

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ŞEBEKE ETKİLEŞİMLİ FOTOVOLTAİK GÜÇ
SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ VE SİMULASYONU**

SEMİH DOĞAN

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞEBEKE ETKİLEŞİMLİ FOTOVOLTAİK GÜÇ
SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ VE SİMULASYONU

SEMİH DOĞAN

Prof. Dr. Nurettin ABUT
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Doç. Dr. Ali Bekir YILDIZ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi M. Server FIRAT
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi

Nurettin Abut
.....

AB Yıldı
.....

Sumru
.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 19.06.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

İçinde bulunduğumuz yüzyılda insan ırkının doğal kaynakları kullanım alışkanlıkları maalesef ki yaşadığımız Dünya’da küresel ısınma gibi sonu engellenemeyecek problemlere yol açmaktadır. Fosil yakıtların tüketimi giderek artan bir grafik göstermekte olup, ekonomik ve ekolojik Dünya dengelerini bozmaktadır. Bu sebeplerle tüm Dünya ülkelerinin üzerinde yoğun bir şekilde durduğu alternatif ve temiz enerji kaynaklarının mümkün olan maksimum verimde kullanımı, büyük ilgi görmektedir. Güneş’in Dünya üzerindeki etkilerini temel alan ve bu enerji salınımını elektrik enerjisine dönüştürmeyi konu alan fotovoltaik teknolojisi her geçen gün gelişmektedir. Buna bağlı olarak alt sistemlerin özellikle de güç elektroniği teknolojisinin hızla gelişmesi giderek artan verimlilik oranlarına ulaşmayı sağlamıştır.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, Kocaeli ilinin özellikle elektrik enerjisi tüketimi bakımından büyük pay sahibi Gebze ilçesine kurulabilecek bir Güneş enerji santralının modellenmesi ve bu benzetim çalışmalarında kullanılan sistemlerin doğruluğu sorgulanmıştır. Öncelikle Güneş panellerinin elektronik ortamda simulasyonu ve buna bağlı DA yükseltici dönüşüm devreleriyle kontrolünü benzetim çalışması yapılmıştır. Elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinde genellikle kullanılan AA gerilim seviyesine dönüşümleri modellenmiştir. Güneş enerji sistemlerinin temel taşlarından biri olan maksimum güç noktası takip algoritmalarına değinilerek, tasarımı yapılan benzetim çalışmasına uygulanmıştır. Modelleme çalışmalarının tamamında MATLAB/Simulink ve PVSyst yazılımlarıyla desteklenmiştir.

Bu tez çalışmasında engin bilgi ve tecrübeleriyle beni destekleyen danışmanım Prof. Dr. Nurettin ABUT’a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tüm eğitim hayatım boyunca bana verdiği maddi ve manevi destekler için aileme sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Mart – 2018

Semih DOĞAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ.....	v
SİMGELEr VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
GİRİŞ.....	1
1. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER.....	5
1.1. Fotovoltaik Enerji Tanımı.....	5
1.2. Işıma Enerjisi Tanımı.....	6
1.3. Güneş Panel Tanımı.....	8
1.3.1. İdeal güneş paneli tanımı.....	10
1.3.2. Güneş panel çalışması ve denklemleri.....	12
1.3.3. Güneş panel verimliliği ve karakteristikleri.....	14
1.4. Güneş Santrali Sistem Tipleri.....	18
1.4.1. Şebekeden bağımsız santraller.....	18
1.4.2. Şebeke bağlantılı santraller.....	20
1.4.3. Karma sistemler.....	22
2. GÜNEŞ ENERJİ SANTRAL SİSTEM ELEMANLARI.....	23
2.1. Paneller ve Bağlantıları.....	23
2.1.1. Mono kristal silikon paneller.....	26
2.1.2. Poli kristal silikon paneller.....	26
2.1.3. İnce film paneller.....	27
2.2. DA-DA Gerilim Dönüştürücüler.....	28
2.2.1. Boost (Step-Up) yükseltici çeviriciler.....	28
2.2.2. Buck (Step-Down) indirici çeviriciler.....	31
2.2.3. Buck-Boost çeviriciler.....	34
2.3. DA-AA Dönüştürücüler.....	35
2.3.1. Merkezi evirici sistemleri.....	40
2.3.2. Dizi evirici sistemleri.....	41
2.3.3. Çoklu evirici sistemleri.....	42
2.4. Maksimum Güç Noktası Takibi.....	43
2.4.1. Hata ve gözlem (P&O) tekniği.....	44
2.4.2. Sabit gerilim ve akım algoritması.....	45
2.4.3. Artan iletkenlik algoritması.....	48
2.4.4. Parazit kapasite algoritması.....	49
3. SİSTEM TASARIMI VE MODELLENMESİ.....	51
3.1. Coğrafi Koşul Analizi ve Modellemesi.....	51
3.2. Güneş Panel Modellemesi ve Hesaplamalar.....	54
3.3. DA-DA Çevrim Modellemesi.....	68
3.4. MGNT Kontrol Algoritması ve Modellemesi.....	71
3.5. DA-AA Modellemesi ve Hesaplamalar.....	74

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	82
KAYNAKLAR	85
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	88
ÖZGEÇMİŞ	89



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Dünya yüzeyinde kara cisim ve Güneş ışınlarının spektral dağılımı.....	7
Şekil 1.2.	AM1.5 uzaklığında normal ve evrensel ışınma örneklemeesi.....	8
Şekil 1.3.	Fotovoltaik hücre yapısı.....	10
Şekil 1.4.	İdeal fotovoltaik hücre devre şeması	11
Şekil 1.5.	Fotovoltaik panel gerilim, akım ve güç grafikleri	15
Şekil 1.6.	Farklı ışınma ve sıcaklık durumlarında FV hücrenin I-V grafiği	17
Şekil 1.7.	Fotovoltaik Sistem Tipleri	18
Şekil 1.8.	Şebekeden Bağımsız tesis şeması	19
Şekil 1.9.	Şebekeden bağımsız depolamalı FV sistem şeması.....	20
Şekil 1.10.	Şebeke etkileşimli FV sistem şeması.....	21
Şekil 2.1.	FV Panel Bileşenleri	24
Şekil 2.2.	FV panel iç yapısı	25
Şekil 2.3.	FV Panel çeşitleri.....	27
Şekil 2.4.	DA yükseltici devre şeması	29
Şekil 2.5.	MGNT kontrollü bir DA yükseltici devre şeması.....	31
Şekil 2.6.	DA Buck Dönüştürücü devre şeması.....	31
Şekil 2.7.	MGNT kontrollü bir DA düşürücü devre şeması	33
Şekil 2.8.	DA Düşürücü-Yükseltici Devre Şeması	34
Şekil 2.9.	MGNT kontrollü bir Buck-Boost çevirici devre şeması.....	35
Şekil 2.10.	Bir fazlı yarım dalga köprü evirici devre şeması.....	36
Şekil 2.11.	Bir fazlı tam dalga köprü evirici	37
Şekil 2.12.	3 fazlı evirici genel devre şeması.....	37
Şekil 2.13.	Düşük ve yüksek frekanslı transformatörlü evirici	39
Şekil 2.14.	Transformatörsüz eviriciler.....	39
Şekil 2.15.	Merkezi evirici bağlantı şeması	41
Şekil 2.16.	Dizi evirici bağlantı şeması.....	42
Şekil 2.17.	Çoklu evirici bağlantı şeması.....	43
Şekil 2.18.	Farklı ışınım değerleri altında MGN değişimi.....	45
Şekil 2.19.	Sabit gerilim MGNT yöntemi algoritması.....	47
Şekil 2.20.	Sabit akım MGNT yöntemi algoritması	47
Şekil 2.21.	Artan iletkenlik algoritması döngüsü.....	49
Şekil 3.1.	Gebze ilçesi yıllık ışınım verileri	54
Şekil 3.2.	Tesis genel yerleşim görüntüsü.....	54
Şekil 3.3.	Tesis çatı yerleşim görüntüleri.....	55
Şekil 3.4.	Sistem tasarım şeması	55
Şekil 3.5.	Panel sistemleri yerleşim görünümü.....	56
Şekil 3.6.	Panel konstrüksiyon görünümü	56
Şekil 3.7.	PVSyst panel verileri	57
Şekil 3.8.	Sunpower 305 WHT panel akım gerilim ve güç grafikleri.....	57
Şekil 3.9.	FV Dizi Matlab akım gerilim ve güç grafikleri	58
Şekil 3.10.	Panel fiziksel özellikleri.....	58
Şekil 3.11.	Sistem tasarım şeması	64
Şekil 3.12.	Sistem tek hat şeması	65

Şekil 3.13.	Gebze ilçesi yıllık ışıma değişimleri grafiği	66
Şekil 3.14.	FV panel devre benzetimi	66
Şekil 3.15.	FV panel diyot denklemleri benzetimi.....	67
Şekil 3.16.	FV dizilerin DA çevirici bağlantı şeması	68
Şekil 3.17.	DA çevirici devre şeması	69
Şekil 3.18.	FV panel çıkış gerilimleri	70
Şekil 3.19.	DA yükseltici çıkış gerilim grafiği	70
Şekil 3.20.	Işınım, sıcaklık, FV panel gerilim, yükseltici devre çıkışları	70
Şekil 3.21.	MGNT kontrol modellemesi.....	71
Şekil 3.22.	MGNT Matlab kod satırları	72
Şekil 3.23.	D çevrim oranı değişim grafiği	73
Şekil 3.24.	Çevrim oranı değerlerinin darbe sinyallerine çevrimi	73
Şekil 3.25.	SMA Sunny Central 800CP üretici verileri	74
Şekil 3.26.	Evirici çıkış darbe sinyalleri	76
Şekil 3.27.	Evirici çıkış sinyallerinin yaratılması	76
Şekil 3.28.	Evirici çıkışı şebekeye aktarılan gerilim grafiği	77
Şekil 3.29.	Evirici çıkışı şebekeye aktarılan akım grafiği.....	77
Şekil 3.30.	Evirici modeli bağlantı detayları.....	77
Şekil 3.31.	Genel sistem tasarımı ve modellemesi.....	78
Şekil 3.32.	Sistem kayıp oranları	79
Şekil 3.33.	Yıllık sistem üretim grafiği.....	81

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1.	Türkiye aylık ortalama Güneş enerji potansiyeli.....	2
Tablo 1.2.	Türkiye bölgelere göre Güneş enerji potansiyeli dağılımı.....	3
Tablo 3.1.	Kocaeli ili ortalama sıcaklık verileri.....	53
Tablo 3.2.	Panel tasarım özellikleri.....	59
Tablo 3.3.	Evirici Tasarım özellikleri	60
Tablo 3.4.	Sistem üretim bilgileri	80
Tablo 3.5.	Aylık bazda sistem üretim verileri.....	81



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ΔP	:Güç değişimi, (W)
ff	:Doluluk faktörü
G	:Işınım değeri, (Watt/m ²)
I ₀	:Ters Saturasyon Akımı, (A)
I _d	:Diyot akımı, (A)
I _{mpp}	:Maksimum güç noktası akımı, (A)
I _{pv}	:FV Panel Akımı, (A)
I _{sc}	:Kısa devre akımı, (A)
I _{sh}	:Şönt bağlı direnç üzerinden geçen akım, (A)
k	:Boltzmann sabiti
n	:Doğrulama faktörü
P _{max}	:Maksimum güç değeri, (W)
q	:Yüklü parçacık değeri, (C)
R _p	:FV paralel direnci, (Ohm)
R _s	:FV seri direnci, (Ohm)
V _{mpp}	:Maksimum güç noktası gerilimi, (V)
V _{oc}	:Açık devre gerilimi, (V)
V _p	:Tepe noktası gerilimi, (V)
VT	:Termal sıcaklık, (T)
η	:Verim
η_{dv}	:Dönüştürme verimi
θ_z	:Zenit Açısı

Kısaltmalar

AM	:Air Mass (Hava kütlesi)
CC	:Constant Current (Sabit Akım)
CV	:Constant Voltage (Sabit Gerilim)
D	:Duty Cycle (Döngü Çevrimi)
EVA	:Etilen Vinil Asetat
FV	:Fotovoltaik
GES	:Güneş Enerji Santrali
IGBT	:Insulated Gate Bipolar (Yalıtılmış Kapılı Çift Kapılı) Transistör
kV	:kilo-Volt
kWh	:kilo-Watt-hours
kWp	:kilo-Watt-peak
MOSFET	:Metal Oksit Yarı-İletken Alan Etkili Transistör
MGNT	:Maximum power point tracking (maksimum güç noktası takibi)
P&O	:Perturb and Observe (Benzet ve Gözle)
PI	:Proportional Integral (Oransal İntegral)
PLL	:Phase Locked Loop (Faz Kilitli Döngü)
PWM	:Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)

STC :Standart Test Conditions (Standart Test Koşulları)
UV :Ultraviolet (Ultraviyole)
VAP :Verimlilik Arttırıcı Proje



ŞEBEKE ETKİLEŞİMLİ FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ VE SİMULASYONU

ÖZET

Dünya üzerinde var olan en büyük enerji kaynağı olan Güneş potansiyelinin, fotovoltaik sistemler içerisinde maksimum verimde kullanılması gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgideki artış, Dünya çapında birçok verimli ve efektif yenilenebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesini tetiklemektedir. Bu artan ilgi ile beraber, kurum ve kuruluşlar yoğun bir şekilde kaynaklarını temiz enerji sistemlerinin geliştirilmesine harcamaktadır. Yeşil enerji kaynaklarının şüphesiz ki en yaygın kullanım alanlarından biri, fotovoltaik güneş pilleri ve fotovoltaik sistemlerdir. Literatürde birçok teorik modelleme örneği olmakla beraber, bu benzetim çalışmalarının gerçek uygulama örneklerine uyarlama çalışmaları bu tip sistemlerin karakteristiklerinin incelenmesinde büyük önem arz etmektedir. Ülkemizde şebeke gerilim değerleri esas alınarak yapılan bu çalışmada, piyasada satılan DA-AA evirici parametrelerine sadık kalınmaya çalışılmıştır. Böylelikle benzetim çalışmasındaki sayısal verilerin uygulama örneklerine yakınlığı irdelenmiştir. Bu çalışmada, günümüzde uygulamalara yönelik bir Güneş enerji santralinin temel anlayış ve Matlab Simulink yardımıyla benzetim çalışmaları açıklanacaktır.

Anahtar Kelimeler: DA-DA Dönüştürücü, Fotovoltaik Sistem, Maksimum Güç Noktası, Matlab, Şebeke Bağlantılı Güneş Enerji Santrali.

INVESTIGATION DESIGN AND SIMULATION OF PHOVOLTAIC SYSTEMS

ABSTRACT

Solar energy potential, is the largest energy source on Earth that needs to be used within photovoltaic system at maximum efficiency. The increasing attention in renewable energy sources triggers the development of many researches on efficient and stable renewable energy systems around the world. With this interest, institutions and organizations are heavily investing their resources in the development of green energy concepts. One of the most widespread uses of renewable energy system is photovoltaic solar cells and photovoltaic systems. In case of many theoretical modelling examples in academic literature, studying these simulation researches getting the attention of characteristics of actual practical examples. In this study, adopting the common grid voltage regulations, the simulation of grid connected photovoltaic has done. DC-AC inverting parameters are used deeply to examine system behaviour. Also this study explains the sub-systems of a photovoltaic plant which is widely used on market. By generating modelling and simulation results, general idea about these plants can be easily examined. With the help of Matlab/Simulink and PVSyt softwares, the necessary datas are given readers to understand the basics of grid connected PV systems.

Keywords: DC-AC Converter Circuits, Photovoltaic systems, Maximum Power Point Tracking, Grid Connected PV System, Matlab.

GİRİŞ

Güneş'in Dünya üzerindeki önemi ve sağladığı enerji kaynağı olarak büyük bir öneme sahiptir. Bu sınırsız ve ücretsiz enerjiyi, fotovoltaik ilkelerle elektrik enerjisine çevirmenin yöntemleri ve geliştirme bilim insanlarının dikkatini çeken bir konudur. Bu sistemlerin yüksek maliyet ve şimdilik düşük verimde olmasından dolayı beklenen etkiyi yaratamamıştır. Bu sistemlerin çıkış güçlerindeki dalgalanmalar, ısınım değişimlerine bağlı olmasından dolayı, elektrik şebekelerinde istenmeyen durumlara yol açmaktadır. Dolayısıyla son kullanıcı tarafından olumsuzluklar meydana gelmektedir. Bu sebeplerle araştırmacıların bu konu üzerinde çalışmaları, devletlerin teşvik çalışmaları bahsi geçen zorlukların aşılmasında kilit rol oynayacaktır.

Hızlı nüfus artışı, bilinçsiz enerji tüketimi, çevresel ve ekonomik zorluklar nedeniyle yenilenebilir özellikle de fotovoltaik sistemlerin gelişmesi gerçeğini ortaya çıkarmıştır. Ek olarak küresel ısınma nedeniyle, Dünya üzerindeki coğrafi dengelerin bozulmaya başlaması, tüm insanlığın üzerinde düşünmesi gereken bir hal almıştır. Bu konuda alınan önlemlerden biri 1997 yılında imzalanan ve 2005 yılında yürürlüğe giren Kyoto Protokolüdür. Taraf ülkelerin 10 yıl içerisinde atmosfere sera etkisi yaratan gazların salınım kısıtlama konusunda fikir birliği içerisinde olduğudur. Özellikle imza atan her ülke, kendi özgün hedefini tutturmaya söz vermiş olmaktadır. %5-8 oranlarında değişen bu kısıtlamalar, 16 Şubat 2005 tarihinden itibaren yasal olarak bağlayıcı nitelik kazanmıştır[1].

Böylelikle gelişmeler hız kazanmış olup, FV panel üretim ve kurulum kapasiteleri giderek artmaktadır. Halen FV pazarında evrensel düzeyde belirli ülkeler kilit rol oynamaktadır. Özellikle 2016 ve 2017 yılında GES pazarı beklenenin çok üzerinde bir artış göstererek rüzgâr enerjisinin yıllık kurulum büyümesini geride bırakmıştır. Ve 2015 yılında 51 000MWp civarında olan kurulu güç, 77 000MWp kadar artmıştır. Ancak ulaşılan gücün küresel elektrik enerjisi talebinin %2'sini karşılama kapasitesinde olduğu hesaplanmaktadır. 2016 yılı içerisinde ABD'de GES kurulum çalışmaları iki katına çıkarken, yaratılan her elli yeni istihdam gücünün biri GES

sektöründe olduğu düşünüldüğünde, FV sistemlerin yenilenebilir enerji piyasasının liderliğine oynayacağına işaret etmektedir[2].

Türkiye coğrafi konum olarak, Güneş kuşağı olarak adlandırılan ve bu konuda şanslı bir konumdadır. Çeşitli bölgelere göre yıllık güneşlenme süresi 2993-1971 h/yıl olduğu bilinmektedir. Bu değer yaklaşık olarak 1460-1120 kWh/m².yıl civarındadır. Türkiye yüz ölçümüne göre elde edilebilen brüt Güneş gücü 111500 GW mertebesindedir. Ancak çeşitli yansıma ve kayıplar nedeniyle kullanılabilir potansiyel 116 GW civarındadır. Bu güç ile sağlanabilecek enerji, %10 verimli FV sistemler kullanıldığında 8800 Btep elektrik kadardır[3].

Özellikle Güney Doğu Anadolu Bölgesi ve Akdeniz Bölgesi Güneş potansiyeli bakımından ülkemizin zengin bölgeleridir. Bu kaynaklar ile ilgili verileri Tablo 1.1 ve Tablo 1.2’de verilmiştir[4].

Tablo 1.1. Türkiye aylık ortalama Güneş enerji potansiyeli

AYLAR	AYLIK TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ		GÜNEŞLENME SÜRESİ (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
NİSAN	10,51	122,23	197,0
MAYIS	13,23	153,86	273,0
HAZİRAN	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
EKİM	7,73	89,90	214,0
KASIM	5,23	60,82	157,0
ARALIK	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

Tablo 1.2. Türkiye bölgelere göre Güneş enerji potansiyeli dağılımı

BÖLGE	TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ (kWh/m ² -yıl)	GÜNEŞLENME SÜRESİ (Saat/yıl)
G.DOĞU ANADOLU	1460	2993
AKDENİZ	1390	2956
DOĞU ANADOLU	1365	2664
İÇ ANADOLU	1314	2628
EGE	1304	2738
MARMARA	1168	2409
KARADENİZ	1120	1971

Artan enerji maliyetleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının ihtiyacı, FV sistemlerin maliyetlerinin düşmesi bu tez çalışmasının ilham verici unsurlarıdır.

Bu tez çalışması, FV sistemlerin önemi ve gelişmeleri hakkında bilgi vermekte olup, Kocaeli ilinin Gebze ilçesine kurulabilecek şebeke bağlantılı 900kWp gücünde bir GES projesinin detayları irdelenmiştir.

Tezin birinci bölümünde, fotovoltaik sistemler hakkında bilgi verilmiş, tarihçesi ve temel unsur olan ışımaya tanımı yapılmıştır. Ayrıca Güneş panellerinin yapısını derinlemesine anlayabilmek adına bu cihazların matematiksel tanımlaması yapılmıştır. Panellerin verimliliğini etkileyen faktörler hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca bu paneller ile kurulan sistemlerin yapısına ve tiplerine değinilmiştir.

İkinci bölümde, fotovoltaik güç sistemlerini oluşturan alt elemanlar hakkında bilgi verilmiştir. Özellikle DA ve AA güç elektroniği konuları hakkında bilgi verilmiş olup FV sistemlerin kilit noktalarından biri olan maksimum güç noktası takibi kavramından bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde ise, Gebze ilçesinde bir üretim tesisine kurulabilecek 900kWp gücünde çatı tipi bir Güneş enerji santralinin tasarım aşamalarından bahsedilmiştir. Ek

olarak pratikte yapılan bu uygulamaların MATLAB ve Simulink ortamında benzetim çalışmaları ile beraber, birbirine bağılı olarak çalışan birçok sistemin genel davranışları incelenmiştir.

Bu çalışmanın ışığında, tasarlanan FV sistemin ileride maliyet ve fizibilite çalışmaları yapılabilir. Ortaya çıkan veriler ile beraber, kendini geri ödeme süresi ve paranın belirli zaman sonraki değerini hesaplama gibi maliyet analizleriyle yatırımcıya sağladığı faydalar tartışılabilir. Teknik olarak ise, yapılan MATLAB simulasyonu dağıtım şebeke ölçütlerine bağılı kalarak gerilim seviyesi arttırılarak, güç transformatör modelleme yapılabilir. Böylelikle, dağıtım şebekesine bağlantısı tamamlanmış olacaktır. Ayrıca bağılanılan şebekenin yük analizi yapılarak daha kesin sonuçlar için şebeke modellemesi daha sağlıklı yapılması gerekmektedir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasının, ülkemizin geleceğı, daimi olması ve Dünya ülkeleri arasında enerji sektöründe pay sahibi olmasını dileyerek, bu alanda çalışma yapmak isteyen herkese kaynak olması için hazırlanmıştır.

1.FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

1.1.Fotovoltaik Enerji Tanımı

Fotovoltaik terimi, antik Yunanca’ da ışık anlamına gelen “foto” ve elektriksel potansiyel fark anlamında “voltaik” kelimelerinin birleşmesiyle meydana gelen ve ışığa enerjisinin, elektrik enerjisine dönüşümünde kullanılan terimler ifade etmek için literatürde yerini almıştır.

“Fotoelektrik etki” terimi ise, ilk olarak 1839 yılında Fransız fizikçi Edmund Bequerel tarafından, belirli maddelerin ışığa maruz kaldığında düşük miktarda elektrik akımı üreteceğini belirtirken kullanılmıştır. Ardından 1905 yılında Albert Einstein, ışığın doğasını ve fotoelektrik etki ile olan ilişkisini tanımlayan çalışmasıyla Nobel fizik ödülüne layık görüldü. Böylece fotovoltaik teknolojisinin temelleri atılmış oldu.

I. Dünya Savaşı sırasında petrolün değer kazanması ile Güneş enerjisine yönelik çalışmalar giderek azalmıştır. 1930 yılı başı itibariyle Güneş enerjisi ile ilgili çalışmalar hız kazansa da fazla uygulama alanı bulamamıştır, çalışmalar araştırma kurumlarının dışına çıkamamıştır[1].

İlk fotovoltaik modül ise 1954 yılında Bell Laboratuvarları’nda üretilmiştir. Daha çok bir Güneş pili olarak tasarlanmasına istinaden, yüksek maliyeti nedeniyle yaygınlaşması uzun zaman almıştır.

1960 yılında ise Güneş Panelleri teknolojisinde önemli bir gelişmeye imza atılarak, uzay sanayisinde ilk ciddi amaçlı paneller üretilmeye başlanarak, uzay araçlarına güç sağlamak amaçlanmaktaydı. O dönemde uzay programları sayesinde teknoloji gelişmiş, ekipmanların güvenilirliği sağlanmış ve maliyetler düşmeye başlamıştır. Özellikle 1970 yıllarında, panel imalat, performans ve kalitedeki iyileşmeler, maliyet düşürmeye yardımcı olarak, telekomünikasyon alanında kullanılan cihazlar gibi kritik ve düşük güç gereksinimleri için pil şarjı da gibi birçok alanda yerini almıştır.

1980'li yıllarda fotovoltaik (FV) teknolojisi, hesap makineleri, saatler, radyolar, fenerler ve diğer küçük pil sarj uygulamaları gibi tüketici elektroniği cihazlarda kullanılmak üzere popüler bir güç kaynağı haline gelmiştir. Özellikle bu yıllarda enerji krizlerini takiben, FV sistemleri geliştirip ticari ve konut uygulamalarında hem şebekeden uzakta ve bağımsız hem de şebeke bağlantılı uygulamalar için önemli çabalar sarf edilmiştir. Aynı dönemde, sağlık kuruluşlarında, soğutma sistemlerinde, su pompalama gibi kırsal alan uygulamalarında FV sistemlerin önemli giderek artmıştır[2].

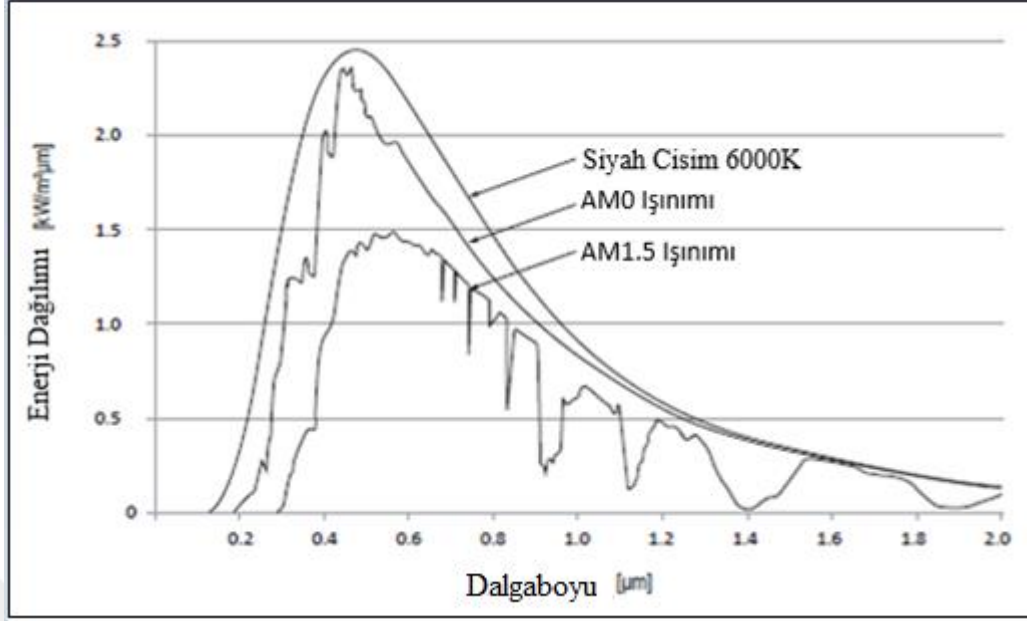
1.2.İşıma Enerjisi Tanımı

Dünya'da var olan enerjinin ana kaynağı Güneş'tir ve bu kaynak sayesinde yaşamın var olması ve devamlılığı büyük önem arz etmektedir. Dünya'ya en yakın yıldız olan Güneş, sahip olduğu enerjiyi Dünya'ya elektro-manyetik ışıma yoluyla iletmektedir. Bu iletimin ışık hızında olduğu Albert Einstein'ın çalışmaları ile kanıtlanmıştır.

Bu enerji potansiyelinin Dünya'ya ulaşan kısmı, birçok etkene bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Mevsimsel değişkenlik, sıcaklık değişimleri ve ışıma açılarındaki varyasyonlar birim alanda elektrik üretiminde kullanılacak Güneş Enerjisi miktarını doğrudan etkilemektedir. Bu değişimler ise matematiksel yöntemler kullanılarak önceden hesaplanabilir ve projelerde önemli verileri oluşturmaktadır.

Bu enerjinin ölçümü ve korunumu belirli yasalarla ve formüllerle tanımlanmaktadır. Güneş Enerjisinin iletimi "ışıma" tanımıyla başlar. Temelde birim alanda ölçülen, elektromanyetik ışıma yoluyla ölçülen güç miktarıdır. Birim olarak ise "Watts/m²" olarak ifade edilmektedir.

Güneş yaklaşık 6000 Kelvin sıcaklıkta kara cisim ışıma spektrumuna benzer elektromanyetik yayılma yoluyla ışık saçan bir kaynaktır. Siyah bir cisim olarak kabul edilen uzay boşluğunda ve tüm dalga boylarında elektromanyetik radyasyonu emer ve yayar. Ve dalga boylarının teorik dağılımı Planck Yasası ile tanımlanır. Şekil 1.1'de bu ışımanın uzay boşluğu ve Dünya yüzeyinde spektral dağılımı verilmiştir[3].

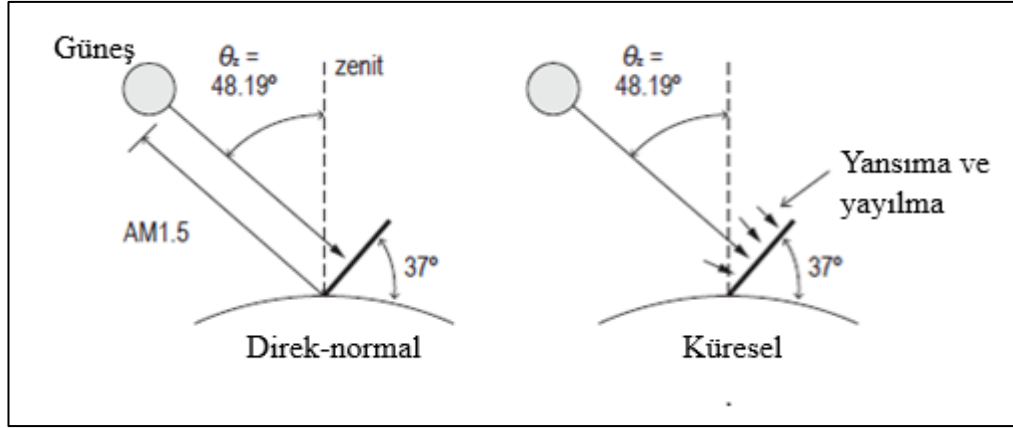


Şekil 1.1. Dünya yüzeyinde kara cisim ve Güneş ışınlarının spektral dağılımı

AM (Air Mass) ile gösterilen değer, hava ağırlığıdır. Daha detaylı açıklamak gerekirse, Güneş ışınlarının spektral dağılımına maruz kaldığı yüzey ile Güneş arasındaki havanın ağırlığıdır. AM numaraları ise, radyasyonun atmosfer ile arasındaki uzaklığı tabir eden rakamdır. Uzun mesafeler, daha fazla sapma ve bozulmalara yol açmaktadır. Bu bahsedilen olayların, FV cisim tarafından emilen spektral ışımaya doğrudan etkisi vardır. AMx terimindeki x katsayısı ışığın yolunun uzunluğunu belirtir ve aşağıdaki formülle belirtilir[3]:

$$x = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (1.1)$$

θ_z ifadesi, Güneş'in referans olan zenit ile arasındaki açıdır ve aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 1.2. AM1.5 uzaklığında normal ve evrensel ışıma örnekleme

X değeri ne kadar büyük olursa, Güneş ile FV cihazın arasındaki yol ve hava kütlesi o kadar artar. Standart AM1.5 dağılımı, Güneş ışımalarının $\theta_z=48,180^\circ$ ilişkidir. Yukarıda verilen şekilde evrensel ışıma direk ışıma ifadeleri görülebilir[3].

Coğrafi konuma, zamana, yılın farklı günlerine, iklim koşullarına, atmosfer bileşenlerine, yüksekliğe gibi birçok etkene bağlı olarak, Güneş radyasyonunun spektral dağılımı ve yoğunluğu değişiklik gösterebilir. AM1.5 spektral dağılımları birbirinden farklı FV cihazların değerlendirilmesi ve karşılaştırılmasında ortalama bir değer olarak düşünülebilir. FV panel endüstrisinde AM1.5 bir test standardı olarak kabul edilmiştir. Böylelikle standart test durumları (STC), 1000 W/m^2 ışıma değerinde, 25°C ve AM1.5 ışınım bandını kabul eder[3].

Dünya yüzeyine ulaşan Güneş ışınlarında yansımalar ve taşınma yöntemleri ile belirli kayıp miktarları olmaktadır. Kalan kısımların, kara ve okyanuslarda soğurulan oranları ise FV teknolojilerde kullanıma uygunluk göstermektedir.

1.3.Güneş Panel Tanımı

Güneş Panelleri, genel olarak Güneş'in yaydığı ışıma enerjisini elektrik enerjisine FV kurallar çerçevesinde dönüştüren yarı-iletken aygıtlardır. Paneller en küçük hücre olarak tanımlanan yapılardan oluşmaktadır.

Günümüz elektronik ürünlerinde kullanılan transistörler, doğrultucu diyotlar gibi güneş pilleri de, yarı-iletken maddelerden imal edilmektedir. Yarı-iletken özellik

gösteren birçok madde arasında güneş pili yapmak için en elverişli olanlar, silisyum, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi maddelerdir[4].

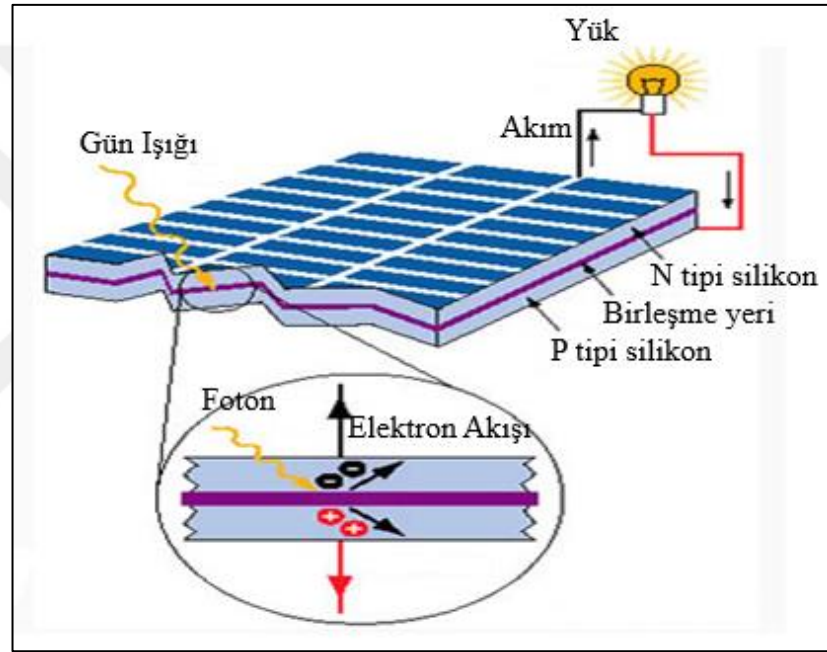
Yarı-iletken maddelerin güneş pili yapımında kullanılabilmesi için “n” ya da “p” tipi yapılandırılmaları gereklidir. Bu yapılanma, saf yarı iletken eriyik içerisine istenilen katkı maddelerinin kontrollü olarak eklenmesiyle yapılır. Elde edilen yarı-iletkenin “n” ya da “p” tipi olması katkı maddesine bağlıdır. En yaygın olarak kullanılan güneş pili maddesi olarak silisyumdan n tipi silisyum elde etmek için silisyum eriyiğine periyodik cetvelin 5. Grubundan bir element, örneğin fosfor eklenir. Silisyum’un dış yörüngesinde 4, fosforun dış yörüngesinde 5 elektron olduğu için, fosforun fazla olan tek elektronu kristal yapıya bir elektron verir. Bu nedenle 5. Grup elementlerine “verici” ya da “n tipi” katkı maddesi denir[4].

P tipi silisyum elde etmek için ise, eriyiğe 3. Gruptan bir element (alüminyum, indiyum, bor gibi) eklenir. Bu elementlerin son yörüngesinde 3 elektron olduğu için kristalde bir elektron eksikliği oluşur, bu elektron yokluğuna boşluk denir ve pozitif yükler barındırdığı varsayılır. Bu tür maddelere de “p tipi” ya da “alıcı” katkı maddeleri denir[4].

Yarı iletken eklemeler, “P” ya da “N” tipi ana malzemenin içerisine gerekli katkı maddelerinin katılması ile oluşturulur. “N” tipi yarı iletkende elektronların birleşiminden önce, her iki madde de elektriksel olarak nötrdür. Yani p tipinde negatif enerji seviyeleri ile boşluk sayıları eşit, n tipinde pozitif enerji seviyeleri ile elektron sayıları eşittir[4].

P-N eklem oluştuğunda, n tipindeki çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar, p tipine elektron geçişi dolayısıyla doğru akım oluştururlar. Bu olay her iki tarafta da yük dengesi oluşana kadar devam eder. PN tipi maddenin ara yüzeyinde, yani eklem bölgesinde, P bölgesi tarafında negatif N bölgesi tarafında pozitif yük birikmesi meydana gelir. Bu eklem bölgesine “elektron geçiş bölgesi” ya da “yükten arındırılmış bölge” denir. Bu bölgede oluşan elektriksel alan “yapısal elektrik alan” olarak adlandırılır. Yarı iletken eklemine güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde FV dönüşümün sağlanması gerekir. Bu dönüşüm iki aşamada olur, ilk olarak, eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-hol çiftleri oluşturulur, ikinci olarak ise, bunlar bölgedeki elektronlar elektrik alan yardımıyla birbirinden ayrılır[4].

FV olaylar sayesinde hücre içerisinde enerji dönüşümü olayları meydana gelmektedir. FV olayda, ışık fotonları yoğunlukla eklem bölgesine ulaştığında elektronlara çarparak serbest yük çiftleri oluşturur ve harekete geçirir. Uyarılan negatif yüklü her elektron, gerisinde pozitif yüklü bir boşluk bırakır. Bu yük taşıyıcıları, eklemle kurulan doğal iç ters elektrik alanla akım katkısı oluşturmak üzere yoğunlukta oldukları bölgelere hareketlenir. Doğal elektrik alanı, fotonla enerji kazan yük taşıyıcılarının hareketlerinde hangi tarafa eğilimli olduklarını ifade eden bir enerji engeli olarak düşünülebilir. Böylece fotonlarla üretilen negatif yüklü elektronların bölgesinde, pozitif yüklü taşıyıcılar p bölgesinde toplanarak bir gerilim üretilmektedir[4].

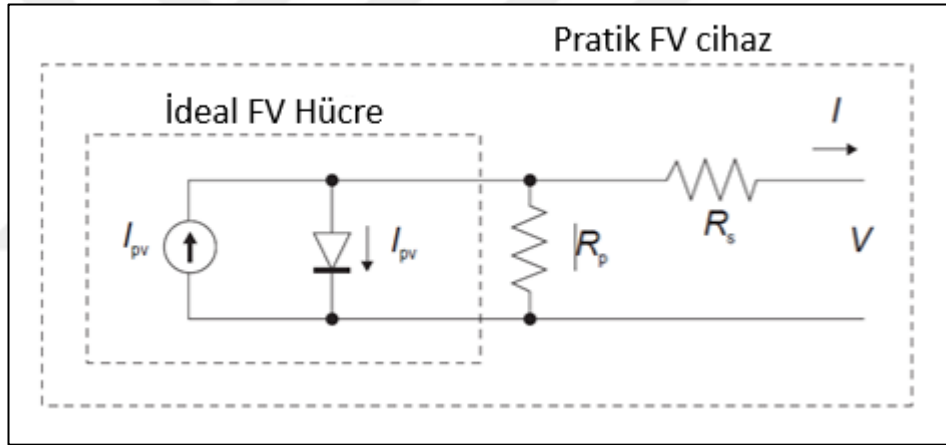


Şekil 1.3. Fotovoltaik hücre yapısı

1.3.1. İdeal güneş paneli tanımı

Güneş Panelleri içerisinde oluşan ve potansiyel fark oluşmasıyla sonuçlanan operasyonları tanımlamak için ideal Güneş paneli tanımı açığa çıkmıştır. Bu tanım, FV panelin elektriksel davranışlarını, ayırık bileşenler kullanarak analizinde büyük kolaylık sağlamaktadır. İdeal panel modeli, sistem modellemelerinde ve atmosferik koşullarda olan değişimlerin etkilerini analiz etmede kolaylık sağlayarak, karmaşıklıkları ortadan kaldırmaktadır. Bu tanımla panel içerisinde eşdeğer devresi çıkarılarak davranış ve analizlerini basite indirmek mümkündür.

İdeal FV hücre modeli Kirchoff Kanunları ve yarı-iletken teorisi kullanılarak eşdeğer devre denkleminde bize birçok analiz yapmaya olanak sağlar. Şekil 1.4’de görüldüğü üzere, sistem foton enerjisi ile elektron hareketini oluşturan FV olayların sonucu bir akım kaynağı gibi modellenmektedir. Ve açığa çıkan akım miktarı I_{pv} olarak ifade edilmektedir. Ayrıca panelin p-n kavşaklarını ifade eden şönt diyot belirtilmiştir. Diğer bir terim ise FV hücrenin p-n kavşaklar arasındaki birleşimde bulunan kayıp ve yabancı maddelerden kaynaklanan kaçak akımları hesaba katma amacıyla paralel bağlı gibi düşünülen direnç R_p ifadesidir. Bu değer mümkün olduğuna kadar yüksek olması hedeflenerek, kayıp akımları en aza indirmek hedeflenir. İdeal şartlar altında kayıplar göz önüne alınmayarak tüm model böyle modellenebilmektedir. Ek olarak ise, pratik uygulamalar ve hesaplar için bu devreye seri olarak bağlı ve yarı-iletkenlerin metalik kontakların ohmik direnç değerleri ifade etmek için R_s terimi vardır.



Şekil 1.4. İdeal fotovoltaik hücre devre şeması

Yukarıda görülen devre şemasında elemanların matematiksel dönüşümlerini yapmak için Kirchoff akımları kanunu devreye girmektedir.

Bu tanımlamalarla ideal bir FV hücrenin lineer olmayan I-V karakteristiklerine ulaşılabilir. Özellikle araştırmacılara büyük kolaylık sağlayacak, FV hücre fiziksel özelliklerinin matematiksel yöntemlerle ifade edilmesi ve dönüşümü sayesinde, giriş sıcaklık ve ışım faktörlerinin doğrudan etkilerinin irdelenmesini kolaylaştıracaktır[5].

1.3.2. Güneş panel çalışması ve denklemleri

Eşdeğer devrede akım kaynağı olarak tanımlanan panelden çıkan akım, diyot üzerinden geçen akım ile kayıp akımların toplamından oluşmaktadır;

$$I = I_{pv} - I_d - I_p \quad (1.2)$$

Paralel bağlı direnç uçları arasındaki potansiyel fark değerinin detaylı yazımı ise,

$$V_p = V + IR_p \quad (1.3)$$

Paralel bağlı dirençten geçen akım ise,

$$I_p = \frac{V_p}{R_p} = \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1.4)$$

Shockley Denklemlerinden yararlanılarak diyot üzerinden geçen akım ise,

$$I_d = I_0 \left[e^{\frac{V_s}{nV_T}} - 1 \right] \quad (1.5)$$

I_0 : ters saturasyon akımı

k : Boltzmann sabiti = $1,3806488 \times 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$

n : doğrulama faktörü (ideal diyot için 1 kabul edilir)

q : Yüklü parçacık değeri = $1,602176565 \times 10^{-19} \text{C}$

T : sıcaklık değeri K

V_T : termal voltaj

Genel ideal panel denkleminde terimleri yerine koyarsak,

$$I = I_{pv} - I_o \left[e^{\frac{V_{sh}}{nV_T}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1.6)$$

I: Yük üzerinden akım değeri

I_d : Diyot üzerinden geçen akım değeri

I_{pv} : Panel tarafından üretilen akım değeri

I_{sh} : Şönt bağlı direnç üzerinden geçen akım değeri

R_s : eşdeğer seri direnç değeri

R_p : Eşdeğer şönt direnç değeri

V: Yük üzerindeki potansiyel fark

V_p : Eşdeğer şönt potansiyel fark değeri

Bu durumda panellerin karakteristik özelliklerini belirlemek ve kısa devre akımları, açık devre potansiyel farkları gibi değerleri belirlemek amacıyla, denklemdeki belirli terimler için çeşitli varsayımlar yapılır.

Açık devre analizleri için akım değeri sıfır kabul edilerek $I=0$ olursa, genel denklem aşağıdaki gibi olmaktadır,

$$0 = I_{pv} - I_o \left[e^{\frac{V_{oc}}{nV_T}} - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (1.7)$$

Bu varsayımda, R_p açık devre gerilimine göre çok büyük bir değer olduğundan, formüldeki son terim yok sayılmaktadır. Buna göre denklem tekrar düzenlenecek olursa,

$$V_{oc} \approx nV_T \ln \left[\frac{I_{pv}}{I_o} + 1 \right] \quad (1.8)$$

Kısa devre akımı için ise, panel çıkışının kısa devre olduğu düşünülerek, $V=0$ kabul edilerek,

$$I_{SC} = I_{PV} - I_0 \left[e^{\frac{I_{SC} R_S}{nVT}} - 1 \right] - \frac{I_{SC} R_S}{R_P} \quad (1.9)$$

Bu durumda ise, R_P değeri R_S direnç değerine kıyasla çok daha büyük olduğu için, denklemdaki son terim sıfıra çok yakın bir değerdir. Ayrıca logaritmik ifadenin içerisinde bulunan terimler sıfır olarak kabul edilir.

$$I_{SC} \approx I_{PV} \quad (1.10)$$

Böylelikle, seri direnç, R_S şönt direnç R_P ve ters saturasyon akımı I_0 fotovoltaiik hücre alanına bağlıdır. Alan kesidi büyük olan panellerde I_0 değerleri daha büyük ancak R_P ve R_S değerleri daha küçük olacaktır.

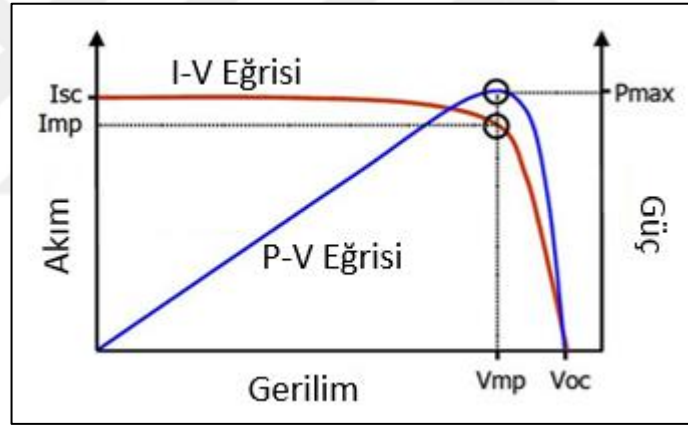
Fotovoltaiik panellerin değişken durumlardaki performanslarını incelemek için yukarıdaki formüller kullanılmaktadır. Özellikle panellerin akım-gerilim (I-V) ve güç-akım (P-I) grafikleri birçok yorum yapabilmeyi ve verim analizleri açısından büyük önem taşır.

1.3.3. Güneş panel verimliliği ve karakteristikleri

Bir önceki bölümde belirtildiği üzere, ideal Güneş panel denklemlerini sadeleştirilerek, performans analizlerinde büyük önem arz eden birimleri yorumlamak daha kolay hale gelmiştir.

Bu yaklaşımlara ulaşmak için, FV panelin kısa devre akımının I_{SC} ve panel açık devre geriliminin V_{OC} maksimum değerlerine ulaştığını düşünmek gerekir. Bu karakteristik değerler, birçok panel üretici firma tarafından verilmektedir. Farklı tip panelleri karşılaştırmak için ve analizleri standartlaştırmak için IEC 60904 / DIN EN 60904 standartları getirilmiştir. Bu standartlar çerçevesinde üç ana kıstas sabit tutulmaktadır ve bu duruma “standart test değerleri” (Standart Test Conditions STC) adı verilmektedir. STC durumlarında ışımaya değeri $W=1000 \text{ W/m}^2$; panel hücre sıcaklıkları $T= 25^\circ\text{C}$ ve hava özgül kütle katsayısı $G_0 =1,5$ olarak kabul edilmektedir.

Bir FV hücrenin karakteristik akım-gerilim eğrisi Şekil 1.5’ de verilmiştir. Çalışma şartlarına bağlı olarak panelin bu eğrinin herhangi bir noktasında çalışması mümkündür. FV hücre, Güneş ışığı altındayken bir gerilim açığa çıkarır. Hücrenin uçlarına sonsuz yük direnci bağlandığında ölçülen bu gerilime açık devre gerilimi V_{oc} denir. Pil ışığa altındayken uçlarının kısa devre edilmesiyle akan akıma da kısa devre akımı I_{sc} adı verilir. Fotovoltaik hücrenin karakteristik eğrisinde eksenlerdeki sınır değerlerini oluşturan bu iki tanımdır. Farklı ışığa koşulları altında açık devre gerilimi V_{oc} ve kısa devre akımının I_{sc} değerleri farklı olmaktadır. Bu durumda farklı ışığa altındaki FV hücrelerin eğrileri farklıdır. Üretici firmalar 1000 W/m^2 gibi standart değerler altında yapılan ölçümlere göre bu değerleri verirler. Bu değerler aynı zamanda bir hücrenin verebileceği maksimum akım ve gerilim değerleridir. Yalnız yük altında çalışırken, pilden maksimum güç elde edebilmek için bu değerlerin eğri üzerindeki maksimum gücü verecek noktaya kaymaları gerekmektedir[6].



Şekil 1.5. Fotovoltaik panel gerilim, akım ve güç grafikleri

Yüke aktarılan gücün maksimum olduğu noktaya maksimum güç noktası adı verilir. Bu nokta üzerindeki akım ve gerilim değerleri V_{mpp} ve I_{mpp} olarak ifade edilir. Hücreden beklenen performans, hücrenin bu nokta üzerinde çalışmasını sağlamaktadır. Diğer bir parametre ise, maksimum gücün (P_{max}) kısa devre akımı I_{sc} ve açık devre gerilimine V_{oc} 'nin çarpımına bölümünden elde edilen ve aşağıdaki denklemde gösterilen doluluk faktörüdür. Bu değer üretilen fotovoltaik hücreler için hesaplanabilir ve ideal bir hücre için 0,7 değerinden büyük olması istenir. Genellikle değeri $0,7 < ff < 0,85$ arasındadır. Doluluk faktörü akım-gerilim eğrisinin karesel olmasıyla alakalı bir ölçüttür[6].

$$\text{Doluluk faktörü} = \frac{I_{\text{mpp}} V_{\text{mpp}}}{I_{\text{sc}} V_{\text{oc}}} \quad (1.11)$$

Diğer bir önemli terim ise “çevrim verimi” dir. Azami güç değeri ile, anlık ölçülen güç değerinin oranından hesaplanan bu değer, maksimum güç değerinin 1000 W/m² değerinde ölçülen güç değeri ile kolayca hesaplanabilmektedir.

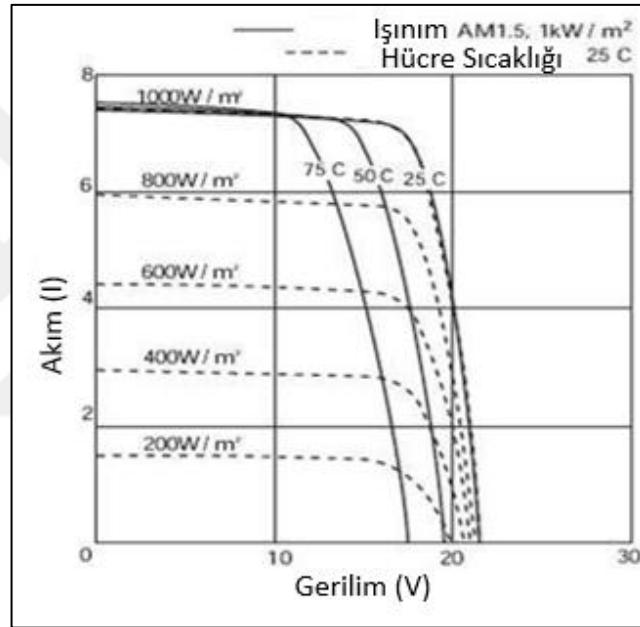
$$\eta = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{in}}} = \frac{I_{\text{mpp}} V_{\text{mpp}}}{P_{\text{in}}} = \frac{I_{\text{sc}} V_{\text{oc}}}{P_{\text{in}}} \quad (1.12)$$

Tipik kristal silikon Güneş panelleri için yaklaşık değerler; $I_{\text{sc}} \approx 35 \text{mA/m}^2$, $V_{\text{oc}} = 0,65 \text{V}$ civarında ve doluluk faktörü 0,75 ile 0,80 arasındadır. Bu hesaplama ile çevrim verimi 17-18% arasındadır[6].

Fotovoltaik güneş panellerinin karakteristik eğrilerinin çalışma koşullarını belirleyen iki önemli etken olan ışık ve sıcaklık bu cihazların çalışma durumlarını doğrudan etkilenmektedir. Değişen çalışma koşullarından dolayı, panelin çalışma noktası da sürekli değişmekte dolayısıyla pilin çalışma noktası her zaman maksimum güç noktası olmamaktadır. Fotovoltaik panellerin uygun kombinasyonlarda seri veya paralel bağlanmaları sonucunda farklı güç değeri ve karakteristiğine sahip panel dizileri elde edilir. Söz konusu etkiler göz önünde bulundurularak panellerin sürekli maksimum güç noktasında çalıştırılabilmesi için çıkış akımı ve çıkış gerilimi takip edilerek çıkış gücü ölçülür. Denetleyiciler ve yazılımlar ile sistem içerisinde panellerin maksimum güç noktaları belirlenir ve çıkış gücü bu akım ve gerilim değerlerinin eğri üzerinde takibiyle maksimum güç noktasında düzenli bir çalışma göstermesi beklenir. Güneş takip sistemleri, yansıtıcılar, soğutma sistemleri v.b. ışık ve sıcaklık faktörlerini kontrol etmeyi sağlayan yardımcı sistemler olmakla birlikte esas olarak güç dönüştürücüleri yardımı ile maksimum güç noktasında kararlı çalışması sağlanır[6].

Güneş panellerinin aynı performans ve çıkış değerlerinde çalışmamasının nedeni, atmosferik olaylar olan sıcaklık ve ışınım değişkenliğidir. Hava sıcaklığının artışı, panel sıcaklığını etkileyerek çıkış akım ve gerilim değerlerini etkilemektedir. Böylelikle, soğuk atmosferik ortamların fotovoltaik panel uygulamaları için daha uygun olduğu sonucu çıkarılabilir. Aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere, sıcaklık artışının etkileri özellikle panelin çıkış geriliminin düşmesi ve buna bağlı olarak

maksimum güç noktasının değişmesine yol açmaktadır. P-N bantlarının karakteristiklerinden dolayı, sıcaklığın yükselmesi bantlardaki potansiyel engelin azalmasına, yarı-iletken termal boşluk ve elektronların artmasına sebebiyet verir. Bu sıcaklık artışı ile beraber kaçak akımlar da yükselmiş olur. Kaçak akım artışı fotovoltaik hücrede ısı kayıplara ve çıkış akımının azalmasına neden olur. Sıcaklık hücre verimini etkileyen önemli bir faktördür. Güneşlenme süresi aynı olan bir yaz ve kış günü karşılaştırıldığında, kış aylarında daha yüksek verimlilik oranları ile karşılaşılır. (Güneş ışınma açısı sabit kabul edilmiştir) Bu nedenle panellerin çalışma sıcaklıklarını düşürmek için hava sirkülasyonu hesaplanarak yerleşimi yapılır.



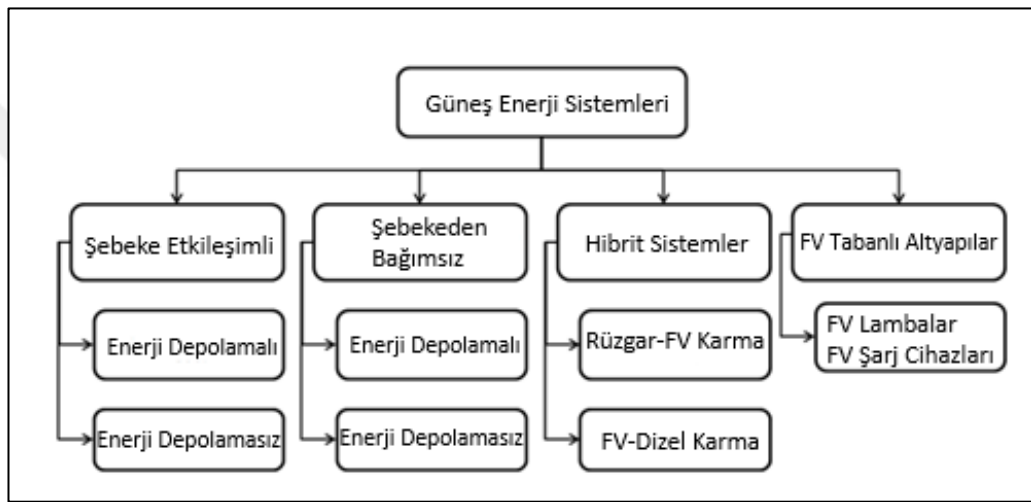
Şekil 1.6. Farklı ışınma ve sıcaklık durumlarında FV hücrenin I-V grafiği

Güneş panellerin verimini etkileyen diğer bir faktör güneşlenme süresidir. Bir bölgedeki Güneşin gökyüzünde görülebildiği süreye güneşlenme süresi denir. Güneşlenme süresinin uzun olması, o bölgede Güneş'ten alınan enerjinin artmasına ve ısınmaya yol açar. Yeryüzünde güneşlenme süresinin yıl boyunca en fazla olduğu yerler dönenceler çevresidir. Kutup bölgelerinde yaz mevsiminde güneşlenme süre uzundur fakat sıcaklık düşüktür. Bu durumun temel sebebi güneş ışınlarının eğik açılarla gelmesidir[7].

Ayrıca panellerin montaj açısı verimlilik oranını yükseltmek için çok önemli bir faktördür. Güneş ışınlarının Dünya'ya geliş açısı yıl içerisinde farklılık gösterdiğinden, optimum panel eğim açısı hesaplanmalıdır[8].

1.4. Güneş Santrali Sistem Tipleri

Güneş santralleri çeşitli özellikleri ile birbirinden ayrılmaktadır. Bu farklılıklar, tasarım amaçlarına göre ve bağlantı tiplerine göre sınıflandırılabilir. Aşağıdaki şekilde bu ayırım verilmiştir.



Şekil 1.7. Fotovoltaik Sistem Tipleri

İki ana kategori olan şebekeden bağımsız ve şebeke bağlantılı türler olmakla beraber karma sistemlerde günümüzde yaygınlaşmaktadır.

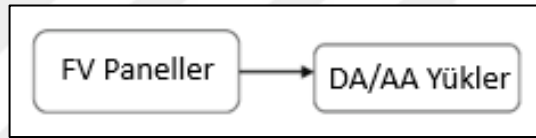
1.4.1.Şebekeden bağımsız santraller

Elektrik şebekelerine göre bağlantıları Güneş enerjisi santrallerinin temel ayırım noktalarıdır. Elektrik ihtiyacı ve elde edilen enerjinin hangi şekilde kullanılacağı büyük önem arz etmektedir.

Şebekeden bağımlı olmayan sistemlerin genel amacı, domestik elektrik şebekesinin mesafe olarak yakın olmaması dolayısıyla şebeke bağlantısının ekonomik açıdan yanlış bir seçim olduğu durumlarda göz önüne alınmaktadır. 34,5kV elektrik dağıtım hattının maliyeti düşünüldüğünde, tüm kablo ve ekipman maliyetleri, işçilik masrafları ve elektriksel kayıplar hesaplanmalıdır.

Bu tip sistemlerin en kritik özelliği enerji üretiminin güvenilirliği ve sürekliliğidir. Nedeni ise, bazı telekomünikasyon sistemleri, deniz aşırı sinyal sistemlerinde özellikle enerjinin sürekliliği büyük önem arz etmekte olup, oluşabilecek kesintilerin yaratacağı etkiler de büyük olacaktır[9].

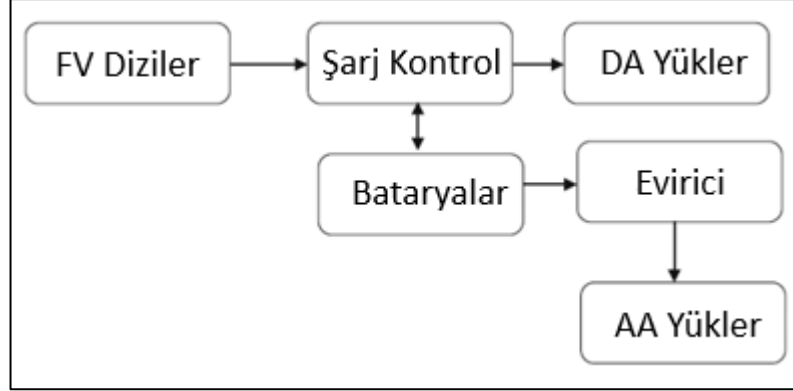
Kendi içerisinde ikiye ayrılan bu tip sistemlerde, fotovoltaik panel gruplarının doğrudan elektriksel yüklerle birleşik olduğu direk bağlı sistemler ve akü grupları ile enerji depolama imkân sağlayan ve ihtiyaç halinde kullanıma hazır olan santral tipleri gibi iki ayrı temel grup vardır. Panel gruplarının direk elektriksel yüke bağlı olduğu sistemler özellikle tarımsal uygulamalarda yaygınlık gösterir. Güneş ışınlarının aktif olduğu gündüz saatlerinde çalışması için tasarlanan bu sistemler, özellikler karşımıza büyük tarım alanlarının sulama ihtiyaçlarında panellerin direkt olarak pompa gruplarına bağlanarak çalıştırılan sistemlerde karşımıza çıkmaktadır[9].



Şekil 1.8. Şebekeden Bağımsız tesis şeması

Genellikle bir şebekeden bağımlı olmayan bir Güneş enerjisi tesisi, fotovoltaik paneller ve enerji depolama aygıtları olan akü gruplarından oluşmaktadır. Güneş ışınları altında, Güneş panellerinin ürettiği enerji, elektriksel bir yüke iletilerek batarya gruplarını şarj etmekte kullanılır. Ardından, bu depolanan elektrik enerjisi uygulamaya göre kullanım için hazırdır.

Panellerin seri yada paralel bağlanarak sistemin ihtiyacı olan gerilim seviyesine çıkılması ardından, batarya gruplarını şarj etmek amacıyla şarj kontrol devrelerine iletilmektedir. Böylelikle sistemin hem gece, hemde Güneş ışınlarının optimum durumlar dışındaki durumlarda sisteme stabil elektrik enerjisi iletilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca bu şarj kontrol devreleri ile, batarya durumu gözlenerek, elektriksel yüklerin batarya tarafından kesintisiz bir şekilde beslenme durumunu korur. Akü gruplarının şarj gerilim seviyesini geçmemesi için koruma olarak da görevi vardır. Işıma seviyesinin yeterli olduğu durumlarda yüklerin direk paneller sayesinde beslenerek, bir yandan da batarya gruplarını şarj etmektedir.



Şekil 1.9. Şebekeden bağımsız depolamalı FV sistem şeması

Bu tip sistemler tasarlanırken, göz önüne alınması gereken belirli kriterler vardır. Panel tip ve sayısı her sistemde önemli olacağı gibi, beslenecek sistemdeki elektriksel yüklerin enerjisiz kalma süre toleransı batarya gruplarının büyüklüğünü doğrudan etkilemektedir. Düşük ışığa altında ya da Güneş ışınlarının mevcut olmadığı süreler hesaplanmalıdır. Bu nedenle yüksek kapasiteli bataryaların seçilerek, bu cihazların ömürlerini uzatmak adına şarj ve deşarj durumları titizlikle hesaplanmalı ve devreye alınmalıdır. Batarya gruplarının çalışma durumlarında üretilen enerjinin 20-30% kısmı ısı gibi kayıplara gidebilmektedir. Ve bataryaların genel olarak 80% kapasitenin altına düşmeden sarj seviyesini koruması hedeflenmelidir. Ek olarak tam kapasite ile şarj olmuş bataryaların tamamıyla dolduktan sonra akım almalarının önüne geçilmelidir. Tüm bu önlemler akü gruplarının ömürlerini uzatmak için kaçınılmaz uygulamalardır.

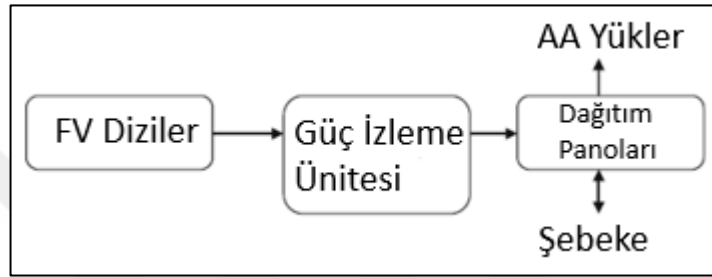
1.4.2.Şebeke bağlantılı santraller

Güneş enerjisi santrallerinin diğer bir tipi de domestik elektrik enerjisi dağıtım şebekesine bağlı olan sistemlerdir. Uygulamalarda birçok farklı detaylar olmasına rağmen ortak özellikleri, şehir şebekesine bağlanabilen ve gerektiği durumlarda şebekeye elektrik enerjisi iletimine olanak verebilen bu sistem tipleri günümüzde oldukça yaygındır[9].

Bu tür sistemler temel olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Birinci sistem, kurulan Güneş panelleriyle tamamen elektrik enerjisi üreterek şebekeye destek sağlama ya da elektrik enerjisi satma amacıyla kurulan tiplerdir. (GES) Bu sistemler üretilen enerjinin büyük yükleri beslemek için değil, doğrudan şebekeye iletilmesi ve satışı

nedeniyle çeşitli ölçeklerde kurulabilir. Ayrıca üretilen enerjiyi uzak noktalara taşımadan en yakında bulunan dağıtım şebeke sistemine bağlanarak iletim/dağıtım kayıplarının en az oranda tutabilmektedir[9].

İkinci sistemler ise, kullanıcının hem elektrik ihtiyacını karşılayarak kullanımın düşük olduğu durumlarda ya da paneller ile üretilen enerji üretiminin yüksek olduğu zamanlarda şebekeye satılmasına böylelikle kullanıcının gelir elde etmesine dayanmaktadır.



Şekil 1.10. Şebeke etkileşimli FV sistem şeması

Bu tip sistemlerde, oluşabilecek problemlerin önüne geçme amacıyla, FV sistem çıkış gerilim karakteristiği, şebekenin gerilimine oldukça yakın olmak zorundadır. Bilindiği üzere, elektrik iletim ve dağıtım şirketlerinin uyması gereken en önemli kurallardan bazıları şebeke gerilim seviyesi ve frekans değeridir. Bu nedenle elektrik şebekesine bağlanması düşünülen bir sistemin hem kendi güvenliği hem de elektrik şebeke güvenliği ve kalitesi için senkronizasyon oldukça önemlidir. Temel olarak şebekeye enterkonnekte olacak bir sistemde aranması gereken dört ana madde sıralanabilir:

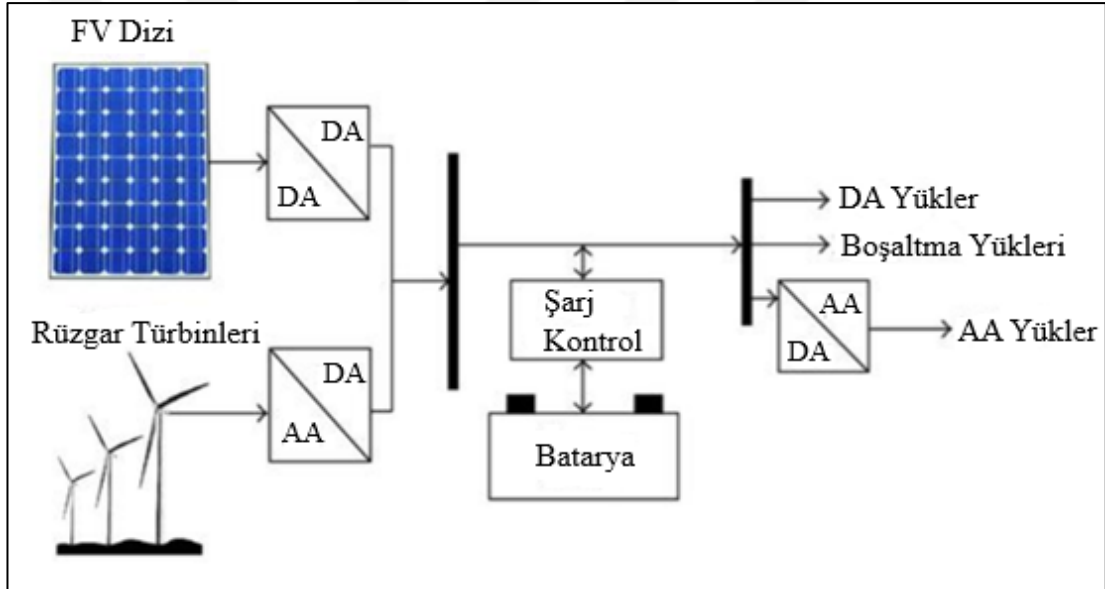
- FV sistem çıkış gerilim frekansı şebeke frekansı ile senkronize olmalıdır.
- FV sistem çıkış terminal gerilim büyüklüğü şebeke gerilim seviyesi ile aynı olmalıdır.
- Şebeke üç faz sırası, FV sistem çıkış fazlarının sırasıyla aynı olmalıdır.
- Faz açısı şebeke ve FV sistem arasında senkronize olmalıdır.

Aynı zamanda FV sistemde oluşabilecek bir problemde, şebeke bağlantısının çeşitli kontrol sistemleriyle kesilerek, elektrik şebekesine yansımalarının önüne geçilmelidir. Şebeke frekans dalgalanmaları ve gerilim yükselmelerinde aynı şekilde FV sistemi korumak için devre dışı hale gelmelidir[10]

Şebeke bağlantılı sistemlerde diğer önemli bir konu ise, akıllı sayaçlardır. FV sistemlere bağlanan sayaçların üretilen elektrik enerji miktarını sürekli takip etmesi gerekir. Sayaç endeks değerlerinin sağlıklı bir şekilde takibi ve kWh birimi cinsinden kayıt altına alınması gerekir[11].

1.4.3. Karma sistemler

Karma sistemler, fotovoltaik paneller ile oluşturulan sistemlere ek olarak, enerji sürekliliğini devam ettirmek adına, ikincil bir elektrik enerjisi üretim sistemlerinin kademeli olarak birleşiminden oluşur. Uygulamalarda en sık rastlanan örnekler, Güneş panel sistemine ek olarak dizel jeneratör, gaz türbinleri veya rüzgar enerjisinin yardımıyla elektrik enerji üretim sistemlerinin birlikte çalıştığı sistemlerdir.



Şekil 1.11. Karma sistem örnek şeması

Bu tür sistemlerde, sistem durum izleme algoritmaları ve üretim kontrol sistemleri çok daha gelişmiş olmalıdır. Örneğin bir FV-dizel karma sisteminde, akü gruplarının deşarj oranları belirli bir seviyeye düştüğünde, dizel jeneratörler ile sistem enerjilendirilerek bataryalar uygun şarj durumuna getirilmelidir. Bu kontrol mekanizmalarıyla sistemin en verimli şekilde çalışması takip edilmelidir.

2. GÜNEŞ ENERJİ SANTRAL SİSTEM ELEMANLARI

Günümüzde Güneş enerjisi santrallerinin uygulamalarına baktığımızda, birçok sisteminin ortak çalıştığını görebilmekteyiz. Bu santrallerin kalbi fotovoltaiik paneller olmasına rağmen, paralel çalışan yardımcı sistemlerde vardır.

Şebeke sistemlerine bağlantı tipleri farklılık gösterse bile, tüm Güneş enerji sistemlerinde ek olarak başka yapıların ve elemanların varlığı büyük önem taşımaktadır.

Sistem bileşenleri olarak ilk akla gelen Güneş panelleri ve montaj sistemleridir. Panel ara bağlantıları için kullanılan kablo ve bağlantı elemanları özel olarak seçilmekte olup, bu hassas sistemlerde yüksek performansla çalışması hedeflenmektedir.

Panel çıkışlarında üretilen DA gerilimin, şebeke gerilimine uyum sağlaması amacıyla öncelikle gerilim seviyesinin yükseltilmesi ardından ise AA evirmek evirici sistemleri kullanılmaktadır.

2.1. Paneller ve Bağlantıları

Güneş panellerinin yüzeylerine gelen Güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren yarı-iletken maddeler olduğunu daha önce belirtmiştik. Bu paneller fotovoltaiik ilkelere göre çalışarak, üzerine düşen Güneş ışınları sayesinde panel çıkış uçlarında belirli gerilimler oluşturur. Bu ışıma, deniz seviyesinde, havanın açık ve Güneşli olduğu günlerde maksimum 1000 W/m^2 civarında olduğu bilinmektedir. Bu enerji Güneş pili karakteristiklerine bağlı olarak %5 - %70 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir.

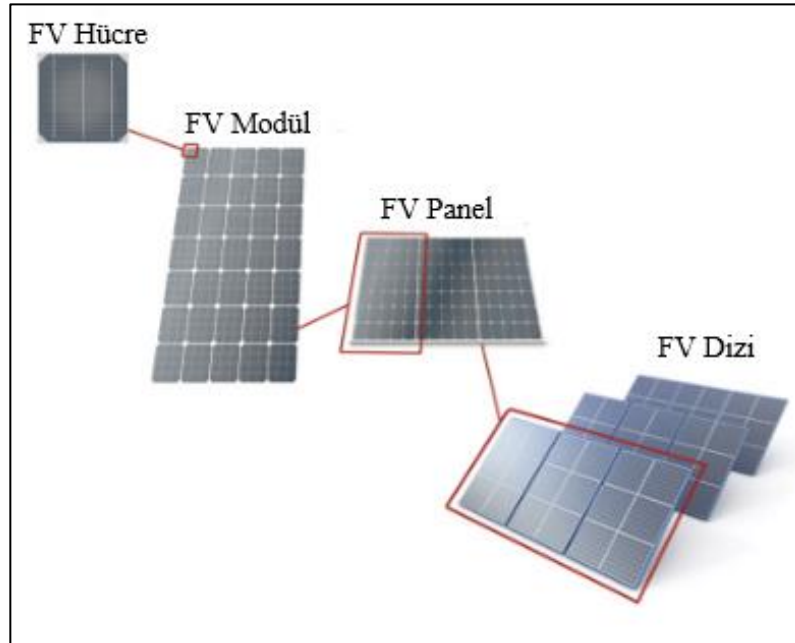
DA bir gerilim çıkışı elde edilen bu Güneş panellerinde, çıkış gücünü arttırmak amacıyla hücre bağlantıları farklılıklar gösterebilir. Seri ya da paralel bağlanan bu hücreler, bir yüzey üzerine montajı yapılarak Güneş panellerini oluşturur.

Birçok Güneş enerjisi santralinde, panel gruplarının bağlantıları uygulamadaki ihtiyaçlara göre paralel ya da seri bağlı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Güneş panellerinin yapılarına baktığımızda, hücreler birleşerek modülleri oluşturduğunu, birçok modülün ise panelleri meydana getirmektedir. Panellerin birleşiminden ise diziler meydana gelmektedir.

Bu yapılara sırasıyla baktığımızda[12];

- i) FV Hücreler: P-N diyot yapısında özel olarak üretilen ve Güneş ışığını elektrik enerjisine çeviren en küçük yapıdır.
- ii) FV Modül: Hücrelerin birleşiminden meydana gelen ve seri yada paralel bağlanarak çıkış güçlerinin artırılması hedeflenen, özel lehim yöntemleriyle birleştirilerek cam yapı ile kaplanan yapılardır.
- iii) FV Panel: Modüllerin birleşiminden meydana gelen bu yapılar ise, Güneş enerjisi santrallerinin temel elemanlarıdır. Farklı montaj tiplerine göre çeşitlilik gösteren panellerin üreticilere göre özellikleri değişmektedir.
- iv) FV Diziler: Birden çok panelin bağlanmasıyla meydana gelen bu yapılar eviricilere bağlanarak Güneş santrallerini oluştururlar.



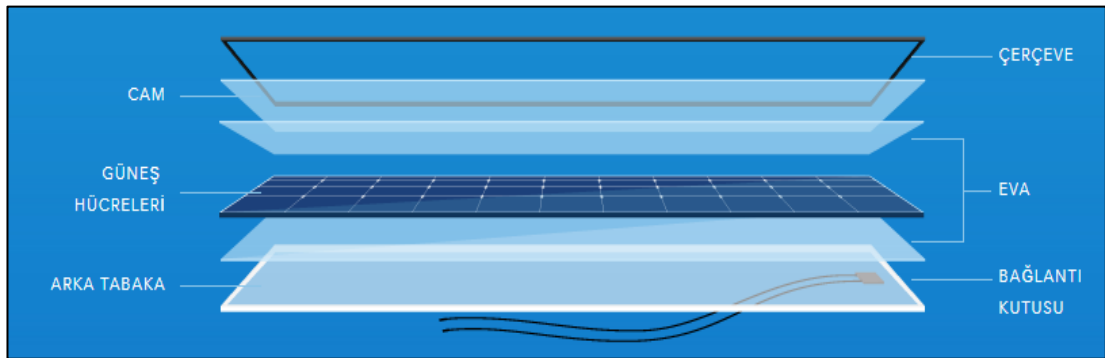
Şekil 2.1. FV Panel Bileşenleri

Bu cihazların yapı malzemelerine değinecek olursak, karşımıza birçok malzeme ve yapım teknikleri çıkmaktadır. Daha önce bahsedildiği gibi Güneş panelleri, ışığın yarı-

iletken silikon yapıların üzerine etkileşmesi sonucu artı ve ekşi yüklerin hareketine yol açar. Bu açığa çıkan DA gerilimin karakteristikleri şüphesiz ki panel imal edildiği yarı-iletken malzemenin özelliklerine doğrudan bağlıdır[12].

Panel imalat aşamalarında kullanılan bu silikon malzemelerin, Güneş'ten sağlanan fotonların emilmesi konusunda oldukça başarılı olması gerekmektedir. Genel olarak bu silikon malzemeler Silisyum elementinden üretilerek Bor katkılı maddeler ile çeşitli tekniklerle birleştirilerek panel bileşenleri haline getirilir[12].

- Çerçeve: Tüm panel bileşenlerini birleştirip bir arada tutmak için kullanılan mekanik malzemedir.
- Solar Cam: Güneş ışınlarının panel içerisine nüfuz etmesini sağlayan ve bu sırada atmosferik olaylara karşı paneli koruyan cam yapıdır.
- EVA Film: Etilen vinil asetat yapılı bir polimer olan bu yapı, fotovoltaik hücreyi koruma amacıyla kullanılan kaplama malzemesidir.
- FV Hücre: Güneş ışınlarını elektriksel potansiyel farka dönüştüren yapıdır.
- Bağlantı uçları: Panelin ürettiği elektrik akımını iletmek için kullanılan bağlantı uçlarıdır.
- Panel arka yüzeyi: Panel üzerine nüfuz eden UV ışınların, nem veya hava şartlarından kaynaklanan olumsuzluk engelleme amacıyla kullanılır.



Şekil 2.2. FV panel iç yapısı

Güneş panel yapımında kullanılan kristal silikon formları benzerdir ancak silikon saflıkları ana farkı oluşturmaktadır. Güneş panelleri genel olarak üç ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar Mono (Tekli) Kristal Silikon paneller, Poly (Çoklu) Silikon paneller ve ince film (Thin Film Silicon Cells) silikon panellerdir[12].

2.1.1. Mono kristal silikon paneller

Yapıları genel olarak, saf ve kontrollü bir yapıdadır. Tüm parçacıkları yüksek saflığa sahip silikondan yapıldığı için organize ve tutarlı karakteristikler oluşturur. Böylelikle çeşitli durumlardaki davranışları tahmin edilebilir özellikler taşımaktadır.

Yapım aşamasında, mono kristal plaka katmanlar halinde kesilerek panel zemini üzerinde lehimlenerek birleştirilmektedir. Bu sebeple poly kristal silikon panellere göre görünüş bakımından farklılıklar taşımaktadır. Bunu en basit yöntemiyle kenar açılardan kesilmiş olduğunu görerek anlayabiliriz. Genellikle daha siyah renklere yakın olmasından dolayı foton absorpsiyon oranları daha yüksektir. Bu özellik verimlerine yansımaktadır[13].

Güneş panelleri içerisinde verimi en yüksek bilinen panellerdir. Verimlilik ortalamaları yaklaşık %20 olan bu paneller, genelde küçük alanlarda büyük güçler üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Piyasada satılan Güneş panelleri düşünüldüğünde, bu verimlilik oranı oldukça yüksek sayılmaktadır.[13]

Ancak fiyatları konusunda aynı bilgileri belirtmek yanıltıcıdır. Piyasada bulunan en pahalı paneller olmakla birlikte, Watt başına birim fiyatı muadillerine göre iki katına çıkmaktadır.

Panel üreticilerinin verdikleri bilgiler ışığında, bilinen en uzun ömürlü paneller maksimum 50 yıl civarında olup, genel ortalama 25-30 yıl civarındadır[13].

2.1.2. Poli kristal silikon paneller

Mono kristal panellerin aksine yapım aşamaları daha az zahmetli olan bu paneller, diğer tiplere göre daha mavimsi renklere sahiptir. Ve daha zor fark edilen keskin kesim şekillerine sahiptir. Görünümleri birçok silikon katmanın preslenmiş hali gibi görünmektedir. Bu katmanların kesim işlemlerinde daha az fire verilmesi nedeniyle fiyatları daha düşüktür.

Üretici firmaların verilerine göre bu tip panellerin performansları ortalama %15-%17 civarındadır. Bu veri doğrudan birim alana düşen elektriksel gücü etkilemektedir[13].

Gelişen teknolojiler ışığında Güneş panellerinin üretim masrafları giderek düşmekte lakin performanslarının artması hedeflenmektedir.

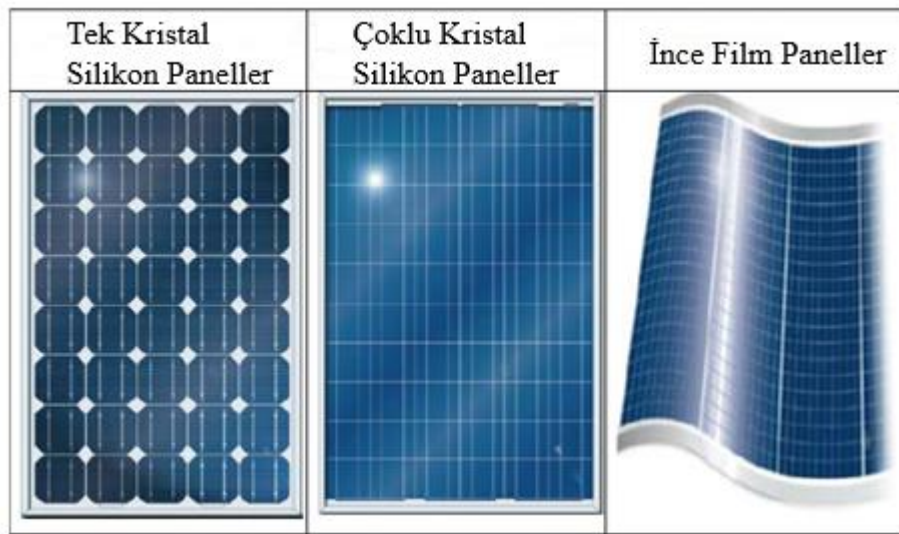
Ayrıca kullanım alanlarına göre özellikle sert ve dayanıklı çerçeve içerisinde bulunan mono ve poli kristal panellerin aksine, ince film yapıda ya da şerit halinde Güneş panellerinin üretimleri de hız kazanmaktadır[13].

2.1.3. İnce film paneller

İnce film yapıda paneller, diğer panel tiplerinden oldukça farklı bir yapıya sahiptir. Hücreler arasında ekstra bağlantıya ihtiyaç duymadan, kullanım alanları oldukça sınırlıdır.

Belirli bir şekle sahip olmayan yarı iletken malzemeler, bakır indiyum diselenid, ve kadmiyum tellürid gibi malzemelerin panel genişliğini oldukça ince tutarak imal edilmeleri en belirgin özelliklerindedir. Bu inceliklerine rağmen Güneş ışınlarının elektrik enerjisine çevirme işlemleri oldukça dar bir alanda (yaklaşık 0,001mm kalınlıkta) meydana gelmektedir.

Bu tip panellerin, mono ve poly kristal panellerden daha verimsiz olmasına rağmen üretim maliyetlerinin oldukça düşük olması nedeniyle tercih oranları oldukça fazladır. İnce film panellerin özellikle yapısı nedeniyle bina cephe, çatı kaplama gibi uygulama alanlarına çok sık rastlanmaktadır[14].



Şekil 2.3. FV Panel çeşitleri

2.2. DA-DA Gerilim Dönüştürücüler

Güneş panellerinde üretilen elektrik enerjisini şebeke gerilimine yükseltmek yada farklı amaçlarla kullanabilmek için, gerilim seviyesinin yükseltilmesi gerekmektedir. Başka bir tanımla, panellerde üretilen DA potansiyel farkı, AA gerilime hazırlamak ve eviricilerin giriş portlarına vermek amacıyla yükseltme işlemi gerekmektedir.

Güneş panel sistemlerinin en sık kullandığı yapılar kuşkusuz ki güç elektroniği prensiplerine dayanmaktadır. Teorik ve ideal bir çevirici, panel tarafında üretilen maksimum gücü, elektriksel yük tarafına minimum kayıplarla aktarabilmelidir.

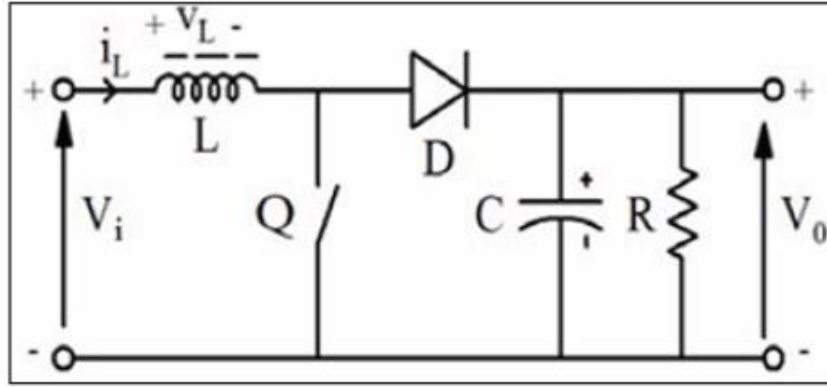
Fotovoltaik sistemlerde kullanılan güç elektroniği prensiplerinden DA dönüştürücüler hakkında bilgi verilecektir. Ek olarak Güneş enerji sistemlerinde kullanım alanlarına değinilecektir.

Temel olarak DA dönüştürücüler; Boost (Step-up) yükseltici dönüştürücü, Buck (Step-down) azaltıcı dönüştürücü ve Buck-Boost Karma dönüştürücüler olarak sınıflandırılabilir.

2.2.1. Boost (Step-Up) yükseltici çeviriciler

Güç elektroniğinin temelini oluşturan ve sayısız uygulamalarda karşımıza çıkan Boost çeviriciler, Güneş Enerji sistemlerinde verimi en yüksek noktalara taşıyabilmek için mükemmel bir çözümdür.

Basit ancak yüksek tepkime süreleriyle karşımıza çıkan bu devreler, temelde giriş gerilimini istenilen seviyeye yükselterek, çıkış geriliminin devre içerisinde kullanılmasında olanak sağlar. Basit bir boost dönüştürücünün devre şeması aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.4. DA yükseltici devre şeması

Prensip olarak iki adet yarı-iletken (bir tanesi aktif bir anahtarlama diğeri ise pasif yapıda kullanılan), bir adet indüktör ve bir adet kapasitörden oluşmaktadır. Boost çevirici devrelerinde kritik nokta aktif anahtar olarak kullanılan yarı-iletken transistör yapının anahtarlama frekansıdır. Bu anahtar yapının durumuna göre, çevirici devresi iki ayrı karakteristikte çalışmaktadır. Anahtar kapalı durumda, devre indüktör üzerinden tamamlanarak indüktörde oluşan elektro-manyetik alanı arttırmaktadır. Eksponansiyel olarak artış gösteren elektro-manyetik alan indüktörün bir akım kaynağı gibi davranmasına yol açar[15].

Anahtar iletimde olduğu anda, indüktör içerisindeki şarj akımı, D diyodu üzerinden kapasitöre ve devreye bağlı olan yüke aktarılır. İndüktör enerjisini deşarj ederek, gerilim polarite yönlerini eşitler. Böylece çıkış geriliminin seviyesi yükseltilmiş olur. Böylece D diyodu da kesime gider[16].

Devrenin çalışması periyodik tekrarlanarak devam eder. İndüktör üzerinden geçen akım periyodiktir[16].

Anahtar iletimdeyken gerilim kaynağı indüktörü besleyerek oluşan elektrik akımının artış oranı, kaynak potansiyel farkı V_s ve L indüktans değerine göre değişimi[16];

$$L \frac{di}{dt} = V_s(t) \quad (2.1)$$

Anahtar iletimde olmadığı durumda ise, aralık $(1-D)T$ ile ifade edilir. İndüktör üzerinde geçen akım ise aşağıdaki gibi ifade edilir[16];

$$\Delta I_L = \frac{V_s - V_o}{L} (1-D)T \quad (2.2)$$

Bir periyotda net akım değişiminin sıfır olduğu kabul edildiğinde, giriş geriliminin çıkış gerilimine oranını incelersek[16],

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (2.3)$$

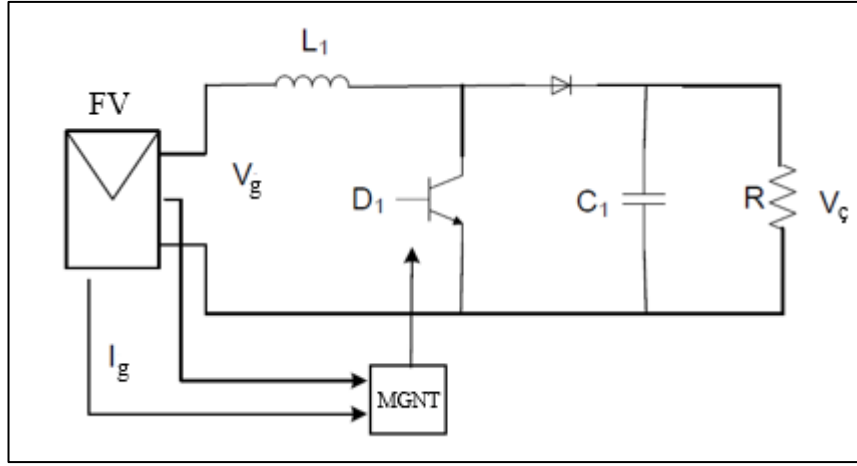
V_o çıkış gerilimini V_i ise giriş gerilimini ifade etmektedir. Kritik nokta ise, D olarak belirtilen çalışma döngüsü (duty cycle) terimidir. Bu ifadeyi biraz daha incelersek,

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} = \frac{T_s}{t_{off}} \quad (2.4)$$

T_s anahtarlama periyodu olarak ifade edilmektedir. t_{off} ise açık konumda kalma süresini ifade etmektedir.

Çevrim oranı olan D sayısal değeri $0 < D < 1$ arasında değişmektedir. Denklemden yerine konulduğunda, çıkış gerilim seviyesinin çıkış geriliminden yüksek olduğu görülür. Matematiksel olarak sonsuz değerlere sahip olması istenmediğinden uygulamalarda bu değer 0,1 ile 0,9 arasında seçilmektedir[16].

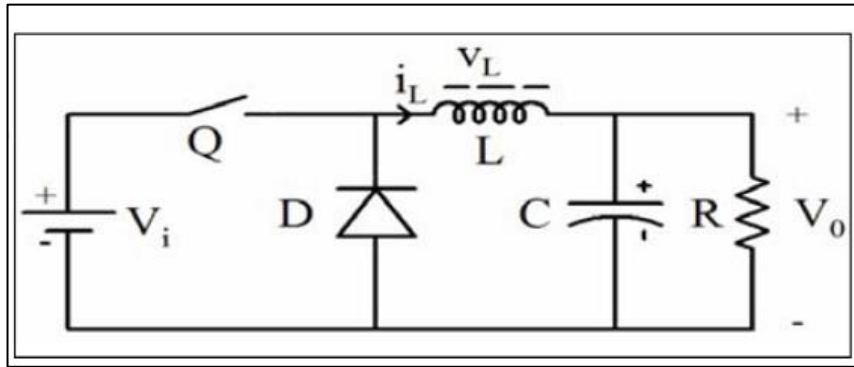
Güneş enerjisi sistemlerinde, bu anahtarlama periyotları büyük önem arz etmektedir. Üretilen gücün doğru şekilde yükseltilmesi ve evirici girişlerinde kullanılması için anahtarlama frekansı hassas bir kontrol algoritması gerektirmektedir. Hatta bu yükseltme işlemi ileride bahsedilecek olan maksimum güç noktası takibinde (MGNT) kullanılması ve kontrol edilmesi gerekmektedir. Böylelikle hassas güç kontrol devreleri kullanılmaktadır. Ancak bu anahtarlama işlemi harmonik bozulmalara yol açmakta olup, bu problemin önüne geçilmek için filtre tasarımları yapılmıştır.



Şekil 2.5. MGNT kontrollü bir DA yükseltici devre şeması

2.2.2. Buck (Step-Down) indirici çeviriciler

Buck yani indirici çeviriciler, giriş gerilimini daha düşük bir gerilim seviyesine indirerek çıkış veren sistemlerdir. Bu sistemin basitleştirilmiş yapısına bakarsak, Boost çeviricilerde olduğu gibi bobin, kapasitör ve yarı-iletken anahtarlama elemanları görebiliriz. Anahtarlama frekansı özellikle büyük önem taşıyarak çıkış gerilimini doğrudan etkilemektedir.



Şekil 2.6. DA Buck Dönüştürücü devre şeması

Sürekli çalışma modunda bir periyotta indüktör akımı sıfırdan başlar ve tepe değerine yükselir, anahtarlama periyodu bitmeden tekrar sıfıra düşer. Pratikte dönüştürücü her iki çalışma modunda da çalıştırılabilmektedir. Bu nedenle dönüştürücü tasarımında her iki çalışma modunda göz önünde bulundurulması gerekir [17].

Anahtarın iletimde olduğu anda indüktans akımı L indüktör üzerinden çıkışı besler. Ancak bu sırada geçen akımla orantılı olarak indüktörde bir enerji depolanır. D diyotu

ise ters polaritededir. Anahtar kesimde iken L indüktörü üzerindeki enerji ile D diyotu üzerinden yükü beslemektedir. Böylece çıkışta enerji sürekliliği saplanır. İndüktör depolama kapasitesine göre çıkış akımı sürekli ya da süreksiz formda olabilir. Devredeki C kapasitesi ise yük üzerinden akım geçişi sağlayarak, çıkış gerilimini denetleme görevini üstlenir. Anahtar süreksiz iletim modunda çalıştırıldığında kondansatör tam şarj durumuna geçmeyeceğinden etkin değeri daha küçük bir gerilimle depolanır. Bu şekilde yük üzerindeki çıkış geriliminin değeri azalmış olur. Çıkış kondansatöründen çekilen akım küçüktür. Çıkış gerilimi anahtarın iletimde ya da kesimde olma süresi ile doğrusal ilişkilidir[17].

Bobin üzerindeki akım değeri ve değişimi indüktans denklemleri ile hesaplanabilmektedir.

$$V_L = L \frac{di}{dt} \rightarrow \Delta I_L = \frac{V_L}{L} \Delta T \quad (2.5)$$

Buradan iletim durumu için bobin akımındaki yükselme hesaplanabilir

$$\Delta I_L (+) = \frac{V_i - (V_Q - I_L R_L) - V_0}{L} T_{on} \quad (2.6)$$

Burada R_L bobin eşdeğer devresindeki direnci, V_Q iletim durumunda yarı-iletken üzerindeki gerilim düşümünü ve $\Delta I_L (+)$ bobinin akımındaki pozitif dalgalanma miktarını göstermektedir. Kesim durumu için bobin akımındaki azalma aşağıdaki denklem ile bulunabilir[17].

$$\Delta I_L (-) = \frac{V_0 - (V_D - I_L R_L)}{L} T_{off} \quad (2.7)$$

Burada da $\Delta I_L (-)$ bobinin akımındaki dalgalanma miktarını göstermektedir. Kararlı hal çalışma şartlarında akımın, iletimdeki artma miktarı $\Delta I_L (+)$ ve kesimdeki azalma miktarı $\Delta I_L (-)$ eşit olduğu kabul edilmektedir. Bu nedenle, yukarıdaki iki denklem eşitlenerek sürekli hal için dönüştürücü çıkış gerilimi V_o bulunabilir[17].

$$V_o = (V_i - V_Q) \left(\frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \right) - V_D \left(\frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \right) - I_L R_L \quad (2.8)$$

ve

$$V_o = \left(\frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \right) = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (2.9)$$

$$(1-D) = \frac{T_{off}}{T_s} \quad (2.10)$$

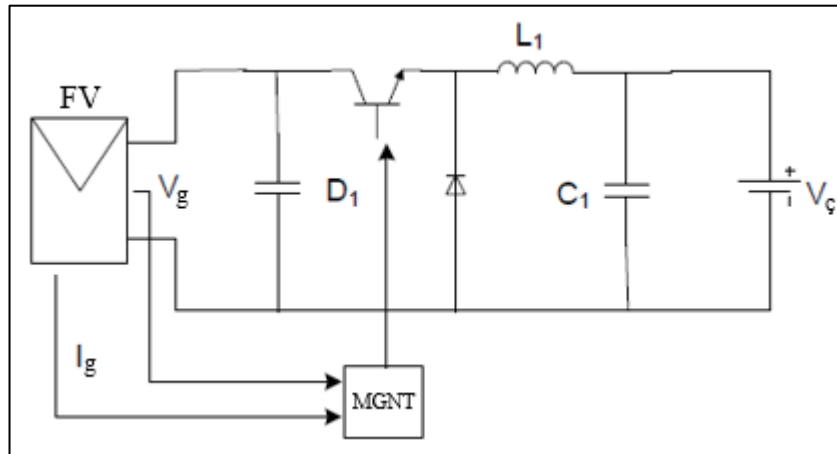
eşitlikleri kullanıldığında çıkış gerilimi aşağıdaki denklemden elde edilebilir.

$$V_o = (V_i - V_Q)D - V_D(1-D) - I_L R_L \quad (2.11)$$

Genel bir basitleştirme yapmak için V_Q , V_D ve R_L değerlerinin yeterince küçük olduğu kabul edilirse çıkış gerilimi sadeleştirilebilir[17].

$$\frac{V_o}{V_i} = D \quad (2.12)$$

Özellikle bu çevirici metodu fotovoltaik sistemlerde, Güneş ışınlanma oranının yüksek olduğu günlerde, bataryaların yüksek gerilimlere maruz kalmasını engellemek ve cihazları koruma amacıyla kullanılmaktadır. Aşağıda MGNT cihazları tarafında kontrol edilerek çıkış gerilimi indirgenen bir şarj kontrol sistem devre şeması görülebilir.



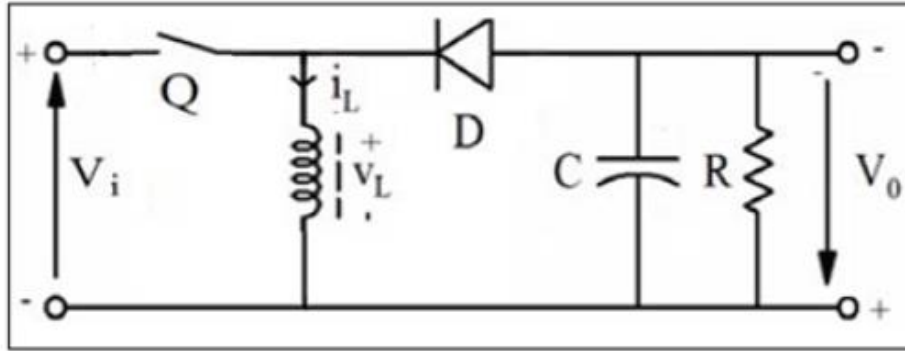
Şekil 2.7. MGNT kontrollü bir DA düşürücü devre şeması

2.2.3. Buck-Boost çeviriciler

Güneş enerjisi sistemlerinde oldukça önemli bir yere sahip olan bu tip temel olarak daha önce belirtilen çevirici yapılarının birleştirilmesiyle oluşmuştur. Yine oldukça hassas bir kontrol mekanizması gerektiren bu güç devreleri, anahtarlama tetiklenmesi için birçok metot kullanılmasına olanak sağlar.

Özellikle hızlı tepki süreleri ve sistem güvenilirliği konularında gayet başarılı bir seçim olmasından dolayı, fotovoltaik sistemlerin verimli çalışmasında etkin rol oynamaktadır.

Aşağıda bir Buck-Boost çeviricinin basit devre şeması verilmiştir.



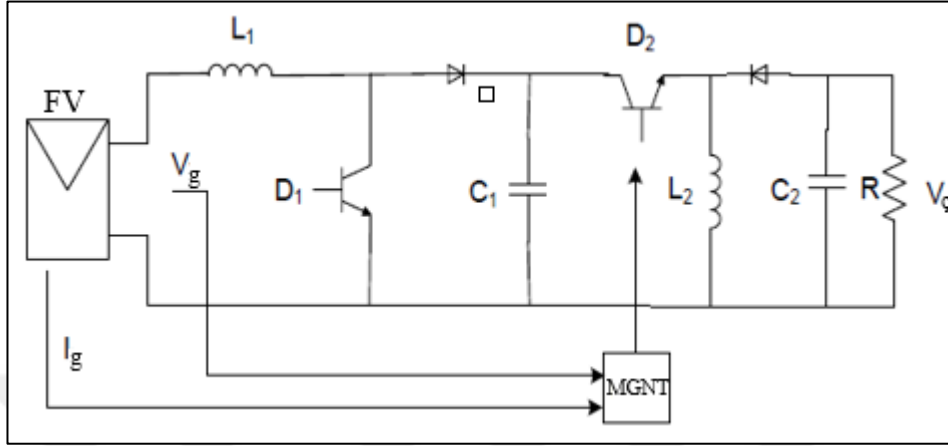
Şekil 2.8. DA Düşürücü-Yükseltici Devre Şeması

Prensipinde bu devreler, alçaltıcı ve yükseltici çeviricilerin birbirine bağlanmasıyla elde edilir. Böylelikle sistem, bir Buck ya da Boost çevirici olarak çalıştırılabilir. Duty Cycle olarak bilinen çevrim oranına göre sistem iki farklı tip olarak çalıştırılabilir. Bu avantaj Güneş enerjisi sistemlerinde bataryadan çalışma ya da Güneş üzerinden beslenen durumlarda farklı karakteristiklerde çalışma imkânı sağlamaktadır.

Çevrim oranına göre giriş-çıkış gerilimlerinin arasındaki ilişki aşağıdaki formülde verilmiştir.

$$V_o = -V_i \frac{D}{1-D} \quad (2.13)$$

Gelişmiş MPP kontrollü Güneş enerjisi sistemlerinde bu çevrim oranı kontrol edilir ve çalışma modu belirlenmiş olur. Aşağıdaki devre şemasında MPP kontrollü çift kademeli bir Buck-Boost çevirici verilmiştir.



Şekil 2.9. MGNT kontrollü bir Buck-Boost çevirici devre şeması

2.3. DA-AA Dönüştürücüler

Güç elektroniği sistemlerinde, elektrik enerjisini alternatif akıma çeviren elektrikselsel cihazlara verilen isimdir. Piyasada kullanılmakta olan birçok farklı prensipte çalışan dönüştürücü (evirici) tipleri mevcuttur.

Güneş panelleri ile üretilen ve ardından yükseltilip/düşürülüp uygun seviyeye getirilen DA gerilim ya da enerjinin depolanması için kullanılan batarya gruplarının ardından, şebekeye iletilmek ya da belirli cihazları beslemek için AA gerilime dönüştürülmelidir. Bu kritik işlem yine evirici adı verilen cihazlarla yapılmaktadır.

İlk fotovoltaiik sistemlerde, şebeke tarafından tetiklenen tristörlü evirici tipleri kullanılmaktaydı. Ancak düşük akım ve gerilim kaliteleri ve büyük harmonikler değerler yaratmasından dolayı, günümüzde IGBT ya da MOSFET tabanlı eviriciler kullanılmaktadır. Aynı günümüzde Güneş enerji sistemleri için üretilen özel eviricilerde bazı ön şartlar aranmakta olup, tasarım aşamalarında bu ölçütler göz önüne alınmaktadır. Bu ölçütler aşağıda sıralanmıştır[18].

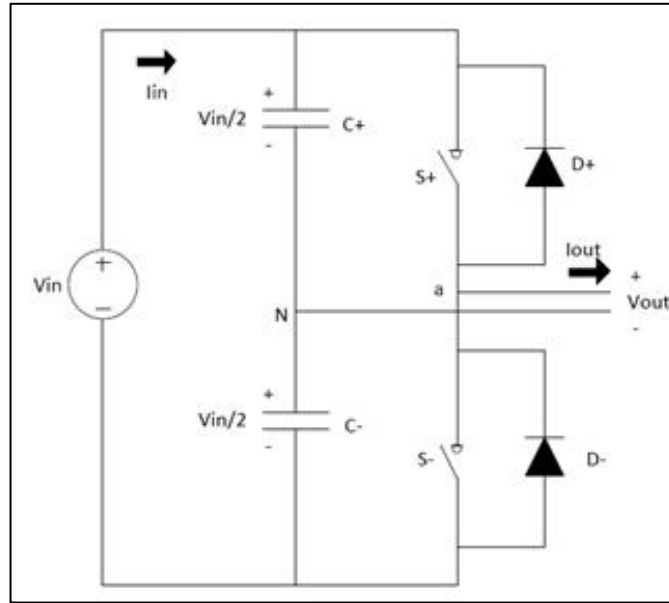
- verimlilik seviyesi %90 üzerinde olmalıdır
- Maliyet
- Voltaj ve akım kalitesi ve harmonik seviyesi
- Aşırı yüklenme kapasitesi (şebeke bağlı eviricilerde 20-30% civarında)

- Kesin ve kararlı MPP takibi (özellikle kısmi gölgelenmelerde MPP takibinde güvenilirlik
- Kesintisiz bir şekilde uzaktan izleme ve kontrol

Eviriciler, AA gerilime dönüştürme aşamasında, frekans ve gerilim seviyesini ayarlayarak, elektriksel yükün karakteristiklerine uygun hale getirmekle görevlidir. Bu nedenle, bir fotovoltaik sistemin verimliliği, o sistemin tipi fark etmeksizin evirici seçimine doğrudan bağlıdır.

Eviriciler genel olarak bir fazlı ya da üç fazlı olarak tasarlanmakla beraber, kendi aralarında farklı topolojilere sahiptir.

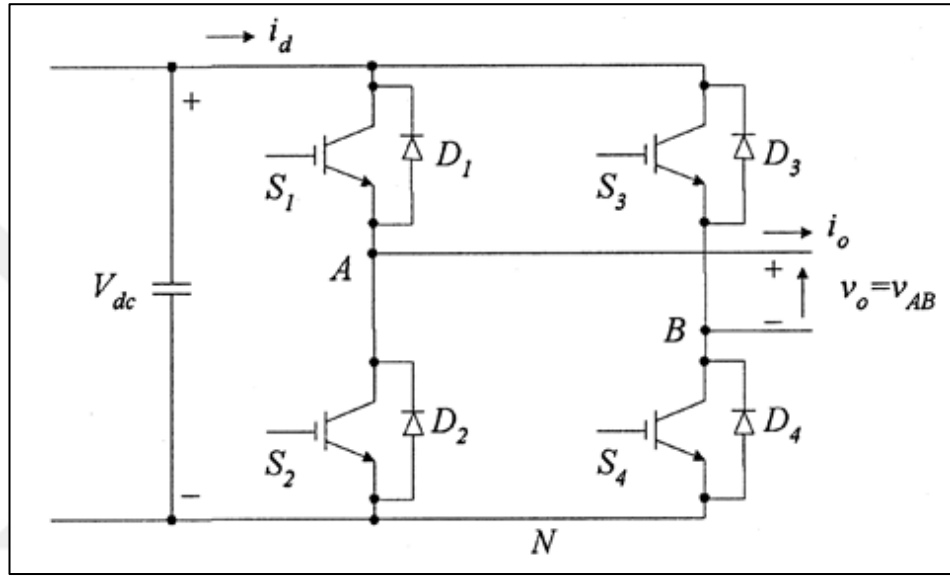
Tek fazlı eviriciler, yarım dalga köprü ve tam dalga köprü olarak iki ana grupta toplanır. Yarım dalga köprü evirici tipi temel yapı olarak kabul edilmektedir. Bu evirici tipinde, sabit gerilim değerine iki kondansatör, evirici tasarımının nötr bölgesini oluşturmaktadır. Yarı-iletken anahtarlama esnasında, oluşacak harmonik bozulmaların önüne geçmek için bu kondansatör değerleri oldukça yüksek seçilmelidir. Ardından, S+ ve S- anahtarlama elemanlarını sırayla aktif hale getirerek iletimde olması sağlanır.



Şekil 2.10. Bir fazlı yarım dalga köprü evirici devre şeması

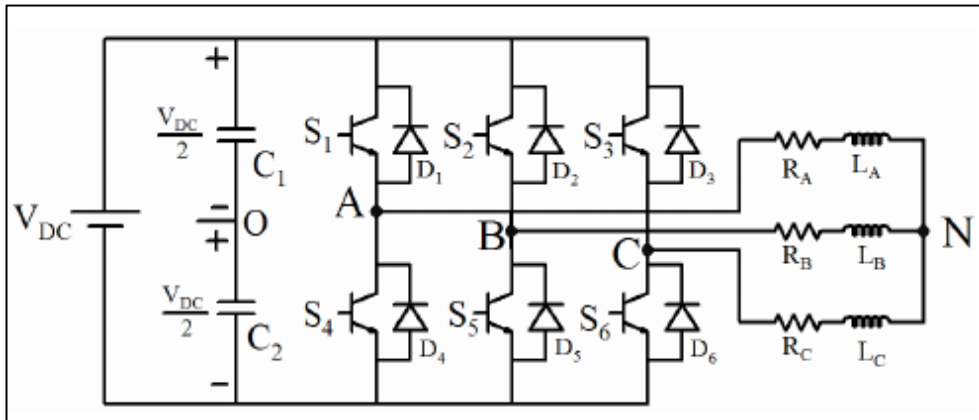
Çıkış gerilimi sabit ancak ters işaretli gerilim değerleri olacağı için darbe genişliği modülasyonu tekniklerine başvurularak genlik oranları çıkış gerilim seviyesini belirlemektedir[19].

Tam dalga köprü eviriciler ise, iki adet yarım dalga eviricinin birleşiminden oluşmaktadır. Tam köprü tipi iki seviyeli ve üç seviyeli çıkış dalga üretmek için kullanılır. Yükün nötr noktasını ikinci anahtarlama hattı belirlemektedir[19].



Şekil 2.11. Bir fazlı tam dalga köprü evirici

Üç fazlı eviriciler orta ve yüksek güç gereksinimlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu evirici devreler, çıkışta üç faz gerilim dalgalarını elde etmek için $2\pi/3$ faz farklı ile yerleştirilmiş üç adet yarım dalga köprüden oluşmaktadır[19].



Şekil 2.12 3 fazlı evirici genel devre şeması

H köprü, kaskat eviriciler gibi çok seviyeli çeşitleri zaman içerisinde birçok tasarım bilimsel ve pratik uygulamalarda yerini almıştır. Ve kesintisiz güç kaynaklarından, FV sistemlere kadar birçok alanda kullanılmaktadırlar.

Yukarıda üç fazlı bir AA evirici devresi verilmiştir. Giriş kısmındaki DA gerilim şebeke frekansına göre belirli anahtarlama işlemleri sayesinde AA çıkış gerilimi üretmektedir. Giriş-çıkış gerilim oranları aşağıdaki formülden hesaplanmaktadır.

$$V_{ph} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) V_{dc} \quad (2.14)$$

Evirici sistemlerinin diğer önemli görevi ise, maksimum güç noktasının takibi (MGNT) ve bağlı olduğu diğer sistemleri bu noktaya göre yönlendirmektir. Ayrıca yine bu eviriciler alternatif akıma dönüşüm yaparken şebekeyle senkronize bir şekilde harmonik bozulma ve faz kayması gibi problemleri minimuma indirgeyerek çıkış vermektedirler. Çıkış gerilimi kalitesinde etkin rol oynamaktadır.

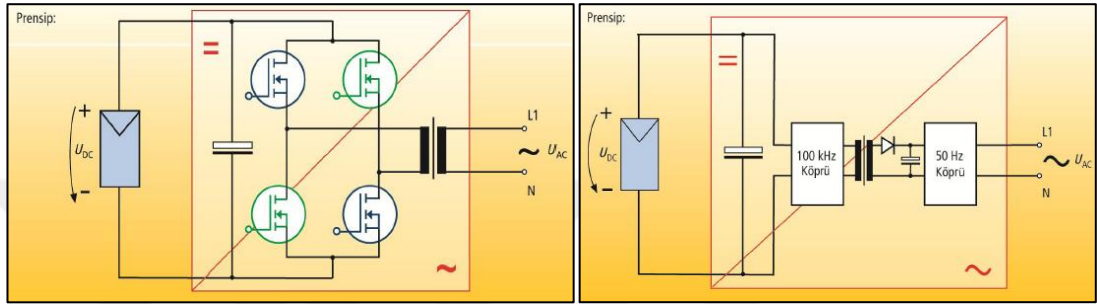
Şebeke bağlantılı eviricilerde, tüm üretilen elektrik enerjisi şebekeye aktarılacağı için, senkron olarak aynı faz özelliklerinde olması gerekir. Güç faktörü için şebeke geriliminin faz ve frekans bilgileri gerekmektedir. Bu sebeple faz kilitleme döngüsü (PLL) yöntemi kullanılır. Ayrıca şebeke bağlantılı eviriciler gerilim ya da akım kontrollü olarak tasarlanabilir. Gerilim kontrollü olan tiplerde, senkronizasyon hataları nedeniyle eviricinin aşırı yüklenmesine neden olma ihtimali vardır. Bu nedenle genellikle akım kontrollü eviriciler tercih edilmektedir. Böyle durumlara daha az duyarlı olan akım kontrollü modellerde, kontrol algoritması için PI, histerezis, bulanık mantık gibi yöntemler kullanılmaktadır[20].

Eviriciler ürettikleri alternatif akım tipine göre kare dalga, sinüs etkileşimli modifiye ya da tam sinüs dalga formunda olabilmektedir. Özellikle IGBT ve MOSFET tabanlı eviriciler, 10-100kHz gibi yüksek frekanslı anahtarlama işlemi yaparak AA çıkış vermektedir. Ancak filtreleme işlemleri ile kare formundaki dalgalar, şebeke gerilimine uygun hale getirilir. Ayrıca darbe modülasyonu yüksek frekanslı parazitler meydana getirdikleri için elektromanyetik uyumluluğa dikkat edilmelidir.

Evirici yapıları genel olarak transformatörlü ve transformatörsüz iki ana gruba ayrılır.

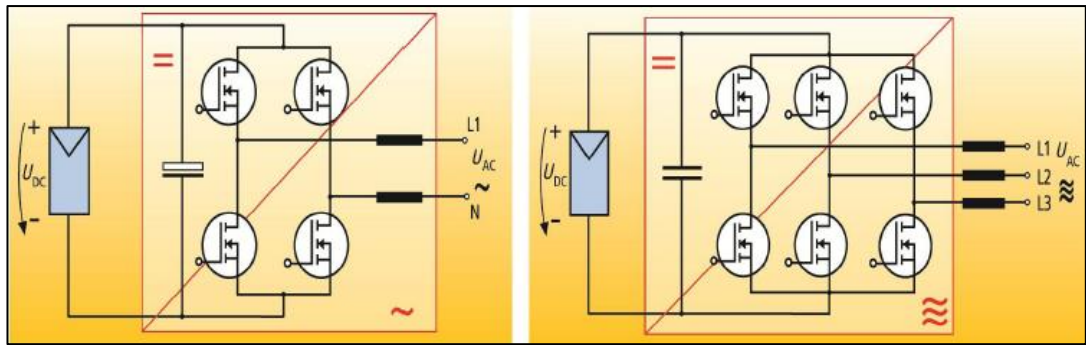
Transformatörlü eviriciler, 50 Hz frekansı ile çalışarak, şebeke frekansı yakalanmış olur. Ayrıca transformatör sayesinde DA ve AA kısımlar birbirinden izole olmuştur.

Yüksek frekanslı eviriciler ise, yüksek frekanslı güç elektroniği devreleri ile ve yüksek frekansta çalışmaya uygun transformatörler ile yine DA ve AA kısımlar izoledir. Transformatör çıkışına 50 Hz köprüsü bağlanarak, şebeke senkronizasyonu sağlanır. Ancak yüksek frekanslı transformatörler küçük ebatlarda ve hafiftir.



Şekil 2.13. Düşük ve yüksek frekanslı transformatörlü evirici

Transformatörsüz eviriciler ise, daha yüksek verimlilik oranlarına sahiptir. Ek olarak hafif olmaları avantajlarındadır. Yüksek DA giriş voltajlarına daha uygundur. Uygulamalarda panellere uyumluluklarına dikkat edilmelidir. Transformatör gibi bir izolasyon olmadığı için, yalıtım direnci konusunda daha hassastır.



Şekil 2.14. Transformatörsüz eviriciler

Bir eviricinin verimlilik denklemlerini inceleyecek olursak,

$$\eta_{dv} = \frac{P_{ac}}{P_{dc}} \quad (2.15)$$

η_{dv} olarak ifade edilen dönüştürme verimi AA çıkış gücünün, DA giriş gücüne oranıdır. Ayrıca MPP noktasındaki gücü hesapladığımızda, MPP verimi (η_{mpp}) de hesaplanabilmektedir.

$$\eta_{dv} = \frac{P_{dc}}{P_{mpp}} \quad (2.16)$$

Son olarak bu iki değerin çarpımı eviricinin genel olarak verimini vermektedir.

$$\eta_{inv} = \eta_{dv} \cdot \eta_{mpp} = \frac{P_{ac}}{P_{dc}} \cdot \frac{P_{dc}}{P_{mpp}} = \frac{P_{ac}}{P_{mpp}} \quad (2.17)$$

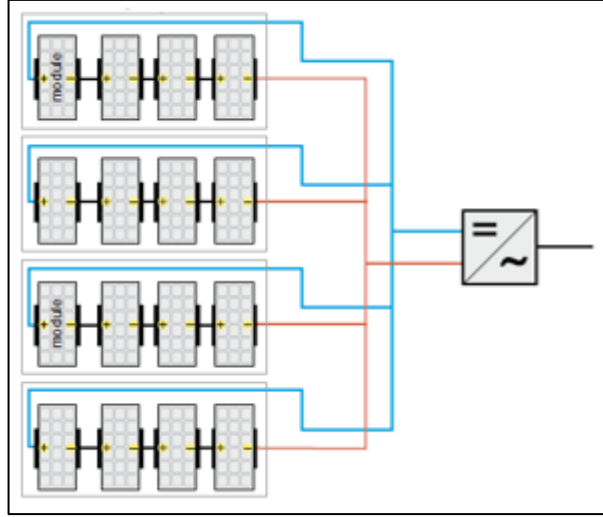
Güneş panel sistemlerinin farklılık göstermesinden ve ihtiyaç olan çıkış gücünün farklılığından dolayı, bu sistemlerde evirici bağlantı tipleri de değişken göstermektedir. Bağlantı tiplerine göre eviricileri üç ana grupta toplayabiliriz.

- Tüm tesis için tek merkezi evirici kullanılan tip (tek-evirici ya da merkezi evirici)
- Her bir dizi için bir evirici kullanılan tip
- Birden fazla dizi için bir evirici kullanılan tip (çoklu-evirici)

2.3.1. Merkezi evirici sistemleri

Bu evirici seçimi genel olarak, aynı tip panel kullanılan ve küçük güçte sınırlı tutulan Güneş enerji tesislerinde sıkça kullanılmaktadır. En büyük avantajı, yatırım ve bakım maliyetlerinin minimum olmasıdır. Fakat sistemde oluşabilecek bir evirici arızasında tüm tesiste üretim duracağı için bu arızaların sonuçları maliyetli olacaktır. Ayrıca tesis kurduktan sonra meydana gelebilecek bir kapasite ve güç artışında, aşırı akımlara karşı koruma veya panellerin gölgelenme durumlarına karşın problemler yaratmaktadır.

Tek bir eviriciye bağlanan birçok panel dizisinde oluşabilecek problemler, doğrudan merkezi eviriciyi etkileyerek sistemin genel performansını olumsuz etkileyebilmektedir.



Şekil 2.15. Merkezi evirici bağlantı şeması

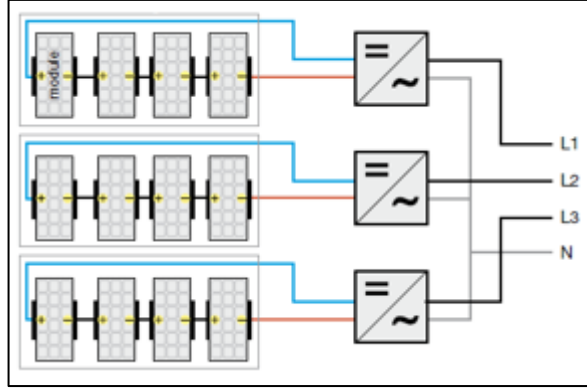
Örneğin büyük alana yayılmış ve büyük güçte olan bir FV sistemde homojen bir Güneş ışınımına maruz kalınmaması, büyük problem teşkil edecektir. Gölgeleme etkisi altında kalan modüller sistemde yük etkisi yaratarak, çıkış değerlerinin düşmesine yol açar. 160 panelden oluşan bir sistem normal ışığa altında 22°C artarken, gölgeleme etkisindeki bir modülün hücre sıcaklığının 70°C 'den fazla ısındığı tespit edilmiştir. Isınan hücrelerin modül çalışma ömrünü olumsuz yönde ısıtmasından dolayı maliyet problemleri yaratmaktadır[21].

2.3.2. Dizi evirici sistemleri

Bu tip genelde orta ölçekli tasarımlarda, her bir dizi kendine ait olan evirici grubuna bağlanarak dizinin maksimum güç noktasına göre çalışmaktadır. Yapıları basit, hızlı tasarlanıp devreye alınabilen evirici modelleridir[22].

Bu cihazların içerisinde birçok koruma fonksiyonu mevcuttur. Özellikle kaynaktan ters besleme ihtimaline karşın var olan blokaj diyotlama sistemi ve sistemin işletme durumunda DA tarafta oluşabilecek aşırı akım ve aşırı gerilim yükselmesi karşı koruma sistemleri mevcuttur.

Ayrıca, her bir dizinin kendine ait evirici cihazlarına bağlanması, gölgeleme ya da pozisyonlama problemleri gibi atmosferik olumsuzlukları minimum seviyede tutmaktadır. Ek olarak, farklı performansta çalışan panel dizilerini denetleyerek, toplam sistem verimliliğini maksimumda kalmasını sağlamaktadır.



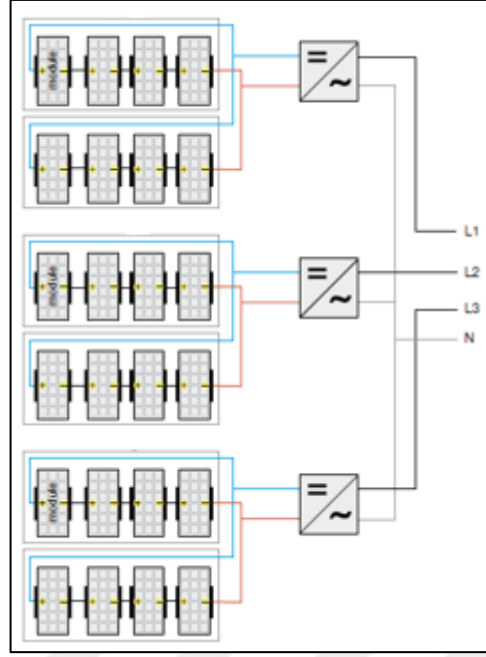
Şekil 2.16. Dizi evirici bağlantı şeması

2.3.3. Çoklu evirici sistemleri

Büyük ölçekli sistemlerde, Güneş enerji santrali birbirinden bağımsız alt dizilere ayrılmaktadır. Birbirine paralel bağlanan her bir alt panel dizi grubu kendilerine hizmet eden bir evirici cihazına bağlıdır. Böylelikle birbirinden bağımsız efektif şekilde çalışan diziler için düşük maliyetli ancak yüksek verimde bir çözüm sağlanır[23].

Bir önceki bölümde bahsedilen tasarımın aksine, bu tip sistemlerde evirici sayısı daha az olduğundan, yatırım ve bakım maliyetleri daha düşüktür. Bununla birlikte, herhangi bir dizide oluşabilecek gölgeleme problemlerinde sistem performansını düşürmemesi için, aynı dizi içerisinde bulunan panellerin aynı özellikte olması aynı konumlandırma özelliklerinde olması gerekmektedir. Ayrıca, herhangi bir eviricide oluşabilecek arıza durumunda ya da panel dizisinde, tüm sistem performansı etkilenmeden ve devre dışı bırakılmadan, sadece arızalı kısım bakım ve servis işlemi için çalışmaya uygun hale getirilebilir.

Birbirine paralel olan panel dizilerini evirici DA portlarına bağlarken, özellikle aşırı akım veya ters besleme problemlerine karşı önlem almak ve koruma devrelerini iyi analiz etmek gerekir. Örneğin, aşırı akım korumaları, termik-manyetik devre kesicilerle ya da aşırı akım koruma sigortalarıyla sağlanabilir. Ters besleme koruması için ise, diyotlu sistemler tercih edilmektedir.



Şekil 2.17. Çoklu evirici bağlantı şeması

2.4. Maksimum Güç Noktası Takibi

Maksimum güç noktası takibi (MGNT), Güneş enerjisi sistemlerinde sıkça konusu geçen bir terimdir. Bu terminoloji genel olarak, değişen ortam koşullarında FV panellerin üretebileceği en yüksek çıkış veriminde sistem çalıştırmak ve denetlemek için kullanılan algoritmaya verilen isimdir. Güç noktasının takip edilmesi için mekanik bir yöntem yerine, sinyal kontrol algoritmaları sistemlerden yararlanılır. Sisteminde ana girişleri, ışımaya ve sıcaklık verileridir. Bu değişkenler sayesinde panellerin çıkış güçleri değişkenlik göstereceğinden, daha önceden panel verilerine göre belirlenen maksimum güç noktası bu elektronik kontrol sisteminin referans noktasıdır. Bu kontrol sistemi yükten bağımsız olarak çalışarak, panellerin elektrik üretim miktarını denetler.

Kontrol yöntemlerine göre maksimum güç takibi tekniği çeşitlilik gösterir. Ticari olarak fotovoltaik sistem pazarında en çok kullanılan algoritma hata gözlem (perturb&observe (P&O)) tekniğidir. Buna rağmen hangi algoritmanın en iyi sonucu verdiği konusunda oluşmuş bir görüş birliği yoktur. Bunu en önemli nedenlerinden biri de literatürde MGNT algoritmalarının verimlerini birbirleriyle karşılaştıran kapsamlı çalışmaların olmamasıdır. Yapılan çalışmaların çoğu bir MGNT algoritması ile izleyici olmayan doğrudan bağlı sistemleri veya bir MGNT algoritması ile sabit çalışma noktası için tasarlanmış bir çevirici sisteminin karşılaştırmaktadır. Diğer

karşılaştırma çalışmalarında ise algoritmalar arası karşılaştırma yapılmasında rağmen, bu karşılaştırmalar genellikle temel bir algoritma (genellikle hata gözlem algoritması) ile test koşulları altında tamamen optimize edilmiş parametreler içeren algoritmanın karşılaştırılması esasına dayanmaktadır[24].

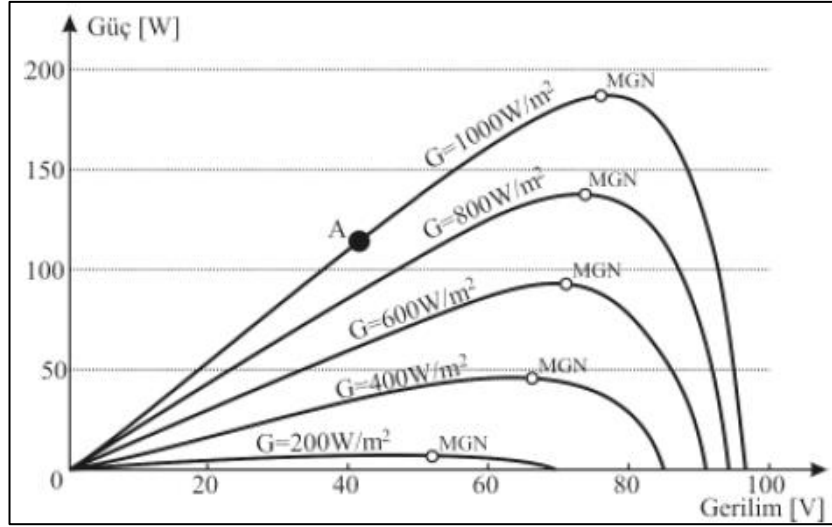
Bir MGNT sisteminin verimi en önemli parametresidir. Bu verim[24];

$$\eta_{MGNT} = \frac{\int_0^t P_{aktarılan}(t)dt}{\int_0^t P_{alınan}(t)dt} \quad (2.19)$$

İfadesiyle elde edilir. Burada $P_{alınan}$ fotovoltaik panel tarafından MGNT sistemi kullanılarak ölçülen gücü, P_{max} ise belirli şartlar altında üretebileceği maksimum gücü göstermektedir[24].

2.4.1. Hata ve gözlem (P&O) tekniği

P&O algoritması uygulamadaki basitliği nedeniyle pratikte en çok kullanılan yaklaşımdır. Bu algortmada fotovoltaik panelin P-V karakteristiğinden faydalanılmaktadır. Bilindiği gibi, fotovoltaik panellerden üretilen güç, gerilimine bağlı olarak değişiklik gösteren bir ifadedir. Hata ve gözlem algoritmasında FV panelin çalışma geriliminde küçük bir artışlar gerçekleştirilerek, güçteki değişim miktarı (ΔP) ölçülür. ΔP değeri pozitif ise maksimum güç noktasına yaklaşmak için, çalışma gerilimi tekrar arttırılır. Böylece gerilimde küçük tolerans değerleri oluşturularak güçte meydana gelen hatanın işareti izlenir. Şekil 2.18’de P-V karakteristiğine sahip bir FV panelin A noktasında çalıştığını kabul edecek olursak, yukarıdaki işlem tekrarlanarak çalışma noktası eğiri üzerinde yukarıya doğru taşınmış olacaktır. Maksimum güç noktasından sonra gerilimin artması durumunda ΔP ’in değişimi negatif olacağından gerilimin artışı yönü değiştirilerek, sistemin maksimum güç noktasına en yakın noktaya getirilmesine çalışılır[24].



Şekil 2.18. Farklı ışınım değerleri altında MGN değişimi

P&O algoritmasının bu kadar çok tercih edilmesinin nedeni basit ve uygulanmasının kolay olmasıdır. Ancak en önemli dezavantajı maksimum güç noktasının verimini azaltıcı yaklaşımlara sahip olmasıdır. Gün ışığının azaldığı durumlarda, örneğin şekildeki $G=400\text{W/m}^2$ ve $G=200\text{W/m}^2$ eğrilerinde bir yataylaşma olduğundan maksimum güç noktasının yerini tam olarak tespit etmek güçleşmektedir. Bunun nedeni gerilimdeki sapmaların çok küçük güç hataları oluşturmasıdır. Bu yöntemin diğer bir temel olumsuzluğu da maksimum güç noktasının gerçek yerini değil sadece yakınsama yöntemiyle tespit etmesidir. Bu yöntemde ancak çalışma noktasının maksimum güç noktasına yakın bir bölgede salınım yapması sağlanabilmektedir. Bu salınım miktarını azaltmak amacıyla literatürde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Sisteme bir bekleme fonksiyonu eklenerek gerilim artışları arasındaki süre arttırılarak salınım miktarı azaltılabilir. Ancak bu bekleme süresi sabit ışınım şartları altında başarılıdır. Hatta bu şartlar altında algoritmanın verimini de arttırabilir. Ancak sisteme ilave edilen bekleme süresi atmosferik şartların değişimine verilen cevap süresini yavaşlatır ve özellikle parçalı bulutlu günlerde kararsız davranışları daha da kötüleştirir[24].

2.4.2. Sabit gerilim ve akım algoritması

Sabit gerilim (constant voltage (CV)) maksimum güç noktasındaki gerilim ile FV panelin açık devre geriliminin oranına dayanmaktadır. Bu oran anlık gerilim değeri ile açık devre gerilimi arasındaki orandır ve aşağıdaki formülle yazılabilir;

$$\frac{V_{\max}}{V_{oc}} \cong K < 1 \quad (2.20)$$

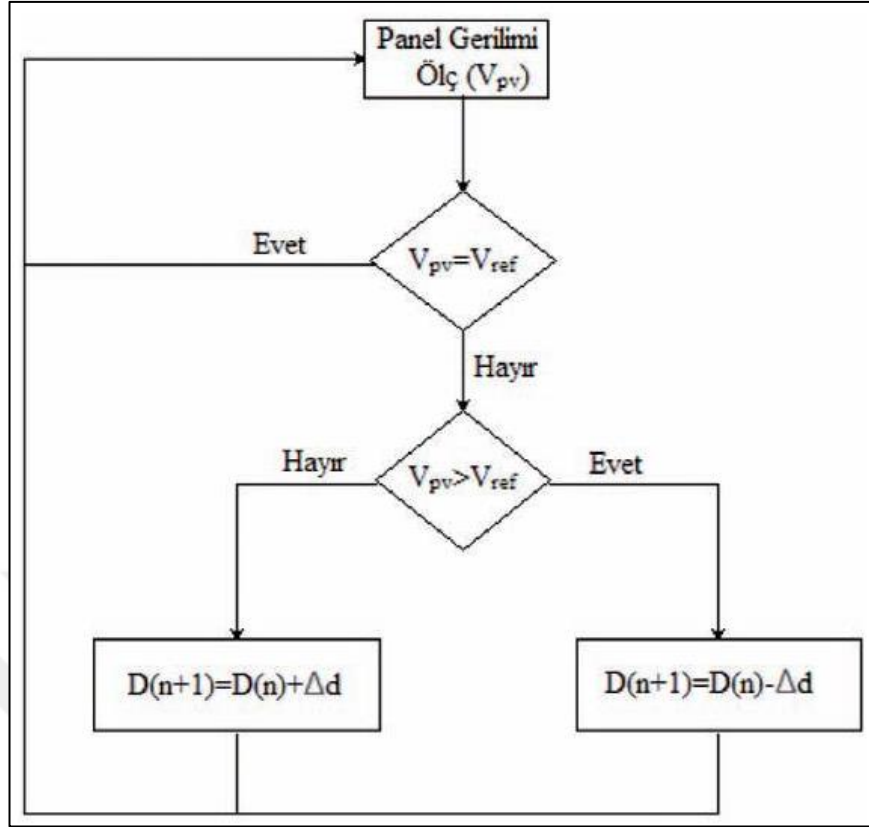
CV algoritmasında Güneş paneli geçici olarak maksimum güç noktasından ayrılarak açık devre gerilimi analiz edilerek, yukarıdaki denklemden maksimum güç noktası gerilimi hesaplanır. Hesaplanan bu değere panel gerilimi ayarlanarak maksimum güç noktasında çalışma sağlanmış olur. Bu işlem periyodik olarak tekrarlanarak maksimum güç noktasının pozisyonu sürekli takip edilir. Bu yöntemin oldukça basit olmasına rağmen, K sabitinin optimal değerini belirlemek zordur. Literatürde K değerinin %73-80 arasında değiştiği ortaya konulmuştur.

Sabit gerilim kontrolü analog donanımlarla kolayca gerçekleştirilebilir. Ancak bu yöntemin maksimum güç noktası izleme verimi diğer algoritmalara oranla daha düşüktür. Bunun nedeni daha önce belirtilen K sabitinin optimal değerinin elde edilme zorluğu ve daha da önemlisi açık devre geriliminin ölçülebilmesi için FV gücün ani olarak kesilmesini gerektirmesidir[24].

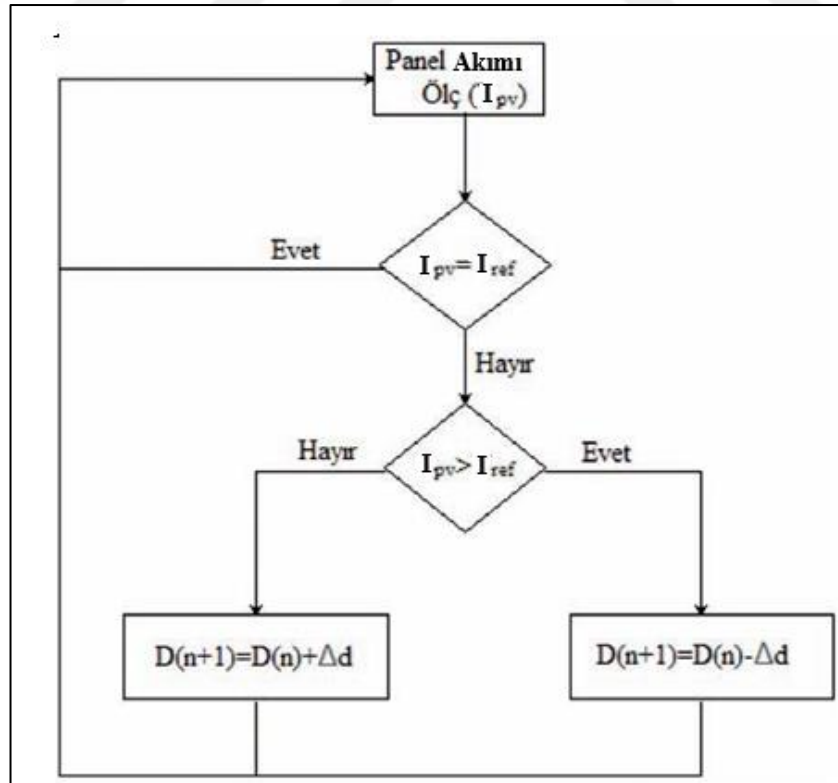
Sabit gerilim algoritması için yukarıda belirtilen yaklaşım aynı şekilde sabit akım (constant current (CC) için de gerçekleştirilebilir. Sabit akım algoritmasında maksimum çalışma noktasındaki akım ile kısa devre akımı arasındaki oran kontrol edilerek işlem yapılır. Bu yöntemi gerçekleştirmek için FV panel çıkışına veya çevirici girişine konulan bir anahtar kullanılır. Bu anahtar ani olarak kapatılarak kısa devre akım değeri ölçülür ve K sabiti kullanılarak çalışma noktasındaki gerilim belirlenmiş olur. Bu işlem periyodik olarak tekrar edilir[24].

Doğal olarak, sabit gerilim yöntemi daha çok tercih edilmektedir. Çünkü gerilimi ölçmek akıma nazaran daha kolaydır. Ayrıca paneli açık devre durumuna getirmek basit bir işlemdir. Panel uçlarını kısa devre etmek ise pratik olarak çoğu zaman mümkün olmayabilir ve sistem açısından tehlikeler yaratabilmektedir[24].

Aşağıda iki yönteme ait kontrol algoritmaları verilmiştir. MGNT kontrol sistemlerinin tasarımları bu algoritmalar ışığında tasarlanmaktadır.



Şekil 2.19. Sabit gerilim MGNT yöntemi algoritması



Şekil 2.20. Sabit akım MGNT yöntemi algoritması

Bu iki yönteminde uygulanabilmesi için sistemlere statik anahtarlar eklenerek, açık devre gerilimleri ve kısa devre akımları ölçülebilmektedir[25].

2.4.3. Artan iletkenlik algoritması

Artan iletkenlik algoritması fotovoltaiik panel gücünün gerilime göre türevinin alınarak sifira eşitlenmesi esasına dayanır. Buna göre maksimum güç noktasında;

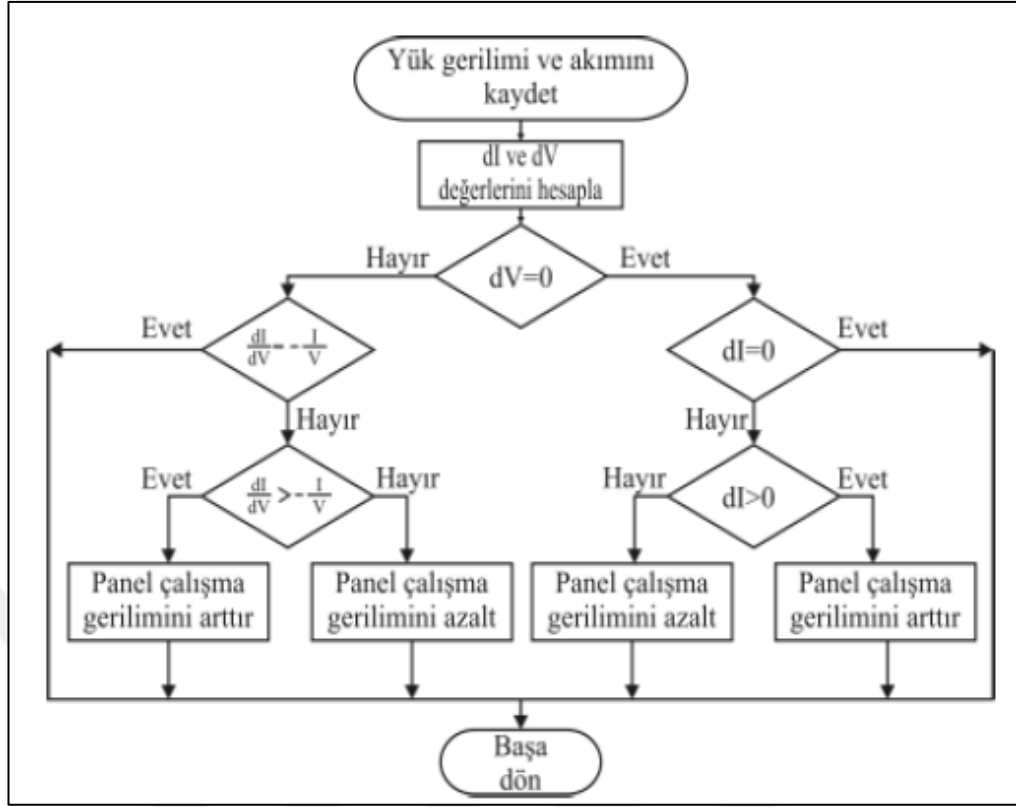
$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V.I)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (2.21)$$

Olmaktadır. Yukarıdaki denklemin yeniden düzenlenmesiyle;

$$-\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV} \quad (2.22)$$

Denklemin elde edilir. $-\frac{I}{V}$ ifadesi, fotovoltaiik panelin ani iletkenlik değerinin tersini ifade etmektedir. Denklemin sağ tarafındaki ifade ise artan iletkenlik değeridir. Bu durumda maksimum güç noktasında bu iki değer birbirine eşit fakat zıt işaretli olması gerekir. Bu denklemin bir eşitsizlik olması halinde çalışma geriliminin maksimum güç noktası geriliminden düşük ya da yüksek olduğu anlaşılır. Artan iletkenlik algoritması akış diyagramı aşağıda verilmiştir[24].

Artan iletkenlik metodu, hata ve gözlem metodundan farklı olarak, ne yönde bir gerilim değişimi yapması gerektiğini hesaplayabilmektedir. Ayrıca maksimum güç noktasına tam olarak ulaşmış olmadığını da tespit edebilmektedir. Böylece, hızla değişen şartlar altında dahi yanlış yönlü bir izleme dolayısıyla maksimum güç noktası etrafında bir salınım yapmazlar[24].



Şekil 2.21. Artan iletkenlik algoritması döngüsü

2.4.4. Parazit kapasite algoritması

Parazit kapasite algoritmasına dayanan bu metod, artan iletkenli yöntemine oldukça benzemektedir. Ancak bu yöntemde, FV pillerin p-n birleşim bölgesinde oluşan yük birikimi sonucu ortaya çıkan “parazit birleşim kapasitesi” değerinin değişimi dikkate alınır. Bu kapasitenin çektiği $i(t) = C \frac{dV}{dt}$ akımı aydınlatılmış diyot denlemine eklenerek,

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q \cdot V}{k \cdot T_c} - 1} \right) + C \frac{dV}{dt} = F(v) + C \frac{dV}{dt} \quad (2.23)$$

Denklemleri elde edilmiş olur. Bu denklemin panel gerilimi ile çarpımının türevi alınırsa,

$$\frac{dF(v)}{dv} + C \left(\frac{V'}{V} + \frac{V''}{V'} \right) + \frac{F(v)}{v} = 0 \quad (2.24)$$

Bu denklemdeki üç terim sırasıyla ani iletkenlik, parazit kapasite nedeniyle gerilimde oluşam titreşimleri ve artan iletkenlik değerlerini göstermektedir[24].



3. SİSTEM TASARIMI VE MODELLENMESİ

Tez çalışmasının bu bölümünde, Kocaeli'nin Gebze ilçesinde bulunan bir üretim tesisine uygulanabilecek şebeke bağlantılı bir Güneş enerji santralinin tasarımı ve simulasyonu yapılacaktır.

Bilindiği üzere Kocaeli ilinin özellikle Gebze ilçesi, sanayi tesisleri bakımından oldukça zengin olup, her geçen gün bölgenin enerji ihtiyacı giderek artmaktadır. Bu nedenle birçok özel sektör ve kamu kuruluşunun enerji masraflarını düşürmek adına bir an önce somut adımlar atması gerekmektedir. Özellikle enerji alanında yapılan yatırımlar ve geri dönüş süreleri, yatırımcıların dikkatini çekmektedir.

Kurulacak tesisin enerji sarfiyat hesapları dikkatlice yapılarak, fabrikanın enerji ihtiyacı ve/veya şebekeye sağlayacağı enerji ile üretim kârının artırması hedeflenmektedir. Organize sanayi bölgeleri içerisinde yer alan bu tesisin elektrik birim fiyatları normal abonelere göre daha ucuz olduğundan, tahmini elektrik üretim miktarları sayesinde Türkiye'nin enerji yükü ve karbondioksit salınım miktarları düşürülmesi hedeflenmektedir.

Sanayi kuruluşlarının bu tip verimlilik artırıcı projeler "VAP" ile özellikle Enerji Bakanlığı'nın teşvik avantajlarından da faydalanması hedeflenmektedir.

3.1. Coğrafi Koşul Analizi ve Modellemesi

Gebze ilçesi Kocaeli ilinin kuzey-batı kısmında yer almaktadır. Özellikle sanayi bölgelerinin yoğunluğu ile bilinmekte olup, hızla gelişen ve büyüyen bir ilçedir.

Böylece İzmit Körfezi'ne yakınlığı, demiryolu ve ana karayollarına yakınlığı nedeniyle birçok sanayi faaliyetine ev sahipliği yapmaktadır.

Bu nedenlerle, bölgedeki yatırımlar giderek hız kazanmaktadır. Kurulacak bir Güneş enerjisi tesisi için coğrafi analizler büyük hassasiyetle yapılmalıdır. Bu bölgede GES kurulumuna uygun arazi masrafları çok yüksek olduğundan, ayrıca çatı kısımlarında

kullanılmayan boş alan olmasından dolayı, çatı tipi uygulama yapılacaktır. Eğer bu sistem GES üretimine uygun bir araziye yapılması planlansaydı, arazi zemin sınıf analizleri gibi birçok başvuru aranmaktadır. Ancak çatı tipi uygulamalarda bu analizler aranmamaktadır.

Çatı tipi uygulamalarda, çatı taşıyıcı statik hesaplar, güney cepheli olması, etrafta gölgeye neden olacak unsurların olmaması, çatı eğimi gibi ön analizler aranmaktadır.

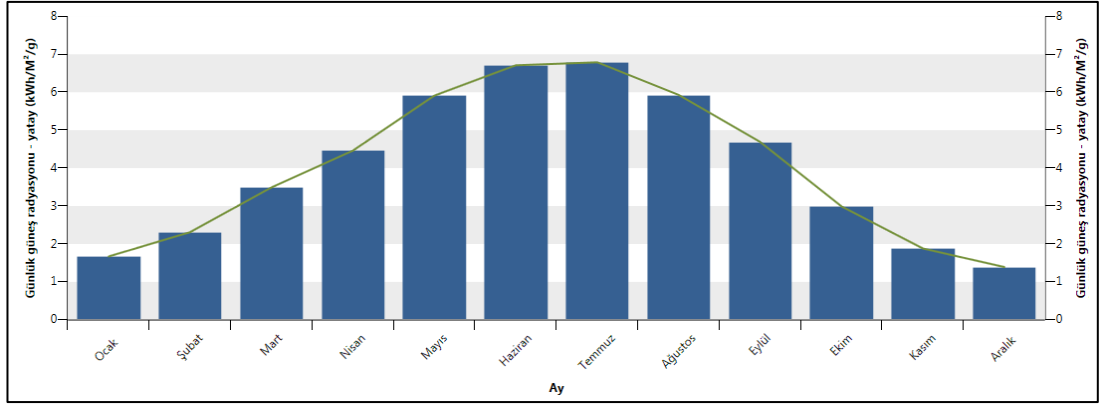
Gebze ilçesinin iklim koşullarının incelenmesinde, çeşitli kaynaklardan edinilen bilgilerin analiz edilmesi gerekmektedir.

Öncelikle sistem verimini doğrudan etkileyen faktör olarak bölgenin yıllık ortalama sıcaklık verileri gerekmektedir. T.C Orman ve Su İşleri Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından tespit edilen Kocaeli ilinde uzun yıllar içinde gerçekleşen sıcaklık ve güneşlenme süresi ortalama değerleri tablodadır[26].

Tablo 2.1. Kocaeli ili ortalama sıcaklık verileri

KOCAELİ	Ortalama Sıcaklık (°C)	Ortalama En Yüksek Sıcaklık(°C)	Ortalama En Düşük Sıcaklık(°C)	Ortalama Güneşlenme Süresi(°C)
AY				
Ocak	6,3	9,7	3,3	2,3
Şubat	6,7	10,7	3,5	3,0
Mart	8,6	13,2	4,9	4,6
Nisan	13,1	18,5	8,9	5,3
Mayıs	17,5	23,2	12,9	7,2
Haziran	21,7	27,5	16,8	8,6
Temmuz	23,7	29,5	19,1	9,3
Ağustos	23,7	29,6	19,2	9,6
Eylül	20,4	26,2	16,1	7,1
Ekim	16,0	20,8	12,5	4,5
Kasım	11,9	16,2	8,6	3,4
Aralık	8,5	11,9	5,6	2,3

Sıcaklık verileri ile birlikte ışınım verileri, sistem verimliliği için büyük önem arz etmektedir. Işınım ya da güneşlenme, temel olarak birim alana düşen Güneş enerjisi potansiyeli olarak tanımlanabilir. Gebze ilçesinin enlem ve boylam değerleri ve deniz seviyesinden yükseklik verileri ile ortalama ışınım değerlerine ulaşılabilir. Aşağıdaki grafikte Gebze'nin yıl içerisinde ışınım bilgileri verilmiştir.



Şekil 3.1. Gebze ilçesi yıllık ışınlam verileri

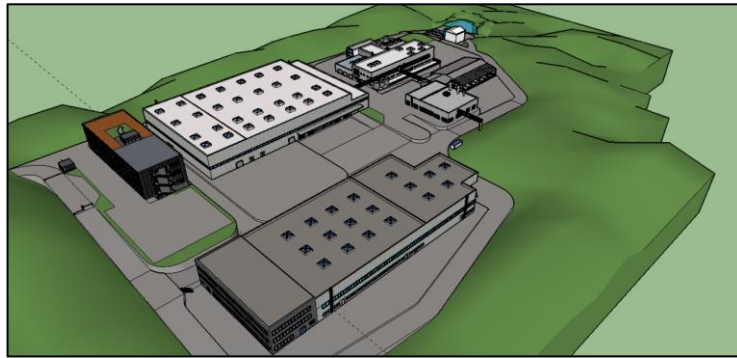
Bu verilere göre günlük Güneş ışıması değeri yıl içerisinde 1,39-6,79 kWh/m²/g arasında değişmektedir. Ortalama bu değer yaklaşık 3,96 kWh/m²/g yapmaktadır. Yıllık ise 1155 kWh/m² yapmaktadır.

3.2. Güneş Panel Modellemesi ve Hesaplamalar

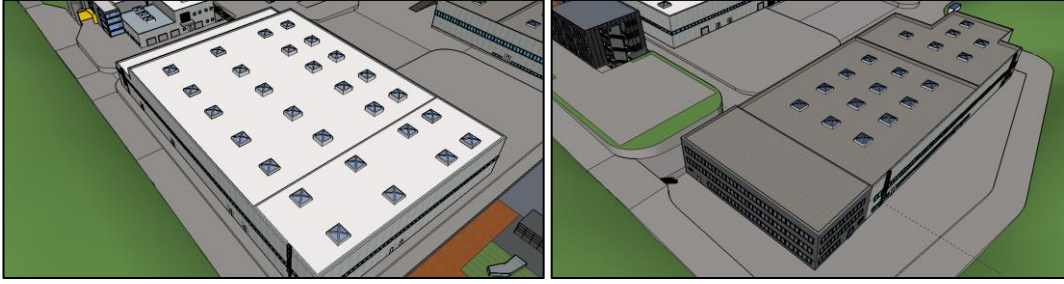
Güneş panelleri kurulacak sistemin kalbini oluşturmaktadır. Özellikle üretim yapan tesisin fiziksel şartlarına uygun, çalışma koşulları ve maliyet bakımından birçok ölçüt düşünülerek seçilmesi gerekmektedir.

Panel yerleşimi tesisin sahip olduğu iki adet lokasyon etrafında tasarlanmıştır. Bunlardan tesisin ana depo binası çatısına, diğeri ise üretim binası çatısına kurulacaktır.

Öncelikle tesis genel yerleşimi ve panel yerleşimi için uygun alanlar aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.2. Tesis genel yerleşim görüntüsü

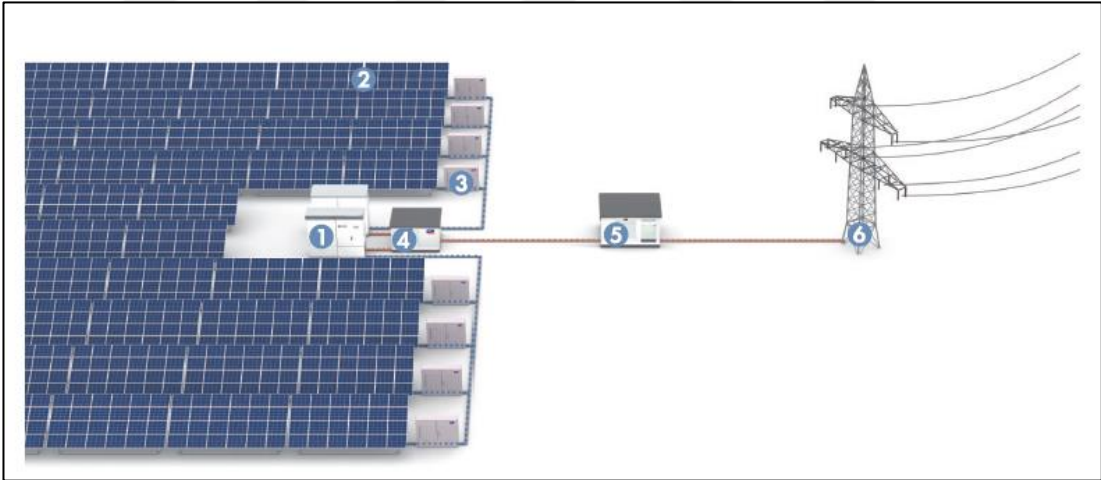


Şekil 3.3. Tesis çatı yerleşim görüntüleri

Panel uygulaması yapılacak toplamda iki adet çatı olup, ölçüleri yaklaşık olarak bir adet 100 m X 80 m ve bir adet 80 m X 60 m ebatlarındadır. Bu alanların zemin ve çatı statik hesapları yapılmış olup, panel ve evirici cihazlarını taşımak için uygundur.

İdeal panel yerleşim açısı montaj aşamasında Güneş ışınlarından maksimum derecede yararlanmak, büyük önem arz etmektedir. Bu açı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır;

$$\text{İdeal Panel Yerleşim Açısı} = (0,76 \times \text{Enlem}) + 3,1^\circ = (0,76 \times 40,86) + 3,1^\circ = 34,153^\circ$$



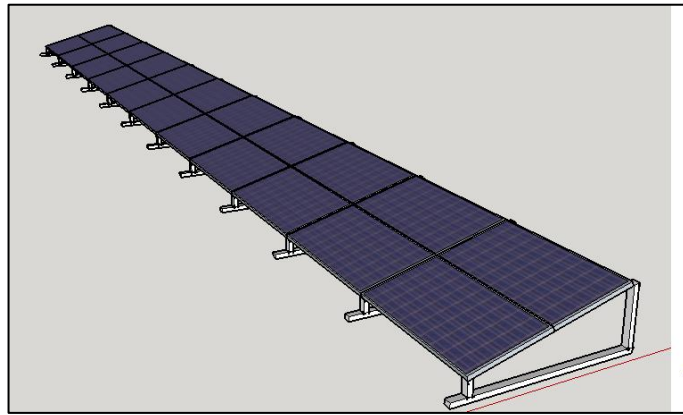
Şekil 3.4. Sistem tasarım şeması

Merkezi olan evirici kablo metrajını düşürmek amacıyla panel gruplarının ortasında yer alan trafo odasına yerleştirilecektir. Çatı üzerlerinde ise, panel DA çıkışlarını gerilimlerini, evirici giriş sayısına uygun hale getirmek için DA kombinasyon panoları yerleştirilecektir.



Şekil 3.5. Panel sistemleri yerleşim görünümü

Aşağıda panellerin hesaplanan açılı ile çatı üzerinde yerleşimi için çelik ve alüminyum alaşım konstrüksiyon çerçeveler gerekmektedir. Böylece panel ağırlıkları da çatı yüzeyine homojen olarak dağılacaktır. Aşağıda panel taşıyıcı detayı verilmiştir.



Şekil 3.6. Panel konstrüksiyon görünümü

Sistemde kullanılmak üzere, SunPower SPR-305-WHT-D seçilmiş olup, nedeni verimlilik ve fiyat bakımından avantajları göz önüne alınmıştır. Panel tipinin mono-

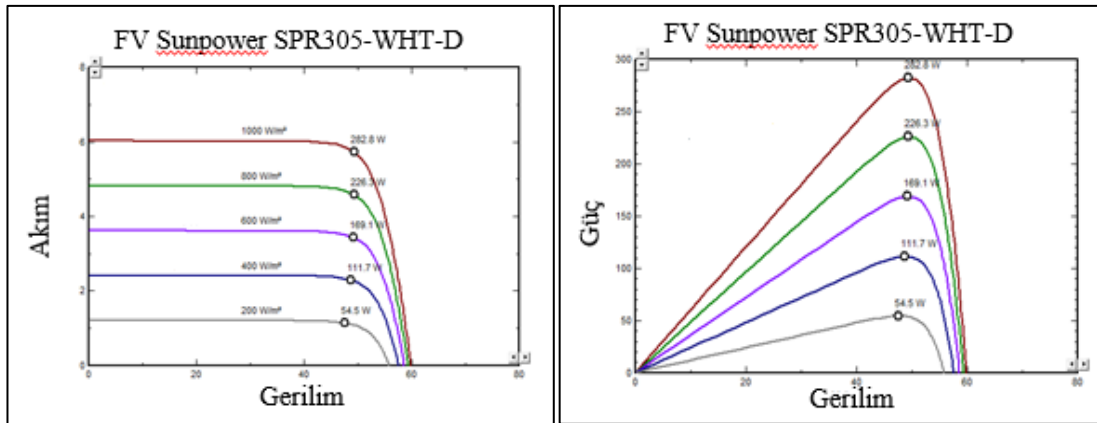
kristal olması nedeniyle verimlilik oranı muadil poli-kristal panellere göre daha yüksektir.

Panel üretici verilen bilgilerinin hepsi PVsyst® programından SunPower firmasının katalog arşivinden aktarılmıştır. Panel mono-kristal yapıda olup, nominal güç değeri 305 kWp değerindedir. Standart test değerleri altında ($W=1000 \text{ W/m}^2$ ve $T=25^\circ\text{C}$) altında kısa devre akımını ve açık devre gerilimleri aşağıdaki gibidir. Daha önce belirtildiği gibi maksimum güç noktasındaki gerilim ve akım değerleri;

Model	SPR-305-WHT-D	Manufacturer	SunPower	
File name	Sunpower_SPR305WHTD.PAN	Data source	Manufacturer 2010 + Sandia D	
Original PVsyst database		Prod. from 2007 to 2013		
Nom. Power (at STC)	305.0 Wp	Tol. -/+	-5.0 5.0 %	
Technology		Si-mono		
Manufacturer specifications or other Measurements				
Reference conditions:	GRef	1000 W/m ²	TRef 25 °C	
Short-circuit current	Isc	5.960 A	Open circuit Voc	64.20 V
Max Power Point:	I _{mpp}	5.580 A	V _{mpp}	54.70 V
Temperature coefficient	mulsc	3.5 mA/°C		
	or mulsc	0.059 %/°C		
		Nb cells 96 in series		

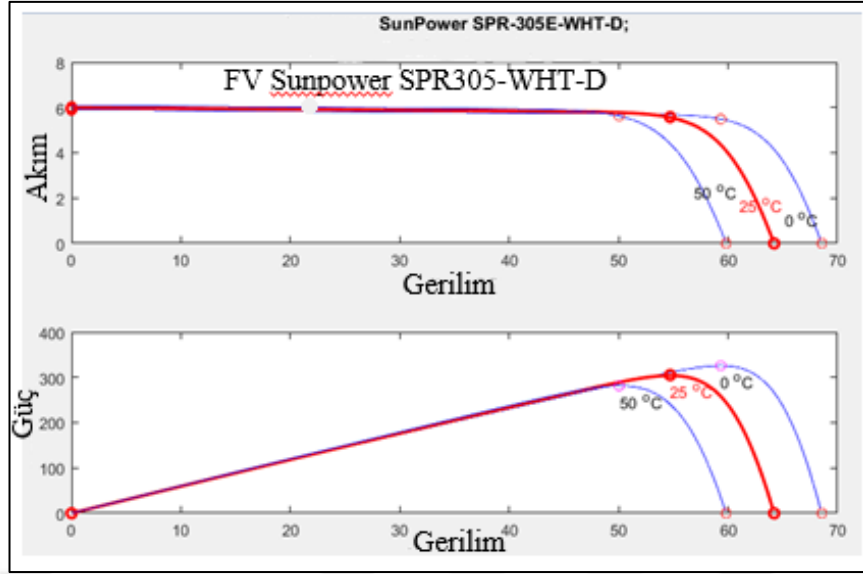
Şekil 3.7. PVSyst panel verileri

$$P_{mpp} = V_{mpp} \times I_{mpp} = 54,7V \times 5,85A = 305,02 \text{ Watts} \quad (3.1)$$



Şekil 3.8. Sunpower 305 WHT panel akım gerilim ve güç grafikleri

Aşağıda ise MATLAB tarafında edinilen aynı panelin akım-gerilim ve güç gerilim grafikleri görünmektedir.



Şekil 3.9. FV Dizi Matlab akım gerilim ve güç grafikleri

Panel yapısı birbirine seri bağlı 96 adet mono-kristal yapıda hücreden oluşmakta olup, yaklaşık 3,2mm kalınlığında temperli cam ile korunmaktadır. Panel boyutları ise, 1559 mm boy ve 1046 mm en ölçülerine sahiptir. Böylece bir panel alanı 1472 metrekaredir.

SunPower, SPR-305-WHT-D	
Module	Cells
Uzunluk	Seri
1559 mm	96
Genişlik	Paralel
1046 mm	1
Kalınlık	Hücre Alanı
46.0 mm	154.8 cm ²
Ağırlık	Toplam Hücre Alanı
18.60 kg	96
Modül Alanı	Hücreler Alanı
1.631 m ²	1.486 m ²

Şekil 3.10. Panel fiziksel özellikleri

Toplam iki adet çatıya yerleştirilen sırasıyla 1612 ve 1358 adet panel grupları ile toplam sistem kapasitesi 906,4 kWp olarak tasarlanmıştır.

$$\sum P_{\text{system}} = n_{\text{panel}} \times P_{\text{mpp}} = 2970 \times 305,02 = 906,4 \text{ kWp} \quad (3.2)$$

Çatı alanında bulunan 2970 adet Sunpower SPR-305E-WHT-D panelin toplam 4.864 metrekare alan kaplamakta olup, 12 ve 11 panel bir dizi oluşturacak şekilde

gruplandırılmıştır. Bu panel grupları birbirine seri bağlanarak, dizinin potansiyel farkı yükseltilmiştir.

Tablo 3.2. Panel tasarım özellikleri

FV Modül Bilgileri				
Üretici	Sunpower SPR-305E-WHT-D			
FV Modül Tipi	Mono		Ağırlık	18kg
Hücre Sayısı	80 Adet		Bağlantı Tipi	MC4
Hücre Tipi	Mono			
Hücre Ölçüsü	6" (156x156mm)			
Nom. Güç	305	W	NOCT	40°C
Maks MPP Gerilimi	54,7	V	Sıcaklık Katsayısı	0,06
Nom. Güç Akımı	5,58	A	Sıcaklık Katsayısı	-0,38
Kısa Devre Akımı	5,96	A	Sıcaklık Katsayısı	-0,42
Açık Devre Gerilimi	64,2	V	Sıcaklık Katsayısı	0,38
Maks. Sistem Gerilimi	600	V		
Diyot Akımı	15	A		

Oluşturulan diziler, kablo akım taşıma kapasiteleri, gerilim düşüm faktörleri ve evirici giriş voltaj kapasitesine göre gruplandırılması gerekmektedir. İki tip gruplandırmada kullanılan kombinasyon kutusu uygulanmıştır. Bu kombinasyonların biri 12 girişli olup, diğeri 11 adet dizi girişine sahiptir.

Maksimum dizi panel sayısı için, panel kataloğundan açık devre gerilimi 64,2V ve sıcaklık katsayısı -0,380 %/°C olarak görülmekte olup bu değerler yardımıyla;

$$U_{L(\text{modül } T_{\min})} = \left(1 - \Delta T^{\circ}\text{C} \times \frac{\beta_L}{\%100}\right) \times U_{L(\text{STC})} = \left(1 - (25 - 4) \times \frac{-0,38}{100}\right) \times 64,2$$

$$= 69,4\text{V}$$

(3.3)

Bulunan en düşük sıcaklıktaki panel dizi gerilim değeri, dizide bağlanabilecek maksimum panel sayısını hesaplamak için;

$$n_{\text{maks}} = \frac{U_{\text{evirici maks}}}{U_{L(\text{modül } T_{\min})}} = \frac{1000}{69,3963} = 14,409 \text{ adet}$$

(3.4)

Minimum panel sayısını hesaplamak için, panel maksimum güç gerilimi 54,7V ve sıcaklık katsayısı -0,380 %/°C olarak görülmekte olup bu değerler yardımıyla;

$$U_{mpp(\text{modül } T_{\max})} = \left(1 + \Delta T^{\circ}C \times \frac{\beta_{MPP}}{100}\right) \times U_{mpp(STC)} = \left(1 + (50-25) \times \frac{-0,38}{100}\right) \times 54,7$$

$$= 52,25V$$

(3.5)

Bulunan en yüksek sıcaklıktaki panel maksimum güç gerilim değeri, dizide bağlanabilecek minimum panel sayısını hesaplamak için;

$$n_{\min} = \frac{U_{\text{evirici maks}}}{U_{L(\text{modül } T_{\max})}} = \frac{562}{52,2472} = 10,76 \text{ adet}$$

(3.6)

Böylelikle bir diziye bağlanabilecek panel sayısı $10,76 < n_{\text{dizi}} < 14,4$ arasında olmalıdır.

Tablo 3.3. Evirici Tasarım özellikleri

Evirici Tipi	Sunny Central 900		Koruma Sınıfı	IP65	
Tek/Trifaz	Trifaz		Ağırlık	61kg	
Evrici Boyutları	665x690x265				
DC Taraf			AC Taraf		
Maks. DC Giriş Gerilimi	1000V		Nominal AC Güç	990	kW
MPPT Sayısı	1 adet		Maks. AC Güç	990	kW
Maks. MPPT Giriş Gücü	1010	W	Nominal AC Gerilim	405	V
Maks. DC Giriş Akımı	1400	A	AC Gerilim Aralığı	365-465	V
Maks. DC Giriş Akımı MPPT	1400	A	Maks. AC Akımı	1411	A
Maks. MPPT Kısa Devre Akımı	2500	A	Nominal frekans	50	Hz
			Frekans Aralığı	47-53	Hz
Sistem Bilgileri			Nominal Güç Faktörü	>0,995	
Toplam FV Modül Sayısı	3240 adet				
Toplam Evirici Sayısı	1 adet				

Ek olarak sistem panellerinin evirici ile uyumu büyük önem arz etmektedir. Bu uygunluğu test etmek için bir dizi hesaplamalar gerekmektedir. Öncelikle panellerle oluşturulan dizinin maksimum gerilim hesabı yapılmalıdır.

$$V_{\text{dizi maks}} = N \times V_{\text{oc}} \times \left(1 + \beta V_{\text{oc}} \times \frac{(T_{\text{min}} - T_s)}{100} \right) = 12 \times 64,2 \times \left(1 + 0,38 \times \frac{(25+4)}{100} \right) \quad (3.7)$$

$$= 855,3V < 1000V$$

Bir dizi geriliminin maksimum ulaşabileceği gerilim değeri ile evirici giriş maksimum değeri karşılaştırıldığında, uygun olmaktadır.

Ayrıca eviricinin verimli çalışabilmesi için minimum giriş gerilim değeri de önemli bir faktördür. Bu değeri hesaplamak için;

$$V_{\text{dizi min}} = N \times V_{\text{oc}} \times \left(1 + \beta V_{\text{oc}} \times \frac{(T_{\text{max}} - T_s)}{100} \right) = 12 \times 64,2 \times \left(1 + 0,38 \times \frac{(50-25)}{100} \right) \quad (3.8)$$

$$= 697,2V > 562V$$

Evirici katalog değerlerinden minimum çalışma geriliminin 697,2V olduğu bilindiğine göre, dizinin minimum çalışma gerilimi ve dizi büyüklüğü eviriciye uygundur.

Panel dizinin minimum ve maksimum gerilimleri hesaplandıktan sonra, farklı sıcaklıklarda maksimum güç noktasında gerilim değerleri hesaplanması gerekmektedir.

$$V_{\text{mpp max}} = N \times V_{\text{mpp}} \times \left(1 + \beta V_{\text{mpp}} \times \frac{(T_{\text{min}} - T_s)}{100} \right) = 12 \times 54,7 \times \left(1 + 0,42 \times \frac{(25+4)}{100} \right) \quad (3.9)$$

$$= 736,3V < 1000V$$

ve

$$V_{\text{mpp min}} = N \times V_{\text{mpp}} \times \left(1 + \beta V_{\text{mpp}} \times \frac{(T_{\text{max}} - T_s)}{100} \right) = 12 \times 54,7 \times \left(1 + 0,42 \times \frac{(50-25)}{100} \right) \quad (3.10)$$

$$= 587,5V > 562V$$

Böylece panel dizisi ve evirici uyumluluk hesaplarına göre, eviricinin çeşitli atmosferik şartlar altında panel gruplarıyla güvenli ve uyumlu çalıştığı kanıtlanmıştır. Özellikle yaz aylarında tam ışınım olduğu günlerde, paneller yüksek sıcaklıktan modülün anma gerilimine göre daha düşük bir gerilime sahip olur. Tesisin çalışma gerilimi eğer eviricinin maksimum güç noktası geriliminin altına düşerse, mümkün olan maksimum güç verilemez hatta uygun şartlar altında sistem enerji üretmez. Bu

nedenle seri bağı modüllerin bir dizi içindeki minimum sayısı maksimum güç noktasındaki eviricinin minimum giriş geriliminden ve 50°C'deki maksimum güç noktasındaki modül geriliminin çarpımından elde edilecek şekilde boyut seçimi yapılır. Seri devredeki modül sayısını belirlemek için alt sınır değeri elde edilir.

Tesiste kullanılacak kablo seçimi için göz önüne alınması gereken diğer bir unsur ise, DA ve AA güç kayıpları ve gerilim düşümleridir. Öncelikle kullanılacak DA kablo hesapları için;

$$DA \text{ Güç Kaybı} = P_k = \frac{I^2 \times L}{S \times K} = \frac{5,58^2 \times 105}{6 \times 56} = 9,73 \text{ W/dizi} \quad (3.11)$$

P_k :Modül veya dizi hattı güç kaybı (Watt)

L: Modül veya dizi hattının +- terminalleri arası toplam hat uzunluğu (m)

S: Kablo kesiti (mm²)

K: Elektrik iletkenlik katsayısı (bakır için 56 m/Ωmm²)

Hesaplanan DA güç kaybı sayesinde, gerilim düşümü de aşağıdaki hesaplanabilmektedir.

$$\%e = \frac{100 \times L \times I}{S \times U \times K} = \frac{100 \times 105 \times 5,58}{6 \times 656,4 \times 56} = \%0,26 \quad (3.12)$$

Aynı hesaplama yöntemi kullanılarak, DA kombinasyon kutularından eviricilere kullanılacak kablo seçimleri yapılması gerekmektedir. Özellikle Güneş enerji santrallerinde kullanılacak kablo seçimine özen gösterilmelidir. Aksi takdirde sistemde oluşabilecek yüksek güç kayıpları ve aşırı ısınmadan kaynaklanabilecek büyük problemler ortaya çıkabilmektedir. Uygulamalarda en sık karşılaşılan bakır ve alüminyum iletkenlerdir. Ancak alüminyum iletkenin öz direnci muadil bakır iletkene göre 1,6 kat daha fazladır. Fiyat olarak karşılaştırma yapılırsa, alüminyum iletkenler daha ucuzdur. Bu nedenle maliyet ve verim hesapları çok önemlidir. Sistemin verimli çalışmasının önüne geçebilecek her türlü problemin efektif bir şekilde çözülmesi gerekmektedir.

Kablo kesitleri için sistemde genel olarak DA kısmında dört tip kablo kullanılacaktır. Birinci tip FV paneller arası kullanılacak olan kablodur. Tek panel V_{mpp} 54,7V ve I_{mpp} 5,58A olarak bilinmektedir. Böylelikle paneller arası $1,5\text{mm}^2$ bakır iletken kullanımı mümkündür.

Panel dizisi ve kombinasyon kutuları arası kablolar gerilim ve akım hesabına göre yapılması gerekmektedir. Bir dizi 12 adet seri bağlı panelden oluştuğu için, V_{dizi} maksimum güç noktasında 656,4V olarak hesaplanmıştır. Dizi akımı ise, seri bağlı panel grubu olduğundan, I_{dizi} 5,58A olarak düşünülebilir. Bu bölümde seçilen kablo kesiti yine 1.5mm^2 olarak belirtilmiştir.

Sistemde farklı iki tip kombinasyon kutusu kullanıldığından 12 ve 11 gruplu kutuların evirici girişine uygun olması için ve oluşabilecek bir problemde belirli dizileri enerjisiz bırakabilmek için ekstra bir kombinasyon kutusu kullanılacaktır. Bu kesitleri hesaplamak için aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$A_{dc} = \frac{2 \times L_{DC} \times P_{Dizi}}{LF \times V_{mpp}^2 \times K} \quad (3.13)$$

AA kısmında ise, evirici çıkışı emniyet tedbirleri için dağıtım panosuna girişi yapılarak, koruma ekipmanları (devre kesici sigorta ve parafudr) evirici-pano ve pano transformatör arası üç fazlı kablo seçimleri yapılmıştır.

AA kablo seçimi için aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$A_{ac} = \frac{L_{ac} \times P_{ac}}{LF \times V_{ac}^2 \times K} \quad (3.14)$$

Formüllerde kullanılan terimler sırasıyla;

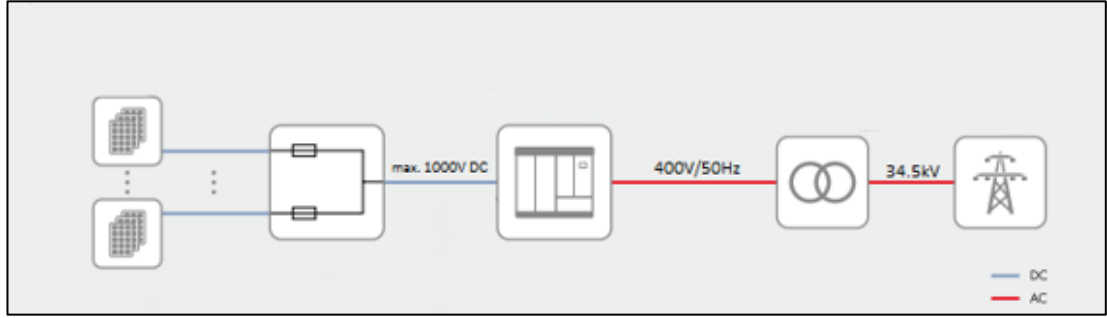
L: Kablo uzunluğu (metre)

LF: Gerilim düşüm faktörü (%1 olarak kabul edilmiştir.)

P: Nominal güç

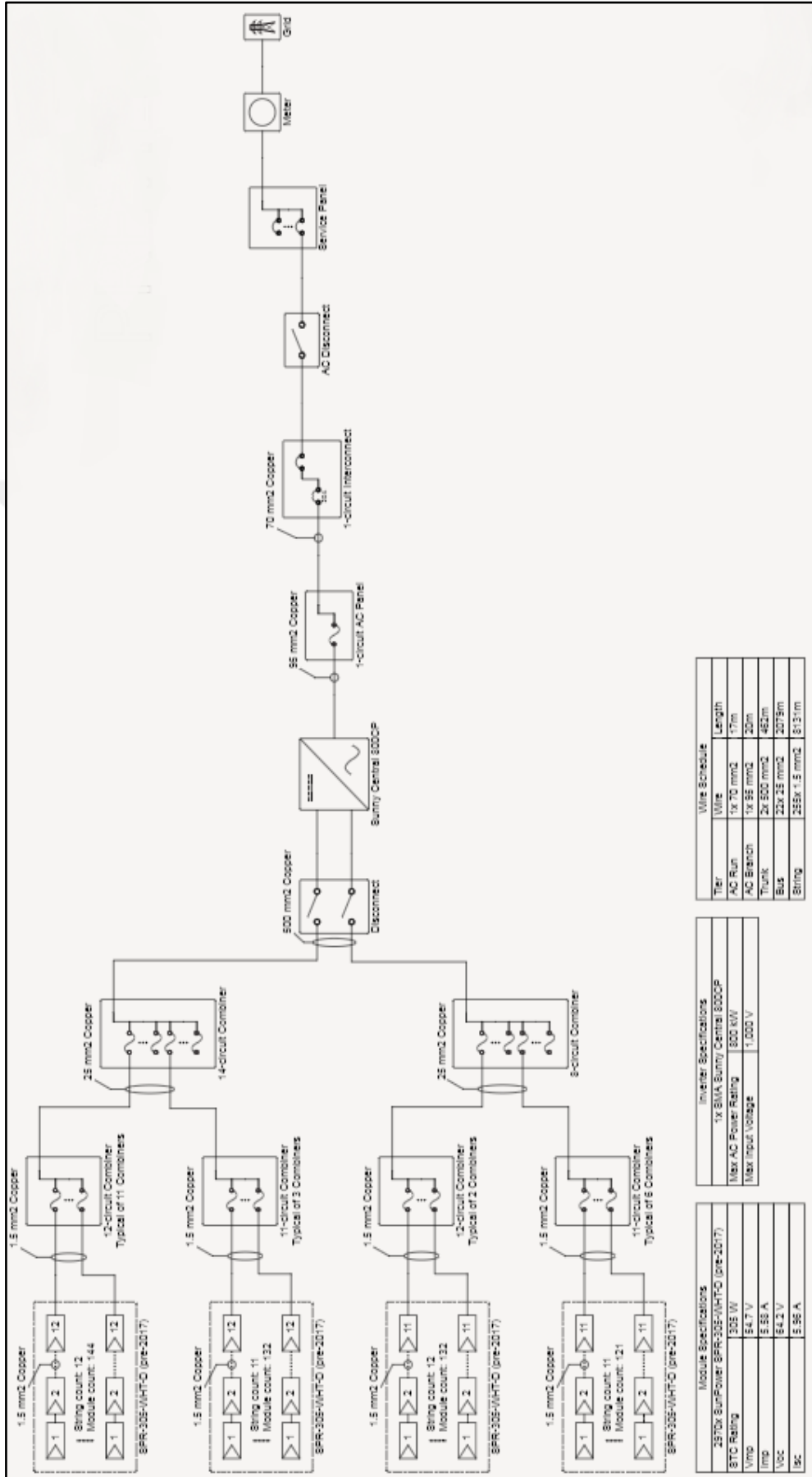
K: Kablo iletim faktörü (Bakır için 56 kullanılmıştır)

Yapılan hesaplar ardından sistem genel tasarım şeması ve detaylı tek hat şeması verilmiştir.



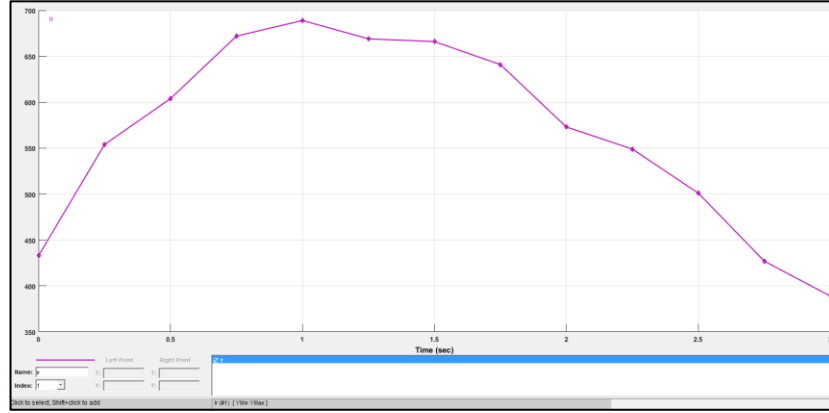
Şekil 3.11. Sistem tasarım şeması

Panel dizi hesabı, gerilim düşüm oranları, güç hesapları ve kablo kesit hesapları yapıldığına göre sistemin tek hat şeması çizilmiştir. Bu tek hat şemasında bağlantı detayları daha net verilmiş olup, genel sistemin daha anlaşılır hale getirilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 3.12. Sistem tek hat şeması

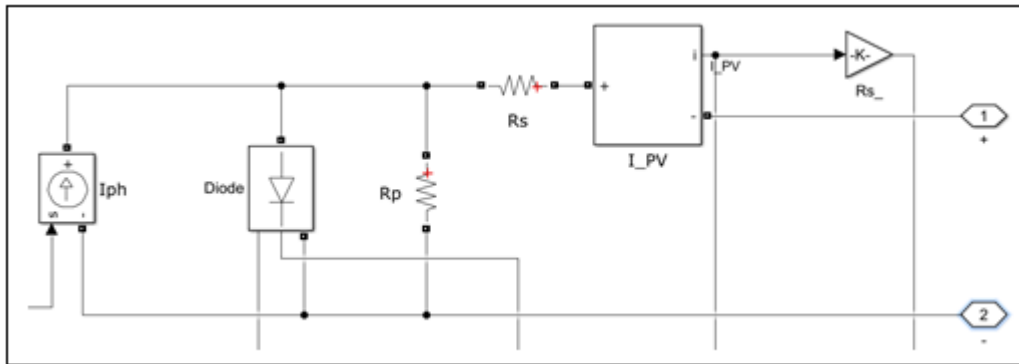
Işıma değeri sinyal fonksiyon üreticisi ile yıl içerisindeki değışkenlik değeri benzetimi yapılmıştır. Aşağıdaki grafikte bu eğri verilmiştir.



Şekil 3.12. Gebze ilçesi yıllık ışıma değışimleri grafiği

Tıpkı ışıma fonksiyonu gibi bölgenin yıllık ortalama sıcaklık grafiği simülasyona tanıtılmıştır.

Matlab simülasyon modeline öncelikle fotovoltaiik panellerin tasarımı ve parametre girişleriyle başlanmıştır. Simülasyon ideal şartlarda gerçekleşeceği için pratik uygulamalardaki bazı kayıplar göz ardı edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle fotovoltaiik panel modellemesi için ideal panel devre şeması ve bileşenleri kullanılmıştır. Tek diyotlu ideal güneş panel denklemlerinin matematiksel modeli oluşturularak ışıma değeri giriş olarak tanıtılmıştır.



Şekil 3.13. FV panel devre benzetimi

Bir fotovoltaiik hücrenin ana denklemi olan;

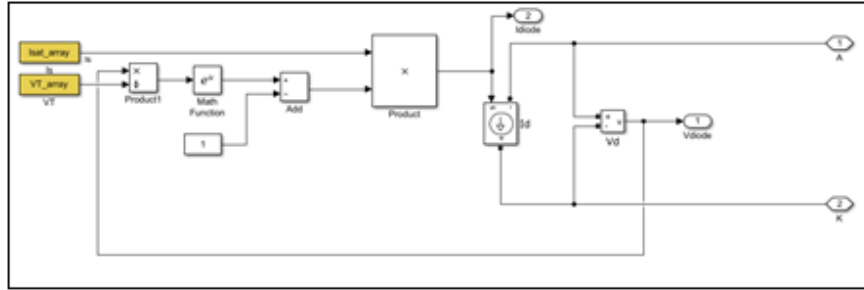
$$I=I_{pv}-I_d-I_{sh} \quad (3.15)$$

Denklemini yardımıyla, akım düğümlerinin oluşturduğu denklem çözümlenmiş olup, dizi bağlantı verilerine göre dizi çıkış güçleri test edilmiştir.

Özetle fotovoltaik panel ana denklemi olan;

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\frac{V_{sh}}{e^{nVT}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3.16)$$

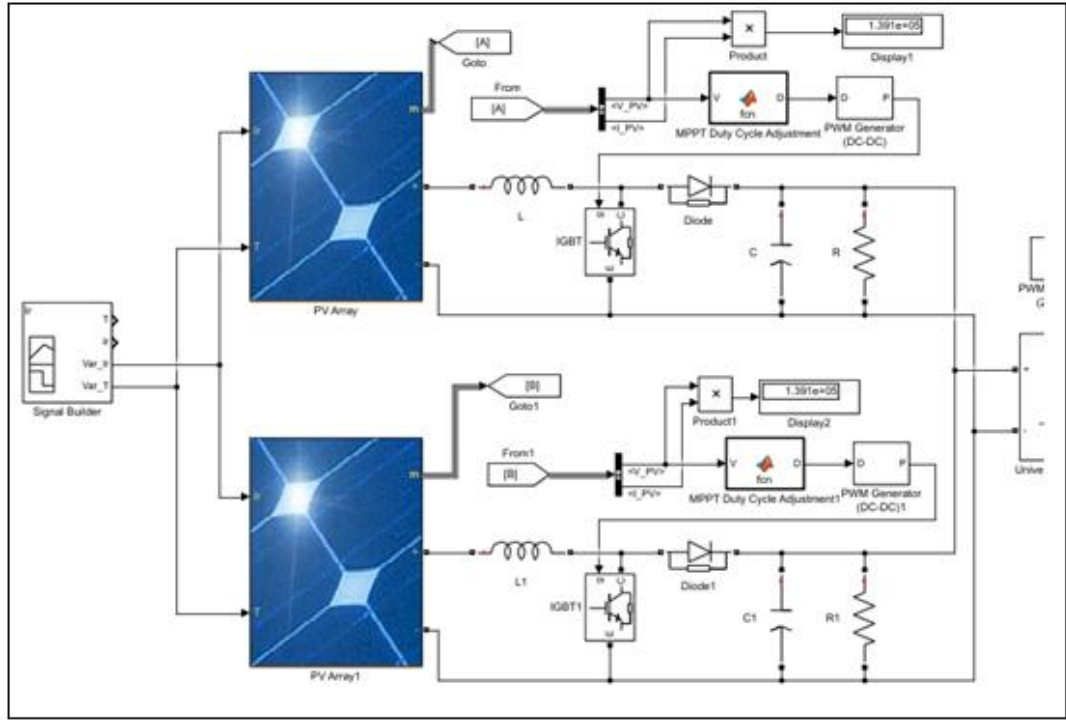
ifadesinin matematiksel tanımlaması yapılmıştır. Diyot üzerinden geçen akım ifadesi ise Shockley Denklemlerinden yararlanılarak;



Şekil 3.14. FV panel diyot denklemleri benzetimi

ifade edilmiştir. İlgili dizinin seri bağlı panel sayısı ve paralel dizi sayısı ise, grup bloklaması yapılarak istenilen çıkışa ulaşılmıştır.

Oluşturulan fotovoltaik dizi bloğu, ışığa girdileriyle tetiklenerek DA Boost dönüştürücü devresi girişlerine hazır hale getirilmiştir.

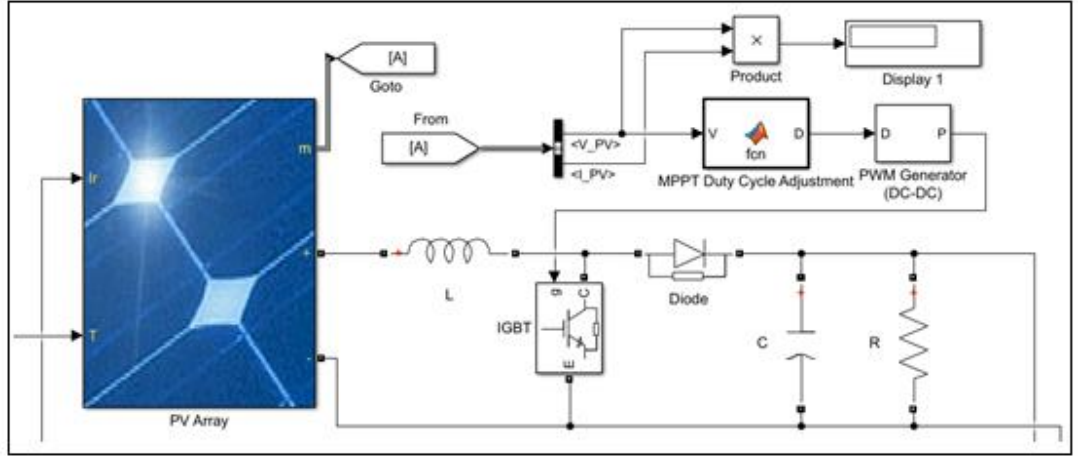


Şekil 3.15. FV dizilerin DA çevirici bağlantı şeması

3.3. DA-DA Çevrim Modellemesi

Daha önce de belirtildiği gibi, fotovoltaik panel çıkışlarında oluşan DA gerilim seviyesi belirli oranlardadır ve değişkendir. Elektrik dağıtım şebekesine aktarmak yada iç ihtiyaç amacıyla kullanılması için, yaygın olan 220V AA faz-nötr arası gerilime regüle edilmesi gerekir.

Sistem modellemesinde, panel dizilerinin çıkışları öncelikle DA-DA boost converter yardımıyla, DA gerilim barasına bağlanmıştır. DA çevirici içerisindeki çevrim oranı “duty cycle” değerinin kontrolü maksimum güç noktası takibinden gelmektedir. Böylece, sistem çalışma performansına göre, DA gerilim yükseltme işlemi değişkenlik göstererek yükseltilecek DA gerilimin maksimum güç noktasına yakın çalışması sağlanır. Aşağıda DA dönüştürücü devre şeması verilmiştir.



Şekil 3.16. DA çevirici devre şeması

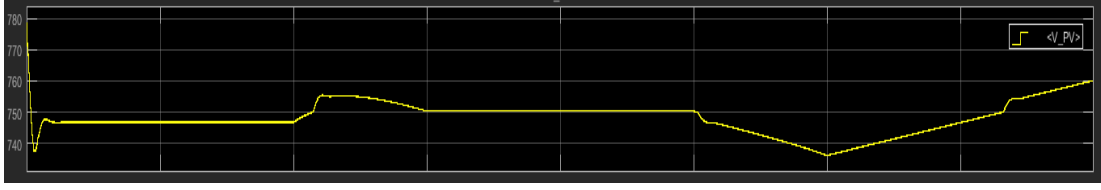
Sistemde kullanılacak evirici DA gerilim giriş seviyesi maksimum 1000V DA kapasitesindedir. Bu nedenle boost çevirici çıkış gerilim seviyesi evirici tasarımına göre ayarlanarak yükseltme işleminin verimli olmasını sağlamıştır. Çevirici tasarımında MGNT kontrolü tetikleme yarı-iletkenine gerekli olan frekans değerinde sinyaller göndermektedir. Bu tetikleme 5kHz frekansında ve maksimum güç noktası fonksiyonunda yapılan işlemler neticesinde elde edilen çevrim oranı değeri darbe genişlik modülasyonu (DGM) tekniği ile darbe sinyalleri olarak yarı iletkenine iletilmektedir.

Sistemdeki indüktans ve kapasitans değerleri hesaplamak için, yükseltici dönüşüm devre yapısı incelenerek aşağıdaki formüller kullanılmıştır;

$$L = \frac{V_i \times D}{f \times \Delta I_L} \quad (3.17)$$

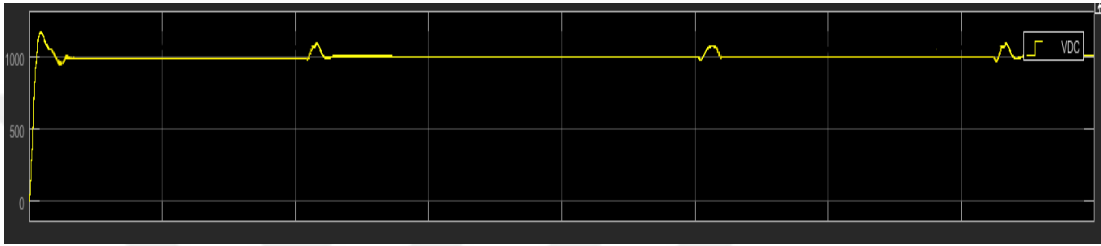
$$C = \frac{I_{max} \times D}{f \times \Delta V_O} \quad (3.18)$$

Tasarım formülleri ve çıkış gerilim toleransı ile, $L=50\mu H$ ve $C=120\mu F$ olarak seçilmiştir. Yapılan bu tasarım ile çevrim oranı D sıfır ile bir arasında olduğu düşünülerek çevirici simülasyonu çıkış grafikleri incelenmiştir.



Şekil 3.17. FV panel çıkış gerilimleri

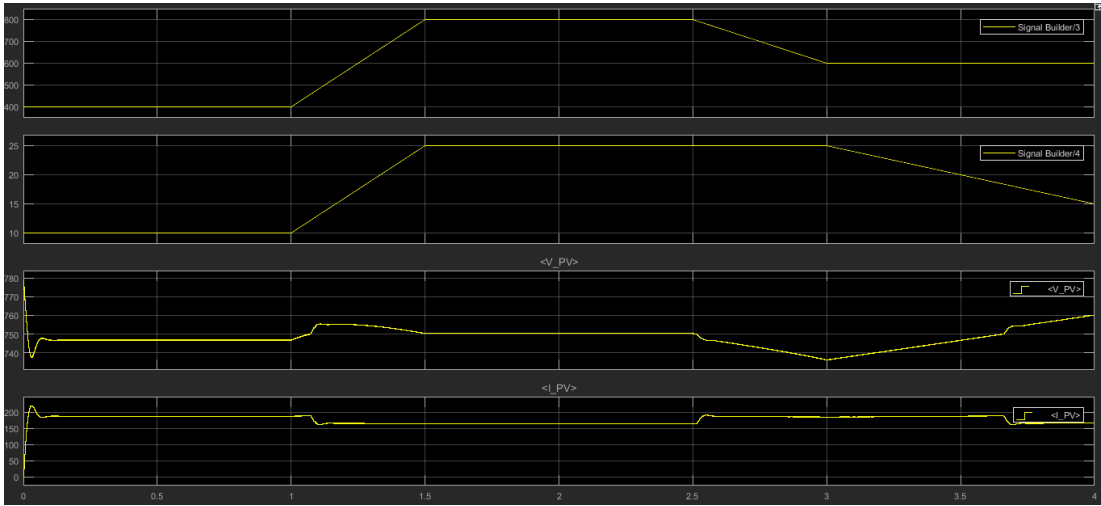
Sistemin değişken ışımaya ve sıcaklık girdilerine oranla panel çıkış gerilimlerinin de değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Yükseltici devrenin çıkış gerilim grafiği aşağıdaki grafiktedir.



Şekil 3.18. DA yükseltici çıkış gerilim grafiği

Böylelikle DA gerilim yükseltme ve regülasyon işlemi fonksiyonu modellenmiştir.

Işınım değişimlerine göre panel çıkış gerilim grafikleri aşağıdadır. Ek olarak yıllık sıcaklık değişim grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.19. Işınım, sıcaklık, FV panel gerilim, yükseltici devre çıkışları

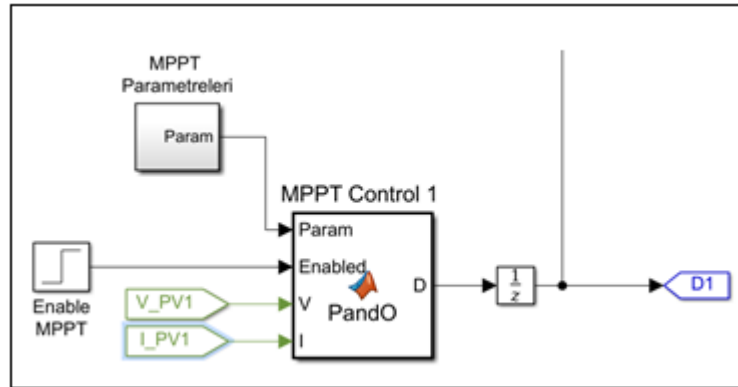
3.4. MGNT Kontrol Algoritması ve Modellemesi

Sistemin en kritik noktası ve kontrol mekanizması maksimum güç noktası ve bağlı olduğu sistemleri yönetmesidir. Değişken ışığa ve sıcaklık değerine göre sistemin verimli çalışmasını denetleyerek tüm güç elektronik devresine kontrol sinyalleri göndermektedir.

Daha önce bahsedildiği üzere, maksimum güç noktası takibi uygulamalarında birçok yöntem mevcuttur. Bu benzetim çalışmasında hata ve gözlem (perturb and observe) tekniği kullanılmıştır. Böylelikle güç noktasını en yüksek verimlilik değeriyle takibi amaçlanmıştır.

Hata ve gözlem tekniğinde sistem girdileri olarak, fotovoltaik panel gerilim ve akım değerleri gerekmektedir. Bu değerler dizi modelinden kolaylıkla alınabilmektedir.

Kontrol fonksiyonun daha etkin çalıştırmak ve maksimum güç noktasını en kısa zaman aralığında yakalamak adına, sistemin çıkış değeri olan “D” çevrim değerine belirli parametreler tanıtılması gerekmekte olup, minimum ve maksimum aralığı belirlenmelidir. Ayrıca her çevrim zaman aralığında artış miktarı yine tanıtılması gereken parametrelerdendir. Aşağıda MGNT kontrol modellemesi verilmiştir.



Şekil 3.20. MGNT kontrol modellemesi

Hata ve gözlem tekniğinde yapılması gereken işlemler serisini hızlı bir şekilde yaparak tepki süresini düşürmek adına MATLAB fonksiyon bloğunun içerisine MATLAB program dili kullanılarak yapılacak işlemler tanıtılmıştır. Aşağıda bu algoritmayı çalıştırmak için yazılan kod serisi verilmiştir.

```

function D = PandO(Param, Enabled, V, I)

% MGNT kontrolu Hata & Gozlem

% D cikis = Boost cevirici adim sayisi (0 ve 1 arasinda)
%
% V giris = FV dizi cikis gerilimi (V)
% I giris = FV dizi akim degeri (A)
%
% Param giris:
Dinit = Param(1); %Giris degeri D output
Dmax = Param(2); %Maksimum deger D
Dmin = Param(3); %Minimum deger D
deltaD = Param(4); %Artis yada azalma icin gerekli adim sayisi
degeri
%

persistent Vold Pold Dold;

dataType = 'double';

if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Dold=Dinit;
end
P= V*I;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;

if dP ~= 0 & Enabled ~=0
if dP < 0
if dV < 0
            D = Dold - deltaD;
else
            D = Dold + deltaD;
end
else
if dV < 0
            D = Dold + deltaD;
else
            D = Dold - deltaD;
end
end
else D=Dold;
end

if D >= Dmax | D<= Dmin
    D=Dold;
end

Dold=D;
Vold=V;
Pold=P;

```

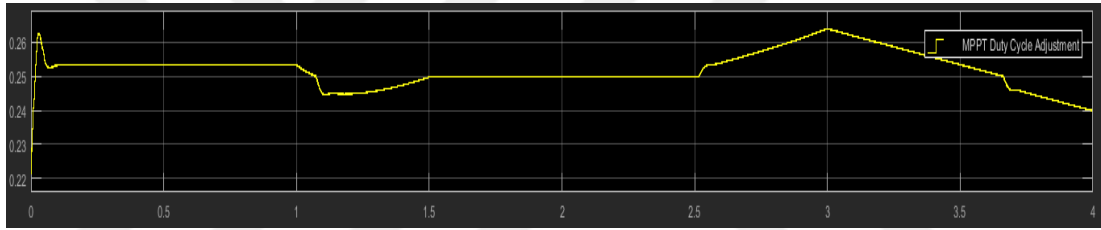
Şekil 3.21. MGNT Matlab kod satırları

Yukarıdaki kod satırında MGNT sistemi ilk durumlarda gerilim ve akım değerleriyle çeşitli benzetimler yapmaktadır.

Öncelikle sistemde tanımlanan ilk gerilim ve akım değerleri ile panel dizisi çıkış gücünü hesaplayarak, adım sayısı kadar arttırma işlemine gitmektedir. Böylelikle sırayla iterasyonlar yaparak bir önceki iterasyon değerindeki güç ve gerilim değerleri arasındaki farkı hesaplamaktadır. Sistem aynı zamanda boost çeviricide kullanılacak D çevrim değerini oluşturmaktadır.

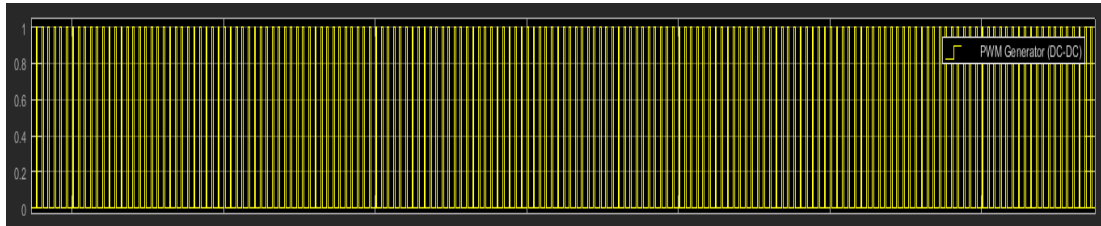
Hata ve gözlem yöntemi tam olarak maksimum güç noktası değerini tam olarak yakalayamasa bile, bu nokta en yakın değerlerde işlemler yaparak verimli bir çevrim yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Maksimum güç noktasının takibi ile çevrim oranındaki değişimler ve DGM bloğu çıkış darbeleri grafikleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.22. D çevrim oranı değişim grafiği

Sistem çevrim oranı farklı atmosferik şartlara rağmen 0,25 değeri arasında işlem yapmakta olup, darbe sinyallerine dönüştürülerek yarı-iletken anahtarlama elemanına gönderilmektedir. Aşağıda bu darbe sinyallerinin grafiği verilmiştir.



Şekil 3.23. Çevrim oranı değerlerinin darbe sinyallerine çevrimi

Bu darbe sinyalleri sisteme 5kHz bir frekans ile gönderildiğinden insan gözüyle takibi ve darbe genişliklerinin oldukça zordur. Eğer frekans değeri düşürülürse, çevrim oranı ve çıkış gerilim dengelemesi daha yavaş yapılacaktır.

3.5. DA-AA Modellemesi ve Hesaplamalar

Bu uygulamada, piyasada şartlarında bulunan SMA markasının Sunny Central 800CP XT modeli seçilmiştir. Maksimum 880 kVA gücünde olan bu cihaz, %98,7 verimlilik oranına sahip olup, detayları aşağıda verilmiştir.

Teknik Veriler	Sunny Central 800CP-XT
Giriş (DA)	
Maks. DA Gücü (@cosφ=1)	898kW
Maks. Giriş gücü	1000V
MGN gerilim aralığı	570V-820V
Giriş Anma Gerilimi	570V-820V
Maks. Giriş akımı	1600A
Min Giriş Gerilimi/Vmpp min	568V
Bağımsız MGN Girişi	2
DA giriş sayısı	6--9
Çıkış (AA)	
Anma Gücü(@25°C)	880kVA/800kVA
Anma Şebeke Gerilimi	360V / 324-396 V
AC güç frekansı	50Hz/47-63Hz
Anma Güç Frekansı	50Hz/ 360V
Maks. Çıkış akımı	1411A
Maks. Toplam harmonik bozulma	<%5
Anma gücündeki güç faktörü	1/0,8
Besleme Faz Sayısı	3
Verim	
Maks. Verimlilik	98,70%

Şekil 3.24. SMA Sunny Central 800CP üretici verileri

Evirici verileri üzerinden, sisteminin bazı güç hesapları yapılacak olursa, öncelikle AA aktif güç hesabı için evirici DA giriş güç hesapları için kullanılan formül;

$$P_{dcGEN} = \frac{P_{acWR}}{\eta} = \frac{800}{0,98} = 816 \text{ kW} \quad (3.19)$$

Böylelikle, evirici verilerinden nominal güç faktörü kullanılarak, dizi gücü hesaplanabilir;

$$P_{dcGEN} = \frac{P_{dcWR}}{N} = \frac{816 \text{ kW}}{0,82} = 995 \text{ kW} \quad (3.20)$$

Evirici tasarımında modüllerin sıcaklığa ve ışınımına bağlılıkları dikkate alınmalıdır. Gebze bölgesinde ortam sıcaklığı olarak 50°C, minimum sıcaklık ise -3,7°C alınmıştır. Düşük sıcaklıklarda fotovoltaiik panel gerilimi artacağından ve yüksek sıcaklık

değerlerinde gerilim artmasından dolayı çalışma durumunda meydana gelebilen en yüksek ve en düşük gerilim değerine göre dizideki maksimum ve minimum panel sayıları aşağıda hesaplanmıştır.

Türkiye şartlarında kullanılan enterkonnekte elektrik dağıtım şebeke frekansı 50 Hz değerindedir. Ayrıca 220V AA gerilim seviyesinde olduğundan, evirici çıkış seviyesi için bu değerler esas alınmıştır. Üç fazlı bir şebekenin gerilim sinüs grafiği incelendiğinde, faz-faz arası gerilim, faz ve nötr arası gerilim değerinin $\sqrt{3}$ katıdır.

$$V_{\text{faz-faz}} = \sqrt{3}V_{\text{faz-nötr}} \quad (3.21)$$

Evirici giriş gerilimi ve çıkış gerilimleri $\pm\%10$ tolerans değerleriyle kabul edilerek 1000V DA ve 400V AA faz-faz arası olarak kabul edilmiştir. Aynı şekilde 400V AA etkin gerilime sahip olan evirici çıkışları aynı fazda tutulduğundan hesaplamalarda güç faktörü 1 olarak alınmıştır.

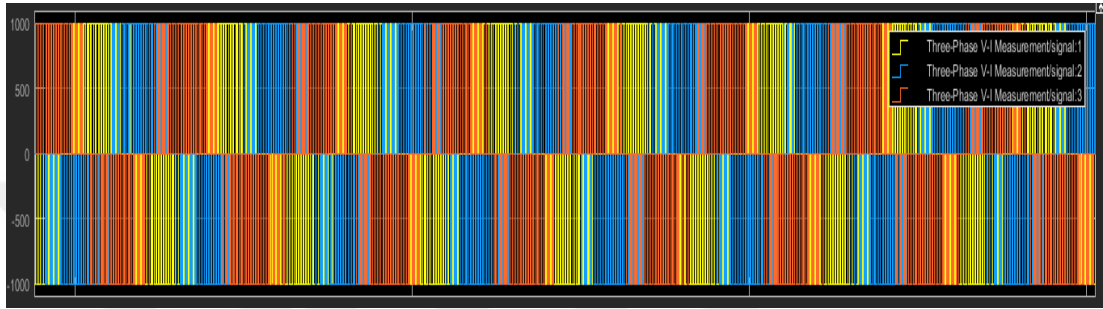
Matlab modellemesi için, program kütüphanesinde bulunan evirici bloğu kullanılmıştır. DA yükseltici devresi çıkışları evirici giriş kısımlarına bağlanarak, 1000V DA olarak regüle edilen sistem üç fazlı 6 anahtarlama elemanlı köprü evirici prensibiyle çalışan modele girişi yapılmıştır.

IGBT tabanlı simulasyon yapılmış olup, şebeke bağlantılı olması nedeniyle yüksek frekansla şebekenin gerilim ve akım değerlerinden referans olarak DGM tekniği ile anahtarlama elemanlarına sinyal göndermektedir. Böylece şebekeye saf sinusoidal üç fazlı ve 120° faz açılı gerilim iletilmiştir. Belirtilmiş güç faktörü ile birlikte şebekeye kaliteli bir besleme yapması amaçlanmasına rağmen, anahtarlama frekansının yüksek olması nedeniyle harmonik bozulmalar yaşanmaktadır. Bu harmonik bozulmaları engellemek ve darbe çıkışlarını sinüs dalgalarına çevirmek için evirici çıkışına bir L-C filtre tasarımı yapılarak, çıkış gerilimi incelenmiştir.

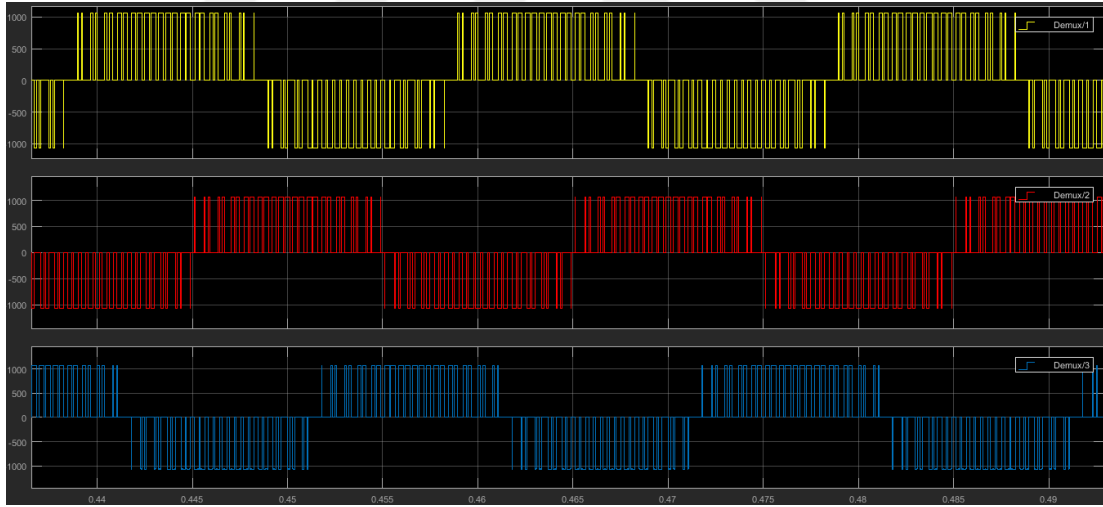
Şebeke etkileşimli bir evirici kullanıldığından, çıkış karakteristikleri şebeke gerilimi ile uyumluluk göstermesi gerekmektedir. Bu nedenler, senkronizasyon kademeleri için abc çıkışlarından Matlab fonksiyon bloklarından PLL (phase locked loop) faz kilitleme döngüsü kullanılmıştır. PLL bloğu, faz açısı ve frekans gibi üç faz parametrelerini analiz ederek, iki fazlı sinyallere dönüştürmektedir. Bu dönüştürme

işleminin ardından, parametreler akım regülasyonu bloğuna giriş olarak verilmiştir. Böylece şebekeye maksimum güç verilmesi hedeflenmiştir. Ardından simülasyonu yapılan referans sinyaller tekrar DGM sinyallerine dönüştürülerek evirici anahtarlama elemanına gönderilmiştir.

Öncelikle evirici çıkış gerilimi DGM tekniğinden gelen darbe ile veriler elde edilmiştir. Bu grafik aşağıda verilmiştir.

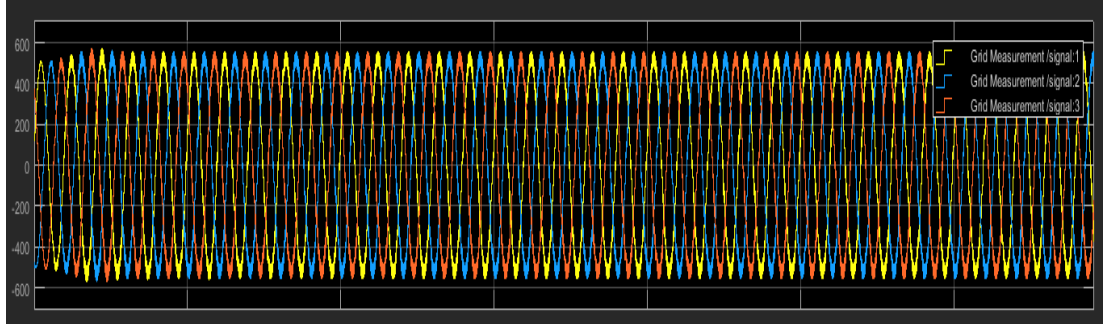


Şekil 3.25. Evirici çıkış darbe sinyalleri

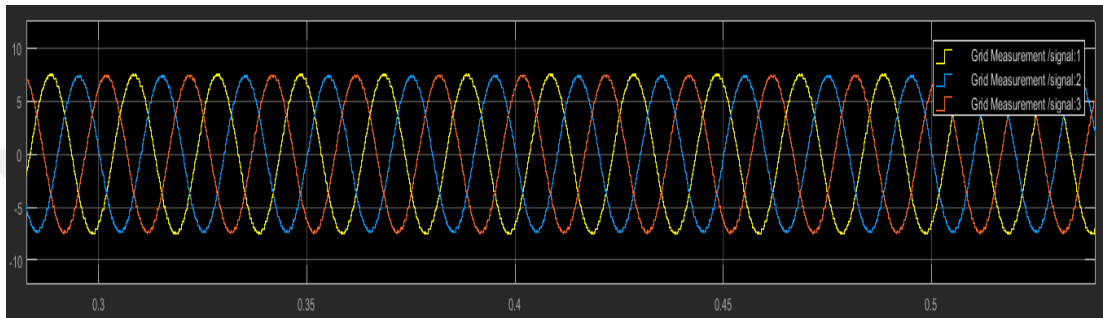


Şekil 3.26. Evirici çıkış sinyallerinin yaratılması

Evirici çıkışının ardından seri bağlı bir $200\mu\text{H}$ indüktans değerinde ve $500\mu\text{F}$ değerinde bir kapasitans değerinde filtreleme işlemi yapılmıştır. Bu filtrelemenin ardından çıkış gerilim sinyallerinde sinüs dalgasına yakın veriler alınmıştır. Bu çıkışlar aşağıda görülmektedir.

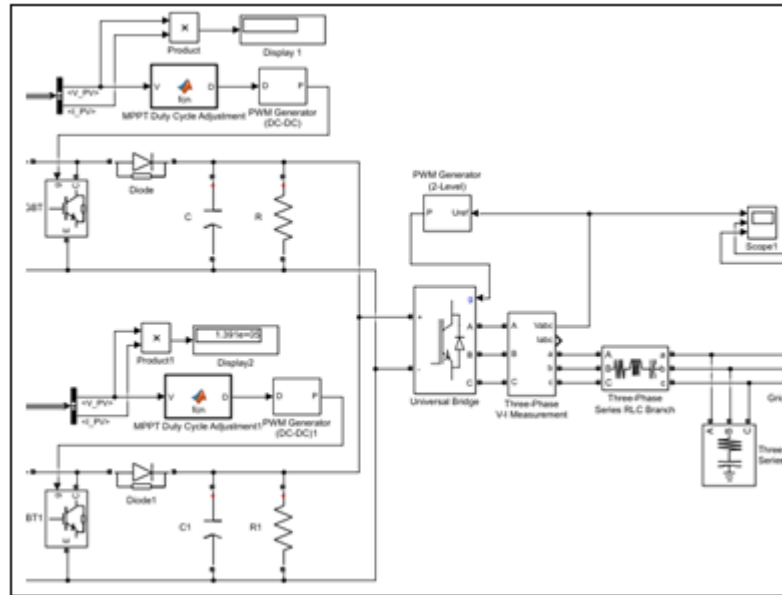


Şekil 3.27. Evirici çıkışı şebekeye aktarılan gerilim grafiği



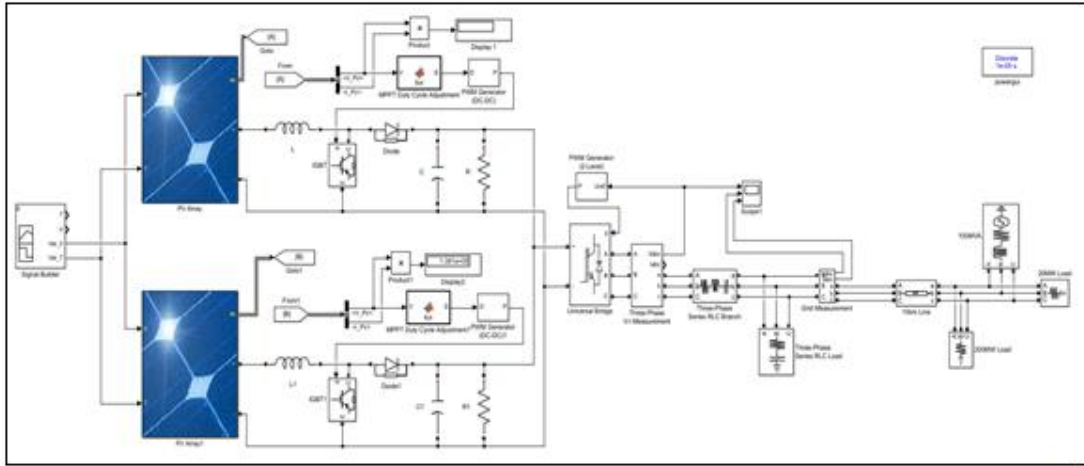
Şekil 3.28. Evirici çıkışı şebekeye aktarılan akım grafiği

Tüm bu sistemin kurulumu ve simülasyonu giriş sinyallerinin yıllık ortalaması alınarak tamamlanmıştır. Simülasyon dört saniye süresince tanıtılmış ve yukarıdaki çıkış sinyalleri elde edilmiştir. Aşağıdaki görselde evirici bağlantı detayları yer almaktadır.



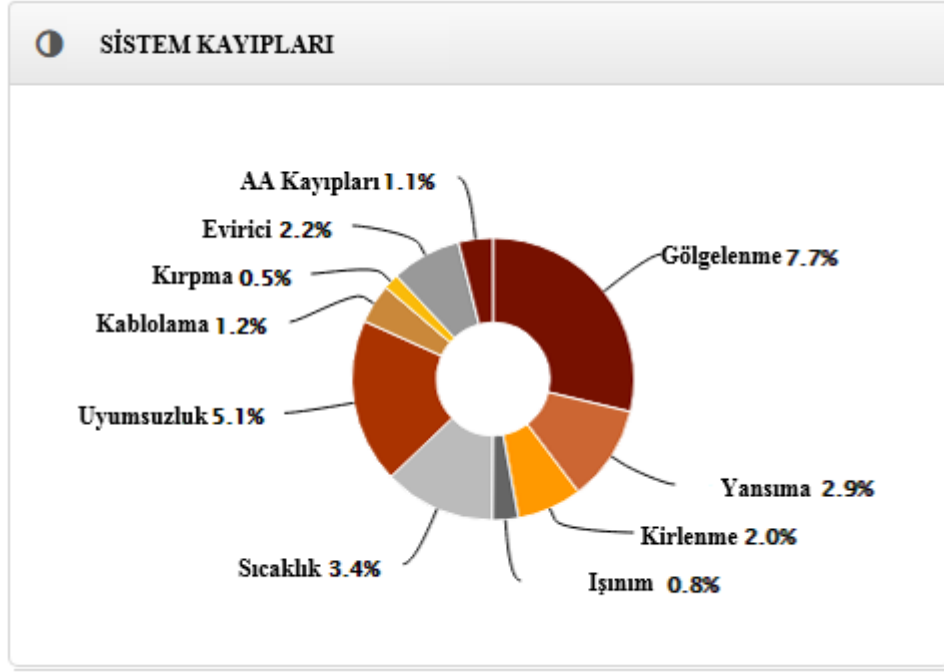
Şekil 3.29. Evirici modeli bağlantı detayları

Genel olarak sistem tasarımının tamamlanması için şebeke modeli yaratılması gerekmektedir. Söz konusu bölgenin organize sanayi bölgesinde yer alması, değişken ve önceden davranışının tahmin edilmesi zor bir şebeke altyapısına yol açmaktadır. Bilindiği üzere organize sanayi şebekelerinde elektriksel yükler anlık olarak büyük değişiklikler göstereceğinden, şebeke detayları çok değinilmeden, yüzeysel bir model yaratılmıştır. Aşağıda tamamlanan sistem tasarımı ve şebeke modellemesinin bütünü yer almaktadır.



Şekil 3.30. Genel sistem tasarımı ve modellemesi

Sistemim gerçek zamanlı PVSyst simülasyonları ise daha gerçekçi sonuçlar verecektir. Tüm atmosferik kayıplar, DA ve AA kablo kayıpları, transformatör kayıpları, evirici kayıpları gibi pratik uygulamalardaki veriler ile tasarlanan sistem hakkında daha somut fikir sahibi olunabilir.



Şekil 3.31. Sistem kayıp oranları

Şekil 3.32'de görüldüğü üzere, sistemin en büyük kayıplarını gölgeleme efekti oluşturmaktadır. Gebze ilçesinin hava durumları (bulutlu ve nemli koşullar gibi) direk olarak bu kısmı etkilemektedir.

Mismatch kayıpları ise, panel sistemlerinin yerleşimi, sıcaklık farkları, konstrüksiyon yapılarının ve panellerin birbirini gölgelemesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca seçilen panel modellerinin coğrafi koşullara uygunluğu bu değeri etkilemektedir.

Diğer kayıplar ise, AA kablolama olarak belirtilen, bakır kayıpları ve gerilim düşümleri olarak hesaplanmıştır. Ayrıca evirici kapasitesi ve iç kayıplarda yukarı belirtilmiştir.

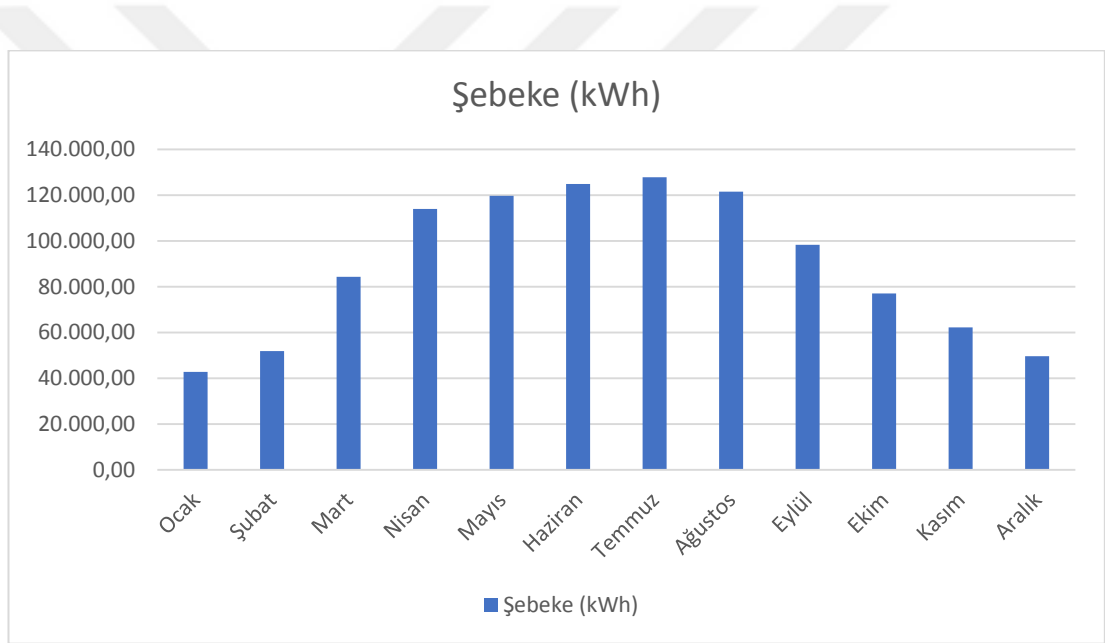
Tablo 3.4. Sistem üretim bilgileri

Yıllık Üretim Değerleri			
	Tanım	Çıkış	Delta%
Işınım (kWh/m ²)	Yıllık Global Dikey Işınım	1.376,90	
	POA Işınım	1.560,40	13,30%
	Gölgelenmiş Işınım	1.439,80	-7,70%
	Yansımaya sonrası ışınım	1.397,40	-2,90%
	Kirlenme sonrası Işınım	1.369,40	-2,00%
	Toplam Elde Edilen Işınım	1.369,40	0,00%
Enerji (kWh)	Etiket	1.241.393,00	
	Işınımına değerlerindeki çıkış	1.231.484,20	-0,80%
	Hücre sıcaklık sonrası çıkış	1.189.112,10	-3,40%
	Uyumsuzluk sonrası çıkış	1.128.769,30	-5,10%
	Optimum DA çıkış	1.115.064,50	-1,20%
	Sınırlanmış DA çıkış	109.718,30	-0,50%
	Evirici Çıkışı	1.085.750,00	-2,20%
	Şebekeye Verilen Enerji	1.074.250,00	-1,10%
Sıcaklık (Metrik)			
	Ortalama Ortam Sıcaklığı		17,9°C
	Ortalama Hücre Sıcaklığı		25,3°C
Simulasyon (Metrik)			
	Çalışma Saati		4633

Işınım verilerinin analizi ile, elektriksel üretim hesapları yukarıda verilmiştir. DA çıkış ve evirici çıkış oranları ve çalışma saatleri verileri yardımıyla sistemin yıllık üretiminin hesaplanması mümkündür. Kayıp oranları verileri kullanılarak şebekeye aktarılan toplam nominal güç değeri tüm yıl boyunca toplam 1,074GWh olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3.5. Aylık bazda sistem üretim verileri

Ay	GHI (kWh/m ²)	POA (kWh/m ²)	Gölgelenme (kWh/m ²)	Etkiket (kWh)	Şebeke (kWh)
Ocak	44,6	70,5	58,3	50.473,00	42.825,70
Şubat	54,4	72,4	66,1	57.092,70	51.830,20
Mart	95,8	114,1	107,5	92.761,10	84.297,80
Nisan	143,9	156,1	147,7	127.326,80	113.916,90
Mayıs	171,7	168,9	159,1	136.724,30	119.707,60
Haziran	191,5	179,6	169,8	146.031,70	124.946,90
Temmuz	194,6	186,7	176,7	151.906,00	127.762,30
Ağustos	168,9	177,1	167,5	144.197,50	121.524,30
Eylül	119,5	139,4	131,7	113.574,50	98.341,60
Ekim	80,2	108,7	101,3	87.625,30	77.123,80
Kasım	61,8	99,8	84,7	73.456,00	62.288,60
Aralık	49,8	87,1	69,5	60.193,10	49.684,90



Şekil 3.33. Yıllık sistem üretim grafiği

Sistemin kurulu maksimum gücü 905,9kWp olarak hesaplanmış olup, aylık bazda üretim tahminleri Tablo 3.5’de verilmiştir.

Sistem genel verimi %76 olarak belirlenmektedir.

4.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Enerji, özellikle de elektrik enerjisi, insan yaşamında tartışmasız bir önceliğe sahiptir. Enerjisiz bir yaşam, günümüz koşullarında neredeyse mümkün değildir. Gelişen teknoloji ve artan enerji açığı bütün ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de yeni enerji kaynakları üzerinde daha fazla düşünülmesini ve hızlı bir şekilde alternatiflerin üretilmesini gerekli hale getirmiştir.

İçerisinde bulunduğumuz Dünya'nın kaynaklarının hızla tükendiği düşünüldüğünde, ülkemizin içinde bulunduğu rekabet ve dışa bağımlılığın en önemli faktörlerinden biri enerji tüketimidir. Özellikle sanayisi gelişmekte olan ve enerji ihtiyacı gün geçtikçe artan ülkelerin acilen önlem alması gerekmektedir. Petrol, doğalgaz, kömür gibi birincil enerji kaynaklarına olan ihtiyacımızı sınırlayarak, gayri safi milli hasılamıza katkı her vatandaşın sorumluluğudur.

Özellikle ülkemizin coğrafi olarak Güneş enerji potansiyelinden yararlanma avantajı ve kurulacak sistemleri maksimum verimle çalıştırabilmek büyük önem arz etmektedir. Bu anlayışın gün geçtikçe artması, çeşitli devlet teşvik ve proje yatırım hibelerine bağlıdır. Böylelikle güneş enerji sistemlerindeki ar-ge çalışmaları giderek artmakta ve sistem yatırım maliyetleri azalmaktadır.

Tek başına ya da şebeke bağlantılı olarak kullanılabilen FV sistemlerin genel çalışma prensibi ve teknik analizleri bu tez çalışmasının konusudur. Tez içeriğinde özellikle gerçek hayatta uygulanabilecek bir FV sistemin modellemesi yapılmıştır. Genel kavramlara değinilerek, elektrik mühendisliği alanında kullanılan teoremler ve kurallar ışığında alt sistemlerin çalışması açıklanmıştır. Özellikle Kocaeli ilinin Gebze ilçesinde bir üretim tesisine kurulabilecek tasarım yapılmış olup, çeşitli bilgisayar yazılımlarıyla modelleme ve hesaplamalar yapılmıştır. Benzetim çalışmaları özellikle bu sistem hakkında fikir sahibi olmak için büyük fayda sağlamıştır.

Bu çalışmada, simulasyon ve gerçek uygulama kısımlarında, verimlilik açısından tek kristal yapılu hücreler kullanılmıştır. Ancak gelecek çalışmalar için, farklı yapıda olan çoklu kristal yapılu panel tipleri ile oluşacak sonuçlar incelenebilir. Ayrıca günümüz teknolojisi ile panel verimliliklerinin artmasından dolayı, sistem verim değişimi de incelenebilecektir.

Üretilen elektrik enerjisinin dağıtım şebekesinde kullanılabilmesi için yüksek gerilim seviyesine çıkarılması gerekmektedir. Dağıtım şirketleri kullanıcıya ihtiyaçları halinde kendi trafo merkezlerine bağlantıları ülkemizde genellikle 34kV-36kV arasında sağlamaktadır. Bu nedenle gelecek çalışmalarda, modelleme üzerinde güç transformatör tasarımları yapılarak, yüksek gerilim seviyesinde sistemin çalışmaları kontrol edilebilecektir. Çift yönlü şebeke sayaçları ile, sistem üretim kazanımları maddi olarak analiz edilebilecektir.

Ek olarak dağıtım şebekesinin davranış ve kurulu gücü hakkında bilgi sahibi olunarak, şebeke üzerindeki değişken yüklerin davranışı incelenebilecektir. Böylelikle üretilen güç daha verimli kullanılabilir. Şebeke karakteristik özellikle organize sanayi gibi bölgelerde sıklıkla değişkenlik göstermekte olup, ilgili veriler dağıtım şirketlerinin analizlerinde mevcuttur.

Farklı MGNT algoritmalarının sisteme verdiği tepki süreleri ölçülerek, modellemeye ve Gebze coğrafi koşullarına en uygun algoritma seçilebilir. Böylelikle, verimlilik analizleri tekrar irdelenmek mümkün olacaktır.

Tasarlanan sistem ürettiği tüm elektrik enerjisini şebeke vermek üzere düşünülmüştür ancak kurulan alan bir üretim tesisi olduğundan kritik yükleri besleme amacıyla bu elektrik enerjisinin depolanması ve ihtiyaç halinde kullanılması seçeneği de mevcuttur. Böylece akü gruplarının hesapları ve sisteminin yeniden tasarlanması gerekmektedir.

Ayrıca, bu çalışmanın konusu olan bir Güneş enerjisi santralının kurulum ve işletme maliyetleri üzerinde çalışma yapılabilir. Çeşitli ekonomik analizler ve maliyet hesap teknikleri kullanılarak, projenin yatırım maliyeti hesaplanabilir. Ayrıca böyle bir tesisi işletmek için, yedek parça, işçilik, bakım ve revizyon maliyet hesapları yapılması

mümkündür. Paranın bugünkü ve gelecek değerleri hesaplanarak, kurulan sistemin geri dönüş süresi ve kendini ödeme planı yapılabilir.

Son olarak, bu çalışmanın ileride fotovoltaik sistemler üzerine çalışmayı düşünen ve pratik sistem tasarımlarını incelemek isteyen lisans öğrencilerine tesis tasarımı, donanım seçimi ve genel kavramlarda, analizleri ve data temininde yardımcı olması dileğiyle.



KAYNAKLAR

- [1] <http://bianet.org/bianet/cevre-ekoloji/54452-kyoto-protokolu-nedirne-degildir> (Ziyaret Tarihi: 13 Mart 2018)
- [2] Oktik Ş., Esnek Enerji Pazarında yeni oyuncu fotovoltaik güç ve gelecek beklentileri, *TMMOB Makine Mühendisleri Odası 7. Güneş Enerjisi Sistemleri ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, S 1-2, Eylül 2017, Mersin.
- [3] Akdeniz E., Yenilenebilir Kaynaklardan Enerji Üretiminin Şebekenin Enerji Kalitesi Ve Kararlılığına Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 221956.
- [4] <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx> (Ziyaret Tarihi: 17 Mart 2018)
- [5] <http://www.gunessistemleri.com/tarihsel.php> (Ziyaret tarihi: 1 Aralık 2015)
- [6] <http://www.enerjibes.com/gunes-panelleri-teknolojisi-ve-tarihcesi/> (Ziyaret Tarihi: 19 Şubat 2018)
- [7] Breza P., Modelling and Simulation of a PV Generator For Applications on Distributed Generation Systems, Yüksek Lisans Tezi, Delft University of Technology, Faculty of Applied Sciences, Delft, 2013.
- [8] <http://www.thesisat.org/gunes-pilleri-calisma-prensibi.html> (Ziyaret tarihi: 29 Ocak 2018)
- [9] Bellia H., Youcef R., Mouley F., A detailed modelling of photovoltaic module using MATLAB, *National Research Institute of Astronomy and Geophysics Journal*, 2014, **3**, 53-61.
- [10] Peren V., Fotovoltaik Su Pompalama Sistemi Tasarımı ve Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2016, 449261.
- [11] <http://www.ders-notlari.com/2015/02/guneslenme-suresi-nedir.html> (Ziyaret tarihi 24 Ocak 2018)
- [12] <http://www.lrc.rpi.edu/programs/NLPIP/lightingAnswers/photovoltaic/14-photovoltaic-tilt-angle.asp> (Ziyaret tarihi 10 Şubat 2018)
- [13] Sumathi S., Kumar L., Surekha P., *Types of PV Systems, Solar PV and Wind Energy Conversion Systems*, 1st edition, Springer International Publishing Group, Switzerland, 2005.

- [14] Patel M.R., *Synchronizing with the Grid, Wind and Solar Power Systems*, 2nd. Ed., Taylor&Francis Group, New York, 261, 2006
- [15] Amir N. A., Dahlan N. Y, Abdullah W., Zain Z., Mohamad H., Energy Saving Analysis of a 16kWp Grid Connected Photovoltaic (PV) System at GreenResearch Centre (GERC), Uitm Shah Alam, *IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference*, Langkawi, Malezya, 24-25 Mart 2014.
- [16] Adam A., Design and Analysis of 500kWp solar photovoltaic system in Gaziantep as a means of carbon emission reduction, Yüksek Lisans Tezi, Zirve Üniversitesi, 2014, 394440.
- [17] Alkan A., Yenilenebilir hibrit enerji kaynakları ile beslenen konutlarda akıllı enerji depolama ve yönetim sistemi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2016, 423764.
- [18] Çapar Ş., Photovoltaic power generation for polycrystalline solar cells and turning sunlight into electricity, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, 2005, 198699.
- [19] Kalirasu A., “Simulation of Closed Loop Control of Boost Converter for Solar Installation”, *Serbian Journal of Electrical Engineers*, Mayıs 2010, **7**, 121-130.
- [20] Ürgün S., Erfidan T., Çoruh N., DA-DA Boost Dönüştürücü Tasarımı ve Gerçeklenmesi, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 26-30 Kasım 2008.
- [21] Ürgün S., Erfidan T., Çoruh N., DA-DA Buck Dönüştürücü Tasarımı ve Gerçeklenmesi, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 26-30 Kasım 2008.
- [22] Goetzberger A., Hoffmann V., Photovoltaic Energy Generation, Springer Science Media, Heidelberg Almanya, 2005.
- [23] Çolak İ., Kabalcı E., Evirici Topolojileri ve Gelişimleri Üzerine Bir İnceleme, *Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyum ELECO 2008*, Bursa, 26-30 Kasım 2008.
- [24] Kabalcı E., Evirici şebeke bağlantıları ve şebeke giriş çıkışları, Güneş Enerjisi ile Elektrik Üretimi Ders Notları
- [25] Sefa İ., Altın N., Güneş Pili ile beslenen şebeke etkileşimli eviriciler – Genel Bakış, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **24**, No. 3, 409-424, Ankara, 2009.
- [26] <http://www.firatdeveci.com/gunes-enerjisi-eviriciler-inverters/> (Ziyaret Tarihi: 12 Ocak 2018)

- [27] Özdemir, E. Özdemir, Ş., “Güneş Pilleri ile Dağıtılmış Elektrik Üretim Sistemlerindeki Gelişmeler”, *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008*, İstanbul, **395-404**, 17-19 Aralık (2008).
- [28] Onat N., Ersöz S., Fotovoltaik sistemlerde maksimum güç noktası izleyici algoritmalarının karşılaştırılması, *5. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Diyarbakır, 2009.
- [29] Trabelsi H., Hafedh A, Elloumi M., Kharrat M., MGNT controllers for PV array panel connected to grid, *18th International conference on Sciences and Techniques of Automatic control & Computer engineering STA 2017*, Monastir, Tunus, 21-23 Aralık, 2017
- [30] <http://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceleristatistik.aspx?m=KOCAELI> (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2015).



KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

Doğan S.,500kWp Şebeke Etkileşimli Fotovoltaik Sistemin Maksimum G Noktası Takibi Tabanlı Simulasyonu ve İncelenmesi, *3e Electrotech*, 2018, **288**, 52-56



ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında İstanbul Beyoğlu'nda doğdu. İlköğretim Karamürsel'de, ortaöğretimini Balıkesir Erdek'te tamamladıktan sonra, Lise eğitimini Yuvacık'ta bitirmiştir. 2012 yılında Doğu Akdeniz Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun olarak profesyonel çalışma hayatına başlamıştır. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'na 2013 yılında başlamıştır. Çalışma alanları elektrik makinaları, yüksek gerilim teknikleri ve yenilenebilir enerji üzerinedir.

