

T.C.
YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DAĞITILMIŞ ÜRETİM SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ, ANALİZİ VE
ŞEBEKEYLE ENTEGRASYONUNUN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: DOĞAN ÇELİK
DANIŞMAN: Doç. Dr. M. EMİN MERAL

VAN - 2016

T:C
YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DAĞITILMIŞ ÜRETİM SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ, ANALİZİ VE
ŞEBEKEYLE ENTEGRASYONUNUN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: DOĞAN ÇELİK

VAN - 2016

KABUL VE ONAY SAYFASI

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doç. Dr. M. Emin MERAL danışmanlığında, Doğan ÇELİK tarafından sunulan “**Dağıtılmış Üretim Sistemlerinin Modellenmesi, Analizi ve şebekeyle Entegrasyonunun İncelenmesi**” isimli bu çalışma Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili hükümleri gereğince 29/04/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile başarılı bulunmuş ve Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Doç. Dr. M. Emin MERAL

İmza:

Üye: Doç. Dr. Naci GENÇ

İmza:

Üye: Yrd. Doç. Dr. Lütfü SARIBULUT

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 06/05/2016 tarih ve 2016/21-İ sayılı kararı ile onaylanmıştır.

İmza
Prof. Dr. Suat SENSÖZ
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yaptığımı bildiririm.


Doğan ÇELİK

ÖZET

DAĞITILMIŞ ÜRETİM SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ, ANALİZİ VE ŞEBEKEYLE ENTEGRASYONUNUN İNCELENMESİ

ÇELİK, Doğan

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. M. Emin MERAL

Nisan 2016, 91 Sayfa

Son yıllarda, dağıtılmış üretim (DÜ) sistemlerinin elektrik dağıtım şebekelerine entegrasyonu giderek yaygınlaşmaktadır. Buna paralel olarak, güç sisteminde yük akış kararlılığının sürdürülebilmesi ve DÜ sistemlerinin şebeke ile senkronizasyonun sağlanması için uygun kontrol yöntemleri uygulanmalıdır. Bu tez çalışmasında; yakıt hücresi, güneş hücresi ve rüzgar olmak üzere üç farklı enerji kaynağının ortak bir doğru akım (DA) baraya bağlanarak çeşitli yüklere enerji sağladığı DÜ sisteminin modellenmesi ve benzetim çalışması yapılmıştır. Ortam şartlarının ve kullanılan donanımların tasarlanan DÜ sisteminde etkisi analiz edilmiştir. Enerji kaynaklarının; üç fazlı gerilim kaynaklı evirici vasıtasıyla şebekeyle senkronize olması ve istenen güç değerinde enerji sağlaması için; literatürdeki en yaygın faz kilitlemeli çevrim (PLL) yöntemlerinden biri olan senkron referans tabanlı PLL ve park dönüşüm tabanlı güç kontrol metodu kullanılmıştır. Tez çalışmasındaki enerji kaynaklarının ve arabirim devrelerinin modellenmesi ve benzetimi için, güç sistemleri analizi yapabilen paket program kullanılmıştır.

Tasarlanan ve benzetim modeli oluşturulan DÜ+Şebeke+Yük sisteminde çeşitli senaryolar için benzetim sonuçları alınmıştır. Yükün, ortam şartlarının ve DÜ sisteminin vereceği referans gücün değişimine göre sistem incelenmiştir. Benzetim sonuçları, uygulanan kontrol yöntemlerinin ve tasarım parametrelerinin doğruluğunu ve verimliliğini ortaya koymuştur.

Anahtar kelimeler: Dağıtılmış üretim sistemi, PLL, Senkron referans düzlem, Yenilenebilir enerji



ABSTRACT

MODELLING, ANALYSING OF DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS AND EXAMINING INTEGRATION TO GRID

ÇELİK, Doğan

M. Sc. Thesis, Electric Electronic Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. M. Emin MERAL

April 2016, 91 Pages

In recent years, integrated of the distributed generation (DG) systems to the electric distribution grid is gradually increasing. Concordantly, appropriate control methods should be applied in order to maintain the stability of load flow in power system and provide synchronization with the grid. In this study; modelling and simulation studies of DG in which three different energy sources, including fuel cell, solar cell and wind, connected to the common direct current (DC) bus system to provide energy for various loads have been made. Impact of environmental conditions and used equipment on designed DG system are analysed. In order to synchronising of energy sources with the grid by way of three phase voltage source inverter and to provide the energy at the desired power, synchronous reference frame based PLL which is one of the most common phase locked loop (PLL) methods in literature and power control method based park transformation are used. In thesis study, a package program capable of analysing power systems is used in order to modelling and simulation of energy sources and interface circuits.

In the designed and created simulation model of DG+Grid+Load system, simulation results are obtained for various scenarios. According the variation of the load, the environmental conditions and the reference power given by DG, the system is examined. Simulation results present efficiency and accuracy of the implemented control methods and design parameters.

Key words: Distributed generation system, PLL, Synchronous reference frame, Renewable energy



ÖN SÖZ

Yüksek Lisans eğitimim süresince tez çalışmamın başından sonuna kadar ilgi ve desteğini esirgemeyen, emek veren, bu tez çalışmasında konu seçimi ve çalışmalarım sırasında yardımda bulunan değerli ve saygıdeğer danışman hocam Sayın Doç. Dr. M. Emin MERAL'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım sırasında bana kaynak sunan, ilgi ve deneyimlerini esirgemeyen başta Doç. Dr. Naci GENÇ olmak üzere tüm Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi ile Öğretim Elemanlarına ve tüm hayatım boyunca manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme ve nişanlıma teşekkürlerimi sunarım.

2016

Doğan ÇELİK



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖN SÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	6
2.1. Yakıt Hücresi	6
2.2. Güneş Hücresi	9
2.3. Rüzgar Türbini	12
2.4. Dağıtılmış Üretim	13
3. YAKIT HÜCRESİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ	17
3.1. Yakıt Hücresi Sistemi ve Yapısı	17
3.1.1. Yakıt Hücresi	17
3.1.2. DA-DA yükselten dönüştürücü	26
3.2. Yakıt Hücre Sisteminin PSCAD/EMTDC Modellemesi	32
3.2.1. Yakıt hücresinin modellenmesi	33
3.2.2. DA-DA yükselten dönüştürücünün PSCAD/EMTDC modellenmesi ve kontrolü	34
3.3. Yakıt Hücresi Sisteminin Benzetim Sonuçları	35
4. GÜNEŞ HÜCRESİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ	40
4.1. Güneş Hücresi Sistemi	40
4.1.1. Güneş hücresi	40
4.1.2. Maksimum güç noktası izleme (MPPT)	43
4.2. Güneş Hücresi Sisteminin PSCAD/EMTDC Modellemesi	45
4.2.1. Güneş hücresi modellemesi	46
4.2.2. MPPT Algoritma Modellemesi	46
4.2.3. Yükselten dönüştürücü ve kontrolü	47

	Sayfa
4.2. Güneş Hücresi Sisteminin Benzetim Sonuçları	48
5. RÜZGAR TÜRBİNİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ	58
5.1 Rüzgar Türbini	58
5.1.1 Rüzgar enerjisi	58
5.1.2 Rüzgar Enerjisi	60
5.1.3 Rüzgar jeneratörü.....	62
5.1.4. Üç fazlı köprü doğrultucu	63
5.2. Rüzgar Enerjisi Sisteminin PSCAD/EMTDC Modellemesi	64
5.3. Rüzgar Enerji Sisteminin Benzetim Sonuçları	65
3. DAĞITILMIŞ ÜRETİM SİSTEMİ	67
6.1. Gerilim Kaynaklı Evirici (VSI)	69
6.2. Şebekeye Bağlı Evirici Kontrol Sistemi	70
6.3. DÜ Sisteminin Benzetim Sonuçları	74
7. TARTIŞMA VE SONUÇ	83
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	91

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 3.1.	Yakıt hücresinin şematik diyagramı.....	4
Şekil 3.2.	SOFC'nin dinamik modeli.....	26
Şekil 3.3.	DA-DA yükselten dönüştürücü devresi.....	27
Şekil 3.4.	DA-DA yükselten dönüştürücü devre analizi.....	28
Şekil 3.5.	Giriş gerilimi ve endüktans gerilimi.....	30
Şekil 3.6.	Endüktans akımı.....	31
Şekil 3.7.	Endüktans dalgacık (ripple)gerilimi.....	32
Şekil 3.8.	DA-DA yükselten dönüştürücü geribildirim kontrol sistemi.....	33
Şekil 3.9.	Yakıt hücresi sistemi blok diyagramı.....	34
Şekil 3.10.	DA-DA yükselten dönüştürücünün modeli.....	35
Şekil 3.11.	DA-DA yükselten dönüştürücünün kontrolü.....	35
Şekil 3.12.	(a) Sabit yük altında yakıt hücresinin; (b) gerilimi, (c) akımı, (d) gücü.....	36
Şekil 3.13.	Yükselten dönüştürücünün; (a) çıkış gerilimi, (b) çıkış akımı, (c)çıkış gücü.....	37
Şekil 3.14.	(a) Değişken yük altında yakıt hücresinin; (b) gerilimi, (c) akımı, (d) gücü.....	38
Şekil 3.15.	Değişken yük altında yakıt hücresine bağlanan yükselten dönüştürücünün; (a) çıkış gerilimi, (b) çıkış akımı, (c) çıkış gücü.....	39
Şekil 4.1.	Güneş hücresinin eşdeğer devresi.....	41
Şekil 4.2.	MPPT algoritma akış şeması.....	44
Şekil 4.3.	Güneş hücresi sisteminin blok diyagramı.....	45
Şekil 4.4.	MPPT sisteminin blok diyagramı.....	46
Şekil 4.5.	Yükselten dönüştürücünün kontrol yapısı.....	47
Şekil 4.6.	PV hücrenin I-V ve P-V karakteristiği.....	49
Şekil 4.7.	PV Hücrenin I-V Karakteristiğinin Işınımına göre değişimi (T=298.15, G=1000W/m ² , 600W/m ² , 300W/m ² ,).....	50
Şekil 4.8.	PV hücrenin P-V karakteristiğinin ışınımına göre değişimi (T=298,15, G=1000W/m ² , 600W/m ² , 300W/m ² ,).....	50
Şekil 4.9.	PV hücrenin I-V karakteristiğinin sıcaklığa göre değişimi (G=1000W/m ² , T=298,15K, 338.15K, 378.15K).....	51

Şekil	Sayfa
Şekil 4.10. PV hücrenin P-V karakteristiğinin sıcaklığa göre değişimi ($G=1000\text{W/m}^2$, $T=298,15\text{K}$, 338.15K , 378.15K).....	51
Şekil 4.11. PV hücrenin değişken yük altında çıkış gerilimi.....	52
Şekil 4.12. PV hücrenin değişken yük altında çıkış akımı.....	52
Şekil 4.13. PV hücrenin değişken yük altında çıkış gücü	53
Şekil 4.14. PV hücrenin değişken yük altında diyot akımı.....	53
Şekil 4.15. Yükselten dönüştürücüye bağlanan PV hücrenin çıkış gerilimi.....	54
Şekil 4.16. Yükselten dönüştürücüye bağlanan MPP referans gerilimi.....	54
Şekil 4.17. Yükselten dönüştürücüye bağlanan PV hücrenin çıkış akımı.....	55
Şekil 4.18. PV hücrene bağlanan yükselten dönüştürücünün çıkış gerilimi.....	56
Şekil 4.19. PV hücrene bağlanan yükselten dönüştürücünün çıkış akımı.....	55
Şekil 4.20. Yükselten dönüştürücüye bağlanan PV hücrenin çıkış gücü.....	56
Şekil 4.21. PV hücrene bağlanan yükselten dönüştürücünün çıkış gücü.....	57
Şekil 5.1. (a) Dikey eksenli, (b) Yatay eksenli rüzgar türbini.....	59
Şekil 5.2. Üç fazlı köprü doğrultucu.....	63
Şekil 5.3. Rüzgar türbini enerji sistemin blok diyagramı.....	65
Şekil 5.4. PMSG'nin faz-nötr gerilimleri.....	65
Şekil 5.5. Doğrultucunun çıkış gerilimi.....	66
Şekil 5.6. PMSG'nin çıkış gücü.....	66
Şekil 6.1. Dağıtılmış üretim sisteminin blok diyagramı.....	68
Şekil 6.2. VSI devresi.....	69
Şekil 6.3. Şebekeye bağlı VSI ile LC filtrenin eşdeğer devresi.....	71
Şekil 6.4. Üç fazlı şebekeye bağlı VSI'nin PI kontrollü senkron düzlem kontrol tasarımı.....	74
Şekil 6.5. Evirici faz-faz çıkış gerilimi.....	75
Şekil 6.6.. Evirici faz-faz çıkış rms gerilimi.....	75
Şekil 6.7. Şebeke faz-faz çıkış gerilimi.....	76
Şekil 6.8. Şebeke faz-faz çıkış rms gerilimi.....	76
Şekil 6.9. $V_{s,d}$ ve $V_{s,q}$ ortogonal gerilimleri.....	77
Şekil 6.10. Şebeke ($V_{s,abc}$) ve ortogonal ($V_{s,q}$) gerilimleri.....	77
Şekil 6.11. Evirici ve referans aktif güçler.....	77
Şekil 6.12. Evirici ve referans reaktif güçler.....	78

Şekil	Sayfa
Şekil 6.13. Evirici aktif gücün reaktif güce göre değişimi.....	78
Şekil 6.14. Ortak DA baraya bağlanan yakıt hücresi, güneş hücresi ve rüzgar türbini enerjilerinin aktif güçleri.....	79
Şekil 6.15. 0,5 MW yük altında yakıt hücresi, güneş hücresi ve rüzgar enerjilerinin birlikte devreye alınmasıyla eviriciden elde edilen çıkış aktif güçleri ile şebeke ve yükün aktif gücü.....	80
Şekil 6.16. 0,6 MW yük altında yakıt hücresi, güneş hücresi ve rüzgar enerjilerinin birlikte devreye alınmasıyla eviriciden elde edilen çıkış aktif güçleri ile şebeke ve yükün aktif gücü.....	80
Şekil 6.17. Sabit yük altından evirici ve şebeke güç değişimleri.....	81
Şekil 6.18. Eviricinin çıkış gücüne göre yük ve şebeke güçleri.....	81
Şekil 6.19. Yakıt hücresi, güneş hücresi ve rüzgar enerjilerinin ayrı ayrı devreye alınmasıyla eviriciden elde edilen çıkış aktif güçleri ile şebeke ve yükün aktif gücü.....	82



ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge		Sayfa
Çizelge 3.1.	Yakıt hücre çeşitlerinin karakteristiklerinin genel özeti.....	21
Çizelge 3.2.	SOFC karakteristiğinin genel özeti.....	25
Çizelge 4.2.	Yakıt hücresi parametreleri.....	34
Çizelge 4.1.	PV hücrenin karakteristik yapısı.....	48
Çizelge 6.1.	Şebekeye bağlı evirici sisteminde kullanılan parametrelerin değerleri.....	73



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklama

W	Watt
kW	kilowatt
MW	Megawatt
A	Akım
V	Volt
°C	Santigrat derece
F	Farad
Ω	ohm
H	Henry
PH₂	Hidrojenin kısmi basıncı
PO₂	Oksijenin kısmi basıncı
PH₂O	Suyun kısmi basıncı
L	Endüktans
C	Kapasitans
pu	per unit

Kısaltmalar

Açıklama

DÜ	Dağıtılmış üretim
DG	Distributed generation
RES	Renewable energy source
PV	Fotovoltaik
MPPT	Maksimum power point tracking
PMSG	Sabit miktanlılı senkron jeneratör
SCIG	Sincap kafesli asenkron jeneratörler Hegzanal
DA	Doğru akım

AA	Alternatif akım
DC	Direct current
AC	Alternating current
PEMFC	Polimer elektrolit membran yakıt hücresi
DMFC	Direkt-metanol yakıt hücresi
AFC	Alkalin yakıt hücresi
PAFC	Fosforik asit yakıt hücresi
MCFC	Erimiş karbonat yakıt hücresi
SOFC	Katı oksit yakıt hücresi
PLL	Faz kilitlemeli çevrim
SRF	Senkron referans düzlem
DIFG	Çift beslemeli asenkron jeneratör
WPGS	Rüzgar gücü üretim sistemi
STATCOM	Statik senkron kompanzatör
YSA	Yapay sinir ağları
YEK	Yenilenebilir enerji kaynakları
PWM	Darbe genişlik modülasyonu
MPP	Maksimum güç noktası
MPPT	Maksimum güç noktası izleme
VSI	Gerilim kaynaklı evirici

1. GİRİŞ

Dağıtılmış üretim (DÜ, Distributed Generation, DG), alçak (0,4 kV) ya da 36 kV'a kadar yüksek gerilim seviyesinde (0,4-36 kV) yapılan elektrik enerjisi üretimi ve enerji depolamadır. DÜ sistemleri, tüketici merkezlerine yakın elektrik dağıtım şebekesi sistemlerine bağlı veya tek başına çalışabilen, coğrafi olarak yayılı kaynakları içerir. Küçük güçlü santrallerin yanında, rüzgar, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları, hidrojen kaynaklı yakıt hücresi, mikro türbinler, gaz türbini ve enerji depolama birimleri dağıtılmış üretim kaynaklarıdır. DÜ sistemi literatürde farklı güç değerlerinde ele alınmıştır. Genel olarak birkaç Watt (W)'tan başlayabilen fakat 100MW (megawatt)'dan küçük güçlü santraller olarak ele alınır. Bu bağlamda dağıtılmış üretim mikro ölçek(1-5 kW (kilowatt)) küçük ölçek (5 kW- 5 MW), orta ölçek (5 MW-50 MW) büyük ölçekte (>50 MW) olmak üzere dört grupta sınıflandırılabilir (Arsoy ve ark., 2009).

DÜ sistemleri diğer bir ifade ile merkezi olmayan elektrik üretim sistemleri ve yenilenebilir enerji kaynakları (Renewable Energy Sources, RES) Avrupa'da ve ülkemizde önemle üzerinde durulan konuların başında gelmektedir. İthalata dayalı fosil yakıtlara olan bağımlılığın kontrol altına alınarak enerji güvenliğinin yükseltilmesi ve sera gazları emisyonu azaltılması bakımından büyük önem taşımaktadır. Merkezi olmayan üretim, günümüzde bir kojenerasyon sistemi gibi yerel ve bölgesel ihtiyaçlara yönelik elektrik üretimi anlamında kullanılmaktadır. Bazı ülkelerde güneş hücreleri başta olmak üzere yenilenebilir enerji sistemleri devlet tarafından desteklenmektedir (Özdemir ve ark., 2008).

DÜ sistemleri, elektrik arz güvenliğinin yükseltilmesi, sera gazları emisyonunun azaltılması ve gürültü seviyesi azaltılması dahil çok sayıda yararlar sağlamaktadır. Bilinen bu yararlar rağmen bu yatırımlar her zaman ekonomik olmayabilir. Yatırımların ekonomik yapılabilirliği önemli ölçüde enerji fiyatlarına ve sağlanan desteklere bağlı bulunmaktadır. DÜ sistemlerinin kapasitelerinin yükseltilmesine yönelik yatırımların cesaretlendirilmesi için tutarlı ve sürekli destekleyici politikalara ve araştırma geliştirme faaliyetlerine ihtiyaç vardır (Özdemir ve ark., 2008).

Yenilenebilir enerji kaynakları dünyadaki nüfus artışı, çevresel ve doğal sebeplerden dolayı son yıllarda daha da önem kazanmıştır ve bu kaynakların

kullanılması için entegrasyon sistemleri geliştirilmeye ve yaygınlaştırmaya başlanmıştır. Rüzgar, güneş vb. yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemindeki oranı, geleneksel kaynaklardaki doğası gereği azalma, kamuoyunun küresel ısınma ile ilgili farkında lığının artması ve yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili teknolojilerin ucuzlamasına bağlı olarak, ciddi şekilde artmaktadır.

Küçük ölçekli solar enerji sistemleri evler, iş yerleri ve uzak güç ihtiyaçları için elektrik sağlar. Daha büyük güneş enerji sistemleri daha fazla elektrik üreterek şebekeyi besler. Fotovoltaik (PV) hücreler gün ışığını elektriğe çeviren elemanlar olduğu için tüm PV sistemlerin yapıtaşlarıdır. PV hücreler, bir posta pulundan daha küçük ölçülerden başlayarak desimetre civarındaki ölçülere kadar çok farklı boyutlarda ve şekillerde olabilir. Hücreler genellikle birbirlerine bağlanarak onlarca desimetre uzunluk ve yaklaşık birkaç desimetre genişlikteki PV modüllerin oluşturulmasında kullanılır (Rashid, 2013).

İki tip PV hücre vardır: düz-plaka ve dışbükey mercekler. Düz-plaka PV dörtgen ve düzdür. Bu tip, ticari uygulamalarda kullanılan PV dizilerinin en yaygın olarak kullanılanıdır. Düz-plaka hücreler yıl boyunca üzerine düşen ışığı maksimize etmek için sabit açı ile monte edilir. Konsantre dışbükey mercekler ve buna uygun PV hücreler aynı güç değeri için düz-plaka olanlara göre daha az malzeme gerektirir; böylece hücrelerin boyutları küçülür. Bununla birlikte, konsantre hücreler şayet hava bulutlu değil ise en iyi durumda çalışır. Bulutlu günlerde, bulutlardan yansıyan ışık düz-plaka PV hücreler elektrik üretmeye devam eder (Rashid, 2013).

PV hücrelerin çalışma prensibi yarıiletkenlere benzemektedir. Bir diyottan akım geçmesi harici gerilim uygulanarak gerçekleştirilir. Solar hücrelerin birçoğunun verimleri düşük olup, hücrenin malzeme yapısına bağlı olarak %2 ile %20 aralığında değişir. Çıkış gerilimini de ışınım, ortamın sıcaklığı gibi faktörler etkiliyor. Bir PV sistemi, normal olarak P_{max} maksimum güç noktası olarak bilinir. Maksimum gücü sağlayan MPPT (Maksimum Power Point Tracking) kontrol metodu kullanılarak istediğimiz verimi elde edebiliriz (Rashid, 2013).

Rüzgar enerjisi teknolojileri, rüzgardaki enerjiyi elektrik üretmek, bataryaları şarj etmek, su pompalamak, tahıl öğütmek ve benzeri işlerde bir kaynak olarak kullanılır. Rüzgar enerjisi sistemlerinin çoğu, şebekeye bağlı olmayan uygulamalar için kullanılabilir. Rüzgar enerjisinin şebeke ölçeğindeki kaynakları söz konusu olduğunda,

çok sayıdaki türbin şebekeye güç sağlayan bir rüzgar çiftliği oluşturmak için genellikle birbirine yakın inşa edilmektedir. Genellikle elektrik enerjisi sağlayıcıları, müşterilerine gücü sağlamak için rüzgar çiftliklerinden faydalanır (Rashid, 2013).

Rüzgar hızı ve rüzgarın kalitesi iki kritik faktöre bağlıdır. Rüzgar türbinleri için en uygun yerler, türbülansız mekanlardır çünkü turbülans, rüzgar türbinlerini daha az verimli kılar ve türbinin toplam verimliliğini etkiler. Arazi pürüzlülüğüne bağlı olarak rüzgar, daha fazla veya daha az türbülanslı olabilir. Tüm rüzgar türbinleri benzer ilkelere göre çalışmasına rağmen birçok çeşidi vardır. Bunlar yatay eksenli türbinler ve dikey eksenli türbinlerdir (Rashid, 2013). Rüzgar türbinlerinin tasarımlarında dikkat edilen en önemli unsur daha fazla rüzgarı yakalayıp maksimum elektrik üretimi için daha fazla dönüş sağlayabilmektir. Rüzgar türbinleri genellikle kanat sayısında farklılık gösterirler. Temel olarak iki kanatlı türbinler daha verimli olmalarına rağmen üç kanatlı türbinler tercih edilir. İki kanatlı türbinlerde kanat sayılarının az olması ile daha fazla rüzgar akışı ve daha fazla dönüş sağlanır. Ancak bu türbinlerde dengeyi sağlamak ve elektrik üretmek için özel amortisörler ve özel olarak tasarlanmış hub gerekmektedir. Bu durum maliyeti arttırdığı için iki kanatlı rüzgar türbinleri pek tercih edilmez (Anonim, 2012).

Ticari rüzgar türbinleri istisnai durumlar oluşmadığı sürece 3 kanatlı olarak tasarlanırlar. Üç kanatlı rüzgar türbinleri iki kanatlılara diğer tasarımlara göre daha az maliyetle, daha güvenli olması ile ve daha fazla elektrik üretimi sağlamaktadır. Bu sistemler her 120 derecelik dönüş ile elektrik üretimi için gerekli torku oluşturur. Bu durumda akıllara 4-5 ya da daha fazla kanatlı türbinlerde daha küçük açılı bir dönüş ile tork sağlanır ve daha fazla elektrik üretilmez mi sorusu gelebilir ancak üçten daha fazla kanatlı olmaları durumunda kanatlara daha fazla rüzgar çarpar ancak bu daha fazla dönme sayısı ve daha fazla tork oluşumuna neden olmaz. Çünkü kanat sayısının daha fazla olması durumunda her kanat aşağısındaki kanat için gelen rüzgarı engeller ve kanatlar arasındaki rüzgar akışı yetersiz kalır. Bu durum ise dönüş hızının 3 kanatlıya göre çok daha az olmasına neden olur. Bununla doğru orantılı olarak da elektrik üretimi daha az olur (Anonim, 2012).

Bir rüzgar enerji sisteminin temel unsurları türbin, dişli kutusu ve güç elektroniği dönüştürücüleridir. Şebekeye bağlanmak üzere, transformatörlere sıklıkla ihtiyaç duyulur. Jeneratörlerin çıkış gerilimleri, bir veya birden fazla kademeli güç elektroniği

dönüştürücüleri ile nominal şebeke gerilimine dönüştürülür. Rüzgar türbinlerinde kullanılan çok çeşitli elektrik makineleri vardır. Belirli bir makinenin rüzgar jeneratörü olarak çalıştırılmak üzere seçilmesi için açık bir kıstas yoktur. Rüzgar jeneratörü yerleşik gücüne, türbin alanına, yük tipine ve kontrol kolaylığına göre seçilebilir. Rüzgar türbini uygulamalarında genellikle kullanılan jeneratör tipleri fırçasız DA (BLDC), sabit miktanlı senkron jeneratörler (PMSG), sincap kafesli asenkron jeneratörler (SCIG) ve senkron jeneratörlerdir. SCIG veya BLDC jeneratörler genelde evrensel uygulamalarda ki küçük rüzgar türbinleri için kullanılır (Rashid, 2013).

Yakıt hücreleri gelişmekte olan bir teknolojidir. Yakıt hücreleri elektrik üretmede kimyasal reaksiyonları kullanan elektrokimyasal cihazlardır. Bir yakıt hücresi kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir batarya gibi çalışır. Bir yakıt hücresi hidrojen gibi yakıt ile oksijen gibi bir oksidine ihtiyaç duyar ve çıktı olarak ise, doğru akım (DA) elektrik, su ve ısı üretir. Yakıt hücresinin çıkış gerilimi genellikle düşük olup bu gerilim bir DA-DA yükselten (boost) dönüştürücü ile yükseltilir ve çıkış güç kapasitelerini artırmak için sıklıkla belli sayıda seri ve paralel bağlanır. Değişken veya sabit frekanslı ve değişken veya sabit gerilimli bir alternatif akım (AA) üretmek için genellikle PWM kullanılır (Rashid, 2013).

Yakıt hücreleri normal olarak farklı elektrolitlerin kullanıldığı elektroliz malzemelerden yararlanır. Tüm yakıt hücrelerin çalışma prensibi benzer olup elektrolitleri farklıdır. Elektrolit, anottan yüke ve yük üzerinden katot plakasına doğru akmasını sağlar. Elektrolit tiplerine göre yakıt hücreleri şunlardır: Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücreleri (PEMFC), Direkt-Metanol Yakıt Hücreleri (DMFC), Alkalin Yakıt Hücreleri (AFC), Fosforik Asit Yakıt Hücreleri (PAFC), Erimiş Karbonat Yakıt Hücreleri (MCFC), Katı Oksit Yakıt Hücreleri (SOFC). Bu çalışmada SOFC'ler yüksek sıcaklıklarda (600°C-1000°C) çalışmaları ve %75'e varan yüksek verimliliklerinden dolayı kullanacağız (Rashid, 2013).

Bu tez çalışmasında; Güneş Hücresi, Yakıt Hücresi ve Rüzgar olmak üzere üç farklı enerji kaynağının ortak bir DA baraya bağlanarak çeşitli yüklere enerji sağladığı DÜ sisteminin modellenmesi ve benzetim çalışması yapılmıştır. Ortam şartlarının ve kullanılan donanımların tasarlanan dağıtılmış üretim sisteminde etkisi analiz edilmiştir. Enerji kaynakları üç fazlı gerilim kaynaklı evirici vasıtasıyla şebekeyle senkronize ve istenen güç değerinde enerji sağlaması için; literatürdeki en yaygın faz kitlemeli

çevrim (PLL) yöntemlerinden biri olan senkron referans tabanlı PLL ve abc/dq referans senkron düzlem güç kontrol metodu kullanılmıştır. Tez çalışmasındaki enerji kaynaklarının (yakıt hücresi, güneş hücresi, rüzgar türbini) ve arabirim devrelerinin (yükseften DA-DA dönüştürücü, evirici, vb) modellenmesi ve benzetimi için PSCAD/EMTDC yazılım paketi kullanılmıştır.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Yakıt Hücresi

Fedakar ve ark. (2013), SOFC'nin dinamik modellemesini yaparak benzetim çalışmasını yapmışlardır. DA-DA dönüştürücü ve DA-AA evirici için PI kontrol metodu kullanmışlardır. Katı oksit yakıt pilinin DC karakteristiği sabit ve değişen yük altında test edip 400 V AA iletim hattının 10 km boyunca taşımalarını incelenmiştir.

Mikilli ve Panda (2011), shunt aktif filtreyi bulanık mantık ve PI kontrolcülerıyla analizini yapmışlardır. Aktif ve reaktif güç (p-q) metodunu kullanarak analiz etmişlerdir. Benzetim çalışmasını dengeli, dengesiz ve sinüzoidal olmayan durumlar altında incelenmiştir. Benzetim sonuçları bulanık mantık ve PI kontrolcülerin dinamik davranışlarını doğrulamıştır. İki kontrolcü sistemdeki harmonikleri azaltabilmesine rağmen bulanık mantık kontrolcünün dinamik performansı PI kontrolcüden daha iyi olduğunu gösteriyor.

Bocaletti ve ark. (2006), yakıt pili modellerinin analizi amaçlamışlardır. Özellikle PEM hücresi ve SOFC modellemelerini geliştirerek Matlab/Simulink yazılımında kurulumu yapılmıştır. PEM yakıt hücresini ve SOFC' yi durgun durumda dinamik uygulamaları analiz edip ve onların ana karakteristiklerini hava, hidrojen akış oranı ve hidrojen basıncına bağlı olarak karşılaştırmışlar.

Akkinapragada ve Chowdhury (2006), yakıt pili için ani yük değişiminde cevabı ve SOFC' nin dinamik modelini incelenmiştir. Bu model için geri besleme kontrol sistemi olduğu ve olmadığı durumlarda incelenip PSCAD/EMTDC yazılımında kurulumu yapılmıştır. Yük değişimi uygulaması için kullanılan SOFC sistemi DA-DA dönüştürücünün ihtiyacını doğrulamak için güç karakteristiği elde edilmiştir. Bu çalışmada yüksek sıcaklıkta çalışma karakteristiğinden dolayı özellikle SOFC üzerinde odaklanmıştır. Yakıt pili genellikle düşük gerilimlerde çalışır ve yükseltmek için yükselten dönüştürücü kullanılır.

Ranjan ve ark. (2015), dağıtılmış üretim sisteminde yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesini amaçlamışlardır. Yakıt pili dağıtılmış üretim sisteminde gelecek vaat eden güç üretim kaynakları olarak düşünülebilir. Bu çalışmada SOFC'nin

Matlab/simulink'de matematik modelini geliştirmişlerdir. SOFC dağıtılmış üretim sisteminin transient analizi için AA/DA yük almışlardır.

Jeong ve ark. (2011), üç fazlı akım besleyicisi DA-DA dönüştürücü 26-48 V yakıt pili gerilimini 400 V'a yükseltip ve üç fazlı PWM evirici ile şebeke arasında aktif ve reaktif güç kontrolünün yapmışlardır. Yakıt pili PSCAD/EMTDC benzetim programında kurulmuştur. Donanım uygulamanın geçerliliği için 1.2 kW PEM hücresi ile laboratuvar prototipi çalışmasını doğrulamışlardır. Amaçlanan güç sistemi düzenleyicisi yakıt pili ile bağlantılı ticarileştirilebilir.

Salam ve ark. (2009), PEM yakıt hücresi, şebeke ve gerilim kaynaklı eviricinin benzetim çalışması üzerinde durmuşlardır. PEM yakıt hücresinin dinamik performansı farklı koşullar altında incelenmiştir. Evirici için farklı anahtarlama frekansları tartışılmıştır. Eviriciyi per unit birim sistemin altında kontrol edilmişlerdir. Yakıt pili modelinin benzetimini hem şebeke hem de ada modunda incelenmişlerdir. Benzetim sonuçları modelin doğru şekilde çalıştığını gösteriyor. Sistemin uygulaması için Matlab/Simulink programını kullanılmışlardır.

Vijayakumar ve Nair (2013), dağıtılmış üretim tabanlı yakıt pili çalışmasının benzetimini, kontrolünü ve modellemesini yapmışlardır. Dağıtılmış üretim sistemi tabanlı yakıt pilinin güç kalitesi problemlerinin kontrolü için PI ve bulanık mantık kontrolünü kullanmışlardır. Yakıt pili ve güç elektroniği elemanları modellemesini inceleyip PI ve bulanık mantık kontrollerini her bir elemana güvenli bir şekilde uygulanmışlardır. Amaçlanan sistemin etkinliğini Matlab/Simulink'de doğrulamışlardır.

El-Sharkh ve ark. (2004), PEM yakıt hücresini şebekeden bağımsız dinamik elektromekanik modeli üzerinde durmuşlardır. Bu model metanol düzenleyici, PEM yakıt pili ve güç düzenleyiciden (power conditioning) oluşur. Elektriksel yükün artıp azaldığı durumlarda yakıt pilinin cevabını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar yakıt pilinin hızlı cevap verdiği görülmüştür.

Bahçeci ve ark. (2012), PEM yakıt hücresinin dinamik modeli üzerinde durmuşlardır. PSCAD/EMTDC yazılımını kullanarak elektromekanik ve termodinamik modelini gerçekleştirmişlerdir. Nernst denklemine dayalı dinamik modelin davranışını DA yük altında incelemişlerdir.

Akkinapragada (2007), SOFC'nin dinamik modelini PSCAD/EMTDC yazılım programını kullanarak modellemiştir. DA-DA düşüren-yükselten (buck-boost)

dönüştürücü ve onun geri besleme kontrol sistemini modellemiştir. Üç fazlı eviriciyi DA-DA dönüştürücü ve diğer yanında trafo olan şebeke arasına yerleştirmiştir. Eviricinin anahtarlama sinyalleri için kontrol stratejileri geliştirip ve modellemiştir. Evirici kontrol yöntemi için trafo karşısındaki gerilim ve evirici faz açısını kontrol etmek için PQ (aktif-reaktif güç) kontrol yöntemini kullanmıştır. DA-AA eviricinin karakteristiğini DA-DA dönüştürücü ve yakıt pilinin karakteristiği ile karşılaştırmıştır. Bu çalışmada yakıt pilinin termodinamik etkileri düşünülmemiştir. Benzetim sonuçları güç dengeleyici sistem ile doğrulandığını gösteriyor.

Becherif ve Hissel (2010), PEM yakıt hücresi için ileri derecede motokompresör grubu kontrol sistemini uygulamışlardır. Yakıt hücresi maksimum çıkış gücü için oksijen stojiometri için en uygun değerinin hesaplanmasını amaçlamışlardır. Hava motokompresör birleşimli PEM yakıt hücresi tabanlı maksimum güç izlemeyi (MPPT) entegre etmeye çalışmışlardır. MPPT kontrol yöntemini PEM yakıt pili ve motokompresörden bağımsız seçmişlerdir.

Luckose ve ark. (2011), dizel jeneratörleri akustik ve hava kirliliğine neden olduğu için yakıt pillerin tercihlerinden bahsetmektedirler. Yakıt pili olarak seçilen PEM PSCAD/EMTDC' de modellenip benzetim sonuçlarını elde etmişlerdir. Yakıt pili ani bir yük değişiminde hızlı cevap verdiğini gözlemleyip PSCAD'de modellenip çözümler sunmuşlardır.

Ngema ve ark. (2010), PEM yakıt hücresinin, DA-DA dönüştürücünün ve DA-AA eviricinin PSCAD/EMTDC' de modellenmesi yapmışlardır. Dönüştürücü yakıt hücresinin gerilimini yükseltmek için kullanılıp ve kontrol edilerek maksimum yükte istenilen gerilimi tutmaya çalışmıştır. Eviriciyi DA gerilimini AA gerilimine çevirmek için kullanmışlardır.

Fedakar (2012), SOFC'nin elektriksel karakteristiğinin deneysel ve benzetim çalışmasını yapmıştır. SOFC'nin dinamik modellenmesini, DA-DA dönüştürücü, DA-AA evirici ve güç düzenleyici kontrol sistemini PSCAD/EMTDC' de yapmıştır. Kullanılan parametreler literatürden alıp gerçekleştirmiştir. Şebekeye bağlı yakıt hücresi modelleyip farklı AA yük altında incelemiştir.

Bahçeci (2012), PEM yakıt pili, DA-DA dönüştürücü ve DA-AA eviriciyi PSCAD/EMTDC' de modellenmesini yapmıştır. DA-DA dönüştürücü ve DA-AA

eviricinin kontrolü yapıp şebekeye bağlanarak güç üniteleri ayrı ayrı kontrol edilerek şebeke ile senkronizasyonu sağlamıştır.

2.2. Güneş Hücresi

Barchowsky ve ark. (2012), PV panel için MPPT kontrolcü, DA-DA düşüren dönüştürücü, evirici ve bulut üretici modellerini modellemişlerdir. Bu bileşenlerin kullanımı iki şekilde geliştirmişlerdir. Birincisi, merkezi MPPT ile ikincisi her bir panele MPPT'nin dağıtılmasını yapmışlardır. Her bir sistem için en iyi ve en kötü hava koşulları çalıştırarak sistemlerin durumları gözlemleyip karşılaştırmışlardır. Güneşli hava da her iki sistemde eşit bir şekilde akım kaynağında değişiklik olmuştur. Daha düşük değerli merkezi MPPT sisteminden dolayı güneşli havaya yakın olan durum en iyi durum olarak kabul edilmişlerdir. Bulutlu hava durumunda dağıtılmış MPPT sistemi daha iyi çalışır ve ani hava değişimlerinde daha iyi reaksiyon verir. Sonuç olarak dağıtılmış MPPT sistemi garanti güneş ışığı vermeyen yerler için daha iyidir.

Rajapakse ve Muthumuni (2009), bir PV panelin benzetim modelini elektromanyetik transient benzetim programı olan PSCAD/EMTDC'de yapmışlardır. Maksimum güç izleme algoritmaları tabanlı değişen iletim benzetim modeli yapılmıştır. Bu benzetim modellerinin uygulamasını PV panelini şebekeye bağlayarak yapmışlardır.

Rahman ve Varma (2011), PV güneş sisteminin PSCAD/EMTDC modelini, şebekeye bağlı üç fazlı eviriciyi (VSI) ve onun kontrolünü yapmışlardır. VSI kontrolünü akım döngüleriyle yapmışlardır. Verilen ışın ve sıcaklığa bağlı olarak maksimum güç izleme uygulamasını yapmışlardır. İhtiyaç duyulan DA-DA dönüştürücü ile birlikte eviriciyi maksimum güç elde etmek için kullanılmışlardır. Evirici çıkış gücüne bakılmaksızın sınırlı harmonik içerdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın literatüre en büyük katkısı şebekeye bağlanan dönüştürücülerin program kodlarını kullanmadan blok diyagramları ile PSCAD/EMTDC'de kurulmasıdır. Bu sayede daha hızlı ve doğru şekilde benzetim çalışmasını yapmışlardır.

Kalbat (2013), PSCAD/EMTDC yazılım paketi kullanarak şebekeye bağlı PV hücrenin modellenmesini yapmıştır. Bu model PV hücre, DA-DA kapasitans hattı, DA-DA düşüren dönüştürücü, üç fazlı evirici, AA endüktif filtre ve şebekeden oluşmaktadır. Atmosferik olayların model üzerinde etkisi araştırmıştır. Toplam harmonik bozulma

eviricide elde edip IEEE std 519-1992 ile sınırlanan limit ile karşılaştırmıştır. Daha önceki çalışmalarına dayalı olarak, PSCAD programının en hızlı ve verimli bir program olduğunu gözlemlemiştir. Çünkü Matlab/Simulink ve Simpower gibi yazılımlar yavaş olduğundan PSCAD/EMTDC paket yazılımı şebekeye bağlı PV hücre için seçilmiştir. Yazılım programının diğer bir avantajı da Matlab/Simulink ile ara yüz oluşturmasıdır.

Xia (2012), Şebekeye bağlı güneş hücresi sistemini incelemiştir. Bu sistemde karışıklık ve gözlem (Perturbation ve Observation), artan iletim maksimum güç noktası izleme MPPT çeşidi ve bulanık mantık kontrol MPPT gibi farklı kontrol yöntemlerini analiz ederek verimliliklerini ve performanslarını kıyaslamıştır. Sistemin güvenilirliğini geliştirmek için uygun kontrol parametreleriyle akım döngüsü kendinden uydurma, deneme yanılma ve matematik analizi içeren üç farklı PI kontrolüyle uygulamasını yapmıştır. Modülasyon ve de modülasyon PI kontrol döngüsünün dq0/abc senkron düzlem yapısının getirdiği karışıklık oransal rezonans kontrolcü, basit kontrol yapısı ve sıfır karalılık hatası ile tasarlamıştır. LCL filtreyi analiz edip kararlılık ve bozulma durumları altında sistemi modellemiştir.

Kim ve ark. (2008), şebekeye bağlı PV sistemin şebeke ile analizi için benzetim çalışması yaparak ve sistem tasarımı için kontrol yöntemlerini amaçlamışlardır. Güneş sisteminin basit bir modelinin karakteristiği incelenmişlerdir. Sistemin benzetim çalışması için PSCAD/EMTDC yazılım paketi kullanılmıştır. Benzetim sonuçlarını geniş bir değerlendirme ve etkili bir kontrol sistemiyle doğrulamışlardır.

Bonkounge ve ark. (2013), tek diyot ve beş parametreden oluşan PV modelini yapmışlardır. Bu PV modelini Matlab yazılımında yapıp sonuçlarını standart test durumu (STC) ile PV karakteristiğinin datasheet değerleriyle kıyaslamışlardır.

Kumar ve Muralidharan (2014), Matlab/Simulink yazılımını kullanılarak PV hücrenin I-V karakteristiği üzerinde çevresel ve fiziksel etkilerini incelemişlerdir. Tek diyot, seri direnç ve shunt dirençten oluşan PV hücrenin değişik parametreler arasında matematiksel ilişkisini yapmışlardır. I-V karakteristiğinin farklı değerleri deneysel sonuçlarla kıyaslamışlardır. Benzetim sonuçları I-V karakteristiği için farklı sıcaklık ve direnç değerleri kullanmışlardır. Benzetim uygulaması için Matlab/Simulink yazılımını kullanmışlardır.

Prakash ve ark. (2014), şebeke ile PV kaynağın ara yüzündeki kontrol yöntemini amaçlamışlardır. Şebekeye yükselten dönüştürücü ve gerilim kaynaklı evirici

bağlamışlardır. Amaçlanan kontrol yöntemi bozuk olan şebeke gerilimine serbest harmonik akımını enjekte etmektedir. PV kaynağından şebekeye enjekte edilen aktif güç kontrol sistemini doğrulamaktadır. Önerilen kontrol yöntemi şebeke ile dağıtılmış üretim sistemi kaynakları (rüzgar, yakıt pili, güneş panelleri) arasında önemli çözümler sunmaktadır. PV dizisi için maksimum güç elde etmek için MPPT kullanmışlardır. Şebeke gerilimi içinde PQ teorisi kullanmışlardır. PLL tekniğini şebeke geriliminin faz ve frekans bilgisini almak için kullanmışlardır. Benzetim uygulaması Matlab/Simulink yazılımında yapmışlardır. Benzetim sonuçları akım harmoniklerinin sınırlı seviyede olduğunu gösteriyor.

Nandurkar ve Rajeev (2012), şebekeye bağlı ile PV sistemini ve bu sistemin bir parçası olan üç fazlı eviricinin benzetim tasarımı yapmışlardır. Dönüştürücü olarak kullanılan VSI senkronize d-q referans düzlem yapısıyla kontrol edilmektedir. PLL tekniğini şebeke faz ve frekansını takip etmek için kullanmışlardır. Yüksek frekanslı dalgacıkları elemek için düşük geçirgen filtre kullanmışlardır.

Stallon ve ark. (2013), PV panelin ve yüksek verimli yükselten dönüştürücünün tasarımını ve benzetimini yapmışlardır. Yenilenebilir enerji kaynakları olarak güneş enerjisi, rüzgar ve biokütle gibi şebekeye fazla bağlanamamaktadır. Çalışmanın en büyük katkısı yükselten dönüştürücünün yüksek verimlilikte çalıştırılmasıdır. Benzetim çalışması için Matlab/Simulink yazılımını kullanmışlardır.

Rahman (2012), PV çiftlikleri için önemli güç kazancı sağlayan eviriciler için yeni teknoloji kontrolleri sunuyor. Güneş çiftlikleri gece boşta çalışır ve sabahın erken saatleri ve öğleden sonra geç saatlerde kapasitelerin altında çalışırlar. Bu yüzden güneş çiftlikleri tam kazançları istenen düzeyin altında kalıyor. Yeni teknoloji güneş çiftliklerini işlevsel olarak PV- Statik Senkron Kompanzator (STATCOM) ya da STATCOM olarak bilinen dinamik reaktif güç kompanzatorüne dönüştürür. PV güneş sistemi PSCAD/EMTDC'de modellenip ürün datasheet ile doğrulamıştır. Bu tezin diğer bir katkısı Kanada'da güneş çiftliğine olan harmonik etkiler ilk kez incelemiştir.

2.3. Rüzgar Türbini

Verma ve ark. (2013), PSCAD/EMTDC yazılımında çift beslemeli asenkron jeneratör (DIFG) ve PMSG rüzgar türbini tabanlı modellemesi ve benzetim çalışmasını yapmışlardır. Rüzgar enerjisi sistemi DA gerilimi sabit DA-DA dönüştürücüye sahiptir ve reaktif gücün sıfırda kalmasını sağlıyor. Ayrıca şebekeye bağlı DIFG'nin ve PMSG'nin kontrollerini yapmışlardır.

Han ve ark. (2007), rüzgar gücü üretim sistemini (WPGS) PSCAD/EMTDC yazılımını kullanarak benzetim çalışması yapmışlardır. Değişen rüzgar hızına bağlı rüzgar güç üretim sistemi için etkili ve başarılı bir benzetim çalışması için gerçek hava koşulları altında gerçekleştirmişlerdir. Gerçek hava koşullarında EMTP ve PSPICE gibi yazılımları kullanmak daha zordur. Bu yüzden rüzgar türbini sisteminin bileşenlerinin modellenmesi ve gerçek hava koşulları PSCAD/EMTDC'de lineer olmayan dış parametrelerin ara yüzü olarak göstermişlerdir. Rüzgar türbini verimliliğini, güç dönüştürücüyü ve enerji akışını analiz etmişlerdir. Toplam harmonik bozulmayı hesaplamışlardır.

Syahputra ve ark. (2014), dağıtılmış üretim sisteminin bir parçası olan rüzgar türbinin analizi üzerinde durmuşlardır. Rüzgar türbinini indüksiyon jeneratör ile çalıştırmışlardır. Dağıtılmış üretim sistemi elemanı olan rüzgar türbini şebekeye gücü sağlayabiliyor. Rüzgar türbini hem hata durumları ve normal durumlar altında incelemiştir. Benzetim çalışması için Matlab/Simulink ile yapmışlardır.

Nandi ve Chakraborty (2012), şebekeye bağlı senkron rüzgar jeneratör sistemini dengelemek için gerilim kaynaklı dönüştürücü tabanlı rüzgar türbinin STATCOM ile modellemesini yapmışlardır. Rüzgar türbini şebekeye bağlandığı zaman kaynağın güç kalitesi üzerindeki etkileri anlamak için önemlidir. STATCOM FACTS tabanlı gerilim kaynaklı evirici, esnek güç akış kontrolü, güvenli yük ve güç osilasyonu için kullanılır. Şebeke üzerinde hata durumlarını çalışmışlar. Gerilim düşümü geliştirilmesi STATCOM olduğu ve olmadığı durumlarda karşılaştırmışlardır. Sistemin uygulaması için PSCAD/EMTDC yazılım paketi kullanmışlardır.

Kumar ve ark. (2013), küçük rüzgar güç dönüşüm sisteminde SEIG uygulamasını yapmışlardır. Bu tür dönüşümler yük ile sabit gerilim ve frekans sayesinde güç talebini karşılamıştır. Batarya enerji depolama sistemi ile gerilim kaynaklı SEIG ve yük arasındaki güç akışını sağlamak için kullanmışlardır. Rüzgar

üretim sisteminin gerilim ve frekans kontrol yöntemini hazırlamışlardır. Rüzgar sisteminin ve senkron jeneratörün matematik modeli geliştirilip Matlab yazılımında değişen yük altında incelemiştirlerdir. Rüzgar üretim sistemi ile senkron jeneratör ve STATCOM için gerilim ve frekans sabitleri elde etmişlerdir. Senkron jeneratör STATCOM ile birlikte reaktif gücün azaltılmasında yardımcı olur. STATCOM bu amaçla kullanmışlardır. Türbin sabit hıza sahip olmak için eğim (pitch) ile kontrol edilip indüksiyon jeneratör için minimum kapasitans seçmişlerdir.

Kim ve ark. (2004), değişken hızlı rüzgar türbinin şebekeye bağlı dinamik modellemesini ve benzetim çalışması için PSCAD/EMTDC yazılımını kullanmışlardır. Rüzgar sistemin ara yüzü olarak kullanılan güç dönüştürücünün dinamik modellemesi yapmışlardır. Evirici kontrol yöntemleri değişken hız altında maksimum gücü yakalamak ve sabit güç faktörü ya da gerilim düzenlemesi için istenilen seviyede reaktif gücü tutmaktır. Bu modelleme çalışması şebeke üzerindeki etkilerin yanı sıra değişken rüzgar hızının performansı ve kontrolü üzerinde durmuşlar.

Sinha ve Tapre (2014), rüzgar çiftliğinde güç sistemi dengeleyici kontrolü olduğunda ve olmadığı durumlarda makina hızı, güç ve yük açıları gibi farklı sonuçlar üzerinde durulmuşlardır. Ani rüzgar ve hava değişimlerinde etkisini azaltmak ve güç osilasyonlarını dengelemek için güç sistemi dengeleyici kontrol sistemini kullanmışlardır. Temel olarak dağıtılmış üretimdeki rüzgar ve hava değişimleri olduğunda güç oluşumu ve makinedeki ana değişimler üzerinde durmaktadır. Ayrıca ani ramp ve rüzgar olduğunda istenilmeyen güç osilasyonunda rüzgar türbininde mekanik hız kontrolünü sağlamak ve senkron makine ve jeneratörün türbin tork performans analizi incelemiştirlerdir.

2.4. Dağıtılmış Üretim

Urganlı (2012), DÜ tesislerinin güç sistemleri parametrelerinden olan şebeke kayıpları, gerilimleri ve hat akışlarına olan etkileri, bağlantı yeri ve gücün belirlenmesi açısından incelemiştir. Öncelikle konvansiyonel yük akış analizi metotları kullanılarak yapılan analizler sonucunda şebeke kayıpları ve sistem gerilimleri açısından dağıtılmış enerji sistemlerinin güç sistemlerine en uygun hangi güçte ve hangi noktadan bağlanacağı ayrıntılı olarak irdelenmiştir. Farklı çalışma koşulları altında önerilen yöntemlerin performansları IEEE test sistemleri kullanarak test etmiş ve dağıtılmış

enerji sistemlerinin şebekeye olan etkilerinin analizinde ve entegrasyonunda güvenilir bir şekilde kullanılabilmesi göstermiştir. Yük belirsizliklerin dahil edildiği bu çalışmalarda farklı yük seviyelerinde optimum DÜ yeri ve gücü yapay sinir ağları (YSA) yardımıyla bulunabilmektedir. Bu sistem ile birlikte, şebeke yönetim merkezlerinde her bir durum için tekrar edilen optimizasyon ve yük akış analizlerinin yapılmasına gerek kalmamaktadır.

Çakal (2012), arıza akımı sınırlayıcılarının elektrik şebekesi üzerindeki etkileri üzerine çalışmıştır. Arıza akımı sınırlayıcıların tanımları, özellikleri ve çeşitleri gibi temel kavramlar aktarılmaktadır. Arıza akımı sınırlayıcının sisteme dâhil edilmesinin etkileri incelemiş ve PSCAD/EMTDC yazılım programını kullanarak örnek güç sistemleri üzerinde çalışmalarını yapmıştır.

Nuroğlu (2011), DÜ'nün dağıtım şebekesine bağlantılarının etkilerini incelemiştir. Özellikle arıza akımı, koruma ve gerilim profilini irdelemiştir. Bunun için üç farklı temel dağıtım şebekesi kullanılarak DÜ bağlantısının etkileri gösterilmek üzere sürekli durum ve kısa devre arıza analizleri gerçekleştirmiştir. Bütün benzetimlerde Digsilent Powerfactory yazılım programını kullanmıştır. Özellikle kısa devre arıza akımlarına ve gerilim etkileri üzerinde durulmuştur. DÜ'nün kapasitesinden en üst düzeyde yararlanmak, güvenilirliği arttırmak ve koruma/kontrol koordinasyonunu sağlamak için merkezi koordinasyon röle tasarımı geliştirmiştir.

Gözel (2009), dağıtım sistemlerine uygun eşdeğer akım enjeksiyon tekniği ile kayıp duyarlılık ifadesinden yararlanılarak radyal ve kapalı devre bulunan DÜ sistemlerinde güç kayıplarını en aza indirmek amacı ile eklenecek yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) yerleştirilmesi için güvenilir, kolay uygulanabilen ve sonuca hızlı ulaşılabilen iki metot geliştirmiştir. Geliştirilen metotlar radyal sistemler ve kapalı devre bulunan dağıtım sistemler için Jacobian veya empedans matrisi kullanmayan YEK'in en uygun yeri ve büyüklüğü elde eden analitik metotlardır. Geliştirilen analitik metotlar dağıtım test sistemine ve gerçek radyal dağıtım sistemine uygulanarak ızgara arama metodu ile geçerliliği doğrulanmıştır.

Mu ve Zhao (2013), doğrudan rüzgar türbine bağlanan PMSG, PV hücre ve mikro türbin tabanlı enerji kaynakların dinamik modellenmesi üzerinde durmuşlardır. Kontrol stratejileri geliştirilerek PSCAD/EMTDC ile benzetim çalışmasını yapmışlardır. PV hücrenin karakteristiği birkaç parametreye bağlı olduğuna

değınmişlerdir. Bu parametreler; güneşin radyasyon yoğunluğu, ortam sıcaklığı, aydınlatma gibi parametrelerdir.

El Safty ve ark. (2010), dağıtılmış üretim sisteminde hataların olduğu durumlar boyunca sistemin kararlılığı ve sistem kararlı durumdayken hataların etkilerini araştırmışlardır. DÜ şebekeye bağlanırken sürekli, geçici cevapta hataların ve değişken yükün etkisi üzerinde durmuşlardır. IEEE'nin 13 düğüm nokta testi kullanılarak hatalar tespit edilmeye çalışmışlardır. DÜ sisteminin kontrolü için PID kullanmışlardır. Bu sistemin uygulamasını PSCAD/EMTDC yazılımını kullanılarak yapmışlardır.

Norouzizadeh ve ark. (2010), güç salınımı (güç sistemlerinde görülen düşük frekanslı küçük genlikli salınımlar, gerektiği gibi sönümlemediği zaman, sistemin güç iletim kapasitesini sınırlayarak güç sisteminin kararsızlığa gitmesine neden olabilirler.) çok azaltılarak ve üretim seviyesi bir DÜ yerine birkaç tane geliştirerek artırmaya çalışmışlardır. Sistem birkaç dengelenmemiş yük altında aktif ve reaktif güç akışını test etmişlerdir. DIFG kullanılarak üretilmiş ve tüketilmiş aktif ve reaktif darbe genişlik modülasyonu (PWM) kullanarak gücü kontrol etmişlerdir. Benzetim sonuçları reaktif güç tabanlı kontrol sistemi kullanarak-gerilim tabanlı kontrol sisteminden daha iyi sonuç verdiğini gösteriyor. Uygulamanın sonuçlarını elde etmek için PSCAD/EMTDC yazılımını kullanmışlardır.

Laili ve ark. (2012), mikro türbin üretim sistemi modellemesini PSCAD'de hazırlayıp, dağıtım sisteminde harmonik etkileri araştırmışlardır. Dağıtım sisteminde mikro türbin jeneratör bağlanıp kullanılması gerektiren AA/DA/AA güç dönüştürücü harmonik problemlere sebep olur. Harmonik etkileri azaltmak için hibrit filtre kullanmışlardır. Hibrit filtrenin modellemesinde alçak geçiren filtre ve aktif filtre kullanmışlardır. Hibrit filtreye daha uygun bir çözüm olması hem aktif hem de pasif filtrenin kullanımı daha ucuz kılmıştır. Fakat yalnızca aktif filtrenin kullanımı etkili bir kontrol sistemiyle daha etkili ve verimli bir çözüm sunar. Diğer şekilde daha zayıf sonuçlar üretir.

Ke-ping ve ark. (2012), PV hücresi, yakıt hücresi, rüzgar türbini ile ilgili modelleme ve benzetim çalışmasını yapmışlardır. Benzetim sonuçları ve bu modellemenin güvenilirliklerini doğrulamaya çalışmışlardır. PV hücrelerin kısa devre akımı ve açık devre gerilimi inceleyerek ortam sıcaklığının ve aydınlanmanın etkilerini incelemişlerdir. PV hücrelerin kontrolünü MPPT kullanarak sağlanmışlardır. Yakıt

hücrelerin kapasitesi batarya anahtarlama sayısına bağlıdır. Çevresel faktörlerin yakıt hücrelerin kapasitesine etkisi çok azdır. Küçük rüzgar türbini ile ilgili rüzgar hızını etkileyen faktörler incelemiştir.

Shouman ve ark. (2012), DÜ tabanlı PEM yakıt hücresi benzetim çalışmasını ve modellemesini yapmışlardır. Bu sistemde sinüzoidal PWM evirici, LC filtre ve yükseltici transformatör kullanmışlardır. Bu sistemin performansı farklı yük durumları yani lineer olmayan bir yükte ya da ani bir lineer olmayan yük altında çalışmasını incelemiştir. PEM yakıt hücresi diğer yakıt hücrelerine göre avantajı korozyon özelliğinin olmamasından dolayı kullanmışlardır.

Salam ve ark. (2009), küçük şebekelerde dağıtılmış üretimde birimler arasında daha dengeli bir güç dağıtımı olması için kullanılan paralel evirici arasında kontrol yöntemini geliştirmişlerdir. Yakıt hücresi ve PV üretim birimleri tarafından üretilen güç elektroniğin ara yüzü olarak kullanılan eviricilerde güç ve gerilim kontrolünü sağlamaya çalışmışlardır. Yakıt hücresi ve PV hücresinin modellemeleri PSCAD/EMTDC yazılımında yaparak sonuçları test etmişlerdir.

Bassi (2013), DA ev projesi için merkezi dağıtım sisteminin modellemesini, benzetim çalışmasını ve performansını incelemiştir. 25 DA enerji alan ev için PSCAD yazılımı ile modellenen PV kaynak ve batarya bankları ile beslemiştir. Farklı durumlar altında sistemin kararlılığı ve hava koşullarının PV kaynağı etkilediğini gözlemiştir. PV kaynağın gün boyu bataryayı şarj ettiğini ve gece boyunca da DA beslemenin batarya bankları tarafından sağlandığını gözlemiştir.

3. YAKIT HÜCRESİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

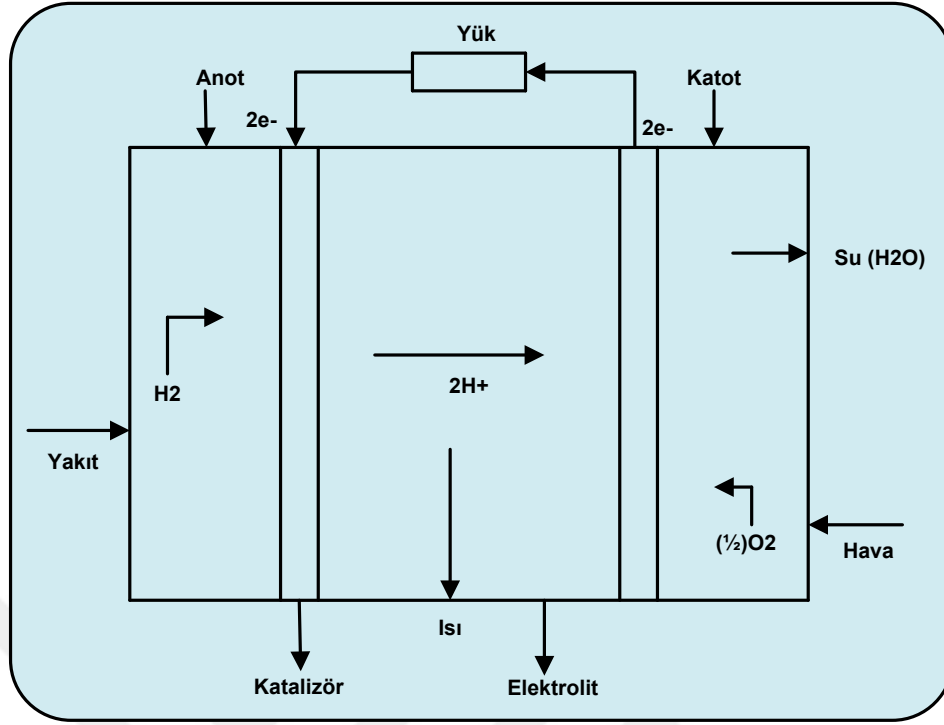
3.1. Yakıt Hücresi Sistemi ve Yapısı

3.1.1. Yakıt hücresi

Yakıt hücresi kimyasal enerjiyi (hidrojen yakıtı) elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal bir araçtır. Ürün olarak su ve ısı elektrik üretmek için yakıt ve oksidant (genellikle oksijen) arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyon ile oluşur. Yakıtın enerjiye dönüşümü yanma olmadan gerçekleşir. Yakıt hücrelerinin verimlilikleri yaklaşık %40-60 arasında gerçekleşir ve genellikle verimliliklerini %80-90 seviyesine çıkartmak için kojenerasyon uygulaması yapılır. Düşük sıcaklıkta üretilen atık ısı istenilen üretim değildir. Çünkü çoğu uygulamalarda kullanılamaz ve istenilen verimi sınırlar. Yakıt hücreleri yüksek sıcaklıkta daha yüksek verimlilik sağlar. Çünkü üretilen ısı istenilen ısıtmada kullanılabilir (Akkinapragada, 2007)

3.1.1.1 Yakıt hücresi çalışma prensibi

Yakıt hücreleri fonksiyonu ve yapısı yakıt sürekli hücreyi beslemek hariç genel olarak bataryalarla benzerdir. Yakıt hücreleri birbirinden ayrılmış iki elektrot, anot (negatif elektrot) ve katottan (pozitif elektrot) oluşur. Yakıt elektrokimyasal oksidasyonun meydana geldiği anodu besler ve oksidant hücre reaksiyonunun birincil ürünü olan su ve elektrik akımını üretmek için elektrokimyasal azalmanın meydana geldiği katodu besler. Şekil 3.1'de basit yakıt hücrenin tepkenlerini göstermektedir (Akkinapragada, 2007)



Şekil 3.1. Yakıt hücresinin şematik diyagramı.

Anot içerisine giren hidrojen katalizör yardımıyla hidrojen iyonlarını ve elektronları birbirinde ayırır. PEMFC ve PAFC gibi düşük sıcaklık durumlarında hidrojen iyonları elektrolite doğru hareket eder ve elektronlar dış çevreden hareket eder. Katot tarafına giren oksijen, hidrojen iyonları ile birleşir ve su oluşturur. Su uzaklaştığında birçok iyon elektrolit içine geçmekte devam edip güç üretimi sağlar. MCFC’de oksijen ve elektron iyonlarının karbondioksit ile birleşmesi ile elektrolitte hareket eden karbonat iyonları oluşur (Akkinapragada, 2007).

Genel olarak yakıt hücresi için anot katot tepkimeleri aşağıda verilmiştir.

Anot tepkimesi;



Katot tepkimesi;



Genel tepkime;



Bir yakıt hücresi bir volt elektrik potansiyelinden daha az gerilim üretir. Bu yüzden birçok sayıda hücre birleşerek daha büyük gerilim üretir.

3.1.1.2. Yakıt hücresi gerilimi ve Nernst denklemi

Yakıt hücrenin kimyasal enerjisi Gibbs serbest enerjisi ve entalpi oluşumuyla tanımlanabilir. Entalpi oluşumu Gibbs serbest enerjinin toplamı ve entropiye bağlanan enerjidir. Yakıt hücrelerinde Gibbs serbest enerji toplamındaki değişim olarak düşünülebilir. Çünkü bu değişim enerjinin açığa çıkmasıyla mümkündür ve bu değişim ürünler ve tepkenler arasındaki enerji değişimleridir (Akkinapragada, 2007).

$$\Delta G_f = G_{f\text{ürünler}} - G_{f\text{tepkenler}} \quad (3.4)$$

Bu karşılaştırmaları daha kolay yapmak için birim mol olarak gösterilebilir.

$$\overline{\Delta G_{f=}} = \overline{g_f} \text{ ürünler} - \overline{g_f} \text{ tepkenler} \quad (3.5)$$

Hidrojen yakıt hücresi her su molekülü üretmek ve her kullanılan hidrojen molekülü için iki elektron dış hattan geçer. Kayıpsız sistemde yapılan elektriksel iş Gibbs serbest enerjideki değişime eşittir. Bir elektriksel gerilim için iki elektronu (2F) hareket ettirdiğinde elektriksel iş yapılır. Yapılan elektriksel iş -2FE joules'dur.

E aşağıdaki gibi gösterilebilir. Bu gerilim yakıt hücrenin açık devre gerilimidir (Akkinapragada, 2007).

$$E = -\frac{\overline{\Delta G_f}}{2F} \quad (3.6)$$

Genel bir tepkime $j\text{J}+k\text{K}=m\text{M}$ denklemi şeklinde gösterilebilir. j J'nin mole sayısı k K'nın mole sayısı ve m M'in mole sayısıdır. Bu tepkenler ve ürünler bir aktifliğe sahiptir. Bu aktiflik standart basınç ve kısmi gaz basıncın oranıdır. Bu yüzden

Gibbs serbest enerji aşağıdaki Eşitlik 3.7'deki gibi yazılabilir. $\overline{\Delta g_f}$ Gibbs serbest enerjinin standart basınçta değişimidir (Akkinapragada, 2007).

$$\overline{\Delta g_f} = \overline{\Delta g_f}^\circ - RT \ln \left(\frac{\alpha_J^j \cdot \alpha_K^k}{\alpha_M^m} \right) \quad (3.7)$$

Eşitlik 3.7'de ürünü su ve tepkenleri hidrojen ve oksijen olan hidrojen yakıt hücresi tepkimesine uygulanabilir.

$$E = \overline{\Delta g_f}^\circ - \frac{RT}{2F} + \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \quad (3.8)$$

3.1.1.3. Yakıt hücresi çeşitleri

Yakıt hücreleri kullanılan elektrolit çeşidine göre sınıflandırılır. Farklı gelişim seviyelerinde farklı yakıt hücresi çeşidi vardır. Yakıt hücresi çeşitleri artan çalışma sıcaklıklarına göre aşağıda yazılmıştır.

Proton Değişimli Membran Yakıt Hücre (PEMFC -175°F)

Fosforik Asit Yakıt Hücre (PAFC -400°F)

Erimiş karbonat Yakıt Hücre (MCFC -1250°F)

Katı Oksit Yakıt Hücre (SOFC -1250°F)

Yakıt hücrelerin her biri elektrolitte kullanılan yakıt, çalışma sıcaklığı ve basınç, malzeme yapısı, güç yoğunluğu ve verimliliği farklılık gösterir.

Yakıt hücresinin çeşitleri kısa özet şeklinde Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Yakıt hücre çeşitlerinin karakteristiklerinin genel özeti (Akkinapragada, 2007)

Değerlendirme Ölçütleri	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Çalışma Sıcaklığı	<210°F	~400°F	~1250°F	~1800°F
Çalışma Basıncı	1-5 atm	1-8 atm	1-3 atm	1-13 atm
Güç Yoğunluğu	3-250kW	100-200kW	250kW-10MW	1kW-10MW
Yakıt	H ₂	H ₂	H ₂ , CO, CH ₄	H ₂ , CO, CH ₄ , NH ₃
Zehir	CO, NH ₃ , Cl ₂ , S ₂	CO, NH ₃ , Cl ₂ , S ₂	Cl ₂ , S ₂	S ₂
Yük Taşıyıcı	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Malzeme Yapısı	Grafit, Karbon	Grafit, Karbon	Ni ve Paslanmaz Çelik	Seramik ve Metal
Soğutucu Madde	Su	Kaynamış Su	Hava fazlalığı	Hava fazlalığı

3.1.1.4. Katı oksit yakıt hücresi (SOFC)

SOFC sabit uygulamalarda yüksek potansiyele sahip yüksek çalışma sıcaklığı yakıt hücresidir. SOFC'nin verimliliği %45-50 arasındadır ve gaz türbini ile entegre edildiğinde verimlilik %70-75 seviyelerine çıkabiliyor. Hücreler diğer yakıt hücreleri gibi tabaka şeklinde inşa edilmemiştir çünkü elektrolit katıdır. Korozyon MCFC'ye göre daha azdır ve katı elektrolitten dolayı su yönetimi PEMFC gibi yoktur. Yüksek çalışma sıcaklığı pahalı metal katalizörün kullanılmasını gerektirmiyor ve bu sayede maliyeti azaltıyor. Çeşitli yakıt hücrelerinin içten kullanılmasına izin verir ve bu şekilde diğer düzenleyici sistemlerin eklenip birleştirilmesiyle maliyet azalır. Kullanılan elektrolit seramik oksittir (itirya dengeli zirkonya). Anot elektrotu nikel-zirkonya metalli seramik ve katodu strontiyum katıkılanık lantanum manganittir. Seramik metallerin kullanımı

SOFC'nin maliyetini artırıyor. Yüksek sıcaklık çalışması maliyeti artıran sert ve sıkı malzeme gerektiriyor. Araştırmalar daha az sıkı ve daha az güçlü malzeme kullanmak çalışma sıcaklığını azaltacağını gösteriyor. Sıcaklığın azalması başlama zamanını geliştirerek daha ucuz malzeme kullanılmasını sağlayarak dayanıklılık artırılabilir. Orta sıcaklıklar çoğu uygulamalarda kullanılamıyor fakat küçük sistemler için uygulanabilir. (Akkinapragada, 2007)

Anot girişi hidrojen, karbon monoksit ya da metan olabilir çünkü SOFC esnek bir yakıt hücresidir. Oksijen moleküllerinin elektronlara bağlandığı katotta oksit iyonları elde etmek için elektrokimyasal azalma gerçekleşir. Bu iyonlar elektrolit tabakasından suyu elde etmede oksidize olan hidrojenin bulunduğu anoda geçer. Anot, katot ve hücre tepkimeleri aşağıda verilmiştir (Akkinapragada ve Chowdhury, 2006).



Bu çalışmada kullanılan yakıt hidrojenidir. Yakıt hücre çalışma gerilimi V_{fc} , akım I_{fc} ve kayıplar hesaba katılarak Nernst denklemi ile bulunmuştur (Akkinapragada, 2007).

Yakıt hücresinin hidrojen, oksijen ve suyu kısmi basınçları aşağıda verilir ve bu denklemlerle birlikte SOFC'nin çıkış gerilimi Nernst denklemi ile ifade edilmektedir.

$$P_{H_2} = \left(\frac{1}{\frac{KH_2}{1 + \tau_{H_2}S}} \right) (q_{H_2} - 2K_r I_{fc}) \quad (3.13)$$

$$P_{O_2} = \left(\frac{1}{\frac{KO_2}{1 + \tau_{O_2}S}} \right) (q_{O_2} - 2K_r I_{fc}) \quad (3.14)$$

$$P_{H_2O} = \left(\frac{1}{\frac{KH_2O}{1 + \tau_{H_2O}S}} \right) (2K_r I_{fc}) \quad (3.15)$$

$$I_{fc} = \frac{I_{ref}}{1 + \tau_e S} \quad (3.16)$$

I_{ref} referans akımını temsil etmektedir.

$$I_{ref} = \frac{P_{ref}}{V_{fc}} \quad (3.17)$$

Tepkimeye giren yakıt ve oksijen akışı;

$$q_{H_2}^{rec} = 2K_r I_{fc} \quad (3.18)$$

$$q_{O_2}^{rec} = \frac{q_{H_2}}{r_{HO}} \quad (3.19)$$

$$r_{ohmic} = 0.126 \exp \left[-2870 \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3.20)$$

Eşitlik 3.21.'de gösterilen aktivasyon kaybı yakıt ve oksitleyici madde arasındaki elektrokimyasal tepkimenin yavaş hızından kaynaklanıyor. Üretilen gerilimin bir kısmı elektrokimyasal reaksiyonun başlatmasında harcanıyor. Aktivasyon kaybı Tafel denklemi (Akkinapragada ve Chowdhury, 2006) ile verilmiştir.

$$V_{act} = \frac{RT}{\alpha n F} \cdot \ln \left(\frac{I_{fc}}{I_0} \right) \quad (3.21)$$

α elektron transfer katsayısı ve elektriksel enerji oranının elektrokimyasal tepkime değişimidir ve değeri (0-1) elektrot malzemenin değerine bağlıdır. I_{fc} yakıt hücresi akımı, I_0 akımı değişimi ve n elektron sayısıdır. Aktivasyon kaybı orta ve düşük sıcaklıklarda daha belirgindir. Yüksek sıcaklıklarda bu kayıplar ihmal edilir (Akkinapragada ve Chowdhury, 2006).

Eşitlik 3.22.'de verilen konsantrasyon kaybı kullanılan yakıt hücresinin elektrot yüzeyinde kimyasal tepkimeye giren maddenin yoğunluğunun değişiminden

kaynaklanıyor. Tepkimeye giren madde elektrotlarda tüketildiğinde, yoğunlukta hafif bir azalma meydana gelecektir. Yoğunluktaki bu değişim gerilim azalmasına yol açan kısmi basıncın azalmasına sebep olur (Akkinapragada ve Chowdhury, 2006).

$$V_{\text{con}} = \frac{RT}{nF} \left(1 - \frac{I_{\text{fc}}}{I_{\text{ref}}} \right) \quad (3.22)$$

n elektron sayısı ve I_{ref} referans akımını temsil etmektedir.

Eşitlik 3.23'te gösterilen omik kayıplar elektrotların içinde akan elektrotların rezistansı yanı sıra iyonların rezistansından kaynaklanıyor (Akkinapragada ve Chowdhury, 2006).

$$V_{\text{ohm}} = r_{\text{ohmic}} I_{\text{fc}} \quad (3.23)$$

r_{ohmic} iç direnç ve bu direnç elektrolitlerin yüksek iletkenlerinin kullanılmasıyla azaltılabilir.

$$E = N_0 \left(E_0 + \frac{RT}{2F} \left(\ln \frac{P_{\text{H}_2} P_{\text{O}_2}^{0.5}}{P_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \right) - r_{\text{ohmic}} I_{\text{fc}} \quad (3.24)$$

$$V_{\text{fc}} = E - V_{\text{ohm}} - V_{\text{act}} - V_{\text{con}} \quad (3.25)$$

$$P_{\text{fc}} = N_0 V_{\text{fc}} I_{\text{fc}} \quad (3.26)$$

E Termodinamik potansiyeli,

E_0 Açık devre gerilimi,

V_{con} Gerilim konsantrasyon kayıpları,

V_{act} Gerilim kuvvetlendirme kayıpları,

$q_{\text{H}_2}^{\text{rec}}$ Tepkimeye giren hidrojen miktarı,

$q_{\text{O}_2}^{\text{rec}}$ Tepkimeye giren oksijen miktarı,

q_{H_2} Vanadan giren hidrojen miktarı,

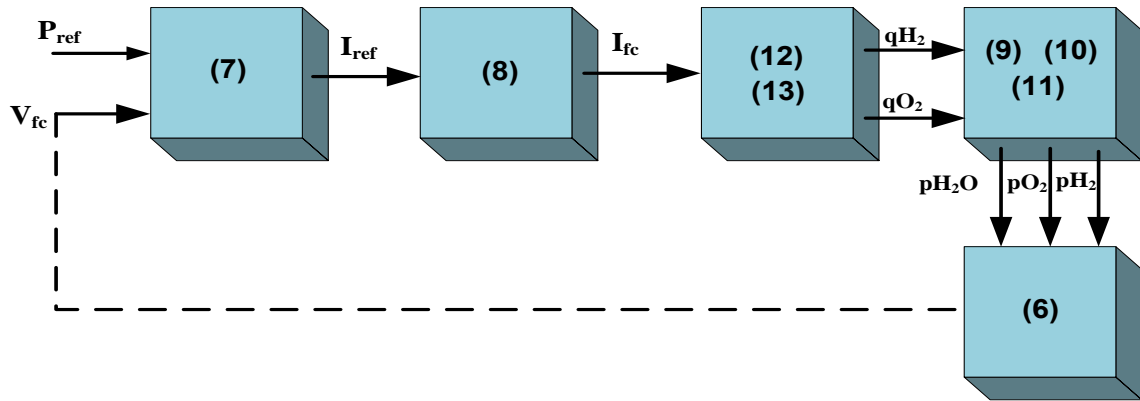
q_{O_2} Vanadan giren oksijen miktarı.

Çizelge 3.2. SOFC karakteristiğinin genel özeti (Akkinapragada ve Chowdhury, 2006)

Kriter	Karakteristikler
Çalışma Sıcaklığı	1500 – 1800°F
Verimlilik	%45-50
Güç Yoğunluğu	1 KW-10 MW
Elektrolit	Seramik Oksit
Elektrot	Anot: Nikel-Zirkonya seramik metali Katot: Strontiyum-Lantanum manganit
Katalizör	Perovskit
Yakıt	H ₂ , CO, CH ₄ , NH ₃
Zehir	S ₂
Katot Gazı	Atmosferik Oksijen
Yük Taşıyıcı	O ²⁻ (oksijen iyonu)
Elektrolitte iyon hareketi	O ²⁻ iyonu hidrojenin oksidize olduğu anoda hareket eder.
Anot tepkimesi	H _{2(g)} + O ²⁻ = H ₂ O _(g) + 2e ⁻ CO _(g) + O ²⁻ = CO _{2(g)} + 2e ⁻
Anot tepkimesi	O _{2(g)} + 4e ⁻ = 2O ²⁻
Hücre tepkimesi	H _{2(g)} + O _{2(g)} + CO _(g) = H ₂ O + CO ₂
Soğutucu	Hava fazlalığı
Avantajlar	*İçten düzenleyici, *Yüksek verimlilik, *Yakıt esnekliği, *Kojenerasyon uygulaması
Dezavantajlar	*Sıkı ve sert malzemeye ihtiyaç duması, * Yüksek sıcaklık, yüksek maliyet ve yavaş çalışmaktan dolayı yıpranması, aşınması ve yüksek termal korumaya ihtiyaç duyması
Gerilim denklemi	$V_{fc} = N_0 \left(E_0 + \frac{RT}{2F} \left(\ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \right) - r_{ohmic} I_{fc} \quad (6)$
Yakıt hücresi akımı	$I_{fc} = \frac{I_{ref}}{1 + \tau_e S} \quad (7) \quad I_{ref} = \frac{P_{ref}}{V_{fc}} \quad (8)$

Kriter	Karakteristikler
Kısmi basınçlar(H ₂ ,O ₂ ,H ₂ O)	$P_{H_2} = \left(\frac{1}{\frac{1}{KH_2} + \tau_{H_2}S} \right) (qH_2 - 2K_r I_{fc}) \quad (9)$
	$P_{O_2} = \left(\frac{1}{\frac{1}{KO_2} + \tau_{O_2}S} \right) (qO_2 - 2K_r I_{fc}) \quad (10)$
	$P_{H_2O} = \left(\frac{1}{\frac{1}{KH_2O} + \tau_{H_2O}S} \right) (2K_r I_{fc}) \quad (11)$
Yük miktarları (H ₂ ,O ₂)	$qH_2^{rec} = 2K_r I_{fc} \quad (12)$
	$qO_2^{rec} = \frac{qH_2}{rHO} \quad (13)$

PSCAD/EMTDC yazılımında modellenen SOFC'nin dinamik modelinin blok diyagramı Şekil 3.2.'de verilmiştir.



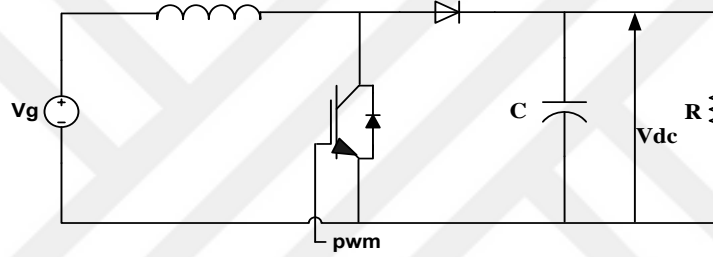
Şekil 3.2. SOFC'nin dinamik modeli (Akkinapragada ve Chowdhury, 2006).

3.1.2. DA-DA yükselten dönüştürücü

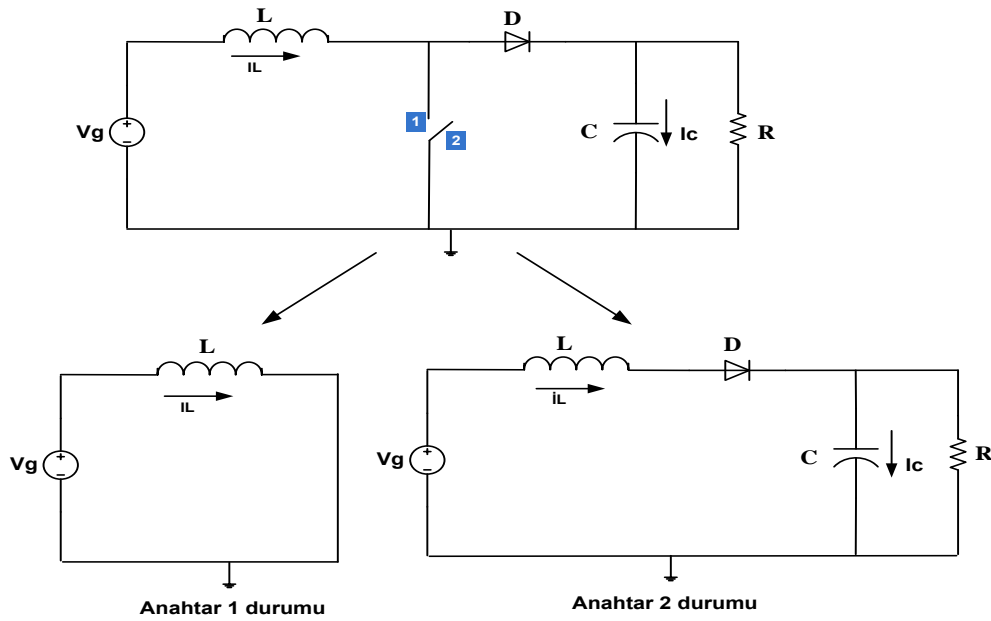
Yakıt hücreleri yüke doğrudan bağlanamaz çünkü cevap verme süreleri yavaştır. Yakıt hücresinden elde edilen gerilim düşük ve düzenlenmemiş DA gerilim üretir ve bu DA gerilimi AA şebeke gerilimine dönüştürmek için gerilim yükseltilmelidir. Yakıt

hücrelerin şebekeye bağlamak ve enerji depolama bataryasına uydurmak için yakıt hücresi gerilimi artırma gereği varsa yakıt hücresi gerilimi düzenlenmelidir. DA-DA dönüştürücü bu iki fonksiyonu yerine getirir ve yakıt hücresinin sınırlı uygulamalarına cevap verir. DA-DA yükselten dönüştürücü yakıt hücresinin gerilim ve akım kontrolünü sağlamaktadır (Bouneb ve ark., 2005, Hashem ve ark., 2008).

Literatürde birçok DA-DA dönüştürücü vardır. Genel olarak dönüştürücüler izole edilmiş ve izole edilmemiş olarak iki sınıfa ayrılır. Şekil 3.3.'te verilen dönüştürücü devresi DA giriş gerilimini düzenleyip çıkış gerilimini kontrol ederek istenilen büyüklüğe çeker (Mohan ve ark., 2003). Şekil 3.4.'de verilen dönüştürücünün çalışma prensibini daha iyi anlamak için ayrıntılı olarak incelenmiştir.



Şekil 3.3. DA-DA yükselten dönüştürücü devresi.



Şekil 3.4. DA-DA yükselten dönüştürücü devre analizi.

Durum1:

Endüktansta güç depolanır.

Endüktans şarj olur.

Endüktansta geçen akım artar.

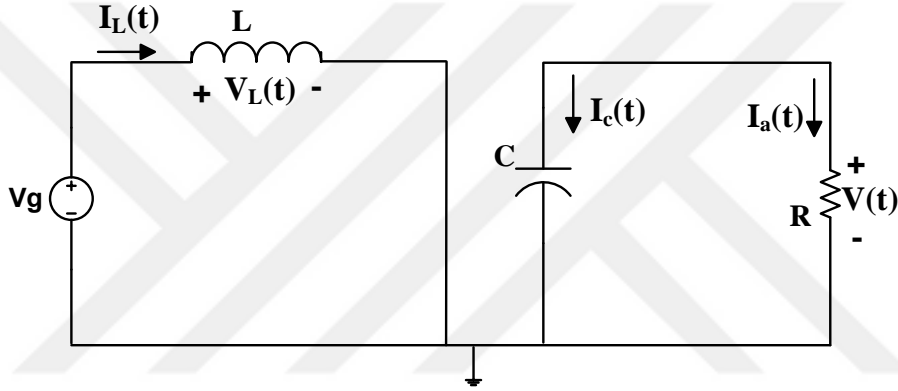
Durum2:

Endüktanstan depolanan güç yüke ve kapasitansa deşarj olur.

Endüktanstan geçen akım azalır.

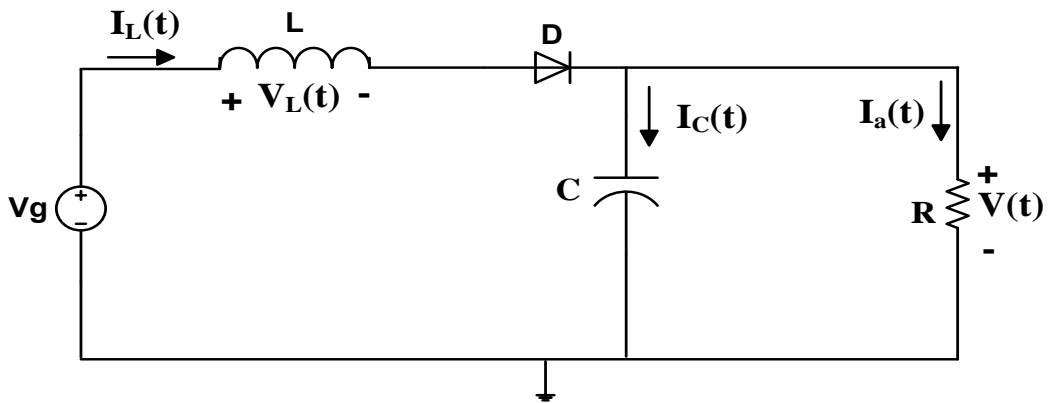
Anahtar 1 durumu:

Endüktans geriliminde ve kapasitans akımında dalgacık (ripple) vardır.



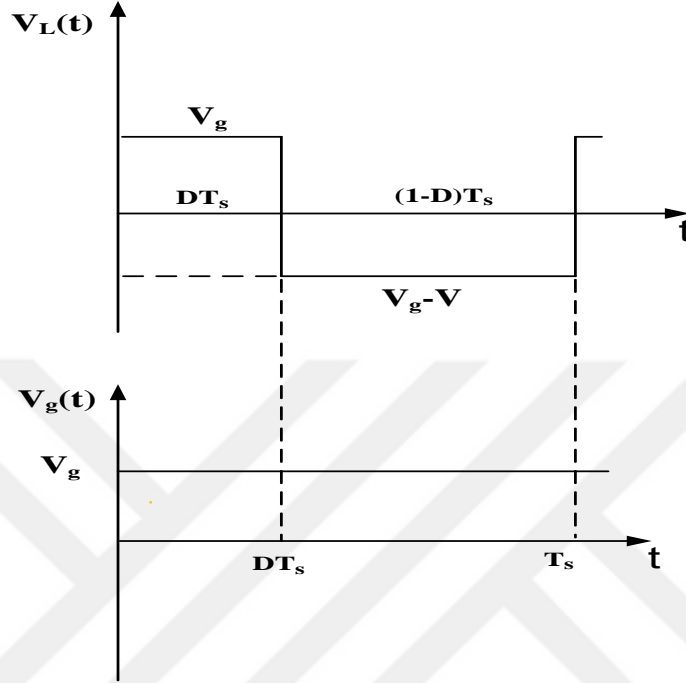
$$V_L = V_g \quad (3.27)$$

$$I_c = -V/R, \quad I_c = -I_a \quad (3.28)$$

Anahtar 2 durumu:

$$V_L = V_g - V \quad (3.29)$$

$$I_c = I_L - V/R, \quad I_c = I_L - I_a \quad (3.30)$$



Şekil 3.5. Giriş ve endüktans gerilimi.

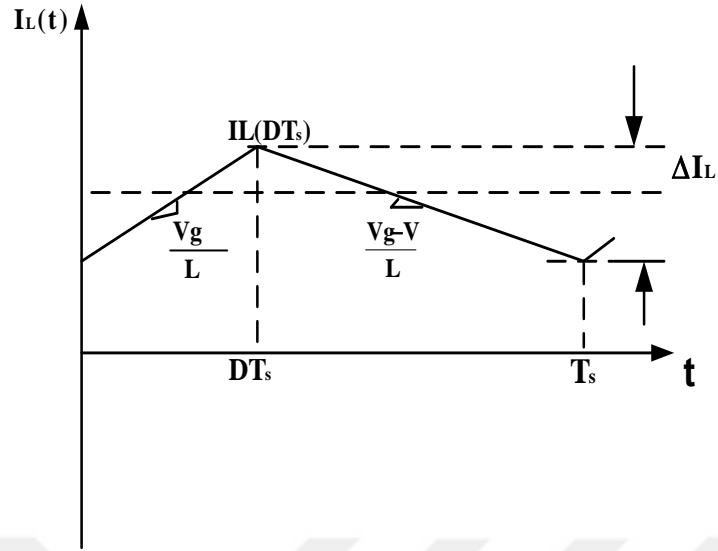
$$T_s = \frac{1}{f_s}, \quad D = \frac{V - V_g}{V} \quad (3.31)$$

T_s : Anahtar çalışma süresi

f_s : Frekans

V_g : Giriş gerilimi

D : Duty Cycle



Şekil 3.6. Endüktans akımı.

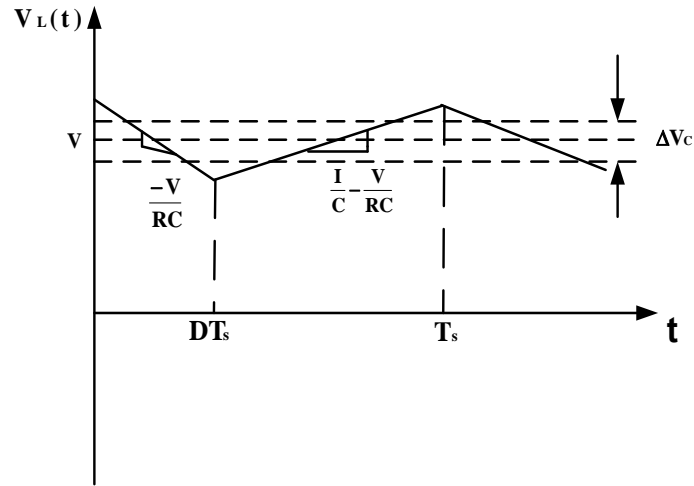
Endüktans akımının eğimlerdeki durumları;

$$\frac{dI_L(t)}{dt} = \frac{V_L(t)}{L} = \frac{V_g}{L} \quad (3.32)$$

$$\frac{dI_L(t)}{dt} = \frac{V_L(t)}{L} = \frac{V_g - V}{L} \quad (3.33)$$

$$\Delta I_L = \frac{V_g}{L} DT_s \quad (3.34)$$

Eşitlik 3.34'de dalgacıkları (ripple) istediğimiz büyüklüğü seçmek için endüktans (L) büyüklüğünü ayarlayabiliriz.



Şekil 3.7. Endüktans dalgacık (ripple) gerilimi.

Endüktans gerilimin eğimlerdeki durumları;

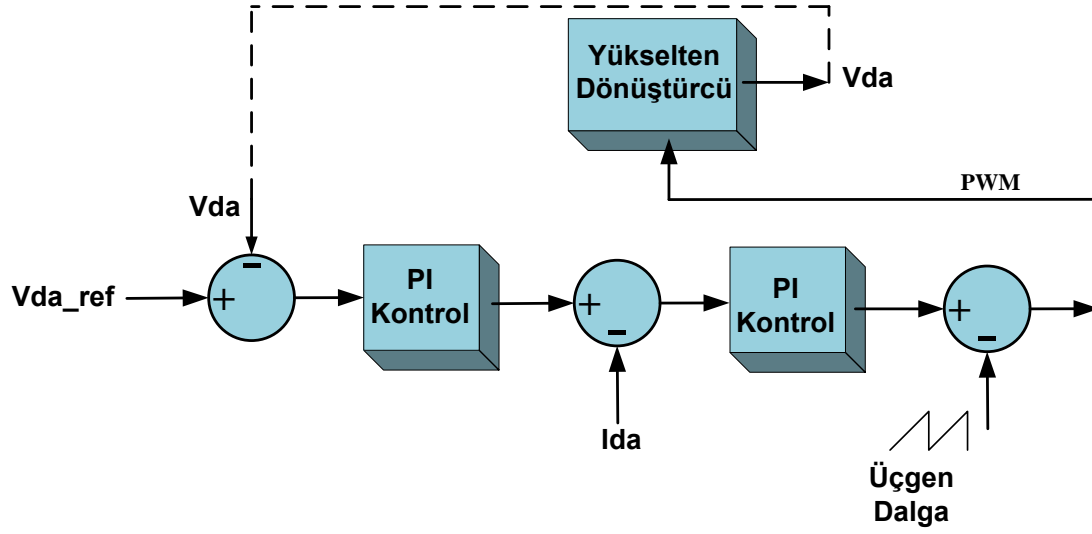
$$dV_c(t) = \frac{I_c(t)}{C} = \frac{-V}{RC} \quad (3.35)$$

$$dV_c(t) = \frac{I_c(t)}{C} = \frac{I}{C} - \frac{V}{RC} \quad (3.36)$$

$$\Delta V_c = \frac{V}{RC} DT_s \quad (3.37)$$

Eşitlik 3.37’de dalgacıkları (ripple) istediğimiz büyüklüğe çekmek için kapasitans (C) büyüklüğü ayarlanabilir.

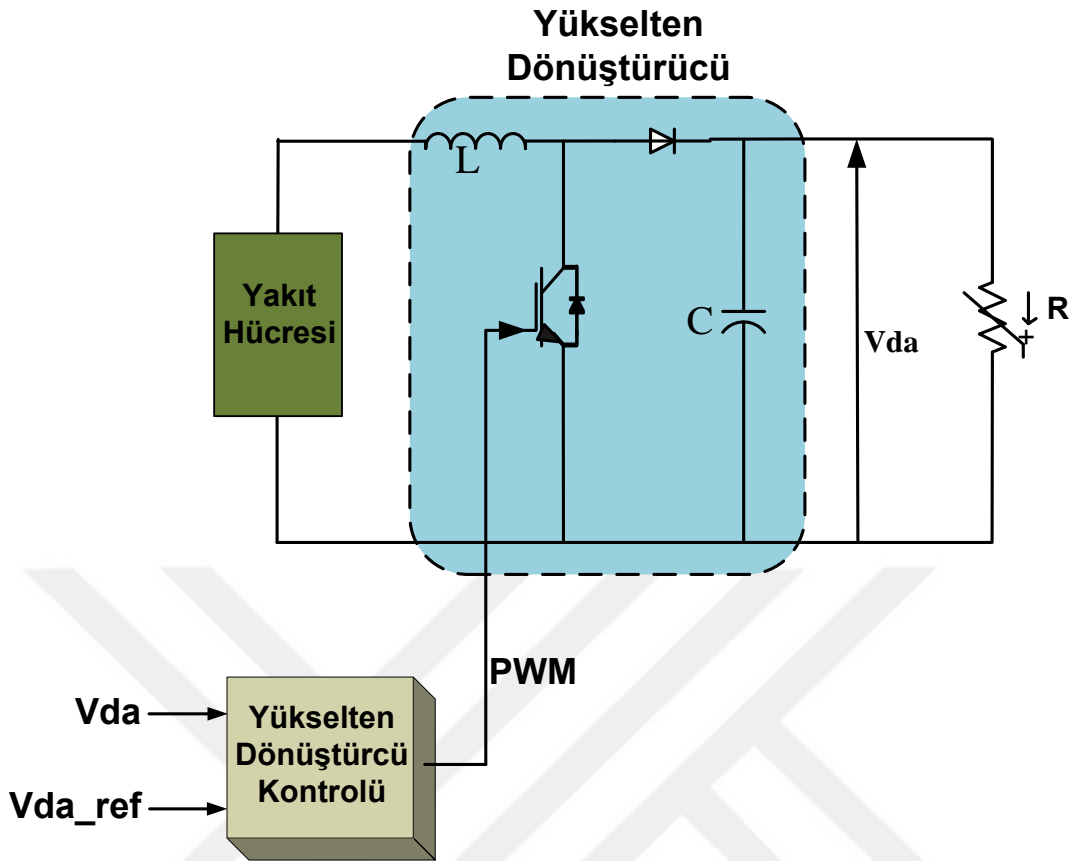
Şekil 3.8.’de yükselten dönüştürücünün anahtarlama sinyallerini (PWM) oluşturmak için geribildirim kontrol sistemi kullanılmıştır. Çıkış gerilimi (V_{da}) ile referans gerilimi (V_{da_ref}) karşılaştırarak PI kontrolcü ile hatayı sıfıra çekip referans akımını (I_{da_ref}) oluşturur. Bu referans akımını tekrar dönüştürücünün giriş akımı ile karşılaştırıp PI kontrolcüye vererek hatayı sıfıra indirgedikten sonra testere dişi ile karşılaştırıp PWM oluşturulmuştur.



Şekil 3.8. DA-DA yükselten dönüştürücü geribildirim kontrol sistemi.

3.2. Yakıt Hücre Sisteminin PSCAD/EMTDC Modellemesi

Yakıt hücreleri enerji üretmek için hidrojen ve oksijen arasındaki kimyasal reaksiyona temeline dayalıdır. Yakıt hücrelerinin kapasitesi anahtarlanan batarya sayısına ve az miktarda çevresel faktörlere bağlıdır. Yakıt hücrelerinin çıkış gerilimleri genellikle düşüktür bu nedenle Şekil 3.9.'da gösterildiği gibi yükselten DA-DA dönüştürücüler kullanılır ve şebekeye bağlamak için DA-AA dönüştürücüler kullanılır. Bölümün bu kısmında sabit ve değişken yük altında PSCAD/EMTDC yazılımını kullanarak yakıt hücresi sistemin elemanlarının (Yakıt hücresi ve DA-DA Yükselten Dönüştürücü ve Kontrolü) modellenmesi açıklanacaktır.



Şekil 3.9. Yakıt hücresi sistemi blok diyagramı.

3.2.1. Yakıt hücresinin modellenmesi

SOFC'nin dinamik modeli elektrokimyasal, elektrodinamik yakıt hücrenin elektrik karakteristiğine bağlı olarak yapılmıştır. SOFC'nin yakıtı yakıt hücresinin akımın ile kontrol edilmiştir. Hidrojen, oksijen ve suyun kısmi basıncı, hidrojen ve oksijen akış oranını kullanarak belirlenmiştir. Yakıt hücresinin kısmi çıkış gerilimini basıncı ve akıma bağlı olarak Nernst denklemi ile elde edilmiştir.

Yakıt hücresinin dinamik modellemesinde kullanılan parametreler Çizelge 3.3.'te verilmiştir.

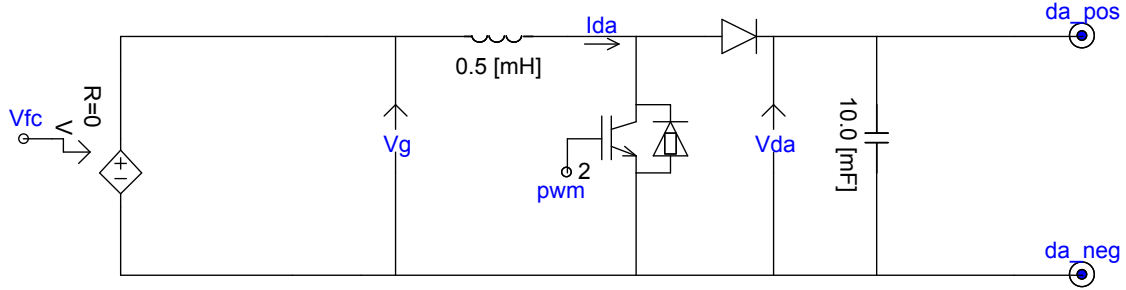
Çizelge 3.3. Yakıt hücresi parametreleri

Parametre	Açıklama	Birim	Değerleri
T	Sıcaklık [K]	Sıcaklık [K]	343
F	Faraday Sabiti	[C/kmol]	96484600
R	Gaz Sabiti	[J/(kmol*K)]	8314.47
E ₀	Açık Devre Hücre Gerilimi	[V]	0.6
N ₀	Hücre Sayısı		356
K _r	Sabit Sayı K _r =N ₀ /4F	[kmol/(s*A)]	2.2802x10 ⁻⁷
U _{opt}	Optimum Yakıt Kapasitesi		0.8
K _{H2O}	Molar Su Sabiti	[kmol/(s*atm)]	7.716x10 ⁻⁶
τ _{H2O}	Su Zaman Sabiti	[s]	18.418
K _{H2}	Molar Hidrojen Sabiti	[kmol/(s*atm)]	4.22x10 ⁻⁵
τ _{H2}	Hidrojen Zaman Sabiti	[s]	3.37
K _{O2}	Oksijen Sabiti	[kmol/(s*atm)]	2.11 x10 ⁻⁵
τ _{O2}	Oksijen Zaman Sabiti	[s]	6.74
r _{HO}	Hidrojen-Oksijen Dönüşüm Oranı		1.168
r _{ohmic}	Omik Direnç	[Ω]	0.126
B	Aktivasyon Sabiti	[A ⁻¹]	0.04777
C	Aktivasyon Sabiti	[V]	0.0136

3.2.2. DA-DA yükselten dönüştürücünün PSCAD/EMTDC modellenmesi ve kontrolü

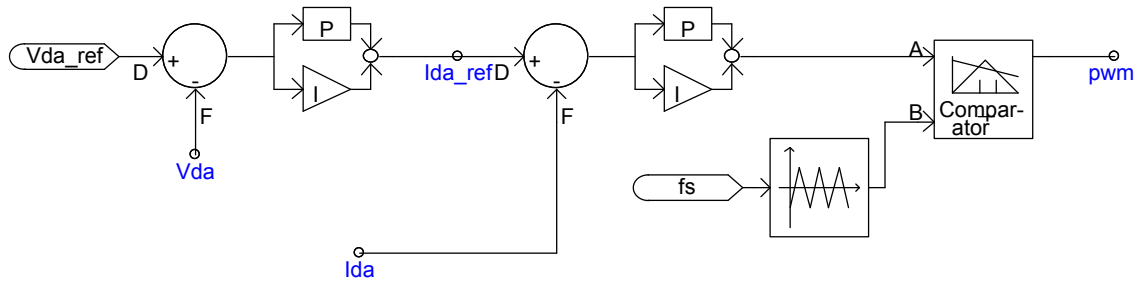
Şekil 3.10.'da PSCAD/EMTDC yazılımında dinamik modellemesi yapılan yükselten dönüştürücünün giriş gerilimi yakıt hücresinin çıkış gerilimidir. Kullanılan

kapasitans çıkış gerilimi dalgacıklarını (ripple) azaltmak için endüktans ise çıkış akımını düzeltmek için kullanılmıştır.



Şekil 3.10. DA-DA yükselten dönüştürücünün modeli.

Şekil 3.11.'deki dönüştürücü kontrol sistemi, çıkış gerilimini ayarlamak için kullanılmıştır. Çıkış gerilim 400 V olan yakıt hücresinin gerilimi dönüştürücünün giriş gerilimi olarak adlandırılır ve 800 V' a yükseltilir. Dönüştürücü çıkış gerilimi 800 V ile karşılaştırılıp hata oranı per unite çevrilip ve hata sıfırlanmaya çalışılmıştır. PI kontrolcünün çıkışı referans akımı (I_{dc_ref}) elde edilip dönüştürücünün giriş akımıyla kıyaslanıp tekrar verilir. PI kontrolcünün çıkışı testere dişi ile karşılaştırılıp PWM elde edilip anahtarları tetiklemek için kullanılmıştır.

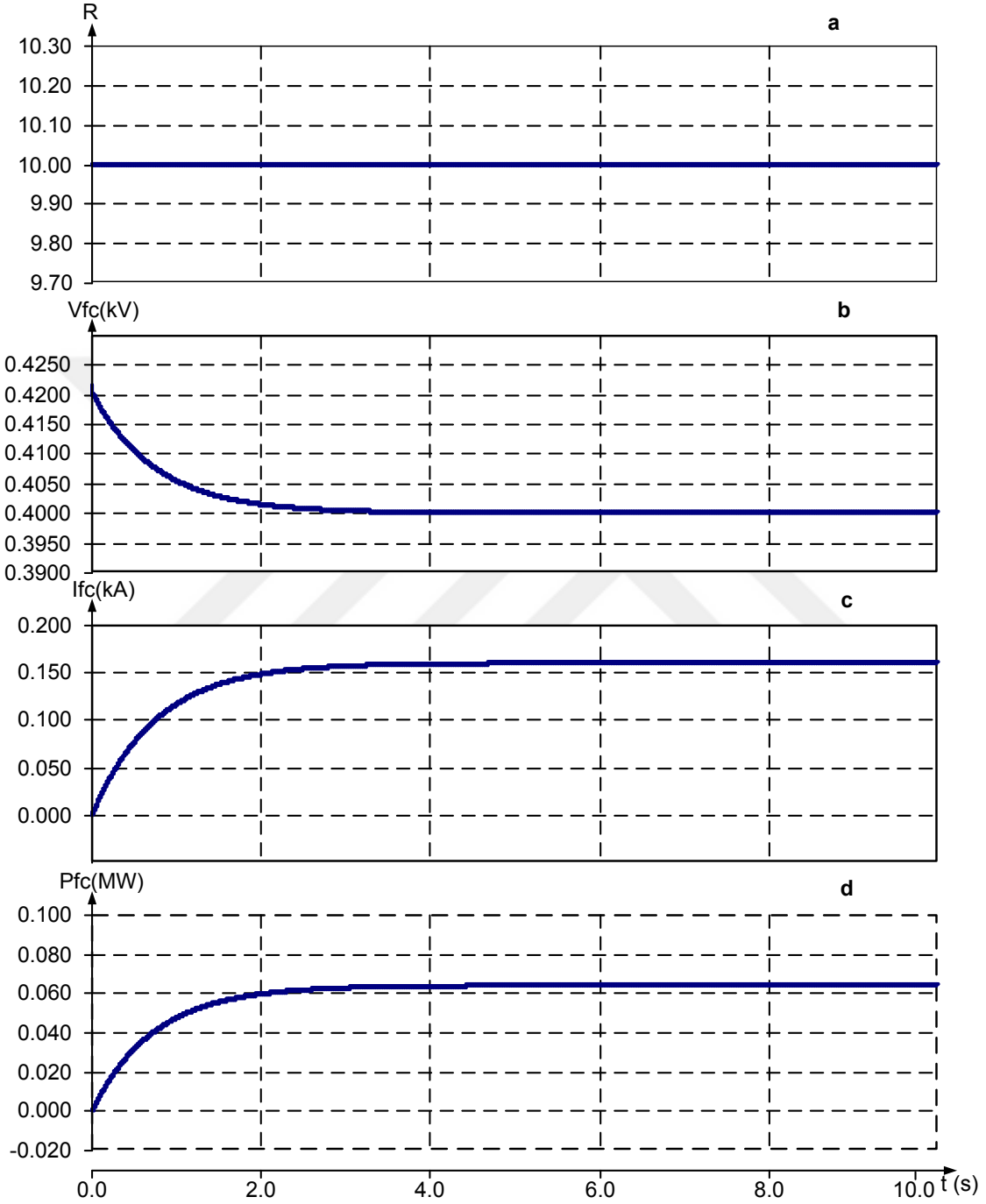


Şekil 3.11. DA-DA yükselten dönüştürücünün kontrolü.

3.3. Yakıt Hücresi Sisteminin Benzetim Sonuçları

Yakıt hücresinin öncelikle sabit DA yükte altında çalışması incelenmiş ve bu amaçla yakıt hücresinin çıkışına 10 ohm'luk yük bağlanmıştır. yakıt hücresine ait yük, akım, gerilim ve güç ile ilgili yapılan benzetim sonucu Şekil 3.12.'de gösterilmiştir.

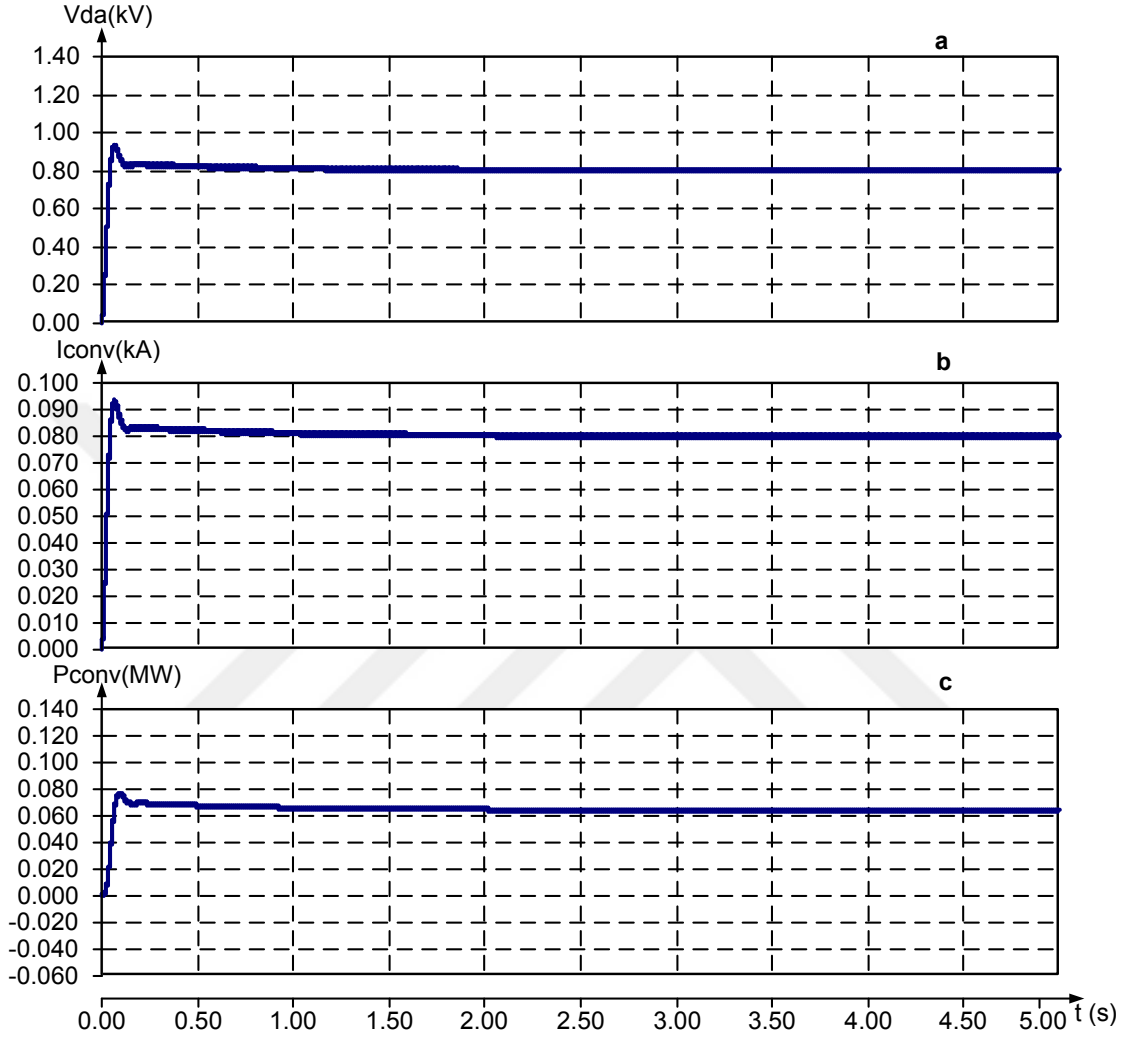
Yakıt hücresinin çıkış gerilimi 400 V olarak ölçülmüştür. Ayrıca çıkış akımı 160 A olarak elde edilip 64 kW'lık güç elde edilmiştir.



Şekil 3.12. (a) Sabit yük altında yakıt hücresinin; (b) gerilimi, (c) akımı, (d) gücü.

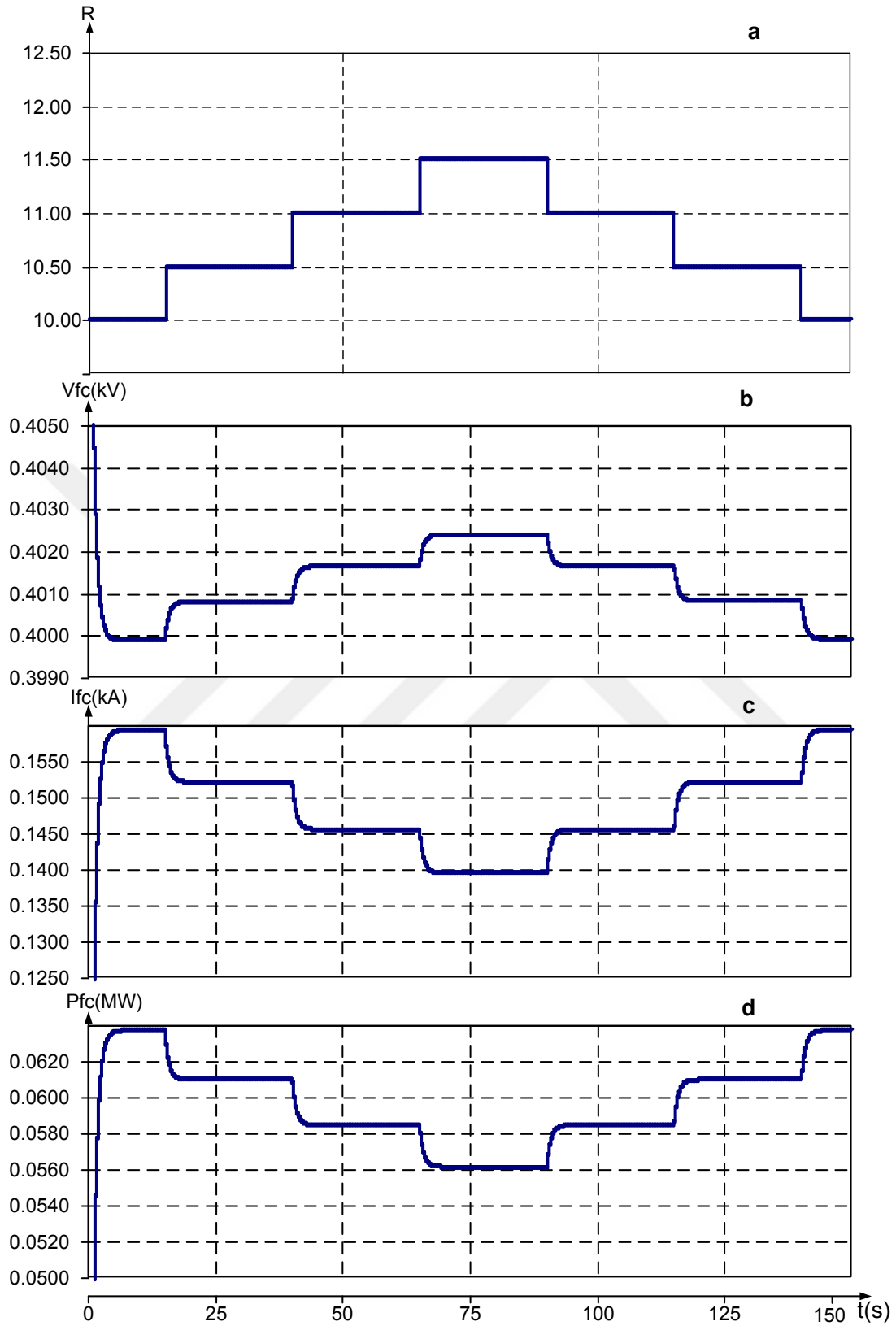
Yakıt hücresinin sabit DA yük altında yükselten dönüştürücüye bağlanarak yapılan benzetim sonuçları Şekil 3.13.'te verilmiştir. Yakıt hücresi çıkış gerilimi 400 V

olan çıkış gerilimi dönüştürücü ile 800 V'a yükseltilmiştir. Dönüştürücünün çıkışında 80 A akım ölçülüp böylece bağlanan yüke göre yaklaşık 64 kW'lık güç elde edilmiştir.



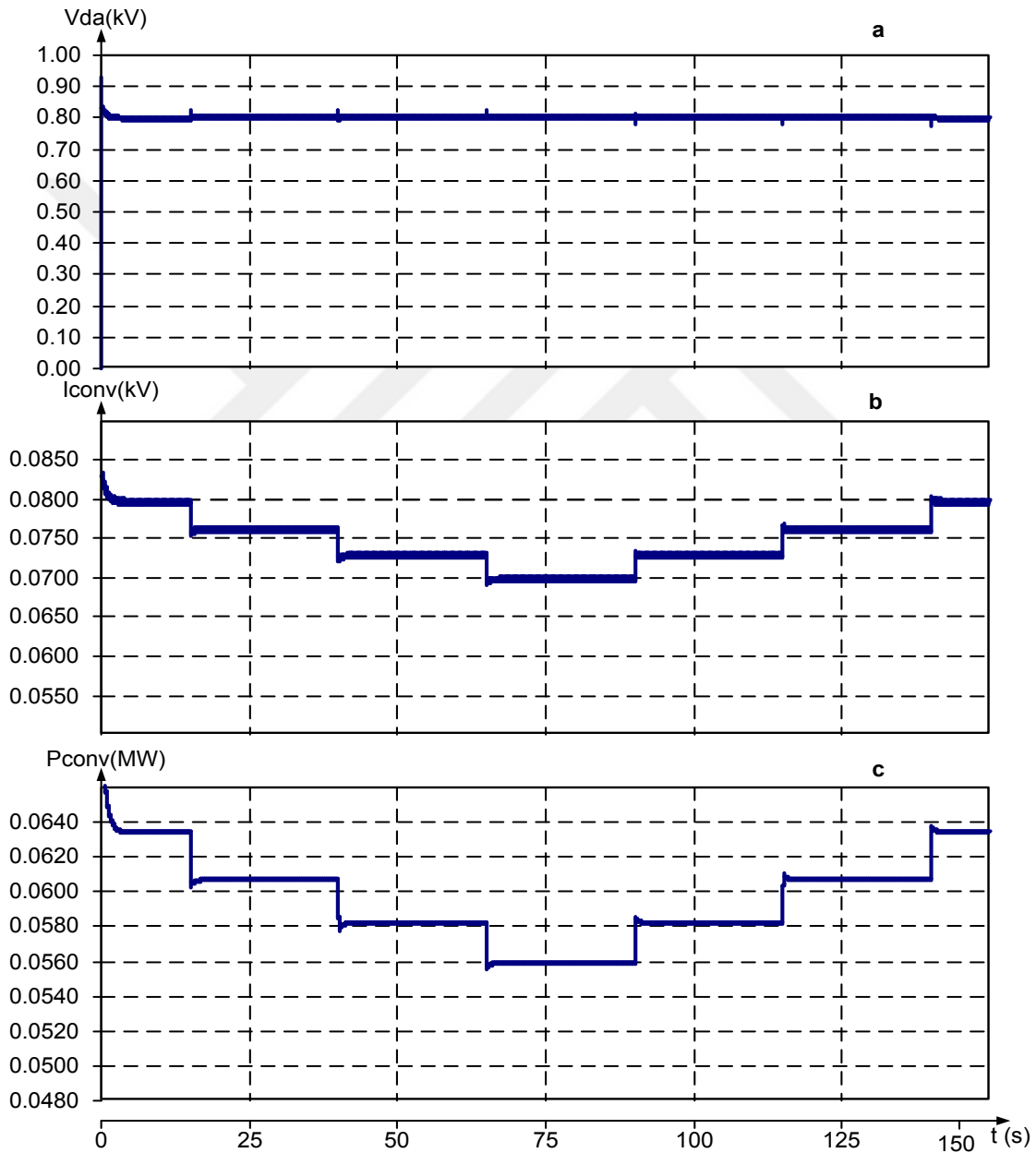
Şekil 3.13. Yükselten dönüştürücünün; (a) çıkış gerilimi, (b) çıkış akımı, (c) çıkış gücü.

Yakıt hücresine ait akım, gerilim ve güç değişimine ait benzetim sonuçları Şekil 3.14.'de verilen değişken yük durumları altında DA karakteristiği herhangi bir güç ünitesi olmadan incelenmiştir. Yakıt hücresine 10-11.5 ohm'luk arasında değişen yükler önce artırılarak daha sonra azaltılarak bağlanmıştır. Yakıt hücresine bağlanan yük artışına bağlı olarak yakıt hücresi gerilimi artıyor azaldığında ise gerilim azalıyor. Yakıt hücresinden çekilen güç ve akım değerleri yükte ters orantılı olarak değişmektedir.



Şekil 3.14. (a) Değişken yük altında yakıt hücresinin; (b) gerilimi, (c) akımı, (d) gücü.

Şekil 3.15.'de yükselten dönüştürücü çıkışında yer alan yük farklı seviyelerde ayarlanarak oluşturulan modelin yük değişimine karşı davranışı incelenmiştir. DA-DA yükselten dönüştürücünün çıkış geriliminin değişken yük altındaki çıkış gerilimi değişiminin ortalaması sabit olmalıdır. Hazırlanan modelin çıkış geriliminin kontrol yapısında istenen 800 V değerinde sabit kaldığı görülmektedir. Akım ve güç değerleri ise yük değeri ile orantılı olarak değişmektedir.



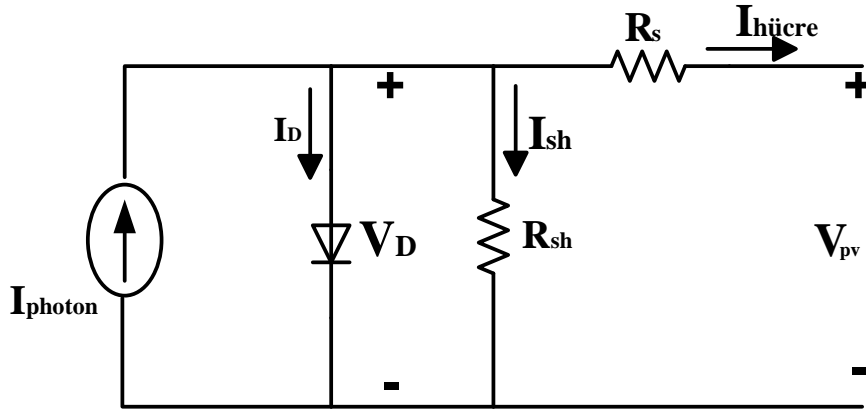
Şekil 3.15. Değişken yük altında yakıt hücresine bağlanan yükselten dönüştürücünün; (a) çıkış gerilimi, (b) çıkış akımı, (c) çıkış gücü.

4. GÜNEŞ HÜCRESİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

4.1. Güneş Hücresi Sistemi

4.1.1. Güneş hücresi

Günümüzde hızla artan enerji ihtiyacı, fosil yakıtların sınırlı olması ve çevreye zarar vermesi gibi nedenlerden dolayı yenilenebilir enerji kaynakları alanındaki çalışmalar hızla artmış ve oldukça önemli bir hale gelmiştir. Özellikle güneş hücresi teknolojilerindeki gelişmeler, yenilenebilir enerji sistemlerinde önemli bir yeri olan güneş hücreleri kullanılarak üretilen elektrik enerjisinin şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı olarak kullanılması sağlanmıştır. PV sistemleri genellikle trafik lambaları, haberleşme, güvenlik sistemleri aydınlatma sistemi, su pompalama sistemi, havalandırma sistemi ve buna benzer AA ve DA yükler gibi yerlerde şebekesiz uygulamalarda kullanılır. Bu sistemler için ilave bataryalar, DA-AA ve DA-DA çeviricilere ihtiyaç duyulmaktadır. Genellikle PV enerji talebinin karşılamadığı durumlarda rüzgar ya da geleneksel elektrik üretimleriyle PV enerjisine eklenerek hibrit sistemi sağlanabilir. Bu yüzden PV sistemi şebekeden bağımsız çalışabilir. PV sistemi taşınabilirlik, düşük çalışma maliyeti, bağımsız özelliği, emniyet ve güvenilirlik gibi yararları vardır. PV sistemlerinden elektrik üretimi oldukça pahalıdır bu yüzden enerji kayıplarını azaltıp ve güvenilirliği geliştirilmelidir. Tüm bu sistemlerin karmaşıklığı ve güneş hücresinin diğer kaynaklardan farklı kendine özgü yapısı, öncelikle güneş pillerinin eksiksiz olarak modellenmesi gereğini doğurmuştur. Güneş hücresinin verimi kendi iç dirençleri, kontak yapıları, üretildiği malzeme, sıcaklık ve ışık şiddetinin değişimi gibi parametrelerden etkilenmektedir. Dolayısıyla güneş hücreleri ile ilgili yapılan çalışmalarda sağlıklı sonuçlar elde edebilmek için öncelikle değişken parametrelerin güneş pili verimine etkisini ortaya koyacak bir model oluşturulması gerekmektedir (Şahin ve Okumuş, 2013, Xia, 2012).



Şekil 4.1. Güneş hücresinin eşdeğer devresi.

R_s ve R_{sh} güneş hücresi verimini etkileyen seri ve paralel dirençleri olup güneş hücresinin özelliğine göre değişen parametrelerdir.. Paralel direnç etkisini kristal etkileri yaratırken seri direnç etkisini yarıiletken malzemeye yapılan metal kontaklar, yarıiletken malzeme içindeki tabakaların iç dirençleri ve hücrenin üst yüzeyindeki metalik parmak kontak dirençleri oluşturur. Paralel direnç etkisi hücrenin açık devre gerilimini ve dolun faktörünü azaltan bir etkidir. Seri direnç etkisi hücrenin kısa devre akımını ve dolun faktörünü azaltan bir etkidir (Şahin ve Okumuş, 2013).

Devreye Kirşof'un akımlar kanunu uygulanırsa;

$$I_{hücre} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (4.1)$$

Diyot akımı, p-n jonksiyonundan geçen toplam akım olup, matematiksel olarak fotonlar tarafından harekete geçirilen elektronlar ve boşluklar tarafından oluşturulan akımların toplamıdır. İletim bandındaki elektron durumlarının ve valans bandındaki boşluk akımlarının Boltzman dağılımı ile net elektron akımı ve boşluk akımları (Xia, 2012);

$$I_e = I_{e0} \cdot \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right) \quad (4.2)$$

$$I_h = I_{h0} \cdot \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right) \quad (4.3)$$

olarak tanımlanır.

Diyot akımı ise;

$$I_D = I_e + I_h = I_o \cdot \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right) \quad (4.4)$$

Diyot akımı I_D , diyotun mutlak sıcaklığı, gerilim ve yük tarafından çekilen akımın bir fonksiyonu olarak değişir. Eşitlik 4.4'de; q , elektron yükünü (1.602×10^{-19} C), V_D diyotun uçları arasındaki potansiyel farkını, I_o ters doyma akımı, n , idealite faktörünü, k Boltzman sabitini (1.381×10^{-23} J/K) ve T , Kelvin cinsinden mutlak sıcaklığı temsil etmektedir (Xia, 2012).

Şekil 4.1.'de verilen güneş hücresi eşdeğer devresinde, Kirşof'un gerilimler kanunu uygulanarak, kaynak akımı ifadesi elde edilir.

$$I_D = I_o \cdot \left(e^{\frac{qV_D}{nkT}} - 1 \right) = I_o \cdot \left(e^{\frac{q(V_{pv} + I \cdot R_s)}{nkT}} - 1 \right) \quad (4.5)$$

$$I_{sh} = \frac{V_D}{R_{sh}} = \frac{(V_{pv} + I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (4.6)$$

Gerilim ve akım arasındaki bağıntı farklı güneş ışınması ve sıcaklığa bağlı olarak Eşitlik 4.7 ve 4.8' de verilmiştir.

$$I_{hücre} = I_{ph} - I_o \cdot \left(e^{\frac{q(V_{pv} + I \cdot R_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (4.7)$$

$$I_{hücre} = I_{ph} \cdot (1 + C_0(T - 273.15)) - I_o \cdot \left(e^{\frac{q(V_{pv} + I \cdot R_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (4.8)$$

Güneş panelleri, N_{pc} sayıda paralel koldan ve N_{sc} seri koldan oluşur. Her bir N_{pc} kol, N_{sc} sayıda güneş hücreleri ile seri olarak birbirlerine bağlanmıştır. Birbirlerine seri bağlı güneş hücrelerinin toplam gerilim değeri, aynı akım değeri için her bir güneş hücresi gerilim değerinin birbirine eklenmesiyle bulunur. Birbirlerine paralel bağlı güneş hücrelerinin toplam akım değeri, aynı gerilim değerleri için üretilen akım değerlerinin toplanmasıyla bulunur.

Sıcaklığın etkisine bağlı olarak bir PV modülün karanlıktaki doyma akımı;

$$I_0 = I_{\text{oref}} \left(\frac{T_c}{T_{\text{cref}}} \right)^3 \cdot \exp \left[\left(\frac{q \cdot E_g}{n \cdot k} \right) \left(\frac{1}{T_{\text{cref}}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (4.9)$$

I_{oref} Referans akımı

E_g Diyot bant genişliği

$$V_{\text{OC}} = v_D = V_T \ln \left(\frac{I_c}{I_s} + 1 \right) \quad (4.10)$$

V_D katoda göre anodun pozitif olduğu diyot gerilimi,

I_c diyotun ters yönde ön polarlamalı hücre akımı,

V_{OC} açık devre gerilimi,

V_T termal gerilimi,

I_s sızıntı (veya ters doyma) akımı, tipik değer aralığı 10^{-6} ile 10^{-15} A;

Foton akımı;

$$I_{\text{ph}} = [I_{\text{sc}} + \alpha \cdot (T_c - 25)] \frac{G}{G_{\text{ref}}} \quad (4.11)$$

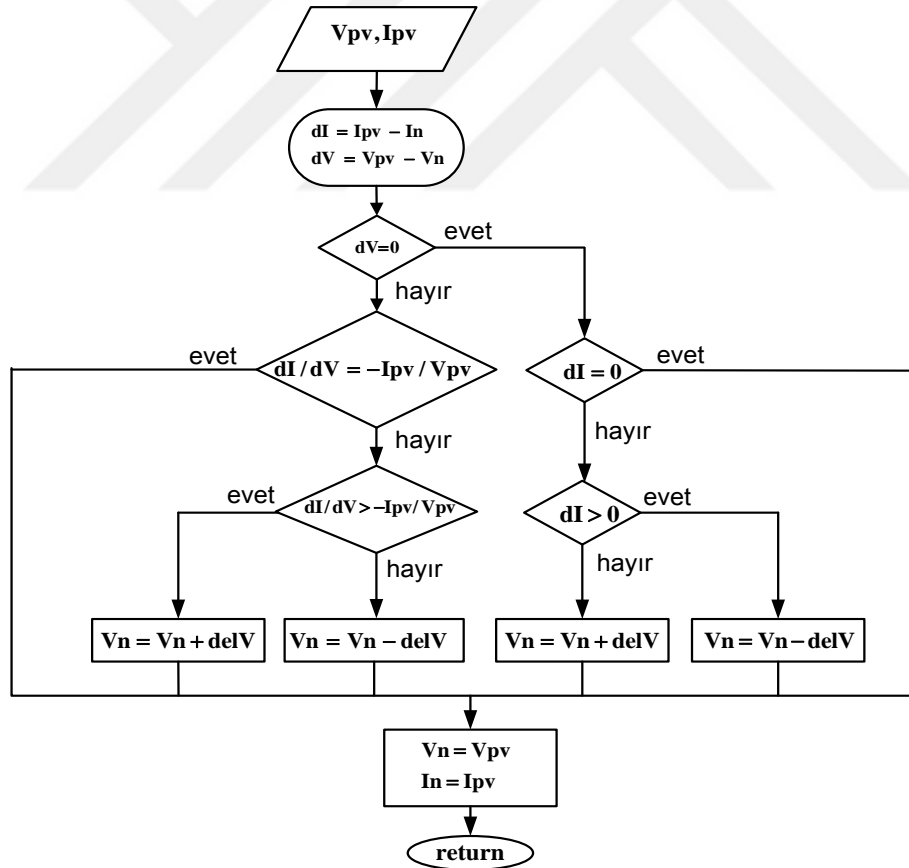
4.1.2. Maksimum güç noktası izleme (MPPT)

Güneş hücresi farklı sıcaklık ve ışıma seviyelerinde çalışır. Her bir güneş hücresi farklı bir karakteristik üretir çünkü PV'nin çıkış gücü gerilime göre değişir. Her bir güneş hücresi farklı maksimum güç noktasına (MPP) sahiptir. MPP'de gerilim ışıma ve sıcaklığa bağlı olarak değişir. Bu yüzden PV hücreden yüksek verimlilik elde etmek için MPP izlenmesi gerekir. PV hücrenin yüksek maliyeti düşünüldüğünde MPP sistemin verimliliğini artırır (Xia, 2012).

MPPT kelimesinin Türkçe kelime karşılığı maksimum güç noktası takipçisidir. MPPT'ler belirli periyotlarda elde edilen gücün peak yaptığı değeri yani tepe değerini takip ederek yüke yollanmasını sağlar. MPPT'ler bir bakıma alternatif enerji sistemlerinin kesişim noktası diyebiliriz. Tüm sistemlerde elde edilen enerjiden maksimum seviyede yararlanmak, bu elektronik cihazlar sayesinde mümkün hale gelmiştir. Rüzgar türbinlerinde ve solar sistemlerde kullanılan MPPT çeşitleri mevcuttur.

MPPT için referans gerilimi elde etmek için artan iletkenlik algoritmasından faydalanılmıştır. Bu algoritmanın akış şeması Şekil 4.2.'de verilmiştir. MPPT algoritması tam zaman örnekleme olarak bilinen zaman aralığıyla PV modüle çıkışındaki akım ve gerilimdeki değişimi izliyor. Şekil 4.2.'de hazırlanan algorithmada, DA gerilimde değişikliği gözleyen iki durum mevcuttur. Birinci durum gerilim değişikliği olmadığı durum, ikinci durum ise gerilimde olan değişim incelenmiştir (Hussein ve ark., 1995)

İlk durum için gerilim değişimi olmazken akımda olan değişim incelenmiştir. Akım değişikliği sıfır olursa PV modül MPP'ye ulaşır. Bu yüzden gerilim değişikliği yoktur. Fakat akım değişikliği sıfır değil ise PV modül MPP'ye ulaşamaz. Bu yüzden gerilimdeki küçük bir değişim akım akımın artıp azalmasına bağlı olarak uygulanır. Modül çıkışındaki gerilim değişiminden dolayı modül çıkış akımı değişir. Bu işlem PV modülü MPP'ye ulaşana kadar devam eder.

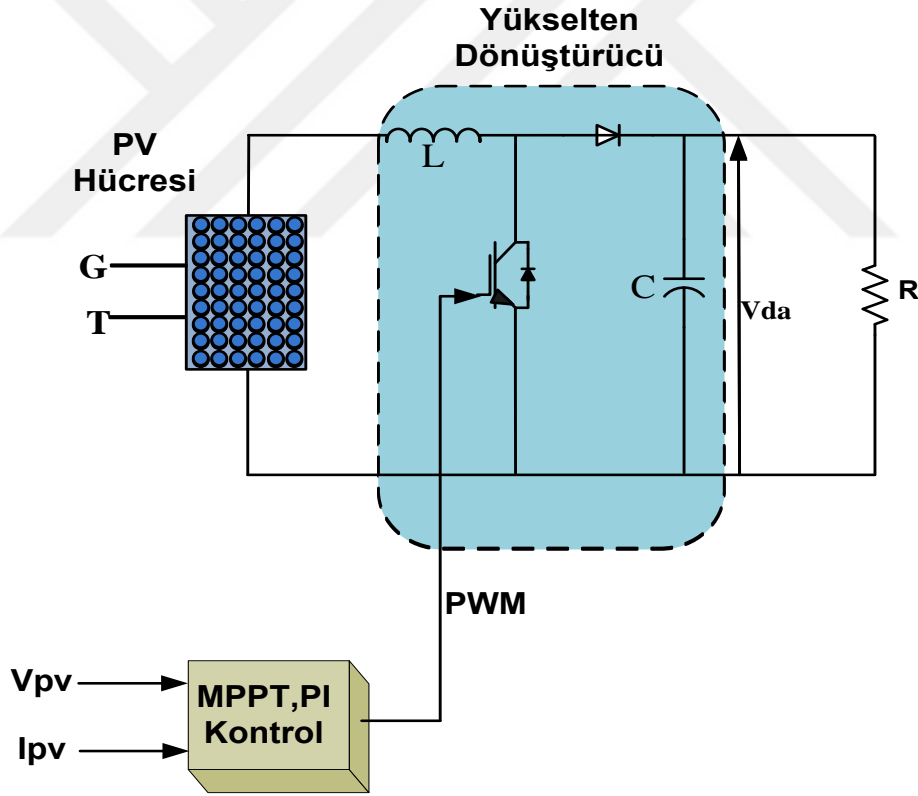


Şekil 4.2. MPPT algoritma akış şeması (Rahman, 2012).

İkinci durum için gerilim değişimi olduğunda $\frac{dI}{dV} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ arasındaki bağıntı incelenir. Aradaki bağıntı uyumlu olursa algoritma sıcaklık ve ışımaya seviyelerinde bir değişim olduğunu tahmin eder. Fakat PV modül MPP’de çalışır. Bu yüzden çalışma noktasında değişim gerekmiyor. Fakat aradaki bağıntı uyumlu değilse MPP’de çalışmaz. Bu yüzden çıkış akımını değiştiren gerilimde küçük bir değişim gerekir. Bu durumda ilk durumda olduğu gibi MPP noktasına ulaşana kadar işlem devam eder. (Rahman, 2012)

4.2. Güneş Hücresi Sisteminin PSCAD/EMTDC Modellemesi

Şekil 4.3.’te verilen PV hücre sisteminin dinamik modellenmesi ve MPPT kontrol sisteminin modellenmesi yapılarak sistem sabit DA yük altında analiz edilmiştir.



Şekil 4.3. Güneş hücresi sisteminin blok diyagramı.

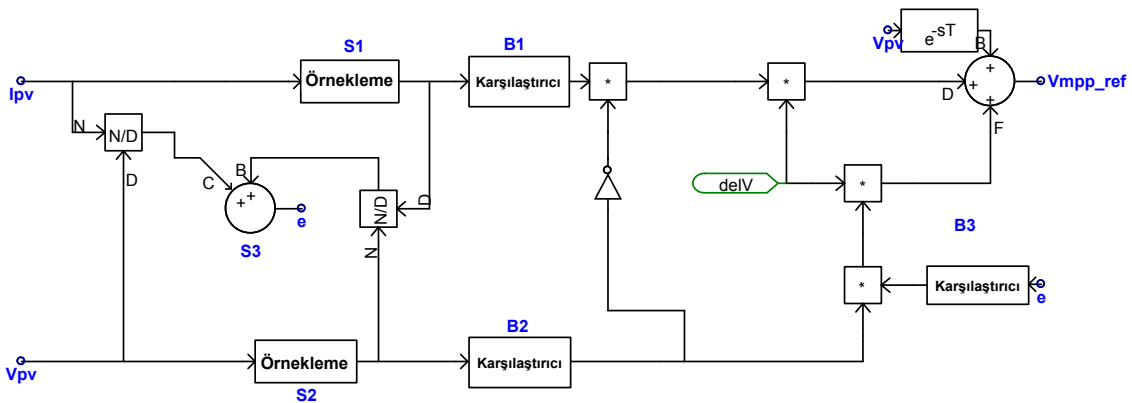
4.2.1. Güneş hücresi modellemesi

PV hücresi modeli uygulaması PSCAD/EMTDC yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Tüm akım kontrol blokları yazılım programının kütüphanesi kullanılarak güneş hücresi gerilimine bağlı olarak çıkış akımın kontrolü belirlenip uygulaması yapılmıştır. Gerilim ve akım arasındaki bağıntı ışıma ve sıcaklığa bağlı olarak gösterilmiştir.

4.2.2. MPPT Algoritma Modellemesi

Şekil 4.4.'de verilen MPPT algoritması PSCAD/EMTDC'de uygulaması için örnekleme zamanı belirlenerek hazırlanmıştır. Akım değişimini izlemek için PV modül çıkış akımı (I_{pv}) ile bir önceki çıkış akımının örnekleyerek S1 fark bloğu ile kıyaslanmıştır. Aynı şekilde gerilimdeki (V_{pv}) S2 fark bloğu ile izlenmiştir. Diğer taraftan dI/dV oranı ve I_{pv}/V_{pv} oranı hata çıkışını veren S3 fark bloğu ile kıyaslanmıştır ve B3 karşılaştırıcısından geçmiştir. S1 ve S2 çıkışları sırasıyla B1 ve B2 karşılaştırıcısından geçmiştir.

DC gerilimde değişim yoksa B2 çıkışı sıfır olur ve 1'e dönüştürüp B1 çıkışı ile çarpılır. Akım değişimi sıfır ise, B1 çıkışı sıfır olacaktır. Bu yüzden (V_{mpp}) çıkışında değişim olmayacaktır. Fakat B1 sıfır değilse $delV +1$ ya da -1 önceki örnekleme eklenip çıkartılarak (V_{mpp}) değerine ulaşacaktır. Bu durumda B3 çıkışı sıfır ile çarpılacaktır.

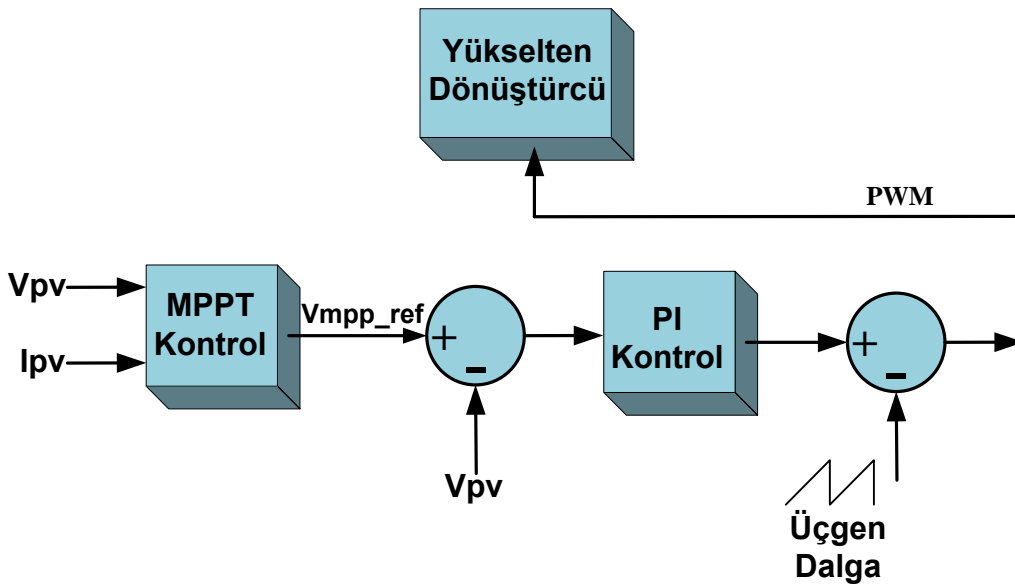


Şekil 4.4. MPPT sisteminin blok diyagramı.

Gerilimde bir değişim yoksa algoritmada anlatıldığı gibi B2 çıkışı $|X|$ bloğundan geçtikten sonra 1 olacaktır ve B3 çıkışı (V_{mpp}) değerine ulaşacaktır. Diğer taraftan dönüştürülen B3 çıkışını etkisiz bırakacaktır. Bu yüzden B3 çıkışına bağlı olarak gerilimdeki değişim (V_{mpp}) uygulanacaktır. Bu modellemede örnekleme zamanı gecikme zamanı olarak 0.2s ve gerilim değişimi 10V olarak kabul edilmiştir. Bu şekilde DA gerilimi MPPT ile başarılı bir şekilde sağlanmıştır.

4.2.3. Yükselten dönüştürücü ve kontrolü

Yükselten dönüştürücü ile ilgili temel bilgiler 3. Bölümde (yakıt hücresi ile ilgili bölüm) anlatıldığı için bu bölümde Şekil 4.5.'de verildiği gibi sadece dönüştürücünün kontrol yapısı anlatılacaktır. PV hücresine bağlı dönüştürücünün çalışması sırasında elde edilen çıkış gücünün maksimum verimle çalışabilmesi için sürekli olarak en yüksek seviyede olması gerekmektedir. Sistemin çıkış gücünün sürekli olarak en yüksek seviyede tutulması MPPT kontrolü ile sağlanmaktadır. PV panellerde güneş ışınması, çevre sıcaklığı gibi faktörlere bağlı olarak maksimum güç noktası değişmektedir (Demirtaş ve ark., 2008). PV hücresine bağlı dönüştürücüyü MPPT ile kontrol edilerek maksimum güç sağlanmaktadır. PSCAD/EMTDC'de blok diyagramları ile modellenen MPPT çıkışından referans gerilim elde edilerek PV gerilim ile kıyaslanıp PWM oluşturularak yükselten dönüştürücü kontrol edilmiştir.



Şekil 4.5. Yükselten dönüştürücünün kontrol yapısı.

PV hücrenin modülünü oluşturmak için kullanılan genel parametreler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

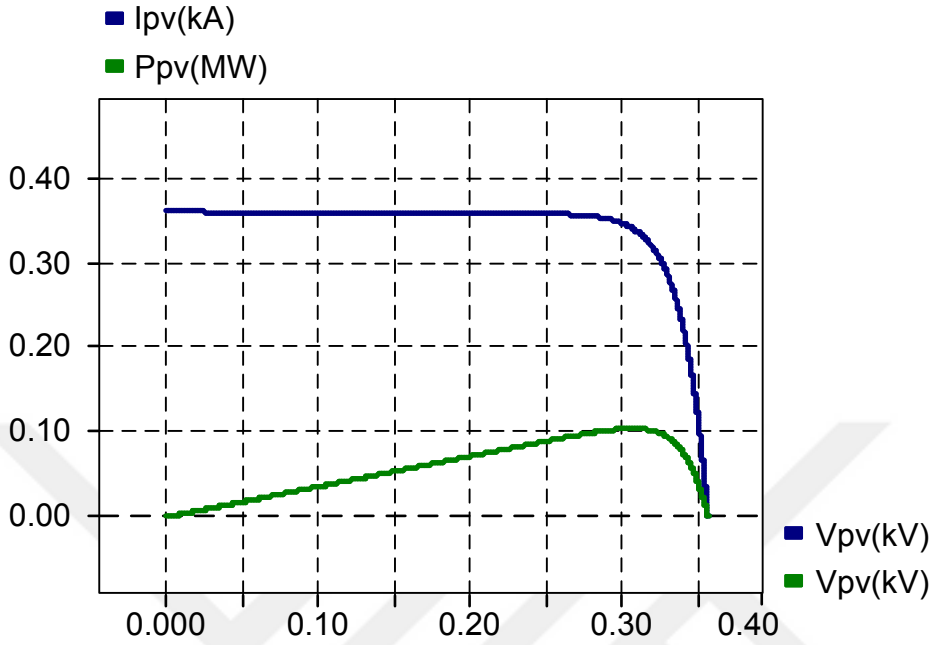
Çizelge 4.1. PV hücrenin karakteristik yapısı

Açıklama	Parametre	Değerleri
Bir paneldeki seri modül sayısı	Nms	10
Bir paneldeki paralel modül sayısı	Nmp	20
Bir modüldeki seri hücre sayısı	Ncs	44
Bir modüldeki paralel hücre sayısı	Ncp	10
Referans ışıma	Gref	1100 W/m ²
İşıma	G	1000 W/m ²
Referans sıcaklık	Tref	25°C
Sıcaklık	T	25°C
İdealite faktörü	n	1.5
Seri rezistans	Rs	0.028 Ω
Shunt rezistans	Rsh	1000 Ω
Band gerilimi	Eg	1.106
Referans durumlarda doyma akımı	Iosr	1.35e-9
Sıcaklık sabiti	α	0.0017
Elektron yükü	q	1.602e-19
Boltzman sabiti	k	1.381e-23
Açık devre gerilimi	Voc	394V

4.2. Güneş Hücresi Sisteminin Benzetim Sonuçları

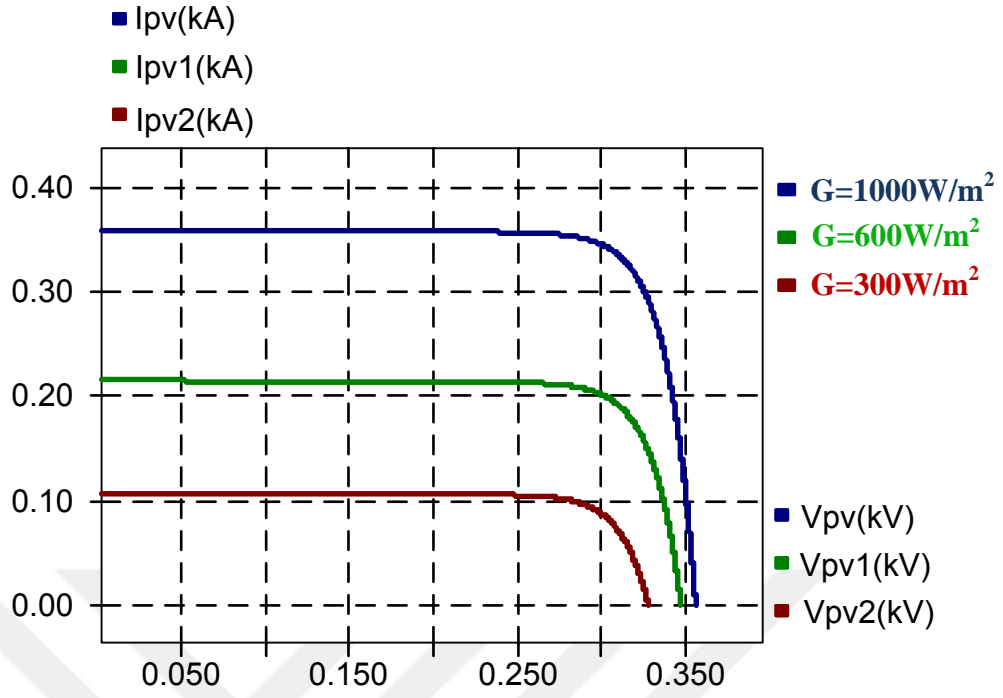
PV hücrenin akım-gerilim ve güç gerilim grafiği Şekil 4.6.'da verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi, güneş hücresinden elde edilen farklı gerilim ve akım

değerleri ile birlikte, güç noktası en yüksek seviyede tutulmaya çalışılmaktadır. Böylece sisteminin verimi en yüksek seviyede tutulması sağlanmıştır.

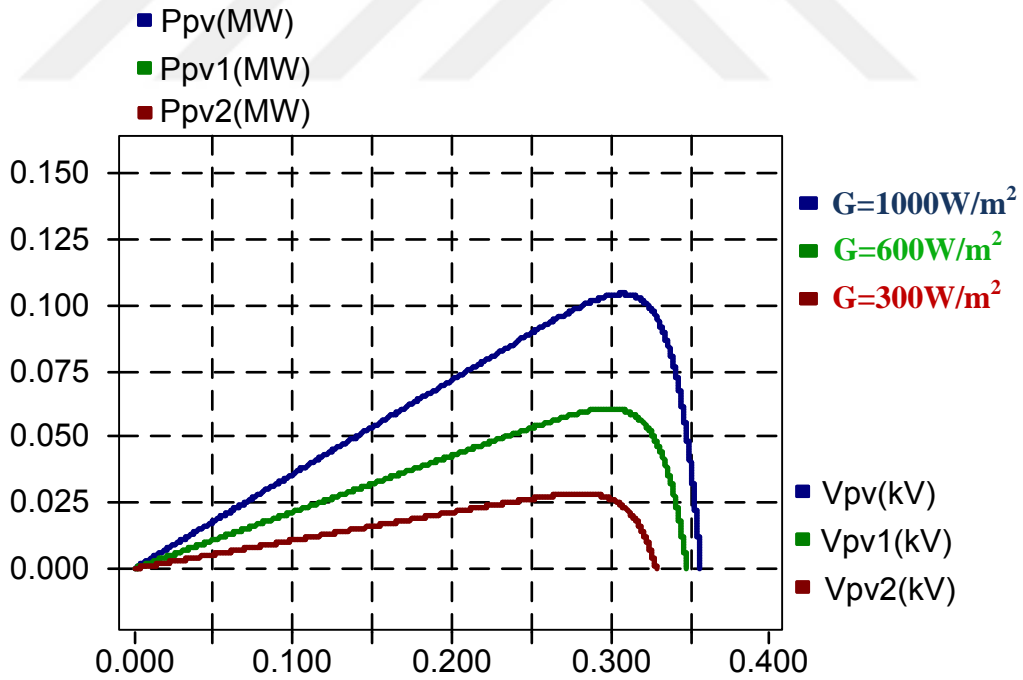


Şekil 4.6. PV hücrenin I-V ve P-V karakteristiği.

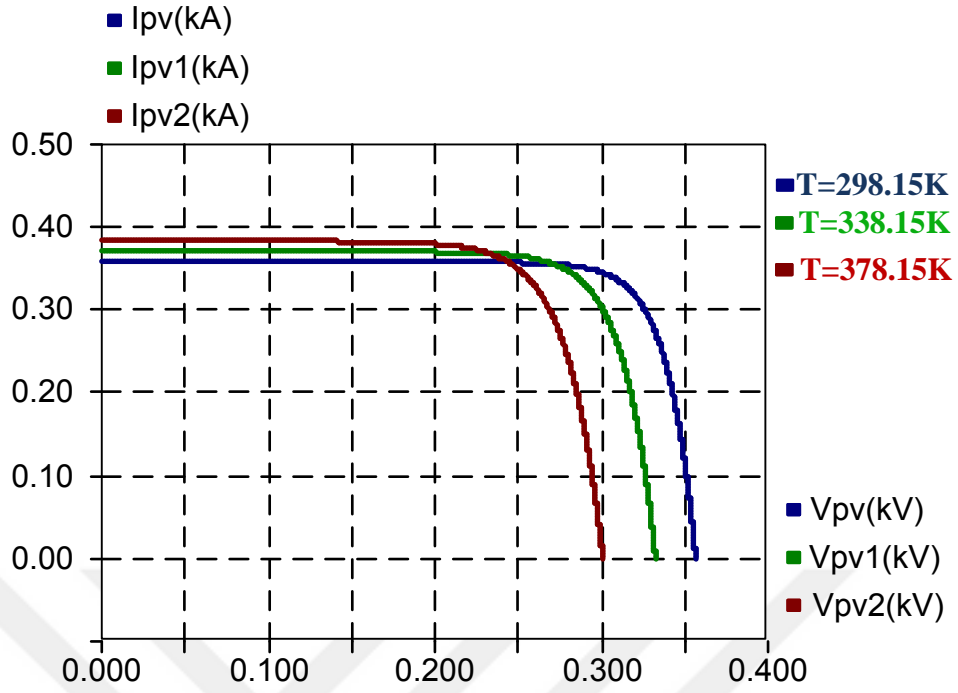
PV hücrenin akım-gerilim (I-V) grafiği ve gerilim-güç (P-V) ışınım ve sıcaklık gibi çevresel faktörlere göre değişir. Şekil 4.7., Şekil 4.8., Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.'da ışınım seviyesi $300-1000 \text{ W/m}^2$ ve sıcaklık ise $298,15-378,15 \text{ K}$ arasında değişmiştir. PV hücrenin çıkış gücü sıcaklığın artmasıyla azalırken ışınımın artmasıyla artar. Şekil 4.7.'de sabit sıcaklık altında ışınımın artmasıyla gerilim artmaktadır. Aynı şekilde Şekil 4.8.'de ışınımın artmasıyla güç artmaktadır. Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.'da ise sabit ışınım altında sıcaklığın artmasıyla gerilim ve güç azalmaktadır.



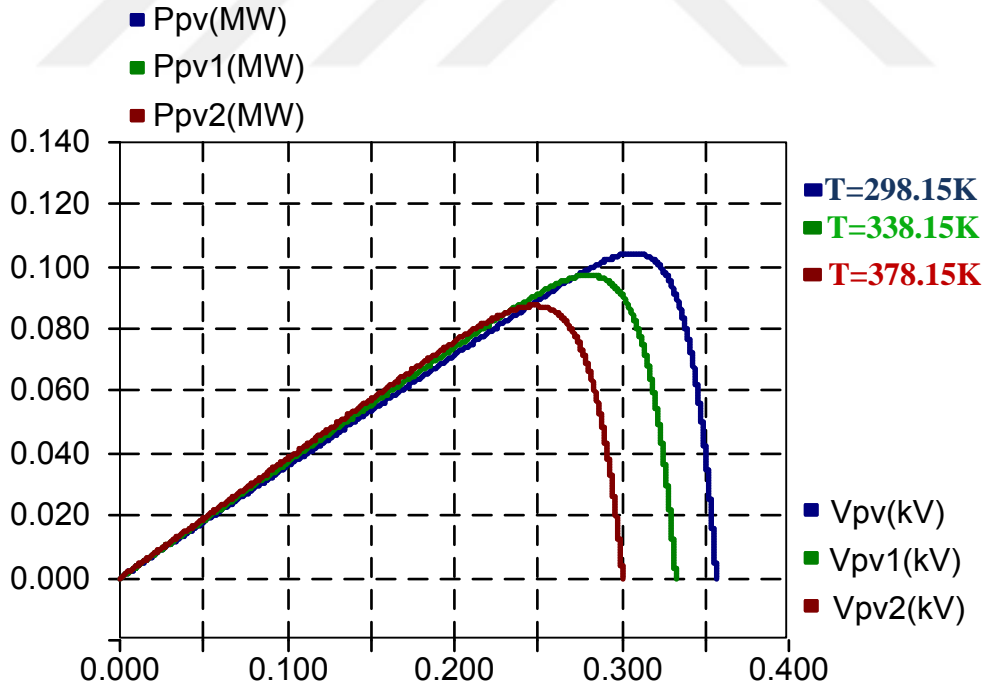
Şekil 4.7. PV Hücresinin I-V karakteristiğinin ışınıma göre değişimi ($T=298.15$, $G=1000 \text{ W/m}^2$, 600 W/m^2 , 300 W/m^2).



Şekil 4.8. PV hücresinin P-V karakteristiğinin ışınıma göre değişimi ($T=298.15$, $G=1000 \text{ W/m}^2$, 600 W/m^2 , 300 W/m^2).

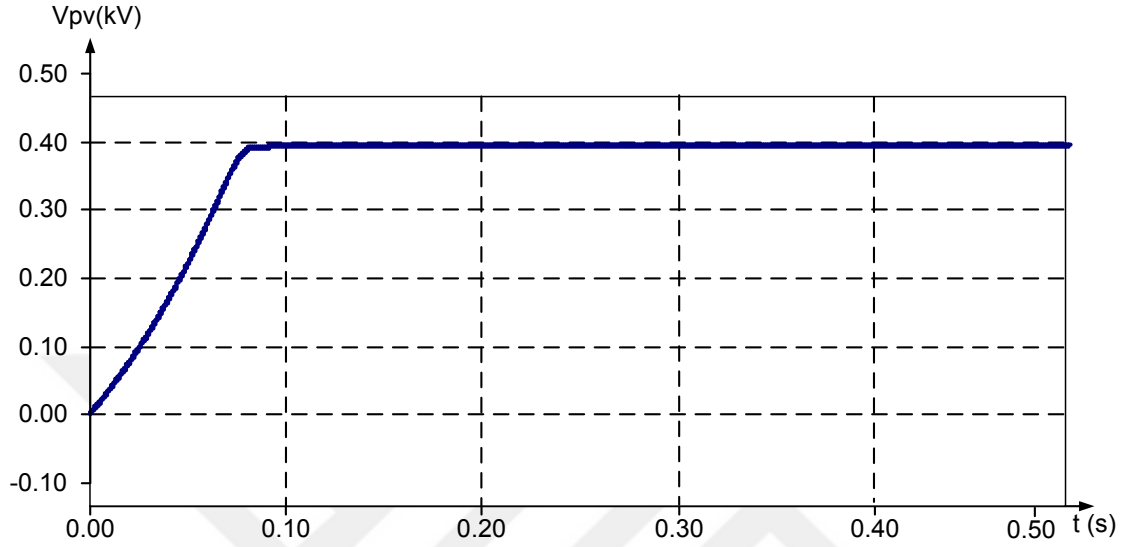


Şekil 4.9. PV hücrenin I-V karakteristiğinin sıcaklığa göre değişimi ($G=1000W/m^2$, $T=298,15K$, $338.15K$, $378.15K$).



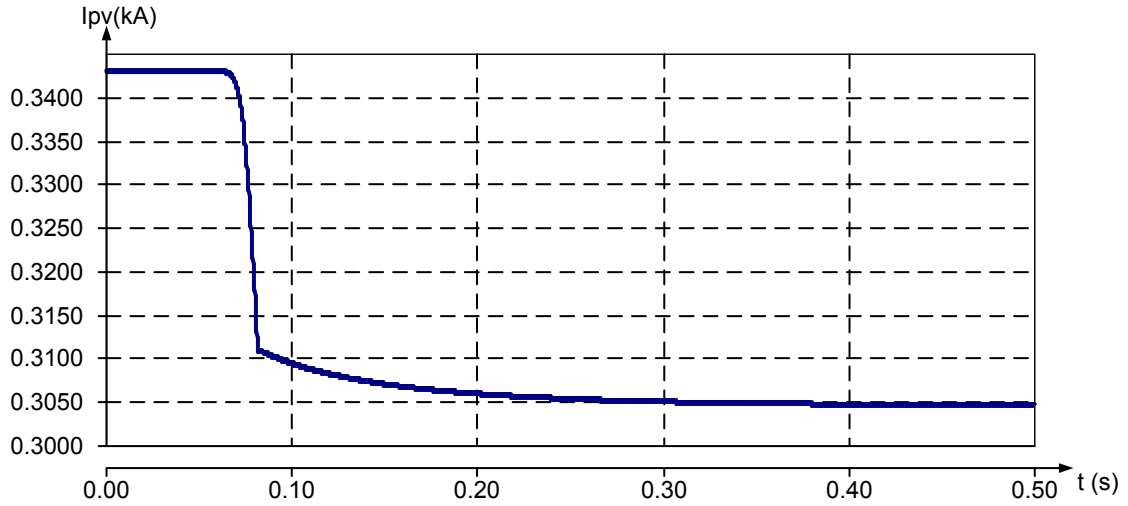
Şekil 4.10. PV hücrenin P-V karakteristiğinin sıcaklığa göre değişimi ($G=1000W/m^2$, $T=298,15K$, $338.15K$, $378.15K$).

Şekil 4.11.'de verilen grafikte artan yük miktarına göre güneş hücresinin gerilimi yaklaşık 0.1s'den sonra kararlı hal noktasında ulaşmaktadır. Sabit çevresel koşullar altında çıkış gerilimi 400 V göstermektedir.



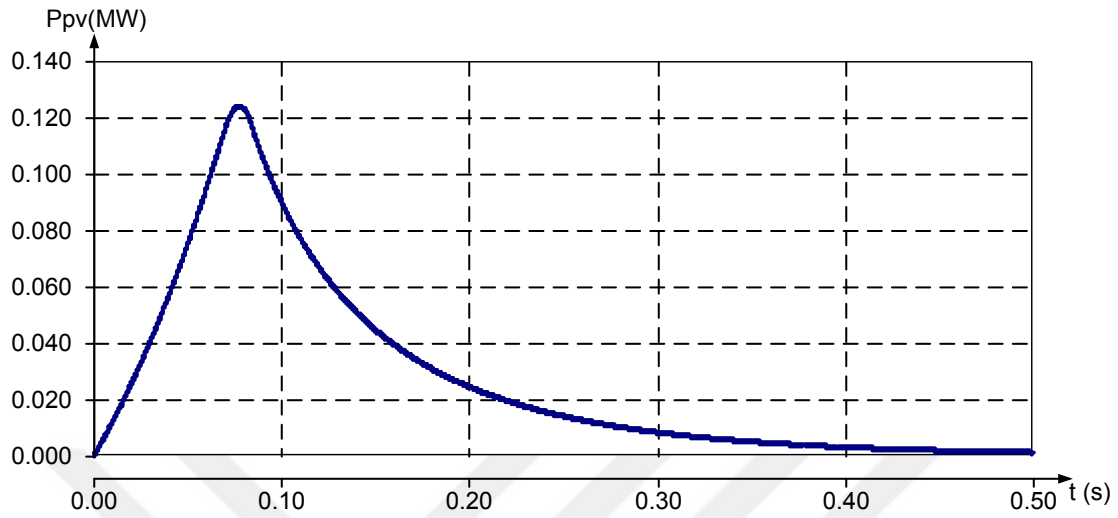
Şekil 4.11. PV hücrenin değişken yük altında çıkış gerilimi.

Şekil 4.12.'de verilen grafikte artan yük miktarına güneş hücresinin akımı yaklaşık 0.1s'ye kadar azalır sonra kararlı hal noktasında ulaşmaktadır. Sabit çevresel koşullar altında çıkış akımı 305 A değerinde göstermektedir.



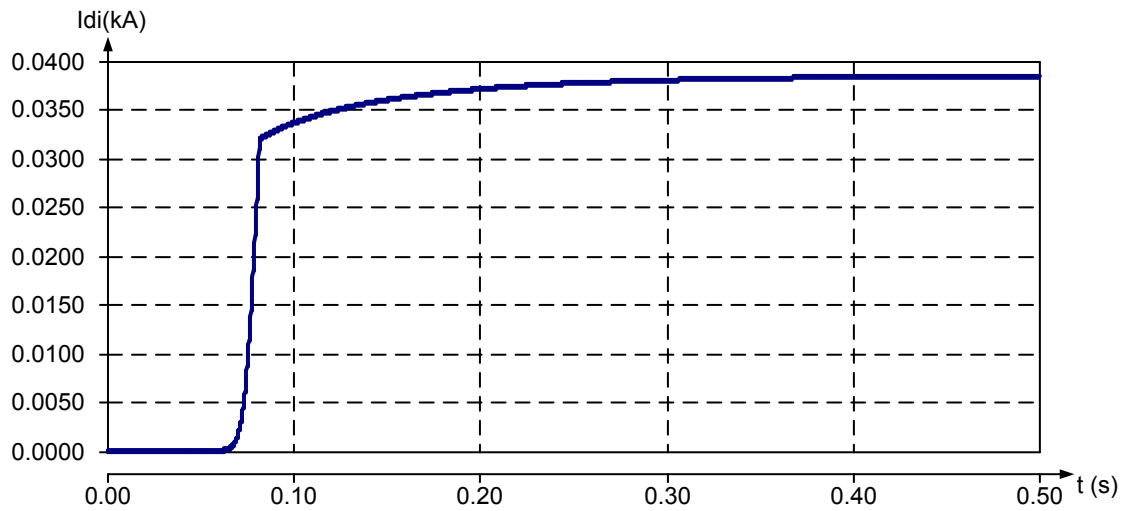
Şekil 4.12. PV hücrenin değişken yük altında çıkış akımı.

Şekil 4.13.'te verilen grafikte artan yük miktarına ve sabit çevresel koşullar altında güneş hücresinin maksimum gücü yaklaşık 120 kW noktasına ulaşmaktadır.



Şekil 4.13. PV hücrenin değişken yük altında çıkış gücü.

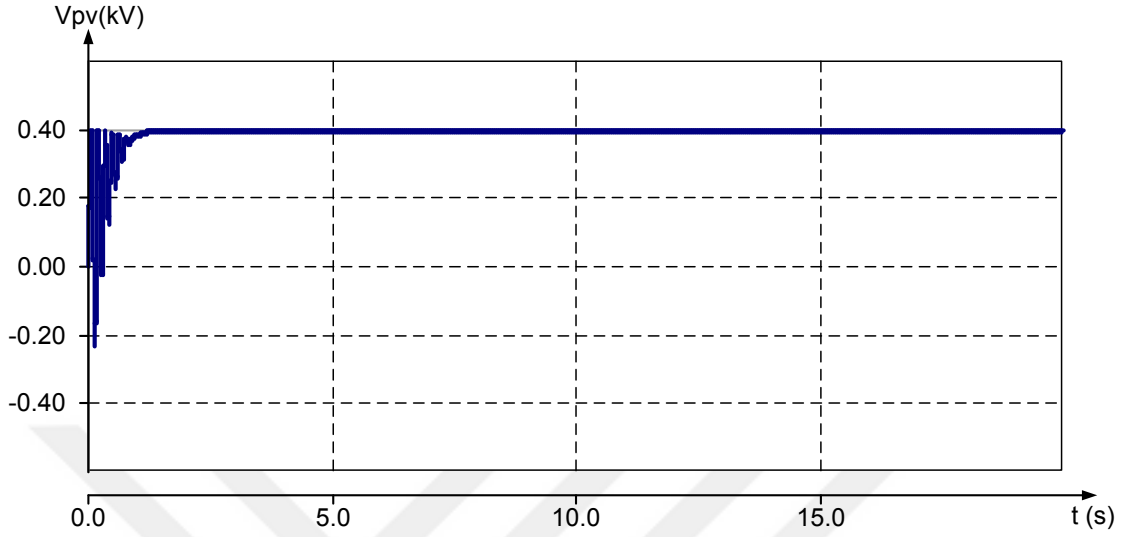
Şekil 4.14.'de güneş hücresinin değişken yük altında diyot akımı yaklaşık 0.1s'den sonra kararlı hal noktasında ulaşmaktadır. Diyot akımı 360 A değerinde göstermektedir.



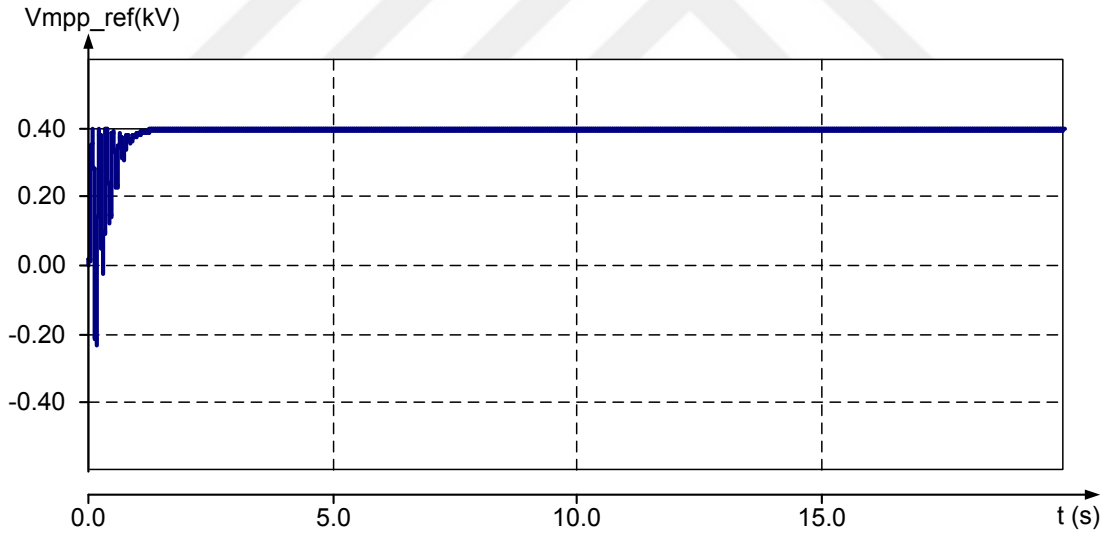
Şekil 4.14. PV hücrenin değişken yük altında diyot akımı.

Yükseltilen dönüştürücüye bağlanan güneş hücresinin çıkış gerilimi sabit yük ve sabit çevresel koşullar altında kararlı hal noktasında ulaşmaktadır. Şekil 4.15.'de

maksimum güç noktası gerilimi 400 V değerinde göstermektedir. Şekil 4.16.'da ise MPP referans geriliminin PV hücre gerilimini takip ettiğini gösteriyor.

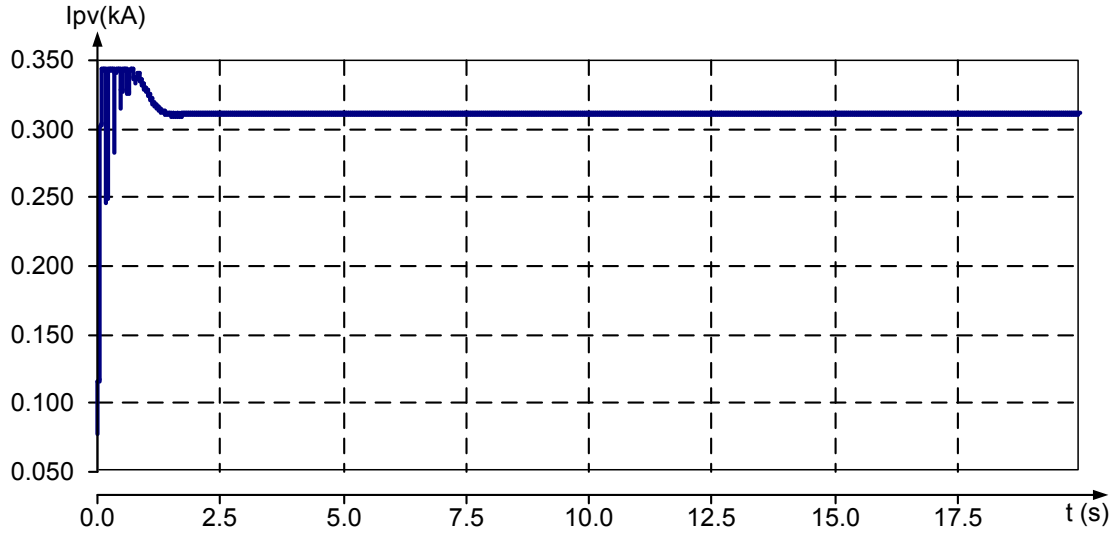


Şekil 4.15. Yükselten dönüştürücüye bağlanan PV hücrenin çıkış gerilimi.

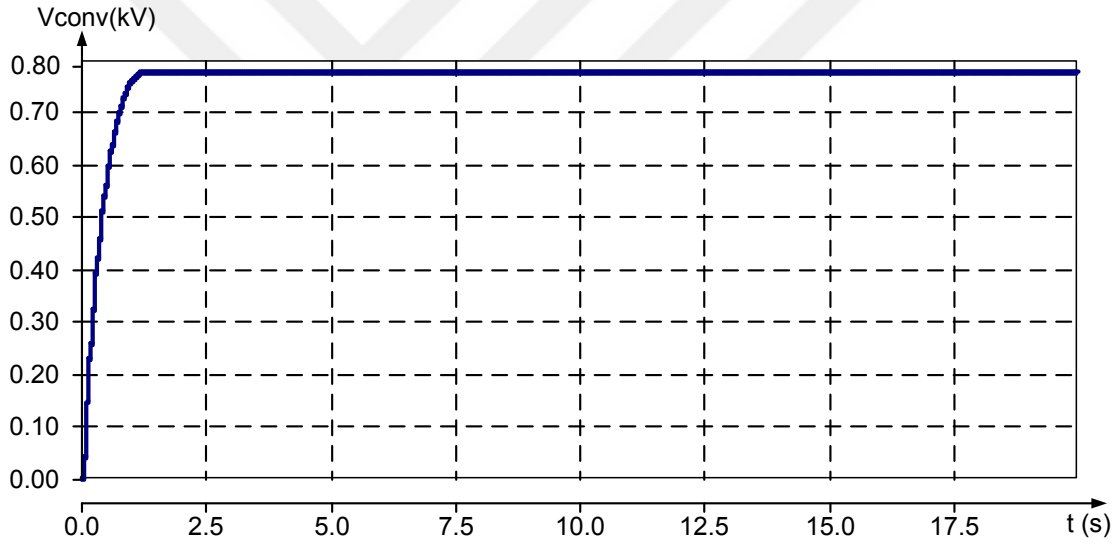


Şekil 4.16. Yükselten dönüştürücüye bağlanan MPP referans gerilimi.

Yükselten dönüştürücüye bağlanan güneş hücresinin çıkış gerilimi sabit yük ve sabit çevresel koşullar altında MPPT kontrolü ile yükseltilmiştir. Şekil 4.17.'de PV hücrenin çıkış akımı yaklaşık 310 A değerinde göstermektedir. Şekil 4.18.'de yükselten dönüştürücünün çıkış gerilimi 800 V'a ulaşılmıştır.

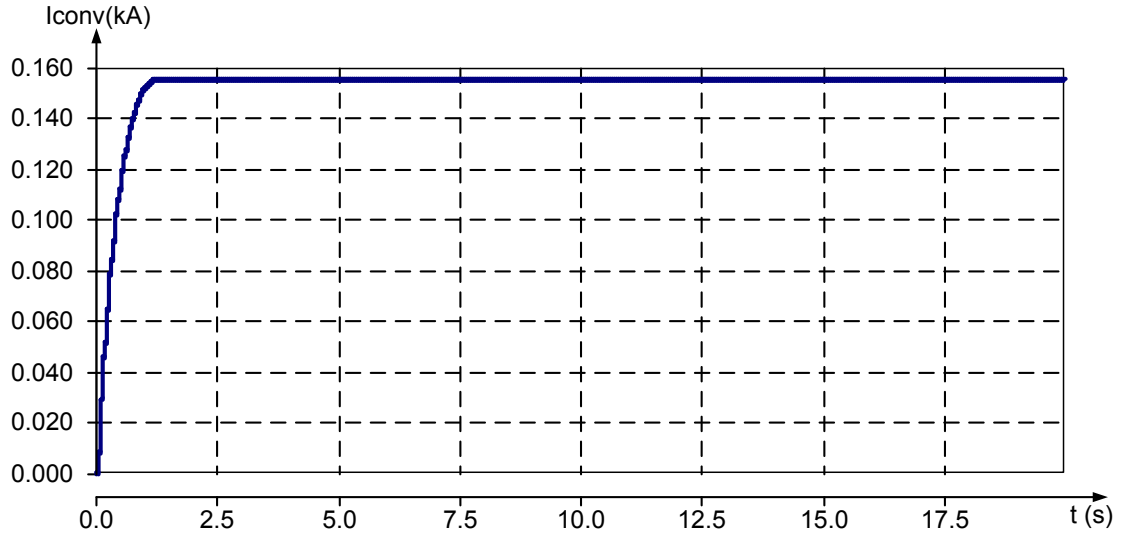


Şekil 4.17. Yükselten dönüştürücüye bağlanan PV hücrenin çıkış akımı.

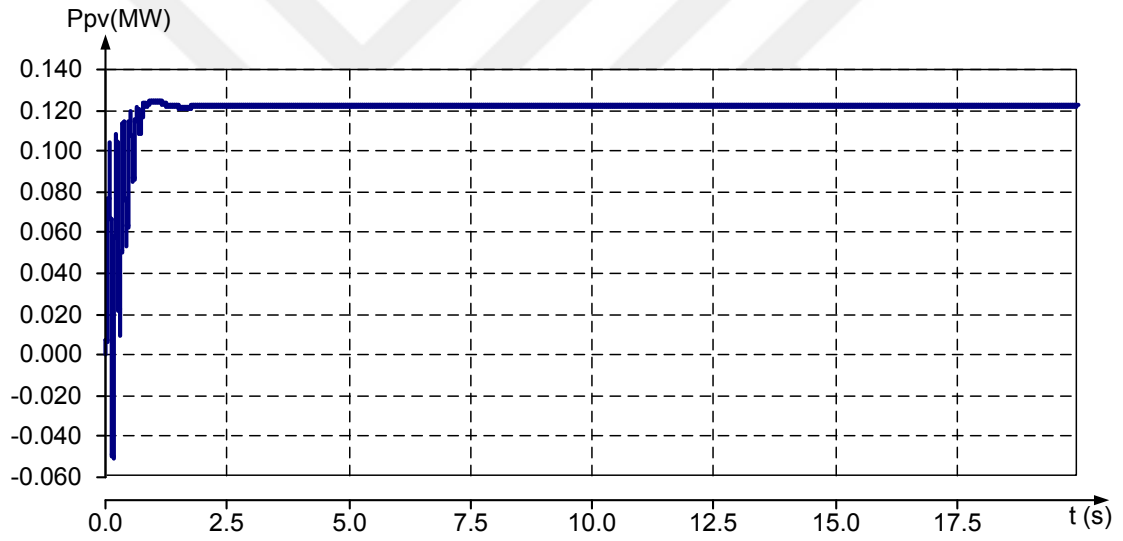


Şekil 4.18. PV hücrene bağlanan yükselten dönüştürücünün çıkış gerilimi.

Güneş hücresinin bağlanan yükselten dönüştürücünün çıkış akımı sabit yük ve sabit çevresel koşullar altında Şekil 4.19.'da 155 A'e ulaşılmıştır. Şekil 4.20.'de PV hücreden MPPT kontrolü ile 124 kW'lık güç elde edilmiştir.

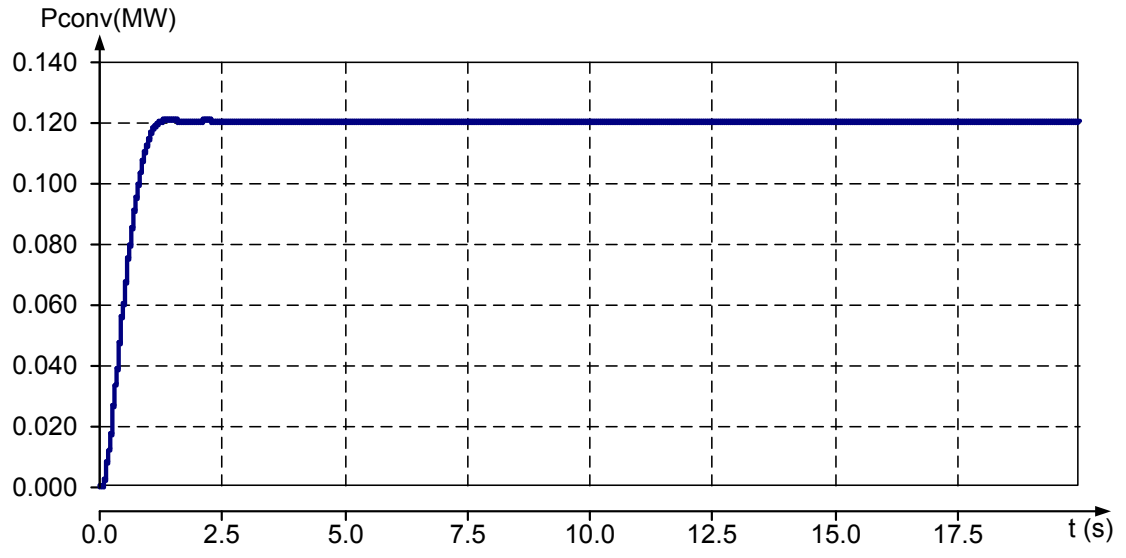


Şekil 4.19. PV hüresine bağlanan yükselten dönüştürücünün çıkış akımı.



Şekil 4.20. Yükselten dönüştürücüye bağlanan PV hücrenin çıkış gücü.

Şekil 4.21.'de yükselten dönüştürücünden çok az güç kaybı olarak yaklaşık 120 kW'lık güç elde edilmiştir.



Şekil 4.21. PV hüresine bağlanan yükselten dönüştürücünün çıkış gücü.

5. RÜZGAR TÜRBİNİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

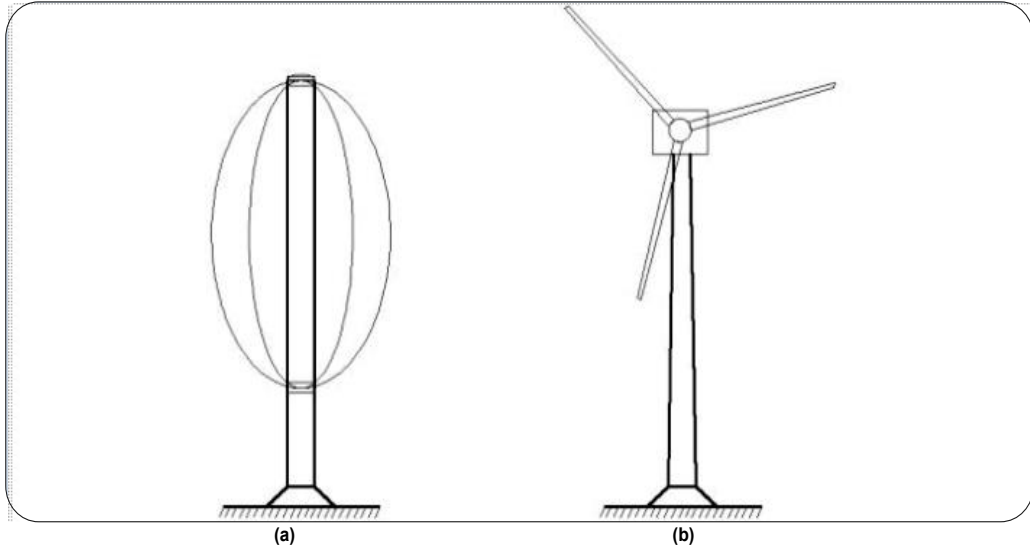
5.1 Rüzgar Türbini

5.1.1 Rüzgar enerjisi

Küresel ısınmadan dolayı yenilenebilir enerji kaynakları önemi gittikçe artıyor. Ekonomik, sağlık çevre gibi farklı yönde insanı etkiliyor. Küresel ısınma petrol yada kömür gibi fosil yakıtların yanmasında sera gazının oluşmasına sebep olur. Yenilenebilir enerji kaynakları bu tür problemleri çözebiliyor. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi en hızlı büyüyen enerji kaynağıdır. Rüzgar enerjisi serbest halde bulunmasından ziyade yüksek kapasiteye sahiptir. Yüksek enerji gücü birçok türbinin bir araya gelmesi ya da rüzgar çiftliklerinden elde edilir.

Rüzgar enerjisi kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürme prensibidir. Rüzgar türbini hava akışından dolayı kinetik enerjiyi yakalayıp mekanik enerjiye dönüştürür. Rüzgar türbine yerleştirilen jeneratör mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Rüzgarın kinetik enerjisi türbinin rotor kanadını döndürür. Bu şekilde rotor kanadına binen jeneratör milinin dönmesini sağlar. Bu jeneratörler mil ile döndürülen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür.

Şekil 5.1.'de gösterildiği gibi rüzgar türbinleri eksenlerin dönmelerine göre dikey ve yatay eksenli türbin olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Dikey rüzgar türbinleri düşük güç uygulamaları için uygundur. Güç verimlilikleri yaklaşık %25'tir (Skolthanarat, 2009). Yatay türbinlerin avantajı jeneratör ve trafolar rotor bıçakların yanına yerleştirebilirler. Bu şekilde düşük montaj ve bakım maliyeti sağlar. Yatay rüzgar türbinleri genellikle iki ya da üç bıçaklı olarak tasarlanırlar.



Şekil 5.1. (a) Dikey eksenli, (b) Yatay eksenli rüzgar türbini (İşcan ve Demirbaş, 2011).

Rüzgar türbini rotor kanadının hız kontrolünü sağlayan kontrolcüye sahiptir. Rüzgar ölçer rüzgar hızını ölçer ve bilgiyi kontrolcüye aktarır. Rotor kanadının yükselme açısı maksimum rüzgar hızını elde etmek için kontrolcü ile kontrol edilir ve şiddetli rüzgarın olduğu durumlarda mekanik gücü azaltır. Rotor kanatları nominal güce ulaşıldığında rüzgardan hücum açısını azaltmak için taraklandırılır. Pitch kontrol sisteminde rüzgardaki maksimum güç küçük ya da orta seviyedeki rüzgar türbinleri için pasif kontrol durdurucuları ile sınırlandırılır. Durdurucu kontrol kanatların dönmesini engeller. Aktif durdurucu kontrol yükselme açısı kontrolcüye benzerdir. Rotor kanatları maksimum gücü yakalamak için döner. Güç nominal değere ulaştığında aktif durdurucu kontrol türbülansı artırmak için rüzgar şiddetini artırmaya çalışır (Skolthanas, 2009).

Rüzgar türbinleri sabit hızlı ve değişken hızlı türbinler olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Sabit hızlı türbinler doğrudan şebekeye bağlanır ve rüzgar hızına bakılmaksızın şebeke açılma hızıyla senkronize edilir. Rüzgar hızındaki dalgalanma jeneratöre mekanik şiddet üretir. Rüzgar türbini şebekeye bağlandığında rüzgar hızı dalgalanmaları şebeke tarafında görülür. Değişken hızlı türbinler sabit hızlı türbinler ile zıt çalışır. Jeneratör hızı rüzgar hızının mekanik şiddeti çözmesine göre değişir. Sonuç olarak jeneratör çıkış gerilimi frekans ve genliği vardır. Bu yüzden şebekeye bağlanması için rüzgar türbinin değişken gerilim genliği ve frekansını şebeke frekansına dönüştürülmelidir. Dolaylı olarak şebekeye bağlamak mekanik şiddetten kaynaklanan problemleri azaltır.

Rüzgar enerjisini şebekeye bağlamak için uygun şebeke entegrasyonu ve yüksek güç kalitesi için kontrol sistemi gerekir. Güç elektroniği şebeke entegrasyonunda değişken hızlı rüzgar gücü, aktif ve reaktif güç kontrolü ve gerilim titreşimini azaltır. Fakat güç dönüştürücüleri anahtarlamadan dolayı diğer problemlerde ortaya çıkabilir. Şebeke entegrasyonundan dolayı kaynaklanan bir diğer problem güç kalitesini azaltan şebeke akım ve gerilim harmonikleridir.

5.1.2 Rüzgar Enerjisi

Hava değişiminden dolayı basınç ve sıcaklık kinetik enerjiye dönüşür. Kinetik enerji, E , hava akışı kütlesi m ve hız v_t olmak üzere (Skolthanarat, 2009);

$$E = \frac{1}{2} m v_t^2 \quad (5.1)$$

ile ifade edilir.

Betz kanunu, rüzgardan teorik olarak elde edilebilecek maksimum gücü verir. Daha yüksek rüzgar hızı ile daha yüksek miktarda enerji elde edilir. Türbin kanadına giren v_a hızı türbinden ayrılan v_b hızından daha yüksektir.

A_s Alanından akan rüzgarın anlık gücü veya çıkış gücü (Rashid, 2013) P_{out} ;

$$P_{out} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} A_s \rho_{air} v_t^3 = \frac{1}{2} A_s \rho \left(\frac{v_a + v_b}{2} \right) (v_a^2 - v_b^2) \quad (5.2)$$

Mevcut türbin giriş gücü;

$$P_{in} = \frac{1}{2} A_s \rho_{air} v_a^3 \quad (5.3)$$

ρ_{air} Hava akışı yoğunluğudur.

Değişken rüzgar hızı türbini ile rotor kanatları serbestçe rüzgarın hız ve yönüne göre hareket eder. Rüzgardan elde edilen güç rotor güç verimliliğine bağlıdır. Rüzgar hızı rotor kanadını geçtikten sonra sıfır hız olamaz çünkü verimlilik 1'den küçük olamaz. Mekanik güç rotor güç verimliliğine (C_p) bağlı olan rüzgar türbini türbini ile elde edilir (Skolthanarat, 2009).

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) A_s \rho_{\text{air}} v_t^3 \quad (5.4)$$

Türbinin rotor güç verimliliği, C_p , kanat çevresel hız oranının λ ve kanat yükselme açısının β bir fonksiyonudur (Skolthanasarat, 2009).

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \cdot e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068 \lambda \quad (5.5)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (5.6)$$

Betz kanununa göre, teorik olarak elde edilen maksimum rüzgar gücü, toplam gücün %59,3'üdür. Rotor bıçaklarını geçtikten sonra rüzgarın akım hızı ve enerjisi düşer. Bu yüzden rüzgar çiftliğinde rüzgar türbini birbirini etkiler. Rüzgar türbinleri genellikle türbülansın etkisinden kurtulmak için birbirinden rotor yarıçapından üç katından uzak yerlere yerleştirilir (Skolthanasarat, 2009). Uygulamalardaki türbinlerin verimleri biraz daha düşüktür. Hava basıncı, sıcaklık, nem, yükseklik, yerçekimi ivmesi ve δ 'nin bir fonksiyonu olan rüzgarın hava yoğunluğu ρ yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$\delta = \frac{P_{\text{at}}}{C_g T} e^{\frac{gh}{k_g T}} \quad (5.7)$$

P_{at} Deniz seviyesindeki standart atmosferik basınç (101,325 Pa veya N/m²);

T Hava sıcaklığı (K) (Kelvin = 273,15+°C);

C_g Hava için özgül gaz sabiti(287Ws/kg K);

g Yerçekimi ivmesi (9.8 m/s²);

h Rüzgarın deniz seviyesinden yüksekliği (m);

v_a Türbin kanadına giren rüzgar hızı (m/s);

v_b Türbin kanadına çıkan rüzgar hızı (m/s);

A_s Türbinin ürettiği enerji kanatların taradığı alan;

v_t Suyun, rüzgarın veya buharın rüzgar kanatlarına çarpma hızı (m/s)

5.1.3. Rüzgar jeneratörü

Jeneratörlerin çıkış gerilimleri, bir veya daha fazla kademeli güç elektroniği dönüştürücüleri ile nominal frekanstaki nominal şebeke gerilimine dönüştürülür. Rüzgar jeneratörü yerleşik gücüne, türbin alanına, yük tipine ve kontrol kolaylığına göre seçilir.

Rüzgar çiftliklerinin faydalandığı jeneratörlerden biri senkron jeneratördür. Senkron jeneratörün rotor sargıları evirici ile birlikte şebekeden ihtiyaç duyulan akım ya da daimi mıknatıslanma ile uyartılır. Stator sargısı değişken hız kavramının destekleyen tam nominal güç dönüştürücüye bağlanılır. Frekans ve kutup sayısının çarpımı;

$$f_{elec} = \frac{P}{2} f_{rotor} \quad (5.8)$$

Senkron jeneratör basit sistem ve bakım maliyetinde azalma sağlıyor. Dişlisiz çok kutuplu daimi mıknatıslı senkron jeneratör daha caziptir çünkü hafif ve bakım maliyeti düşüktür. Ayrıca kurulum ve taşıma maliyeti azalır (Skolthanasat, 2009).

Şebeke entegrasyonu olduğunda rüzgar jeneratörü kaçınılmaz oluyor. Her jeneratör çeşidi şebekeye bağlı farklı güç elektroniği gerektiriyor. Asenkron jeneratör rüzgar endüstrisinde geniş bir şekilde kullanılır. İki farklı asenkron jeneratör vardır.

Sincap kafesli asenkron jeneratör doğrudan şebekeye ya da değişken hızda güç elektroniği ara yüzüne bağlanabilir (Skolthanasat, 2009). Sabit hızlı sistem basitlik ve bakımının az olması az olmasından dolayı ucuzdur. Rüzgar türbinine doğrudan bağlanan mekanik sarsıntıya ve kalkışta yüksek ani akıma neden olur. Bu sorun yumuşak anahtarlama ile çözülür. Yumuşak anahtarlama, tristör, güç elektroniği yarı iletkenleri maksimum akımı sınırlar (Skolthanasat, 2009).

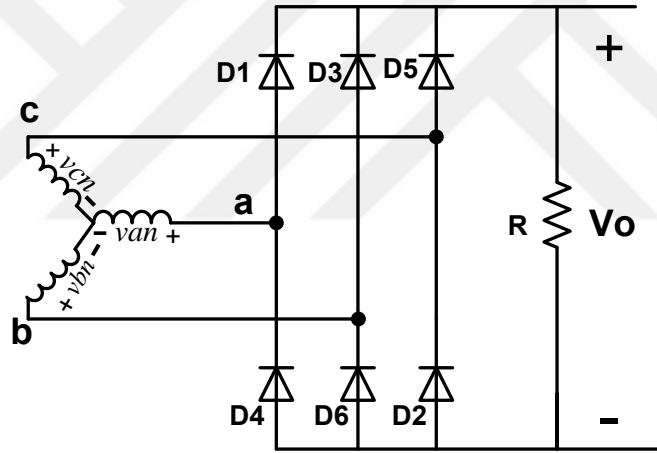
Asenkron makine düşük güç faktörü ya da gerilim düşümü gibi istenilmeyen durumlara sebep olan şebekeden reaktif güce ihtiyaç duyar. Reaktif güç anahtarlama kapasitesi ya da güç dönüştürücüleri ile sağlanabilir. Değişken hızlı sincap kafesli asenkron makine için güç dönüştürücüleri reaktif gücü sağlamaktadır.

Bu çalışmada sabit mıknatıslı jeneratör (PMSG) kullanılmıştır. PMSG ile şebeke arasında güç elektroniği elemanları kullanılır. Bu sistemin basit kurulum ve düşük maliyet gibi avantajları vardır. Ancak jeneratör güç katsayısı üzerindeki kontrol

yeteneğinin olmaması jeneratörün verimini düşürmektedir. Ayrıca yüksek harmonik akımını içermesi verimi azaltmaktadır (Rashid, 2013).

5.1.4. Üç fazlı köprü doğrultucu

Şekil 5.2.'de gösterilen üç fazlı köprü doğrultucu büyük güçlü uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılır. Üç fazlı gerilimin mevcut olduğu endüstriyel uygulamalarda, üç fazlı doğrultucuları, tek fazlı doğrultuculara tercih eden bir doğrultucu çeşididir. Çünkü üç fazlı doğrultucular, çıkışta daha düşük gerilim salınımları vererek ve daha yüksek güç aktarabilir. Üç fazlı köprü doğrultucuda her koldaki diyotlar(D1-D4, D2-D5, D3-D6) birbiriyle 180° faz farkıyla çalışırlar. Ayrıca alt ve üst grup diyotları da (D1-D3-D5, D2-D6-D4) kendi içlerinde birbirleriyle 120° faz farkıyla çalışırlar.



Şekil 5.2. Üç fazlı köprü doğrultucu.

V_m Anlık faz gerilimin tepe değeri ise anlık faz gerilimleri (Rashid, 2013);

$$V_{an} = V_m \sin(\omega t) \quad (5.9)$$

$$V_{bn} = V_m \sin(\omega t - 120) \quad (5.10)$$

$$V_{cn} = V_m \sin(\omega t - 240) \quad (5.11)$$

Fazlar arası gerilim faz geriliminden 30° ileride ise;

$$V_{ab} = V_m \sin(\omega t + 30) \quad (5.12)$$

$$V_{bc} = V_m \sin(\omega t - 90) \quad (5.13)$$

$$V_{ca} = V_m \sin(\omega t - 210) \quad (5.14)$$

Ortalama çıkış değeri;

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi/6} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3} V_m \cos \omega t d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m = 1.654V_m \quad (5.15)$$

Çıkış gerilimin etkin değeri;

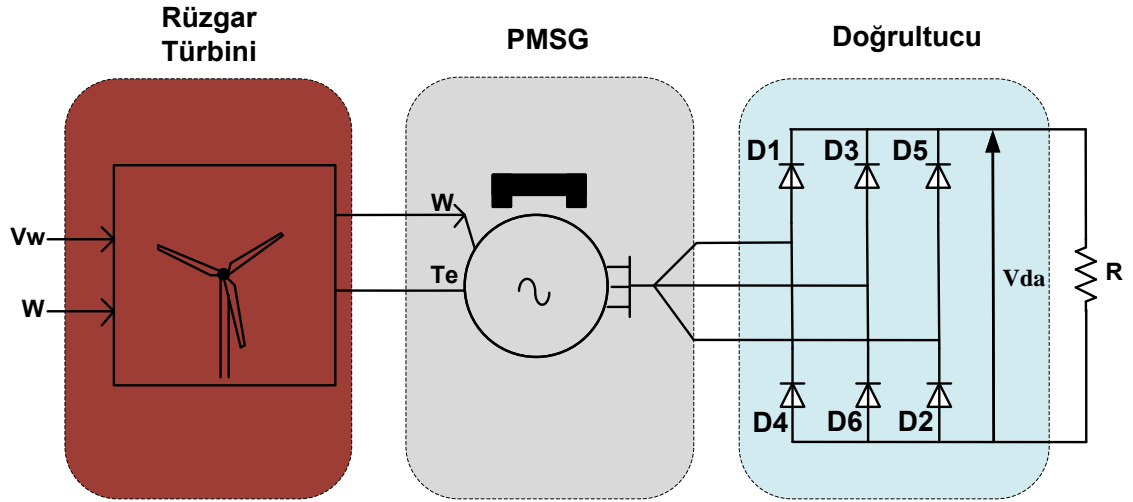
$$V_{rms} = \left[\frac{2}{2\pi/6} \int_0^{\pi/6} 3V_m^2 \cos^2 \omega t d(\omega t) \right]^{1/2} \left(\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi} \right)^{1/2} V_m = 1.6554V_m \quad (5.16)$$

Diyottan geçen en büyük akım $I_m = \sqrt{3} I_m / R$ ve diyot akımının etkin değeri;

$$\left\{ I_{D(rms)} = \left[\frac{4}{2\pi} \int_0^{\pi/6} I_m^2 \cos \omega t d(\omega t) \right]^{1/2} = I_m \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{6} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{6} \right) \right]^{1/2} \right. \\ \left. = 0.5518I_m \right. \quad (5.17)$$

5.2. Rüzgar Enerjisi Sisteminin PSCAD/EMTDC Modellemesi

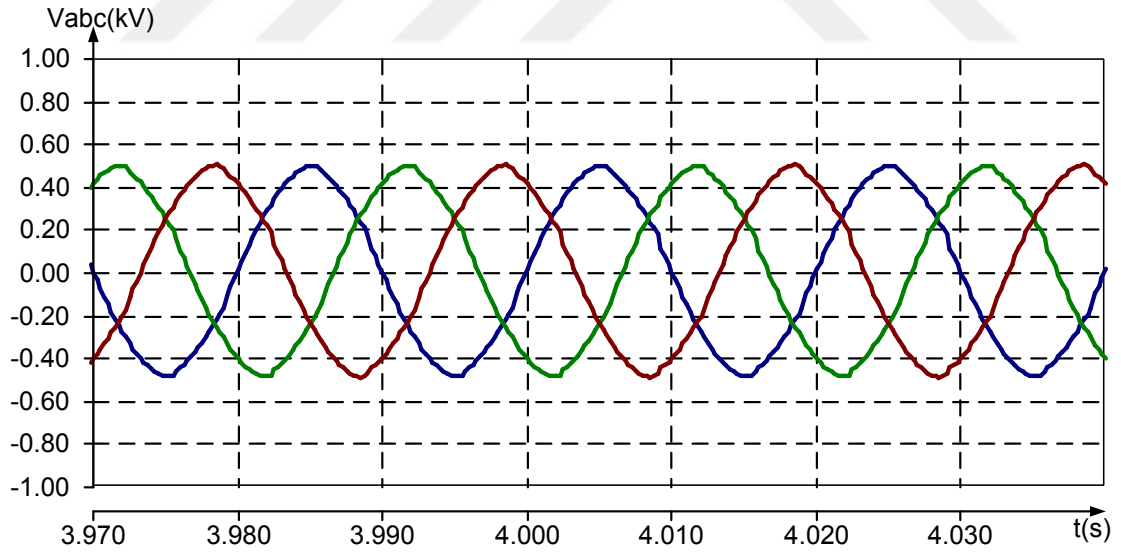
Bu bölümde Şekil 5.3.'te verilen rüzgar enerji sistemini DA yük altında modellemesi yapılmıştır. Bu sistem güç elektroniği elemanları ve PMSG kullanılarak şebeke ile entegrasyonu sağlanıp çıkış gerilimi, bir veya daha fazla kademeli güç elektroniği dönüştürücüleri ile nominal frekanstaki nominal şebeke gerilimine dönüştürülmüştür. Sistemin her bileşeni ayrı ayrı modellenip analiz edilerek birbiriyle senkronizasyonu sağlanmıştır.



Şekil 5.3. Rüzgar türbini enerji sistemin blok diyagramı.

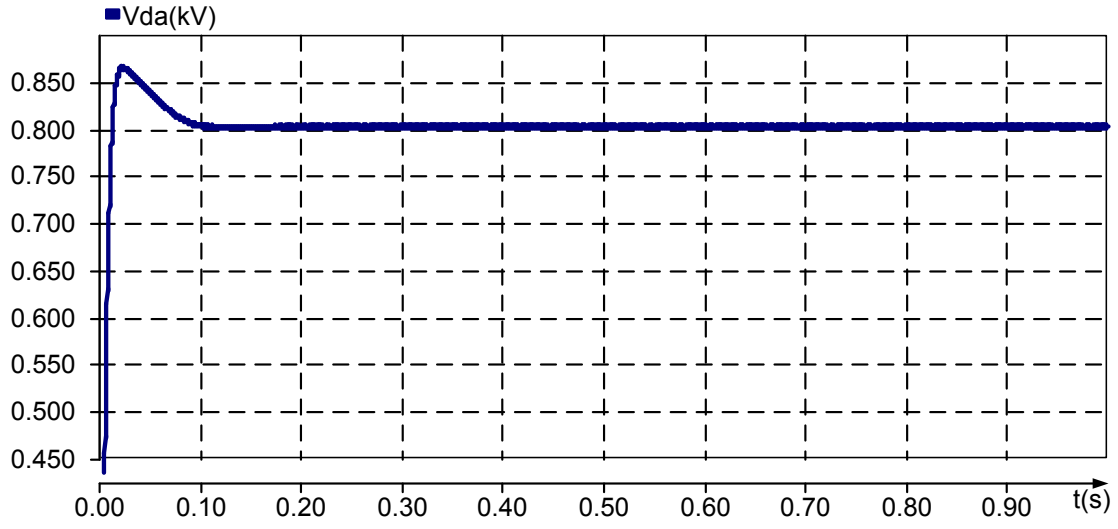
5.3. Rüzgar Enerji Sisteminin Benzetim Sonuçları

Şekil 5.4' de PMSG'nin 483 V olan faz-nötr gerilimleri verilmiştir.

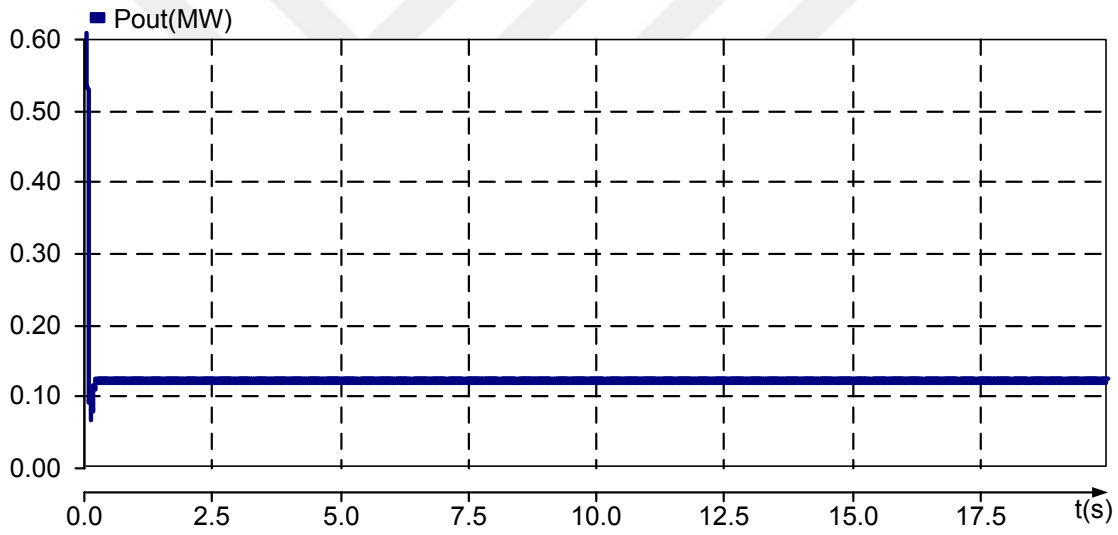


Şekil 5.4. PMSG'nin faz-nötr gerilimleri.

Üç fazlı kontrolsüz köprü doğrultucu jeneratör çıkış gerilimini nominal frekansta nominal şebeke gerilimine dönüştürmüştür. Şekil 5.5.'de verildiği gibi elde edilen gerilim 800 V'tur. Şekil 5.6.'da ise PMSG'den yaklaşık 130 kW güç elde edilmiştir.



Şekil 5.5. Doğrultucunun çıkış gerilimi.



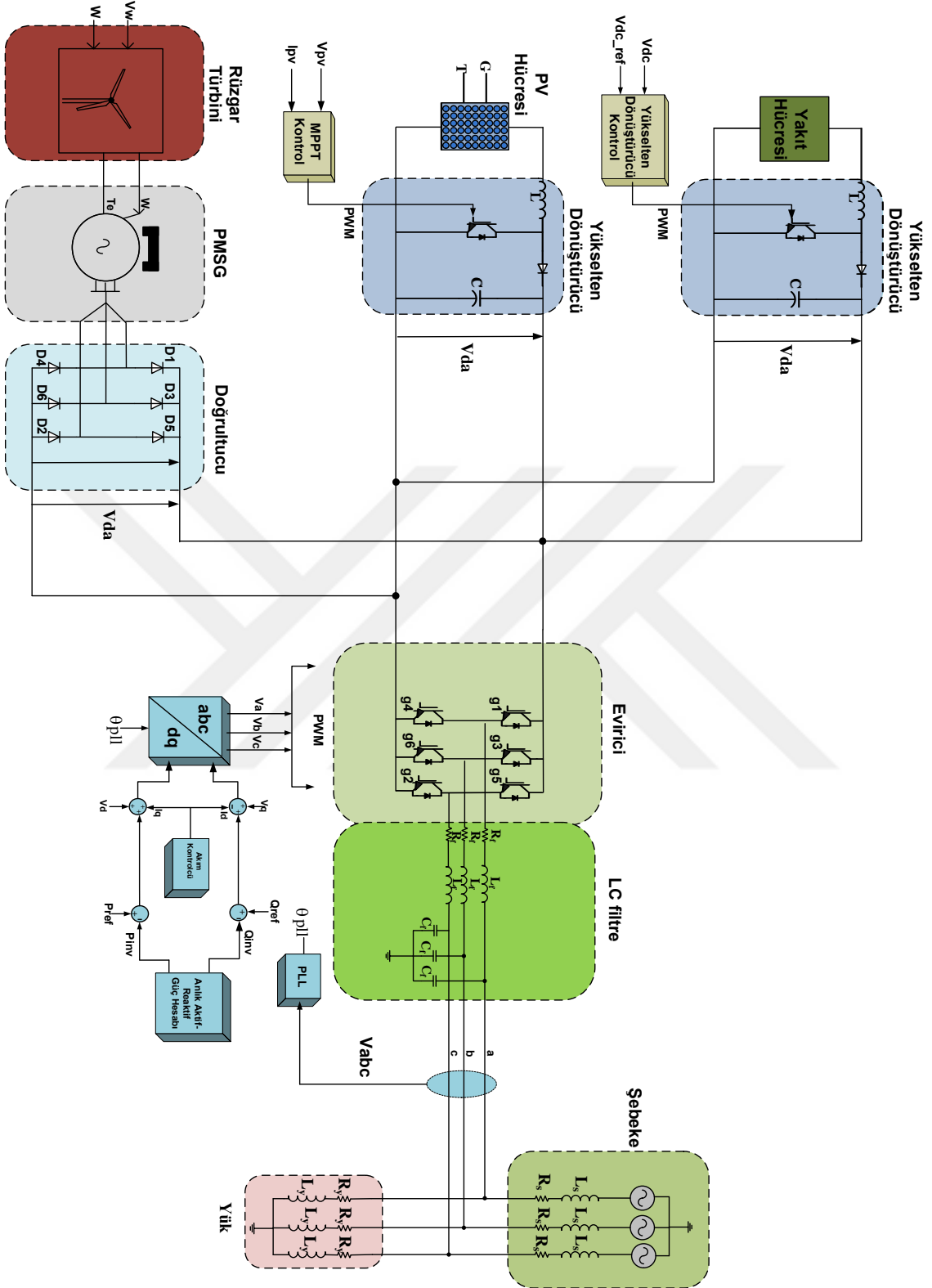
Şekil 5.6. PMSG'nin çıkış gücü.

6. DAĞITILMIŞ ÜRETİM SİSTEMİ

DÜ sistemi kaynakları tüketiciye yakın küçük elektrik enerji üretimi ya da depolanmasını sağlayan kaynaklar olarak tanımlanır. DÜ sistemleri teknolojilerin uygulama farklılığına ve büyüklüğüne göre (kW-MW) arasında değişir. Geleneksel DÜ teknolojileri endüstriyel gaz türbini, içten yanmalı motorlar, mikro türbin ve yakıt hücreleri gibi yakıtı sağlayan enerjiye bağlıdır (Pregelj, 2003).

DÜ sistemi son yıllarda elektrik talebinin artmasıyla büyük ilgi görmektedir. İletim sistemi üzerindeki yükü azaltarak daha çok yenilenebilir enerji kaynakları ve alternatif enerji kaynakları ile bağlantı kurar. DÜ kaynakları şebekeye bağlı ya da şebekeden bağımsız çalışabilir. Literatürde genellikle yakıt hücresi, biokütle, jeotermal, PV, rüzgar ve mikro türbin gibi geleneksel olmayan ve yenilenebilir enerji kaynakları olarak düşünülebilir (Mahmood, 2014).

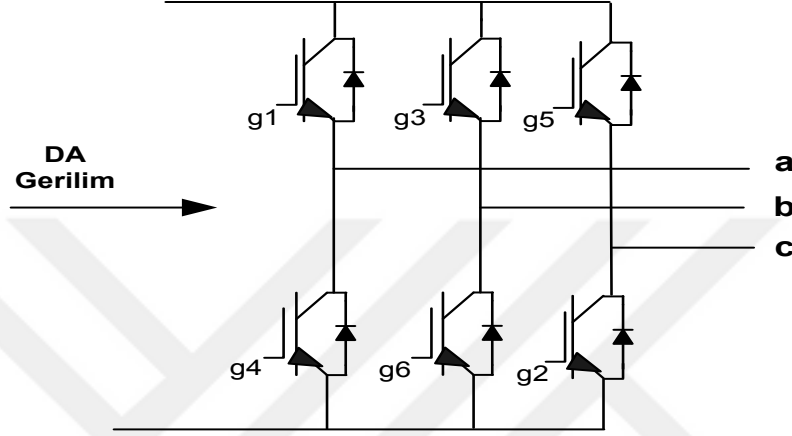
Bu sistemde Şekil 6.1.'de görüldüğü gibi güneş hücresi, yakıt hücresi ve rüzgar türbini ayrı ayrı modellenip analiz edilerek ortak bir eviriciye bağlandığı, her birinin ayrı ayrı devreye alınması ya da üçün birlikte şebeke ile entegrasyonu yapılmıştır.



Şekil 6.1. Dağıtılmış üretim sisteminin blok diyagramı.

6.1. Gerilim Kaynaklı Evirici (VSI)

Şekil 6.2.'de verilen üç fazlı evirici genelde yüksek güç uygulamalarında kullanılır. Üç fazlı VSI altı transistor ve altı diyot yapısından elde edilebilir. 180 derece iletim ya da 120 derecede iletim kontrol sinyalleri uygulanabilir. 180 derecede iletim anahtarlama için daha uygundur.



Şekil 6.2. VSI devresi.

Anlık faz-faz gerilimi Eşitlik 3.35'de verildiği gibi V_{ab} gerilimi 30° faz kayması ve sıfır çift harmonik alınarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir (Rashid, 2013).

$$V_{ab} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \sin n \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) \quad (6.1)$$

V_{bc} ve V_{ca} 120° V_{ab} fazını kaydırarak elde edilebilir.

$$V_{bc} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \sin n \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (6.2)$$

$$V_{ca} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \sin n \left(\omega t - \frac{7\pi}{6} \right) \quad (6.3)$$

Faz-faz ve faz-nötr rms gerilimi elde edilebilir aşağıdaki eşitliklerde elde edilebiliriz.

$$V_L = \left(\frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} V_s^2 \cdot dwt \right)^{1/2} = \sqrt{2/3} V_s = 0.8165V_s \quad (6.4)$$

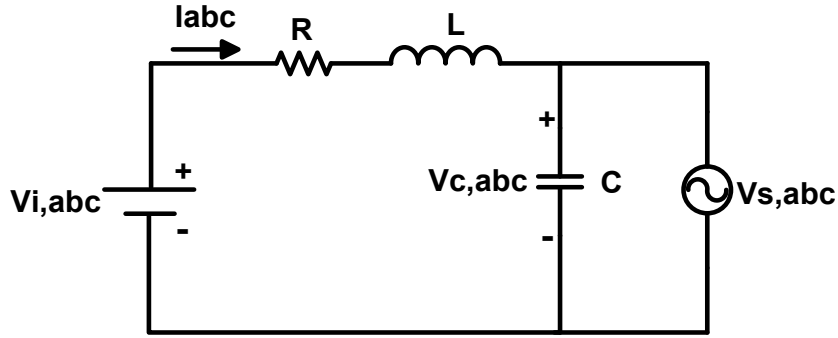
$$V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2}}{3} V_s = 0.471V_s \quad (6.5)$$

6.2. Şebekeye Bağlı Evirici Kontrol Sistemi

DÜ sisteminin şebekeye bağlanabilmesi için sistemin bağlanacağı şebeke gerilimi ile DÜ sisteminin çıkış geriliminin faz açısı, frekansı ve genliği eşit olmalıdır. Böylece iki sistem arasında senkronizasyon gerçekleştirilmiş olur. Bu amaçla, oluşturulan modelde PLL kullanılmıştır

PI kontrolcü şebekeye bağlı DÜ sisteminde AA akım kontrolü için kararlı hal hatasını ortadan kaldıramaz. Bu problemi çözmek için üç fazlı abc hareketsiz düzlem (stationary frame) ve dq0 senkron düzlem sistemi arasındaki matematiksel dönüşüm uygulanmalıdır. Üç fazlı AA devreye uygulanan dq0 dönüşümü doğrudan kareleştiren uygulamadır. Matematiksel dönüşümün uygulamasının ana nedeni analizi basitleştirmektir. Üç fazlı dengeli durumda, dq0 dönüşümü üç fazlı AA akımı iki doğrultulu akıma dönüştürür. Basitleştirilmiş hesaplamalardan sonra sanal DA miktara taşır. Ayrıca ters dönüşüm yapılarak üç fazlı abc duruma tekrar getirilip gerçek sisteme geribildirim yapılabilir fakat bu durumda sistemin karmaşıklığını gidermez (Xia, 2012).

Üç fazlı sinüzoidal faz, aynı açısal hızla dönen iki eksene dönüşür. Bu iki eksen 90° önde olan q-ekseni ve d-ekseni olarak adlandırılır. Dönüşümler aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir (Xia, 2012).



Şekil 6.3. Şebekeye bağlı VSI ile LC filtrenin eşdeğer devresi.

Şekil 6.3.'te verilen şebekeye bağlı üç fazlı LC filtrenin devre analizi aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir (Xia, 2012).

$$\frac{dI_{abc}}{dt} = \frac{V_{i,abc}}{L} - \frac{V_{c,abc}}{L} - \frac{I_{abc}R}{L} \quad (6.6)$$

Dq0/abc ile abc/dq0 park dönüşümleri aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir (Xia, 2012).

$$I_{dq0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

$$I_{abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

$\theta = \omega t$ ise;

$$I_d = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[I_a \cos(\omega t) + I_b \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_c \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (6.9)$$

$$I_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[I_a \sin(\omega t) + I_b \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_c \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (6.10)$$

I_d ve I_q türevleri alınırsa 6.11 ve 6.13 Eşitlikleri elde edilir.

$$\begin{aligned} \frac{dI_d}{dt} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\frac{dI_a}{dt} \cos(\omega t) + \frac{dI_b}{dt} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{dI_c}{dt} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ &- \sqrt{\frac{2}{3}} \omega \left[I_a \sin(\omega t) + I_b \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_c \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \end{aligned} \quad (6.11)$$

Eşitlik 6.6 ve 6.10 Eşitlik 6.11'e yerleştirildiğinde Eşitlik 6.12'yi elde edebiliriz.

$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{V_d}{L} - \frac{V_{c,d}}{L} - \frac{R}{L} I_d + \omega I_q \quad (6.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{dI_q}{dt} &= -\sqrt{\frac{2}{3}} \left[\frac{dI_a}{dt} \sin(\omega t) + \frac{dI_b}{dt} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{dI_c}{dt} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ &- \sqrt{\frac{2}{3}} \omega \left[I_a \cos(\omega t) + I_b \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_c \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \end{aligned} \quad (6.13)$$

Eşitlik 6.6 ve 6.9, Eşitlik 6.13'e yerleştirildiğinde Eşitlik 6.14'ü elde edebiliriz.

$$\frac{dI_q}{dt} = \frac{V_q}{L} - \frac{V_{c,q}}{L} - \frac{R}{L} I_q - \omega I_d \quad (6.14)$$

Yapılan analizlerde d-ekseni ve q-ekseni denklem modelleri arasında bir eşleşme mevcuttur.

$$L \frac{dI_d}{dt} = V_d - V_{c,d} - R I_d + \omega L I_q \quad (6.15)$$

$$L \frac{dI_q}{dt} = V_q - V_{c,q} - R I_q - \omega L I_d \quad (6.16)$$

6.15 ve 6.16 Eşitlikleri sırasıyla 6.12 ve 6.14 Eşitliklerinden elde edilmiştir. 6.15 ve 6.16 Eşitlikleri her devre elemanının arasındaki ilişkiyi sağlıyor. Ayrıca d ve q eksenlerinin birbirleriyle ilişkisinin nasıl yansıdığını gösteriyor (Xia, 2012).

Basitleştirilmiş eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$V_{s,d} = V_{c,d}, V_{s,q} = V_{c,q} \text{ ise;}$$

$$V_d = V_{Ld} - \omega LI_q + V_{s,d} \quad (6.17)$$

$$V_q = V_{Lq} + \omega LI_d + V_{s,q} \quad (6.18)$$

$$V_{Ld} = L \frac{dI_d}{dt} + RI_d \quad (6.19)$$

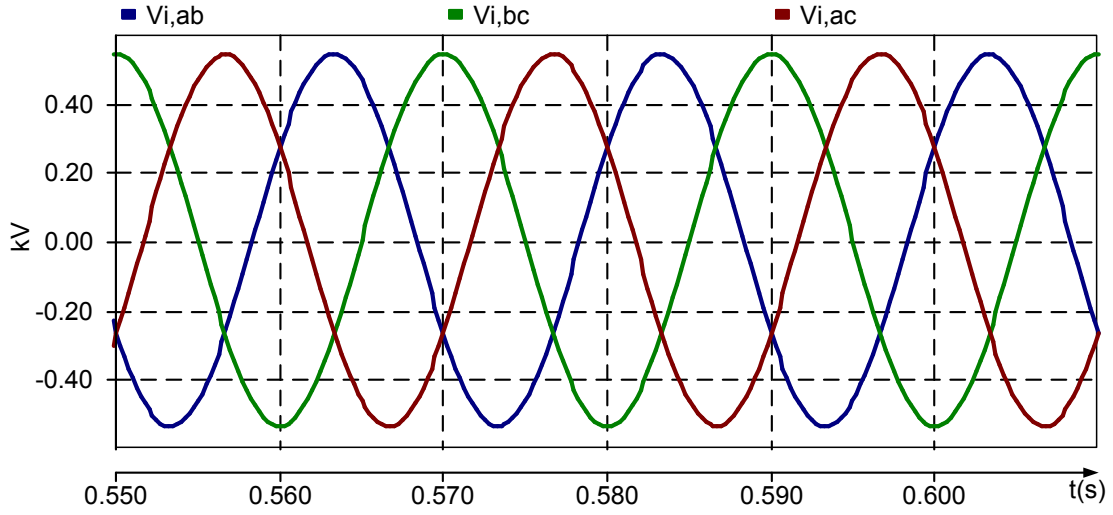
$$V_{Lq} = L \frac{dI_q}{dt} + RI_q \quad (6.20)$$

R çok küçük olduğundan analiz yapılırken ihmal edilebilir.

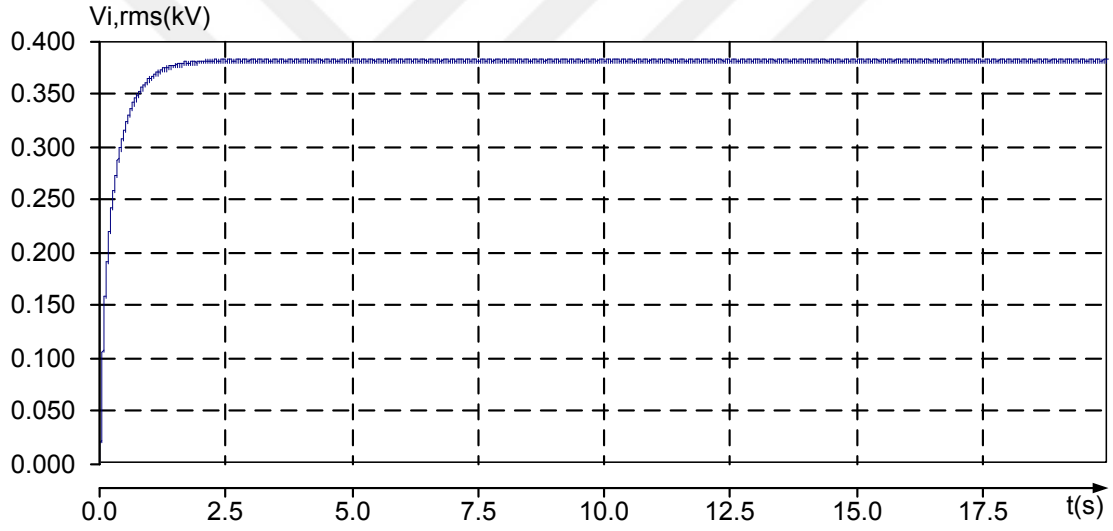
Şekil 6.4.'de verilen üç fazlı VSI'nin PI kontrollü senkron düzlem kontrol tasarımı aşağıda verilmiştir. DÜ sisteminin ve filtrenin bazı parametreleri Çizelge 6.1.'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Şebekeye bağlı evirici sisteminde kullanılan parametrelerin değerleri

Parametre	Değer
R	0.005 Ω
L	0.5 [mH]
C	16 [μ F]
Yük miktarları	0.3 MW, 0.5 MW, 0.6 MW, 0.7 MW
DA bara gerilimi	800 V
Şebeke gerilimi	380 V faz-faz rms

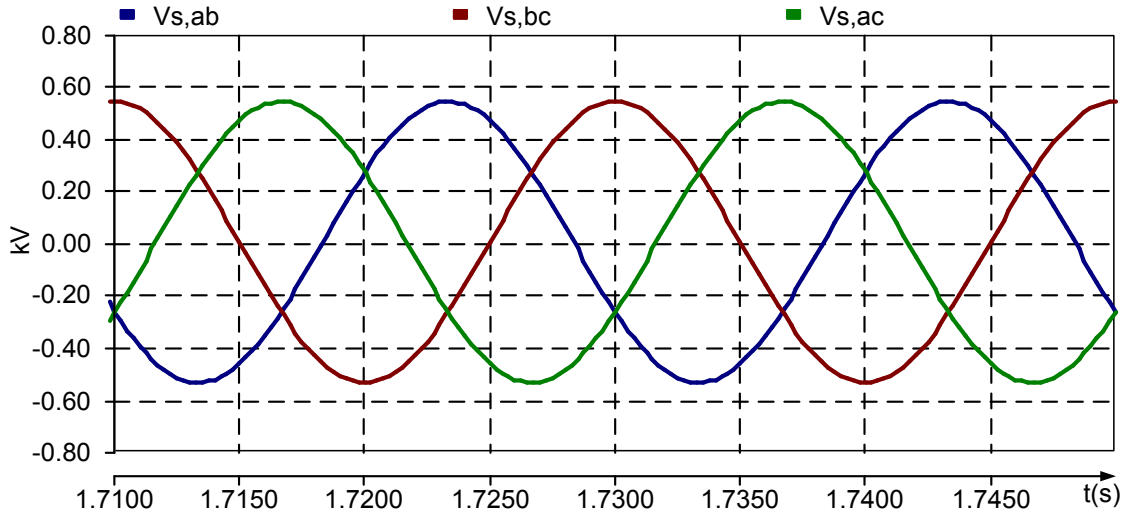


Şekil 6.5. Evirici faz-faz çıkış gerilimi.

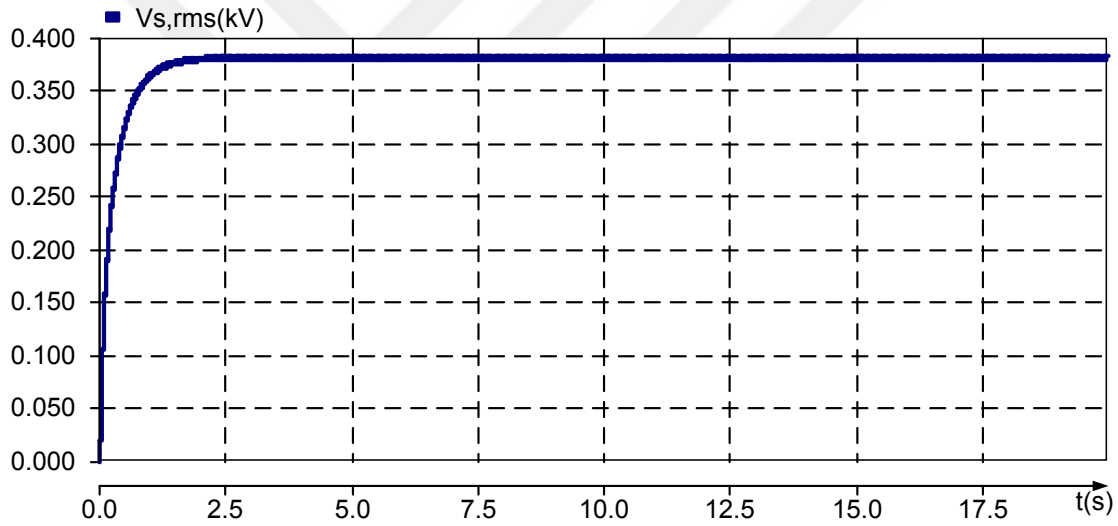


Şekil 6.6. Evirici faz-faz çıkış rms gerilimi.

Şekil 6.7. ve Şekil 6.8.'de verilen grafiklerde şebekeye sistemi aynı şekilde üç fazlı evirici sistemine paralel bağlı olduğundan dolayı faz-faz çıkış gerilimi 538 V'tur ve faz-faz çıkış rms gerilimi 380 V'tur.

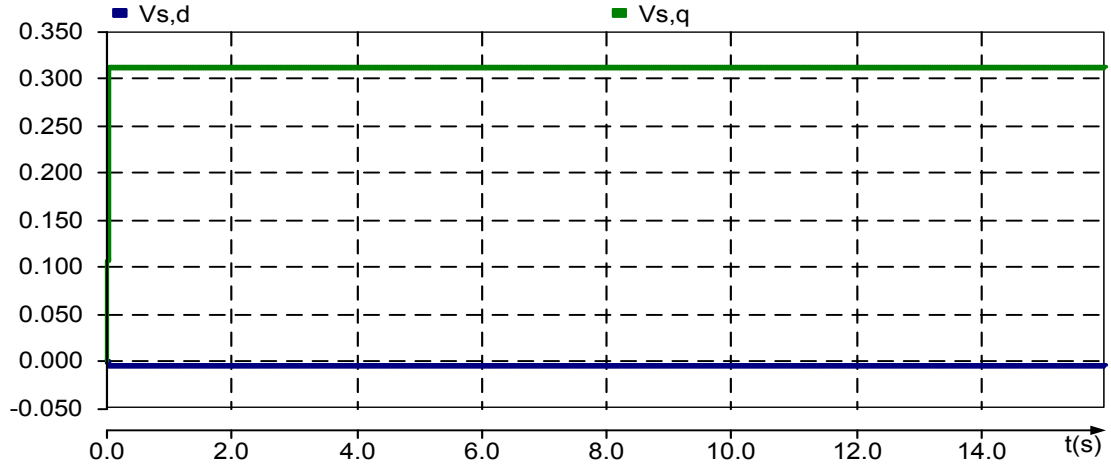


Şekil 6.7. Şebeke faz-faz çıkış gerilimi.

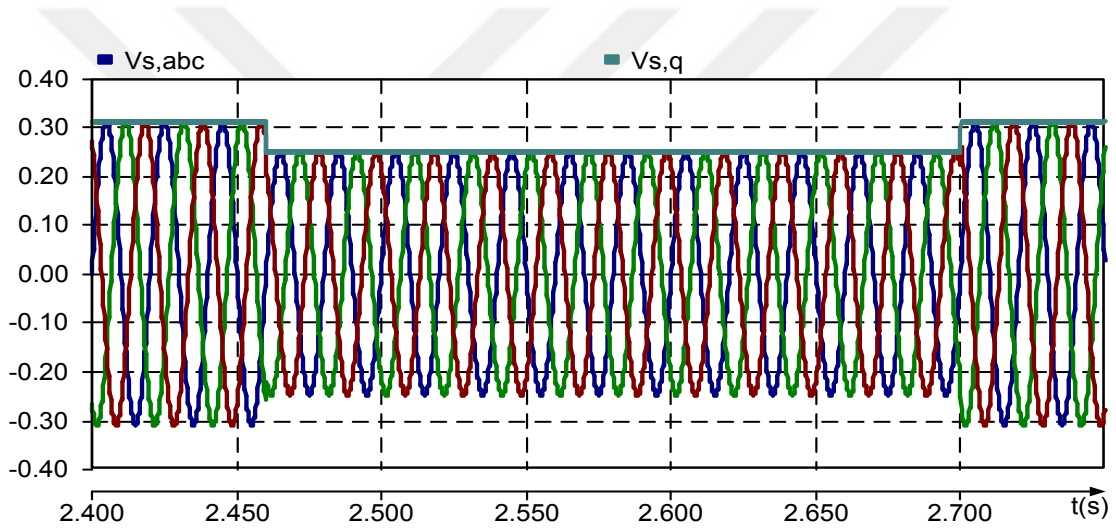


Şekil 6.8. Şebeke faz-faz çıkış rms gerilimi.

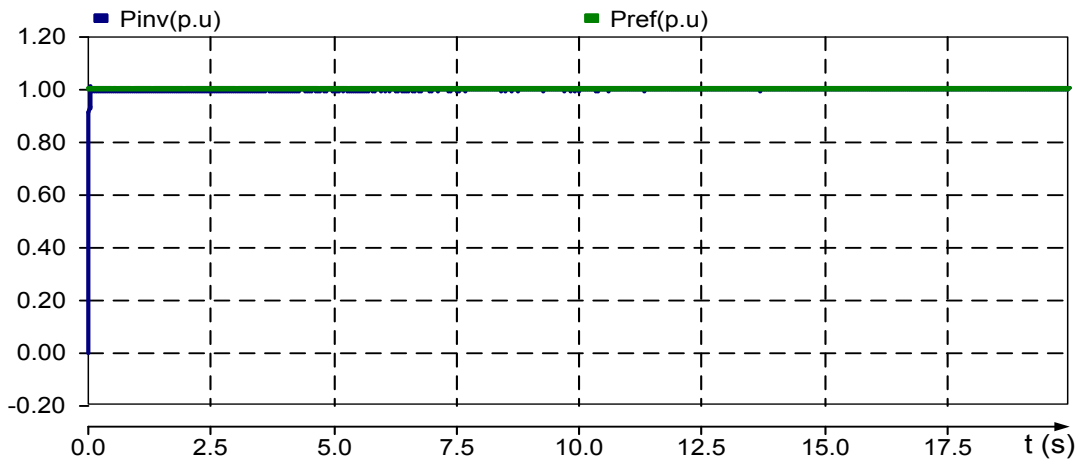
Şekil 6.9'da görüldüğü üzere sistemin ortogonal gerilimler elde edilerek ve PLL tekniği yapısı sayesinde şebeke ve eviricinin faz ve genlikleri eşitlenmiştir. Senkron referans düzlem (SRF) PLL çıkışlarından park dönüşümü yapılarak oluşturulan $V_{s,q}$ ortogonal sinyali şebeke geriliminde 2.46-2.7s arasında %20 gerilim düşümü olduğunda şebeke ($V_{s,abc}$) faz genliğini takip eden grafik Şekil 6.10'da verilmiştir. Şekil 6.11'de seçilen referans güce (P_{ref}) göre eviriciden çekilen güç miktarını ayarlanabilir.



Şekil 6.9. $V_{s,d}$ ve $V_{s,q}$ ortogonal gerilimleri.

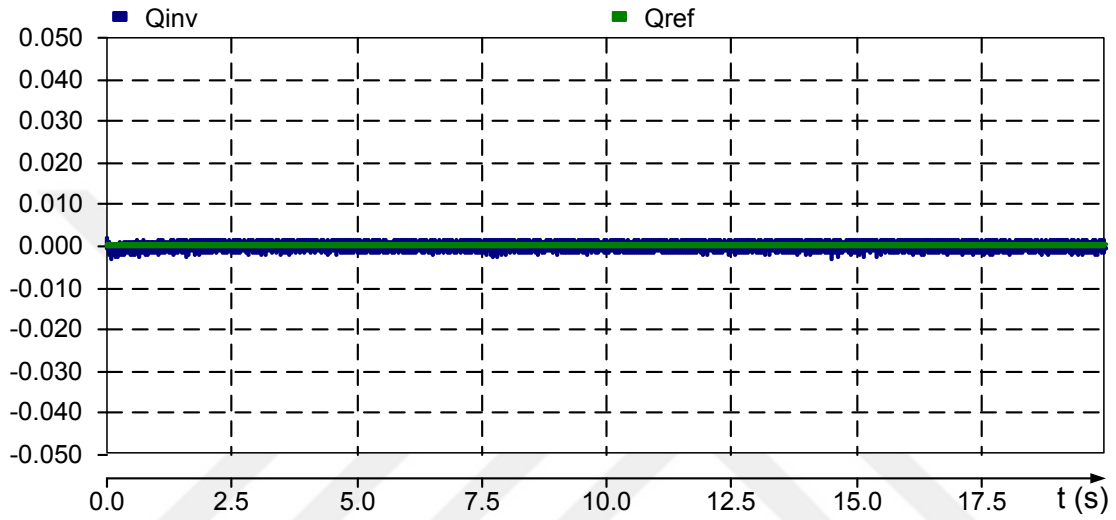


Şekil 6.10. Şebeke ($V_{s,abc}$) ve ortogonal ($V_{s,q}$) gerilimleri.

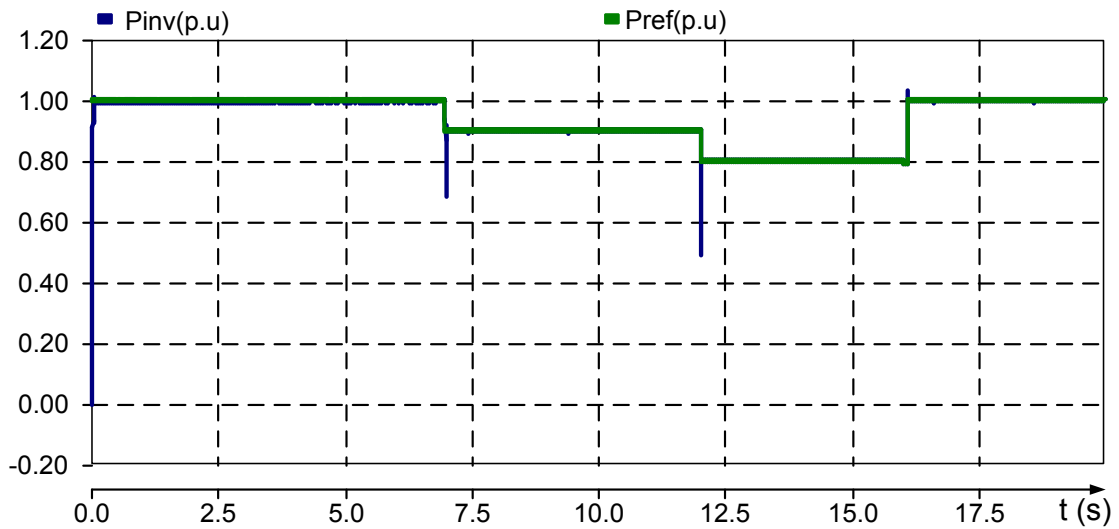


Şekil 6.11. Evirici ve referans aktif güçler.

Güç faktörünü 1'e çekebilmek için Şekil 6.12.'de verilen grafikte evirici reaktif gücü referans güce göre alınıp sıfıra çekilmiştir. Evirici çıkışındaki aktif gücü de istediğimiz referans güce çekebiliriz. Şekil 6.13.'te görüldüğü gibi yaklaşık 7s ve 12s'lerde referans gücü düşürdüğümüzde evirici çıkış gücünün de ona göre düştüğünü görüyoruz. 17s'de tekrar maksimum referans gücü çektiğimizde aynı şekilde evirici çıkış gücünün de yükseldiğini görüyoruz.



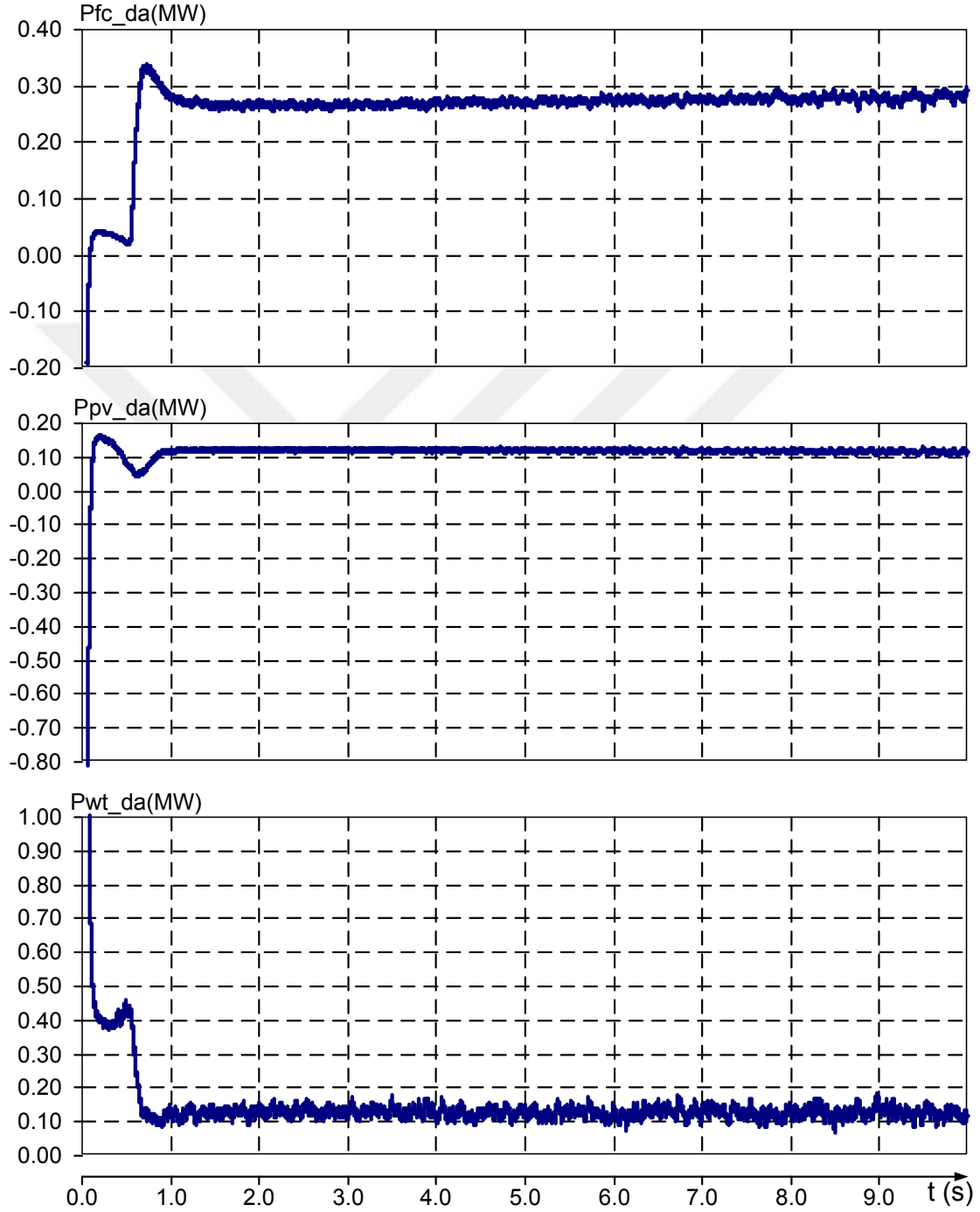
Şekil 6.12. Evirici ve referans reaktif güçler.



Şekil 6.13. Evirici aktif gücün ve referans güce göre değişimi.

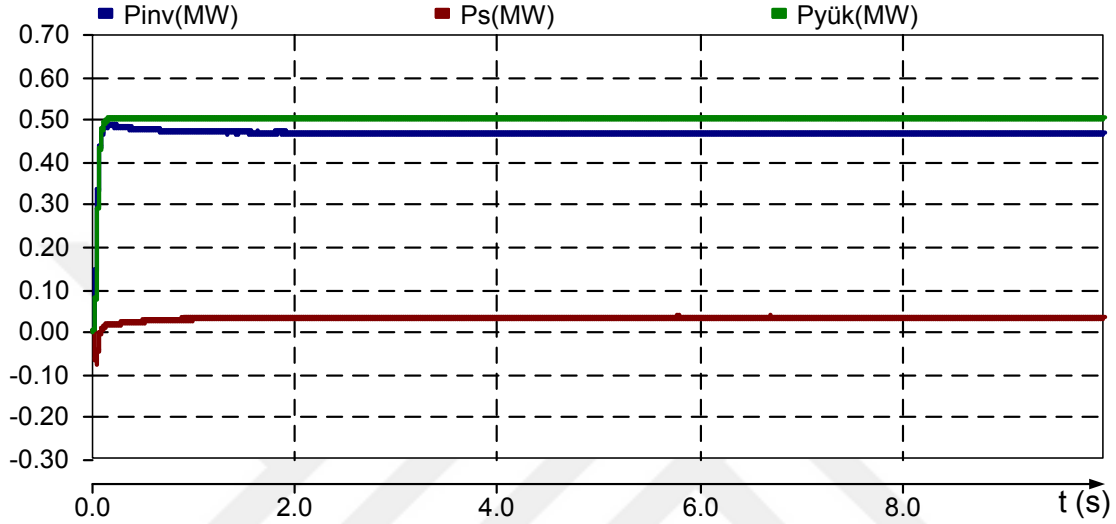
Yakıt hücresi, güneş hücresi ve rüzgar türbini sistemleri ortak DA baraya bağlanarak eviriciyi beslemektedir. Şekil 6.14.'deki güç grafiklerinde verildiği gibi

ortak DA baradan alınan yakıt hücresi sisteminden alınan çıkış gücü 280 kW, güneş hücresinden 120 kW ve rüzgar türbininden yaklaşık elde edilen güç 120 kW değerindedir.

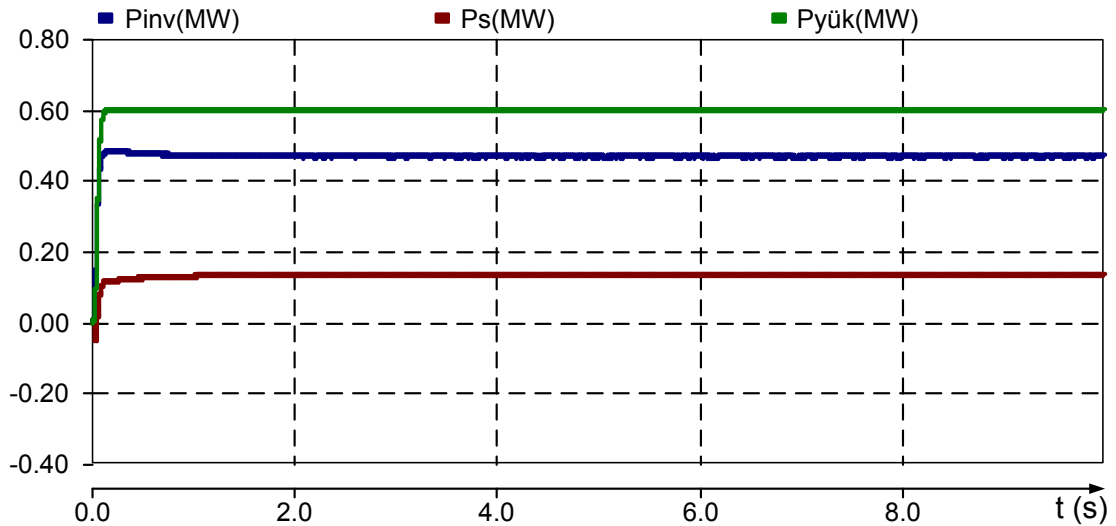


Şekil 6.14. Ortak DA baraya bağlanan yakıt hücresi, güneş hücresi ve rüzgar türbini enerjilerinin aktif güçleri.

Yakıt hücresi, güneş hücresi ve rüzgar türbini sistemleri birlikte devreye alınarak yükü beslemektedirler. Şekil 6.15. ve Şekil 6.16.'deki güç grafiklerine bakıldığında yükün çektiği toplam güç eviriciden ve şebekeden çekilen toplam gücünün toplamıdır. Yük artırıldığında evirici yaklaşık güç sabit 480 kW değerinde güç verirken geri kalan güç miktarı artırılan yükün gücüne göre şebekeden çekilmektedir.

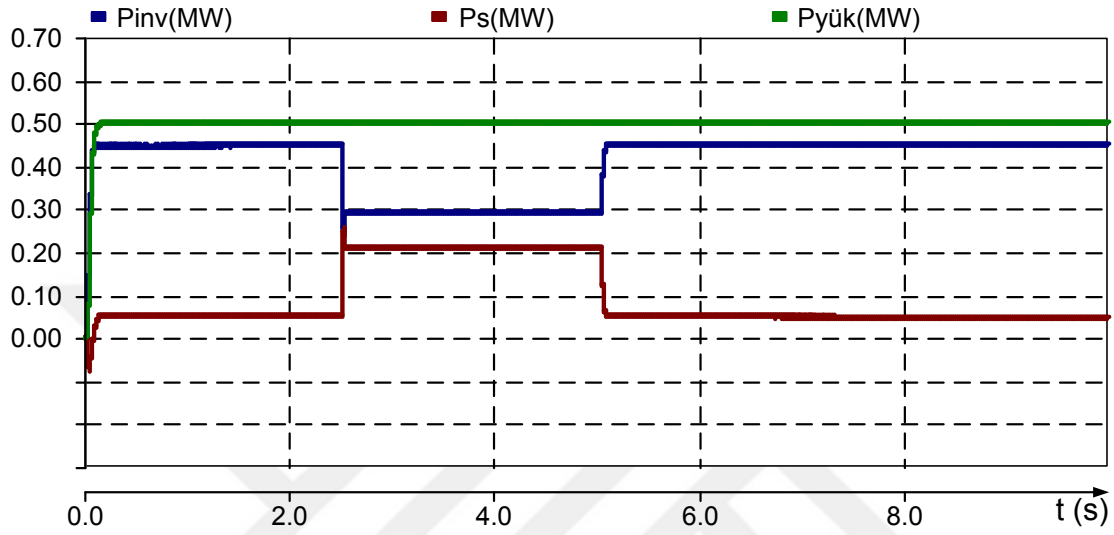


Şekil 6.15. 0.5 MW yük altında yakıt hücresi, güneş hücresi ve rüzgar enerjilerinin birlikte devreye alınmasıyla eviriciden elde edilen çıkış aktif güçleri ile şebeke ve yükün aktif gücü.



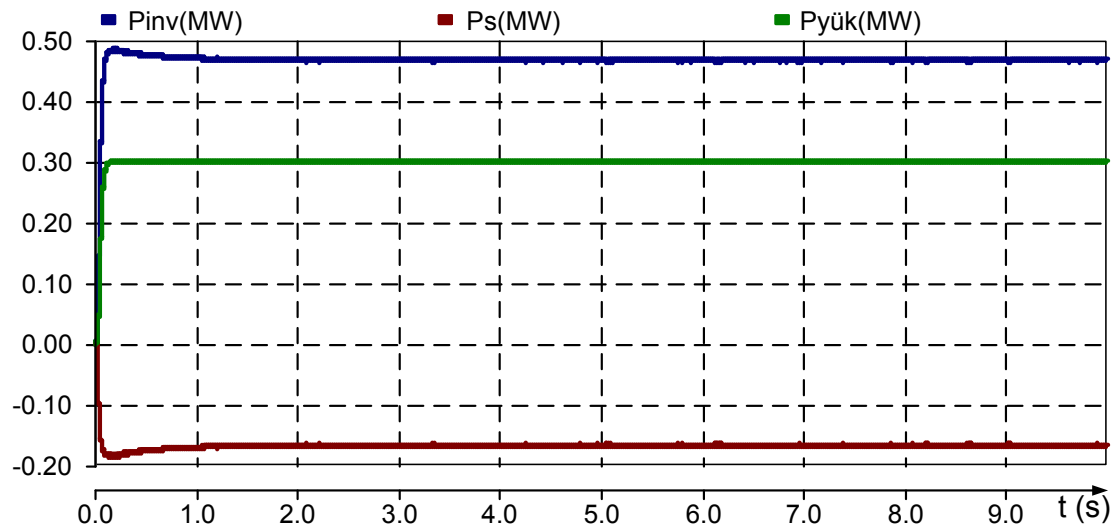
Şekil 6.16. 0.6 MW yük altında yakıt hücresi, güneş hücresi ve rüzgar enerjilerinin birlikte devreye alınmasıyla eviriciden elde edilen çıkış aktif güçleri ile şebeke ve yükün aktif gücü

Şekil 6.17.'de verilen grafikte 2.5-5s aralarında evirici çıkış gücünü referans güce göre ayarlayarak azaltılmıştır. İlk durumda 0.5 MW'lık yük beslemesi için yaklaşık 0.3 MW gücünde eviriciden geri kalanı ise şebekeden sağlanmıştır. Ancak evirici gücü azaltıldıktan sonra yük beslemesi için şebeke gücü artırılmıştır.



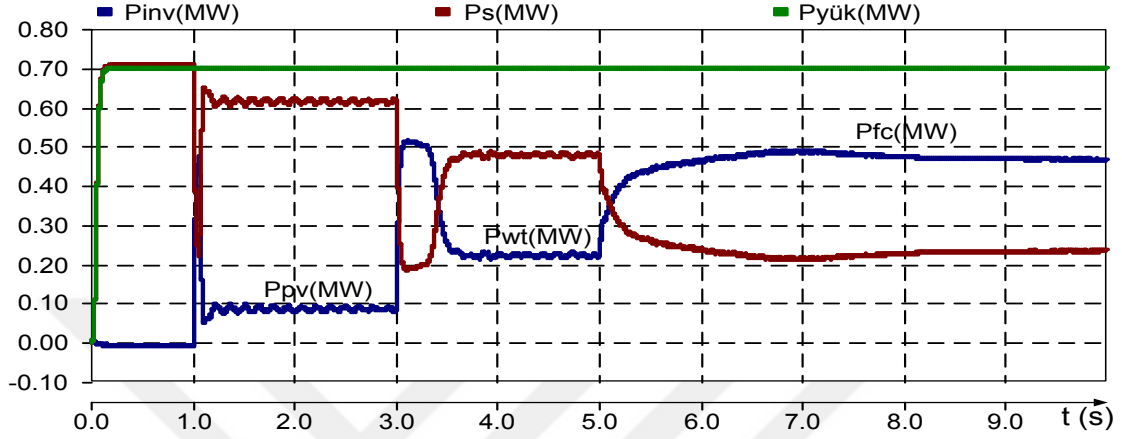
Şekil 6.17. Sabit yük altından evirici ve şebeke güç değişimleri.

Şekil 6.18.'de verilen grafikte evirici elde edilen çıkış gücü yaklaşık 0.47 MW'tır. Bu güç 0.3 MW'lık yük için fazladır. Bu yüzden gücün geri kalanının şebekeye iletmektedir.



Şekil 6.18. Eviricinin çıkış gücüne göre yük ve şebeke güçleri.

Şekil 6.19.'da verilen grafikte 1s'ye kadar kesici açık iken yük sadece şebeke tarafından beslenmektedir. 1-3s'leri arasında sadece devreye güneş hücresi, 3-5s'leri arasında güneş hücresi ile birlikte rüzgar türbini ve 5s'den sonra güneş hücresi, rüzgar türbini ve yakıt hücresi devreye alınarak yük beslenmiştir.



Şekil 6.19. Yakıt hücresi, güneş hücresi ve rüzgar enerjilerinin ayrı ayrı devreye alınmasıyla eviriciden elde edilen çıkış aktif güçleri ile şebeke ve yükün aktif gücü.

7. TARTIŞMA VE SONUÇ

DÜ sistemleri denildiğinde, genellikle yenilenebilir enerji kaynaklarıyla yerel olarak enerji üretimi yapılarak kullanılması anlaşılmaktadır. Bununla beraber DÜ'ler, çok geniş bir alana sahiptir; güneş hücresi, rüzgar türbinleri, yakıt hücresi gibi hızlı gelişen teknolojiler DÜ sistemine güç elektroniği devre elemanları üzerinden bağlandığı gibi, küçük güçlü hidroelektrik ya da doğalgaz üretim kaynakları doğrudan bağlanmaktadır.

Son yıllarda elektrik enerjisine olan talebin artması sonucu; kömür, su, gaz ve petrol gibi kaynaklardan elde edilen geleneksel enerji çeşitlerine alternatif olarak şebekeye bağlı ya da şebekeden bağımsız güneş hücresi, yakıt hücresi, rüzgar türbini, mikro türbin ve gaz türbini gibi DÜ sistemleri olarak kabul edilen enerji kaynaklarının önemi artmaktadır. DÜ sistemlerinin yaygınlaşması, fosil yakıtların kullanımının azaltılması yanında, sera gazı emisyonunun azaltılması, düşük gürültü seviyesi, yüksek verimlilik, şebekenin güvenilirliği, sürdürülebilirliği ve güç kalitesi açısından büyük katkılar sağlamaktadır. DÜ sistemleri, elektrik şebekelerinde iletim şebekesinin daha az yüklenmesi, iletim ve dağıtım sistemi kayıplarının azaltılması, güvenilirlik, güç kalitesinin artması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artması gibi çok önemli katkılar sağlamaktadır. Ancak yenilenebilir enerji kaynağı tabanlı DÜ sistemleri şebekeye bağlandığı durumlarda beraberinde bazı sorunlar da getirmektedir. DÜ sisteminin şebeke entegrasyonunun sonucu değişen enerji yapısında, yük akışı, kısa devre ve koruma koordinasyonu yapısında değişme söz konusu olmaktadır. Bu değişim miktarının yüksek olması, enerji sisteminde ciddi gerilim, frekans ve güç dalgalanmaları oluşturabilmektedir. Bu problemler, güç faktörü, konum ve DÜ sisteminin özelliğine bağlı olarak değişebilir.

İletim sistemlerinde gerçekleştirilen entegrasyonlarda daha çok frekans ve gerilim senkronizasyonuna bakılır. Bu çalışmada, enerji kaynaklarını sisteme entegre eden ortak evirici ile şebekenin senkronizasyonu için üç fazlı PLL kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında; yakıt hücresinin dinamik modellenmesi yapılarak DA yük altında karakteristiği incelenmiştir. Aynı şekilde güneş hücresinin dinamik modellenmesi yapılarak PV modülü oluşturulup çevresel koşulların PV hücresinin I-V ve P-V

karakteristiği üzerinde etkileri incelenmiştir ve ayrıca MPPT kontrolcünün dinamik modeli oluşturularak, yukselten dönüştürücünün kontrolü sağlanmıştır. Rüzgar türbinin de gç modellemesi yapılıp PMSG'ye bağlanarak modellenmesi yapılmıştır. Yukarıda bahsedilen D enerji kaynaklarının (yakıt hcreesi, güneş hcreesi, rüzgar) modellenmesi yapılıp analiz edildikten sonra ortak bir DA baraya bağlanarak, tek bir üç fazlı kontrollü evirici ile şebekeye bağlanmıştır. Evirici ile şebeke arasındaki gç kontrolü için abc/dq senkron düzlem kontrol yöntemi ile gç kontrolü yapılmıştır. Gerilim genliği ve frekansı PLL ile düzenlenerek şebeke ile senkronizasyon sağlanmıştır.

Tasarlanan ve benzetim modeli oluşturulan tüm D+şebeke+Yük sisteminde çeşitli senaryolar için benzetim sonuçları alınmıştır. Yükün, ortam şartlarının ve D sisteminin vereceği referans gücün değişimine göre sistem incelenmiştir. Sonuçlar uygulanan kontrol yöntemlerinin ve tasarım parametrelerinin başarılı olduğunu göstermiştir.

8. KAYNAKLAR

- Akkinapragada, N., 2007. *Dynamic Modeling and Simulations of Solid Oxide Fuel Cells for Grid-Tied Applications* (yüksek lisans tezi, basılmamış). MU, Faculty of The Graduate School of The University of Missouri-Rolla, Missouri, ABD.
- Akkinapragada, N., Chowdhury, B.H., 2006. SOFC-based fuel cells for load following stationary applications, *Power Symposium*, 17-19 September, Carbondale, IL. 553-560.
- Anonim, 2012. Rüzgar Türbinleri Neden 3 Kanatlıdır. <http://www.elektrikport.com>. Erişim tarihi: 10.03.2015.
- Bahçeci, S., 2012. *Şebekeye Bağlı Yakıt Hücresinin Elektriksel Davranışının ve Kontrolünün İncelenmesi*, (yüksek lisans tezi, basılmış). EÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Bahçeci, S., Fedakar, S., Yalçınöz, T., 2012. PSCAD yazılımı kullanarak PEM yakıt hücresinin modelinin ve benzetiminin gerçekleştirilmesi, *ELECO*, 29 Kasım - 01 Aralık 2012, Bursa. 167-170.
- Barchowsky, A., Parvin, J.P., Reed, G.F., Korytowski, M.J., Grainger, B.M., 2012. A comparative study of MPPT methods for distributed photovoltaic generation, *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 16-20 January, Washington, 1-7.
- Bassi, H.S., 2013. *Design and Modeling of Centralized Distribution Network for the DC House Project* (yüksek lisans tezi, basılmamış). FCPU, San Luis Obispo.
- Bocaletti, C., Dun, G., Fabbri, G., Santini, E., 2006. simulation models of fuel cell systems, *National Science Foundation*, 283.
- Bonkougou, D., Koalaga, Z., Njomo, D., 2013. Modelling and simulation of photovoltaic module considering single-diode equivalent circuit model in MATLAB, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, **3**: 493-502.
- Bouneb, B., Grant, D. M., Cruden, A., McDonald, J. R., 2005. Grid connected inverter suitable for economic residential fuel cell operation, *Power Electronics and Applications*, 11-14 September, Dresden, 1-10.

- Çakal, G., 2012. *Dağıtılmış Üretim'e Sahip Elektrik Dağıtım Sistemlerinde, Arıza Akımı Sınırlayıcılarının ve Yerleşim Yerlerinin Etkilerinin İncelenmesi* (yüksek lisans tezi, basılmış). İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Demirtaş, M., Sefa, İ., Irmak, E., Çolak, İ., 2008. Güneş enerjili sistemler için mikrodenetleyici tabanlı DA/DA yükselten dönüştürücü, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, **23**: 719-728.
- El Safty, A.S., Abd El Geliel, B.M., Ammar, C.M., 2010. Distributed generation stability during fault conditions, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO)*, 23-25 March, Granada, Spain.
- El-Sharkh, M.Y., Rahman, A., Alam, M.S., Byrne, P.C., Sakla, A.A., Thomas T., 2004. A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications, *Journal of Power Sources*, 199-204.
- Fedakar, S., Bahceci, S., Yalcinoz, T., 2013. Modeling and simulation of SOFC using PSCAD. *EuroCon*, 1-4 July, Zagreb, Croatia. 1058-1065.
- Fedakar, S., 2012. *Experimental and Simulation Studies of A Grid Connected Solid Oxide Fuel Cell* (yüksek lisans tezi, basılmamış). MÜ, Institute of Sciences and Engineering, Kayseri.
- Gözel, T., 2009. *Dağıtım Sistemlerine Yerel Elektrik Santrallerinin Yerleştirilmesi* (doktora tezi basılmış). GYTE, Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, Kocaeli.
- Han, S.G., Yua, I.K., Park, M., 2007. PSCAD/EMTDC-based simulation of wind power generation system, *Renewable Energy*, **32**: 105-117.
- Hussein, K.H., Muta, I., Hoshino, T., Osakada, M., 1995. Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric condition, *IEE Proc.-Generation, Transmission and Distribution*, **142**: 59-64.
- İşcan, S., Demirbaş, Ş., 2011. Rüzgar türbin laboratuvarı: daimi mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbini modellenmesi ve simülasyonu, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 16-18 May, Elazığ, Turkey, 341-346.
- Jeong, J.K., Lee, J.H., Han, B.M., Cha, H.J., 2011. Grid-tied power conditioning system for fuel cell composed of three-phase current-fed DC-DC converter and PWM inverter, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, **6** (2): 255-262.

- Ke-ping, Z., Dao-zhuo, J., Yang, Z., 2012. Study on simulation of distribution generation based on PSCAD/EMTDC. *2012 Third International Conference on Digital Manufacturing & Automation*, 31 July - 2 August, Guilin, China. 836-839.
- Kalbat, A., 2013. PSCAD Simulation of grid-tied photovoltaic systems and total harmonic distortion analysis, *Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)*, 2-4 October, İstanbul, 1-6.
- Kim, S.K., Jeon, J.H., Cho, C.H., Kim, E.S., Ahn, J.B., 2008. Modeling and simulation of a grid-connected PV generation system for electromagnetic transient analysis, *Solar Energy*, **83**: 664-678.
- Kim, S.K., Kim, E.S., Yoon, J.Y., Kim, H.Y., 2004. PSCAD/EMTDC based dynamic modeling and analysis of a variable speed wind turbine, *Power Engineering Society General Meeting*, 10 June, Denver, 1735-1741.
- Kumar, R., Muralidharan, R., 2014. Mathematical modeling, simulation and validation of photovoltaic cells, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, **3**: 170-174.
- Kumar, S., Sehgal, S., Bhosle, S., 2013. Voltage and frequency control of SEIG in small wind power plant using VFC, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, **2**: 4098-4106.
- Laili, M.S., Zakaria, Z.N., Halim, N.H., Ibrahim, P., 2012. Modelling and simulation of microturbine for a distribution system network with hybrid filter. *International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2012)*, 6-7 June, Melaka, Malaysia. 204-208.
- Luckose, L., Urlaub, N.J., Wiedeback, N.J., Hess, H.L., Johnson B.K., 2011. Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) modeling in PSCAD/EMTDC, *Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, 3-5 October, Winnipeg, 11-16.
- Mahmood, H. 2014. *Power Management Strategies For Islanded Microgrids*, (doktora tezi, basılmamış). WOU, Electrical and Computer Engineering, London, Ontario, Kanada.
- M. Becherif, M., D. Hissel, D., 2010. MPPT of a PEMFC based on air supply control of the motocompressor group, *International Journal of Hydrogen Energy*, **35** (22): 12521-12530.

- Mikkili, S., Panda, A.K., 2011. SHAF for mitigation of current harmonics using p-q method with PI and fuzzy controllers. *ETASR Engineering, Technology & Applied Science Research*, **1** (4): 98-104.
- Mu, P., Zhao, D., 2013. Simulation study of three types of distributed power based on EMTDC. *Energy and Power Engineering*, **5**: 41-45.
- Nandurkar, S.R., Rajeev, M., 2012. Design and simulation of three phase inverter for grid photovoltaic systems, *Proceedings of Third Biennial National Conference*, 24-25 February, 80-83.
- Nandi, C., Chakraborty, A. K., 2012. Wind power plants with VSC based STATCOM in PSCAD/EMTDC environment, *International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)*, **56**: 7-11.
- Nehrir, M. H., Wang, C., 2008. *Modeling and Control of Fuel Cells, Distributed Generation Applications*, (JohnWiley) USA, 296.
- Ned Mohan, T.M. Undeland, W.P.Robbins, 2003. *Power Electronics, Converters Applications and Design*, Wiley, Hoboken NJ.
- Ngema, S.N., Saha, A.K. , Ijumba, N.M., 2010. Power converter for proton exchange membrane fuel cell, *Power System Technology (POWERCON)*, 24-28 October, Hangzhou, 1-6.
- Nuroğlu, F. M., 2011. *Dağıtılmış Üretim İçeren Dağıtım Şebekelerinde Merkezi Koordinasyon Rölesi Tasarımı İncelenmesi* (doktora tezi, basılmamış). KÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Özdemir, E., Özdemir, Ş., 2008. Güneş pilleri ile dağıtılmış elektrik üretim sistemlerindeki gelişmeler, *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu (UTES'2008)*, 17-19 Aralık, İstanbul, Türkiye, 395-404.
- Prakash, S.L., Jesudaiyan, A.S., Arutchelvi, M., 2014. Dynamic simulation of grid tied PV-inverter under distorted grid voltage, *International Journal Of Innovative Research In Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, **2**: 1926-1932.
- Pregelj, A., 2003. *Impact of Distributed Generation on Power Network Operation*, (doktora tezi, basılmamış).GIT, School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology, Georgia.

- Rajapakse, A.D., Muthumuni, D., 2009. Simulation tools for photovoltaic system grid integration studies, *Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*, 22-23 October, Montreal, 1-5.
- Rahman, S.A., Varma, R.K., 2011. PSCAD/EMTDC model of a 3-phase grid connected photovoltaic solar system, *North American Power Symposium (NAPS)*, 4-6 August, Boston, 1-7.
- Rahman, S.A., 2012. *Novel Controls of Photovoltaic (PV) Solar Farms* (yüksek lisans tezi, basılmamış). WU, Graduate Program in Electrical and Computer Engineering, London, Ontario, Canada.
- Ranjan, R., Kumar, P., Gupta, A., Pachauri, R., Chauhan, Y.K., 2015. Modeling and analysis of solid oxide fuel cell based H₂ generator for distribution generation, *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET)*, *National Conference on Renewable Energy and Environment (NCREE)*, **2**: 272-277.
- Rashid, M.H., 2013. *Yenilenebilir Enerjiye Giriş, 16. Güç Elektroniği Yarıiletken Elemanları, Devreler ve Uygulamaları* (S. Sünter, M. T. Aydemir). Nobel kitap, Türkiye. 1014.
- Salam, A.A., Hannan, M.A., Mohamed, A., 2008. Dynamic modeling and simulation of solid oxide fuel cell system, *2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08)*, 1-3 December, Johor Baharu, Malaysia.
- Salam, A.A., Mohamed, A., Hannan, M.A., 2009. Improved control strategy for fuel cell and photovoltaic inverters in a microgrid, *Wseas Transactions On Power Systems*, **10** (4): 331-340.
- Sinha, K., Tapre, P.C., 2014. Impact of ramp and gust in wind farm distributed generation using power system stabilizer in PSCAD simulation. *2014 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science*, 1-2 March, Bhopal, India.
- Salam, A.A., Mohamed, A., Hannan, M.A., Shareef, H., 2009. A 50kW PEM fuel cell inverter-based distributed generation system for grid connected and islanding operation, *TENCON 2009*, 23-26 January, Singapore. 1-5.

- Stallon, S.D., Kumar, K.V., Kumar, S.S., Baby, J., 2013. Simulation of high step-up DC–DC converter for photovoltaic module application using MATLAB/SIMULINK, *I.J. Intelligent Systems and Applications*, 72-82.
- Syahputra, R., Robandi, I., Ashari, M., 2014. Performance analysis of wind turbine as a distributed generation unit in distribution system, *International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT)*, **6**: 39-56.
- Şahin, M.E., Okumuş, H.İ., 2013. Güneş pili modülünün Matlab/Simulink ile modellenmesi ve simülasyonu, *EMO Bilimsel Dergi*, **5**: 17-25.
- Urganlı, F., 2012. *Dağıtılmış Enerji Üretiminin Elektrik Şebekelerine Etkisi ve Analizi* (yüksek lisans tezi, basılmamış). EÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bornova, İzmir.
- Verma, P., Jaiswal, N., Gupta, P., 2013. PSCAD modelling and simulation of DFIG and PMSG based WECS, *International Conference on Electrical, Electronics & Computer Science Engineering*, 26 May, New Delhi, 43-48.
- Vijayakumar, A., Nair, V.M., 2013. Control of fuel cell based distribution generation system, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, **2** (1): 242-251.
- Xia, Q., 2012. *Solar Photovoltaic System Modeling And Control*, (yüksek lisans tezi, basılmamış). DU, The Faculty of Engineering and Computer Science, Denver.

ÖZGEÇMİŞ

Doğan ÇELİK 1987 yılında Van'ın Erciş ilçesine bağlı Derimevi Köyünde doğdu. İlköğretimini Derimevi Köyünde tamamladı. Ortaöğretimini 2000 yılında Erciş Erkek YİBO'da tamamladıktan sonra aynı yıl içinde Erciş Sevim K r m Anadolu Lisesi'ni kazandı. 2008 yılında Çukurova  niversitesi'nde Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünü (İngilizce) okumaya hak kazandı ve 2013 yılında lisans eğitimini tamamladı. 2014 yılında Yüzüncü Yıl  niversitesi'ne Araştırma Görevlisi olarak atandı. Doğan ÇELİK halen aynı  niversitede Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

