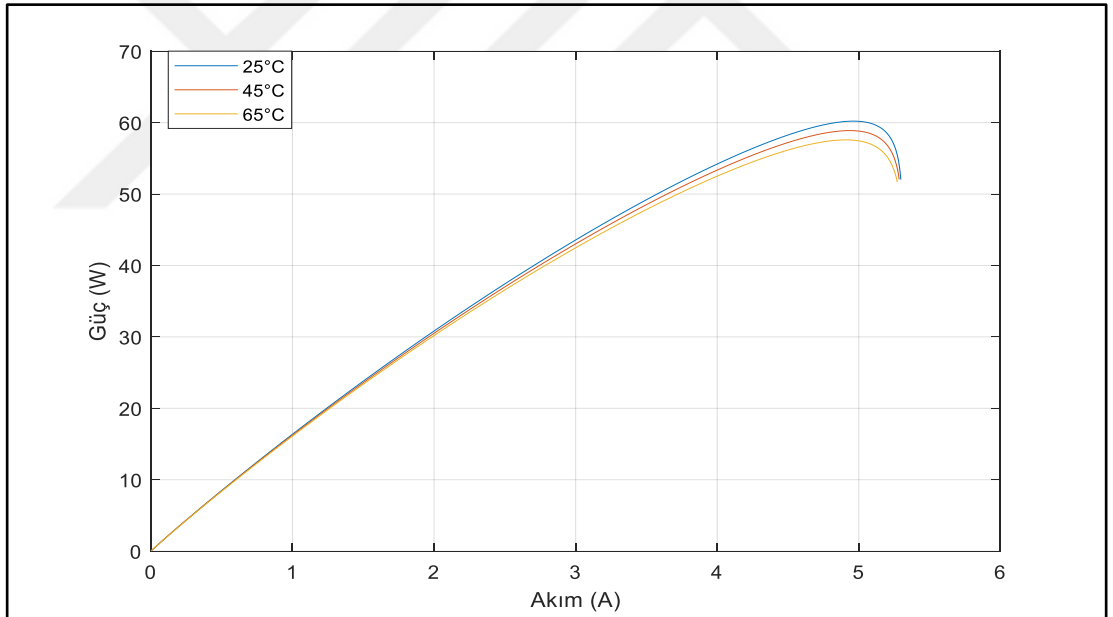


Şekil 2.4. Model güç-akım karakteristik eğrisi

Elde edilen modele dayalı akım-gerilim ve güç-akım eğrilerinin 25°C, 45°C ve 65°C hücre sıcaklıklarındaki değişimi Şekil 2.5 ve Şekil 2.6’da görülmektedir.



Şekil 2.5. Gerilim-akım karakteristik eğrisinin sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 2.6. Güç-akım karakteristik eğrisinin sıcaklığa bağlı değişimi

Elde edilen eğrilere bakıldığında, sıcaklık arttıkça güç düşmekte ve sabit gerilimde yakıt pilinin verdiği akım değeri azalmaktadır. Güç değişimi değeri, popüler yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş panellerinin ışınlama bağlı güç değişimi değerinden çok daha az olsa da yüke maksimum güç iletilmesi gereken durumlarda yakıt hücrelerinde maksimum güç noktası izleyici kullanılması gerekmektedir.

3. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİ

PDM Yakıt hücresinin ürettiği güç; hücre sıcaklığı, yakıt ve oksitleyici basıncı ve bunların elektrotlar üzerinde homojen bir şekilde dağılması, elektrolit yüzeyinin nemliliği gibi etkenlere bağlıdır. Ayrıca düşük sıcaklıkta çalışan yakıt hücrelerinde saf olmayan yakıt kullanımı, elektrot katalizör yüzeylerinin işlevselliğinin azalmasına ve güç kaybına neden olmaktadır. PDM yakıt hücresinden maksimum gücü elde etmek için maksimum güç noktası izleyicilere ihtiyaç vardır. Maksimum güç noktası izleyici, Yakıt pilinin çıkışına bağlanan bir dönüştürücünün MGNİ algoritması ile kontrol edilmesi olarak tanımlanabilir. MGNİ yakıt pilini maksimum güç noktasında çalıştırarak yüke maksimum güç aktarımını sağlar.

MGNİ algoritmaları Dolaylı Kontrollü ve Doğrudan Kontrollü olarak iki gruba ayrılabilir.

3.1. Dolaylı Kontrollü MGNİ Algoritmaları

Bu algoritmalar sistemden akım ve gerilim gibi bilgileri okumadan deneysel verileri, yakıt hücresinin çıkış karakteristiği ile karşılaştırarak, hücrenin akımı ve gerilimi belirleyen algoritmalarıdır.

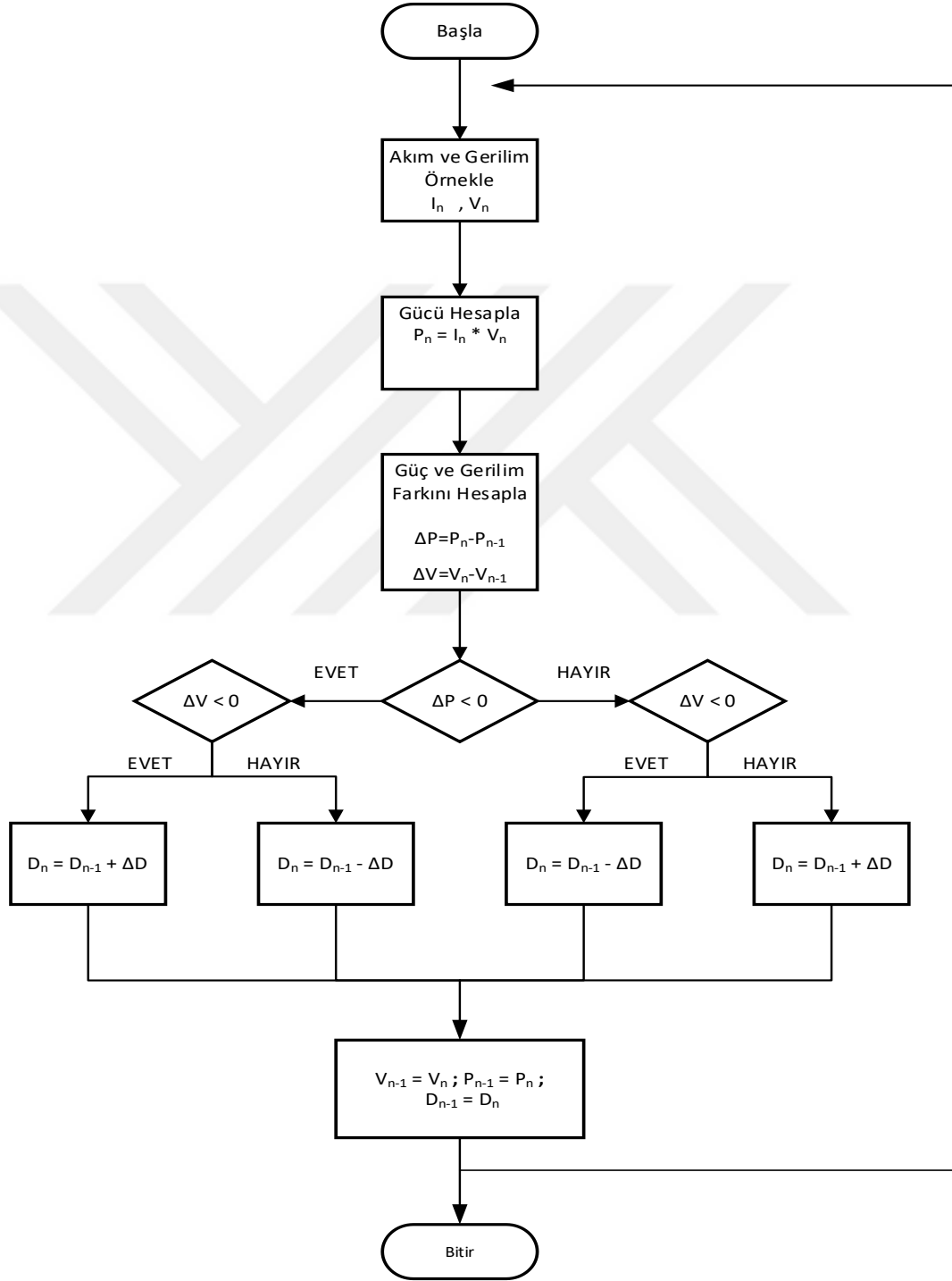
3.2. Doğrudan Kontrollü MGNİ Algoritmaları

Bu algoritmalar gerçek zamanlı akım ve gerilim ölçümleriyle yakıt pilinden maksimum gücü elde etmek için gerekli maksimum güç noktasını izleyen algoritmalarıdır.

3.2.1. Değiştir ve Gözle algoritması

Değiştir ve Gözle algoritması, basitliği bakımından en çok kullanılan algoritmalarından biridir. Öncelikle yakıt pilinin akım ve gerilim bilgileri okunur ve bu bilgiler ile güç değeri hesaplanır. Dönüştürücünün doluluk oranı değiştirilerek yakıt pilinin çalışma geriliminin değiştirilmesi sağlanır. Bu işlem sonucunda yakıt pilinin gücü gözlenir. Yakıt pilinin gücünde artış gerçekleşmişse doluluk oranı aynı yönde değiştirilir,

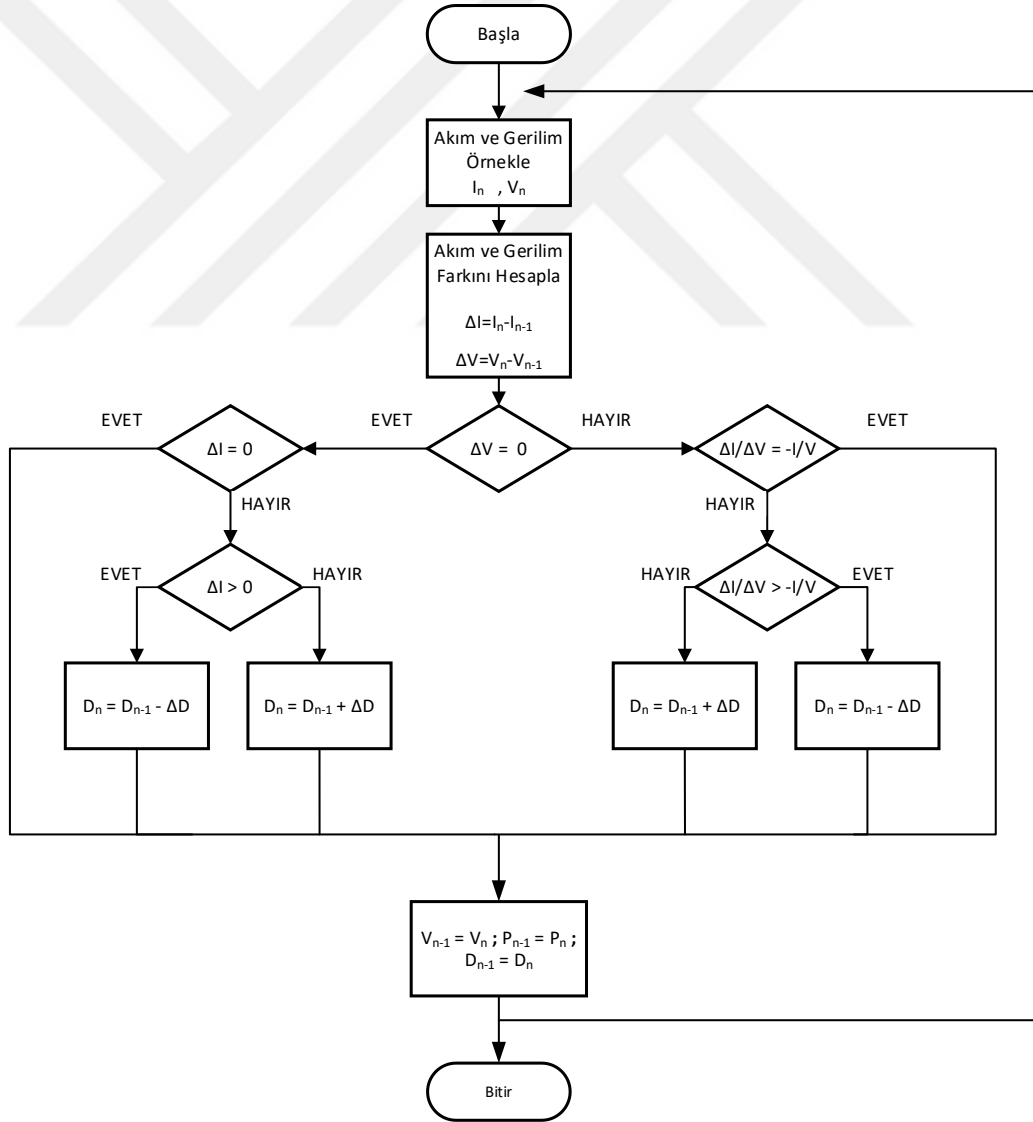
azalma gerçekleşmişse doluluk oranı ters yönde değiştirilir. Algoritma toplam güç değişiminin sıfır olduğu noktaya ulaşmaya çalışır. Değiştir ve Gözle algoritmasının denetim ve çıkış parametresi akım, gerilim ve doluluk oranı olabilir. Değiştir ve Gözle algoritmasının akış şeması Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Değiştir ve Gözle algoritması akış şeması

3.2.2. Artan İletkenlik algoritması

Artan İletkenlik Algoritması yakıt pilinin maksimum güç noktasının, Güç-Akım eğrisinin eğiminin sıfır olduğu nokta olduğunu kabul eder. Yakıt pilinin akım ve gerilim değerleri okunarak güç değeri hesaplanır. Doluluk oranı değiştirilerek güç ve akım değerindeki değişim gözlenir. Daha sonra dP/dI kısmi türev işlemi gerçekleştirilerek sonucun pozitif veya negatif olmasına bakılır. Sonuç pozitif ise yakıt pili maksimum güç noktasının solunda, negatif ise sağında çalıştığı anlaşılır. Algoritma türev ifadesinin sıfır olduğu noktaya ulaşmaya çalışır. MGNİ algoritmasının çıkış parametreleri akım, gerilim ve doluluk oranı olabilir. Artan İletkenlik algoritmasının akış şeması Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Artan İletkenlik algoritması akış şeması

4. DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

DA-DA dönüştürücüler girişlerine uygulanan bir DA gerilimi başka bir gerilim seviyesine yükselten veya alçaltan, en az bir kontrollü güç anahtarına (transistör, mosfet, ıgbt) ve enerji depolama elemanlarına (kapasitör, indüktör) sahip devrelerdir [13].

Dönüştürme işlemi yarı iletken güç anahtarının belirli sürelerle iletme ve kesime girmesiyle gerçekleşir. İletim süresince enerji depolama elemanında biriken enerji, kesim süresinde yüke aktarılır bu şekilde dönüştürme işlemi gerçekleştirilir. Kontrollü anahtar, genellikle sabit frekansta farklı darbe genişlikleriyle kontrol edilir. Bu yöntemde darbe genişlik modülasyonu denmektedir. Bir periyot boyunca üretilen darbe genişliğinin (t_{on}), periyoda (T) bölünmesine Doluluk Oranı denir. “D” ile gösterilen bu oran 0 ile 1 arasında değer almaktadır [13].

DA-DA dönüştürücülerde çıkış gerilimi, doluluk oranı değiştirilerek ayarlanabilir.

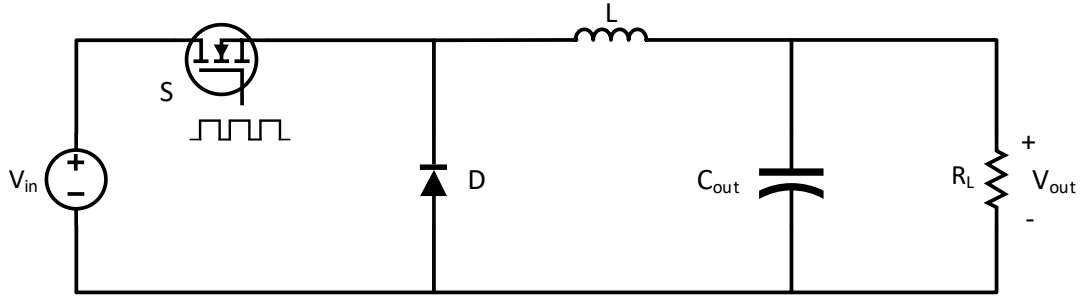
4.1. DA-DA Dönüştürücü Topolojileri

Literatürde farklı DA-DA dönüştürücü topolojileri bulunmaktadır. Bu topolojiler kendi aralarında yalıtımlı ve yalıtımsız olarak ayrılabilir. Yalıtımlı dönüştürücülerde giriş ve çıkış arasına yerleştirilen yüksek frekanslı transformatör yalıtımı sağlar. Transformatör, giriş ve çıkış gerilimlerinin polaritesinin kolayca ayarlanmasına ve sağladığı yalıtımla hassas yüklerin korunmasına olanak sağlar [14].

4.1.1. Yalıtımsız dönüştürücüler

4.1.1.1. Buck (düşürücü) dönüştürücü

Şekil 4.1’de devre şeması verilen Buck dönüştürücü indüktör ve kapasitör olmak üzere iki enerji depolama elemanına, bir kontrollü anahtara ve diyota sahiptir.



Şekil 4.1. Buck dönüştürücü devre şeması

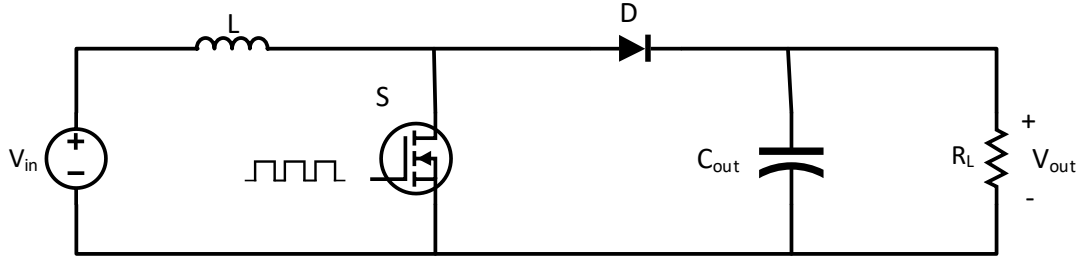
S anahtarı iletimdeyken, kaynak çıkışı besler ve kapasitör ve indüktöre enerji aktarır. S anahtarı kesimdeyken, kapasitör ve indüktörde biriken enerji çıkışı besler.

Denklem (4.1)'de görüldüğü üzere, Buck dönüştürücünün çıkış gerilimi giriş geriliminden her zaman küçük olmaktadır.

$$V_{out} = D \cdot V_{in} \quad (4.1)$$

4.1.1.2. Boost (yükseltici) dönüştürücü

Boost dönüştürücü şekil 4.2'de görüldüğü gibi indüktör, kapasitör, kontrollü anahtar ve diyottan oluşmaktadır.



Şekil 4.2. Boost dönüştürücü devre şeması

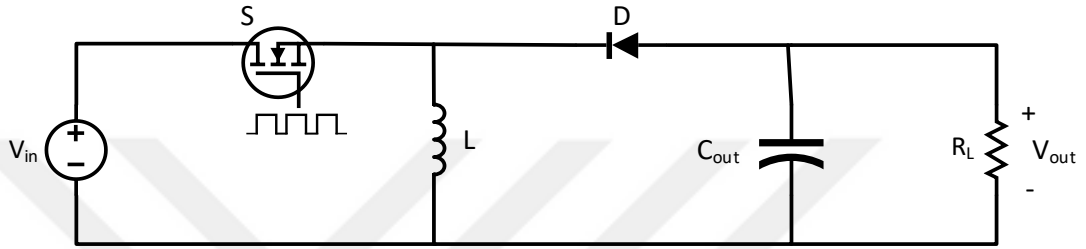
S anahtarı iletimde iken kaynak indüktörü enerjilendirir ve kapasitör üzerinden yük beslenir, S anahtarı kapandığında yük indüktör ve kaynak tarafından beslenir. Boost dönüştürücünün çıkış geriliminin (V_{out}), giriş gerilimi (V_{in}) ve doluluk oranına (D) bağlı ifadesi Denklem (4.2)'de görülmektedir.

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{(1-D)} \quad (4.2)$$

4.1.1.3. Buck-boost (düşürücü-yükseltici) dönüştürücü

Buck-Boost dönüştürücü, düşürücü ve yükseltici olarak çalışabilmektedir. S anahtarı iletimde iken kaynak indüktörü besler ve enerjilendirir, S anahtarı kesimde iken yük indüktör tarafından beslenir. Buck-Boost dönüştürücünün çıkış gerilimi giriş gerilimine göre ters polaritededir.

Buck-Boost dönüştürücünün devre şeması şekil 4.3'te görülebilir.



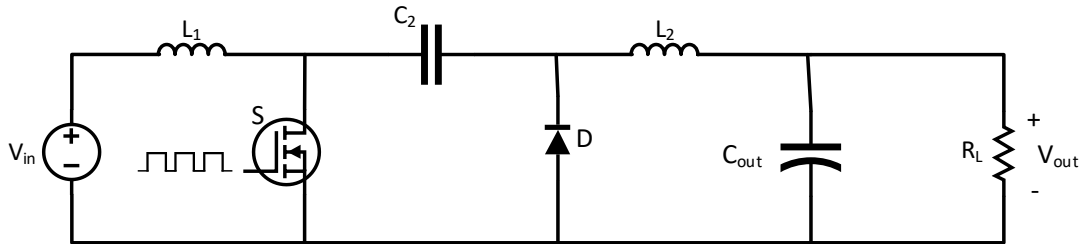
Şekil 4.3. Buck-boost dönüştürücü devre şeması

Denklem (4.3)'te görüldüğü üzere Buck-Boost dönüştürücü D değerinin 0.5'ten küçük olduğu durumlarda düşürücü, D değerinin 0.5'ten büyük olduğu durumlarda yükseltici olarak çalışmaktadır.

$$V_{out} = -V_{in} \left(\frac{D}{1-D} \right) \quad (4.3)$$

4.1.1.4. Cuk dönüştürücü

Cuk dönüştürücü, düşürücü ve yükseltici olarak çalışabilmektedir. Buck-boost dönüştürücüdeki gibi çıkış gerilimi negatiftir. Kaynak ve yüke seri bağlı iki indüktöre sahip olması kaynak ve yük akımlarında dalgalılığın az olmasını sağlar. Cuk dönüştürücünün devre şeması şekil 4.4'te görülebilir.



Şekil 4.4. Cuk dönüştürücü devre şeması

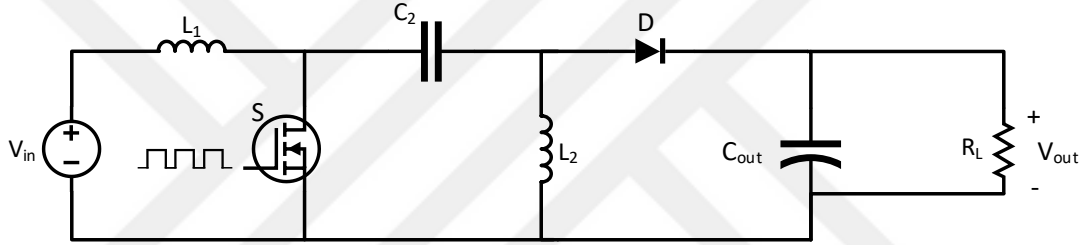
Cuk dönüştürücünün çıkış geriliminin (V_{out}), giriş gerilimi (V_{in}) ve doluluk oranına (D) bağlı ifadesi Denklem (4.4)'te görülmektedir.

$$V_{out} = -V_{in} \left(\frac{D}{1-D} \right) \quad (4.4)$$

4.1.1.5. SEPIC dönüştürücü

SEPIC dönüştürücü yükseltici ve düşürücü olarak çalışabilmektedir. S anahtarı iletimde iken indüktörleri kaynak gerilimi ile yüklenir, S anahtarı kapalı iken çıkışa paralel olan indüktör yükü besler. İndüktörler kuplajlı veya kuplajsız olarak kullanılabilir.

SEPIC dönüştürücünün devre şeması Şekil 4.5'te görülmektedir.



Şekil 4.5. SEPIC dönüştürücü devre şeması

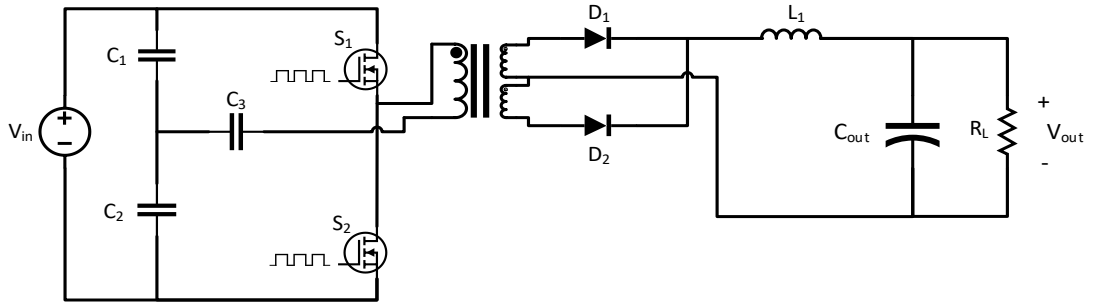
SEPIC dönüştürücünün çıkış geriliminin (V_{out}), giriş gerilimi (V_{in}) ve doluluk oranına (D) bağlı ifadesi Denklem (4.5)'te görülmektedir.

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{D}{1-D} \right) \quad (4.5)$$

4.1.2. Yalıtımlı dönüştürücüler

4.1.2.1. Half-full bridge dönüştürücü

Half-Bridge dönüştürücü temel olarak iki kontrollü anahtar ve transformatörden oluşmaktadır. Half-Bridge dönüştürücünün devre şeması Şekil 4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.6. Half-bridge dönüştürücü devre şeması

İki anahtar kullanılması anahtar üzerine düşen gerilim stresinin azalmasını sağlar. Half-Bridge dönüştürücünün çıkış geriliminin (V_{out}), giriş gerilimi (V_{in}), doluluk oranına (D) ve transformatör sarım sayılarına (N_s , N_p) bağlı ifadesi Denklem (4.7)'de görülmektedir.

$$V_{out} = V_{in} D \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (4.7)$$

Full-Bridge Dönüştürücü ise girişteki C_1 ve C_2 kapasitörleri yerine kontrollü güç elemanları eklenerek elde edilir. Bu değişim transformatörün primer tarafının kaynak tarafından beslenmesine ve çıkış geriliminin Denklem (4.8)'de görüldüğü gibi iki katına çıkmasını sağlamaktadır.

$$V_{out} = 2V_{in} D \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (4.8)$$

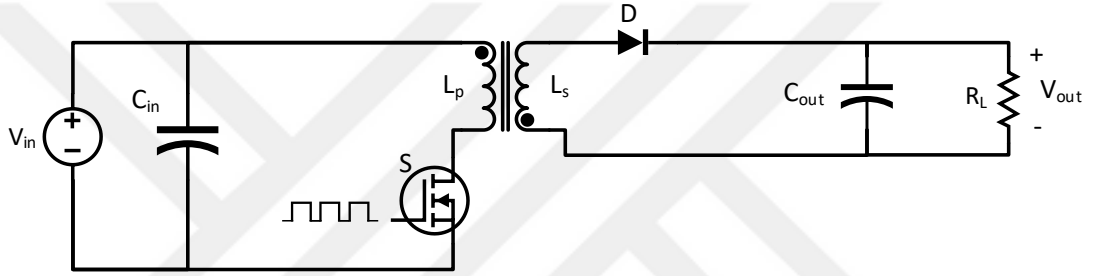
4.1.2.2. Flyback dönüştürücü

Flyback dönüştürücüler cep telefonu şarj cihazı, bilgisayarlar için yedek güç kaynağı, led aydınlatma ve yüksek gerilim gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Flyback dönüştürücü bir kontrollü anahtar, diyot ve Flyback transformatöründen oluşmaktadır. Flyback transformatörü, hava aralığı bulunan bir nüveye sarılmış zıt kutuplu iki ayrı indüktör olarak tanımlanabilir. Flyback dönüştürücünün devre şeması Şekil 4.7'de görülmektedir.

Devre elemanı sayısının az olması dolayısıyla uygun maliyetli olması, giriş ve çıkış katları arasında yalıtım bulunması ve aynı anda birden çok çıkış gerilimi elde edilebilmesi Flyback dönüştürücünün öne çıkan özellikleridir.

Flyback dönüştürücüler, Flyback transformatörünün dizayn limitleri nedeniyle 5 – 150W arası güçlerde üretilmektedir. Flyback dönüştürücü yüksek güçlerde nüve büyüklüğünün artması, dizayn zorluğu ve maliyet artışı gibi sebeplerden ötürü genellikle tercih edilmez. Düşük güçlerde uygun maliyetli olması Flyback dönüştürücünün bu güç seviyesinde en çok kullanılan dönüştürücü olmasını sağlamıştır.



Şekil 4.7. Flyback dönüştürücü devre şeması

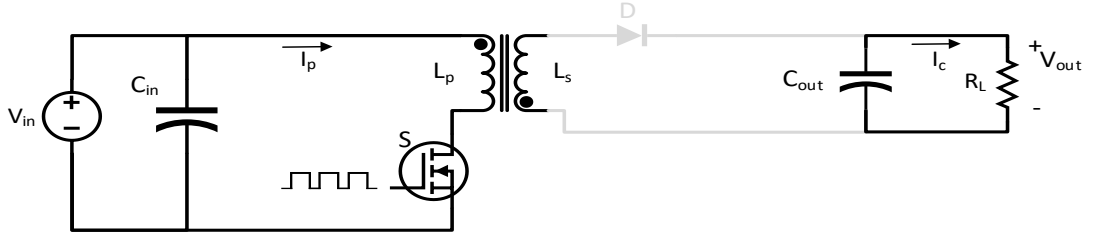
Flyback dönüştürücünün çıkış geriliminin (V_{out}), giriş gerilimi (V_{in}), doluluk oranı (D) ve transformatör sarım sayılarına (N_s , N_p) bağlı ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \frac{D}{(1-D)} \quad (4.9)$$

4.2 Flyback dönüştürücü analizi

Flyback dönüştürücünün analizi, kontrollü anahtarın iletimde ve kesimde olduğu durumlar ile gerçekleştirilebilir.

a) S anahtarının iletimde olması durumu ($0 \leq t \leq DT$, $t_{on} = DT$)



Şekil 4.8. S anahtarı iletimde iken akım yolları

L_p kaynak tarafından beslenir ve primer akımı doğrusal olarak artmaya başlar.

$$V_{in} = \frac{di_{L_p}}{dt} L_p \quad (4.10)$$

Primer indüktans değeri, Anahtarlama periyodu T ve doluluk oranı d olmak üzere Deklem (4.11)'deki gibi yazılabilir.

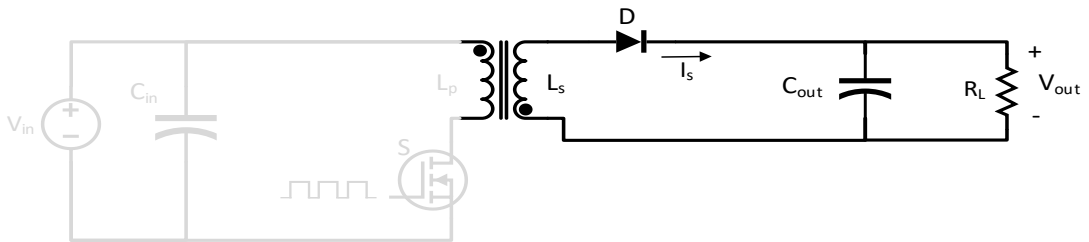
$$L_p = \frac{V_{in} d T}{\Delta I} \quad (4.11)$$

Primer akımı, anahtarın iletim süresinin sonunda maksimum değerine ulaşır. Anahtarın iletim süresi t_{on} olduğuna göre, primer akımının maksimum değeri şöyle bulunur.

$$I_{p(max)} = \frac{V_{in} t_{on}}{L_p} \quad (4.12)$$

L_p ve L_s 'nin ters kutuplara sahip olması D diyotunun kesime girmesine neden olur ve devrede sekonder akımı akmaz (Şekil 4.8). Primer tarafında oluşan enerji nüvenin hava boşluğunda depolanır ve yük C kapasitörü tarafından beslenir.

b) S anahtarının kesimde olması durumu ($DT \leq t \leq T$, $t_{off} = (1-D)T$)



Şekil 4.9. S anahtarı kesimde iken akım yolu

S anahtarı kapalı iken hava boşluğunda depolanan enerji L_s üzerinden devreye aktarılır.

Sekonder akımının maksimum değeri, transformatörün dönüştürme oranı kullanılarak Denklem (4.13) olarak ifade edilebilir.

$$I_{S(max)} = \left(\frac{N_s}{N_p}\right) I_{p(max)} \quad (4.13)$$

Anahtarın kesim süresi t_{off} olduğuna göre, sekonder akımındaki azalma Denklem (4.14)'teki gibi ifade edilebilir.

$$I_s = I_{S(max)} - \frac{V_{out}}{L_s} t_{off} \quad (4.14)$$

Denklem (4.14)'te görüldüğü gibi çıkış gerilimi sabit olduğundan L_s akımı doğrusal olarak azalarak yükü besler (Şekil 4.9).

Ayrıca transformatörün dönüştürme oranı kullanılarak, L_p ve L_s arasındaki bağıntı Denklem (4.15)'teki gibi gösterilebilir.

$$L_s = \frac{L_p}{\left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2} \quad (4.15)$$

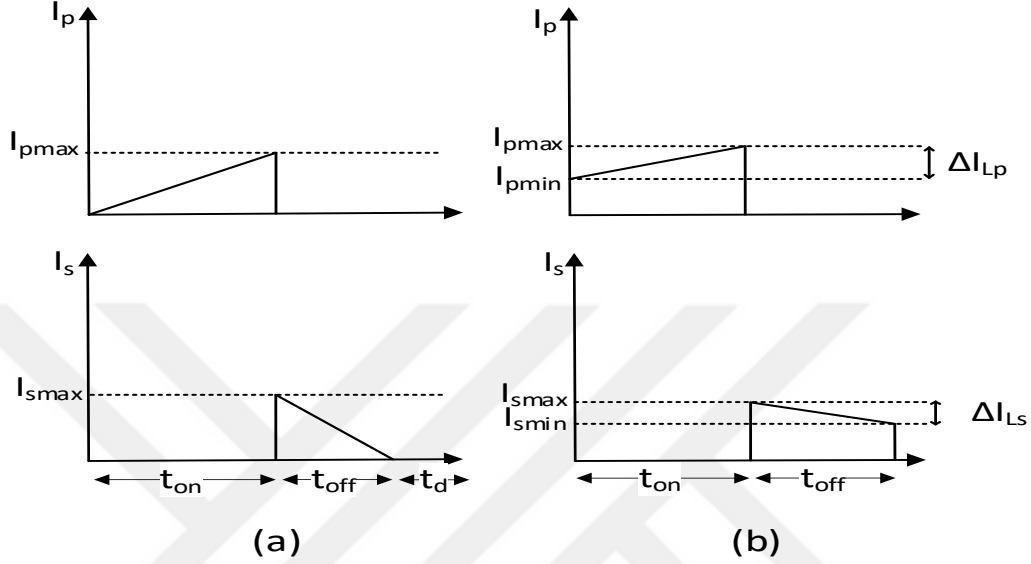
Bir anahtarlama periyodu boyunca, S anahtarının maksimum Drain-Source gerilimi V_{sw} ve diyotun maksimum ters gerilimi V_D sırasıyla Denklem (4.16) ve Denklem (4.17)'de görülmektedir.

$$V_{sw} = V_{in} + \frac{V_{out}}{\frac{N_s}{N_p}} \quad (4.16)$$

$$V_D = V_{in} \cdot \frac{N_s}{N_p} + V_{out} \quad (4.17)$$

Her DA-DA dönüştürücüde olduğu gibi flyback dönüştürücüde de indüktör akımının durumuna göre sürekli ve süreksiz çalışma durumu vardır. Süreksiz çalışma durumunda bir anahtarlama periyodu içerisinde nüvenin hava boşluğu içerisinde depolanan enerjinin tümü sekondere aktarılır ve sekonder akımı sıfıra düşer. Sürekli çalışma durumunda ise nüvenin hava boşluğu içerisinde depolanan enerji ve sekonder

akımı asla sıfır olmaz. Her iki çalışma durumunun kendi aralarında avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Flyback dönüştürücü için çalışma durumlarının primer ve sekonder akımları üzerindeki etkisi sırasıyla Şekil 4.10(a) ve Şekil 4.10(b)'de görülmektedir.



Şekil 4.10. (a) Süreksiz çalışma durumunda indüktör akımları (b) Sürekli çalışma durumunda indüktör akımları

Yapılan çalışmada tepe akım değerlerinin daha az olması dolayısıyla devre elemanları üzerindeki akım zorlanmasının daha az olması ve transformatörün kaçak indüktans değerinin az olması gibi nedenlerden dolayı sürekli çalışma durumu tercih edilmiştir.

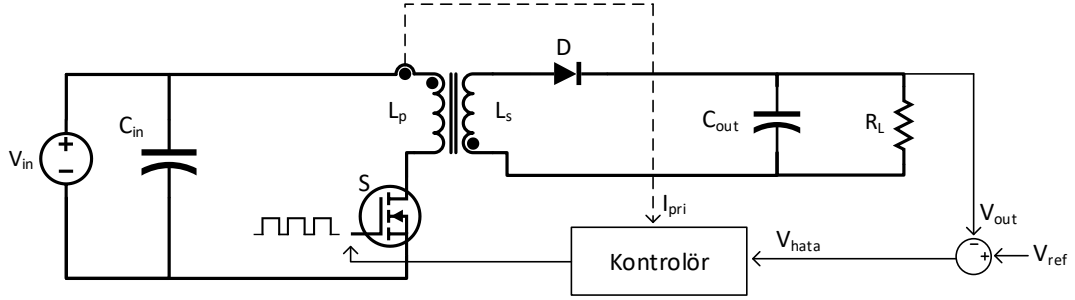
4.3. DA-DA Dönüştürücülerde Kontrol

DA-DA Dönüştürücü sistemlerinde genellikle çıkış geriliminin sabit olması istenmektedir. Çıkış gerilimi, giriş gerilimi ve yük değeri ile değişmektedir. Dönüştürücü, çıkış gerilimindeki değişimi regüle edebilmek için geri beslemeli bir kontrol sistemine ihtiyaç duymaktadır. Genellikle geri besleme türüne göre, gerilim modu ve akım modu kontrol olmak üzere iki tip kontrol yöntemi kullanılmaktadır.

4.3.1. Akım modu kontrol

Akım modu kontrol yönteminde, dönüştürücünün çıkış gerilimi ile birlikte güç anahtarı veya indüktans akımı kullanılarak iki geri besleme döngüsüyle dönüştürücü kontrol edilir. Dönüştürücünün çıkış gerilimi referans geriliminden çıkartılarak bir

hata sinyali elde edilir. Ardından hata sinyali kontrolöre aktarılarak kontrol sinyali üretilir. Üretilen kontrol sinyali, güç anahtarı akımı veya indüktans akımı ile karşılaştırılarak anahtarlama sinyali üretilir ve dönüştürücü bu sinyal ile kontrol edilir (Şekil 4.11).

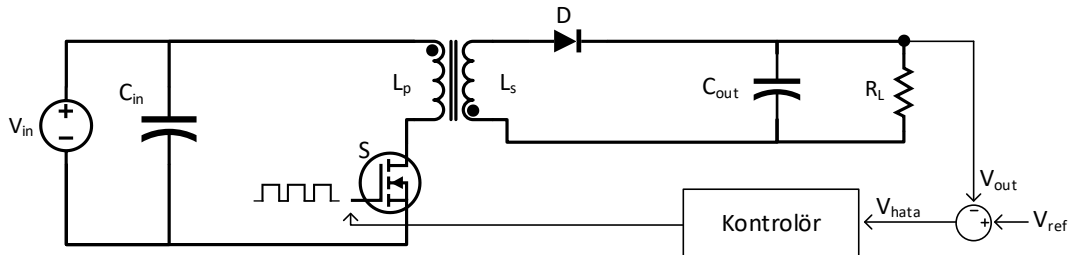


Şekil 4.11 Akım modu kontrol yöntemi uygulanan bir Flyback dönüştürücü

Akım modu kontrol yöntemi iki geri besleme döngüsüne ihtiyaç duyduğu için kontrol döngüsünün tasarımı gerilim modu kontrol yöntemine göre daha zordur. Ancak akım bilgisi ile kontrol edildiği için devredeki değişimlere gerilim modu yöntemine göre daha hızlı cevap vermektedir.

4.3.2. Gerilim modu kontrol

Gerilim modu kontrol yönteminde, çıkış gerilimi kullanılarak oluşturulan geri besleme döngüsü ile dönüştürücü kontrol edilmektedir. Dönüştürücünün çıkış gerilimi referans gerilimden çıkartılarak bir hata sinyali elde edilir. Bu hata sinyali bir kontrolöre aktarılarak, kontrolörün bir kontrol sinyali üretmesi sağlanır. Bu kontrol sinyali ile dönüştürücü kontrol edilir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Gerilim modu kontrol yöntemi uygulanan bir Flyback dönüştürücü

Gerilim modu kontrol yöntemi, çıkış gerilimi ile kontrol edildiği için devredeki değişimlere geç cevap vermektedir. Ancak sadece bir geri besleme döngüsüne ihtiyaç duyulduğu için uygulamalarda tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, bir geri besleme döngüsüne sahip olması ve uygulama kolaylığı nedeniyle Flyback dönüştürücünün kontrolünde gerilim modu kontrol yöntemi kullanılmıştır.



5. FLYBACK DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI VE BENZETİMİ

Yapılan çalışmada Flyback dönüştürücü tasarımında aşağıdaki tabloda verilen parametreler seçilmiştir. Dönüştürücünün giriş gerilimi yakıt pilinin maksimum güç noktasındaki gerilim değeri olan 12 V seçilmiştir. Çıkış gerilimi olarak akü maksimum şarj gerilimi olan 16.8 V seçilmiştir.

Tablo 5.1. Flyback dönüştürücü tasarım parametreleri

Parametre	Değer
Giriş Gerilimi	12 V
Çıkış Gerilimi	16.8 V
Primer İndüktans Akım dalgalılığı	3 A
Anahtarlama Frekansı	100 Khz
Doluluk Oranı	0.5

Dönüştürücünün primer indüktans değeri Denklem 4.11 kullanılarak,

$$L_{pri} = \frac{12 \cdot 0.5 \cdot 10^{-5}}{3} = 20 \mu H$$

elde edilir.

Transformatörün dönüştürme oranı Denklem 4.9 kullanılarak,

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{V_{out} (1 - D)}{V_{in} D} = 1.4$$

elde edilir.

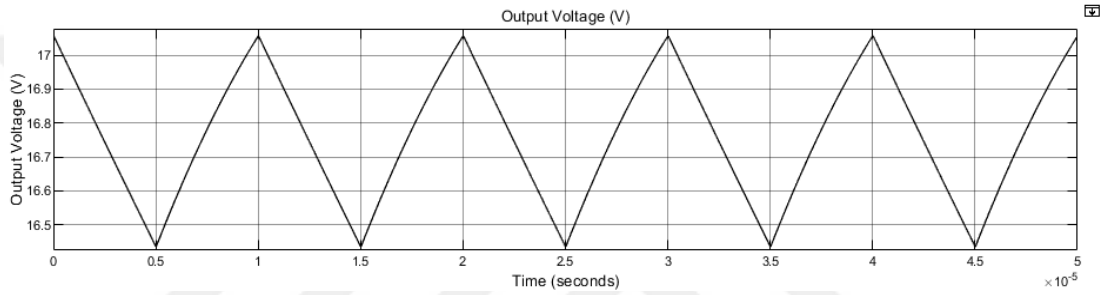
Dönüştürücünün sekonder indüktans değeri Denklem 4.15 kullanılarak,

$$L_{sec} = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{\left(\frac{1}{1.4}\right)^2} = 40 \mu H$$

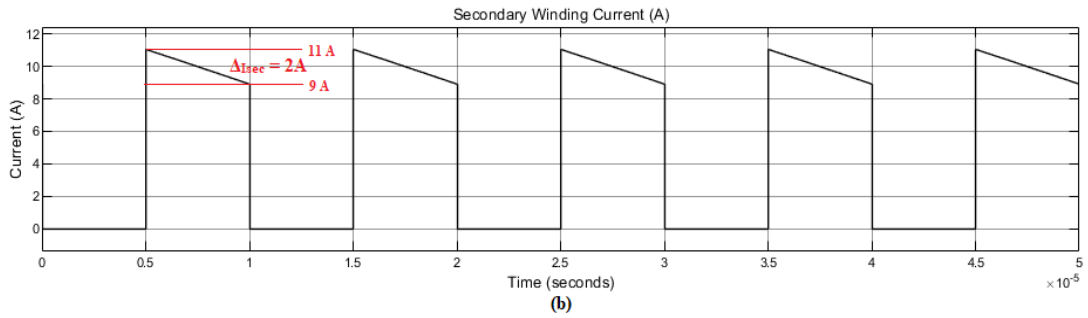
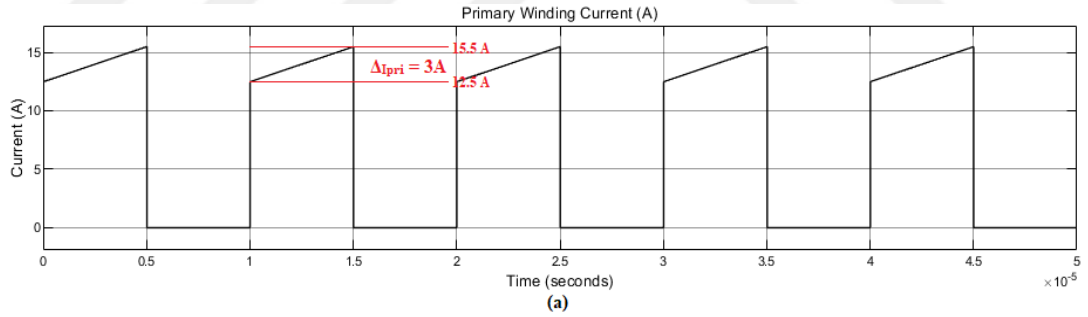
bulunur.

Tasarım parametreleri belirlenen Flyback dönüştürücünün MATLAB/Simulink ortamında simülasyonu yapılmıştır.

Tasarlanan dönüştürücünün çıkış gerilimi Şekil 5.1'de, primer ve sekonder akım değerleri şekil 5.2'de görülmektedir.

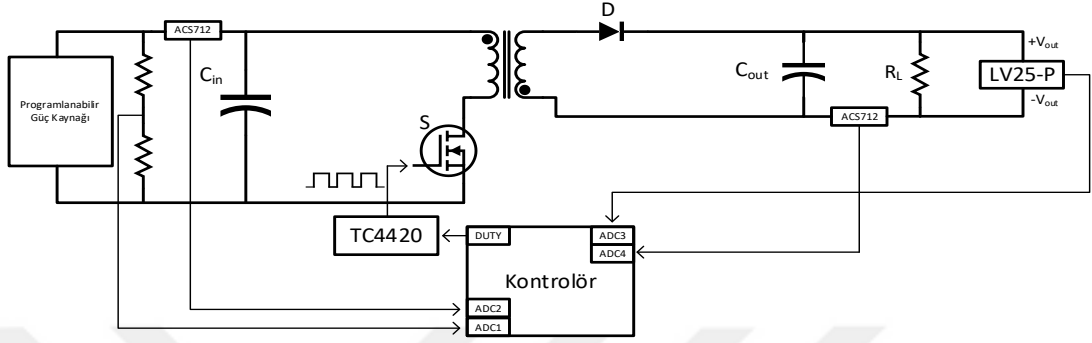


Şekil 5.1. Flyback dönüştürücü çıkış geriliminin zamana bağlı değişimi



Şekil 5.2. Flyback Dönüştürücü (a) Primer Akımı (b) Sekonder Akımı zamana bağlı değişimi

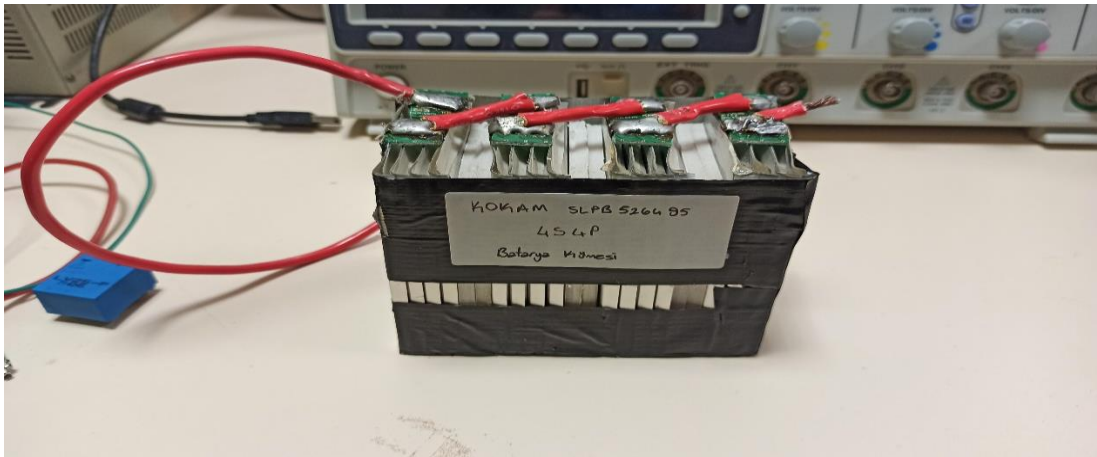
6. TASARLANAN DENEYSEL SİSTEM



Şekil 6.1. Tasarlanan deneysel sistemin blok şeması

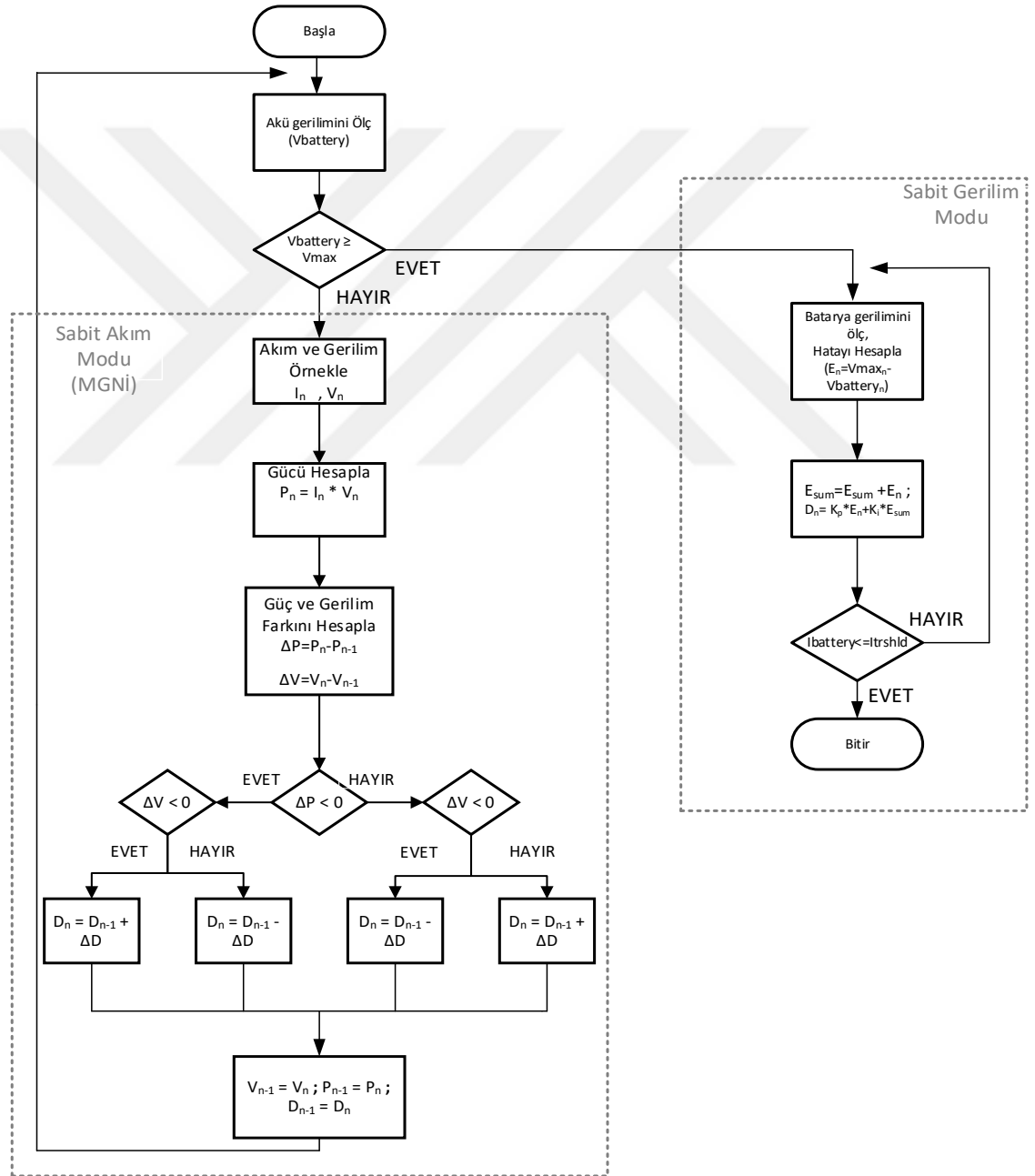
Tasarlanan deneysel sistem, Flyback dönüştürücü, programlanabilir güç kaynağı, kontrolör ve akü kümesinden oluşmaktadır. Sistem üzerine yerleştirilen sensörler ile programlanabilir güç kaynağı ve akü kümesinin akımı ve gerilimi gerçek zamanlı olarak ölçülmektedir. Ölçümler kullanılarak kontrolör yardımıyla dönüştürücünün akü şarj algoritmasına uygun olarak çalışması sağlanmaktadır. Tasarlanan deneysel sistemin blok şeması Şekil 6.1’de görülmektedir.

Yapılan çalışmada KOKAM markasının ürettiği SLPB 526495 model numaralı nominal gerilimi 3.7V ve kapasitesi 3300mAh olan Lityum-Polimer türü akünün 4 seri ve 4 paralel bağlanmasıyla oluşturulan 14.8V/13200mAh değerindeki akü kümesinin (Şekil 6.2) yakıt pili üzerinden şarj edilmesi için deneysel sistem tasarlanmıştır.

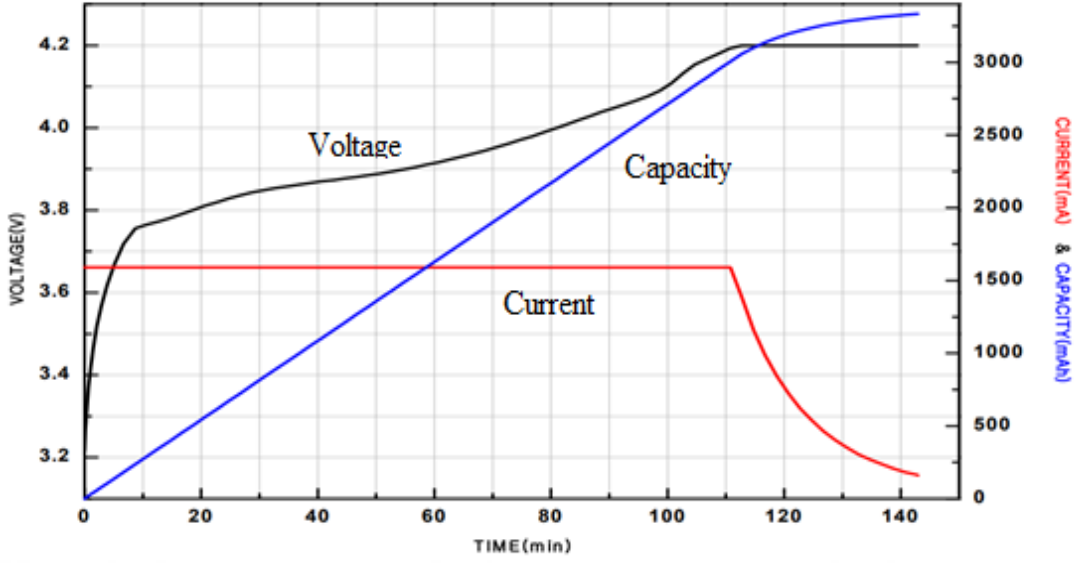


Şekil 6.2. Akü kümesi

Genellikle lityum bazlı akülerin şarjı, Sabit Akım-Sabit Gerilim adı verilen yöntem ile gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde akü öncelikle maksimum şarj akımı değerini aşmayacak şekilde sabit akım ile şarj edilir. Akü gerilimi maksimum şarj gerilimine ulaştığında, akü şarj akımı değeri çok küçük olana dek sabit gerilim ile şarj edilir. Sabit Akım - Sabit Gerilim şarj yönteminin akış şeması Şekil 6.3'te görülmektedir. Ayrıca kullanılan akünün, üretici firmanın bilgi sayfasında verilen şarj karakteristiği Şekil 6.4'te görülmektedir.



Şekil 6.3. Geliştirilen akü şarj algoritması



Şekil 6.4. KOKAM SLPB526495 referans şarj karakteristiği

6.1. Malzeme Seçimi

Tasarlanan deneysel sistem programlanabilir güç kaynağı, DA-DA dönüştürücü ve akü kümesinden oluşmaktadır. Bu bölümde deneysel sistem için gerekli malzeme seçimleri yapılmıştır.

- Güç Anahtarı

Flyback dönüştürücü devresinde kullanılan güç anahtarı, üzerine düşen 24V gerilime ve 30A akıma dayanıklı olmalıdır. Ayrıca anahtarlama kayıplarının az olması adına iletim direnci düşük güç anahtarı tercih edilmelidir. Dönüştürücü devresinde güç anahtarı olarak INTERNATIONAL RECTIFIER firmasının ürettiği IRFP054N model numaralı N-Kanal Mosfet tercih edilmiştir. IRFP054N N-Kanal Mosfet, 55V drain-source gerilimine ve 81A değerine kadar akımlara dayanabilmektedir. Ayrıca iletim direnci 0.012 ohm'dur.

- Diyot

Dönüştürücü devresinin anahtarlama frekansı 100Khz olduğu için kullanılan diyotun ters toparlanma süresinin az olması ve 33.6 voltluk ters gerilime dayanıklı olması gerekmektedir. Dönüştürücü devresinde IXYS firmasının DSEI30-60 model numaralı hızlı toparlanan diyotu tercih edilmiştir. DSEI30-60 600V değerine kadar gerilime dayanıklıdır. Ayrıca ters toparlanma süresi 35 ns'dir.

- Kontrolör

Dönüştürücü devresinde güç anahtarını sürülmesi, devrenin akım ve gerilim değerlerinin okunması ve MGNİ ve Gerilim Modu Kontrol algoritmalarının çalıştırılması için ST firmasının STM32F4 Discovery geliştirme kiti tercih edilmiştir.

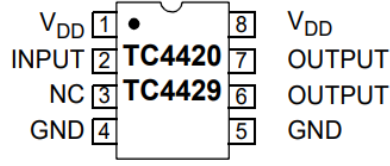
STM32F4 Discovery geliştirme kiti, Arm Cortex M4 serisi STM32F407VGT6 model numaralı işlemciye sahiptir. Bu işlemcinin genel özellikleri;

- 168Mhz çalışma frekansına sahiptir.
- Ondalıklı sayıların matematiksel işlemleri için özel olarak tasarlanmış olan kayan nokta birimine (FPU) sahiptir.
- 12 bit çözünürlükte örnekleme yapabilen, maksimum 24 kanallı 3 adet analog dijital dönüştürücüsüne (ADC) sahiptir.
- 12 bit çözünürlükte sinyal işleyen, 2 adet dijital analog dönüştürücüsüne (DAC) sahiptir.
- 17 adet 168Mhz hıza kadar çalışabilen, zamanlayıcı ünitesine sahiptir.
- 140 adet genel amaçlı giriş/çıkış modülüne sahiptir.

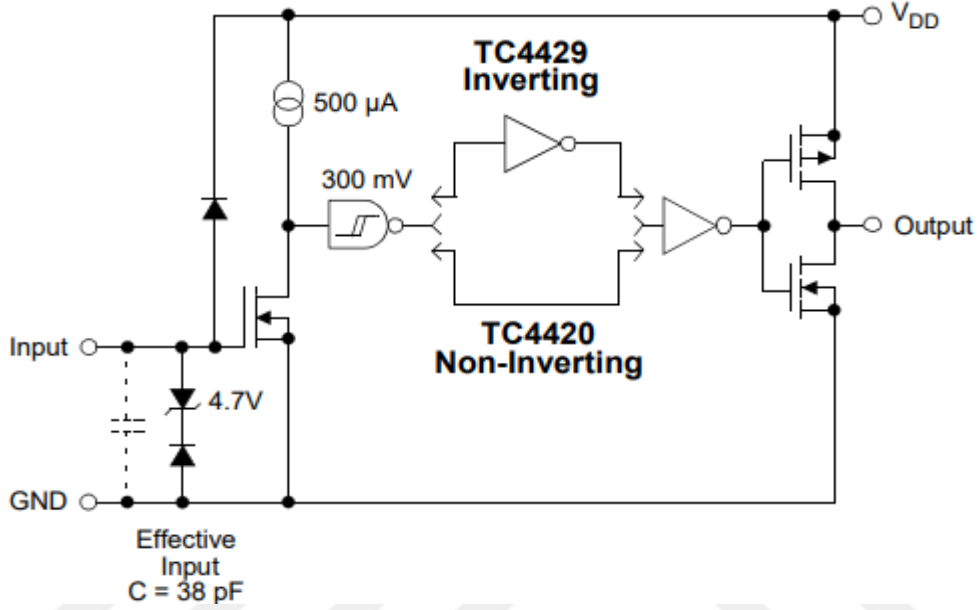
Yüksek çalışma frekansı ve kayan nokta birimine sahip olması nedeniyle çalışmada STM32F407VGT6 model işlemci tercih edilmiştir.

- Güç Anahtarı Sürücü Entegresi

Tercih edilen işlemcinin lojik çıkış gerilimi maksimum 3.3V'tur. Devrede bulunan MOSFET'in sürülebilmesi için, bu gerilimi 12V seviyesine çıkartacak sürücü entegresine ihtiyaç vardır. Bu nedenle Devrede MICROCHIP firmasının ürettiği TC4420 MOSFET sürücü entegresi kullanılmıştır. TC4420 entegresi, çalışma gerilimine göre 4.5V ile 18V arası çıkış gerilimi vermektedir. Ayrıca giriş ve çıkış sinyali arasındaki gecikme süresi 25ns dir. TC4420 entegresinin pin yapısını ve iç yapısını gösteren blok diyagramı sırasıyla Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da görülmektedir.



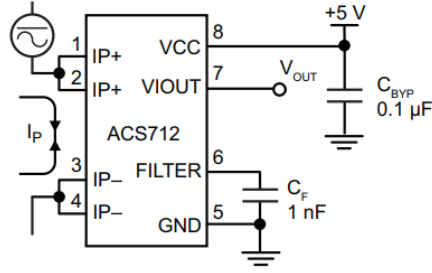
Şekil 6.5. TC4420 entegresi pin yapısı



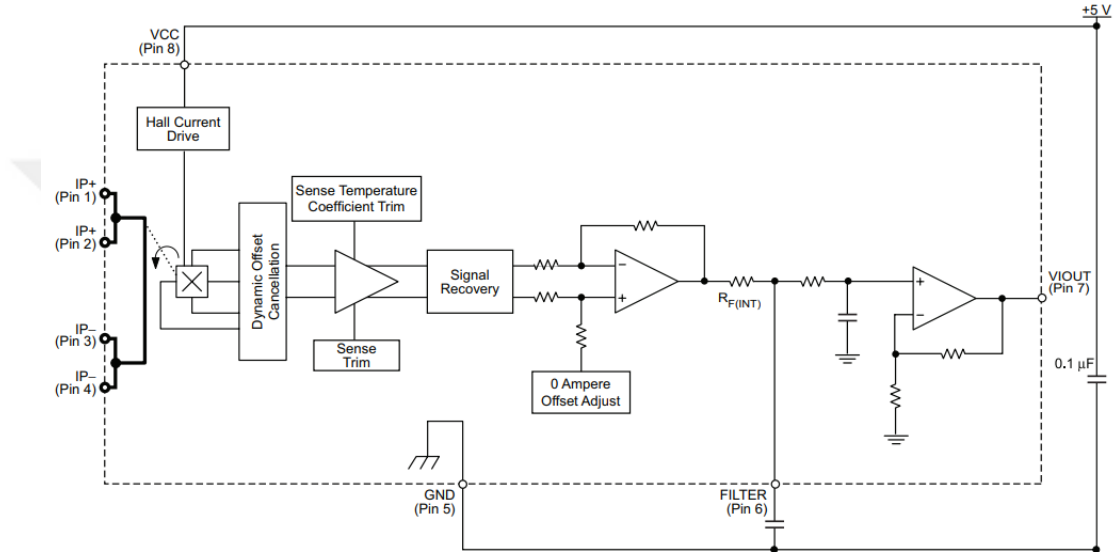
Şekil 6.6. TC4420 entegresi iç yapısı

- Akım Sensörü

MGNİ kontrol algoritmanın çalıştırılması ve akü şarj akımının izlenmesi için sistemin giriş ve çıkış akımları bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle akım ölçümü için, devrenin girişine ve çıkışına ALLEGRO MICROSYSTEMS firmasının ürettiği ACS712 ELC-20 akım sensör modülü bağlanmıştır. Bu modül ile 20A değerine kadar akım değerleri ölçülebilmektedir. ACS712 hall etkisi ile çalışmaktadır. Bu özelliği ile mikroşlemci ile devre kartı arasında yalıtım sağlar. Entegre içerisinde bakır iletken bir plaka üzerinden geçen akım hall etkisi ile entegrenin çıkışında gerilim oluşmasına neden olur bu gerilim değeri, 1A akım karşılığı 100mV değerindedir. Bakır iletken plakanın direnç değeri 1.2 mΩ'dur. ACS712 entegresi temel bağlantı şeması ve iç yapısını gösteren blok şeması Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de görülmektedir.



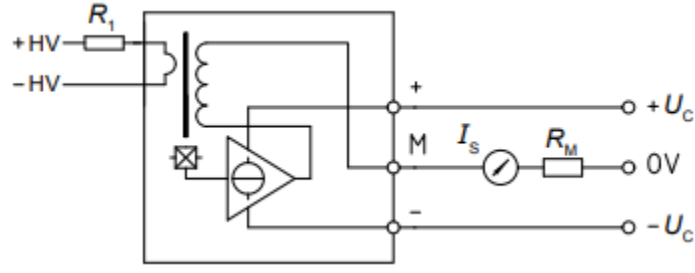
Şekil 6.7. ACS712 entegresi temel bağlantı şeması



Şekil 6.8. ACS712 entegresi iç yapısı

- Gerilim Sensörü

Devrenin çıkış geriliminin ölçülmesi için LEM firmasının ürettiği LV25-P gerilim sensörü kullanılmıştır. LV25-P gerilim sensörü hall etkisi ile çalışmaktadır. Genellikle Sensörün girişine, ölçüm aralığında giriş akımını nominal değerde tutacak şekilde seri koruma direnci (R_1) bağlanır. Sensör, çıkışına giriş akımıyla orantılı olarak bir akım akıtır. Bu akım değeri çıkışa seri olarak bağlanan ölçüm direnci (R_m) üzerinde gerilim oluşturur. Bu gerilim değeri, ölçüm direnç değerine bölünerek çıkış akımı bulunur. Ardından geriye dönük hesaplama yapılarak giriş akımı ve buna bağlı giriş gerilimi değeri hesaplanır. Sensörün akım kazancı 2.5'tir. LV25-P gerilim sensörünün blok şeması Şekil 6.9'te görülmektedir.



Şekil 6.9. LV25-P gerilim sensörü blok şeması

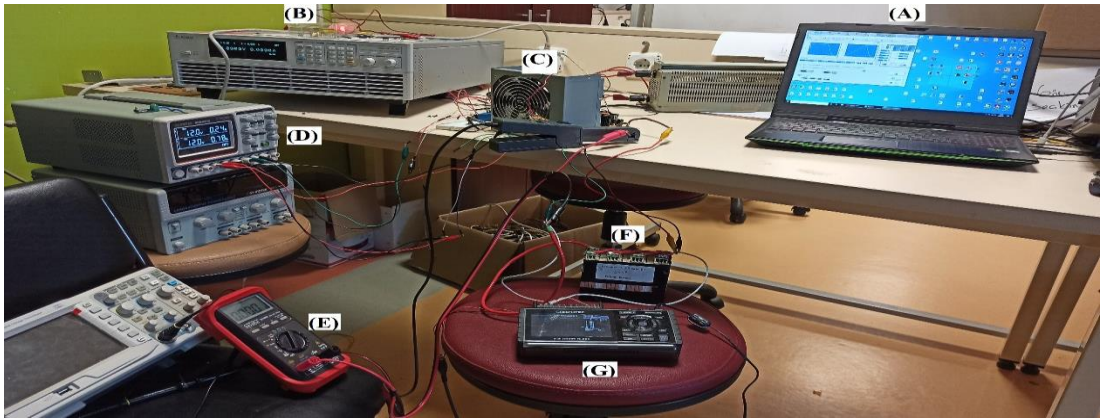
- Programlanabilir Güç Kaynağı

Gerçekleştirilen uygulamada, PDM yakıt pili yerine Chroma markasının ürettiği 62150H-40 model numaralı programlanabilir güç kaynağı kullanılmıştır. 6215H-40 fotovoltaik panellerin simülasyonu için özel olarak tasarlanmıştır. Özel yazılımı sayesinde bilgisayar üzerinden kontrol edilebilmektedir. Matematiksel model ile elde edilen PDM yakıt pili karakteristik eğrileri, programlanabilir güç kaynağına aktararak güç kaynağının yakıt pili gibi çalışması sağlanmıştır.

- Data Logger

Şarj uygulaması esnasında akünün akım ve gerilim bilgisini kaydetmek amacıyla GRAPHTEC firmasının ürettiği GL220 Data Logger kullanılmıştır. GL220 Data Logger aynı anda 10 farklı ölçüm alabilmektedir. Alınan ölçümler canlı olarak takip edilebilmekte ve istenilen zaman aralıklarında cihaz belleğine veya taşınabilir belleğe kayıt edilebilmektedir.

Gerçekleştirilen uygulama düzeneği Şekil 6.10'te görülmektedir.



Şekil 6.10. Uygulama düzeneği

Uygulama düzeneğinde aşağıdaki birimler bulunmaktadır,

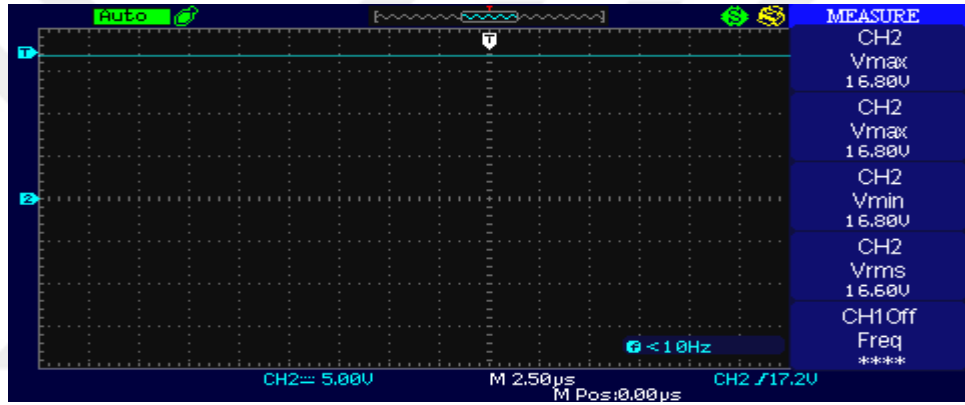
- A. Programlanabilir güç kaynağını kontrol eden bilgisayar
- B. Yakıt pili simülatörü olarak çalışan programlanabilir güç kaynağı
- C. Flyback dönüştürücü devresi
- D. Devredeki sensörler için gereken gücü sağlayan ikincil güç kaynağı
- E. Data logger verilerini doğrulamak için kullanılan ampermetre
- F. Akü kümesi
- G. Data logger



7. DENEYSEL SONUÇLAR

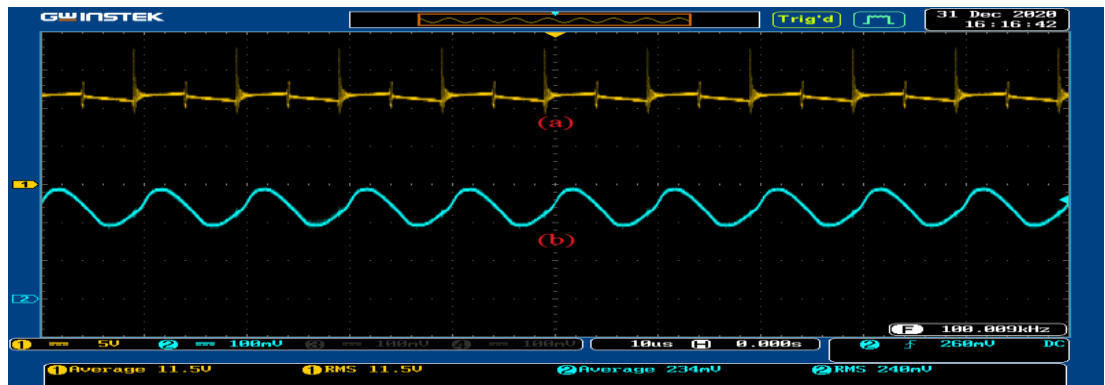
Şekil 6.10'da görülen deneysel akü şarj sisteminin uygulama sonuçları aşağıdaki gibidir.

1. Flyback dönüştürücü Şekil 6.10'da görülen sistem üzerinde test edilmiştir. İlk olarak dönüştürücünün doluluk oranı 0,5 olarak ayarlanmış, giriş gerilimi olarak 12V verilmiş ve çıkış gerilimi Şekil 7.1.'den görüleceği gibi 16.8V ölçülmüştür.



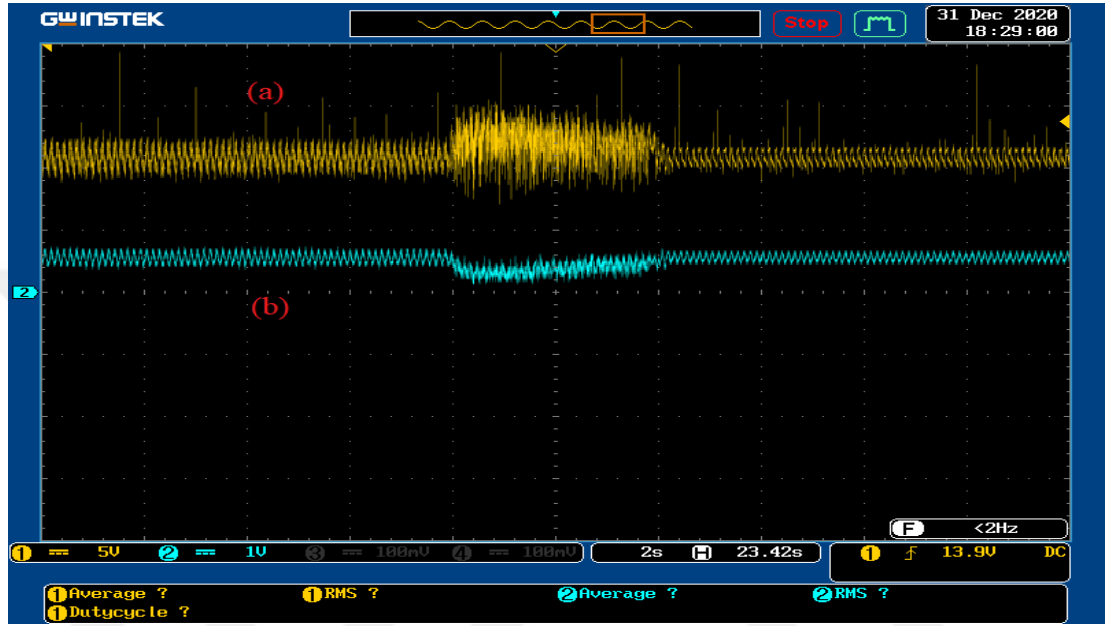
Şekil 7.1. Doluluk oranı 0.5 için çıkış geriliminin zaman bağılı değişimi

2. Programlanabilir güç kaynağına yakıt pili karakteristik eğrisi girilmiş ve dönüştürücü doluluk oranı 0,5 olacak şekilde çalıştırılarak dönüştürücünün girişindeki akım ve gerilim değerleri, ölçülmüştür ve sonuçları Şekil 7.2'de verilmiştir.



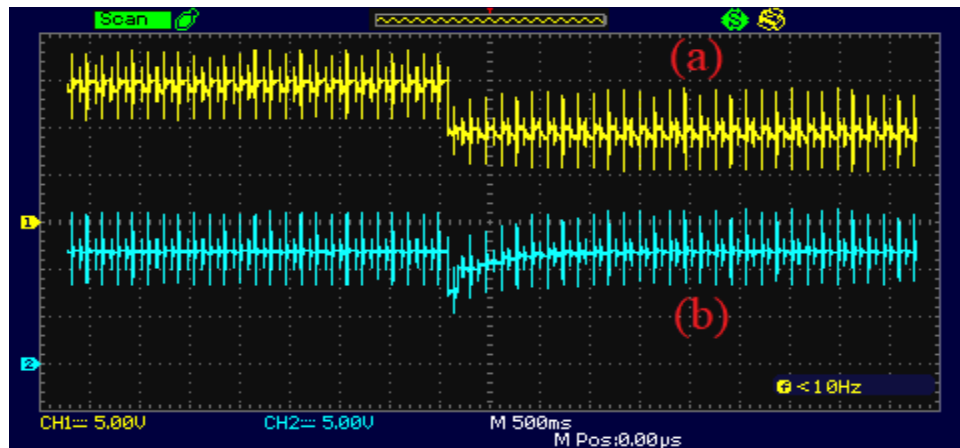
Şekil 7.2. Doluluk oranı 0.5 için dönüştürücünün (a) Giriş gerilimi (b) Giriş akımı zamana bağılı değişimi

3. Akü şarj sistemi MGNI algoritması ile kontrol edilerek maksimum güç noktasında devrenin yükü değiştirilmiş ve dönüştürücünün cevabı incelenmiştir. Şekil 7.3'te görüldüğü üzere dönüştürücü maksimum güç noktasında çalıştığı esnada yükün değiştirilmesi sonucu dönüştürücü maksimum güç noktasından sapmış, ardından tekrardan maksimum güç noktasına ulaşmıştır.

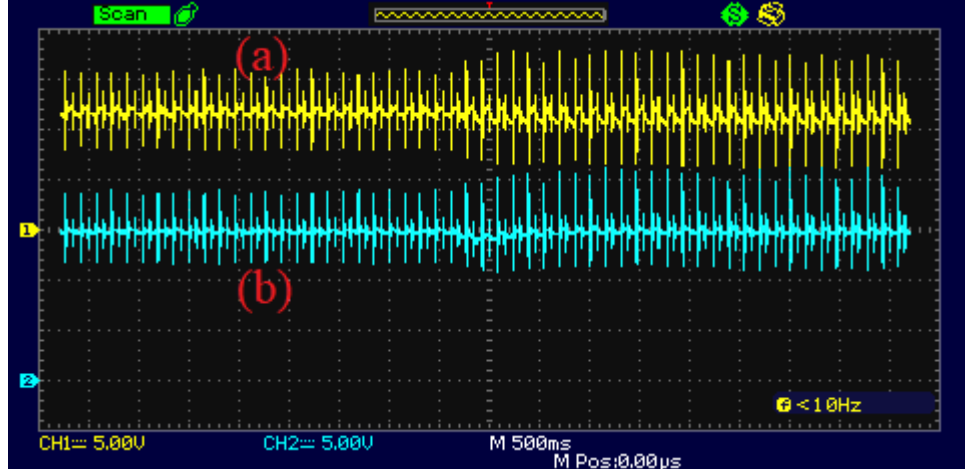


Şekil 7.3. Yük değişimine göre (a) Giriş gerilimi (b) Giriş akımı zamana bağlı değişimi

4. Gerilim Modu Kontrol uygulaması için, referans çıkış gerilimi 12V seçilerek dönüştürücünün giriş gerilimi sırasıyla 15V ve 10V olarak ayarlanmış ve çıkış gerilimi gözlenmiştir. Giriş gerilimi değişimine karşı çıkış gerilimi Şekil 7.4'de, Yük değişiminin çıkış gerilimine etkisi Şekil 7.5'te görülmektedir.

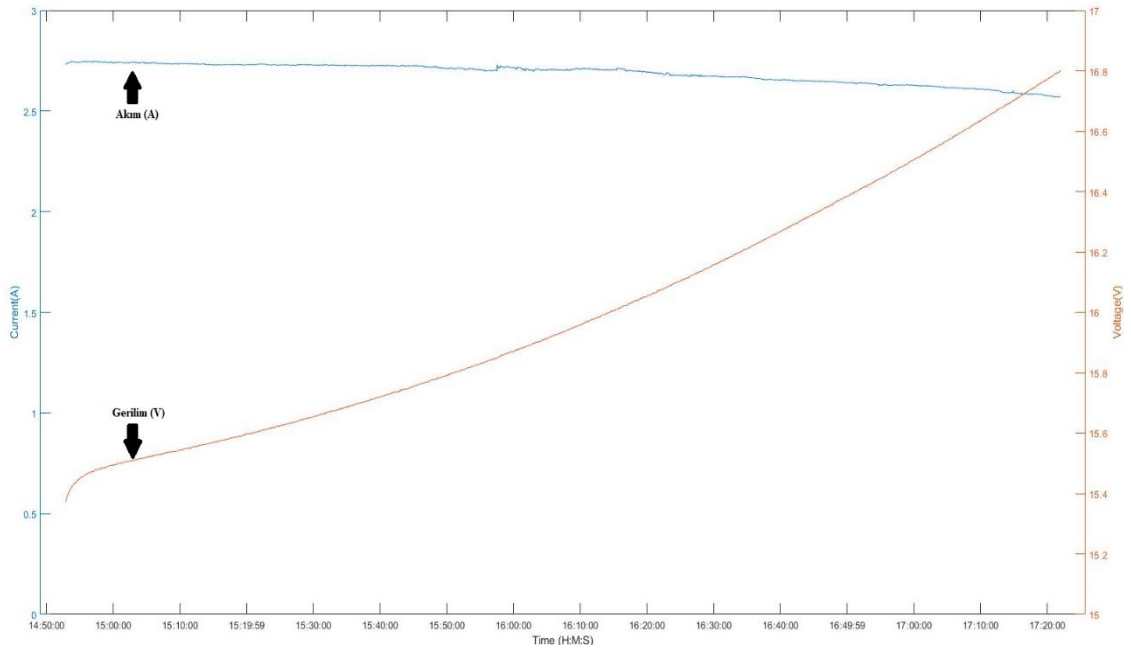


Şekil 7.4. Giriş gerilimi değişiminin çıkış gerilimine etkisi (a)Giriş gerilimi (b) Çıkış gerilimi zamana bağlı değişimi



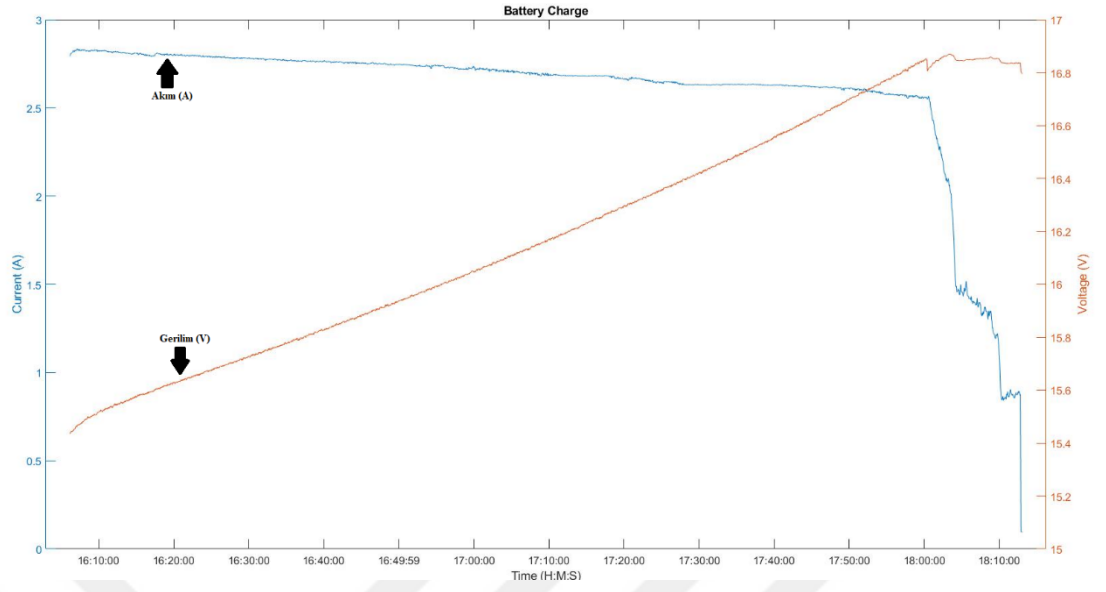
Şekil 7.5. Yük değişiminin çıkış gerilimine etkisi (a) Giriş gerilimi
(b) Çıkış gerilimi zamana bağlı değişimi

5. Maksimum güç noktası izleyici ve gerilim modu kontrol uygulamalarından sonra, akü kümesi sisteme bağlanmış ve şarj edilmiştir. İlk olarak sabit akım şarj evresinde MGNİ algoritması çalıştırılmıştır. Sabit akım şarj evresinde akünün akım ve gerilim bilgileri Şekil 7.6’da görülmektedir.



Şekil 7.6. MGNİ şarj esnasında akü akım ve gerilimi zamana bağlı değişimi

6. Sabit akım şarj tamamlandıktan sonra akü kümesi bir reosta yardımıyla kontrollü olarak deşarj edilmiştir. Deşarj edilen akü daha sonra sabit akım sabit gerilim şarj yöntemi kullanılarak tam bir şarj döngüsü boyunca şarj edilmiştir. Şarj esnasında akü akım ve gerilim bilgileri şekil 7.7’de görülmektedir.



Şekil 7.7. Tam döngü şarj esnasında akü akım ve gerilimi zamana bağlı değişimi

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışmasında, öncelikle hidrojen yakıt pili türleri arasında bulunan proton değişim membranlı yakıt pilinin matematiksel modeli elde edilmiştir. Elde edilen model üzerinden sıcaklık değişiminin, yakıt pilinin çıkış gücü üzerine etkisi incelenmiştir. Daha sonra, bu model kullanılarak maksimum güç noktası izleyebilen akü şarj uygulaması için Flyback dönüştürücü tasarlanmıştır. Akü şarj sisteminin pratik olarak gerçekleştirilebilmesi için malzeme seçimleri yapılmış ve deneysel sistem kurulmuştur. Kurulan deneysel sistem ile güç kaynağı olarak PDM yakıt pili modeli kullanan maksimum güç noktası izleyebilen akü şarj uygulaması gerçekleştirilmiştir.

PDM yakıt pilinin matematiksel modeli MATLAB m-file ortamında gerçekleştirilmiş, Şekil 2.2 ve Şekil 2.4'te görülen sırasıyla gerilim-akım ve güç-akım karakteristik eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen karakteristik eğriler, Horizon firmasının ürettiği H-60 model yakıt pilinin Şekil 2.1 ve Şekil 2.3'te görülen gerilim-akım ve güç-akım karakteristik eğrileriyle çok benzer olması kurulan modelin gerçeğe yakın doğrulukta olduğunu göstermektedir.

Elde edilen matematiksel model üzerinde H-60 yakıt pili baz alınarak farklı sıcaklıklar için gerilim-akım ve güç-akım karakteristik eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen eğriler sırasıyla Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da görülmektedir. Sonuçlar PDM yakıt pilinin sıcaklığının artmasıyla performansının düştüğünü göstermektedir.

Maksimum güç noktası izleyebilen akü şarj uygulaması için Flyback dönüştürücü analizi yapılmış, seçilen uygun parametreler için devre elemanlarının değerleri bulunmuş ve devre tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Deneysel akü şarj sistemi kurularak MGNİ ve gerilim modu kontrol uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

Akü şarj sisteminin MGNİ algoritması ile kontrol edildiğinde, yük değişimine karşı performansı Şekil 7.3'te görülmektedir. Sistemin çalışma noktasındaki değişime cevap

vererek, tekrardan maksimum güç noktasına ulaşması MGNİ uygulamasının başarılı olduğunu göstermektedir.

Gerilim modu kontrol uygulaması sonucunda, giriş gerilimi değişimine bağlı çıkış gerilimi Şekil 7.4'de ve yük değişimine bağlı çıkış gerilimi değişimi Şekil 7.5'te görülmektedir. Sistemin kaynak ve yük değişimine karşı verdiği cevap, gerilim modu kontrol uygulamasının başarıyla gerçekleştirildiğini göstermektedir.

Son olarak, SLPB526495 model numaralı akü kullanılarak oluşturulan akü kümesinin şarj uygulaması gerçekleştirilmiştir. Şarj uygulamasında, akış şeması şekil 5.2'de verilen algoritma kullanılarak akünün tam şarj edilmesi sağlanmıştır. Şekil 7.7'de görülen akü şarj verileri, Şekil 5.3'te verilen referans şarj verileriyle benzerlik göstermektedir. Bu benzerlik deneysel akü şarj sisteminin başarılı olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın devamında gerçek bir yakıt pili kullanılarak, geliştirilen sistem test edilebilir. Ayrıca farklı kontrol algoritmaları ve dönüştürücüler ile testler yapılarak karşılaştırılma yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Andujar Marquez J., Segura F. Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2009, **13**(9), 2309-2322.
- [2] Sisworahardjo N., Yalcinoz T., El-Sharkh M.Y., Alam M., Neural network model of 100 W portable PEM fuel cell and experimental verification, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, **35**(17), 9104-9109.
- [3] Raźniak A., Determination of Electrical and Efficiency Parameters of Air Cooling of Low-Temperature PEM Fuel Cell Stack with Power of 5Kw, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2018, **1**(4), 142-149.
- [4] Lee S., Min I., Kim H., Nam S., Development of a 600 W Proton Exchange Membrane Fuel Cell Power System for the Hazardous Mission Robot, *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2010, **7**(3), 310061-310067.
- [5] Qin C., Wang J., Yang D., Li B., Zhang C., Proton Exchange Membrane Fuel Cell Reversal: A Review, *Catalysts*, 2016, **6**(12), 197.
- [6] Voottipruex K., Sangswang A., Naetiladdanon S., Mujjalinvimut E., Wongyao N., PEM fuel cell emulator based on dynamic model with relative humidity calculation, *14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Phuket, Thailand, 27-30 June 2017.
- [7] Behling, N. H., *Fuel Cells Current Technology Challenges And Future Research Needs*, Elsevier, California, 2013.
- [8] Shock E.L., Sassani D.C., Willis M., Sverjensky D.A., Inorganic species in geologic fluids: correlations among standard molal thermodynamic properties of aqueous ions and hydroxide complexes, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, **61**(5), 907-950.
- [9] Rowe A. M., Mathematical Modelling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells, Master Thesis, University of Victoria, Department of Mechanical Engineering, Victoria, 1997.
- [10] Karaoğlan, M. U., Kuralay, N. S., PEM Yakıt Hücresi Modeli, *Mühendis ve Makina*, 2014, **55**(657), 51-58.
- [11] Azri M., Mubin A.N.A., Ibrahim Z., Rahim N.A. Raihan S., Mathematical modelling for proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2016, **86**(3), 409-419.

- [12] Xiao Y., Agbossou K., Interface Design and Software Development for PEM Fuel Cell Modeling Based on Matlab/Simulink Environment. *WRI World Congress on Software Engineering, (WCSE)*, Xiamen, China, 19-21 May 2009.
- [13] Bodur H., *Güç Elektroniği Temel Analiz ve Sayısal Uygulamalar*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2010.
- [14] Liu D., Deng F., Wang Y., Chen Z., Improved Control Strategy for T-type Isolated DC/DC Converters, *Journal of Power Electronics (J POWER ELECTRON)*, 2017, **17**(4), 874–883.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Şola S.**, Yıldız A. B., Erfidan T., An Efficient Approach to Simulation of Sepic Converter with Mutual Inductance, *International Conference On Engineering Technologies (ICENTE)*, Konya, Turkey, 25-27 October 2019.



ÖZGEÇMİŞ

Seçkin Şola, ilk ve orta öğretimini tamamladıktan sonra 2006 yılında Torbalı Anadolu Lisesini kazandı. 2012 yılında İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümüne başladı. Lisans eğitimini 2016 yılında tamamladı. 2017 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı ve aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Halen Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

