KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Samet ÇALIKOĞLU

Anabilim Dalı: Elektrik Eğitimi

Danışman: Doç. Dr. Engin ÖZDEMİR

KOCAELİ, 2010

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Samet ÇALIKOĞLU

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 31 Mayıs 2010

Tezin Savunulduğu Tarih: 21 Haziran 2010

Tez Danışmanı

Doç.Dr. Engin ÖZDEMİR

(.....)

Üye

Prof.Dr. Bekir ÇAKIR

(.....)

Üye

Doç.Dr. Mehmet UZUNOĞLU

(.....)

KOCAELİ, 2010

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Günümüzde enerji ihtiyacının yıldan yıla artış gösterdiği gözlemlenmektedir. Bu sebeple, işletim masrafı olmayan, çevresel ve ekonomik olarak önemli avantajlara sahip olan yenilenebilir enerji kaynakları, önümüzdeki yılların en önemli gündem maddesi olacaktır. Bu kaynaklardan en önemlisi olan güneş enerjisi, dünyanın her bölgesinde kullanıma müsait bir elektrik üretim kaynağı olmuştur. Bu çalışmada, ağırlıklı olarak üzerinde durulan, şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemleri, gerek evsel gerek bölgesel olarak, enerji ihtiyacını karşılamada çok büyük rol üstlenecektir. Ayrıca bu tez kapsamında, 360 W_p gücünde şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi tasarlanıp, uygulaması yapılmıştır. Gerçekleştirilen bu proje ile, yenilenebilir enerji bilincinin geliştirilerek, fotovoltaik sistemler açısından önemli bir adım atıldığına inanılmaktadır.

Lisans eğitimimde olduğu gibi, yüksek lisans eğitimimde de üzerimde büyük emeği olan, tez çalışmam süresince sürekli desteğini gördüğüm, güncel bilgileri benimle devamlı paylaşarak çalışmalarıma yardımcı olan, saygıdeğer hocam ve tez danışmanım Doç. Dr. Engin Özdemir'e ve "360 W_p şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sisteminin incelenmesi" adlı projeye sağladığı destekten dolayı Kocaeli Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Ayrıca, dört yıldır birlikte çalıştığım, mesleki hayatıma ilk adımımı attığım andan itibaren yanımda olan GÜL ELEKTRİK MÜHENDİSLİK firma sahibi saygıdeğer ağabeyim Fahri KAYADELEN'e ve beni bu zamana kadar yetiştiren, her zaman yanımda olan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ v
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER viii
ÖZET x
İNGİLİZCE ÖZET xi
1.GİRİŞ 1
1.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları 1
1.2. Tezin Kapsamı ve Amacı 3
2. FOTOVOLTAİK HÜCRELER 4
2.1. Fotovoltaik Hücrelerin Tarihçesi 4
2.2. Fotovoltaik Hücrelerin Yapısı ve Çalışması 5
2.3. Fotovoltaik Hücre Çeşitleri 8
2.3.1. Kristal silikon hücreler 8
2.3.1.1. Monokristal yapılı hücreler 8
2.3.1.2. Polikristal yapılı hücreler 9
2.3.2. İnce film hücreler 10
2.3.2.1. Şekilsiz silikon hücreler 10
2.3.2.2. Bakır indiyum diselenid hücreler 11
2.3.2.3. Kadmiyum tellürid hücreler 11
2.3.3. Diğer yapılar 12
2.3.3.1. Tandem yapılar 12
2.3.3.2. Boya duyarlı yapılar 12
2.3.3.3. Organik yapılar 13
2.4. Fotovoltaik Hücrelerin Elektriksel Özellikleri 15
2.4.1. İdeal fotovoltaik hücre eşdeğer devre şeması 15
2.4.2. Fotovoltaik hücrenin akım-gerilim karakteristiği 15
2.4.3. Fotovoltaik hücrenin güç-gerilim karakteristiği 18
2.5. Fotovoltaik Hücrelerde Kayıplar 18
2.5.1. Işıksal kayıplar 19
2.5.1.1. Işıksal soğurulma kayıpları 19
2.5.1.2. Işıksal yansıma kayıpları 20
2.5.1.3. Gölgelenme kayıpları 20
2.5.2. Elektriksel kayıplar 21
2.5.2.1. Akım kayıpları 21
2.5.2.2. Açık devre gerilimi kayıpları 22
2.5.2.3. Direnç kayıpları 22
2.5.2.4. Fill faktörü kayıpları 23
2.5.3. Ara yüzey kayıpları 23
2.6. Fotovoltaik Hücrelerde Verim 24
3. FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİ 25

3.1. Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Güç Sistemleri 27
3.1.1. Fotovoltaik hücre 29
3.1.2 Şarj kontrolörü 30
3.1.3. Enerji depolama birimi (Aküler) 31
3.1.4. DC-DC gerilim dönüştürücüler 31
3.1.5. Eviriciler (DC-AC dönüştürücüler) 33
3.2. Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Güç Sistemleri 33
3.2.1. Merkezi evirici sistemi 34
3.2.2. Dizi evirici sistemi 36
3.2.3. Çoklu dizi evirici sistemi 37
3.2.4. Modül entegre evirici sistemi 37
3.3. Tek Fazlı Evirici Topolojileri 39
3.3.1. Transformatörsüz fotovoltaik eviriciler 39
3.3.2. Transformatörlü fotovoltaik eviriciler 40
3.4. Üç Fazlı Şebeke Bağlantılı Evirici 44
3.5. Transformatörlü ve Transformatörsüz Evirici Topolojilerinin Kullanımı 44
3.6. Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Güç Sistemlerinde Net Ölçüm 45
3.7. Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Sınıflandırılması 47
3.7.1. Küçük güçlü sistemler 47
3.7.2. Orta güçlü sistemler 47
3.7.3. Büyük güçlü sistemler 48
3.8. Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Güç Sistemlerinde Önemli Parametreler 48
3.8.1. Bağlantı noktası 51
3.8.2. Kısa devre kapasitesi 51
3.8.3. Aşırı ve düşük gerilim 51
3.8.4. Ani gerilim değişimi 52
3.8.5. Gerilim dengesizliği 52
3.8.6. Harmonikler 52
3.8.7. Adalama 53
3.8.8. Sistemler arası arızanın süresi 53
3.8.9. Frekans değişimi 54
3.8.10. DC kayma (DC offset) 54
3.8.11. Yüksek frekans taşınımı 54
3.8.12. Güç dönüştürücü sistemlerinin şebeke üzerindeki aktif sinyal etkisi 55
3.8.13. Reaktif güç kontrolü 55
3.8.14. Hat iletim kapasitesi 55
3.8.15. Koruma koordinasyonu 56
3.8.16 İletim ve dağıtım kayıplarının azalması 56
3.8.17 Arz güvenliği 56
3.8.18. Maksimum güç talebi 57
3.8.19. Güç kalitesi yönetimi 57
3.9. Akıllı Şebeke Teknolojisi 59
4. DÜNYADA VE ÜLKEMİZDE GÜNEŞ ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ 62
4.1. Dünyada Yapılan Uygulamalar ve Hedefler 62
4.2. Dünyada Güneş Enerjisi Teşvikleri 65
4.3. Ülkemizde Yapılan Uygulamalar ve Hedefler 68
5. ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMİ TASARIMI VE UYGULAMASI 78

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 86
KAYNAKLAR 88
ÖZGEÇMİŞ 93

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Dünya toplam enerji arzının enerji türlerine göre dağılımı 2
Şekil 2.1: Elektron-hol çiftinin oluşumu 7
Şekil 2.2: Fotovoltaik hücrenin çalışma prensibi 7
Şekil 2.3: Monokristal yapılı hücreler 9
Şekil 2.4: Polikristal yapılı hücreler 9
Şekil 2.5: Şekilsiz silikon hücreler 10
Şekil 2.6: Bakır indiyum diselenid hücreler 11
Şekil 2.7: Kadmiyum tellürid hücreler 12
Şekil 2.8: İdeal fotovoltaik hücre eşdeğer devre şeması 15
Şekil 2.9: Fotovoltaik hücrenin akım-gerilim karakteristiğini ve maksimum güç noktasını belirlemede kullanılan deney şeması 16
Şekil 2.10: Fotovoltaik hücrenin akım-gerilim karakteristiği ve maksimum güç noktası 16
Şekil 2.11: Fotovoltaik hücrenin farklı ışık şiddetlerindeki akım-gerilim karakteristiği 17
Şekil 2.12: Fotovoltaik hücrenin farklı sıcaklıklardaki akım-gerilim karakteristiği 17
Şekil 2.13: Fotovoltaik hücrenin güç-gerilim karakteristiği 18
Şekil 2.14: Fotovoltaik hücre çeşitlerine göre 1 kW güç elde etmek için gerekli alanlar 24
Şekil 3.1: Fotovoltaik pazarın küresel olarak tarihi gelişimi 25
Şekil 3.2: Fotovoltaik pazarın 2000-2013 arası yıllık küresel büyüme oranları ve tahminleri 26
Şekil 3.3: Şebekeden bağımsız DC fotovoltaik güç sistemi blok diyagramı 27
Şekil 3.4: Güneş enerjisi ile çalışan el feneri 28
Şekil 3.5: Şebekeden bağımsız AC fotovoltaik güç sistemi blok diyagramı 28
Şekil 3.6: Şebekeden uzak bölgede kurulmuş AC fotovoltaik güç sistemi 28
Şekil 3.7: Şebeke bağlantısız fotovoltaik güç sistemi bağlantı şeması 29
Şekil 3.8: Fotovoltaik hücrelerden modül ve dizilerin oluşturulması 29
Şekil 3.9: Değişik üreticiler tarafından üretilen akü şarj kontrol cihazları 30
Şekil 3.10: Solar aküler 31
Şekil 3.11: Maksimum güç noktası kontrolörü 32
Şekil 3.12: Solar evirici 33
Şekil 3.13: Şebeke bağlantılı fotovoltaik santral güç akış diyagramı 34
Şekil 3.14: Evsel uygulamalar için şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem güç akış diyagramı 34
Şekil 3.15: Merkezi evirici sistemi 35
Şekil 3.16: Dizi evirici sistemi 36
Şekil 3.17: Çoklu dizi evirici sistemi 37
Şekil 3.18: Modül entegre evirici sistemi 38
Şekil 3.19: Transformatörsüz fotovoltaik evirici (düşürücü) 39
Şekil 3.20: Transformatörsüz fotovoltaik evirici (hat komütasyonlu) 40

Şekil 3.21: Gerilim yükselticili transformatörsüz fotovoltaik evirici 40
Şekil 3.22: Hat frekans transformatörlü fotovoltaik evirici (kendinden komütasyonlu tam köprü) 41
Şekil 3.23: Hat frekans transformatörlü fotovoltaik evirici (manyetik birleşmeli) 41
Şekil 3.24: Yüksek frekans transformatörlü fotovoltaik evirici 42
Şekil 3.25: Üç fazlı şebeke bağlantılı evirici devre şeması 44
Şekil 3.26: Çift yönlü sayaç 46
Şekil 3.27: 1,3 kW gücünde şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi 47
Şekil 3.28: 45 kW gücünde şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi 48
Şekil 3.29: 20 MW gücünde şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi 48
Şekil 3.30: Dağıtılmış elektrik üretim santrallerinin güç akışı 50
Şekil 4.1: 1 MW çatı entegreli fotovoltaik güç sistemi, Münih fuar merkezi, Almanya 62
Şekil 4.2: 500 kW fotovoltaik güç sistemi, Haenam, Güney Kore 62
Şekil 4.3: 10 kW_p şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi, Meksika 63
Şekil 4.4: 0,64 kW_p fotovoltaik güç sistemi, Meksika 63
Şekil 4.5: 20 MW fotovoltaik güç sistemi, Almaraz güneş tarlası, İspanya 64
Şekil 4.6: 6,5 MW fotovoltaik güç sistemi, La Solana güneş tarlası, İspanya 64
Şekil 4.7: Ülkemizin yıllık güneşlenme miktarı 70
Şekil 4.8: 40 kW_p fotovoltaik güç sistemi, Muğla Üniversitesi 72
Şekil 4.9: 25,6 kW_p fotovoltaik güç sistemi, Muğla Üniversitesi, Türk Evi öğrenci kafeteryası 73
Şekil 4.10: Maksimum güç noktası izleyicili fotovoltaik güç sistemi 73
Şekil 4.11: Telekomünikasyon sistemi için kurulmuş fotovoltaik güç sistemi 74
Şekil 4.12: Ege Üniversitesi 13,85 kW_p gücünde fotovoltaik güç sistem uygulaması 74
Şekil 4.13: OKDA güç dönüştürücüsünün güç akış diyagramı 75
Şekil 4.14: OKDA güç dönüştürücüsünün iç yapısı 76
Şekil 4.15: Fotovoltaik sistemden alınan gücün OKDA ile şebekeyi, yükü ve aküleri beslemesi 76
Şekil 4.16: Şebeke ile OKDA'nın yükleri ve aküleri beslemesi 77
Şekil 4.17: Şebeke enerjisi olmadığında fotovoltaik modüller ve aküler ile OKDA'nın yükleri beslemesi 77
Şekil 5.1: 360 W_p şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi bağlantı şeması 79
Şekil 5.2: 360 W_p şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi projesi 80
Şekil 5.3: 360 W_p şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi galvaniz çerçevesi 81
Şekil 5.4: 360 W_p şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi 81
Şekil 5.5: 1200 W MPPT'li solar evirici 82
Şekil 5.6: Sistem değerlerini izleme ünitesi, Sunny Beam 82
Şekil 5.7: 360 W_p fotovoltaik güç sisteminin şebeke tarafından alınan gerilim eğrisi 83
Şekil 5.8: 360 W_p fotovoltaik güç sisteminin şebeke tarafından alınan akım eğrisi 83
Şekil 5.9: 360 W_p fotovoltaik güç sisteminin şebeke tarafından alınan akım ve gerilim eğrisi 84
Şekil 5.10: 360 W_p fotovoltaik güç sisteminden alınan bazı değerler 84
Şekil 5.11: 360 W_p fotovoltaik güç sisteminden alınan anlık toplam harmonik distorsiyon ve harmoniklerin grafiksel gösterimi 85
Şekil 5.12: 360 W_p fotovoltaik güç sisteminden alınan anlık toplam harmonik distorsiyon ve harmoniklerin sayısal değerleri 85

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1: Fotovoltaik hücre çeşitleri 8
Tablo 2.2: Fotovoltaik hücrelerin özellikleri 14
Tablo 2.3: Fotovoltaik hücrelerde kayıplar 19
Tablo 3.1: Fotovoltaik sistemlerde kullanılan evirici sistemlerinin karşılaştırılması 38
Tablo 3.2: Şebeke etkileşimli fotovoltaik sistemler ile ilgili belli başlı standartların özeti 43
Tablo 3.3: Fotovoltaik güç sistemlerinin; şebeke, tüketici ve fotovoltaik modül tarafında meydana gelebilecek olumsuz etkilerine karşı ve sisteme yarar sağlayabilmesi için alınacak önlemler 58
Tablo 5.1: "360 W_p şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi projesinde kullanılan malzemeler ve özellikleri 78

SİMGELER

η	: verim
CO_2	: karbondioksit
I	: akım (A)
I_d	: diyot akımı (A)
I_k	: kaynak akımı (A)
I_{kd}	: kısa devre akımı (A)
P_{in}	: fotovoltaik hücreye gelen maksimum güç (W)
P_m	: fotovoltaik hücreden alınan maksimum güç (W)
R	: yük direnci (ohm)
V	: gerilim (V)
V_{ad}	: açık devre gerilimi (V)
V_{rms}	: etkin gerilim
W_p	: tepe güç değeri

Kısaltmalar

AB	: Avrupa Birliği
AC	: alternatif akım
ARGE	: Araştırma Geliştirme
ASIF	: Fotovoltaik Endüstri Derneği (İspanya)
BJT	: çift kutuplu transistör
DC	: doğru akım
DIN VDE	: Alman standardizasyon enstitüsü, Alman elektrik derneği
DSİ	: Devlet Su İşleri
EİE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
EN	: Avrupa Birliği standardı
EPIA	: Avrupa fotovoltaik endüstri derneği
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
EÜAŞ	: Elektrik Üretim Anonim Şirketi
FF	: fill faktörü
GENSED	: Türkiye Güneş Enerjisi Sanayicileri ve Endüstrisi Derneği
GEPA	: Güneş Enerjisi Atlası
IEC	: Uluslararası elektroteknik komisyonu
IEEE	: Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IGBT	: izole kapılı çift kutuplu transistör
IREDA	: Hindistan Yenilenebilir Enerji Kalkınma Ajansı
İŞBAP	: TÜBİTAK-Bilimsel ve Teknolojik İşbirliği Ağları ve Platformları
MGN	: maksimum güç noktası
MOSFET	: metal oksit alan etkili transistör
MPPT	: maksimum güç noktası izleyicisi
PV	: fotovoltaik

PWM	: darbe genişlik modülatörü
STATCOM	: statik senkron kompanzatör
SCADA	: Denetleme kontrol ve veri toplama
TBMM	: Türkiye Büyük Millet Meclisi
TEDAŞ	: Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TESİD	: Türk Elektronik Sanayicileri Derneği
TEYDEB	: Teknoloji ve Yenilik Destek Programları Başkanlığı
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UEA-PVPS	: Uluslararası Enerji Ajansı – Fotovoltaik Güç Sistemleri
U.S NEC	: Amerikan Ulusal elektrik kodu

ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

Samet ÇALIKOĞLU

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji kaynakları, Fotovoltaik hücreler, Şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemleri, Fotovoltaik hücreler ile elektrik üretimi

Özet: Yenilenebilir enerji kaynakları, önümüzdeki yılların en önemli konusu olacaktır. Fosil yakıtların hızla tükenmesi ve çevreye olan zararları, yenilenebilir enerji kaynaklarını vazgeçilmez kılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlisi olan güneş enerjisi ile elektrik üretimi her ne kadar günümüzde ucuz olmasa da, giderek düşen maliyetiyle dikkat çekmektedir. Foton enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik hücreler, farklı yarı iletken maddelerden üretilebildiği gibi, günümüzde bu konudaki çalışmalar da devam etmektedir. Fotovoltaik güç sistemlerinde kullanılan güç elektroniği elemanlarında yaşanan gelişmeler sistem verimini ve güvenliğini artırmaktadır. Bu tez çalışmasında, fotovoltaik hücreler ile elektrik üretim teknolojisi incelenmekte, şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemlerinin şebeke üzerindeki olası etkileri ve çözüm yöntemleri üzerinde durulmaktadır. Ayrıca, 360 W_p gücündeki şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi deneysel olarak uygulanarak tanıtılmıştır.

ELECTRICITY GENERATION WITH GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS

Samet ÇALIKOĞLU

Keywords: Renewable energy sources, Photovoltaic cells, Grid connected photovoltaic power systems, Electricity generation with photovoltaic cells

Abstract: Renewable energy sources will be the most important subject of next years. Rapid depletion and the damage to the enviroment of fossil fuels, makes renewable energy sources, indispensable. Although, electricity generation isn't cheap nowadays, draws attention with gradually falling cost. Photovoltaic cells, which convert photon energy into electrical energy, can be produced from different semiconductor materials. In addition, development effort continues on this issue. Developments in power electronic components which are used in photovoltaic power systems, make increases on system effiency and security. In this thesis, electricity generation technologies with photovoltaic cells, are reviewed, possible effects on electricity mains of grid connected photovoltaic power systems and solution methods are discussed. Furthermore, 360 W_p grid connected photovoltaic power system was implemented experimentally and introduced.

1. GİRİŞ

1.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Bir ülkenin kalkınmışlık düzeyinde, enerji zenginliği önemli rol oynamaktadır. Bu sebeple, ülkeler enerji alanında birçok politika izlemekte ve değişen teknolojilere göre politikalarını revize etmektedirler. Ülkelerin bu politikalarındaki temel amacı, vatandaşlarına en ucuz, en temiz, en güvenilir ve kesintisiz enerji kaynaklarını sunmaktır.

Dünya üzerindeki enerji talebi, özellikle artan nüfus nedeniyle gün geçtikçe artmaktadır. Bugün hayatımızda çok önemli bir yer tutan, -yenilenemeyen- petrol, kömür, doğalgaz ve nükleer gibi dünya üzerindeki varlık süreleri bile şimdiden tahmin edilebilen fosil enerji kaynakları, bundan birkaç yüzyıl sonra, insanlar tarafından bilinen sadece tarihi bir bilgi olarak kalacaktır. Fosil kaynakların çevreye olan zararları da giderek önemli boyutlara ulaşmıştır. Bu kaynakların kullanılmasıyla ortaya çıkan sera gazları, dünyadaki ısıyı atmosferde tutarak küresel ısınmaya yol açmaktadır. Ayrıca, ortaya çıkan zararlı gazların karıştığı asit yağmurları, hayatımız için tehlike oluşturmaktadır. Bu sebepler, dünya üzerinde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi gün geçtikçe artırmaktadır. Üniversitelerin ve sanayi kuruluşlarının yenilenebilir enerji üzerine yaptığı çalışmalar bu ilgiyi göstermektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları, sürdürülebilir şekilde kullanılabilen, çevreyi kirletmeyen ve işletme masrafı olmayan kaynaklardır. Bu kaynaklar, enerji çeşitliliğini artırarak birincil kaynaklara olan bağımlılığı azaltmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidrolik enerji, dalga enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji olarak sıralanabilir.

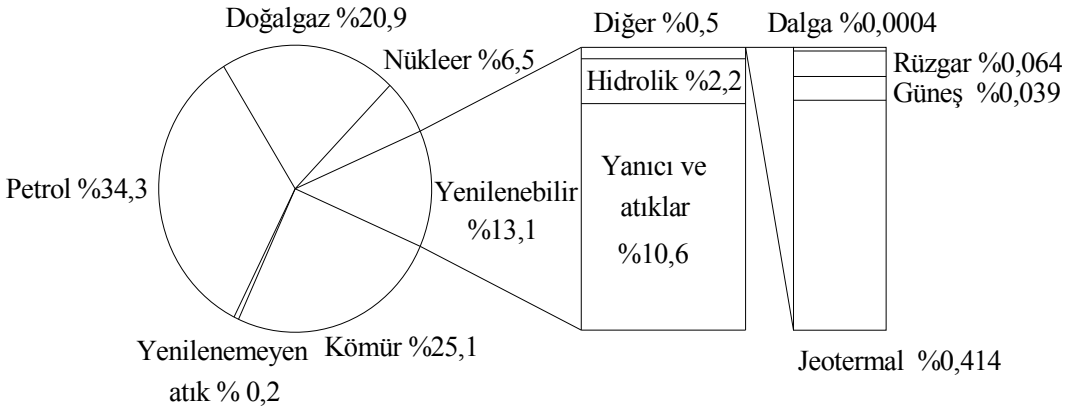
Yüzyılı aşkın varlığıyla geleceğin en önemli enerji kaynaklarını oluşturacak olan yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişimi, üç nesil olarak gruplandırılabilir [1].

19. yüzyılın sonlarında sanayi devrimi ile ortaya çıkan birinci nesil, hidroelektrik, biyokütle ve ısıtma amaçlı kullanılan jeotermal enerji kaynaklarını içermektedir [1].

İkinci nesil teknolojiler, ısıtma ve soğutma amaçlı kullanılan güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve fotovoltaik hücreleri içerir. Bu konuda ilk yatırımlar, 1973'te ortaya çıkan dünya petrol krizine bağlı olarak, enerji güvenliği kaygısına yol açmasına rağmen, çevresel yararları yatırımların devam etmesini sağlamıştır [1].

Üçüncü nesil teknolojiler hala geliştirilmekte olup, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi, okyanus enerjisi ve geliştirilmiş jeotermal sistemleri içermektedir [1].

Şekil 1.1'de 2007 yılı itibarı ile dünya toplam enerji arzının enerji türlerine göre dağılımı görülmektedir.



Şekil 1.1: Dünya toplam enerji arzının enerji türlerine göre dağılımı [1]

2008 yılı Aralık ayında, Avrupa Birliği tarafından yenilenebilir enerji yol haritasının başlatılmasına karar verilmiştir. Bu yol haritasında, 2020 yılı itibarı ile Avrupa Birliği ülkelerinin tükettiği enerji miktarının %20'sinin yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması amaçlanmıştır. Alman Yenilenebilir Enerji Birliği, 2009 yılı Ocak ayında, 2020 yılı itibarı ile elektrik üretiminin %47'sinin yenilenebilir enerjiden karşılanabileceğini duyurmuştur [2].

Avrupa Fotovoltaik Endüstri Derneği (EPIA), 2009 yılı yıllık raporunda, 2020 yılında Avrupa Birliği ülkelerinin elektrik ihtiyacının %12'sinin sadece fotovoltaik kaynaklardan elde edileceğini belirtmiştir [3].

1.2. Tezin Kapsamı ve Amacı

Bu tez çalışmasında, yenilenebilir enerji kaynaklarından en önemlisi olan güneş enerjisinden elektrik enerjisinin, üretiminden tüketimine kadar olan süreç ele alınmıştır. Fotovoltaik teknolojileri ile ilgili genel bilgiler verilmiş, yapılan 360 W_p şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi uygulaması tanıtılmış ve analiz edilmiştir.

İkinci bölümde, fotovoltaik hücrelerin tarihçesi, yapısı ve çalışması, çeşitleri, elektriksel özellikleri, kayıpları ve verimliliği anlatılarak fotovoltaik hücreler ile ilgili temel bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde ise, fotovoltaik modüllerin kullanıldığı fotovoltaik güç sistemleri ve bu sistemleri oluşturan elemanlar tanımlanarak, sistemlerdeki kullanılış amaçları açıklanmış, fotovoltaik güç sistemleri sınıflandırılmış ve şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemlerinde önemli parametreler anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, dünyada ve ülkemizde yapılan çalışmalar ve uygulamalar tanıtılmış, dünya üzerinde uygulanan teşvik yasaları açıklanmıştır. Ayrıca gerçekleştirilmesi düşünülen hedefler belirtilmiştir.

Beşinci bölümde, uygulaması yapılan 360 W_p gücünde şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi tanıtılarak, sistemden alınan akım gerilim ve harmonik bilgileri incelenmiştir.

Altıncı bölümde ise, yapılan çalışmalar değerlendirilmiş, sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

Bu yüksek lisans tezi, yenilenebilir enerji ve fotovoltaik güç sistemi teknolojilerine ilgi duyan herkese, yararlı bir kaynak olması amacıyla hazırlanmıştır. Fotovoltaik güç sistemi kurulumlarının, gelişen teknoloji ve olası teşvik yasalarıyla beraber maliyetin de düşmesiyle önümüzdeki yıllarda sürekli olarak artış göstermesi beklenmektedir. Önümüzdeki yıllarda gerçekleştirilecek çalışmalar ve uygulamalar, bu tez çalışmasıyla kıyaslanarak ne kadar mesafe alındığını gösterecektir.

2. FOTOVOLTAİK HÜCRELER

2.1. Fotovoltaik Hücrelerin Tarihçesi

Fotovoltaik hücreler üzerine güneş ışığı düştüğünde, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren düzeneklerdir. Bu enerji çevriminde herhangi bir hareketli parça bulunmaz. Hücrelerin çalışma ilkesi, fotovoltaik olayına dayanır. İlk kez 1839 yılında Becquerel, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğu gözlemleyerek fotovoltaik olayını bulmuştur. Katılarda benzer bir olay ilk olarak selenyum kristalleri üzerinde 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day tarafından gösterilmiştir. Bunu izleyen yıllarda çalışmalar, bakır oksit ve selenyuma dayalı fotovoltaik hücrelerin, yaygın olarak fotoğrafçılık alanında ışık metrelerinde kullanılmasını beraberinde getirmiştir. 1914 yılında fotovoltaik hücrelerin verimliliği %1 değerine ulaşmış ise de, gerçek anlamda güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik hücreler ilk kez 1954 yılında Chapin tarafından silikon kristali üzerine gerçekleştirilmiştir. Fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilen bu tarihi izleyen yıllarda araştırmalar ve ilk tasarımlar, uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için yapılmıştır. Fotovoltaik güç sistemleri 1960'ların başından beri uzay çalışmalarının güvenilir kaynağı olmayı sürdürmektedir [4].

Fotovoltaik hücrelerin yeryüzünde de elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik araştırma ve geliştirme çabaları 1954'lerde başlamış olmasına karşın, gerçek anlamda ilgi, 1973 yılındaki "1. petrol bunalımı"nı izleyen yıllarda olmuştur. Amerika, Avrupa ve Japonya'da büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılmıştır. Bir yandan uzay çalışmalarında kendini ispatlamış silikon kristaline dayalı fotovoltaik hücrelerin verimliliğini artırma çabaları ve diğer yandan alternatif olmak üzere çok daha az yarı iletken malzemeye gerek duyulan ve bu neden ile daha ucuza üretilebilecek ince film fotovoltaik hücreler üzerindeki çalışmalara hız verilmiştir [4].

Güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirme, basit, çevre dostu olan fotovoltaik güç sistemlerinin araştırılması ve geliştirilmesi, maliyetinin düşürülerek yaygınlaştırılması misyonu, uzun yıllar üniversitelerin yüklendiği ve yürüttüğü bir görev olmuş ve bu nedenle kamuoyunda hep laboratuarda gerçekleştirilen bir çalışma olarak kalmıştır. Ancak son yirmi yılda, dünya genelinde çevre konusunda duyarlılığın artmasına bağlı olarak kamuoyundan gelen baskı, çok uluslu büyük şirketleri, fosil kaynaklara dayalı olmayan yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları konusunda çalışmalar yapmaya zorlamışlardır. Büyük şirketlerin devreye girmesiyle, fotovoltaik hücreler konusundaki teknolojik gelişmeler ve güç sistemlerine artan talep ve buna bağlı olarak büyüyen üretim kapasitesi, maliyetlerin hızla düşmesini de beraberinde getirmiştir. Yakın geçmişe kadar, alışılagelmiş elektrik enerjisi üretim yöntemleri ile karşılaşıldığında çok pahalı olarak değerlendirilen fotovoltaik güç sistemleri, artık yakın gelecekte güç üretimine katkı sağlayabilecek sistemler olarak değerlendirilmektedir. Özellikle elektrik enerjisi üretiminde hesaba katılmayan ve görünmeyen maliyet olarak değerlendirilebilecek "sosyal maliyet" göz önüne alındığında, fotovoltaik güç sistemleri, fosil kaynaklara dayalı sistemlerden daha ekonomik olarak değerlendirilebilir [4].

2.2. Fotovoltaik Hücrelerin Yapısı ve Çalışması

Güneş ışınları, foton adı verilen enerji paketleri halinde yayılarak, dünyayı ısıtmakta ve aydınlatmaktadır. Yarı iletken maddeler kullanılarak yapılan fotovoltaik hücreler, üzerine gelen foton enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren elemanlardır. Bu nedenle "fotovoltaikler" (PV) olarak adlandırılmaktadır. Kare, dikdörtgen ve daire şeklinde yapılan fotovoltaik hücrelerin alanları yaklaşık 100 cm^2 civarındadır. Kalınlıkları özellikle en yaygın olan silisyum fotovoltaik hücrelerde 0,2-0,4 mm arasındadır. Fotovoltaik hücreler, yüksek gerilim ve akım elde etmek için seri ve paralel bağlanarak daha güçlü fotovoltaik modülleri oluşturur. Modüllerin de seri ve paralel bağlanmasıyla oluşan yüksek güçlü yapıya fotovoltaik dizi adı verilir.

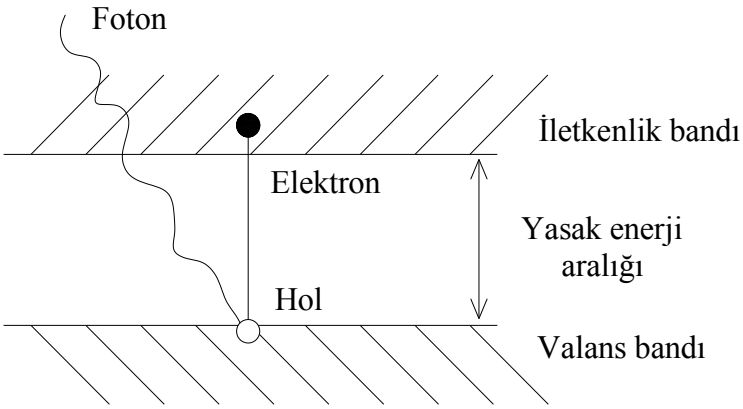
Yarı iletkenler, P ve N tipini oluşturmak üzere farklı maddelerle katkılanırlar ve bu yarı iletkenler bir araya getirilerek fotovoltaik hücre oluşturulur. En yaygın fotovoltaik hücre maddesi olarak kullanılan silisyumdan N tipi silisyum elde etmek

için silisyum eriyiğine periyodik cetvelin 5. grubundan bir element, örneğin fosfor eklenir. Silisyum'un dış yörüngesinde 4, fosforun dış yörüngesinde 5 elektron olduğu için, fosforun fazla olan tek elektronu kristal yapıya bir elektron verir. P tipi silisyum elde etmek için ise, eriyiğe 3. gruptan bir element (alüminyum, indiyum, bor gibi) eklenir. Bu elementlerin son yörüngesinde 3 elektron olduğu için kristalde bir elektron eksikliği oluşur, bu elektron yokluğuna hol ya da boşluk denir ve pozitif yük taşıdığı varsayılır [5].

P ve N tipi katkılandırılmış malzemeler bir araya getirildiğinde yarı iletken eklemler oluşur. N tipi yarı iletkende elektronlar, P tipi yarı iletkende holler, çoğunluk taşıyıcısıdır. P ve N tipi yarı iletkenler bir araya gelmeden önce, her iki madde de elektriksel bakımdan nötrdür. Yani P tipinde negatif enerji seviyeleri ile hol sayıları eşit, N tipinde pozitif enerji seviyeleri ile elektron sayıları eşittir. PN eklem oluştuğunda, N tipindeki çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar, P tipine doğru akım oluştururlar. Bu olay her iki tarafta da yük dengesi oluşana kadar devam eder. PN tipi maddenin ara yüzeyinde, yani eklem bölgesinde, P bölgesi tarafında negatif, N bölgesi tarafında pozitif yük birikir. Bu eklem bölgesine "geçiş bölgesi" ya da yükten arındırılmış bölge" denir. Bu bölgede oluşan elektrik alanı "yapısal elektrik alan" olarak adlandırılır [5].

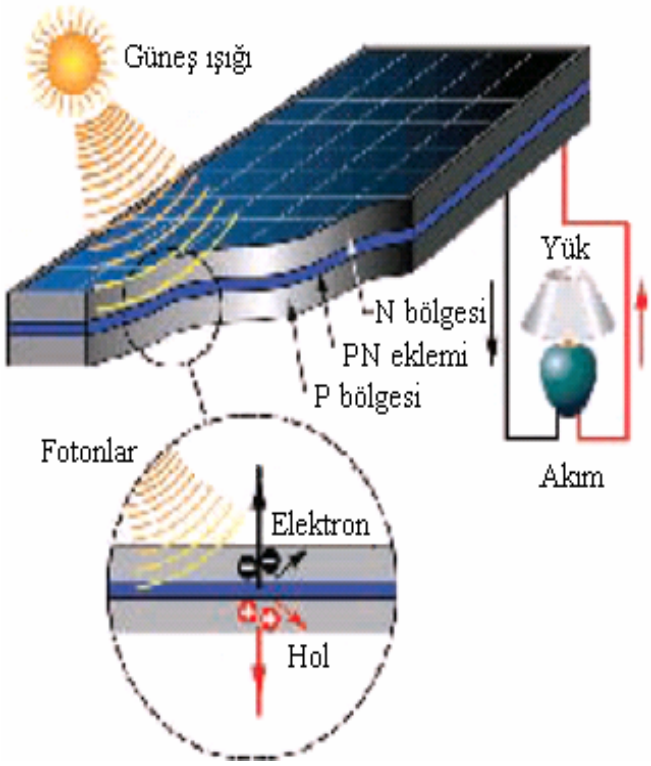
Yarı iletken eklemin, fotovoltaik hücre olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaik dönüşümün sağlanması gerekir. Bu dönüşüm iki aşamada olur. Öncelikle, eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-hol çiftleri oluşturulur, daha sonra ise, bunlar bölgedeki elektrik alan yardımıyla birbirlerinden ayrılır [5].

Yarı iletkenler, bir yasak enerji aralığı tarafından ayrılan iki enerji bandından oluşur. Bu bantlar, valans bandı ve iletkenlik bandı adını alırlar. Bu yasak enerji aralığına eşit veya daha büyük enerjili bir foton, yarı iletken tarafından soğurulduğu zaman, enerjisini valans banddaki bir elektrona vererek, elektronun iletkenlik bandına çıkmasını sağlar. Böylece, elektron-hol çifti oluşur. Bu olay, PN eklem fotovoltaik hücrenin ara yüzeyinde meydana gelmiş ise, elektron-hol çiftleri buradaki elektrik alanından dolayı birbirinden ayrılır [5]. Şekil 2.1'de elektron-hol çiftinin oluşumu görülmektedir.



Şekil 2.1: Elektron-hol çiftinin oluşumu [6]

Bu şekilde fotovoltaik hücre, elektronları N bölgesine, holleri de P bölgesine iten bir pompa gibi çalışır. Birbirlerinden ayrılan elektron-hol çiftleri, fotovoltaik hücrenin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluşturur. Bu süreç, yeniden bir fotonun hücre yüzeyine çarpmasıyla aynı şekilde devam eder. Yarı iletkenin iç kısımlarında da, gelen fotonlar tarafından elektron-hol çiftleri oluşturulmaktadır. Fakat, gerekli elektrik alanı olmadığı için tekrar birleşerek kaybolmaktadırlar [5]. Şekil 2.2'de fotovoltaik hücrenin çalışma prensibi görülmektedir.

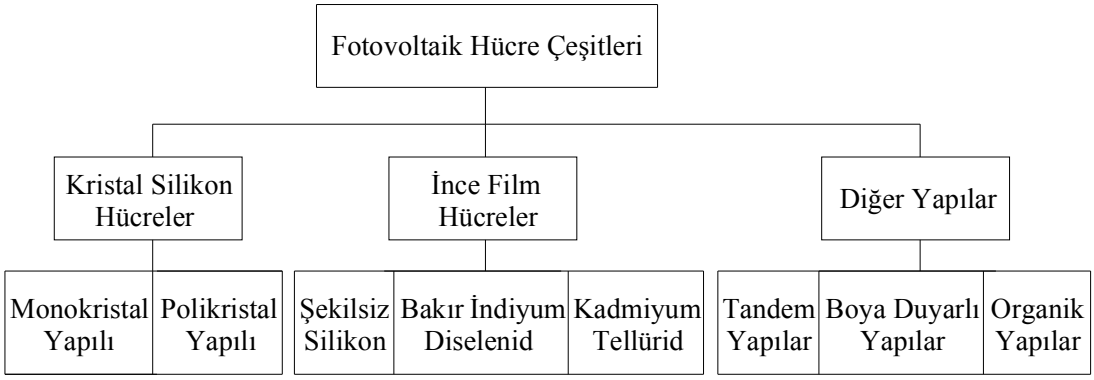


Şekil 2.2: Fotovoltaik hücrenin çalışma prensibi [7]

2.3. Fotovoltaik Hücre Çeşitleri

Fotovoltaik hücreler, farklı maddelerden yararlanılarak üretilebilir. Bu maddeler fotovoltaik hücrelerin verimliliği ve maliyeti üzerinde etkilidir. Fotovoltaik hücreler, üretildikleri hücre çeşitlerine göre Tablo 2.1'deki şekilde görüldüğü gibi gruplandırılabilir.

Tablo 2.1: Fotovoltaik hücre çeşitleri



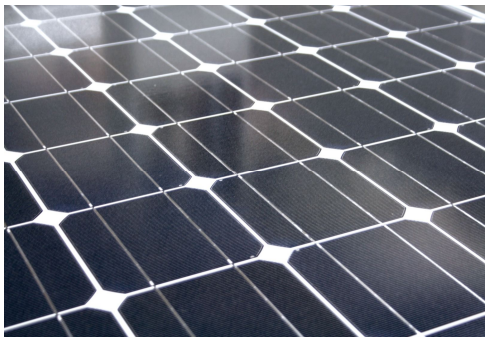
2.3.1. Kristal silikon hücreler

Silikon oksijenden sonra en bol bulunan elementtir. Silikon çoğunlukla kuvars veya kum halinde, silikon dioksit bileşiği olarak bulunur. Silikon dioksit, saflaştırma işleminde karbon ile 1800^{o}C'de ısıtılır. Bu sürecin sonunda oluşan silikon, çoğunlukla demir ve alüminyum endüstrilerinde kullanılır. Oluşan silikonun saflığı, yeterli olmadığından kimyasal yollarla silikonun saflığı artırılır ve istenen saflığa ulaşan silikon, fotovoltaik hücre üretiminde kullanılır [8].

2.3.1.1. Monokristal yapılı hücreler

İlk ticari fotovoltaik hücrelerde, CHROZALSKI kristal çekme tekniği ile büyütülen tek kristal yapılı silisyum kullanılmıştır. Fotovoltaik endüstrisinde hala en çok kullanılan yöntem olan bu teknikte, öncelikle ark fırınlarında silisyum dioksit, çeşitli kimyasal ve termal reaksiyonlardan geçirilerek saf silisyum elde edilir. Daha sonra silisyum eriyiğe çekirdek denen tek kristal yapılı bir silisyum parçası batırılır. Bu çekirdek, eriyikten çıkarıldığında soğuyan silisyum eriyik, çekirdeğin üzerine külçe

şeklinde yığılmış olur. Bu silisyum külçe olur olmaz bir keski ile dilimlere ayrılır. Bu, iki aşamada olur. Öncelikle, külçe dikdörtgen bloklar şeklinde kesilir. Daha sonra bu bloklar dilimlere ayrılarak hücre şeklinde işlenir. Verimleri %15 ile %18 arasındadır. Yapım sırasında malzeme kaybının çok fazla olması, bu hücrelerin dezavantajıdır [4]. Şekil 2.3'te monokristal yapılı fotovoltaik hücreler görülmektedir.



Şekil 2.3: Monokristal yapılı hücreler [9]

2.3.1.2. Polikristal yapılı hücreler

Bu teknikte, saf eritilmiş silikon silindir ya da blok şeklinde kalıba dökülür. Oluşan bu çoklu kristal yapıdaki bloktan plakalar dilimlenir. Monokristale kıyasla verimliliği az miktarda düşer, fakat üretim metodundaki hassasiyet azaldığı için maliyeti daha düşüktür. Modül verimliliği %13 ile %16 arasındadır. Polikristal hücrelerin yapıları çok kristallidir ve ışığın yansımasında bu kristaller rahatlıkla görülebilir [7]. Şekil 2.4'te polikristal yapılı fotovoltaik hücreler görülmektedir.



Şekil 2.4: Polikristal yapılı hücreler [10]

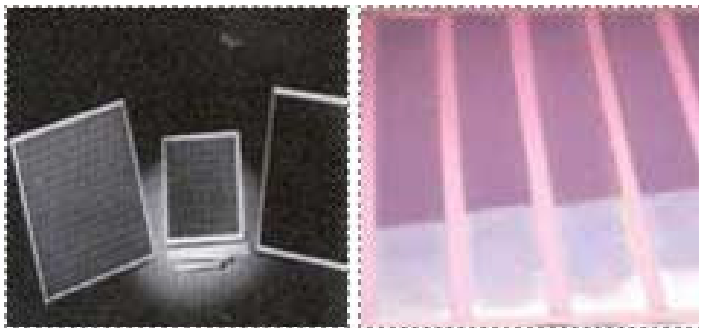
2.3.2. İnce film hücreler

İnce silikon ile ilgili ilk incelemeler, yüksek verimlilik için ideal parametreleri araştıran M. Wolf ve J. Lofersky tarafından yapılmıştır. Hücre kalınlığının azalmasının getirdiği aktif hacimde meydana gelen azalma, doyma akımını da azaltarak, açık devre gerilimini artmıştır [8].

Yarı iletken malzemeler olarak genellikle, şekilsiz silikon, bakır indiyum diselenid ve kadmiyum tellürid kullanılır. Bu malzemelerin yüksek ışık soğurma yeteneği sebebiyle, güneş ışığını elektrik enerjisine çevirmeleri için 0,001 mm kalınlıkta olmaları bile yeterlidir. Kristal silikon teknolojisi ile kıyaslandığında, daha az kullanılan hammadde ve enerjiye rağmen, seri üretim ve daha fazla çıktı olanakları bu teknolojiyi cazip kılmaktadır. İnce film hücrelerin göreceli düşük verimliliklerine rağmen, enerji verimi bazı koşullarda kesinlikle dikkate değerdir. Az ışık ve yüksek sıcaklık koşullarında performansı diğer hücrelere göre daha iyidir. Ayrıca bulutlu ve kapalı havalarda da enerji üretimine devam ederler [7].

2.3.2.1. Şekilsiz silikon hücreler

Kristal yapı özelliği göstermeyen şekilsiz silikon hücrelerin verimi %10 dolayında, ticari modüllerde ise %5 ile %7 arasındadır. Günümüzde daha çok, küçük elektronik cihazların güç kaynağı olarak kullanılan amorf silisyum fotovoltaik hücrenin bir başka önemli uygulama sahası, binalara entegre yarı saydam cam yüzeyler olarak, bina dış koruyucusu ve enerji üreteci olarak kullanılabileceği alanlardır [11]. Şekil 2.5'te şekilsiz silikon hücreler görülmektedir.



Şekil 2.5: Şekilsiz silikon hücreler [11]

2.3.2.2. Bakır indiyum diselenid hücreler

İlk bakır indiyum diselenid hücreler 1974 yılında Bell Laboratuarlarında bir grup tarafından sunuldu. Bakır indiyum diselenidin fotovoltaik materyal olarak seçilmesinin sebebi, çok yüksek optik soğurma katsayısı ve hazırlanma maliyetinin düşük olmasıdır [12].

Bakır indiyum diselenid hücreler, şekilsiz silikon hücrelerde olduğu gibi, ışığa bağlı verim kaybına uğramaz. Bununla beraber, sıcak ve nemli koşullarda kararlılık sorunları meydana gelir. Bu hücreler şu anda en verimli ince film teknolojisidir. Seri üretimle birlikte, maliyeti kristal silikon hücrelerden çok daha az olmaktadır. Ticari modül verimlilikleri %7,5 ile %9 arasındadır. Yapıları homojendir ve renkleri siyahtır [7]. Şekil 2.6'da bakır indiyum diselenid hücreler görülmektedir.



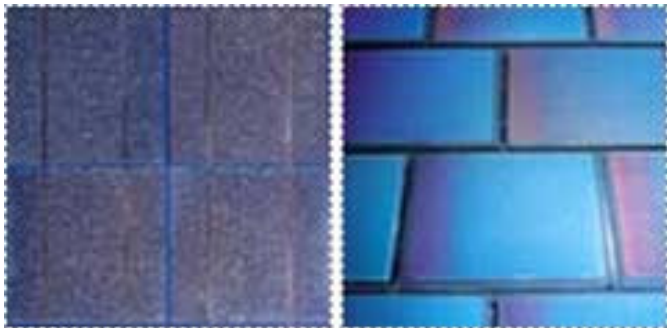
Şekil 2.6: Bakır indiyum diselenid hücreler [11]

2.3.2.3. Kadmiyum tellürid hücreler

Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünü en uygun şekilde sağlaması gibi bazı avantajlı özellikleri bir arada topladığı için, kadmiyum tellürid, ince film teknolojisi için en ideal malzemedir. Laboratuar koşullarında verimi %16'nın üzerindedir [8].

Bu teknolojide bakır indiyum diselenidde olduğu gibi, seri üretimle birlikte maliyet düşmektedir. Ticari modül verimlilikleri %6 ile %9 arasındadır. Yapıları homojendir.

Renkleri, reflektif koyu yeşilden siyaha doğru değişir [7]. Şekil 2.7'de kadmiyum tellürid hücreler görülmektedir.



Şekil 2.7: Kadmiyum tellürid hücreler [11]

2.3.3. Diğer yapılar

2.3.3.1. Tandem yapılar

Fotovoltaik hücrelerin verimlilikleri, bant aralıkları farklı hücrelerin yukarıdan aşağıya sıralanması ile belirgin bir şekilde artırılabilir. Böylelikle güneş ışığından maksimum verimlilik sağlanır. Teorik olarak, seri bağlanan iki hücre %41,9 verimliliğe ulaşır. Hücre sayısının artması ile %50'den fazla verimlilik sağlanır. Bu tür tandem ayarlamalar, ince film ve amorf silisyum hücreler kullanılarak gerçekleştirilebilir [13].

2.3.3.2. Boya duyarlı yapılar

Nanokristal yapılı boyarmadde uyarımlı hücreler, temel olarak geleneksel hücrelerden çok farklıdır. Boyalı titanyum dioksit tabaka ve elektrolit olarak iletken tuzlu solüsyon, iki saydam iletken elektrot arasına yerleştirilir. Titanyum dioksit, üstteki elektrota macun şeklinde uygulanır. Bu tabaka, 450^{o}C sıcaklıkta, 10 µm kalınlığında bir katı film oluşturacak şekilde fırınlanır. Bu işlem sonrasında 10-30 mm kalınlığındaki parçacıklardan oluşan gözenekli bir yapı ortaya çıkar. Titanyum dioksit yalnızca mor ötesi ışığı soğurduğu için, titanyum dioksit yüzey çok ince bir rutenyum tabaka ile kaplanır. Gözeneklere ulaşabilen sıvı elektrolit sayesinde,

boyanın alttaki elektrotla elektriksel bağlantısı kurulmuş olur. Hücreye ışık çarptığında boya aktifleşir ve titanyum dioksite bir elektron iletir. Bu elektron partiküllerin içinden üst elektrota ulaşır. Alt elektrota ise, dış devre sayesinde erişir. Bu elektron, platin katalizör sayesinde elektrolit solüsyona transfer edilir. Elektrolit ise, elektronu yeniden boyaya ileterek devreyi tamamlar [7].

2.3.3.3. Organik yapılar

Piyasada ilgi alanı oluşturan organik hücreler, moleküler ve polimer organik hücreler veya düz katmanlı sistemler ve kütle farklı bağlantı sistemleri olan organik fotovoltaik hücreler olarak sınıflandırılabilir. Polimerler, moleküler organik camlar gibi organik malzemeler, P tip veya N tip yarı iletken özelliği gösterirler. Bu malzeme ile oldukça yüksek optik alım katsayıları sağlamak mümkündür. Organik bileşiklerin cinsleri hemen hemen sonsuzdur. Sonsuz alternatif içerisinde malzemenin bolluğu, düşük ısılarda üretim kolaylığı ve düşük maliyet, malzeme seçimini belirler. Organik fotovoltaik hücrelerden büyük çaplı aygıtlar üretilmesi doğrudan yapılabilen bir iş olduğu halde, inorganik fotovoltaik hücrelerde bu büyük sorundur [13].

Organik fotovoltaik hücrelerin enerji açısından amortismanının çok kısa olacağı düşünülmektedir. Plastik malzeme ve filmlerin kullanılması halinde, verimli fotovoltaik dönüşüm sağlanabilir. Birçok bilinmeyen olmasına rağmen organik fotovoltaik hücrelere olan ilgi hızla gelişmektedir [13].

Fotovoltaik hücre üretiminde en önemli seçimlerden biri, hücre yapımında kullanılan malzemedir. Fotovoltaik diyotta soğurucu tabaka olarak kullanılan yarı iletken, güneş spektrumunun önemli bir bölümünü, metrenin milyonda biri kadar kalınlıkta soğurmalıdır [14].

Güneş spektrumunda kırmızı ışığın enerjisi 1,7 eV civarında iken, mavi ışığın enerjisi 2,7 eV civarındadır. Ancak bu değerlerin altında ve üstünde (0,5-3,3 eV) önemli ölçüde enerji vardır. Yasak enerji aralığı 0,5 ile 3,3 eV arasında olan

malzeme, fotovoltaik hücre yapımında kullanılabilir. Ayrıca kullanılacak malzemelerin yapısal ve elektriksel özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir [14].

Fotovoltaik hücre çeşitlerini üç nesil altında incelemek mümkündür:

Birinci nesil: Monokristal ve polikristal yapılı hücreler
İkinci nesil: Amorf silisyum, kadmiyum tellürid ve bakır indiyum hücreler
Üçüncü nesil: Tandem, boya duyarlı ve organik yapılar

Birinci ve ikinci nesil fotovoltaik hücre çeşitlerinin özellikleri karşılaştırmalı olarak Tablo 2.2'de görülmektedir. Üçüncü nesili oluşturan tandem, boya duyarlı ve organik yapılarda kesin bir sonuca ulaşılmış değildir. Üçüncü nesil hücrelerin gelecekte yüksek verimlilikleri ile önemli bir atılım yapması beklenmektedir.

Tablo 2.2: Fotovoltaik hücrelerin özellikleri [15]

Monokristal ve polikristal hücreler
➢ Piyasa payı şu anda %85-90 civarındadır. ➢ Çevreye zararlı madde içermemektedirler. ➢ Hammadde sıkıntısı bulunmamaktadır.
Amorf silisyum, kadmiyum tellürid ve bakır indiyum diselenid hücreler
➢ Laboratuar ölçeğinde %18'e varan verime sahiptir. ➢ Cam ya da çelik levha taban üzerine üretilebilir. ➢ Maliyeti düşük ve gelişmeye daha açıktır.

Fotovoltaik hücrelerin avantajları ve dezavantajları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

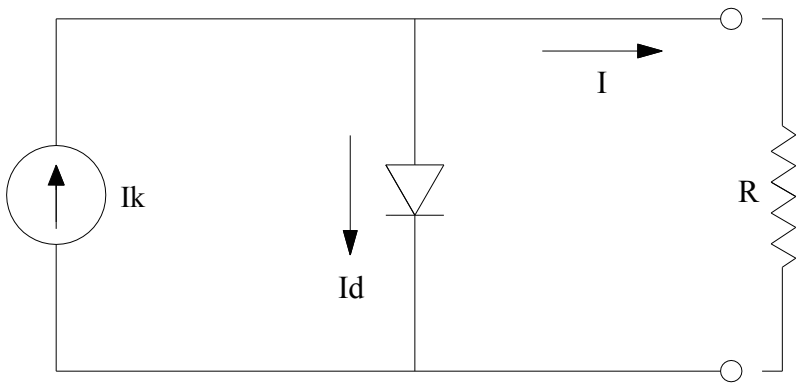
- Hareketli parçaları yoktur, arıza ve bakım maliyetleri çok düşüktür.
- Çevre kirliliğine neden olmazlar.
- Uzun ömürlüdürler.
- Gürültülü çalışmazlar.
- İlk kurulum maliyetleri halen yüksektir.

- Bulutlu havalarda verim oldukça düşmektedir.
- Geniş alan gereksinimi duyulmaktadır [15].

2.4. Fotovoltaik Hücrelerin Elektriksel Özellikleri

2.4.1. İdeal fotovoltaik hücre eşdeğer devre şeması

Şekil 2.8'de ideal fotovoltaik hücre eşdeğer devre şeması görülmektedir. Şekilde gösterilen akım kaynağı, fotonlar aracılığıyla fotovoltaik hücrenin ürettiği akımdır. Diyot ise, fotovoltaik hücreyi oluşturan PN eklemini temsil etmektedir.

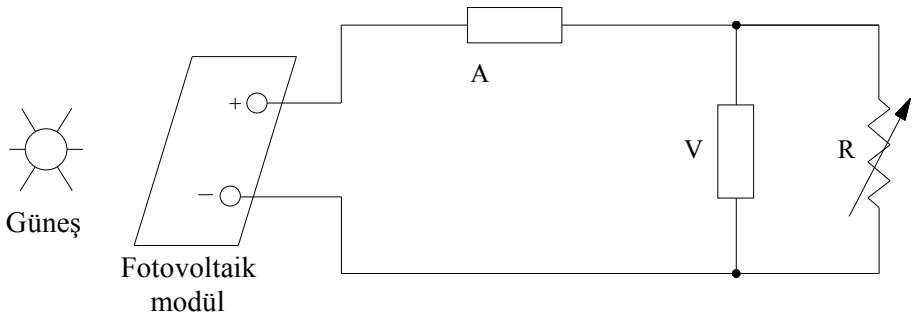


Şekil 2.8: İdeal fotovoltaik hücre eşdeğer devre şeması

2.4.2. Fotovoltaik hücrenin akım-gerilim karakteristiği

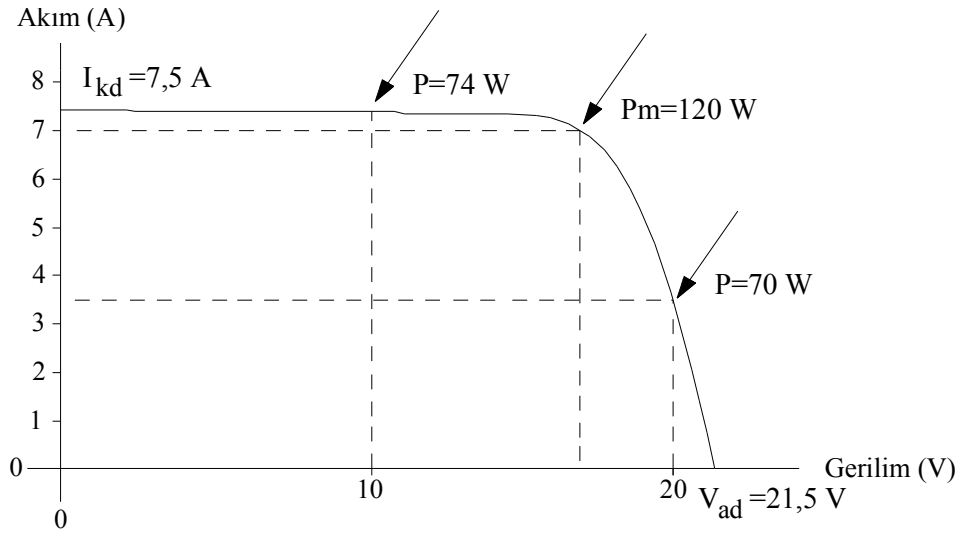
Fotovoltaik hücrelerin elektriksel özelliklerinden bahsedebilmek için, öncelikle bu hücrelerin akım-gerilim karakteristiğini tanımlamak gerekir. Bu tanımlama için de akım ve gerilimin yükten nasıl etkilendiği görülmelidir.

Yükün açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ile, ayarlı bir yük aracılığıyla, fotovoltaik hücrenin farklı akım ve gerilimdeki çalışma noktaları ve maksimum güç noktası belirlenir. Böylelikle fotovoltaik hücrenin elektriksel özelliği belirlenmiş olur. Bu parametreleri belirlemek için Şekil 2.9'da şeması verilen deney uygulanır. Açık devre gerilimi, yük çalıştırılmadığında hücre üzerinde oluşan gerilimdir. Kısa devre akımı ise, hücre uçlarının kısa devre edilmesi ile hücreden geçen akımdır.



Şekil 2.9: Fotovoltaik hücrenin akım-gerilim karakteristiğini ve maksimum güç noktasını belirlemede kullanılan deney şeması

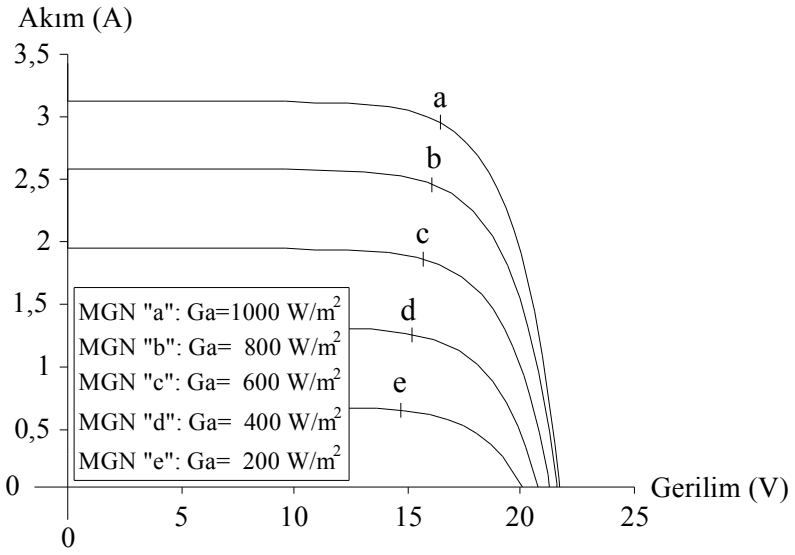
Öncelikle, fotovoltaik hücrenin kısa devre akımı ve açık devre gerilimi ölçülür. Ayarlı yükün direnci minimumdan maksimuma kadar değiştirilerek yükün çalıştığı akım ve gerilim noktaları belirlenir. Kısa devre akımı ve açık devre gerilimi arasında bulunan çalışma noktalarının birleştirilmesiyle fotovoltaik hücrenin akım-gerilim karakteristiği oluşturulur. Fotovoltaik hücrenin maksimum gücü, akım gerilim karakteristiğinden hesaplanabilir. Akım-gerilim karakteristik eğrisi altında kalan en büyük dikdörtgenin alanı maksimum güce eşittir. Şekil 2.10'da fotovoltaik hücrenin akım-gerilim karakteristiği ve maksimum güç noktası görülmektedir.



Şekil 2.10: Fotovoltaik hücrenin akım-gerilim karakteristiği ve maksimum güç noktası [16]

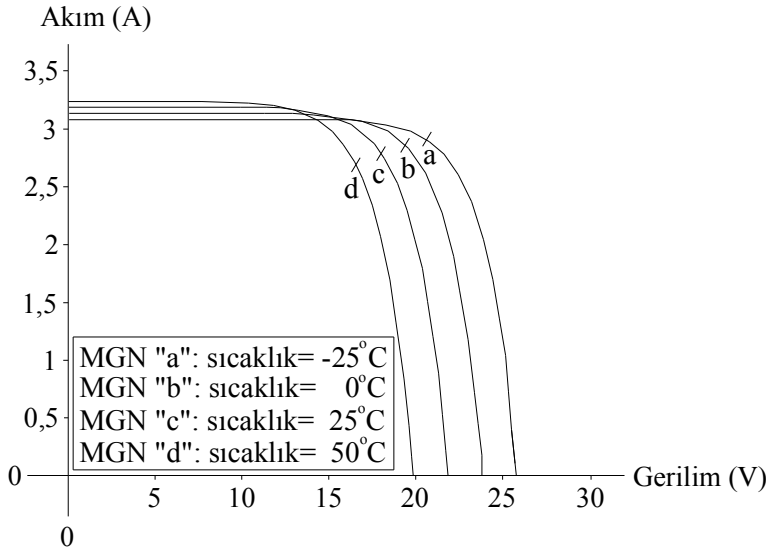
Fotovoltaik hücrenin maksimum gücü, üzerine gelen güneş ışığı şiddeti ile orantılı olarak değişir. Işık şiddeti azaldıkça hücrenin ürettiği gerilim ve hücreden çekilen akım azalmaktadır. Burada kısa devre akımındaki azalma, açık devre gerilimindeki azalmadan daha fazladır. Fotovoltaik hücrelerden en iyi verimi elde edebilmek için,

hücreler güneş ışığından maksimum faydalanabilecek şekilde yerleştirilmelidir. Şekil 2.11'de, ışık şiddeti azalan hücrelerin akım ve gerilimindeki azalma ile maksimum güç noktalarındaki (MGN) değişme görülmektedir.



Şekil 2.11: Fotovoltaik hücrenin farklı ışık şiddetlerindeki akım-gerilim karakteristiği [17]

Ortam sıcaklığının artması ise kısa devre akımını çok az artırarak açık devre gerilimini azaltmaktadır. Açık devre gerilimindeki değişme, kısa devre akımındaki değişmeye göre daha fazladır. Şekil 2.12'de fotovoltaik hücrenin ortam sıcaklığına bağlı olarak akım-gerilim karakteristiği ile maksimum güç noktalarındaki değişme görülmektedir.

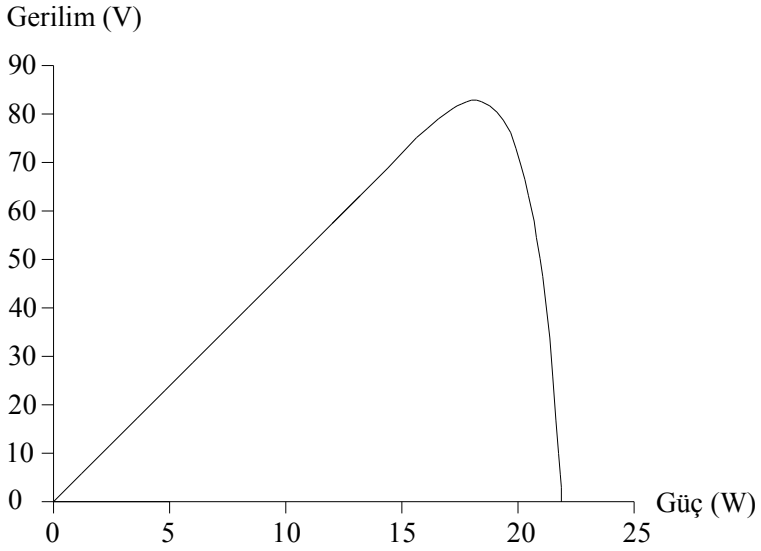


Şekil 2.12: Fotovoltaik hücrenin farklı sıcaklıklardaki akım-gerilim karakteristiği [17]

Fotovoltaik hücrelerin elektriksel karakteristikleri incelendiğinde, akım-gerilim ilişkisinin doğru akım kaynağına benzemediği, yani doğrusal olmadığı ve maksimum güç noktasının ışık şiddetine ve sıcaklığa bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Fotovoltaik hücrelerden maksimum güç, ışık şiddeti yüksek ve sıcaklığı az olan ortamlarda elde edilir.

2.4.3. Fotovoltaik hücrenin güç-gerilim karakteristiği

Fotovoltaik hücrelerin güç-gerilim karakteristiği incelendiği takdirde, öncelikle gücün hücre gerilimi ile orantılı olarak arttığı görülmektedir. Maksimum güç noktasından sonra akımda meydana gelen büyük düşüş, çıkış gücünü düşürmektedir. Şekil 2.13'te fotovoltaik hücrenin güç-gerilim karakteristiği görülmektedir.



Şekil 2.13: Fotovoltaik hücrenin güç-gerilim karakteristiği [18]

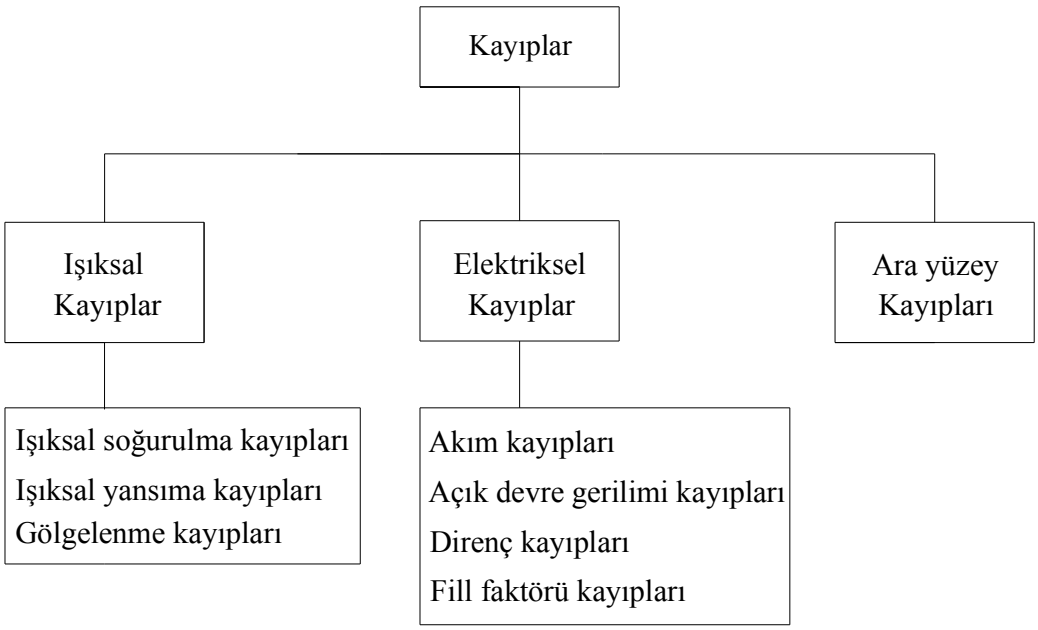
2.5. Fotovoltaik Hücrelerde Kayıplar

Fotovoltaik hücrelerin kayıpları, ışıksal, elektriksel ve ara yüzey kayıpları olarak üç ana başlık altında incelenebilir.

Işıksal kayıplar, fotonların soğurulamaması ve elektron-hol çiftlerinin üretilememesinden kaynaklanır. Elektriksel kayıplar ise, alınan gücün azalmasına

sebep olan elektrik parametrelerindeki değişikliklerdir. Ara yüzey kayıpları, yarı iletken tabakalar arasındaki yüzeylerde meydana gelen kayıplardır [19]. Bu üç ana kayıp ayrıntılı şekilde Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3: Fotovoltaik hücrelerde kayıplar



2.5.1. Işıksal kayıplar

Işıksal kayıplar; ışıksal soğurulma kayıpları, ışıksal yansıma kayıpları ve gölgelenme kayıplarından oluşur. Işıksal kayıplardan dolayı üretilen akım azalır.

2.5.1.1. Işıksal soğurulma kayıpları

Işıksal soğurulma kayıpları, fotovoltaik hücrenin soğuramadığı fotonlardan, dolayısıyla oluşamayan elektron-hol çiftlerinden kaynaklanır.

Fotovoltaik hücreler, yasak enerji aralığından daha küçük enerjili fotonları soğuramazlar. Yasak enerji aralığından daha küçük enerjili fotonlar fotovoltaik hücreye ulaştığı zaman herhangi bir potansiyel fark oluşmaz. Fotonlar, maddenin içinde bir taraftan diğer tarafa geçer ve ışıksal soğurulma kayıplarını oluşturur. Bu kayıplar %10'a kadar çıkabilmektedir [19].

2.5.1.2. Işıksal yansıma kayıpları

Işıksal yansıma kayıpları; güneş ışınımının fotovoltaik hücreye ulaşmasından itibaren sırayla üst yüzeyde, yarı iletken tabakada ve omik kontakta gerçekleşebilir [19].

Fotovoltaik hücrenin üst yüzeyinde meydana gelen yansıma kayıpları, bu yüzey üzerinde desenler oluşturulması ve yüzeyin yansıma önleyici kaplama ile kaplanması gibi teknolojik yöntemlerle en aza indirilmektedir. %3-%4 düzeyine kadar düşürülebilen üst yüzey yansıma kayıpları tamamen ortadan kaldırılamamaktadır [19].

Fotovoltaik hücrede yansıma önleyici kaplama ile yarı iletken tabakanın ışıksal sabitleri arasındaki farklılıklara bağlı olarak, yarı iletken tabakalardan bir miktar yansıma beklenebilir. Fotovoltaik hücrenin bu kısmındaki yansımalar, yansıma önleyici kaplama ile yarı iletken tabakaların uygun işlemlerden geçirilmesi ve ışık tuzaklaması ile %5'in altına düşürülebilir [19].

Fotovoltaik hücredeki omik kontağa, soğurucu-üretici yoluyla bir miktar ışığın sızması beklenebilir. İdeal bir durumda, bu ışık tekrar soğurucu-üreticiye yararlı bir şekilde soğurulmak üzere yansıtılabilir. Omik kontaktaki yansıma kayıpları %2'yi geçmemelidir. İyi tasarlanmış bir hücrede, bu üç bölgede meydana gelen toplam ışıksal yansıma kayıpları %18'e kadar çıkabilir. Bu oran uygun işlemlerle %5'e kadar düşürülebilir [19].

2.5.1.3. Gölgelenme kayıpları

Fotovoltaik hücrelerde, fiziksel zararın dışında hücrenin çalışmasını etkileyebilecek en kötü durum, üzerinde oluşacak bir gölgedir. Küçük bir gölge bile, hücrenin enerji üretim miktarında etkili olmaktadır. Bu sebeple, hücrelerin en çok üretim yapacakları zaman olan gün ortasında kesinlikle gölgelenmelerden etkilenmeyecek şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Gölgelenme geçici veya konuma bağlı olarak iki biçimde olabilir. Geçici gölgelenmeye örnek olarak hücre üzerine düşen yapraklar, kurum, toz, kar ve çamur örnek verilebilir. Hücrenin kendini temizleme kabiliyeti,

yani yağmurla gölgelenmeye sebep olan şeylerin akabilme potansiyeli ne kadar iyi ise, kirlenme de o kadar az olur. Bu koşul %12'lik bir eğimle sağlanabilir. Ayrıca hücrelere yapılan tek bakım olan süngerle temizleme ve hortumla yıkama yoluyla da hücreler üzerindeki maddelerden arındırılabilir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, termal şoka neden olup, kaplama camının kırılmasını önlemek için, hücrelerin sıcakken yıkanmamasıdır. Konuma bağlı gölgelenme ise, fotovoltaik modüllerin çevresindeki binaların ve ağaçların sebep olduğu gölgelenmeler gibi her türlü gölgeyi kapsar. Bazı gölgelenmeler, gölgeye neden olan nesnenin ya da hücrenin yer değiştirmesiyle önlenebilir [7].

2.5.2. Elektriksel kayıplar

Fotovoltaik hücrelerin elektriksel parametrelerinde istenmeyen değişiklikler bu kayıpları oluşturur. Elektriksel kayıpları tanımlamada akım-gerilim ilişkisi kullanılır.

2.5.2.1. Akım kayıpları

Bir fotovoltaik hücrede üretilen azınlık yük taşıyıcılarının kaybı; hacim içinde yeniden birleşme, yüzeyde yeniden birleşme ve kristal sınırlarının iç yüzeyler gibi davranması olarak birçok yolla gerçekleşebilir [19].

Fotovoltaik hücrenin hacmi içinde meydana gelen yeniden birleşme kayıpları, fotonlarla uyarılan yük taşıyıcılarının sonlu ömürlerinden kaynaklanır. PN eklemli bir fotovoltaik hücrede, güneş ışığıyla uyarmalar sonucu oluşan elektron-hol çiftleri, difüzyon mesafesi sonunda yeniden birleşerek yok olurlar. Dolayısıyla, fotovoltaik hücreden elde edilmek istenen akıma katkıda bulunamazlar. Bu nedenle ortaya çıkan akım kayıplarını en aza indirmek için fotovoltaik hücrenin ışıksal ve elektriksel gereksinimleri arasında bir uyum sağlanmalıdır. Akım kayıplarını azaltmak için, fotonlar hücrenin PN eklemine yakın bölgelerine düşürülerek, elektron-hol çiftleri eklem yakınlarında oluşturulabilir. Bunun haricinde, hücrenin toplayıcı metal kafes aralığı, difüzyon mesafesinden daha dar tutularak elektron-hol çiftlerinin yeniden birleşmesi engellenebilir. Hacim içi yeniden birleşmeden kaynaklanan verim

kayıpları, tamamen ortadan kaldırılamaz. İyi tasarlanmış hücrelerde bu kayıplar %5 ile %20 arasında değişmektedir [19].

Yüzey yeniden birleşmesi, bir malzemedeki her kesintinin, yeni elektronik koşullar oluşturmasından kaynaklanır. Işınımla üretilen ve yüzeye doğru yayılan yük taşıyıcıları; yüzey etkilerini önleyici özel önlemler alınmadığı ya da taşıyıcıların yüzeye ulaşmaları engellenmediği zaman; yüzeyde yeniden birleşerek, akıma katkıda bulunamadan yok olurlar. Yüzeyde bir oksit tabakanın oluşturulması, yüzey koşullarının etkisini ve bundan kaynaklanan taşıyıcı kaybını azaltır. Yüzey yakınlarına uygulanan homojen olmayan bir katkılama işlemi; bir iç elektrik alan oluşumuna yol açarak, azınlık yük taşıyıcılarının yüzeyden uzaklaştırılmasını sağlar. Böylece yüzeyde yeniden birleşme sonucu oluşan akım kayıpları azaltılmış olur. Bu kayıplar iyileştirilmiş durumdaki fotovoltaik hücrelerde en fazla %5 seviyelerine kadar çıkmaktadır [19].

Bir fotovoltaik hücrenin kristal sınırları iç yüzeyler gibi davranabildiğinden, serbest bir yüzey ölçüsünde azınlık yük taşıyıcılarının kaybına sebep olabilirler. Kristal sınırlarında pürüzler çok daha etkin olduğundan, yapılacak bir katkılama işlemi azınlık yük taşıyıcılarını kristal sınırlarından uzaklaştıracak ve bu bölgelerde oluşan akım kayıplarını azaltacaktır [19].

2.5.2.2. Açık devre gerilimi kayıpları

Homojen eklemler, heterojen eklemler ve Schottky diyotlarında açık devre gerilimi; ya hacim içi yeniden birleşme ömrü ya da ara yüzey yeniden birleşme hızları ile denetlenir. Açık devre gerilimini kontrol eden ve etkileyen diğer parametreler, yasak bant genişliği ile PN ekleminin her iki bölgesindeki katkılama seviyeleridir. Açık devre geriliminden kaynaklanan kayıplar %4 ile %50 arasında değişmektedir [19].

2.5.2.3. Direnç kayıpları

Fotovoltaik hücreyi oluşturan yarı iletkenin direnci, metal bağlantıların direnci ve metal bağlantılar ile yarı iletken arasında oluşan direnç; hücrenin bir seri dirence

sahip olmasına neden olur. Fotovoltaik hücrenin eklem bölgesindeki safsızlıklar, kristal bozuklukları ve PN ekleminin kenarlarındaki kaçaklar da düşük şönt direncinin oluşmasına neden olan etkenlerdir. Fotovoltaik hücrelerin yapımında metal kontakların yüzeye kaplanması sırasında kullanılan metal, hücrenin yüzeyindeki çizik ve çatlakları kısmen veya tamamen doldurur. Bu ise, düşük şönt direncine sebep olur. Seri direncin çok büyük değerleri kısa devre akımını (I_{kd}), şönt direncinin çok küçük değerleri ise açık devre gerilimini (V_{ad}) azaltır [19].

2.5.2.4. Fill faktörü kayıpları

Fill faktörü, açık devre gerilimi ve kısa devre akımının çarpımından alınan değerin hücrenin maksimum gücüne oranıdır.

$$FF = V_{ad} \times I_{kd} / P_m \qquad (2.1)$$

İdeal bir fotovoltaik hücrede fill faktörü 1'e eşittir. Seri direncin yüksek olması ve şönt direncinin de düşük olması, fill faktörünü azaltarak verimin düşmesine sebep olur. Yasak bant aralığı arttıkça, fill faktörü ideal değeri olan 1'e yaklaşmaktadır. Fill faktörü açısından, maksimum verim elde etmek için fotovoltaik hücre yapımında olabildiğince büyük yasak bant aralığına sahip yarı iletkenler kullanılmalıdır. Başka bir açıdan bakıldığında, kullanılan yarı iletkenin yasak bant aralığı arttıkça, fotovoltaik hücre tarafından soğurulan foton sayısı azalır. Bu yüzden, hücreden elde edilen akım değerinin yüksek olması için kullanılan yarı iletkenin yasak bant aralığı küçük olmalıdır. Bu şekilde, kullanılacak yarı iletkenin yasak bant aralığı için en uygun değeri bulma gereği ortaya çıkar. Bunun için ideal verimin yasak bant aralığı ile değişimine bakılır. Fotovoltaik hücrenin en yüksek verime sahip olabilmesi için, yapımında kullanılan yarı iletkenin 1.4 eV ile 1.6 eV değerinde yasak bant aralığına sahip olması gerekir [19].

2.5.3. Ara yüzey kayıpları

Heteroeklem yapısına sahip bir fotovoltaik hücrede; PN ekleminin iki yanında bulunan materyallerin örgü uyumsuzluğu, ara yüzey konum yoğunluğunun artmasına

yol açar. Ara yüzey konum yoğunluğunun artması; yük taşıyıcılarının ara yüzeyde yeniden birleşerek, yok olma hızını arttırır. Bu ise, fotovoltaik hücrede verim kaybının artmasına neden olur [19].

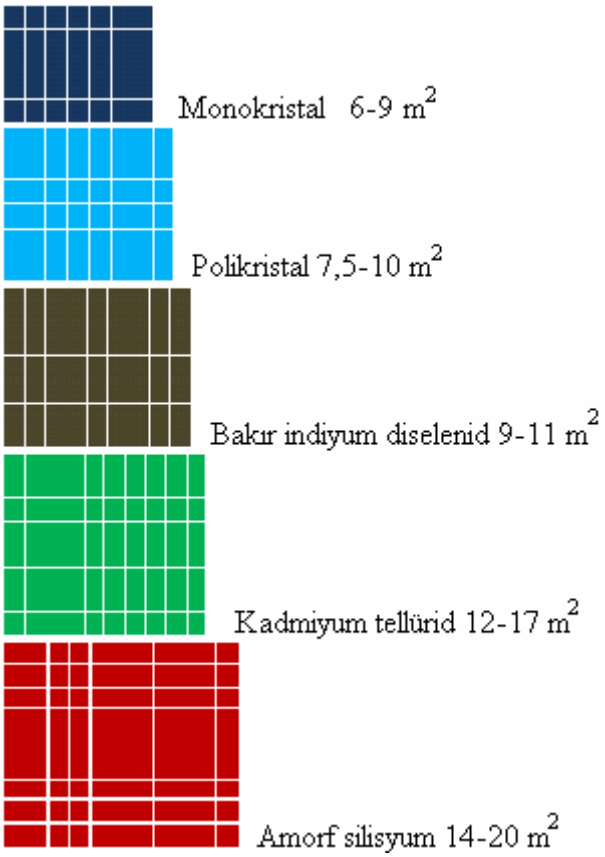
2.6. Fotovoltaik Hücrelerde Verim

Bir fotovoltaik hücreden alınan maksimum gücün, hücreye gelen foton enerjisinin maksimum gücüne oranı, o hücrenin verimini gösterir. Verim, η ile gösterilir.

$$\eta = P_m / P_{in} \tag{2.2}$$

bağıntısı ile verimi hesaplamak mümkündür.

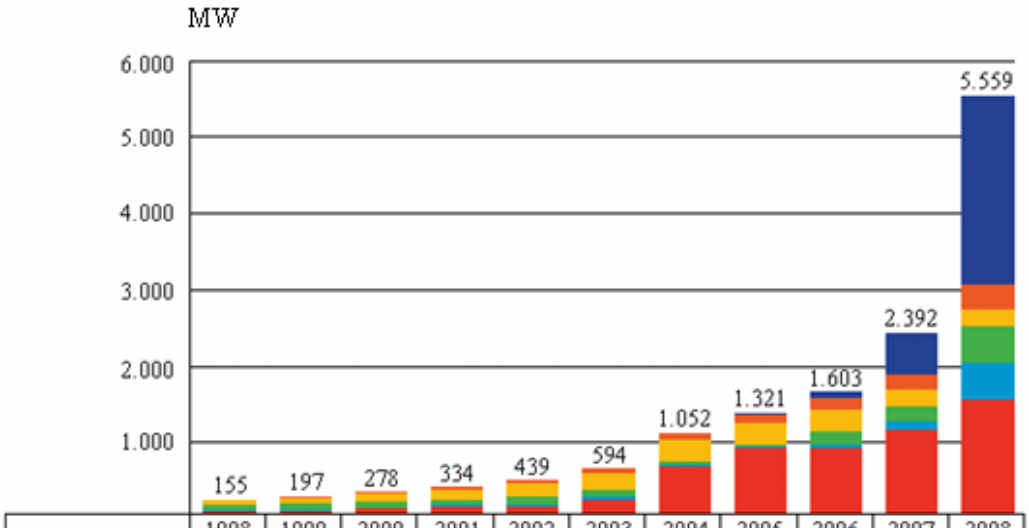
1 kW güç elde etmek için, fotovoltaik hücre çeşitlerine göre gerekli olan alan Şekil 2.14'te görülmektedir.



Şekil 2.14: Fotovoltaik hücre çeşitlerine göre 1 kW güç elde etmek için gerekli alanlar [20]

3. FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİ

Fotovoltaik güç sistemi kurulumları son yıllarda büyük artışlar göstermiştir. Özellikle 2008 yılında önceki yıllara oranla önemli bir ilerleme kaydedilmiştir. Bu ilerlemenin en önemli nedeni, İspanya'nın fotovoltaik endüstrisindeki payını büyük oranda artırması olmuştur. 2007 yılında 560 MW fotovoltaik güç sistemi kurulan İspanya'da, 2008 yılında 2511 MW sistem kurulmuştur. 2008 yılı için, İspanya haricinde diğer ülkelerde de önemli gelişmeler yaşanmıştır. Almanya'da 1500 MW, Amerika'da 342 MW, Japonya'da 230 MW fotovoltaik güç sistemi kurulmuştur. Bu gelişmelerle, 2008 yılında kurulan fotovoltaik sistem kurulu gücü 5.559 MW olmuştur [21]. Şekil 3.1'de fotovoltaik pazarın küresel olarak tarihi gelişimi görülmektedir.

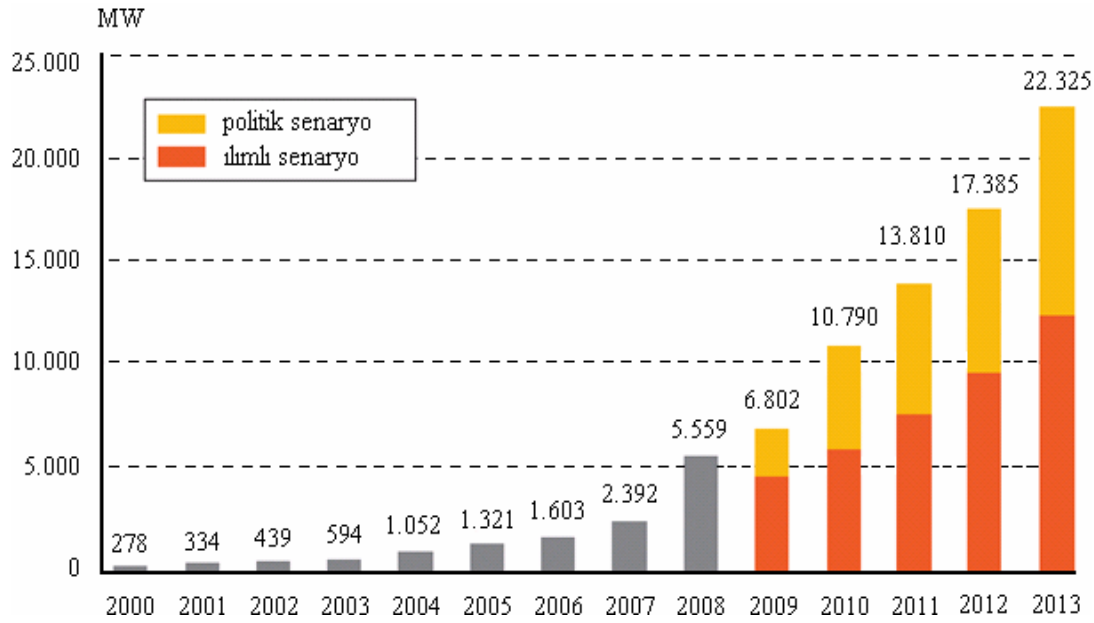


	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
İspanya	0	1	-	2	9	10	6	26	88	560	2.511
A.B.D	-	17	22	29	44	63	90	114	145	207	342
Japonya	69	72	112	135	185	223	272	290	287	210	230
Diğer (Dünya)	68	84	94	75	104	98	53	12	196	207	485
Diğer (Avrupa)	8	11	10	16	16	50	30	30	37	108	492
Almanya	10	12	40	78	80	150	600	850	850	1.100	1.500
Toplam	155	197	278	334	439	594	1.052	1.321	1.603	2.392	5.559

Şekil 3.1: Fotovoltaik pazarın küresel olarak tarihi gelişimi [21]

Şekil 3.2'de 2000-2013 yılları arasında, fotovoltaik pazarın büyüme oranları ve tahminlerine ait senaryolar görülmektedir. Tahminler için politik ve ılımlı senaryolar

yapılmıştır. Politik senaryolar, hedeflerin daha üst düzeyde tutulduğu, düşünülen planların uygulamaya tamamen aktarılması dahilinde ortaya çıkan tahminlerdir. Ilımlı senaryo ise, daha gerçekçi verilerle yapılan tahminlerdir. Dolayısıyla politik senaryodaki hedefler ılımlı senaryodan her zaman daha fazla olmaktadır.



Şekil 3.2: Fotovoltaik pazarın 2000-2013 arası yıllık küresel büyüme oranları ve tahminleri [21]

2009 yılında ise, Avrupa'da kurulan fotovoltaik güç sistemi istatistiklerine göre; Almanya'da 3800 MW fotovoltaik sistem kurulmuştur. İtalya ise, 730 MW ile gelecek vaat eden önemli ülkeler arasına girmiştir. Çek Cumhuriyeti'nde 411 MW fotovoltaik sistem kurulmasına rağmen, sürdürülebilir olmayan destek programları nedeniyle 2011 yılı için küçülme beklenmektedir. 2009 yılında güçlü bir siyasi isteklilik nedeniyle 292 MW sisteme sahip olan Belçika, ilk on ülke arasına girmeyi başarmıştır. Belçika'yı 185 MW ile Fransa izlemiştir. İspanya, içinde bulunduğu ekonomik kriz sebebiyle 2008 yılındaki büyük çıkışını sürdüremeyerek 69 MW seviyesinde kalmıştır. Ayrıca Almanya, yaklaşık 10 GW toplam kurulu güç ile dünya liderliğini sürdürmektedir [22].

2009 yılında Avrupa dışında ise, dünya pazarında üçüncü ülke olan Japonya'da, 484 MW sistem kurulmuştur. Etkili siyasi destek nedeniyle Japonya önemli bir büyüme potansiyeline sahiptir. Amerika'da ise 475 MW sistem kurulmuştur. Çin ve

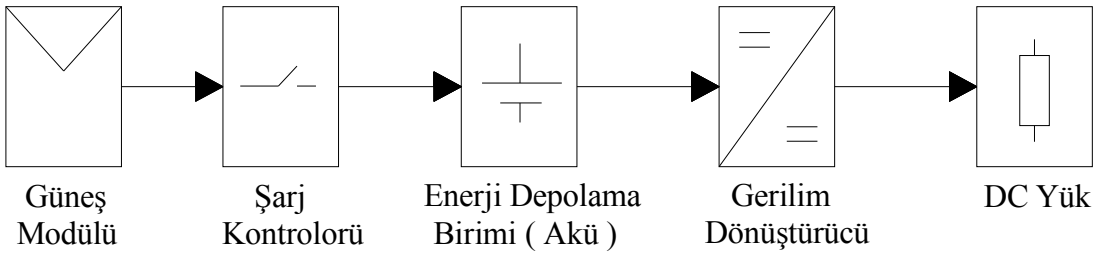
Hindistan'da var olan önemli potansiyel sebebiyle önümüzdeki beş yıl içinde önemli ilerlemeler beklenmektedir. Kanada ve Avustralya pazarında da 2009 yılında önemli gelişmeler yaşanmıştır. Bununla birlikte, Brezilya, Meksika, Fas, Tayvan, Tayland ve Güney Afrika, gelecek vaat eden ülkeler arasında görülmektedir [22].

3.1. Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Güç Sistemleri

Şebekeden bağımsız fotovoltaik güç sistemleri, W-kW düzeylerinde olan küçük güçlü uygulamalarda kullanılır. Bu sistemlerin elektrik şebekesine bağlantısı yoktur. Şebekeden bağımsız sistemlerde, güneş ışınlarının olmadığı veya az olduğu zamanlarda, enerji sağlamak için aküler kullanılır. Güneş ışığının yeterli olduğu zamanlarda kullanılacak sistemler için enerji depolamaya gerek kalmaz [8].

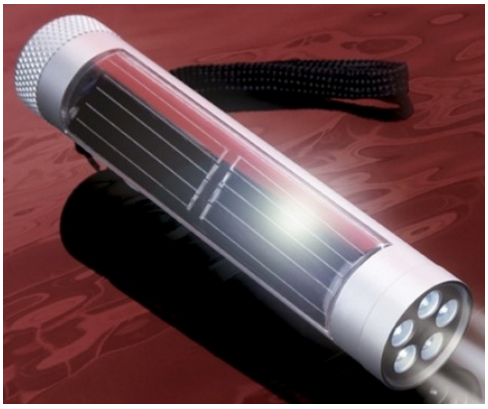
Günümüzde çok çeşitli uygulamalarda bu sistemler kullanılmaktadır. Hesap makinaları, saatler, trafik kontrol sistemleri ve şebekeden uzak bölgelerde bulunan binaların elektrik ihtiyacını karşılamak için kurulan sistemler, şebekeden bağımsız fotovoltaik güç sistemlerine örnek olarak gösterilebilir. Bunlar, akülü veya aküsüz doğru akımla çalışan sistemler olabileceği gibi evirici kullanılarak elde edilen alternatif akımla çalışan sistemler de olabilmektedir [8].

Doğru akımla çalışan yükler için fotovoltaik güç sistemi genel blok diyagramı Şekil 3.3'te görülmektedir. Bu sistem, fotovoltaik modül, şarj kontrolörü, akü, ve gerilim dönüştürücüden oluşmaktadır.



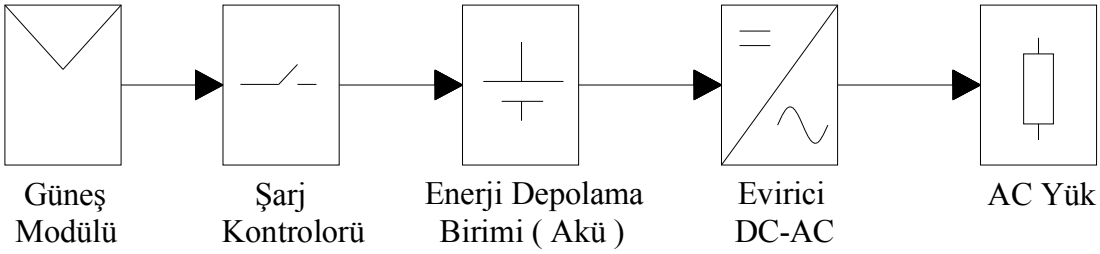
Şekil 3.3: Şebekeden bağımsız DC fotovoltaik güç sistemi blok diyagramı [8]

Fotovoltaik hücrelerin küçük ve geniş uygulama alanlarından biri olan el feneri uygulamalarına bir örnek Şekil 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.4: Güneş enerjisi ile çalışan el feneri [23]

Şebekeden uzakta bulunan yerlerde, alternatif akımla çalışan yüklerin bulunduğu sistemler için Şekil 3.5'te görülen blok diyagramı kullanılır. Bu sistemin farkını, doğru akımı yükün ihtiyacına uygun, alternatif akıma çeviren evirici oluşturmaktadır.



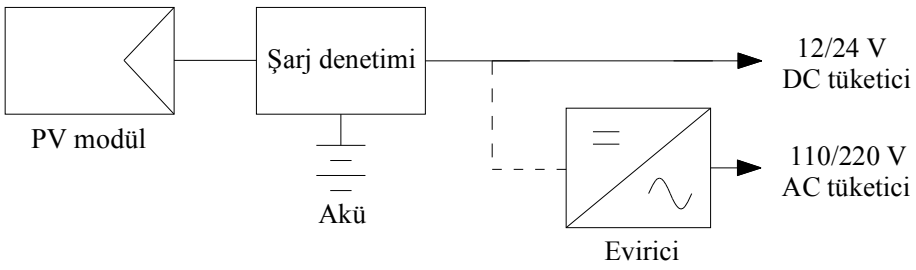
Şekil 3.5: Şebekeden bağımsız AC fotovoltaik güç sistemi blok diyagramı [8]

Şekil 3.6'da şebekeden uzak bölgede bulunan çatısı fotovoltaik modüllerle kaplanmış AC fotovoltaik güç sistemi görülmektedir.



Şekil 3.6: Şebekeden uzak bölgede kurulmuş AC fotovoltaik güç sistemi [24]

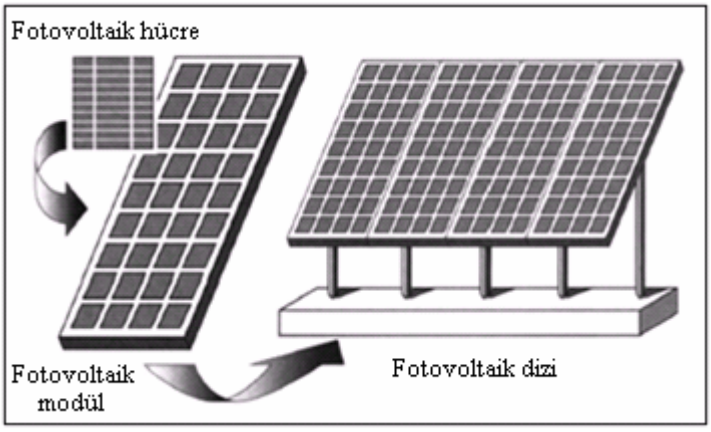
Günümüzde Asya, Afrika ve Güney Amerika'nın kırsal kesimleri başta olmak üzere, dünyanın çeşitli yerlerinde yüz binlerce güneş evi sistemi yaklaşık 200 W gücünde tesis edilmiş durumdadır. Ayrıca, bu tip evlerde ilave küçük bir evirici desteği ile tüketiciler standart AC yükleri de DC bara üzerinden kullanabilmektedir. Şekil 3.7'de daha önce blok diyagramları gösterilen şebekeden bağımsız fotovoltaik güç sistemlerinin bağlantı şeması görülmektedir [25].



Şekil 3.7: Şebekeden bağımsız fotovoltaik güç sistemi bağlantı şeması [25]

3.1.1. Fotovoltaik hücre

Fotovoltaik hücre, foton enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek fotovoltaik güç sistemlerinde akım kaynağı görevi yapmaktadır. Bir hücreden elde edilebilecek güç çok düşüktür. Bu sebeple, fotovoltaik hücreler seri ve paralel bağlanarak, daha fazla güç gerektiren uygulamalarda kullanılmak üzere fotovoltaik modülleri oluşturur. Fotovoltaik modüllerinin de birbirine bağlanmasıyla fotovoltaik diziler oluşur. Şekil 3.8'de fotovoltaik hücre, fotovoltaik modül ve fotovoltaik dizi görülmektedir.



Şekil 3.8: Fotovoltaik hücrelerden modül ve dizilerin oluşturulması [26]

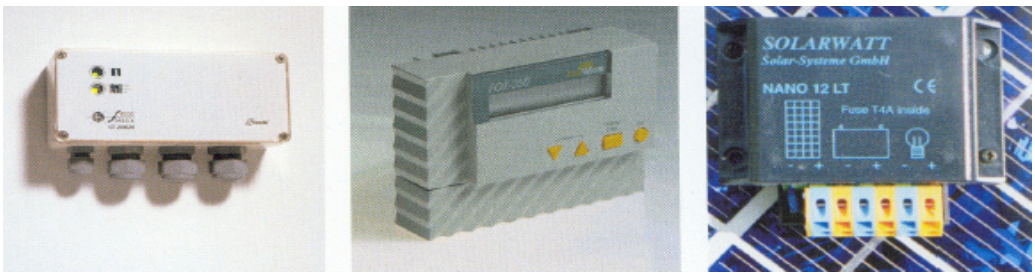
3.1.2 Şarj kontrolörü

Enerji depolama gereksiniminin olduğu sistemlerde, şarj kontrolörü, sistemin temel bileşenini oluşturur. Şarj kontrolörünün görevi, akünün aşırı şarj ve tam deşarj olmadan çalışmasını sağlamaktır [12].

Fotovoltaik modüllerden alınan gerilim, ışık şiddetine bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla akünün zarar görmemesi için bu gerilimin sabitlenmesi gerekmektedir. Şarj kontrolörü, fotovoltaik modüllerden alınan gerilimin, akü besleme geriliminden yüksek olması halinde, akü beslemesini istenen gerilim seviyesinde tutar. Burada amaç, akünün aşırı şarjda kalmasını önlemektir. Değişen şarj, deşarj ve sıcaklık durumlarına göre kontrolör ayarlanabilir olmalıdır [12].

Denetim birimleri, fotovoltaik modüllerden gelecek maksimum akımın %25 fazlasını tolere edecek şekilde tasarlanmalıdır. Fotovoltaik modüller genelde, ilk 2-3 yıl boyunca ortalama değerlerinin üzerinde üretim yaptıkları için bu sağlıklı bir sistem tasarımı için çok önemlidir [27].

Bu denetim birimleri üzerinden, akü gerilimi, birim hücre gerilimi ve o anda üretilen elektrik enerjisi miktarı gibi veriler okunabilmektedir. Denetim birimlerinin birçok özelliği kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Örneğin, akü geriliminin istenilen seviyeye geldiğinde şarjın kesilmesi, akü geriliminin belli bir değerin altına düşmesi durumunda verici sistemine zarar gelmemesi için yük bağlantısının otomatik olarak kesilmesi ve gerilim yükseldiğinde tekrar otomatik olarak güç vermeye başlaması gibi özellikler tanımlanabilmektedir [27]. Şekil 3.9'da şarj kontrol cihazları görülmektedir.



Şekil 3.9: Değişik üreticiler tarafından üretilen akü şarj kontrol cihazları [28]

3.1.3. Enerji depolama birimi (Aküler)

Fotovoltaik güç sistemlerinde, fotovoltaik modüller ile şarj edilen aküler, gün ışığının yeterli olmadığı zamanlarda ve geceleri enerji üretmek için kullanılır. Akülerin birçok çeşidi vardır. Bu çeşitliliğe rağmen, kurşun-asit aküler, yüksek güçlü enerji sistemlerinde ekonomik yönden daha çok tercih edilmektedir. Fakat, enerji yoğunluğu, maliyet ve kullanım süreleri konularında iyileştirme yapılmadığı takdirde, diğer teknolojiler kurşun-asit akülerin yerini alacaktır. Örneğin, yüksek enerji yoğunluğunda kullanılan nikel-kadmiyum aküler mevcuttur. Fakat bu aküler kurşun-asit akülere oranla daha pahalıdır. Nikel metal hidrit ve bazı lityum teknolojileri gelecekte daha ucuza enerji depolama maliyeti sağlayacaktır [12].

Aküler dış ortamda bulunacaksa dayanıklı ve su geçirmez bir muhafaza kabı içerisine yerleştirilmelidir. Şarj esnasında çıkabilecek gaz nedeniyle uygun bir şekilde havalandırılmalı, + ve – uçları belirgin bir şekilde işaretlenmiş olmalıdır [29]. Şekil 3.10'da solar aküler görülmektedir.



Şekil 3.10: Solar aküler [28]

3.1.4. DC-DC gerilim dönüştürücüler

Fotovoltaik güç sistemlerinin daha verimli olması için DC-DC dönüştürücüler kullanılmaktadır. Kullanılan dönüştürücü çeşitleri ise, yükseltici (boost), alçaltıcı (buck) ve alçaltıcı-yükseltici (buck-boost) dönüştürücüler olarak sıralanabilir.

Dönüştürücülerin tasarımı sırasında kullanılan anahtarlama stratejisiyle, sistemin veriminin arttırılmasını hedeflenmektedir. Bu tür sistemler için en verimli uygulamanın maksimum güç noktası takibi (MPPT) olduğu belirlenmiştir [27].

Maksimum güç noktası takibi işleminde, fotovoltaik modüllerden elde edilen elektrik enerjisindeki değişimlerin, sistemin çıkışında minimum seviyede hissedilmesi ve dönüştürücü çıkış geriliminin sürekli olarak sabit tutulması amaçlanmaktadır. MPPT işlemi sırasında giriş gerilimi ve akımı değerlendirilerek, dönüştürücü türüne bağlı olarak anahtarlama sinyalinin oranı sürekli olarak değiştirilmekte ve çıkış gerilimi sabit tutulmaktadır. Ancak bu işlemin yapılabilmesi için, öncelikle kullanılacak olan fotovoltaik modüllerin yapısı ve çıkış gerilim aralıklarının bilinmesi, ayrıca üretebilecekleri giriş gerilimine göre, sistemde kullanılacak olan dönüştürücü tipinin belirlenmesi gerekmektedir [27].

Literatürde gerçekleştirilen MPPT yöntemleri, on-line ve off-line yöntemler olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. On-line yöntemler genel olarak; fotovoltaik modüllerden sağlanan gücün hesaplanması, önceki güç değeriyle karşılaştırılması ve gerçek maksimum güç noktasına, doğru referans sinyalin ayarlanması şeklinde gerçekleştirilir. Referans sinyal, güç elektroniği dönüştürücüsü kullanılan sistemlerde, anahtarlama elemanı için iletim süresi, evirici kullanılan sistemlerde ise, frekans ve modülasyon faktörü olabilir. Off-line yöntemler ise, fotovoltaik modüller hakkında önceden detaylı bir bilgiye sahip olunması ve ışık şiddeti, fotovoltaik modül sıcaklığı, fotovoltaik modüllerin kısa devre akımı veya açık devre gerilimi gibi parametrelerin ölçülmesini gerektirir [30]. Şekil 3.11'de maksimum güç noktası kontrolörü görülmektedir.



Şekil 3.11: Maksimum güç noktası kontrolörü [31]

3.1.5. Eviriciler (DC-AC dönüştürücüler)

Fotovoltaik güç sistemleri, alternatif akımla çalışan yükleri beslemek için eviricilere ihtiyaç duyar. Ayrıca üretilen akımın, şebekeye verilmesi istendiği takdirde de, şebeke akımıyla uyumlu olması için eviriciler tarafından alternatif akıma çevrilmesi gerekmektedir. Şekil 3.12'de solar evirici görülmektedir.



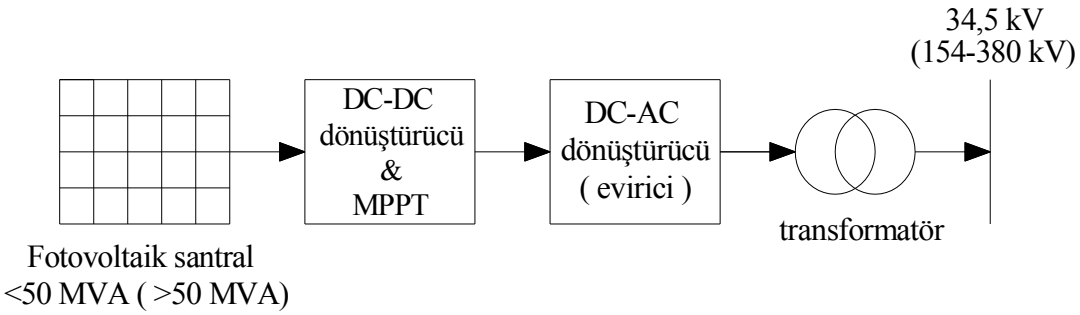
Şekil 3.12: Solar evirici [32]

3.2. Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Güç Sistemleri

Şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemleri iki şekilde tasarlanabilir. Bu sistemlerde, üretilen doğru akım, evirici aracılığıyla alternatif akıma çevrilerek direk şebekeyi besleyebileceği gibi, eviriciden sonra çift yönlü sayaç kullanılarak hem çeşitli yükler beslenebilir hem de üretilen fakat kullanılmayan fazla enerji şebekeye verilebilir.

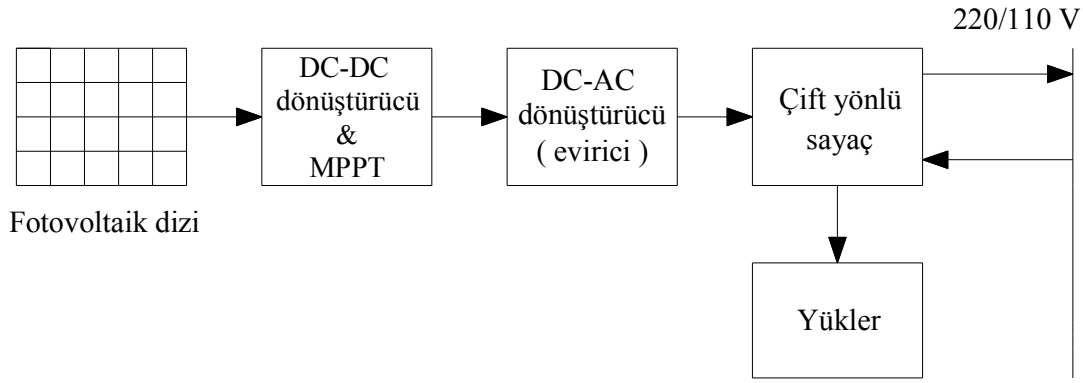
Şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemleri şebekeden bağımsız sistemler ile karşılaştırıldığında, üretilen enerjinin devlete satılması, akü ve şarj kontrol masrafının ortadan kalkması gibi avantajlı özellikleri barındırdıkları için şebekeye yakın yerlerde bulunan uygulama alanlarında daha çok tercih edilmektedir.

Elektrik üretim santrali olarak kullanılan sistemlerde, bağlantı noktası, sistemin kurulu gücüne göre değişiklik göstermektedir. Kurulu gücü, 50 MVA'e kadar olan sistemler, 34,5 kV dağıtım hattı gerilim seviyesinden, 50 MVA üzeri olanlar ise, 154 kV veya 380 kV iletim hattı gerilim seviyesinden şebekeye bağlanır [33].



Şekil 3.13: Şebeke bağlantılı fotovoltaik santral güç akış diyagramı

Şekil 3.14'te, evsel uygulamalarda kullanılan, üretilen enerjinin şebekeye verildiği, tüketilen enerjinin ise şebekeden alındığı sistem görülmektedir.



Şekil 3.14: Evsel uygulamalar için şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem güç akış diyagramı

Şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemlerinde kullanılan eviriciler iki ana işlevi yerine getirmelidir. Bunlar, üretilen doğru akımın alternatif akıma çevrilmesi ve fotovoltaik dizilerden alınan gerilimin, şebeke gerilimine eşitlenmesidir. Bu iki fonksiyon, evirici tasarımını belirleyen yarı iletkenlerin ve pasif bileşenlerin seçiminde etkilidir [34]. Şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemlerinde kullanılan evirici sistemleri aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır:

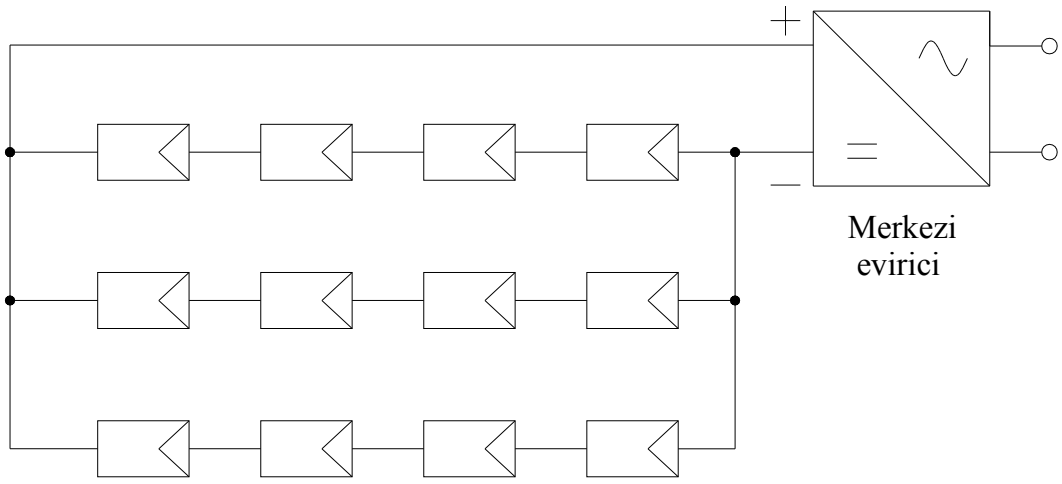
3.2.1. Merkezi evirici sistemi

1980'lerin ortalarında merkezi eviricilerin kullanıldığı büyük güçlü şebeke etkileşimli güneş enerjili sistemler yaygındı. Bu eviriciler, fotovoltaik güç sistemleri için optimize edilmeden, sürücülerde kullanılan eviriciler temel alınarak geliştirilmiştir. Bu uygulamalarda, fotovoltaik modüller dizi olarak adlandırılan seri

kollara bölünmüştür. Her kolun gerilimi, yükseltme gereksinimini ortadan kaldıracak kadar yüksek olmalıdır. Bu seri kollar, yüksek güç üretebilmek için dizi diyotları üzerinden paralel bağlanmıştır [35].

1990'ların başlarından itibaren yapılan araştırmalar, merkezi eviricilerin, fotovoltaik modüller ve evirici arasındaki yüksek gerilimli bağlantı kabloları, merkezi maksimum güç takibi nedeniyle oluşan güç kayıpları, dizi diyotlarının güç kaybı ve fotovoltaik modüllerin karakteristiklerinin aynı olmaması gibi bazı ciddi dezavantajlarını ortaya çıkarmıştır. Büyük alana yayılmış, büyük güçlü bir fotovoltaik güç sisteminin, eşit miktarda ışınım alamaması da bir sorun oluşturmaktadır [35].

5-500 kW güç aralığındaki ticari uygulamalarda kullanılan merkezi evirici sisteminin bağlantı şeması Şekil 3.15'te görülmektedir.



Şekil 3.15: Merkezi evirici sistemi [36]

Merkezi eviricilerin en önemli üç dezavantajı;

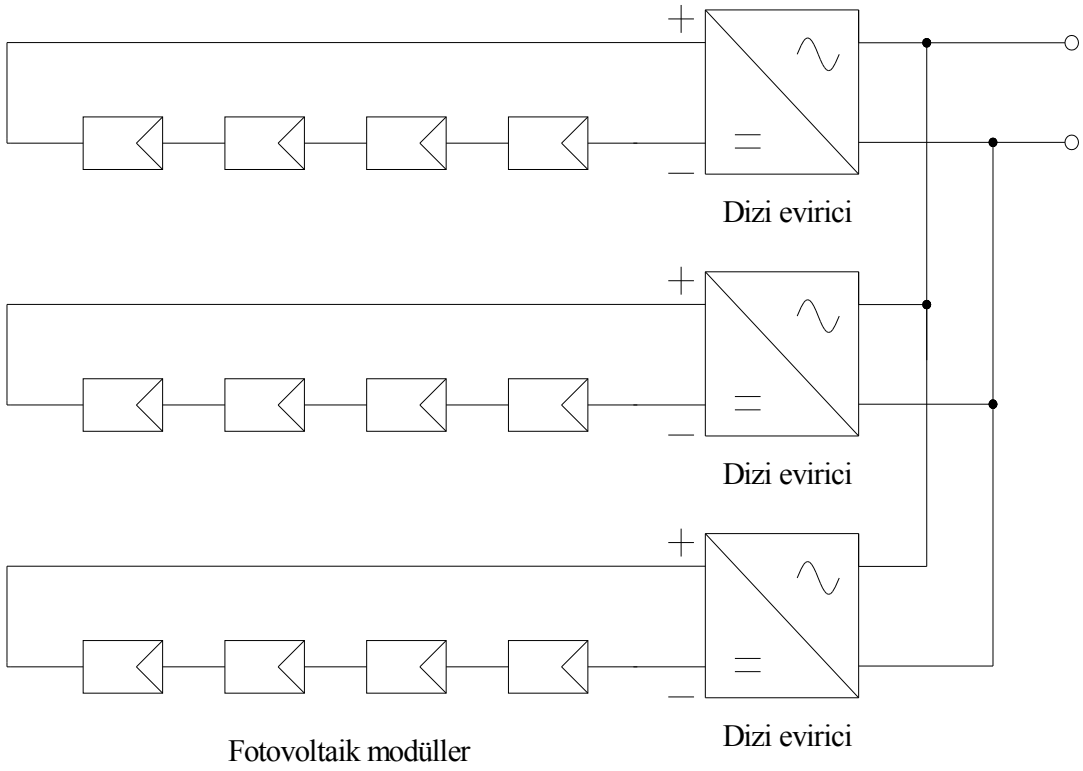
1. DC kablolamanın maliyeti artırarak güvenliği azaltması,
2. Diziler arasındaki uyumsuzluğun çıkış gücüne olumsuz etkisi,
3. İlave modüllerle, yüksek güç aralığı için sistemin esnek olmaması [34].

3.2.2. Dizi evirici sistemi

Sistem veriminin arttırılması ve maliyetlerin düşürülmesi için 1990'ların ortalarında dizi eviriciler geliştirilmiştir. Dizi eviriciler, merkezi eviriciler ile modül birleşimli eviricinin arasında bir çözümdür ve bir dizi fotovoltaik modülden oluşan bir sistem için tasarlanmıştır [35].

Dizi evirici sistemi, merkezi ve modül entegre evirici sistemlerinin avantajlarını birleştirir. Güce ve gerilime bağlı olarak, IGBT'ler ve MOSFET'ler 16-32 kHz anahtarlama frekansında kullanılır. Bu sistemlerin merkezi evirici sistemlerine göre avantajı, %1 ile %3 oranında daha verimli olması ve birim güç başına azalan maliyetidir. Bu sistemde, fotovoltaik dizi gerilimleri 150 V ile 450 V arasındadır [34].

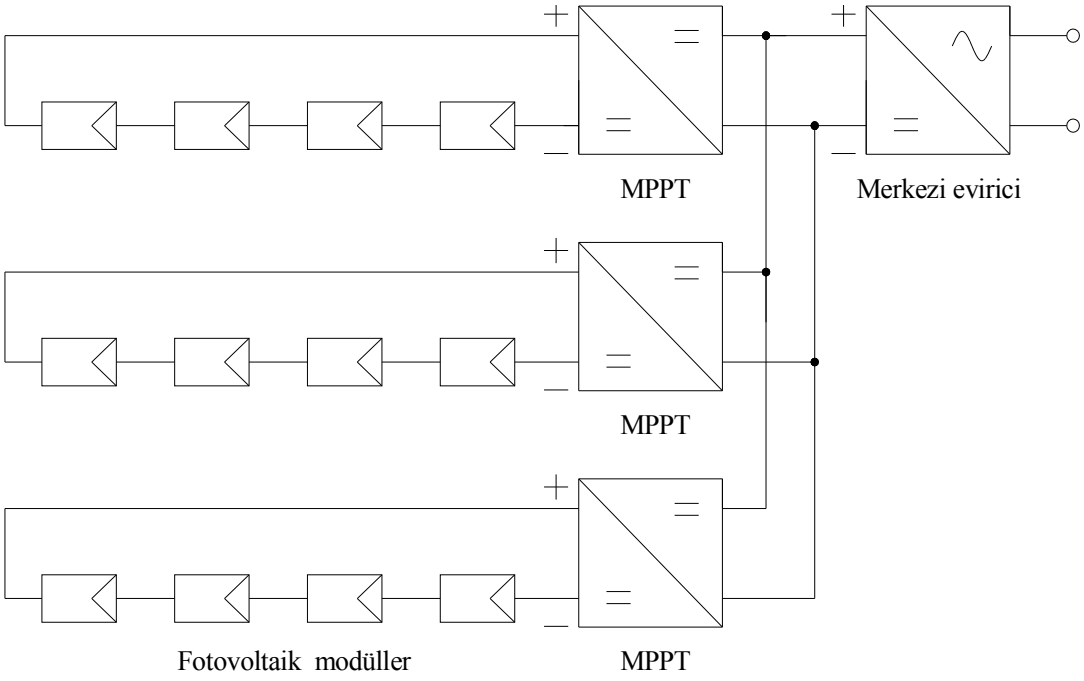
1-5 kW güç aralığında, ticari amaçlı veya konutlarda enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan dizi evirici sisteminin bağlantı şeması Şekil 3.16'da görülmektedir.



Şekil 3.16: Dizi evirici sistemi [36]

3.2.3. Çoklu dizi evirici sistemi

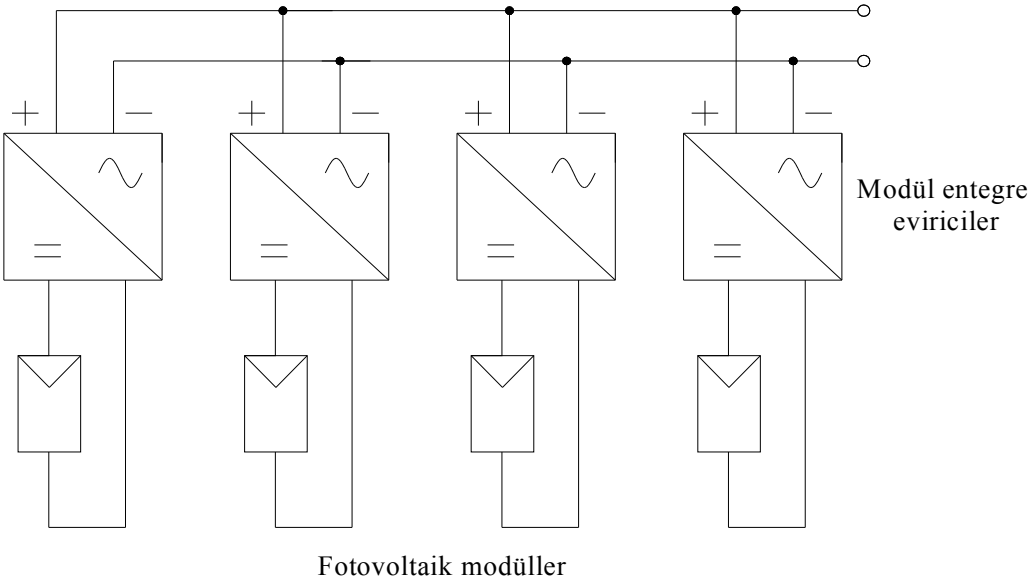
Çoklu dizi evirici teknolojisi, çok sayıda fotovoltaik dizinin ayrı ayrı MPPT ile (DC-DC dönüştürücü), tek bir DC-AC eviriciye bağlanmasıyla daha kompakt ve ucuz bir çözüm sunmaktadır. Böylece merkezi ve dizi eviricinin, tek parça ve düşük maliyetli çözüm avantajları sağlanmaktadır. Bu yapıda, farklı fotovoltaik dizi teknolojileri ve farklı yönlerde bulunan fotovoltaik güç sistemleri birbirine entegre edilmektedir [25]. Şekil 3.17'de çoklu dizi evirici sisteminin bağlantı şeması görülmektedir.



Şekil 3.17: Çoklu dizi evirici sistemi [25]

3.2.4. Modül entegre evirici sistemi

Bu sistemde eviriciler, bir yada birkaç tane 500 W'tan düşük güçlü fotovoltaik modüllere bağlanırlar. Fotovoltaik dizi gerilimi 30 V ile 150 V arasındadır [34]. Her fotovoltaik modüle ait bir evirici kullanıldığı için en verimli sistemdir. Şekil 3.18'de modül entegre evirici sisteminin bağlantı şeması görülmektedir.



Şekil 3.18: Modül entegre evirici sistemi [36]

Fotovoltaik güç sistemlerinde kullanılan merkezi, dizi ve modül entegre eviriciler; genel sistem yapıları, güvenlik, enerji kullanımı, maliyet, işlevsel davranışları ve sistem yönünden Tablo 3.1'de karşılaştırılmaktadır [37].

Tablo 3.1: Fotovoltaik sistemlerde kullanılan evirici sistemlerinin karşılaştırılması [37]

Merkezi evirici	Dizi evirici	Modül entegre evirici
Merkezi bir evirici	Modül yönlendirilmiş evirici	Modül entegre evirici
DC tarafta seri ve/veya paralel bağlantı	Çok sayıda fotovoltaik modül DC tarafa ayrı ayrı bağlanır	Her bir fotovoltaik modül için ayrı evirici
Tüm fotovoltaik grubu için tek bir evirici	Evirici 2 kW gücünde	DC kablolama yok
	AC taraf paralel bağlı	AC taraf paralel bağlı

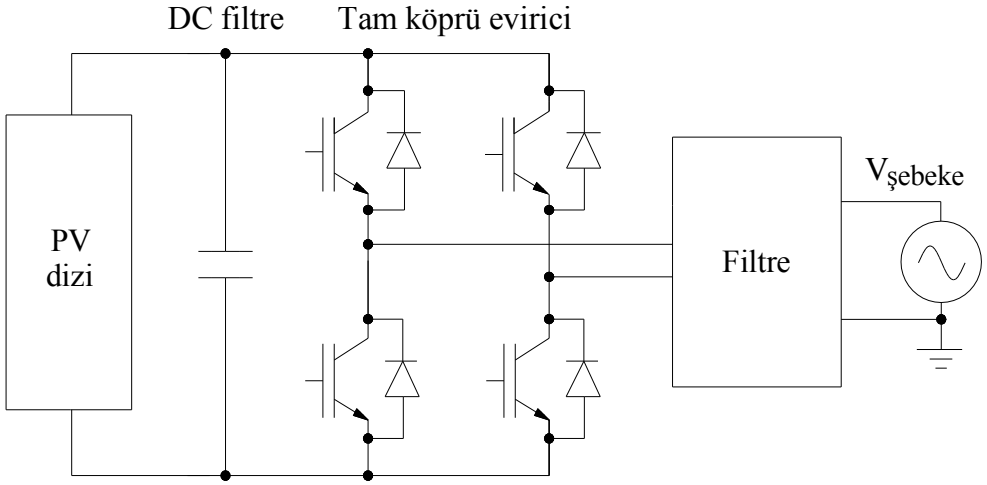
Merkezi eviriciler genellikle, büyük ölçekli üç fazlı fotovoltaik tesislerde kullanılırken, dizi eviricili sistemlerde ise çok sayıda fotovoltaik modül paralel bağlanmaktadır. Merkezi eviricide, modül uyumsuzluğu ve gölgelenme nedeniyle kayıplar yüksektir. Bu dezavantajları gidermek için, dizi ve çoklu dizi eviriciler geliştirilmiştir. Çoklu dizi eviriciler, farklı fotovoltaik ölçülerini uygun hale getirmek üzere her biri kendi maksimum güç takip sistemine sahip olan dizi evirici

içermektedir. Modül entegre evirici ise, çok fazla DC kablolama olmadığı için, en yüksek maksimum güç takip yeteneğine sahiptir [37].

3.3. Tek Fazlı Evirici Topolojileri

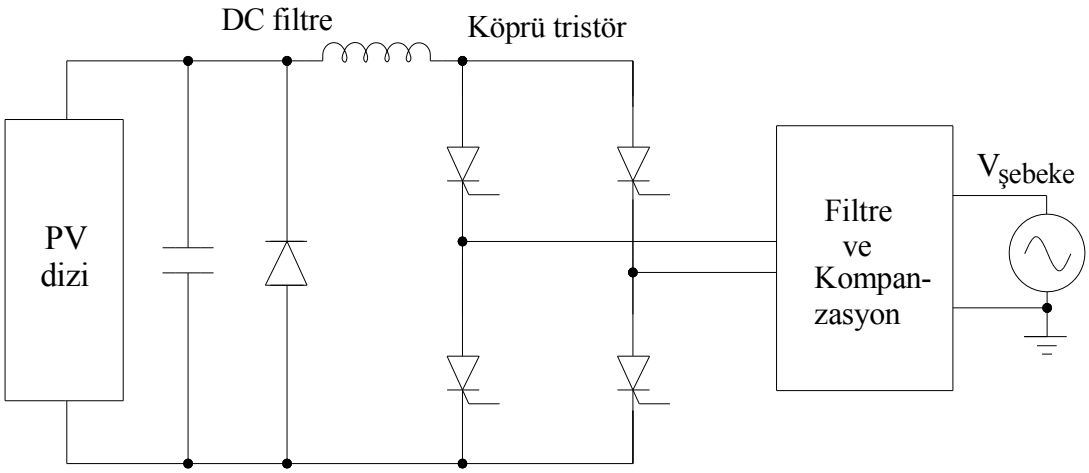
3.3.1. Transformatörsüz fotovoltaik eviriciler

Transformatörsüz fotovoltaik evirici topolojisi düşürücü ve hat komütasyonlu olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Düşürücü fotovoltaik evirici, tam köprü PWM denetleyicilerden oluşur. 16 kHz'den büyük frekanslarda anahtarlama yaparak giriş akımını alternatif akıma çevirir. Köprü eviriciler çoğunlukla IGBT'lerden yada IGBT ve MOSFET kombinasyonlarından oluşmaktadır. Bu topoloji, dayanıklı, etkili, yüksek güvenirlikli, verimli ve ucuzdur. [34]. Şekil 3.19'da düşürücü transformatörsüz fotovoltaik evirici şeması görülmektedir.



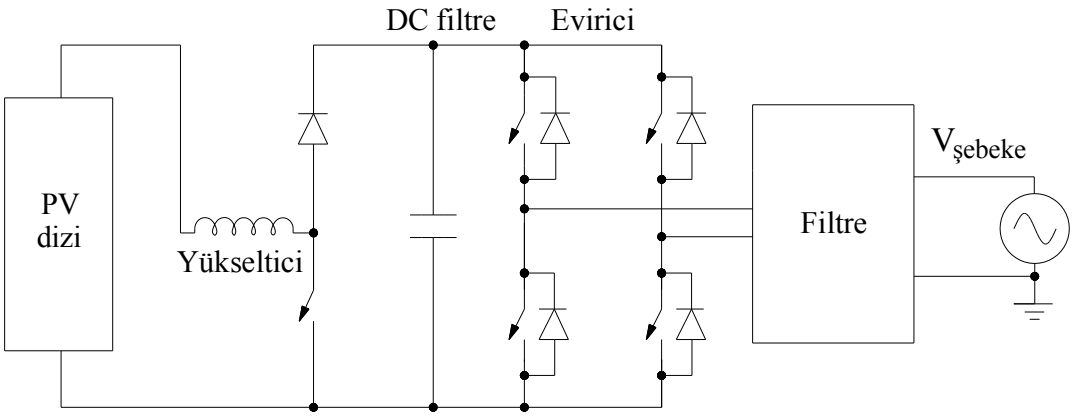
Şekil 3.19: Transformatörsüz fotovoltaik evirici (düşürücü) [34]

Hat komütasyonlu fotovoltaik evirici topolojisinin, yüksek verimli ve ucuz olmasına rağmen büyük sakıncaları vardır. Güç faktörünün 0,6-0,7 aralığında olmasından dolayı, özel filtrelerle kompanzasyon gerektirmesi ve çıkış akımının yüksek harmonik bileşen içermesi bu sakıncalardandır. Yarı iletken sektöründeki hızlı gelişmelerle birlikte, yüksek güçlü uygulamalarda, tristörlerin yerini BJT, MOSFET ve IGBT'ler almaktadır [34]. Şekil 3.20'de hat komütasyonlu transformatörsüz fotovoltaik evirici şeması görülmektedir.



Şekil 3.20: Transformatörsüz fotovoltaik evirici (hat komütasyonlu) [34]

Transformatör kullanımından kaçınmak, manyetik bileşenleri azaltmak ve verimi artırmak için gerilim yükselticili topoloji kullanılır. Almanya ve bazı Avrupa ülkelerinde kullanılmaktadır. Akımın alternatif akıma çevrilmesi ve düzeltilmesi, yüksek gerilim tarafında yapılmaktadır [34]. Şekil 3.21'de gerilim yükselticili transformatörsüz fotovoltaik evirici görülmektedir.

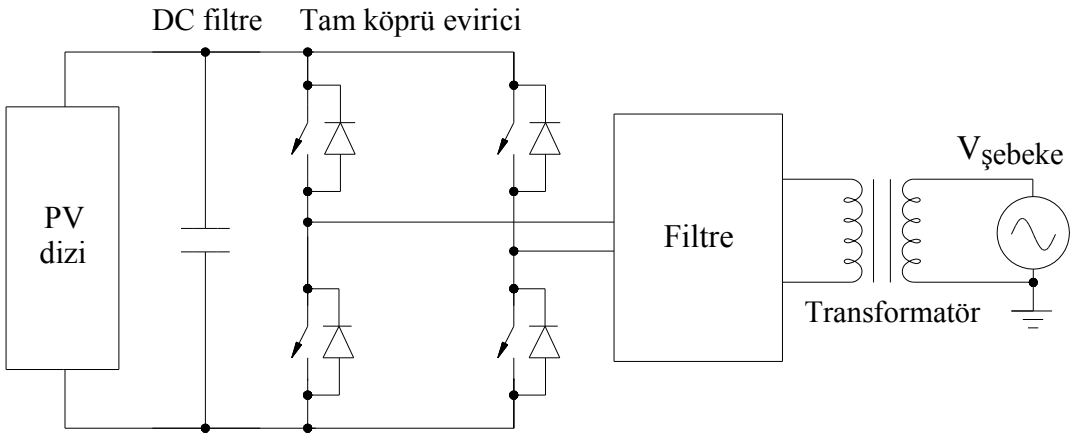


Şekil 3.21: Gerilim yükselticili transformatörsüz fotovoltaik evirici [34]

3.3.2. Transformatörlü fotovoltaik eviriciler

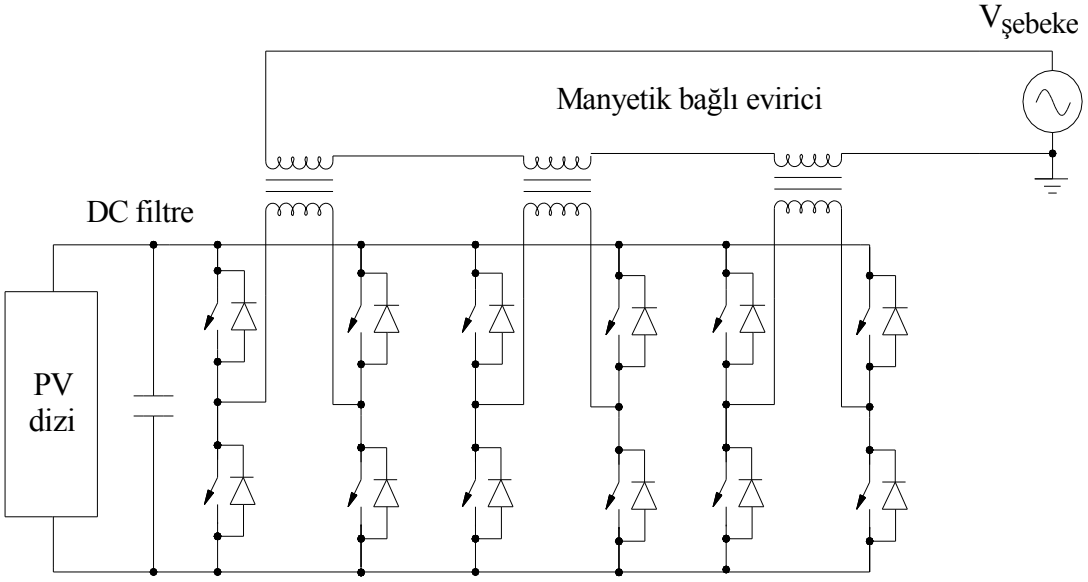
Transformatörlü fotovoltaik evirici topolojisi ise, kendinden komütasyonlu tam köprü, manyetik birleşmeli ve yüksek frekanslı olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Transformatörlü sistemlerde, üretilen doğru akım, kondansatör ile filtre edildikten sonra, evirici tarafından alternatif akıma dönüştürülür. Transformatör, sistem

geriliminin şebeke geriliminden farklı olması halinde, gerilimi şebeke gerilimi seviyesine getirir [34].



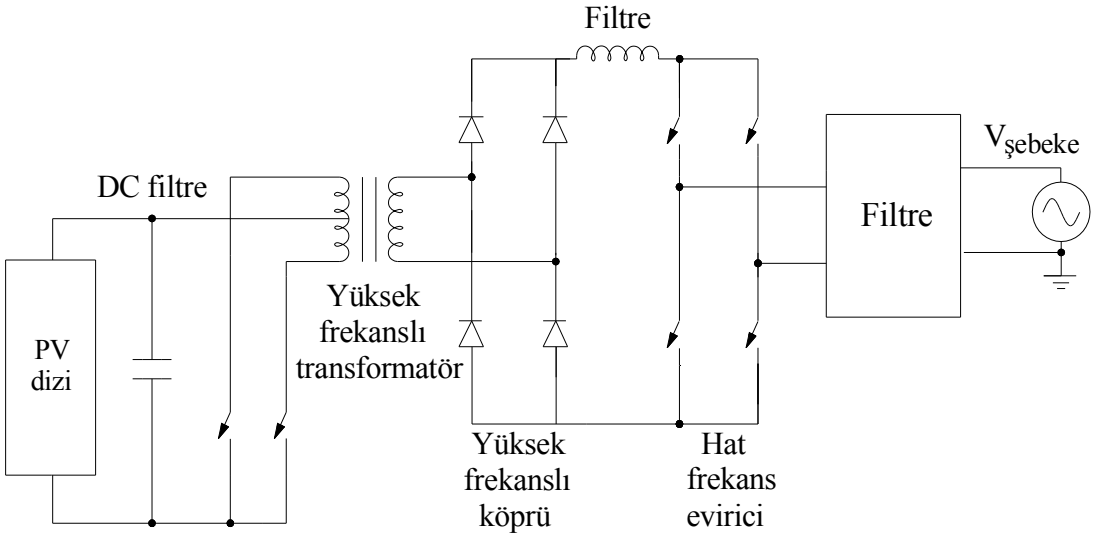
Şekil 3.22: Hat frekans transformatörlü fotovoltaik evirici (kendinden komütasyonlu tam köprü) [34]

Manyetik birleşmeli evirici, ortak uçları transformatörün primer sargısına bağlanmış üç adet klasik tek fazlı tam köprüden oluşmaktadır. Transformatörün sekonder sargıları seri bağlanır. Trafo dönüştürme oranları birbirinin katı olacak şekilde seçilir. Bu devrenin avantajı, sağlam ve ucuz bir köprü evirici ile sinüs dalga formuna yakın bir çıkış elde edilmesidir. Dezavantajı ise, transformatörlerin maliyetidir [34].



Şekil 3.23: Hat frekans transformatörlü fotovoltaik evirici (manyetik birleşmeli) [34]

Hat frekanslı transformatörlerin ağırlık, boyut ve fiyatları artırması, ayrıca verimi düşürmesi nedeniyle modern eviricilerde yüksek frekanslı transformatörler tercih edilmektedir. Yüksek gerilim tarafındaki anahtarlama kayıplarını azaltmak için, öncelikle gerilim şebeke gerilimi seviyesine yükseltilir ve hat frekanslı evirici ile akım dalga şekli sinüsoidal yapılarak şebekeye uyumlu hale getirilir. Aynı zamanda, sistem frekansı şebeke frekansına eşitlenir [34]. Şekil 3.24'te yüksek frekanslı transformatörle kurulan fotovoltaik evirici şeması görülmektedir.



Şekil 3.24: Yüksek frekans transformatörlü fotovoltaik evirici [34]

Şebeke etkileşimli eviriciler şebekeye bağlanacağı için, elektrik tedarik eden kuruluşların belirlediği standartlara uyulmalıdır. Özellikle IEC61727, EN61000-3-2, IEEE1547 ve U.S. National Electrical Code (NEC)690 standartları dikkate alınmalıdır. Bu standartlar güç kalitesi, ada modunun tespiti, topraklama vb. gibi konularla ilgilidir ve Tablo 3.2'de özetlenmiştir. Tablo 3.2'de görüldüğü gibi günümüzde uygulanmakta olan IEEE ve IEC standartları, EN (Avrupa'da uygulanan) standardına göre akım harmonikleri konusunda daha katıdır. Bu sebeple, büyük tristörlü şebekeye bağlı eviriciler yerine daha küçük IGBT ve MOSFET'li olanlar tercih edilmektedir [38].

Tablo 3.2: Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler ile ilgili belli başlı standartların özeti [38]

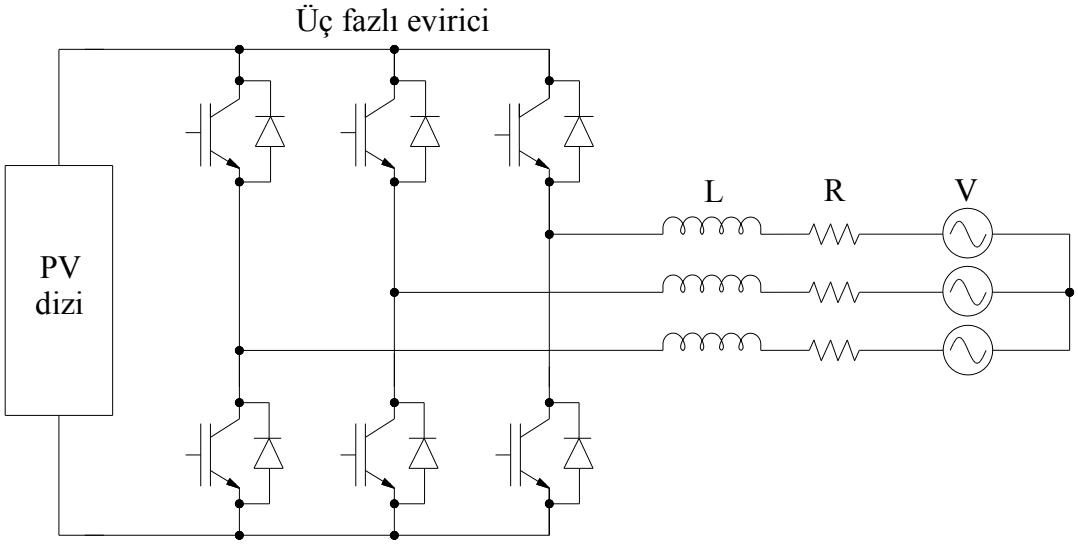
Konu	IEC61727	IEEE1547	EN61000-3-2
Anma Gücü	10 kW	30 kW	16 A x 230 V = 3,7 kW
Harmonik akım (sıra-h) limitleri	(3-9) %4,0 (11-15) %2,0 (17-21) %1,5 (23-33) %0,6	(2-10) %4,0 (11-16) %2,0 (17-22) %1,5 (23-34) %0,6 (>35) %0,3	(3) 2,30 A (5) 1,14 A (7) 0,77 A (9) 0,40 A (11) 0,33 A (13) 0,21 A (15-39) 2,25 A/h
	Bu aralıktaki çift sıralı harmonikler listelenen tek sıralı harmoniklerden %25 daha az olmalıdır.		Tek sıralı harmoniklerin yaklaşık %30'u kadar
Maksimum akım toplam harmonik distorsiyonu	% 5,0	% 5,0	-
Anma gücünün %50'sinde güç faktörü	0,9	-	-
Doğru akım enjeksiyonu	Anma çıkış akımının % 1'inden az	Anma çıkış akımının % 0,5'inden az	<0,22 A - 50 W yarım dalga doğrultucuya uyan
Normal çalışma için gerilim aralığı	%85-%110 (196-253 V)	%88-%110 (97-121 V)	-
Normal çalışma için frekans aralığı	50(+- 1) Hz	59,3-60,5 Hz	-

NEC 690 standardı, maksimum çıkış geriliminin 50 V gibi belirli bir değere ulaşan fotovoltaik modüllerin, topraklı ve toprak arızalarına karşı izlenen bir sistem olmasını istemektedir. Sistem topraklaması, fotovoltaik modülün negatif (veya pozitif) ucunun toprağa bağlanmasını gerektirir. Bu ise, şebekenin faz-nötr uçlarına bağlanan bir fazlı eviricinin zaten şebeke tarafında topraklı olması nedeniyle, pek çok yüksek güçlü transformatörsüz sistem için sorun olabilir. Diğer elektrik idareleri elektriki izolasyonun olmaması durumunda, sadece donanımın topraklanmasını isterler. Donanımın topraklanması, çerçevelerin ve diğer metalik parçaların toprağa

bağlanmasıdır. Ayrıca fotovoltaik güç sistemleri için anti-ada modunu da kapsayan test standartları IEEE 929-2000 ile belirtilmiştir [38].

3.4. Üç Fazlı Şebeke Bağlantılı Evirici

Üç fazlı şebeke bağlantılı eviricinin devre şeması Şekil 3.25'de görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynağı V_{da} gerilim kaynağı ile gösterilmiştir. Bu yenilenebilir enerji kaynağı, fotovoltaik modül veya yakıt hücreleri olabildiği gibi, doğru akım generatörü olmaması durumunda, çıkış gerilimi doğrultulmuş bir rüzgâr türbini de olabilir. Evirici çıkışında yüksek frekanslı harmonik bileşenleri süzmek ve akımın toplam harmonik distorsiyonunu azaltmak için filtre kullanılmıştır. Evirici yapısı olarak gerilim kaynaklı evirici, akım kontrollü evirici kullanılmıştır. Sadece şebeke enerjili iken çalışabilmeleri nedeniyle şebeke etkileşimli eviriciler, ada modu çalışanlardan farklıdır [38].



Şekil 3.25: Üç fazlı şebeke bağlantılı evirici devre şeması [38]

3.5. Transformatörlü ve Transformatörsüz Evirici Topolojilerinin Kullanımı

Fotovoltaik modülleri alternatif akım uygulamalarında kullanabilmek için anahtarlama elemanı olarak yarı iletken elemanların kullanıldığı güç elektroniği dönüştürücüleri kullanılır. Transformatörlü sistemlerde, fotovoltaik modüllerden elde

edilen doğru akım bir kondansatör ile filtre edildikten sonra evirici tarafından alternatif akıma dönüştürülmektedir. Fotovoltaik modüllerin çıkış gerilimi pratik olarak düşük olacağından çıkışta yer alan transformatör, evirici çıkış gerilimini şebeke gerilimi seviyesine çıkarır. Bu sistemin en önemli dezavantajını, maliyeti artıran, ağır ve yer kaplayan transformatör oluşturmaktadır. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için fotovoltaik modüllerinin çıkışında bir boost dönüştürücünün yer aldığı transformatörsüz fotovoltaik güç sistemleri kullanılır. Bu sistemlerde filtre kondansatörü boost dönüştürücü tarafından daha yüksek gerilimlerde şarj edilerek, eviricinin şebeke gerilim seviyesinde çıkış gerilimi oluşturması sağlanır. Bu nedenle evirici-şebeke gerilim uyumu açısından artık transformatöre ihtiyaç duyulmaz. Şebeke ile paralel çalışan her iki sistem de frekans bakımından şebekeye senkron olmak zorundadır. Bu senkronizasyon, evirici yarı iletken elemanlarının uygun şekilde anahtarlanması ile sağlanır [39].

3.6. Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Güç Sistemlerinde Net Ölçüm

Net ölçüm, yenilenebilir enerji tesisi olan tüketiciler için bir elektrik politikasıdır. "Net" burada 'kesintiler sonrası kalan' enerji, yani üretilen enerjiden harcanan enerjinin çıkarılması sonucunda elde edilen miktardır. Yenilenebilir enerji sistemlerinde kullanılan elektrik sayaçları, her iki yöne de kayıt yapmaktadır. Net ölçüm tüketici tabanlı olup, genellikle tüketicileri yenilenebilir enerji kullanımına teşvik için kullanılmaktadır [40].

Avrupa ülkelerinde uygulanan çift yönlü sayaç sistemi, ülkemizde henüz uygulanmamaktadır. Bu sistemde, üretilen elektrik enerjisi akülerde depolamaya gerek kalmadan şebekeye satılabilir. Harcanacak olan elektrik enerjisi de şebekeden satın alınır. Bu sayede, akü ve şarj kontrol masrafı ortadan kalkmakta ve temiz enerji sistemlerinin şebeke elektriği bulunan yerlerde de uygulanmasına olanak sağlanmaktadır. Çift yönlü sayaç sistemlerinde, eğer üretimimiz tüketimimizden fazla ise, fatura ödememenin yanı sıra ürettiğimiz enerjiden gelir elde etmemiz de mümkün olur. Bu sistemin ülkemizde ne zaman faaliyete geçeceği hakkında kesin bir bilgi olmamakla beraber, enerji kanunlarında son dönemde yapılan değişiklikler

böyle bir uygulamaya giden yolu açmıştır. Tarifeler ile altyapı ve uygulamalara yönelik yönetmelikler ve düzenlemeler beklenmektedir [41].



Şekil 3.26: Çift yönlü sayaç [42]

Net ölçüm, kamu kuruluşları ve müşteriler arasında, özel bir ölçüm ve faturalandırma sözleşmesidir. Bu programlar, küçük ölçekli yenilenebilir enerji sistemlerini teşvik etmekte, yenilenebilir enerji sistemlerinin çalışmadığı zamanlarda, şebekeden müşterilere her zaman güvenilir bir enerji kaynağı temin etmekte ve elektrik üreten sistemlere önemli avantajlar sağlamaktadır [43].

Ülkeler çıkaracakları yasalar ile, bu sistemlerin kurulumunu teşvik edebilirler. Fotovoltaik güç sistemleri fosil kaynaklara olan bağımlılığımızı azaltır, mevcut enerji portföyümüzün çeşitlendirilmesini sağlar. Dünyada bu sistemleri kullanan müşterilerin, tükettikleri enerjinin daha çok farkına vardıkları ve dolayısıyla daha az enerji tükettikleri gözlemlenmiştir. Şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemleri, aynı zamanda şebekedeki gücü artıran bir yoldur. Elektrik enerjisinin yoğun olarak kullanıldığı zamanlar için bu konu önem taşımaktadır. Böylelikle bazı elektrik kesintilerinin de önüne geçilebilmektedir. Otuzdan fazla ülke net ölçümün çevresel avantajlarından dolayı gerekli yasaları çıkarmış, küçük ölçekli şebeke bağlantılı yenilenebilir enerji kullanımını teşvik etmiştir [43].

New Mexico'da 2007 yılındaki uygulamaya göre, aylık fatura döneminde müşterinin net üretim fazlalığı 50$' dan az ise, bu tutar müşterinin bir sonraki faturasına yansıtılmaktadır. Eğer müşterinin net üretim fazlalığı 50$' dan fazla ise elektrik tedarik eden kuruluş bu fazlalığı bir sonraki ay ödemektedir. Müşteriler net ölçüm ile elektrik üretimi konusunda yenilenebilir enerji kredisine sahip olamamaktadır [44].

3.7. Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Sınıflandırılması

Şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemleri, kurulu güçlerine göre küçük, orta ve büyük güçlü sistemler olarak sınıflandırılır. Kullanılacak yüklerin ihtiyacına göre kurulu güç belirlenir.

3.7.1. Küçük güçlü sistemler

10 kW ve altındaki uygulamalar küçük güçlü sistemleri oluşturur. Bu uygulamalara, müstakil çalıştırılan cihazlar ve evsel uygulamalar örnek olarak gösterilebilir. Şekil 3.27'de Legtogic firması tarafından kurulan 1,3 kW gücündeki şebeke bağlantılı sistem görülmektedir. Bu sistemde 130 W gücünde 10 adet fotovoltaik modül kullanılmıştır. Bu sistemlerin kurulumu için lisans alınmasına gerek yoktur.



Şekil 3.27: 1,3 kW gücünde şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi [45]

3.7.2. Orta güçlü sistemler

10-500 kW arasındaki kurulu güce sahip sistemler, orta güçlü sistemleri oluşturur. Genellikle belirli bir bölgedeki evler için kurulmuş santraller olabileceği gibi, alışveriş merkezi gibi yüksek güç ihtiyacı olan yerlerde de kurulabilir. Bu sistemlerin kurulumunda, küçük güçlü sistemlerde olduğu gibi lisans alımına gerek yoktur. Şekil 3.28'de Feldis-İsviçre'de kurulmuş olan, 45 kW gücündeki şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi görülmektedir.



Şekil 3.28: 45 kW gücünde şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi [46]

3.7.3. Büyük güçlü sistemler

Büyük güçlü sistemler elektrik üretim santralleri olup, 500 kW'tan büyük güçlü uygulamaları kapsamaktadır. Küçük ve orta güçlü sistemlerin aksine, sistem kurulumu için lisans alınması gerekmektedir. Şekil 3.29'da görülen 20 MW gücündeki Beneixama solar parkı İspanya'da bulunmaktadır. 500 bin metrekare alana kurulmuş olan parkta 100.000 adet fotovoltaik modül kullanılmıştır.



Şekil 3.29: 20 MW gücünde şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi [47]

3.8. Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Güç Sistemlerinde Önemli Parametreler

Elektrik enerjisinin büyük güçlü santraller üzerinden sağlanması, gerek coğrafik ve çevresel sınırlamalar, gerek politik ve teknik nedenlerden dolayı artık tercih

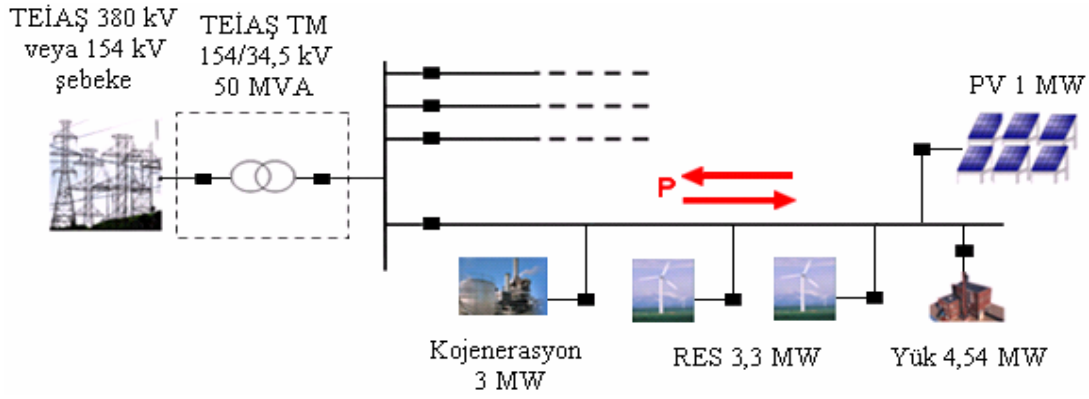
edilmemektedir. Bunun yerine dünya çapında küçük güçlü, farklı karakteristikli enerji kaynaklarının yerel olarak kullanılması yaygınlaşmaktadır [48].

Merkezi olmayan enerji üretimi, elektrik arz güvenliğinin yükseltilmesi ve sera gazı emisyonunun azaltılması dahil çok sayıda yararlar sağlamaktadır. Bilinen bu yararlara rağmen, bu yatırımlar her zaman ekonomik olmayabilir. Yatırımların ekonomik yapılabilirliği, önemli ölçüde enerji fiyatlarına ve sağlanan desteklere bağlıdır. Dağıtılmış elektrik üretim kapasitesinin yükseltilmesine yönelik yatırımların cesaretlendirilmesi için, tutarlı ve sürekli destekleyici politikalara ve araştırma geliştirme faaliyetlerine ihtiyaç vardır [25].

Mevcut elektrik iletim ve dağıtım şebekelerinde enerji akışı, tek yönlü olarak, yüksek gerilim iletim sisteminden son kullanıcıların bağlı olduğu pasif dağıtım sistemine doğrudur. Genellikle dağıtım sistemlerinin birçoğu dağıtım kısmında üretim olmaksızın radyal olarak çalıştırıldıkları için, aktif ve reaktif güç akışı her zaman yüksek gerilim seviyelerinden daha düşük gerilim seviyelerine doğru olmaktadır. Ancak, günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının artan kullanımı ile enerji akış yönü değişmeye başlamıştır. Bu durumun kaçınılmaz bir sonucu olarak dağıtım sistemlerinin iki yönlü enerji transferini sağlayabilen ve gerilim seviyesinin üretimle birlikte yükler tarafından belirlenebildiği, aktif bir sistem haline dönüşmesi gerekmektedir [49].

Herhangi bir dağıtılmış elektrik üretim kaynağının şebekeye bağlantısı yapılmadan önce, mutlaka sistem üzerinde yapacağı etkilerin teknik ve ekonomik değerlendirmesi yapılmalıdır. Dağıtılmış elektrik üretim kaynaklarının şebekeye olumlu etkileri olabileceği gibi, bazı durumlarda sistem kararlılığı ve enerji kalitesi ile ilgili olumsuz sonuçları da olabilmektedir. Bu kaynakların kullanım oranı ve çıkış gücü, dağıtım sisteminde gerilim seviyesi değişim oranının artmasına sebep olmaktadır. Genellikle, normal işletme koşullarında tüketicilere yakın noktalarda şebekeye bağlantı yapan küçük güçlü elektrik üretim kaynakları, iletimden kaynaklan kayıpları düşürmekte ve dolayısıyla besleme hatlarının sonunda oluşan gerilim düşümlerini de azaltmaktadır [50].

Üretilen enerji, dağıtılmış elektrik üretim kaynağına yakın tüketiciler tarafından kullanıldığı zaman, şebeke üzerinde en düşük olumsuz etkiler oluşmaktadır. Fakat, özellikle bu kaynakların tüketicilerden uzak olduğu, üst gerilim seviyelerine doğru enerji transferinin gerektiği durumlarda, iletim hatlarının aşırı yüklenmesine ve kayıpların artmasına sebep oldukları bilinmektedir. Elektrik üretim kaynaklarının kurulum kapasiteleri, bağlı oldukları dağıtım sistemi içerisinde kararlılığı bozmamak için ve genellikle ticari kaygılardan kaynaklanan sebeplerden dolayı sabitlenmiştir [50].



Şekil 3.30: Dağıtılmış elektrik üretim santrallerinin güç akışı [33]

Dağıtılmış elektrik üretim santrallerinin avantajları ve dezavantajları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Dağıtım ve iletim kayıplarını azaltır.
- Sera gazı emisyonu oluşturmaz ve çevre ile uyumludur.
- İnşaat süreleri kısadır ve kolay geliştirilebilir.
- İşletme bakım giderleri düşüktür.
- Kısa devre gücünün artması ve çift yönlü yük akışı için koruma ve işletme sorunları vardır.
- Güç kalitesi parametrelerini etkiler.
- Enerji üretimi meteorolojik ve mevsimsel koşullara bağlıdır [33].

Merkezi olmayan, dağıtılmış elektrik üretim santrallerin şebeke bağlantısında göz önüne alınması gereken birçok önemli husus vardır. Bu hususlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

3.8.1. Bağlantı noktası

Yenilenebilir enerji kaynakları (büyük hidroelektrik santraller hariç) klasik enerji santralleri ile güç açısından kıyaslandığında, oldukça küçük enerji yoğunluğuna sahiptirler. Bu yüzden yatırım maliyetleri açısından değerlendirildiğinde, bu tip küçük elektrik üretim kaynaklarının, mevcut şebeke sistemine bağlantısının en doğal yolu, mevcut dağıtım ve iletim sistemine ait trafo merkezleri üzerinden yapılmasıdır [49].

3.8.2. Kısa devre kapasitesi

Ülkemizde EPDK ve TEİAŞ tarafından uygulanmakta olan yenilenebilir enerji santrallerinin bağlantı kriterleri uyarınca -özellikle rüzgar santralleri için- bağlantı yapılacak trafo kısa devre gücünün %5 değerini geçmeme kısıtlaması getirilmiştir. Bu sınırlama değeri, dünya genelinde uygulanmakta olan güçlü şebeke tanımı uyarınca esas alınarak hesaplanmıştır. Bu değer aslında pratikte uygulamalar için genel-geçer bir değer olup, her yenilenebilir enerji santralinin kurulum gücü bağlantı yapacağı şebekenin herhangi bir noktası uyarınca değişmektedir [50].

3.8.3. Aşırı ve düşük gerilim

Yenilenebilir enerji kaynaklarının çıkış gücündeki değişim uyarınca şebeke gerilimi seviyesinde azalma ve artma yönünde yavaş değişimler gözlemlenmektedir. EN50160 standardı uyarınca orta gerilim şebekesindeki gerilim değişimleri +/- %10 V_{rms} değerini geçmemelidir [49].

Almanya'da DIN VDE 0126-1-1 standardına göre, eviricide 10 dakikalık periyotlarla ölçülen gerilimin maksimum değeri 253 V olmalıdır. 10 dakikanın ortalaması bu sınırı geçtiği takdirde, evirici devreyi hemen açmalıdır ve hata mesajı göstermelidir [51].

Aşırı ve düşük gerilim, sistemin transformatör tarafına zarar vereceği gibi, tüketici tarafına da zarar verebilir. Aşırı gerilim ile yük ömrü azalırken, düşük gerilim ile yük

performansı düşer. Ayrıca, aşırı ve düşük gerilim kentsel ölçekli fotovoltaik sistemlerin güç dağıtımında büyük sorun çıkarır. Bununla birlikte, bu sorunlar diğer dağıtılmış güç üreteçleri üzerinde de etkili olur [52].

3.8.4. Ani gerilim değişimi

Şebeke kısa devre gibi sorunlarla karşılaştığı zaman, koruma rölesi tarafından bu sorun algılanır, fakat kesiciler şebeke bağlantısını kesene kadar geçecek sürede gerilim düşer. Gerilim düşümünün süresi, koruma rölelerinin ve kesicilerin çalışma süresine bağlıdır. Fotovoltaik sistemlerin güç çıkışındaki dalgalanmalar yavaş olduğu için, bu sistemlerin ani gerilim değişikliği üzerinde çok az etkisi vardır. Fotovoltaik güç sistemlerinin ani gerilim düşümü oluşturacak tek olasılığı, eviricinin istenmeyen adalama fonksiyonuna karşı çok hassas olması halinde, fotovoltaik modüllerin eşzamanlı olarak şebeke bağlantısını kesmesidir [52].

3.8.5. Gerilim dengesizliği

Gerilim dengesizliği, üç fazlı sistemlerde her fazın genliğinin birbirinden farklı olduğu durumdur. Fotovoltaik güç sistemlerindeki faz farkları, dağıtım hattında fazlar arasında gerilim dengesizliğine sebep olur. Fazlar arasındaki büyük dengesizlik, motorların aşırı ısınmasına ve motor denetleyicilerinin belirli aralıklarla kapanmasına sebep olur [52].

3.8.6. Harmonikler

Bir harmonik dalga, temel frekansın birkaç katı olarak kendini gösteren frekanslar olarak tanımlanır. Fotovoltaik güç sistemlerinin ürettiği doğru akımı alternatif akıma çevirmek için kullanılan eviriciler, içerdikleri yarı iletken anahtarlama elemanlarından dolayı, harmonik kaynağı olarak adlandırılır. Son yıllarda yapılan eviriciler, önceki yıllarla karşılaştırıldığında daha az harmonik üretir [52].

Harmonikleri en aza indirmek için darbe genişlik modülatörü olarak adlandırılan PWM denetleyiciler tasarlanmıştır. PWM denetleyiciler ile, darbe genişliği ve

gerilim aralığı değiştirilerek kontrol gerçekleştirilir. Böylece gerilim ortalama değeri, istenen temel dalga şekline eşitlenir. Harmoniklerin yükler üzerindeki etkilerine, floresan lamba ve televizyon ekranlarındaki titreşimler, ses sistemlerindeki bozulmalar ve kontrol cihazlarının arızalı çalışması örnek olarak gösterilebilir [52].

Toplam harmonik distorsiyon değeri, ölçülen anlık akım değeri uyarınca belirlenmektedir. IEEE 519 standardına göre, 69 kV'un altındaki elektrik şebekelerinde oluşan harmonik seviyeleri toplamda %5'i ve cihazlardan kaynaklanan tekil harmonik bozulma ise %3'ü geçmemelidir [49].

3.8.7. Adalama

Adalama, şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemlerinde, herhangi bir sebepten dolayı şebeke elektriğinin kesilmesi durumunda, fotovoltaik sistemin elektrik üretmeye devam ettiği elektriksel bir problemdir. Şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemleri, şebeke elektriğini güç kalitesi yönünden takip ederek, herhangi bir sorunla karşılaştığı takdirde, bu sorunu algılayabilmelidir. Bu sorun karşısında fotovoltaik sistem eviricisi devreyi açarak elektriğin şebekeye verilmesini önlemelidir. Aksi takdirde, şebekenin herhangi bir yerinden kesilen enerji, bütün şebekede enerjinin kesilmesine sebep olmaz. Enerjinin kesildiği yere kadar olan bölüm için fotovoltaik sistemin ürettiği enerji devrede kalmaya devam eder. Bu nedenle şebekede bakım yapılamaz [52].

3.8.8. Sistemler arası arızanın süresi

Transformatörlerde alçak gerilim ve yüksek gerilim tarafı birbirinden yalıtımlıdır. Sistemler arası arıza, transformatör üzerinde yıldırım düşmesi gibi herhangi bir sorun meydana geldiğinde, bu yalıtımın ortadan kalkmasıyla ortaya çıkan arızadır. Böyle bir sorun oluştuğunda güç santralinin çalışması durdurulmalı ve şebeke ile bağlantısı kesilmelidir. Trafo merkezi kesicisi devreyi açana kadar fotovoltaik güç sistemleri bu olayı algılayamaz. Böyle bir sorunda alçak gerilim tarafında oluşacak yüksek gerilim, çarpılmalara ve yangınlara sebep olabilir [52].

3.8.9. Frekans değişimi

Güç arzı ve talebi arasındaki dengesizlik frekans dalgalanmalarına sebep olmaktadır. Frekans, güç kalitesi konusunda en önemli faktörlerden biridir. Dolayısıyla şebeke bağlantılı elektrik üretim sistemlerinde, sistem frekansı şebeke frekansıyla eşit tutulmak zorundadır. Rüzgar ve güneş gibi enerjinin sürekli sabit oranda sağlanamadığı kaynakların payı gün geçtikçe artmaktadır. Bu sebeple, elektrik tedarik eden kuruluşların güç kalitesini kontrol altına alması zorlaşmaktadır. Fotovoltaik güç sistemlerinin artmasıyla, bu sistemlerin sebep olduğu frekans dalgalanması daha rahat fark edilebilir. Frekans değişimi, motorlarda dönme hızına etki ederek, imalat sürecinde bazı ürünlerin kalitesinin bozulmasına sebep olabilir. Ayrıca, frekans dalgalanmasının sebep olduğu rezonans, generatörlere zarar vererek elektrik kesintisine yol açabilir [52].

3.8.10. DC kayma (DC offset)

DC bileşeni, alternatif akım temel dalga şeklinden pozitif veya negatif yönde meydana gelen sapmalar oluşturur. Fotovoltaik güç sistemlerinde kullanılan transformatörsüz eviriciler, DC bileşenin elimine olmasını engeller. DC bileşenin, alternatif akım tarafına sızmasını önlemek için, dönüştürücüler DC bileşen algılayıcısı ile donatılmıştır. Böylelikle, fotovoltaik güç sistemlerinde alternatif akım tarafına sızacak DC bileşenler önlenmiş olur [52].

3.8.11. Yüksek frekans taşınımı

Fotovoltaik güç sistemlerinin en önemli elemanı olan eviriciler, fotovoltaik modüllerle üretilen doğru akımı, 10-20 kHz civarında olan yüksek frekanslardaki anahtarlama ile 50 Hz frekansta alternatif akıma çeviriler. Bu yüksek frekans sebebiyle, eviricide bir elektromanyetik gürültü olur. Bu gürültü, elektrik kablolarıyla taşınarak elektronik cihazlar üzerinde olumsuz etki gösterir. Fotovoltaik güç dönüştürücüleri tarafından üretilen elektromanyetik dalga, televizyon, radyo ve haberleşme cihazlarını karşılıklı olarak etkilemektedir [52].

3.8.12. Güç dönüştürücü sistemlerinin şebeke üzerindeki aktif sinyal etkisi

Fotovoltaik güç dönüştürücüleri adalama sorunuyla karşılaştığı zaman, şebeke bağlantısını kesebilmek için gerekli algılayıcılarla donatılmıştır. Bu algılayıcı sistemler, aktif ve pasif sistemler olmak üzere iki ana başlık altında incelenebilir. Aktif sistemler, gerilim ve frekans kontrolü yapmak için minimum derecede bir düzensizlik oluşturarak, şebekeye sinyal gönderir. Bu sinyal şebekenin güç kalitesini etkilemeyecek kadar küçüktür. Fakat, şebekeye bağlı bir dizi fotovoltaik sistem varsa, bu sistemlerin gönderdiği sinyallerin birbirleri ile çakışması olumsuz etki meydana getirebilir. Bu olumsuz etkilere dair herhangi bir bildirim bugüne kadar yapılmamıştır. Aktif sistemlerden gelen bu sinyal çakışmalarının şebekenin güç kalitesi üzerinde olumsuz etki yapacağı düşünülmektedir [52].

3.8.13. Reaktif güç kontrolü

Reaktif güç dengesi, şebekede yer alan kapasitif ve endüktif bileşenler arasındaki alışverişe bağlı olarak değişmektedir. İletim hatları ve kondansatörler reaktif güç üretimine katkıda bulunurken, transformatör ve motorlarda reaktif enerji tüketilmektedir. Pratikte reaktif güç dengesini sağlamak için, tüketici endüktif yüklere yakın noktalara kompanzasyon sistemleri kurulmaktadır [52].

3.8.14. Hat iletim kapasitesi

Şebekenin herhangi bir noktasına yenilenebilir enerji kaynağı bağlamadan önce, o noktayı şebekeye bağlayan hatlarda aşırı yüklenme olmayacağından kesinlikle emin olunmalıdır. Hattın tipi ve dağıtım trafosunun kurulu gücü, yenilenebilir enerji kaynağından şebekenin diğer noktalarına iletilecek gücün limit değerini belirlemektedir. Ayrıca, şebekenin sahip olduğu iletim kapasitesi, şebekedeki yük akışı ve iletim hatları üzerinden taşınan aktif ve reaktif güç değerleri ise, yenilenebilir enerji santralin kurulum gücünün belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır [49].

3.8.15. Koruma koordinasyonu

Yenilenebilir enerji santrallerinin şebekeye bağlantısı durumunda iki farklı durum için koruma söz konusu olmaktadır. Bunlardan birincisi, yenilenebilir enerji kaynağının oluşturduğu santral ve alt bileşenlerinin korumasıdır. Diğeri ise, santralden kaynaklanabilecek problemlere karşı şebekenin korunmasıdır. Santral bünyesinde oluşabilecek problemler içinde; üretime katılan ünitede veya üniteler arası kısa devre arızası, aşırı üretime bağlı olarak oluşabilecek termal zorlanmalar ve aşırı gerilim problemleri en etkin olarak gözlemlenen problemler arasındadır. Yenilenebilir enerji santralinden kaynaklanan şebekede oluşabilecek problemler, gerilim ve frekans seviyesinde oluşabilecek değişikliklerle ilgilidir. Bu tip durumlar genellikle, santralin açma kumandasının devreye girmesi veya üretimi kesmesi durumunda oluşabilecek geçici durumlardır. Bu durumlara örnek olarak, aşırı ve yüksek frekans seviyeleri, aşırı ve yüksek gerilim seviyeleri, ana şebekede kesinti, yüksek kısa devre akımları, aşırı termal zorlanma, toprak hatası ve nötr gerilimi değişmesi durumları sıralanabilmektedir [49].

3.8.16. İletim ve dağıtım kayıplarının azalması

Büyük güçlü elektrik üretim santralleri genellikle tüketim noktasına uzak yerlere inşa edilirler. Güç kaybı mesafe ile orantılı olarak arttığından, güç iletimi ve dağıtımında büyük miktarda kayıplar olmaktadır. Bölgesel olarak değişmekle birlikte, sanayileşmiş ülkelerde bu kayıp oranı %3 ile %9 arasındadır. Fakat, fotovoltaik güç sistemleri güneş ışığının olduğu yerler olmak koşuluyla, tüketim noktasında kurulabilirler. Böylelikle, iletim ve dağıtım kayıplarında önemli ölçüde azalmalar olur [52].

3.8.17. Arz güvenliği

Fotovoltaik sistemlerin güç çıkışında, herhangi bir kaza veya doğal afet tarafından kesinti meydana gelebilir. Sık sık doğal afet deneyimi yaşayan Japonya'da, fotovoltaik güç sistemleri, acil durumlarda elektrik kesintilerine rağmen, sisteme güç

aktarabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu sistemlerde akü grubunun, sisteme dahil edilmiş olması gerekmektedir [52].

3.8.18. Maksimum güç talebi

Genel olarak elektrik tüketimi gündüz vakitlerinde artarken, gece vakitlerinde azalmaktadır. Fotovoltaik modüller gündüz vakitlerinde elektrik üretimi yaptığı için, maksimum güç talebinin olduğu zamanlarda güç ihtiyacının karşılanıp karşılanamayacağı önemli bir konu olmuştur. Özellikle, sıcak iklimli ülkelerde, fotovoltaik modüllerin yaz aylarında soğutma ihtiyacını karşılayabilmesi gerekir. Kentsel yerlerde, büyük ofis binalarında, soğutma yapılması zorunludur. Diğer taraftan, fotovoltaik modüller ile sağlanan gücün etkisini değerlendirmek kolay değildir. Örneğin, birçok ülkede akşam vakitlerinde güç talebi fazla olabilmektedir. Ayrıca, güneş enerjisi kesintili bir enerji kaynağıdır. Dolayısıyla, enerji sıkıntısı olmaması için geri besleme sistemleri ile desteklenmelidir. Fotovoltaik güç sistemleri, akülerle desteklenerek geliştirilebilir. Eğer fotovoltaik sistem, yüksek güç çıkışı verdiği zamanlarda akülerle enerji depolar ve bunu yük ihtiyacı için kullanırsa, şebekeden çekilecek tepe güç değerlerinde azalma olur [52].

3.8.19. Güç kalitesi yönetimi

Fotovoltaik güç sistemlerinde gerilim dalgalanması, kısa devre kapasitesi ve harmonikler gibi beklenen olumsuz etkiler, yüksek performanslı güç dönüştürücüsü kullanılması halinde olumlu etkiye dönüştürülebilir. Aktif filtre, statik VAr kompanzasyon ve arıza akımı sınırlayıcı süperiletken fonksiyonları ile kaliteli güç dönüştürücüsü elde edilebilir. Bu güç dönüştürücüleri ile şebekenin güç kalitesini artırmak mümkündür [52].

Fotovoltaik güç sistemlerinin; şebeke, tüketici ve fotovoltaik modül tarafında meydana gelebilecek olumsuz etkilerine karşı ve sisteme yarar sağlayabilmesi için alınacak önlemler Tablo 3.3'te görülmektedir [52].

Tablo 3.3: Fotovoltaik güç sistemlerinin; şebeke, tüketici ve fotovoltaik modül tarafında meydana gelebilecek olumsuz etkilerine karşı ve sisteme yarar sağlayabilmesi için alınacak önlemler [52]

	Önlemler		
	Şebeke tarafı	Tüketici tarafı	Fotovoltaik tarafı
Aşırı ve düşük gerilim	Hat gerilim düşürücü, kompanzatör, şönt kapasitör, şönt reaktör, adım gerilim regülâtörü, aküler	Şönt kapasitör, şönt reaktör, aküler	Güç dönüştürücüleri ile gerilim kontrolü, aküler
Ani gerilim değişimi	Tristörlü gerilim kontrolörü, statik VAr kompanzatör, statik senkron kompanzatör, aküler	Dinamik gerilim sağlayıcı, aküler	Aküler
Gerilim dengesizliği	Statik senkron kompanzatör	Dinamik gerilim sağlayıcı	
Harmonik	Şönt kapasitör, şönt reaktör, statik senkron kompanzatör, pasif filtre, aktif filtre	Şönt kapasitör, şönt reaktör, dinamik gerilim sağlayıcı, pasif filtre, aktif filtre	Geliştirilmiş güç dönüştürücü sistemleri
Adalama	Aküler, koruma cihazları, transfer anahtarı	Aküler, koruma cihazları	Aküler, geliştirilmiş güç dönüştürücü sistemleri
Kısa devre kapasitesi			Geliştirilmiş güç dönüştürücü sistemleri
Sistemler arası arızanın süresi	Transfer anahtarı		
DC kayma artışı			Geliştirilmiş güç dönüştürücü sistemleri, DC kayma algılayıcısı
Frekans değişimi	Aküler	Aküler	Aküler
Arz güvenliği	Aküler	Aküler	Aküler
Güç kesintisi	Aküler	Aküler	Aküler, geliştirilmiş güç dönüştürücü sistemleri

3.9. Akıllı Şebeke Teknolojisi

Bugün kullandığımız elektrik iletim yapısı 125 yıl önce dizayn edildiğinden dolayı, güç eksikliklerini hissetmemek ve karanlıkta kalmamak için elektrik şebekesinde iyileştirilmeler yapılmalıdır. Elektrik şebekesi modern, güncel ve akıllı bir yapıda olmalıdır. Sürdürülebilir enerji kaynağı için yenilenebilir enerji kaçınılmazdır. Diğer hiçbir tür enerji kaynağı sürdürülebilir yapıda değildir. Ancak rüzgar, güneş, dalga ve jeotermal gibi yenilenebilir kaynakları, dünya var olduğu sürece var olmaya devam edecektir. Asıl sorulması gereken soru ise, sürdürülebilir enerji amaçlarımıza ne kadar ulaşabildiğimizdir [53].

Yenilenebilir enerji kaynakları tarafından beslenecek olan iletim ve dağıtım sistemlerinin, bu kaynaklara hazır olması akıllı şebekeler yoluyla olacaktır. Mevcut şebekelerin akıllı hale getirilmesinin birçok faydası bulunmaktadır. Kyoto protokolüne bağlı olarak CO_2 emisyonlarının sera etkisi çarpıcı bir biçimde ifade edilmektedir. Örneğin, Amerika'da akıllı bir şebeke yapısına sahip olunmasının karbon emisyonlarını %25 oranında aşağı çekeceği hesaplanmıştır. CO_2 emisyonu açısından ise, 160 milyon hektar orman daha temiz bir hava için çalışacaktır. Bu, yaklaşık 130 milyon aracın yollardan çekilmesi ile eşdeğerdir. 2030 yılında dünya enerji ihtiyacının %30 artacağı düşünüldüğünde, mevcut karbon emisyonlarının arttırılmadan bu büyümenin nasıl karşılanabileceği merak konusudur [53].

Bir akıllı şebekenin bileşenleri ve teknolojileri, Amerikan Enerji Departmanına göre (DOE) aşağıdaki yapılara sahip olmalıdır [53].

Akıllı uygulamalar: Önceden belirlenmiş kullanıcı tercihlerine bakarak, gücün gün içinde ne zaman daha fazla tüketileceğini tahmin eder. Böylece, elektrik üretimi ve emisyonlar üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olan tepe yüklerini azaltır. Üretimdeki en önemli maliyetlerden biri bu tepe yükleri karşılarken oluşur. Bazı çalışmalar, elektrik kullanımı ve bu kullanım bilgisinin kullanıcıya verilmesiyle, tepe yüklerde %25 oranında tasarruf sağlandığını göstermiştir [53].

Akıllı sayaçlar: Akıllı sayaçlar, tüketici ve gücü sağlayan kuruluş arasında iki yönlü iletişimi sağlar ve ödeme verilerinin toplanmasını, güç kesintilerinin belirlenmesini ve bakımcıların hızlı bir şekilde, doğru yere yönlendirilmesine olanak sağlar. Mevcut şebekelerde arızalar, tüketicilerin telefonu yoluyla belirlenip, ekiplerin yönlendirilmesi sağlanmaktadır. Dolayısıyla 1-2 saat gecikmeye neden olunabilmektedir [53].

Bütünleştirilmiş haberleşme: Veri toplama (SCADA-Supervisory Control and Data Acquisition), koruma ve kontrol konseptleri, bütünleştirilmiş bir sistemde kullanıcının akıllı elektronik cihazlar ile etkileşimini sağlar [53].

Algılama ve ölçme: Şebekenin sağlıklı olduğunu ve bütünlüğünü koruduğunu tanımlayacak verileri toplar. Akıllı bir şebekede, şebekenin sağlığı ve kritik noktalar anlık olarak yansır. Hattın sıcaklığı, yüklenme seviyesi ve havadaki rüzgar hızı izlenebilecektir. Otomatik okumayı, online enerji maliyetinin bilinmesini ve enerji hırsızlığını engeller. Şebekedeki kaçak oranları düşünüldüğünde böyle bir yapıya sahip olunmasının önemi daha iyi görülür. Çünkü üretimi, iletimi, tüketimi ve kayıpları bilen bir yapı, kaçakları kolaylıkla hesaplayabilecektir [53].

Akıllı istasyonlar: Güç faktörü performansı, kesici, trafo ve akü durumunun izlenmesi, kritik ve kritik olmayan işlem kontrolünü sağlar [53].

Akıllı dağıtım: Kendi kendini iyileştiren, dengeleyici ve optimize edici yapıdadır. Otomatik izleme ve analiz etme özelliği ile hava durumu ve enerjisiz kalma geçmişine bağlı olarak arızaları tahmin edebilecek yapıya sahip sistemlerdir [53].

Akıllı üretim: Şebekenin birçok noktasından alınan geri beslemeler ile, enerji üretiminin optimize edilmesi, gerilimin, frekansın ve güç faktörünün otomatik olarak ayarlanabilmesi için, öğrenme özelliğine sahip güç üretimini tanımlamaktadır [53].

İleri kontrol metotları: Şebekenin durumunu analiz ederek tanımlayan ve tahmin eden cihazlar ile algoritmalar topluluğunu ifade etmektedir. Otomatik olarak

düzeltici önlemler alarak, enerji kesintilerini ve güç kalitesi problemlerini engeller ya da etkilerini azaltır [53].

Her ülkeye ait farklı şebeke yapısı olduğundan, gerek akıllı sistemler, gerek yenilenebilir enerji kaynakları entegrasyonunda sistem analizleri devam ettirilerek en uygun koşullar araştırılmalıdır. Kendi şebekemizin dinamik analizlerinin alt yapısı oluşturularak, rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji sistemlerinin yük akışı ve kısa devre katkısının yanında, dinamik yapıları da incelenmelidir [53].

Bunların yanında, gelecekte artacak yenilenebilir enerji katkısı da düşünülerek, yön değiştirebilecek güç akışları ve adalama konumları için koruma koordinasyonunun alt yapısı hazırlanmalı, iletişim protokolleri de gelecekteki şebeke yapısına uygun seçilmelidir. Uzaktan enerji izleme ve ölçme yapısı dizayn edilmeli, modern ve hızlı olmasına dikkat edilmelidir. Aktif ve reaktif güç kontrolü yapabilen sistemler için şebekenin uygun noktaları ve farklı senaryoların da incelenmesi gerekir [53].

4. DÜNYADA VE ÜLKEMİZDE GÜNEŞ ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

4.1. Dünyada Yapılan Uygulamalar ve Hedefler

Dünyada yapılan uygulamalar gün geçtikçe artmakta olup, fotovoltaik modüllerle elektrik üretimi çeşitli alanlara da yayılmaktadır. Uygulamalar ihtiyaca ve isteğe göre şebeke bağlantılı ve şebekeden bağımsız olabilmektedir. Şekil 4.1'de Münih, Almanya'da kurulan çatı entegreli fotovoltaik güç sistemi görülmektedir.



Şekil 4.1: 1 MW çatı entegreli fotovoltaik güç sistemi, Münih fuar merkezi, Almanya [54]

Şekil 4.2'de Haenam, Güney Kore'de KISCO tarafından üretilen modüllerle kurulan 500 kW fotovoltaik güç sistemi görülmektedir.



Şekil 4.2: 500 kW fotovoltaik güç sistemi, Haenam, Güney Kore [55]

2008 yılında Meksika'da kurulan fotovoltaik güç sistemi kurulu gücü 21,7 MW_p civarında olmuştur. Meksika'da şu ana kadar yapılan en büyük çatı monteli sistem, Aguascalientes şehrinde bir süpermarketin çatısına kurulan sistem olup, kurulduğu binanın elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık %20'sini karşılamaktadır [55].

Şekil 4.3'te Meksika'da bir evin enerji ihtiyacını karşılamak için kurulan 10 kW_p gücünde şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi görülmektedir.



Şekil 4.3: 10 kW_p şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi, Meksika [55]

Şekil 4.4'te su pompalama sistemi için kurulan 0,64 kW_p fotovoltaik güç sistemi görülmektedir.



Şekil 4.4: 0,64 kW_p fotovoltaik güç sistemi, Meksika [55]

2007 yılında İspanya'da, Ulusal Yenilenebilir Enerji Planı'nın 2010 yılı hedefi olan 400 MW seviyesi aşılmıştır. İspanya çok önemli fotovoltaik endüstriye sahiptir.

Modül ve hücre üretiminde aktif 20'den fazla şirketle, 2008 yılı için 1000 MW endüstriyel üretim kapasitesine sahiptir. Fotovoltaik Endüstri Derneği (ASIF)'e göre, İspanya'da fotovoltaik sektöründe 500'den fazla şirket aktif olarak çalışmaktadır [55].

Şekil 4.5'te İspanya'da kurulan 20 MW gücündeki Almaraz güneş tarlası görülmektedir.



Şekil 4.5: 20 MW fotovoltaik güç sistemi, Almaraz güneş tarlası, İspanya [55]

Şekil 4.6'da İspanya'da kurulan 6,5 MW gücündeki La Solana güneş tarlası görülmektedir.



Şekil 4.6: 6,5 MW fotovoltaik güç sistemi, La Solana güneş tarlası, İspanya [55]

2007-2012 yılları arasında fotovoltaik pazarın yaklaşık olarak beş kat büyüyeceği düşünülmektedir. Yıllık pazar büyüme oranları geçmişe göre önemli farklılıklar

göstermektedir. Önümüzdeki yıllarda Avrupa ülkeleri ve Amerika'nın fotovoltaik pazarın büyümesinde önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir. 2012 yılı itibarı ile dünya üzerinde yaklaşık olarak 44 GW kurulu güce ulaşılması tahmin edilmektedir. Bu değer 44 adet nükleer reaktör gücü kapasitesine eşittir. Fotovoltaikler küresel olarak büyük bir enerji kaynağı olma yolunda ilerlemektedir [56].

Fotovoltaik pazar dağılımını ülkelere göre değerlendirmek gerekirse, ülkelerin izlediği politikalarda bu oranların etkisinin büyük olduğu söylenebilir. Destek mekanizmaları ülkeler tarafından yasalaştırılarak belirlenmektedir. Bu sebeple, fotovoltaik pazar tahminleri ülkelerin siyasi anlayışlarına da bağlıdır. Güney Avrupa'da 2015 yılında, Avrupa'da ise 2020 yılında fotovoltaik modül fiyatlarında en üst rekabetin yaşanacağı düşünülmektedir. Fotovoltaik güç sistemleri, ucuz elektrik üretim kaynağı olarak anılacağı gibi, aynı zamanda temiz ve güvenilir elektrik üretim kaynakları da olacaklardır [56].

4.2. Dünyada Güneş Enerjisi Teşvikleri

Dünyanın birçok ülkesinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının geleneksel enerji kaynakları karşısındaki fiyat dezavantajlarını ortadan kaldıracak, finansal teşvik sistemleri uygulanmaktadır. Bu teşvik kapsamları ülkeler bazında aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır [57].

Avustralya: Avustralya'daki her bir federasyon, yenilenebilir enerji teşvik mekanizmasına sahiptir. Bazı federasyonlarda abonelerin alış fiyatlarının iki katına kadar çıkan şebeke besleme tarifeleri uygulanmaktadır [57].

Bulgaristan: Sınır komşumuz olan ve yakın geçmişte AB'ye katılan bu ülkede, 30 Mart 2009 tarihi itibarı ile yürürlükte olan yenilenebilir enerji teşvik yasasına göre sistem şu şekilde işlemektedir: 5 kW_p'tan daha küçük fotovoltaik sistemler için şebekeyi besleme tarifesi 0,42 €/kWh, 5 kW_p'tan daha büyük fotovoltaik sistemler için ise 0,39 €/kWh seviyesindedir. 25 yıllık sözleşmelerde tarife değerlerinde her sene bir önceki yılın %95'i geçerli olmaktadır [57].

Çin: 2009 yılı itibarı ile Çin hükümetinin 585 milyar $ tutarındaki teşvik paketi sayesinde Çinli firmalar, elektrikli araçların, rüzgar türbinlerinin, fotovoltaik modüllerin ve enerji verimli elektrikli aletlerin üretiminde dünyanın en büyük üreticileri arasına girmiştir. 2009 Mart'ta Çin hükümeti binalarda fotovoltaik güç sistemlerinin teşviki için "Solar Çatılar Planını" yürürlüğe koymuştur. Temmuz ayında Finans Bakanlığı daha önceden de yürürlükte olan "Altın Güneş Projesinde" yeni düzenlemelere gitmiştir. Bu plana göre, şebeke bağlantılı fotovoltaik güç santrali projelerinde fotovoltaik sistemin kurulum, iletim ve dağıtım bağlantı sistem maliyetlerinin %50'sinin finansmanı devlet teşvikleri ile sağlanmaktadır. Şebeke bağlantısı olmayan kırsal bölgeler için bu teşvik oranı %70'e kadar çıkmaktadır. Bu teşvik sisteminin toplam limiti 500 MW olarak belirlenmiştir. Güneş enerjisi için hayata geçirilen bütün bu teşvikler, Çin Halk Cumhuriyeti'ndeki fotovoltaik pazarın gelişimini hızlandırmıştır. Anwell Technologies ve Tianwei firmalarının devreye aldığı yeni ince film fotovoltaik üretim tesisleri ve fotovoltaik hücre üreticisi LDK'nın 500 MW gücünde fotovoltaik güç santrali kurmak için imzaladığı kontratlar bu duruma örnektir. Fakat küçük çaplı bina sistemleri için Çin'de uygulanan herhangi bir yenilenebilir enerji teşvik sistemi bulunmamaktadır [57].

Almanya: 2009 yılı itibarı ile Alman yenilenebilir enerji kaynakları teşvik yasası yürürlüktedir. 1 Ağustos 2004 yılında yürürlüğe giren şebeke besleme tarifesi 2008 yılında değiştirilmiştir. Beklenmeyen yüksek ilgi ve büyüme oranları nedeniyle tarifelerdeki değer indirme hızlandırılmış ve daha düşük tarifelerin geçerli olduğu yeni bir kategori (1.000 kW_p'tan daha büyük sistemler için) oluşturulmuştur. 2009 yılı itibarı ile fotovoltaik güç sistemleri için uygulanmakta olan şebeke besleme tarifeleri şu şekildedir:

- 30 kW_p'tan daha küçük sistemler: Yere kurulu fotovoltaik güç sistemleri için 0,3194 €/kWh, binalara ve ses kesme duvarlarına (genelde otoyollarda ses yalıtımı için kullanılır) kurulan fotovoltaik güç sistemleri için 0,4301 €/kWh.

- 30-100 kW_p arasındaki sistemler: Yere kurulu fotovoltaik güç sistemleri için 0,3194 €/kWh, binalara ve ses kesme duvarlarına kurulan fotovoltaik güç sistemleri için 0,4091 €/kWh.

- 100-1000 kW_p arasındaki sistemler: Yere kurulu fotovoltaik güç sistemleri için 0,3194 €/kWh, binalara ve ses kesme duvarlarına kurulan fotovoltaik güç sistemleri için 0,3958 €/kWh.

- 1000 kW_p'tan daha büyük sistemler: Yere kurulu fotovoltaik güç sistemleri için 0,3194 €/kWh, binalara ve ses kesme duvarlarına kurulan fotovoltaik güç sistemleri için 0,3300 €/kWh [57].

Hindistan: Hindistan Yenilenebilir Enerji Kalkınma Ajansı (IREDA) finans ve finansal kiralama kurumlarını, Hindistan'da kurulan yenilenebilir enerji sistemlerinin satışı ve kurulumu için uygun şartlarda kredi vermesi için desteklemektedir. Eyalet şebeke firmaları, güneş tarlalarıyla yaptıkları anlaşmalar gereği, üretilen elektriği satın almak zorundadır. Yeni ve Yenilenebilir Enerjiler Bakanlığı 2008 yılında Fotovoltaik Güç Santrallerinin kurulumu için yeni bir teşvik mekanizmasını devreye almıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları teşvik yasasında yapılan değişiklikle, eyaletlerin verdiği alım garantisinin yanı sıra merkezi hükümet, fotovoltaik güç sistemleri ile üretilen elektriğin kWh'ine 0,21 € vermektedir [57].

İspanya: 2008 yılından beri yasal çerçeveyi, "Real Decrato" (kraliyet kararnamesi) olarak bilinen ve 2008'de yenilenen "Yenilenebilir Enerji Kaynakları" yasal düzenlemesi belirlemektedir. Güneş enerjisi teşvikleri için şebekeyi besleme tarifesi şu şekildedir:

Binaya entegre sistemlerde, 20 kW_p'tan küçük sistemler için: 0,34 €/kWh, 20 kW_p'tan büyük sistemler için: 0,32 €/kWh, yere kurulmuş sistemler için: 0,32 €/kWh'tır [57].

Tayvan: Tayvan Ekonomik İşler Bakanlığına bağlı Enerji Bürosu, güneş enerjisi teşvikleri için öneri niteliğindeki şebeke besleme tarifelerini 2009 yılının Eylül ayında ilan etmiştir. Tam kesinleşmeyen tarife, fotovoltaik güç sistemleri tarafından üretilen elektrik için 0,25-0,28 $/kWh olarak öngörülmektedir. Bu oranlar fotovoltaik sektöründeki yerel yatırımcıların beklentilerinin çok altındadır [57].

4.3. Ülkemizde Yapılan Uygulamalar ve Hedefler

1528 sayılı kanunun 3 Mart 2001 tarihinde yürürlüğe girmesinden bugüne kadar ülkemiz elektrik enerjisi sektöründe rekabete dayalı ve işleyen bir piyasanın oluşturulmasına yönelik önemli adımlar atılmış, sektörde faaliyet gösteren kamu kuruluşları yeniden yapılandırılmış, sektörde serbestleşmeyi temin edecek piyasa kuralları uygulanmaya başlamıştır. Sektör reformu ve özelleştirme konusunda kısa ve orta vadeli yol haritası olan Elektrik Enerjisi Sektörü Reformu ve Özelleştirme Strateji Belgesi 17 Mart 2004 tarihinde açıklanmıştır. Bu kapsamda gerekli yasal düzenlemeler tamamlanmış, uzun dönemli talep tahmin çalışması yapılarak yayımlanmış, geçiş dönemi Dengeleme ve Uzlaştırma uygulaması başlatılmış, geçiş dönemi sözleşmeleri tamamlanmış, fiyat eşitleme mekanizması uygulanmaya başlamış, Devlet Su İşleri (DSİ) santrallerinin Elektrik Üretim Anonim Şirketi (EÜAŞ)'ne devri sağlanmış, özelleştirmeye hazırlık çalışmaları kapsamında EÜAŞ portföy grupları oluşturulmuş, dağıtım bölgeleri yeniden düzenlenerek şirketleştirilmiş, Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi (TEDAŞ), özelleştirme kapsam ve programına alınmış, geçiş dönemi için bu bölgelere ait tarifeler belirlenmiş, dağıtım özelleştirme metodolojisi belirlenerek ihale işlemleri başlatılmıştır. Böylece elektrik piyasasının oluşumunda ve özelleştirme sürecinde önemli adımlar atılmıştır [58].

Elektrik enerjisi sektöründe serbestleşmeyi esas alan yeniden yapılanmanın temel amacı, arz güvenliği bakımından gerekli yatırımların yapılmasını sağlayacak yatırım ortamının oluşturulması, rekabet ortamının sağlayacağı sektördeki verimlilik artışı yoluyla elde edilecek kazanımların tüketiciye yansıtılmasıdır. Bu amaca ulaşmak üzere uygulanan politika ve stratejiler, ülkemiz koşullarının yanı sıra enerji sektöründe dünyada yaşanan gelişmeler ile yakından ilgilidir. Nitekim, enerji sektöründe gerek maliyet ve fiyat artışları gerek artan elektrik enerjisi talebi çerçevesinde, birçok ülkede arz güvenliğinin sağlanması konusunda yeni tedbirler alınmakta, mevcut piyasa yapıları ve kuralları yaşanan deneyimler ve karşılaşılan sorunlar çerçevesinde yenilenmekte, piyasa mekanizmaları arz güvenliğini sağlayacak tedbirler ile güçlendirilmektedir. Ülkemizde de dünya ortalamasının

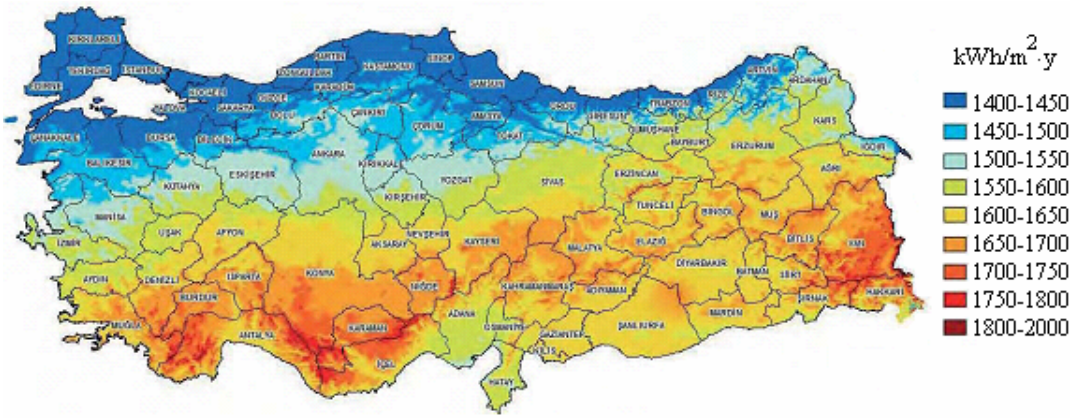
üzerinde gerçekleşmeye devam eden talep artışı ve buna bağlı olarak artan yatırım ihtiyacı yeni tedbirler alınmasını zorunlu kılmaktadır [58].

Elektrik Enerji Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesinde yenilenebilir enerji kaynakları için temel hedefin 2023 yılında, en az %30 düzeyinde olduğu belirtilmiştir. Teknoloji, piyasa ve kaynak potansiyelindeki gelişmeler dikkate alınarak bu hedef üzerinde değişiklik yapılabilecektir. Ayrıca, güneş enerjisinin elektrik üretimi için de kullanılması uygulamasını yaygınlaştırmak, ülke potansiyelinin azami ölçüde değerlendirilmesi hedeflenmektedir. "Güneş enerjisinin elektrik üretiminde kullanılması konusunda teknolojik gelişmeler yakından takip edilecek ve uygulanacaktır" denilmektedir. Bununla birlikte, yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı için alınacak tedbirler sonucunda, elektrik üretiminde doğal gaz payının %30'un altına düşürülmesi hedeflenmektedir [58].

Ülkemizde 2005 yılında kabul edilen, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun ile, yenilenebilir enerji kaynak alanlarının belirlenmesi, korunması, kullanılması ile yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisinin belgelendirilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretiminde uygulanacak usul ve esaslar, yatırım dönemine ilişkin uygulama esasları ve çeşitli hükümler yasalaşmıştır. Bu kanunun amacı; yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımının yaygınlaştırılması, bu kaynakların güvenilir, ekonomik ve kaliteli biçimde ekonomiye kazandırılması, kaynak çeşitliliğinin artırılması, sera gazı emisyonlarının azaltılması, atıkların değerlendirilmesi, çevrenin korunması ve bu amaçların gerçekleştirilmesinde ihtiyaç duyulan imalat sektörünün geliştirilmesidir [59].

Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından yapılan ön fizibilite çalışmaları, ülkemizde yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip (1650 kWh/[m^2.y] değerinin üzerinde) 4.600 km^2'lik kullanılabilir bir alanın olduğunu hesaplamıştır. 4.600 km^2 alanın fotovoltaik güç sistemlerinde kullanılması, 440-495 GW_p kurulu fotovoltaik gücü ve yılda 638-718 milyar kWh elektrik enerjisi üretimi anlamına gelir. Türkiye'de şu anda kurulu fotovoltaik güç sisteminin 3 MW_p olduğu tahmin edilmekte ve daha çok iletişim baz istasyonları, aydınlatma sistemleri, şebekeden

uzak ada sistemleri gibi elektrik şebekesinden bağımsız otonom sistemlerde kullanılmaktadır. Şekil 4.7'de ülkemizde, yılda metrekareye düşen elektrik enerjisi miktarları verilmiştir [60].



Şekil 4.7: Ülkemizin yıllık güneşlenme miktarı [60]

Türkiye'de yıllık güneş ışınımından yararlanma süresi 2.640 saati bulmaktadır ve yatay eksende yıllık güneş ışınımı 1.311 kWh/m^2'dir. Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE), Güneş Enerjisi Atlası (GEPA) çalışması ile ülkemizin güneş enerjisi potansiyelini ortaya çıkarmıştır [60].

Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü proje yürütücülüğünde çeşitli kamu kuruluşlarının, üniversitelerin ve sanayi kuruluşlarının katılımı ile TÜBİTAK-Bilimsel ve Teknolojik İşbirliği Ağları ve Platformları (İŞBAP) desteği çerçevesinde "Ulusal Fotovoltaik Teknoloji Platformunun Oluşturulması" başlıklı kapsamında fotovoltaik teknolojisi ile ilgili kuruluşları bir araya getirerek, Türkiye'de Ulusal Fotovoltaik Teknoloji Platformunun oluşturulması ve bu platformun ülkemizdeki fotovoltaik alanındaki teknolojilerin gelişimi için etkin plan ve programları belirlemesi amaçlanmıştır [60].

01.09.2008 tarihinde başlayan bu projenin 3 yıllık bir süre boyunca desteklenmesine karar verilmiştir. Platformun uluslararası alanda da aktif olmasını sağlamak amacıyla, Uluslararası Enerji Ajansı-Fotovoltaik Güç Sistemleri (UEA-PVPS) başta olmak üzere ilgili kuruluşlarla yakın işbirliğinde çalışılmaktadır. Platform, Türkiye hükümeti adına Uluslararası Enerji Ajansı-Fotovoltaik Güç Sistemleri (UEA-PVPS)

temsilciliğini de yapmaktadır. Dışişleri Bakanlığı'nca bu yetki proje yürütücüsü Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü'ne verilmiştir. Türkiye'nin UEA-PVPS çalışma programları içinde yer alması, çıkarına uygun olduğu gibi, TÜBİTAK-Vizyon 2023 Enerji ve Doğal Kaynaklar Panelinin raporu ile de tamamen aynı hedefleri göstermektedir [60].

"Ulusal Fotovoltaik Teknoloji Platformu" çatısı altında çeşitli alt çalışma grupları oluşturulmuştur. Platform üyeleri, kendi faaliyet alanları ile ilgili çalışma grubunda görev almaktadır. Ayrıca, üçer aylık sürelerde, her üye kuruluşun üst düzey bir yetkilisinin katılımı ile platform toplantısı yapılmaktadır. Üçer aylık bu rutin toplantılarda, alt çalışma gruplarının faaliyetlerindeki gelişmeler ve bir sonraki toplantıya kadar yapılması istenen çalışmalar değerlendirilmektedir [60].

2009 yılında, Güneş Enerjisi Sanayicileri ve Endüstrisi Derneği (GENSED), fotovoltaik sektöründe faaliyet gösteren şirketlerin bir araya gelmesi ile kurulmuştur. Türkiye'de güneş enerjisi kullanım bilincinin oluşturulması ve fotovoltaik endüstrisinin gelişiminin sağlanması amacıyla kurulan GENSED, Enerji Bakanlığı, Türkiye Büyük Millet Meclisi (TBMM) Enerji Komisyonu, TEDAŞ, EİE ve Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) ile görüş alışverişleri yapmayı, öneriler getirmeyi ve 2023 yılı Güneş Enerjisi Yol Haritası için sanayicilerle ortak hedefler belirlemeyi amaçlamaktadır [61].

Genel olarak hedefleri;

- Türkiye'nin yüksek büyüme hızıyla orantılı, hızla artan enerji talebini güneşten karşılamak,
- Sektörün standartlarını belirleyerek, halkımıza doğru hizmetin sunulmasını sağlamak,
- Türkiye'nin en verimli yerel enerji kaynağı olan güneşin değerlendirilerek, enerjide dışa bağımlılığımızı azaltmak,
- Toplam ithalatımızın %25'ini oluşturan enerji ithalatını azaltarak Türkiye'nin dış ticaret açığının kapanmasına katkıda bulunmak,

➢ Türkiye'de güneş enerjisinden elektrik üretimi konusunda Ar-Ge çalışmalarını destekleyerek teknoloji ihraç eden sektör oluşturmaktır [61].

2008 yılı Ocak ayında kurulan 40 kW_p kurulu güce sahip Türkiye'deki en büyük bina entegre şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi uygulaması Muğla Üniversitesi Rektörlük Hizmet binasında devreye alınmıştır. Muğla Üniversitesi, yerleşkesinde bulunan 110 kW_p kurulu fotovoltaik sistem gücü ile, Türkiye'deki en büyük Fotovoltaik Park olma özelliği taşımaktadır. Merkez yerleşkede tükettiği elektrik enerjisinin %4'ünü fotovoltaik sistemlerden üretmektedir [62].

Şekil 4.8'de Muğla Üniversitesi rektörlük binasına kurulan 40 kW_p fotovoltaik güç sistemi görülmektedir.



Şekil 4.8: 40 kW_p fotovoltaik güç sistemi, Muğla Üniversitesi [55]

Binaya entegre fotovoltaik güç sistemi uygulaması olarak Muğla Üniversitesi Yerleşkesi içerisinde bulunan "Türk Evi" öğrenci kafeteryasının çatısı 2003 yılında fotovoltaik modüllerle kaplanmıştır. 25,6 kW_p kurulu güce sahip olan binaya entegre şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi ile yıllık toplam 35.000 kWh'in üzerinde elektrik enerjisi üretilerek şebekeye aktarılmaktadır. 2007 yılı sonunda, sistemin kurulumundan itibaren yaklaşık 5 yılda üretmiş olduğu toplam elektrik enerjisi 150.000 kWh değerinin üzerindedir [63]. Şekil 4.9'da 25,6 kW_p kurulu güce sahip "Türk Evi" öğrenci kafeteryası görülmektedir.



Şekil 4.9: 25,6 kW_p fotovoltaik güç sistemi, Muğla Üniversitesi, Türk Evi öğrenci kafeteryası [62]

Şekil 4.10'da Ekosolar Ltd. Şti. tarafından kurulan maksimum güç noktası izleyicili fotovoltaik güç sistemi görülmektedir.



Şekil 4.10: Maksimum güç noktası izleyicili fotovoltaik güç sistemi [55]

Şekil 4.11'de Anel Teknoloji tarafından telekomünikasyon sistemi için kurulan fotovoltaik güç sistemi görülmektedir.



Şekil 4.11: Telekomünikasyon sistemi için kurulmuş fotovoltaik güç sistemi [55]

Şekil 4.12'de Ege Üniversitesi'nde otopark üzerine kurulan 13,85 kW_p gücünde şebeke bağlantısız fotovoltaik güç sistem uygulaması görülmektedir.



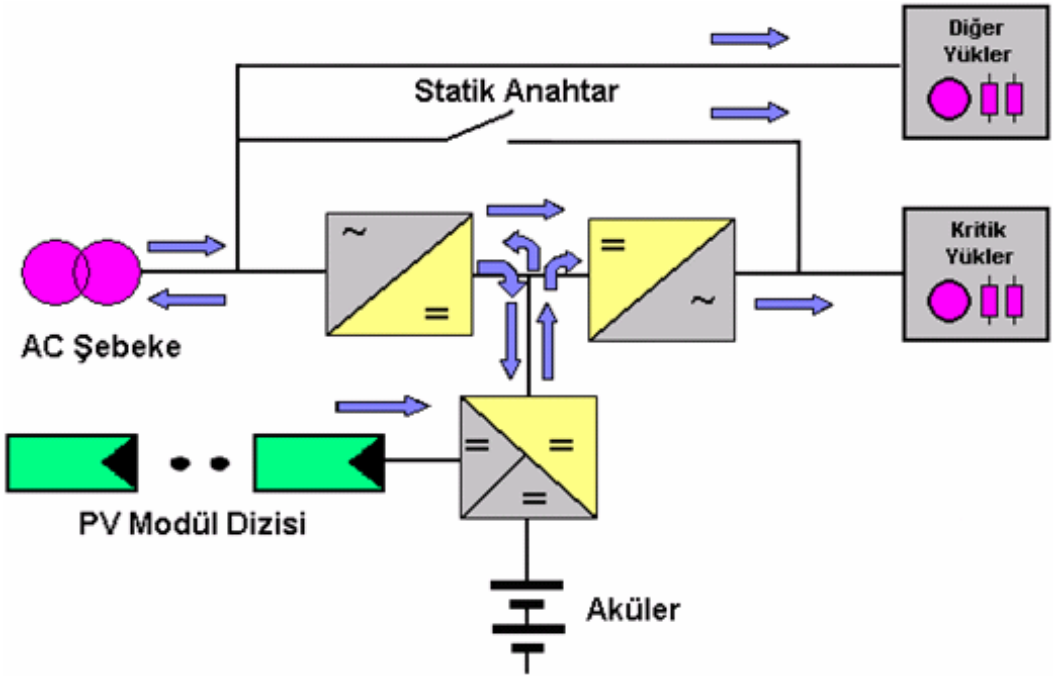
Şekil 4.12: Ege Üniversitesi 13,85 kW_p gücünde fotovoltaik güç sistem uygulaması [64]

Özel sektörün fotovoltaik güç dönüştürücüleri konusundaki önemli çalışmalarından biri Mavisis Teknoloji tarafından geliştirilmiştir. Geliştirilen akıllı güç dönüştürücü sistemi OKDA'nın Ar-Ge projesi, 2007-2008 yıllarında gerçekleştirilmiştir. 6 kVA gücündeki OKDA sistemi, Türkiye ve çevre ülkelerin özel koşulları düşünülerek tasarlanmıştır [65].

Tübitak-TEYDEB tarafından desteklenen bu proje, TESİD 2008 yenilikçilik yaratıcılık ödülü ve TÜBİTAK 8. Teknoloji ödülünün sahibi olmuştur. Bu dönüştürücü sisteminin özellikleri aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Konut sahibinin güç kalitesi sorunlarını azaltmak,
- Şebekenin gerilim kalitesini düzeltmek, elektrik kesintilerinde UPS gibi cihazları kullanma sorununu ortadan kaldırmak,
- Konut içerisinde kullanılan enerjinin bir kısmını yada tamamını güneşten elde etmek,
- Fotovoltaik gücün fazlasını şebekeye aktarmak,
- Fotovoltaik gücün yetersiz kaldığı durumlarda eksik gücü şebekeden tamamlamaktır [65].

OKDA'nın çıkış gerilimi gerçek sinüstür. IEC 62040-3 standardı bu tarz sinüs olmayan gerilimler ile beslenen cihazların üreticilerinden onay alınmasını tavsiye etmektedir. Şekil 4.13'te OKDA'nın güç akış şeması görülmektedir [65].



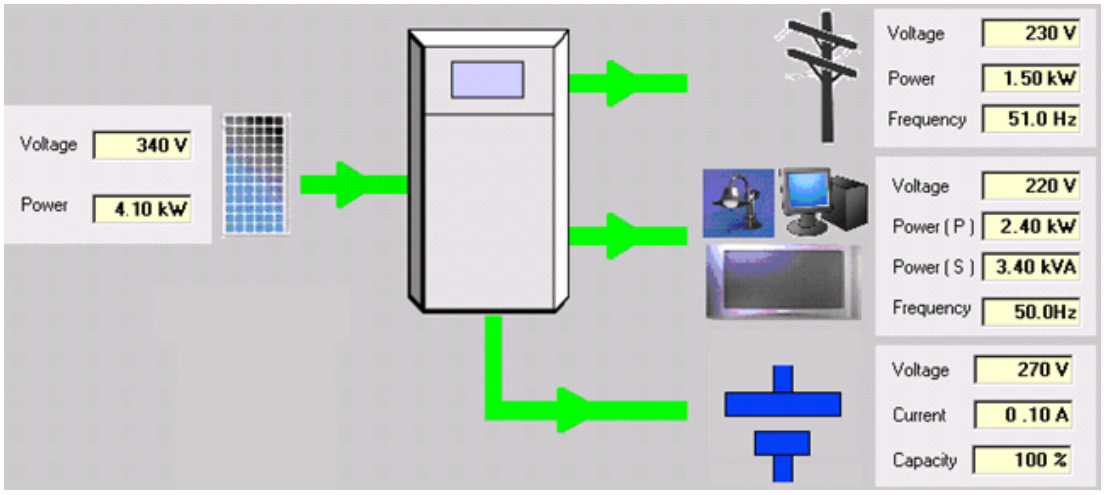
Şekil 4.13: OKDA güç dönüştürücüsünün güç akış diyagramı [65]

Şekil 4.14'te OKDA güç dönüştürücüsünün iç yapısı görülmektedir.



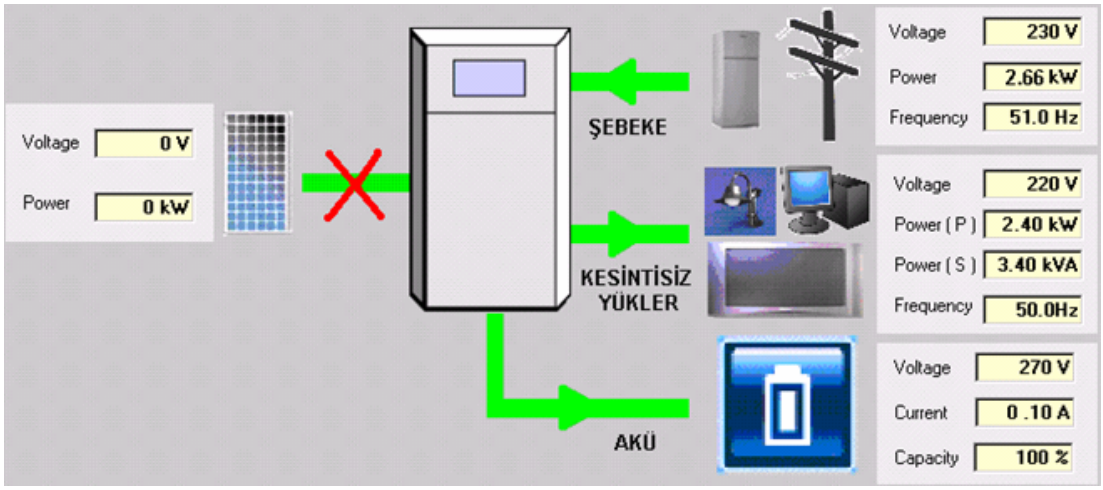
Şekil 4.14: OKDA güç dönüştürücüsünün iç yapısı [66]

OKDA'nın şebekeye enerji verdiği, bağlı olduğu yükleri beslediği ve aküleri şarj ettiği sistem şeması Şekil 4.15'te görülmektedir.



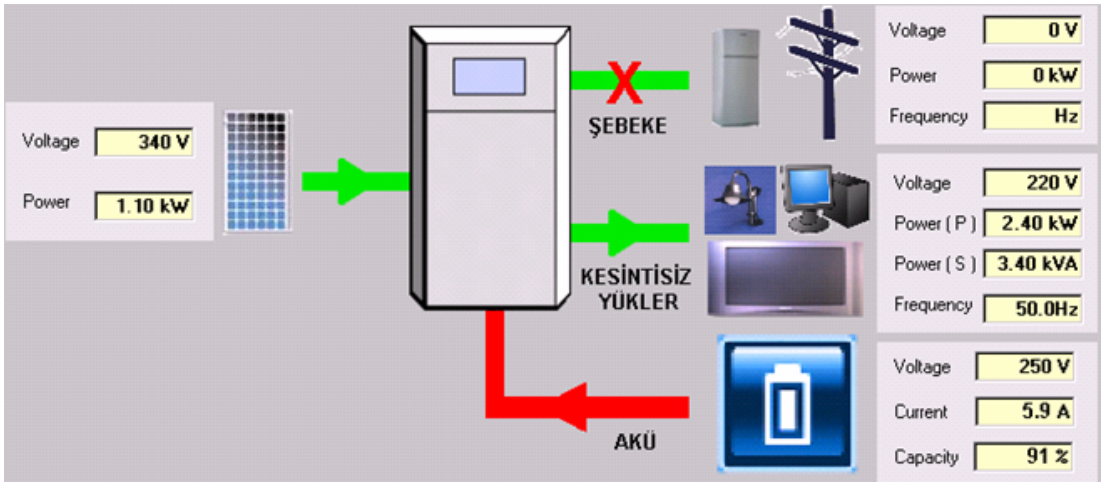
Şekil 4.15: Fotovoltaik sistemden alınan gücün OKDA ile şebekeyi, yükü ve aküleri beslemesi [65]

Fotovoltaik sistemin akım üretmediği zamanlarda, şebekeden alınan enerji ile yüklerin ve akülerin beslendiği sistem şeması Şekil 4.16'da görülmektedir.



Şekil 4.16: Şebeke ile OKDA'nın yükleri ve aküleri beslemesi [65]

Şebeke enerjisi olmadığında ise, yüklerin fotovoltaik modül ve aküler ile beslendiği OKDA sistemi Şekil 4.17'de görülmektedir.



Şekil 4.17: Şebeke enerjisi olmadığında fotovoltaik modüller ve aküler ile OKDA'nın yükleri beslemesi [65]

5. ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMİ TASARIMI VE UYGULAMASI

Kocaeli Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'nin sağladığı destek ile 360 W_p şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi uygulaması yapılmıştır. Bu proje uygulaması, Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi bahçesinde gerçekleştirilmiştir. Tüm sistem kurulumu için maliyet 3500 $ tutarındadır. Tablo 5.1'de proje kapsamında kullanılan malzemeler ve özellikleri görülmektedir.

Tablo 5.1: 360 W_p şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi projesinde kullanılan malzemeler ve özellikleri

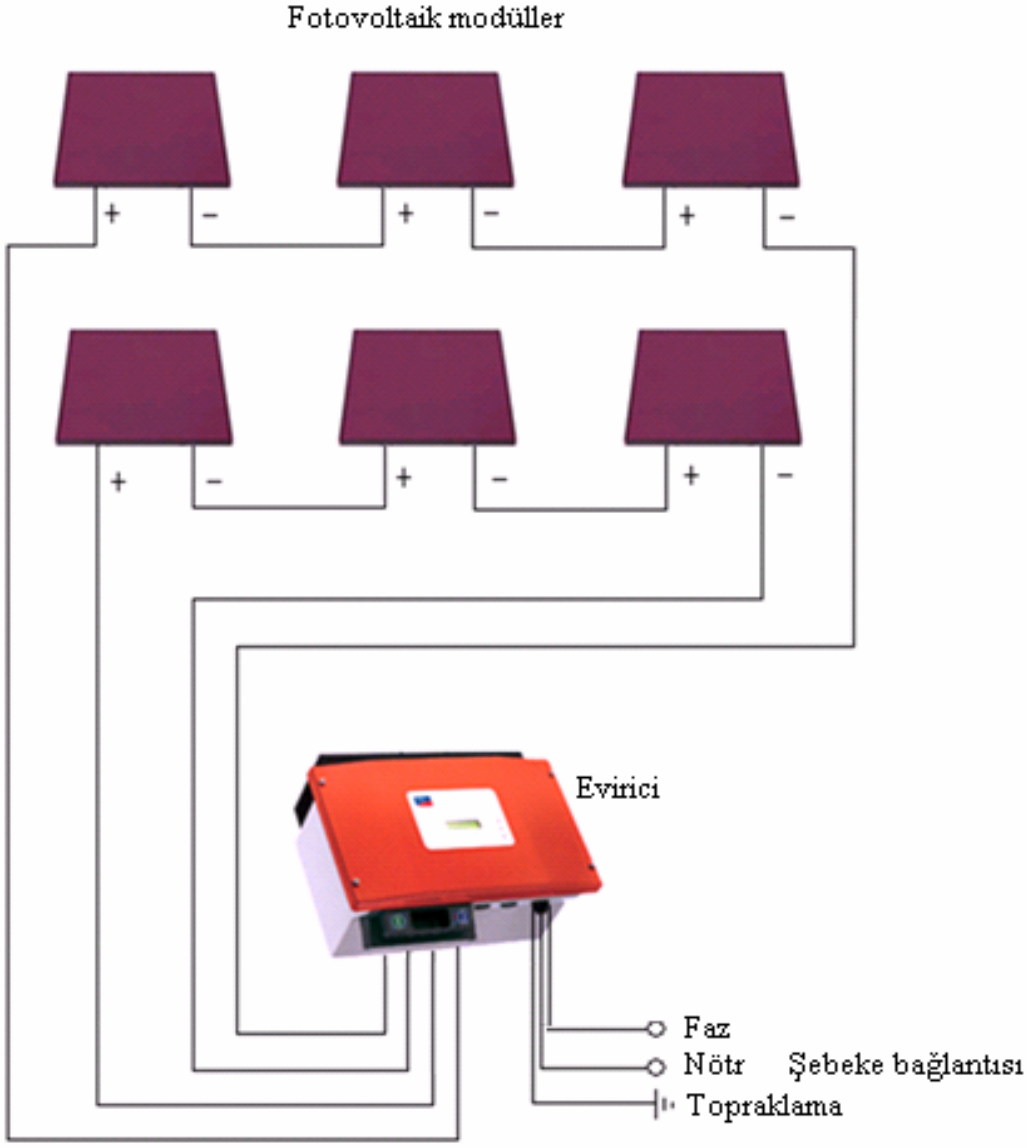
Kullanılan Malzeme	Miktar	Kullanım Gerekçesi
MPPT'li evirici, 1200 W, 220 V AC, Alüminyum soğutuculu, sıcaklık sensörlü, harici kullanım	1 adet	Fotovoltaik modüllerle üretilen doğru akımın alternatif akıma çevrilmesi ve maksimum güç noktası takibi
Amorf-silisyum ince film fotovoltaik modül, alüminyum çerçeveli, 60 W_p	6 adet	Doğru akım kaynağı
Solar DC kablo, 1x4 mm^2	100 metre	Kablolama
Montaj için galvaniz çerçeve	1 takım	Fotovoltaik modüllerin montajı

Bu çalışmada, yukarıdaki tabloda da görüldüğü gibi 6 adet 60 W_p ince film fotovoltaik modüller kullanılmıştır. Fotovoltaik modüller üçer adet olarak birbirine seri bağlanmıştır. Bu iki adet üçlü grup ise paralel bağlanmıştır. Fotovoltaik modüllerin nominal gerilimleri 67 V'tur. 201 V olan sistem gerilimi 139-400 V DC giriş aralığında çalışan evirici için bir sorun oluşturmamaktadır.

Yenilenebilir enerji bilincinin oluşması ve fotovoltaik güç sistemlerinin tanıtımı açısından bu projenin önemli bir açığı kapatacağına inanılmaktadır.

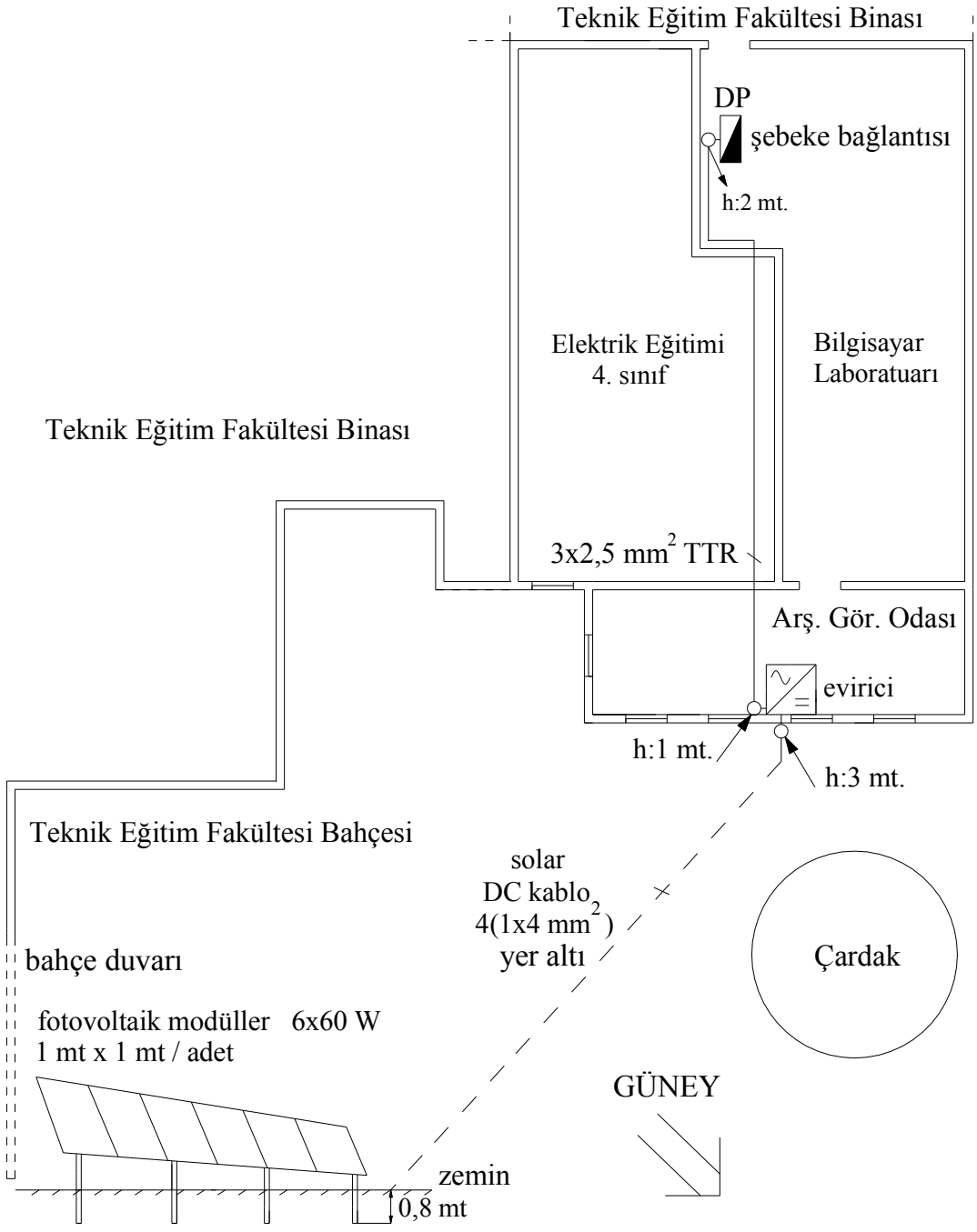
Kurulan sistem enerjisi yeraltından taşınarak Teknik Eğitim Fakültesi binasına alınmıştır. Bilgisayar Laboratuarında bulunan dağıtım panosu barasına şebeke bağlantısı yapılmıştır. Evirici üzerinde bulunan ekrandan, fotovoltaik sistemden şebekeye aktarılan güç, sistem gerilimi, üretilen toplam enerji miktarı, gün içinde üretilen enerji miktarı ve sistemin toplam çalışma süresi görülmektedir. Ayrıca bu değerler, uzaktan izleme ünitesi ve internet bağlantısı ile de takip edilebilmektedir.

Şekil 5.1'de 360 W_p şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemine ait bağlantı şeması görülmektedir.



Şekil 5.1: 360 W_p şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi bağlantı şeması

Şekil 5.2'de sistemin mimari ve elektriksel projesi görülmektedir.



Şekil 5.2: 360 W_p şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi projesi

Şekil 5.2'de mimari ve elektriksel projesi görülen 360 W_p şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi, Kocaeli Üniversitesi için bir ilk olmuştur. Bu sistemin, ürettiği elektrik enerjisi Teknik Eğitim Fakültesi, Bilgisayar Laboratuarına aktarılmaktadır.

Şekil 5.3'te sistemin taşıyıcı kısmını oluşturan galvaniz çerçevelere ait fotoğraf görülmektedir.



Şekil 5.3: 360 W_p şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi galvaniz çerçevesi

Şekil 5.4'te kurulmuş sisteme ait bir fotoğraf görülmektedir.



Şekil 5.4: 360 W_p şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi

Sistem kurulumu 10 Mart 2010 Çarşamba günü tamamlanmıştır. Fotovoltaik modüllerin ilk 2-3 yıl içinde ürettiği güç, normal gücünün %10 fazlası olabilmektedir. Bu ihtimal dahilinde, kurulan sistemden 12 Mart 2010 Cuma günü maksimum 402 W gücün şebekeye aktarıldığı gözlemlenmiştir. 19 Mart 2010 Cuma günü 2,6 kWh enerji üretilerek maksimum enerji üretimi yapılmıştır. Bu değer, yaklaşık 7 saat boyunca sistemin maksimum enerji üretiminde bulunduğunu

göstermektedir. Sistem kurulumundan 15 gün sonra, 25 Mart 2010 Perşembe günü ise, toplam üretilen enerji 25 kWh olmuştur. 26 Mayıs 2010 Çarşamba günü toplam çalışma süresinin 934 saat, üretilen toplam enerjinin ise 119 kWh olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.5'te fotovoltaik güç sistemi tarafından üretilen doğru akımı, alternatif akıma dönüştüren solar evirici görülmektedir.



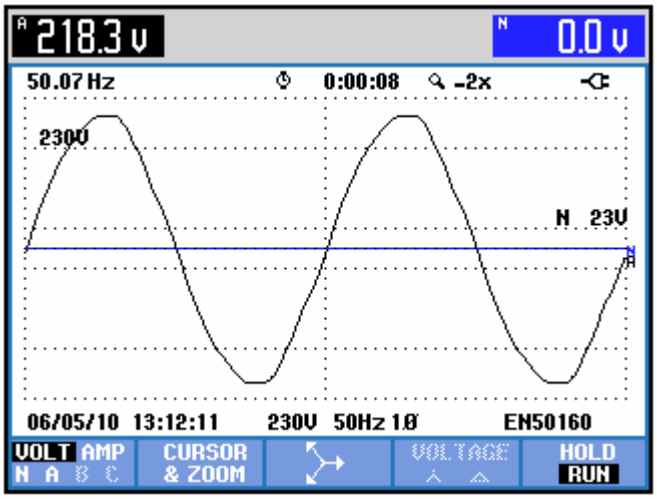
Şekil 5.5: 1200 W MPPT'li solar evirici

Evirici üzerinden okunan değerleri gösteren uzaktan izleme ünitesi, Sunny Beam Şekil 5.6'da görülmektedir. Sunny Beam, bluetooth aracılığı ile 12 adet eviriciye kadar haberleşme sağlayarak bütün sistemlerin bilgilerine ulaşmaktadır. Aynı zamanda USB port ile bilgisayar üzerinden haberleşme sağlamaktadır. Ayrıca 100 güne kadar verileri saklama kapasitesine sahiptir. Hata durumunda sesli uyarı vermektedir [67].



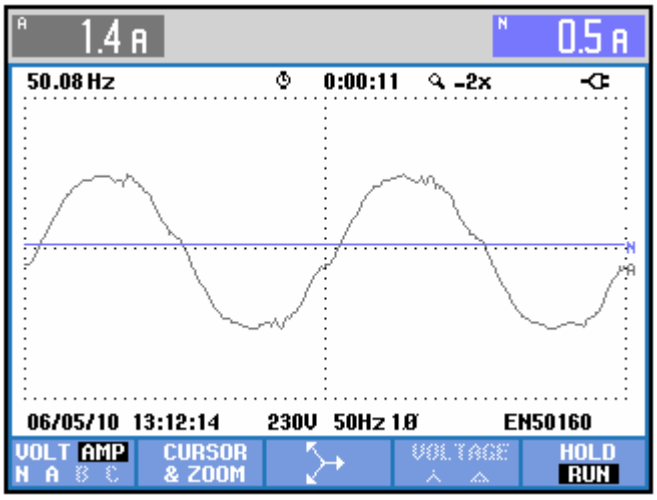
Şekil 5.6: Sistem değerlerini uzaktan izleme ünitesi, Sunny Beam [68]

6 Mayıs 2010 Perşembe günü Fluke 434 güç analizörü ile, kurulan fotovoltaik güç sisteminin alternatif akım tarafında, akım, gerilim ve harmonik incelemesi yapılmıştır. Şekil 5.7'de saat 13:12:11 itibarı ile sistemden alınan gerilimin 218,3 V olduğu ve gerilimin sinüsoidal eğrisi görülmektedir.



Şekil 5.7: 360 W_p fotovoltaik güç sisteminin şebeke tarafından alınan gerilim eğrisi

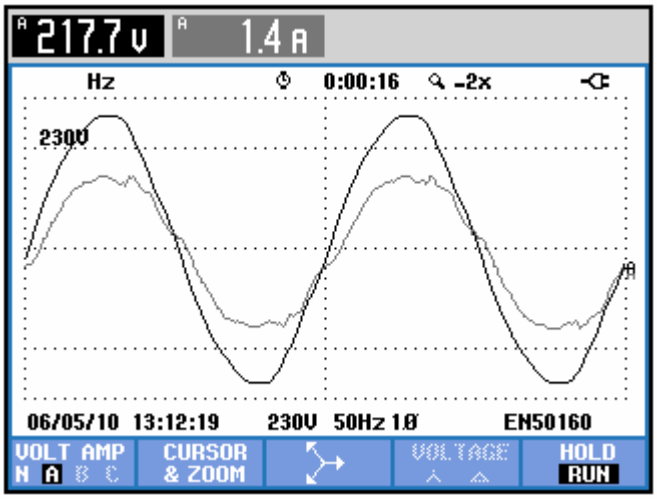
Şekil 5.8'de, saat 13:12:14 itibarı ile ölçülen akım değerinin 1,4 A olduğu ve akımın sinüsoidal eğrisi görülmektedir.



Şekil 5.8: 360 W_p fotovoltaik güç sisteminin şebeke tarafından alınan akım eğrisi

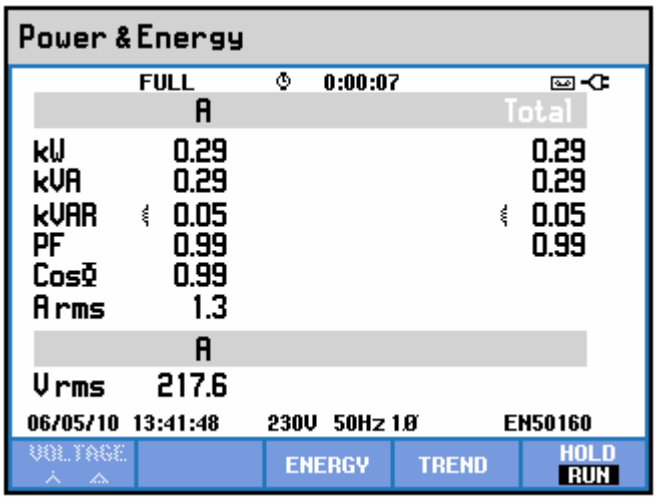
Şekil 5.9'da ise, saat 13:12:19 itibarı ile alınan ölçümde akım ve gerilim eğrileri aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere sistem gerilimi 217,7

V'tur. Aynı dakika içinde alınan iki farklı ölçüm olmasına rağmen, sistem geriliminin bir önceki ölçüme göre az miktar düşmesi, fotovoltaik hücrelerin ürettiği gerilimin, üzerine gelen ışık şiddetinin değerine bağlı olarak anlık değişim göstermesinden kaynaklanmaktadır.



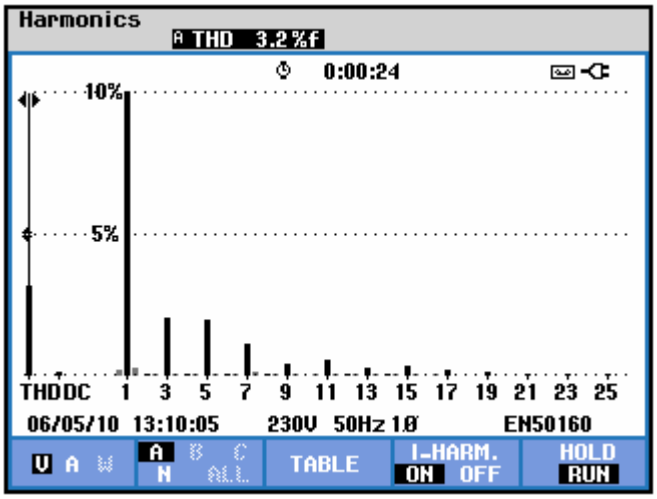
Şekil 5.9: 360 W_p fotovoltaik güç sisteminin şebeke tarafından alınan akım ve gerilim eğrisi

Şekil 5.10'da saat 13:41:48 itibarı ile sistemden alınan bazı değerlere göre, sistem geriliminin 217,6 V, akımının 1,3 A, gücünün 0,29 kW ve güç faktörünün 0,99 olduğu görülmektedir.



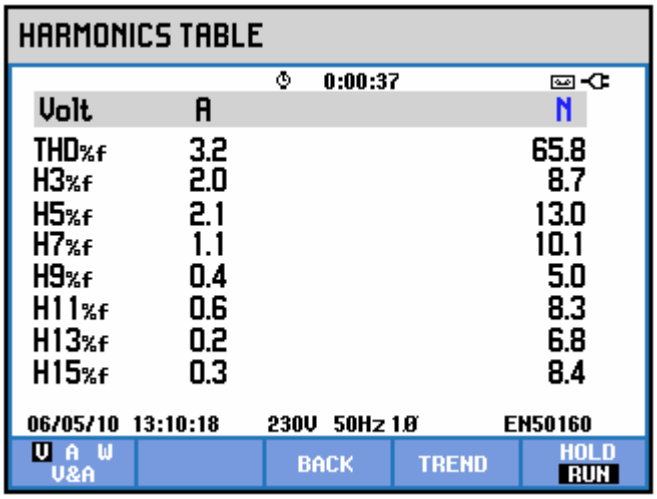
Şekil 5.10: 360 W_p fotovoltaik güç sisteminden alınan bazı değerler

Şekil 5.11'de saat 13:10:05 itibarı ile, sistemin toplam harmonik distorsiyonu ve harmonik değerleri grafiksel olarak görülmektedir.



Şekil 5.11: 360 W_p fotovoltaik güç sisteminden alınan anlık toplam harmonik distorsiyon ve harmoniklerin grafiksel gösterimi

Saat 13:10:18 itibarı ile, sistemin toplam harmonik distorsiyonu ve harmonik değerleri sayısal olarak Şekil 5.12'de görülmektedir.



Şekil 5.12: 360 W_p fotovoltaik güç sisteminden alınan anlık toplam harmonik distorsiyon ve harmoniklerin sayısal değerleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde enerji, dünya siyasetinde en önemli konu olarak gösterilebilir. Enerjinin bu kadar önemli olduğu bir zamanda, yenilenebilir enerji kaynaklarının avantajları her ülkenin ilgisini çekmektedir. Özellikle diğer ülkelere olan bağlılığın azaltılması ve çoğu ülkenin yenilenebilir enerji kaynaklarından yaralanabilme kapasitesine sahip olması, bu kaynaklara olan ilgiyi daha da artırmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlisi güneş enerjisidir. Ülkemiz güneş enerjisi potansiyeli açısından çok önemli bir yere sahiptir. Dolayısıyla, sahip olduğumuz avantajlar iyi değerlendirilmeli, fotovoltaik güç sistemlerinin kullanımına yönelik çalışmalara daha fazla ağırlık verilmeli, sistemlerin kurulumu için uygun kredilendirme fırsatları, sistem ekipmanlarından KDV indirimleri, üretilen enerjinin devletçe uygun bir fiyata satın alınması sağlanmalıdır. Fotovoltaik sektörü başta olmak üzere yenilenebilir enerji sektörüne sağlanacak katkılar, enerji konusunda diğer ülkelere olan bağımlılığımızı da azaltacaktır.

Dünya üzerinde, fotovoltaik güç sistemleri ile elektrik üretimindeki artışla beraber, ülkemizde de bu bilinç oluşmuş ve birçok uygulama yapılmıştır. Ülkemizdeki uygulamaların dünya ortalamasının çok altında kalmasına rağmen, önümüzdeki yıllarda büyük artışların gerçekleşmesi beklenmektedir. Fotovoltaik sektörü, geleceğin önemli ve karlı bir sektörü olmakla birlikte, birçok riski de yanında taşımaktadır. Bu sebeple, fotovoltaik sektörüne yatırım yapmayı düşünen yatırımcıların, projelendirme süreçlerini sağlıklı bir şekilde yürütmeleri gerekmektedir. Aksi halde, büyük zararlar ortaya çıkabilir.

Yenilenebilir enerji sektörüne yapılacak yatırımların, ülkemizde yaşanan işsizlik sorunu için de önemli bir çözüm sunacağı açıktır. Bu sektörde önemli gelişmeler kaydeden ülkeler, onbinlerce kişinin istihdam edilmesini sağlamıştır. Dolayısıyla,

ülkemiz için yeni iş sahalarının açılması bakımından da, sektörün geliştirilmesi ve sektöre sağlanacak destekler önemlidir.

Bu tez çalışması kapsamında güneş enerjisiyle elektrik üretimi konusu incelenmiş, geçmişten günümüze kadar yapılan uygulamalar tanıtılmış, gelecek yıllar için öngörülen düşünceler ve hedefler açıklanmıştır. Ayrıca, Kocaeli Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenen 360 W_p şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi proje uygulaması gerçekleştirilmiştir. Kurulan şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemi sayesinde, Teknik Eğitim Fakültesi elektrik enerjisi ihtiyacının küçük bir kısmı güneş enerjisi ile karşılanmaktadır. 29-30 Nisan 2010 tarihlerinde Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde düzenlenen SolarTR-1 konferansında poster sunumu yapılan sistem, yatırımcılar tarafından dikkatle takip edilmiş, fotovoltaik sektörü için önemli basamaklardan birini oluşturmuştur.

KAYNAKLAR

[1] International Energy Agency, "Renewables in Global Energy Supply", ***IEA,*** 3,7, (2007).

[2] Falk, A., Meinhardt, M., Wachenfeld, V., "Efficiency and grid compatibility of photovoltaic inverters - state-of-the-art and future trends", ***PCIM Europe 2009 Conference,*** SMA Solar Technology AG, Almanya, 14-20, (2009).

[3] European Photovoltaic Industry Association, "Annual Report", ***EPIA,*** 11, (2010).

[4] Karamanav, M., "Güneş enerjisi ve güneş pilleri", Yüksek Lisans Tezi, ***Sakarya Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü,*** Sakarya, 6,7,28, (2007).

[5] http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/gunes/pvilke.html **(Ziyaret tarihi: 13 Eylül 2009)**.

[6] Kıyak, İ., Koçyiğit, G., "Şebekeye bağlı güneş pili sistemleri", ***3e Electrotech,*** Sayı: 177, 214-222, (2009).

[7] Temiz Dünya Ekoloji Derneği, Temiz Dünya Rehberi - Güneş Enerjisi, Hatice Şen, ***İstanbul,*** 34,39-44,47,48.

[8] Goetzberger, A., Hoffmann, V. U., "Photovoltaic Solar Energy Generation", Rhodes, W. T., Asakura, T., Brenner, K. H., Hansch, T.W., Kamiya, T., Krausz, F., Monemar, B., Venghaus, H., Weber, H., Weinfurter, H., ***Almanya,*** 23,43,70,95-97,101, (2005).

[9] http://www.advancedsolarphotonics.com/images/ASP%20Solar%20Panel.jpg **(Ziyaret tarihi: 11 Nisan 2010).**

[10] http://www.tme.eu/katalog_pics/9/1/d/91d9c2b0778caae5cefb349285cf73a2/pv-50w-p-b.jpg **(Ziyaret tarihi: 08 Nisan 2009).**

[11] Nehoş, O., "Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesi ve kullanım alanları", Bitirme Projesi, ***Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü,*** İzmir, 14,15, (2007).

[12] Messenger, R. A., Ventre, J., "Photovoltaic Systems Engineering, Second Edition", ***Taylor & Francis e-Library,*** 57,76,394,395, (2005).

[13] Ünal, O., "Güneş pilleri", Yüksek Lisans Tezi, ***Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** Konya, 51,53, (2006).

[14] Oktik, Ş., "Güneş-elektrik dönüşümleri, Fotovoltaik güneş gözeleri ve güç sistemleri", ***Ankara Temiz Enerji Vakfı Yayınları,*** 15,17, Ankara, (2001).

[15] Demircioğlu, O., "Işınım ve güneş gözeleri", ODTÜ Mikro ve Nano Teknoloji Bölümü 2 Mart (2010).

[16] **Masters, G. M., "**Renewable and Efficient Electric Power Systems", ***Stanford University Kanada,*** 474, (2004).

[17] Xiao, W., Dunford, W. G., Palmer, P. R., Capel, A., "Regulation of Photovoltaic Voltage", ***IEEE Transactions on Industrial Electronics,*** Cilt.54, No.3, 1365-1374, (2007).

[18] Imhoff, J., Rodrigues, G. F., Bülow, A. R., Gules, R., Pinheiro, J. R., Hey, H. L., "A stand alone photovoltaic system based on dc-dc convertors in a multistring configuration", ***Power electronics and control research group, Unıversidade Federal de Santa Maria.***

[19] Küpeli, A. Ö., "Güneş pilleri ve verimleri", Yüksek Lisans Tezi, ***Osmangazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü,*** Eskişehir, 99-110, (2005).

[20] http://www.dogal-enerji.net/energy/gunes-pili-2/gunes-pili-nedir **(Ziyaret tarihi: 08 Mayıs 2010).**

[21] European Photovoltaic Industry Assocation, "Global Market Outlook for Photovoltaics until 2013, ***EPIA,*** 4,5, (2009).

[22] European Photovoltaic Industry Assocation, "Global Market Outlook for Photovoltaics until 2014, ***EPIA,*** 3, (2010).

[23] http://www.zamazing.org/yazi/gunes-pilli-el-feneri **(Ziyaret tarihi: 3 Mart 2010).**

[24] Swanson, Richard, M., "Power Electronic Opportunites in Photovoltaic Solar Power", ***SunPower Corporation,*** APEC 2006, 19-23 Mart (2006).

[25] Özdemir, E. Özdemir, Ş., "Güneş Pilleri ile Dağıtılmış Elektrik Üretim Sistemlerindeki Gelişmeler", ***VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008,*** İstanbul, 395-404, 17-19 Aralık (2008).

[26] Deligöz, M., Fakıoğlu E., "Güneş enerjisi ne zaman ucuzlayacak", ***Enerji ve Ekoloji Paneli,*** Diyarbakır Büyükşehir Belediyesi, Diyarbakır, 27 Kasım (2007).

[27] Demirtaş, M., "Güneş ve rüzgar enerjisi kullanılarak şebeke ile paralel çalışabilen hibrit enerji santrali tasarımı ve uygulaması", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü,*** Ankara, 76,91, (2008).

[28] http://lemsolar.com/docs/solarteorib%C3%B6l%C3%BCm6.pdf **(Ziyaret tarihi: 25 Aralık 2009).**

[29] Çetin, E., Karakılınç, Ö, Ö., "Fotovoltaik panelle beslenen GSM 1800 baz istasyonu sistemi", ***IV. Bilgi Teknolojileri Kongresi,*** 9-11 Şubat (2006).

[30] Kulaksız, A. A., "Maksimum güç noktası izleyicili ve UVM inverterli fotovoltaik sistemin yapay sinir ağları tabanlı kontrolü", Doktora Tezi, ***Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** Konya, 30, (2007).

[31] http://www.suunny.com/products/charge-controller/PV_charging_controller-mppt.html **(Ziyaret tarihi: 11 Nisan 2010).**

[32] http://www.sma.de/en/products/solar-inverters/sunny-boy/sunny-boy-1200-1700-2500-3000.html **(Ziyaret tarihi: 09 Mayıs 2010).**

[33] Şimşek, B., "Dağıtım Gerilimi Seviyesinden Bağlı Santrallerin Ülkemizdeki Genel Durumu", ***PV Platformu Alt Çalışma Grubu Toplantısı,*** Muğla, 10 Temmuz (2009).

[34] Calais, M., Myrzik, J., Spooner, T., Agelidis, V. G., "Inverters for Single-Phase Grid Connected Photovoltaic Systems—An Overview" ***Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC'02,*** IEEE, Cilt 2, Queensland, Australia, 1995–2000, 23 - 27 Haziran (2002).

[35] Sefa, İ., Altın, N., "Güneş pili ile beslenen şebeke etkileşimli eviriciler – genel bir bakış", ***Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi,*** Cilt 24, No 3, 409-424, (2009).

[36] Kroposki, B., "Power Electronics for Renewable Energy Systems", National Renewable Energy Laboratory, ***APEC,*** (2005).

[37] Özdemir, Ş. Özdemir, E., "Güneş Pilleri İle Elektrik Üretiminde Kullanılan Evirici Tipleri ve Çok Seviyeli Evirici Kullanımı", ***Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu (YEKSEM 2007),*** Gaziantep, 113-117, 31 Ekim–2 Kasım (2007).

[38] Sefa, İ., Altın, N., Özdemir, Ş., "Yenilenebilir enerji kaynakları için üç fazlı şebeke etkileşimli evirici", ***5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09),*** Karabük, 13-15 Mayıs (2009).

[39] Bölat, V., 2009, "Güneş Pillerinin Elektriksel Davranışı ve Fotovoltaik Sistemler" Lighting Magazine, http://lightingmagazine.com.tr, **(Ziyaret tarihi: 19 Kasım 2009).**

[40] http://en.wikipedia.org/wiki/Net_metering **(Ziyaret tarihi: 11 Kasım 2009).**

[41] http://www.normenerji.com.tr/res_yarisma/haber_detay.asp?id=196 **(Ziyaret tarihi: 11 Kasım 2009).**

[42] http://usfarmersbioenergy.com/netmet1.jpg **(Ziyaret tarihi: 11 Kasım 2009).**

[43] State Environmental Resource Center Madison, Wisconsin http://www.serconline.org/netmetering/index.html **(Ziyaret tarihi: 11 Kasım 2009).**

[44]http://dsireusa.org/incentives/incentive.cfm?Incentive_Code=NM01R&re=1&ee=1 **(Ziyaret tarihi: 11 Kasım 2009).**

[45] http://www.lectogic.co.uk/solar.html **(Ziyaret tarihi: 02 Ocak 2010).**

[46]http://www.greenpeace.org/turkey/guneskusagi/gunesenerjisi/solarelektrik/uygulama-boyutlandırma **(Ziyaret tarihi: 02 Ocak 2010).**

[47] Yeşiltaş, S., Hizmark Group, Güneş Enerjisi 2009, ***Güneş Enerjisi Teknolojileri Fuarı,*** 26 Şubat (2009).

[48] Nuroğlu, F. M., Basa Arsoy, A., "Dağıtılmış Üretim Kaynağı İçeren Dağıtım Sistemlerinde Sürekli Durum ve Kısa Devre Analizi", ***3e Electrotech,*** 104-110, (2009).

[49] Akdeniz, E., "Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretiminin şebekenin enerji kalitesi ve kararlılığına etkilerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** İstanbul, 43-57, (2006).

[50] Akdeniz, E., Kaypmaz, A., Yağmur, E. A., "Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretiminin şebekenin enerji kalitesi üzerine etkilerinin incelenmesi", ***Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı, Eleco'2006,*** Bursa, 6-10 Aralık (2006).

[51] Technical Information, Grid Connection, Influence of the grid conditions in terms of connected power of PV inverters, SMA Solar Technology AG.

[52] International Energy Agency, "Overcoming PV grid issues in the urban areas", ***IEA, Report IEA-PVPS T10-06-2009,*** 8-31, (2009).

[53] Çetinkaya, H. B., Akıllı Şebeke Teknolojisi (Smart Grid), http://www.guneshaber.net/haber/254-uzman-gozuyle-akilli-sebeke-teknolojisi.html **(Ziyaret tarihi: 14 Mayıs 2010).**

[54] International Energy Agency, "Performance Prediction of Grid-Connected Photovoltaic Systems Using Remote Sensing", ***IEA, Report IEA-PVPS T2-07:2008,*** 15, (2008).

[55] International Energy Agency, "Photovoltaic Power Systems Programme, Annual Report 2008", ***IEA,*** 77,84,94,95,103,105, (2008).

[56] European Photovoltaic Industry Association, "Global Market Outlook for Photovoltaics until 2012, Facing a sunny future, ***EPIA,*** 4,7.

[57] http://www.akademimuhendislik.net/dunyada-gunes-enerjisi-tesvikleri.html **(Ziyaret tarihi: 16 Mayıs 2010).**

[58] "Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi", 21 Mayıs (2009).

[59] Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, Kanun No. 5346, Kabul Tarihi: 10.5.2005, Başbakanlık Mevzuatı Geliştirme ve Yayın Genel Müdürlüğü.

[60] http://www.trpvplatform.org/index.html **(Ziyaret tarihi: 06 Ocak 2010).**

[61] http://www.gensed.org/index.html **(Ziyaret tarihi: 27 Ocak 2010).**

[62] Eke, R., "Muğla Üniversitesindeki fotovoltaik güç sistemleri kurulumlar ve değerlendirmeler", ***3. Güneş Enerjisi Teknolojileri Fuarı,*** İstanbul, 12 Mart (2010).

[63] http://www.trpvplatform.org/mu_sistem_haber.html **(Ziyaret tarihi: 08 Mayıs 2010).**

[64] http://www.trpvplatform.org/eu_pv_sistemler.html **(Ziyaret tarihi: 08 Mayıs 2010).**

[65] Özdemir, E., Kavaslar, F., "Fotovoltaik Elektrik Üretim Sistemlerindeki Gelişmeler", ***Tesisat Enerji Teknolojileri ve Mekanik Tesisat Dergisi,*** Sayı:162, 92-106,(2009).

[66] Özdemir, E., Kavaslar, F., "A New Multifunctional Power Converter for Grid Connected Residential Photovoltaic Applications" ***ECCE 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition,*** San Jose, California USA, 20-24 Eylül 2009, 2650-2656, (2009).

[67] Product Guide 2009/2010, SMA, 106.http://www.sma-america.com/fileadmin/fm-dam/documents/en_us/SOLARKAT_KUS095017.pdf **(Ziyaret tarihi: 08 Mayıs 2010).**

[68] http://www.sma.de/en/products/monitoring-systems/sunny-beam.html **(Ziyaret tarihi: 08 Mayıs 2010).**

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında İzmit'te doğdu. İlköğretim ve lise eğitimini Kocaeli'de tamamladı. 2004 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi Bölümü (II.Öğretim)'nden 2008 yılında Elektrik Öğretmeni olarak mezun oldu. 2006 yılından itibaren GÜL ELEKTRİK MÜHENDİSLİK'te çalışmaktadır.