

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI

ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK GÜÇ
SİSTEMLERİNİN ANALİZİ, BENZETİMİ VE
BOYUTLANDIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BERK TUNÇER

DENİZLİ, MAYIS - 2022

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI



ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK GÜÇ
SİSTEMLERİNİN ANALİZİ, BENZETİMİ VE
BOYUTLANDIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BERK TUNÇER

DENİZLİ, MAYIS - 2022

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

BERK TUNÇER

ÖZET

ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİNİN SİMÜLASYONU, ANALİZİ VE BOYUTLANDIRILMASI YÜKSEK LİSANS TEZİ

BERK TUNÇER

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF.DR. BEKİR SAMİ SAZAK)

DENİZLİ, MAYIS - 2022

Güneş enerjisi günümüzde önemli yer tutmakta ve kullanımı yaygınlaşmaktadır. Güneş enerji sistemlerinin önemli bir kısmı da şebeke bağlantılı sistemlerdir. Bu tez çalışmasında, şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlerin örnek bir kurulu sistem üzerinden analiz, boyutlandırma ve simülasyonu konularına değinilmiştir. Denizli ilinde bulunan Sena Kablo fabrikasının çatısında kurulan şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem referans alınmıştır. Bu sistemde kullanılan fotovoltaik modüllerin, güç dönüştürücü devrelerin ve sistem parçalarının MATLAB/Simulink ortamında benzetimi ve analizi yapılmış, ETAP yazılımı ile sistemin kısa devre hesapları yapılarak uygun kesici kontrolü yapılmıştır. Bu sayede, sistemde oluşacak herhangi bir arızanın önüne geçmeyi hedeflenmekte ve tasarıma uygun hale getirilmiştir. Bu çalışmalar ile birlikte PVsyst yazılımı kullanılarak kurulacak olan bölgenin meteorolojik bilgileri alınarak bir yıl boyunca gerçek zamanlı olarak sistemin gölgeleme durumunu ve diğer çevre faktörlerini hesaba katarak benzetim yapılacak ve günlük, aylık veya yıllık üretim miktarları ve bunun gibi birçok çıktı verileri elde edilmiştir. Bu sistemlerin benzetimi, analizi ve boyutlandırılmasının yapılması hali hazırda kurulacak bir sistemin kurulmadan önce karşılaşılabilecek senaryoları görerek uygun bir yol çizilmesi, sistem davranışlarını ve farklı ortam ve sıcaklık koşullarında sistemin nasıl çalışacağını gözlemlemek açısından önem arz etmektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Sistem, Güç Dönüştürücüler, MATLAB, ETAP, Fotovoltaik Sistemler

ABSTRACT

SIMULATION, ANALYSIS AND SIZING OF GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

MSC THESIS

BERK TUNÇER

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

(SUPERVISOR:PROF. DR. BEKİR SAMİ SAZAK)

DENİZLİ, MAY 2022

Solar energy occupies an important place today and its use is becoming widespread. An important part of solar energy systems are grid-connected systems. In this thesis, analysis, dimensioning and simulation of grid-connected photovoltaic systems over a sample installed system are discussed. The grid-connected photovoltaic system installed on the roof of the Sena Kablo factory in Denizli has been taken as reference. Photovoltaic modules, power converter circuits and system parts used in this system were simulated and analyzed in MATLAB/Simulink environment, short circuit calculations of the system were made with ETAP software and appropriate breaker control was made. In this way, it is aimed to prevent any malfunction that may occur in the system and it has been adapted to the design. Along with these studies, meteorological information of the region to be established using PVsyst software will be taken and simulated in real time for a year, taking into account the shading status of the system and other environmental factors, and daily, monthly or annual production amounts and many such output data have been obtained. Simulation, analysis and sizing of these systems are important in terms of seeing the scenarios that a system to be installed will face before it is installed, drawing a suitable path, observing the system behaviors and how the system will work in different ambient and temperature conditions.

KEYWORDS: Grid-Connected Photovoltaic Sytem, Power Converters, MATLAB, ETAP, Photovoltaic Systems

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	viii
KISALTMALAR LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Literatür Özeti	3
2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER	8
2.1 Fotovoltaik Sistemlerin Tarihçesi	8
2.2 Fotovoltaik Hücresinin Yapısı ve Çalışma Prensibi	9
2.3 Fotovoltaik Hücrelerin Elektriksel Karakteristikleri	12
2.4 Fotovoltaik Hücre Tipleri	17
2.4.1 Kristal Silikon Fotovoltaik Teknolojisi	17
2.4.2 İnce Film Fotovoltaik Teknolojisi	18
2.4.3 Gelişmekte Olan Yeni Fotovoltaik Hücre Teknolojileri.....	19
2.5 FV Sistem Tipleri	22
2.5.1 Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Sistemler	23
2.5.2 Hibrit (Karma) Sistemler	24
2.6 Maksimum Güç Noktası.....	25
3. ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK SİSTEMLER	27
3.1 Şebeke Bağlantılı FV Sistemlerde Kullanılan Güç Dönüştürücüler ..	28
3.1.1 DC-DC Dönüştürücüler	29
3.1.2 DC-AC Dönüştürücüler (Eviriciler)	30
3.1.3 FV Evirici Sistemleri	33
3.1.3.1 Merkezi Evirici Sistemler	34
3.1.3.2 Dizi Evirici Sistemler	34
3.1.3.3 Çoklu-dizi Evirici Sistemler.....	35
3.1.3.4 Modül Entegre Evirici Sistemler (AC Modüller).....	35
3.1.4 Üç Fazlı FV Evirici Yapıları.....	36
3.2 Şebeke Bağlantılı Eviriciler İçin Standartlar	40
4. ŞEBEKE BAĞLANTILI ÖRNEK BİR FV SİSTEMİN ANALİZ VE BENZETİMİ	42
4.1 FV Modül ve Eviricinin İncelenmesi	42
4.1.1 FV Modül ve Evirici Uygunluk Kontrolü.....	47
4.2 Şalt Ekipmanlarının İncelenmesi ve Kontrolü	49
4.2.1 DC Kabloların İncelenmesi	49
4.2.2 AC Kabloların İncelenmesi	51
4.2.3 Koruma Cihazlarının İncelenmesi	53
4.3 Sistemin MATLAB/Simulink Benzetimi	56
4.4 Sistemin PVsyst Benzetimi	60

5. ŞEBEKE BAĞLANTILI ÖRNEK BİR SİSTEMİN İNCELENMESİ VE SAHA ÖLÇÜMLERİ	73
5.1 GES Ana Panosunda Yapılan Ölçümler.....	74
5.2 Fusion Solar Uzaktan İzleme Sistemi	76
5.3 Solar Test Cihazı Ölçümleri	79
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	88
7. KAYNAKLAR	89
8. EKLER	97
EK A Eviricilere Ait Dizilerin Kablo ve Gerilim Düşümü Bilgileri.....	97
9. ÖZGEÇMİŞ	104

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Türkiye güneş yoğunluğu	1
Şekil 1.2: Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre gelişimi (2009-2019) (TEİAŞ 2020).....	2
Şekil 2.1: Katkılama işlemi (ABB 2014).....	10
Şekil 2.2: FV hücrelerin çalışma prensibi (ABB 2014).....	11
Şekil 2.3: FV hücre, modül ve dizi yapısı.....	11
Şekil 2.4: FV modül iç yapısı (ABB 2014).....	12
Şekil 2.5: İdeal FV hücre modeli a) Solar hücre b) Akım kaynağı modeli (Rashid 2016).....	12
Şekil 2.6: FV hücrelerin akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristikleri (Rashid 2016).....	14
Şekil 2.7: FV hücrelerin yük doğruları ve çalışma noktaları (Rashid 2016)	14
Şekil 2.8: FV hücrenin pratik modeli (Rashid 2016).....	15
Şekil 2.9: Işınım değerlerinin çalışma noktası üzerindeki etkisi (Rashid 2016).....	16
Şekil 2.10: Sıcaklık değerlerinin çalışma noktası üzerindeki etkisi (Rashid 2016).....	16
Şekil 2.11: Kristal silikon fotovoltaik modüller a) monokristal b) polikristal (ABB 2014).....	18
Şekil 2.12: İnce film yapılı FV modül	19
Şekil 2.13: Organik güneş pili yapısı (webtekno.com).....	20
Şekil 2.14: Boya duyarlı güneş pili yapıları (Wikipedia.com).....	21
Şekil 2.15: Perovskite hücre yapısı	22
Şekil 2.16: Fotovoltaik hücre teknolojileri ve ulaşılan verim değerleri (NREL (National Renewable Energy Labrotary) 2020).....	22
Şekil 2.17: Şebekeden bağımsız FV sistemlerin genel yapısı (ABB 2014).....	23
Şekil 2.18: FV- rüzgar karma sistemi çalışma diyagramı (Sawle ve diğ. 2016).....	24
Şekil 2.19: Maksimum güç noktasının sabit ışınım farklı sıcaklık altında akım-gerilim eğrisindeki değişimi (Bhatnagar ve Nema 2013).....	25
Şekil 2.20: Maksimum güç noktasının sabit sıcaklık farklı ışınım altında akım-gerilim eğrisindeki değişimi (Bhatnagar ve Nema 2013).....	25
Şekil 3.1: Şebeke bağlantılı FV sistemlerin genel yapısı (ABB 2014).....	27
Şekil 3.2: DC-DC dönüştürücü a) Temel yapısı b) Çıkış gerilimi (Boyar 2018).....	30
Şekil 3.3: Bir eviricinin giriş ve çıkış ilişkisi a) Blok diyagramı b) Çıkış gerilimi c) Giriş akımı (Rashid 2016).....	31
Şekil 3.4: Temel evirici devresi	31
Şekil 3.5: Doğal komütasyonlu eviricili şebeke bağlantılı FV yapı (Ünlü ve diğ. 2015)	33
Şekil 3.6: Şebeke etkileşimli evirici yapıları a) Şebeke komütasyonlu akım kaynaklı evirici b) Zorlamalı komütasyonlu gerilim kaynaklı evirici (Jana ve diğ.2017).....	33

Şekil 3.7: Şebeke etkileşimli evirici sistemleri a) Merkezi evirici sistem b) Dizi evirici sistem c) Çoklu-dizi evirici sistem d) Modül entegre evirici sistem (Mahela ve Shaik 2017).....	35
Şekil 3.8: Şebeke etkileşimli eviriciler a) Tek aşamalı güç işleme b) İki aşamalı güç işleme	36
Şekil 3.9: İki aşamalı üç fazlı şebeke bağlantılı FV sistem yapısı (Martins 2013).....	36
Şekil 3.10: Üç fazlı FV sistem yapılarının transformatör içerip içermediğine göre sınıflandırılması a) Transformatör içermeyen b) Transformatör içeren (Özkan ve Hava 2014).....	37
Şekil 3.11: Üç fazlı FV evirici topolojileri klasik tam köprü, T tipi ve NPC yapısının gösterimi (Kerekes ve diğ. 2015)	38
Şekil 3.12: İki seviyeli (tam köprü yapısı) şebeke bağlantılı üç fazlı evirici yapısı	38
Şekil 3.13: Üç seviyeli NPC üç fazlı evirici yapısı	39
Şekil 3.14: Üç seviyeli T tip üç fazlı evirici yapısı	39
Şekil 4.1: Sena Kablo fabrikasının çatısında kurulu şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemin üstten görünümü	42
Şekil 4.2: Phono Solar PS320M-20/U model modül yapısı (Phono Solar 2020).....	43
Şekil 4.3: HUAWEI SUN2000-100KTL-M1 model evirici (Huawei Solar 2020).....	43
Şekil 4.4: Evirici-1 ve FV dizilerin bağlantı şeması	44
Şekil 4.5: Evirici-2 ve FV dizilerin bağlantı şeması	45
Şekil 4.6: Evirici-3 ve FV dizilerin bağlantı şeması	45
Şekil 4.7: Evirici-4 ve FV dizilerin bağlantı şeması	45
Şekil 4.8: Evirici-5 ve FV dizilerin bağlantı şeması	46
Şekil 4.9: Evirici-6 ve FV dizilerin bağlantı şeması	46
Şekil 4.10: Evirici-7 ve FV dizilerin bağlantı şeması	46
Şekil 4.11: AC kablolama ve gerilim düşümü için referans noktaları	51
Şekil 4.12: Sena Kablo NYY kablolar teknik özellikleri (Sena Kablo Katalog).....	53
Şekil 4.13: ETAP yazılımı üç kutuplu kısa devre akım değerleri.....	55
Şekil 4.14: Sistem tek hat şeması	55
Şekil 4.15: Sistemin 1 no.lu eviricisine ait yapının Matlab/Simulink modeli ..	56
Şekil 4.16: Sistemin 1 no.lu eviricisine ait yapının Matlab/Simulink modeli ..	57
Şekil 4.17: MATLAB Simulink FV modül veri giriş ekranı	57
Şekil 4.18: 1 no.lu evirici için kontrol yapısı ve eviriciye bağlanan dizilerin akım, gerilim ve güç değerleri.....	58
Şekil 4.19: 1 no.lu eviriciye ait çıkış akımı (üstte) ve faz-nötr gerilimi (altta) değerlerine ait grafikler	58
Şekil 4.20: Her bir eviriciye bağlı olan FV dizilerin (20 ve 22'lik diziler) 1000 W/m ² ışınım ve 25°C sıcaklık değerlerinde sistemin 100 kW gücünde çalışması esnasındaki akım ve gerilim değerleri	59
Şekil 4.21: Sistem toplam AC çıkış gücü (üstte) ve FV diziler tarafından sağlanan DC güç (aşağıda).....	59
Şekil 4.22: Ges ana panosu bara akımı ve akımdaki toplam harmonik bozunum(% THD).....	60
Şekil 4.23: PVsyst yazılımı üzerinden sena kablo fabrikasının ve çatı üzerindeki FV modüllerin görünümü.....	61

Şekil 4.24: PVsyst yazılımı üzerinden sistemin perspektifi.....	61
Şekil 4.25: PVsyst yazılımı FV modül veri giriş ekranı	62
Şekil 4.26: PVsyst yazılımı evirici veri giriş ekranı	62
Şekil 4.27: Güneş yolu-zaman grafiği.....	63
Şekil 4.28: Sistemdeki FV modüllerin bağlı oldukları eviricilere göre renklendirilerek sınıflandırılması	64
Şekil 4.29: Benzetim için proje ve sistem özeti	65
Şekil 4.30: Benzetim için oluşturulan sistem.....	65
Şekil 4.31: Benzetim için oluşturulan sistem (devam)	66
Şekil 4.32: Benzetim için oluşturulan sistem (devam)	67
Şekil 4.33: Benzetim için oluşturulan sistem (devam)	68
Şekil 4.34: Sistem için ön görülen sonuçlar.....	69
Şekil 4.35: Şebekeye aktarılan enerji-güç dağılımı.....	70
Şekil 4.36: PVsyst tarafından sunulan kayıplar veri giriş ekranı	71
Şekil 4.37: PVsyst tarafından sunulan kayıplar diyagramı	72
Şekil 5.1: Thytronic şebeke koruma rölesi.....	73
Şekil 5.2: Sistem çıkışı için güç kalitesi ölçüm düzeneği a) Fluke 435 ölçüm cihazı bağlantıları b) Ges ana pano akım ve gerilim probu bağlantıları.....	74
Şekil 5.3: FV sistem çıkışı ölçüm değerleri	74
Şekil 5.4: Sistem çıkış akımındaki harmonik değerleri	75
Şekil 5.5: Sistem çıkış gerilimindeki harmonik değerleri.....	76
Şekil 5.6: Fusion Solar uzaktan izleme sistemi ana ekranı	77
Şekil 5.7: 2021 yılı için aylık üretilen enerji raporu	77
Şekil 5.8: 05.06.2021 tarihli günlük enerji üretim raporu.....	78
Şekil 5.9: 5 no.lu eviriciye ait elektriksel veriler	79
Şekil 5.10: Örnek bir FV diziye ait ölçüm için kurulan sistem.....	79

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre değişim değerleri (2009-2019) (TEİAŞ 2020).....	2
Tablo 3.1: Şebekeye bağlı evirici standartları özeti(Wu ve diğ. 2017).....	41
Tablo 4.1: Phono Solar PS320M-20/U model modüle ait teknik veriler (Phono Solar 2020).....	43
Tablo 4.2: HUAWEI SUN2000-100KTL-M1 model eviriciye ait teknik veriler (Huawei Solar 2020).....	44
Tablo 4.3: Multi-Contact FLEX-SOL-XL model kabloya ait teknik veriler	50
Tablo 4.4: Evirici çıkışı kablo kesitleri ve gerilim düşümleri.....	52
Tablo 5.1: 2021 yılı için üretilen enerji raporu	78
Tablo 5.2: 1 no.lu eviriciye ait saha ölçümleri.....	80
Tablo 5.3: 2 no.lu eviriciye ait saha ölçümleri.....	81
Tablo 5.4: 3 no.lu eviriciye ait saha ölçümleri.....	82
Tablo 5.5: 4 no.lu eviriciye ait saha ölçümleri.....	83
Tablo 5.6: 5 no.lu eviriciye ait saha ölçümleri.....	84
Tablo 5.7: 6 no.lu eviriciye ait saha ölçümleri.....	85
Tablo 5.8: 7 no.lu eviriciye ait saha ölçümleri.....	86
Tablo A.1: 1 no.lu eviriciye ait dizilerin kablo ve gerilim düşümü bilgileri	97
Tablo A.2: 2 no.lu eviriciye ait dizilerin kablo ve gerilim düşümü bilgileri	98
Tablo A.3: 3 no.lu eviriciye ait dizilerin kablo ve gerilim düşümü bilgileri	99
Tablo A.4: 4 no.lu eviriciye ait dizilerin kablo ve gerilim düşümü bilgileri ..	100
Tablo A.5: 5 no.lu eviriciye ait dizilerin kablo ve gerilim düşümü bilgileri ..	101
Tablo A.6: 6 no.lu eviriciye ait dizilerin kablo ve gerilim düşümü bilgileri ..	102
Tablo A.7: 7 no.lu eviriciye ait dizilerin kablo ve gerilim düşümü bilgileri ..	103

KISALTMALAR LİSTESİ

AC	:	Alternating Current (Alternatif Akım)
ANSI	:	American National Standards Institute (Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü)
CCM	:	Continuous Conduction Mode (Sürekli İletim Modu)
CPV	:	Concentrator Photovoltaics (Yoğunlaştırılmış Fotovoltaik Hücre)
CSI	:	Current Source Inverter (Akım Kaynaklı Evirici)
DC	:	Direct Current (Doğru Akım)
DCM	:	Discontinuous Conduction Mode (Kesikli İletim Modu)
DSSC	:	Dye-sensitized Solar Cell (Boya Duyarlı Solar Hücre)
EPDK	:	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EVA	:	Ethylene Vinyl Acetate (Etilen Vinil Asetat)
FWD	:	Freewheeling Diode (Serbest Dolaşım Diyodu)
FV	:	Fotovoltaik
IEC	:	International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
IEEE	:	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
IGBT	:	Insulated Gate Bipolar Transistor (İzole Edilmiş Kapılı ve İki Kutuplu Transistör)
KVA	:	Kilo Volt Amper (Görünür Güç)
KWE	:	Evirici Nominal AC Çıkış Gücü
KWP	:	FV Modülün STC'de Üretebileceği Maksimum Güç Değeri
LID	:	Light Induced Degradation
MOSFET	:	Metal Oxide Semi-Conductor Field Effect Transistor (Metal Oksit Yarı-iletkenli Alan Etkili Transistör)
MPP	:	Maximum Power Point (Maksimum Güç Noktası)
MPPT	:	Maximum Power Point Tracking (Maksimum Güç Noktası Takibi)
MGN	:	Maksimum Güç Noktası
NPC	:	Neutral Point Clamped (Nötr Noktası Kenetlemeli)
NREL	:	National Renewable Energy Laboratory (Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı)
PLL	:	Phase Locked Loop (Faz Kitlemeli Döngü)
PWM	:	Pulse-width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
STC	:	Standart Test Conditions (Standart Test Koşulları)
TEİAŞ	:	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
TMŞ	:	Termik Manyetik Şalter
THD	:	Total Harmonic Distortion (Toplam Harmonik Bozunum)
VSI	:	Voltage Source Inverter (Gerilim Kaynaklı Evirici)
QD	:	Quantum Dots (Kuantum parçacık)

SEMBOL LİSTESİ

i_L	:	FV hücre yük(çıkış) akımı [A]
I_C	:	Güneş ışınımı etkisinden oluşan elektrik akımı [A]
i_D	:	Diyot akımı [A]
I_S	:	Diyot sızıntı veya ters doyma akımı [A]
v_D	:	Diyot gerilimi [V]
k	:	Boltzmann sabiti [J/K]
T	:	Hücre çalışma sıcaklığı [K]
q	:	Elektron yükü [C]
V_T	:	Termal gerilim [V]
P_L	:	FV hücre yük(çıkış) gücü [W]
P_{max}	:	FV hücre maksimum yük(çıkış) gücü [W]
R_L	:	Yükü temsil eden rezistif eleman [Ω]
R_S	:	FV hücre pratik modelinde elektriksel kayıpları temsil eden direnç [Ω]
R_P	:	FV hücre pratik modelinde hücre kristal iç direncini temsil eden direnç [Ω]
I_P	:	FV hücre pratik modelinde R_P direnci üzerinden akan akım [A]
v_L	:	FV hücre yük(çıkış) gerilimi [V]
η	:	Diyot ideallik katsayısı veya ampirik sabit
I_{SC}	:	FV hücre kısa devre akımı [A]
V_{OC}	:	FV hücre açık devre gerilimi [V]
V_{mpp}	:	FV hücre maksimum güç noktası gerilimi [V]
I_{mpp}	:	FV hücre maksimum güç noktası akımı [V]
V_o	:	Dönüştürücü çıkış gerilimi [V]
t_{on}	:	Anahtarlama elemanının iletimde kalma süresi [s]
t_{off}	:	Anahtarlama elemanının kesimde kalma süresi [s]
T	:	Anahtarlama periyodu [s]
D	:	Duty cycle (çevrim oranı)
Hz	:	Hertz
N	:	Nötr iletkeni
PE	:	Koruma iletkeni
$V_{OC,dizi}$:	Dizinin açık devre gerilimi [V]
n	:	Adet (modül, dizi)
$V_{OC,modül}$:	Modül açık devre gerilimi [V]
$V_{modül-max}$:	Maksimum modül gerilimi [V]
$V_{dizi-max}$:	Maksimum dizi gerilimi [V]
k_{max}	:	Gerilimin maksimum değeri için katsayı
$V_{mpp,dizi}$:	Dizinin maksimum güç noktası gerilimi [V]
$V_{modül-min}$:	Minimum modül gerilimi [V]
k_{min}	:	Gerilimin minimum değeri için katsayı
$V_{dizi-min}$:	Minimum dizi gerilimi [V]
$\%e_{DC}$:	DC gerilim düşümü [%]
l	:	Uzunluk [m]
s	:	Kesit alanı [mm ²]
t	:	Sıcaklık katsayısı

K	:	Öz iletkenlik katsayısı [$m/\Omega.mm^2$]
%e_{AC}	:	AC gerilim düşümü [%]
P	:	Eviricinin nominal çıkış gücü [W]
V_h	:	Hat gerilimi [V]
%e_T	:	Toplam AC gerilim düşümü [%]
I_h	:	Hat akımı [A]
cosφ	:	Güç faktörü (PF)
I_B	:	İşletme akımı [A]
I_n	:	Koruma cihazının nominal akımı [A]
I_Z	:	İletken veya kablunun akım taşıma kapasitesi [A]
PR	:	Performans oranı
E_{grid}	:	Şebekeye aktarılan enerji [kWh]
GlobInc	:	Modüller üzerine düşen güneş ışıyım değeri [kWh/m ²]
R_{iso}	:	İzolasyon direnci [Ω]

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca kendime örnek edindiğim ve yanında çalışmaktan onur duyduğum değerli hocam, Prof. Dr. Bekir Sami SAZAK 'a en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Ayrıca tezin saha ölçüm ve inceleme kısmında teknik bilgilerini benden esirgemeyen Fenom Enerji Ltd. Şti. kurucusu Hüseyin Aktaş'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan ve benden maddi-manevi desteğini esirgemeyen aileme ithaf ederim.

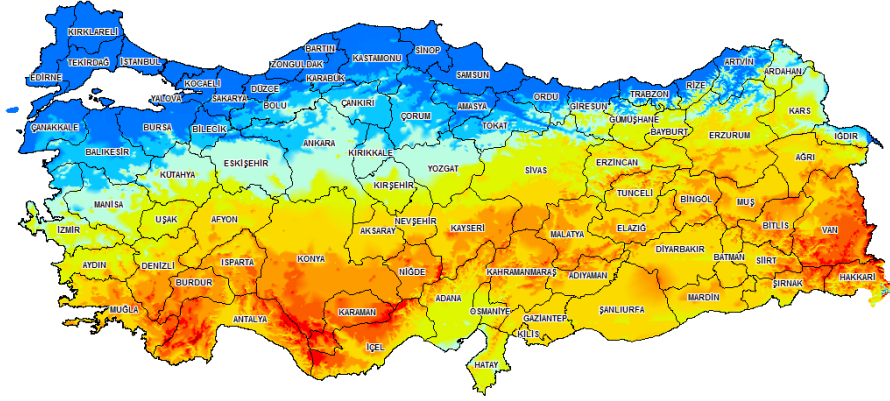
BERK TUNÇER

Denizli, Mayıs-2022

1. GİRİŞ

Dünyanın artan enerji ihtiyacında önemli bir yere sahip olan yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi, hem herhangi bir zararlı gaz salınımı olmadığı için çevre dostu, hem de potansiyel olarak bu enerji ihtiyacına karşılık verebilecek seviyededir. Diğer enerji kaynaklarına göre birçok avantaja sahiptir. Örneğin sıcak su ihtiyacını karşılamadan, elektrik üretimine kadar farklı kullanım alanları vardır. Ayrıca küresel ısınma ile edilen mücadelede önemli bir yere sahiptir. Son yıllardaki ar-ge çalışmaları ve devlet teşvikleri ile birlikte birçok ülkede yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır.

Türkiye konumu itibariyle güneş enerjisi yoğunluğu ve güneşlenme süresi bakımından yüksek olan ülkeler arasında yer almaktadır. Şekil 1.1’de Türkiye’nin güneş enerji potansiyeli renklerle gösterilmektedir. Maviden turuncuya gidildikçe güneş enerjisi potansiyeli artmaktadır. Güneydoğu Anadolu, İç Anadolu, Ege ve Akdeniz bölgeleri yüksek potansiyele sahip bölgelerdir.

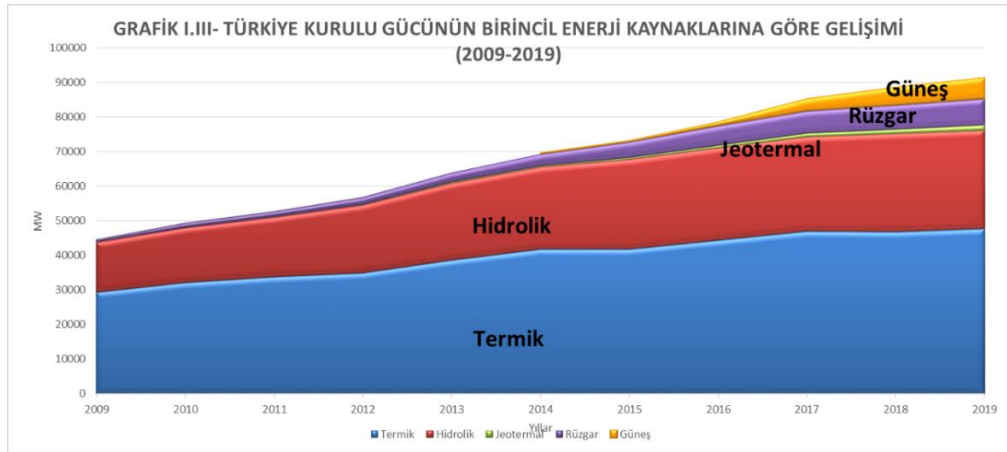


Şekil 1.1: Türkiye güneş yoğunluğu

Türkiye’de son yıllardaki nüfus artışı ve yaşam standardının yükselmesi, enerji talebini de arttırmıştır. Enerji ihtiyacını büyük oranda fosil yakıtlardan karşılayan ülkemiz bu yakıtlarda yüksek oranda dışa bağımlı ve yüksek ithalat giderleri ödemektedir. Yenilenebilir kaynaklar içerisinde yüksek bir potansiyel sunan güneş enerjisinin ise, Türkiye’nin artan elektrik ihtiyacını karşılamada yeni bir kaynak olarak değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Şekil 1.2’de sunulan TEİAŞ verilerine göre Türkiye’nin kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre 2009-2019 yılları arasındaki gelişiminde özellikle rüzgar ve güneş enerjisinde bir artış görülmektedir. Bu artışın sebebi olarak devlet teşvikleri ve enerjinin fazlasının satarak gelir elde etme gibi olanaklar gösterilebilir.

Tablo 1.1’de de yine TEİAŞ’tan alınan veriler sunulmuştur. Burada 2009 ve 2019 yıllarının birincil enerji kaynaklarına göre karşılaştırılması yapılmış, kurulu güç değerleri sayısal ve yüzdeler olarak verilmiştir.



Şekil 1.2: Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre gelişimi (2009-2019) (TEİAŞ 2020).

Tablo 1.1: Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre değişim değerleri (2009-2019) (TEİAŞ 2020)

	Birim : MW					
	Termik	Hidrolik	Jeotermal	Rüzgar	Güneş	Toplam
2009	29.339,1	14.553,3	77,2	791,6	-	44.761,2
%	65,55	32,51	0,17	1,77	-	100,00
2019	47.663,0	28.503,0	1.514,7	7.591,2	5.995,2	91.267,0
%	52,22	31,23	1,66	8,32	6,57	100,00

Bu veriler ışığında güneş enerjisine yönelmenin ve talebin arttığı görülmektedir. Bu tez çalışması bu yönelme ve talebe esasen geliştirilmiştir. Bu çalışmada, güneş enerji sistemlerinin çoğunluklu kolu olan şebekeye bağlı sistemlerin analiz, simülasyon ve boyutlandırma konuları üzerinde durulmuş ve bu konular MATLAB/Simulink, ETAP ve PVSYST yazılımları ile desteklenmiştir. Bu sistemlerin benzetimi, analizi ve boyutlandırılmasının yapılması hali hazırda kurulacak bir sistemin kurulmadan önce karşılaşılabilecek senaryoları görerek uygun bir yol çizilmesi, sistem davranışlarını ve farklı ortam ve sıcaklık koşullarında sistemin

nasıl çalışacağını gözlemlemek açısından önem arz etmektedir. Bunlarla birlikte, literatürde kullanılan şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem topolojileri açıklanmıştır.

Sistem örneği olarak Denizli ilinde bulunan Sena Kablo fabrikasının çatısına kurulan şebekeye bağlı bir fotovoltaik sistem örnek alınmış, bu sistemdeki ekipmanların ve güç devrelerinin simülasyon ortamında benzetimi ve analizi gerçekleştirilmiştir.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında; temelde şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlerin yapılarına değinilmiş, örnek bir sistem üzerinden tasarım ve boyutlandırma yapılmıştır. Tasarım ve boyutlandırmanın dışında, örnek sistemde kullanılan fotovoltaik modüllerin, güç dönüştürücü devrelerin ve sistem parçalarının MATLAB/Simulink ortamında benzetimi ve analizi yapılmış, ETAP yazılımı ile kısa devre hesapları ve uygun ekipman seçiminin yapılması ile birlikte halı hazırda yeni sistem kuracaklara rehberlik etmesi, PVsyst yazılımı ile de şebeke bağlantılı sistemin gerçek zamanlı olarak simülasyonu yapıp sistemin çalışmasını, bunlarla birlikte tahmini üretim değerlerini gözlemlemek ve gerçek üretim değerleriyle karşılaştırmak amaçlanmıştır.

1.2 Literatür Özeti

Literatürde şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerin analizi, benzetimi, incelenmesi, gözlemlenmesi ve bu sistemlerin tasarlanması ile ilgili birçok örnek bulunmaktadır. Bazı örnek literatür çalışmaları aşağıda özetlenmiştir.

Kosova'nın iklim koşullarında fotovoltaik sistemleri incelemek için Prishtine Üniversitesi'nde 3,9 kWp şebeke bağlantılı bir FV sistem kurulmuştur ve analiz edilmiştir. Sistem Nisan 2013- Mart 2014 tarihleri arasında izlenerek performans parametreleri aylık ve yıllık olarak değerlendirilmiştir. Bu sistem, monokristal ve polikristal olmak üzere iki tür fotovoltaik modül, inverter, ölçüm ve izleme cihazlarından oluşmaktadır. Bu süre boyunca, enerji üretimi, günlük güneş

radasyonu, hava sıcaklığı, FV modül sıcaklığı ve rüzgar hızı gibi günlük ve aylık sistem parametreleri ölçülmüş ve analiz edilmiştir (Komoni ve diğ. 2014).

Fotovoltaik sistemlerin dünya üzerinde kullanımının yaygınlaşması ile birlikte ülkemizde de bu sektöre ilginin arttığı gözlemlenmiştir. Bu tez çalışmasında bu konu üzerinde durulmuş ve özellikle bu sektöre yatırım yapmayı düşünenler için projelendirme sürecinin önemine vurgu yapılmıştır. Bu sektöre ilginin artması ile işsizlik sorununa çözüm bulunabileceğine ve istihdam sağlamak için önemli bir alan olabileceği vurgulanmıştır. Ayrıca Kocaeli Üniversitesinde bulunan 360 Wp gücündeki şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemin benzetim, analiz ve projelendirme çalışması yapılmıştır (Çalikoğlu 2010).

Abdelaziz ve arkadaşlarının yaptığı çalışma, şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerin bir parçası olan üç fazlı bir eviricinin MATLAB/SIMULINK ortamında tasarımı ve simülasyonu ile ilgilidir. Bu makalede ilk olarak, şebekeye bağlı fotovoltaik diziler için tasarlanmış bir eviricinin çıkışını şebeke gerilimi ile senkronize edebildiği üç fazlı şebeke bağlantılı bir fotovoltaik sistem için bir kontrol algoritması sunulmuştur. Bu çalışmadaki başlıca konular, MPP(Maksimum Güç Noktası) izleme algoritması, eviricinin senkronizasyonu ve şebekeye bağlantısıdır. Sistem için MATLAB / SIMULINK tabanlı bir simülasyon modeli geliştirilmiştir (Abdelaziz ve diğ. 2013).

Güç elektroniği teknolojisinin ilerlemesi ve fotovoltaik (FV) modüllerin fiyatındaki düşüş ile FV sistemlerin kullanımı artmaktadır. FV sisteminin şebeke bağlantısı sırasında, voltaj güvenilirliği ve kalitesinin sağlanması için voltaj büyüklüğü ve frekansı gibi parametreler tolere edilebilir sınırlar içinde tutulmalıdır. FV kaynağından elde edilen bu parametreler, senkronizasyondan önce şebeke parametreleriyle eşleştirilmeli ve işlem sırasında değiştirilmemelidir. Bununla birlikte, bu parametreleri etkileyen birkaç koşul vardır, bunlardan biri adalanma(islanding) durumudur. Bu durumda, voltaj ve frekans sağlıklı bir davranış gösterir ve bu nedenle FV sisteminin bu senaryo altında adalanma koşulunda çalışması istenmez. Bu çalışmada, önce şebekeye bağlı FV sisteminin genel modellenmesi yapılmış ve eviriciden gelen voltaj ve frekans dalga formlarının çıkış yapısı incelenmiştir. Daha sonra, genel sistemin adalanma senaryosu modellenmiş ve bu durumdaki voltaj ve

frekans dalga formları farklı yük koşullarında simüle edilmiş ve incelenmiştir (Chapai ve diğ. 2020).

Bir diğ er yapılan çalışmada, Muğ la Üniversitesi Türk Evi'nde bulunan ve kurulu gücü 25,6 kWp olan sistemin yıllık performansı ve karakteristiği incelenmiştir. Bu değ erlendirmelerde NEG ve LOG ölçüm sistemleri kullanılmış tır. Elde edilen veriler kullanılarak günlük FV modüllerin çıkış güçleri ile modül üzerine düş en ışınım miktarları karşılaştırılmış tır. Simülasyon sonucu aylık şebekeye aktarılan enerji ile analiz sonucundaki veriler karşılaştırılmış tır. Yapılan çalışmada, sistemin yıllık performansı diğ er ÷lkelerdeki uygulamalarla karşılaştırılmış ve diğ er ÷lkelerdeki uygulama sonuçlarına göre daha yüksek olduğu gör÷lmüştür (Tozlu 2004).

Joshi ve arkadaşları 1,8 kW şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin tasarımı ve simülasyonunu yapmıştır. Bu sistemde, güç devreleri olarak yükseltici DC-DC dönüştürücü ve tam köprü evirici kullanılmış tır. Bunun yanında alçak geçiren bir filtre kullanılmış, bu da eviricinin neden olduğu Toplam Harmonik Bozulmayı (THD) en aza indirerek sistemin kabul edilebilir sınırlar içinde olmasını sağlamışlardır. DC-DC dönüştürücüde, dönüştürücü çıkış voltajını düzenlemek için bir geri besleme kontrol devresi kullanılmış tır. FV sistemlerinin çıkış voltajı, yapısından dolayı sürekli değişt iğ inden, yük tarafında sabit çıkış gerilimi elde etmek için kontrol devresi kullanılmış tır. Bu özelliklerde devre oluşturularak simülasyonu gerçekleştirilmiştir (Joshi ve diğ. 2014).

Malezya Kebangsaan Üniversitesi kampüsüne kurulan 3 kWp şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemin karakteristik özellikleri ve performans analizi ile ilgili sonuçlar sunulmuştur. 25 x 120 W polikristal silikon FV modüllerinden ve 3.000 W eviriciden oluşan sistem, güneş ışınımı, ortam sıcaklığı, FV paneller dâhil olmak üzere gerekli veriler ve evirici çıkış güçleri, Ekim 2013- Mart 2014 arasında her dakikada bir kaydedilmiştir. Deneysel sonuçlar, FV modülün ortalama verimliliğ inin %10,11, eviricinin ise ortalama %95,15 verimliliğ e sahip olduğ unu göstermektedir (Farhoodnea ve diğ. 2015).

Anzalchi ve Sarwat tarafından yapılan çalışmada, şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerdeki yaşanan zorluklar ve gelişmeler hakkında kapsamlı bir inceleme sunulmuştur. Fotovoltaik evirici üreticiler ve diğ er ilgili alan uzmanları, FV eviriciler

için gelişmiş akıllı kontrol stratejileri tasarlamaya odaklanmıştır. Yapılan çalışmada, elektrik şebekesinde yenilenebilir enerjilerin uygulanması için çeşitli teknik zorluklar ve gerekli temel şartlar açıklanmıştır. Farklı ülkeler için voltaj ve frekans bozulmalarında güç şebekesinin güvenli ve uygun çalışması için şebeke kodlarıyla, yani şebekeye bağlanırken uyulması gereken standartlarla belirtilmiştir. Bunlar IEEE, ANSI vb. gibi standartlardır. Ayrıca araştırmacılar tarafından akım, voltaj, aktif ve reaktif gücü kontrol etmek için birçok kontrol yöntemi önerilmiştir. Bu yazıda, bu sistemlerle ilgili genel bir bakış getirilmiştir (Anzalchi ve Sarwat 2017).

FV sistemlerin benzetim, analiz ve optimizasyon çalışmaları matematiksel modeller yardımıyla da yapılabilir. Bu çalışmada, şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerin benzetimi, analizi ve optimizasyonu matematiksel modellemeler ile gerçekleştirilmiştir. Şebekeden bağımsız sistemler için bir aydınlatma sisteminin optimizasyonu yapılmıştır. Şebekeye bağlı sistemler için ise 4 farklı bağlantı topolojisinin benzetimi ve karşılaştırılması yapılmıştır. Bu 4 farklı topoloji gölgelenme, evirici verimleri ve kablolama kayıpları göz önüne alınarak karşılaştırılmıştır (Çekinir 2012).

Başka bir modelleme ve benzetim çalışması, Hindistan G. Narayanamma Teknoloji ve Bilim Enstitüsünde şebekeye bağlı 100 kWp gücünde bir fotovoltaik sistem kurulmuştur. Enstitüdeki iki binanın çatısına yerleştirilen sistem, beş adet 20 kW gücünde eviriciler kullanılarak binaların alçak gerilim dağıtım panosuna bağlanmıştır. Yapılan simülasyon çalışmaları farklı güneş ışınımı koşullarında gerçekleştirilmiş olup, sistemdeki maksimum güç noktasının takibi için Perturb and Observe (Hata ve Gözlem Metodu) ve Incremental Conductance (Artan İletkenlik Metodu) uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları gerçek değerler ile karşılaştırılmıştır (Rawoof ve diğ. 2015).

Dünyada, fotovoltaik sistemlerden üretilen elektrik enerjisi, elektrik güç sisteminde önemli bir üretim alternatifi olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada, fotovoltaik sistemin performans ölçütleri, farklı referans dönemleri için değerlendirilen enerji üretiminin yanı sıra sistem verimlilikleriyle birlikte ele alınmıştır. Romanya Iasi Uygulamalı Araştırma Laboratuvarında kurulan fotovoltaik sisteme ait performans endeksleri değerlendirilmiştir. Şebekeye bağlı fotovoltaik

sistemin performansı yıllık, aylık ve günlük referans sürelerinde analiz edilmiştir (Nemes ve Costinas 2015).

Gölgeleme, fotovoltaik sistemlerde önemli kayıplara yol açar. FV sisteminin tasarımını yaparken, gölge konusu öncelikli dikkate alınmalıdır. Fotovoltaik diziler arasındaki mesafeler, gölgelemeye göre ayarlanmalıdır. Ayrıca, sistemin dışında ortaya çıkan her türlü gölge etkisinden de uzak durulmalıdır. Bu çalışmaya göre; FV dizinin gücü, FV dizinin bağlantısı ve FV modüllerin konumu uygun şekilde tasarlanıp ve uygulanırsa, gölgeleme nedeni ile ortaya çıkan kayıplar en aza indirilmektedir (Malathy ve Ramaprapha 2015).

Literatürde şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlerde kullanılan birçok evirici modellenmesi ve benzetimi mevcuttur. Bunlarda bir tanesi, Sezen ve Özdemir tarafından yapılan üç fazlı, üç seviyeli nötr kenetleyici evirici modellemesidir. Sistemde, fotovoltaik modüllerden maksimum gücü çekebilmek için Perturb and Observe (Hata ve Gözlem) maksimum güç noktası takip metodu kullanılmıştır. Şebekeye bağlanırken senkron referans çerçeve(dq) kontrol yöntemi uygulanmıştır. Sistem MATLAB/Simulink ortamında simule edilmiştir (Sezen ve Özdemir 2013).

Diğer bir tasarım çalışmasında, Irak iklim koşullarında Karbala şehrinin 1 MW şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemin tasarımı ve MATLAB yardımı ile benzetim çalışması yapılmıştır. Çalışma, bu sistem için güneş ışınım tahminleri, sistem teknik tasarımı, sistem kayıpları, çevresel etki, performans ve ekonomik değerlendirmeler içermektedir (Abbood ve diğ. 2018).

İtalya'da Trieste Üniversitesi'nde yapılan çalışmada, şebekeye bağlı aynı güce sahip, ama farklı FV teknolojilerinden oluşan iki ayrı FV sistemin 15 Ekim 2011 – 14 Ekim 2012 tarihleri aralığında izlenmesi yapılmıştır. Bu araştırmada, ışınım ve sıcaklık etkisi incelenmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak, bir model oluşturulmuştur. Bu model, FV sistemin performansını tahmin edebilmektedir (Micheli ve diğ. 2014).

2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

2.1 Fotovoltaik Sistemlerin Tarihçesi

Fotovoltaik terimi, Yunanca' da ışık anlamına gelen "foto" ve gerilim anlamına gelen "voltaic" kelimelerinin birleşmesiyle meydana gelen ve ışığa enerjisinin, elektrik enerjisine dönüşümünde kullanılan terimleri ifade etmek için literatürde yerini almıştır.

Fotovoltaik malzemeler ve araçların ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştürdüğünü Fransız fizikçi Edmond Becquerel 1839'larda keşfetmiştir. Becquerel, gün ışığını kullanarak katı bir malzemede elektrik akımı üretme işlemini keşfetmiştir. Ardından 1905 yılında, Albert Einstein ışığın doğasını ve fotoelektrik etki ile olan ilişkisini tanımlayan çalışmalarda bulunmuştur.

1883'te Charles Fritts, selenyum kullanarak ilk fonksiyonel %1 verimli fotovoltaik (FV) hücreyi geliştirdi. Verimin %6 ya ulaşması ise 1954 yılında silikon kristali üzerinde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise ilk FV modül 1954 yılında Bell Laboratuvarları'nda üretilmiştir. Fakat yüksek maliyetler sebebiyle o zamanlar beklenen ilgiyi görememiştir (Çalikoğlu 2010).

1954 yılını takip eden yıllarda FV sektörü için çok önemli yollar kat edilmiştir. Bu yıllarda araştırmalar ve tasarımlar uzay araçlarında kullanılmak üzere yapılmıştır. Fotovoltaik güç sistemleri 1960 yılından itibaren uzay çalışmalarında rol almaktadır. 1958'de %9 verimli silisyum FV hücreler geliştirdi. Aynı yılda bir uzay aracında ilk defa FV hücreler kullanıldı. Bu hücreler 100 cm² ye 0.1 W güç üretiyorlardı. O zamanlar bu sistemler uzay araçlarına güç vermek amacıyla kullanılmaktaydı. Bu çalışmalar ışığında fotovoltaik sistemlere güven artmış ve maliyetler düşmeye başlamıştı (Karamanav 2007).

1973 yılındaki Petrol Krizi ile birlikte alternatif enerji kaynakları arayışı başlamış, FV hücrelere ilgi git gide artmıştır. Fotovoltaik sistemlerle ilgili araştırma ve geliştirme projeleri üretilmeye başlanmıştır (Karamanav 2007).

1980'li yıllarda fotovoltaik sistemler, saatler, radyolar ve fenerler gibi küçük uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu yıllardaki enerji krizleri ve dünya genelinde çevre konusunda duyarlılığın artması ile birlikte fotovoltaik sistemlerin enerji ihtiyacı karşılamada önemli bir yere sahip olduğu düşünülerek bu sistemlerin şebekeden bağımsız ve şebekeye bağımlı uygulamalarda kullanılması için çabalar sarf edilmiştir (Doğan 2018).

Günümüzde fotovoltaik sistemlerde kullanılan fotovoltaik modüller, azalan maliyet ve verimliliklerindeki istikrarlı artış sebebiyle popüler bir konu haline gelmiştir (Başak ve Sazak 2013).

Günümüzde FV sistemler pek çok alanda kullanılmaktadır. Basit sistemler, kol saati ve hesap makineleri gibi tüketici ürünlerine güç sağlarlar. Daha karmaşık sistemler ise, haberleşme, aydınlatma, su pompalama sistemlerinde, telekomünikasyon sistemlerinde ve konut ve fabrika gibi yerlerde de kullanılmaktadır.

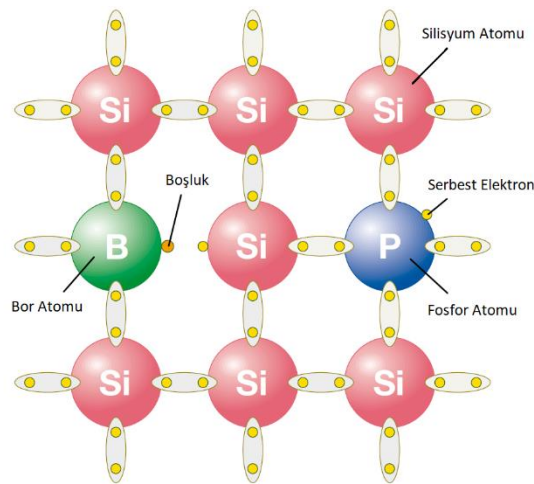
2.2 Fotovoltaik Hücrenin Yapısı ve Çalışma Prensibi

Fotovoltaik hücreler yarı iletken maddeler kullanılarak yapılan ve üzerine gelen foton enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren elemanlardır. Fotovoltaik hücre üzerine gelen fotonların bir kısmı hücre tarafından soğurulur, kalanlar ise yansıtılır veya hücre içerisinden geçerler. Elektrik enerjisi soğurulan fotonlardan üretilmektedir. Fotovoltaik hücrelerin alanları 60-160 cm² arasında değişmektedir. Kalınlıkları ortalama 0,1-0, mm arasındadır.

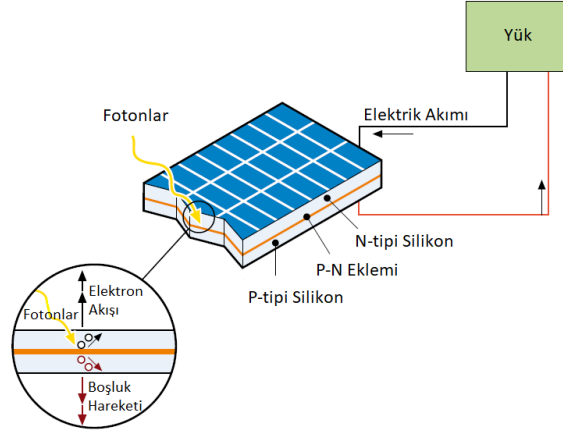
Fotovoltaik hücrelerin çalışma prensibi, diyotlara benzer. Bir diyottan akım geçmesi harici gerilim uygulanarak gerçekleştirilir. Fakat, bir fotovoltaik hücreden akım geçmesine sebep olan ise uygulanan ışık kaynağı (foton)dır. FV hücrelerin yapısı basit olarak p ve n tipi eklemlerden oluşur. Işık kaynağının eklem üzerine gelmesi ile elektronlar fotonlar tarafından harekete geçirilir ve eklemler arası elektron akışı meydana gelir. Bu akış sayesinde elektrik akımı oluşur.

Birçok elektronik üründe olduğu gibi fotovoltaik hücrelerde yarı iletken maddeler kullanılarak imal edilir. Yarı-iletken malzemelerden silisyum, galyum

arsenit, kadmiyum tellür gibi maddeler fotovoltaik hücre imalatında kullanmak için en uygun maddelerdir. Fotovoltaik hücrelerde en yaygın olarak kullanılan madde silisyumdur. Fakat saf silisyum, iletkenliği zayıf olduğu için “katkılanma” işleminden geçer. Katkılama işlemi Şekil 2.1’de yapısal olarak gösterilmiştir. Katkılanmış silisyum iki farklı tipte olabilir, bunlar n-tipli ve p-tipli silisyumdur. N-tipli silisyum elde etmek için silisyum eriğine periyodik cetvelin 5. grubundan (örneğin, fosfor) bir element eklenir. Beşinci grup elementlerinin son yörüngesinde beş adet elektron bulunur. Bu tip katkılama işlemi sırasında silisyum elementinin son yörüngesindeki 4 elektron 5. grup elementlerinin son yörüngesindeki bu beş elektronun dördü ile bağlantı sağlar. Kalan bir elektron ise boşta kalır ve gereken uyarım enerji verilirse, yörüngeden ayrılabilir. P-tipli silisyum elde etmek için ise, silisyum eriğine periyodik cetvelin 3. grubundan (örneğin, bor) bir element eklenir. Üçüncü grup elementlerinin son yörüngesinde ise üç adet elektron bulunur. Bu tip katkılama işlemi sırasında silisyum elementinin son yörüngesindeki 4 elektron 5. grup elementlerinin son yörüngesindeki bu üç elektron ile bağlantı sağlar ve bir elektron ise eksik kalır. Bu elektron yokluğuna “boşluk” ismi verilir ve pozitif yüklü olduğu varsayılır. Bu olaylar sonucunda, ışık ile uyarılan bu yapıda elektronlar hareket eder ve potansiyel fark oluşur. Fotovoltaik hücrelerin çalışma prensibi Şekil 2.2’de sunulmuştur. Bu fark sonucu da akım akışı meydana gelir. Sonuç olarak, fotovoltaik hücreler DC bir akım kaynağı gibi çalışır.

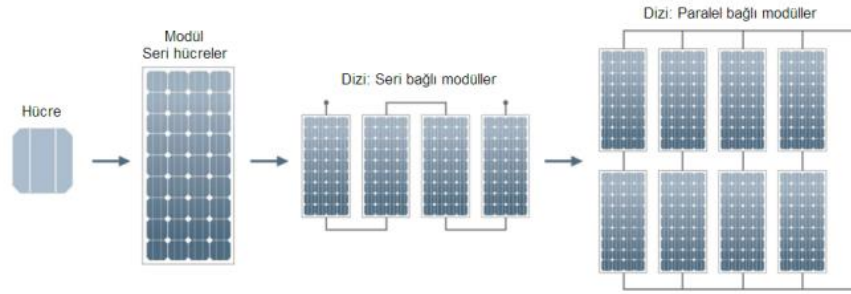


Şekil 2.1: Katkılama işlemi (ABB 2014).



Şekil 2.2: FV hücrelerin çalışma prensibi (ABB 2014).

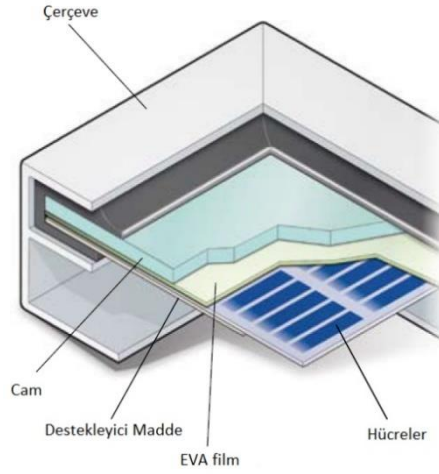
Tipik bir fotovoltajik hücrenin gerilimi 0,5 V gücü ise 5 W ve altında olarak kabul edilebilir. Fotovoltajik hücreler, yüksek gerilim ve akım elde etmek için seri ve paralel bağlanarak fotovoltajik modülleri oluştururlar. Modüller de yine ihtiyaca göre seri veya paralel bağlanarak dizi yapılarını oluşturur. Hücre, modül ve dizi yapıları Şekil 2.3'te gösterilmiştir. FV hücreler seri bağlanarak gerilim, paralel bağlanarak akım yükseltilebilir.



Şekil 2.3: FV hücre, modül ve dizi yapısı

Temel bir FV modül (kristal silikon yapılı) iç yapısında çerçeve, solar cam, destekleyici madde, EVA film ve hücrelerden oluşur. Bu yapılar Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Çerçeve yapısı, modül bileşenlerini bir arada tutan mekanik yapıdır ve çoğunlukla alüminyum malzemeden üretilir. Solar cam, modülü koruyan en dış kısımdır ve güneş ışınlarının modül içine nüfuz etmesini sağlamaktadır. Çoğunlukla tamperli cam kullanılır. EVA filmler, etilen vinil asetat olarak bilinir ve cam ve hücre arasında doğrudan teması önlemek, hücrelerin yüzey hatalarından kaynaklanan boşlukları ortadan kaldırmak ve hücreyi modülün diğer ekipmanlarından yalıtım için

kullanılan malzemedir. Destekleyici madde, modül yapısını fiziksel olarak desteklemek için kullanılan malzemedir. Cam, metal veya plastik olabilir (ABB 2014).

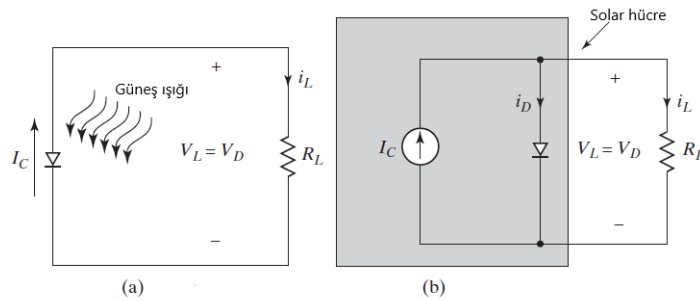


Şekil 2.4: FV modül iç yapısı (ABB 2014).

2.3 Fotovoltaik Hücrelerin Elektriksel Karakteristikleri

FV hücre basit olarak sadece bir diyotla veya akım kaynağı modeli ile ifade edilebilir, bu yapılar Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Fakat bu modeller analiz ve tasarımda kayıplar ilave edilmediği için yetersiz kalabilir.

Literatürde FV sisteminin çıktı karakteristiğini doğru bir şekilde analiz etmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler genellikle bir güneş pilinin eşdeğer devresini oluşturmak için kullanılan analitik denklemler olarak ortaya çıkar. FV sisteminin performansını analiz etmek için eşdeğer bir devre kullanılması tercih edilir. Güneş pili modellemesi için en çok tercih edilen eşdeğer devre modeli, doğruluk ve basitlik arasındaki denge nedeniyle tek-diyot modelidir (Bhatnagar ve Nema 2013).



Şekil 2.5: İdeal FV hücre modeli a) Solar hücre b) Akım kaynağı modeli (Rashid 2016).

Fotovoltaik hücreye ait çıkış akımı Shockley diyot denkleminin yardımı ile aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$i_L = I_C - i_D = I_C - I_s \left(e^{\frac{v_D}{n \cdot V_T}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

Burada bilinmeyenler şu şekilde ifade edilir;

I_s : Diyot sızıntı veya ters doyma akımı (A)

η : Diyot ideallik katsayısı veya ampirik sabit

k : Boltzmann sabiti ($1,380622 \times 10^{-23}$ J/°K)

T : Hücre çalışma sıcaklığı (Kelvin)

q : Elektron yükü ($1,6021917 \times 10^{-19}$ C)

v_D : Diyot gerilimi (V)

V_T : Terminal gerilimi (V)

Fotovoltaik hücrelerin akım-gerilim karakteristiği eşitlik (2.1) yardımı ile elde edilebilir;

$v_D \geq 0$ ve $i_L \geq 0$ şartlarında v_D 'ye bağlı olarak elde edilen i_L eğrisi Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Yük tarafı kısa devre olduğunda, $I_C = I_{SC}$ olur. Yüksüz çalışma durumunda ise, yük akımı $i_L = 0$ ve $i_D = I_C$ olmaktadır. Bu durumda $v_L = v_D = V_{OC}$ olur. Kısa devre akımı ve açık devre gerilimi arasında bulunan çalışma noktalarının birleştirilmesiyle fotovoltaik hücrenin akım-gerilim karakteristiği oluşturulur.

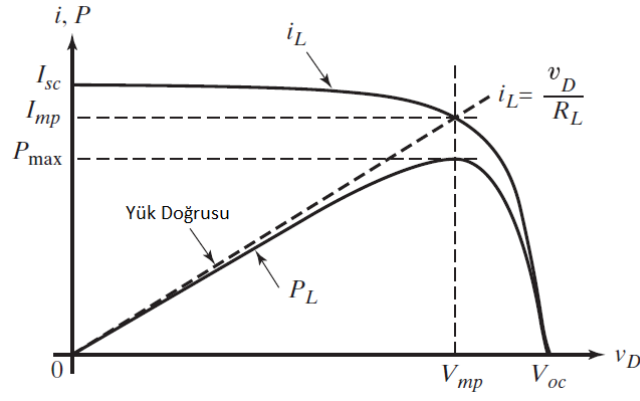
Fotovoltaik hücrelerin önemli karakteristik özelliklerinden bir tanesi de güç-gerilim karakteristiğidir. FV hücrelerin çıkış gücü aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$P_L = v_L \cdot i_L = v_L \cdot \left[I_C - I_s \left(e^{\frac{v_D}{n \cdot V_T}} - 1 \right) \right] \quad (2.2)$$

Yük gücünün yük gerilimine göre değişim eğrisi Şekil 2.6’da gösterilmiştir.

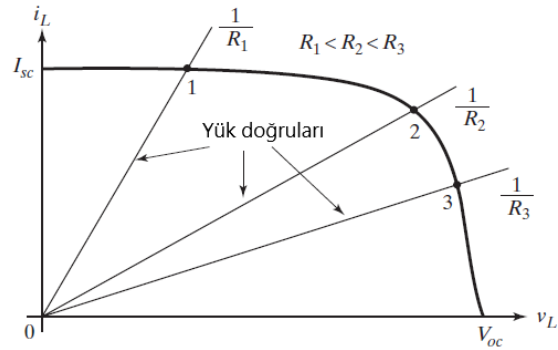
Maksimum güç noktası, fotovoltaik hücre veya modülden elde edilebilecek maksimum güç miktarıdır. Bu konuya ilerleyen kısımlarda daha detaylı olarak değinilecektir. Maksimum güç, (2.2) eşitliği kullanılarak aşağıdaki eşitlikteki (2.3) gibi elde edilebilir. Maksimum güç noktasındaki gerilim değeri V_{mpp} , akım değeri ise I_{mpp} olarak gösterilir.

$$P_{max} = V_{mpp} \cdot \left[I_C - V_{mpp} \cdot I_s \left(e^{\frac{V_{mpp}}{\eta V_T}} - 1 \right) \right] \quad (2.3)$$



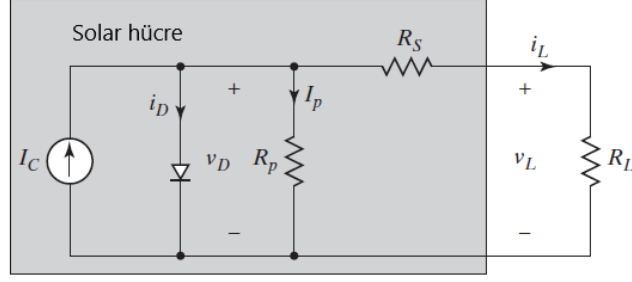
Şekil 2.6: FV hücrelerin akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristikleri (Rashid 2016)

FV hücrelerin çalışma noktası, yük direnci R_L ‘nin değerine bağlı olarak değişmektedir. Yük doğrusu ile FV hücrenin karakteristik kesişimi o hücrenin çalışma noktasını verir. Yük direncinin değeri büyüdükçe, hücrenin çıkış gerilimi de yükselecektir. Şekil 2.7’de yük direncinin değerine göre, yük doğrularının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.7: FV hücrelerin yük doğruları ve çalışma noktaları (Rashid 2016)

Literatürde yaygın olarak kullanılan diğer bir fotovoltaik hücre modeli de Şekil 2.8’de sunulan tek diyotlu pratik elektriksel eşdeğer devre modelidir. Bu model, modelleme, tasarım gibi uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu modelin tercih edilmesinin sebebi daha gerçekçi sonuçlar ortaya çıkarmasıdır. Çünkü bu modelde kayıplar da gösterilmiştir, bunlar R_s ve R_p dirençleridir. R_s , elektriksel kayıpları R_p ise hücrenin kristal iç direncini temsil eder (Rashid 2016).



Şekil 2.8: FV hücrenin pratik modeli (Rashid 2016).

(2.1) ifadesini bu devreye göre tekrardan şu şekilde düzenleyebiliriz:

$$i_L = I_C - i_D - i_P = I_C - I_s \left(e^{\frac{v_D}{nV_T}} - 1 \right) - \frac{v_D}{R_p} \quad (2.4)$$

Çıkış gerilimini de şu şekilde yazabiliriz:

$$v_L = v_D - R_s \cdot i_L = v_D - R_s \left[I_C - I_s \left(e^{\frac{v_D}{nV_T}} - 1 \right) - \frac{v_D}{R_p} \right] \quad (2.5)$$

Fotovoltaik hücrelerin çıkış karakteristikleri (akım ve gerilim); ışınım, sıcaklık, rüzgar hızı, nem ve basınç vb. gibi olaylardan etkilenebilir. Bunlardan en önemli etkenler, ışınım ve sıcaklık etkisidir. Işınım değeri, kısaca güneş ışınlarının güç yoğunluğu olarak tanımlanabilir ve W/m^2 ile ifade edilir. Bu karakteristikler genelde standart test koşullarında (STC) yani $25^\circ C$ sıcaklıkta ve $1000 W/m^2$ ışınım değerinde oluşturulur.

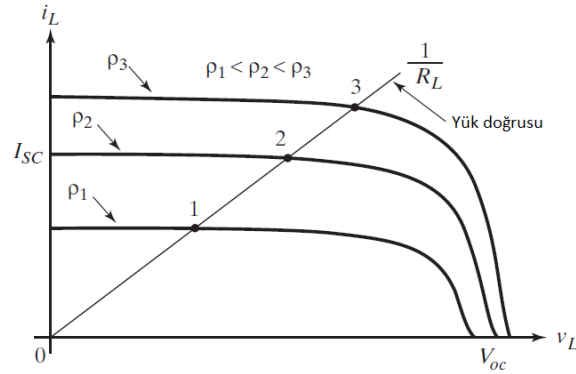
Fotovoltaik hücrelerin, farklı sıcaklık ve ışınım koşullarındaki I_{SC} ve V_{OC} değerleri aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$V_{OC} = V'_{OC} + a_2 \cdot (T - T') - (I_{SC} - I'_{SC}) \cdot R_s \quad (2.6)$$

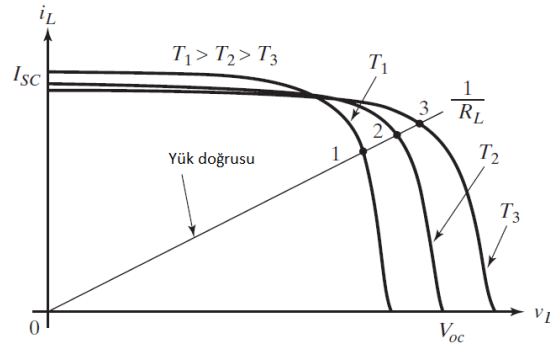
$$I_{SC} = I'_{SC} \cdot \left(\frac{G}{G'} \right) + a_1 \cdot (T - T') \quad (2.7)$$

Bu eşitliklerde V'_{oc} ve I'_{sc} değerleri, referans ışınım G' ve sıcaklık T' değerlerinde bulunan değerler, a_1 ve a_2 değerleri ise sırasıyla fotovoltaik hücrenin akım ve gerilim için sıcaklık katsayılarıdır. Bu değerler modül üreticileri tarafından ürün kataloglarında belirtilir (Bhatnagar ve Nema 2013).

Şekil 2.9'da ışınımın çalışma noktasına etkisi, Şekil 2.10'da ise sıcaklığın çalışma noktasına etkisi eğri üzerinde gösterilmiştir. Şekil 2.9'a bakıldığında, ışınım değeri arttıkça yük akımı ve geriliminin yükseldiği görülmektedir. Şekil 2.10'da ise, sıcaklık değeri arttıkça yük akımının arttığı fakat yük geriliminin azaldığı görülmektedir. Dolayısıyla, sıcaklık ve ışınım değerleri FV hücrenin çalışma noktasını farklı şekillerde etkilemektedir.



Şekil 2.9: Işınım değerlerinin çalışma noktası üzerindeki etkisi (Rashid 2016).



Şekil 2.10: Sıcaklık değerlerinin çalışma noktası üzerindeki etkisi (Rashid 2016).

Fotovoltaik hücrelerin karakteristiklerinde bir diğer önemli parametre, hücrenin doluluk faktörüdür. Doluluk faktörü aşağıdaki ifade yardımıyla hesaplanabilir. Doluluk faktörü ideal bir hücre için 0,7-0,9 aralığındadır. Bu ifade FV hücrenin, elektrik üretim kalitesinin ifade etmek için kullanılır.

Doluluk faktörü aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.8)$$

2.4 Fotovoltaik Hücre Tipleri

Fotovoltaik hücreler farklı malzemeler kullanılarak yapılabilir. Bu malzeme seçimi hücrenin verimini ve maliyetini değiştirir. Kullanılan yarıiletken çeşidine bağlı olarak FV sistem teknolojileri Cebeci (2017) çalışmasında gösterildiği gibi kristal silikon, ince film ve gelişmekte olan yeni FV teknolojileri olmak üzere üç şekilde incelenebilir.

Rathore ve diğ. (2019) çalışmasında literatürdeki fotovoltaik hücrelerin sınıflandırılması şu şekilde de görülmektedir; Birinci nesil (dilim (wafer) tabanlı silikon hücreler), ikinci nesil (ince film hücreler) ve üçüncü nesil (yeni ortaya çıkan teknolojiler).

2.4.1 Kristal Silikon Fotovoltaik Teknolojisi

FV hücrelerde yarı-iletken malzeme olarak kristal silikonun kullanıldığı sistemlerdir. Silisyumun hücre yapımında kullanılmaya başlanması 1960'lı yıllara dayanmaktadır (Cebeci 2017).

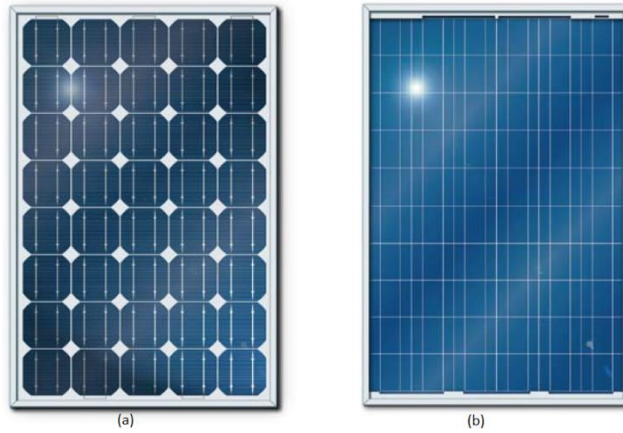
Fotovoltaik hücrelerin %90'ı kristal silikon fotovoltaik teknolojisi ile üretilmektedir. Bu hücrelerin kalınlıkları yaklaşık olarak 180–200 µm dir (Rathore ve diğ. 2019). Üretim sürecindeki farklılıklardan dolayı kristal silikon FV hücrelerin; monokristal silikon, polikristal (ya da multikristal) silikon hücre olmak üzere iki çeşit olarak incelenebilir.

Monokristal silikon hücrelerinin tamamı tek kristal silikon yapıdan oluşmaktadır. Hücrelerin yapısı homojendir. Monokristal hücrelerin hücre verimlilikleri %14-%18 arasında değişmektedir (Cebeci 2017). Günümüzde, NREL

(National Renewable Energy Labrotary) (2020) raporuna göre ticari monokristal silikon hücrelerin verimlilikleri laboratuvar ortamında %26 seviyelerine ulaşmıştır.

Polikristal silikon hücrelerde, silikon hücreyi oluşturmak için bir dizi farklı kristal ile karıştırılır. Bu tip hücreler diğerlerine kıyasla daha çok kullanılmaktadır. Bu hücrelerin üretimi ucuz olmakla birlikte, verimlilikleri %12-%14 arasındadır (Rathore ve diğ. 2019).

Monokristal ve polikristal yapılarıdaki modüller Şekil 2.11’de sunulmuştur.



Şekil 2.11: Kristal silikon fotovoltaik modüller a) monokristal b) polikristal (ABB 2014).

2.4.2 İnce Film Fotovoltaik Teknolojisi

İnce film fotovoltaik teknolojisi sahip FV hücreler yapımında kullanılan yarı iletken tipine göre üç şekilde incelenebilir. Bunlar, amorf silisyum (a-si), kadmiyum tellürid (CdTe) ve bakır-indiyumgalyum-selenyum CI (G)S yapılarıdır. Bu yapının en büyük avantajlarından biri, kullanılan malzemenin güneş emici özelliğinden dolayı ince olmasıdır. Kalınlıkları yaklaşık olarak 1–4 μm dir (Rathore ve diğ. 2019). Şekil 2.12’de ince film yapılı FV modül gösterilmiştir. İnce film hücrede kristal silikon hücreye göre daha az miktarda yarı-iletken malzeme kullanılmaktadır Böylece, ince film FV teknolojisinin üretim maliyetini kristal silikon yapılarıya kıyasla düşürmektedir (Cebeci 2017).



Şekil 2.12: İnce film yapılı FV modül

2.4.3 Gelişmekte Olan Yeni Fotovoltaik Hücre Teknolojileri

Fotovoltaik sektöründe verimlilik artırma ve maliyeti düşürme çalışmaları, yeni hücre teknolojilerine kapı açmıştır. Yeni hücre teknolojileri ve hala geliştirilmekte olan hücre teknolojileri üçüncü nesil teknolojiler olarak nitelendirilmektedir. Bu yapılar temelde dört başlık altında toplanmıştır (Rathore ve diğ. 2019).

Bunlar:

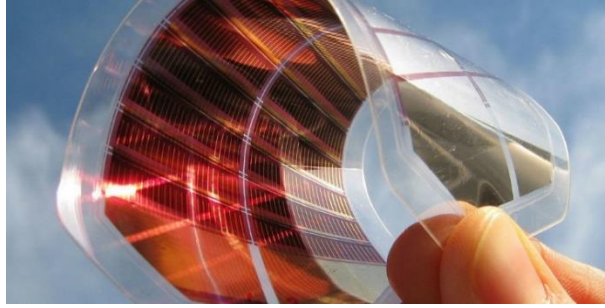
- 1-Nanokristal tabanlı hücre yapıları
- 2- Polimer tabanlı hücre yapıları
- 3-Boya duyarlı hücre yapıları (DSSC)
- 4- Yoğunlaştırılmış hücre yapıları (CPV)

Nanokristal tabanlı hücre yapıları, literatürde quantum dots(kuantum parçacık)(QD) hücreler olarak da ifade edilebilir. Bu yapılar periyodik cetvelin 2-6, 3-5, 4-6 gruplarındaki elementlerden oluşan (PbS, GaAs, CdTe gibi) özel nanokristal yapılı yarı iletkenlerdir. Bu yapılar teorik olarak verimlilikleri %20- %60 aralığında olabilir (Jasim 2015).

Polimer yapılar, birçok tekrar eden alt birimden oluşmuş çok büyük moleküllerden veya makro moleküllerden oluşan bir madde veya malzemedir. Polimerler, P tip veya N tip yarı iletken özelliği gösterirler. Bu yapılar ilk

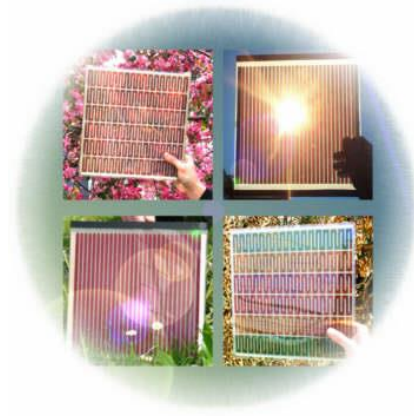
keşfedildiğinde yalıtkan özellik gösteren maddeler idi. Fakat 1970’lerde yapılan çalışmalar sonucu iletken özellik gösteren polimer yapılar keşfedilmiştir. İletkenliği bilinen toz, film, polianilin gibi çok sayıda polimer bulunmaktadır (Akman ve diğ. 2013).

Organik güneş pilleri karbon bazlı polimerlerden ve küçük moleküllerden oluşurlar. İki metal elektrot arasına organik tabanlı malzemelerin yerleştirilmesiyle oluşturulur. Şekil 2.13’te gösterilen organik güneş pili yapısında organik temelli malzemeler olarak, polimer yapıların kullanılması organik güneş pillerinin geliştirilmesine önemli yere sahiptir (Winder ve Sarıçiftçi 2004). Hücre üzerine gelen güneş enerjisini organik tabaka tarafından emerek, elektrik enerjisine dönüştürürler.



Şekil 2.13: Organik güneş pili yapısı (webtekno.com).

Boya duyarlı hücre yapısı ilk kez İsviçre federal teknoloji enstitüsünde Michel Gratzel tarafından 1991 yılında tanıtıldı. Bu tip güneş pillerinin yapısında ışığa duyarlı organik yapıya sahip boya ve yarıiletken tabaka bulunmaktadır (Akman ve diğ. 2013). Boya duyarlı hücrelerde genellikle farklı elektrotlar arasında boya molekülleri kullanır. Şekil 2.14’te gösterilen bu yapılar dört bileşenden oluşur: yarı iletken elektrot, bir boya duyarlılaştırıcı, elektrolit ve bir karşıt elektrot (karbon veya platin). Boya duyarlı hücre yapıları esnek olmakla birlikte aynı zamanda düşük maliyetlidir. Bu yapılardaki en önemli özellik, TiO_2 (titanyum dioksit) kaplamaların ışığa duyarlı hale getirilmesi nedeniyle ortaya çıkmaktadır, bu da verimi %10 ve üzeri oranlarda arttırmaktadır (Sharma ve diğ. 2015).



Şekil 2.14: Boya duyarlı güneş pili yapıları (Wikipedia.com).

Yoğunlaştırılmış güneş hücreleri ise, temel prensibi güneş ışınımının büyük bir kısmını FV hücrenin yerleştirildiği küçük bir alan üzerinde yoğunlaştırmaktır. Böylece kullanılan yarı iletken malzeme sayısı azalır, dolayısıyla maliyet de düşer. Bu sistemlerde iyi çalışan bir optik sistem uygulanması gereklidir. Bu yapıların verimleri yapılan çalışmalar sonucunda laboratuvar koşullarında %40 ve üzeri seviyeleri görmektedir. Hareketli parçasının olmaması ve hızlı tepki süresi gibi avantajlara sahiptir (Sharma ve diğ. 2015).

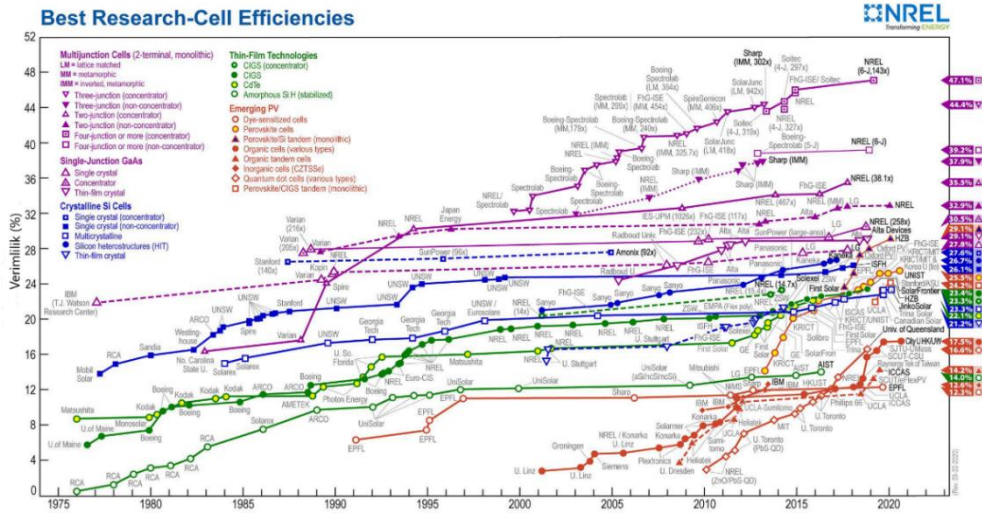
Bu yapıların dışında, yeni fotovoltaik hücre yapılarından verimi en yüksek seviyeleri görmüş olan ve son yıllarda popüler olmuş olan Perovskite tabanlı FV hücre yapıları üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Bu yapılar ismini, Rus mineralojist L.A. Perovskit'den almıştır. Perovskite yapıları ilk kez 2012 yılında FV hücrelerde kullanılmaya başlanmıştır (Yılmaz ve Özkök 2018). Perovskite yapıları, ABX₃ şeklindeki bileşikler sınıfına verilen isimdir. Burada X yapısı, halojen (İyot, Klor vb.) sınıfındaki bir elementi temsil eder (Rathore ve diğ. 2019). Park (2015) yapmış olduğu çalışmada literatürde ilk kez uzun süreli kararlı perovskite tabanlı FV hücrelerin verimliliklerinin %9,7 seviyesine ulaştıklarını bildirmiştir. Şekil 2.15'te Perovskite tabanlı FV hücrenin yapısı gösterilmiştir.

Bu FV hücreler teoride %31 'e kadar verime sahip olabilirler. Geleneksel silisyum hücreler ile kıyaslandığında daha az maliyetli ve daha verimli bir alternatif haline gelmiştir. Bu hücreler ile ilgili mevcut problemler kararlılık ve dayanıklılık problemleridir (Sharma ve diğ. 2015). Günümüzde bildirilen en yüksek verim değeri %25 'dir (NREL (National Renewable Energy Laboratory) 2020).



Şekil 2.15: Perovskite hücre yapısı

Şekil 2.16'da üzerinde çalışmalar yapılan ve kullanılan fotovoltaik hücre teknolojileri ve laboratuvar koşullarında ulaşıldıkları maksimum verim değerleri görülmektedir.



Şekil 2.16: Fotovoltaik hücre teknolojileri ve ulaşılan verim değerleri (NREL (National Renewable Energy Labortary) 2020).

2.5 FV Sistem Tipleri

FV sistemler şebeke bağlantılı, şebekeden bağımsız ve hibrit(karma) sistemler olmak üzere üç şekilde incelenebilir. Bu bölümde şebekeden bağımsız ve hibrit sistemler ele alınmıştır. Şebeke bağlantılı sistemler ve yapıları üçüncü bölümde detaylıca incelenecektir.

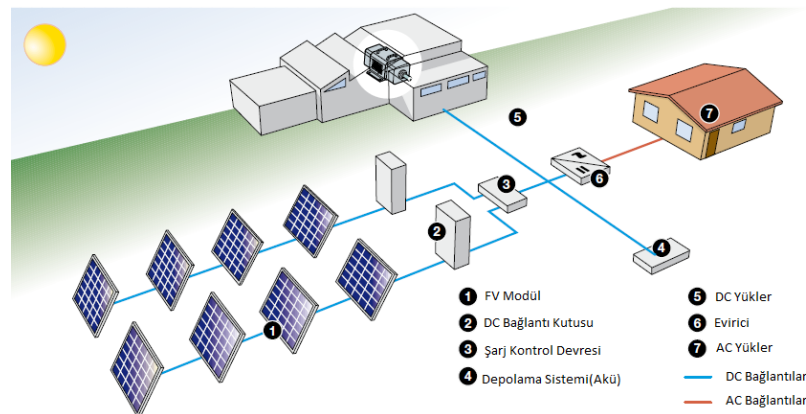
2.5.1 Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Sistemler

Şebekeden bağımsız fotovoltaik güç sistemleri, genelde düşük güçlü uygulamalarda kullanılan ve şebeke enerjisine bağlı olmayan sistemlerdir. Şekil 2.17’de şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemlerin genel yapısı gösterilmiştir. Temel olarak şekilde (2.17) gösterildiği gibi FV modül, evirici, şarj kontrol devresi ve akü gibi ekipmanlardan oluşmaktadır.

Bu sistemlerde çoğunlukla güneş ışınımının az veya yetersiz olduğu durumlarda enerjiyi depo etmek için akü sistemleri kullanılır. Fotovoltaik modüller yeterli ışınım aldığı anda aküleri şarj eder ve modüllerin yetersiz olduğu durumlarda sistem akü grubu tarafından beslenir. Şebekeden bağımsız sistemler akü grubu kullanılarak tasarlanabildiği gibi akü grubu olmadan da kullanılabilir.

Bu sistemler en basitinden hesap makineleri, dijital saatler, bazı trafik lambalarında veya şebekenin olmadığı yerlerde enerji ihtiyacını sağlamak için kullanılabilir. Bu tür sistemlerde şarj kontrol devreleri(kontrolör) kullanılır. Bu yapılar FV modüller ile akü grubu arasında bir köprü görevi görmektedir. Akünün şarj olması için uygun akımı ve gerilimi ayarlarken aynı zamanda modüllerden de maksimum gücün alınmasını sağlar. Aynı zamanda akü gruplarını koruma görevini de üstlenir.

Bu tip sistemler tasarlanırken, beslenecek mevcut yüklerle ve bu yüklerin çalışma süresine göre işlem yapılır ve o yükleri istenilen sürede besleyebilecek akü grubu seçilir. Hesaplamalarda güneş ışınımının en düşük olduğu senaryolarda göz önünde bulundurulup ona göre seçim yapılmalıdır (Doğan 2018).



Şekil 2.17: Şebekeden bağımsız FV sistemlerin genel yapısı (ABB 2014).

2.5.2 Hibrit (Karma) Sistemler

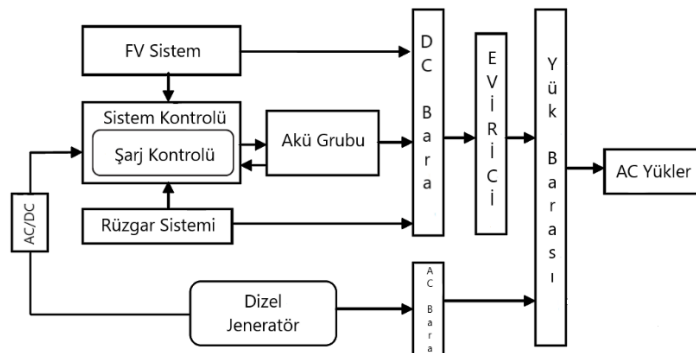
Hibrit sistemler, temelde birden fazla güç kaynağının birleştirilmesi ile çalışır. Güneşten, rüzgardan veya dizel jeneratörden enerji alınabilir ve akü ile yedeklenebilir. Birden fazla üretim kaynağı, birbirini tamamlayan kaynaklara ve yedeklemeye izin verir. Örneğin, hava güneşliken FV diziler aküyü şarj eder; hava rüzgarlı ise rüzgar türbini aküleri şarj edebilir. Bu şekilde kaynaklar birbirini tamamlamış olur.

Hibrit sistemler sayesinde FV dizi boyutları ve akü bankası kapasitesi azaltılabilir ve güneşin olmadığı dönemler için daha küçük boyutlarda seçmeye imkan tanır (enerzytech.com).

Uygulamalarda en sık rastlanan örnekler, fotovoltaik sisteme ek olarak dizel jeneratör, gaz türbinleri veya rüzgar enerjisinin yardımıyla elektrik enerji üretim sistemlerinin birlikte çalıştığı sistemlerdir. Şekil 2.18’de FV – rüzgar karma sisteminin çalışma blok diyagramı gösterilmiştir.

Shaahid ve Elhadidy (2003) hibrit sistemlerin potansiyeline dikkat çekmek için yapmış olduğu çalışmada yerleşim yerlerinde (ev, işyeri gibi) kullanılacak FV sistem, dizel jeneratör ve akü sistemi yapısını incelemiş ve farklı FV dizi kombinasyonlarında analizler gerçekleştirilmiştir, aynı zamanda akü sisteminin önemine vurgu yapmıştır.

Hibrit sistemler tasarlanırken kontrol ve takip mekanizmalarına dikkat etmek gerekmektedir. Jeneratörlerin devreye girme ve çıkma zamanları akülerle koordineli bir şekilde uygulanmalıdır (Sawle ve diğ. 2016).

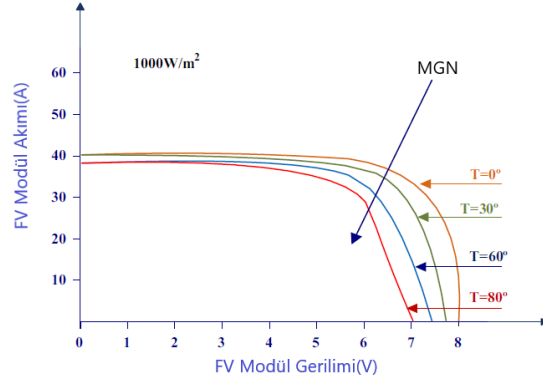


Şekil 2.18: FV- rüzgar karma sistemi çalışma diyagramı (Sawle ve diğ. 2016).

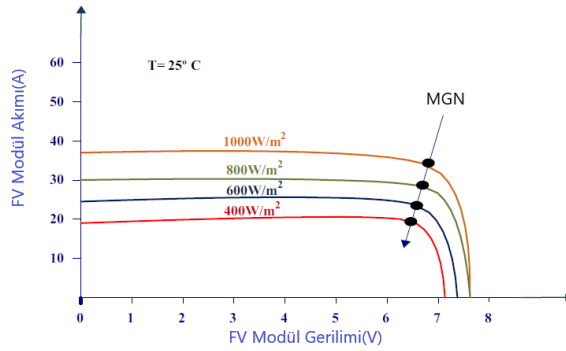
2.6 Maksimum Güç Noktası

Maksimum güç noktası (MGN), bir fotovoltaik hücrenin veya modülün üretebileceği en yüksek güçte çalıştığı noktadır. Bu noktadaki akım ve gerilim değerleri fotovoltaik hücrelerin karakteristiklerinde büyük önem taşır. Maksimum güç noktası takibi ise, farklı ortam koşullarında fotovoltaik modüllerin üretebileceği en yüksek çıkış veriminde sistemi çalıştırmak ve denetlemek için kullanılan algoritmalara verilen isimdir. Bu algoritmaların temelinde sinyal kontrolü bulunmaktadır.

Fotovoltaik sistemlerin sıcaklık ve ışınım gibi ortam şartlarına olan bağlılığından dolayı doğrusal olmayan yapısı, sistemlerin maksimum güç noktasında çalışmasını zorlaştırmaktadır (Kordestani ve diğ. 2018). Bu yüzden maksimum güç noktası takip algoritmaları büyük önem arz etmektedir. Şekil 2.19’da sabit ışınım, farklı sıcaklık değerleri için maksimum güç noktasının değişimi Şekil 2.20’de ise sabit sıcaklık, farklı ışınım değerleri için maksimum güç noktasının değişimi görülmektedir.



Şekil 2.19: Maksimum güç noktasının farklı sıcaklık altında akım-gerilim eğrisindeki değişimi (Bhatnagar ve Nema 2013).



Şekil 2.20: Maksimum güç noktasının farklı ışınım altında akım-gerilim eğrisindeki değişimi (Bhatnagar ve Nema 2013).

Maksimum güç noktası takip yöntemlerini sınıflandırmada farklı yollar vardır. Bazı yöntemler, maksimum güç noktasını izlemek için kullanılan değişken sayısına bazıları da maksimum güç noktasını izlemek için kullanılan tekniklerin türüne dayanır (Bhatnagar ve Nema 2013).

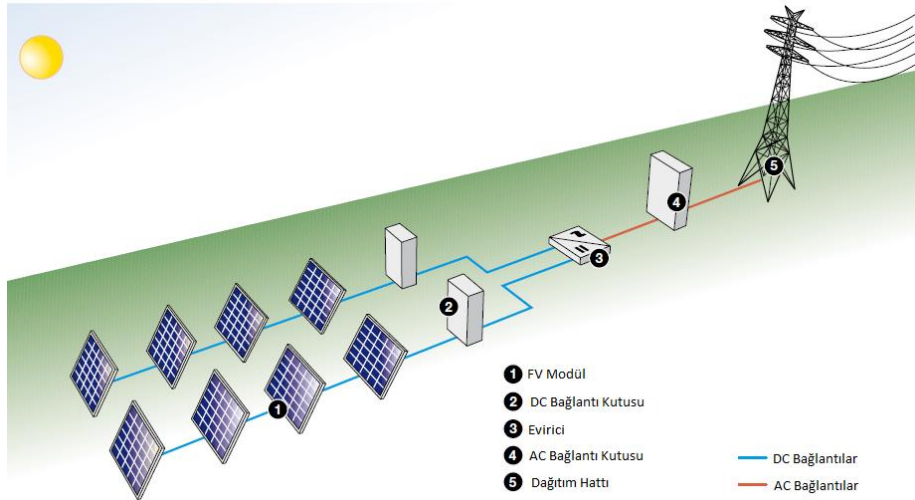
Genel olarak literatürde maksimum güç noktası takip yöntemleri iki ayrı kategoriye ayrılabilir, bunlar doğrudan(direct) ve dolaylı(indirect) yaklaşımlardır (Kordestani ve diğ. 2018). Doğrudan yöntemler maksimum güç noktasını izlemek için gerçek zamanlı, FV gerilim ve / veya akım ölçümleri kullanır. En yaygın doğrudan yaklaşım metotlarına örnek olarak, “Hata ve Gözlem Metodu” verilebilir. Dolaylı kontrol yaklaşımları ise maksimum güç noktasını tahmin etmek için genellikle FV modüllerin teknik verilerini kullanır. Bu veriler, farklı iklim koşulları için panellerin I – V ve P – V eğrileri, FV panellerin farklı matematiksel modelleri vb. gibi panel bilgilerinin öncelikli olarak bilinmesi gerekir (Bhatnagar ve Nema 2013).

3. ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

Fotovoltaik sistemlerin en önemli kollarından biri olan şebeke bağlantılı sistemler, en basit mantıkla fotovoltaik sistemlerin şebeke ile irtibatlanmasıdır. Bu bağlantı sayesinde kullanılmayan enerjinin şebekeye verilmesine olanak sağlar. Bu sistemlerin temel bileşenleri, fotovoltaik modüller, eviriciler ve çift yönlü sayaçtır. Çift yönlü sayaçlar, aynı anda hem tüketim hem üretim miktarlarını kayıt altına alarak sistemin performansını çıkarır.

Şebeke bağlantılı sistemler kullanım amacına göre iki farklı kategoriye ayrılabilir. Birincisi, fotovoltaik modüllerden üretilen enerji doğrudan şebekeye verilerek şebekeye destek sağlama ve enerji satma amacı ile kurulur. Bu sistemlerde herhangi bir tüketim yapılmaz. İkinci sistemler ise tüketicinin ihtiyacı olan enerjiyi sağlama ve kullanılmayan veya fazla enerjiyi şebekeye satarak gelir elde etmesine imkân sağlar (Doğan 2018).

Şebeke bağlantılı FV sistemlerin genel yapısı Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Temel olarak şekilde gösterildiği gibi beş ekipmandan oluşmaktadır. Bunlar; FV modüller, DC bağlantı yeri, evirici, AC bağlantı yeri ve dağıtım hattı ile irtibatlanma kısmıdır.



Şekil 3.1: Şebeke bağlantılı FV sistemlerin genel yapısı (ABB 2014).

Bu tip sistemlerde, şebekeye bağlantı kısmında birçok problemle karşılaşılabilir. Bu problemlerle karşılaşmamak için temelde FV sistemin çıkış karakteristiği ile şebekenin karakteristiğinin uyumlu olması gerekmektedir. İletim ve

dağıtım sistemlerinde en önemli parametreler gerilim seviyesi ve frekans değeridir. Dolayısıyla bu iki parametrenin senkronizasyonu çok önemlidir (Arıcı ve İskender 2020). “Temel olarak şebekeye bağlanacak bir sistemde aranması gereken dört ana madde sıralanabilir:

1- FV sistem çıkış gerilim frekansı şebeke frekansı ile senkronize olmalıdır.

2- FV sistem çıkış terminal gerilim büyüklüğü şebeke gerilim seviyesi ile aynı olmalıdır.

3-Şebeke üç faz sırası, FV sistem çıkış fazlarının sırasıyla aynı olmalıdır.

4- 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” (Arıcı ve İskender 2020).

Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler şebekeye bağlanırken bağlantı noktası olarak kurulu gücü 11 kWe ve altında olması halinde alçak gerilimden, 11 kWe'nin üzerinde olması halinde teknik analizler sonucu alçak gerilim veya yüksek gerilimden bağlanabilir (EPDK 2018). Kurulu gücü 5 kWe'a eşit veya altında olan sistemler alçak gerilim seviyesinden tek fazlı olarak, 5 kWe'in üzerinde olan sistemler ise şebekeye üç fazlı olarak bağlanmaktadır (EPDK 2017).

Bu bölümde şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem ekipmanları, topolojileri, farklı şebeke bağlantılı evirici yapıları, şebeke bağlantılı sistemlerde kullanılan DC-DC dönüştürücü yapılardan bahsedilecektir.

3.1 Şebeke Bağlantılı FV Sistemlerde Kullanılan Güç Dönüştürücüler

Bu kısımda, şebeke bağlantılı FV sistemlerde kullanılan güç dönüştürücü yapılardan bahsedilecektir.

3.1.1 DC-DC Dönüştürücüler

DC-DC dönüştürücü, DC kaynağın bir voltaj seviyesinden gerekli voltaj seviyesine dönüştüren bir güç elektroniği devresidir. DC-DC dönüştürücünün çalışma şekli, çeşitli MPPT kontrol algoritmalarına göre MPP (Maksimum Güç Noktası)'nin tespiti için temel oluşturur. Şebeke bağlantılı FV sistemlerde, eviriciye ya da yüklerle istenen ve sabit bir değerde gerilim sağlamak amacıyla çeşitli dönüştürücü devreleri kullanılmaktadır.

Literatürde bu dönüştürücüler ile ilgili birçok topoloji bulunmaktadır. Dönüştürücü yapıları temel olarak iki şekilde incelenir, yalıtılmış ve yalıtılmamış topolojiler. DC-DC dönüştürücülerin verimleri %75-98 arasındadır (Shoro ve Hussain 2020). Yalıtımsız topolojiler, yapılarında çıkış transformatörü bulunmaz. Bu yapılarla örnek olarak buck(azaltan) konvertör ve boost(arttıran) konvertör yapıları verilebilir (Mahela ve Shaik 2017). FV sistemlerde dizilerin çıkış gerilimi bağlandıkları eviriciye uygun olması gerekmektedir. Dolayısıyla dizi çıkış geriliminin duruma göre yükseltilmesi ve düşürülmesi gereken durumlar oluşabilir. Bu gibi durumlarda buck veya boost konvertör yapıları kullanılabilir.

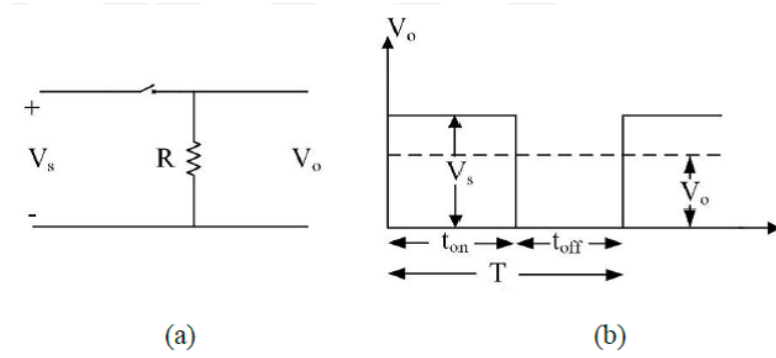
Yalıtımlı topolojilerde ise çıkış transformatörleri bulunur. Bu yapılar, modüller ile şebeke arasında elektriksel olarak izolasyon sağlar. Şebeke bağlantılı sistemlerde güvenlik nedenleriyle elektriksel izolasyonun tercih edildiği yerlerde bu yapıları kullanılabilir (Mahela ve Shaik 2017). Bu yapılarla örnek olarak flyback konvertör yapısı verilebilir.

Dönüştürücüler sürekli iletim modu (CCM) ve süreksiz(kesikli) iletim modu (DCM) olmak üzere iki farklı modda çalışabilir. Sürekli iletim modunda bobin akımı sürekli olarak akmaktadır ve sıfıra inmez. Kesikli iletim modunda ise bobin akımı sıfıra inebilir. Genelde düşük güç seviyeleri için DCM modu, yüksek güç seviyeleri için CCM modu tercih edilir (Shoro ve Hussain 2020). Fotovoltaik sistemlerde daha çok sürekli iletim modunda çalışan dönüştürücüler tercih edilmektedir (Mahela ve Shaik 2017).

Dönüştürücüler genel olarak, anahtarlama elemanı ile bir bobin ve bir kondansatör gibi devre elemanlarından oluşmaktadır. Devre yapılarındaki temel

prensip, anahtarlama elemanı sayesinde bobinde depolan enerjinin kontrol edilerek çıkışa aktarılmasıdır. Kondansatörler çıkış gerilimindeki dalgalanmayı düzenlemek için kullanılır. Devrelerin çıkış gerilimi anahtarlama elemanının iletimde ve kesimde olma süresine göre değişmektedir.

Şekil 3.2’de basit bir dönüştürücünün yapısı verilmiştir. V_o çıkış geriliminin değeri, anahtarlama elemanının iletimde kalma süresi, t_{on} ve kesimde kalma süresi t_{off} ile gösterilmiştir, T ise anahtarlama periyodudur.



Şekil 3.2: DC-DC dönüştürücü a) Temel yapısı b) Çıkış gerilimi (Boyar 2018).

Anahtarlama elemanlarının kontrol işlemi darbe genişlik modülasyonu (DGM, PWM) yöntemi ile yapılır. Anahtarın görev çevrim oranı (duty cycle, D) çıkış gerilimini belirlemektedir.

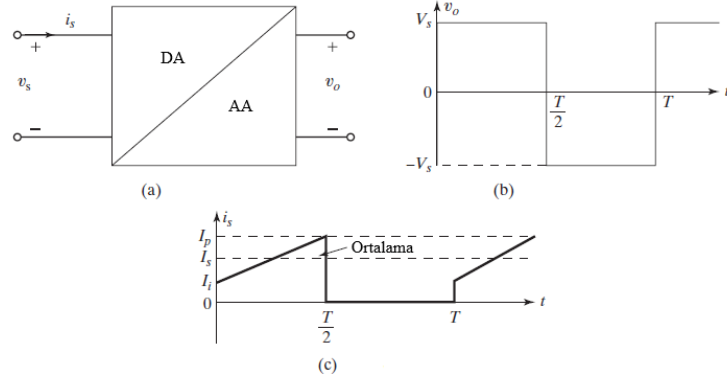
$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (3.1)$$

$$t_{on} = D \cdot T \quad (3.2)$$

$$t_{off} = (1 - D) \cdot T \quad (3.3)$$

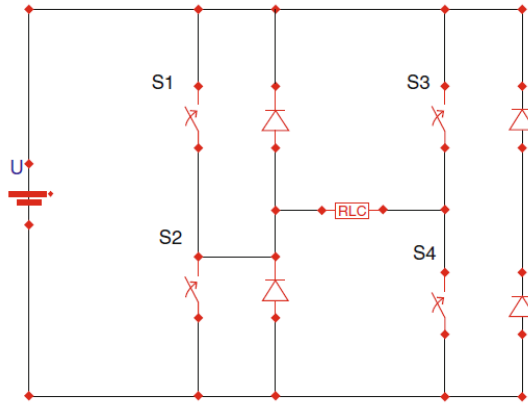
3.1.2 DC-AC Dönüştürücüler (Eviriciler)

Eviriciler, temelde güç elektroniği sistemlerinde doğru akımı alternatif akıma çeviren cihazlara verilen isimdir. Fotovoltaik sistemlerde, eviriciler FV modüllerden üretilen ve daha sonra yükseltilebilir veya düşürülen DC gerilimi şebekeye iletmek ya da cihazları beslemek amacıyla AC gerilime dönüştürülmelidir ve bu görevi eviriciler üstlenmektedir.



Şekil 3.3: Bir eviricinin giriş ve çıkış ilişkisi a) Blok diyagramı b) Çıkış gerilimi c) Giriş akımı (Rashid 2016).

Temel evirici devresi Şekil 3.4'te gösterildiği gibi bir devre ile gerçekleştirilebilir. Bu yapı tam köprü evirici olarak da bilinmektedir. Eviricinin temel çalışma prensibi, DC giriş geriliminin ilk yarım periyotta pozitif yönde ikinci yarım periyotta negatif yönde yüke uygulanması şeklindedir. Devrenin çalışma periyodu ise, bu iki yarım periyotun toplamı ile belirlenir.



Şekil 3.4: Temel evirici devresi

Güç elektroniğinde eviriciler iki şekilde olabilir, bunlar gerilim kaynaklı evirici (VSI) ve akım kaynaklı evirici (CSI) şeklindedir. Gerilim kaynaklı eviricilerde giriş tarafı bir gerilim kaynağı gibi davranır ve çıkış tarafında sabit genlikli AC gerilim dalga formu elde edilir (Jana ve diğ. 2017). Çıkış akımı ise pozitiften negatife veya tersi şeklinde dalgalanması için zorlanır. Eğer yük endüktif ise, serbest dolaşım diyotlu (FWD) güç anahtarlarına ihtiyaç duyulmaktadır (Rashid 2016).

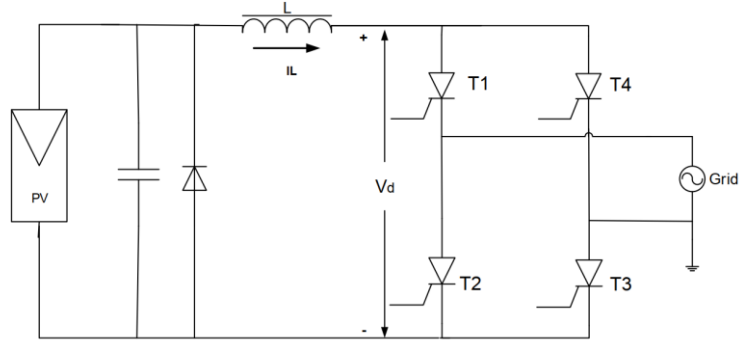
Gerilim kaynaklı eviriciler kendi içinde ikiye ayrılabilir, bunlar akım kontrollü ve gerilim kontrollü çalışma modlarıdır. Şebeke bağlantılı sistemlerde genellikle akım

kontrolü modda çalışan gerilim kaynaklı eviriciler tercih edilir. Bunun sebebi, daha az karmaşık kontrol devreleri ile yüksek güç faktörü elde etme ve herhangi bir şebeke arızası meydana geldiğinde geçici(transient) akımı bastırabilmesidir (Jana ve diğ. 2017). Akım kaynaklı eviriciler ise, bir akım kaynağı gibi davranır ve çıkış akımı yükten bağımsız olarak sabit tutulurken çıkış gerilim ise değişmesi yönünde zorlanır. Ayrıca bu yapılarda, kaynaktan sürekli bir akım akışının zorunluluğu vardır, bu yüzden daima iki anahtar iletimde olmalıdır (Rashid 2016).

Şebeke bağlantılı eviriciler, şebeke komütasyonlu (doğal komütasyonlu, line commutated) ve zorlamalı komütasyonlu (self commutated) şeklinde de sınıflandırılabilir. Zorlamalı komütasyonlu yapılarda genelde MOSFET ve IGBT gibi hızlı çalışan devre elemanları kullanılır. Bu yapılarda, evirici anahtarlama elemanlarının iletime ve kesime girme zamanlarının kendisi belirler. Gerilim kontrollü eviriciler genelde zorlamalı komütasyon yapısındadır ve daha çok küçük güçlü şebeke bağlantılı FV uygulamalarda kullanılır (Ünlü ve diğ. 2014). Bu yapılarda, evirici çıkış tarafında hem akım hem de gerilimin dalga yapısını kontrol edilebilmektedir ve güç faktörü ayarlaması ve düzeltilmesi yapılabilir (Jana ve diğ. 2017).

Şebeke komütasyonlu yapılarda ise, yarı iletken olarak tristörler kullanılır. Bu yapılar zorlamalı komütasyonlu eviricilerden farklı olarak yarı iletken elemanlar kesime girmek için tetiklemeye ihtiyaç duymaz (Ünlü ve diğ. 2014). Tristörlerin doğal yapısından dolayı içinden geçen akımın sıfır olmasıyla doğal olarak kendiliğinden kesime girer. Bu olaya güç elektroniğinde “doğal komütasyon” denir. Bu yapılar geçmişte popüler olmasında rağmen günümüzde çok tercih edilmemektedir.

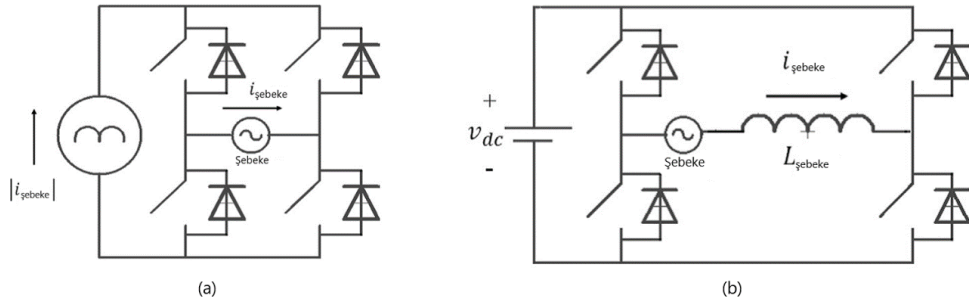
Ünlü ve diğ. (2015) yapmış oldukları çalışmada, tek fazlı bir şebeke modeli kullanarak literatürde “geleneksel doğal komütasyonlu evirici” olarak geçen yapıyı kullanarak bir şebeke bağlı tek fazlı FV sistem modeli oluşturmuşlardır. Bu yapı Şekil 3.5’te verilmiştir. Sistemin basit ve FV sistemlerde güç aktarımı için iyi bir alternatif olabileceği ifade edilmiştir.



Şekil 3.5: Doğal komütasyonlu eviricili şebeke bağlantılı FV yapısı (Ünlü ve diğ. 2015).

Günümüzde, MOSFET'ler ve IGBT'ler gibi anahtarlama elemanlarının gelişimi nedeniyle, FV sistemler gibi dağıtılmış güç sistemleri için kullanılan eviriciler, artık şebeke komütasyonlu yapılar yerine zorlamalı komütasyonlu yapılar kullanılmaktadır (Jana ve diğ. 2017). Bu yapıların en büyük avantajı, şebeke ile kolay bir şekilde senkronize olarak çalışmalarıdır. Fakat bu yapıların dezavantajları, çıkış harmoniklerinin fazla olması ve güç faktörünün düşük olmasıdır (Ünlü ve diğ. 2015).

Şekil 3.6'da şebeke etkileşimli evirici yapıları gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Şebeke etkileşimli evirici yapıları a) Şebeke komütasyonlu akım kaynaklı evirici b) Zorlamalı komütasyonlu gerilim kaynaklı evirici (Jana ve diğ.2017).

3.1.3 FV Evirici Sistemleri

FV modüllerin seri veya paralel bağlanmasıyla farklı güçte FV sistemler elde edilir. Bu sistemlerin farklılık göstermesi ve talep edilen çıkış gücünün farklılığından dolayı eviriciler bağlantı tiplerine göre çeşitlilik göstermektedir. Eviriciler bağlantı tiplerine göre dört şekilde incelenir:

- 1- Merkezi evirici sistem (Centralized inverters)
- 2- Dizi evirici sistem (String inverters)
- 3- Çoklu-dizi evirici sistem (Multi-string inverters)
- 4- Modül entegre evirici sistem (Module integrated inverters, micro-inverters, ac modules)

3.1.3.1 Merkezi Evirici Sistemler

Bu yapılar, 1980'lerde büyük güçlü sistemlerde yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Kurulan ilk sistemler merkezi evirici sistem yapısındadır. Yapı olarak çok sayıda fotovoltaik modülün tek bir eviriciye bağlanması esas alınır (Sefa ve Altın 2009). Bu yapıların çıkış güç aralığı 10-250 kW arasındadır (Mahela ve Shaik 2017). Bu sistemlerin verimlilikleri %85-90 aralığındadır. Bu yapıların en büyük dezavantajları düşük güç faktörü ve çıkış akımındaki yüksek harmonik değerleridir (Jana ve diğ. 2017).

3.1.3.2 Dizi Evirici Sistemler

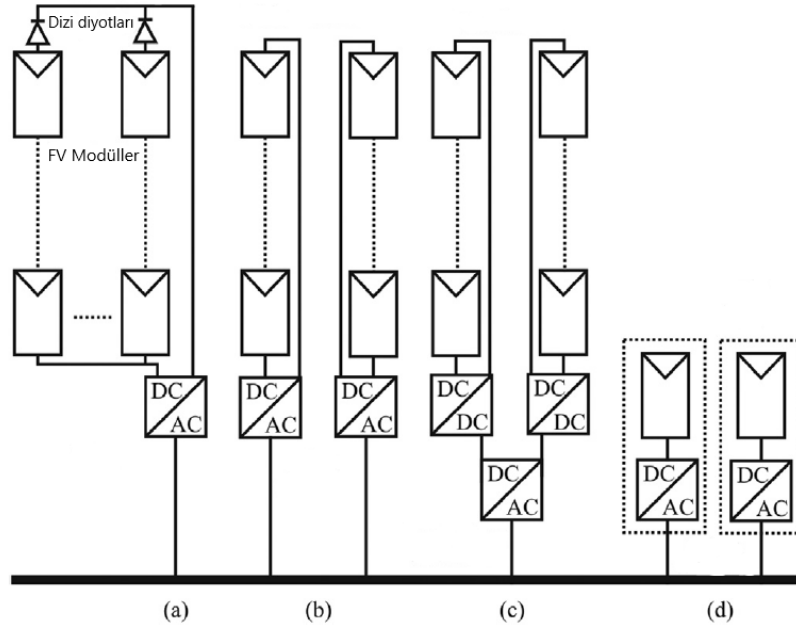
Bu yapılar sistemlerin verimini arttırmak ve maliyeti düşürmek için 1990'larda geliştirilmiştir. Bu yapılarda her bir FV modül dizisi ayrı bir eviriciye bağlanır. Giriş gerilimi 150-450 V aralığındadır (Sefa ve Altın 2009). Bu yapılar genellikle küçük güçlü sistemlerde (1-5 kW) kullanılır. Dizi eviricilerin en büyük avantajı, her bir diziyeye ayrı evirici bağlandığı için her bir dizinin maksimum güç noktası ayrı ayrı tespit edilebilmektedir. Bu yapıların verimliliği merkezi eviricilere göre %1-3 arası daha yüksektir (Jana ve diğ. 2017). Bu yapılar günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

3.1.3.3 Çoklu-dizi Evirici Sistemler

Bu yapılar dizi evirici sistemlerinin gücünü ve verimini arttırmak için geliştirilmiştir. Bu sistemlerde her bir FV dizinin kendi DC-DC dönüştürücüsü vardır ve diziler tek bir eviriciye bağlanır. Her bir dizinin maksimum güç noktası ayrı ayrı takip edilebilmekte ve her bir dizi ayrı ayrı kontrol edilebilmektedir. Bu yapı dizi evirici ve merkezi evirici sistemlerinin olumlu yanlarının kompakt olarak birleştirilmiş halidir (Hassaine ve diğ. 2014). Bu yapıların çıkış güç değerleri 3-10 kW aralığındadır (Mahela ve Shaik 2017).

3.1.3.4 Modül Entegre Evirici Sistemler (AC Modüller)

Modül entegre evirici sistemler, evirici ve modül yapılarının tek bir cihaza entegre edilmiş halidir. Bu yapılarda tek bir modül bulunduğu için diğer sistemlere göre kayıpları daha azdır. Her bir modülün maksimum güç noktası da ayrı ayrı takip edilebilmektedir (Hassaine ve diğ. 2014). Güçleri genellikle 500 W ve altı seviyesindedir. Yapı olarak “tak çalıştır” mantığında çalışır ve bu da uzman olmayan kişiler için kullanılmaya olanak verir (Sefa ve Altın 2009).



Şekil 3.7: Şebeke etkileşimli evirici sistemleri a) Merkezi evirici sistem b) Dizi evirici sistem c) Çoklu-dizi evirici sistem d) Modül entegre evirici sistem (Mahela ve Shaik 2017).

3.1.4 Üç Fazlı FV Evirici Yapıları

Şebeke etkileşimli eviriciler üç fazlı veya tek fazlı olsun temelde iki parametreye göre sınıflandırılır; bunlar güç işleme aşamalarına göre ve yapılarında transformatör içerip içermediğine göre yapılırlar.

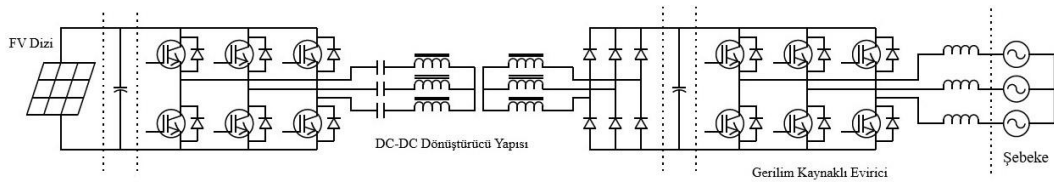
Güç işleme aşamalarına göre temelde iki farklı yapı vardır, bunlar; tek aşamalı ve iki aşamalı yapılardır. Tek aşamalı eviricilerde, evirici maksimum güç noktası takip işlemi ve gerekirse gerilimin yükseltilmesi veya alçaltılması işlemlerini kendisi yerine getirmektedir. İki aşamalı eviricilerde ise, bu görevi DC-DC dönüştürücüler üstlenmektedir (Sefa ve Altın 2009). Bu yapılar Şekil 3.8’de sunulmuştur.



Şekil 3.8: Şebeke etkileşimli eviriciler a) Tek aşamalı güç işleme b) İki aşamalı güç işleme

Tek aşamalı eviriciler, nominal gücün iki katı bir peak gücünü sağlayabilecek şekilde tasarlanmalıdır. İki aşamalı eviricilerde ise, DC-DC dönüştürücülerin tasarımı önemlidir. Buna göre DC-DC dönüştürücünün çıkışı saf DC gerilimi ise dönüştürücü nominal gücü sağlayabilecek şekilde, çıkışı yarı sinüzoidal bir dalgayı takip edecek şekilde modüle edilmiş ise bu durumda dönüştürücü nominal gücün iki katı bir peak gücü sağlayabilecek şekilde tasarlanmalıdır (Jana ve diğ. 2017).

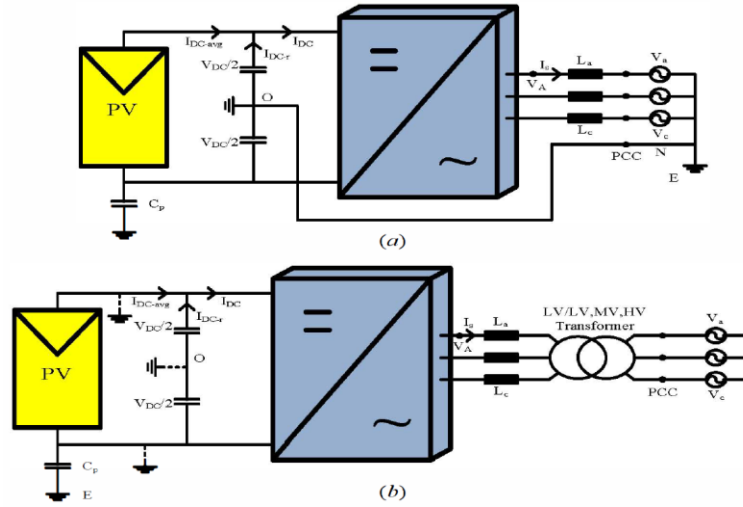
Şekil 3.9’da iki aşamalı üç fazlı şebeke bağlantılı yapı gösterilmiştir.



Şekil 3.9: İki aşamalı üç fazlı şebeke bağlantılı FV sistem yapısı (Martins 2013).

Tek fazlı eviriciler 1-5 kW güç aralığındaki sistemler için uygunken, üç fazlı eviriciler 10 kW’tan başlayıp MW seviyesine kadar olan sistemler için uygundur. Üç fazlı eviriciler genelde gerilim kaynaklı yapıdadır (Özkan ve Hava 2014).

Diğer bir sınıflandırma yapısı ise, transformatör içerip içermemesine göre yapılan sınıflandırmadır. Aşağıda Şekil 3.10’da bu yapılar gösterilmiştir.



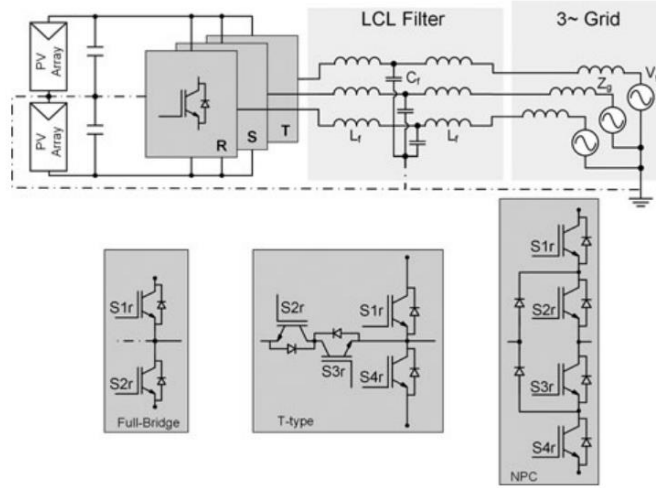
Şekil 3.10: Üç fazlı FV sistem yapılarının transformatör içerip içermediğine göre sınıflandırılması a) Transformatör içermeyen b) Transformatör içeren (Özkan ve Hava 2014).

Transformatörsüz yapılar, genelde 10 kW ve katları aralığındaki güç değerlerinde kullanılır ve şebekeye alçak gerilim seviyesinden direk olarak bağlanır. Kaçak akım sorunları nedeniyle, evirici DC barasının orta noktası topraklanmıştır. Şekil 3.10 (a)'da gösterildiği gibi akımın sıfır dizi bileşenleri (zero sequence) için yol olduğundan, böyle bir topraklanmış sistemde daha düzgün bir DC bara gerilimi ve daha düşük anahtarlama kayıpları için gerilimin sıfır dizi bileşenlerinin geçişi önlenmektedir. Büyük ölçekli bir FV sistem oluşturmak için küçük güç aralığına sahip transformatörsüz eviriciler kullanıldığında, dağıtılmış izleme yapısı nedeniyle daha iyi maksimum güç noktası izleme özellikleri sergilerler (Özkan ve Hava 2014).

Transformatörlü yapılarda, transformatörün sekonder sargısı alçak gerilim veya yüksek gerilim seviyesinden şebekeye bağlanabilir. Transformatörün dahil edilmesi maliyeti artırır ve soğutma sistemi gerekliliğine sebep olabilir. Fakat dezavantajlarının aksine, transformatörün kullanımı yüksek gerilim seviyelerinden bağlanmaya izin verir ve FV modüller için topraklamayı kolaylaştırmaktadır (Özkan ve Hava 2014).

Üç fazlı evirici topolojilerinde, tek fazlı yapılara kıyasla daha az yapı bulunmaktadır. Tek fazlı evirici topolojilerinde en çok bilinen yarım köprü yapısı ve H-köprü yapıları dışında literatürdeki yayınlarda birçok topoloji yapısı önerilmiştir.

Literatürde en çok kullanılan üç fazlı fotovoltaik evirici yapıları, Şekil 3.11’de gösterilen klasik tam köprü evirici, T tipi evirici ve NPC evirici yapılarıdır (Kerekes ve diğ. 2015).

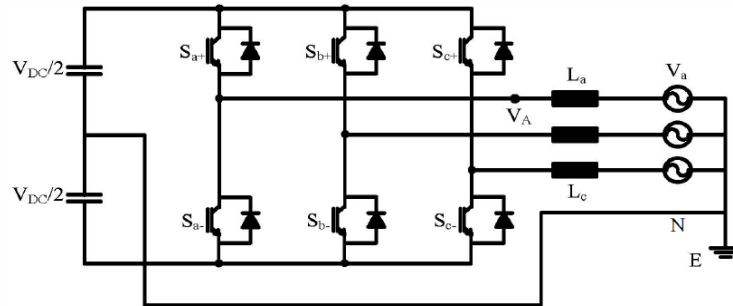


Şekil 3.11: Üç fazlı FV evirici topolojileri klasik tam köprü, T tipi ve NPC yapısının gösterimi (Kerekes ve diğ. 2015).

Özkan ve Hava (2014) yapmış olduğu çalışmada literatürdeki üç fazlı fotovoltaik evirici yapıları incelenmiş ve en çok kullanılan yapıları şu şekilde belirtilmiş, temelde ikiye ayırmıştır;

- 1- İki seviyeli şebeke bağlantılı yapı
- 2- Üç seviyeli şebeke bağlantılı yapı

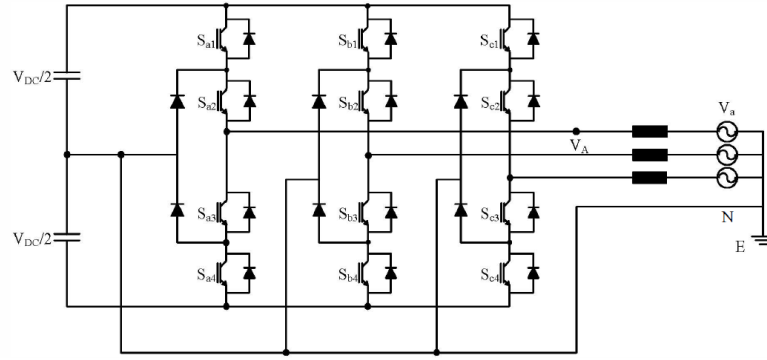
Kerekes ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmaya benzer şekilde temelde aynı üç yapı incelenmiş fakat bu yapılar iki başlık altında toplanmıştır.



Şekil 3.12: İki seviyeli (tam köprü yapısı) şebeke bağlantılı üç fazlı evirici yapısı

İki seviyeli yapı Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Bu yapı aslında uygulamalarda sıklıkla kullanılan tam köprü evirici yapısıdır. Bu yapı, daha az anahtarlama elemanı gereksinimi ve daha düşük bağlantı kayıpları sebebiyle tercih edilmektedir.

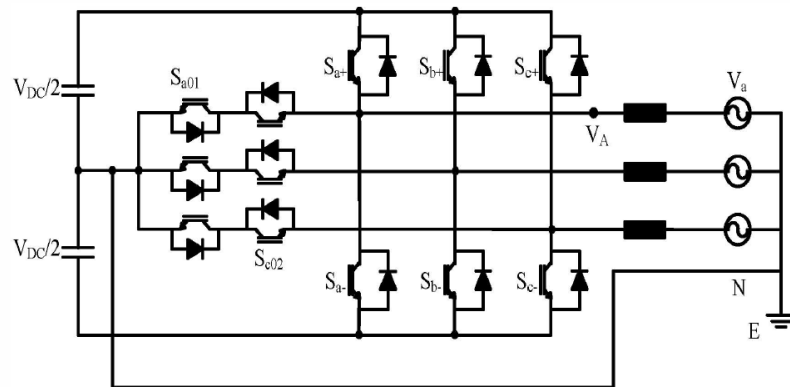
Üç seviyeli yapılar, iki tipe olabilir. Bunlar nötr noktası kenetlemeli (Neutral Point Clamped, NPC) ve T tipi (T type) yapılarıdır. Nötr noktası kenetlemeli üç seviyeli evirici yapısı Şekil 3.13’de, T tipi evirici yapısı ise Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



Şekil 3.13: Üç seviyeli NPC üç fazlı evirici yapısı

Üç seviyeli NPC yapısında, anahtarlama kayıpları ve iletim kayıpları daha düşüktür. Dolayısıyla, enerji dönüştürme verimliliği daha yüksektir. Fakat maliyet ve yapılarındaki karmaşıklık gibi sorunları bulunmaktadır.

NPC yapısıyla aynı çalışma özelliklerine sahip olan üç seviyeli T tipi (Şekil 3.12) yapıdaki evirici ise, farklı tipteki cihazları bağlama gibi avantajlara sahiptir. Böylece NPC yapısına kıyasla daha düşük iletim kayıpları ve daha yüksek enerji dönüşüm verimliliğine sahiptir.



Şekil 3.14: Üç seviyeli T tip üç fazlı evirici yapısı

3.2 Şebeke Bağlantılı Eviriciler İçin Standartlar

Şebeke etkileşimli eviriciler, şebekeye bağlanırken elektrik tedarik eden kuruluşların belirlediği standartlara uyması gerekmektedir. Bu standartlardan bazıları IEC 61727, IEEE 1547 ve IEEE 929 standartlarıdır. IEEE 1547 standardı 10 MVA'nın altındaki dağıtım kaynaklarının birbirine bağlanmasına yönelik teknik özellikleri ve testleri içermektedir. IEC 61727 standardı düşük gerilimli şebeke ağına bağlanan 10 kVA'nın altında nominal kapasiteye sahip olan şebeke bağlantılı sistemler ve birbirleri arasındaki uyumla ilgilidir. IEEE 929 ise sadece FV sistemler için geliştirilmiş olup, 10 kW'nın altındaki sistemler için personel ve ekipman güvenliği ve güç kalitesi gibi konuları kapsayan içinde yönergelerinde bulunduğu bir standarttır (Wu ve diğ. 2017).

Bu standartlarda güç kalitesi, ada modu tespiti vb. gibi konulara da değinilmiştir. Aşağıdaki tabloda bu standartlar ve istenilen limit değerleri verilmiştir.

Tablo 3.1: Şebekeye bağlı evirici standartları özeti(Wu ve diğ. 2017).

Konular	IEC 61727	IEEE 1547	IEEE 929
Uygulanabilir Kapasite	10 kVA ve altı	10 MVA ve altı	10 kW ve altı
Harmonik akım (sıra-h) limitleri	(3-9) % 4 (11-15) % 2 (17-21) % 1,5 (23-33) % 0,6 Bu aralıktaki çift sıralı harmonikler tek sıralı harmoniklerden %25 daha az olmalıdır.	(2-10) < % 4 (11-16) < % 2 (17-22) < % 1,5 (23-34) < % 0,6 35 ve üstü < 0,3	(3-9) % 4 (11-15) % 2 (17-21) % 1,5 (23-33) % 0,6
Doğru akım enjeksiyonu	Anma çıkış akımının %1'inden daha az	Anma çıkış akımının %0,5'inden daha az	
Maksimum akım toplam harmonik bozunumu		< %5	
Normal çalışma için gerilim aralığı	%85-110 (196-253 V)	-	%88-110 Evirici anormal voltajı algılamalı ve yanıt vermelidir.
Normal çalışma için frekans aralığı	50±1 Hz	-	59,3-60,5 Hz
Ada modu	-	Adanın oluşumundan sonraki iki saniye içinde adayı tespit edecek ve izole edecek	Adanın oluşumundan sonra on döngüde veya daha az sürede evirici enerjiyi kesecek

4. ŞEBEKE BAĞLANTILI ÖRNEK BİR FV SİSTEMİN ANALİZ VE BENZETİMİ

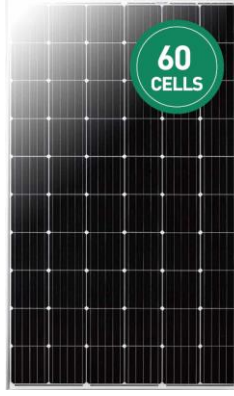
Sistem rneği olarak Denizli ilinde bulunan ve halihazırda kurulu olan Sena Kablo fabrikasının çatısında bulunan Şebeke bağlantılı 700 kWe AC güce ve 853.12 kWp DC kurulu güce sahip fotovoltaik sistem alınmıştır. Bu sistemin Matlab/Simulink ortamında ve PVSyst yazılımı ile benzetimi yapılmıştır. Sistemdeki evirici, FV modül ve kablolar gibi elektriksel ekipmanların incelenmesi yapılmış ve bazı yerlerde ETAP yazılımından yararlanılmıştır.



Şekil 4.1: Sena Kablo fabrikasının çatısında kurulu Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemin üstten görünümü

4.1 FV Modül ve Eviricinin İncelenmesi

Mevcut sistemde 7 adet evirici ve toplamda 2666 adet fotovoltaik modül kullanılmıştır. Her bir eviricide 10 adet MPPT girişi ve her bir MPPT de 2 adet giriş bulunmaktadır. Sistemde fotovoltaik modül olarak Şekil 4.2’de gösterilen monokristal yapıdaki Phono Solar PS320M-20/U serisi kullanılmıştır. Tablo 4.1’de bu modüle ait veriler gösterilmektedir.



Şekil 4.2: Phono Solar PS320M-20/U model modül yapısı (Phono Solar 2020).

Tablo 4.1: Phono Solar PS320M-20/U model modüle ait teknik veriler (Phono Solar 2020)

Nominal Güç (W)	Maksimum Güç gerilimi(V_{mpp}, V)	Maksimum Güç akımı(I_{mpp}, A)	Açık Devre Gerilimi(V_{oc}, V)	Kısa Devre Akımı(I_{sc}, A)
320	33,65	9,51	41,01	10,07

Tablo 4.1’de gösterilen veriler evirici seçimi, kablo seçimi ve diğer şalt ekipmanlarının seçimi için büyük önem arz etmektedir. Bu yüzden tasarımda bu veriler göz önünde bulundurulmalıdır.

Sistemde evirici olarak 7 adet HUAWEI SUN2000-100KTL-M1 model (Şekil 4.3) evirici kullanılmıştır. Bu evirici üç fazlı olup 400 V / 50 Hz çıkış verebilmektedir. Çıkışı 3W + (N) +PE şeklindedir. Bu eviriciye ait teknik veriler Tablo 4.2’de verilmiştir.

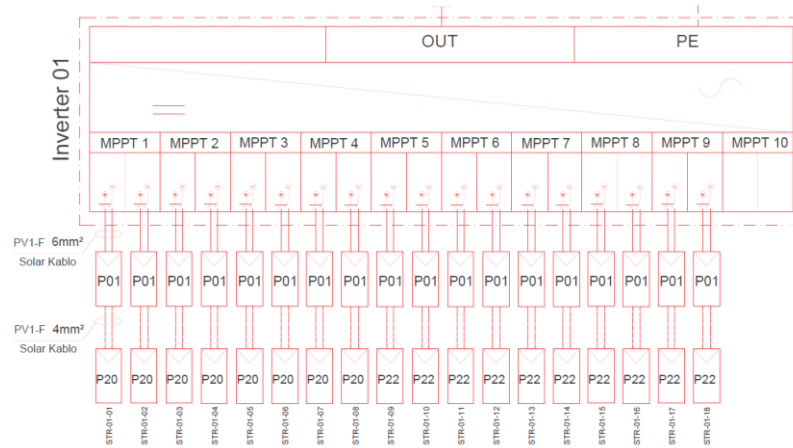


Şekil 4.3: HUAWEI SUN2000-100KTL-M1 model evirici (Huawei Solar 2020).

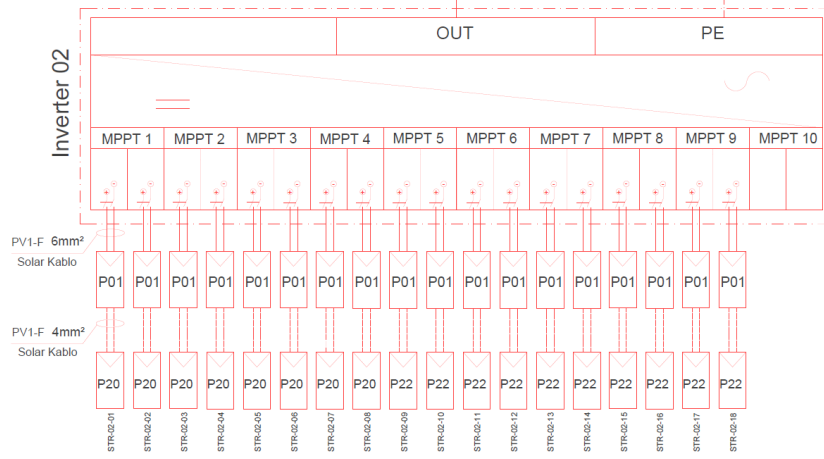
Tablo 4.2: HUAWEI SUN2000-100KTL-M1 model eviriciye ait teknik veriler (Huawei Solar 2020)

DC Giriş Kısmı	
Bağımsız MPPT Giriş Sayısı	10
MPPT Başına Maks. Giriş Sayısı	2
Maksimum DC Giriş Gerilimi (V)	1100
Başlangıç Gerilimi (V)	200
Nominal DC Giriş Gerilimi (V)	400 V çıkış için; 600 V
MPPT Başına Maks. Giriş Akımı (A)	26
MPPT Başına Maks. Kısa Devre Akımı (A)	40
Nominal Çalışmada DC Giriş Gerilim Aralığı (V)	200 - 1000
AC Çıkış Kısmı	
Nominal Çıkış Gücü (kW)	100
$\cos\phi=1$ için Maksimum Çıkış Gücü (kW)	110
Nominal Çıkış Gerilimi (V)	480 / 400 / 380
Nominal Çıkış Akımı (A)	400 V için; 144,4 A
Maksimum Çıkış Akımı (A)	400 V için; 160,4 A
Nominal Çıkış Frekansı (Hz)	50 / 60

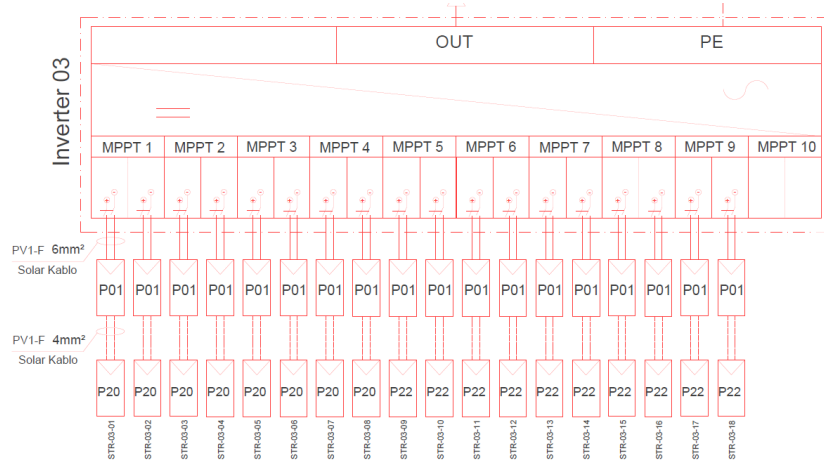
Sistemde kullanılan eviricilerin fotovoltaik modüller ile olan bağlantıları aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



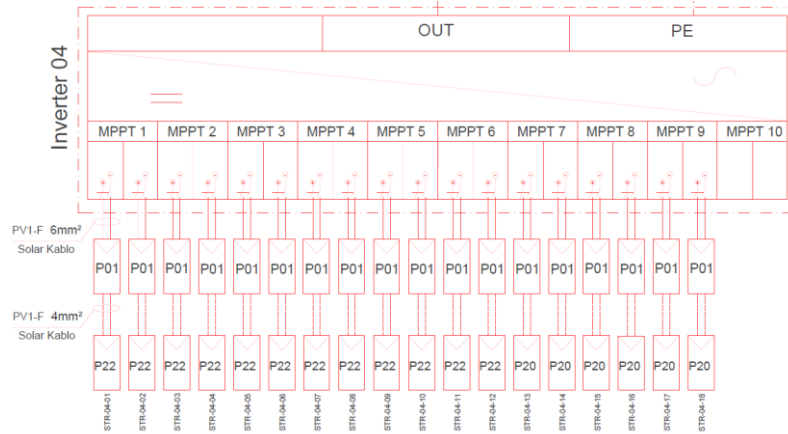
Şekil 4.4: Evirici-1 ve FV dizilerin bağlantı şeması



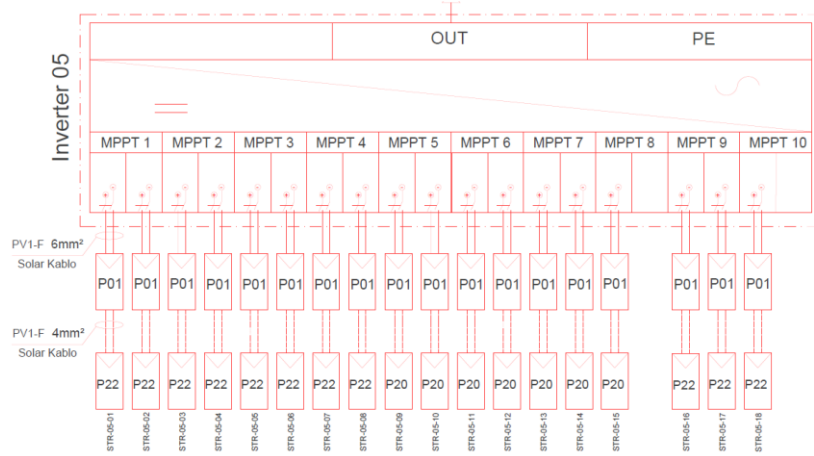
Şekil 4.5: Evirici-2 ve FV dizilerin bağlantı şeması



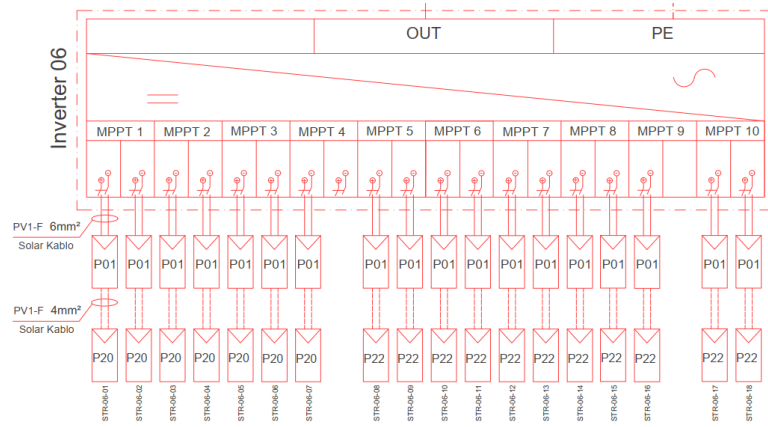
Şekil 4.6: Evirici-3 ve FV dizilerin bağlantı şeması



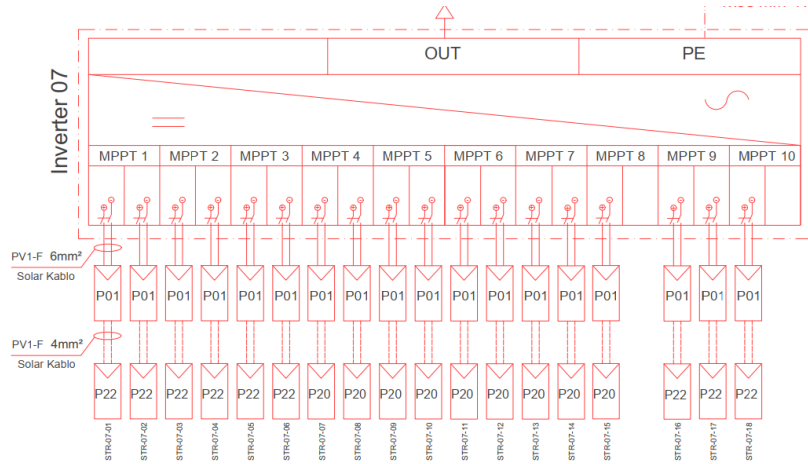
Şekil 4.7: Evirici-4 ve FV dizilerin bağlantı şeması



Şekil 4.8: Evirici-5 ve FV dizilerin bağlantı şeması



Şekil 4.9: Evirici-6 ve FV dizilerin bağlantı şeması



Şekil 4.10: Evirici-7 ve FV dizilerin bağlantı şeması

Sistemde kullanılan dizi yapıları karmaşıklığı kolaylaştırmak için STR-0x-XX şeklinde kodlanmıştır.

Eviricilere bağlanan toplam FV dizi güçleri sırasıyla; 121,6 kWp, 121,6 kWp, 121,6 kWp, 122,88 kWp, 122,24 kWp, 122,24 kWp ve 120,96 kWp şeklindedir.

4.1.1 FV Modül ve Evirici Uygunluk Kontrolü

Nominal şartlar altında FV modülün açık devre gerilimi 41,01 V ve maksimum güç gerilimi 33,65 V'tur. Bulunan sistemde 20 ve 22 adet modüller kullanılarak farklı dizi yapıları oluşturulmuştur. Bu şartlarda 22 adet modüle göre hesap yapmak daha doğru olacaktır. Buna göre dizi yapısının açık devre gerilimi aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$V_{OC,dizi} = n \times V_{OC,modül} \quad (4.1)$$

$$V_{OC,dizi} = 22 \times 41,01 = 902,22 \text{ V}$$

Eşitlik (4.1)'den elde edilen bu değer Tablo 4.2'de verilen maksimum DC giriş gerilim değerinin (1100 V) altında olduğu için uygun görünmektedir. Fakat FV hücrelerin çıkış gerilimleri sıcaklık ile değiştiği için bu etki de göz önünde bulundurulmalıdır. FV modülün kataloğuna göre gerilim sıcaklık katsayısı $-0.31\%/^{\circ}\text{C}$ olarak görülmektedir (Phono Solar 2020). Dizi gerilimlerinin maksimum ve minimum değerleri için -10°C ve 70°C sıcaklık değerleri referans alınmıştır. Buna göre, maksimum dizi gerilimi -10°C için aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$V_{modül-max} = V_{OC,dizi} \times k_{max} \quad (4.2)$$

$$k_{max} = 1 + (\text{sıcaklık farkı} \times \text{gerilim katsayısı}(\%)) \quad (4.3)$$

$$V_{modül-max} = 41,01 \times 1,1085 = 45,46 \text{ V}$$

Bir dizi maksimum 22 adet seri modül bulunabileceğinden $V_{dizi-max}$, şu şekilde hesaplanır;

$$V_{dizi-max} = 45,46 \times 22 = 1000,12 \text{ V}$$

olarak bulunur. Bu değer Tablo 4.2'de verilen maksimum DC giriş gerilim değerinin (1100 V) altında olduğu için uygun görünmektedir.

Bu değerle birlikte FV dizinin MPP geriliminin de incelenmesi gerekmektedir. Bu değer şu şekilde hesaplanır;

$$V_{mpp,dizi} = n \times V_{mpp} \quad (4.4)$$

$$V_{mpp,dizi} = 22 \times 33,65 = 740,3 \text{ V}$$

Eşitlik (4.4)'den elde edilen bu değer Tablo 4.2'de verilen DC giriş gerilim aralığı (200-1000 V) içerisinde olduğu için uygun görünmektedir. Dizi geriliminin minimum değeri ise 70°C için aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$V_{modül-min} = V_{mpp} \times k_{min} \quad (4.5)$$

$$k_{min} = 1 - (\text{sıcaklık farkı} \times \text{gerilim katsayısı}(\%)) \quad (4.6)$$

$$V_{modül-min} = 33,65 \times 0,8605 = 28,96 \text{ V}$$

Bir dizi minimum 20 adet seri modül bulunabileceğinden $V_{dizi-min}$, şu şekilde hesaplanır;

$$V_{dizi-min} = 28,96 \times 20 = 579,2 \text{ V}$$

FV diziler için hesaplanan minimum değer Tablo 4.2'de verilen DC giriş gerilim aralığı (200-1000 V) içerisinde olduğu için uygun görünmektedir.

Akım yönünden incelediğimizde, bu diziye ait kısa devre akımı modül verilerine göre 10,07 A, maksimum güç akımı ise 9,51 A 'dir. Her MPPT 2 girişe sahip olduğu için bu değerler iki ile çarpılması gerekmektedir. Sırasıyla 20,14 A ve 19,02 A değerleri elde edilir.

Bu değerler eviriciye ait MPPT başına maksimum akım değeri olan 26 A (26 A > 19,02) ve MPPT başına maksimum kısa devre akım değeri olan 40 A (40 A > 20,14) değerinden küçük olduğu için akım yönünden de uygundur diyebiliriz.

4.2 Şalt Ekipmanlarının İncelenmesi ve Kontrolü

Fotovoltaik sistemlerde evirici ve modül seçimi dışında diğer ekipmanların da incelenmesi önemli bir husustur. Bu bölümde sistemdeki kabloların ve devre kesici vb. elemanların incelenmesi yapılmıştır.

4.2.1 DC Kabloların İncelenmesi

Kablo seçiminde iki önemli husus bulunmaktadır. Bunlar gerilim düşümü ve kablunun akım taşıma kapasitesidir. Bu kriterler AC ve DC kısımlar için ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Dizilerde kablo kesitleri 4 mm² ve 6 mm² olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Oluşturulan tüm dizilerde 4 mm² kesitli olan kablo kısmı aynı uzunluğu (19,8 m) sahiptir. Dolayısıyla 6 mm² kesitli kablo kısmında en uzun linyeye sahip olan ve 22 adet modül içeren diziyi incelemek diğer DC linyelerin tamamı için gerilim düşümünün uygun olduğu sonucunu vermektedir. İncelemeler sonucunda STR-05-16 linyesi için hesaplamalar yapılacaktır.

DC gerilim düşümü aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\%e_{DC} = \frac{2 \times l \times t \times I_{mpp}}{K \times s \times V_{mpp-dizi}} \times \%100 \quad (4.7)$$

Burada t sıcaklık katsayıdır ve eşitlik (4.8) deki gibi hesaplanır. 50°C ortam sıcaklığı için, 1,12 değerine karşılık gelir. Gerilim düşümü hesaplarında ortam sıcaklığı 50°C olarak kabul edilmiştir.

$$t = 1 + 0,004 \times (T - 20^\circ\text{C}) \quad (4.8)$$

4 mm² için;

$$\%e_{DC-1} = \frac{2 \times 19,8 \times 1,12 \times 9,51}{56 \times 4 \times 740,3} \times \%100 = \%0,25$$

6 mm² için;

$$\%e_{DC-2} = \frac{2 \times 200 \times 1,12 \times 9,51}{56 \times 6 \times 740,3} \times \%100 = \%1,71$$

Toplam gerilim düşümü;

$$\%e_{DC} = \%e_{DC-1} + \%e_{DC-2} = \%1,96$$

Formülde l kablo uzunluğu(m), t sıcaklık katsayısı, I_{mpp} fotovoltaik dizinin maksimum güç akımı (A), K öz iletkenlik katsayısı (bakır için $56 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$), s ise kablo kesiti (mm^2), $V_{mpp-dizi}$ ise fotovoltaik dizinin maksimum güç gerilimini (V) ifade eder.

Son yapılan araştırmalara göre; DC gerilim düşümü değerinin maksimum %2 olması kabul görmektedir(pv-magazine-usa.com). Dolayısıyla gerilim düşümü bakımından uygundur diyebiliriz.

Kablonun akım taşıma yönünden de incelenmesi gerekmektedir. DC kısımda Multi-Contact FLEX-SOL-XL model solar kablolar kullanılmıştır. Bu kablolarla ait teknik veriler Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3: Multi-Contact FLEX-SOL-XL model kabloya ait teknik veriler

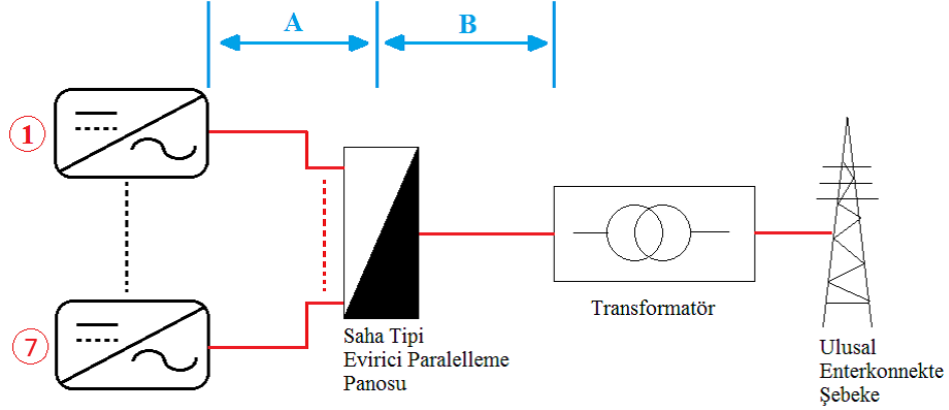
Kablo Kesiti (mm^2)	Dış çap (mm)	Taşıma Kapasitesi (A)	Direnç (20°C) (Ω/km)	Anma Gerilimi (V)	Çalışma Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)
4	5,8	55	4,75	1000	$-40^\circ\text{C}- 90^\circ\text{C}$
6	7	70	3,39	1000	$-40^\circ\text{C}- 90^\circ\text{C}$

Tablo 4.1'e göre bir modülün kısa devre akımı $10,07 \text{ A}$ 'dır. Bu akım kablolardan geçebilecek maksimum akım seviyesidir. 4 mm^2 ve 6 mm^2 kesitli kabloların akım taşıma kapasitesi bu değer üstünde olduğu için kablolar akım taşıma kapasitesi yönünden uygun diyebiliriz.

Her bir eviriciye ait dizilerin kablo ve gerilim düşümü bilgileri EK-A'da sunulmuştur.

4.2.2 AC Kablolama İncelenmesi

AC kablolama, Şekil 4.11’de görüldüğü gibi iki bölüme ayrılmıştır. A ile gösterilen ilk bölüm, her bir evirici çıkışının, saha paralelleme panosuna kadar olan hattı, B ise saha paralelleme panosu ile transformatör arasındaki hattı ifade etmektedir.



Şekil 4.11: AC kablolama ve gerilim düşümü için referans noktaları

Sistemde 7 adet evirici bulunmakta ve gerilim düşümü hesabında saha tipi evirici paralelleme panosu ile evirici arasındaki en uzun olan hat referans alınarak 1 no.lu evirici için gerilim düşümü hesaplanmıştır.

AC gerilim düşümü aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\%e_{AC} = \frac{t \times 100 \times P \times l}{K \times s \times V_h^2} \quad (4.9)$$

Burada t değeri DC gerilim düşümü hesabında olduğu gibi yine 1,12 alınacaktır. P eviricinin çıkış gücü, V_h ise hat gerilimidir. Evirici çıkışlarında $4 \times (1 \times 70)$ mm² NYY kablo kullanılmıştır.

$$\%e_{AC-1} = \frac{1,12 \times 100 \times 100000 \times 15}{56 \times 70 \times 400^2} = \%0,27$$

Sistemin Şekil 4.11’de gösterilen B kısmında ise 15 metre $4 \times (4 \times 1 \times 240) + (1 \times 120)$ mm² NYY kablo kullanılmıştır.

$$\%e_{AC-2} = \frac{1,12 \times 100 \times 700000 \times 15}{56 \times 4 \times 240 \times 400^2} = \%0,14$$

$$\%e_T = \%e_{AC-1} + \%e_{AC-2} = \%0,41$$

Toplam AC gerilim düşümü %0,41 olarak elde edilmiştir. Bu değer, tesis transformatör ünitesine doğrudan bağlı olduğu için Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliği'ne göre belirlenen %3 değerinden daha küçüktür (Resmi Gazete 2004). Buna göre 1 no.lu evirici için gerilim düşümü değeri uygundur. Aşağıdaki tabloda (Tablo 4.4) A ve B kısımlarından gerilimi düşümü değerleri verilmiştir.

Tablo 4.4: Evirici çıkışı kablo kesitleri ve gerilim düşümleri

Evirici No	A Bölümü Kablo Kesiti	A Bölümü Uzunluk	A Bölümü İçin %e	B Bölümü Kablo Kesiti	B Bölümü Uzunluk	B Bölümü İçin %e	Toplam %e
1	70	15	0,27	4x(4x1x240)	15	0,14	0,41
2	70	14	0,25				0,39
3	70	13	0,23				0,37
4	70	12	0,21				0,35
5	70	10	0,18				0,32
6	70	11	0,20				0,34
7	70	9	0,16				0,30

Tablo 4.11'de toplam gerilim düşümü değerleri tüm eviriciler için %3 değerinin altında olduğu için uygun görülmektedir.

Diğer bir husus olarak kabloların akım taşıma kapasitesi yönünden kontrol edilmesi gerekmektedir. Sistemin A kısmında 4x(1x70) mm² NYY kablo ve B kısmında 4x(4x1x240) NYY kablo kullanılmıştır. Bu kablolar ile ilgili teknik veriler Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

Her bir eviriciden çekilen akım şu şekilde hesaplanır;

$$P = \sqrt{3} \times V_h \times I_h \times \cos\varphi \quad (4.10)$$

$$100000 = \sqrt{3} \times 400 \times I_h \times 0,95$$

Buradan $I_h = 151,94$ A bulunur. Tablo 4.2'ye göre 400 V için bir eviriciden çekilebilecek maksimum akım değeri 160,4 A'dır. Bu durumda Şekil 4.12'deki verilere göre A kısmı için evirici çıkışlarında kullanılan kablo kesitleri akım taşıma kapasitesi (218 A) yönünden uygundur.

Saha paralelleme panosundan transformatöre kadar olan (B kısmı) kablonun akım taşıma kapasitesi, Denklem 4.10'a göre;

$$700000 = \sqrt{3} \times 400 \times I_h \times 0,95$$

buradan $I_h = 1063,54$ A bulunur.

Tablo 4.2'ye göre 400 V için bir eviriciden çekilebilecek maksimum akım değeri 160,4 A'dır. Bu durumda 7 adet eviriciden toplamda en fazla 1122,8 A akım çekilecektir. B kısmındaki kablo kesiti $4 \times (4 \times 1 \times 240)$ yani 4 adet 1 damarlı kablo olduğuna göre, Şekil 4.12'ye göre bu kablo grubundan $4 \times 503 = 2012$ A akım çekilebilecektir. Bu değer çekilen maksimum akım değerinden yüksek olduğu için B kısmı için kablo kesitleri uygun diyebiliriz.

TEKNİK ÖZELLİKLER TECHNICAL FEATURES							
NOMİNAL KESİT	KABLO DIŞ ÇAP(YAKLAŞIK)	NET AĞIRLIK YAKLAŞIK	20 °C 'de İLETKEN DA DİRENCİ	AKIM TAŞIYMA KAPASİTESİ			
CROSS-SECTION	OVERALL DIAMETER OF CABLE (APPROX.)	NET WEIGHT(APPROX.)	CONDUCTOR DC RESISTANCE AT 20 °C	▲ CURRENT CARRYING CABACITY in the air	*** CURRENT CARRYING CABACITY in the soil	*** CURRENT CARRYING CABACITY in the air	▲ CURRENT CARRYING CABACITY in the soil
mm ²	mm	g/km	Ω /km	A	A	A	A
1 DAMARLI/1 CORES							
1x10 mm	8,75	158,88	1,83	64	76	65	76
1x16 mm	9,70	221,53	1,15	84	98	87	97
1x25 mm	11,35	327,5	0,727	114	127	117	125
1x35 mm	12,35	418,89	0,524	140	152	144	150
1x50 mm	13,65	554,52	0,387	172	180	177	178
1x70 mm	15,35	764,69	0,268	218	220	225	218
1x95 mm	17,60	1029,41	0,191	270	264	278	260
1x120 mm	19,50	1381,39	0,153	315	300	325	296
1x150 mm	21,10	1557,86	0,124	362	336	373	331
1x185 mm	23,25	1925,58	0,0991	420	379	433	374
1x240 mm	26,70	2551,25	0,0734	503	439	518	432

Şekil 4.12: Sena Kablo NYY kablolar teknik özellikleri (Sena Kablo Katalog)

4.2.3 Koruma Cihazlarının İncelenmesi

Sistemin A bölümünde evirici çıkışlarında 30 mA-30 A toroid röleyle kompakt 4x200 A 36 kA değerinde TMS (Termik Manyetik Şalter, MCCB) kullanılmıştır. Kullanılan TMS'ler ayarlanabilir olup 175 A değerine ayarlanmıştır.

Buna göre kablo ve iletkenlerin aşırı akımlara karşı korunması için anma akım kuralına uyması gerekmektedir (Kaşıkçı 2018).

Anma akım kuralı;

$$I_B \leq I_n \leq I_z \quad (4.11)$$

Burada I_B , işletme akımı I_n , koruma cihazının nominal akımı I_z ise iletken veya kablonun akım taşıma kapasitesidir.

Eviricinin çıkış akımı eşitlik (4.10)'a göre 151,94 A olarak hesaplanmıştı. Koruma cihazının nominal akımı 200 A, kullanılan kablonun akım taşıma kapasitesi ise Şekil 4.2'ye göre 218 A'dir. Dolayısıyla;

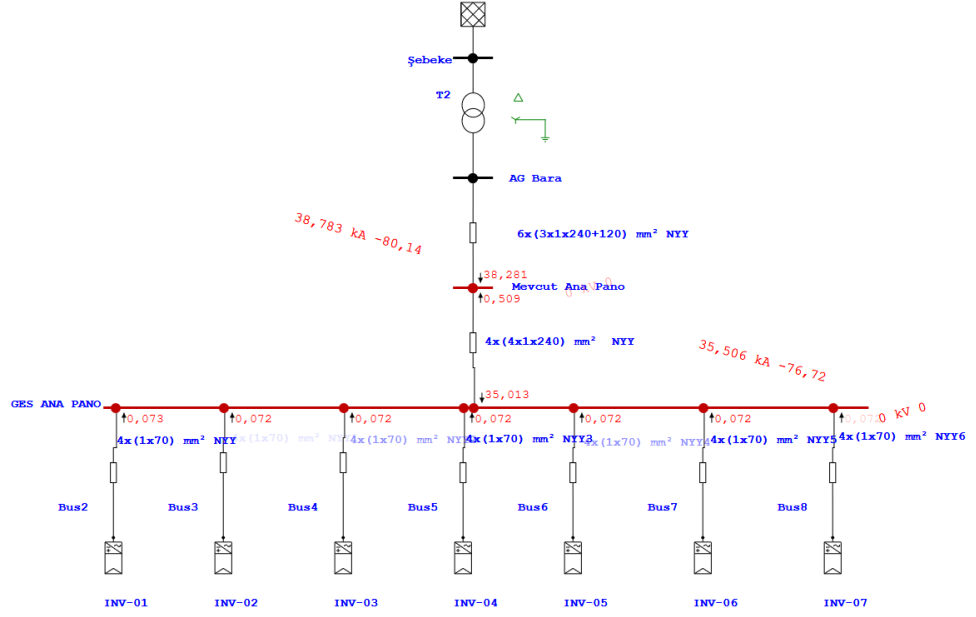
$$151,94 A \leq 175 A \leq 218 A$$

olduğu için seçilmiş olan koruma cihazı uygundur denilebilir.

Sistemin B bölümünde ise, 4 x 1600A 50kA motorlu TMS kullanılmıştır. B kısmının işletme akımı Denklem 4.6'ya göre 1063.54 A olarak hesaplanmıştı. Koruma cihazının nominal akımı 1600 A, kullanılan kablonun akım taşıma kapasitesi ise Şekil 4.12'ye göre $503 \times 4 = 2012 A$ olarak bulunmuştu. Dolayısıyla;

$$1063,54 A \leq 1600 A \leq 2012 A$$

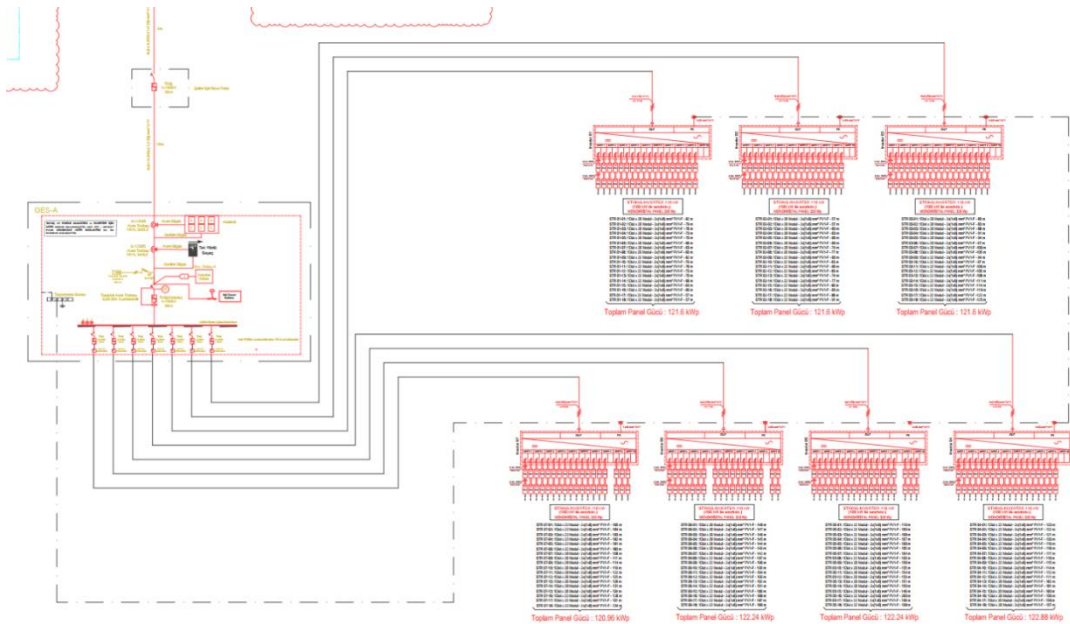
ETAP yazılımının Demo versiyonu kullanılarak sistemin A ve B bölümleri için üç kutuplu kısa devre akımları hesaplanmış seçilen koruma cihazlarının kısa devre açma kapasite değerlerinin (A bölümü için TMS 36 kA, B bölümü için TMS 50 kA) uygunluğu incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.13: ETAP yazılımı üç kutuplu kısa devre akım değerleri

ETAP yazılımında hesaplanan değerlere göre, sistemin A bölümünde 35,506 kA değerinde ve B bölümünde ise 38,783 kA değerinde kısa devre akımı belirlenmiştir. Bu değerler A ve B bölümleri için seçilmiş olan koruma cihazlarının kısa devre kesme kapasitesi değerlerinden düşük olduğu için seçilmiş olan koruma cihazları kısa devre kesme kapasitesi yönünden uygundur denilebilir.

Aşağıda (Şekil 4.14) sisteme ait tek hat şeması verilmiştir.

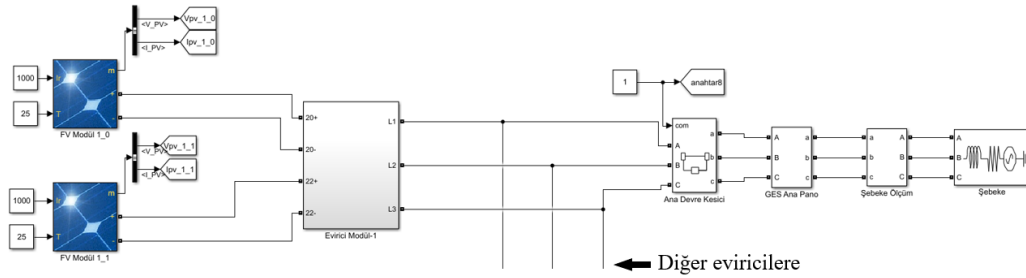


Şekil 4.14: Sistem tek hat şeması

4.3 Sistemin MATLAB/Simulink Benzetimi

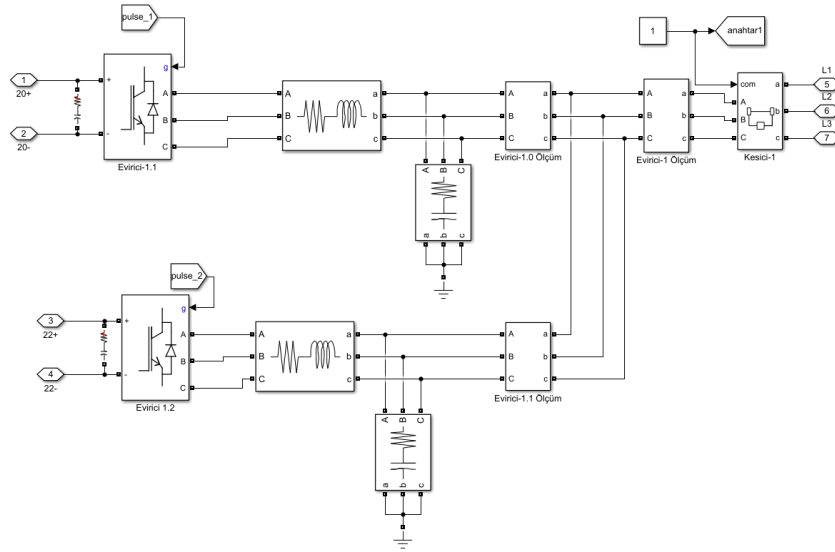
Sistemde bilindiği üzere 7 adet evirici ve bu eviricilere bağlı toplam DC gücü 120-123 kWp arası değişen ve her evirici girişinde toplam 18 adet paralel dizi ve her bir paralel dizide 20 ve 22'şer adet seri modüllerden oluşan diziler bulunmakta idi. 20 ve 20'şerli diziler, ayrı olarak modellenmiş ve güç paylaşımı yapılarak eviriciler ile irtibatlandırılmıştır. Sistemde bulunan 7 adet evirici paralellenenek GES ana panosuna bağlanmış, daha sonra da şebeke modeline bağlanmıştır. Her bir evirici çıkış gücü 100 kW olacak şekilde sistemin benzetimi yapılmıştır.

Şekil 4.15'te incelenen sistemin MATLAB/Simulink ortamındaki benzetim yapısının 1 no.lu evirici için olan kısmı görülmektedir. Bu yapıya benzer şekilde, 7 adet evirici yapısı paralellenenek sistem oluşturulmuştur. Sistem Şekil 3.6 (a)'da gösterildiği gibi tek aşamalı şekilde modellenmiştir. DC-DC dönüştürücü kullanılmamıştır. Sistem FV dizi modeli, evirici yapısı, filtre yapısı ve şebeke modelinden oluşmaktadır. Bu yapıda FV modüllerin karakteristiklerinin girilmesi kütüphanedeki FV dizi modeli, eviriciler için bir modül ve şebekeye entegrasyon için yine bir modül kullanılmıştır.



Şekil 4.15: Sistemin 1 no.lu eviricisine ait yapının Matlab/Simulink modeli

Evirici Modül-1 bloğunun iç yapısına baktığımızda, 20 ve 20'şerli diziler, ayrı olarak modellenmiş ve güç paylaşımı yapılarak irtibatlandırılmıştır. Şekil 4.16'da bu yapı gösterilmiştir.



Şekil 4.16: Sistemin 1 no.lu eviricisine ait yapının Matlab/Simulink modeli

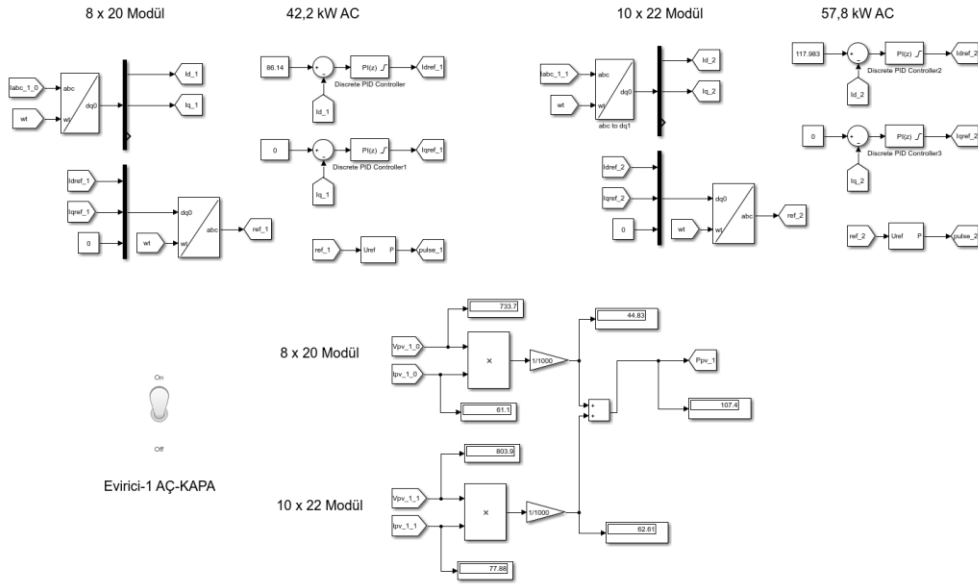
Sistemde bilindiği üzere, Phono Solar PS320M-20/U model FV modül kullanılmıştır. Bu modüle ait elektriksel karakteristikler MATLAB Simulink kütüphanesindeki FV dizi yapısına girilmiştir. Bu parametreler Şekil 4.17’de verilmiştir.

Şekil 4.17: MATLAB Simulink FV modül veri giriş ekranı

Benzetim için FV dizilere 1000 W/m^2 ışınım, sabit sıcaklık (25°C) değerleri uygulanmıştır. Işınım ve sıcaklık değerleri daha sonra kullanıcı tarafından manuel olarak da değiştirilebilmektedir.

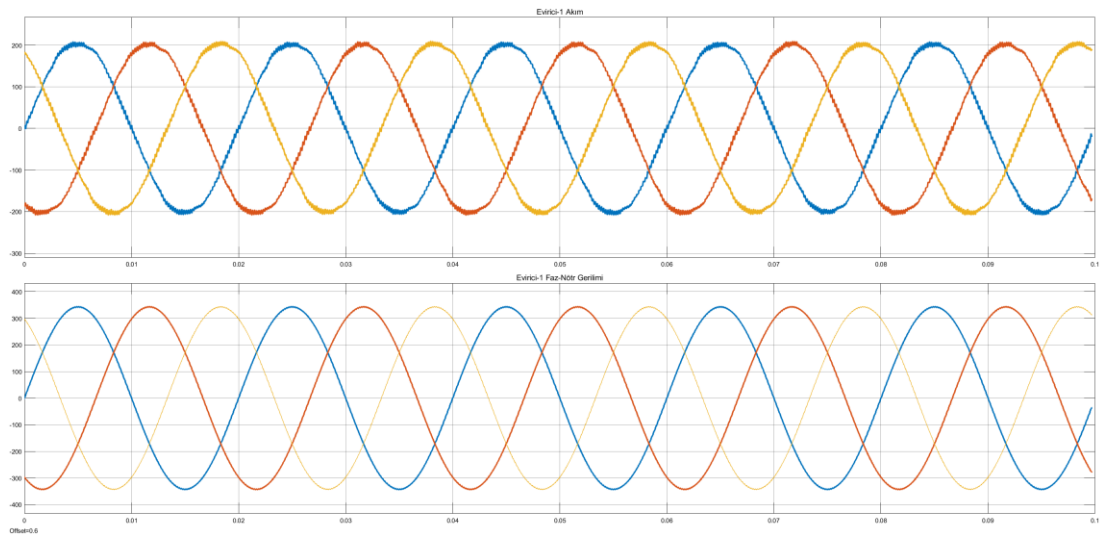
Sistemde her bir evirici için akım tabanlı kontrol algoritması oluşturulmuştur. Eviricinin çıkış gücü bu kontrol algoritması ile kullanıcı tarafından manuel olarak

ayarlanabilmektedir. Bunlarla birlikte, sistemin şebekeye entegrasyonunun sağlanması için PLL (Phase Locked Loop) yapısından yararlanılmıştır. Bir numaralı eviriciye ait kontrol şeması ve çalışma durumunda eviriciye bağlı olan dizilere ait akım, gerilim ve güç değerleri Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



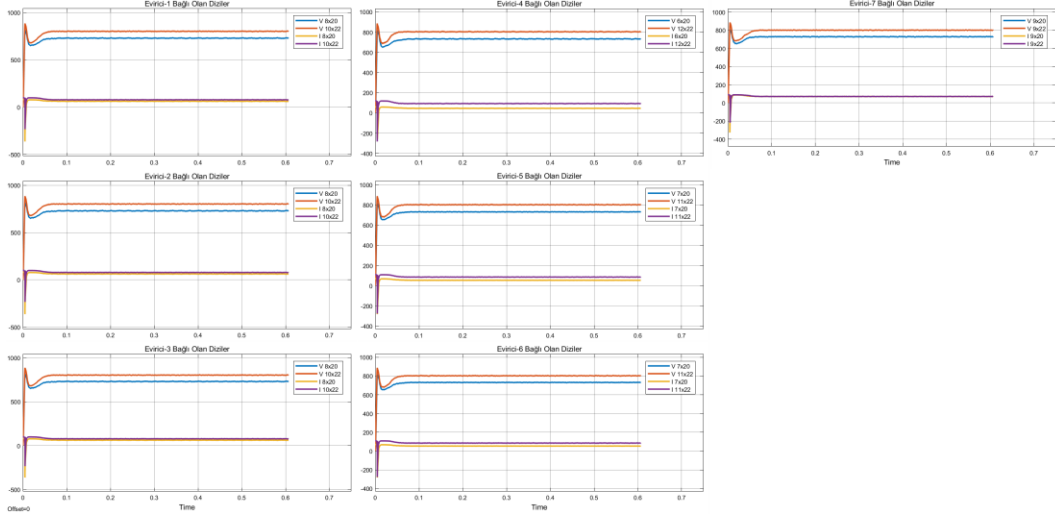
Şekil 4.18: 1 no.lu evirici için kontrol yapısı ve eviriciye bağlanan dizilerin akım, gerilim ve güç değerleri

Eviricilerin akım değeri Tablo 4.2’de verilen katalog değeri olan 144,4 A’ye ayarlanmış olup eviricinin nominal güçte çalışması sağlanmıştır. Aşağıdaki şekilde (4.19) 1 no.lu eviriciye ait çıkış akım ve gerilim grafikleri gösterilmiştir.



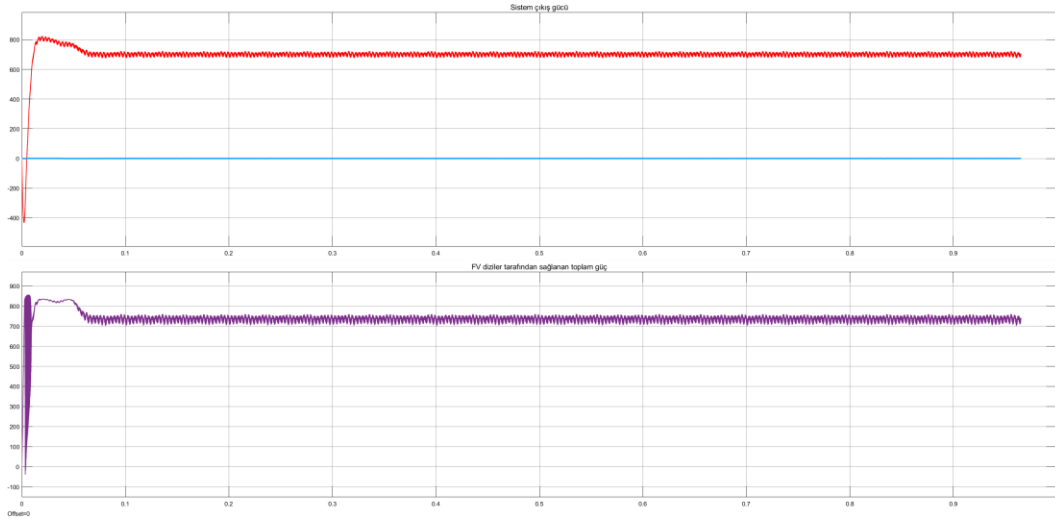
Şekil 4.19: 1 no.lu eviriciye ait çıkış akımı (üstte) ve faz-nötr gerilimi (altta) değerlerine ait grafikler

Evirici çıkışlarına ve ana panoya devre kesici eklenmiş olup, her bir evirici ve sistem manuel olarak kullanıcı tarafından açıp kapatılarak devreden çıkarılıp devreye alınabilmektedir. Şekil 4.20’de modüllere ait akım ve gerilim değerleri sunulmuştur.



Şekil 4.20: Her bir eviriciye bağlı olan FV dizilerin (20 ve 22’lik diziler) 1000 W/m² ışınım ve 25°C sıcaklık değerlerinde sistemin 100 kW gücünde çalışması esnasındaki akım ve gerilim değerleri

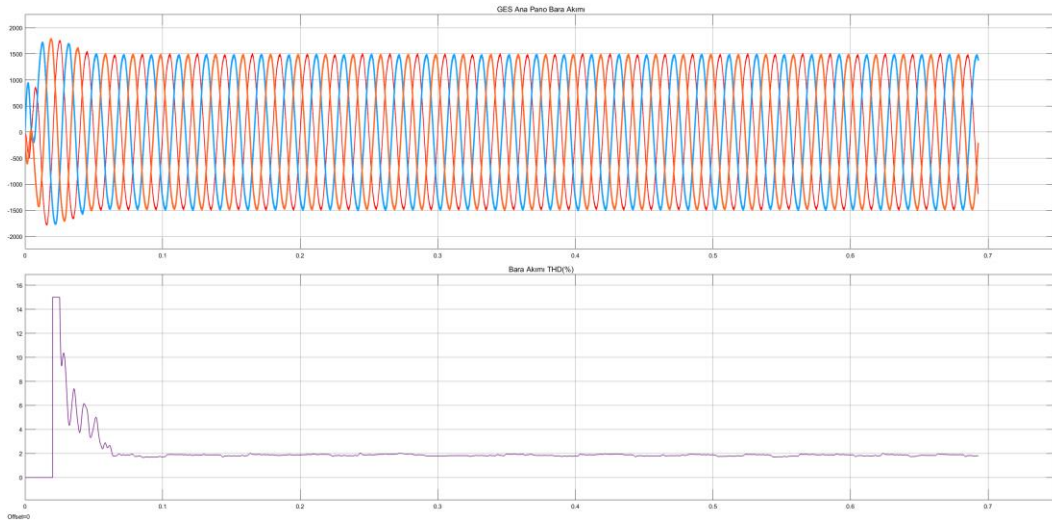
GES ana panosundan yapılan akım ve gerilim ölçümlerine sistemin AC çıkış gücü (700 kW) ve bu güç için, FV dizilerden sağlanan toplam DC güç Şekil 4.21’de sunulmuştur.



Şekil 4.21: Sistem toplam AC çıkış gücü (üstte) ve FV diziler tarafından sağlanan DC güç (aşağıda)

Şebekeye bağlı eviricilerde Tablo 3.1’e göre akımdaki toplam harmonik bozunumun %5’in altında olması istenmektedir. Şekil 4.22’de GES ana pano

barasındaki toplam akım ve toplam harmonik bozunum (%THD) değerlerinin grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.22: Ges ana panosu bara akımı ve akımdaki toplam harmonik bozunum(%THD)

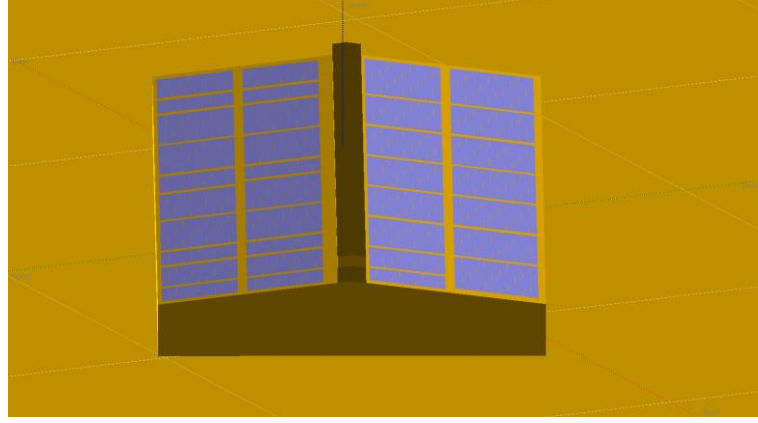
4.4 Sistemin PVsyst Benzetimi

Fotovoltaik hücreler ve dolayısıyla fotovoltaik modüller yapısı gereği özellikle sıcaklık ve ışınlım gibi çevre faktörlerinden etkilenmektedir. Gölgeleme olayı da fotovoltaik sistemlerin çalışmasını etkileyen önemli bir faktördür. Bir FV sistem gün boyu çalışırken güneş ışığının geliş açısına göre ve kurulduğu bölgenin fiziksel koşullarına göre farklı zaman dilimlerinde gölgeleme olayına maruz kalmaktadır. Bu faktörlerin dikkate alınması tasarımda ve ekipman seçimlerini de doğrudan etkilemekte olup büyük önem arz etmektedir.

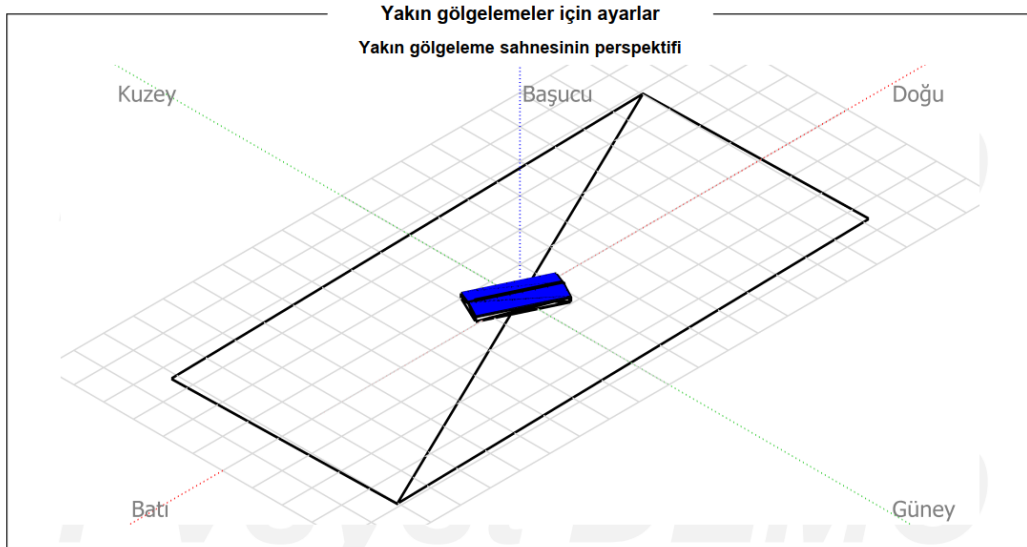
PVsyst benzeri FV sistem benzetimi yapabilen yazılımlar yardımı ile kurulacak olan bölgenin meteorolojik bilgileri alınarak bir yıl boyunca gerçek zamanlı olarak sistemin gölgeleme durumunu ve diğer çevre faktörlerini hesaba katarak benzetim yapılabilmekte ve günlük, aylık veya yıllık üretim miktarları ve bunun gibi birçok çıktı verilerini tahmin edilebilmektedir. Bu yazılımların kullanılması ayrıca, sistemin kurulmadan önce incelenmesi ve kurulacak bölgede çalışma durumunun gözlemlenebilmesi açısından da önemlidir.

İlk olarak Sketchup programı yardımı ile üç boyutlu şekilde gerçeğe yakın boyutlarda Sena Kablo fabrikasının modeli oluşturulmuş olup, çatı kısmına gerçeğe

yakın aralıklarda FV modüller yerleştirilmiştir. Daha sonra bu oluşturulan yapı, PVsyst yazılımına yüklenmiştir. Bu yapı Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Sena kablo fabrikasının konumu (enlem, boylam verileri) yazılım üzerinden seçilmiş olup, yazılım seçilen konuma en yakın olan meteoroloji istasyonundan belirli yıl aralıkları için olan güneşin geliş açısı, güneş ışınlıma değerleri ve sıcaklık gibi verileri kullanmaktadır. Şekil 4.24'te ise fabrikanın perspektif görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 4.23: PVsyst yazılımı üzerinden sena kablo fabrikasının ve çatı üzerindeki FV modüllerin görünümü



Şekil 4.24: PVsyst yazılımı üzerinden sistemin perspektifi

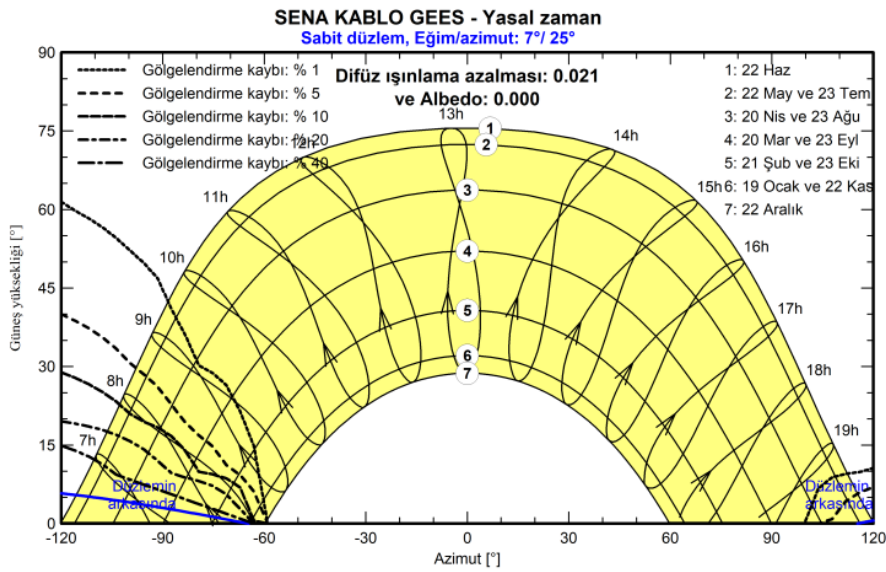
Benzetim işleminin yapılabilmesi için, diğer bir önemli husus FV modül ve evirici verilerinin PVsyst yazılımına girilmesidir. FV modüller için Tablo 4.1'de gösterilen teknik veriler ve Phono Solar (2020) 'de yazılan boyut ve katsayı gibi veriler de Şekil 4.25'te gösterilen FV modül için verilerin girildiği ekrana yazılmıştır. Evirici

için de Tablo 4.2’de sunulan veriler ışığında PVsyst yazılımının kendi kütüphanesinden de yararlanarak yazılmıştır.

Şekil 4.25: PVsyst yazılımı FV modül veri giriş ekranı

Şekil 4.26: PVsyst yazılımı evirici veri giriş ekranı

PVsyst yazılımı yardımı ile güneşten gelen ışınımın FV modüller üzerine düşüş açıları sistemin konumunun meteorolojik verilerine göre çıkarılabilmektedir. Şekil 4.27'de yönlendirme $7^\circ/25^\circ$ durumunda iken güneş yolu-zaman grafiği verilmiştir. Bu çıktıda değerler aylara göre verilmiş, aynı zamanda en uzun gece (21 Aralık) ve en uzun gündüz (21 Haziran) tarihlerindeki değerler de sunulmuştur. Bunlarla birlikte gölgelendirme kayıplarının hangi açılarda hangi seviyede olduğu da sunulmuştur. Bu sonuçlara göre, çevre koşullarının yıl içinde değişmediğini düşünürsek enerji üretim verimliliği olarak en iyi günün 21 Haziran olduğu görülebilir.



Şekil 4.27: Güneş yolu-zaman grafiği

Bilindiği üzere, sistemdeki eviricilerde MPPT girişlerine bağlanan FV dizilerde bulunan modül sayıları değişkenlik göstermekte idi. Bazı dizilerde 20, bazılarında ise 22 adet seri bağlı modül bulunmaktadır. Bu sebepten dolayı bu farklı yapılar benzetim yapılırken daha gerçekçi sonuç verebilmesi için birbirinden ayrılarak girilmiştir. Örneğin 1 no.lu eviriciye bağlı olan 20 adet seri modüle sahip olan diziler ile 22 adet seri modüle sahip olan diziler güç paylaşımı yapılarak birbirinden ayrılmıştır. Sistemde bulunan 7 adet eviriciye bağlı olan diziler öncelikle bulunduğu konuma göre (kuzey veya güney) ayrılmış daha sonra 20 veya 22 adet seri bağlı modüllere sahip dizi sayıları olarak ayrılmıştır. Örneğin; Güney 1-20-8, güney yönünde bulunan 20 adet seri bağlı modüle sahip olan 8 adet dizi yapısını temsil etmektedir. Sistem toplamda 15 parçadan oluşmaktadır.



Şekil 4.28: Sistemdeki FV modüllerin bağlı oldukları eviricilere göre renklendirilerek sınıflandırılması

Şekil 4.28’te sistemdeki FV modüller bağlı oldukları eviricilere göre renklendirilmiştir. Şekle göre; kırmızı renkle gösterilen 1 no.lu eviriciye ait, turuncu renkle gösterilen 2 no.lu eviriciye ait, sarı renkle gösterilen 3 no.lu eviriciye ait, mor renkle gösterilen 4 no.lu eviriciye ait, koyu mavi ile gösterilen 5 no.lu eviriciye ait, açık mavi ile gösterilen 6 no.lu eviriciye ait ve yeşil renkle gösterilen FV modüller ise 7 no.lu eviriciye aittir.

Şekil 4.29’da benzetim için proje ve sistem özeti görülmektedir. Fotovoltaik modüller, bilindiği üzere kuzey ve güney tarafına olmak üzere iki farklı yönlendirme yapılmıştır. Yönlendirmede iki farklı açı değeri önem arz etmektedir. Bunlar; eğim açısı ve azimut açısıdır. Eğim açısı, FV modülün yer ile yaptığı açıdır. Azimut açısı ise, bir noktanın güneye olan açısal yönünü vermektedir.

Örnek sistem için modüllerin eğim açıları 7° , azimut açıları ise güney yönlendirmesi için 25° (batı), kuzey yönlendirmesi için -155° (doğu) olarak belirlenmiş ve PVsyst programına o şekilde girilmiştir.

Proje özeti			
Coğrafi konum	Konum	Proje ayarları	
Haciyüplü	Enlem	Albedo	0.20
Türkiye	Boylam		
	Rakım		
	Saat dilimi		
Hava durumu verileri			
Haciyüplü			
Meteonorm 8.0 (2004-2010), Sat=100% - Synthetic			

Sistem özeti			
Şebekeye bağlı sistem	Bina üzerinde	Kullanıcı ihtiyaçları	
Kolektör düzleminin yönlendirmesi	Yakın gölgelemeler	Sınırsız yükleme (şebeke)	
Sabit düzlemler 2 yönlendirme	Lineer gölgelemeler		
Eğim/azimut 7 / 25 °			
7 / -155 °			
Sistem bilgisi			
PV alanı	Invertör		
Panel sayısı	Öge sayısı		7 birim
Toplam nom. güç	Toplam nom. güç		700 kWac
	Şebeke güç sınırı		700 kWac
	Şebeke sınır Pnom oranı		1.219

Şekil 4.29: Benzetim için proje ve sistem özeti

Şekil 4.30'da 15 parçaya ayrılan sisteme ait veriler gösterilmiştir. İlk dört eviricinin 9 MPPT girişi, kalan 3 eviricinin ise 10 MPPT girişi kullanılmıştır.

Kolektör alanının özellikleri			
PV modül	PHONO SOLAR	Invertör	Huawei Technologies
Üretici	PHONO SOLAR	Üretici	Huawei Technologies
Model	PS320M-20/U	Model	SUN2000-100KTL-M1-400Vac_9MPPT
(Kullanıcı tarafından belirlenen parametreler)		(Kullanıcı tarafından belirlenen parametreler)	
birim gücü	320 Wp	birim gücü	100 kWac
PV modül sayısı	1524 birim	Invertör sayısı	4 birim
Nominal (STC)	488 kWp	Toplam güç	400 kWac
Alan #1 - Güney 1-20-8			
Yönlendirme	#1	Invertör sayısı	4 * MPPT 11% 0.4 adet
Eğim/Azimut	7/25 °	Toplam güç	42.2 kWac
PV modül sayısı	160 birim		
Nominal (STC)	51.2 kWp	Çalışma gerilimi	200-1000 V
Modül	8 Zincir x 20 Seri	Maks güç (=>30°C)	110 kWac
İşletme şartlarında (50°C)		Nom. güç oranı (DC:AC)	1.21
Pmpp	47.2 kWp		
U mpp	618 V		
I mpp	76 A		
Alan #2 - Güney 2-20-8			
Yönlendirme	#1	Invertör sayısı	4 * MPPT 11% 0.4 adet
Eğim/Azimut	7/25 °	Toplam güç	42.2 kWac
PV modül sayısı	160 birim		
Nominal (STC)	51.2 kWp	Çalışma gerilimi	200-1000 V
Modül	8 Zincir x 20 Seri	Maks güç (=>30°C)	110 kWac
İşletme şartlarında (50°C)		Nom. güç oranı (DC:AC)	1.21
Pmpp	47.2 kWp		
U mpp	618 V		
I mpp	76 A		

Şekil 4.30: Benzetim için oluşturulan sistem

Kolektör alanının özellikleri

Alan #3 - Güney 3-20-8			
Yönlendirme	#1		
Eğim/Azımut	7/25 °		
PV modül sayısı	160 btrm	Invertör sayısı	4 * MPPT 11% 0.4 adet
Nominal (STC)	51.2 kWp	Toplam güç	42.2 kWac
Modül	8 Zindır x 20 Serl		
İşletme şartlarında (50°C)			
Pmpp	47.2 kWp	Çalışma gerilimi	200-1000 V
U mpp	618 V	Maks güç (↔30°C)	110 kWac
I mpp	76 A	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.21
Alan #4 - Güney 1-22-10			
Yönlendirme	#1		
Eğim/Azımut	7/25 °		
PV modül sayısı	220 btrm	Invertör sayısı	5 * MPPT 12% 0.6 adet
Nominal (STC)	70.4 kWp	Toplam güç	57.8 kWac
Modül	10 Zindır x 22 Serl		
İşletme şartlarında (50°C)			
Pmpp	64.9 kWp	Çalışma gerilimi	200-1000 V
U mpp	680 V	Maks güç (↔30°C)	110 kWac
I mpp	95 A	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.22
Alan #5 - Güney 2-22-10			
Yönlendirme	#1		
Eğim/Azımut	7/25 °		
PV modül sayısı	220 btrm	Invertör sayısı	5 * MPPT 12% 0.6 adet
Nominal (STC)	70.4 kWp	Toplam güç	57.8 kWac
Modül	10 Zindır x 22 Serl		
İşletme şartlarında (50°C)			
Pmpp	64.9 kWp	Çalışma gerilimi	200-1000 V
U mpp	680 V	Maks güç (↔30°C)	110 kWac
I mpp	95 A	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.22
Alan #6 - Güney 3-22-10			
Yönlendirme	#1		
Eğim/Azımut	7/25 °		
PV modül sayısı	220 btrm	Invertör sayısı	5 * MPPT 12% 0.6 adet
Nominal (STC)	70.4 kWp	Toplam güç	57.8 kWac
Modül	10 Zindır x 22 Serl		
İşletme şartlarında (50°C)			
Pmpp	64.9 kWp	Çalışma gerilimi	200-1000 V
U mpp	680 V	Maks güç (↔30°C)	110 kWac
I mpp	95 A	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.22
Alan #7 - Kuzey 4-22-12			
Yönlendirme	#2		
Eğim/Azımut	7/-155 °		
PV modül sayısı	264 btrm	Invertör sayısı	6 * MPPT 11% 0.7 adet
Nominal (STC)	84.5 kWp	Toplam güç	68.7 kWac
Modül	12 Zindır x 22 Serl		
İşletme şartlarında (50°C)			
Pmpp	77.9 kWp	Çalışma gerilimi	200-1000 V
U mpp	680 V	Maks güç (↔30°C)	110 kWac
I mpp	115 A	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.23

Şekil 4.31: Benzetim için oluşturulan sistem (devam)

Kolektör alanının özellikleri

Alan #8 - Kuzey 4-20-6

Yönlendirme	#2		
Eğim/Azımut	7/-155 °		
PV modül sayısı	120 birim	İnvertör sayısı	3 * MPPT 10% 0.3 adet
Nominal (STC)	38.4 kWp	Toplam güç	31.2 kWac
Modül	6 Zincir x 20 Seri		
İşletme şartlarında (50°C)		Çalışma gerilimi	200-1000 V
Pmpp	35.4 kWp	Maks güç (=>30°C)	110 kWac
U mpp	618 V	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.23
I mpp	57 A		

PV modül

Üretici	PHONO SOLAR
Model	PS320M-20/U
(Kullanıcı tarafından belirlenen parametreler)	
birim gücü	320 Wp
PV modül sayısı	1142 birim
Nominal (STC)	365 kWp

İnvertör

Üretici	Huawei Technologies
Model	SUN2000-100KTL-M1-400Vac
(Orijinal PVsyst veritabanı)	
birim gücü	100 kWac
İnvertör sayısı	3 birim
Toplam güç	300 kWac

Alan #9 - Kuzey 5-22-11

Yönlendirme	#2		
Eğim/Azımut	7/-155 °		
PV modül sayısı	242 birim	İnvertör sayısı	6 * MPPT 11% 0.6 adet
Nominal (STC)	77.4 kWp	Toplam güç	63.4 kWac
Modül	11 Zincir x 22 Seri		
İşletme şartlarında (50°C)		Çalışma gerilimi	200-1000 V
Pmpp	71.4 kWp	Maks güç (=>30°C)	110 kWac
U mpp	680 V	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.22
I mpp	105 A		

Alan #10 - Kuzey 5-20-7

Yönlendirme	#2		
Eğim/Azımut	7/-155 °		
PV modül sayısı	140 birim	İnvertör sayısı	4 * MPPT 9% 0.4 adet
Nominal (STC)	44.8 kWp	Toplam güç	36.7 kWac
Modül	7 Zincir x 20 Seri		
İşletme şartlarında (50°C)		Çalışma gerilimi	200-1000 V
Pmpp	41.3 kWp	Maks güç (=>30°C)	110 kWac
U mpp	618 V	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.22
I mpp	67 A		

Alan #11 - Kuzey 6-20-7

Yönlendirme	#2		
Eğim/Azımut	7/-155 °		
PV modül sayısı	140 birim	İnvertör sayısı	4 * MPPT 9% 0.4 adet
Nominal (STC)	44.8 kWp	Toplam güç	36.7 kWac
Modül	7 Zincir x 20 Seri		
İşletme şartlarında (50°C)		Çalışma gerilimi	200-1000 V
Pmpp	41.3 kWp	Maks güç (=>30°C)	110 kWac
U mpp	618 V	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.22
I mpp	67 A		

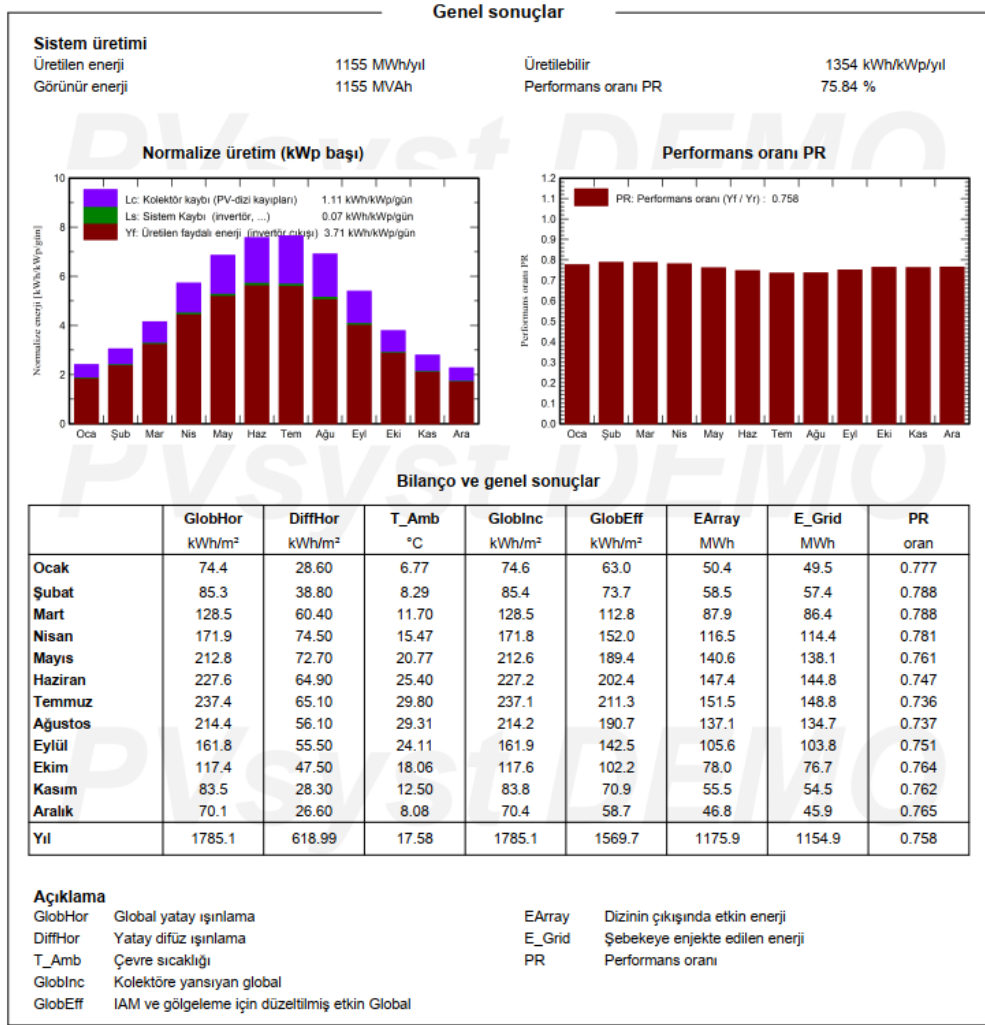
Şekil 4.32: Benzetim için oluşturulan sistem (devam)

Kolektör alanının özellikleri

Alan #12 - Kuzey 6-22-11			
Yönlendirme	#2		
Eğim/Azimet	7/-155 °		
PV modül sayısı	242 birim	Invertör sayısı	6 * MPPT 11% 0.6 adet
Nominal (STC)	77.4 kWp	Toplam güç	63.4 kWac
Modül	11 Zincir x 22 Seri		
İşletme şartlarında (50°C)			
Pmpp	71.4 kWp	Çalışma gerilimi	200-1000 V
U mpp	680 V	Maks güç (=>30°C)	110 kWac
I mpp	105 A	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.22
Alan #13 - Güney 7-20-9			
Yönlendirme	#1		
Eğim/Azimet	7/25 °		
PV modül sayısı	180 birim	Invertör sayısı	5 * MPPT 10% 0.5 adet
Nominal (STC)	57.6 kWp	Toplam güç	47.6 kWac
Modül	9 Zincir x 20 Seri		
İşletme şartlarında (50°C)			
Pmpp	53.1 kWp	Çalışma gerilimi	200-1000 V
U mpp	618 V	Maks güç (=>30°C)	110 kWac
I mpp	86 A	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.21
Alan #14 - Güney 7-22-3			
Yönlendirme	#1		
Eğim/Azimet	7/25 °		
PV modül sayısı	66 birim	Invertör sayısı	2 * MPPT 9% 0.2 adet
Nominal (STC)	21.12 kWp	Toplam güç	17.5 kWac
Modül	3 Zincir x 22 Seri		
İşletme şartlarında (50°C)			
Pmpp	19.47 kWp	Çalışma gerilimi	200-1000 V
U mpp	680 V	Maks güç (=>30°C)	110 kWac
I mpp	29 A	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.21
Alan #15 - Kuzey 7-22-6			
Yönlendirme	#2		
Eğim/Azimet	7/-155 °		
PV modül sayısı	132 birim	Invertör sayısı	3 * MPPT 12% 0.3 adet
Nominal (STC)	42.2 kWp	Toplam güç	34.9 kWac
Modül	6 Zincir x 22 Seri		
İşletme şartlarında (50°C)			
Pmpp	38.9 kWp	Çalışma gerilimi	200-1000 V
U mpp	680 V	Maks güç (=>30°C)	110 kWac
I mpp	57 A	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.21
Total PV gücü			
Nominal (STC)	853 kWp	Invertör toplam gücü	
Toplam	2666 modül	Toplam güç	700 kWac
Panel yüzeyi	4337 m ²	Invertör sayısı	7 birim
Hücre yüzeyi	3930 m ²	Nom. güç oranı	0.0 kullanılmıyor
			1.22

Şekil 4.33: Benzetim için oluşturulan sistem (devam)

Oluşturulan bu sistem için PVsyst yazılımı sonucunda ön görülen sonuçlar ve aylık bilanço değerleri Şekil 4.34'te sunulmuştur.



Şekil 4.34: Sistem için ön görülen sonuçlar

Şekil 4.34'te yazılım tarafından sistemin 1 sene çalışma sonucu ön görülen sonuçlar aylık olarak gösterilmiştir. Sunulan sonuçlara göre; yıllık üretilen enerjinin 1155 MWh olduğu ve yıllık üretililecek enerjinin 1354 kWh/kWp olduğu tahmin edilmektedir. Performans oranı, şebekeye verilen enerjinin üretililecek enerjiye oranıdır. Şu şekilde hesaplanmaktadır;

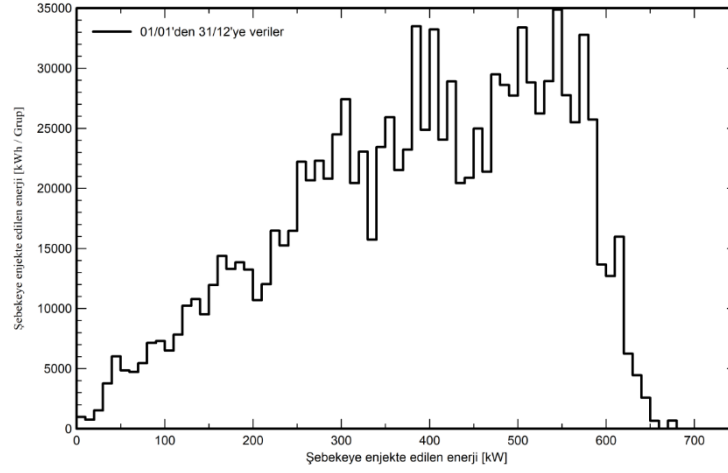
$$PR = E_{grid} / (GlobInc \times P_{pv}) \quad (4.12)$$

Burada;

E_{grid} = Şebekeye aktarılan enerji (kWh)

$GlobInc$ = Modüller üzerine düşen güneş ışınım değeri (kWh/m²)

P_{PV} = FV sistemin nominal çıkış gücü (kW)



Şekil 4.35: Şebekeye aktarılan enerji-güç dağılımı

Şekil 4.35'te şebekeye aktarılan enerji-güç dağılımının bir sene boyunca olan tahmini değerleri gösterilmiştir. Şekilde (4.35) x ekseninde şebekeye aktarılan aktif güç değerleri(kW), y ekseninde ise bu güç değerlerinde çalışma durumunda şebekeye aktarılan enerji miktarı (kWh) cinsinden sunulmuştur.

Şekil 4.37'de ise PVsyst yazılımı tarafından sunulan yıllık kayıp yüzdeleri, kayıplar diyagramında gösterilmiştir. Kayıpların belirlenmesi için yazılıma girilmesi için gerekli olan veriler kullanıcı tarafından girilebildiği gibi istenirse yazılım tarafından ayarlanan varsayılan (default) değerler de seçilebilir. Bu veriler arasında önemli yere sahip olan kirlenme kaybı faktörü, kurulu sistemin bulunduğu konumun hava şartlarına göre uygun seçilmesi gerekmektedir. Bu değer yıllık %8 olarak belirlenmiş ve yazılıma o şekilde girilmiştir. Dikkat edilmesi gereken diğer bir husus da LID (Light Induced Degradation) kayıplarıdır. Bu kayıplar, kristal yapılı FV modüllerde güneşe ilk maruz kalma durumunda ortaya çıkan kayıplardır. Bunlarla ilgili standartlar modül üreticileri tarafından belirlenir. Standart olarak %1-%3 arasındadır. Bu değer, Phono Solar (2020) kataloğundan alınarak %3 olarak belirlenmiş ve yazılıma o şekilde girilmiştir.

Tablo 4.4 - 4.10 arasındaki FV dizilerin DC gerilimi düşümü ve metraj bilgileri sunulmuş idi. Tablo 4.11'de ise eviricilere ait AC gerilim düşümü bilgileri ve metraj bilgileri sunulmuştur. Bu veriler PVsyst yazılımına dahil edilmiş olup, simülasyonun

daha gerçekçi olması amaçlanmıştır. Bu verilerin giriş ekranı Şekil 4.36’da sunulmuştur. Bu kayıp değerleri Şekil 4.36’da gösterilmiştir.

PV alan kayıpları için parametreler

İlgili alt alan: Güney 1-20-8

Tüm alt alanlara uygula

Termal parametre | Omik kayıplar | Modüllerin kalitesi - LID - Uyumsuzluk | Kirlenme kaybı | IAM kayıpları | Yardımlar | Yaşlanma | Kullanılmazlık | Spektral düzeltme

DC devre: alt alan için omik kayıplar

Tanımlama modu

Global kablolu direnci 76.0 mΩ Hesaplanmış ?

STC'de kayıp oranı 0.86 % Varsayılan

Seri diyotun gerilim düşüşü 0.0 V Varsayılan

İnvertörden sonra AC kayıpları

AC devre: invertör 'den enjeksiyon noktasına (invertör başına)

AC devresinin omik kaybını tanımla invertör başına ?
 Tüm sistem

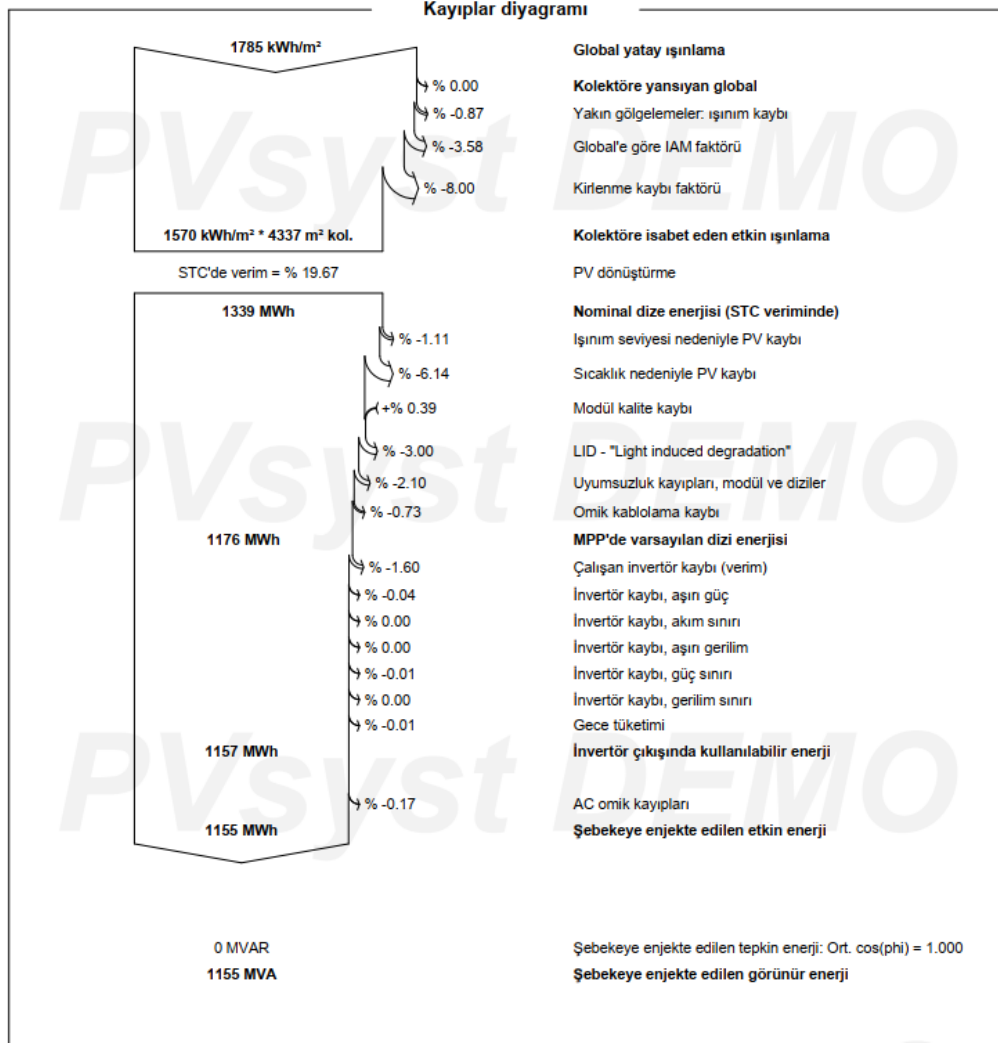
İnvert. den enjek. te uzunluk 20.4 m Kablo kesiti
STC'de kayıp oranı 0.41 % ?
70 mm² ?

STC: P_{ac} = 119.8 kW, V_{ac} = 400 V Tri, I = 172.9 A
STC'de gerilim düşüşü 1.6 V (% 0.41)

Bir veya daha fazla OG trafosu kullanılır
 YG trafo kullan

Kayıp grafiği İptal OK

Şekil 4.36: PVsyst tarafından sunulan kayıplar veri girişi ekranı



Şekil 4.37: PVsyst tarafından sunulan kayıplar diyagramı

5. ŞEBEKE BAĞLANTILI ÖRNEK BİR SİSTEMİN İNCELENMESİ VE SAHA ÖLÇÜMLERİ

Hali hazırda kurulu olan 700 kW Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem sahada incelenmiş ve gerekli ölçümler yapılmıştır. Eviricilerin çıkışındaki (evirici paralelleme panosunda) akım, gerilim ve harmonik gibi temel ölçümler yapılmıştır. FV sistem için ise, FV dizi açık devre gerilimi, FV dizi kısa devre akımı ve FV hücre – modül çerçeve arası izolasyon direncinin ölçümü yapılmıştır.

Evirici paralelleme panosunda Thytronic Şebeke koruma rölesi bulunmaktadır. Bu röle, koruma görevinin haricinde eviricileri Şebekeden ayıran kesiciyi kontrol etmektedir. Bu röle herhangi bir arıza durumunda eviricileri Şebekeden ayırabildiği gibi manuel olarak da bakım vb. gibi durumlar için el ile ayırma işlemi gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 5.1: Thytronic Şebeke koruma rölesi

5.1 GES Ana Panosunda Yapılan Ölçümler

Bilindiği üzere sistemde 7 adet 100 kW gücünde evirici bulunmakta idi. Bu eviriciler, ges ana panosunda paralellendirilerek şebekeye entegrasyonu sağlanmıştır. Bu panodaki ölçümler 05.06.2021 tarihinde Fluke 435 güç kalitesi analizörü ile gerçekleştirilmiştir.



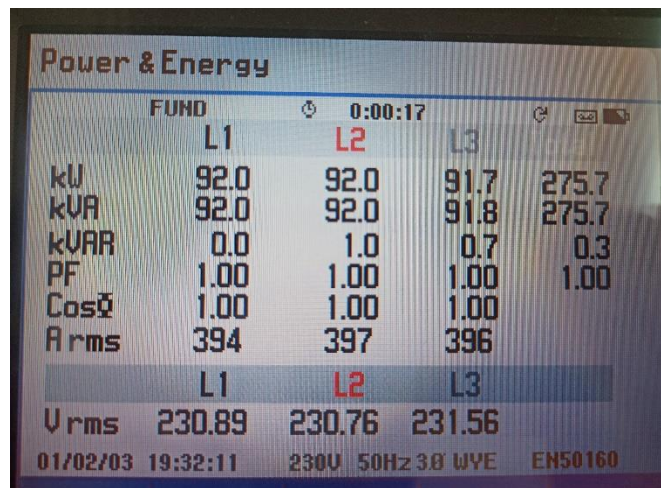
a)



b)

Şekil 5.2: Sistem çıkışı için güç kalitesi ölçüm düzeneği a) Fluke 435 ölçüm cihazı bağlantıları b) Ges ana pano akım ve gerilim probu bağlantıları

Sistem çıkışında ölçülen akım, gerilim ve güç değerleri Şekil 5.3'te verilmiştir.

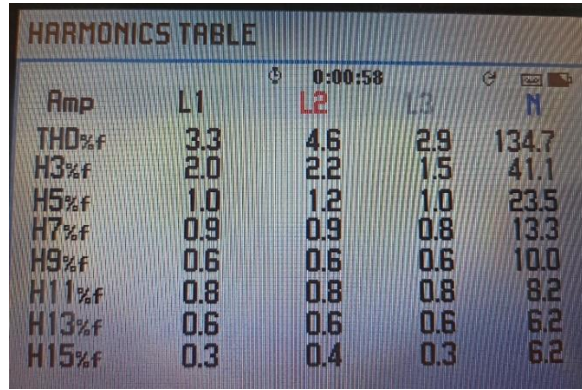


Power & Energy				
FUND	L1	L2	L3	
kW	92.0	92.0	91.7	275.7
kVA	92.0	92.0	91.8	275.7
kVAR	0.0	1.0	0.7	0.3
PF	1.00	1.00	1.00	1.00
Cosφ	1.00	1.00	1.00	
A rms	394	397	396	
	L1	L2	L3	
V rms	230.89	230.76	231.56	
01/02/03 19:32:11 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				

Şekil 5.3: FV sistem çıkışı ölçüm değerleri

Şekil 5.3'e göre ölçüm yapılan an itibariyle, sistemin çıkış gücü 275,7 kW, ve güç faktörünün (PF) 1 olduğu görülmektedir. Bununla birlikte her faza ait faz-nötr gerilimlerinin ve akım değerlerinin etkin değerleri verilmiştir.

Diğer önemli bir husus, sistem çıkışındaki harmoniklerin incelenmesidir. Sistem çıkışındaki akım ve gerilimdeki harmonik değerleri sistem şebekeye bağlı ve yüklü durumda iken ölçülmüştür. IEEE 1547 standardına göre (Tablo 3.1), FV evirici çıkış akımındaki toplam harmonik bozunum (THD) değeri %5'in altında olması istenmektedir. Yine aynı standarda göre 2-10 no.lu arasındaki harmonik değerlerinin %4'ün altında, 11-16 no.lu arasındaki harmoniklerin değerlerinin ise %2'in altında olması istenmektedir. Şekil 5.4'te sistem çıkışındaki her bir faza ait akımdaki harmonik değerleri görülmektedir.



Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	3.3	4.6	2.9	134.7
H3%f	2.0	2.2	1.5	41.1
H5%f	1.0	1.2	1.0	23.5
H7%f	0.9	0.9	0.8	13.3
H9%f	0.6	0.6	0.6	10.0
H11%f	0.8	0.8	0.8	8.2
H13%f	0.6	0.6	0.6	6.2
H15%f	0.3	0.4	0.3	6.2

Şekil 5.4: Sistem çıkış akımındaki harmonik değerleri

Şekil 5.4'te verilen değerlere göre faz başına toplam harmonik bozunum değerleri (THD) %5'in altında görülmektedir. Üçüncü, beşinci, yedinci ve dokuzuncu harmonik değerleri %4'ün altında görülmektedir. On birinci ve on beşinci harmonik değerleri ise %2'nin altında görülmektedir. Dolayısıyla standartlara uygun olduğu söylenebilir.

IEEE 519 standardına ölçüm yapılan baranın gerilim seviyesine göre (≤ 1 kV) sistemler için gerilimdeki toplam harmonik bozunum %8'in altında olması istenmekte, bireysel harmonikler içinse maksimum %5 olması istenmektedir (Matre 2020). Şekil 5.5'te her bir faza ait gerilimdeki harmonik değerleri görülmektedir.

HARMONICS TABLE				
Volt	L1	L2	L3	N
THD% _f	4.2	4.1	4.2	92.9
H3% _f	0.1	0.1	0.3	30.1
H5% _f	4.1	4.0	4.1	22.1
H7% _f	0.4	0.4	0.4	23.6
H9% _f	0.1	0.1	0.2	46.9
H11% _f	0.8	0.6	0.8	19.6
H13% _f	0.5	0.5	0.4	17.4
H15% _f	0.1	0.2	0.1	33.7

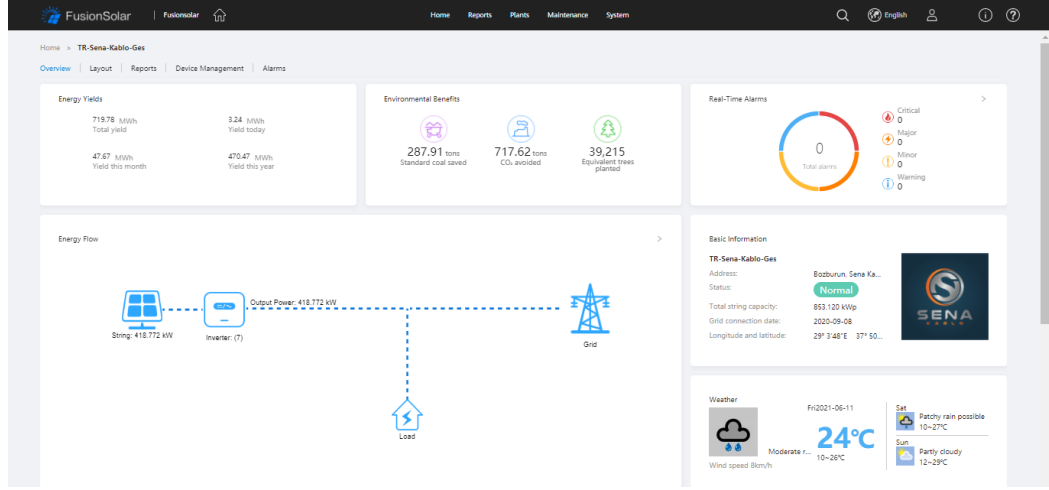
01/02/03 19:35:08 230V 50Hz 38 WVE EH50160

Şekil 5.5: Sistem çıkış gerilimindeki harmonik değerleri

Şekil 5.5'te görülen ölçüm değerlerine göre, her bir faza ait gerilimdeki toplam harmonik bozunum değerleri %8'in altında görülmektedir. Bireysel harmoniklerin ise (Üçüncü, beşinci gibi) %5'in altında olduğu görülmektedir. Yine sistemin standartlara uygun olduğu söylenebilir.

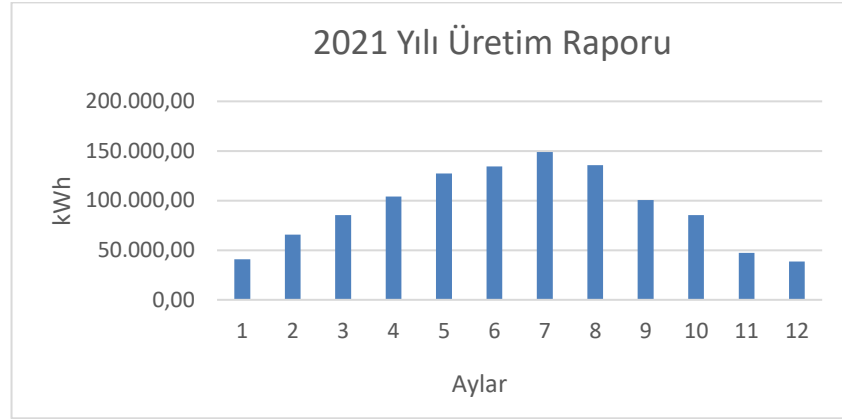
5.2 Fusion Solar Uzaktan İzleme Sistemi

Eviricilerin şebekeye uyumu ve devreye alınmasından sonra sisteme ait elektriksel veriler internet üzerinden uzaktan izlenebilmektedir. Şekil 5.6'de Fusion Solar izleme sisteminin ana ekranı görülmektedir. Ana ekranda sistemin anlık çalışma durumu, anlık ürettiği enerji miktarının dışında şu ana kadar üretilen enerji miktarı, o ay için üretilen enerji miktarı, haftalık ve günlük üretilen enerji miktarları gözlemlenebilmektedir. Ayrıca çevre kirliliğine duyarlılık yaratması için sistemin çalışma süresi boyunca engellenen kömür kullanım miktarı, karbondioksit salınım miktarı ve eşdeğer dikilen ağaç miktarı gibi veriler de sunulmuştur.



Şekil 5.6: Fusion Solar uzaktan izleme sistemi ana ekranı

Sistemde üretilen elektrik enerjisi miktarı, sistemin kurulduğu andan itibaren aylık olarak rapor olarak gözlemlenebilmektedir. Şekil 5.7’de 2021 yılı için üretim değerleri grafik şeklinde verilmiştir.



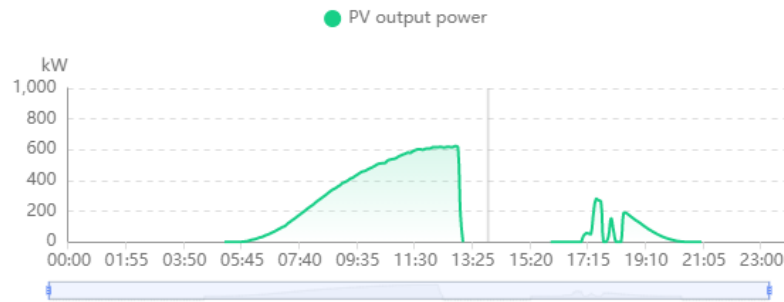
Şekil 5.7: 2021 yılı için aylık üretilen enerji raporu

Fusion Solar uzaktan izleme sistemi üzerinden 2020 ve 2021 yılları için aylık üretilen enerji değerleri Tablo 5.1’de sunulmuştur.

Tablo 5.1: 2021 yılı için üretilen enerji raporu

	Tarih	Üretilen Enerji (kWh)	Özel Üretim (kWh/kWp)
1	2021-01	40.758,35	47,78
2	2021-02	65.548,05	76,83
3	2021-03	85.231,76	99,91
4	2021-04	103.997,34	121,90
5	2021-05	127.266,73	149,18
6	2021-06	134.367,52	157,50
7	2021-07	148.872,32	174,50
8	2021-08	135.599,75	158,95
9	2021-09	100.607,17	117,93
10	2021-10	85.304,06	99,99
11	2021-11	47.225,70	55,36
12	2021-12	38.687,22	45,35
	TOPLAM	1.113.465,97	1305,17

Sistem üzerinden günlük üretilen enerji miktarı da saatlik olarak gözlemlenebilmektedir. Şekil 5.8’de 05.06.2021 tarihine ait saatlik üretim raporu sunulmuştur. Şekil üzerinde ölçüm yapılan saat aralığı (13.15-17.15) da görülmektedir.



Şekil 5.8: 05.06.2021 tarihli günlük enerji üretim raporu

Sistem üzerinden ayrıca her bir eviriciye ait anlık çalışma durumu, gerilim, akım, frekans, güç faktörü gibi veriler de gözlemlenebilmektedir. Örnek olarak 5 no.lu eviriciye ait anlık veriler Şekil 5.9’da sunulmuştur. Her bir eviriciye bağlı olan FV dizilerin gerçek zamanlı olarak maksimum güç gerilimi (V_{mpp}) ve maksimum güç akımı (I_{mpp}) değerleri de gözlenebilmektedir.

❖ Inverter status	Grid-tied	❖ Yield today	477.27 kWh	❖ Total yield	95853.24 kWh
❖ Active power	55.336 kW	❖ Reactive power	-0.039 kvar	❖ Inverter rated power	100.000 kW
❖ Power factor	1.000	❖ Grid frequency	49.99 Hz	❖ Inverter startup time	2021-06-11 06:54:34
❖ Inverter shutdown time	2021-06-10 20:38:33	❖ Output mode	Three-phase four-wire system	❖ Grid phase A current	79.830 A
❖ Grid phase B current	79.949 A	❖ Grid phase C current	80.059 A	❖ Grid phase A voltage	232.5 V
❖ Grid phase B voltage	229.3 V	❖ Grid phase C voltage	232.0 V		
Basic Information					
❖ Device name	Inverter 5	❖ Device type	Inverter	❖ Plant name	TR-Sena-Kablo-Ges
❖ SN	672019006484	❖ Device replacement record	-	❖ Plant address	Bozburun, Sena Kablo San. Ve Tic. Ltd. Şti...
❖ Model	SUN2000-100KTL-M1	❖ Software version	V500R001C005PC112		

Şekil 5.9: 5 no.lu eviriciye ait elektriksel veriler

5.3 Solar Test Cihazı Ölçümleri

Şebeke bağlantılı sistemin FV dizi – evirici arasındaki kısmının ölçümleri Seaward Solar Installation PV150 solar test cihazı ile 05.06.2021 tarihinde ölçülmüştür. Bu ölçüm cihazı ile FV dizi açık devre gerilimi (V_{oc}), FV dizi kısa devre akımı (I_{sc}) ve FV dizi çerçeve arası izolasyon direncinin (R_{iso}) ölçümü yapılmıştır. Yapılan ölçümler her FV dizi için yapılmış olup tüm ölçüm sonuçları raporlanmıştır. Şekil 5.10’da örnek olarak 3 no.lu eviriciye ait 8 no.lu dizinin ölçümü için kurulan sistem sunulmuştur.



Şekil 5.10: Örnek bir FV diziyeye ait ölçüm için kurulan sistem

Ölçüm sonucunda, üçüncü eviriciye ait 20 adet seri bağlı modülden oluşan 8 no.lu dizinin açık devre gerilimi 720 V, (katalog değerine göre STC’de 820.2 V) kısa

devre akımı 8.81 A (katalog değerine göre STC’de 9.51 A) ve izolasyon direnci 1000 V test gerilimine göre 73 M Ω olarak ölçülmüştür.

FV dizilere ait maksimum güç akımı (I_{mpp}), dijital pens ampermetre yardımıyla ölçülmüş olup her bir diziye ait maksimum güç akımı raporlanmıştır. Dizilere ait maksimum güç gerilimi (V_{mpp}) değerleri ise, Fusion Solar uzaktan izleme sisteminden ölçüm tarihi ve saatine göre alınmıştır.

Tablo 5.2: 1 no.lu eviriciye ait saha ölçümleri

Evirici Numarası	Dizi Numarası	Voc (VDC)	Isc (ADC)	Vmpp (VDC)	Impp (ADC)	Yalıtım Direnci (Mohm)
1	1	725	9,96	588,8	8,7	77
	2	726	9,96	588,8	8,63	86
	3	720	9,93	601,2	8,56	82
	4	708	9,89	601,2	8,22	70
	5	704	9,94	585,9	8,41	72
	6	712	9,89	585,9	8,29	77
	7	705	9,92	602,7	8,34	69
	8	708	9,91	602,7	8,33	72
	9	808	9,93	697,3	7,97	82
	10	794	9,92	652	7,8	71
	11	792	9,91	652	8,5	75
	12	787	9,93	652	8,29	69
	13	787	9,94	659,4	8,05	72
	14	802	9,88	659,4	7,95	89
	15	784	9,91	665,3	8,25	69
	16	781	9,94	665,3	7,78	67
	17	778	9,92	641,9	8,13	66
	18	789	9,87	641,9	7,9	72

Tablo 5.3: 2 no.lu eviriciye ait saha ölçümleri

Evirici Numarası	Dizi Numarası	Voc (VDC)	Isc (ADC)	Vmmp (VDC)	Iimp (ADC)	Yalıtım Direnci (M Ω m)
2	1	702	9,81	599,3	7,85	70
	2	706	9,84	599,3	7,86	72
	3	702	9,87	585,8	7,88	66
	4	704	9,88	585,8	7,92	62
	5	702	9,87	595	8,12	63
	6	705	9,84	595	8	66
	7	715	9,73	598,4	8,12	79
	8	701	9,84	598,4	8,58	64
	9	771	9,86	650,9	8,21	66
	10	766	9,83	650,5	8,44	56
	11	764	9,85	646	7,65	63
	12	770	9,9	646	8,05	63
	13	780	9,83	665,5	7,87	72
	14	766	9,88	665,5	7,74	57
	15	769	9,85	638	8,52	58
	16	769	9,87	638	7,95	58
	17	783	9,85	659,3	8,04	66
	18	768	9,81	659,3	8,08	63

Tablo 5.4: 3 no.lu eviriciye ait saha ölçümleri

Evirici Numarası	Dizi Numarası	Voc (VDC)	Isc (ADC)	Vmmp (VDC)	Iimp (ADC)	Yalıtım Direnci (MÖhm)
3	1	704	8,98	595	8,29	64
	2	704	8,98	595	8,38	63
	3	715	8,94	597,3	8,28	71
	4	709	8,92	597,3	8,34	68
	5	705	8,94	589,4	8,38	65
	6	701	8,91	589,4	8,39	64
	7	705	8,89	598,3	8,37	66
	8	720	8,81	598,3	8,38	73
	9	774	8,85	631,5	8,6	62
	10	769	8,83	636,5	8,33	58
	11	777	8,87	641,7	8,33	60
	12	784	8,78	641,7	8,48	69
	13	771	8,76	649,6	8,37	62
	14	779	8,79	649,6	8,64	63
	15	774	8,79	651,5	8,56	61
	16	792	8,79	651,5	8,53	68
	17	787	8,71	665,6	8,21	61
	18	778	8,73	665,6	8,29	57

Tablo 5.5: 4 no.lu eviriciye ait saha ölçümleri

Evirici Numarası	Dizi Numarası	Voc (VDC)	Isc (ADC)	Vmmp (VDC)	Iimp (ADC)	Yalıtım Direnci (Mohm)
4	1	802	7,82	658,1	7,84	105
	2	796	7,82	658,1	7,78	95
	3	794	7,79	640,3	8,28	90
	4	792	7,8	640,3	7,89	82
	5	791	7,79	640,4	7,97	81
	6	790	7,74	640,4	8,01	77
	7	790	7,72	646,6	8,09	75
	8	790	7,72	646,6	8,09	78
	9	790	7,72	639,4	8,24	74
	10	792	7,76	619,7	8,59	74
	11	807	7,68	664,1	7,9	86
	12	796	7,65	664,1	8,1	81
	13	726	7,67	600,4	7,78	75
	14	720	7,65	600,4	7,75	65
	15	718	7,64	593,3	8,12	73
	16	718	7,62	593,3	8	71
	17	718	7,6	601,7	7,88	66
	18	718	7,58	601,7	7,96	71

Tablo 5.6: 5 no.lu eviriciye ait saha ölçümleri

Evirici Numarası	Dizi Numarası	Voc (VDC)	Isc (ADC)	Vmmp (VDC)	Iimp (ADC)	Yalıtım Direnci (MÖhm)
5	1	793	7,54	644,1	8,03	78
	2	790	7,55	644,1	8,13	77
	3	791	7,54	646,1	8,37	76
	4	791	7,55	646,1	8,06	72
	5	789	7,54	645,3	8,36	73
	6	789	7,55	645,3	8,11	77
	7	790	7,54	641,8	8,42	78
	8	793	7,58	641,8	8,39	79
	9	717	7,49	581,8	7,99	70
	10	715	7,46	581,8	8,11	67
	11	717	7,47	575,4	8,26	74
	12	718	7,56	575,4	8,39	67
	13	731	7,42	605,4	7,72	86
	14	722	7,39	605,4	7,71	72
	15	721	7,37	594,9	7,86	76
	17	791	7,38	656,5	7,96	57
	18	791	7,36	641,4	8	58

Tablo 5.7: 6 no.lu eviriciye ait saha ölçümleri

Evirici Numarası	Dizi Numarası	Voc (VDC)	Isc (ADC)	Vmmp (VDC)	Iimp (ADC)	Yalıtım Direnci (Mohm)
6	1	723	7,3	588,4	7,97	69
	2	722	7,28	588,4	8,18	69
	3	722	7,28	593,4	8,03	68
	4	721	7,27	593,4	7,73	65
	5	720	7,23	582,7	8,07	63
	6	720	7,26	582,7	8,14	68
	7	718	7,3	561,8	8,45	63
	8	791	7,21	632,9	8,31	56
	9	791	7,21	632,9	8,28	58
	10	790	7,19	627,8	7,97	57
	11	790	7,18	627,8	7,94	55
	12	789	7,18	626,4	8,15	51
	13	789	7,18	626,4	8,2	51
	14	794	7,23	649,3	8,17	57
	15	808	7,15	649,3	7,78	67
	16	791	7,16	638,9	7,87	57
	17	799	7,12	646,2	7,94	58
	18	797	7,12	646,2	7,91	54

Tablo 5.8: 7 no.lu eviriciye ait saha ölçümleri

Evirici Numarası	Dizi Numarası	Voc (VDC)	Isc (ADC)	Vmmp (VDC)	Imm (ADC)	Yalıtım Direnci (Mohm)
7	1	794	6,94	654,2	7,8	60
	2	792	6,95	654,2	7,86	58
	3	793	6,95	638,6	8,48	63
	4	793	6,95	638,6	7,95	64
	5	793	6,93	624,7	8,33	63
	6	799	6,96	624,7	8,42	69
	7	716	7,72	571,5	8,42	74
	8	707	7,74	571,5	8,22	69
	9	711	7,74	590,4	8,14	66
	10	722	7,71	590,4	8,29	75
	11	717	7,7	587,7	8,77	73
	12	713	7,72	587,7	8,33	65
	13	711	7,7	582,2	8,46	63
	14	714	7,67	582,2	8,3	64
	15	713	7,68	578,5	8,4	70
	16	782	7,66	643,3	8,1	58
	17	793	7,69	643,3	8,74	64
	18	789	7,62	640,7	8,42	63

Tablo 5.2 ile Tablo 5.8 arasında, her eviricideki FV dizilere ait ölçümler sunulmuştur. FV dizilerde herhangi bir yalıtım problemi görülmemektedir. Bununla birlikte akım ve gerilim değerlerinde de herhangi bir sorun görülmemektedir.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Ülkemizde ve dünyada her geçen gün önemi git gide artan yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisinin çoğunluklu kolu olan şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler incelenmiştir. Bu tez çalışmasında, Denizli ilinde bulunan ve halihazırda kurulu olan Sena Kablo fabrikasının çatısında bulunan şebeke bağlantılı 700 kWe AC güce ve 853,12 kWp DC kurulu güce sahip fotovoltaik sistem ele alınmıştır.

PVsyst yazılımı ile sistemin gerçek zamanlı simülasyonu yapılarak sistem için öngörülen sonuçlar çıkarılmıştır. Simülasyon sonuçları ile gerçek üretim değerleri kıyaslandığında değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Yazılım sayesinde yeni kurulacak veya hali hazırda kurulmuş olan sistemlerin üretim değerlerinin, sistem kayıplarının ve gölgelenme etkisi gibi durumların öngörülmesi sağlanmaktadır.

MATLAB/Simulink programı ile sistemdeki güç devrelerinin simülasyonu yapılmış evirici, FV modül ve şebeke entegrasyonu incelenmiştir. Sistemin istenen çalışma gücünde çalışırken, FV modüllerin ve eviricilerin akım, gerilim ve güç değerleri analiz edilmiştir.

Sistemdeki ekipmanlarının gerilim düşümleri, akım taşıma kapasiteleri ve uygunluk kontrolleri yapılmıştır. ETAP yazılımı ile de baralardaki kısa devre değerleri hesaplanmış, seçilen devre kesicilerin uygunluğuna bakılmıştır. Kurulan sistemde gerekli ölçümler yapıp, sistemin çalışması incelenmiş ve bu sonuçlar raporlanmıştır. Bu sonuçlarda sistemde herhangi bir problem gözlemlenmemiş olup, sistem standartlara uygun olarak çalışmaktadır.

Yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, bu tez çalışmasında şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlerin analiz, tasarım ve simülasyon gibi konularda rehberlik etmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmalara ek olarak şebeke bağlantılı örnek sisteme batarya sistemi eklenmesi veya daha küçük bir sistem üzerine çalışılacaksa farklı tipteki yüklerin devreye girip çıkması durumunun sistem üzerindeki etkileri incelenebilir.

7. KAYNAKLAR

Abbood, A.A., Salih, M.A., Mohammed, A.Y., “Modeling and simulation of 1 MW grid connected photovoltaic system in Karbala City”, *International Journal of Energy and Environment*, 9(2), 153-168, (2018).

Abdelaziz, A.Y., Atallah, A.M., Jumaah, R.S., “Modeling and simulation of a three-phase two-stage grid connected photovoltaic system”, *The 2013 World Congress on Power and Energy Engineering (WCPEE)*, Mısır, (2013).

Akman, E., Akın, S., Karanfil, G., Sönmezoğlu S., “Organik Güneş Pilleri”, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14 (1), 1-30, (2013).

Anzalchi, A., Sarwat, A., “Overview of technical specifications for grid-connected photovoltaic systems”, *Energy Conversion and Management*, 152, 312-327, doi: 10.1016/j.enconman.2017.09.049, (2017).

Arıcı N., İskender A., “Fotovoltaik Güneş Santrallerinde Şebeke Bağlantı Sorunları ve Çözümleri”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 215-222, (2020).

ABB, “Technical Application Papers No.10 Photovoltaic plants [online]”, <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SDC007109G0202&LanguageCode=it&DocumentPartId=&Action=Launch>, (2014).

Başak, Ö.D, Sazak B.S, “Effect of Components on Solar Panel System Efficiency”, *4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)*, Romanya, (2013).

Bhatnagar, P., Nema, R.K, “Maximum Power Point Tracking Control Techniques: State of the Art in Photovoltaic Applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 224-241, (2013).

Boyar, A., “Güneş Panelleri için Mikro Evirici Tasarımı ve Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Nevşehir, (2018).

Cebeci S., “Türkiye’de Güneş Enerjisinden Elektrik Üretim Potansiyelinin Değerlendirilmesi”, Uzmanlık Tezi, *İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü*, (2017).

Chapai, M., Shah, B., Kafle, I., Adhikari, U., Basanta, K., “Study of Technical Parameters in Grid-Connected PV System”, *International Journal of Engineering and Technology*, (2020).

Çalıköğlü, S., “Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Güç Sistemleri İle Elektrik Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2010).

Çekinir, S., “Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Modellenmesi ve Benzetimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2013).

Doğan, S., “Şebeke Etkileşimli Fotovoltaik Güç Sistemlerinin İncelenmesi ve Simülasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2018).

Enerzytech.com, “Types of Solar PV Sytems [online]”, (7 Şubat 2021), <http://www.enerzytech.com/resources/articles/13-types-of-solar-pv-systems>, (2012).

EPDK, “Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik (17.01.2018, son versiyon) [online]”, <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-92/elektriklisanssiz-uretim>, (2018).

EPDK, “Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmeliğin Uygulanmasına Dair Tebliğ (15.05.2017, son versiyon) [online]”, <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-92/elektriklisanssiz-uretim>, (2017).

Farhoodnea, M., Mohamed, A., Khatib, T., Elmenreich, W., “Performance evaluation and characterization of a 3-kWp grid-connected photovoltaic system based on tropical field experimental results: new results and comparative study”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1047-1054, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.090, (2015).

Hassaine, L., Olias, E., Quintero, J., Salas, V., “Overview of power inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 796-807, (2014).

Huawei Solar, “SUN2000-100KTL-M1 Smart PV Controller [online]”, PDF version, (2020).

Jana, J., Saha, H., Bhattacharya, K.D., “A Review of Inverter Topologies for Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 1256-1270, (2017).

Jasim, K.E., “Quantum Dots Solar Cells”, (ed: Leonid A. Kosyachenko), *Solar Cells New Approaches and Reviews*, eBook (PDF) ISBN: 978-953-51-6393-0, IntechOpen, (2015).

Joshi, M., Vaidya, G.A., “Modeling and Simulation of Single Phase Grid Connected Solar Photovoltaic System”, *2014 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, Hindistan, (2014).

Kaşıkcı İ., *Elektrik Tesisleri Güvenlik, Koruma ve Uygulama Esasları*, İstanbul : Birsen Yayınevi, (2018).

Karamanav M., “Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2007).

Kerekes, T., Séra, D., Máthé, L., “Three-phase Photovoltaic Systems: Structures, Topologies, and Control”, *Electric Power Components and Systems*, Taylor & Francis Group, 43 (12), 1364-1375, doi: 10.1080/15325008.2015.1030518, (2015).

Komoni, V., Krasniqi, I., Lekaj, A., Gashi, I., “Performance Analysis of 3.9 kW Grid Connected Photovoltaic Systems in Kosova”, *The fifth International Renewable Energy Congress(IREC)*, Tunus, (2014).

Kordestani, M., Mirzaee, A., Safavi, A.A., Saif, M., “Maximum Power Point Tracker (MPPT) for Photovoltaic Power Systems- A Systematic Literature Review”, *2018 European Control Conference(ECC)*, Limasol, Kıbrıs, (2018).

Matre, M., “Harmonics in Photovoltaic Inverters & Mitigation Techniques [online]”, PDF version, <https://www.sterlingandwilsonsolar.com/images/knowledge-corner/pdfs/Harmonics%20in%20Photovoltaic%20Inverters%20&%20Mitigation%20Techniques.pdf>, (2021).

Mahela, O.P., Shaik, A.G., “Comprehensive overview of grid interfaced solar photovoltaic systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 316-332, (2017).

Malathy, S., Ramaprabha, R., “Comprehensive analysis on the role of array size and configuration on energy yield of photovoltaic systems under shaded conditions”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 672-679, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.165, (2015).

Martins, D.C., “Analysis of a Three-Phase Grid-Connected PV Power System Using a Modified Dual-Stage Inverter”, *International Scholarly Research Notices*, Hindawi Publishing Corporation, doi: 10.1155/2013/406312, (2013).

Micheli, D., Alessandrini, S., Radu, R., Casula, I., “Analysis of the outdoor performance and efficiency of two grid connected photovoltaic systems in northern Italy”, *Energy Conversion and Management*, 80, 436-445, doi: 0.1016/j.enconman.2014.01.053, (2014).

Nemes, C., Costinas, S., “Yield and availability analysis of grid-connected photovoltaic systems – a case study for Iasi region, Romania”, *2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION)*, Türkiye, (2015).

NREL (National Renewable Energy Labrotary), “Best Research-Cell Efficiencies, version 22.09.2020 [online]”, (4 Ocak 2021), <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>, (2020).

Öztürk, H. H., “Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler[online]”, www.emo.org.tr, (Çevrimiçi), (2019).

Özkan, Z., Hava, A.M., “Three-Phase Inverter Topologies for Grid-Connected Photovoltaic Systems”, *The 2014 International Power Electronics Conference*, (2014).

Park, N.G., “Perovskite Solar Cells: An Emerging Photovoltaic Technology”, *Materials Today Elsevier*, 18 (2), 65-72, (2015).

Phono Solar, “PREMIUM PLUS MODULE SERIES HIGH EFFICIENCY MONO-PERC M-5B-R 300-320 W”, <http://www.phonosolar.com/international/upload/files/2021/5/GL-EN-156-Premium%20Plus%20Module-60-5BB.pdf>, (2020).

Pv-magazine-usa.com, “Analyzing the 2% DC voltage drop rule [online]”, (21 Aralık 2021), <https://pv-magazine-usa.com/2020/09/30/analyzing-the-2-dc-voltage-drop-rule/>, (2020).

Rashid, M.M., *GÜÇ ELEKTRONİĞİ Yarıiletken Elemenlar, Devreler ve Uygulamaları*, (Çev: S. Sünter ve T. Aydemir), Nobel Yayıncılık, (2016).

Rathore, N., Panwar, N.L., Yettou, F., Gama, A., “A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications”, *International Journal of Ambient Energy*, Taylor & Francis Group, doi: 10.1080/01430750.2019.1592774, (2019).

Rawoof, R., Balasubramanian, R., Muthukrishnan, N.M., “Modeling and Simulation of 100 kWp Grid-Connected Photovoltaic Power System”, *2015 Conference on Power, Control, Communication and Computational Technologies for Sustainable Growth (PCCCTSG)*, Hindistan, (2015).

Resmi Gazete, “Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliği [online]”, <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/yonetmelik/7.5.10391%20metin.doc>, (2004).

Sawle, Y., Gupta, S.C., Bohre, A.K., “PV-wind hybrid system: A review with case study”, *Cogent Engineering*, Taylor & Francis Online, doi: 10.1080/23311916.2016.1189305, (2016).

Sena Kablo, “PVC izoleli alçak gerilim kabloları [online]”, PDF version, <https://www.senakablo.com.tr/nyy/>, (2021).

Sezen, S., Özdemir, E., “Modeling, simulation and control of three-phase three level multilevel inverter for grid connected photovoltaic system”, *Journal of Optoelectronics and Advanced Meterials*, 15 (3-4), 335-341, (2013).

Shaahid, S.M., Elhadidy, M.A., “Opportunities for utilization of stand-alone hybrid (photovoltaic+diesel+battery) power systems in hot climates”, *Renewable Energy*, 28, 1741-1753, (2003).

Sharma, S., Jain, K.K, Sharma, A., “Solar Cells: In Research and Applications- A review”, *Meterials Sciences and Applications*, Scientific Research Publishing, doi: 10.4236/msa.2015.612113, (2015).

Sefa, İ., Altın, N., “Güneş pili ile beslenen şebeke etkileşimli eviriciler – genel bir bakış”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24 (3), 409-424, (2009).

Shoro, M.S, Hussain D.M.A., “Power Electronic Converters for Single-Phase Grid Connected Photovoltaic System: An Overview”, *International Journal Of Integrated Engineering*, 12 (6), 253-264, (2020).

Tozlu, C., “Muğla Üniversitesinde Kurulu Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Perfomans Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Muğla Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Muğla, (2004).

Ünlü, M., Çamur, S., Beşer, E., Arifoğlu, B., “Bir Fazlı Akım Zorlamalı Şebeke Komütasyonlu Evirici”, *Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, (2014).

Ünlü, M., Çamur, S., Beşer, E., Arifoğlu, B., “A Current-Forced Line Commutated Inverter for Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Generation Systems”, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 15 (2), 85-92, (2015).

Webtekno.com, “Çinlilerin Geliştirdiği Organik Güneş Pilleri Enerji Rekoru Kırdı [online]”, (14 Mayıs 2021), <https://www.webtekno.com/cinlilerin-gelistirdigi-organik-gunes-pilleri-enerji-rekoru-kirdi-h51325.html>, (2018).

Wikipedia.com, “Boyaya duyarlı güneş pilleri [online]”, (14 Mayıs 2021), https://tr.wikipedia.org/wiki/Boyaya_duyarlı_güneş_pilleri, (2021).

Winder, C., Sariciftci N.S., “Low bandgap polymers for photon harvesting in bulk heterojunction solar cells”, *Journal of Materials Chemistry*, 7, doi: 10.1039/B306630D, (2004).

Wu, Y.K., Lin, J.H., Lin, H.J., “Standarts and Guidelines for Grid-Connected Photovoltaic Generation Systems: A Review and Comparison”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53 (4), (2017).

Yılmaz, G., Özkök, Ç., “Perovskit Güneş Hücreleri ve Kararsızlık Problemleri”, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9 (1), 297-304, doi: 10.29048/makufebed.428570, (2018).

EKLER

8. EKLER

EK A Eviricilere Ait Dizilerin Kablo ve Gerilim Düşümü Bilgileri

Tablo A.1: 1 no.lu eviriciye ait dizilerin kablo ve gerilim düşümü bilgileri

DİZİ NO	Kablo uzunluğu (m)		% Gerilim Düşümü		
	4 mm ²	6 mm ²	4 mm ²	6 mm ²	Toplam
STR.01.01	19,8	82	0,25	0,70	0,95
STR.01.02	19,8	79	0,25	0,68	0,93
STR.01.03	19,8	76	0,25	0,65	0,90
STR.01.04	19,8	73	0,25	0,63	0,88
STR.01.05	19,8	70	0,25	0,60	0,85
STR.01.06	19,8	66	0,25	0,57	0,82
STR.01.07	19,8	63	0,25	0,54	0,79
STR.01.08	19,8	60	0,25	0,51	0,76
STR.01.09	19,8	82	0,25	0,70	0,95
STR.01.10	19,8	79	0,25	0,68	0,93
STR.01.11	19,8	76	0,25	0,65	0,90
STR.01.12	19,8	73	0,25	0,63	0,88
STR.01.13	19,8	70	0,25	0,60	0,85
STR.01.14	19,8	66	0,25	0,57	0,82
STR.01.15	19,8	63	0,25	0,54	0,79
STR.01.16	19,8	60	0,25	0,51	0,76
STR.01.17	19,8	57	0,25	0,49	0,74
STR.01.18	19,8	57	0,25	0,49	0,74

Tablo A.2: 2 no.lu eviriciye ait dizilerin kablo ve gerilim düşümü bilgileri

DİZİ NO	Kablo uzunluğu (m)		% Gerilim Düşümü		
	4 mm ²	6 mm ²	4 mm ²	6 mm ²	Toplam
STR.02.01	19,8	57	0,25	0,49	0,74
STR.02.02	19,8	57	0,25	0,49	0,74
STR.02.03	19,8	60	0,25	0,51	0,76
STR.02.04	19,8	63	0,25	0,54	0,79
STR.02.05	19,8	66	0,25	0,57	0,82
STR.02.06	19,8	69	0,25	0,59	0,84
STR.02.07	19,8	74	0,25	0,63	0,79
STR.02.08	19,8	77	0,25	0,66	0,91
STR.02.09	19,8	60	0,25	0,51	0,76
STR.02.10	19,8	63	0,25	0,54	0,79
STR.02.11	19,8	66	0,25	0,57	0,82
STR.02.12	19,8	69	0,25	0,59	0,84
STR.02.13	19,8	74	0,25	0,63	0,88
STR.02.14	19,8	77	0,25	0,66	0,91
STR.02.15	19,8	80	0,25	0,69	0,94
STR.02.16	19,8	83	0,25	0,71	0,96
STR.02.17	19,8	88	0,25	0,75	1
STR.02.18	19,8	91	0,25	0,78	1,03

Tablo A.3: 3 no.lu eviriciye ait dizilerin kablo ve gerilim düşümü bilgileri

DİZİ NO	Kablo uzunluğu (m)		% Gerilim Düşümü		
	4 mm ²	6 mm ²	4 mm ²	6 mm ²	Toplam
STR.03.01	19,8	80	0,25	0,69	0,94
STR.03.02	19,8	83	0,25	0,71	0,96
STR.03.03	19,8	88	0,25	0,75	1
STR.03.04	19,8	91	0,25	0,78	1,03
STR.03.05	19,8	94	0,25	0,80	1,05
STR.03.06	19,8	97	0,25	0,83	1,08
STR.03.07	19,8	100	0,25	0,86	1,11
STR.03.08	19,8	105	0,25	0,90	1,15
STR.03.09	19,8	94	0,25	0,80	1,05
STR.03.10	19,8	97	0,25	0,83	1,08
STR.03.11	19,8	100	0,25	0,86	1,11
STR.03.12	19,8	105	0,25	0,90	1,15
STR.03.13	19,8	108	0,25	0,92	1,17
STR.03.14	19,8	111	0,25	0,95	1,20
STR.03.15	19,8	114	0,25	0,97	1,22
STR.03.16	19,8	119	0,25	1,02	1,27
STR.03.17	19,8	122	0,25	1,05	1,30
STR.03.18	19,8	125	0,25	1,07	1,32

Tablo A.4: 4 no.lu eviriciye ait dizilerin kablo ve gerilim düşümü bilgileri

DİZİ NO	Kablo uzunluğu (m)		% Gerilim Düşümü		
	4 mm ²	6 mm ²	4 mm ²	6 mm ²	Toplam
STR.04.01	19,8	123	0,25	1,05	1,30
STR.04.02	19,8	122	0,25	1,05	1,30
STR.04.03	19,8	121	0,25	1,04	1,29
STR.04.04	19,8	120	0,25	1,03	1,28
STR.04.05	19,8	119	0,25	1,02	1,27
STR.04.06	19,8	118	0,25	1,01	1,26
STR.04.07	19,8	117	0,25	1	1,25
STR.04.08	19,8	116	0,25	0,99	1,24
STR.04.09	19,8	115	0,25	0,98	1,23
STR.04.10	19,8	114	0,25	0,98	1,23
STR.04.11	19,8	112	0,25	0,96	1,21
STR.04.12	19,8	111	0,25	0,95	1,20
STR.04.13	19,8	162	0,25	1,39	1,64
STR.04.14	19,8	161	0,25	1,38	1,63
STR.04.15	19,8	160	0,25	1,37	1,62
STR.04.16	19,8	159	0,25	1,36	1,61
STR.04.17	19,8	158	0,25	1,35	1,60
STR.04.18	19,8	157	0,25	1,34	1,59

Tablo A.5: 5 no.lu eviriciye ait dizilerin kablo ve gerilim düşümü bilgileri

DİZİ NO	Kablo uzunluğu (m)		% Gerilim Düşümü		
	4 mm ²	6 mm ²	4 mm ²	6 mm ²	Toplam
STR.05.01	19,8	110	0,25	0,94	1,19
STR.05.02	19,8	109	0,25	0,93	1,18
STR.05.03	19,8	108	0,25	0,92	1,17
STR.05.04	19,8	107	0,25	0,92	1,17
STR.05.05	19,8	106	0,25	0,91	1,16
STR.05.06	19,8	105	0,25	0,90	1,15
STR.05.07	19,8	104	0,25	0,89	1,14
STR.05.08	19,8	103	0,25	0,88	1,13
STR.05.09	19,8	156	0,25	1,34	1,59
STR.05.10	19,8	155	0,25	1,33	1,58
STR.05.11	19,8	154	0,25	1,32	1,57
STR.05.12	19,8	153	0,25	1,31	1,56
STR.05.13	19,8	151	0,25	1,29	1,54
STR.05.14	19,8	150	0,25	1,28	1,53
STR.05.15	19,8	149	0,25	1,28	1,53
STR.05.16	19,8	200	0,25	1,71	1,96
STR.05.17	19,8	199	0,25	1,70	1,95
STR.05.18	19,8	198	0,25	1,70	1,95

Tablo A.6: 6 no.lu eviriciye ait dizilerin kablo ve gerilim düşümü bilgileri

DİZİ NO	Kablo uzunluğu (m)		% Gerilim Düşümü		
	4 mm ²	6 mm ²	4 mm ²	6 mm ²	Toplam
STR.06.01	19,8	148	0,25	1,27	1,52
STR.06.02	19,8	147	0,25	1,26	1,51
STR.06.03	19,8	146	0,25	1,25	1,50
STR.06.04	19,8	145	0,25	1,24	1,49
STR.06.05	19,8	144	0,25	1,23	1,48
STR.06.06	19,8	143	0,25	1,22	1,47
STR.06.07	19,8	142	0,25	1,22	1,47
STR.06.08	19,8	197	0,25	1,69	1,94
STR.06.09	19,8	196	0,25	1,68	1,93
STR.06.10	19,8	195	0,25	1,67	1,92
STR.06.11	19,8	194	0,25	1,66	1,91
STR.06.12	19,8	193	0,25	1,65	1,90
STR.06.13	19,8	192	0,25	1,64	1,89
STR.06.14	19,8	191	0,25	1,64	1,89
STR.06.15	19,8	189	0,25	1,62	1,87
STR.06.16	19,8	188	0,25	1,61	1,86
STR.06.17	19,8	187	0,25	1,60	1,85
STR.06.18	19,8	186	0,25	1,59	1,84

Tablo A.7: 7 no.lu eviriciye ait dizilerin kablo ve gerilim düşümü bilgileri

DİZİ NO	Kablo uzunluğu (m)		% Gerilim Düşümü		
	4 mm ²	6 mm ²	4 mm ²	6 mm ²	Toplam
STR.07.01	19,8	185	0,25	1,58	1,83
STR.07.02	19,8	184	0,25	1,58	1,83
STR.07.03	19,8	183	0,25	1,57	1,82
STR.07.04	19,8	182	0,25	1,56	1,81
STR.07.05	19,8	181	0,25	1,55	1,80
STR.07.06	19,8	180	0,25	1,54	1,79
STR.07.07	19,8	108	0,25	0,92	1,17
STR.07.08	19,8	111	0,25	0,95	1,20
STR.07.09	19,8	114	0,25	0,98	1,23
STR.07.10	19,8	119	0,25	1,02	1,27
STR.07.11	19,8	122	0,25	1,05	1,30
STR.07.12	19,8	125	0,25	1,07	1,32
STR.07.13	19,8	128	0,25	1,10	1,35
STR.07.14	19,8	131	0,25	1,12	1,37
STR.07.15	19,8	134	0,25	1,15	1,40
STR.07.16	19,8	128	0,25	1,10	1,35
STR.07.17	19,8	131	0,25	1,12	1,37
STR.07.18	19,8	134	0,25	1,15	1,40