



**FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİNİN
MODELLENMESİ VE ŞEBEKEYE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gülşah KÜÇÜKİLHAN

DANIŞMAN

Doç. Dr. Yüksel OĞUZ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Haziran 2017

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİNİN
MODELLENMESİ VE ŞEBEKEYE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Gülşah KÜÇÜKİLMAN

DANIŞMAN

Doç. Dr. Yüksel OĞUZ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Haziran 2017

TEZ ONAY SAYFASI

Gülşah KÜÇÜKİLHAN tarafından hazırlanan “Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Model-
lenmesi ve Şebekeye Etkilerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve
öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 20/06/2017 tarihinde aşağıdaki jüri
tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-
Elektronik Mühendisliği **Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul
edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Yüksel OĞUZ

İmza

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Süreyya KOCABEY
Kırklareli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Yüksel OĞUZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji
Fakültesi

Üye : Yrd. Doç. Dr. İsmail KOYUNCU
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji
Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hüseyin ENGİNAR
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

20/06/2017

Gülşah KÜÇÜKİLHAN

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

**FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ VE ŞEBEKEYE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Gülşah KÜÇÜKİLHAN
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Yüksel OĞUZ

Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlerin kullanımı her geçen gün artmakta olup bu artış, ilgilileri fotovoltaik sistemler ve şebekeye etkileri üzerine detaylı araştırmalara yöneltmektedir. Bu araştırmalar ile fotovoltaik sistemlerden kaynaklanan çeşitli sorunların azaltılması, performans analizinin yapılması ve enerji kalitesinin artırılması hedeflenmiştir. Günümüzde ise şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler üzerine yapılan araştırmalar halen devam etmektedir.

Bu tez çalışmasında, fotovoltaik sistem ile şebeke arasındaki senkronizasyon sürecini ve fotovoltaik sistemdeki inverterden kaynaklanan harmoniklerin etkisini gözlemleyebilmek için MATLAB/Simulink ortamında şebekeye bağlı bir fotovoltaik sistem modellenmiştir. Simülasyon ortamında yapılan bu çalışmayla, şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin daha verimli bir şekilde çalışması, harmoniklerin en aza indirilmesi ve fotovoltaik sistem ile şebekenin bir arada çalışma sürecinin simülasyon ortamında gösterilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmanın birinci bölümünde şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlere ait özet bilgiler verildikten sonra daha önce yapılmış olan çalışmalar ve tezin kapsamı hakkında kısaca

bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde; fotovoltaik sistemlerle ilgili daha önceden yapılmış çalışmalar hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Ayrıca güneş pilleri, fotovoltaik sistem, güç kalitesi ve harmonikler hakkında genel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde; şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin her bir elemanı MATLAB/Simulink’ te modellenmiş ve elemanlar için gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

Dördüncü bölümde; fotovoltaik sistemin ve şebekenin frekans, faz, gerilim, güç ve harmonik ölçümleri yapılmıştır. Bunun yanında senkronizasyon sürecinde fotovoltaik sistem-şebeke arasındaki gerilim ve frekans dengelenme süreleri, sistem yüksüz iken şebekede meydana gelen gerilim artışları, senkronizasyon sonrasında fotovoltaik sistem, yük ve şebekede ölçülen gerilim, güç, frekans ve faz açısı değerleri ayrı ayrı gösterilmiştir. Beşinci bölümde ise simülasyon sonucunda ortaya çıkan grafiklere ve ölçüm değerlerine göre fotovoltaik sistemin performansı analiz edilmiş, elde edilen sonuçlar genel olarak gözden geçirilerek yorumlanmış ve tartışılmıştır.

2017, xiv + 95 sayfa

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik sistemler, Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler, Harmonikler, Senkronizasyon.

ABSTRACT
M.Sc. Thesis

MODELING OF ON-GRID PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS AND
INVESTIGATION EFFECTS ON THE GRID OF PHOTOVOLTAIC POWER
SYSTEMS

Gülşah KÜÇÜKİLHAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Yüksel OĞUZ

The use of grid-connected photovoltaic systems is increasing day by day and this increase leads to detailed investigations on photovoltaic systems and grid effects. With these researches, it is aimed to reduce various problems arising from photovoltaic systems, to perform performance analysis and to increase energy quality. Today, researches on grid-connected photovoltaic systems are still in progress.

In this thesis study, a grid-connected photovoltaic system was modeled in MATLAB/Simulink to observe the synchronization process between the photovoltaic system and the grid and the effect of the harmonics originating from the inverter in the photovoltaic system. With this work in the simulation environment, it is aimed to operate on-grid photovoltaic system more efficiently, to reduce the harmonics to the minimum and to show the working period of the photovoltaic system and grid together in the simulation environment.

In the first part of the work, brief information about on-grid photovoltaic systems was given, followed by briefly information about the previous studies and the scope of the thesis. In the second chapter; detailed information about previous studies on photovoltaic systems has been given. After, general information about solar batteries, photovoltaic system, power quality and harmonics is given. In the third chapter; Each

member of the on-grid photovoltaic system is modeled in MATLAB/Simulink and necessary calculations are made for the elements.

In the fourth chapter; Frequency, phase, voltage, power and harmonic measurements of the photovoltaic system and the grid. In addition, voltage and frequency stabilization times between the photovoltaic system and the grid in the synchronization process and voltage increases in the grid are shown when there is no load in the system.

The voltage, power, frequency and phase angle values measured in the photovoltaic system, load and grid are shown separately after synchronization. In the fifth chapter; the performance of the photovoltaic system was analyzed according to the graphs and measurement values resulting from the simulation, and the results obtained were interpreted and discussed in general.

2017, xiv + 95 pages

Keywords: Photovoltaic systems, Grid-connected photovoltaic systems, Harmonics, Synchronization.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Yüksel OĞUZ' a, desteklerini eksik etmeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÇAKMAKKAYA' ya ve her konuda önerileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Gülşah KÜÇÜKİLHAN

AFYONKARAHİSAR, 2017

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	5
2.1 Fotovoltaik Sistemler ile İlgili Yapılan Çalışmalar	5
2.2 Güneş Enerjisi.....	8
2.3 Dünyada Güneş Enerjisi Kullanımı	9
2.4 Türkiye’de Güneş Enerjisi Kullanımı.....	10
2.5 Türkiye’de Güneş Enerjisiyle İlgili Yasal Düzenlemeler.....	12
2.6 Güneş Pilleri	13
2.7 Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi	14
2.8 Güneş Pillerinin Yapısı ve Çalışma İlkesi	16
2.9 Güneş Piliinin Elektriksel Eşdeğer Devre Modeli	18
2.10 Güneş Piliinin Karakteristik Akım-Gerilim Eğrisi	19
2.11 Fotovoltaik Hücreden Modül Elde Edilmesi	21
2.12 Fotovoltaik Sistem Çalışma Prensipleri ve Bileşenleri.....	23
2.13 Fotovoltaik Sistem Çeşitleri.....	24
2.13.1 Şebeke Dışı Bağımsız Sistemler	24
2.13.2 Şebekeye Bağlı Sistemler	25
2.13.3 Hibrid Sistemler	26
2.14 Şebekeye Bağlı Sistemlerin Avantajları ve Dezavantajları	26
2.14.1 Şebekeye Bağlı Sistemlerin Avantajları	27
2.14.2 Şebekeye Bağlı Sistemlerin Dezavantajları	27
2.15 Fotovoltaik Enerji Santrallerinin Şebeke ile Senkronizasyonu	28
2.16 Yükseltici Tip DC/DC Dönüştürücü (Boost).....	30
2.16.1 Anahtar İletimdeyken Bobin İçerisinden Geçen Akım.....	31
2.16.2 Anahtar Kesimdeyken Bobin İçerisinden Geçen Akım.....	32

2.17 Şebeke Bağlantılı İnverterler ve Temel Özellikleri	33
2.18 Güç Kalitesi ve Harmonikler	35
2.19 Güç Kalitesi Problemlerinin Genel Olarak Sınıflandırılması	36
2.19.1 Geçici Değişimler (Olaylar).....	37
2.19.1.1 Darbesel Geçici Olaylar	37
2.19.1.2 Salınımsal Geçici Olaylar	38
2.19.2 Uzun Süreli Gerilim Değişimleri	38
2.19.2.1 Aşırı Gerilim	38
2.19.2.2 Düşük Gerilim.....	38
2.19.2.3 Kalıcı Gerilim Kesintisi	39
2.19.3 Kısa Süreli Gerilim Değişimleri	39
2.19.3.1 Kesinti	39
2.19.3.2 Azalmalar-Salınımlar	39
2.19.3.3 Gerilim Yükselmesi	40
2.19.4 Gerilim Dengesizliği	40
2.19.5 Dalga Şekli Bozulması	40
2.19.6 Gerilim Dalgalanmaları	40
2.19.7 Güç Frekansı Değişimleri	41
2.20 Harmonikler.....	41
2.21 Harmonik Üreten Kaynaklar	43
2.22 Harmoniklerin Etkileri.....	43
2.22.1 Transformatörler Üzerindeki Etkileri	44
2.22.2 Döner Elektrik Makineleri Üzerindeki Etkileri	44
2.22.3 Kesici ve Sigortalar Üzerindeki Etkileri.....	44
2.22.4 Kondansatörler Üzerindeki Etkileri.....	45
2.22.5 İletkenler Üzerindeki Etkileri	45
2.22.6 Rezonans Etkisi	46
3. MATERYAL ve METOT	47
3.1 Fotovoltaik Modülün Modellenmesi ve Simülasyonu.....	49
3.2 DC/DC Boost Konverterin Modellenmesi ve Simülasyonu	52
3.2.1 DC/DC Boost Konverterde İndüktör Seçimi.....	54
3.2.2 DC/DC Boost Konverterde Kondansatör Seçimi	55
3.2.3 Pulse Generatörün Modellenmesi ve Simülasyonu	56
3.3 DC/AC Eviricinin Modellenmesi ve Simülasyonu	56
3.4 Voltaj Regülasyonu Sisteminin Modellenmesi ve Simülasyonu.....	57

3.5 LCL Filtrenin Modellenmesi ve Simülasyonu	59
3.6 Yükün Modellenmesi ve Simülasyonu.....	60
3.7 Kesicinin (Breaker) Modellenmesi ve Simülasyonu	60
3.8 400V/34.5kV Yıldız-Üçgen Bağlı Transformatörün Modellenmesi ve Simülasyonu	61
3.9 Hattın Modellenmesi ve Simülasyonu.....	62
3.10 Gerilim Kaynağının Modellenmesi ve Simülasyonu	64
3.11 Ölçüm Bloğunun Modellenmesi ve Simülasyonu	64
3.12 Şebeke Bağlantılı PV Sistemin Modellenmesi ve Simülasyonu	67
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	70
5. SONUÇ.....	81
6. KAYNAKLAR.....	84
6.1 İnternet Kaynakları	88
EKLER	89
EK 1: Fotovoltaik Panelin Etiket Değerlerinin Girildiği ve Modül Oluşturulduğu Uygulama	89
EK 2: Fotovoltaik Modüle Ait Hesaplamalar	90
EK 3: Matlab Ara Yüzüne Transfer Edilen Veriler	91
EK 4: Simülasyonda Kullanılan Elemanların Parametreleri	92
ÖZGEÇMİŞ.....	95

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Amper
AC	Alternatif akım
C	Kapasitans
DC	Doğru akım
DF	Bozulma Faktörü
f	Frekans
FF	Dolum Çarpanı
G	İletkenlik
Hz	Hertz
kV	Kilovolt
L	Endüktans
Mpp	Maksimum Güç Noktası
MW	Megawatt
Npp	Paralel bağlı modül sayısı
Nss	Seri bağlı modül sayısı
P	Aktif Güç
pu	Per-unit
PV	Fotovoltaik
Q	Reaktif Güç
R	Direnç
Rms	Efektif değer
W	Watt
V	Volt
VA	Volt Amper
VAR	Volt Amper Reaktif
X	Reaktans
Y	Admitans
Z	Eşdeğer reaktans

Kısaltmalar

PWM	Darbe Genlik Modülasyonu
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
THD	Toplam Harmonik Distorsiyonu
YEK	Yenilenebilir Enerji Kanunu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Güneşten gelen ışıının dağılımı	9
Şekil 2.2 Türkiye’de PV tipi alan üretilebilecek enerji miktarları	12
Şekil 2.3 Fotovoltaik pil	14
Şekil 2.4 Güneş pilinin iç yapısı	16
Şekil 2.5 PN eklemi.....	17
Şekil 2.6 Güneş pili çalışma prensibi	18
Şekil 2.7 İdeal PV güneş pili eşdeğer devre modeli	19
Şekil 2.8 Güneş pilinin akım- gerilim karakteristiği	20
Şekil 2.9 Güneş pilinden örgü elde edilmesi	21
Şekil 2.10 PV modüllerin seri bağlantısı	22
Şekil 2.11 PV modüllerin paralel bağlantısı.....	22
Şekil 2.12 PV modüllerin seri-paralel bağlantısı	22
Şekil 2.13 Fotovoltaik sistemlerin temel çalışma prensibi	23
Şekil 2.14 Şarj kontrollü bataryalı sistemler	24
Şekil 2.15 Batarya depolamalı ve AA ile DA yükler	25
Şekil 2.16 Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem	26
Şekil 2.17 Hibrit sistemler.....	26
Şekil 2.18 Senkronoskop kullanılan senkronizasyon devresi	29
Şekil 2.19 Temel yükseltici dönüştürücü devresi	30
Şekil 2.20 Yarıiletken anahtarın iletim durumu	31
Şekil 2.21 Yarıiletken anahtarın kesim durumu	31
Şekil 2.22 Bobin gerilimi ve akımı	33
Şekil 2.23 Elektrik enerji kalitesi problemleri.....	36

Şekil 2.24 Elektrik enerji kalitesi problemlerinin şekilsel açıklaması	37
Şekil 2.25 Harmonik bileşenler ve nonlinear dalga formu	42
Şekil 3.1 Simülasyonda kullanılan fotovoltaiik sistemin blok diyagramı	48
Şekil 3.2 Simülasyonda kullanılan şebekenin blok diyagramı	49
Şekil 3.3 Fotovoltaiik panelin I–V grafiği	50
Şekil 3.4 Fotovoltaiik panelin P–V grafiği	50
Şekil 3.5 Fotovoltaiik modülün eşdeğer devre tabanlı modellemesi	51
Şekil 3.6 Simülasyonda kullanılan DC/DC boost konverter bloğunun iç yapısı	52
Şekil 3.7 Boost konverter çıkışındaki DC voltajın zamana göre değişimi	53
Şekil 3.8 Boost konverter çıkışındaki (yükteki) akımın değeri	53
Şekil 3.9 Boost konverter girişindeki DC voltajın zamana göre değişimi	53
Şekil 3.10 Boost konverterde kondansatör gerilimindeki dalgalılık	55
Şekil 3.11 Simülasyonda kullanılan DC/AC eviricinin blok diyagramı	57
Şekil 3.12 Simülasyonda kullanılan voltaj regülasyonu sisteminin blok diyagramı.....	58
Şekil 3.13 Voltaj regülasyonu sistemine ait bloğun iç yapısı	58
Şekil 3.14 Simülasyonun filtre kısmının blok diyagramı..	59
Şekil 3.15 Simülasyonda kullanılan filtre bloğunun iç yapısı	59
Şekil 3.16 Simülasyonda kullanılan kesicinin (breaker) blok diyagramı	61
Şekil 3.17 Kesicinin kontrol girişine bağlanan kontrol bloğu	61
Şekil 3.18 Şebeke tarafında kullanılan trafonun blok diyagramı.	62
Şekil 3.19 Simülasyonda kullanılan π (Pi) tipi enerji hattının blok diyagramı	63
Şekil 3.20 Nominal π devresi	63

Şekil 3.21 Simülasyonda kullanılan gerilim kaynağının blok diyagramı	64
Şekil 3.22 Simülasyonda kullanılan ölçüm bloğu	65
Şekil 3.23 Ölçüm bloğunun iç yapısı	65
Şekil 3.24 Ölçüm bloğunda frekans ölçümü için kullanılan bloğun iç yapısı	66
Şekil 3.25 Ölçüm bloğunda faz açısı ölçümü için kullanılan bloğun iç yapısı	66
Şekil 3.26 Ölçüm bloğunda güç ölçümleri için kullanılan bloğun iç yapısı	66
Şekil 3.27 Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin blok diyagramı	68
Şekil 3.28 Şebekeye bağlı fotovoltaik sistem simülasyonu	69
Şekil 4.1 PV sistemin frekans-zaman grafiği	71
Şekil 4.2 PV sistemin faz açısı-zaman grafiği	72
Şekil 4.3 Şebeke tarafının frekans-zaman grafiği	72
Şekil 4.4 Şebeke tarafının faz açısı-zaman grafiği	73
Şekil 4.5 Filtre öncesi DC/AC konverter çıkışında gözükten gerilim dalgası	74
Şekil 4.6 Filtre öncesi gözükten gerilim dalgasının harmonik değeri	74
Şekil 4.7 Filtre sonrası harmoniklerin azaltılması sonucu oluşan gerilim dalgası	75
Şekil 4.8 Filtre sonrası oluşan gerilim dalgasının harmonik değeri	76
Şekil 4.9 Breaker (Kesici) sonu oluşan gerilim dalgası	76
Şekil 4.10 Trafo çıkışındaki gerilim dalgası	77
Şekil 4.11 Hat başındaki gerilim dalgasının harmonik değeri	78
Şekil 4.12 Hat sonundaki gerilim dalgasının harmonik değeri	78
Şekil 4.13 PV sistemin aktif güç-zaman grafiği	79
Şekil 4.14 PV sistemin reaktif güç-zaman grafiği	79

Şekil 4.15 Yükün aktif güç-zaman grafiği	79
Şekil 4.16 Yükün reaktif güç-zaman grafiği	80
Şekil 4.17 Şebekenin aktif güç-zaman grafiği	80
Şekil 4.18 Şebekenin reaktif güç-zaman grafiği	80



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Yenilenebilir enerji kaynaklarının 2040 yılına kadar olan süreçteki gelişme senaryoları	9
Çizelge 2.2 Mtoe birimine göre yenilenebilir enerji kaynaklarının 2040 yılına kadarki enerji tüketimi senaryoları	10
Çizelge 2.3 Türkiye'nin aylık güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi.....	11
Çizelge 2.4 Bölgelere göre güneşlenme süresi ve güneş enerjisi potansiyeli dağılımı..	11
Çizelge 2.5 Yenilenebilir Enerji Kanunu'na göre Türkiye'de üretilen aksamalar için teşvik fiyatları (ilk 5 yıl)	13
Çizelge 2.6 IEEE-519 THD gerilim sınır değerleri.....	43
Çizelge 2.7 IEEE-519 THD akım sınır değerleri	43
Çizelge 3.1 Sistem parametrelerinin değerleri	54

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynakları rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, hidrolik (hidroelektrik) enerjisi, jeotermal enerjisi, biyokütle enerjisi (biyoyakıt enerjisi de dahil), hidrojen enerjisi, dalga enerjisi ve gelgit enerjisi olup bunlardan günümüzde kullanımı dünyada en hızlı artan enerji endüstrisi fotovoltaik endüstrisidir. Son zamanlarda ise ticari amaçla ya da elektriğin yetersiz olduğu yerlerde şebekeye bağlı fotovoltaik sistem kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır.

Güneş pilleri (fotovoltaik piller), ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik araçlar olup güneş ışığının taşıdığı enerjiyi iç fotoelektrik reaksiyonlar sonucunda doğrudan elektrik enerjisine dönüştürürler (İnt. Kyn. 1). İlk güneş pilini Schottky, Lange ve Grondahl gerçekleştirmiş olup bu pil bakır oksit (Cu_2O) ve selenyumdan (Se) üretilmiştir (Markvart and Castaner 2003). Fotovoltaik güneş pili yapımında en çok kullanılan materyaller ise silisyum (Si), galyum arsenik (GaAs), kadmiyum sülfür (CdS) ve kadmiyum tellür (CdTe) dür (Köse 1986).

Güneş panelleri uygulamaya bağlı olarak invertörler, akümülatörler, solar kontrol cihazı ve çeşitli elektronik destek devreleri ile birlikte kullanılarak bir fotovoltaik sistemini oluştururlar. Çeşitli sayıda güneş panellerinin kullanılmasıyla istenen miktarda güç elde edilebilir. Bu sistemler; genellikle yerleşim yerlerine uzak olan elektrik şebekesi olmayan yörelerde, güneşlenme süresinin fazla olduğu yerlerde, jeneratöre yakıt taşınımının zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılırlar.

Fotovoltaik sistem güneşin az olduğu zamanlarda veya gece süresince kullanılacak ise sistemde akümülatörün bulunması gerekir. Böylece fotovoltaik modüllerde üretilen elektrik akümülatörlerde depolanır ve gerektiği durumlarda enerji akümülatörler vasıtasıyla sağlanır. Akünün aşırı şarj ve deşarj olmasını engelleyen ve aynı zamanda kontrol birimi olan şarj regülâtörü, akünün durumuna göre ya yükün çektiği ya da güneş pillerinden gelen akımı keser.

Fotovoltaik sistemi, şebeke bağlantılı ve şebeke bağlantısız olmak üzere 2 gruba

ayrılmaktadır. Şebeke bağlantısız sistemler; sokak yol aydınlatmaları, su pompalama sistemleri, sinyalizasyon sistemleri ile şebekeden uzak bölgelerde bulunan evsel uygulamalardan oluşmakta olup bu sistemlerde fotovoltaiik panellerden alınan enerji direkt olarak kullanılır veya akümülatörlerde depolanır. Fotovoltaiik panelin enerji üretmediği durumlarda ise akümülatörlerde depolanan enerji kullanılmaktadır.

Şebeke senkronizasyonlu alternatif akımın kullanıldığı uygulamalarda ise sisteme bir inverter eklenerek akümülatörlerdeki DC gerilim AC gerilime dönüştürülür. Şebeke bağlantılı sistemler, şebeke ile paralel çalışan ve şebekeye doğrudan enerji aktaran sistemler olup bu tip sistemler bir DC/AC dönüştürücü yardımı ile şebekeye senkron bir yapıda çalışmaktadır.

Şebeke bağlantılı fotovoltaiik sistemler, şebekeden bağımsız olanlara göre depolama maliyetinin olmamasından dolayı daha ekonomik ve depolama kayıplarının olmaması sebebiyle daha verimlidir. Bu sistemler, küçük güçlü evsel uygulamalarda (fotovoltaiik çatı sistemlerinde) kullanılabileceği gibi belirli bir bölgenin enerji ihtiyacını karşılamak üzere kurulan büyük güçlü elektrik üretim santrallerinde de kullanılabilmektedir. Şebekeye bağlı fotovoltaiik enerji santralleri, enterkonnekte şebekenin tepe güç gereksinimlerine destek olmak amacıyla kurulur. Şebekeye bağlı çatı sistemlerinde ise fotovoltaiik sistemden alınan enerji direkt olarak elektrik şebekesine aktarılır ve böylece en yakın noktadaki yüklerin bu enerjiyi kullanması sağlanır. Bu da enerjinin çok uzak noktalardan taşınmasını engellediği için enterkonnekte şebekenin iletim ve dağıtım esnasında meydana gelebilecek kayıpları da azaltır.

Fotovoltaiik çatı sistemleri, bağlı olduğu şebekenin yükünü hafifletip enerji taşıma kapasitesini arttırdığından ve kayıpları azalttığından dolayı maliyet ve verim yönünden de birçok avantaj sağlamaktadır. Şebekeye bağlı fotovoltaiik sistemlerin inşa yeri olarak çatıların seçilmesinin iki nedeni vardır. Bunlardan birincisi çatılarda kullanılmayan alanları değerlendirmek, ikincisi ise iletim kayıplarını minimuma indirmektedir. Şebekeye bağlı fotovoltaiik sistemlerde üretilen enerjinin doğrudan şebekeye aktarılmasından yani yüklerin enerjiyi şebekeden alarak kullanmasından dolayı burada elektrik şebekesi enerji iletim ortamı görevini de üstlenmektedir.

Fotovoltaik enerji santrali tarafından üretilen DC gerilimin, inverter vasıtasıyla alternatif akım dalgasına dönüştürülmesinden sonra sistemin direkt şebekeye bağlanabilmesi için senkronizasyonun sağlanması gereklidir. Senkronizasyon sağlandığı zaman şebekeye bağlantı gerçekleştirilebilir.

Eğer senkronizasyon gerçekleşmezse ilk bağlantı sırasında ya büyük sirkülasyon akımları oluşur ya da inverter zarar görür. Senkronizasyon için gerekli olan son derece dikkat gerektiren bir koşul da senkronizm anının saptanmasıdır. Senkronizm anı (Senkronizasyon) paralel bağlanacak PV sistemle şebeke fazlarının üst üste çıkışması demektir.

Ancak şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerde senkronizasyonun sağlanması tek başına yeterli değildir. Bunun yanında fotovoltaik sistemdeki inverterden kaynaklanan harmoniklerin de bir filtre tasarlanarak azaltılması gereklidir. Akım ve gerilimin harmonik yönünden temiz olmaması durumunda çeşitli dereceden harmonikler üretilir (Arifoğlu 2002). Eğer sisteme filtre eklenmezse harmonikler bastırılamaz ve sistemde çeşitli açılardan zararlar oluşabilir.

Fotovoltaik sistemlerle ilgili birçok çalışma yapılmış olup çalışmalarda ağırlıklı olarak şebeke bağlantısız fotovoltaik sistemler ele alınmıştır. Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlerle ilgili olan çalışmalarda ise genel olarak bağlantı topolojileri, güç-verim hesaplamaları, harmonik analizleri gibi konular ele alınmıştır. Fotovoltaik sistemlerle ilgili yapılan önceki çalışmalar Bölüm 2’de detaylı olarak incelenmiştir.

Bu çalışmada ise yukarıda anlatılan senkronizasyon durumunu ve harmonik etkisini gözlemleyebilmek için MATLAB/ Simulink ortamında şebekeye bağlı bir fotovoltaik sistem modellenmiştir. Simülasyon ortamında yapılan bu çalışmada fotovoltaik sisteme ve şebekeye ait her bir eleman ayrı ayrı modellenmiş olup fotovoltaik sistemin ve şebekenin frekans, faz, gerilim, güç ve harmonik ölçümleri yapılmıştır. Simülasyon sonunda ortaya çıkan grafiklere ve ölçüm değerlerine göre fotovoltaik sistemin performans analizi yapılmıştır.

Bunun yanında senkronizasyon sürecinde fotovoltaik sistem-şebeke arasındaki gerilim ve frekans dengelenme süreleri, sistemde yük yok iken şebekede meydana gelen gerilim artışları, senkronizasyon sonrasında fotovoltaik sistem, yük ve şebekede ölçülen gerilim, güç ve frekans değerleri ayrı ayrı gösterilmiştir. Çalışmanın son bölümünde ise elde edilen sonuçlar genel olarak gözden geçirilerek yorumlanmış, tartışılmış ve ileride yapılması muhtemel geliştirmelerden bahsedilmiştir.



2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Fotovoltaik Sistemler ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Fotovoltaik sistemler, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarından olup elektriğin üretildiği yerde tüketim imkanı sağlamalarından, çevreye ve canlılara zararsız olmalarından, modüler olmalarından ve üretilen fazla enerjinin ulusal elektrik şebekesine gönderilme imkanını sağlamalarından dolayı kullanımları her geçen gün artmaktadır. Kullanımlarının artış göstermesiyle birlikte, fotovoltaik sistemlerle ilgili yapılan deneyler, analizler, incelemeler ve çalışmalar da artış göstermiştir. Fotovoltaik sistemlerle ilgili yapılan çalışma örnekleri aşağıda verilmiştir.

Özcan (1993), fotovoltaik generatör tabanlı ve benzinli motor generatör grubu desteğinde otomatik bir doğru akım güç kaynağı tasarlamış ve imal etmiştir. Sistem bir mikroişlemcinin kontrolü altında çalışmakta olup bu sistemle güneş enerjisinin yetersiz olduğu zamanlarda yedek kaynakları kullanıma alarak yüklerin kesintisiz bir şekilde enerji alması sağlanmıştır.

Öksüztepe (1998), çalışmasında bilgisayar programı ile güneşi takip edebilecek mekanik bir güneş izleme sistemi yapmıştır. Sistem, motor kontrollü olup küresel hareket edebilmektedir.

Tozlu (2004), çalışmasında Muğla Üniversitesinde 25.6 kWp kurulu güce sahip fotovoltaik güç sisteminin çalışma karakteristiğini inceleyerek şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sisteminin performans analizini yapmıştır. Sistemin ürettiği yıllık enerji miktarını, PV sistem tarafından şebekeye aktarılan günlük ortalama enerji miktarını, sistemin yıllık performans oranını ve PV sistemin verimliliğini hesaplamıştır.

Küpeli (2005), güneş pilleri ve verimleri konusunu ele alarak güneş pillerinin detaylı olarak incelemesini yapmıştır. Geçmişten günümüze güneş pillerinin kullanım alanlarını ve uygulama yöntemlerini sıralamış, avantajlarını ve dezavantajlarını karşılaştırılmış ve

bunların ardından güneş pillerinin kullanımının yaygınlaştırılması gerektiği sonucuna varmıştır.

Şimşek (2010), çalışmasında polisilikon güneş pillerinin modellemesi ve simülasyonu alanında araştırma yapmıştır. İki gelişmiş fotovoltaiik güneş pili hücresi modeli ortaya koymuş ve bu modellerin sıcaklık ve güneş ışığı değişimlerine tepkilerini araştırmıştır. Model parametreleri oynanarak da ortaya konulan sonuçlar tartışılmıştır.

Aydöner (2010), binaya entegre fotovoltaiik sistem uygulaması yaparak hem fotovoltaiik sistemlerin kurulumundaki maliyetleri azaltmak hem de kendi enerjisini üreten bina modeli geliştirmek istemiştir. Ayrıca sistem tasarımı sırasında izlenecek yolları ve kullanılacak dökümanları ekleyerek bu sektörde istihdam yapmak isteyen kişilere çalışmasının ışık tutmasını hedeflemiştir.

Villalva ve arkadaşları (2010), maksimum güç noktası karakteristikleri esasına dayalı olarak modellenen bir PV hücre kullanmış olup yaptıkları çalışmada bu PV sistemin performansını analiz etmişlerdir. Güneş ışıının günlük değişimine göre bir simülasyon yapmışlardır. Ayrıca sıcaklığın sisteme etkisini de simüle ederek incelemişlerdir.

Dinçer (2011), çevresel faktörlerin fotovoltaiik panele etkisini detaylı olarak irdelemiş olup aynı zamanda fotovoltaiik panelin matematiksel modeline göre Matlab/Simulink programında simülasyonunu yapmıştır. Fotovoltaiik panel çalışma sıcaklığına etki eden; hava sıcaklığı, rüzgâr hızı vb. parametrelerin etkilerini ele alarak fotovoltaiik panelin enerji kazancının artırılması için çeşitli yöntemler sunarak önerilerde bulunmuştur.

Shahidul (2011), fotovoltaiik hücrenin simülasyon modeline dayanarak fotovoltaiik hücrenin elektronik karakteristiğinin elektrik devresine gelen güneş ışığı ve çevre sıcaklığı ile değişimini incelemiştir. Ayrıca Perturb & Observe algoritmalarını kullanarak maksimum güç noktası bulunan bir kontrol sistemi ile çalışan şebeke bağlantılı bir fotovoltaiik sistemin genel tasarımını yapmıştır.

Rashid (2012), çalışmasında apartman daireleri için enerji üretebilecek şebeke bağlantılı fotovoltaiik sistem tasarımı yapmıştır. Sistemin tasarlandığı bina özelliklerini, panellerin konumlanması için alternatifler ortaya koyarak panellerin dizimini, iç bağlantı topolojilerini ve evirici özelliklerine göre değerlendirilmelerini ve şebeke bağlantı birimlerinin seçimi ile ilgili kriterleri sunmuştur.

Keskin (2012), yaptığı çalışmada Türkiye'nin farklı bölgelerinden seçilen yedi il için şebekeden bağımsız enerji depolamalı fotovoltaiik sistem tasarımı gerçekleştirmiştir. Aynı zamanda kullanıcılara yön gösterebilecek bir maliyet analizi de yapmıştır. Fotovoltaiik sistem modellemelerinde PVSYST programını tercih etmiş olup modellenen sistemlerde, seçilen bölgenin enleminin, ikliminin ve meteorolojik verilerin sistem sonucuna etkisinin büyük olduğunu, sistemde seçilecek modül teknolojilerinin bölgenin sıcaklık değerlerine, maliyetine, verim değerlerine ve kayıplarına bağlı olduğu sonucunu ortaya koymuştur.

Eric (2014), yaptığı tez çalışmasında tek fazlı bir evirici tasarlamış olup eviricinin çıkışından 220 Vrms değerinde, 50 Hz'lik bir gerilim elde ederek gerilimin toplam harmonik bozunum değerinin %10'un altında olmasını planlamış ve gerçekleştirmiştir.

Adam (2014), Gaziantep'te şebekeye bağlı 500 kWp'lık fotovoltaiik sistem tasarlayarak yıllık enerji üretiminin hesaplanmasını, ekipman spesifikasyonlarını, sistemin tahmini ekonomik uygulanabilirliğini ve karbon emisyonunun azaltılmasını göstermiştir.

Shikhan (2015), PV sistemlerle ilgili 600 W ve %95 verimlilikte bir DC/AC dönüştürücü tasarlayıp gerçekleştirdi. Matlab/Simulink kullanarak inverterin benzetim çalışmalarını yaptı. Yaptığı deneylerdeki ve simülasyondaki sonuçlar, tasarım performansının tatmin edici olduğunu gösterdi.

Yapılan çalışmalarda, fotovoltaiik sistem kurulumu, fotovoltaiik sistem maliyeti ve verimi, güneş ışığı ve çevre sıcaklığının fotovoltaiik hücreye etkileri, şebeke bağlantılı fotovoltaiik sistem kurulumu yapılacak bir binada olması gereken özellikler ve bağlantı

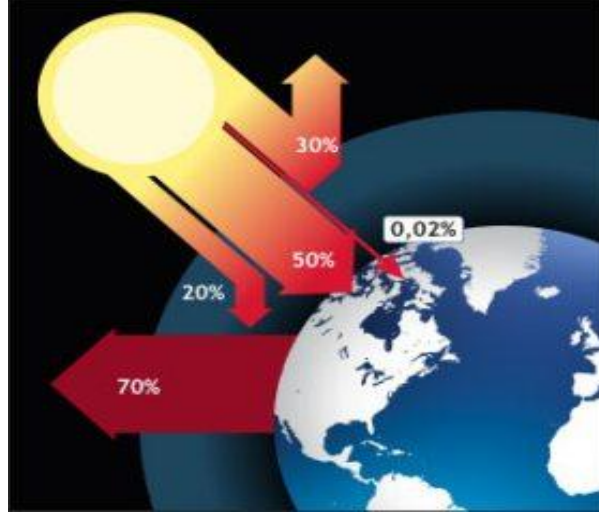
topolojileri, şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin yıllık enerji miktarı ve yıllık performans oranı hesaplamaları, evirici tasarımı, fotovoltaik hücre modellemesi, maksimum verim elde edilmesi gibi konular ele alınmıştır. Bu tezde ise şebekeye bağlı bir fotovoltaik sistem simülasyonu yapılarak sistem ile şebeke arasındaki senkronizasyon süreci ve fotovoltaik sistemin neden olduğu harmonikler incelenmiş ve performans analizi yapılmıştır.

2.2 Güneş Enerjisi

Güneş, dünyamıza ve diğer gezegenlere enerji veren büyük bir enerji kaynağı olup güneşin ışıyım enerjisi, yer ve atmosfer sistemindeki fiziksel oluşumları etkileyen başlıca enerji kaynağıdır. Güneş enerjisini, güneş ışınlarının bir seri fiziksel ve teknik işleminden geçerek ısı ve elektrik enerjisine dönüşmesi şeklinde tanımlayabiliriz. Bu dönüşüm güneşteki hidrojen gazının helyuma dönüşmesi şeklindeki füzyon süreci ile gerçekleşir. Gerçekleşen bu füzyon süreci ile de ışıma enerjisi açığa çıkar.

Güneş enerjisinin şiddeti, dünya atmosferi dışında yaklaşık olarak 1370 W/m^2 değerinde olmasına karşın yeryüzüne ulaşan miktarı dünyanın şekline dolayı $0-1100 \text{ W/m}^2$ değerleri arasında değişim göstermektedir. Güneşten dünyaya gelen enerjinin yoğunluğu atmosferin üzerinde m^2 başına 1.35 kW olup bu şiddet, dünya çapının kapladığı alana gelen güneş gücünün, dünyadaki kurulu elektrik santrallerinin toplam gücünün 100 bin katı düzeyinde olduğunu gösterir.

Güneş enerjisinin potansiyeli sınırsızdır; fakat dünyanın dönüşünden, güneş yörüngesinin asimetrik oluşundan ve atmosferin yapısından dolayı bu büyük miktardaki enerjinin tamamı yeryüzüne ulaşamaz. Güneş ışıyımının sadece %50'si atmosferi geçerek dünya yüzeyine ulaşmakta olup %30 kadarı dünya atmosferi tarafından geriye yansıtılır, %20'si ise atmosfer ve bulutlarda tutulur. Bitkiler tarafından fotosentez olayında kullanılan güneş ışıyımı ise %1 den azdır. Güneş'ten dünyaya gelen bütün ışıyım, sonunda ısıya dönüşür veya uzaya geri yansıtılır. Güneşten gelen ışıyımın dağılımı Şekil 2.1'de verilmiştir (İnt. Kyn. 2).



Şekil 2.1 Güneşten gelen ışınımın dağılımı (İnt.Kyn.3).

2.3 Dünyada Güneş Enerjisi Kullanımı

Günümüzde kullanımı dünyada en hızlı artan endüstri fotovoltaiik endüstrisidir ve bu endüstriyi kullanan çoğu ülkenin güneş ışınım potansiyelleri Türkiye ile kıyaslanamayacak kadar düşüktür. Avrupa Birliği Parlamentosu tarafından yayınlanan ‘Güneş enerjisiyle üretim’ raporunda, 2020 yılında güneş enerjisiyle üretilen elektriğin dünyada; 1 milyar insana ulaşacağı ve karbondioksit gazı emisyonunun yılda 169 milyon-ton azalacağı bildirilmektedir. Dünyada başta Almanya, Japonya ve Amerika olmak üzere, İspanya, İtalya en büyük toplam PV kapasitelerine sahip olan ülkelerdir. Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de dünya genelinde güneş enerjisi kullanılarak elektrik üretiminin ve tüketiminin yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki payı ve gelişme senaryoları gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 Yenilenebilir enerji kaynaklarının 2040 yılına kadar olan süreçteki gelişme senaryoları (İnt.Kyn.4).

Teknoloji	1996-2001	2001-2010	2010-2020	2020-2030	2030-2040
Biyokütle	% 2	% 2,2	% 3,1	% 3,3	% 2,8
Büyük su kaynakları	% 2	% 2	% 1	% 1	% 0
Küçük su kaynakları	% 6	% 8	% 10	% 8	% 6
Rüzgar	% 33	% 28	% 20	% 7	% 2
PV	% 25	% 28	% 30	% 25	% 13

Çizelge 2.1 (Devam) Yenilenebilir enerji kaynaklarının 2040 yılına kadar olan süreçteki gelişme senaryoları (İnt.Kyn.4).

Güneş ısı	% 10	% 16	% 16	% 14	% 7
Güneş ısı elektrik	% 2	% 16	% 22	% 18	% 15
Jeotermal	% 6	% 8	% 8	% 6	% 4

Çizelge 2.2 Mtoe birimine göre yenilenebilir enerji kaynaklarının 2040 yılına kadarki enerji tüketimi senaryoları (İnt.Kyn.4).

Enerji çeşitleri	2001	2010	2020	2030	2040
Dünyanın birincil enerji tüketimi	10038,3	11752,0	13553	15547	17690
Biyokütle	1080,0	1291,0	1653,0	2221,0	2843,0
Büyük hidrolik barajlar	222,7	255,0	281,0	296,0	308,0
Küçük hidrolik barajlar	9,5	16,0	34,0	62,0	91,0
Rüzgar	4,7	35,0	167,0	395,0	584,0
PV	0,2	1,0	15,0	110,0	445,0
Güneş ısı	4,1	11,0	41,0	127,0	274,0
Güneş ısı güç	0,1	0,4	2,0	9,0	29,0
Jeotermal	43,2	73,0	131,0	194,0	261,0
Denize ait (Gelgit, Dalga ve Okyanus)	0,05	0,1	0,4	2,0	9,0
Toplam yenilenebilir	1364,5	1682,5	2324,4	3416,0	4844,0
Yenilenebilir katkı	13,6 %	14,3 %	17,1 %	22,0 %	27,4 %

2.4 Türkiye’de Güneş Enerjisi Kullanımı

Ülkemiz güneş enerjisi potansiyeli bakımından zengin sayılabilecek bir konumda bulunmaktadır. Ülkemiz topraklarına gelen güneş enerjisi, bir yılda 975×10^{12} kWh kadardır. Diğer bir anlatımla, güneş Türkiye için 376 TW (1 TW= 10^6 MW) güç kaynağı demektir. Bu değer kurulu elektrik santrallerimizin 7880 katına eşdeğerdir. EİE tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye ortalama güneşlenme süresinin günlük toplam 7,2 saat, ışınlam şiddetinin ise günlük toplam 3,6 kWh/m² olduğu tespit edilmiştir. Ortalama yıllık güneşlenme süresi ise 2640 saat/yıl’ dır. Türkiye’nin üzerine gelen güneş enerjisinin tamamı enerji üretim amacıyla kullanılamaz.

Bundan dolayı genel enerji bilançosu için brüt güneş enerjisi potansi-yeli, alınan güneş enerjisinin % 2,5’i kadar olup, bu değerde yaklaşık olarak 24×10^{15} kWh/yıl düzeylerindedir. Güneş enerjisi sistemi üzerine faaliyet gösteren firmaların ise büyük çoğunluğunun İzmir, Antalya, Konya, Mersin, Adana, Denizli, Gaziantep ve Ankara’da

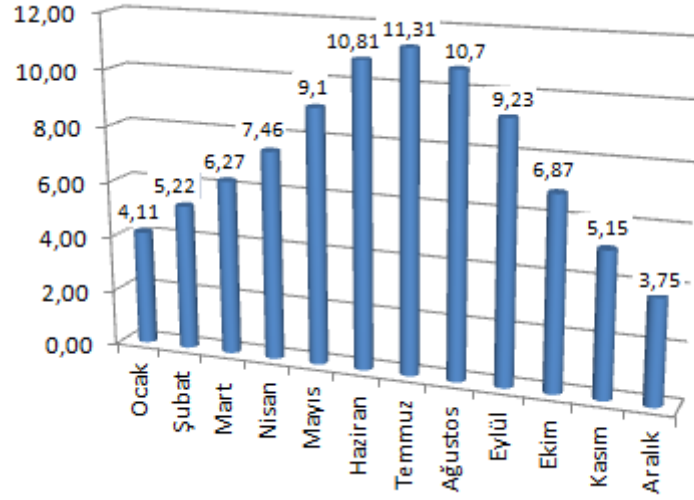
bulunduğu yapılan araştırmalarca tespit edilmiştir. Ülkemizde en çok güneşlenme süresine sahip olan bölge Güneydoğu Anadolu bölgesi olup diğer bölgelerin güneşlenme süresi Çizelge 2.4’ teki gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 2.3 Türkiye’nin aylık güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi (İnt.Kyn.5).

Aylar	Aylık toplam güneş enerjisi		Güneşlenme süresi (Saat/ay)
	(Kcal/cm ² -ay)	(kWh/m ² -ay)	
Ocak	4,45	51,75	103,0
Şubat	5,44	63,27	115,0
Mart	8,31	96,65	165,0
Nisan	10,51	122,23	197,0
Mayıs	13,23	153,86	273,0
Haziran	14,51	168,75	325,0
Temmuz	15,08	175,38	365,0
Ağustos	13,62	158,40	343,0
Eylül	10,60	123,28	280,0
Ekim	7,73	89,90	214,0
Kasım	5,23	60,82	157,0
Aralık	4,03	46,87	103,0
Toplam	112,74	1311	2640
Ortalama	308,0 cal/cm ² -gün	3,6 kWh/m ² -gün	7,2 saat/gün

Çizelge 2.4 Bölgelere göre güneşlenme süresi ve güneş enerjisi potansiyeli dağılımı (İnt.Kyn.6).

Bölge	Toplam ortalama güneş enerjisi	En çok güneş enerjisi (Haziran)	En az güneş enerjisi (Aralık)	Ortalama a güneşlenme süresi	En çok güneşlenme süresi (Haziran)	En az güneşlenme süresi (Aralık)
	kWh/m ² -yıl	kWh/m ²	kWh/m ²	saat/yıl	saat	saat
Güney-doğu Anadolu	1.460	1.980	729	2.993	407	126
Akdeniz	1.390	1.869	476	2.956	360	101
Doğu Anadolu	1.365	1.863	431	2.664	371	96
İç Anadolu	1.314	1.855	412	2.628	381	98
Ege	1.304	1.723	420	2738	373	165
Marmara	1.168	1.529	345	2.409	351	87
Karadeniz	1.120	1.315	409	1.971	273	82



Şekil 2.2 Türkiye’de PV tipi alan üretilebilecek enerji miktarları (KWh-Yıl) (İnt.Kyn.7).

2.5 Türkiye’ de Güneş Enerjisiyle İlgili Yasal Düzenlemeler

Türkiye’de 2005 yılında kabul edilen 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, 3/12/2010 tarihinde 27774 sayılı resmi gazetede yayımlanan ve 10/03/2012 tarihinde 28229 sayılı yeniden hazırlanan değişiklik ile yürürlüğe girmiştir.

Elektrik üretime yönelik 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının (YEK) Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun kapsamında, 1/1/2016 tarihinden 31/12/2020 tarihine kadar işletmeye girecek olan Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK) Destekleme Mekanizmasına tabi olan YEK Belgeli üretim lisansı sahipleri için güneş enerjisine dayalı üretim tesislerine on yıl süreyle 13,3 ABD Doları cent/kWh alım teminatı verilmiştir.

Ayrıca, 1/1/2016 tarihinden 31/12/2020 tarihine kadar işletmeye girecek olan YEK Belgeli üretim tesislerinde kullanılan mekanik ve/veya elektro-mekanik aksamın en az %55’inin yurt içi katma değerle imalatı halinde, bu tesislerde üretilerek iletim veya dağıtım sistemine verilen elektrik enerjisi için önceki fiyatlara, üretim tesisinin

işletmeye giriş tarihinden itibaren beş yıl süreyle Çizelge 2.5'te belirtilen fiyatlar ilave edilecektir. Bunun yanında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına dayalı kurulu gücü azami 1 MW olan üretim tesisi ile elektrik enerjisine dayalı kurulu gücü azami 100 kW olan mikro kojenerasyon tesisi kuran gerçek ve tüzel kişilerin lisans alma ve şirket kurma yükümlülükleri yoktur (Çiftçi 2016).

Çizelge 2.5 Yenilenebilir Enerji Kanunu'na göre Türkiye'de üretilen aksamalar için teşvik fiyatları (ilk 5 yıl) (İnt.Kyn.8).

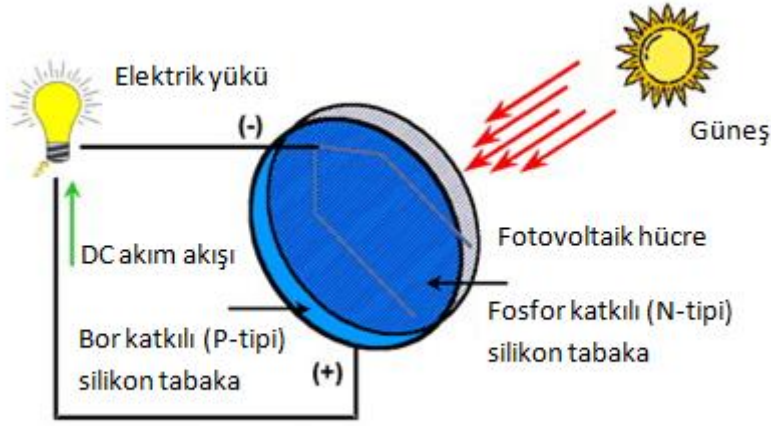
Tesis tipi	Yurt içinde gerçekleşen imalat	Yerli katkı ilavesi ABD doları sent/kWh
Fotovoltaik güneş enerjisine dayalı üretim tesisi	1) PV panel entegrasyonu ve güneş yapısal mekaniği imalatı	0,8
	2) PV modülleri	1,3
	3) PV modülünü oluşturan hücreler	3,5
	4) İnvertör	0,6
	5) PV modülü üzerine güneş ışığını odaklayan malzeme	0,5
Yoğunlaştırılmış güneş enerjisine dayalı üretim tesisi	1) Radyasyon toplama tüpü	2,4
	2) Yansıtıcı yüzey levhası	0,6
	3) Güneş takip sistemi	0,6
	4) Isı enerjisi depolama sisteminin mekanik aksamı	1,3
	5) Kulede güneş ışığını toplayarak buhar üretim sisteminin mekanik aksamı	2,4
	6) Stirling motoru	1,3
	7) Panel entegrasyonu ve güneş paneli yapısal mekaniği	0,6

2.6 Güneş Pilleri

Güneş pilleri (fotovoltaik piller), ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik araçlardır. Güneş pilleri yarı iletken bir diyot olarak çalışırlar ve güneş

ışığının taşıdığı enerjiyi iç fotoelektrik reaksiyonlar sonucunda doğrudan elektrik enerjisine dönüştürürler (İnt. Kyn. 9).

Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şekillerinde üretilen güneş pillerinin alanları genellikle 100 cm² civarında olup, kalınlıkları ise 0,2-0,4 mm arasında değişmektedir (İnt.Kyn.10). Fotovoltaik güneş pili yapımında en çok kullanılan materyaller ise silisyum(Si), galyum arsenik (GaAs), kadmiyum sülfür (CdS) ve kadmiyum tellür (CdTe) 'dür (Köse 1986). Güneş pilleri üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur, yani fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar. Pil, elektrik enerjisi üretimini yüzeyine gelen güneş enerjisi sayesinde gerçekleştirir. Güneş enerjisi, güneş pilinin yapısına bağlı olarak % 5 ile % 20 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir (İnt.Kyn.12).



Şekil 2.3 Fotovoltaik pil (İnt.Kyn.11).

Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş pilinin birbirine paralel ya da seri bağlanmasıyla elde edilen yapıya güneş pili modülü ya da fotovoltaik modül denir. Güç talebine bağlı olarak modüller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak birkaç Watt'tan megaWatt'lara kadar bir fotovoltaik dizi oluşturulabilir (İnt.Kyn.10).

2.7 Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi

Güneş pilleri güneş ışınlarını arada başka bir süreç olmadan doğrudan elektriğe çeviren sistemlerdir. Yani güneş pilleri barajlarda veya rüzgâr türbinlerinde olduğu gibi bir

jeneratör vasıtası ile elektrik üreten sistemler olmayıp doğrudan elektrik üreten sistemlerdir.

Güneş pilleri günümüzde daha çok yer edindiği için yeni bir teknoloji olarak kabul edilse bile tarihsel gelişimi 1800'lü yıllara kadar uzanmaktadır. Fotovoltaik etkisini ilk olarak 1839 yılında Fransız fizikçi Alexander Edmond Becquerel, platin tabakalar üzerinde yaptığı bilimsel çalışmalar sırasında keşfetmiştir. 1876 yılında William G. Adams ve Richard E. Day tarafından silisyum kristalleri bulunmuştur. İlk güneş pilini Schottky, Lange ve Grondahl gerçekleştirmiş olup bu pil bakır oksit (Cu_2O) ve selenyumdan (Se) üretilmiştir (Markvart and Castaner 2003).

1905'te ise Albert Einstein fotovoltaik etkisini düzgün bir şekilde ifade ederek 1921 yılında Nobel Fizik Ödülü almaya hak kazanmıştır (İnt.Kyn.13). 1954 yılında ise güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik piller ilk olarak Chapin ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. Fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilen bu tarihi takip eden yıllarda araştırmalar ve ilk tasarımlar, uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için yapılmıştır (İnt.Kyn.14).

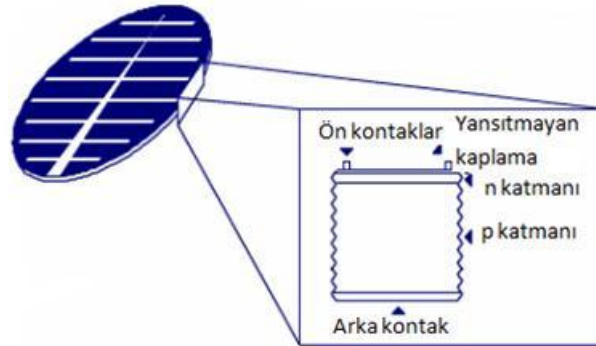
Güneş pillerinin yeryüzünde de elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik araştırma ve geliştirme çabaları 1954'ler de başlamış olmasına karşın, gerçek anlamda ilgi 1973 yılındaki 1. petrol bunalımını izleyen yıllarda olmuştur. Amerika'da, Avrupa'da ve Japonya'da büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılarak bu yıllarda fotovoltaik enerji sistemleri gelişimi hız kazanmıştır. Yine bu dönemde uzay çalışmalarında kendini ispatlamış silikon kristaline dayalı güneş pillerinin verimliliğini artırma çabaları hız kazanmış olup bunun yanında çok daha az yarı iletken malzemeye gerek duyulan ve bu nedenle daha ucuza üretilbilecek olan ince film güneş pilleri üzerindeki çalışmalara da önem verilmiştir (Özgöçmen 2007).

2000'li yıllara gelindiğinde ise başta Almanya, Japonya, ABD ve Türkiye olmak üzere birçok ülkede güneş enerjisinin kullanım alanı arttırılmış ve güneş enerjisinden büyük ölçüde yararlanmaya yönelik olarak çeşitli güneş enerjisi santralleri kurulmuştur.

Günümüzde ise güneş enerjisini geliştirmeye ve yaygınlaştırmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir.

2.8 Güneş Pillerinin Yapısı ve Çalışma İlkesi

Güneş pilleri, optiksel ve elektriksel özellikleri ışık-elektrik enerjisi çevrimine uygun olarak seçilen yarı iletken malzemeden yapılmış diyotlardır. Yarı iletken malzemelerin ise güneş pili olarak kullanılabilmesi için n ya da p tipi katkılanmaları gereklidir. Elektronik devre yapımında kullanılan germanyum ve silisyumun iletkenliği kontrollü olarak artırılabilir. İletkenliği kontrollü olarak arttırmak amacıyla saf yarı iletken malzemeye katkı maddesi eklenir. Yapılan bu işleme katkı işlemi (katkılama) denir. Akım taşıyıcılarının(elektron veya boşluk) sayısının artırılması malzemenin iletkenliğini artırır. Katkılama sonucunda katkı maddesine bağlı olarak n-tipi ya da p-tipi madde oluşur.

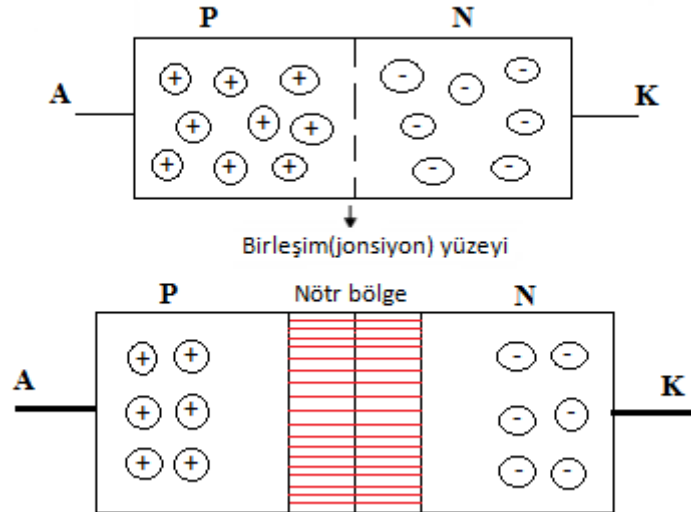


Şekil 2.4 Güneş pilinin iç yapısı (Çıtıroğlu 2000).

En yaygın güneş pili maddesi olarak kullanılan silisyumdan n tipi silisyum elde etmek için silisyum eriyiğine periyodik cetvelin 5. grubundan bir element (arsenik, fosfor, bizmut veya antimon) eklenir. Silisyuma katkı maddesi olarak 5 valans elektrona sahip fosfor eklendiğinde, fosfor atomunun 4 valans elektronu, silisyumun 4 valans elektronu ile kovalent bağ oluşturur. Silisyum'un dış yörüngesinde 4, fosforun dış yörüngesinde 5 elektron olduğu için, kovalent bağ sonucunda, fosforun fazla olan tek elektronu kristal yapıya bir elektron verir. Böylece akım taşıyıcılarının çoğunluğu elektron olan n tipi silisyum oluşturulur.

P tipi silisyum elde etmek için ise, saf silisyum atomu içerisinde 3. gruptan bir elementin (alüminyum, indiyum, bor gibi) belli bir oranda eklenmesiyle yeni bir kristal yapı oluşturulur. Silisyuma katkı maddesi olarak belli bir oranda bor katılırsa; bor elementinin 3 valans elektronu, silisyumun 3 valans elektronu ile ortak kovalent bağ oluşturur. Bu kovalent bağ sonucunda silisyumun 1 valans elektronu ortak valans bağı oluşturamadığı için 1 elektron eksikliği meydana gelir. Bu elektron yokluğuna hol ya da boşluk denir. Boşluklar pozitif yüklü oldukları için bu yöntemle elde edilen yeni malzemeye p tipi yarı iletken malzeme denir.

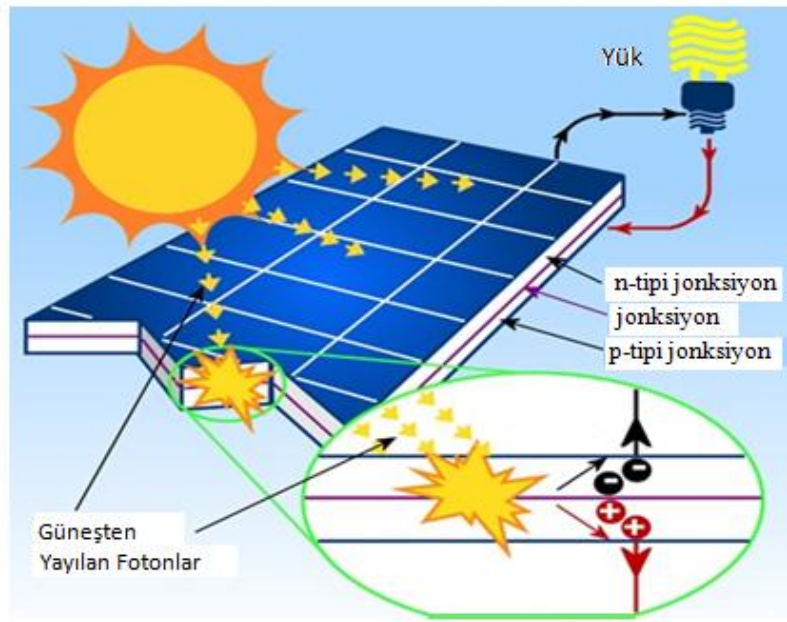
Oluşturulan n-tipi ve p-tipi maddeler yalnız halde elektriksel işlevleri yerine getiremezler. Elektriksel işlevleri yerine getirebilmeleri için bu p ve n tipi maddelerin bir arada kullanılması gerekir. P ve n tipi maddelerin bir arada kullanılmasıyla oluşan yapıya PN birleşimi veya PN eklemi denir. Bu yarı iletken eklemin güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaj dönüşümünün sağlanması gerekir. Bu dönüşüm iki aşamada olur. Birinci aşamada, eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-hol çiftleri oluşturulur, ikinci aşamada ise, bunlar bölgedeki elektrik alan yardımıyla birbirlerinden ayrılır.



Şekil 2.5 PN eklemi (İnt.Kyn.15).

Bu şekilde güneş pili, elektronları n bölgesine, holleri de p bölgesine iten bir mekanizma ile çalışır. Birbirlerinden ayrılan elektron-hol çiftleri, fotovoltaj hücrenin

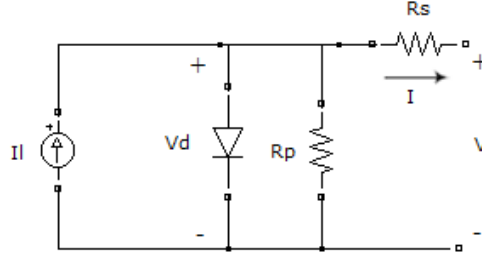
uçlarında yararlı bir enerji çıkışı oluşturur. Bu süreç, yeniden bir fotonun hücre yüzeyine çarpmasıyla aynı şekilde devam eder. Fotovoltaik hücre ışınlam aldığı sürece döngü devam eder ve elektrik enerjisi üretimi gerçekleşmiş olur (İnt.Kyn.16). Fotovoltaik hücrenin, ışına yoğun bir şekilde maruz kalması (gerekli enerjinin daha fazlasının gelmesi) halinde enerji hücrelerde ısıya dönüşür ve bunun sonucunda fotovoltaik panel veriminde azalma meydana gelir (Çelik 2015). Şekil 2.6’da fotovoltaik bir hücrenin çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 2.6 Güneş pili çalışma prensibi (İnt.Kyn.17).

2.9 Güneş Piliin Elektriksel Eşdeğer Devre Modeli

İdeal bir güneş pilinin devre modeli Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Şekildeki gibi ideal model sadece akım ürettiği için bir akım kaynağı ve p-n ekleminden oluştuğu için bir diyot içermektedir. Bu gösterilen modeldeki parametreler ışık şiddeti ve sıcaklığa bağlı olduğundan her çıkış değeri için ışık ve sıcaklık seviyelerinin bilinmesi gerekir.



Şekil 2.7 İdeal PV güneş pili eşdeğer devre modeli (İnt.Kyn.18).

Burada;

I : PV pilin çıkış akımı (A)

I_L : Işık seviyesi ve P-N eklemi sıcaklığının fonksiyonu, fotoakım (A)

I_0 : D diyodunun ters doyma akımı (A)

V : PV pilin çıkış gerilimi (V)

R_s : Eşdeğer devrenin seri direnci (Ohm)

R_p : Eşdeğer devrenin paralel direnci (Ohm)

e : Elektron yükü ($1.6021917 \times 10^{-19}$ C)

k : Boltzmann sabiti (1.380622×10^{-23} J/°K)

T_{pil} : Referans çalışma sıcaklığı (°K)

Şekilde verilen devre modeli, matematiksel olarak Denklem 2.1 ile temsil edilebilir (Çetinkaya 2001). I_D akımı ise PV pili oluşturan yarı iletken malzemelerin P-N birleşme noktasından akan bir iç akım olup, pilin mutlak sıcaklığı, terminal gerilimi ve yük tarafından çekilen akımın bir fonksiyonu olarak değişir.

Bu akım Denklem 2.2 ile ifade edilir (Çetinkaya 2001).

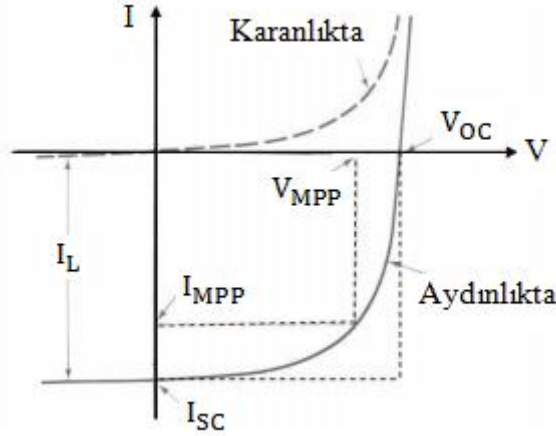
$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{e}{k.T_{pil}} (V + R_s \times I)\right) - 1 \right] - \frac{V + (R_s \times I)}{R_p} \quad (2.1)$$

$$I_D = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{e}{A.k.T_{pil}} (V + R_s \times I)\right) \right] \quad (2.2)$$

2.10 Güneş Pilinin Karakteristik Akım-Gerilim Eğrisi

Işınım altındaki gözenin akım-gerilim karakteristiği, karanlıktaki gözenin akım-gerilim eğrisinden ışınım altında üretilen, I_L akımının çıkarılması olarak ele alınabilir. Bu eğriler kullanılarak fotovoltaiik diyottan alınabilecek güç hesaplanabilmekte olup güneş

pilinin performansını ise genel olarak, kısa devre akımı I_{sc} , açık devre gerilimi V_{oc} , maksimum güç noktası MPP ve akım-gerilim karakteristiğinin düzgünlüğünün ölçüsü olan dolum çarpanı FF ile açıklayabiliriz. Şekil 2.8’de bir güneş piline ait aydınlıktaki ve karanlıktaki akım-gerilim karakteristiği gösterilmektedir.



Şekil 2.8 Güneş pilinin akım- gerilim karakteristiği.

Aydınlıktaki bir güneş pilinin Şekil 2.8’de verilen eğri üzerindeki çıkış gücünün maksimum değere ulaştığı noktaya maksimum güç noktası adı verilmektedir. Bu noktada çalışma gerilimi $V=V_{MPP}$ ve bu gerilime karşılık gelen çalışma akımı $I=I_{MPP}$ olup akım-gerilim eğrisi altında kalan alan maksimum değerindedir.

Gücün hesaplanması için Denklem 2.1 ve 2.2’ ye ek olarak aşağıdaki hesaplamaların da yapılması gerekmektedir.

Dolum çarpanı (FF): Işınım altındaki akım-gerilim eğrisinde, akımların eksi, gerilimlerin pozitif olduğu bölgede hesaplanan en büyük $V_{mp} \times I_{mp}$ değerinin $V_{oc} \times I_{sc}$ ye oranı olarak tanımlanır.

$$FF= (V_{mp} \times I_{mp})/ (V_{oc} \times I_{sc}) \quad (2.3)$$

Güneş pilinin çıkış gücü, P çıkış, bu değişkenler cinsinden,

$$P_{çıkış} = V_{mp} \times I_{mp} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (2.4)$$

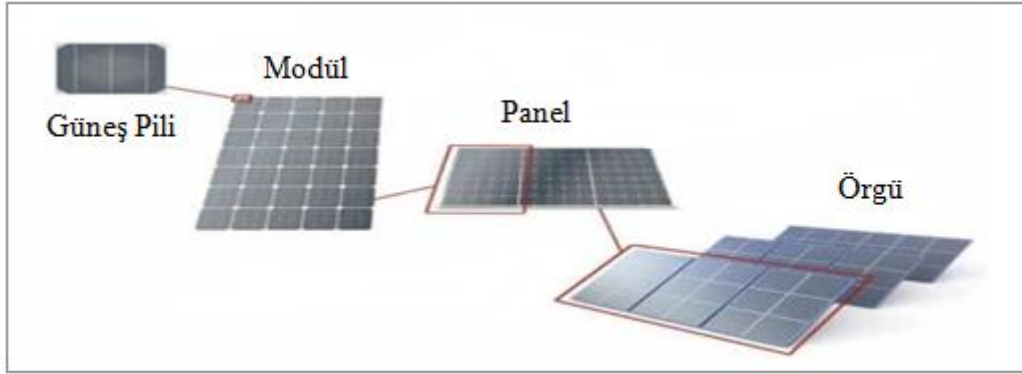
şeklinde verilebilir.

Bir güneş pilinin verimliliği, n ise aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanabilir.

$$N = (P_{\text{çıkış}} \times I_{mp}) / (V_{\text{giriş}} \times I_{sc}) = (V_{oc} \times I_{sc} \times FF) \quad (2.5)$$

2.11 Fotovoltaik Hücreden Modül Elde Edilmesi

PV bir hücre yaklaşık 1 Watt güç üretirken birçok PV hücre seri veya paralel bağlanarak, Şekil 2.9'da görüldüğü gibi yüksek güçte modül elde edilir. Modüllerin birbirine elektriksel olarak bağlanmasıyla panel, ve çok sayıda modül veya panelin elektriksel olarak birbirine bağlanmasıyla da örgü elde edilir. Bir güneş pilinden örgü elde edilmesine kadar olan döngü Şekil 2.9 da gösterilmektedir.



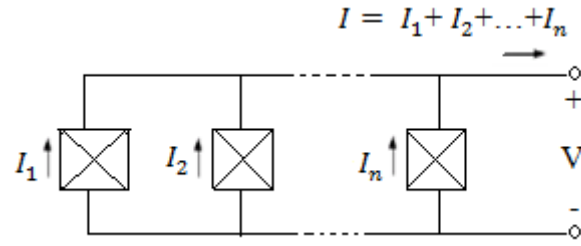
Şekil 2.9 Güneş pilinden örgü elde edilmesi.

Modüller Şekil 2.10'da görüldüğü gibi seri bağlanarak modül gerilimi arttırılır ve bu sayede oluşan modül gerilimi Denklem 2.6 ve 2.7'de gösterildiği gibi hesaplanır.

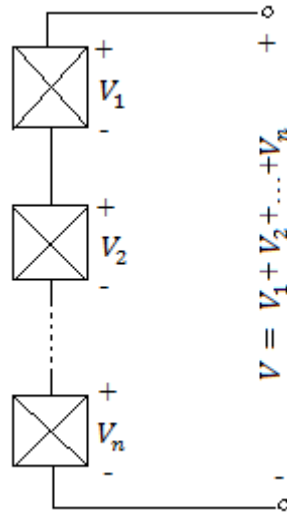
$$V_{\text{modül}} = n \cdot V \quad (2.6)$$

$$V_{\text{modül}} = n \cdot (V_D - I \cdot R_s) \quad (2.7)$$

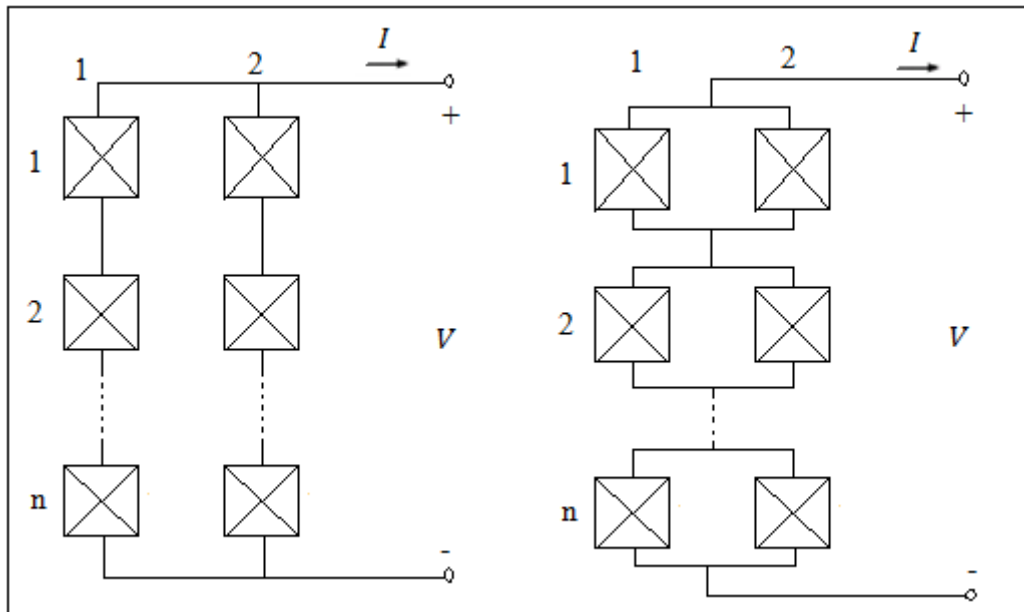
Şekil 2.11 ve Şekil 2.12 de ise sırayla modüllerin paralel bağlanması ve seri-paralel bağlanması gösterilmektedir.



Şekil 2.10 PV modüllerin seri bağlantısı.



Şekil 2.11 PV modüllerin paralel bağlantısı.



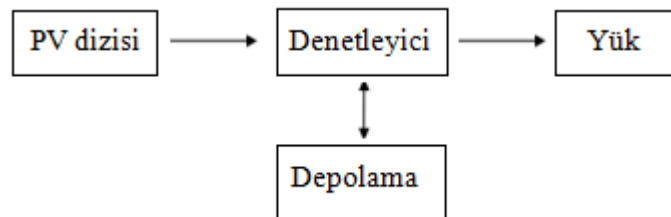
Şekil 2.12 PV modüllerin seri-paralel bağlantısı.

2.12 Fotovoltaik Sistem Çalışma Prensibi ve Bileşenleri

Güneş panelleri uygulamaya bağlı olarak invertörler, akümülatörler, solar kontrol cihazı ve çeşitli elektronik destek devreleri ile birlikte kullanılarak bir fotovoltaik sistemini oluştururlar.

Bu sistemler; genellikle yerleşim yerlerine uzak olan elektrik şebekesi olmayan yörelerde, güneşlenme süresinin fazla olduğu yerlerde, jeneratöre yakıt taşınımının zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılırlar. Sistem güneşin az olduğu zamanlarda veya gece süresince kullanılacak ise sistemde akümülatörün bulunması gerekir. Böylece fotovoltaik modüllerde üretilen elektrik akümülatörlerde depolanır ve gerektiği durumlarda enerji akümülatörler vasıtasıyla sağlanır. Akünün aşırı şarj ve deşarj olmasını engelleyen ve aynı zamanda kontrol birimi olan şarj regülâtörü, akünün durumuna göre ya yükün çektiği ya da güneş pillerinden gelen akımı keser.

Şebeke senkronizasyonlu alternatif akımın kullanıldığı uygulamalarda ise sisteme bir inverter eklenerek akümülatörlerdeki DC gerilim 220 V, 50 Hz.lik sinüs AC gerilimine dönüştürülür. Fotovoltaik sistemler modül, akü, inverter vb. bileşenler dışında elektrik üretebilmek için başka bileşenlere de ihtiyaç duyar. Bu bileşenler; diyotlar, kablolama, bağlantı kesme elemanları, sigortalar, topraklama elemanları, aşırı akımdan koruma elemanları ve montaj parçalarıdır. Kullanılacak uygulamanın çeşidine göre çeşitli destek elektronik devreler de sisteme eklenebilir. PV sistemin sürekli optimum şartlarda çalışması isteniyorsa, güneş pillerinin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlayan MGN izleyici cihazına gerek duyulur. MGN çekilen gücün maksimum olduğu nokta olarak tanımlanır. PV elemanın maksimum verim vermesi isteniyorsa MGN’da çalıştırılması gerekir.



Şekil 2.13 Fotovoltaik sistemlerin temel çalışma prensibi.

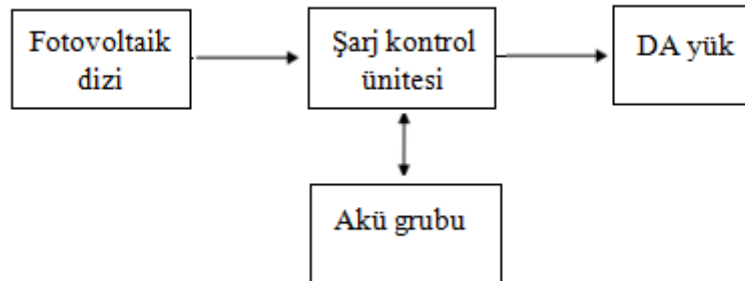
2.13 Fotovoltaik Sistem Çeşitleri

Dünya genelinde geçmişte, şebekeye bağlı olmayan sistemler daha yaygın iken 1999 dan sonra şebekeye bağlı sistemlerin kullanımı gittikçe artmaktadır.

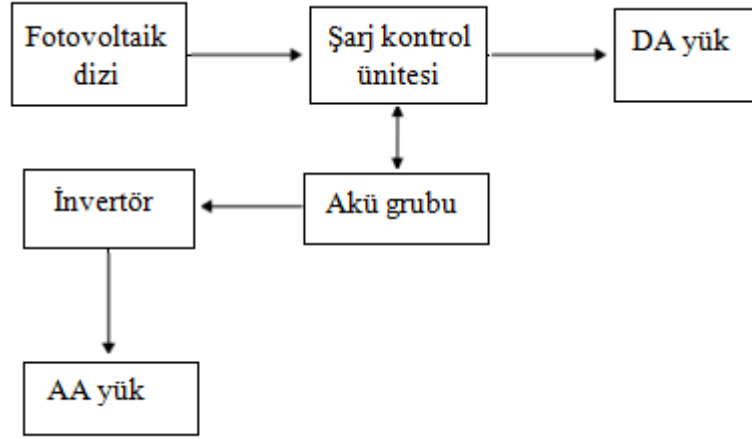
2.13.1 Şebeke Dışı Bağımsız Sistemler

Şebeke dışı bağımsız sistemler genellikle elektrik dağıtım şebekesine erişimi olmayan ya da çok kısıtlı kırsal bölgelerde kullanılır. Bağımsız PV sistemler elektrik şebekesinden (ya da yükten) ayrı çalıştıkları için ürettikleri elektrik akülerde depolanır.

Tipik bir bağımsız PV sistemi PV panel grubu, kontrol ünitesi, akü, bağlantı kutusu ve çeşitli diğer cihazlardan meydana gelir. Gerekirse sisteme bir invertör eklenerek alternatif akım da elde edilebilir. Bağımsız PV sistemlerinin şematik çizimi Şekil 2.14’ te ve Şekil 2.15’ te gösterilmiştir. Buradan da görüleceği üzere bu sistemler ile aynı anda hem alternatif akım hem de doğru akım tüketiciler beslenebilmektedir.



Şekil 2.14 Şarj kontrollü bataryalı sistemler.

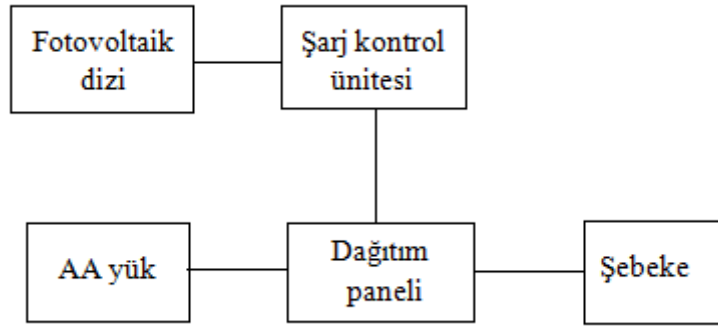


Şekil 2.15 Batarya depolamalı ve AA ile DA yükler.

2.13.2 Şebekeye Bağlı Sistemler

Şebeke içi kullanımda, fotovoltaik sistemin ürettiği enerji kullanılmakta olup, kalan kısmı doğrudan şebekeye verilebilmektedir. Bu sistemlerde örneğin bir evin elektrik gereksinimi karşılanırken, üretilen fazla elektrik şebekeye satılır, yeterli enerjinin üretilmediği durumlarda ise şebekeden enerji alınır. Bu yüzden şebekeye bağlı sistemlerde akümülatör ve benzeri cihazların kullanılmasına gerek yoktur. Bu sebepten dolayı ilk yatırım maliyeti düşmekte ve güneşten elde edilen elektriğin maliyeti de azalmaktadır.

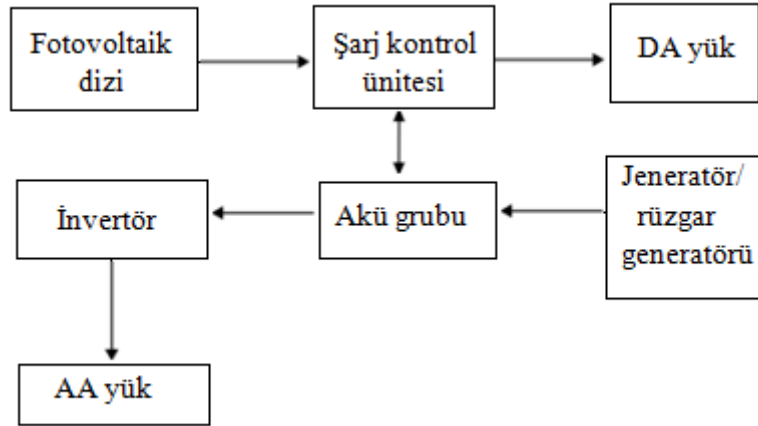
Bunun yanında enerji üretim santrali olarak kullanılan fotovoltaik sistemlerde bağlantı noktası, sistemin kurulu gücüne göre değişiklik gösterir. Kurulu gücü, 50 MVA'ye kadar olan sistemler, 34,5 kV dağıtım hattı gerilim seviyesinden, 50 MVA üzeri olanlar ise, 154 kV veya 380 kV iletim hattı gerilim seviyesinden şebekeye bağlanır.



Şekil 2.16 Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem (İnt.Kyn.19).

2.13.3 Hibrid Sistemler

Hibrit bağlı sistemler günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttırmak için yapılan en önemli uygulamalardan biridir. Enerji kaynaklarının birlikte kullanımına dayalı olan bir sistem türüdür. Bu sistemde, PV panellere ek olarak bir ya da daha fazla elektrik üretim sistemi vardır. Birincil elektrik üreticisinin PV paneller olduğunu kabul edersek, ikincil üretici sistem rüzgar türbini gibi yenilenebilir enerji kullanan bir kaynak veya dizel jeneratör gibi yenilenmez enerji kaynağı kullanan bir kaynak da olabilir.



Şekil 2.17 Hibrit sistemler.

2.14 Şebekeye Bağlı Sistemlerin Avantajları ve Dezavantajları

2.14.1 Şebekeye Bağlı Sistemlerin Avantajları

- Elektrik üretildiği yerde tüketildiği için batarya ihtiyacı yoktur.
- Şebeke iletim kayıpları ve yüklenmesi azaltılmış olur.
- Üretilen fazla elektrik enterkonnekte şebekeye satılabilir.
- Farklı ölçeklerde kurulum esnekliği vardır.
- Herhangi bir arıza durumunda veya fotovoltaiik sistemin yeterli olmadığı durumda şebeke otomatik olarak devreye girer.
- Ada sistemlere (şebeke bağlantısız) göre yüksek verimli olup ekonomik yönden de ada sistemlere göre daha uygundur.
- Toplam yükün belli bir oranının PV sistem tarafınca karşılanması yeterli olup, istenildiği zaman modül sayısı yani çıkış gücü arttırılabilir.

2.14.2 Şebekeye Bağlı Sistemlerin Dezavantajları

- Fotovoltaiik sistemin yeterli olmadığı ve şebekede herhangi bir sorun olduğu durumlarda tüketici enerjisiz kalacaktır.
- Güç faktörü, harmonikler, frekans, dalga şekli gibi önemli elektriksel parametreler çok düzenli regülasyon istediklerinden dolayı, bu sistemlerde yüksek kalitede elektronik ekipmanların olması gerekir. Bu gereklilik de maliyetin artmasına sebep olur.
- Kötü ve yağışlı havalarda şebeke kesintisine neden olduğu için enerji kesintisine yol açabilecek bu tip ortamlarda PV sistem elektrik üretmez. Bu yüzden bir jeneratör ihtiyacı doğabilir (İnt.Kyn.20).

2.15 Fotovoltaik Enerji Santrallerinin Şebeke ile Senkronizasyonu

Fotovoltaik enerji santrali tarafından üretilen DC gerilimin, inverter vasıtasıyla alternatif akıma dönüştürülmesinden sonra sistemin direkt şebekeye bağlanabilmesi için bazı senkronizasyon şartlarının gerçekleşmesi gereklidir. Bu senkronizasyon şartları şunlardır;

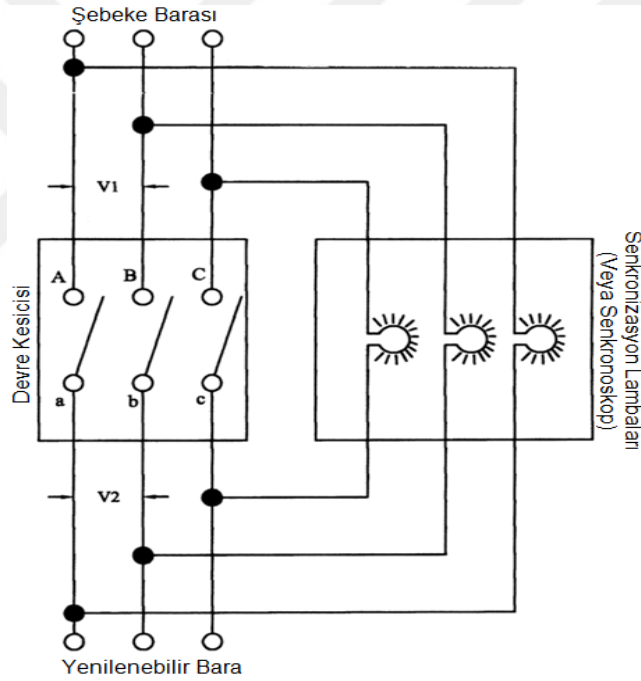
- PV sistemle şebekenin terminal gerilim genlikleri uygun olmalıdır. Şebeke gerilimi $220\text{ V} \pm \%10$ sınırları içerisinde olmalıdır.
- PV sistemin frekansı şebeke frekansına mümkün olduğunca yakın olmalıdır. İnverter çıkış gerilimi şebeke ile aynı frekansta olmalıdır. Şebeke frekansı $50\text{ Hz} \pm \%1$ sınırları içerisinde olmalıdır.
- İki sistemin faz sıraları aynı olmalıdır. Yani inverter çıkış gerilimi şebeke ile aynı faz sırasında olmalıdır.
- İki sistemde aynı fazda olmalıdır. Yani inverter çıkış gerilimi şebeke ile aynı fazda olmalıdır.
- PV sistemdeki güç yeterli miktarda olmalıdır.

Bu şartlar sağlandığı zaman şebekeye bağlantı gerçekleştirilebilir. Belirtilen şartların sağlanmaması durumunda ilk bağlantı sırasında ya büyük sirkülasyon akımları oluşur ya da inverter zarar görür. Senkronizasyon için gerekli olan son derece dikkat gerektiren bir koşul da senkronizm anının saptanmasıdır. Senkronizm anı (Senkronizasyon) paralel bağlanacak PV sistemle şebeke fazlarının üst üste çakışması demektir.

Senkronizm anında PV sistem ile şebeke gerilimleri aynı anda, aynı ani değerleri alır. Senkronizm anı ise senkronoskop, sıfır voltmetresi ve lamba bağlantıları ile ayrı ayrı saptanabilir. Senkronizasyon uygunluğunu senkronoskop veya her faz için birer adet olmak üzere 3 senkronizasyon lambasıyla gözlemleyecek olursak, Şekil 2.18 'deki gibi

bir senkronizasyon devresi kullanabiliriz. Senkronizasyon devresinde PV sistem ve şebeke voltajları her üç faz için de tamamen aynıysa bütün lambalar karanlık durumda olur. Fakat, sadece bir anlık karanlık olması yeterli değildir. Uzun bir süre karanlık kalması gerekir. Bu durum ise sadece 2 sistemin frekansları hemen hemen aynı olduğu zaman gerçekleşebilir.

Eğer PV sistem ile şebekenin frekansları farklıysa gerilimler arasındaki faz farkı sonucunda lambalar yanar. Lambalar 0.25-0.50 saniye karanlık konumda kalırsa senkronizasyon anahtarı kapanır (Patel 2006).



Şekil 2.18 Senkronoskop kullanılan senkronizasyon devresi (Patel 2006).

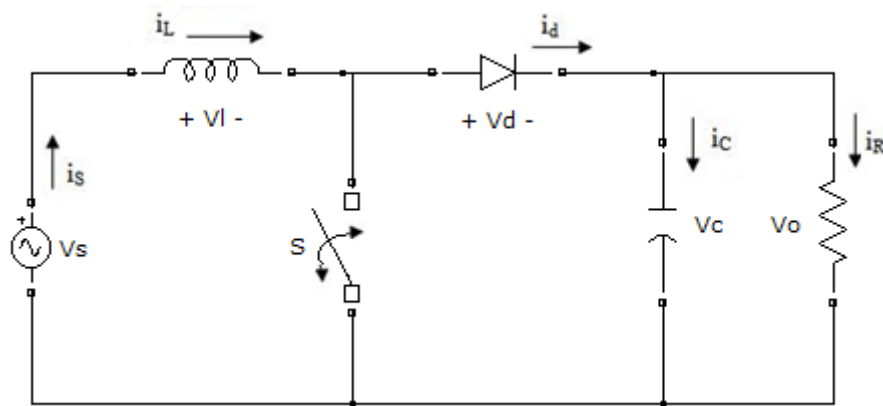
Anahtarın kapanmasıyla senkronizasyonun sağlanabilmesi için PV sistem gerilimi ile şebeke gerilimi arasındaki herhangi bir küçük farklılıktan dolayı iki sistem arasında akım akışı meydana gelir. Oluşan akım akışıyla sistemler arasında denge kurulur. Eğer PV sistem ve şebekenin gerilim ve frekans değerleri, istenilen limit değerlerin altında veya üzerinde olursa sistemde şebekedeki voltaj ve frekans değerlerini izleyen koruma

ünitesi devreye girer. Böylece PV sistem ile şebeke arasındaki güç akışı engellenerek devre koruma altına alınır.

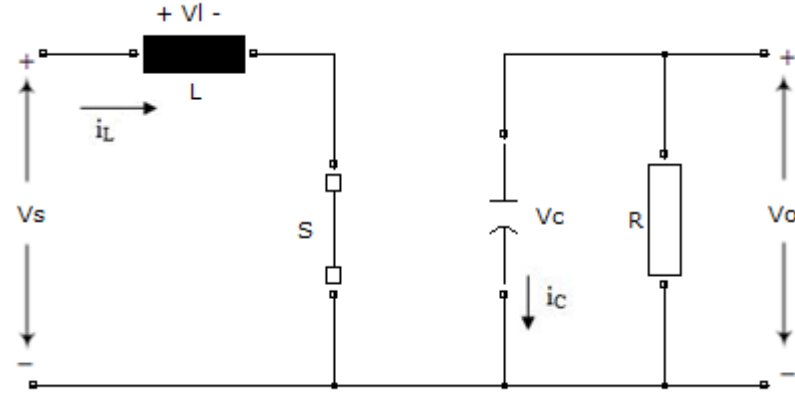
2.16 Yükseltici Tip DC/DC Dönüştürücü (Boost)

Yükseltici dönüştürücü girişindeki doğru gerilimi daha yüksek bir doğru gerilim seviyesine yükselterek çıkışına aktaran sistemlerdir. Şekil 2.19'da temel devre şekli verilmiştir. Şekil 2.19'da görüldüğü gibi yarı iletken anahtar, diyot, bobin ve kapasite elemanlarından oluşmaktadır. Anahtar iletime geçtiğinde kaynak gerilimi bobin ve anahtar üzerinden devresini tamamlar. Bu sırada bobin üzerinde bir miktar enerji depolar. Bu sırada D diyotu ters polaritede olup, çıkıştaki yükü C kondansatörü besler. Kondansatörün akımı yüksek değerlerdedir.

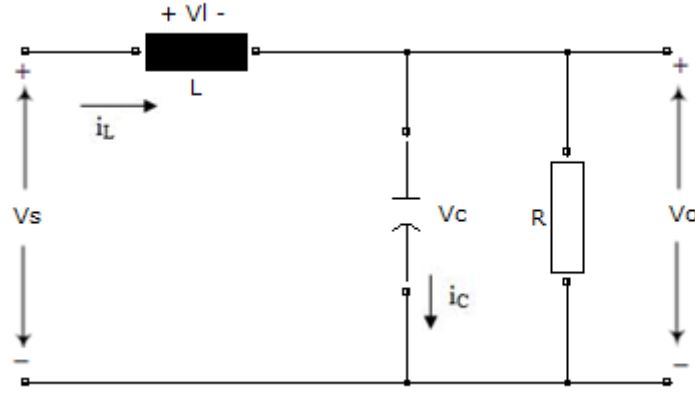
Anahtar kesime geçtiği anda bobin içerisinde geçmekte olan şarj akımı D diyotu üzerinden C kapasitesine ve yüke doğru akmaya başlar. Bobin, enerjisini deşarj eder ve bobin üzerindeki gerilimin polaritesinin yönü gerilim kaynağının polaritesi ile aynı olur ve D diyotu üzerinden yüke bağlanır. Böylece çıkış gerilimi yükseltilmiş olur. Bu sayede D diyotu da kesime gider ve devre Şekil 2.20'de görüldüğü gibi iki farklı parçaya bölünür. RC devresinin zaman sabiti anahtarlama periyodundan çok büyük olduğu sürece çıkış gerilimi sabit kalır.



Şekil 2.19 Temel yükseltici dönüştürücü devresi (İnt.Kyn.21).



Şekil 2.20 Yarıiletken anahtarın iletim durumu.



Şekil 2.21 Yarıiletken anahtarın kesim durumu.

2.16.1 Anahtar İletimdeyken Bobin İçerisinden Geçen Akım

Anahtar iletimdeyken eşdeğer devre Şekil 2.20’de gösterildiği gibi olur. Vs kaynağının değeri L ve i’ ye bağlı olarak,

$$L \cdot \frac{di_L}{dt} = V_s(t) \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir.

Eğer gerilim kaynağı sabit ise bobin akımının yükselme oranı da sabittir. Bu sayede bobin doyuma gitmez.

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{V_s}{L} \quad (2.9)$$

Anahtar DT aralığı boyunca iletimde kalır ve DT aralığı Δt şeklinde gösterilebilir. Anahtarın iletim durumunda, bobin akımındaki net yükselme miktarı,

$$\Delta I_L = \frac{V_s}{L} (DT) \quad (2.10)$$

eşitliği ile hesaplanır.

2.16.2 Anahtar Kesimdeyken Bobin İçerisinden Geçen Akım

Anahtar kesimdeyken eşdeğer devre Şekil 2.21'deki gibi olur. Bu durumda bobin üzerindeki gerilim,

$$V_L = V_s - V_o \quad (2.11)$$

eşitliğiyle hesaplanır.

$V_o > V_s$ olduğu durumda bobin üzerindeki gerilimin ve akan akımın yönü negatif olur.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.12)$$

$(1-D)T$ ifadesi anahtarın kesime götürüldüğündeki aralık değeridir. Bu durumda bobin içerisinden geçen akım,

$$\Delta I_L = \frac{V_s - V_o}{L} (1 - D)T \quad (2.13)$$

şeklinde bulunabilir.

Bir periyottaki akımın net değişimi sıfır olduğundan,

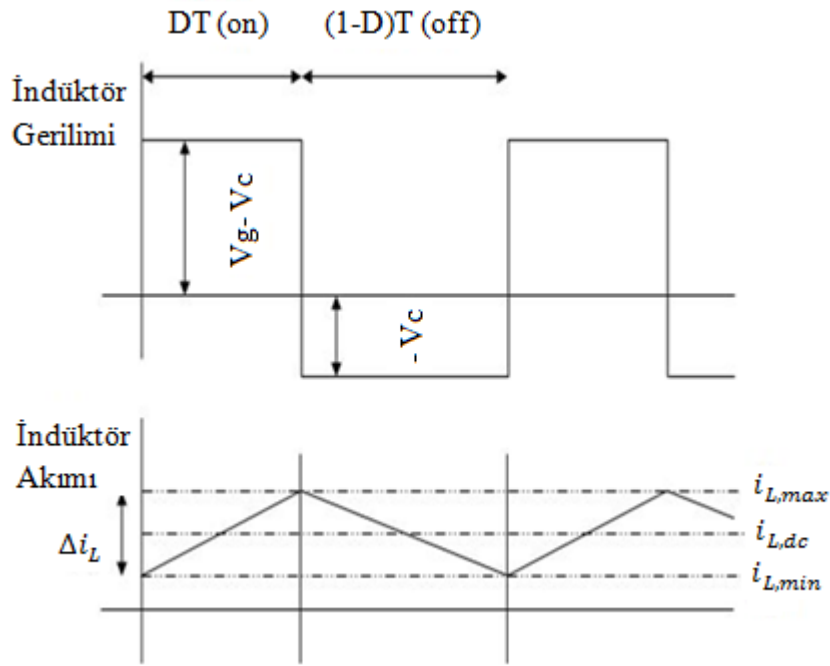
$$\frac{V_s}{L} DT + \Delta I_L = 0 \quad (2.14)$$

eşitliği elde edilir.

Çıkış gerilimi ise bir periyottaki akımın net değişiminin sıfır olduğu eşitliğin sadeleştirilmesiyle aşağıdaki gibi elde edilir.

$$V_o = \frac{V_s}{1-D} \quad (2.15)$$

D değeri $0 < D < 1$ aralığında değişmekte olup çıkış gerilimi giriş geriliminden yüksek olmaktadır. Bu yüzden bu devre yükseltici tip dönüştürücü olarak adlandırılır. Şekil 2.22’de bobin üzerindeki gerilim ve akım değişimleri verilmiştir.



Şekil 2.22 Bobin gerilimi ve akımı (İnt.Kyn.21).

2.17 Şebeke Bağlantılı İnverterler ve Temel Özellikleri

İnvertör, genel olarak doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) çeviren elektriksel bir güç dönüştürücüsü olarak tanımlanabilir. İnvertör çıkışında üretilen AC güç, kullanılan transformatörlere, anahtarlama ve kontrol devrelerine bağlı olarak herhangi bir gerilimde ve frekansta olabilir (İnt.Kyn.22).

Şebeke bağlantılı inverterler, fotovoltaik sistemin şebekeye bağlanabilmesi için gerekli olan şebekeyle paralel çalışabilen cihazlardır. Şebeke bağlantılı inverterlerin temel özellikleri aşağıda verilmiştir:

- Şebekeye bağlı inverterlerin şebekeye senkron olma, güneş pillerini maksimum güç noktasında çalıştırabilme ve şebekeye kontrollü olarak güç aktarabilme özelliklerinin olması gerekir.
- Ürettikleri alternatif akımdaki bozulmaların düşük seviyelerde olması (harmoniklerin yönetmeliklerde belirtilen sınırlar içinde olması) ve istenilen genlik ve frekansta alternatif kaynak sağlamaları gerekir.
- Güç faktörleri 1 olmalıdır.
- Şebekeye sinüs şeklinde akım verebilmelidir.
- Şebeke kesintisi olması durumunda şebeke etkileşimli inverter şebekeden ayrılmalıdır.
- Şebeke kesintisi olması durumunda, inverterin şebekeye enerji aktarımına devam etmesi şebekeye bağlı inverterlerde görülebilen büyük bir sorundur. Adalama olarak bilinen bu sorunu engellemek amacıyla şebekenin gerilim ve elektriksel parametreleri normal değerlerinin üzerinde veya altında iken, PV sistemin şebeke ile olan bağlantısını kesen yüksek ve düşük voltaj röleleri ile frekans röleleri kullanılır.
- Fotovoltaik santralin yeterli olmadığı durumlarda veya fotovoltaik santralden gelen giriş gücünün limit değerlerini aşması durumunda inverterin kendisini otomatik olarak devre dışı bırakması gerekir ve güneş ışınımının yeterli olduğu durumda şebekeye tekrar güç aktarımına başlaması gerekir.

Bunun yanında şebekeye bağlı inverterleri, şebeke bağlantılı akülü sistemler ve şebeke bağlantılı aküsüz sistemler olmak üzere 2 grupta inceleyebiliriz.

Şebeke bağlantılı akülü (akü yedeklemeli) sistemler için istenen özellikler; (Solar Energy International 2008)

- Bu tip sistemlerde AC kaynağını inverterden DC'ye çevirerek akü şarj edilebilmelidir.

- Güç merkezi olarak kullanılabilmelidir.
- Jeneratörü otomatik olarak açıp kapatabilmelidir.
- Koruma tertibatı olmalıdır.(su, toz vb. şeyler için)
- Akü seviyesi azaldığında AC yükleri kapatabilmelidir.

Şebeke bağlantılı aküsüz sistemlerde ise; (Solar Energy International 2008)

- Topraklama koruması olmalıdır.
- 50 Hz veya 60 Hz çalışma standartlarına göre üretilmelidir.
- AC güç çıktısı vermelidir.
- Maksimum güç noktası takibi özelliğine (MPPT) sahip olmalıdır.
- AC/DC koruması ve ayırıcısı olmalıdır.
- Çoğu şebeke bağlantılı inverterler, 75–600 V DC arasında çalıştıkları için bu gerilim aralığına göre fotovoltaik modüllerin paralel ve seri bağlantısı tasarlanmalıdır.
- İnverterler şebeke bağlantılı voltaj verdikleri için bu değerler şebeke voltajına göre 120V, 240V gibi değerlere göre üretilirler.

2.18 Güç Kalitesi ve Harmonikler

Güç kalitesi için çeşitli tanımlamalar yapılmakta olup kamusal dağıtım şirketleri güç kalitesini güvenilirlik olarak tanımlamaktadırlar. Bu dağıtım şirketleri sistemin % 99.98'inin güvenilir olduğunu gösteren istatistikleri ortaya koyarak enerji kalitesini somut olarak değerlendirirler. Yük ekipmanı üreticileri ise güç kaynağına ait karakteristiklerin, ekipmanın doğru ve kesin olarak çalışmasında yeterli olup olmadığına bakarak güç kalitesini tanımlarlar.

Bununla birlikte güç kalitesi, dayanak olarak müşterinin esas alındığı bir olay olduğu için akım, gerilim ve frekans büyüklüklerinde açıkça gözlemlenen sapmaların müşteri ekipmanlarında çalışma bozukluğu veya hata ile sonuçlanması şeklinde güç kalitesi problemi için genel bir tanımlama yapılabilir.

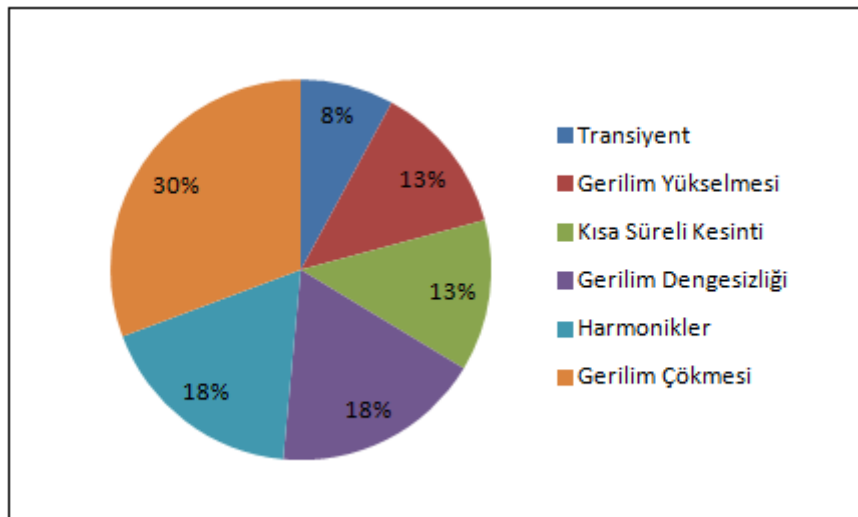
Kaliteli elektrik enerjisi demek, şebekenin tanımlanan bir noktasında gerilimin genlik ve frekansının anma değerlerini koruması ve gerilim dalga şeklinin sinüsoidal biçimde

bulunması demektir. Güç kalitesinde amaç, sabit şebeke frekansında; sabit ve sinüsoidal biçimli uç gerilimi elde etmek olup bu tür enerji pratikte bir takım zorluklarla ve önlemlerle sağlanabilir. Güç sistemine bağlanan bazı elemanlar ve bunların neden olduğu olaylar sebebiyle tam sinüsoidal olmayan dalgalar meydana gelebilmektedir.

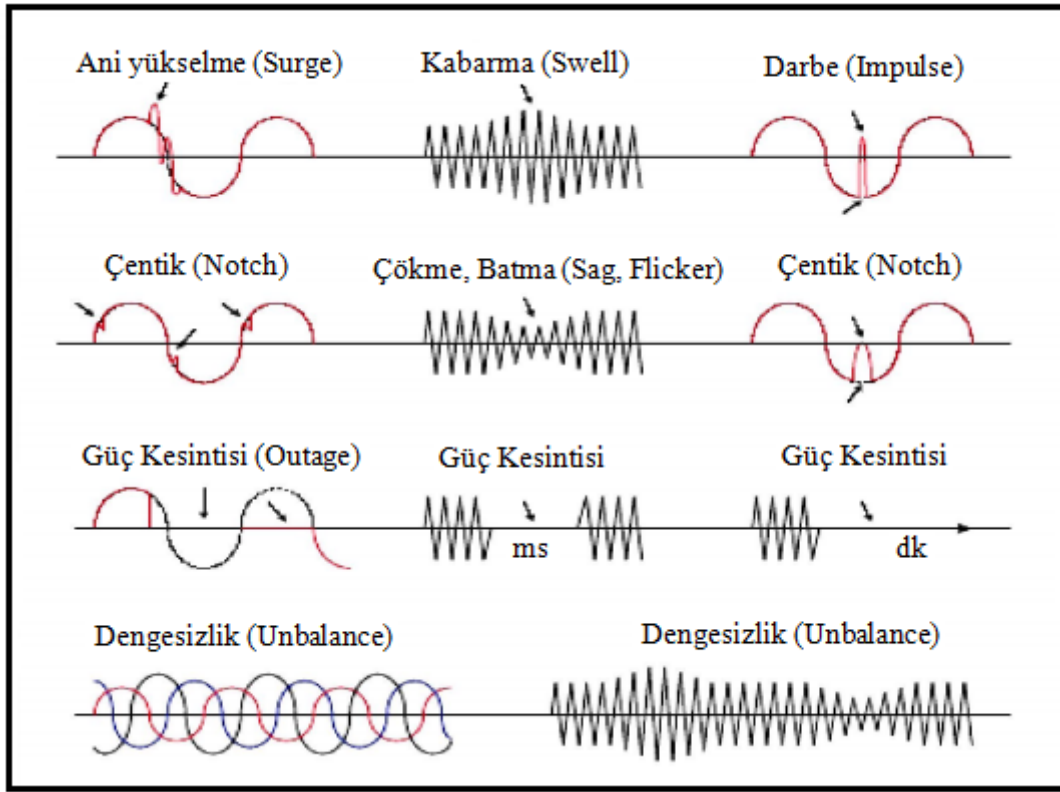
2.19 Güç Kalitesi Problemlerinin Genel Olarak Sınıflandırılması

Enerji kalitesinin bozulması durumunda yani, şebekenin tanımlanan bir noktasında gerilimin genlik ve frekansının anma değerlerini koruyamaması, gerilim dalga şeklinin sinüsten uzaklaşması, kesintiler, gerilim darbeleri, gerilimin doğru bileşen içermesi vs. durumlarında sistemde bozulmalar meydana gelir. Enerjinin kalitesiz olması sonucunda oluşan bu bozulmalar ise sistemde çeşitli problemlere sebep olur.

Bu problemler Şekil 2.23'te oluşum sıklığına bağlı olarak yüzde ile gösterilmiştir. Şekil 2.24'de ise enerji kalitesi problemlerinin şekilsel açıklaması gösterilmiştir. Enerji kalitesinde meydana gelecek bozulmalar enerji sürekliliğinin sağlanamamasına, cihaz arızalarına ve maddi kayıplara sebep olarak endüstriyi olumsuz etkiler (Günlü 2015).



Şekil 2.23 Elektrik enerji kalitesi problemleri (İnt.Kyn.23).



Şekil 2.24 Elektrik enerji kalitesi problemlerinin şekilsel açıklaması (Çelik 2008).

2.19.1 Geçici Değişimler (Olaylar)

Güç sistemlerindeki değişikliklerin analizinde istenmeyen ve gerçekte anlık bir olayı ifade etmek için kullanılır. Geçici olaylar genel olarak darbesel geçici olaylar ve salınımsal geçici olaylar olarak iki kategoriye ayrılabilir.

2.19.1.1 Darbesel Geçici Olaylar

Darbesel geçici olaylar, polarite bakımından tek yönlü olan akım, gerilim veya bunların her ikisinin sürekli hal koşulunda güç frekansında olmayan ani değişiklikleridir. Darbesel geçici olaylar genellikle yükselme veya alçalma süreleri ile ayırt edilirler.

Örneğin $1.4 \times 40 \mu s$ 3000V olarak ifade edilen darbesel geçici olayda, gerilimin sıfır değerinden 3000V olan tepe değerine $1,4 \mu s$ de çıktığı ve $40 \mu s$ sonunda da tepe değerinin yarısına düştüğü anlatılır. Örnek verecek olursak yıldırım olayları bir darbesel

geçici olaydır. Darbesel geçici olaylarda gerilim ve akımların frekansı yüksek olduğu için dalga biçimleri hızlı bir şekilde değişim gösterir.

2.19.1.2 Salınımsal Geçici Olaylar

Salınımsal geçici olay akımda, gerilimde veya her ikisinde meydana gelen ani ve polarite bakımından çift yönlü olan yani hem pozitif hem de negatif değerler alan değişikliklerdir. Salınımsal geçici olayların nedenlerinden biri de dağıtım sistemi üzerindeki güç hatlarının ve ekipmanın anahtarlanması olmaktadır. Kablo anahtarlaması, aynı frekans dizisi içinde salınımsal geçici olayların oluşmasına sebep verebilmektedir.

2.19.2 Uzun Süreli Gerilim Değişimleri

Uzun süreli gerilim değişimleri, bir dakikadan daha uzun bir süreç için güç frekansındaki efektif değer değişimleri olarak tanımlanabilir. Uzun süreli gerilim değişimleri düşük gerilim, aşırı gerilim ve kalıcı gerilim kesintisi şeklinde sınıflandırılabilir. Gerilim yükselmeleri ve gerilim azalmaları, sistem hatalarının bir sonucu olmayıp sistemdeki anahtarlama işlemleri ve yük değişimleri sonucunda meydana gelirler.

2.19.2.1 Aşırı Gerilim

AA gerilimin 1 dk' dan daha uzun bir süre için kaynak gerilim sınırının üzerindeki bir durum olup gerilim artmaları gibi, nominal gerilimin % 110'u aştığında meydana gelen rms gerilim değişimlerini ifade eder. Aşırı gerilime gerilim regülatörlerinin veya kapasitörlerin uygun olmayan ayarlanmaları vs. neden olur.

2.19.2.2 Düşük Gerilim

Düşük gerilim, AA gerilimin 1 dk' dan daha uzun bir süre boyunca güç frekansındaki efektif değerinin %90' nın altına düşmesidir. Devrenin aşırı yüklenmesi veya şebeke sisteminde oluşan gerilim azalmaları, gerilim düşmesine neden olan birer örnektir.

2.19.2.3 Kalıcı Gerilim Kesintisi

1 dakikadan daha uzun bir süre boyunca gerilimin efektif değerinin sıfıra düşmesidir. Kalıcı kesinti ifadesi servis dışı kalma anlamına gelmez. Servis dışı kalma terimi tanım olarak bir sistemdeki bir bileşenden beklenen işlevlerin yerine getirilememesidir. Kesinti terimi ise uzun periyotlar için gerilimin yok olması ile ilgilidir.

2.19.3 Kısa Süreli Gerilim Değişimleri

Bu kategorideki değişiklikler, oluşum sürelerine bağlı olarak ani, anlık ve geçici olmaktadır. Kısa süreli gerilim değişimleri, güç iletiminde kesik kesik kayıpların oluşmasından, yüksek başlangıç akımları gerektiren büyük yüklerin enerjilendirilmesinden veya hata şartlarının oluşmasından kaynaklanır. Kısa süreli gerilim değişimleri kesinti, azalmalar-salınımlar ve gerilim yükselmesi şeklinde sınıflandırılabilir.

2.19.3.1 Kesinti

Gerilim veya akımın bir periyottan daha uzun bir süre boyunca nominal değerinin % 10'unun altına düşmesidir. Genellikle, otomatik devre kesicisi gibi otomatik sistemlerin çalıştırılmasından, trafo ile generator arasındaki kilitleme düzeneğinin çalıştırılmasından veya hatların fazlarının tersine çevrilmesinden (enversör) kaynaklanır.

2.19.3.2 Azalmalar-Salınımlar

Bir azalma veya salınım olayı nominal gerilimin efektif değerinin 0.1 ve 0.9 pu değerler arasında veya güç frekansında 0.5 çevrimden 1 dakikaya varan sürelerde oluşan azalış olarak ifade edilir. Gerilim azalmaları genellikle büyük güçlü yüklerin veya büyük motorların çalışmaya başlamasıyla oluşur. Gerilim azalması sonucunda ise genellikle yüklerin özellikle motorların devreden çıktığı veya verimlerinin düştüğü gözlemlenir.

2.19.3.3 Gerilim Yükselmesi

Gerilim yükselmesi, efektif değer olarak gerilimde, güç frekansında 0.5 periyod ile bir dakika arasındaki bir süre boyunca 1.1 ve 1.8 pu aralığında bir değere yükselmesidir. Gerilim yükselmesi şebekede yükün azalması durumunda veya büyük kapasitörlerin devreye alınması durumunda oluşabilir. Gerilim yükselmesi sonucunda ise kontrol elemanlarının ve motor sürücülerinin olumsuz etkilendiği ve buna bağlı olarak da ömürlerinin azaldığı gözlemlenir.

2.19.4 Gerilim Dengesizliği

Simetrik bileşenler teorisine göre dengesiz bir sistem, pozitif, negatif ve sıfır bileşeni olarak üç dengeli sisteme indirgenir. Kusursuz dengeli bir sistemde, negatif ve sıfır bileşenler yoktur (Bonnett 1997). 3 fazlı bir sistem, faz gerilimlerinin efektif değeri veya ardışık fazlar arasındaki faz açılarının eşit olmaması durumunda dengesiz bir sistem olur. Her fazda, üç faz ortalama gerilim değerinden bir sapmanın olması ise gerilim dengesizliğini meydana getirir. Gerilim dengesizliği sonucunda 3 fazlı asenkron makinelerde aşırı ısınma olur ve bu da makinenin çalışma ömrünü azaltır. Makineler için uygun koruyucu cihazın montelenmesiyle üç fazın tamamında tek fazlı yüklerin dengelenmesiyle ve dikkatle bağlanmış LC yüklerin kullanılmasıyla (Steinmetz bağlantısı) gerilim dengesizliğinin yol açtığı sorunlar giderilebilir.

2.19.5 Dalga Şekli Bozulması

Dalga şekli bozulması, sapmanın spektrumsal olarak karakterize edilen güç frekansındaki ideal bir sinüs dalga şeklinden sürekli hal sapması olarak tanımlanır. Dalga şekli bozulmaları, doğru akım bileşeni, harmonikler, ara harmonikler, çentik etkisi ve gürültü olmak üzere 5 temel şekliyle karşımıza çıkar.

2.19.6 Gerilim Dalgalanmaları

Gerilim dalgalanmaları, anma geriliminin izin verilen 0.95-1.05 genlik değerleri içerisinde gerilimde oluşan sistematik değişiklikler olarak tanımlanır. Kaynak

makinaları ve ark fırınları gibi yük akımında meydana gelen ani değişimler gerilimde dalgalanmaya sebep olur.

2.19.7 Güç Frekansı Değişimleri

Şebeke frekansının nominal değerinden sapması frekans değişimi olarak tanımlanır. Frekanstaki değişimler, yük ve üretim arasındaki dinamik dengeden dolayı meydana gelir. PV santraller gibi kesikli ve değişken güç üreten birimlerin şebekede artması, frekans dalgalanmasını artırır; fakat diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla PV sistemler, şebekede daha az frekans dalgalanmasına sebep olur (Abamor 2016).

2.20 Harmonikler

AC güç sistemlerinde gerilim ve akım dalga biçimlerinin ideal şartlarda (sabit genlikte ve frekansta) sinüsoidal olması beklenir. Lineer olmayan elemanların akım ve gerilimleri tam sinüs şeklinde değildir. Bu yüzden devrede nonlineer elemanların veya nonsinüzoidal kaynakların bulunması durumunda veya bunların her ikisinin de bulunması durumunda harmonikler oluşur. Zamana göre değişen ve sinüsoidal olmayan akım ve gerilimler harmonik içeren akım ve gerilimler olarak tanımlanırken akım ve gerilimin dalga şeklinin nonsinüzoidal olmasına yol açan yüksek frekanslı bileşenler harmonik olarak tanımlanır (Dugan et al. 2002).

Harmonikler, elektrik tesislerindeki cihaz ve alıcılarda üretilip besleme hattı üzerinden şebekeye yayıldıkları için sadece üretildiği yeri değil, diğer tesisleri de etkilerler. Bunun sonucunda harmonikler, sistemde enerji kalitesinin düşmesine, cihazların arızalanmasına, koruma elemanlarının gereksiz açmalarına ve teçhizatlarda kayıpların oluşmasına yol açmaktadırlar.

Temel dalganın haricindeki sinüzoidal dalgalara “harmonik bileşen” adı verilmekte olup güç sistemindeki sinüsoidal dalganın simetrisinden dolayı 3., 5., 7.,11,... gibi tek harmonik bileşenleri bulunur. Harmonik bileşenler ve nonlineer dalga formu Şekil 2.25’te gösterilmiştir. Elektrik enerji kalitesinin tespiti için standart formüller belirlenmiş olup bu formüller aşağıda verildiği gibi ifade edilir. Toplam harmonik

bozulma gerilim ve akım sınır değerleri ise sırasıyla Çizelge 2.6 ve Çizelge 2.7’de verildiği gibidir.

Gerilim için toplam harmonik bozulma,

$$THD_V = \frac{1}{U_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} (U_n)^2 \right)^{1/2} \quad (2.16)$$

Akım için toplam harmonik bozulma,

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} (I_n)^2 \right)^{1/2} \quad (2.17)$$

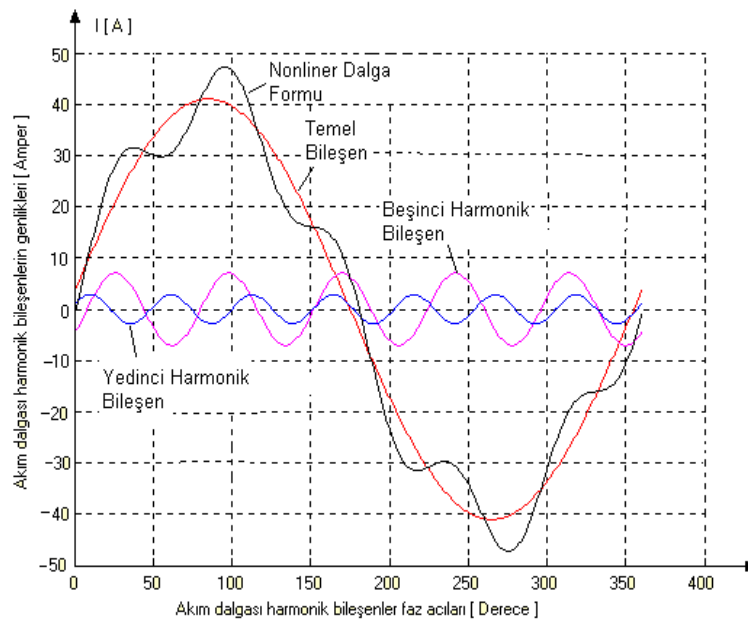
Akım değeri için bozulma faktörü,

$$DF_I = \frac{1}{I} \left(\sum_{n=2}^{\infty} (I_n)^2 \right)^{1/2} \quad (2.18)$$

Gerilim değeri için bozulma faktörü,

$$DF_V = \frac{1}{U} \left(\sum_{n=2}^{\infty} (U_n)^2 \right)^{1/2} \quad (2.19)$$

olarak ifade edilir.



Şekil 2.25 Harmonik bileşenler ve nonlineer dalga formu (İnt.Kyn.24).

Çizelge 2.6 IEEE-519 THD gerilim sınır değerleri.

Bara gerilimi	Maksimum harmonik komponent (%)	Tek maksimum THDV (%)
69 kV ve altı	3.0	5.0
115 kV-161 kV	1.5	2.5
161 kV üzeri	1.0	1.5

Çizelge 2.7 IEEE-519 THD akım sınır değerleri.

SCR= I_s / I_L	h<11	11-16	17-22	23-24	35<h	THD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	7.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

2.21 Harmonik Üreten Kaynaklar

Nonlinear aygıtlar, AC güç sistemine ait sinüsoidal gerilimde bozulmalar meydana getirdiği için bileşke gerilim dalga biçimi nonsinüzoidal bir hale gelir. Harmonik akımların sistem içerisinde akışına neden olan nonlinear aygıtlar aynı zamanda harmonik kaynaklar olarak da bilinir. Nonlinear aygıtlar ve nonlinear devreler, sinüsoidal eğrideki harmoniklerin başlıca nedeni olup bu aygıt ve devreler; alternatör, transformatör, statik dönüştürücüler (evirici, çevirici, doğrultucu, kıyıcı vb.), ark fırınları, kondansatör, elektrik motoru, güç filtresi, gaz boşalmalı lambalar, enerji nakil hatları, anahtarlamalı güç elemanları, statik Var kompanzatörleri, bilgisayarlar ve fotovoltaik sistemler şeklinde sıralanabilir (Shipp 1979).

2.22 Harmoniklerin Etkileri

Harmonik akımlar, jeneratörlerin, transformatörlerin ve hat reaktanslarının üzerinde gerilim düşümü meydana getirir. Bu gerilim düşümü ise harmonik akımların frekanslarının 50 Hz' in tam katları olmasından kaynaklanır. Meydana gelen gerilim düşümleri frekansı, şebeke gerilimi frekansından farklı olduğu için bu gerilim düşümlerinin temel şebeke geriliminin üzerine binmesi sonucu tam sinüs dalga

biçiminde bozulmalar olur (İnan 1999). Harmoniklerin, gerilim ve akım dalga şekillerini bozması enerji sistemlerinde çeşitli sorunlara neden olur.

2.22.1 Transformatörler Üzerindeki Etkileri

Transformatörler, harmoniklerden önemli ölçüde etkilenmekte olup akım ve gerilim harmoniklerinin her ikisi de transformatörlerde çeşitli sorunlar oluşturur. Harmonik akımlar bakır kayıplarının (I^2R) ve kaçak akı kayıplarının artmasına sebep olurlar. Harmonik gerilimler ise eddy ve histerezis akımlarından dolayı demir kayıpların artmasına ve yalıtım zorlanmalarına sebep olur (Arrillaga et al. 1997). Kayıpların ve ısınmanın artmasına bağlı olarak transformatörün performansı düşebilir. Diğer bir sorun ise harmoniklerin, güç transformatörü ile kompanzasyon kondansatörlerinin paralel rezonansa girmesine sebep olmasıdır. Ayrıca üçgen bağlı sargılarda sıfır bileşen akımların dolaşması da harmoniklerin, transformatörler üzerindeki etkilerinden biridir. Üçüncü harmonikler yani sıfır bileşenler, genlik olarak aynı fazdadır. Üç fazlı bir transformatörde mıknatıslanma akımının akışı da düşünülerek transformatör bağlantıları dikkatlice yapılmalıdır. Yıldız bağlı sargıda, yıldız noktası üçüncü harmonik akımların akışı için topraklanmalıdır. Üçgen bağlı sargılarda ise üçüncü harmonik akımlar üçgen sargıların içinde akar.

2.22.2 Döner Elektrik Makineleri Üzerindeki Etkileri

Harmonikler, alternatörlerde saf sinüs dalgası üretilmesini engeller. Bunun sonucunda harmonik kayıplar oluşur. Harmonikler, stator sargılarında, rotor devresinde, stator ve rotor saçlarında ek kayıplara yol açarak ısı kayıpları artırır ve aşırı ısınmalara neden olur. Harmoniklerin motorlar ve alternatörler üzerindeki diğer bir etkisi ise verimde olağan bir düşüş ve torkta bir azalmadır. Sinüzoidal olmayan gerilim uygulandığında motor veriminde ve momentinde oluşan düşüş, motorun gürültülü çalışmasına ve işletme ömrünün kısılmasına yol açar.

2.22.3 Kesici ve Sigortalar Üzerindeki Etkileri

Tepe gerilimine, akım ve gerilimin sıfır geçişlerine göre çalışan koruma sistemleri harmoniklerden çeşitli şekillerde etkilenirler. Kesiciler, akım sıfır noktasından geçerken açma yaparak kontakların fazla yüklenmesini engeller. Ancak akım sıfır noktasından geçerken harmonik akımlar sebebiyle toplamda sıfır olmaz. Bu yüzden kısa devre sırasında veya herhangi bir zamanda kesici devreyi açmak istediğinde kontakları zorlanır. Kontakların zorlanması sonucunda ısı kayıpları meydana gelir. Harmonik nedeniyle kesici ve şalterler, gerektiği yerde çalışamazlar ya da uygun olmayan yerde çalışırlar. Bunun yanında harmonik akımlar, kesici ve şalterlerde ısınmaya neden olurlar.

2.22.4 Kondansatörler Üzerindeki Etkileri

Gerilim harmoniklerinden dolayı kondansatörün gücüyle birlikte ısı zorlanma da artar (Carnovale and Eaton 2003). Frekansın artması durumunda, kondansatörlerde direnç düşeceğinden çekilen akımda artış olur. Bundan dolayı, kondansatör içeren sistemlerde rezonans olası bir hal alır. Rezonans olayları sonucunda oluşan aşırı gerilim ve akımlar, kondansatörde ısınmanın ve gerilim zorlanmalarının artmasına neden olur. Bu da kondansatörün ömrünü azaltır.

2.22.5 İletkenler Üzerindeki Etkileri

Şebeke iletkenleri ve güç kabloları üzerinde harmoniklerin etkileri transformatörlerde, motorlarda, alternatörlerde bulunan ısınma problemlerine benzer niteliktedir. Harmoniklerde frekans yüksek olduğu için iletken ve kablolar da direnç artar. Direncin artmasına bağlı olarak ısı kayıpları da artış olur. Daha yüksek frekanslarda deri etkisine bağlı olarak bakır kayıpları ve iletken empedansları artar. Bu da iletkenlerin akım taşıma kapasitelerinin düşmesine neden olur. Ayrıca harmonik gerilimler, dielektrik zorlanmayı artırarak kablonun kullanım ömrünü kısaltır. Aşırı gerilimlerden dolayı yalıtkan kablolar da delinme meydana gelebilir. Aynı zamanda arıza sayısını ve buna bağlı olarak onarım masraflarını artırır. Tek damarlı iletkenlerde deri etkisi daha

güçlü olduğu için iletkenler çok damarlı yapılarak deri etkisi mümkün olduğunca azaltılmaya çalışılır (Fehr 2004).

2.22.6 Rezonans Etkisi

Rezonans etkisi, harmoniklerin neden olduğu en büyük bozucu etkilerden biridir. Salınımlı bir sistemde, etki frekansının sistemin doğal frekansına eşit olması durumunda sistemdeki salınımların genliğinde sınırsız bir artış olur. Bunun sonucunda salınım genliği belli bir değerden sonra bütünlüğünü koruyamaz hale gelir ve bozulur. Meydana gelen bu olaya ise rezonans denir. Bir elektrik devresinde rezonans anında endüktif reaktans kapasitif reaktansa eşit olur. Endüktif reaktans artan frekansla artarken, kapasitif reaktans artan frekansla azalır. Rezonans olayı, seri ve paralel rezonans olmak üzere iki kısımda incelenir. Seri rezonanstaki, endüktif ve kapasitif reaktanslar birbirine eşit olduğu için sistemde yalnızca omik direnç kalır. Toplam empedans omik dirence göre büyük olduğu için sistemde aşırı akımlar oluşur. Paralel rezonans ise en çok karşılaşılan sorunlardan biridir ve bu rezonanstaki rezonans anında toplam empedans artış gösterir. Toplam empedansın artış göstermesinden dolayı da büyük gerilimler oluşur. Rezonans, güç sisteminde aşırı akım, aşırı gerilim gibi bazı sorunlara neden olabilir. Bunun yanı sıra sistemde çeşitli arıza ve hasarların oluşmasına da sebebiyet verebilir (IEEE 1992).

3. MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada, fotovoltaik sistem ile şebeke arasındaki senkronizasyon sürecini ve fotovoltaik sistemdeki inverterden kaynaklanan harmoniklerin etkisini gözlemleyebilmek için MATLAB/Simulink ortamında şebekeye bağlı bir fotovoltaik sistem modellenmiştir. Simülasyon ortamında yapılan bu çalışmayla, şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin daha verimli bir şekilde çalışması, harmoniklerin en aza indirilmesi ve fotovoltaik sistem ile şebekenin bir arada çalışma sürecinin simülasyon ortamında gösterilmesi amaçlanmıştır.

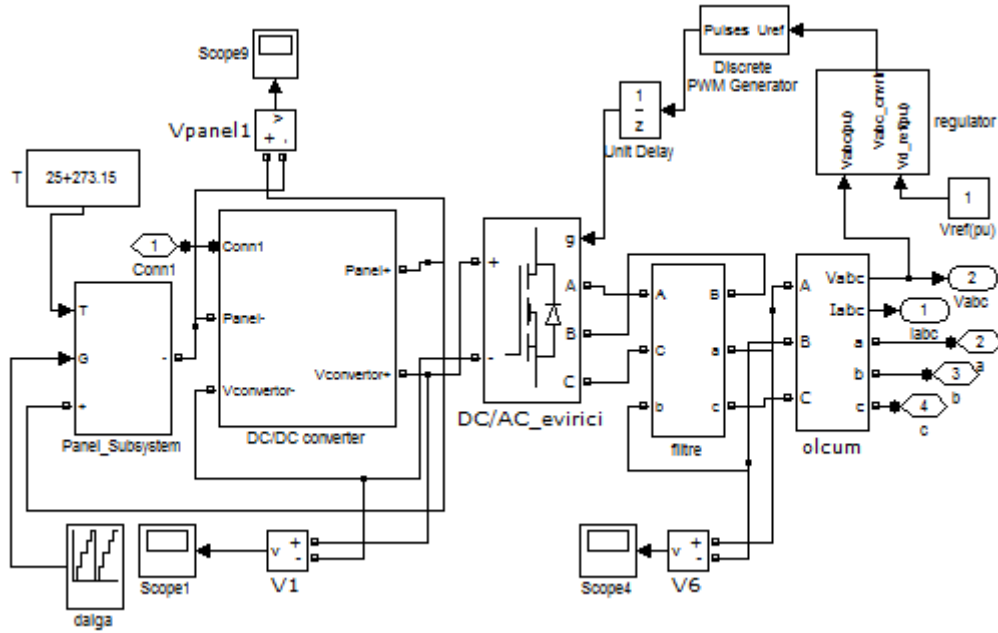
MATLAB/Simulink ortamında yapılan bu çalışmada fotovoltaik sisteme ve şebekeye ait her bir eleman ayrı ayrı modellenmiş olup bu elemanlar şekilleri ile gösterilmiştir. Modellemede kullanılan elemanlar detaylı bir şekilde açıklanmış ve bu elemanlarda kullanılan parametre değerlerinin hesaplamaları yapılmıştır.

Simülasyonu yapılan şebekeye bağlı fotovoltaik sistemde kullanılan elemanlar aşağıda verilmiştir.

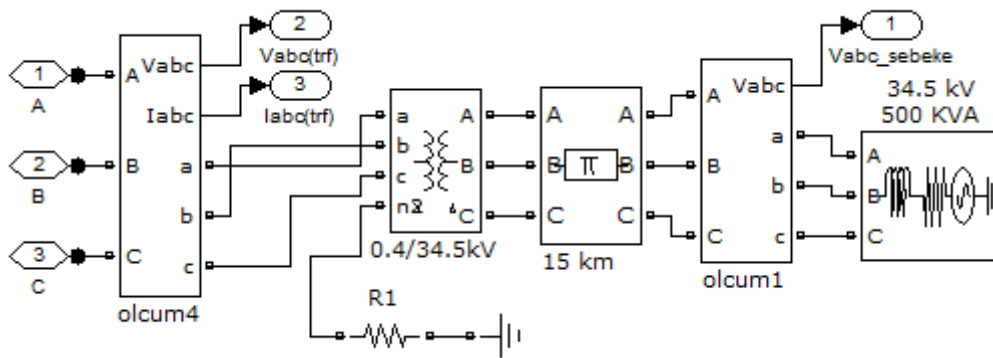
- Fotovoltaik modül
- DC/DC boost converter
- DC/AC evirici
- LCL filtre
- Gerilim ölçüm noktası
- Voltaj regülatörü
- PWM generator
- Ölçüm girişleri
- Yük
- Breaker (Kesici)

- 0.4kV/34.5kV transformatör
- 15km pi tipi hat
- Üç faz 34.5kV voltaj kaynağı
- Breaker (Kesici) kontrol noktası
- Frekans ve faz açısı ölçüm noktası
- Aktif güç ve reaktif güç ölçüm noktası

Simülasyonda kullanılan fotovoltaik sistem ve şebeke ise sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’ de verilmiştir. Şekillerde kullanılan elemanlar ve ölçüm alınan yerler de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Simülasyonda kullanılan fotovoltaik sistemin blok diyagramı.



Şekil 3.2 Simülasyonda kullanılan şebekenin blok diyagramı.

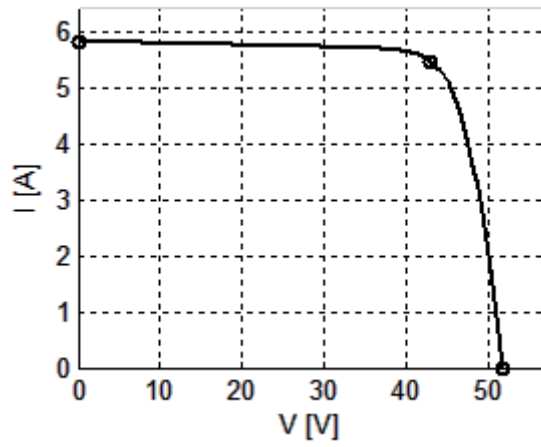
Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de gösterilen elemanların her biri bu bölümde ayrı ayrı ele alınarak anlatılmış, elemanların modellenme aşamaları ve parametre değerleri hakkında bilgi verilmiştir.

3.1 Fotovoltaik Modülün Modellenmesi ve Simülasyonu

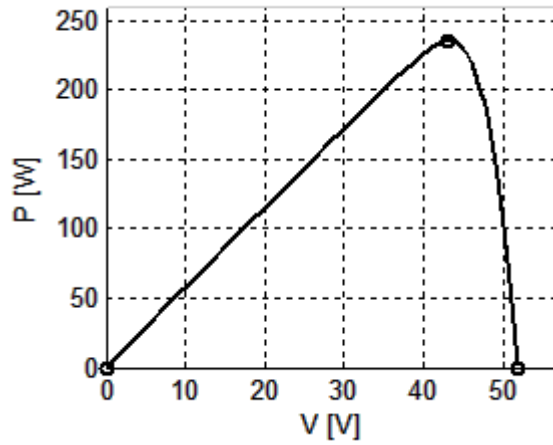
Simülasyondaki fotovoltaiik sistemde bulunan fotovoltaiik modülün eşdeğer devre tabanlı modellemesi, Villalva ve arkadaşlarının (İnt.Kyn.25) çalışması referans alınarak gerçekleştirilmiş olup modelleme Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Sistemdeki fotovoltaiik modül, Bölüm 2'de bahsedilen fotovoltaiik güneş pili eşdeğer devre modelinden ve bu model üzerine uygulanan denklemlerden (İkinci bölüm Denklem 2.1, 2.2) yararlanılarak oluşturulmuştur.

Fotovoltaik modül modelinin parametrelerini içinde barındıran ve bu parametrelerle ilgili hesaplamaların yapıldığı uygulama, ‘‘PV_Model_Method_3.m’’ uygulaması olup bu uygulamanın arayüzü Ek-1’de gösterildiği şekildedir. Simülasyondaki fotovoltaik modülün gücü, Ek-1’de gösterilen Nss (seri bağlı modül sayısı) ve Npp (paralel bağlı modül sayısı) değerleri değiştirilerek ayarlanabilmektedir. Gerçekleştirilen simülasyonda Nss ve Npp değerleri 10 değerinde seçilerek 7kW güce sahip bir fotovoltaik sistem oluşturulmuştur. Bu çalışmada Panasonic VBHN235SA06 paneli kullanılmış olup Ek 1’de görülen kısa devre akımı, açık devre gerilimi, MPP gerilim değeri, MPP akım değeri gibi veriler bu panelin etiketindeki değerlere aittir.

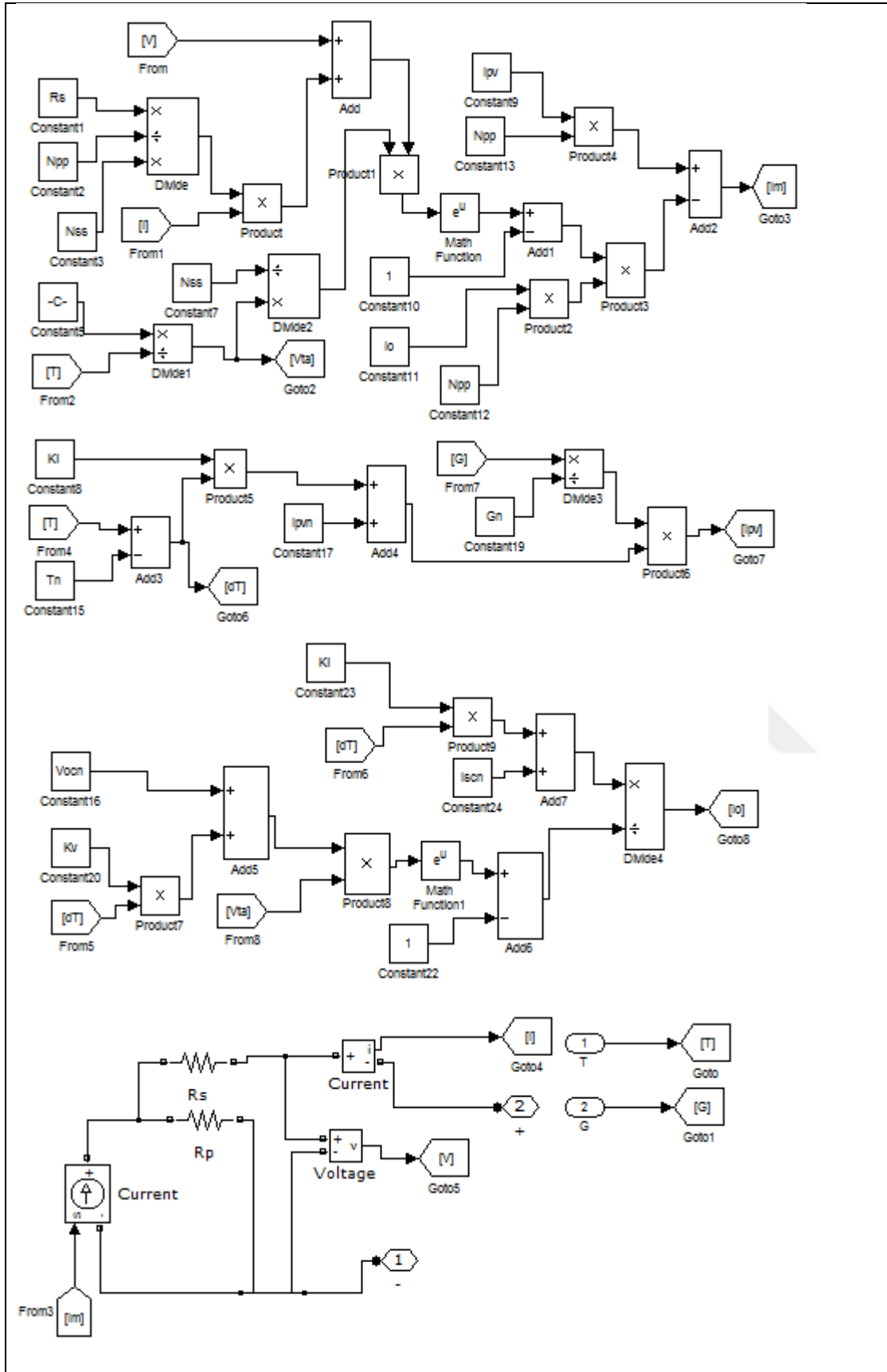
Fotovoltaik güneş pili eşdeğer devre modeline göre yapılan hesaplamalar ise Ek 2’de gösterilmiştir. Fotovoltaik modülün, verileri kullanması gerektiği için şebekeye bağlı fotovoltaik sistem simülasyonunu çalıştırmadan önce mutlaka “PV_Model_Method_3.m” uygulaması çalıştırılmalıdır. Uygulama çalıştırıldıktan sonra veriler, fotovoltaik modüle aktarılmış olur. Fotovoltaik modüle aktarılan ve Matlab ara yüzüne transfer edilen veriler, Ek 3’te gösterilmiştir. Şekil 3.3’te fotovoltaik panele ait Akım (I)–Gerilim (V) grafiği gösterilmiş olup Şekil 3.4’ te ise fotovoltaik panele ait Güç (P)–Gerilim(V) grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Fotovoltaik panelin I–V grafiği.



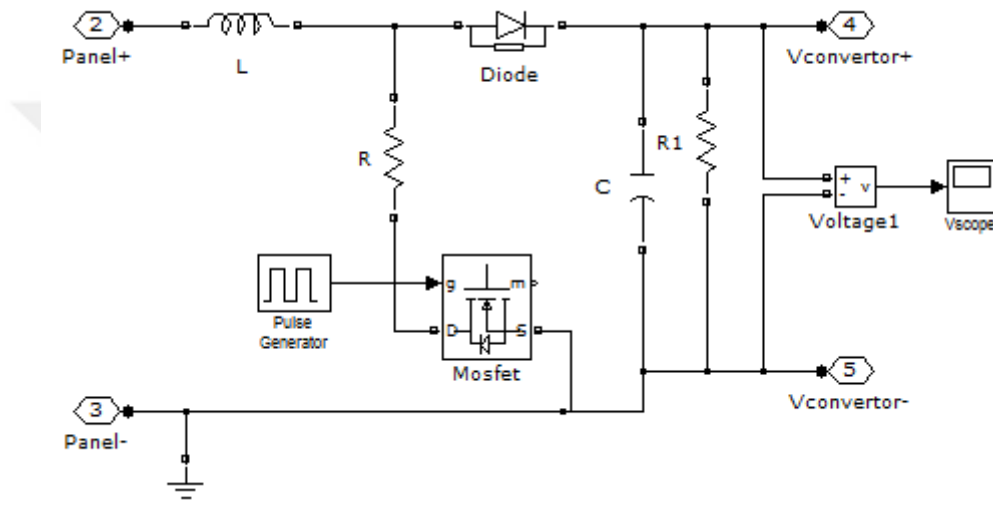
Şekil 3.4 Fotovoltaik panelin P–V grafiği.



Şekil 3.5 Fotovoltaik modülün eşdeğer devre tabanlı modellenmesi.

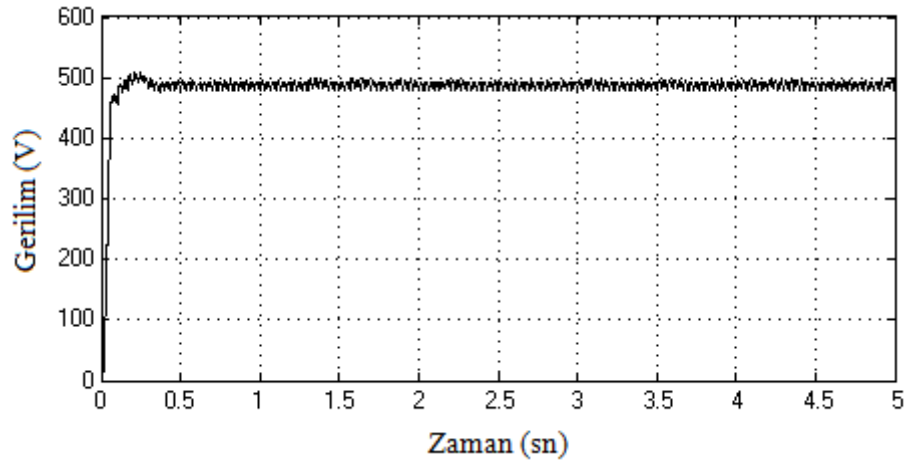
3.2 DC/DC Boost Konverterin Modellenmesi ve Simülasyonu

DC/DC boost konverter hakkındaki bilgiler Bölüm 2’de detaylı olarak verilmişti. Boost konverter, şebekeye bağlı fotovoltaik sistem simülasyonunda fotovoltaik modül çıkışındaki DC voltajı yükseltmek amacıyla modül çıkışında, DC/AC inverter girişinde kullanılmıştır. Şekil 3.6’da görüldüğü gibi boost konverter; indüktör, diyot, mosfet, pulse generator, direnç ve kondansatörden oluşmaktadır.

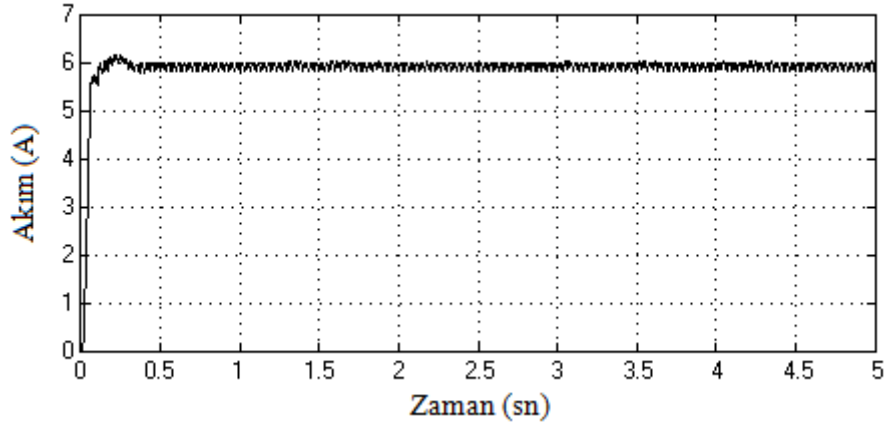


Şekil 3.6 Simülasyonda kullanılan DC/DC boost konverter bloğunun iç yapısı.

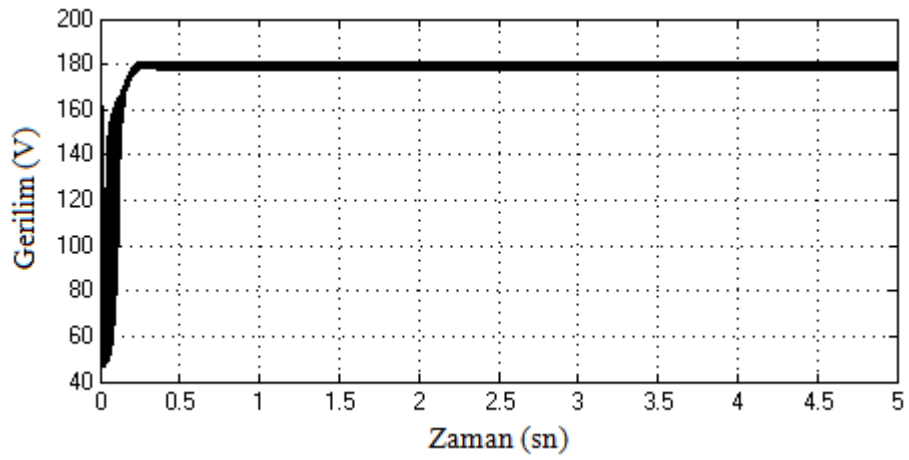
Matlab/Simulink simülasyonunda elde edilen boost konverter çıkışındaki, diğer bir ifadeyle inverter girişindeki DC işaretin zamana bağlı değişim eğrisi Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Fotovoltaik modül çıkışındaki gerilim 180V olup bu değer, boost konverter kullanılarak 481V’a yükseltilmiştir. Fotovoltaik modül çıkışındaki akım değeri 57.8A, boost konverterdeki yük direncinden geçen akım değeri ise 5.83A olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.7 Boost konverter çıkışındaki DC voltajın zamana göre değişimi.



Şekil 3.8 Boost konverter çıkışındaki (yükteki) akımın değeri.



Şekil 3.9 Boost konverter girişindeki DC voltajın zamana göre değişimi.

Boost konverter devresinde kullanılan elemanların değerleri, indüktör ve kondansatör değeri hesaplamaları, seçilen kondansatörün değeri ve seçilen indüktörün değeri aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

3.2.1 DC/DC Boost Konverterde İndüktör Seçimi

İndüktör değerinin hesaplandığı 3.3 denklemi, ortalama bobin akımının hesaplandığı 3.1 denkleminde ve yükten geçen akımın hesaplandığı 3.2 denkleminde elde edilmiştir (Megep 2013).

$$I_{ort} = \frac{D.V_{giriş}}{2.L.f} + I_{min} \quad (3.1)$$

$$I_o = \frac{D.(1-D).V_{giriş}}{2.L.f} + (1 - D).I_{min} \quad (3.2)$$

Yükten geçen akımın hesaplandığı 3.2 denkleminde, $I_{min} = 0$ için minimum L değeri;

$$L_{min} = \frac{D.(1-D).V_{giriş}.R}{2.f.V_o} \quad (3.3)$$

Denklemler ile hesaplanır. Sistem parametrelerini Denklem 3.3’de yerine koyduğumuzda, $L_{min} = 3\text{mH}$ yaklaşık olarak hesaplanmıştır. Simülasyonda ise kullanılan indüktör değeri 400mH’dir. Simülasyonda kullanılan parametrelerin değerleri Çizelge 3.1’de verildiği gibidir.

Çizelge 3.1 Sistem parametrelerinin değerleri.

Sistem parametreleri	Parametreye ait değer
Çıkış voltajı (V_o)	481V
Giriş voltajı ($V_{giriş}$)	180V
Anahtarlama periyodu (T)	0.0008 sn
Yüksek voltajda kalma süresi (D)	0.62

Çizelge 3.1 (Devam) Sistem parametrelerinin değerleri.

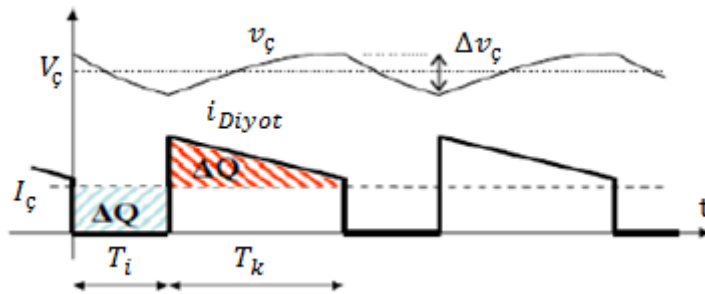
Yük direnci (R)	82.56 ohm
Yük akımı (I_o)	5.83A

3.2.2 DC/DC Boost Konverterde Kondansatör Seçimi

Minimum kondansatör (C_{min}) değerinin hesaplandığı formül Denklem 3.8’ de verilmiş olup, 3.8 denklemi Denklem 3.6 ve Denklem 3.7 den elde edilmiştir. Yüksek voltajda kalma süresinin (Duty Cycle) hesaplandığı formül ile frekansın hesaplandığı formül ise sırasıyla Denklem 3.4 ve Denklem 3.5’te verilmiştir (İnt.Kyn.26).

$$D = 1 - \frac{V_{Giriş}}{V_{Çıkış}} \quad (3.4)$$

$$T_a = T_i + T_k = 1/f \quad (3.5)$$



Şekil 3.10 Boost konverterde kondansatör gerilimindeki dalgalılık (İnt.Kyn.26).

Kondansatör gerilimi aynı zamanda çıkış gerilimi olup, Şekil 3.10’da gösterildiği gibi dalgalanır. Şekil 3.10’da diyot akımı (i_{Diyot}) ortalamasının ($I_ç$) üstündeki veya altındaki ΔQ yük alanları eşit olup, buradan kondansatör değeri Denklem 3.8’de verildiği gibi hesaplanır (İnt.Kyn.26).

$$\Delta Q = T_i \cdot I_ç = D \cdot T_a \cdot I_ç \quad (3.6)$$

$$\Delta V_o = \frac{1}{C} \int (i_{Diyot} - I_{\zeta}) dt = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{D \cdot T_a \cdot I_{\zeta}}{C} = \frac{D \cdot T_a \cdot V_o}{R_y \cdot C} \quad (3.7)$$

$$C_{Min} = \frac{D \cdot V_o}{R_y \cdot \Delta V_o \cdot f_s} \quad (3.8)$$

Sistem parametrelerini Denklem 3.8’de yerlerine koyduğumuzda, $\Delta V_o = 10V$ da olmasını sağlayan minimum kondansatör değeri $C_{min} = 289\mu F$ olarak hesaplanır. Simülasyonda ise $1600\mu F$ değerinde bir kondansatör kullanılmıştır.

3.2.3 Pulse Generatörün Modellenmesi ve Simülasyonu

Pulse generatör, boost konverterdeki mosfetin anahtarlamasını sağlar ve düzenli aralıklarla kare dalga üretir. Simülasyonda pulse generatörün parametreleri ve bu parametrelere ait değerler Ek 4’te gösterilmiştir.

Ek 4’te görüldüğü gibi pulse generatör için simülasyonda seçilen parametreler ve bu parametrelere ait değerler:

Pulse Tipi: Zaman Eksenli

Pulse Zamanı: Simülasyon Zamanı

Genlik: 10

Periyot: 0.0008sn

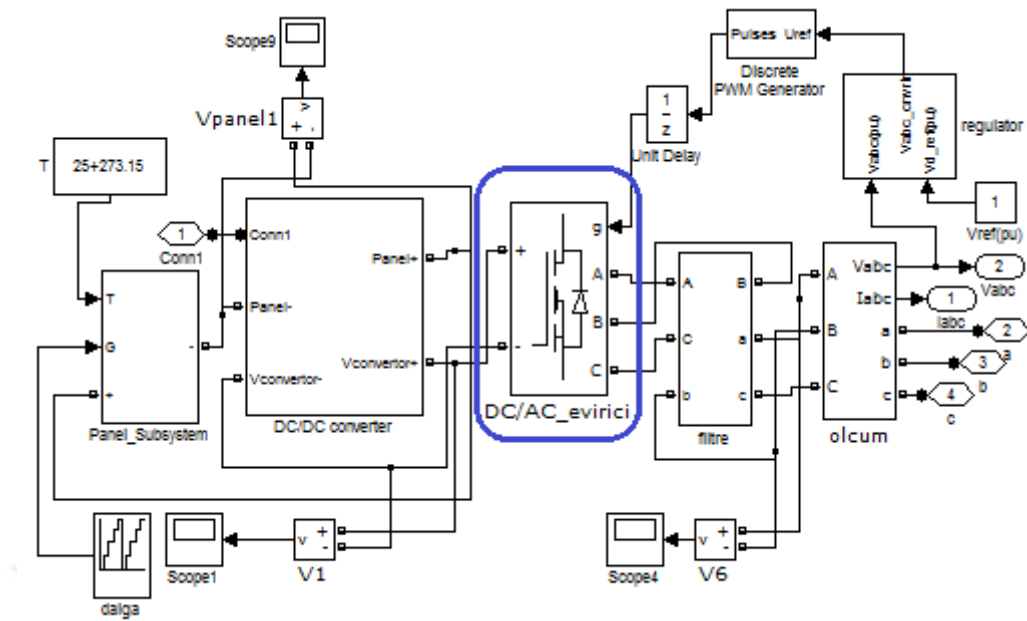
Pulse Genişliği: 62 (periyodun %62’si)

Faz Gecikmesi: 0

olarak belirlenmiş ve simülasyon bu parametrelerle gerçekleştirilmiştir.

3.3 DC/AC Eviricinin Modellenmesi ve Simülasyonu

Simülasyondaki DC/AC evirici, boost konverterin çıkışındaki DC işareti 3 faz AC işarete çevirmek ve şebekeye işareti AC olarak aktarmak amacıyla kullanılmıştır. Şekil 3.11’de şebekeye bağlı fotovoltaik sistem simülasyonunda kullanılan DC/AC evirici işaretlenerek gösterilmiştir.

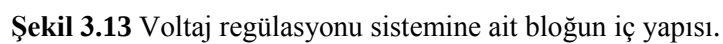


Şekil 3.11 Simülasyonda kullanılan DC/AC eviricinin blok diyagramı.

Sistem 3 fazlı olduğu için köprü kol sayısı 3 olarak seçilmiştir. Sistemdeki faz sayısına göre 1 veya 2 değerleri de köprü kol sayısı olarak kullanılabilir. Snubber rezistans (R_s) değeri 100 Ohms olarak belirlenmiş olup Snubber kapasitans (C_s) değeri ise rezistifliğin sağlanması amacıyla inf olarak belirlenmiştir. DC/AC eviricide güç elektroniği elemanlarından mosfet seçilmiş ve mosfet yardımıyla DC işaret AC işarete çevrilmiştir. R_{on} değeri ise seçili devrenin dahili rezistansının değeri olup bu değer 0.0001 Ohms olarak belirlenerek simülasyon gerçekleştirilmiştir.

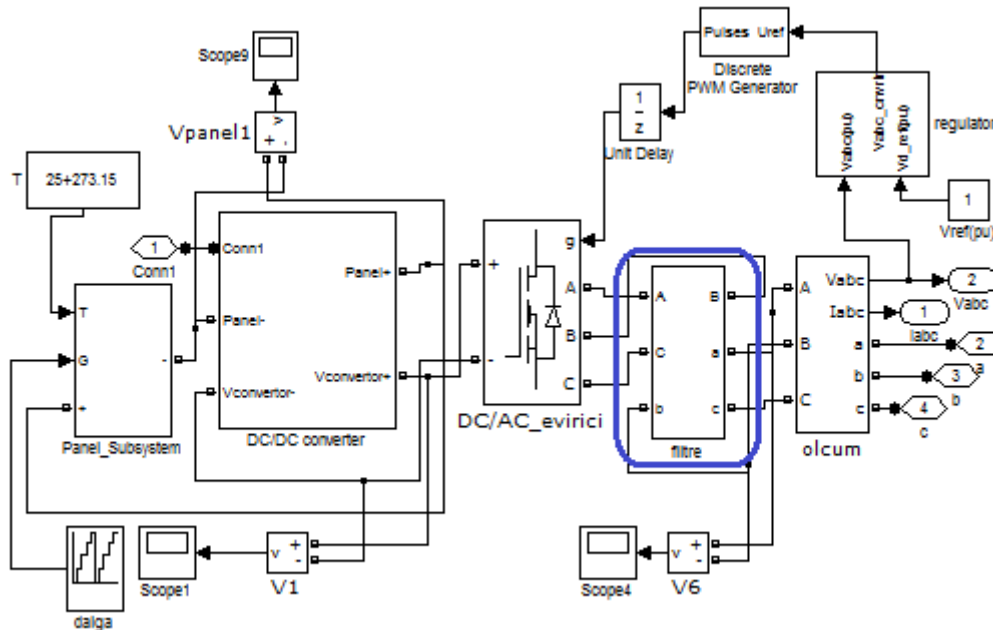
3.4 Voltaj Regülasyonu Sisteminin Modellenmesi ve Simülasyonu

Şebekeye bağlı fotovoltaiik sistem simülasyonunda kullanılan voltaj regülasyonu sistemi, Şekil 3.12’de işaretlenerek gösterilmiştir. Şekil 3.12’deki voltaj regülatörü, iki giriş bir çıkıştan oluşmakta olup girişinde ölçüm noktasından alınan gerilim değeri ve referans gerilim değeri kullanılarak çıkışında PWM generatör yardımıyla oluşturulan üç adet sinyal içeren vektör elde edilmiştir. Voltaj regülatörü sisteminin iç yapısı ise Şekil 3.13’te gösterilmiştir. Şekil 3.13’te $V_{abc}(pu)$ değerinin abc/dq dönüşümü yapılarak V_d ve V_q değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler, PI denetleyici ile kontrol edildikten sonra kontrolör çıkışında tekrar dq/abc dönüşümü yapılarak darbe genişlik modülasyonu için referans gerilim işareti üretilmektedir. PLL (faz kilitlemeli çevrim) ile

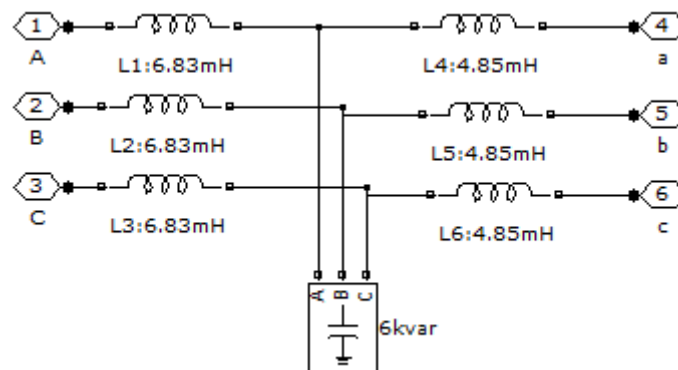


3.5 LCL Filtrenin Modellenmesi ve Simülasyonu

Şebekeye bağlı fotovoltaik sistem simülasyonunun filtre kısmı, Şekil 3.14'te işaretlenerek gösterilmiştir. Sistemde oluşabilecek harmonikleri en aza indirmek için kullanılan filtrenin, evirici çıkışına bağlantısı yapılarak simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda kullanılan filtrenin iç yapısı ise Şekil 3.15'te gösterildiği gibi olup LCL filtre modelinde sırasıyla 6.83mH ve 4.85mH değerine sahip indüktörler ile 6kVar'lık kondansatör kullanılmıştır. Ayrıca filtrenin 400V ve 50Hz'lik sistem parametrelerine göre ayarlaması yapılmıştır. Belirtilen parametrelerle tasarlanan LCL filtre ile sistemdeki harmonikler büyük oranda azaltılmış olup sistemin daha kaliteli bir şekilde çalışması sağlanmıştır.



Şekil 3.14 Simülasyonun filtre kısmının blok diyagramı.



Şekil 3.15 Simülasyonda kullanılan filtre bloğunun iç yapısı.

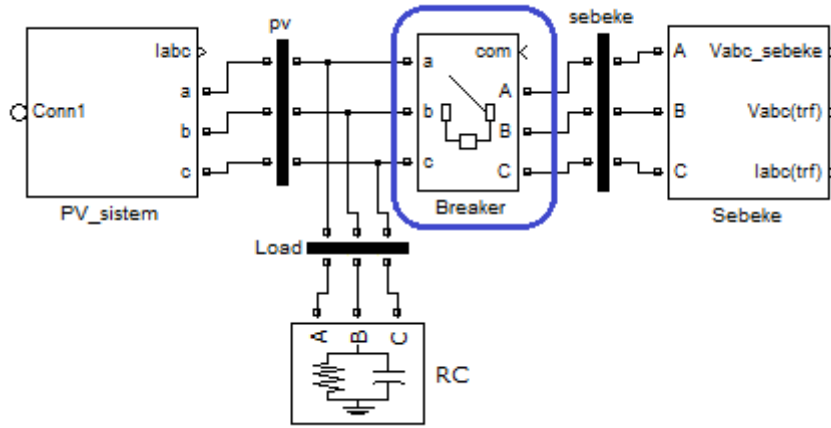
3.6 Yükün Modellenmesi ve Simülasyonu

Şebekeye bağlı fotovoltaiik sistem simülasyonunda kullanılan yük, RC tipi yük olup ekil 3.16’da görüldüğü gibidir. Fotovoltaiik sistem ile şebeke arasına bağlanan yükün, senkronizasyonun sağlandığı andan itibaren kesici kontrolüyle şebekeye bağlantısı sağlanmışır. Simülasyonda kullanılan RC tipi yük, 27kW aktif, 860Var kapasitif reaktif güce, 400V genliğe ve 50Hz frekansa sahip olup simülasyonda yk üzerinde gerilim, harmonik bozulma, gc, frekans gibi ölçümler yapılmışır.

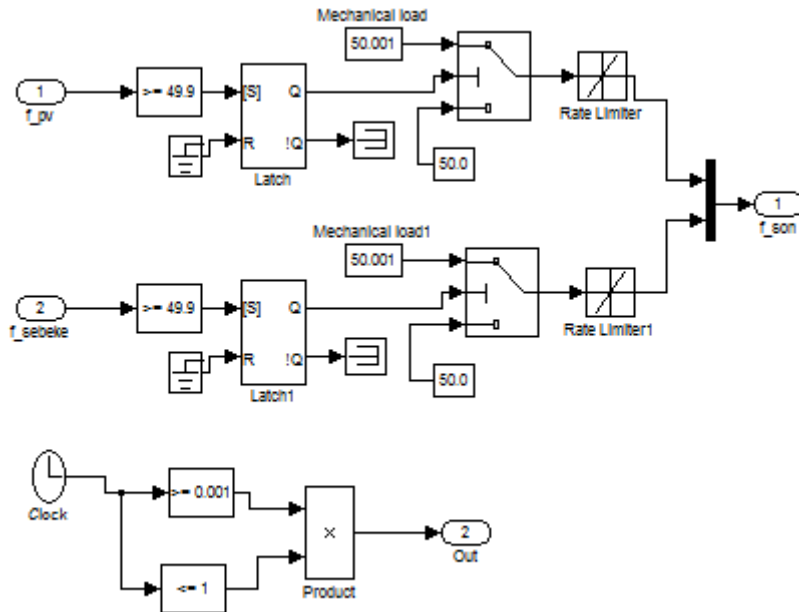
3.7 Kesicinin (Breaker) Modellenmesi ve Simülasyonu

c fazlı kesici bloğu, açma ve kapatma sürelerinin harici kontrol modu veya dahili kontrol modu üzerinden kontrol edilebildiği c fazlı bir devre kesicisi görevini görür. c fazlı kesici bloğunda, bloğun girişleri ve ıkışları arasına bağlanmış c adet kesici blok bulunur. Kesici bloğu, anahtarlama istediğimiz c fazlı elemana seri bağlayarak kullanabiliriz. Eğer kesici bloğu harici kontrol modunda ayarlanırsa, blok simgesinde bir kontrol girişi (com) görünür. Kontrol girişine bağlı kontrol sinyali, kesicileri açan ya da kapatan herhangi bir pozitif değer olmalıdır. Dahili kontrol modunda çalıştırılmak istenirse de geçiş süreleri bloğun iletişim kutusunda belirtilir. Ayrı ayrı c ayırıcı aynı sinyalle kontrol edilir.

Şebekeye bağlı fotovoltaiik sistem simülasyonunda, senkronizasyon gerçekleştiği anda fotovoltaiik sistem ile şebeke arasındaki bağlantıyı sağlamak amacıyla c fazlı bir kesici (breaker) kullanılmışır. Kesici harici kontrol modunda kullanılmış olup fotovoltaiik sistem frekansı ile şebeke frekansının diğer senkronizasyon parametrelerine (faz açısı, gerilim, faz sırası) göre daha geç sürede eşitlenmesi sebebiyle kesicinin kontrol sinyali frekans eşitliğine göre yapılmışır. Sistem senkronizasyonu 0.25’inci saniyeden itibaren gerçekleşmekte olup senkronizasyon anında fotovoltaiik sistem frekansı, faz açısı, gerilimi sırasıyla şebeke frekansı, faz açısı ve gerilimine eşit olmaktadır. Senkronizasyon ncesi açık konumda çalıştırılan kesici, senkronizasyon anında kapalı konumda alıştırılmışır. Simülasyonda kullanılan kesici ekil 3.16’ da gösterilmiş olup kesicinin kontrol girişine bağlanan kontrol bloğu ise ekil 3.17’de gösterilmiştir.



Şekil 3.16 Simülasyonda kullanılan kesicinin (breaker) blok diyagramı.



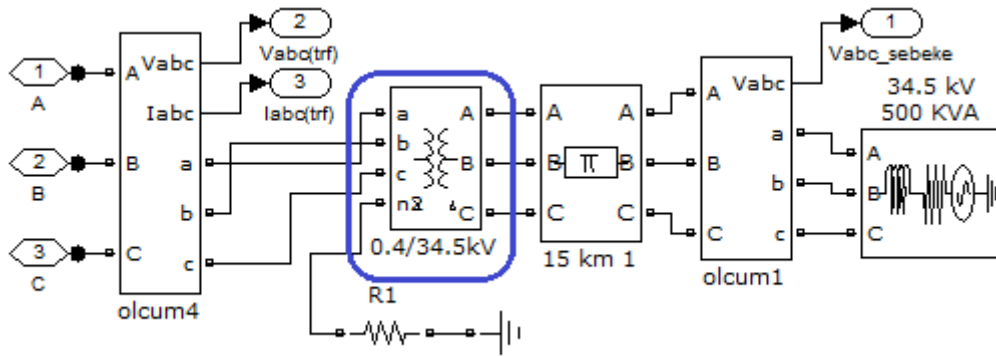
Şekil 3.17 Kesicinin kontrol girişine bağlanan kontrol bloğu.

3.8 400V/34.5kV Yıldız- Üçgen Bağlı Transformatörün Modellenmesi ve Simülasyonu

Simülasyonda DC/AC evirici çıkışında elde edilen 3 faz 400V AC gerilimin şebekeyle senkronizasyonunun sağlanması amacıyla şebeke tarafına 400V/34.5kV değerlerine sahip bir trafo yerleştirilmiştir. Şebeke tarafında kullanılan trafo, Şekil 3.18’de işaretlenerek gösterilmiştir. Trafonun primer tarafında 34.5kV gerilim mevcut olup üçgen bağlı sargı, sekonder tarafında ise 400V gerilim mevcut olup yıldız bağlı sargı kullanılmıştır. Üçgen-yıldız bağlı trafolar-da faz akımı hat akımından daha küçük olduğu için spirleri daha incedir. Üçgen bağlantıda şebekenin her iki fazı bir sargıya

uygulandığı için bir sargı üzerine düşen gerilim, şebeke gerilimi kadardır. İyi yalıtım yapılmaları gerektiği için çok yüksek gerilimlerde (154–380kV) tercih edilmezler.

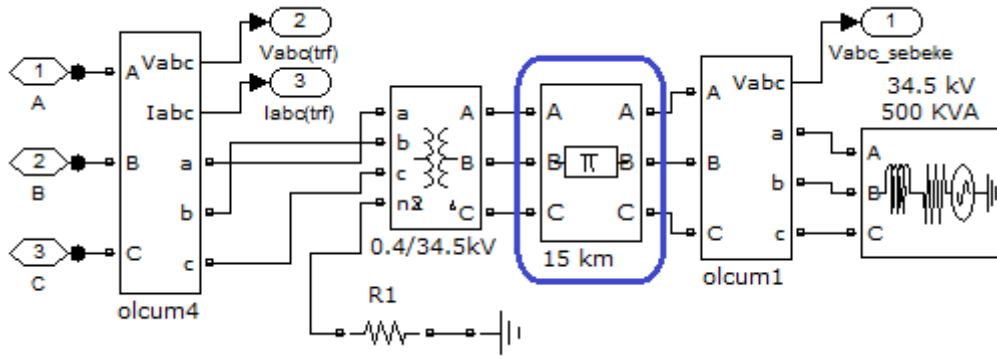
Tedaş şartnamelerinde dağıtım şebekelerinde kullanılan 250 KVA ve üzeri trafolar bu bağlantı grubunun kullanılması gerektiği açıkça belirtilmiştir. Fazlar arası dengesizliğin olduğu köy ve şehirlerdeki elektrik dağıtım şebekelerinde yaygın olarak kullanılır. Ayrıca üçgen-yıldız bağlantı grubunda harmoniklerin primerde yok edilmesi ve sekonderde nötr hattının topraklanabilmesi avantajları arasında gösterilebilir. Simülasyonda kullanılan trafonun sargı ayarlaması Ek 6’da gösterilmiştir. Trafonun ayar parametreleri ise Ek 7’de gösterilmiş olup şekilden de görüleceği üzere 1000kVA nominal güçte, 50Hz frekansta, primerinde 34.5kV, sekonderinde 400V gerilim olan bir trafo tasarlanmıştır.



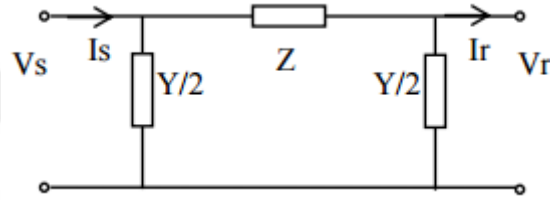
Şekil 3.18 Şebeke tarafında kullanılan trafonun blok diyagramı.

3.9 Hattın Modellenmesi ve Simülasyonu

Simülasyonda Pi tipi enerji nakil hattı kullanılmış olup bu hat Şekil 3.19’da işaretlenerek gösterilmiştir. Pi tipi enerji hatlarında kullanılan eşdeğer devre ise Şekil 3.20’de verildiği gibidir.



Şekil 3.19 Simülasyonda kullanılan π (Pi) tipi enerji hattının blok diyagramı.



Şekil 3.20 Nominal π devresi (İnt.Kyn.27).

Şekil 3.20’de verilen nominal π devresine ait denklemler aşağıda verilmiştir (İnt.Kyn.27).

$$Z = R + j\omega L \quad (3.9)$$

$$Y = G + j\omega C \quad (3.10)$$

G; hattın kaçak geçirgenliğini ifade etmekte olup hattın C eşdeğer kapasitesinden geçen akım çok daha büyük olduğu için G parametresi genellikle ihmal edilir.

$$V_s = (1 + Z \cdot Y/2) \cdot V_r + Z \cdot I_r \quad (3.11)$$

$$I_s = Y \cdot (1 + Z \cdot Y/4) \cdot V_r + (1 + Z \cdot Y/2) \cdot I_r \quad (3.12)$$

Simülasyonda kullanılan π (Pi) tipi enerji hattın Matlab/Simulink parametreleri Ek 8’de gösterilmiş olup değerler Matlab/Simulink enerji hattı simülasyonlarındaki değerlerin aynısı seçilerek simülasyon gerçekleştirilmiştir.

3.10 Gerilim Kaynağının Modellenmesi ve Simülasyonu

Simülasyonda kullanılan dahili R-L empedansında dengeli üç fazlı gerilim kaynağı Şekil 3.21’de işaretlenerek gösterilmiştir. Gerilim kaynağının;

Dahili faz - faz arası etkin gerilim değeri: 34.5kV

A fazının faz açısı: 0°

Kaynak frekansı: 50 Hz

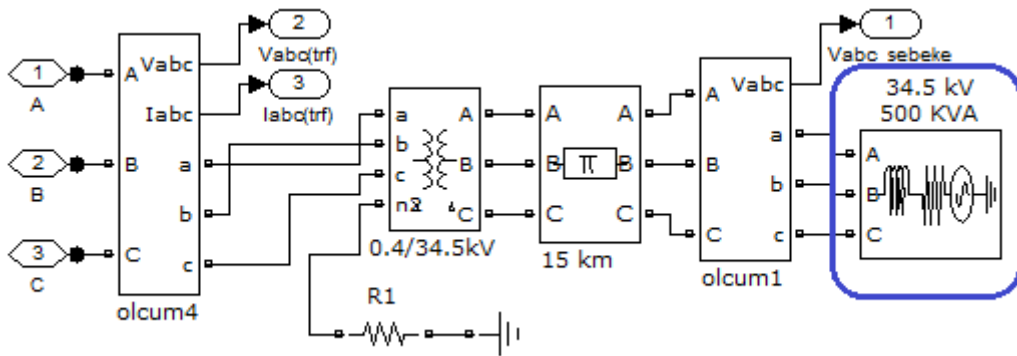
Dahili nötr topraklama üzerinden kaynak bağlantısı: Yg

Temel voltaj kısa devre seviyesi: 500KVA

Faz-faz arası temel voltajın etkin değeri: 34.5kV

X/R Oranı (Dahili kaynak empedansının kalite faktörü): 10

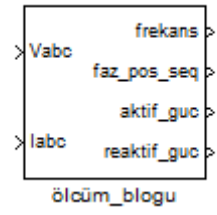
olarak belirlenip simülasyon gerçekleştirilmiştir. Gerilim kaynağının Matlab/Simulink parametreleri Ek 9’da verilmiştir.



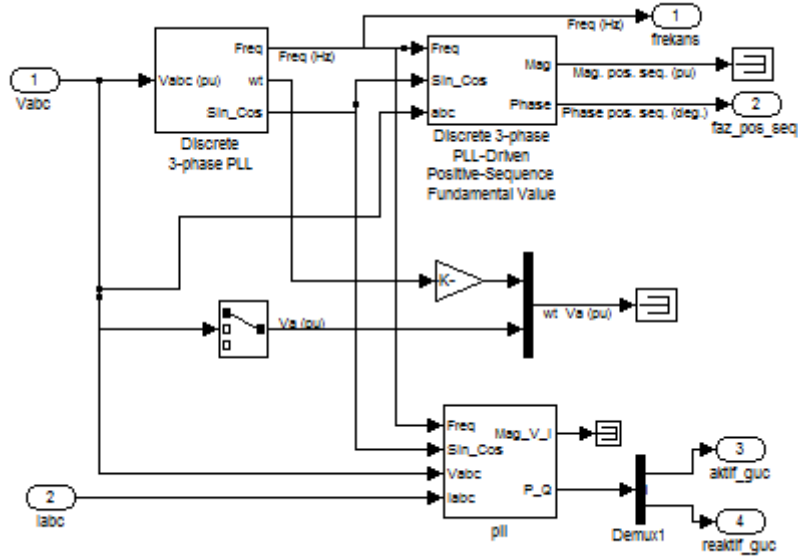
Şekil 3.21 Simülasyonda kullanılan gerilim kaynağının blok diyagramı.

3.11 Ölçüm Bloğunun Modellenmesi ve Simülasyonu

Şebekeye bağlı fotovoltaik sistem simülasyonunda fotovoltaik sisteme, yüke ve şebekeye ait frekans, faz açısı, aktif güç ve reaktif güç ölçümlerini yapmak için Şekil 3.22’deki ölçüm bloğu kullanılmış olup bu bloğun iç yapısı Şekil 3.23’te gösterilmiştir.

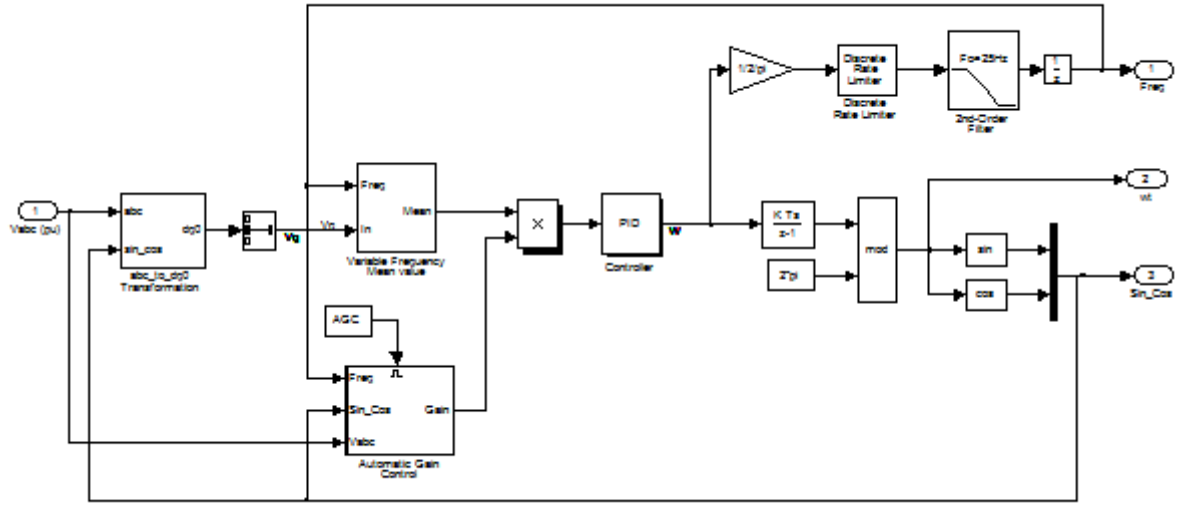


Şekil 3.22 Simülasyonda kullanılan ölçüm bloğu.

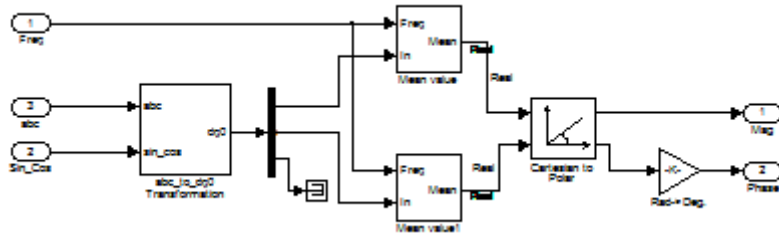


Şekil 3.23 Ölçüm bloğunun iç yapısı.

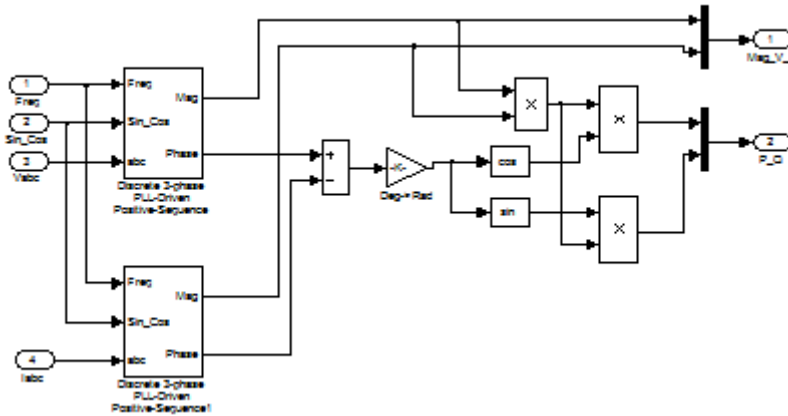
Ölçüm bloğu simülasyonda Şekil 3.28’de gösterildiği gibi fotovoltaik sisteme, yüke ve şebekeye ayrı ayrı bağlantı yapılarak kullanılmıştır. Ölçüm bloğunda frekans ölçümü için, faz açısı ölçümü için ve aktif güç-reaktif güç ölçümleri için kullanılan blokların iç yapıları sırasıyla Şekil 3.24, Şekil 3.25 ve Şekil 3.26’da verilmiştir.



Şekil 3.24 Ölçüm bloğunda frekans ölçümü için kullanılan bloğun iç yapısı.



Şekil 3.25 Ölçüm bloğunda faz açısı ölçümü için kullanılan bloğun iç yapısı.



Şekil 3.26 Ölçüm bloğunda güç ölçümleri için kullanılan bloğun iç yapısı.

Simülasyonda DC/DC konverter çıkışında, DC/AC konverter çıkışında, kesici çıkışında, trafo çıkışında ve hat sonunda gerilim ölçümleri yapılmış olup bu ölçümlerde ise ölçüm noktaları (Scope) kullanılmıştır.

3.12 Şebeke Bağlantılı PV Sistemin Modellenmesi ve Simülasyonu

Şebeke bağlantılı fotovoltaiik sistem simülasyonu, Matlab/Simulink ortamında yapılmış olup simülasyonda modüllerin seri ve paralel bağlanmaları sonucu oluşan 7kW güce sahip fotovoltaiik bir sistem tasarlanmış, bu sistemin çıkışına DC/DC boost konverter bağlantısı yapılarak fotovoltaiik sistemin çıkışındaki gerilim yükseltilmiştir. Daha sonra yükseltileen gerilimi, AC gerilim dalgasına dönüştürmek için DC/DC boost konverterin çıkışına DC/AC evirici bağlanmıştır.

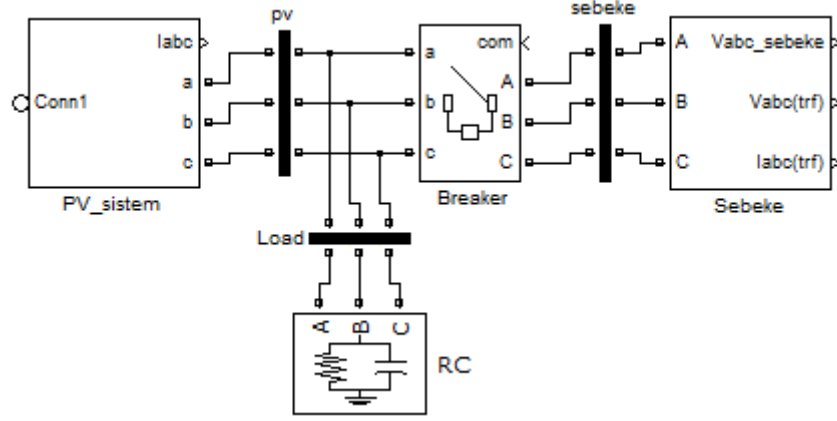
Fotovoltaiik sistemde oluşan harmonikleri azaltmak için de DC/AC evirici çıkışına bir filtre bağlanmıştır. Filtre bağlantısının ardından şebeke ve yüke bağlantı yapılarak fotovoltaiik sistemin şebekeye bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Filtre olarak LCL filtre kullanılmış olup filtre çıkışındaki yükün gerilim kararlılığı için de PWM regülatör kullanılmıştır.

Bu bölümde şebekeye bağlı fotovoltaiik sistem elemanlarının her birinin modellenmesi ayrı ayrı anlatılmış ve elemanların modellenmesinde kullanılan parametreler hakkında bilgi verilmiştir.

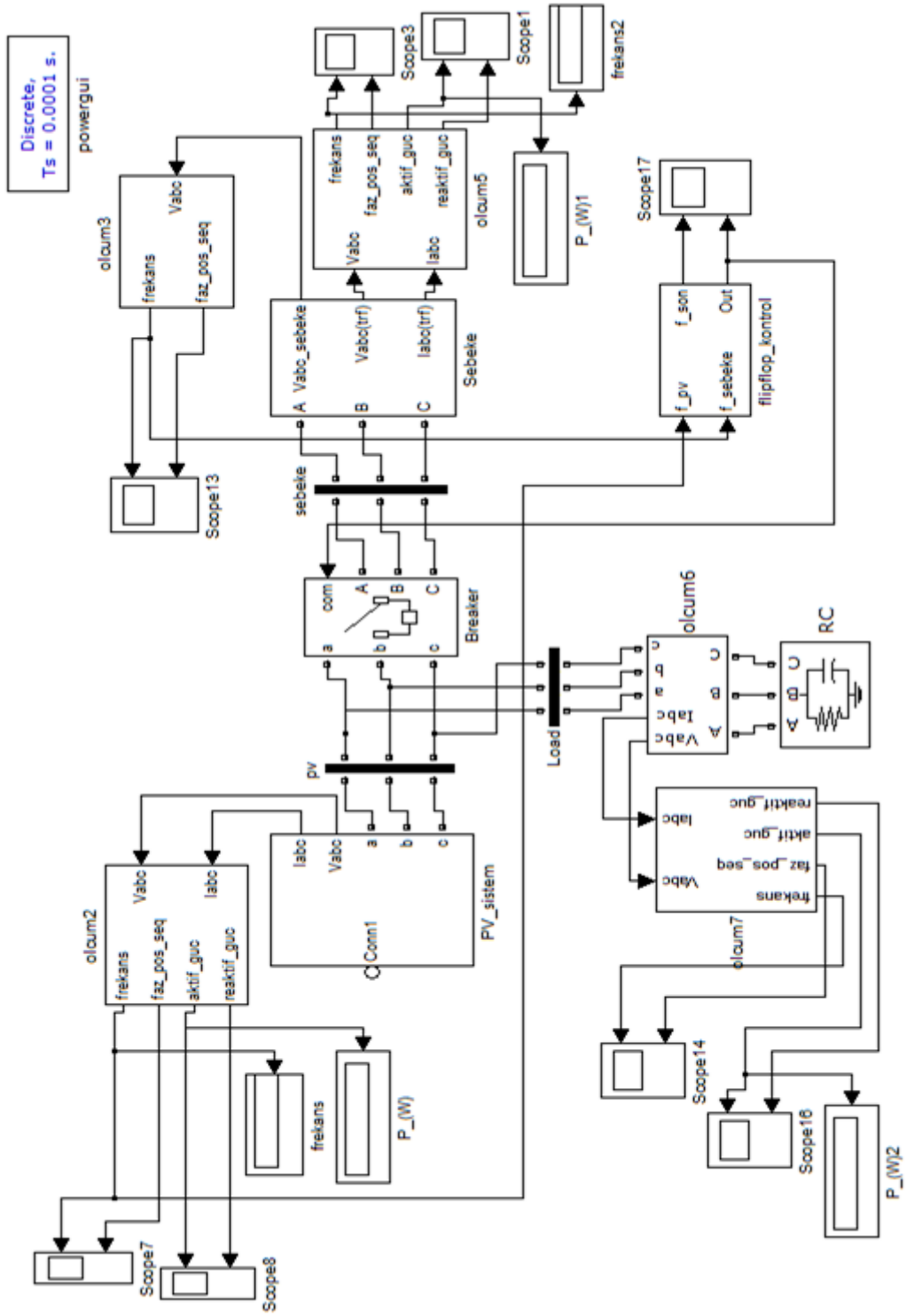
Bununla birlikte DC/DC boost konverter parametre değerlerinin hesaplaması yapılmış ve hesaplamada kullanılan formüller detaylı olarak açıklanmıştır. DC/DC boost konverter, DC/AC evirici, filtre, breaker (kesici), trafo ve hat sonunda oluşan gerilim dalga şekilleri ölçülerek analiz edilmiştir. Bu analizin ardından fotovoltaiik sistem ve şebeke üzerinde oluşan harmonikteki değişimler ölçülmüştür.

Ayrıca fotovoltaiik sistem ile şebeke arasındaki senkronizasyon süreci de incelenerek senkronizasyon sürecinde meydana gelen değişimler ve yükün şebekeye bağlanmasıyla meydana gelen değişimler incelenmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır. Şebekeye bağlı fotovoltaiik sistemin blok diyagramı Şekil 3.27’de gösterildiği gibidir. Şekil 3.27’de fotovoltaiik sistem ile şebeke arasına RC tipi bir yük bağlanmış olup şebekeden alınan enerji şekildeki kesici (breaker) ile kontrol altına alınmıştır. Şekil 3.27 sistemin blok diyagramı olup simülasyonda ölçümlerin yapıldığı ve sistemin incelendiği model Şekil 3.28’de verildiği gibidir. Şekil 3.28’de gösterildiği gibi gerçekleştirilen şebekeye bağlı

fotovoltaik sistem simülasyonu sonucu elde edilen değerler ve grafikler, Bölüm 4’te verilmiş ve ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



Şekil 3.27 Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin blok diyagramı.



Şekil 3.28 Şebekeye bağlı fotovoltaiik sistem simülasyonu.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Şebeke bağlantılı fotovoltaiik sistemin modelleme aşamaları ve simülasyonu Bölüm 3’te detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Şekil 3.28’de gösterilen şebekeye bağlı fotovoltaiik sistem simülasyonunda fotovoltaiik sisteme ve şebekeye ait her bir eleman ayrı ayrı modellenmiş olup fotovoltaiik sistemin ve şebekenin frekans, faz açısı, gerilim, güç ve harmonik ölçümleri yapılmıştır. Senkronizasyon kontrolü ve harmonik ölçümlerine ek olarak; senkronizasyon sürecinde fotovoltaiik sistem-şebeke arasındaki gerilim ve frekans dengelenme süreleri, sistemde yük yok iken şebekede meydana gelen gerilim artışları, senkronizasyon sonrasında fotovoltaiik sistem, yük ve şebekede ölçülen gerilim, güç ve frekans değerleri ayrı ayrı gösterilmiş ve incelenmiştir. Simülasyon sonunda ortaya çıkan grafikler ve ölçüm değerleri bu bölümde gösterilmiş olup elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir.

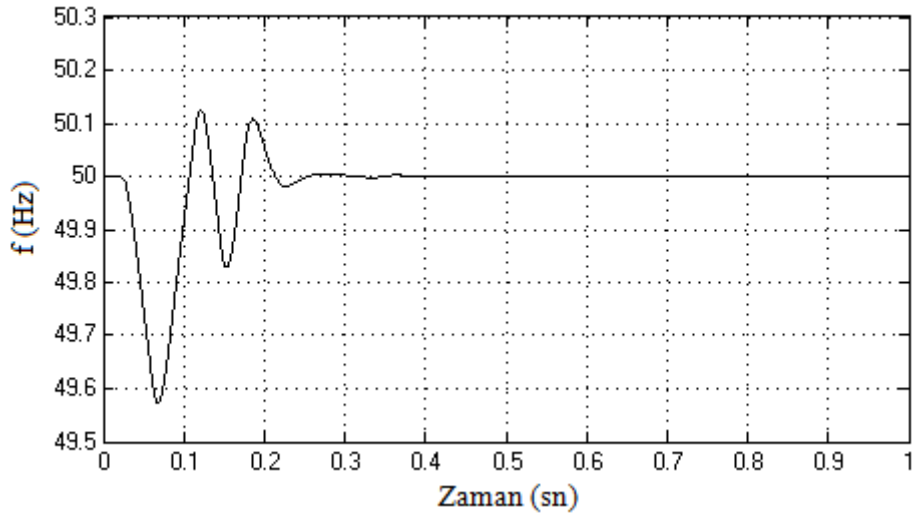
Şebekeye bağlı fotovoltaiik sistem simülasyonunda toplam 18 adet ölçüm yapılmış olup bu ölçümler aşağıda sırasıyla verilmiştir:

- PV sistemin frekans ölçümü
- PV sistemin faz açısı ölçümü
- Şebeke tarafının frekans ölçümü
- Şebeke tarafının faz açısı ölçümü
- Filtre öncesi DC/AC konverter çıkışındaki gerilim ölçümü
- Filtre öncesi gözüken gerilim dalgasının harmonik ölçümü
- Filtre sonrası harmoniklerin azaltılması sonucu oluşan gerilim ölçümü
- Filtre sonrası oluşan gerilim dalgasının harmonik ölçümü
- Breaker (Kesici) sonu oluşan gerilim ölçümü
- Trafo çıkışındaki gerilim ölçümü
- Hat başındaki gerilim dalgasının harmonik ölçümü

- Hat sonundaki gerilim dalgasının harmonik ölçümü
- PV sistemin aktif güç, reaktif güç ölçümü
- Yüken aktif güç, reaktif güç ölçümü
- Şebekenin aktif güç, reaktif güç ölçümü

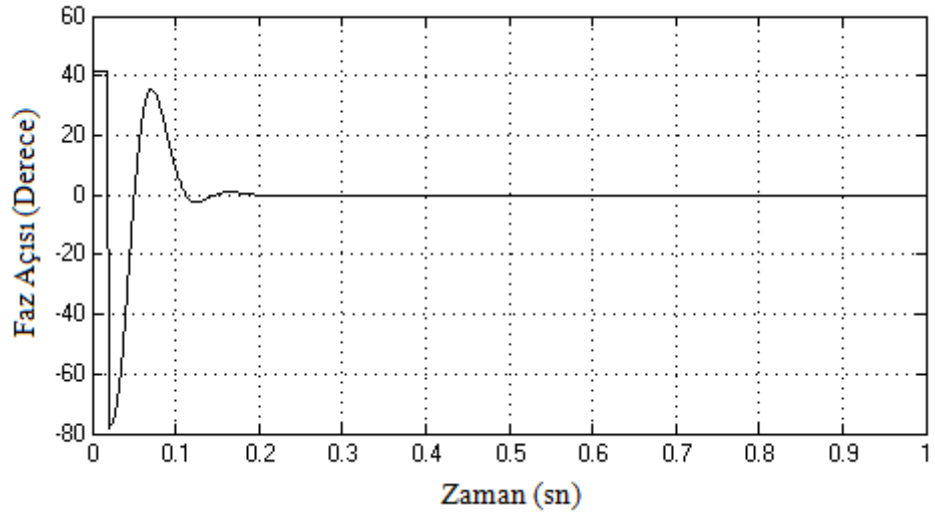
Yukarıda verilen ölçümler sonucunda elde edilen grafikler, aşağıda sırasıyla gösterilmiş ve her birinin açıklaması aşağıdaki gibi yapılmıştır.

Simülasyonda PV sistem ile şebekenin öncelikle senkronizasyonu gözlemlenmiş olup hem PV sistemin hem de şebekenin frekansı, faz derecesi ve gerilim değerleri ölçülmüştür. Şekil 4.1’de PV sistemin frekans-zaman grafiği verilmiş olup frekansın 50 Hz’ e sabitlendiği görülmektedir.



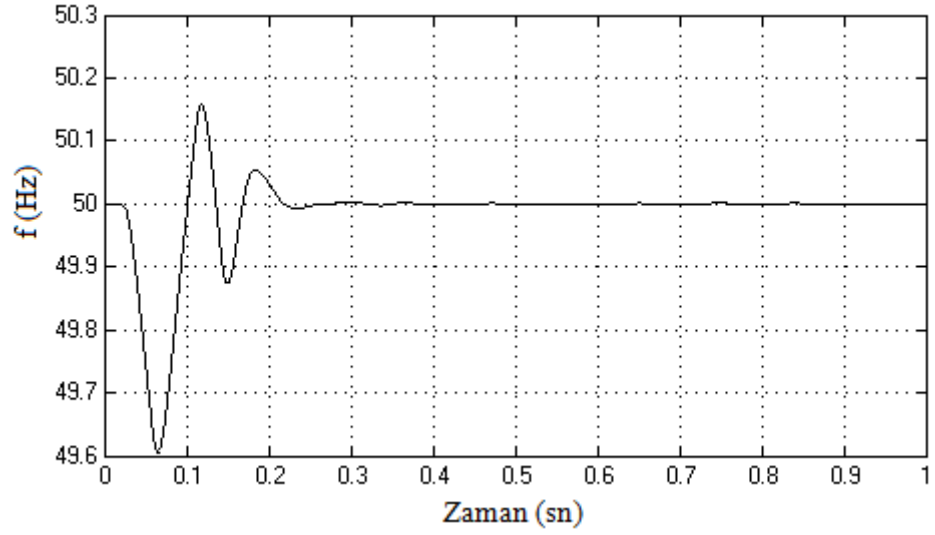
Şekil 4.1 PV sistemin frekans-zaman grafiği.

Şekil 4.2’de PV sistemin faz açısı-zaman grafiği verilmiş olup grafikten faz açısının 0 dereceye sabitlendiği görülmektedir. Frekans ile faz derecesinin aynı anda sabitlenmeye başladığı zaman ise 0.25’inci saniye olup 0.25’inci saniyeden sonra sürekli sabit kalmışlardır.

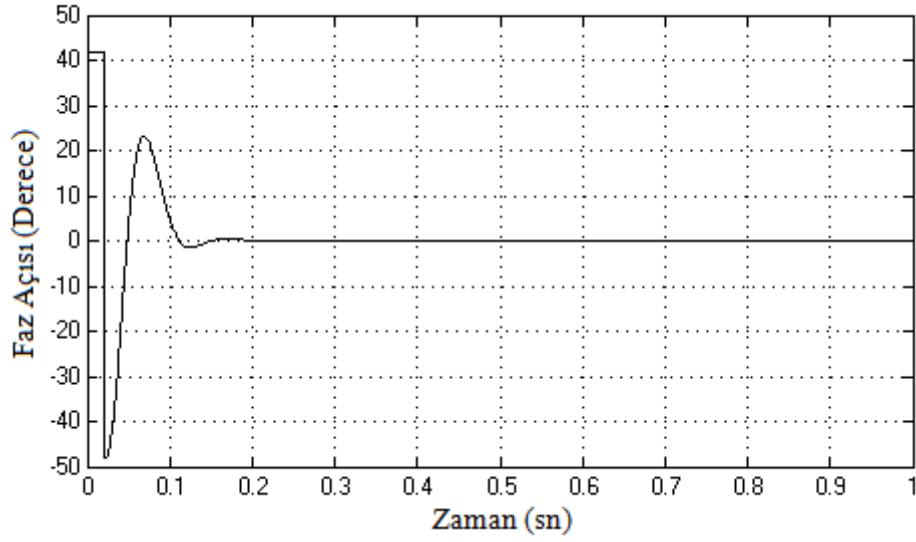


Şekil 4.2 PV sistemin faz açısı-zaman grafiği.

Şekil 4.3'te ise şebeke tarafının frekans-zaman grafiği verilmiş olup burada da PV sistemdeki gibi frekansın 50 Hz' e sabitlendiği görülmektedir.



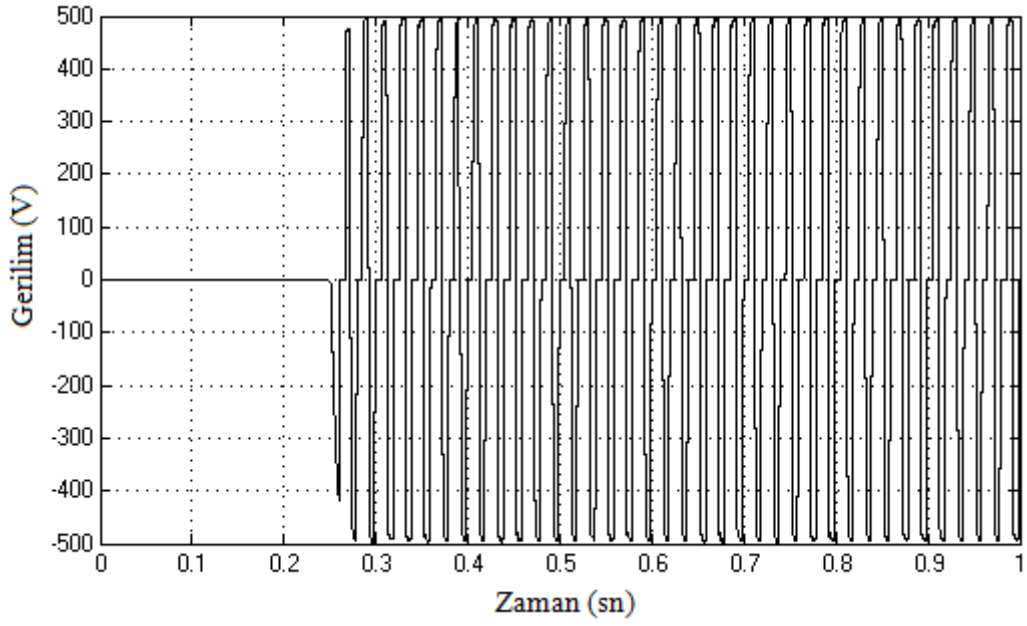
Şekil 4.3 Şebeke tarafının frekans-zaman grafiği.



Şekil 4.4 Şebeke tarafının faz açısı-zaman grafiği.

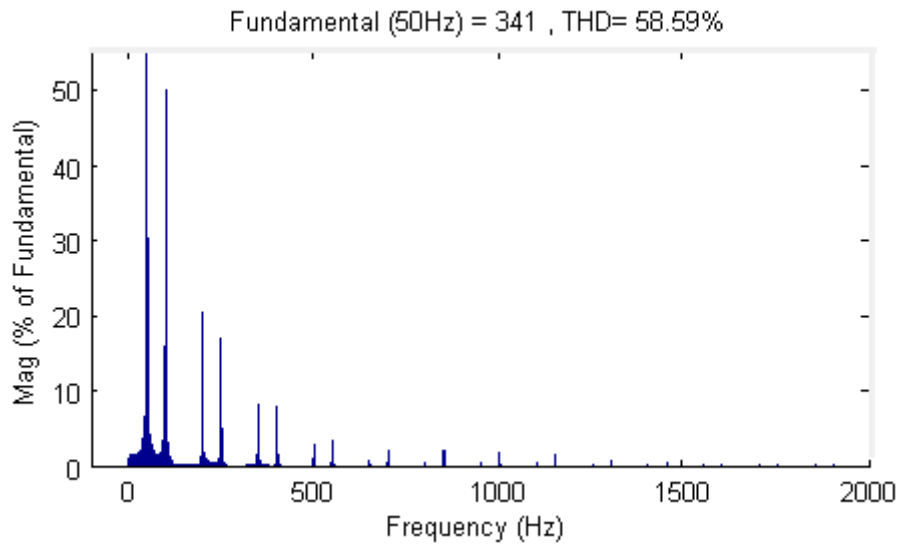
Şekil 4.4'te şebeke tarafının faz açısı-zaman grafiği verilmiş olup burada da PV sistemdeki gibi faz açısının 0 dereceye sabitlendiği görülmektedir. Frekans ile faz derecesinin aynı anda sabitlenmeye başladığı zaman ise şebeke tarafında da 0.25'inci saniye olup 0.25'inci saniyeden sonra sürekli sabit kalmışlardır.

Şebekeye bağlı sistemde frekans, faz ve gerilim değerleri 0.25'inci saniyeden itibaren sabitlendiği için sistemin senkronizasyonu 0.25'inci saniyeden itibaren sağlanmıştır. Bu sebeple ilk başta açık anahtar şeklinde olan breaker, programlanarak 0.25'inci saniyeden itibaren kapanmıştır. Şekil 4.5'te filtre öncesi dc/ac konverter çıkışında gözükten gerilim gösterilmekte olup breaker 0.25'inci sn kapandığı için o ana kadar gerilim 0 olup 0.25'inci saniyeden itibaren bol harmonikli bir dalga elde edilmiştir.

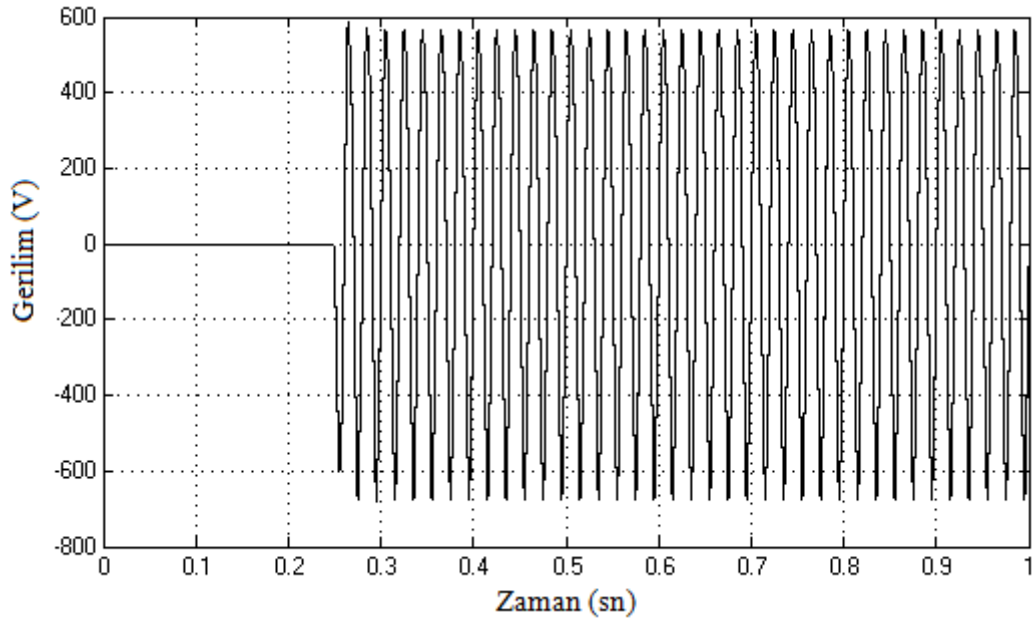


Şekil 4.5 Filtre öncesi DC/AC konverter çıkışında gözükten gerilim dalgası.

Şekil 4.6’da ise Şekil 4.5’te verilen dalğanın harmonik değeri gösterilmekte olup bu değer %58.59 (50 cycle için) olarak ölçülmüştür. Bu değer yüksek oranda bir harmonik teşkil ettiği için bir filtre tasarlanarak (L-C-L filtre) harmonik oranı azaltılmıştır. Şekil 4.5’te filtre öncesi gözükten gerilim ve Şekil 4.6’da filtre öncesi gözükten gerilimin harmonik değeri sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Filtre öncesi gözükten gerilim dalgasının harmonik değeri.

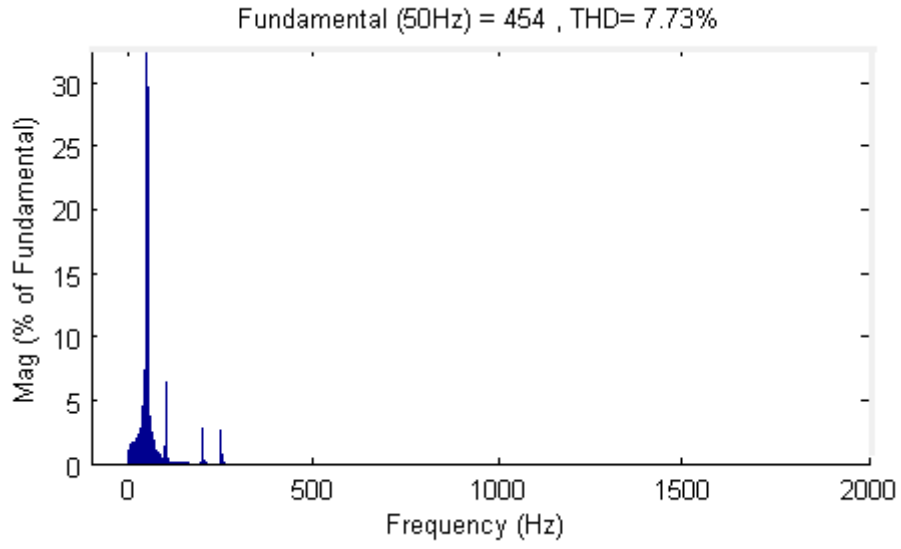


Şekil 4.7 Filtre sonrası harmoniklerin azaltılması sonucu oluşan gerilim dalgası.

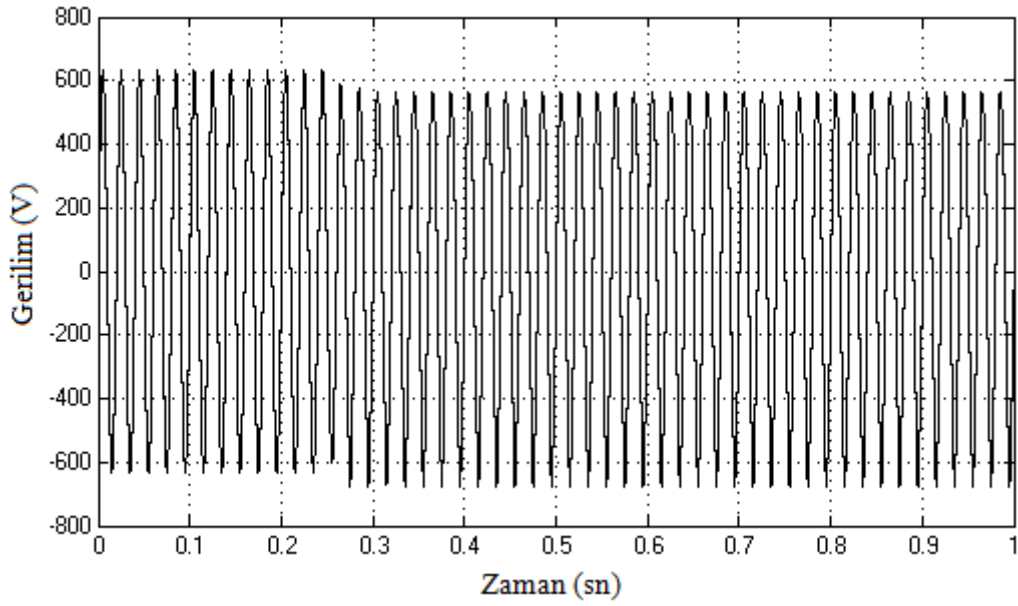
Şekil 4.7’de filtre sonrası harmoniklerin azaltılması sonucu oluşan gerilim dalgası verilmiş olup breaker 0.25’inci saniyeden itibaren kapandığı için dalga 0.25’inci saniyeden itibaren maksimum değeri 566.08V olacak şekilde sabitlenmiştir. Maksimum gerilim değeri, etkin gerilim değerinin $\sqrt{2}$ katı olduğu için filtre sonrası oluşan gerilim dalgasının etkin değeri $566.08/\sqrt{2}$ den 400.2V olarak bulunur.

Şekil 4.8’de ise filtre sonrası oluşan gerilim dalgasının harmonik değeri verilmiş olup bu değer %7.73 olarak (50 cycle için) ölçülmüştür.

Şekil 4.9’da breaker sonunda oluşan gerilim dalgası verilmekte olup senkronizasyon 0.25’inci saniyeden itibaren gerçekleştiği için gerilim dalgası 0.25’inci saniyeden itibaren maksimum değeri 566.26V olacak şekilde sabitlenmiştir. Maksimum gerilim değeri, etkin gerilim değerinin $\sqrt{2}$ katı olduğu için breaker sonunda oluşan gerilim dalgasının etkin değeri $566.26/\sqrt{2}$ den 400.4V olarak bulunur.



Şekil 4.8 Filtre sonrası oluşan gerilim dalgasının harmonik değeri.

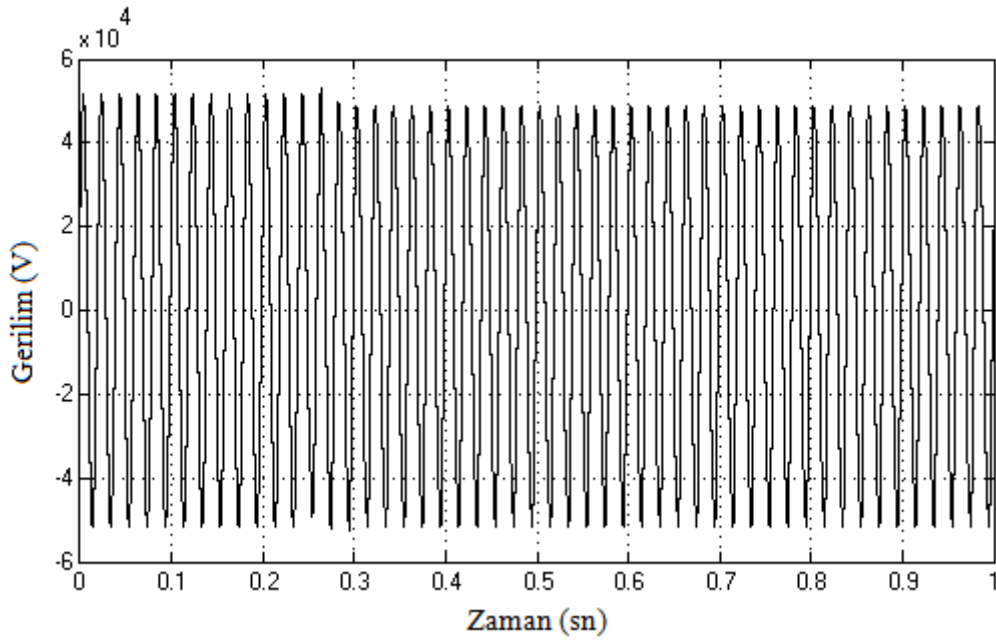


Şekil 4.9 Breaker (Kesici) sonu oluşan gerilim dalgası.

Breaker 0.25'inci saniyeye kadar açık olduğu için (senkronizasyon 0.25'inci saniye gerçekleştiğinden) yük, sisteme 0.25'inci saniye dahil edilmiştir. Bu yüzden 0.25'inci saniyeye kadar sistemde yük olmadığı için breaker sonunda hafif bir gerilim artışı olmuştur. Yük sisteme dahil edildikten sonra ise Şekil 4.9'dan da görüldüğü gibi breaker sonundaki gerilim dalgasının etkin değeri 400.4V'ta sabit kalmıştır.

Şekil 4.10’da trafo çıkışındaki gerilim dalgası verilmekte olup yine senkronizasyon 0.25’inci saniyeden itibaren gerçekleştiği için gerilim dalgası 0.25’inci saniyeden itibaren maksimum değeri 48.84kV olacak şekilde sabitlenmiştir. Trafo çıkışındaki gerilim dalgasının etkin değeri ise $48.84/\sqrt{2}$ den 34.5kV olarak bulunur.

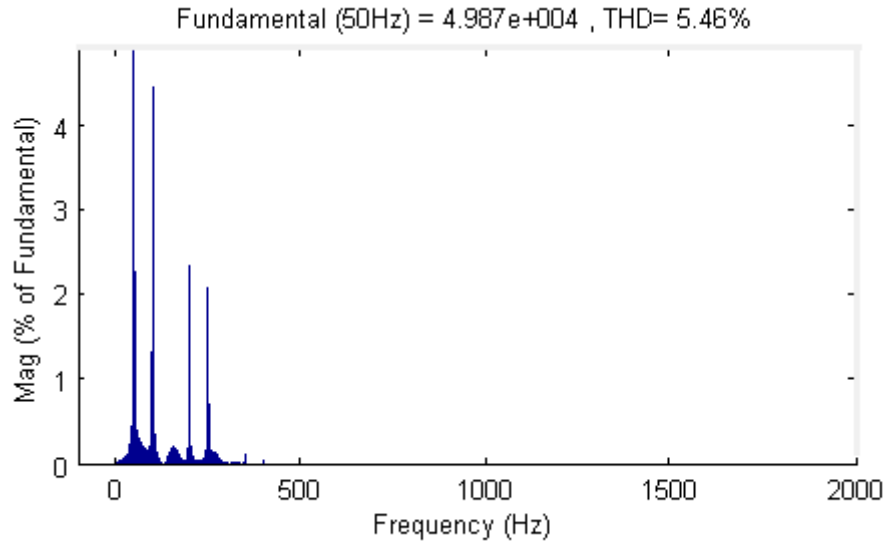
Şekil 4.9 için de anlatıldığı gibi burada da 0.25’inci saniyeye kadar sistemde yük olmadığı için 0.25’inci saniyeye kadar trafo çıkışında hafif bir gerilim artışı olmuştur.



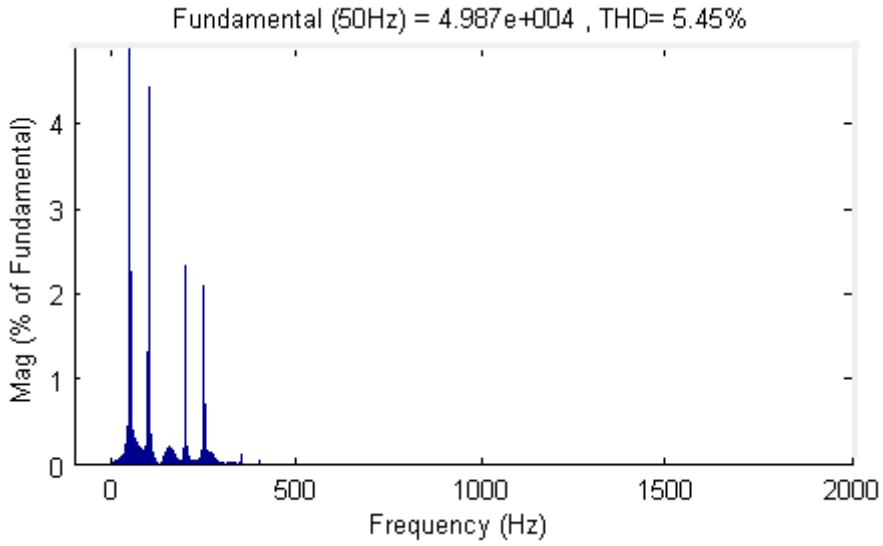
Şekil 4.10 Trafo çıkışındaki gerilim dalgası.

Şekil 4.11’de 15 km’lik pi tipi enerji hattı başındaki gerilim dalgasında meydana gelen harmonik oranı verilmiş olup bu değer %5.46’dır.

Yine aynı hattın sonunda da bir harmonik ölçüm yapılarak bu değer Şekil 4.12’den de görüleceği üzere %5.45 olarak ölçülmüştür. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’den görüleceği üzere hat başındaki harmonik değeri, hat sonunda %0.01’lik bir azalma göstermiştir.

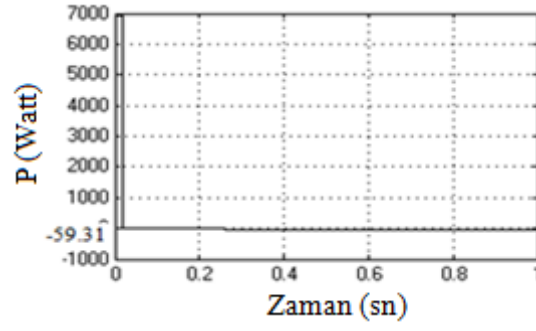


Şekil 4.11 Hat başındaki gerilim dalgasının harmonik değeri.

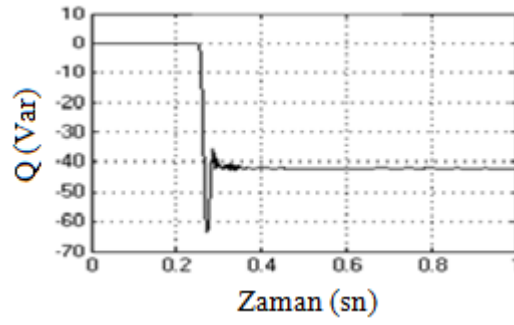


Şekil 4.12 Hat sonundaki gerilim dalgasının harmonik değeri.

Şekil 4.13'te PV sistemin aktif güç-zaman grafiği, Şekil 4.14'te ise reaktif güç-zaman grafiği verilmiştir. Breaker (kesici) kapandıktan sonra PV sistemin gücü 59.31W olarak ölçülmüş ve bu değerde sabit kalmıştır. Reaktif güç ise yine breaker kapandıktan sonra 42.18 Var olarak ölçülmüş ve bu değerde sabit kalmıştır.

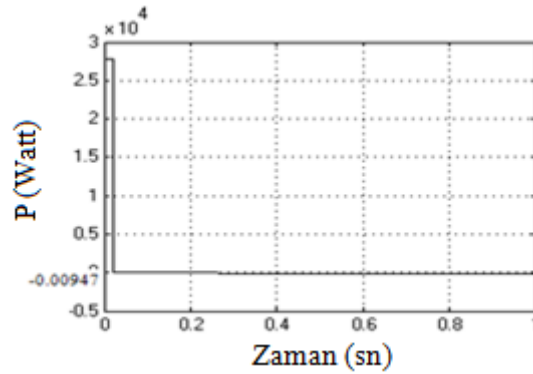


Şekil 4.13 PV sistemin aktif güç- zaman grafiği.

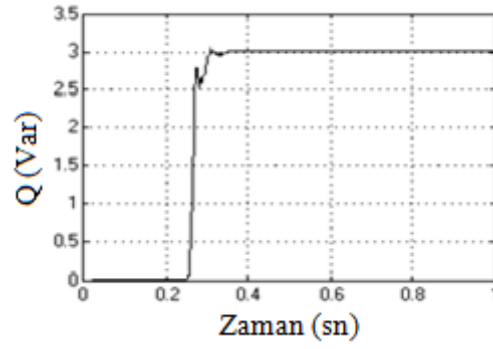


Şekil 4.14 PV sistemin reaktif güç- zaman grafiği.

Şekil 4.15’de yükün aktif güç-zaman grafiği, Şekil 4.16’da ise reaktif güç-zaman grafiği verilmiştir. Breaker (Kesici) kapandıktan sonra yükteki güç 94.71W olarak ölçülmüş ve bu değerde sabit kalmıştır. Reaktif güç ise yine breaker kapandıktan sonra 3.01 Var olarak ölçülmüş ve bu değerde sabit kalmıştır.

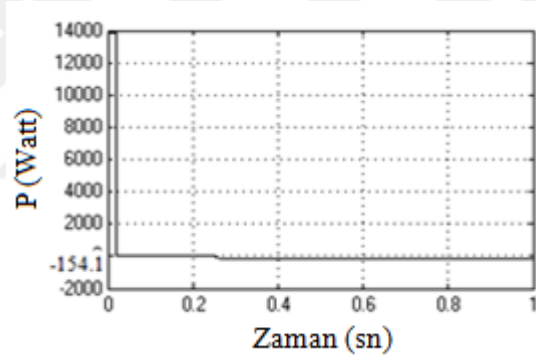


Şekil 4.15 Yükün aktif güç-zaman grafiği.

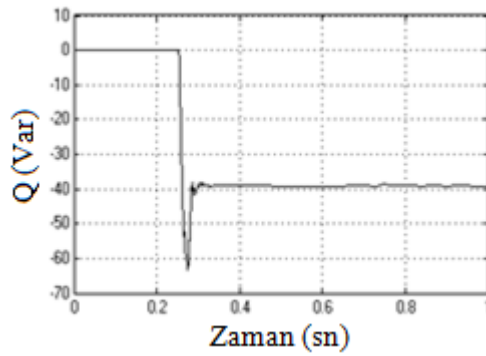


Şekil 4.16 Yüünün reaktif güç-zaman grafiğı.

Şekil 4.17’de şebeke tarafının aktif güç-zaman grafiğı, Şekil 4.18’de ise reaktif güç-zaman grafiğı verilmiştir. Breaker (Kesici) kapandıktan sonra şebeke tarafında oluşan güç 154.1W olarak ölçülmüş ve bu değerde sabit kalmıştır. Reaktif güç ise yine breaker kapandıktan sonra 39.1 Var olarak ölçülmüş ve bu değerde sabit kalmıştır.



Şekil 4.17 Şebekenin aktif güç-zaman grafiğı.



Şekil 4.18 Şebekenin reaktif güç-zaman grafiğı.

5. SONUÇ

Şebeke bağlantılı fotovoltaik elektrik üretim sisteminin şebekeye senkron olarak bağlanması ve güç kalitesi unsurlarının standart sınırlar içinde tutulması önemli bir konudur. Fotovoltaik enerji santralının şebekeyle birlikte sorunsuz bir şekilde çalışması için harmoniklerin belirli sınırlar içinde olması, şebekede sınırların üzerinde oluşabilecek gerilim değişimlerinin engellenmesi, anahtarlama ve anlık devreye girme olaylarında şebekede oluşabilecek problemlerin en az düzeye indirilmesi gerekmektedir. Fotovoltaik sistemin şebeke üzerinde gösterebileceği etkiler değerlendirildikten sonra sistemin şebeke bağlantısı yapılmalıdır. Şebekenin olumsuz etkilenmemesi için fotovoltaik sistemin bağlantı yapılacağı şebekeyle senkronizasyonunun çok iyi olması gerekir. Fotovoltaik sistemler şebekeyle paralel çalışırken harmonikler ile güç faktörü belirli sınır değerinin altında olmalı ve şebekeye doğru akım vermemelidir.

Elektrik dağıtım kuruluşunun, şebeke bağlantısı yapılacak sistemler için belirlediği hususlara (gerilim dengesizliği, ani gerilim değişimi, harmonik, frekans değişimi, arz güvenliği, maksimum güç talebi vb.) uyulmalıdır. Sistemde oluşan problemlerin giderilmemesi veya azaltılmaması durumunda sistem veriminin azalması, sistemde kullanılan elemanların bozulması, güç kalitesi sorunlarının yaşanması, maliyetin artması ve enerji kayıpları kaçınılmazdır. Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemler, hangi güçte olursa olsun şebekedeki arızalarda veya enerji kesilmelerinde şebekeden bağlantılarını ayıracak sistemleri bulundurmaları gerekir. Aksi takdirde herhangi bir arızadan veya enerji kesilmesinden şebeke ve fotovoltaik sistem olumsuz etkilenebilir.

Şebeke ile senkronizasyonu iyi bir şekilde sağlanmış ve elektrik dağıtım kuruluşunun belirlediği hususlara uygun olarak kurulmuş bir fotovoltaik enerji üretim santralinde ise ortaya çıkabilecek problemler yok denecek kadar azdır. Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlerde, üretilen enerji yetmediğinde şebeke devreye girer ve yükün kesintisiz bir şekilde beslenmesi sağlanır. Sisteme yakın yerlerde tüketim olacağı için enerji çevriminin daha az olmasından dolayı kayıp minimum miktarda olur. Ayrıca şebekeye ek güç sağlanarak şebekenin yükü az da olsa hafifletilmiş olunur. Çift taraflı sayac konularak, kullanım fazlası elektrik şebekeye satılabilir. Alan ve ışıyım koşulları uygun olduğu sürece şebekeye bağlı elektrik üretim sistemi ile istenilen güçte elektrik enerjisi

üretimini sağlamak mümkündür. Görüldüğü gibi şebeke bağlantılı fotovoltaiik sistemlerin birçok avantajı olmasından dolayı öncelikli tercih sebebi olmaktadır.

Bununla birlikte ülkemiz için yeni iş sahalarının açılması bakımından da, fotovoltaiik sektörünün geliştirilmesi ve fotovoltaiik sistemlerin kullanımının daha da yaygınlaştırılması önemlidir.

Bu çalışmada, şebekeye bağlı fotovoltaiik sistemin Matlab/Simulink programında simülasyonu yapılarak fotovoltaiik sistemin şebekeye olan etkileri incelenmiştir. Gerçek cihazlar kullanılarak oluşturulan gerçek şebeke bağlantılı fotovoltaiik sistemde meydana gelen değişimlerin, simülasyon ortamında grafiksel olarak şekillerinin gösterimiyle kullanıcıların bilgi edinmeleri amaçlanmıştır. Ayrıca simülasyonda kullanılan her bir elemanın modellenmesi detaylı bir şekilde anlatılmış olup elemanların parametrelerine ilişkin hesaplamalar yapılmıştır.

Simülasyonda 10'ar adet seri ve paralel modül bir araya getirilerek fotovoltaiik sistem oluşturulmuş olup oluşturulan fotovoltaiik modülün akım-gerilim ve güç-zaman grafiklerinin teoriye uygun olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra fotovoltaiik modül çıkışındaki gerilimi yükseltmek amacıyla modül çıkışına DC/DC konverter (yükselten tip boost konverter), boost konverter çıkışına da 3 fazlı AC gerilim dalgası elde etmek amacıyla DC/AC evirici bağlanmıştır. Fotovoltaiik sistemde konverterlerden dolayı harmonikler oluştuğu için oluşan bu harmonikleri en aza indirmek amacıyla DC/AC evirici çıkışına bir filtre bağlanmıştır.

Bu şekilde oluşturulan fotovoltaiik sistemin çıkışına yük ve bir breaker (kesici) bağlanmış olup kullanılan breaker (kesici) ile fotovoltaiik sistem-şebeke arasındaki senkronizasyon süreci gözlemlenmiştir. Şebeke tarafında ise 0.4/34.5kV gerilim değerlerine sahip yıldız-üçgen trafo, 15 km'lik pi tipi enerji hattı ve 500 KVA'lık gerilim kaynağı kullanılmıştır.

Simülasyonda fotovoltaiik sisteme, yüke ve şebekeye ayrı ayrı ölçüm bloğu bağlanarak her birine ait frekans, faz açısı ve gerilim ölçümleri yapılmış ve sistemin performansı analiz edilmiştir.

Yapılan ölçümlerde fotovoltaik sistem ile şebeke arasındaki senkronizasyonun 0.25'inci saniyeden itibaren gerçekleştiği gözlemlendiği için simülasyonda kullanılan breaker (kesici), 0.25'inci saniyede kapatılarak fotovoltaik sistem ile şebeke arasındaki bağlantı gerçekleştirilmiştir. Senkronizasyon gerçekleştikten sonra frekansın, faz açısının ve gerilimin istenen değerlerde sabitlendiği gözlemlenmiş ve bunların her birine ait grafiksel olarak şekiller elde edilmiştir.

Genellikle geceleri yük azalmasına bağlı olarak şebekede gerilim artışları meydana gelmekte olup gerçekte meydana gelen bu artışlar, simülasyon ortamında da şebeke yüksüz durumda iken (senkronizasyon öncesi kesici açık konumda iken) yapılan şebeke üzerindeki gerilim ölçümlerinde gözlemlenmiştir. Yük devreye alındığında ise şebeke üzerindeki gerilim artışlarının kaybolduğu ve gerilim değerinin istenen değere ulaştığı görülmüştür.

Bununla birlikte fotovoltaik sistemlerde konverterlerden kaynaklanan harmonikler Matlab/Simulink FFT Analiz bölümünde ölçülmüş ve tasarlanan filtre ile harmoniklerin uluslararası standartlara uygun olacak şekilde en aza indirildiği gözlemlenmiştir.

Burada öneri olarak, şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlerin kullanımı her geçen gün arttığı için fotovoltaik sistemlerin şebekeye etkileri ve güç kalitesini artırma yolları üzerine daha detaylı çalışmalar yapılmalıdır.

Fotovoltaik sistemlerin kullanımı daha da yaygınlaştırılmalı ve fotovoltaik sistemlere yönelik geliştirme çalışmaları artırılmalıdır. Fotovoltaik sistemde konverterler gibi güç kalitesini olumsuz yönde etkileyen elemanların özellikleri iyi bilinmeli, gerekirse bu elemanları geliştirme yoluna gidilmelidir. Sistemde kullanılacak olan her bir eleman, sistem özelliklerine uygun olarak sisteme ve şebekeye en iyi uyum sağlayacak şekilde seçilmelidir. Sistemde ne kadar çok problem giderilirse o kadar çok verimin artacağı ve kayıpların azalacağı unutulmamalıdır.

6. KAYNAKLAR

- Abamor, S. (2016). Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Enerji Santrallerinin Elektrik Güç Kalite Parametrelerinin İzlenmesi ve Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- Adam, A.D. (2014). Design and Analysis of 500 kWp Solar Photovoltaic System in Gaziantep As a Means of Carbon Emission Reduction, Yüksek Lisans Tezi, Zirve Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- Arifoğlu, U. (2002). Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi. Alfa Yayınları, 1. baskı, İstanbul, TÜRKİYE.
- Arrillaga, J., Smith, B.C., Watson, N.R and Wood, A.R. (1997). Power System Harmonic Analysis, John Wiley & Sons, Norwich, New York, USA.
- Aydöner, D. (2010). Binaya Entegre Fotovoltaik Sistem Tasarımı ve Kurulumu, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Bonnett, A.H. (1997). Quality and Reliability of Energy Efficiency Motors. *IEEE Industry Applications Magazine*, **3**: 22-31.
- Carnovale, D. J. and Eaton, P. E. (2003). Power Factor Correction and Harmonic Resonance : A Volatile Mix, *Electrical Construction and Maintenance*, June 2003.
- Çelik, Ç. (2008). Dağıtım Sistemlerinde Enerji Kalitesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çelik, E. (2015). Şebeke Bağlantılı Tek Fazlı Mikro Eviricinin Tasarlanması ve Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Çetinkaya, H.B. (2001). Güneş Enerjisinden Elektrik Elde Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 130-134.
- Çıtıroğlu, A. (2000). Güneş Enerjisinden Yararlanarak Elektrik Üretimi, *Mühendis ve Makine*, **485**:1-5.
- Çiftçi, F. (2016). Güneş Enerji Sistemlerinde Farklı Cins Panellerle Maliyet ve Güç Analizinin Yapılması, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dinçer, F. (2011). Çevresel Faktörlerin Güneş Paneline Etkisinin Matlab/Simulink Programında Modellenmesi ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Dugan, R. Mcgranaghan, M., Santoso, S. and Beaty, W. (2002). Electrical Power Systems Quality, McGraw Hill, New York, USA.
- Eric, K.A.K. (2014). Fotovoltaik Sistemlerde Kullanılan 220V, 50 HZ, Sabit Çıkış Gücünde, Tek Fazlı Bir Evirici Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Fehr, R. (2004). Harmonics Made Simple, *Electrical Construction and Maintenance*, Jan2004, **Vol. 103**, Issue 1, pc8.
- Günlü, E. (2015). Sentetik Yeniden Örnekleme ile Güç Sinyallerinde Harmonik ve Araharmiklerin Çözümlemesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- IEEE Std 519-1992, (1992). IEEE Recommended Practices and Requirements For Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE, ABD.

- İnan, A. (1999). Lineer Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerin Harmonik Kayıpların Yapay Sinir Ağları ile Analizi ve Filtre Maliyetlerinin Kestirimi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Keskin, E. (2012). Türkiye İklim Koşullarında Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Tasarımı ve Maliyet Analizi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kishor, N. , Mohanty, S.R. , Villalva, M.G. and Ruppert, E. (2010). Simulation of PV Array Output Power for Modified PV Cell Model, *IEEE International Conference on Power and Energy*, **Vol. 29**, No. 1, November 2010.
- Köse, S. (1986). Yarıiletken Güneş Pilleri ve Verimlilikleri, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Küpeli, A.Ö. (2005). Güneş Pilleri ve Verimleri, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Markvart, T. and Castaner, L. (2003). Practical Handbook of Photovoltaics Fundamental and Applications, Elsevier Ltd, Netherlands, HOLLAND.
- Megep. (2013). Yenilenebilir Enerji Teknolojileri Alanı, Doğrultucu ve Evirici Devreleri Modülü, Ankara.
- Öksüztepe, E. (1998). Motor Kontrollü Güneş İzleme Sistemi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Özcan, L.S. (1993). Implementation of an Autonomous Photovoltaic Based DC Supply with Motor Generator Backup, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Özgöçmen, A. (2007). Güneş Pilleri Kullanarak Elektrik Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Patel, M.R. (2006). Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation. Taylor & Francis Group, 2. Edition, New York, USA.
- Rashid, İ.S. (2012). Grid-Connected Photovoltaic System for Buildings, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Shahıdul, S. (2011). A Generalized Model of Grid Connected Photovoltaic System with Maximum Power Point Tracking Control, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Shıkhan, A.A.A. (2015). Design and İmplementation of DC/AC Converter for Photovoltaic Panels, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- Shipp, D.D. (1979). Harmonics Analysis and Suppression for Electrical Systems Supplying Static Power Converters and Other Nonlinear Loads. *IEEE Trans on Industrial Application*, **15**: 453-458.
- Solar Energy International, (2008). Photovoltaics Design and Installation Manual. New Society Publishers, 1. Edition, B & amp; N Warehouse, USA.
- Şimşek, K.G. (2010). Elektrik Enerjisi Üreten Fotovoltaik Güneş Paneli Sistemi Fonksiyonel Modellemesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tozlu, C. (2004). Muğla Üniversitesinde Kurulu Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Performans Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Muğla Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.

6.1 İNTERNET KAYNAKLARI

- 1- https://tr.wikipedia.org/wiki/G%C3%BCne%C5%9F_pili.html, 10.06.2015
- 2- <http://gunesenerjisi.uzerine.com/index.jsp?objid=702.html>, 14.06.2015
- 3- http://www.solarantalya.com/?page_id=100.html, 15.06.2015
- 4- <http://www.unienerji.com/arsivler/349.html>, 07.07.2015
- 5- <http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/gunes.html>, 12.07.2015
- 6- <http://www.iskilipenerji.com.html>, 15.07.2015
- 7- <http://www.eie.gov.tr.html>, 05.08.2015
- 8- <http://www.epdk.gov.tr/TR/DokumanDetay/Elektrik.html>, 10.09.2015
- 9- https://tr.wikipedia.org/wiki/G%C3%BCne%C5%9F_pili.html, 12.09.2015
- 10- <http://www.eie.gov.tr/turkce/gunes.html>, 20.09.2015
- 11- <http://www.bilgiustam.com/gunes-enerjisi.html>, 25.11.2015
- 12- <http://www.eie.gov.tr/turkce/gunes/tgues.html>, 28.12.2015
- 13- <http://www.gunessistemleri.com/fotovoltaitarihce.php.html>, 04.01.2016
- 14- http://www.sandia.gov/pv/docs/PVFEffDriving_Charge_Carriers.html, 10.03.2016
- 15- <http://diyotl.blogspot.com.tr/2012/12/diyotlar.html>, 15.03.2016
- 16- <http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/gunes/gunespv.html>, 09.04.2016
- 17- <http://www.kuark.org/2014/12/gunes-pilleri-nasil-calisir.html>, 02.05.2016
- 18- <http://akademikpersonel.kocaeli.edu.tr.html>, 14.05.2016
- 19- <http://www.solarcell.com.tr.html>, 20.05.2016
- 20- <http://320volt.com/gunes-pilleri-ve-teknolojik-uygulamalari.html>, 18.06.2016
- 21- <http://www.powere.dynamictopway.com/examples.html>, 18.06.2016
- 22- <https://tr.wikipedia.org/wiki/%C4%B0nvert%C3%B6r.html>, 22.07.2016
- 23- <http://www.3eelectrotech.com.tr.html>, 22.07.2016
- 24- <http://www.etmd.org.tr/etmd-arsiv-sayfasi.html>, 22.07.2016
- 25- <http://sites.google.com/site/mvillalva/pvmodel.html>, 05.10.2015
- 26- http://atasevinc.net/ge/DC_DC_ceviriciler_ve_eviriciler.pdf?i=1.html, 16.10.2016
- 27- <http://afguven.com/depo/dersnot/esm301/iletim.pdf.html>, 08.11.2016

EKLER

EK 1: Fotovoltaik Panelin Etiket Değerlerinin Girildiği ve Modül Oluşturulduğu Uygulama

```
% Visit for updates: http://sites.google.com/site/mvillalva/pvmodel

clear all

%% Information from the VBHN235SA06 solar array datasheet PV model

% Warning: do not change any values here unless you know what you are
% doing. You will have the opportunity to use any value of temperature or
% irradiance when you evaluate the model using the program.

Gn = 1000;
Tn = 25 + 273.15;
Vmp = 43.0;
Imp = 5.48;
Vocn = 51.8;
Iscn = 5.84;
Kv = -0.124;
Ki = 1.75e-3;
Ns = 72;
Nss = 10;
Npp = 10;
Pmax_e = Vmp*Imp;
```

EK 2: Fotovoltaik Modüle Ait Hesaplamalar

```
% Modeling algorithm - here we are obtaining the PV model parameters

Rs_max = (Vocn - Vmp) / Imp;
Rp_min = Vmp / (Iscn - Imp) - Rs_max;

% Initial guesses of Rp and Rs
Rs = 0;
Rp = Rp_min;

% The model is adjusted at the nominal condition
T = Tn;
G = Gn;

k = 1.3806503e-23; %Boltzmann [J/K]
q = 1.60217646e-19; %Electron charge [C]

Vtn = k * Tn / q; %Thermal junction voltage (nominal)
Vt = k * T / q; %Thermal junction voltage (current temperature)

perror = Inf; %dummy value
ni = 0; %counter
a = 1; %Initial value of a

% Iterative loop executed until Pmax,model = Pmax,experimental
while (perror > tol) && (Rp > 0) && (ni < nimax)

    ni = ni + 1;

    % Temperature and irradiation effect on the current
    dT = T - Tn;
    Ipvn = (Rs + Rp) / Rp * Iscn; % Nominal light-generated current
    Ipv = (Ipvn + Ki * dT) * G / Gn; % Actual light-generated current
    Isc = (Iscn + Ki * dT) * G / Gn; % Actual short-circuit current

    Ion = (Ipv - Vocn / Rp) / (exp(Vocn / Vt / a / Ns) - 1);
    Io = Ion;

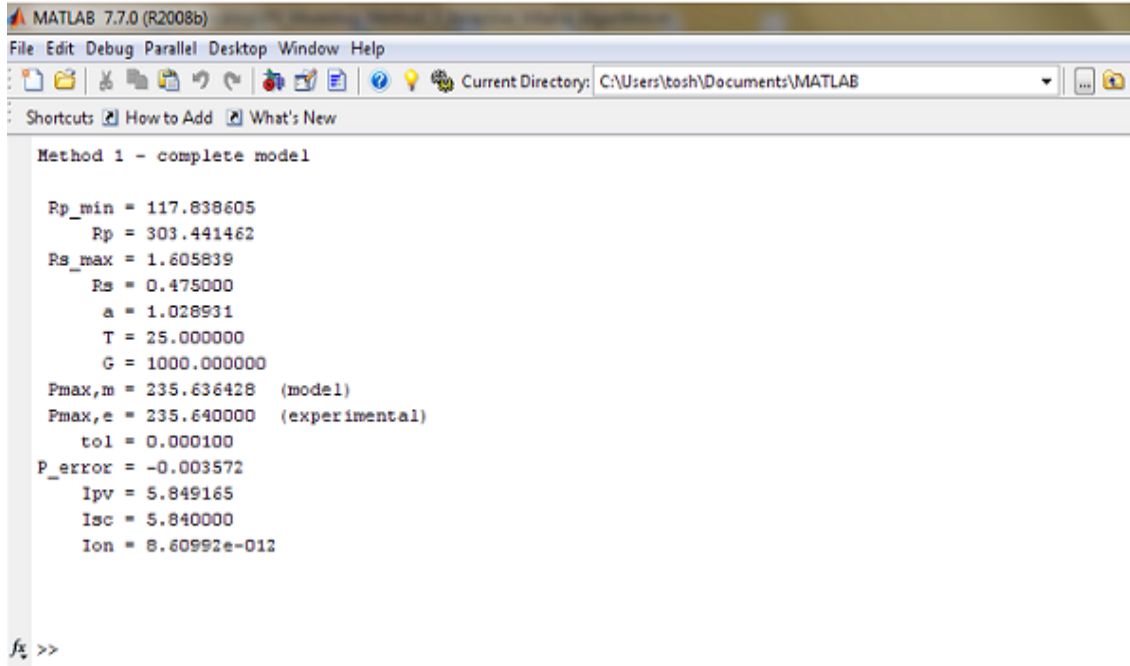
    % Increments Rs
    Rs = Rs + Rsinc;
    Rp_ = Rp;

    % Egap = 2.72370016e-19; % Bandgap do silicio amorfo em J (=1.7 eV)
    Egap = 1.8e-19; % Bandgap do silicio cristalino em J (=1.124 eV)

    a = (Kv - Vocn / Tn) / (Ns * Vtn * (Ki / Ipvn - 3 / Tn - Egap / (k * Tn^2)));

    Rp = Vmp * (Vmp + Imp * Rs) / (Vmp * Ipv - Vmp * Io * exp((Vmp + Imp * Rs) / Vt / Ns / a) + Vmp * Io - Pmax_e);
```

EK 3: Matlab Ara Yüzüne Transfer Edilen Veriler



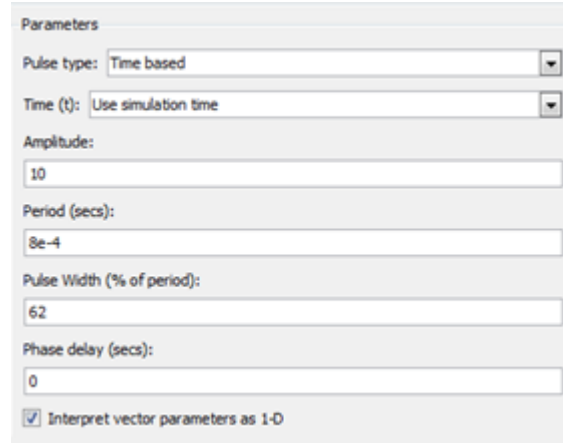
```
MATLAB 7.7.0 (R2008b)
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Directory: C:\Users\tosh\Documents\MATLAB
Shortcuts How to Add What's New

Method 1 - complete model

Rp_min = 117.838605
Rp = 303.441462
Rs_max = 1.605839
Rs = 0.475000
a = 1.028931
T = 25.000000
G = 1000.000000
Pmax,m = 235.636428 (model)
Pmax,e = 235.640000 (experimental)
tol = 0.000100
P_error = -0.003572
Ipv = 5.849165
Isc = 5.840000
Ion = 8.60992e-012

fx >>
```

EK 4: Simülasyonda Kullanılan Elemanların Parametreleri



Parameters

Pulse type: Time based

Time (t): Use simulation time

Amplitude: 10

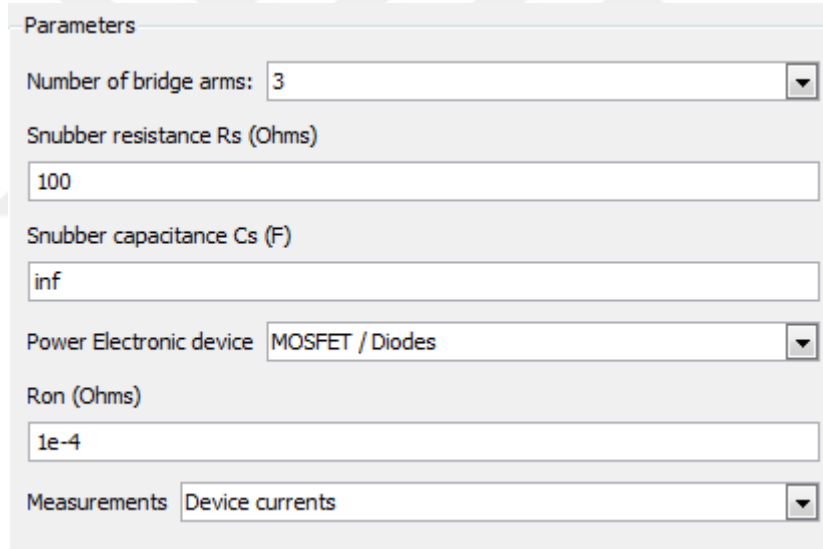
Period (secs): 8e-4

Pulse Width (% of period): 62

Phase delay (secs): 0

☒ Interpret vector parameters as 1-D

Şekil 1. Pulse Generatör Parametreleri



Parameters

Number of bridge arms: 3

Snubber resistance Rs (Ohms) 100

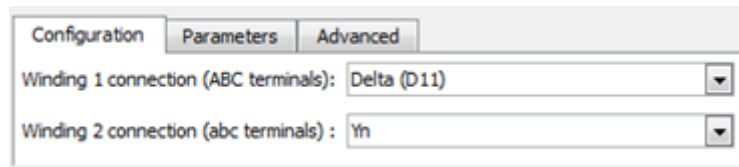
Snubber capacitance Cs (F) inf

Power Electronic device MOSFET / Diodes

Ron (Ohms) 1e-4

Measurements Device currents

Şekil 2. DC/AC Evirici Matlab/Simulink Parametreleri



Configuration Parameters Advanced

Winding 1 connection (ABC terminals): Delta (D11)

Winding 2 connection (abc terminals): Yn

Şekil 3. Simülasyonda Kullanılan Trafonun Sargı Ayarlaması

Configuration	Parameters	Advanced
Units	SI	
Nominal power and frequency [Pn(VA) , fn(Hz)]	[1000e3 , 50]	
Winding 1 parameters [V1 Ph-Ph(Vrms) , R1(Ohm) , L1(H)]	[34500 16.23 0.336]	
Winding 2 parameters [V2 Ph-Ph(Vrms) , R2(Ohm) , L2(H)]	[400 7.27e-4 1.508e-5]	
Magnetization resistance Rm (Ohm)	623586*3	
Magnetization reactance Lm (H)	1251.47*3/sqrt(3)	

Şekil 4. Simülasyonda Kullanılan Trafonun Ayar Parametreleri

Parameters
Frequency used for R L C specification (Hz) :
50
Positive- and zero-sequence resistances (Ohms/km) [R1 R0] :
[0.01273 0.3864]
Positive- and zero-sequence inductances (H/km) [L1 L0] :
[0.9337e-3 4.1264e-3]
Positive- and zero-sequence capacitances (F/km) [C1 C0] :
[12.74e-9 7.751e-9]
Line section length (km) :
15

Şekil 5. Pi Tipi Enerji Hattın Matlab/Simulink Parametreleri

Parameters

Phase-to-phase rms voltage (V):
34.5e3

Phase angle of phase A (degrees):
0

Frequency (Hz):
50

Internal connection: Yg

☒ Specify impedance using short-circuit level

3-phase short-circuit level at base voltage(VA):
500e3

Base voltage (Vrms ph-ph):
34.5e3

X/R ratio:
10

Şekil 6. Gerilim Kaynağının Matlab/Simulink Parametreleri

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Gülşah KÜÇÜKİLHAN

Doğum Yeri ve Tarihi : Afyonkarahisar-1992

Yabancı Dili : İngilizce

İletişim (Telefon/e-posta) : 0 507 990 53 70/ g.k.ilhan@hotmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Ali Çağlar Anadolu Lisesi, (2006-2010)

Lisans : Sakarya Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, (2011-2014)

Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, (2014-2017)

Yayınları (SCI ve diğer) : Arıkan, Y., Oğuz, Y. ve Küçükilhan, G. (2016). Eliminating Current Harmonics with Fourier Based Parallel Active Power Filter for Thermal Power Plants, 1st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences, Afyonkarahisar.