



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN ŞEBEKE GÜÇ
SİSTEMLERİNE ENTEGRASYONU VE
KARŞILAŞILAN PROBLEMLER
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet ALİCİ

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Musa YILMAZ

Eylül-2022
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ahmet ALİCİ tarafından hazırlanan “Fotovoltaik Sistemlerin Şebeke Güç Sistemlerine Entegrasyonu ve Karşılaşılan Problemler” adlı tez çalışması 27/09/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin Asker

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Musa Yılmaz

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Rıda Tür

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Osman PAKMA
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ahmet ALİCİ

Tarih:27.09.2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN ŞEBEKE GÜÇ SİSTEMLERİNE ENTEGRASYONU VE KARŞILAŞILAN PROBLEMLER

Ahmet ALİCİ

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Musa YILMAZ

2022, 77 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Musa YILMAZ

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Rıdâ TÜR

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin ASKER

Dünya genelinde bir çok ülkede artan enerji ihtiyacını karşılayabilmek için kaynakları sınırlı olan geleneksel santrallere dayalı elektrik üretimine alternatif olarak, çevre dostu, temiz ve sürdürülebilir nitelikteki yenilenebilir enerjilere yönelim gün geçtikçe artmaktadır. Fosil kaynakların yetersizliği, maliyet ve ücret değişiklikleri ve çevresel olmayışları nedeniyle zararlı etkileri, ülkeleri birincil enerji kaynaklarına alternatifler bulmaya yönlendirmektedir. Çevre dostu bir kaynak olan güneş enerjisi, geleneksel enerji kaynaklarına çok büyük potansiyelli bir alternatiftir. Bu doğrultuda elektrik üretimi için güneş enerjisi potansiyelinin kullanılması uygulamaları artarak devam etmektedir. Bu Tez’de, güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi aşamaları, güneş-fotovoltaik enerji sistemleri, fotovoltaik tabanlı dağıtılmış üretim (PVDG) ve bu üretimin geleneksel dağıtım şebekelere entegrasyonunda karşılaşılan bazı temel problemler incelenerek literatür taraması gerçekleştirilmiştir. PVDG üniteleri tarafından üretilen harmonik distorsiyon hakkında bilgi ve sebep olduğu etkiler paylaşılmıştır. Dağıtımda PVDG'nin izin verilen maksimum penetrasyon seviyesi de dikkate alınır çünkü PV penetrasyonu arttıkça şebekedeki problem ve hataların arttığı gözlenmiştir. PVDG'yi güç sistemlerine entegre etmenin farklı zorlukları mevcuttur bunlardan biri de entegre sistem güvenilirliğidir. Güvenilirliği sağlamak için dengeli ve kontrollü bir şebeke bağlantısı sağlanmalı, istenildiğinde PVDG ‘nin şebekeye bağlantısı veya şebekeden ayrılması sağlanabilmelidir. Yenilenebilir enerji kaynaklı PVDG tarafından üretilen güç miktarı tam tutarlı olmayabilir bu nedenle PVDG'nin şebekeye yüksek oranda nüfuz etmesi güç sistemi ağıının güvenilirliğini azaltabilir. Tez’de genel hatlarıyla; güneş enerji sistemleri, güneş pili hücresi ve çalışma ilkesi, fotovoltaik tabanlı dağıtılmış üretimin (PVDG) şebekeye entegrasyonu, entegrasyonlarda oluşan bazı temel problemler incelenmiş olup matlab uygulama analizi ile entegrasyon simülasyonu incelenmiştir, bunlarla beraber PVDG yerleştirme ve boyutlandırma için optimum planlama genel prosedürleri izah edilmiştir. Bir PVDG üretimin şebekeye entegrasyonunda tespiti yapılmış problemlerin dışında teknik, ekonomik ve çevresel faydalar gibi etkisi büyük fırsatların ve faydaların olduğu sonucuna da varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, Güneş Enerjisi, PV Teknolojileri, Yenilenebilir Enerji

ABSTRACT

MS THESIS

THE PROBLEMS OF THE INTEGRATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS AND POWER GRID SYSTEM

Ahmet ALİCİ

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ELECTRICAL-ELECTRONICS
ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Musa YILMAZ

2022, 77 Pages

Jury

Advisor: Asst.Prof.Dr. Musa YILMAZ

Asst.Prof.Dr. Mehmet Rıdâ TÜR

Asst.Prof.Dr. Mehmet Emin ASKER

As an alternative to electricity generation based on traditional power plants, which are limited in resources to meet the growing energy needs in many countries worldwide, the orientation towards environmentally friendly, clean and sustainable renewables is growing by the day. Lack of fossil resources, cost and wage changes, and their detrimental effects due to their non-environmental are leading countries to find alternatives to primary energy sources. Solar power, an environmentally friendly resource, is a very big potential alternative to traditional energy sources. In line with this, applications to utilize the potential of solar power for electricity generation continue to increase. In this Thesis, literature screening was conducted by examining the phases of electric power generation from solar power, solar-photovoltaic energy systems, photovoltaic-based distributed generation (PVDG) and some of the fundamental problems encountered in integrating this production into traditional distribution networks. Information on harmonic distortion produced by PVDG units and the effects it causes have been shared. The maximum permitted penetration level of PVDG is also taken into account in distribution because problems and errors in the grid were observed to increase as PV penetration increased. Integrating PVDG into power systems has different challenges, including integrated system reliability. A balanced and controlled grid connection must be provided to ensure reliability, ensuring PVDG connectivity to or disconnection from the grid when desired. The amount of power generated by renewable energy-generated PVDG may not be fully consistent, so PVDG's high penetration of the grid may reduce the reliability of the power system network. In general in this thesis; solar energy systems, solar cell cell and operating principle, integration of photovoltaic-based distributed manufacturing (PVDG) into the grid, some fundamental problems with integrations have been studied and matlab application analysis and integration simulation has been examined, along with optimal planning general procedures for PVDG placement and sizing Apart from the problems detected in the integration of a PVDG production into the grid, it is also concluded that there are great opportunities and benefits, such as technical, economic and environmental benefits.

Keywords: Fotovoltaic, PV Technologies, Renewable Energy, Solar Energy.

ÖNSÖZ

Bu Tez çalışmasında yenilenebilir enerji kaynaklarından kullanımı en yaygın olanlarından biri olan Güneş Enerjisinin, Fotovoltaik üretim sistemiyle geleneksel şebekeye entegrasyonunda karşılaşılan problemler ve bunların çözümüne yönelik genel bir inceleme ve araştırma yapılmıştır.

Yüksek Lisans eğitimimin ve tez yazımının her safhasında yardımlarını eksik etmeyen değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Musa YILMAZ'a, ayrıca katkılarından dolayı Dr. Öğr. Üyesi Heybet KILIÇ (Dicle Üniv.) hocama teşekkür ederim.

Ahmet ALİCİ
BATMAN-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Güneş Enerji Sistemleri.....	2
1.2. Güneş Enerjisinin Dünyadaki Durumu ve Türkiye Potansiyeli	3
2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER.....	8
3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN ŞEBEKE GÜÇ SİSTEMLERİNE ENTEGRASYONU.....	11
3.1. Entegrasyonda Temel Bilgiler.....	11
3.2. Fotovoltaik Dağıtık Üretimin Güç Dağıtım Şebekesine Entegrasyonu	13
3.2.1. PV için Şebeke Paritesi Yol Haritası	14
3.2.2. PV Dağıtık Üretim	18
3.2.3. Dağıtım Sistemleri Üzerindeki PV-DG Etkileri	20
3.2.4. Zararlı Etkileri Azaltma Önlemleri.....	24
3.2.5. PV-DG'nin Üretim Maliyetleri Üzerindeki Etkileri	28
4. FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN ŞEBEKE GÜÇ SİSTEMLERİNE ENTEGRASYONUNDA KARŞILAŞILAN PROBLEMLER.....	31
4.1. PV Sistemlerin Şebeke Güç Sistemlerine Entegrasyonunda Karşılaşılan Problemler – Optimal Planlama Zorlukları	31
4.2. PVDG 'nin Güç Kalitesi Etkisi.....	34
4.2.1. PVDG 'nin Harmonik Etkisi	34
4.2.2. PVDG 'li Güç Sisteminde Harmonik Rezonans	35
4.2.3. PVDG'nin Gerilim Değişimi Üzerindeki Etkisi.....	36
4.3. PVDG 'nin Maksimum İzin Verilebilir Penetrasyon Seviyesi.....	37
4.4. PVDG 'nin En Uygun Yerleşimi ve Boyutlandırılması	38
5. ŞEBEKEYE BAĞLI PV SİSTEM SİMÜLASYON UYGULAMALARI	42
5.1. Uygulamalara Giriş	42
5.2. Şebekeye Bağlı PV Sistemler.....	42
5.3. Güneş Pili (PV Hücre) Eşdeğer Devre Modeli	43
5.4. Tek Faz On-Grid İnverterler	47

5.5. PWM (Darbe Genişliği Modülasyonlu) İnverterler	48
5.6. PV İnverter Modelleme Örneği.....	49
5.7. Güç Dağıtım Sistemi Modelleme Örneği.....	53
5.8. Batman İli için PV Penetrasyon Optimizasyonu Simulink Uygulaması.....	57
5.8.1.Kullanılan PV Sistemin Tanımı ve Sistem Parametreleri.....	58
5.8.2 Uygulamadaki PV Güç Üretiminin Analizi.....	66
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	78



KISALTMALAR LİSTESİ

AA	: Alternatif Akım
AC	: Alternatif Akım (Alternative Current)
ADM	: Ada Mod
ADMÇ	: Ada Modlu Çalışma
BOS	: Konut Sistem Dengesi
CO2	: Karbondioksit
CSP	: Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri (Concentrated Solar Power)
CVR	: Koruma Voltajı Azaltma
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
DES	: Dağıtılmış Enerji Depolama
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
FACDS	: Esnek AC Dağıtım Sistemleri
GEPA	: Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
GES	: Güneş Enerjisi Santrali
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
LCOE	: Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti
LDC	: Hat Düşme Telafisi
LTCs	: Yük Kademe Değiştiricisi (Load Tap Changers)
MPPT	: Maximum Power Point Tracking (Maksimum Güç Noktası Takibi)
MVA	: Mega Volt Amper
MW	: Mega Watt
PCC	: Ortak Kuplaj Noktası (Point of Common Coupling)
PCU	: Power Conditioning Unit
PV	: Fotovoltaik (Photovoltaics)
PV-DG	: Fotovoltaik Dağıtılmış Üretim
PWM	: Sinyal Genişlik Modülasyonu
RMS	: Root Mean Square (Karekök Ortalama)
SCADA	: Uzaktan Kontrol ve Gözleme Sistemi (Supervisory Control And Data Acquisition)
STATCOM	: Statik Senkron Kompansatör
THD	: Total Voltage Harmonic Distortion
TOV	: Geçici Aşırı Gerilim
W	: Watt
Wp	: Watt-Peak
YEGM	: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Elektrik Şebekesinin Topolojisi.....	2
Şekil 1.2 Yıllara göre küresel güneş enerjisi kurulu güç artışı, 2000 – 2018.....	4
Şekil 1.3. Dünya Güneş Enerjisi Kurulu Gücü, 2000 – 2018.....	4
Şekil 1.4 Türkiye'nin Coğrafi Konumu.....	5
Şekil 1.5 Türkiye'nin güneş enerjisi yıllık potansiyel haritası (GEPA).....	6
Şekil 1.6 Türkiye'nin yıllara göre güneş enerjisi kurulu gücü.	6
Şekil 2.1 PV hücre, modül ve dizi tasarımı	8
Şekil 2.2 PV hücrenin a) çalışma ilkesi b) yapısı.	9
Şekil 2.3 Bir PV hücrenin akım-gerilim eğrisi	9
Şekil 3.1 PV endüstrisi öğrenme eğrisi.	16
Şekil 3.2 Modül maliyeti ile verimlilik arasındaki ilişki ve elektrik maliyeti.....	17
Şekil 3.3 PV-DG tesis sahalarında voltaj artışı (Azaltma yok).....	21
Şekil 3.4 PV-DG çıkış aralıkları.....	22
Şekil 3.5 PV-DG çıkış aralıkları histogramı.....	23
Şekil 3.6 PV-DG penetrasyon seviyesinin bir fonksiyonu olarak gerilim dengesizlik faktörü (%).	23
Şekil 3.7 İki gerçek dağıtım besleyicisi için PV-DG penetrasyon seviyesinin bir fonksiyonu olarak besleme kayıpları.....	24
Şekil 3.8 PV-DG tesis sahalarında voltaj yükselmesi (0,97'lik sabit birleşik olmayan öncü güç faktörü kullanılarak azaltma durumu)....	26
Şekil 3.9 PV-DG tesis sahalarında PV-DG tesis sahasındaki dinamik voltaj dalgalanmaları: a)güneş radyasyonu, b) azaltma yok, c) 0.97'lik sabit, dayanıksız lider güç faktörü kullanılarak azaltma ve d) PV-DG invertörleri kullanarak dinamik volt-VAr kompanzasyon şeması kullanarak azaltma.....	27
Şekil 3.10 Her yük türünün yıllık 3 fazlı aktif gücünün süre eğrileri.....	28
Şekil 3.11 Her yük türünün yıllık 3 fazlı aktif gücünün olasılık eğrileri.....	29
Şekil 3.12 Her yük tipinin 100 kW'lık bloklardaki üretim maliyet eğrisi.....	30
Şekil 4.1 Şebekeye bağlı bir PV sisteminin şematik diyagramı.....	32
Şekil 4.2 Bir dağıtım sisteminde PVDG 'nin optimum yerleşimini ve boyutlandırmasını belirlemek için genel optimizasyon tekniğinin akış şeması.....	41
Şekil 5.1 Şebekeye bağlı PV sistemin tipik çerçeve şeması.....	43
Şekil 5.2 Güneş pili elektriksel eşdeğer devresi.....	44
Şekil 5.3 Matlab Simulink ortamında geliştirilmiş olan güneş pili modeli.....	46
Şekil 5.4 Güneş pilleri için tipik güç, akım, gerilim eğrileri.....	47
Şekil 5.5 PWM yöntemine ait dalga şekilleri.....	49
Şekil 5.6 Tek fazlı PV inverter blok diyagramı ve modelleme örnek yapısı.....	50
Şekil 5.7 PV inverter modeli iç yapısı.....	51
Şekil 5.8 PV inverter çıkışında oluşan AC gerilim ve akımın değişimi.....	51
Şekil 5.9 PV inverter gerilim ve akım için örnek giriş ve çıkış dalga şekilleri.....	52
Şekil 5.10 PV inverter giriş ve çıkış güçlerinin anlık durum değişimi.....	53
Şekil 5.11 Örnek güç dağıtım sistemi modeli.....	54
Şekil 5.12 3 Faz kısa devre arızası sonucunda bir PV santralin aktif güç tepkisi	55
Şekil 5.13 3 Faz-Toprak arızası boyunca 3 fazlı şebekedeki voltaj değişimi.....	55
Şekil 5.14 Bir arıza sonrası oluşan gerilim değişimleri.....	56
Şekil 5.15 Batman İli güneşlenme süreleri – saat.....	57
Şekil 5.16 Batman İli global radyasyon (Güneş Işınım) değerleri (KWh/m ² -gün).....	58
Şekil 5.17 Batman İli için PV Tipi-alan-üretilebilecek enerji (KWh-Yıl).....	58
Şekil 5.18 Simulasyonda Kullanılan IEEE-9 Bara Sistemi.....	59

Şekil 5.19 Uygulamada kullanılan senkron generator modeli.....	60
Şekil 5.20 Uygulamada kullanılan batarya sisteminin modeli.....	60
Şekil 5.21 Uygulamada kullanılan PV sistemi modeli.....	61
Şekil 5.22 Kullanılan PV sistemi modeli iç yapısı	61
Şekil 5.23 Solar ışıınım grafiğı.....	62
Şekil 5.24 PV – MPPT gerilimi değışimi.....	63
Şekil 5.25 PV dizinin çıkış gerilimi değışimi	63
Şekil 5.26 İnverter giriş gerilimi değışimi.....	64
Şekil 5.27 PV gücü (Matlab Simulink).....	64
Şekil 5.28 Batarya çıkışı akım ve gerilim değışimi.....	65
Şekil 5.29 PV Sisteme Bağlı Baraya Ait 3 Faz Gerilimleri, PCC Bağlantı Noktası (Matlab Simulink).....	65
Şekil 5.30 PV Sisteme Bağlı Baraya Ait 3 Faz-Nötr Gerilimleri, PCC Bağlantı Noktası (Matlab Simulink).....	66



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1 : Üretim için seviyelendirilmiş maliyet verileri.....29

Tablo 5.1 : Yüklerin Aktif Reaktif Güç Parametreleri.....60



1. GİRİŞ

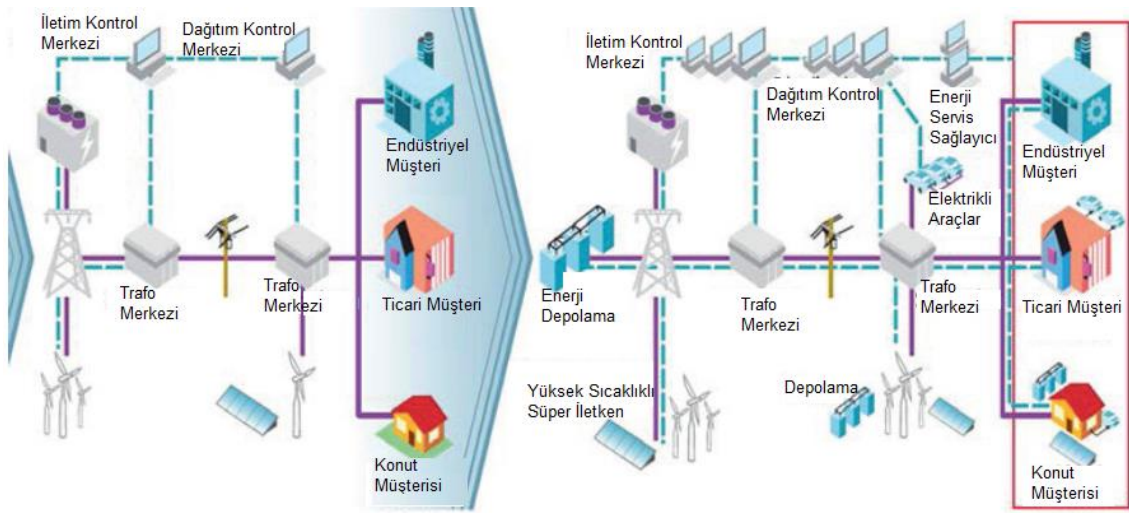
Dünyada ve Türkiye’de elektrik enerjisi ihtiyacı sürekli olarak artmaktadır. Günümüzde enerji kaynaklarının büyük kısmı fosil tabanlı kaynaklardır. Artan bu ihtiyacı karşılamada konvansiyonel kaynakların kapasite sorunu sürekli olarak tartışılan bir gündemdir, çünkü bu kaynakların rezervlerinin sınırlı oluşu tükeneceği endişesini oluşturmaktadır. Diğer yandan, bu yakıtların çevreye verdiği zararlar nedeniyle bilim dünyası farklı enerji kaynağı arayışlarına yönelmiştir. Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli alanlarından biri olan güneş enerjisinden faydalanarak elektrik enerjisi üretme aşamaları, bu üretimde coğrafi, teknolojik ve meteorolojik faktörler, şebeke kontrolü ve ağ planlaması, üretilen fotovoltaik (PV) enerjinin dağıtım şebekelerine entegre edilmesi ve ağırlıklı olarak entegrasyonda karşılaşılan temel problemler paylaşılmıştır. Bu enerji üretiminde meteorolojik faktörler ve enerji üretiminin koordinasyonu üzerinde titizlikle durulması gereken önemli faktörlerdendir. Solar PV sistemleri; küçük bağımsız uygulamalardan konut ve ticari sistemlere, MW ölçekli kurulumlara ve elektrik şebekesine önemli miktarda enerji besleyen sistem gruplarına doğru gelişmiştir. Çalışmada, ayrıca artan PV penetrasyon seviyelerinin dağıtım şebekesine etkilerinden de bahsedilmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi, CO₂ salınımı olmadığı için çevre dostudur. Geleneksel enerji kaynaklarına göre çok fazla avantajlı özellikleri olan güneş enerjisinin elektrik enerjisi üretiminden sıcak su teminine kadar birçok kullanım alanı bulunmaktadır.

PV sistemler, fotovoltaikler aracılığıyla kullanılabilir güneş enerjisi sağlamak için tasarlanmış bir güç sistemidir. Güneş ışığını emmek ve elektriğe dönüştürmek için güneş panelleri, çıkışı doğrudan alternatif akıma dönüştürmek için bir güneş invertörü ve ayrıca bir çalışma sistemi kurmak için montaj, kablolama ve diğer elektrikli aksesuarlar dahil olmak üzere birkaç bileşenden oluşan bir düzenlemeden oluşur. Ayrıca, sistemin genel performansını iyileştirmek için bir güneş takip sistemi kullanılabilir ve depolama sistemlerinin (süperkapasitörler, bataryalar) daha fazla geliştirilmesiyle yoğun üretim dönemlerinden maksimum verim sağlanabilecektir. Açıkça söylemek gerekirse, bir güneş dizisi yalnızca PV sisteminin görünen kısmı olan güneş panelleri grubunu kapsar ve çoğu zaman sistem dengesi (BOS) olarak özetlenen diğer tüm donanımları içermez. PV

sistemleri ışığı doğrudan elektriğe dönüştürdüğünden, ısıtma ve soğutma için kullanılan konsantre güneş enerjisi veya termal güneş enerjisi gibi diğer güneş teknolojileriyle karıştırılmamalıdır.

Elektrik şebekesinin topolojisi, PV dahil olmak üzere ek yenilenebilir kaynakların kullanılmasını kolaylaştıracak şekilde değişmek zorunda kalacaktır. Aşağıda Şekil 1.1'de (Koca, 2016) bu durum gösterilmiştir standart şebeke bugün (solda) ve gelecekte (sağda). Dağıtılmış üretimin entegrasyonunu desteklemek için iletişim ve kontrol mantığının düşük voltaj şebekesine doğru geliştirilmesi gerekir.



Şekil 1.1. Elektrik Şebekesinin Topolojisi (Koca, 2016)

Bu çalışmada ayrıca; güneş enerjisiyle ilgili temel bilgiler, güneş enerjisinin Türkiye'deki genel ve güncel ortalama durumu, güneş enerjisinin potansiyel durumu, üretimleri, kullanım alanları, genel olarak güneş enerjisi teknolojileri de incelenmiştir. Elde edilen bu bilgi ve verilerle bu hususta bilgi paylaşımı ve kaynak bilgilerin artması amaçlanmıştır. Ülkemizin enerji ihtiyacının karşılanmasına yönelik çözüm alternatiflerinden biri olarak güneş kaynağının değerlendirilmesi başta olmak üzere, enerjide sürekliliğin sağlanması ve enerji üretiminde çevresel problemlerinin çözülmesi için güneş enerjisi potansiyelinin güç kaynağı olarak enerji üretiminde daha çok değerlendirilmesi ve bu konuların ülkemiz için önemine de değinilmiştir.

1.1. Güneş Enerji Sistemleri

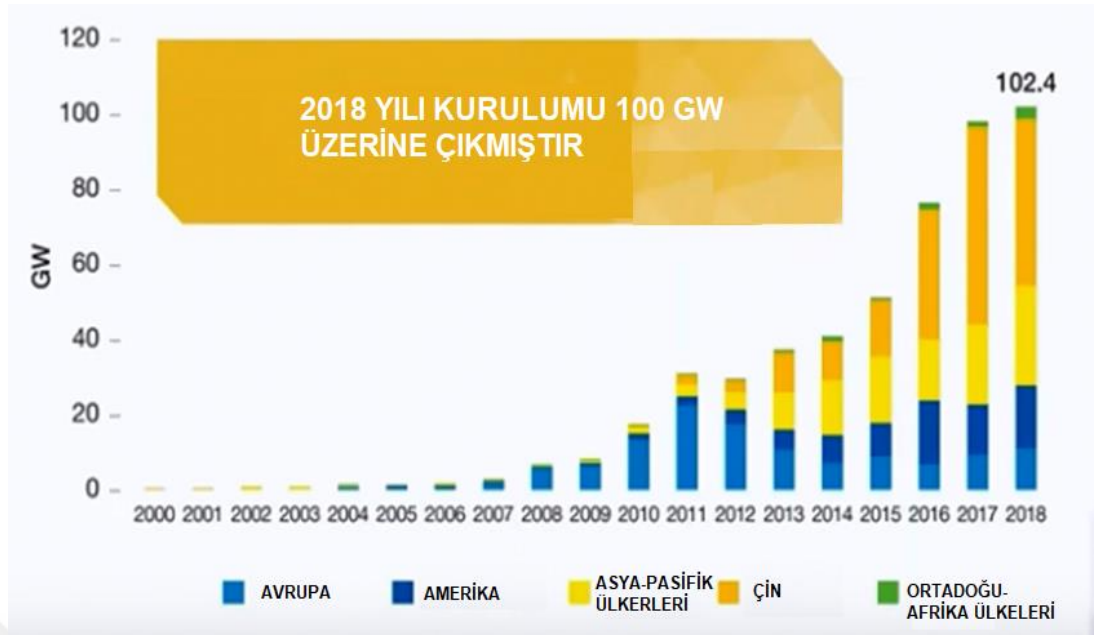
Güneş enerjisi alanındaki çalışmalar özellikle 1970'lerden sonra artmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşerek gittikçe daha

elverişli duruma gelmektedir ancak yine de PV hücrelerinden elektrik üretimi maliyetlidir, bununla beraber çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir. PV enerjisi üretimi ve kullanımı tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de artıyor. Ulusal Güneş Misyonunun bir parçası olarak güneş enerjisi santralleri için birçok sübvansiyon (devlet desteklemesi) sunuluyor, ayrıca birçok ülkede bu alanda gelişme sağlayacak politik düzenlemeler yapılıyor. Güneş enerjisi şebekesi entegrasyonunun ana avantajları; iyileştirilmiş güç kalitesi, gelişmiş şebeke güvenilirliği ve daha az iletim ve dağıtım kayıpları olarak gösterilebilir. Temel olarak 3 faktöre bağlıdır: 1) kontrol edilemeyen değişkenlik 2) kısmi öngörülemezlik ve 3) yerel bağımlılık (Koca, 2016). Bu üç faktör, PV üretimini entegre etmede kamu hizmetleri ve şebeke operatörleri için çeşitli zorluklar yaratır.

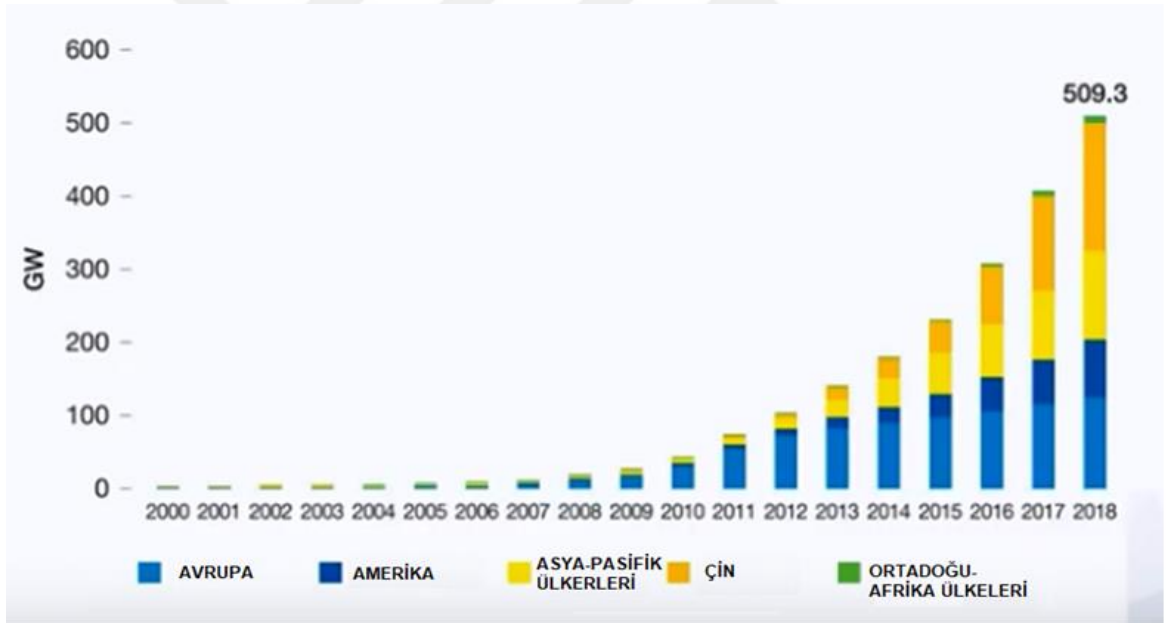
1.2. Güneş Enerjisinin Dünyadaki Durumu ve Türkiye Potansiyeli

Teknolojideki ilerlemeler ve üretim ölçeğindeki artışlara paralel olarak fotovoltaiklerin maliyeti yüksek olmakla beraber sürekli düşmektedir (Bazilian ve ark., 2013). Sadece Almanya’da 440,000 sistemle ve Amerika Birleşik Devletleri’nde Kuzey Amerika 1,4 milyon sistemle olmak üzere, çoğu Avrupa’da olmak üzere tüm dünyaya dağılmış birkaç milyon PV sistemi vardır. Geleneksel bir güneş modülünün enerji dönüşüm verimliliği son on yılda %15’ten yüzde 20’ye yükselmiştir ve bir PV sistemi, üretimi için gerekli olan enerjiyi yaklaşık 2 yıl içinde telafi edebilmektedir. İstisnai olarak ısıtılmış yerlerde veya ince film teknolojisi kullanıldığında, sözde enerji geri ödeme süresi bir yıl veya daha az düşer (Yenilenebilir Enerji Küresel Durum Raporu REN21, 2010). Güneş enerjisi için tercihli tarife garantisi gibi net ölçüm ve mali teşvikler, birçok ülkede PV sistemlerinin kurulumunu ve elektrik üretimini büyük ölçüde destekleyen gelişmeler olmuştur (Branker ve ark., 2011). Büyük ölçekli PV sistemlerinden gelen seviyelendirilmiş elektrik maliyeti, genişleyen coğrafi bölgelerde geleneksel elektrik kaynaklarıyla rekabet edebilir hale gelmiştir ve yaklaşık 30 farklı ülkede şebeke paritesi (alternatif kaynaktan üretimin elektrik şebekesi ile aynı veya daha düşük maliyette olması) sağlanmıştır (Kost ve ark., 2018; Hunt, 2015).

Aşağıda Şekil 1.2’de güneş enerjisi kurulu gücünün 2000-2018 yılları süresince artışı gösterilmiştir (myenerjisolar, 2020). Şekil 1.3’te de Dünya güneş enerjisi kurulu güç miktarları gösterilmiştir (myenerjisolar, 2020).



Şekil 1.2. Yıllara göre küresel güneş enerjisi kurulu güç artışı 2000-2018 (myenerjisolar, 2020)

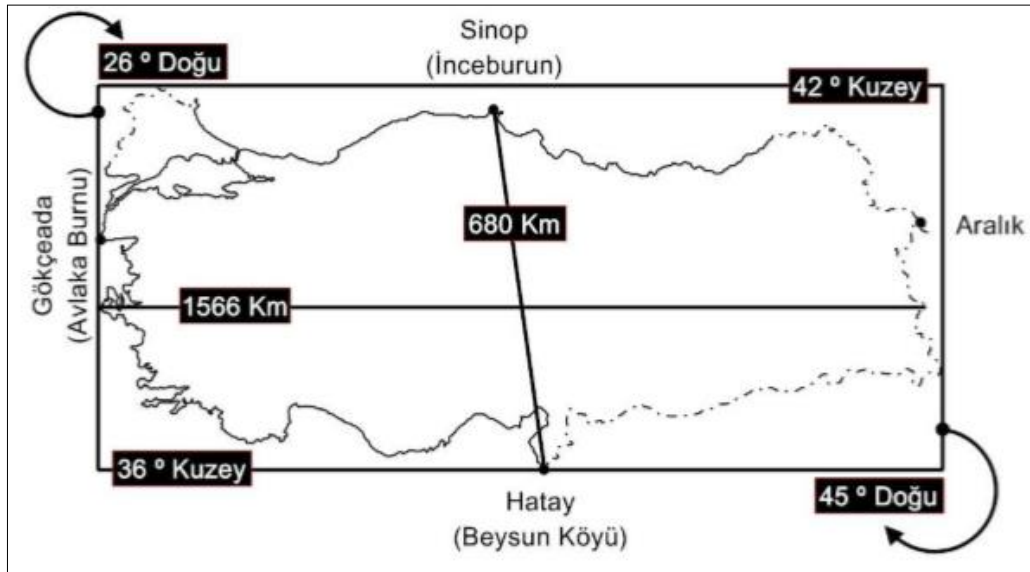


Şekil 1.3. Dünya Güneş Enerjisi Kurulu Gücü 2000 – 2018 (myenerjisolar, 2020)

Türkiye’de son yıllarda yaşanan hızlı ekonomik büyüme, nüfus artışı ve yaşam standardının yükselmesi, enerji talebinde ciddi artışları da beraberinde getirmiştir. Enerji talebini çoğunlukla fosil enerji kaynaklarından karşılayan Türkiye, birincil enerji kaynakları açısından dışa bağımlılığı oldukça yüksek olduğundan her sene milyarlarca dolar bedellerle enerjiyi dışardan satın almaktadır. Fosil kaynaklı yakıtların yüksek oranda kullanımı, enerjide dışa bağımlılık sorunu ve yüksek ithalat giderlerinin yanı sıra

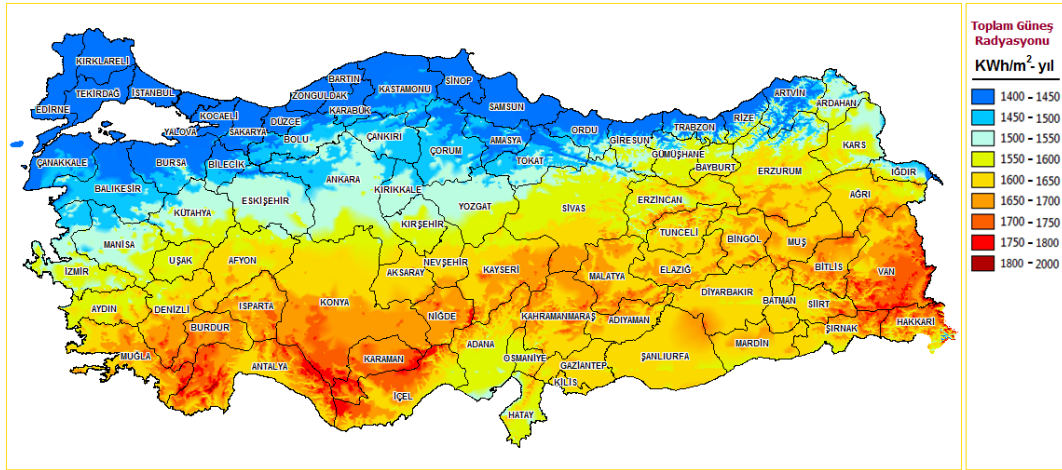
çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir. Enerji arz güvenliğinin temini ve enerji kaynaklı salınımların azaltılması açısından Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyelinin daha etkin kullanılmasının önemi her geçen yıl daha da artmaktadır. Yenilenebilir kaynaklar içerisinde yüksek bir potansiyel olan güneş enerjisinin ise, Türkiye'nin artan elektrik ihtiyacını karşılamada yeni bir kaynak olarak değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Güneş enerjisinin potansiyelini kıyasla göstermek gerekirse dünyada yılda güneş enerjisinden gelen enerji potansiyeli bilinen kömür rezervlerinin 50 katına, bilinen petrol rezervlerinin 800 katına eşdeğerdir (Özgöçmen, 2007). Bu da demektir ki, bu potansiyelin yeryüzüne gelen küçük bir miktarı bile dünyadaki mevcut enerji tüketiminden çok daha fazladır (YEGM, 2015). Daha da detaylandırarak olursak; dünyanın güneşten aldığı enerji toplamı bir yılda 1.5 katrilyon (1.5×10^{15}) MW/h'tir. Bu potansiyel, dünya üzerinde insanlığın 1 yılda tükettiği enerjinin tam 28 000 katına denk gelmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, yeryüzüne 90 dakika boyunca vuran güneş ışığı, dünyanın bir yıllık enerji ihtiyacı eşdeğerindedir (DEKTMK, 2009). Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisinden yakın gelecekte enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında önemli bir alternatif olarak daha etkili, sürekli ve sürdürülebilir bir şekilde faydalanılması gerekmektedir.

Türkiye Kuzey Yarım Küre'de yer alır bu durum Şekil 1.4'te gösterilmiştir (cografyabilimi.gen, 2020).



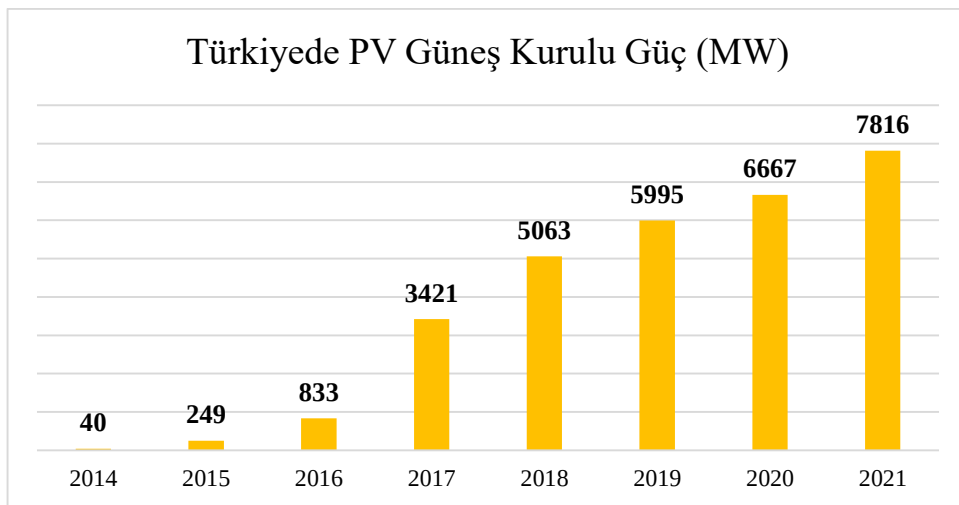
Şekil 1.4. Türkiye'nin Coğrafi Konumu (cografyabilimi.gen, 2020)

Şekil 1.5'te GEPA (Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası) gösterilmiştir. Güneş enerjisi potansiyel belirleme çalışmaları kapsamında hazırlanan atlas ile ülkemizdeki güneş enerjisi uygulamaları açısından en iyi alanların nereler olduğu ve belirlenen bu alanlardaki güneş enerjisine dayalı elektrik veya ısı enerjisi üretim imkânlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Buna göre Türkiye’de ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741 saat olup ortalama yıllık toplam ışıınım değeri 1.527,46 kWh/m² olarak hesaplanmıştır (GEPA yegm, 2015).



Şekil 1.5. Türkiye’nin güneş enerjisi yıllık potansiyel haritası (GEPA, 2015)

Güneş enerji santralleri bakımından Türkiye dünyada çok gerilerdedir. Fakat son yıllarda güneş enerjisi ile ilgili çalışmalar oldukça artmaktadır. Şekil 1.6’da Türkiye’de son 8 yıldaki kurulu güç artışı görülmektedir (Gunder, 2020).

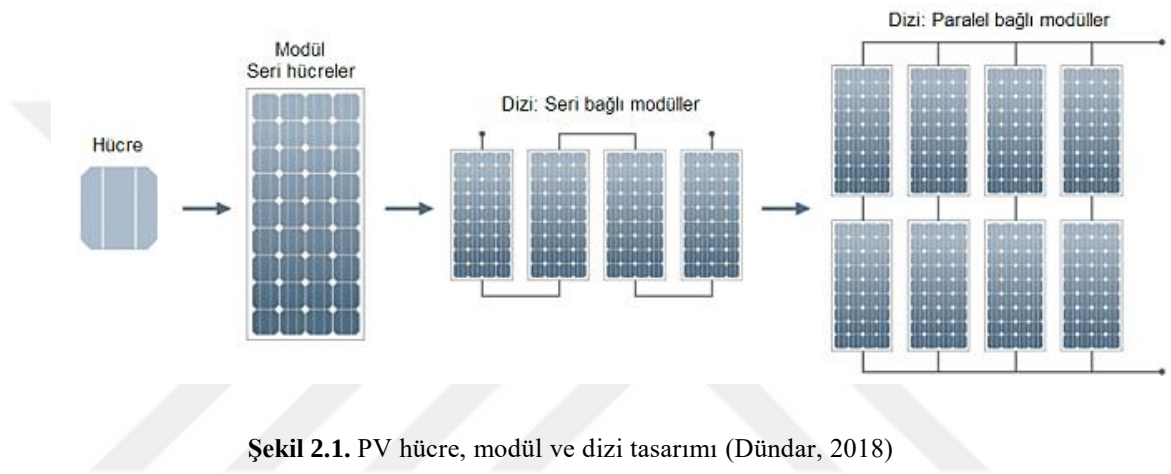


Şekil 1.6. Türkiye’nin yıllara göre güneş enerjisi kurulu gücü (Gunder, 2020)

2015 yılı itibarıyla hızla büyüyen küresel PV pazarı dünya geneli 200 GW seviyelerinde iken 2018 yılında 500 GW seviyesini aşmıştır, 2006'daki kurulu kapasitenin yaklaşık 40 katı. Bu sistemler şu anda dünya çapında elektrik üretimine yaklaşık yüzde 1 katkıda bulunuyor (Uluslar Arası Enerji Ajansı PV Güç Sistemleri Programı iea-pvps, 2020). Kapasite açısından PV sistemlerinin en iyi kurucuları şu anda Çin, Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri iken, dünyanın kapasitesinin yarısı Avrupa'da kurulu olup, Almanya ve İtalya güneş PV ile ilgili yurtiçi elektrik tüketiminin % 7 ila % 8'ini tedarik etmektedir (TMMOB, 2014). Uluslararası Enerji Ajansı, 2050 yılına kadar güneş enerjisinin dünyanın en büyük elektrik kaynağı olacağını öngörmektedir.

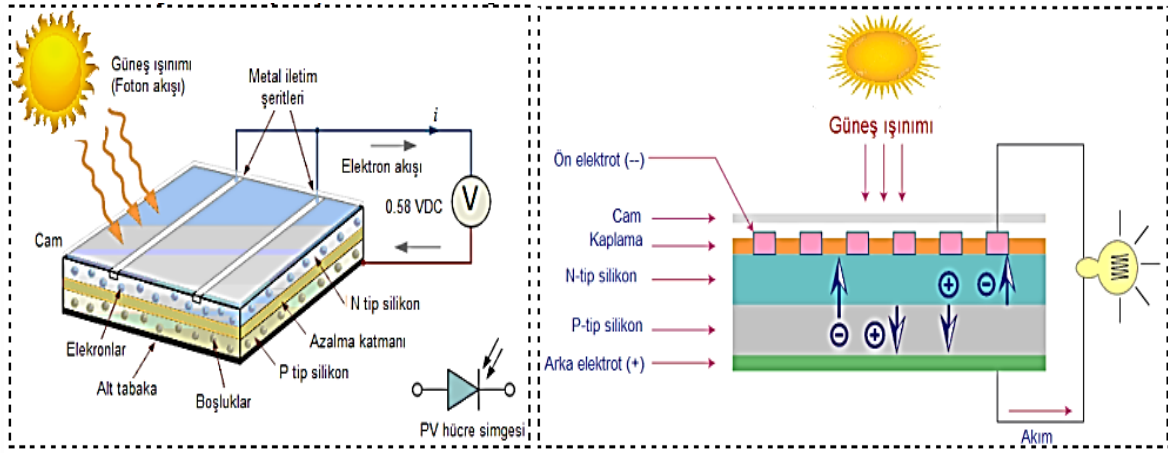
2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

PV sistemler güneşten gelen ışınları doğrudan elektrik enerjisine çevirebilen, hareket eden herhangi bir parçası olmayan, bakımı kolay ve uzun ömürlü sistemlerdir. Yarı iletken teknolojisine sahip olan PV hücreler güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirirler. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi hücreler modülleri, modüller panelleri, paneller ise dizileri oluşturmaktadır (Dündar, 2018).



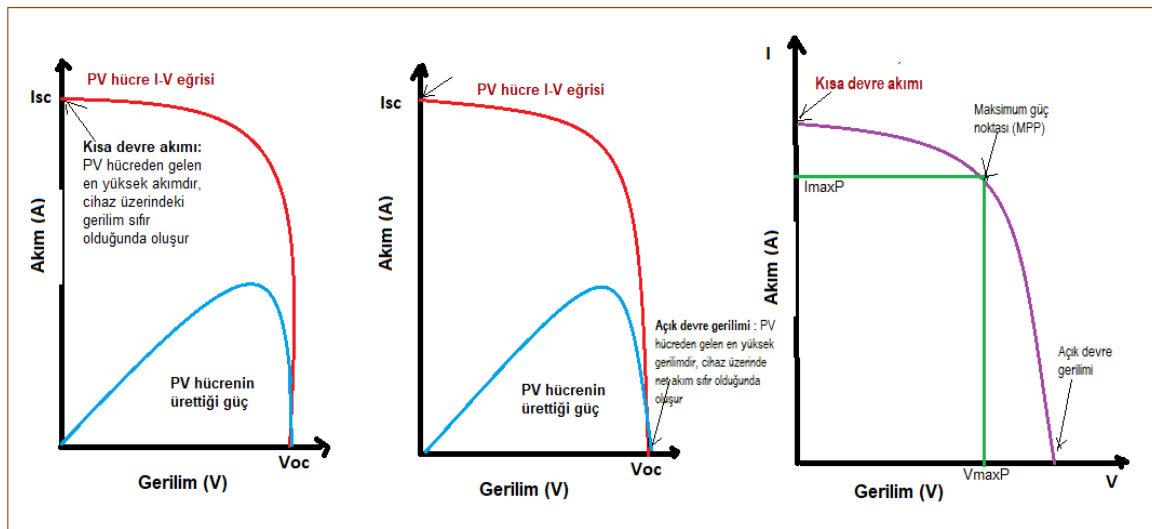
Şekil 2.1. PV hücre, modül ve dizi tasarımı (Dündar, 2018)

PV hücre, bir yarı iletken diyot olarak çalışmakta ve güneşten gelen fotonları Şekil 2.2’de gösterildiği gibi fotoelektrik reaksiyona sokarak doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmektedir. PV hücrelerinin yapısına bağlı olarak bir güneş paneli %5 ila %20 arasında bir verime sahiptir. PV hücrelerin yüzey yapıları genelde dikdörtgen, kare ya da daire şeklindedir. Alan olarak ortalama 1 m² dir. Kalınlık olarak da 0.2-0.4 mm aralığındadır. Yüksek güç çıkışı elde etmek amacıyla birçok PV hücre paralel veya seri bağlanarak uygun bir zemin üzerine monte edilir. Bu şekilde paneller elde edilir (Öztürk, 2008).



a) b)
Şekil 2.2. PV hücrenin a) çalışma ilkesi b) yapısı (Öztürk, 2008)

Güneş ışınımı fotonların akışı olarak ifade edilebilir. Bu fotonlar farklı dalga boylarına sahip değişik miktarlarda enerji içerirler. Bu fotonlar yüzeye çarptığında bir kısmı PV hücre tarafından soğurulur ve bir kısmı da yansıtılır. PV hücrelerin soğurduğu bu fotonlar elektrik enerjisi üretirler. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi güneşten gelen fotonların PV hücredeki silikon gibi yarı iletken malzemeye çarpıp atomlarındaki elektronları serbest bırakmasıyla elektrik enerjisi üretilir (Öztürk, 2008; Kaya, 2013). PV hücrenin enerji üretimi güneş ışınımına, sıcaklığa, yüzey alanına ve güneş ışınlarının geliş açısı olmak üzere birçok faktöre bağlıdır. Şekil 2.3’te bir PV hücrenin akım-gerilim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.3. Bir PV hücrenin akım-gerilim eğrisi (Arora ve Hauser, 1982)

PV hücreye ait akım-gerilim (I-V) özellikleri üç ayrı yöntemle belirlenebilir:

1.Yöntem: Sabit bir ışık şiddeti altında, değişken bir direncin açık devre ve kısa devre durumları arasında değiştirilerek, PV hücrenin uçları arasındaki gerilime karşı dirençten geçen akım ölçülür.

2.Yöntem: PV hücre karanlıkta, bir dış DC besleme kaynak yardımı ile diyot gibi çalıştırılarak.

3.Yöntem: Şiddeti değiştirilebilen bir ışık kaynağının aydınlatılması altında V_{oc} ve I_{sc} değerleri ölçülerek

Açık devre gerilimi (V_{oc}): Bir PV hücrenin açık devre gerilimi (V_{oc}), hücreden geçen akımın sıfır olması durumunda hücre uçlarından ölçülen gerilimdir (Şekil 2.3).

Kısa devre akımı (I_{sc}): PV hücrenin kısa devre akımı (I_{sc}) ise, sıfır gerilimde ve aydınlatma altında hücreden geçen akımdır (Şekil 2.3). Paralel direnç etkilerinin ihmal edildiği ideal durumda ışıkla oluşan akıma eşit olup, ışıyım şiddetine bağlıdır (Öztürk, 2008).

3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN ŞEBEKE GÜÇ SİSTEMLERİNE ENTEGRASYONU

3.1. Entegrasyonda Temel Bilgiler

Güneş enerjisi çıkışı zaman zaman değişir, çünkü mevcut güneş ışığı gün boyunca sabit değildir, çünkü zaman ölçeğine göre saniyeden saniyeye veya an be an değişir. Bu dalgalanma, dengesiz çıkış gücüne neden olur, bu nedenle beslemeyi dengelemek için ek enerji ve frekans düzenleme ve voltaj desteği gibi destekleyici eylemler gerektirir. Frekans regülasyonu saniyeden dakikaya kadar gerçekleşir ve jeneratörlere otomatik üretim kontrol (AGC) sinyalleri yoluyla yapılır. Gerilim desteği, gerektiğinde gerilimi yükseltmek için reaktif güç için kullanılan jeneratörler; ek olarak, şebeke operatörleri şebekenin tüketim tarafında elektrik için yük talebini takip etmeli ve üretimin her zaman yüke uygun olmasını sağlamalıdır. Bu yük izleme işlevi; sabah, sıcak bir öğleden sonra veya akşam gibi elektrik talebinin önemli ölçüde arttığı günün saatlerinde özellikle önemlidir. Yük takibi, güneş takip (solar tracker – güneş izleyici) sistemleri ile yapılabilir ve bu takip ile bir sistemin verimi %40 ‘a kadar artırılabilir (Koutitas, 2012).

Entegrasyonda yaygın görülen problemler harmonikler ve eşzamansız rezonanstır. Güneş enerjisi üretiminin yüksek penetrasyonları enerji sistemine daha fazla değişkenlik katacaktır. Bu tür sorunları cihaz düzeyinde yönetmek ve şebeke dengesini korumak için destekleyici teknolojiler ve stratejiler gerektirir. Elektrik şebekesinde elektrik gücü yüksek voltajlı şebekeden düşük voltajlı şebekeye akmaktadır. PV dağıtılmış üretimin şebekedeki oranı arttıkça düşük voltajdan orta voltaj şebekesine güç akışlarının indüklenmesine yol açabilir. Bu çift yönlü güç akışları, her iki voltaj seviyesinde farklı koruma şemaları ister. Ayrıca dağıtılmış gerilimlerin esnekliği şebeke kontrolü tarafında ekstra kontrol mekanizması gerektirir. Bazı müşteriler bir kesinti sırasında ada moduna (şebekeden bağımsız beslenme, jeneratör vb) geçmek isteyebileceğinden, entegrasyonda şebeke yapısı bu tür işletim modu için de gereksinimleri karşılamalıdır. Kesintiden sonra dağıtım şebekesi tekrar çalışmaya başladığında sistem üniteleri yeniden senkronize edilebilmelidir (Koutitas, 2012).

Gerilim Kontrolü (yüksüz toplam harmonik bozulma THD $< 3,5\%$); dengeli ve dengesiz voltaj arızası durumları, zayıf şebeke durumları, gerilim büyüklüğü modülasyonları gibi sorunları içermektedir. Güç kalitesi, sifıra yakın büyük voltaj

düşüşlerinin (güvenilirlik sorunları) dışında, daha küçük voltaj sapmaları da olabilir. Güç kalitesi, güç özelliklerinin ideal sinüzoidal voltaj ve akım dalga biçimiyle akım ve voltaj dengesizliği ile ne derece uyumlu olduğunu ifade eder. Bu nedenle, güç kalitesi kesin bir ifadeyle güvenilirliği kapsar. Yetersiz güç kalitesi, şebeke ağındaki arızalar, anahtarlama işlemlerinden (gerilim düşüşleri ve geçişler) ve yük kaynaklı ağ bozulmalarından (titreşim, harmonikler ve faz dengesizliği) kaynaklanabilir (Koutitas, 2012).

Geleneksel elektrik üretim tesisleri ve mevcut eski tip altyapılar enerji taleplerini karşılayamaması ile yenilenebilir enerji kaynaklı tesislerin şebekeye entegrasyonu ile daha karmaşık sistem yapıları oluşmuştur. Geleneksel santraller ile yenilenebilir üretim tesislerinin entegrasyonu bu husustaki ilk problem olmuştur. Tesisten müşteriye kadarki tüm aşamalar birbiri ile uyumlu ve bütünün parçaları gibi irtibatlı olmalıdır. Bu uyum ve düzen kadar akıllı şebeke birimlerinin ve haberleşme durumunun da hızı önemlidir. Müşteri veya tüketici grubundan gelen talep durumuna göre sistem aşamalarını kontrol altında tutmayla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarındaki düzensizlik veya değişikliklerin sistem yapısındaki etkilerine göre yapı tasarlanmalıdır. Bahsedilen bu sorunu gidermek için öncelikle yetersiz durumdaki altyapıda ihtiyaç duyulan geliştirmeler yapıp, iyileştirilmiş şebeke durumları oluşturulmalıdır (Koutitas, 2012).

Bu süreçte yenilenebilir enerji kaynaklarının durumunun ve devamlılığının kesin bilinmiyor olması da önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır (Chua, 2012). Güneş radyasyonu tahminleri bu tesislerinin çıkış gücünün tespitinde en önemli kaynak etkindir. Bundan dolayı yüksek kapasiteli şebekelerde yenilenebilir enerji kaynaklı üretim tesisleri ile geleneksel enerji üretim tesisleri aynı altyapıda beraber kullanılmakta, GES'ler yedek veya ikincil enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem ile çıkış gücünün tahminlemesi doğruluk oranı artmakta ve yük beslemeleri için enerjinin devamlılığı elde edilmektedir. Bu bakımdan yeni nesil enerji üretim altyapıları yenilenebilir ve geleneksel enerji üretim tesislerinin birleşimi olarak kabul edilmektedir (Bilal ve Khan, 2015).

PV'lerin şebeke yapısına bağlantısı işleminde en önemli etken durum eklenecek yapının mevcut şebekeye nasıl bir etkisi olacak durumudur. Mevcut yapının yük akım iletme kapasitesi, kısa devre gücü, gerilim düzeyi, sistem kararlılık durumu gibi kriterler değerlendirilerek bir güneş enerji sistemi GES'in şebekeye irtibatı sağlanmaktadır.

Geleneksel şebekelerde kullanılan koruma sistemleri, yeni nesil üretici ve tüketiciler için ihtiyacı karşılamamakta ve geleneksel koruma sistemleri hız ve güvenilirlik kriterleri dikkate alındığında geliştirilmesi gerekmektedir (Wei ve Oi, 2018). İşletim maliyetleri de dikkate alınarak koruma sistemlerinin optimal tasarımı çok önemlidir. Bu etkenler ışığında, şebeke entegrasyonundan önce yapılması gereken bir diğer analiz ise röle koordinasyon analizi çalışmasıdır. Şebeke altyapısında bulunan mevcut rölelerin seçici/selektif çalışma kriterlerine uyan röleler seçilip koordinasyon çalışması yapılmalıdır. Mevcut şebeke yapısına dahil edilecek olan bir GES için en iyi verimin alınması önemli bir kriterdir. Bu nedenle, GES sisteminin uygulanacağı bölgenin güneşlenme süresi ve güneş radyasyonu önemli etkenlerdir. Bununla beraber, GES entegrasyonu sağlanmasıyla sistemin verimi, en iyi enerjilendirme kapasitesi, çalışma aralığı genişlikleri kriterlerinin sağlanmış olması gerekir. Entegrasyonu için dikkat edilmesi gereken kriterlerden biri de kısa devre gücü ve dahil edilecek GES'in sistemin kısa devre gücünde meydana getireceği etkiler kontrol edilmelidir. Gerilim kaynakları sistemde problem durumunda oluşacak kısa devre akımını arttıracak bir etki yaparlar fakat dahil edilen yeni santralle birlikte kullanılacak röleler arızanın giderilip normale dönme süresini kısaltacak etki yapabilirler. Bu nedenle yeni tesisin şebekede meydana getireceği olumlu ve olumsuz etkilere dikkat edilmelidir (Afifi ve Darwish, 2014).

3.2. Fotovoltaik Dağıtık Üretimin Güç Dağıtım Şebekesine Entegrasyonu

Bir çok uluslararası şirket, devletler tarafından zorunlu hale getirilen Yenilenebilir Portföy Standartları'na (RPS - Renewable Portfolio Standards) uymak için, yatırımcılara ait çok sayıda fotovoltaik dağıtılmış üretim (PV-DG) tesisini dağıtım sistemlerine entegre etmektedir. Dağıtım sistemlerinin radyal bir şekilde (şebeke ile tüketici arasında tek bir hattın olduğu besleme şekli) çalıştırılmak üzere tasarlandığı gerçeği göz önüne alındığında; PV-DG'nin birbirine bağlanması, güç düşümleri önlemlerini belirlemek ve sorunsuz entegrasyonu sağlamak planlama aşamasında önemli hususlardır (Begovich ve ark., 2012). Bu çalışmanın amaçlarından biri, PV-DG'nin, sabit durum ve dinamik yapı dahil olmak üzere güç dağıtım sistemleri planlaması ve operasyonları üzerindeki etkilerini, şebeke ölçeğinde PV-DG'ye vurgu yaparak ele almaktır. Aynı zamanda örnek entegrasyon uygulaması ile karşılaşılan problemlerin analizlerini, bu problemlerin etkilerini ve dağıtım ağlarındaki diğer sonuçlarını sunmaktır.

Dağıtılmış üretim (DG), küçük ölçekli, dağınık, merkezi olmayan ve yerinde elektrik enerjisi sistemleri olarak tanımlanabilir. Şu anda, DG'lerin kapasiteleri tipik olarak birkaç kW ila yüzlerce MW aralığında değişmektedir. DG, elektrik enerjisi sistemlerine daha fazla nüfuz ettikçe, DG sisteminin çeşitli mikro şebekeler ve dağıtım ağları üzerindeki etkisini analiz etmek için daha doğru ve verimli sistem analiz algoritmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Belirsizliklerin etkisi, uygun şekilde optimize edilmiş Monte Carlo teknikleriyle modellenenebilir. Dağıtım sistemleri radyal bir şekilde çalışacak şekilde tasarlandığından, yani trafo merkezlerinden yüklere tek yönlü güç akışını sağlamak için tasarlandığından, potansiyel etkilerinin tanımlandığından ve gerekli azaltma önlemlerinin uygulandığından emin olmak için DG ara bağlantısının incelenmesi gerekir. Bazı etkilerin, geleneksel olanlar da dahil olmak üzere tüm teknolojilerde ortak olduğunu belirtmek gerekir (örneğin, pistonlu motorlar, küçük hidro, biyokütle, vb.), Ancak aralıklı DG (örneğin, birincil kaynağı fotovoltaik, rüzgar), uçucu ve kontrol edilemez doğası göz önüne alındığında belirli zorluklar ortaya çıkarmaktadır. DG dağıtım sisteminin işleyişini değiştirebildiği ve koruma ve kontrolüne müdahale edebileceğinden, elektrik enerjisi hizmetleri, müşterinin sahip olduğu küçük jeneratörleri dağıtım ağlarına bağlamaya uyarlanmamıştır. Kamu hizmetleri, kamu hizmeti dışı üretimi kapsamlı teknik analize sokma eğilimindedir. Tersine, düzenleyici otoriteler DG sahiplerinin lehine hareket etme ve ara bağlantının mümkün olduğunca kolay ve şeffaf olmasını destekleme eğilimindedir (Begovich ve ark., 2012).

Bu çalışmanın vurgularından biri, PV-DG nin geleneksel dağıtım sistemi etkileri, enerji tasarrufu, ekolojik yönler ve üretim maliyeti dahil olmak üzere, PVDG'nin artması ve hızlı çoğalması nedeniyle endüstrinin karşılaştığı bazı sorunları ve zorlukları incelemektir. Bölüm 3.2.1 'de PV endüstrisinin gelişimini ve en son teknoloji ve pazar gelişmelerinden bazıları araştırılıp paylaşılmıştır; Sonraki bölümlerde PV-DG 'nin güç dağıtım sistemlerinin planlanması ve işletilmesi üzerindeki potansiyel etkileri ve olumsuz etkileri azaltma önlemleri incelenip analiz edilmiştir.

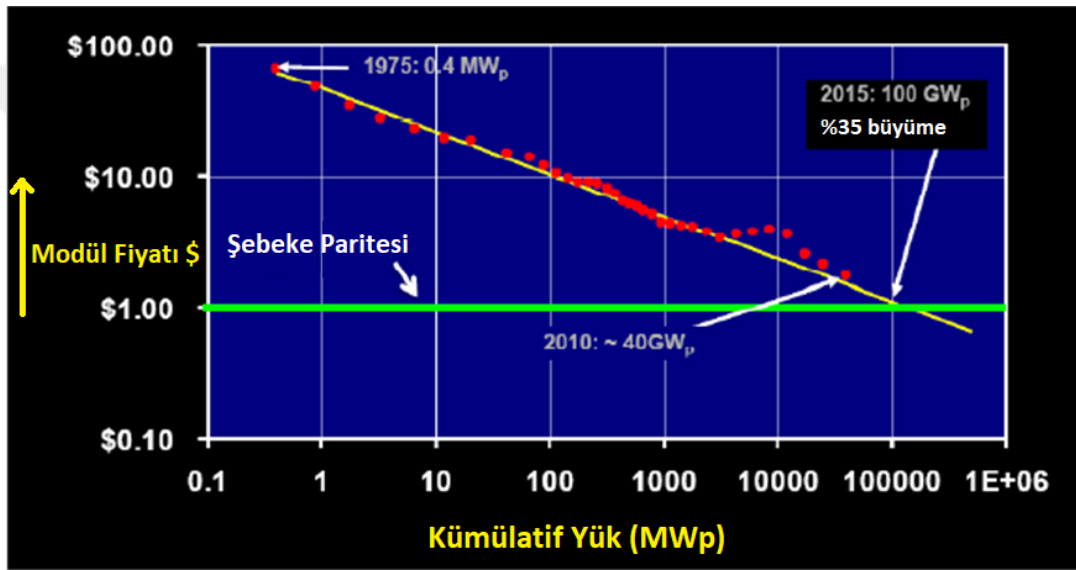
3.2.1. PV için Şebeke Paritesi Yol Haritası

Ticari PV enerji endüstrisi 1970'li yıllarda gelişmeye başladı. 40 yıl boyunca PV modüllerinin gerçek fiyatında % 70'lik bir düşüşe rağmen, PV'den gelen enerji, geleneksel üretim kaynaklarına kıyasla pahalı olmaya devam ediyor. Ayrıca, PV hücre verimliliği hala yüzde 20'nin altındadır . 80'lerin başlarında, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki siyasi

değişiklikler, güneş enerjisi araştırmalarına önemli ölçüde fon sağlamayı sona erdirdi ve ülke, o zamanlar küresel güneş enerjisi pazarının yaklaşık % 80 'ini temsil ettiğinden, dünya çapında güneş enerjisi gelişimini fiilen durdurdu. Bununla birlikte, 2008 yılında, hidroelektrik dahil yenilenebilir enerji kaynakları, Amerika Birleşik Devletleri'nde toplam elektrik üretiminin % 9 'undan fazlasını ve dünya çapında % 17.7 'sini oluşturuyordu. Çin, 2008'de yenilenebilir üretim kapasitesi açısından lider ülke oldu (o yıl 598 TWh yenilenebilir enerji üretildi). 2008 yılında dünyada toplam 3.584 TWh yenilenebilir enerji üretildi, bunun sadece 12 TWh'si solar PV jeneratörlerden, örneğin dünya elektrik enerjisinin % 16 'sı (3.288 TWh) hidroelektrik santrallerinden üretildi. Bununla birlikte, PV pazarı, 1982-1996 döneminde yılda % 13 oranında büyümüş ve 1996-2010 yılları arasında yıllık ortalama ~% 40 büyüme oranına daha da genişlemiştir. 2008'de Amerika Birleşik Devletleri'nde kümülatif güneş PV ağı kapasite 2007'ye göre % 44 arttı. Büyüme oranı, PV'nin elektrik üretiminde devam eden bir değişim olduğunu gösteriyor. PV modülü sevkiyatları, en hızlı büyüyen üretim kaynaklarından biri olarak 1982'den bu yana ortalama yıllık % 13 büyüme oranında arttı. Tahmini potansiyel büyüme, PV'yi 100 milyar dolarlık bir endüstriye dönüştürebilir. Kristal silikon (Si), yarım yüzyıldan fazla bir süredir PV hücreleri ve panelleri üretmek için en popüler teknoloji olmuştur ve sektörünün büyümesinin sebebi de büyük ölçüde PV üretim kaynaklıdır. Kristal Si, daha yüksek üretim maliyeti nedeniyle şu anda diğer malzemelerle güçlü bir rekabetle karşı karşıyadır, ancak yine de PV pazarının yaklaşık yüzde 90'ını temsil etmektedir. Hücre verimliliklerini artırmak ve maliyetlerini düşürmek için (Si) PV hücre üretiminin tüm alanlarında önemli yenilikler gerçekleştiriliyor. PV kurulu kapasitesinin hızlı büyümesinin dünya çapında devam etmesi beklenmektedir ve değişen üretim portföylerinin sonuçları, elektrik hizmetlerinin planlama, operasyonel ve diğer birçok uygulamasının dikkatle yeniden gözden geçirilip buna göre planlamalar yapılmasını gerektirecektir (Rohatgi ve ark., 2009).

PV üretimde hücre verimlilikleri hala yüzde 20'nin altındadır. Bununla birlikte, PV pazarının ölçeği, 1982-1996 döneminde yılda ~% 13 oranında büyümüş ve 1996-2010 arasında yıllık ortalama ~% 40 büyüme oranına daha da genişlemiştir. Kristal silikon (Crystalline Si), 1990-2007'de pazardaki payını % 68'den % 90'a çıkardı. Mevcut modül fiyatları yaklaşık 1,30 \$ / W ve 2,50 \$ / W arası değişebilmektedir, daha fazla kurulu güç fiyat düşüşüne ihtiyaç vardır. Güneşlenme oranının daha düşük olduğu bölgelerde şebeke paritesi için kurulu sistem fiyatının daha da düşük olması gerekir (Rohatgi ve ark., 2009).

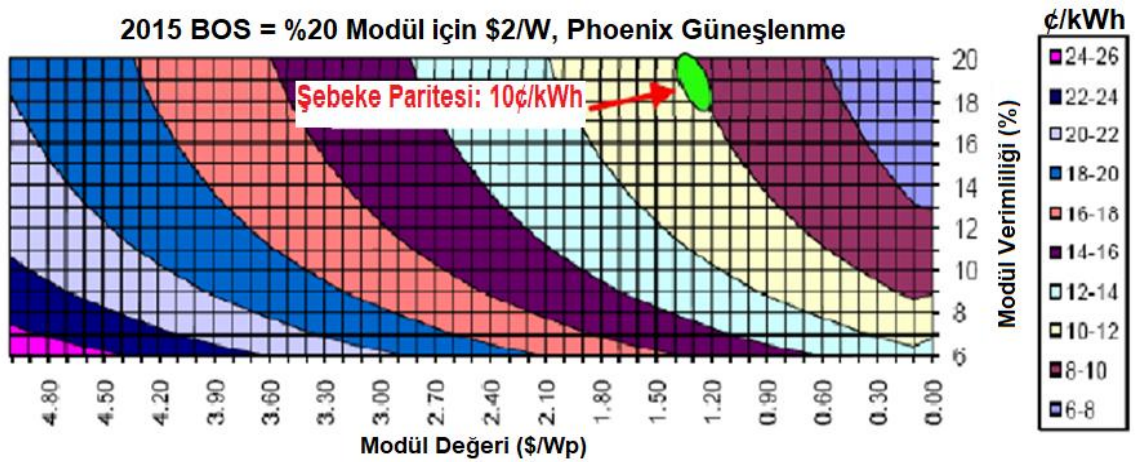
Şekil 3.1 PV endüstrisi için öğrenme-gelişim eğrisini göstermektedir: Dünyada kurulu PV miktarı iki katına çıktığında, PV modüllerinin fiyatı yaklaşık % 20 düşer. 1975'te PV modülleri, 0,4 MW kümülatif kurulu kapasite ile 80 \$ / W idi, halihazırda ~18 GW kurulu kapasitede modül fiyatları 2 \$ / W olduğu bilgisi kayıtlarda geçmektedir. Bu eğrinin ekstrapolasyonu (doğrusal olarak log-log alanında), kurulu PV kapasitesi 100 GW'a ulaştığında modül fiyatının 1 \$ / W'a düşebileceğini göstermektedir. Bu, 10 cent / kWh elektrik maliyetine karşılık gelir. Çeşitli koşullar nedeniyle (polikristalin Si, plaka ve invertör stok yetersizlikleri), PV endüstrisi kapasitesindeki büyümenin geçici olarak yavaşlayabileceği öngörülmektedir (Kim ve Polivarapu, 2011).



Şekil 3.1. PV endüstrisi öğrenme eğrisi (Rohatgi ve ark., 2009)

Son dönemde olumsuz ekonomik koşullara rağmen; Japonya'daki tsunami ve deprem olayları sonrası ciddi şekilde hasar gören elektrik santralleri, felaket olayları ve TEPCO'nun (Tokyo Electric Power Company) Fukushima Daiichi'deki üçlü (muhtemelen daha büyük) nükleer reaktör erimeleri hakkında tüm dünyaya hızla yayılan haberlerin dalgaları göz önüne alındığında, PV için büyümede bir miktar artış bekleniyor. Haziran 2011'de, Alman hükümeti 17 nükleer reaktörünü 2022 yılına kadar 40 milyar dolarlık beklenen maliyetle kalıcı olarak kapatma planını açıklamıştı. Alman hükümeti aynı zamanda, bu kararın neden olduğu üretim kaybını kısmen telafi etme planının bir parçası olarak yenilenebilir üretim teknolojilerine artan bağlılığını açıkladı. Elektrik üretiminin yaklaşık yüzde 80'i için nükleer enerjiye bel bağlayan Fransız hükümeti, nükleer kaynaklarında yüzde 5'lik bir azaltma yapmayı düşünürken, İtalyan

hükümeti tüm yeni nükleer girişimlerin dondurulduğunu açıklarken, diğer hükümetler de benzer önlemler planlayarak yenilenebilir enerjide trende uymaktadır. Bu kararlar yenilenebilir enerjinin teşviki ile eşdeğer olmasa da, PV'ler dahil olmak üzere tüm yenilenebilir teknolojilerin artan yaygınlaşmasıyla kısmen dengelenmesi mümkün olacak enerji kıtlığı yaratacaklar. Şekil 3.2 teknoloji geliştirme ihtiyacını ölçmek için LCOE (seviyelendirilmiş elektrik maliyeti) için bir yol haritasını göstermektedir. LCOE konturları, USA Phoenix'te bir konum için modül fiyatının ve verimliliğinin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Örnek olarak, 1,00 ila 1,25 ABD Doları / W fiyatındaki %18 ila %20 verimli modüller ~ 10 ¢ / kWh'de elektrik üretebilir. Bu durum % 20 verimli modüller için BOS (konut sistem dengesi) maliyetinin 2 \$ / W olduğunu varsayar ve bunun sonucunda kurulu sistem maliyeti 3.0 \$ olur. Şekil ayrıca, 10 ¢ / kWh'de elektrik üretmek için % 10 verimli bir modülün fiyatının ~ 60 ¢ / kW olması gerektiğini ve %8' den az verimli bir modülün, önemli olmadıkça ücretsiz olsa bile şebeke paritesine ulaşamayacağını göstermektedir. Daha düşük maliyetler ancak daha yüksek verimli hücreler tarafından sağlanabilir çünkü BOS maliyetinin değişken bileşeni (kurulum işçiliği, donanım ve arazi alanı), daha büyük sistem alanı nedeniyle daha düşük verimlilikle artar. %0,5 / °C verimlilik düşüş katsayısına (KT) sahip %15 verimli bir modülün, 10 ¢ / kWh'de elektrik üretmek için 1,38 \$ / W'a mal olması gerekir. % 18 verimli bir modül, daha düşük BOS maliyeti nedeniyle 1.17 \$ / W fiyatla aynı hedefe ulaşabilir. Bununla birlikte, %18 verimli bir modül (~% 20 verimli hücreler) genellikle daha yüksek açık devre voltajına ve daha düşük sıcaklık katsayısına KT'ye ($\leq 0,4$ / °C) sahiptir (Kim ve Polivarapu, 2011).



Şekil 3.2. Modül maliyeti ile verimlilik arasındaki ilişki ve elektrik maliyeti (Kim ve Polivarapu, 2011).

Kurulumun maliyet durumu açısından, modül fiyatı aynı zamanda yerel perakende elektrik ve güneş akısı veya güneşlenme fiyatının bir fonksiyonudur. Şebeke paritesi için gerekli modül fiyatının, modül verimliliğinin, verimlilik düşüşü için sıcaklık katsayısının, modül ömrünün, yerel elektrik fiyatının ve güneşe maruz kalmanın güçlü bir fonksiyonu olduğunu bilmek önemlidir, çünkü tüm bu faktörler modül tarafından üretilen toplam gücü etkiler. Silikon PV teknolojisi, 2015 yılına kadar şebeke paritesine ulaşma hedefiyle tutarlı olarak iyileştirilmiş hücre verimliliklerinden ve daha düşük maliyetlerden yararlanıyordu. Kristal büyümesi, külçe dilimlemedeki yenilikler ve daha ince gofret kullanımıyla verimlilik artışı için maliyet düşürme çalışmalarıyla faydalar sağlanmaktadır. Model hesaplamaları, 40\$/kg hammaddeden üretilen $\sim 170 \mu\text{m}$ (mikrometre, milimetrenin binde biri) kalınlığındaki gofretler üzerindeki %20 ekran baskılı hücrelerin $\sim 1,20\$/\text{W}$ modüllere, $\leq 3,0 \$ / \text{W}$ kurulu sistem maliyetine ve $\sim 10 \text{ ¢} / \text{kWh}$ LCOE'ye yol açabileceğini göstermektedir. 2020-2021 yılları güncel fiyatlarıyla ortalama panel fiyatları 60-70 hücreli 158,75 mm hücreli 330-400 Watt panellerde KW'ı 27,5-29,5 USD cent civarında oluşmakta olup; 166 mm hücrelerde de 360-440 Watt'da 29-30 USD cent değerlerinde oluşmaktadır (myenerjisolar, 2021).

3.2.2. PV Dağıtık Üretim

Çok sayıda Kuzey Amerika şirketi, dağıtım besleyicilerinde yatırımcıya ait PV-DG dağıtılmış üretimin hızla çoğalması durumunu yaşamaktadır. Bu durum, Yenilenebilir Portföy Standartlarının (RPS) ve yenilenebilir kaynaklar kullanılarak elektrik üretimi için teşviklerin varlığından kaynaklanmaktadır. PV-DG'ler; mikro, küçük, orta ve faydalı ölçekli olarak sınıflandırılabilir:

- a) Mikro ölçekli PV-DG, yüksek oranda dağıtılmış VA boyutlu tek fazlı ünitelerden (örneğin, 200 W) oluşur.
- b) Küçük ölçekli PV-DG, meskenlerin çatılarına monte edilenler gibi birkaç kW boyutlu tek fazlı ünitelerden (örneğin, 5 ila 10 kW) oluşur.
- c) Orta ölçekli PV-DG, küçük ticari binaların çatılarına monte edilenler gibi daha büyük kW boyutlu üç fazlı ünitelerden (örneğin, 100 ila 500 kW) oluşur.

- d) Şebeke ölçeğindeki PV-DG, dağıtım fiderleri ve trafo merkezleri tarafından yönetilebilen nominal kapasitelere sahip MW boyutlu üç fazlı ünitelerden oluşur, örnek olarak 500 kW ile 10 MW arasında (Agüero ve Steffel, 2011).

PV-DG entegrasyonunda, aktif ve reaktif güç akışları üzerindeki etkiler şunlardır; voltaj profilleri üzerindeki etkiler (voltaj yükselmesi, voltaj dengesizliği), voltaj kontrol ve düzenleme ekipmanıyla etkileşim (LTC' ler, voltaj regülatörleri, kapasitör bankları), ekipman bakımı ve yaşam döngüsü, besleyici yüklemesi, aşırı akım ve aşırı gerilim koruması (örneğin, aşırı akım koruma cihazlarının erişiminin değiştirilmesi, geçici aşırı gerilim durumu), elektrik kayıpları, güç faktörü ve güç kalitesi gibi önemli hususlarda etkilenme ve değişimler söz konusu olabilmektedir. Bu etkiler, hizmet ölçeğindeki PV-DG ve daha küçük ölçekli PV-DG 'lerin çoğalmasından kaynaklı oluşabileceğini belirtmek gerekir. Darbe şiddeti, PV-DG'nin penetrasyon seviyesinin ve konumunun bir fonksiyonudur. Ters güç akışı, dağıtım besleyicileri üzerindeki PV-DG etkilerinin ana itici güçlerinden biri olduğundan, penetrasyon seviyesi, önceden tanımlanmış bir besleyici talebine karşı PV-DG'nin toplam kurulu kapasitesinin oranı olarak bir besleyici temelinde tanımlanabilir. Bir yaklaşım olarak, PV-DG sisteminin AC derecelendirmelerini (PPVAC) ve maksimum PV-DG çıkışı (PFmin,PVmax) zamanlarında yıllık minimum besleyici yükünü kullanmaktır. Örneğin Denklem 3.1'de gösterilen eşitlik öğle vakti gibi $P_i, PVAC$, besleyicideki i-inci PV-DG tesisinin AC derecelendirmesidir (Ropp ve ark., 2008).

$$P = \frac{\sum_{i=0}^n P_{i,PV AC}}{PF_{min,PVmax}} \quad (3.1)$$

Bu tanım kullanılarak aşağıdaki penetrasyon seviyeleri tanımlanabilir

- Düşük Penetrasyon:

$$\sum_{i=0}^n P_{i,PV AC} < k_1 PF_{min,PVmax}$$

- Orta Seviye Penetrasyon:

$$k_1 PF_{min,PVmax} < \sum_{i=0}^n P_{i,PV AC} < k_2 PF_{min,PVmax}$$

- Yüksek Penetrasyon:

$$\sum_{i=0}^n P_{i,PV} AC > k_2 P_{Fmin,PVmax}$$

Dağıtım trafo merkezleri veya ayrı dağıtım transformatörleri için penetrasyon seviyelerini belirlemek için benzer bir tanım kullanılabilir, bu durumda $P_{Fmin,PVmax}$, sırasıyla $P_{Submin,PVmax}$ ve $P_{Transfmin,PVmax}$ ile değiştirilmelidir k_1 ve k_2 seçimi, diğerlerinin yanı sıra, şirketin dağıtım planlamasına ve işletim kılavuzlarına ve kriterlerine, sistem özelliklerine vb. bağlı olacaktır. Örneğin, $k_1 = 1$ ve $k_2 = 2$ ise, düşük penetrasyon seviyesi ters güç akışına yol açmaz, orta düzeyde penetrasyon, "makul" ters güç akışına neden olur ve yüksek penetrasyon, dağıtım besleyici seviyesinde "şiddetli" ters güç akışı üretir. PV-DG'den etkilenmeye daha yatkın olan besleyicilere sahip bir yardımcı program, penetrasyon seviyelerini tanımlamak için $k_1 = 0.5$ ve $k_2 = 1$ kullanmayı tercih edebilir. Konvansiyonel DG (geleneksel dağıtık üretim) çıktısının nispeten sabit ve kontrol edilebilir olduğu bilinmektedir, bu nedenle etkilerinin çoğu kararlı durum analizleri ile incelenebilir. Birincil kaynağın kesintili olması durumlarında, PV-DG etkilerinin de dinamik çalışmalarla analiz edilmesi mümkündür. Bu çalışmaların karmaşıklığı göz önüne alındığında, etkilerin ve etki azaltma önlemlerinin belirlenmesi daha zordur ve kamu hizmetleri ve dağıtım planlayıcıları genellikle bunlarla başa çıkmak yeterince hazırlıklı değildir. Ayrıca, tüm bu durumların uygun bir şekilde dikkate alınmasını sağlamak için mevcut birçok altyapı ara bağlantı standardı ve planlama kılavuzunun yeniden gözden geçirilmesi gerekmektedir (Begovich ve ark., 2012).

Bir sonraki 3.2.3. bölümde, PV-DG'nin güç dağıtım sistemleri üzerindeki etkilerini ve bunları azaltmaya yönelik önlemleri, şebeke ölçeğindeki PV-DG 'ye vurgu yaparak değerlendirilmiştir. Çok çeşitli olası olayları ve etkileri tespit etmek için, gerçek dağıtım besleyiciler üzerinde çeşitli senaryolar için gerçekleştirilen analizlerin sonuçları sunulmakta ve değerlendirilmektedir. Bu senaryolar, PV-DG 'nin farklı penetrasyon seviyelerini ve konumunu ve çeşitli besleyici yükleme koşullarını kapsar.

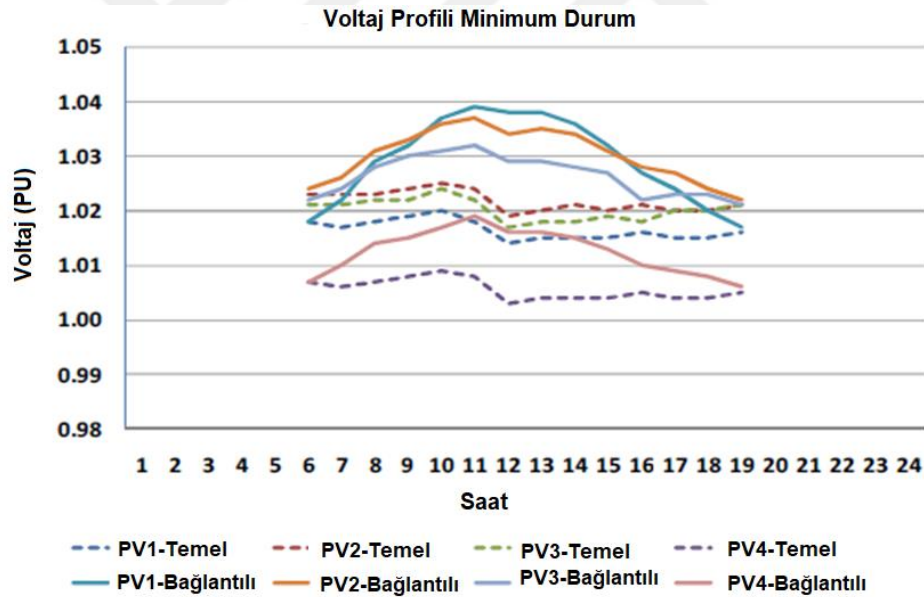
3.2.3. Dağıtım Sistemleri Üzerindeki PV-DG Etkileri

PV-DG entegrasyonunun dağıtım sistemleri üzerindeki en yaygın etkilerinden bazıları şunlardır:

a) Ters güç akışı: PV-DG 'nin yüksek penetrasyon seviyeleri, besleyici ve trafo merkezi trafo seviyesinde ters aktif güç akışına neden olabilir. Bu durum, aşırı akım koruma

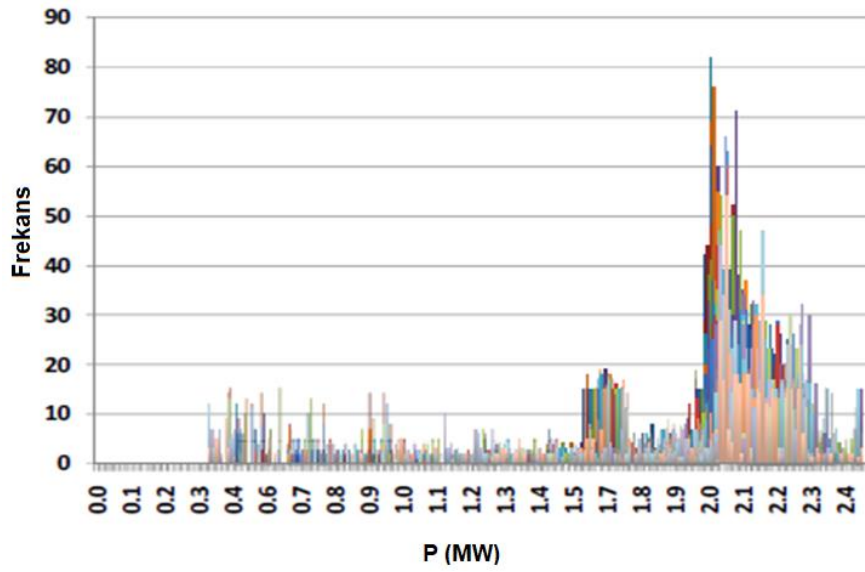
koordinasyonunu ve özellikle ileri çalışma modu ve / veya Hat Düşme Telafisi (LDC) için ayarlanmış olan hat voltaj regülatörlerinin çalışmasını etkileyebilir. Ayrıca, trafo merkezi trafo seviyesindeki ters güç akışı, bazı trafoların gerilimlerini ve yükleme sınırlarını etkileyebilir.

b) Voltaj artışı: PV-DG entegrasyonu, besleyici voltaj profillerini değiştirir ve özellikle PV-DG tesis sahalarına yakın yerlerde önemli voltaj artışına neden olabilir. Bu, tesis planlama sınırlarında ve endüstri standartlarında ihlallere neden olabilir, müşterilerden şikayetlere neden olabilir ve PV-DG tesislerinin aşırı gerilim koruma sistemlerinin çalışmasına neden olabilir. Şekil 3.3, dört PV-DG tesis sahasındaki sabit durum voltaj artışının bir örneğini göstermektedir. Voltaj artışının büyüklüğü PV-DG çıktısının bir fonksiyonu olduğundan, bu durumda voltaj profilleri, PV-DG çıktısının tipik çan şeklini izler. Uzun, hafif yüklü besleyicilerin ucuna büyük PV-DG üniteleri bağlandığında, gerilim artışı entegrasyon için bir sınırlamadır (Begovic ve ark., 2012).



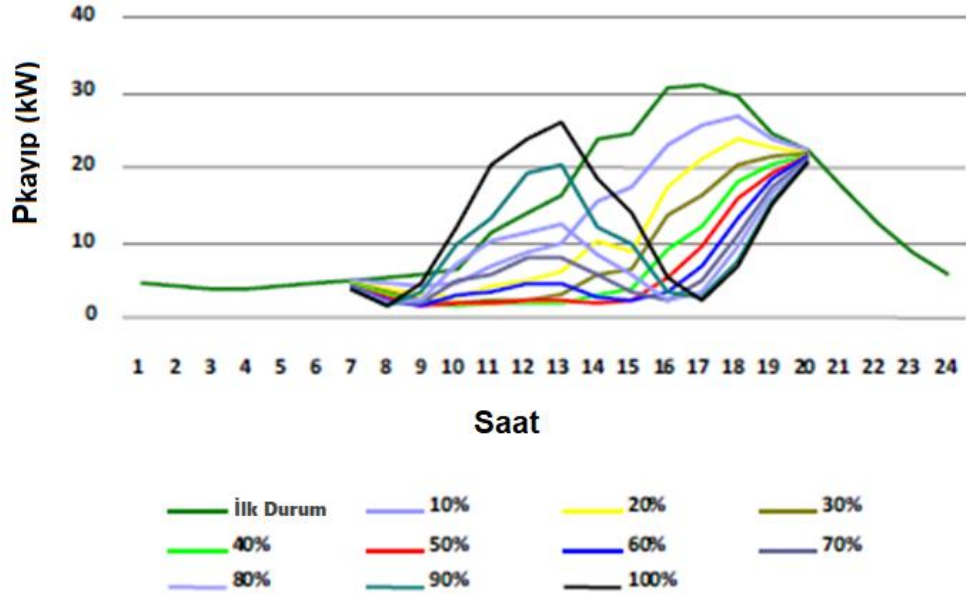
Şekil 3.3. PV-DG tesis sahalarında voltaj artışı (Azaltma yok) (Begovic ve ark., 2012)

c) Voltaj dalgalanmaları: PV-DG kesintisinin, besleyici voltajları üzerinde önemli etkileri olabilir. Bu, düşük kısa devre güç seviyelerine sahip, yani düşük sertlik faktörüne sahip besleyicilerde ve dağıtım trafo merkezlerinden uzakta bulunan PV-DG tesislerinde daha belirgindir. Şekil 3.4 ve 3.5, PV-DG kesintisinin örneklerini gösterir. Şekil 3.4, 2010 Ağustos ayı için gerçek bir PV-DG tesisinin çıkış profillerini göstermektedir. Bu grafik, birkaç dakika içinde 1,5 MW 'a varan büyüklüklerde önemli dalgalanmaların meydana



Şekil 3.5. PV-DG çıkış aralıkları histogramı (Cipcigan ve Taylor, 2007).

e) Besleyici Yüklemesi ve Güç Kayıpları Artışı: PV-DG'nin düşük ve orta düzeyde penetrasyon seviyeleri genellikle besleyici akımlarının büyüklüğünü düşürür, özellikle gündüz saatlerinde zirve yapan besleyicilerde, bu da dönüş kayıplarını (hat akımının karesiyle orantılıdır) ve genel besleyici yükünü azaltır. Diğer taraftan PV-DG'nin yüksek penetrasyon seviyeleri, ters güç akışına neden olabilir ve dağıtım hattı akımlarının, hat kayıplarının ve ekipman yükünün büyüklüğünü artırabilir. Bu durumlar besleyici yük profilinin bir fonksiyonu oldukları için her iki durum da gün içinde aynı besleyicide meydana gelebilir. Şekil 3.7'de gösterildiği gibi bu durum çeşitli penetrasyon seviyeleri için, örneğin %100 penetrasyon için, kayıplar (temel duruma göre) başlangıçta özellikle öğle saatlerinde artar ve daha sonra öğleden sonra geç saatlerde azalır. Besleyici kayıpları üzerindeki genel etki, anlık kayıplar yerine ortalama hesaplanarak değerlendirilebilir (Begovic ve Pregelj, 2000).



Şekil 3.7. İki gerçek dağıtım besleyicisi için PV-DG penetrasyon seviyesinin bir fonksiyonu olarak besleme kayıpları (Begovic ve Pregelj, 2000)

f) Aşırı akım ve aşırı gerilim koruması: PV-DG'nin koruma sistemleri üzerindeki potansiyel etkileri arasında, tekrar kapamalar ve röleler gibi aşırı akım koruma cihazlarının erişim modifikasyonu ve kazara ada koşullarında topraklanmamış sistem çalışması nedeniyle Geçici Aşırı Gerilim (TOV) yer alır. Genel aşırı akım koruma koordinasyonu da etkilenebilir.

g) Voltaj kontrollü kapasitör bankları, LTC'ler ve hat voltaj regülatörleri ile etkileşim: Voltaj yükselmesi ve voltaj dalgalanmaları, LTC'lerde ve hat voltaj regülatörlerinde kademe değişimlerinde bir artışa neden olabilir ve voltaj kontrollü kondansatör gruplarının anahtarlanmasına neden olabilir. Bu da ek voltaj ve reaktif güç akışı dalgalanmalarına neden olabilir, güç kalitesini, ekipman bakım sıklığını ve yaşam döngüsünü etkileyebilir ve Koruma Voltajı Azaltma (CVR) gibi gelişmiş Volt-VAr Optimizasyon (VVO) şemalarının uygulanmasını etkileyebilir (Begovic ve ark., 2012).

3.2.4. Zararlı Etkileri Azaltma Önlemleri

PV-DG entegrasyonunun neden olduğu kararlı durum ve dinamik sorunların ciddiyeti, zararlı etki çalışmaları ile tahmin edilmektedir. Bu çalışmaların amacı, zararlı etkileri hafifleten ve PV-DG tesislerinin entegrasyonunu kolaylaştıran ekonomik olarak uygulanabilir hafifletme önlemlerini belirlemektir. Etki azaltma önlemleri, çalışmalar sırasında tespit edilen etkilerin (kararlı durum, dinamik veya her ikisi) ve geçerli

düzenleme, politikalar ve standartların doğasının bir fonksiyonudur. PV-DG etkilerini hafifletmek için alternatifler, geleneksel ve akıllı şebeke yaklaşımları olarak sınıflandırılabilir. Geleneksel yaklaşımlar, mevcut teknolojilerin kullanımını içerir, bunun örnekleri şunlardır:

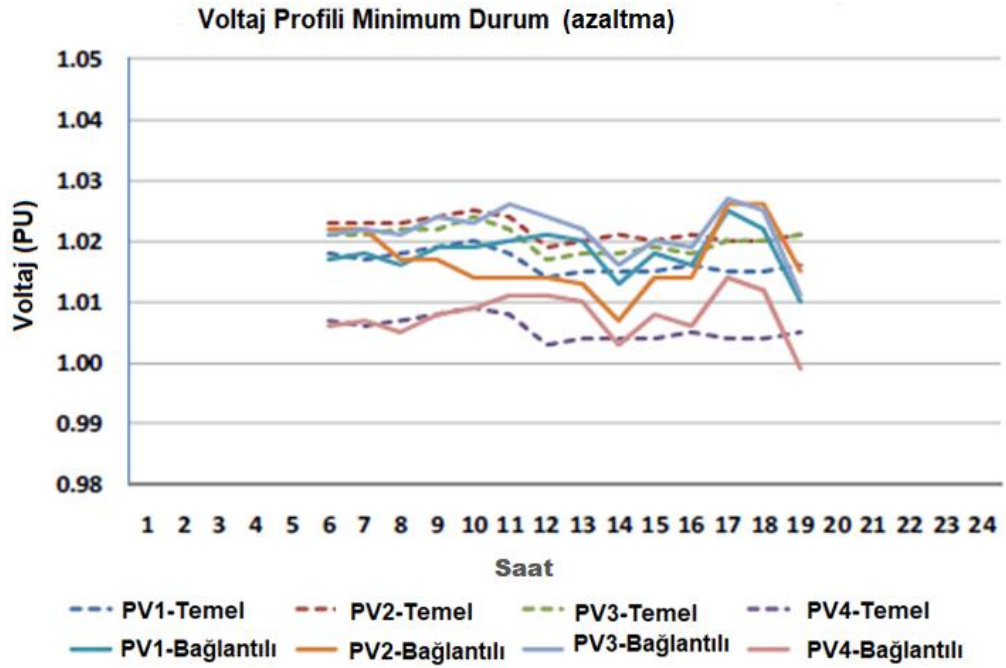
- a) Hat voltaj regülatörlerini ve LTC 'leri (Yük Kademe Değiştiricisi) kojenerasyon veya çift yönlü çalışma modlarına ayarlanır ve kontrol ayarlarını (örn. referans voltajı), PV-DG tarafından sunulan voltaj artışı ve yük ofsetini (örn. hat düşüşü telafisi uygulamaları için) hesaba katacak şekilde değiştirilir veya özelleştirilir.
- b) Kapasitör banklarının kontrol ayarları değiştirilir, mevcut kapasitör gruplarını yeniden konumlandırıp ve sabit kapasitör banklarına kontroller kurulur.
- c) Sabit durumdaki yüksek voltaj, voltaj ve akım dengesizliğini azaltmak ve voltaj dalgalanmalarını azaltmak için besleyici yükleri yeniden dengelenir.
- d) Şebeke ölçeğindeki PV-DG tesislerinin bağımsız ara bağlantısı için ekspres veya özel besleyiciler kullanılır (ekspres besleyiciler trafo merkezinden daha uzak alanlara enerji aktarımında kullanılır).
- e) Ekspres besleyici voltajı ve yıllık enerji kayıpları gibi hususlar, ekspres fiderlerin uzunluğunu ve bununla birbirine bağlanacak PV-DG tesislerinin maksimum kapasitesini seçmek için önemlidir (Begovic ve ark., 2012).

Akıllı şebeke yaklaşımları, yeni teknolojileri ve yeni operasyonel metodolojileri kullanır, bunun örnekleri şunlardır:

- a) PV-DG tesislerini, sabit birim olmayan öncü güç faktöründe (inverter sınırları dahilinde VAr's Volt-ampere emerek) veya bir güç faktörü çizelgesi altında çalıştırılır.
- b) PV-DG invertörleri veya ticari olarak D-VAr olarak bilinen dağıtım Statik Senkron Kompansatör (STATCOM) gibi Esnek AC Dağıtım Sistemlerini (FACDS) kullanarak dinamik volt-VAr kompanzasyon şemaları uygulanır.
- c) Kesinti koşulları sırasında PV-DG çıkışını düzenlemek sabitlemek ve voltaj dalgalanmalarını azaltmak için (Distributed Energy Storage- Dağıtılmış Enerji Depolama) DES kullanılır.
- d) PV-DG'nin kazara adalanması sırasında topraklanmamış sistem çalışmasını ve TOV'u (Geçici Aşırı Gerilim) önlemek için Doğrudan Transfer Yolculuğu şemaları (DTT) veya topraklama bankaları kullanılır.
- e) Aşırı akım korumanın hatalı çalışmasını önlemek için yönlü koruma kullanılır.

f) Adalanmayı algılamak için GPS tabanlı senkrofazör ölçüm teknolojisi (Senkrofazör ölçümü, elektrik güç sistemlerinde arızaları tespit etmek ve sistem kararlılığını izlemek için yaygın bir araçtır) kullanılır (Ropp ve ark., 2008).

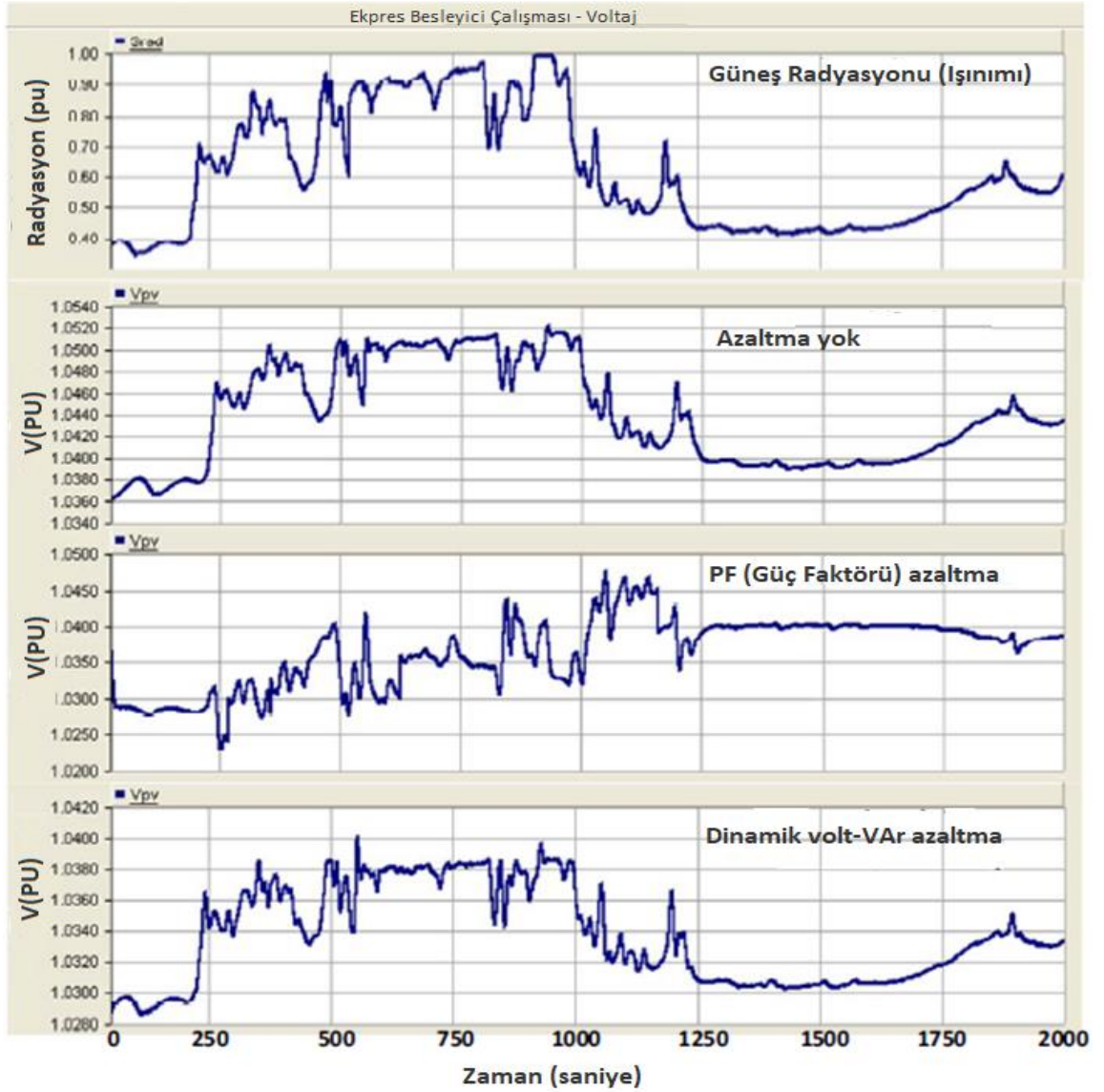
Şekil 3.8 ve önceki paragraflarda gösterilen Şekil 3.3 ile aynı tesisler için sabit birleşik olmayan öncü güç faktöründe PV-DG tesislerini çalıştırmanın simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Ölçü sonuçları, PV-DG tesis sahalarındaki sabit durum voltaj artışının bu azaltma ile hafifletildiğini göstermektedir.



Şekil 3.8. PV-DG tesis sahalarında voltaj yükselmesi (0,97'lik sabit birleşik olmayan öncü güç faktörü kullanılarak azaltma durumu) (Begovic ve ark., 2012).

Bununla birlikte, bazı durumlarda sabit bir birim olmayan öncü güç faktörünün kullanılması, kesinti durumlarının neden olduğu hızlı PV-DG çıkış dalgalanmaları sırasında voltaj dalgalanmalarını veya voltaj ihlallerini azaltmaz (bulutlanma nedeniyle meydana gelen güneş radyasyonu dalgalanması). Bu tür bir durum, PV-DG invertörleri kullanan bir dinamik volt-VAr dengeleme şemasının uygulanmasını gerektirebilir, bu şemalar, voltajları önceden tanımlanmış sınırlar içinde tutmak için, invertörlerin reaktif güç çıkışını, yani tesis güç faktörünü dinamik olarak değiştirir. Şekil 3.9, a) güneş radyasyonunu (üst eğri) ve üç durumun bir karşılaştırmasını göstermektedir, b) azaltma yok, c) sabit, dayanıksız öncü güç faktörü kullanılarak azaltma ve d) PV-DG invertörleri

kullanılarak dinamik volt-VAr dengeleme şeması kullanılarak azaltma. Bu simülasyonlarda maksimum voltaj limiti 1.04 PU 'dır (Per-Unit: birim değer). Sonuçlar, dinamik volt-VAr kompanzasyonunun güç faktörü azaltmadan nasıl daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir. Azaltıcı olmayan en yüksek voltaj 1,052 PU 'yu aşıyor (b eğrisi), güç faktörü azaltma 1.05 PU ile sınırlıdır (c eğrisi) ve volt-VAr kompanzasyonu ile 1.04 PU ile sınırlıdır (d eğrisi) (Begovic ve Kim, 2011).

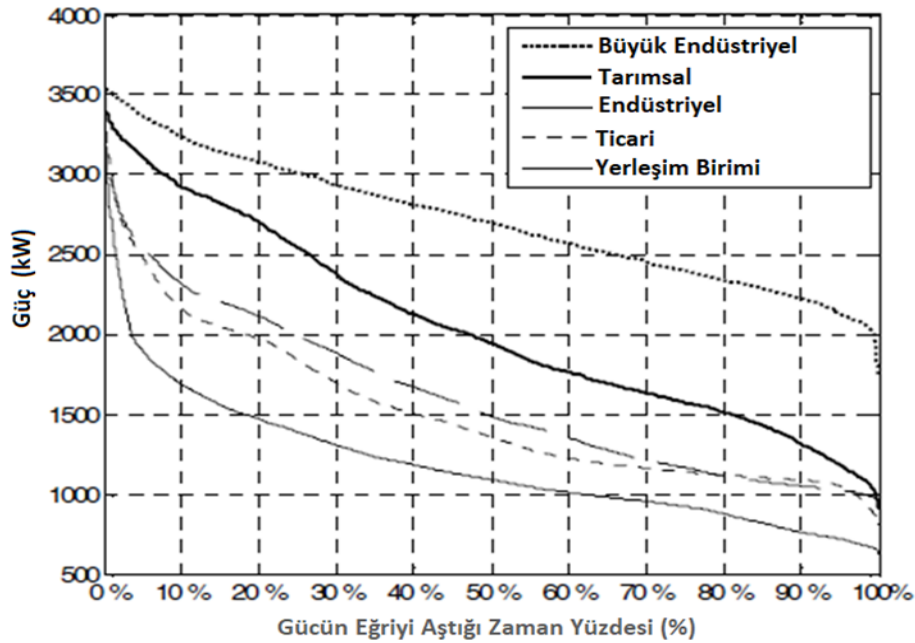


Şekil 3.9. PV-DG tesis sahalarında PV-DG tesis sahasındaki dinamik voltaj dalgalanmaları:

- a) güneş radyasyonu, b) azaltma yok, c) 0.97'lik sabit, dayanıksız lider güç faktörü kullanılarak azaltma ve d) PV-DG invertörleri kullanarak dinamik volt-VAr kompanzasyon şeması kullanılarak azaltma (Begovic ve Kim, 2011).

3.2.5. PV-DG'nin Üretim Maliyetleri Üzerindeki Etkileri

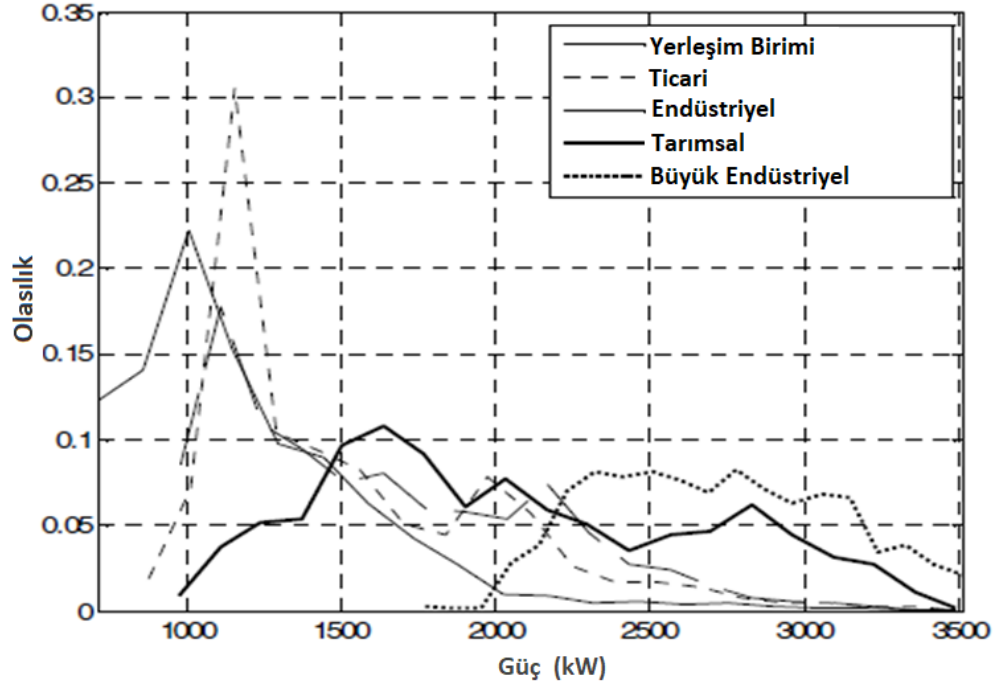
Aşağıdaki bölümlerde, besleyiciye dağıtılan çeşitli PV-DG kapasitelerini içeren bir kurulum ekolojik ve ekonomik etkinlik açısından incelenmiştir. Bazı basitleştirici varsayımlar yapılırken (çoğunlukla gerçek verilerin eksikliğinden dolayı), çıkarılan sonuçlar bu basitleştirmelerden etkilenmez. Bir yük profili, müşteri türüne göre (konut, ticari, tarım ve pompalama, endüstriyel ve büyük endüstriyel müşteriler) zaman içinde değişir. Bu analizde kullanılan yük profilleri gerçek verilerden alınmıştır. Çeşitli yük türlerini istatistiksel olarak hesaba katmak için, güç faktörü 0,85'in üzerinde tutulurken reaktif güç tüketimi rastgele oluşturulur. Tüm bireysel müşteri yüklerinin besleyicide neredeyse aynı yük profillerine sahip olduğu varsayılır. IEEE 123 test besleyicisine uygulanan besleyici tepe talebinin 3,49 MW olduğu varsayılmaktadır. Farklı yük profillerinin özellikleri Şekil 3.10 ve 3.11 'de analiz edilmektedir. Şekil 3.10, her bir yük tipinin toplam aktif gücünün yük süresi eğrilerini göstermektedir. Büyük endüstriyel tip yüklerin en çok aktif güç yükü profilini aştığını, konut tipi yüklerin ise bunu aşma ihtimalinin en düşük olduğunu göstermektedir. Şekil 3.11, her bir yük tipinin toplam aktif gücünün olasılık eğrilerini göstermektedir (Begovich ve ark., 2012).



Şekil 3.10. Her yük türünün yıllık 3 fazlı aktif gücünün süre eğrileri (Begovic ve ark., 2012)

DG (dağıtılmış üretim) kullanımı ve yük profili arasındaki etkileşim, toplam enerji maliyetlerini etkileyecektir. Şebeke için, DG kullanmanın yararı, zirve seviyelerine yakın

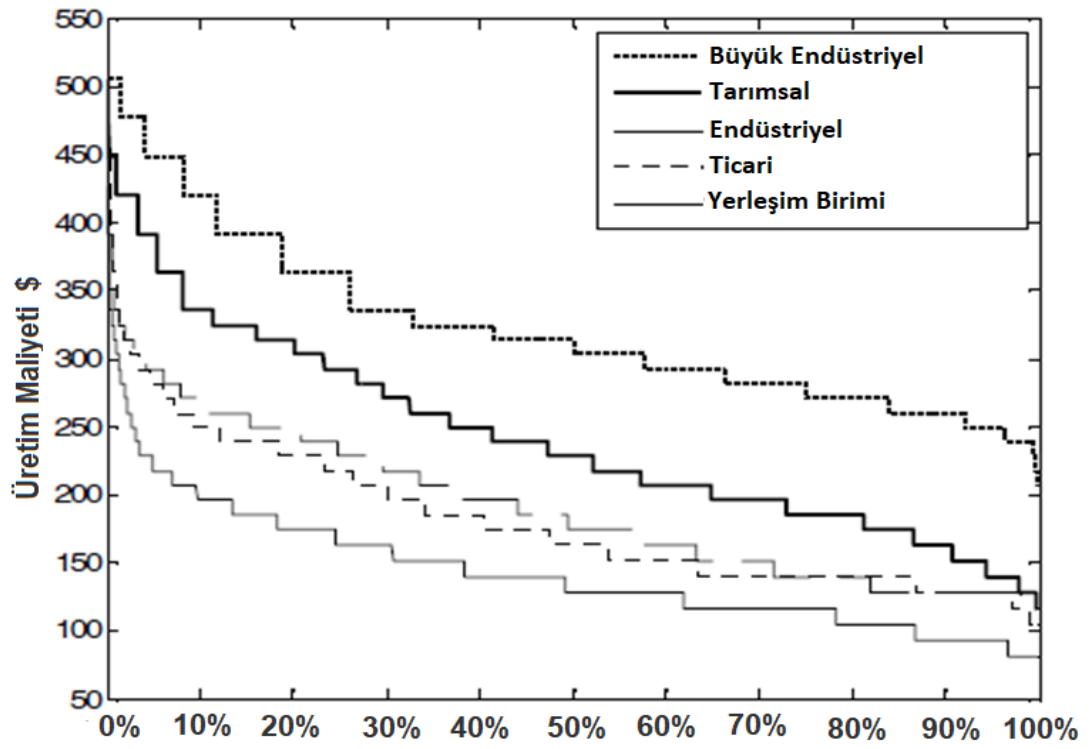
enerji üretiminden kaçınılması ve iletim ve dağıtım kayıplarının azaltılmasıdır. Kurulduğu dağıtım ağlarında etkin besleyici yükünün azaltılması, iletim ve dağıtım kayıplarını da azaltır. Toplam enerji tasarrufu, toplam üretim maliyeti tasarrufuna dönüştürülebilir. Baz, orta ve en yüksek güç üretimi için varsayılan maliyetler Tablo 3.1'de gösterilmiştir. 100 kW'lık bloklardaki üretim maliyet eğrisi Şekil 3.12'de gösterilmiştir (Rohatgi ve ark., 2009).



Şekil 3.11. Her yük türünün yıllık 3 fazlı aktif gücünün olasılık eğrileri (Begovich ve ark., 2012)

Tablo 3.1. Üretim için seviyelendirilmiş maliyet verileri (Begovic ve Pregelj, 2000)

Power (Güç)	Capacity (Kapasite) (kW)	Fuel (Yakıt)	Generation Cost (Üretim Maliyeti) (\$/MWh)
Base Power (Temel Güç)	0~1500	Coal (Kömür)	Coal: 78\$ ~ 144 \$
		Nuclear (Nükleer)	Nuclear: 107\$ ~ 138\$
Intermediate Power (Ara Güç)	1500~3000	IGCC (Entegre Basınçlı Gaz)	IGCC: 110\$ ~ 141\$
		GCC Basınçlı Gaz	GCC: 74\$ ~ 102\$
Peak Power (En yüksek Güç)	3000~	Gas Turbine (Gaz Türbini)	Gas Peak: 225\$ ~ 342\$



Şekil 3.12. Her yük tipinin 100 kW'lık bloklardaki üretim maliyet eğrisi (Rohatgi ve ark., 2009)

4. FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN ŞEBEKE GÜÇ SİSTEMLERİNE ENTEGRASYONUNDA KARŞILAŞILAN PROBLEMLER

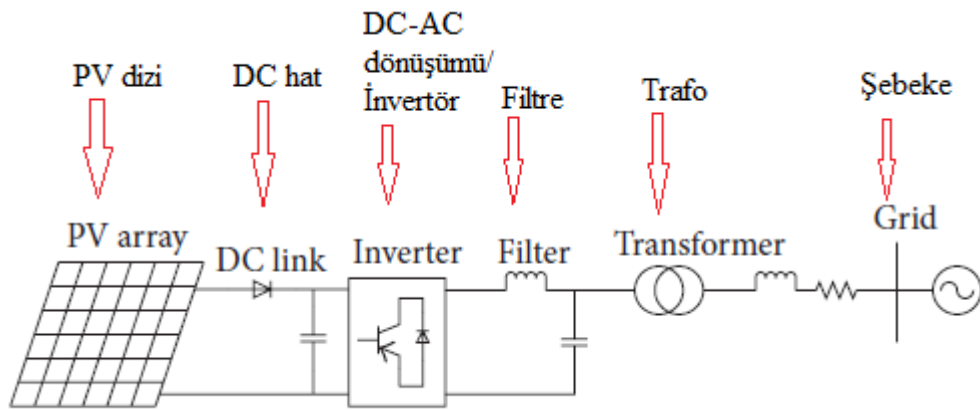
Bu bölümde tezin konusunun odak noktası olan PV tabanlı dağıtılmış üretimin (PVDG) güç sistemlerine entegrasyonundaki bazı ana sorunlar üzerinde genel bir inceleme yapılmıştır. PVDG üniteleri tarafından üretilen harmonik distorsiyon hakkında ayrıca bilgi paylaşılmıştır. Dağıtımda PVDG 'nin izin verilen maksimum penetrasyon seviyesi sistemi de dikkate alınır. PVDG yerleştirme ve boyutlandırma için optimum planlama genel prosedürleri de bu bölümde değerlendirilerek ele alınmıştır. Bu inceleme ve analiz sonucu, PVDG 'yi güç sistemlerine entegre etmenin farklı zorlukları olduğunu göstermektedir. Bu zorluklardan biri, entegre sistem güvenilirliğidir, yenilenebilir enerji kaynağı tarafından üretilen güç miktarı tam tutarlı olmayabilir. Bu nedenle, PVDG 'nin şebekeye yüksek oranda nüfuz etmesi, güç sistemi ağının güvenilirliğini azaltabilir. Öte yandan, güç kalitesi PVDG 'nin zorluklarından biri olarak kabul edilirken, PVDG 'lerin yüksek penetrasyonu güç sistemi ağında daha harmonik yayılmaya yol açabilir. Buna ek olarak, entegre PVDG ve ters güç akışının voltaj dalgalanması bu teknoloji için iki önemli zorluktur. Son olarak, entegre PVDG ile güç sisteminin korunması, mevcut koruma şemaları çift yönlü değil tek yönlü güç akışı modeli için tasarlandığından, bu teknolojinin en kritik zorluklarından biridir. Çoğu geleneksel güç sistemi, üretim istasyonları yük merkezlerinden uzakta olacak ve iletim ve dağıtım sistemini yol olarak kullanacak şekilde tasarlanır ve çalıştırılır. PVDG'nin dağıtım sistemlerine entegrasyonu, güç sistemlerinin normal çalışmasını değiştirir ve olası çift yönlü güç akışı, voltaj değişimi, kesici koordinasyonsuzluğu, kısa devre seviyelerinde değişiklik ve ada çalışması gibi çeşitli problemler ortaya çıkarır (Kadir ve ark., 2014).

4.1. PV Sistemlerin Şebeke Güç Sistemlerine Entegrasyonunda Karşılaşılan Problemler – Optimal Planlama Zorlukları

Artan güç talebi, elektrik enerjisi üretimini neredeyse kapasite sınırına kadar artırmıştır. Bununla birlikte, elektrik şirketleri, mevcut elektrik üretim marjlarını yeterli düzeyde tutmalıdır. Şu anda, iletim sistemleri aktarılabilecek büyük miktarda güç nedeniyle maksimum kapasitelerine ulaşmaktadır. Bu nedenle, elektrik şirketleri, artan güç talebini karşılamak ve endüstriyel alanlara, büyük ticari müşterilere kesintisiz güç kaynağı sağlamak için tesislerini genişletmek için büyük yatırımlar yapmak zorundadır (Borbely ve Kreidel, 2001). Dağıtım sistemine PV tabanlı dağıtılmış üretim birimlerinin eklenmesi,

voltaj desteği, gelişmiş güç kalitesi, kayıp azaltma, yeni veya yükseltilmiş iletim ve dağıtım altyapısının geliştirilmesi ve iyileştirilmiş hizmet sistemi güvenilirliği gibi olumlu getiriler sağlaması önemli faydalardır (Barker ve Mello, 2000). PVDG, güç kapasitesinden bağımsız olarak tüketicilerin yakınında bulunan şebekeye bağılı bir yapıdır, güç talebini desteklemek ve sıkışık iletim hatlarının üstesinden gelmek için alternatif bir yoldur (Wanik, 2011).

PVDG 'nin bir dağıtım sistemine entegrasyonu, dağıtım sisteminin işletim özelliklerine ve PVDG özelliklerine bağılı olarak olumlu veya olumsuz etkiye sahip olacaktır. PVDG, en azından sistem işletim perspektifinin ve besleyici tasarımının temel gereksinimlerini karşılıyorsa uygulanması daha uygundur (Begovic, 2001). Şekil 4.1, tipik olarak bir PV dizisi, bir DC bağlantı kondansatörü, filtreli bir invertör, bir yükseltici transformatör ve bir elektrik şebekesinden oluşan şebekeye bağılı bir PV sisteminin şematik bir diyagramını göstermektedir (Daly ve Morrison, 2001). PVDG 'nin güç kalitesi üzerindeki etkisi, yardımcı sistemle olan ara yüzüne, DG ünitesinin boyutuna, sisteme göre PVDG 'nin toplam kapasitesine, ara bağlantı noktasındaki yüke göre üretim boyutuna ve besleyici voltaj regülasyonu uygulamasına bağılıdır (Kim ve ark., 2009).



Şekil 4.1. Şebekeye bağılı bir PV sisteminin şematik diyagramı (Daly ve Morrison, 2001)

PV dizisinden üretilen DC gücü, DC bağlantı kapasitörünü şarj eder. Dönüştürücü (invertör), doğru akımı (DC) bir sinüzoidal voltaj ve frekansa sahip olan alternatif akıma (AC) dönüştürür (inverter herhangi bir güç üretmiyor; güç, DC kaynağı tarafından sağlanır, invertör istenilen gerilim, güç veya frekans değerlerinde AC akım elde edilmesini sağlar). Diyot, PV dizisi boyunca ters akım akışını engeller. Transformatör,

evirici gerilimini şebeke geriliminin nominal değerine yükseltir ve PV sistemi ile şebeke arasında elektriksel izolasyon sağlar. Harmonik filtre, temel elektrik frekansı dışındaki harmonik bileşenleri ortadan kaldırır.

Güç sistemlerinin performansını düşüren, güç kalitesinin yaygın endişelerinden biri harmonik distorsiyondur. Harmonik bozulmanın ana nedenleri, bilgisayar, televizyon, enerji tasarruflu lambalar, ayarlanabilir hızlı sürücüler, ark fırınları ve güç dönüştürücüleri gibi güç elektroniği cihazlarının çoğalmasından kaynaklanmaktadır. Harmonik bozulma aynı zamanda transformatör ve dönen makineler gibi ekipmanların doğrusal olmamasından da kaynaklanır (Louie ve ark., 2006). Bu harmonik akımlar, ardışık olarak yükün değerinin düşürülmesini, nötr iletkenin aşırı ısınmasını, transformatörün aşırı ısınmasını ve koruyucu cihazların arızalanmasına neden olan yüklerde daha büyük kayıplar yaratabilir (IEEE Std., 1993). PVDG invertörleri ile şebeke arasındaki arayüzde ortaya çıkan diğer bir güç kalitesi sorunu, harmonik rezonans durumudur. Harmonik rezonans, endüktif bileşenin kapasitif bileşene eşit olduğu bir rezonans frekansında meydana gelmektedir. PVDG invertörleri ve şebeke arasındaki arayüzde giderek daha yaygın bir sorun olduğu tespit edilen harmonik rezonans, PVDG ünitelerin sayısına bağlıdır. Harmonik rezonansın etkisi, yalnızca ciddi bir güç kalitesi sorunu oluşturmakla kalmaz, aynı zamanda koruma cihazlarının takılmasına ve hassas ekipmanların hasar görmesine de neden olabilir (Chen ve Sun, 2011).

PVDG'nin elektrik şebekesinin dağıtım sistemi seviyesinde kurulması ve yük merkezine yakın yerleştirilmesi gerektiği bilinen bir kriterdir. PVDG'nin bir dağıtım sistemine yerleştirilmeden önce harmonik bozulma, güç kaybı, voltaj profili, kısa devre akımı ve güç sistemi güvenilirliği üzerindeki etkisini değerlendirmek için çalışmalar ve analizler yapılır. Güç kayıplarını azaltmak için sistem voltajı iyileştirilir ve gerilim toplam harmonik bozulmasını (THD_v) en aza indirmek, DG 'nin mevcut durumu ile güç sisteminin uygun planlanması gereklidir. PVDG birimlerinin sayısı ve kapasitesi, optimum PVDG konumu ve ağ bağlantısının türü gibi çeşitli hususların dikkate alınması gerekir. PVDG ünitelerinin optimum olmayan yerlerde ve optimum olmayan boyutlarda kurulması daha yüksek güç kaybına, voltaj dalgalanması sorununa, sistem kararsızlığına ve işletim maliyetinin artmasına neden olabilir (Rau ve Wan, 1994).

4.2. PVDG 'nin Güç Kalitesi Etkisi

PVDG'nin güç sistemlerine entegrasyonu, iletim hatlarındaki aşırı yüklemeyi hafifletebilir, güç kalitesini iyileştirerek genel şebeke ihtiyaçlarını sağlayabilir. Bununla birlikte, PVDG'nin yanlış koordinasyonu, konumu ve kurulumu, güç sistemlerinin güç kalitesini olumsuz yönde etkileyebilir (Jenkins ve Strbac, 1995). Geleneksel güç sistemlerinin çoğu, üretim istasyonlarının yük merkezlerinden uzakta olacağı ve iletim ve dağıtım sistemini yollar olarak kullanacağı şekilde tasarlanır ve çalıştırılır. Tipik bir güç sisteminin normal çalışması, dağıtım ağında veya sistemin müşteri tarafında üretimi içermez. Bununla birlikte, PVDG'nin dağıtım sistemlerine entegrasyonu, güç sistemlerinin normal çalışmasını değiştirir ve olası iki yönlü güç akışı, voltaj değişimi, kesicinin koordinasyonsuzluğu, kısa devre seviyelerinde değişiklik ve adalama işlemi gibi çeşitli problemler ortaya çıkarır (Kadir ve ark., 2014). Bu nedenle, dağıtım sistemlerinde DG entegrasyonunun neden olduğu bir takım teknik zorlukları ele almak ve bertaraf etmek için halen geliştirmelere ihtiyaç vardır. DG ile şebeke arasındaki ara bağlantı cihazı, herhangi bir DG'ye bağlanmadan önce planlanmalı ve koordine edilmelidir (Saint ve Friedman, 2002).

4.2.1. PVDG 'nin Harmonik Etkisi

Harmonik, periyodik bir dalganın sinüzoidal bir bileşeni veya temel frekansın integral katı olan bir frekansı olan bir niceliktir (IEEE Std., 1992). Harmonik distorsiyon, güç dönüştürücüleri, transformatör, döner makineler, ark fırınları ve floresan aydınlatma gibi ekipmanların doğrusal olmamasından kaynaklanır (Louie ve ark., 2006). Bir dağıtım sistemine bağlı PVDG, güç dönüştürücü teknolojisine bağlı olarak sistemde harmonik bozulmaya neden olabilir. İnvertör arayüzlü PVDG 'nin elektrik gücünün kalitesi üzerindeki etkisini tahmin etmek için bir PV sistemi üzerinde bir güç kalitesi çalışması yapılmıştır (Cardona ve Carretero, 2005). Deneysel sonuçlar, toplam harmonik bozulma THDi değerlerinin inverterin çıkış gücüne bağlı olduğunu göstermektedir. Bu bağımlılık, düşük güç dönüştürücü oranıyla orantılı olarak azalır.

Bir güç sistemindeki harmonik bozulmayı etkileyen diğer bir faktör, güç sistemine bağlı PVDG ünitelerinin sayısıdır. Şebeke bileşenleri ve bir grup PVDG ünitesi arasındaki etkileşim, harmonik distorsiyonu artırabilir (Benhabib ve ark., 2007). Ek olarak, PVDG yerleşimi, bir güç sistemindeki harmonik bozulma durumlarına da neden olabilir. Daha yüksek gerilim devresinde DG (dağıtılmış üretim : yerinde üretim veya

merkezi olmayan enerji üretimi diğer bir deyişle direkt olarak dağıtım şebekesine bağlı veya elektrik sayacının tüketici tarafına bağlı elektrik-güç kaynağı) yerleşimi düşük gerilim seviyesinde PVDG yerleşimi ile karşılaştırıldığında daha az harmonik bozulma üretir (Arrillaga ve Watson, 2003). Müşteri tarafında, ayarlanabilir hızlı sürücüler gibi harmonik üreten ekipmanların artan kullanımı, sistemdeki harmoniklerin daha fazla yayılması, elektronik ekipmanın ömrünün kısılması ve motor ve kabloların aşırı ısınması gibi sorunlar yaratabilir. Ayrıca, harmonikler besleme hattına geri dönebilir ve PCC 'deki (güç kontrol panosu) diğer müşterileri etkileyebilir. Bu nedenle, güç sistemleri için harmonik azaltma stratejileri belirlenmeli, analiz edilmeli ve tanımlanmalıdır (Borbely ve Kreidel, 2001).

4.2.2. PVDG 'li Güç Sisteminde Harmonik Rezonans

Rezonans, bir güç sisteminde sistemin kapasitif elemanları belirli bir frekanstaki endüktif elemanlara tam olarak eşit olduğunda meydana gelir. Paralel veya seri çalışmaya bağlı olarak, paralel veya seri rezonans oluşturabilir. Belirli bir konumda, bir sistem paralel bir rezonans oluşturduğunda, yüksek ağ empedansı oluşurken, bir seri rezonans için düşük bir ağ empedansı oluşur (Wang ve ark. 2010). Güç şebekesinde artan PVDG penetrasyonu ile harmonik rezonans, güç sistemlerinde önemli bir sorun olarak kabul edilmektedir (McGranaghan ve ark., 2007).

Harmonik rezonans, şebeke ve eviriciler arasındaki empedans (elektrik devresinin akıma karşı gösterdiği eşdeğer direnç) uyumsuzluğundan dolayı, tek tek veya birden fazla PVDG ünitesinin şebekeye bağlantı noktasında meydana gelebilir. Şebeke ve inverter çıkış empedansı arasındaki dinamik etkileşim, şebeke akımında ve/veya belirli frekanslarda oluşan voltajda harmonik rezonansa neden olabilir. Harmonik rezonansın etkisi, aşırı gerilim veya aşırı akım nedeniyle koruma cihazlarının devreye girmesi ve hassas ekipmanın hasar görmesi gibi ciddi güç kalitesi sorunları ortaya çıkarır (McGranaghan ve ark., 2007). Yapılan bir çalışmada, birden fazla PVDG ünitesi ve dağıtılmış bir ağ arasındaki harmonik etkileşim araştırılıp ve PVDG ünitelerinin yüksek penetrasyon seviyelerinin, PV invertörlerinin her biri IEC 61000-3-2 (international electromagnetic compatibility harmonik akım emisyon sınırları standartı-şebeke voltajı bozulmasını sınırlayan uluslararası bir standart) kriterlerini karşılamasına rağmen harmonik emisyonu önemli ölçüde artırdığını bulmuştur. Şebeke ve PV inverterleri

arasındaki paralel ve seri rezonans durumu, şebekedeki beklenmedik yüksek akım ve gerilim distorsiyon seviyelerinden sorumlu bulunmuştur (Bollen, 2003).

4.2.3. PVDG'nin Gerilim Değişimi Üzerindeki Etkisi

Bir dağıtım sistemindeki çalışma voltajları, besleyiciler boyunca yük değişimleri, güç trafolarının kademe değiştiricilerinin hareketi ve kapasitör banklarının veya reaktörlerin anahtarlanması nedeniyle her zaman gerekli voltaj aralıkları içinde değildir. Bu, bir voltajın nominal değerinden sapması olarak tanımlanabilecek voltaj değişimlerine neden olur (Bollen, 2003). Kısa süreli voltaj değişimleri olarak sınıflandırılan parazitler voltaj düşüşü, voltaj yükselmesi ve kısa süreli kesinti iken, uzun süreli voltaj değişimleri olarak sınıflandırılan bozukluklar, sürekli kesinti, düşük voltaj ve aşırı voltajı içerir (Chen ve ark., 2012). Dağıtım sistemlerindeki artan elektrik talebi ve yüklerin artmasıyla birlikte, dağıtım fiderleri boyunca gerilim tolere edilebilir çalışma sınırlarının altına düşme eğilimindedir. Bu nedenle, gerilim düşümü sorunlarını çözmek için dağıtım sistemi altyapısı yükseltilmelidir (Eajal ve El-Hawary, 2010). PVDG birimlerinin entegrasyonu bir dağıtım sisteminde, besleyici bölümlerindeki voltaj düşüşü, besleyicideki düşük güç akışı nedeniyle azaldığından voltaj profilini iyileştirebilir. Bununla birlikte, PVDG tarafından üretilen güç, PCC'deki yerel talepten daha büyükse, fazla güç şebekeye geri akar. DG'den gelen fazla güç, besleyicide ters güç akışı oluşturabilir ve besleyicide voltaj artışı yaratabilir (Casavola ve ark., 2011). Bazı çalışmalarda, dağıtım sistemlerine PVDG bağlantısının neden olduğu voltaj artışını kontrol etme yöntemleri araştırılmıştır. Borges ve Falcao (2006), voltaj regülatörlerinin çalışmasıyla birlikte çoklu PVDG kaynaklarını analiz etmişlerdir ve PVDG ünitesi tarafından enjekte edilen gücün, PVDG bağlantısı iletim yolunda izin verilen sınırlar dahilinde sistem voltajlarını elde etmek için tanımlanması gerektiği sonucuna varmıştır (Borges ve Falcao, 2006). Chen vd. (2012), sistem planlaması ve ekipman kontrolü yoluyla bir dağıtım besleyicisinde iki voltaj kontrol tekniği sunmuştur. Sistem tasarımı ve planlama aşamalarında sistem planlama teknikleri kullanılırken, gerçek zamanlı çalışma sırasında bir besleyici boyunca iletim yolu voltajlarını düzenlemek için ekipman kontrol teknikleri kullanılmıştır. Depolama kapasitesini etkin bir şekilde düzenlemek için depolama sisteminin (kurşun asitli piller) şarj ve boşaltma kontrolü için de bir yaklaşım uygulanır. Gerilim sınırlarını ihlal etmeden DG'nin çıkış kapasitesini artırmak için bir yük altında kademe değiştirici ve otomatik gerilim kontrol rölesi kullanan uyarlanabilir bir gerilim kontrol şeması önerilmiştir (Chen ve ark., 2012).

Düşük voltaj seviyesinde yüksek DG penetrasyonu ile üst voltaj sınırında bir ihlal meydana gelebilir. Bu nedenle, DG'nin neden olduğu aşırı gerilimi azaltmak için bir çözüme ihtiyaç vardır. Demirok vd. (2010), DG inverterlerinde dağıtılmış reaktif güç regülasyonu ve aktif güç kısıma stratejileri uygulayarak aşırı gerilim sorununu ele almıştır (Demirok ve ark., 2010).

4.3. PVDG 'nin Maksimum İzin Verilebilir Penetrasyon Seviyesi

Dağıtım sistemlerindeki yüksek PVDG penetrasyonunun etkilerini çeşitli kısıtlamalar dikkate alınarak araştırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Kirawanich ve O'Connell (2003), bir PVDG 'nin tipik bir ticari dağıtım sistemi üzerindeki harmonik etkisini araştırmak için bir simülasyon gerçekleştirmiştir (Kirawanich ve O'Connell, 2003). Sonuçlar, en kötü durum koşullarında sistemdeki en savunmasız yan temas noktalarında bile, THD voltajı (toplam voltaj harmonik bozulması) DG üniteleriyle ticari dağıtım sisteminin % 40 'a kadar doygunluğu için IEEE 519 Standardı sınırını aşmamıştır. Pandi vd. tarafından gerçekleştirilen benzer bir çalışmada (2013), ideal bir DG boyutuna ve 18-baralı ve 33-baralı radyal (merkezden çevreye yayılan) dağıtım sistemlerindeki konumlara dayanan maksimum PVDG penetrasyon seviyelerinin sırasıyla % 66 ve % 33 olduğu sonucuna varmıştır (Pandi ve ark., 2013).

Diğer çalışmalar, geçici stabilite sınırı dikkate alınarak DG birimlerinin izin verilen maksimum penetrasyon seviyesine odaklanmıştır. Azmy ve Erlich (2005), farklı penetrasyon seviyelerine sahip seçilmiş DG ünitelerini kullanmanın çeşitli güç sistemi kararlılığı biçimleri üzerindeki etkisini araştırmıştır (Azmy ve Erlich, 2005). Simülasyon sonucu, voltaj sapmasının %28,3 DG penetrasyonu ile önemli ölçüde azaldığını gösterdi. Ayrıca, geçici stabilite sınırını ihlal etmeden DG 'nin maksimum penetrasyon düzeyinin toplam bağlı yükün % 40 'ı olduğu raporlanmıştır (Azmy ve Erlich, 2005).

Tipik bir dağıtım sisteminde DG 'nin penetrasyon seviyesini sınırlayabilecek diğer bir faktör, kararlı durum voltaj yükselmesidir. Celli vd. (2009) DG konumlandırma ve boyutlandırmayı dikkate alarak DG penetrasyon seviyesinin kritik değerini değerlendirmek için bir yöntem geliştirmiştir (Celli ve ark., 2009). Sonuç, bir dağıtım sistemindeki DG penetrasyon seviyesinin sınırının %40-%50 arası olduğunu göstermiştir. Benzer bir çalışmada Chen ve ark. (2012), müşterilerin DG birimlerini kendi tesislerine serbestçe kurmalarına izin verilirse ve DG birimleri yaygınlaşırsa bir dağıtım sistemine

ne olacağı tespiti amacıyla yaptıkları çalışmada; aşırı gerilime ve düşük gerilime neden olan en büyük faktör, fazla DG gücünün ikincil şebeke ağının lokalize alanlarında şebeke koruyucularının açılmasına neden olduğu görülmüştür (Chen ve ark., 2012).

Almanya ve İtalya çok güçlü bir PV sistem penetrasyonuna sahiptir. 2012 yılında kurulu PV kapasitesi sırasıyla 32GW ve 16GW'ye ulaşmıştır. Kurulu kapasitenin %20'sinden fazlası dağıtım voltaj ağına bağlıdır. Almanya'da, özellikle de PVDG 'nin %63'ü ev voltaj seviyesine bağlıdır. Bu büyük miktardaki PVDG 'nin entegrasyonu, güç sistemi için zorluklar yaratır. Örneğin, eşzamanlı olarak kapanan PVDG birimlerinin büyük bir paya sahip olması durumunda, şebeke frekansını 50,2 Hz'e kadar artırabilir. Bununla birlikte, bu sorun Almanya'da 10 kW'ın üzerinde nominal güce sahip tesislerin arkadan monte edilmesini gerektirerek ele alınmıştır. Buna ek olarak, tolere edilebilir sınırlar içindeki voltaj regülasyonu karşılaşılan bir başka zorluktur. Depolama, güç sistemine esneklik sağlamak amaçlı çözümlerden biridir. Birçok araştırmacı, depolama ile ilgili PV entegrasyonundaki zorlukların nasıl aşılabileceği üzerinde çalışmaktadır. Örneğin, inverter bağlantısının kesilmesine neden olan aşırı gerilimden kaçınmak için batarya (pil) en uygun şekilde boyutlandırılabilir (Kadir ve ark., 2014).

4.4. PVDG 'nin En Uygun Yerleşimi ve Boyutlandırılması

Gerilim değişimi ve harmonik bozulma, dağıtım sistemlerindeki iki ana problemdir. Gerilim düşüşü, artan elektrik talebi nedeniyle meydana gelir ve bu da dağıtım sistemi altyapısını yükseltme ihtiyacını gösterir. Çalışmalar, üretilen gücün yaklaşık %13 'ünün dağıtım seviyesinde kayıp olarak tüketildiğini göstermiştir. Dağıtım sistemlerindeki voltaj değişimini ve harmonik distorsiyonu azaltmak için, pasif ve aktif güç filtrelerinin kullanılması ve voltaj değişimi sorunlarını azaltmak için özel güç kontrol cihazlarının uygulanması gibi çeşitli stratejiler uygulanmıştır. Ancak, bu azaltma stratejileri yatırım gerektirir. Bu nedenle, PVDG 'li bir dağıtım sistemindeki gerilim profilini iyileştirmek ve harmonik bozulmayı ortadan kaldırmak için PVDG birimlerinin uygun şekilde planlanmasını ve PVDG birimlerinin optimum yerleşiminin ve boyutunun belirlenmesini içeren yayılımcı olmayan bir yöntem önerilmektedir (Amanifar ve Hamedani, 2011).

PVDG ünitelerini bir dağıtım sistemine kurmadan önce bir fizibilite analizi yapılmalıdır. PVDG sahiplerinden PVDG 'lerinin türünü, boyutunu ve yerini sunmaları

istenir (Pandi ve ark., 2013). Güç sistemi genellikle PVDG 'nin kurulumundan etkilenir. Bundan dolayı izin verilen PVDG penetrasyon seviyesi harmonik limitlere uygun olmalıdır. Bu nedenle DG ünitelerinin optimum yerlere ve boyutlarda kurulumu güç kayıplarının azaltılması, güç kalitesinin iyileştirilmesi, sistem kararlılığı ve daha düşük işletim maliyeti gibi ekonomik ve teknik avantajlar sağlayabileceğinden DG'nin optimum yerleştirilmesi ve boyutlandırılması önemlidir (Jenkins ve Strbac, 1995).

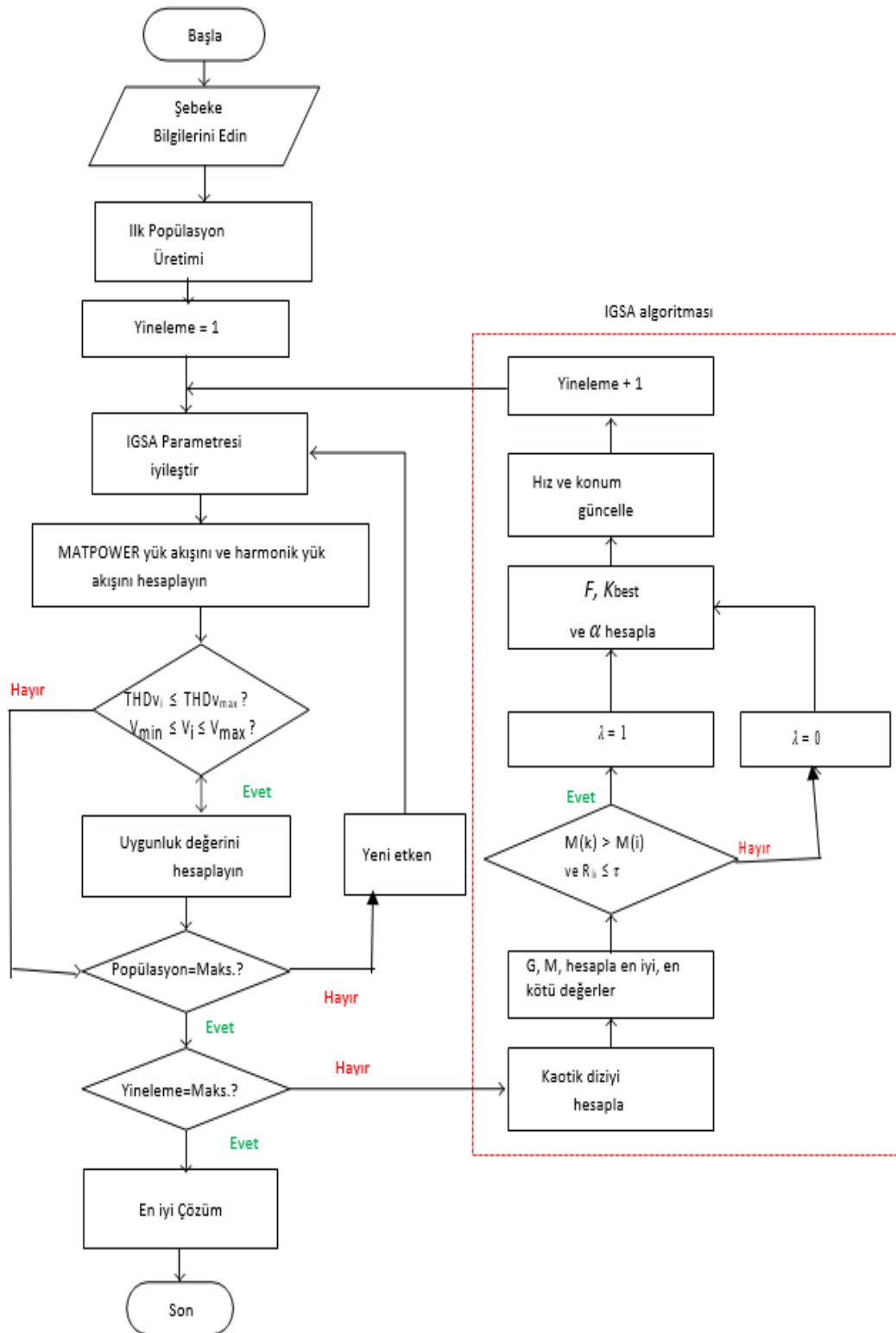
Bir dağıtım sisteminde PVDG 'nin optimum konumunu ve boyutunu belirlemek için çeşitli yöntemler uygulanmıştır. Optimum PVDG yerleştirme ve boyutlandırma için kullanılan analitik yöntem yalnızca geliştirilen model için doğrudur ve karmaşık sistemleri çözmek için çok karmaşık olabilir. Güç akış algoritması, her bir yük barasının bir PVDG birimine sahip olabileceği varsayılarak her yük barasında optimum PVDG boyutunu bulmak için kullanılmıştır (Rau ve Wan, 1994). Ancak bu yöntem, çok sayıda yük akışı hesaplaması gerektirdiğinden etkisizdir. PVDG 'yi radyal (merkezden yayılan) veya örgülü sistemlere yerleştirmek için analitik yöntemler de kullanılabilir. Bu yöntemde, radyal ve örgülü sistemler için ayrı ifadeler gereklidir ve PVDG yer değiştirme problemini çözmek için fazör akımına dayalı karmaşık prosedürler uygulanır. Ancak, bu yöntem yalnızca optimum PVDG yerleşimini belirler ve sabit bir PVDG boyutunu dikkate aldığından optimum PVDG boyutu değildir (Willis, 2000).

Meta-sezgisel yöntem, dağıtım sistemlerinde DG 'nin optimum yerleştirilmesi ve boyutlandırılmasında da kullanılır. Bu yöntem, optimizasyon probleminin en uygun optimum çözümlerine yakın çözümlerini bulmak için alt sezgisel yöntemlerine öncülük edebilen yinelemeli bir üretim sürecini uygular. Performansı artırmak için yapay zekadan türetilen farklı kavramları birleştirir. Meta-sezgisel kavramları benimseyen tekniklerden bazıları arasında genetik algoritma (genetic algorithm-GA), tabu arama, parçacık sürüsü optimizasyonu (particle swarm optimization-PSO), karınca kolonisi optimizasyonu (ant colony optimization-ACO) ve yerçekimsel arama algoritması (gravitational search algorithm-GSA) bulunur (Osman ve Kelly, 1996).

PVDG optimal yerleşimini ve boyutlandırması problemini çözmek için genel optimizasyon tekniğinin uygulanması Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Bir dağıtım sistemindeki toplam kayıpları, ortalama toplam gerilim harmonik bozulmasını (THD_v) ve gerilim sapsmasını en aza indirmek için çok amaçlı bir fonksiyon formüle edilmiştir.

PVDG 'nin optimal yerleşimini ve boyutlandırmasını belirlemek için genel optimizasyon algoritması prosedürleri aşağıda gösterilmiştir (Kadir ve ark., 2014).

- (i) Bara, hat ve jeneratör verileri gibi giriş ağı bilgileri edinilir.
- (ii) PVDG konumu, toplam bağlı yüklerin %40 ila %50 'si aralığında PVDG boyutu ve 0,98 p.u. (per-unit) ila 1,02 p.u. aralığında PVDG kontrol edilebilir bara voltajı gibi uygun çözüm kombinasyonu içinde rastgele başlangıç konumları oluşturulur.
- (iii) Popülasyon boyutu, boyut sayısı ve maksimum yinleme gibi optimum parametreleri kullanarak optimizasyon algoritması geliştirilir.
- (iv) Toplam güç kaybını, ortalama THDV 'yi ve voltaj sapmasını elde etmek için yük akışı ve harmonik yük akışı çalıştırılır.
- (v) Uygunluk işlevi hesaplanır.
- (vi) İletim yolu voltaj büyüklüğü ve THDV kısıtlamaları kontrol edilir. Her ikisi de limitlerini aşarsa, (iv) adımı tekrarlanır.
- (vii) Optimizasyon parametreleri güncellenir.
- (viii) Durdurma kriterleri elde edilene ve en iyi çözüm elde edilene kadar işlem tekrarlanır.



Şekil 4.2. Bir dağıtım sisteminde PVDG 'nin optimum yerleşimini ve boyutlandırmasını belirlemek için genel optimizasyon tekniğinin akış şeması (Kadir ve ark., 2014).

5. ŞEBEKEYE BAĞLI PV SİSTEM SİMÜLASYON UYGULAMALARI

5.1. Uygulamalara Giriş

PV tabanlı bir güç sistemi, elektrik dağıtım şebekesine bağlandığında bazı standartlara uyumlu olmalıdır. Bunlar ulusal veya uluslararası elektriksel şartlardır. Bu standartları sağlamak; gücün kalitesi, sürekliliği ve sistemleri koruma bağlamında güvenilir olması kapsamında oldukça önemli bir husustur. PV teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak güneş enerjisi ile çalışan pek çok sistem uygulamada gittikçe daha çok yer almakta ve kullanıma geçmektedir. Güneş enerjisi sistemlerinin tasarımında kritik nokta, güneş pili ve güneş paneli eşdeğer modelidir. Güneş pili ve güneş paneli modeli olan bir sistemin analizini yapmak uygulanabilir ve kolaydır. Literatürde güneş pili eşdeğer modelinin elde edilmesi için farklı çalışmalar bulunmakta ayrıca bu çalışmalarda eşdeğer devrelerin simülasyonunu yapıp durum analizi yapmakta en yaygın tercih Matlab Simulink'tir.

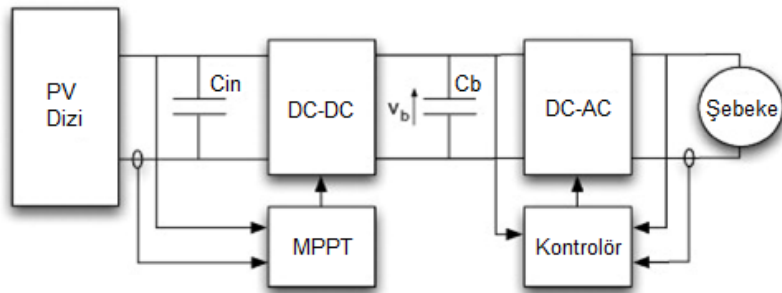
Bu bölümde; PV dizi modellemek için, güneş pili eşdeğer devresi kullanılarak Matlab Simulink ile PV panel bloğu elde edilen yapılar kullanılarak yapılan simülasyonlar gösterilmiştir. Bölüm içerisinde PV inverter modelleri de kullanılarak şebeke bağlantılı PV sistem eşdeğer modellerine ulaşılmıştır. Bunlarla beraber, şebekeye bağlı PV sistemin simülasyonlarında kaynak olarak faydalanan eşdeğer devre modelleri hakkında bilgiler paylaşılarak simülasyon sonuçları da gösterilmiştir.

5.2. Şebekeye Bağlı PV Sistemler

Genel olarak dağıtım şebekesine bağlı olan bir PV sistem 4 temel birimden oluşur. Bu birimler; PV panel ve bunu oluşturan diziler, DC-DC konverter (gücü yükseltme amacıyla), inverter (DC/AC dönüşümü için) ve yük birimleridir. Şebeke bağlantılı PV sistemler uygulanırken veya seçilirken; tahmini güç ihtiyacı, yerleşim yeri, hava durumu, iklim şartları, kişisel veya kurumsal ihtiyaç miktarı gibi etkenler göz önünde bulundurulur. Şebekeye bağlı PV sistemler, dağıtılmış elektrik ağına uyumlu bir düzende irtibatlanacak şekilde tasarlanırlar. Şebekeden günlük dağıtılan enerji ağında elektrik gereksiniminin fazla olduğu sürelerde PV sistemi şebekeye dahil edilerek elektrik güç sistemi rahatlatılıp optimum hale getirilmektedir. Bunun yanı sıra, PV yapıdan üretilen enerji üretildiği merkeze yakın mesafeli bölgelerde kullanıldığından en düşük oranda kayıplarla kullanımı sağlanmaktadır. Şebekeye bağlı bir PV sistem üzerinden bir lokasyonun enerji

gereksinimi tedarik edilirken aynı zamanda ihtiyaç miktarından artan fazla enerjinin yerel dağıtım şebekesine satışı mümkündür. PV sistemden üretilen enerji ihtiyacı karşılayamadığı süreçlerde ise dağıtık elektrik şebekesinden enerji ihtiyacı karşılanmaya devam edilmektedir (Ezzt ve ark., 2007).

İnverterler, şebekeye bağlı PV sistemlerin en önemli elemanlarından biridir. PCU (Power Conditioning Unit – Güç Düzenleme Ünitesi) olarak da tanımlayabileceğimiz inverterlerin, PV modüllerin çıkış düzenine bağlanması ile şebeke bağlantılı PV sistem elde edilir. PV modüller ve güneş ışınlarının buluşmasıyla modül yapısında bulunan PV diyotlar vasıtasıyla bu ışınlar DC' e çevrilir. Üretilen enerjinin şebekeye uyumlu bir şekilde DC'den AC'ye dönüştürülmesi sürecin en önemli işlemlerindendir. DC/AC dönüştürücü inverterlerin kullanılması da bu amaçladır. Aşağıda Şekil 5.1'de şebekeye bağlı olan bir PV sisteme ait çerçeve yapı görülmektedir. Şebeke bağlı PV sistemlerde, enerjiyi depolama gereksinimi bulunmamaktadır bu nedenle şebekeye bağlı olmayan sistemlere kıyasla daha düşük maliyetli yapılardır. 2020 li yılların başlarında Avrupa Birliği ve ABD'de binaların çatılarına milyonlarca küçük PV sistem kurulup devreye alınması öngörülüp planlanmıştır. Avrupa'da bazı ülkeler ise şebekeye bağlı PV sistemleri çoğaltıp yaygınlaştırmak hedefiyle çatıda kur-işlet-sahip ol programları yapıp hayata geçirmişlerdir (Ezzt ve ark., 2007).



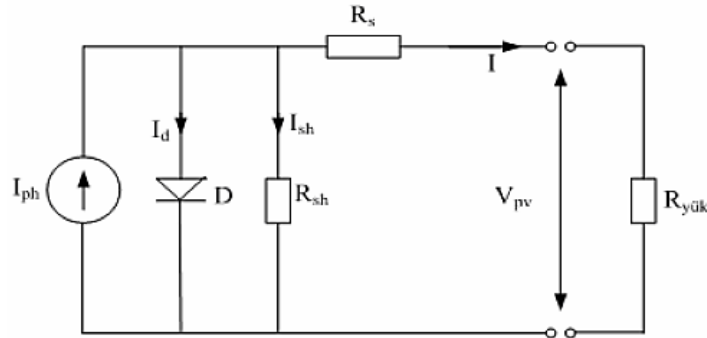
Şekil 5.1. Şebekeye bağlı PV sistemin tipik çerçeve şeması (Ezzt ve ark., 2007)

5.3. Güneş Pili (PV Hücre) Eşdeğer Devre Modeli

PV etki ile ışığın enerjisini doğrudan elektriğe dönüştüren güneş hücresi olarak da adlandırılan güneş pillerinin karakteristik özelliklerinin ve tepkilerinin anlaşılması için; elektriksel yapısı ve özellikleri test edilmiş, bilinen teçhizatlarla donatılmış bir eşdeğer devre yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. PV piller (dizileri oluşturan güneş hücreleri)

esasinda bir yarı iletken kristaldır ve çalışma mantığı PV etkiye dayanmaktadır Literatür incelemelerinde yaygın olarak iki çeşit eşdeğer devreye yer verilmiştir bunlar basit ve gelişmiş eşdeğer devreler olarak adlandırılmıştır. Ancak, güneş pilleri ideal elemanlar olmadığından yapısı itibarıyla kayıplı elemanlar olarak kabul edilir. Söz konusu kayıplar direnç ile temsil edilir (Mengi ve ark., 2008).

Şekil 5.2’de gösterilen eşdeğer devre modeli güneş pilleri yapısını temsil eden yaygın olarak kullanılan devredir. Akım kaynağı olan I_{ph} , fotonların ürettiği akım değerini göstermekte ve bu akım sabit ışınım ve sıcaklıklarda sabittir. Sızıntı akımı için R_{sh} paralel direnci, çıkıştaki gerilim düşümü için ise R_s seri direnci temsilen kullanılmaktadır. Işığın enerjiye dönüştürülmesindeki PV işleminde verimlilik; R_{sh} direncindeki değişimlere duyarlı olmamakla beraber R_s direncindeki değişimlere duyarlılığı oldukça yüksektir. Örnelemek gerekirse R_s direncinde az bir artış, PV modülün çıkış gerilimini önemli oranda düşürür (Mengi ve ark., 2008).



Şekil 5.2. Güneş pili elektriksel eşdeğer devresi (Mengi ve ark., 2008)

I_{ph} : Güneş ışığı tarafından üretilen elektrik akımı

I_d : Diyot akımı

I_{sh} : Paralel direnç akımı

I : Yük akımı

R_s : Seri direnç

R_{sh} : Paralel direnç

Kirchhoff akımlar kanunu denklemleri bu devreye uygulanacak olursa;

$$0 = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (5.1)$$

Diyot üzerindeki akım, p-n jonksiyonundan geçen toplam akımdır. Matematiksel ifade ile fotonların harekete geçirdiği elektronların ve boşlukların oluşturduğu akımlar toplamıdır. İletim yolundaki elektronların ve valans bandındaki boşluk akımlarının net elektron akımı Boltzman dağılımı ile gösterilecek olursa;

$$I_e = I_{e0}(e^{qvd/kbT}-1) \quad (5.2)$$

Boşluk akımı ise;

$$I_h = I_{h0}(e^{qvd/kbT}-1) \quad (5.3)$$

olarak formulize edilebilir. Bu durumda, net elektron ve boşluk akımlarının toplamı diyot akımını verecektir. Diyot akımı;

$$I_d = I_e + I_h = I_0(e^{qvd/mbT}-1) \quad (5.4)$$

olarak ifade edilebilir. Diyot akımına I_d etki eden değerler; gerilim ve yük tarafından çekilen akım ve diyotun mutlak sıcaklığı olduğu görülmektedir. Denklem 5.4'te;

- q : elektron yükü (1.602×10^{-19} C);
- VD : diyot uçları arasındaki potansiyel farkını;
- m : idealite faktörü (ideal diyotlarda $m = 1$);
- k : Boltzman sabiti (1.381×10^{-23} J/K);
- T : Kelvin ($0^\circ K = -273.15^\circ C$ cinsinden mutlak sıcaklığın göstergesidir).

$$I_0 = I_{e0} + I_{h0} \quad (5.5)$$

I_0 , ters doyum akımını (karanlık doyma akımı) temsil etmektedir. Bu akım sıcaklıktan çok fazla etkilenmektedir bununla beraber diyot akımını da etkiler. Denklem 5.6'da belirtilen kaynak akımı değerini bulmak için Şekil 5.2'de gösterilen güneş pili eşdeğer devresine Kirchhoff gerilim yasası ile hesaplama yapılır (Rodriguez ve ark., 2010).

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qVd}{mkT}} - 1 \right) = I_0 \left(e^{\frac{q(Vpv+I.Rs)}{mkT}} - 1 \right) \quad (5.6)$$

$$I_{sh} = \frac{Vd}{Rsh} = \frac{Vpv+I.Rs}{Rsh} \quad (5.7)$$

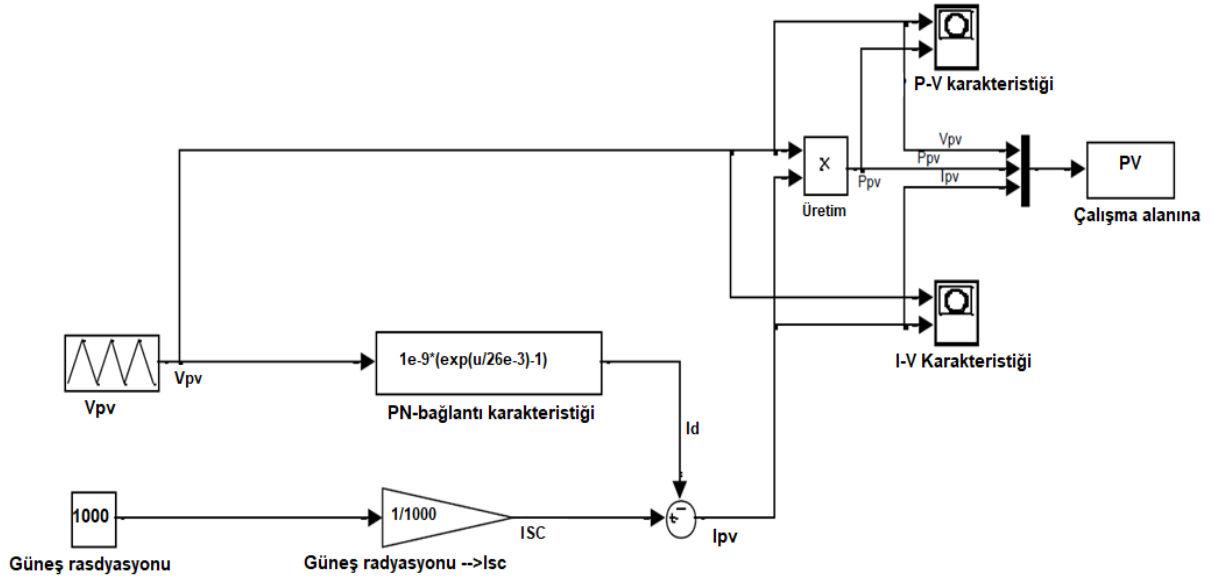
$$I_{ph} = I_0 \left(e^{\frac{q(Vpv+I.Rs)}{mkT}} - 1 \right) + \frac{Vpv+I.Rs}{Rsh} \quad (5.8)$$

Güneş piline ait gerilim ve akım değerlerini denklem 5.8'deki hesaplamalarla tespit etmek çok zor olduğundan bu nedenle bazı sayısal metodlar kullanılmaktadır. Bu tespiti kolaylaştırmak için genellikle basitleştirilmiş eşdeğer devre modelinden faydalanılmaktadır. Bu modelde $R_{sb} \gg R_s$ durumu dikkate alınarak, sızıntı akımı ihmal edilmektedir. Bu bağlamda çıkış akımı:

$I = I_{ph} - I_0$ olarak hesaplanır.

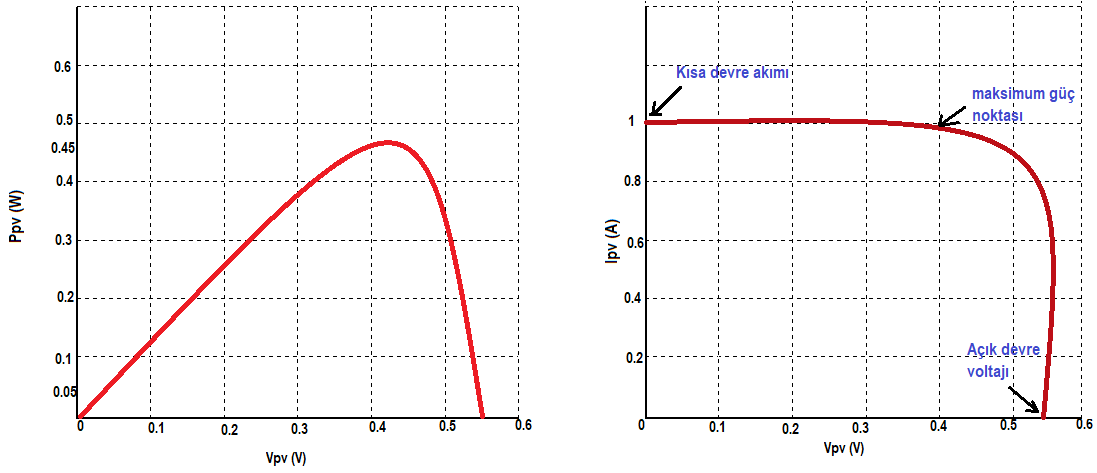
$V_t = k.T/q$ ifadesinde, V_T termal gerilim değeri; $V_T = 25.7\text{mV}$ (25°C 'de)

Bir güneş pilinin eşdeğer devresi baz alınarak Matlab Simulink uygulaması ortamında geliştirilen güneş pili modeli aşağıda Şekil 5.3'te sunulmuştur. Bu modelde, güneş ışıınımı değeri değiştiğinde, güneş piline ait gerilim ve akım değerlerinin de değiştiği görülmüştür. Ortaya çıkan veri ve değerler uygulamaya yüklenerek Matlab workspace ortamında da görülüp incelenebilmektedir.



Şekil 5.3. Matlab Simulink'te geliştirilmiş olan güneş pili modeli (Rodriguez ve ark., 2010)

Aşağıda Şekil 5.4'te güneş pillerine ait genel sayılabilecek tipik akım gerilim eğrileri gösterilmiştir. Buna göre PV panellerin sistemin modeline, çevresel ve hava faktörlerine göre akım gerilim büyüklükleri doğrusal olmayan bir şekilde değişmektedir. Bu doğrultuda bir çok PV dizi zemin ve güneşlenme konumuna göre seri veya paralel biraraya getirilerek elde edilen güç arttırılarak arz talep miktarına göre belli büyüklükte güneş sistemleri yapıları oluşturulup kullanıma sunulmaktadır.



Şekil 5.4. Güneş pilleri için tipik güç-akım-gerilim eğrileri (mundasolar, 2022)

5.4. Tek Faz On-Grid İnverterler

İnverterler ya da eviriciler; diğer bir deyişle DC-AC dönüşüm sistemleri, doğru akımı alternatif akıma çeviren, herhangi bir gerilim ve frekansta ayarlanabilen invertörler herhangi bir DC kaynaktan aldığı gerilimi işleyen ve AC gerilimi elde etmek için kullanılan güç elektroniği devrelerine verilen isimdir. İnvertörün ters işlevli haline redresör ya da doğrultucu adı verilir. Kullanılan anahtarlama devrelerine, kontrol devrelerine ve transformatörlere bağlı olarak invertör çıkışında üretilen AC gücün gerilimi ve frekansı farklılık gösterebilir. İnverter çıkışında üretilen dalgaanın türü ve frekansı; içeriğindeki yarı iletken elemanların özelliklerine, iletim ve yalıtım süreleriyle direkt ilişkilidir. Yarı iletken devre elemanları güce ve frekansa göre seçilebilmektedir. En yaygın kullanılan yarı iletkenler; BJT (bipolar-iki kutuplu bağlantı transistörü), MOSFET (metal oksit transistör-yarı iletken), IGBT (İzole edilmiş kapılı transistör) ve hızlı SCR (silikon kontrollü doğrultucu-tristör) türü elemanlardır (Bayrak,2013).

Genel inverterlerin çıkış dalgası sinüs biçimlidir fakat pratik uygulamada inverterler sinüs biçimli dalga şekline sahip değildir ve harmonikler içerir. Düşük ve orta güçteki uygulamalarda kare dalga veya buna benzer gerilimler, yüksek güçteki uygulamalar da ise sinüs dalga türü ve distorsiyonu düşük elemanlar istenir. Genel olarak çıkış gerilimindeki harmonik içerikler azaltılması, yüksek hıza sahip yarı iletken güç teçhizatları ile mümkün olabilmektedir. İnverterler elektrik ve elektronik teknolojilerinde çok yaygın kullanılan elemanlardır. Örneklendirecek olursak; AC motor hız kontrol devrelerinde, indüksiyon ısıtma güç kaynaklarında (temassız ısıtma), kesintisiz güç

kaynaklarında, hassas ölçüm teknolojilerinde vs. İnverterlerin girişine uygulanan kaynaklar; bir DC akü sistemi, PV modül veya herhangi bir DC kaynak olabilir. Genel olarak tek faz sistemlerde tipik çıkışlar 115V-400Hz, 120V-60Hz ve 220V-50Hz'dir. 3 Fazlı kapasite gücü yüksek sistemlerde tipik çıkışlar 115/200V- 400Hz, 120/208V-60Hz ve 220/380V-50Hz'dir (Bayrak, 2013).

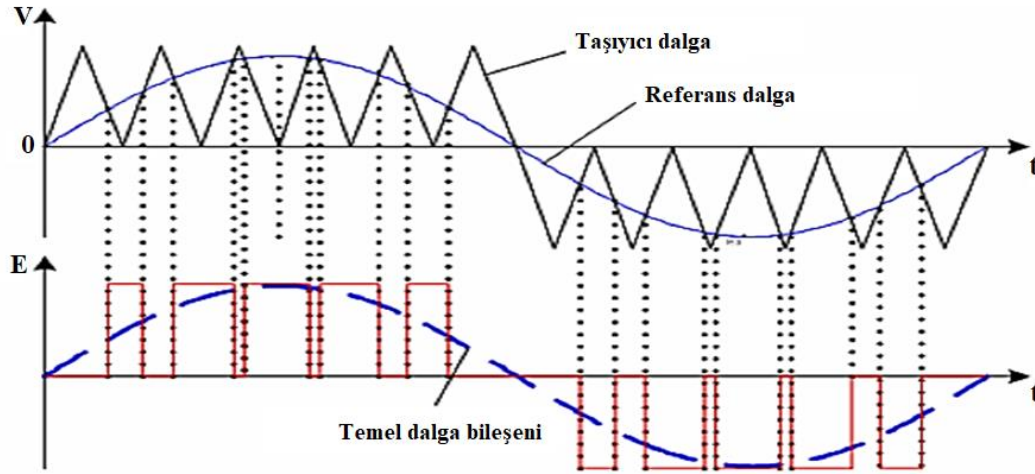
İnverter türlerinden biri olan PWM (Pulse Width Modulation–darbe genişlik modülasyonlu) inverterler ile ilgili bir sonraki bölümde, tek fazlı PWM inverterin Matlab Simulink uygulaması ortamında modellenmesi ile ilgili bilgiler verilmiştir.

5.5. PWM (Darbe Genişliği Modülasyonlu) İnverterler

İnverterlerin genel çalışma prensibi, DC bir giriş gerilimini istenen genlikte ve frekansta simetrik şekilde bir AC gerilime dönüştürmek olarak açıklanabilir. Çıkış gerilimi ayarlı olabilirken, bu işlem değişken veya sabit frekansta yapılmaktadır. Değişken çıkış gerilimini elde etmek için, inverter kazancı sabit tutularak ve değişken bir DC giriş gerilimi kullanılmalıdır. DC giriş geriliminin sabit olmadığı durumda veya ayarlanamıyorsa, inverter kazancı değiştirilerek ancak değişken bir çıkış gerilimi elde edilebilir, bu da genellikle PWM kontrolüyle yani inverterin darbe genişlik modülasyonu ile sağlanır. İnverter çıkışındaki AC gerilimin, girişteki DC gerilime oranı tanımsal olarak inverter kazancı demektir (Bayrak, 2013).

PWM inverter modelinde, bir referans sinyali oluşturularak inverter çıkışı belirlenir. İnverter çıkış frekansı, referans sinyalin frekansına bağlı olarak belirlenir, etkin çıkış gerilim değeri ise gerilim tepe değeri tarafından belirlenir. Taşıyıcı sinyalin (üçgen dalga) frekansı her yarı döngüdeki darbe sayısını belirler. Standart olarak bu inverter türünde DC giriş gerilimi sabittir. Çıkıştaki AC gerilimi ve frekansı inverter kontrol eder. Şekil 5.5'te gösterilen teknik ile PWM invertera bağlı yarı iletken anahtarlama elemanlarının tetikleme anlarının tespiti ve zaman senkronizasyonu sağlanır. İnverter çıkışındaki frekansı ve gerilim değerini belirleyecek referans bir sinüs işareti, kendisinden daha büyük genlik ve frekansa sahip olan bir üçgen dalga ile karşılaştırılır. Anahtarlama elemanlarının tetikleme anları, belirtilen bu iki işaretin çakışma noktalarıdır. Darbenin başlangıcı, sinüs dalgası ile üçgen dalganın negatif eğiminin kesiştiği andır. Darbenin durdurulduğu an ise sinüs dalga ile üçgen dalganın pozitif eğiminin kesiştiği yerdir. Darbe süresi tüm dalga boyunca sinüs şeklinde değişmektedir. Referans sinüs

işaretinin genliği azaltılarak veya arttırılarak, inverter çıkışındaki gerilim azaltılır veya arttırılır. Frekansın kontrollü bir şekilde değiştirilmesi, sinüs işareti frekansı değiştirilerek sağlanır (Bonnett, 1996).



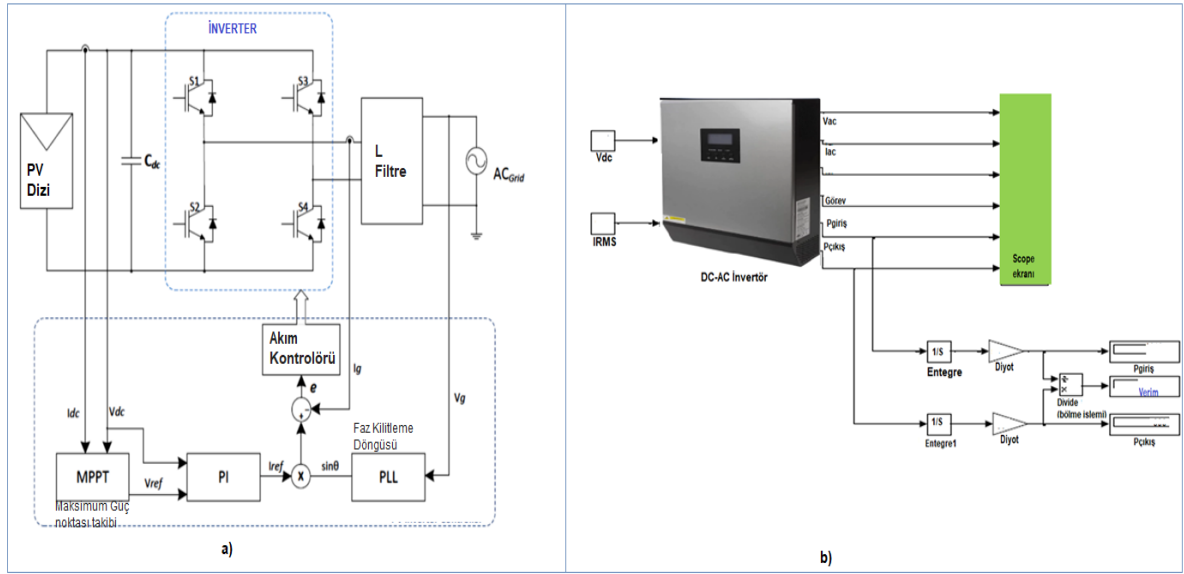
Şekil 5.5. PWM yöntemine ait dalga şekilleri (Bayrak, 2013)

İnverterin çıkışındaki gerilim değişimlerini kontrol altında tutmak denetimini sağlayabilmek için PWM tekniği kullanılır. Basamak veya kare dalga çıkış gerilimleri, yarı döngülük periyotlarla tekrarlanır bu şekilde genliği eşit darbeler elde edilir. Bu darbelerin genlikleri inverter girişindeki gerilim genliğiyle eşit büyüklüktedir. Çıkıştaki gerilime ait genlik ise, yarı periyotta iletim süresinin değiştirilmesiyle kontrol edilmektedir. Bu karakteristiğe, darbe genişliğini sabit tutarak darbe sayısını değiştirerek veya darbe sayısı değişmeden darbe genişliği değiştirerek ulaşılır. Bu bilgilerden yola çıkarak; anahtarlama mekanizmasının iletimde iken olan sürenin kesimde iken olan süreye oranının kontrollü bir şekilde değiştirilmesiyle inverterin çıkış gerilimi elde edilir. PWM inverterler iki çeşittir bunlar yarım köprü ve tam köprü inverterler olarak bilinmektedir (Bayrak, 2013).

5.6. PV İnverter Modelleme Örneği

Matlab simulink uygulamasında inverter analizi amacıyla girişinde belirli DC parametreler uygulayıp çıkışından alınacak AC akım ve gerilim değerleri ile inverter modellemesi ve analizi yapmak mümkündür. Örnek olarak kaynak (Bayrak, 2013)'te tek fazlı PV inverter Matlab Simulink'te tasarlanıp analizi yapılmıştır. İnverterlerin temel çalışma prensibine uygun olarak inverter girişine uygulanan DC gerilim değeri çıkışında

istenilen AC gerilime dönüştürülerek istenen çıkış sağlanmaktadır. Modelin çıkışında istenen AC akımın RMS değeri işlem başlangıcında girişe girilmektedir. RMS (Root Mean Square) değeri karekök ortalama olarak tanımlanmaktadır (değişen miktarların büyüklüğünün ölçülmesinde kullanılan kavram), buradaki kullanımı anlık değerlerin karesi alınmış fonksiyonunun ortalama değerinin kareköküdür. Çıkışta da diğer önemli değerler hesaplanmaktadır bunlar; AC çıkış akım ve gerilimi, PV invertere ait giriş ve çıkış güçleri, giriş akımı ve görev periyodudur.



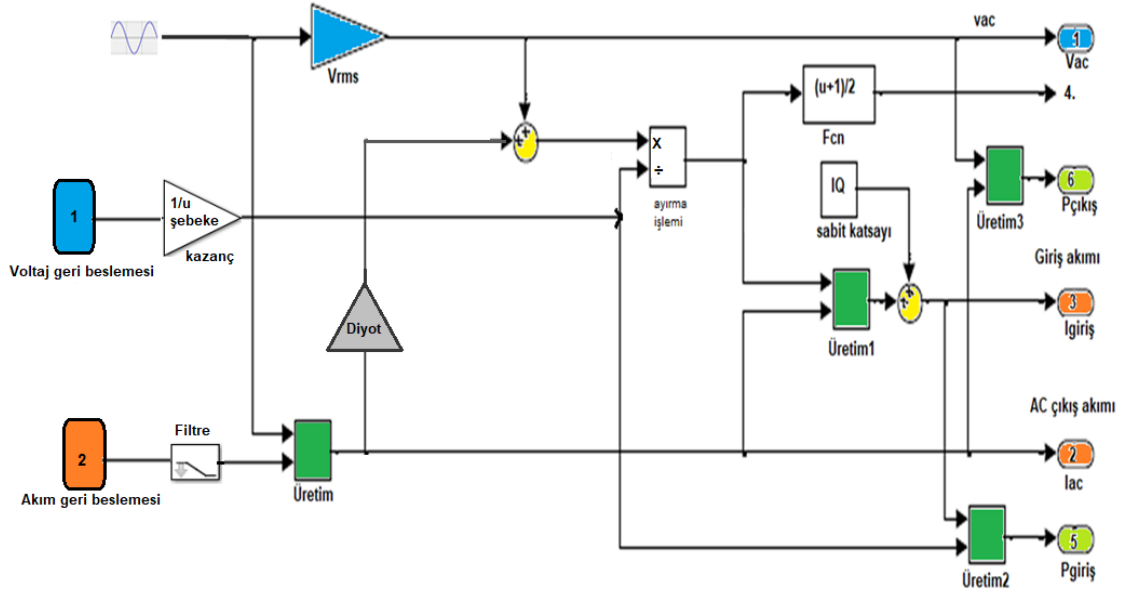
Şekil 5.6. Tek fazlı PV inverter a) blok diyagramı, b) modelleme örnek yapısı (Yarıkkaya ve Vardar, 2020)

Kaynakta belirtilen PV inverter modelin matlab simülasyonunda giriş DC 200 V gerilim uygulanması ve çıkışında AC olarak tek fazlı ve 50 Hz frekanslı 220 V RMS değerinde bir gerilim sağlandığı Şekil 5.6'daki tasarımın bir benzeri yapılarak gösterilmiştir. Çıkıştaki gücün değeri aşağıdaki genel denklem hesaplaması ile basitçe bulunmuştur. Çıkışta bağlı olan seri direnç 0.8 ohm değerinde olduğu ve anahtarlama işlemindeki akım kayıplarının 0.05 Amper olarak hesap edildiğinde PV inverter yaklaşık %97 verimle görevini yaptığı ifade edilebilir.

$$P_{out} = V_{RMS} \cdot I_{RMS} = 220 \cdot 4.5 = 990 \text{ W}$$

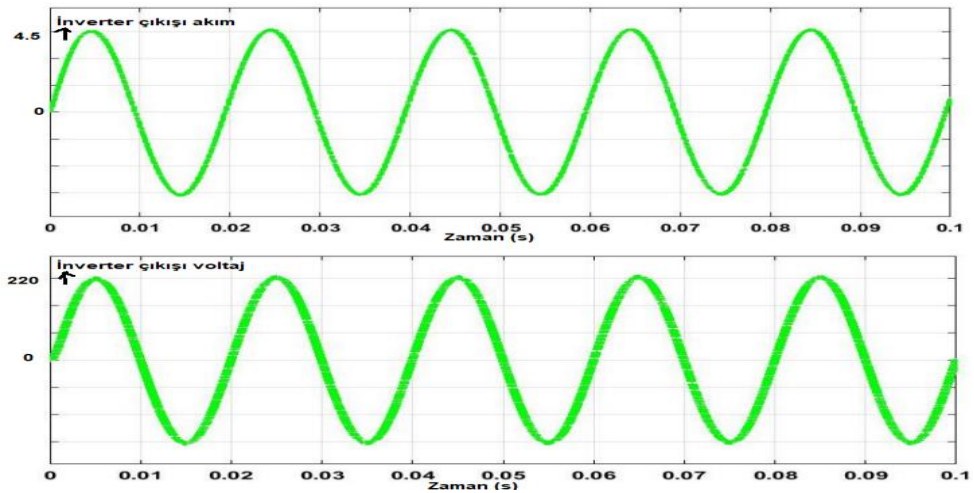
PV inverter modelinin iç yapısını gösteren şematığın benzer bir örneği Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Girişteki DC gerilim ve referans akım değerleri üzerinde inverterin çalışma denklemleri uygulanarak, inverter çıkışında istenen frekansta ve istenen RMS

değerli AC bir gerilim sağlanmaktadır. Bununla beraber çıkışta oluşan anahtarlama akım kayıpları ve çıkışa ait seri direnç üzerinde düşen gerilim de dikkate alınmaktadır.



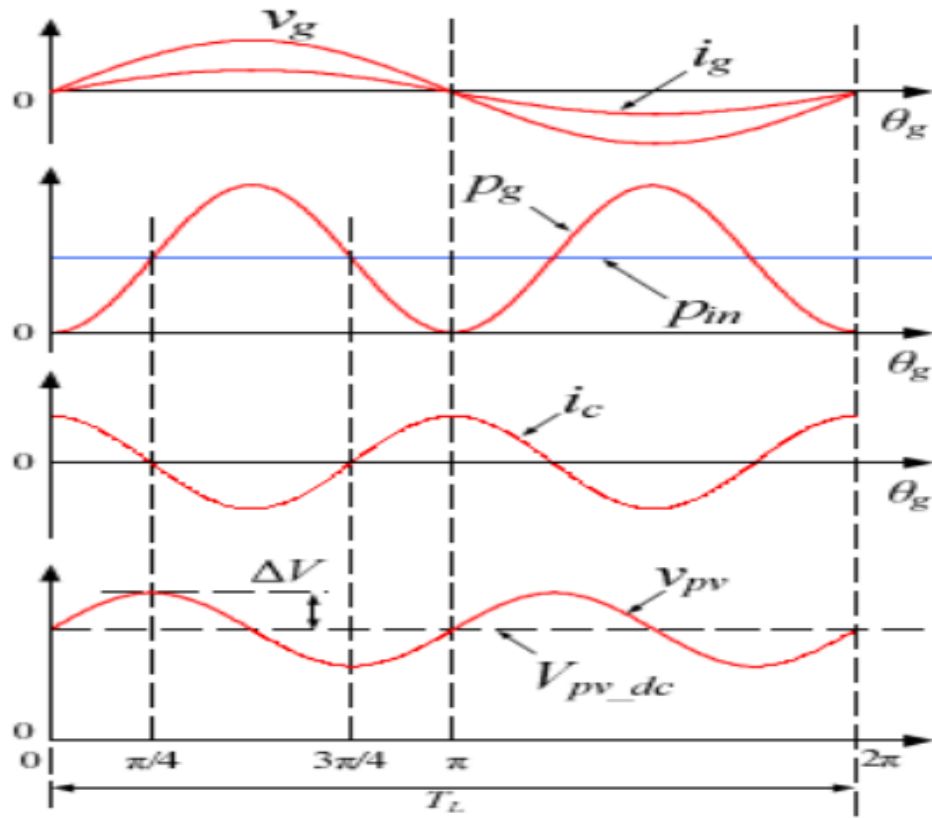
Şekil 5.7. PV inverter modeli iç yapısı (Bielskis ve ark., 2020)

PV inverter modelin giriş parametrelerinin uygun seçilip uygulanmasıyla inverter çıkışında AC gerilim ve akımın nasıl değiştiği Şekil 5.8'deki örnek bir değişim grafiği ile gösterilmiştir. PV inverterde çıkışta hedeflenen gerilim büyüklüğü olan 220 V RMS değerinin sağlandığı görülmüş ve PV inverter çıkışında alınan AC akım ise 4.5A RMS değerinde olduğu görülmüş olup bu aynı zamanda çıkıştan alınmak istenen referans akımı olduğu tespitle izah edilmiştir.

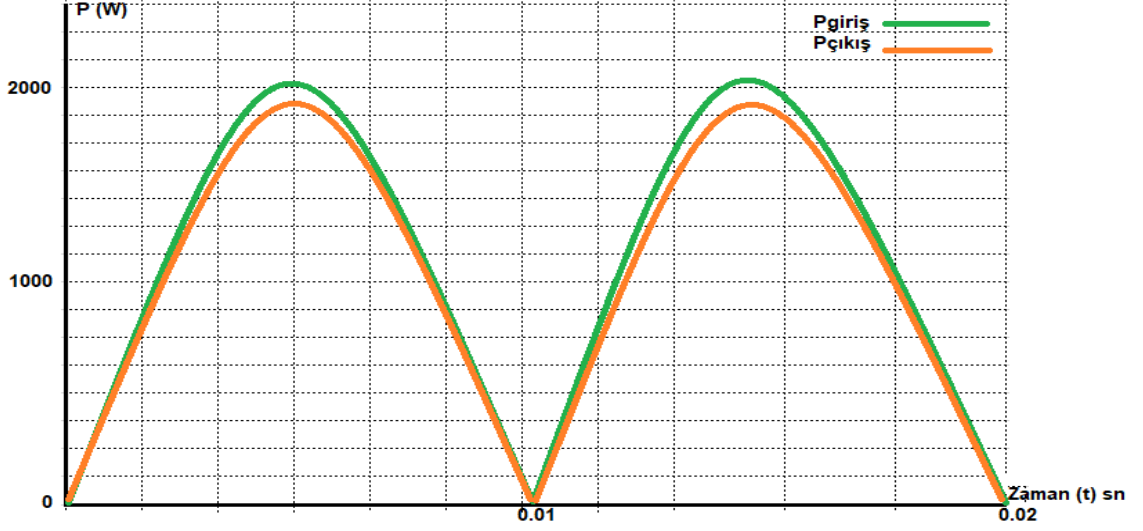


Şekil 5.8. Bir PV inverter çıkışında oluşan AC gerilim ve akımın değişimi (Rahman, 2017)

PV inverterin çıkışından düzenli bir şekilde 220V AC RMS gerilim alabilmek için inverterdeki anahtarlar kullanılıp bu anahtarların görev periyotları uygun hale getirilmesi ve istenen gerilimi alabilmek için değiştirilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Bu inverter modelde bunun sağlandığı görülmüştür. İnverter giriş ve çıkışındaki akım ve gerilimin değişim formunun örnek bir şekli Şekil 5.9’da yaklaşık değerlerle gösterilmiştir. Görev periyotların değişimi ile inverter çıkışında istenen akım ve gerilim kontrol altında tutulmaktadır. PV inverterin girişindeki ve çıkışındaki anlık güç değişimleri Şekil 5.10’da yaklaşık değerler ile grafik edilmiştir. İnverter giriş gerilimi 200 V olup akımı yaklaşık 10 A’dır. PV inverterin çıkışında görülen akım 6.34 A, tepeden tepeye çıkış gerilimi ise 311 V’tur. PV inverterin girişindeki ve çıkışındaki ani güçlere bakıldığında ortaya çıkan sonuçların benzer olduğu görülmüştür (Bayrak, 2013).



Şekil 5.9. PV inverter gerilim ve akım için örnek giriş ve çıkış dalga şekilleri (Fri ve ark., 2016)

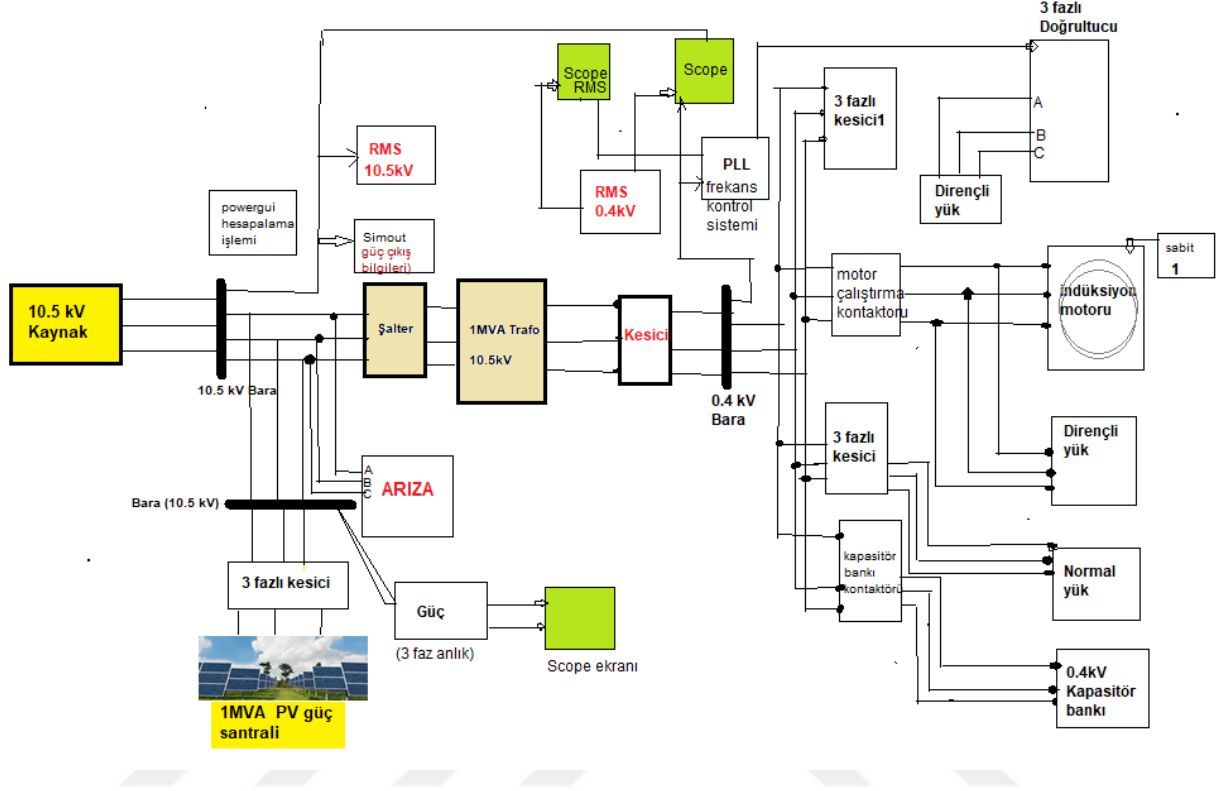


Şekil 5.10. PV inverterin giriş ve çıkış güçlerinin anlık durum değişimi (Bayrak, 2013)

5.7. Güç Dağıtım Sistemi Modelleme Örneği

Şebekeye bağlı PV sistemlerde oluşan güç kalitesine etki eden durumların tespiti için kaynak veri, güç sisteminin arıza durumunda verdiği tepkilerdir. Güç dağıtım sistemi modeli üzerinde yapılmış olan simülasyonlar, faz-toprak kısa devre ve faz-faz arası arızaları, transformatör enerjilendirilmesini, kapasitör bankı ve asenkron motorun devreye alınmasını ve değişken yükler altında sistemin çalışmasını ve tepkilerini içermektedir. İncelenmiş olan güç sistemi modelinde; geçici durum olayları, güç harmonikleri ve oluşan çentikler, gerilim sıçraması veya çökmesi, gerilimdeki dalgalanmalar gibi güç kalitesinin önemli olaylarının incelenmesine imkân sağlamaktadır. Örnek olarak kaynak (Yılmaz, 2018)'de bir güç ve şebeke dağıtım sistemi modeli tasarlanıp izah edilmiştir. İlgili çalışmada 1 MWp (Watt peak: Güneş panellerinin gücü için kullanılan birim) gücünde bir PV santralden alınan gerilim DC hat üzerinden invertörün girişine aktarılmış, invertör çıkışı ise LCL harmonik filtreden (giriş akımı harmoniklerini filtreleyerek, harmonik akım bozulmalarını azaltır) geçirilerek ana şebekeye ortak bağlantı noktasından (Bus1) bağlanmıştır. Bu güç dağıtım sistemi modelinde 10,5 kV ve 1 MVA lık ana şebeke hattı, 1 MWp yükünde şebeke irtibatlı PV santral iki sarımlı tipinde üçgen-yıldız bağlantılı düşürücü transformatör, rezistif yükler, indüktif yükler, sincap kafes türü asenkron motor, yüksek güç kapasiteli kapasitör bankı ve lineer olmayan üç fazlı yük gibi teçhizat ve katmanlar mevcuttur. 10,5 kV/0,4 kV kapasiteli transformatör, lineer olmayan üç fazlı (20 kVA RL) bir yük ve (150 kVA RL)

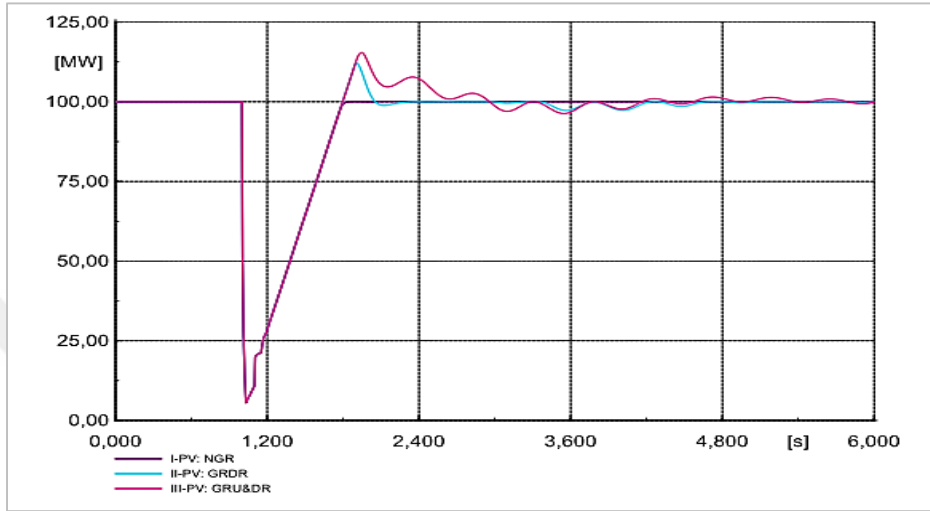
normal bir yük, 160 kW sincap kafes tipi indüksiyon motoru beslemektedir. Bununla beraber 50 kVA güce sahip bir kapasitör bankı 0,4 kV 'luk yük barasına dahil edilmiştir.



Şekil 5.11. Örnek güç dağıtım sistemi modeli (Yılmaz, 2018)

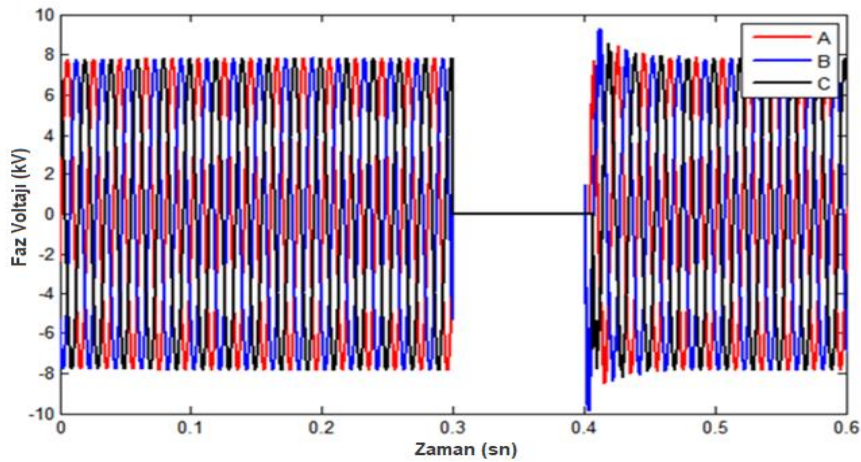
Şebekeye bağlı bu PV sistemin ana şebekeye ve şebekeye bağlı elektriksel donanımlara, güç kalitesi veya güç sistemi ile ilgili arıza ve değişimlere bağlı olarak verdiği tepkileri incelendiğinde; başta güç sistemi modeli oluşturulup geliştirilen model üzerinde arıza durumları, farklı yüklerde veya yük değişimlerinde sistemin tepkileri, tespit ve test amaçlı bu manevralara karşılık oluşan değişimleri kaynak çalışmada simülasyonlar ile test edilmiştir. Bu testler ile geçici durum olayları, güç harmonikleri ve oluşan çentikler, gerilim sıçraması veya çökmesi, gerilimdeki dalgalanmalar gibi güç kalitesi gibi kritik etkenler gözlemlenmiştir. Üç faz sistemlerde arızalar iki grupta incelenebilir; bunlar simetrik, asimetrik olarak fazlar arası arızalar ve fazlarla toprak arası olan arızalardır. Faz-toprak arızaları, tüm arızalar içinde %80'lik bir orana sahip olduğu edilmektedir. Kısa devre arızaları anında sistemde yüksek arıza akımları oluşur ayrıca bazı türdeki kısa devre arızalarında yüksek gerilimler de oluşabildiği görülmüştür. Bu yüzden kısa devre arızalarının en kısa sürede giderilmesi gerekir. Bir güç sisteminde 3 faz kısa devre arızası meydana geldiğinde, generatörlerden talep edilen aktif güç

miktarının büyük ölçüde azalmasıyla üretim-talep dengesizliği ortaya çıkar ve frekansta yükseliş meydana gelir. Kaynak (Çavdar ve ark., 2021) tarafından yapılmış olan bir çalışmada Şekil 5.12’de bir PV santralin 3 faz kısa devre arızası sonucunda sistem gücünde meydana gelen değişim test edilmiş olup PV santralin arıza başlangıç anında sisteme sağladığı aktif güç desteğini aşırı düşürdüğü görülmüştür.



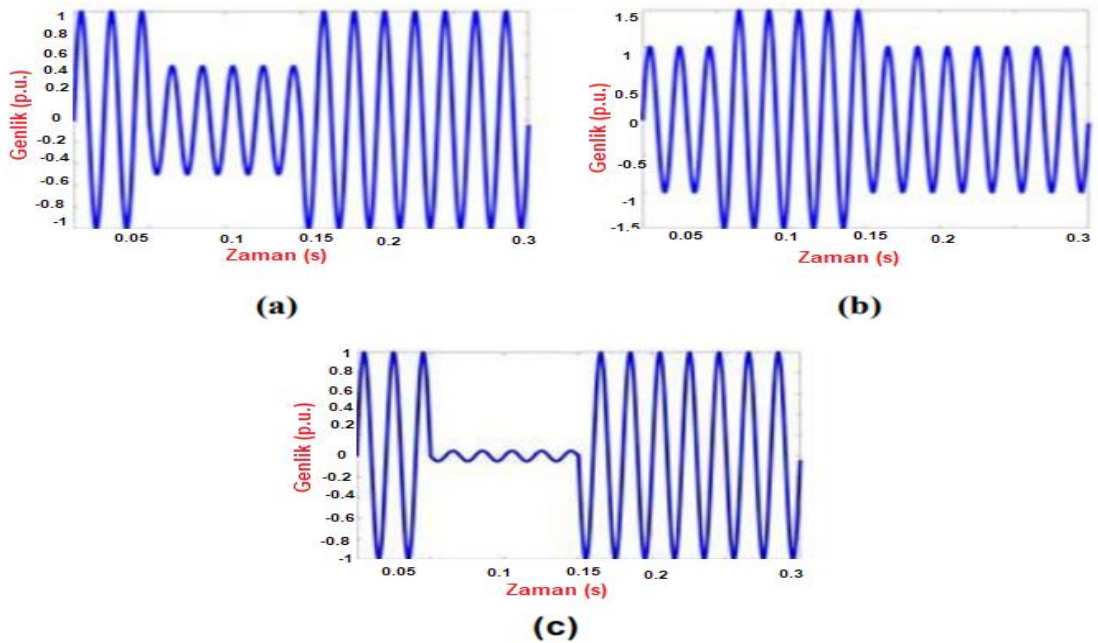
Şekil 5.12. 3 Faz kısa devre arızası sonucunda bir PV santralin aktif güç tepkisi (Çavdar ve ark., 2021)

Kaynak (Hota ve ark., 2016) tarafından şebekeye bağlı PV sistemin arıza analizi adlı çalışmada 3 faz-toprak arızası boyunca şebekedeki voltaj değişimi test edilmiş olup Şekil 5.13.’teki gibi bir voltaj değişim formu elde edilmiştir. Buna göre 0.3 ve 0.4 saniyeleri arası oluşan arızada faz voltajlarının gerilim çökmesi sonucu sıfırlandığı ve 3 faz voltajların simetrik bir şekilde etkilendiği görülmüştür.



Şekil 5.13. 3 Faz-Toprak arızası boyunca 3 fazlı şebekedeki voltaj değişimi (Hota ve ark., 2016)

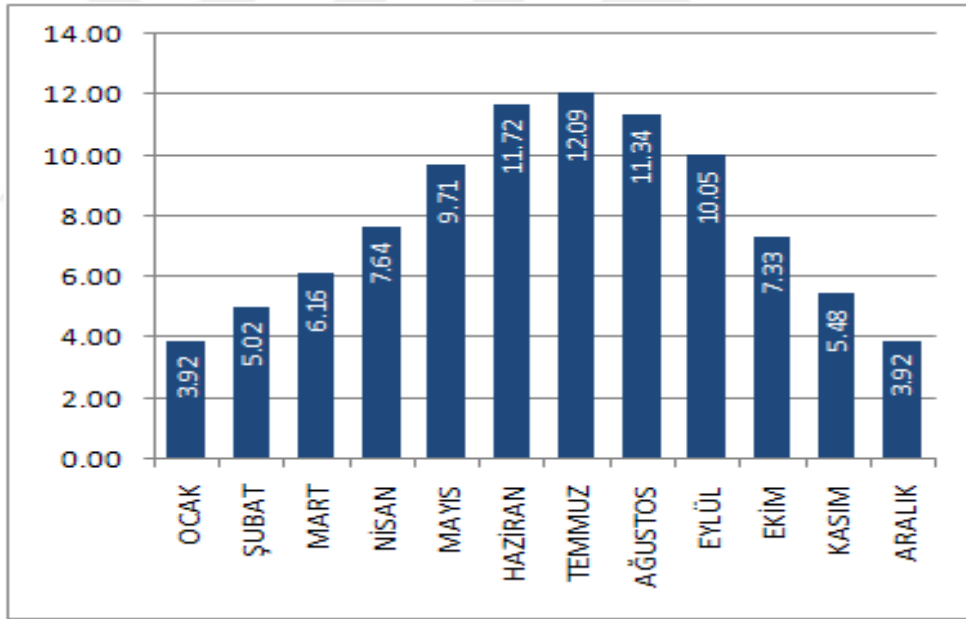
PV sistem santralleri bir arıza sonrası devreye girerken veya devreden çıkarken gerilim düşümü veya yükselmesine neden olabilmektedir. Bu hususta IEC 61000-3-3 standartlarına göre şebeke bağlantılı sistem yeni devreye verilirken veya bir arıza sonrası devreye girerken ve devreden çıkarken nominal gerilimin $\pm\%3,3$ 'ünü aşmayacak şekilde sınırlandırma ile standart belirlenmiştir. Ayrıca güç sisteminin devrede olduğu sürenin %95'inde nominal gerilim değerinin $\pm\%10$ 'unu aşmaması yönünde bir standart belirlenmiştir. Bu çerçevede güç, gerilim, akım analizleri yapılırken bu standart oranlara göre sınır değerler içerisinde analiz yapılması önemlidir. Gerilim etkin değerindeki değişimler bir dakikadan kısa süreli nominal değerler dışında olduğunda buna kısa süreli gerilim bozulmaları, bir dakikayı aşanlar uzun süreli gerilim bozulmaları olarak adlandırılır. Sisteme aşırı yüklenme veya hat boyunca meydana gelen arızalar sistemde gerilim çökmesine neden olabilir. Gerilim çökmesi, şebeke frekansında çalışan bir güç sisteminde 10ms-60s süre aralığında gerilimdeki %10-90 arasında meydana gelen azalma olarak belirlenmiştir. Gerilim sıçraması, şebeke frekansında çalışan bir sistemde 10ms-60s süre aralığında gerilimdeki %110-%180 arasında meydana gelen artış olarak tanımlanmıştır (Arıcı ve İskender, 2020). Şekil 5.14.'te bir arıza sonrası gerilimdeki değişimlerin grafikleri gösterilmiştir.



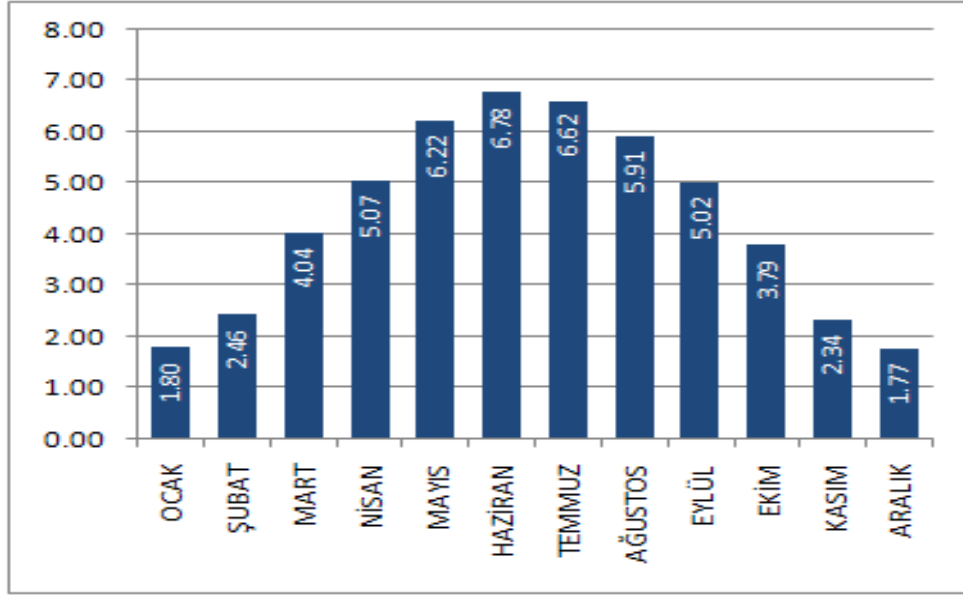
Şekil 5.14. Bir arıza sonrası oluşan gerilim değişimleri, a)gerilim çökmesi, b)gerilim sıçraması, c)gerilim kesintisi (Arıcı ve İskender, 2020)

5.8. Batman İli için PV Penetrasyon Optimizasyonu Simulink Uygulaması

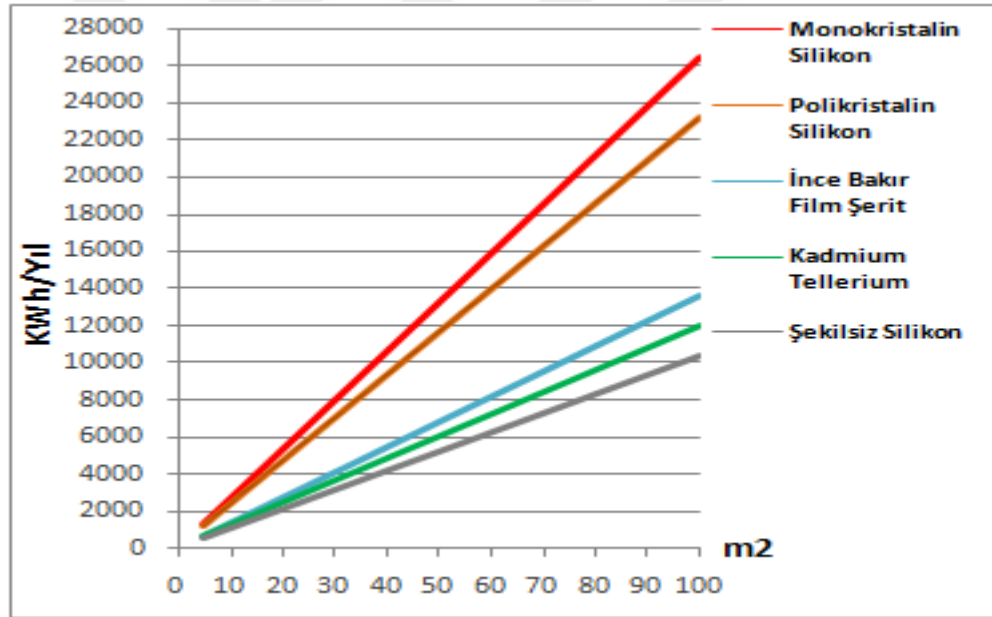
Bir PV sisteminin penetrasyon seviyesi, büyük aralıklı güç üretiminin neden olduğu gerilim ihlali nedeniyle genellikle sınırlıdır. Tez kapsamında yapılan bu uygulamada, bir dağıtım şebekesinin (IEEE-9 bara sistemi) PV penetrasyon seviyesinin güneş enerjisinden tam olarak yararlanmak amacıyla gerilim dalgalanmasını önlemek için tepe güneş ışınımı sırasında PV güç enjeksiyonunu azaltmaktadır. Bunun sağlanması için aktif bir güç azaltma stratejisinin kullanımı önerilmiştir. Fazla olan enerji, depolama sistemine aktarılarak ya da dağıtım şebekesine aktararak gerilim dalgalanmasının önüne geçilmiştir. PV güç üretiminde referans olarak, yenilenebilir enerji genel müdürlüğü sitesinden alınan veriler kullanılmıştır. Ortak kuplaj (PCC) noktasındaki gerilim değişimi, yük akış analizi ile yürütülerek elde edilmiş ve sonucun herhangi gerilim ihlaline neden olmadığı görülmüştür.



Şekil 5.15. Batman ili güneşlenme süreleri - saat (gepa.enerji., 2022)



Şekil 5.16. Batman İli global radyasyon (Güneş Işınım) değerleri (KWh/m²-gün) (gepa.enerji., 2022)



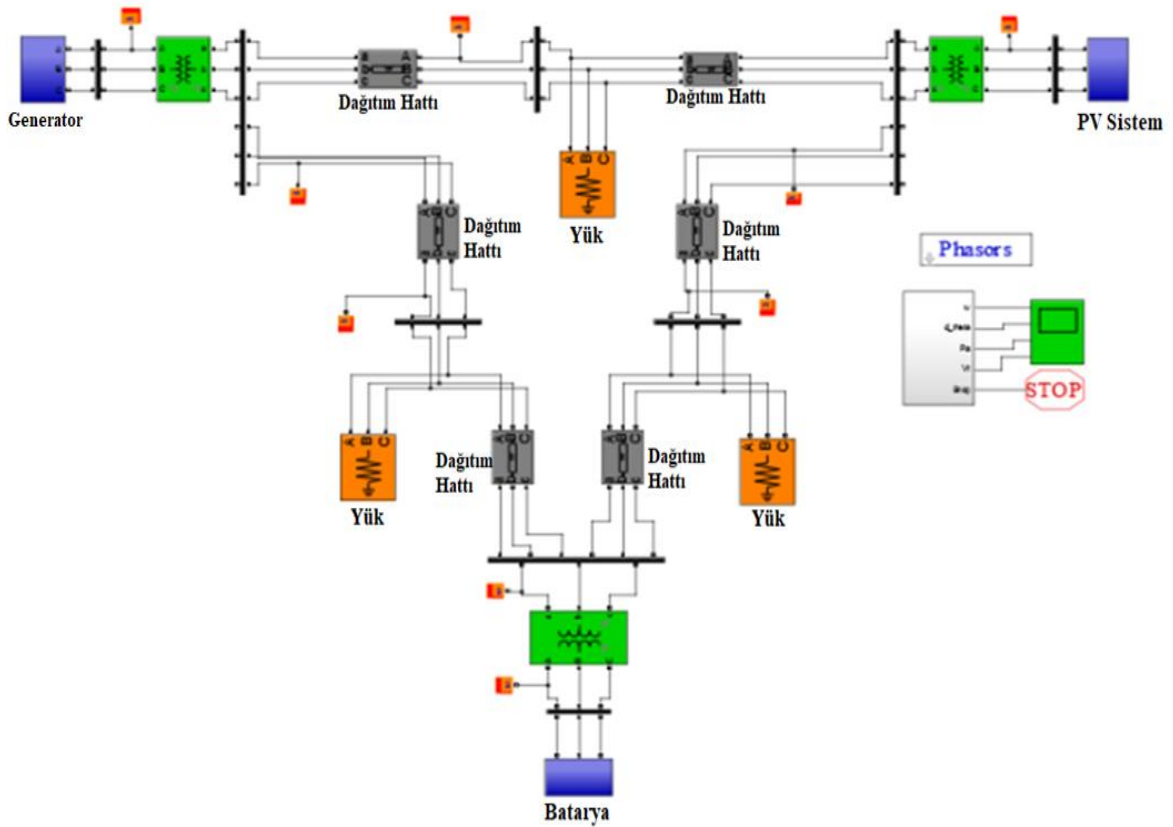
Şekil 5.17. Batman ili için PV tipi-alan-üretilebilecek enerji (KWh-Yıl) (gepa.enerji., 2022)

5.8.1.Kullanılan PV Sistemin Tanımı ve Sistem Parametreleri

Batman iline ait PV projesinin en iyi maliyet etkinliğini elde etmek için dağıtım sistemlerinin optimum PV penetrasyon seviyesini belirlemek amacıyla Matlab Simulink kullanılarak IEEE-9 baralı bir dağıtım sistemi modellenmiştir. Güneş ışıınımı analizinin yıllık süre eğrisini elde etmek için yenilenebilir enerji genel müdürlüğünden alınan saatlik hava durumu verileri kullanılmıştır (gepa.enerji., 2022). PV güç üretimi daha sonra PV

sistemi tarafından üretilen yıllık yenilenebilir enerjiyi elde etmek için kullanılan saatlik güneş ışınlamı seviyesi yardımıyla hesaplanmıştır. Üç fazlı yük akışı analizinde, bara gerilimini ölçmek ve PCC'deki gerilim değişimini bozmadan dağıtım şebekesini beslenebilecek maksimum PV güç üretiminin sağlanması amaçlanmaktadır. PV güç süresi eğrisine atıfta bulunularak, PV güç üretiminin aşılması, kısıtlanacak PV üretimi olarak kabul edilir. Altındaki PV güç üretim alanı, 1 yıllık bir süre boyunca elde edilen edilen ve dağıtım şebekesine satılan ya da depolanan PV enerjisini temsil eder.

Uygulamada aşağıda şekilde gösterilen IEEE-9 baralı bir dağıtım şebekesi dikkate alınmıştır. Bu 11,4 kV dağıtım fiderinin toplam iletken uzunluğu 12 km'dir ve üç büyük müşteriye hizmet vermektedir.



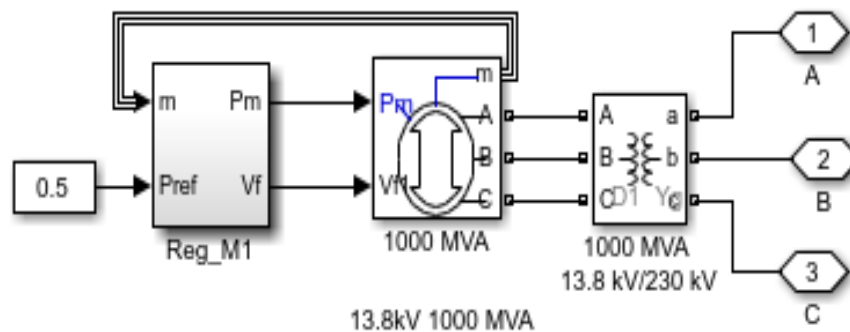
Şekil 5.18. Simulasyonda Kullanılan IEEE-9 Bara Sistemi

Tablo 5.1’de üç büyük müşteriye ait aktif reaktif güç parametre değerleri verilmiştir. Bu müşteri profillerinde, tepe yüklemenin gündüz meydana geldiği dikkate alınmıştır. Bu durum, PV sistemi tarafından güç üretiminin besleyici tepe güç yüklemesini etkili bir şekilde dengeleyebileceği anlamına gelir. Çünkü PV güç üretiminin çıktısı, PV panellerin yüzey sıcaklığına ve güneşin gökyüzündeki konumuna göre

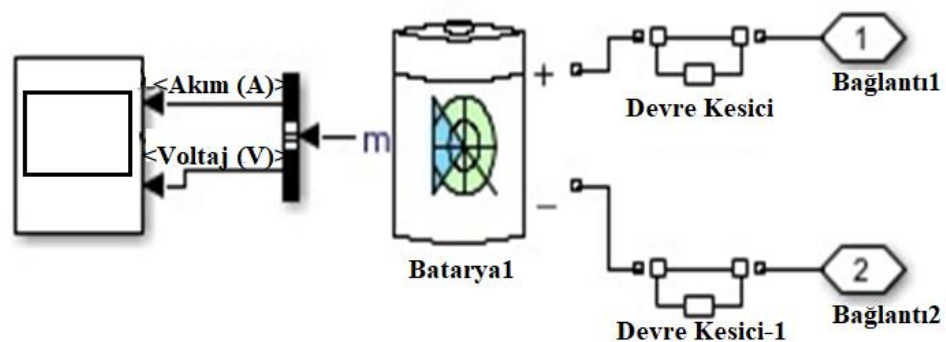
belirlenen ve bulutun rastgele perdelemesinden etkilenen güneş ışıınının değişimine göre değişir. Düzenlenen sistemin parametreleri aşağıda gösterilmiştir.

Tablo 5.1 Yüklerin Aktif Reaktif Güç Parametreleri

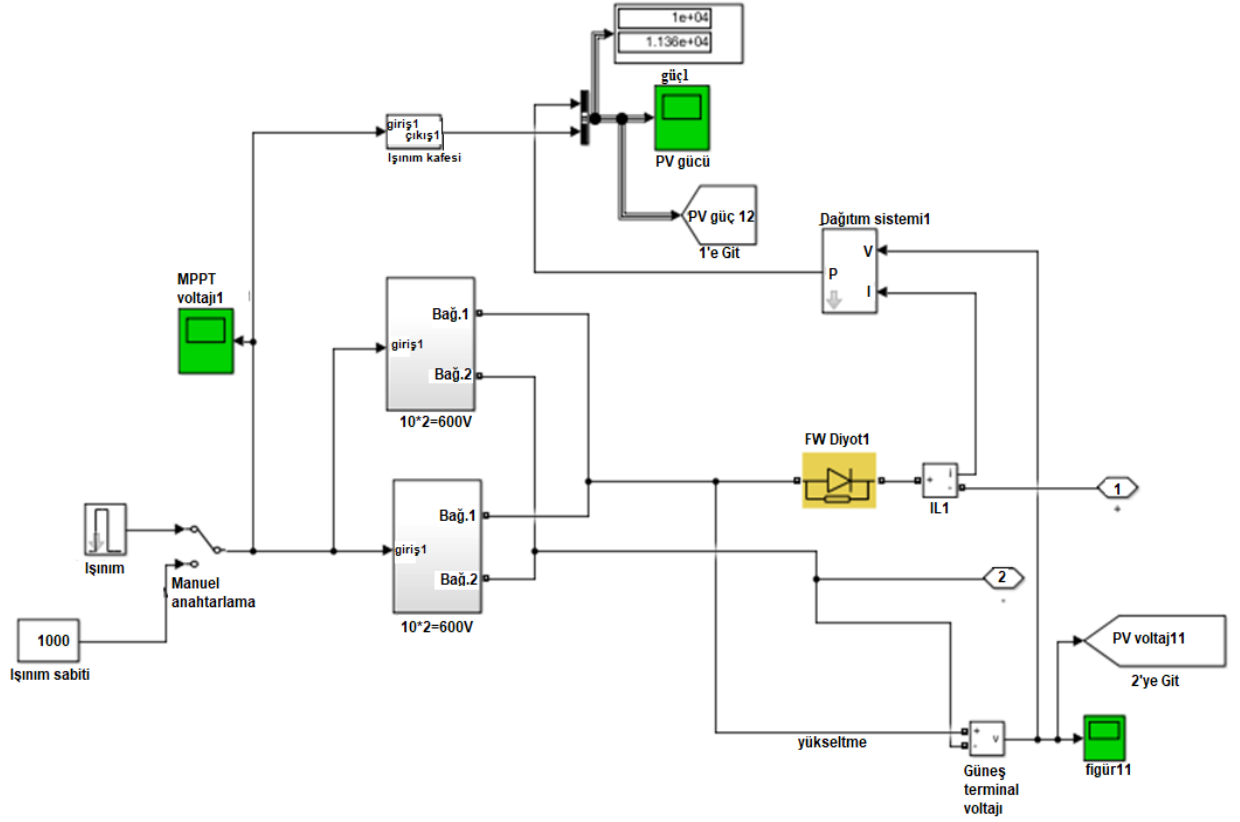
	Yük-1	Yük-2	Yük-3
Nominal (itibari) faz-faz voltajı V_n (Vrms)	1000	1000	1000
Nominal frekans f_n (Hz)	60	60	60
Aktif güç P (W)	1500	1300	700
Endüktif reaktif güç Q_L (pozitif değişken)	600	400	200
Kapasitif reaktif güç Q_c (negatif değişken)	0	0	0



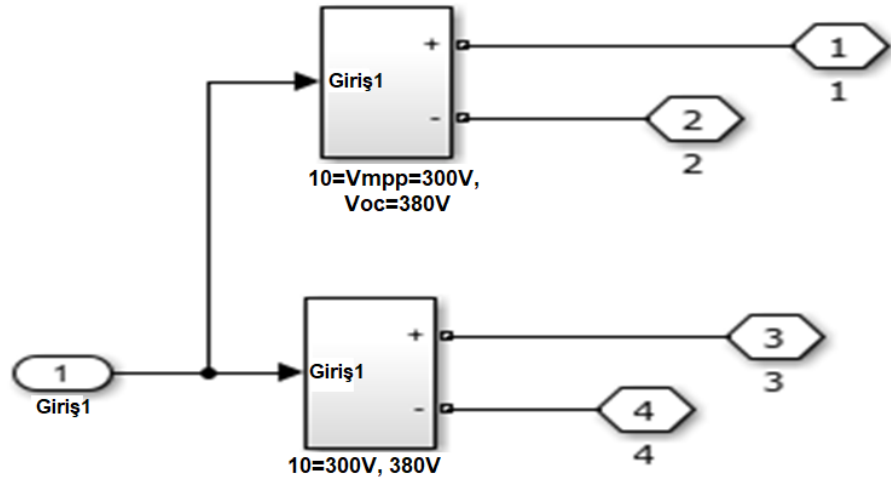
Şekil 5.19. Uygulamada kullanılan senkron generator modeli



Şekil 5.20. Uygulamada kullanılan batarya sisteminin modeli



Şekil 5.21. Uygulamada kullanılan PV sistemi modeli

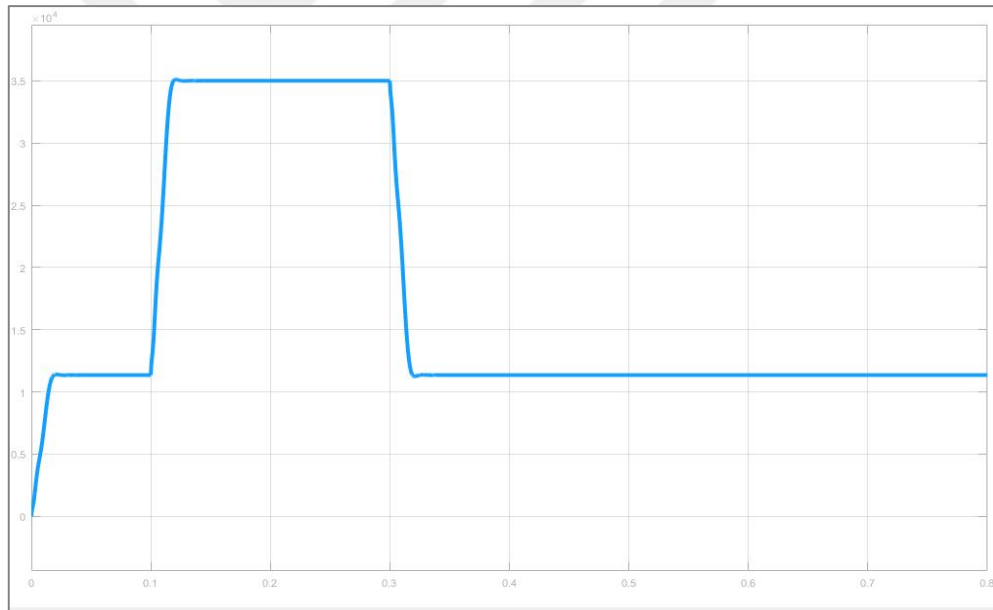


Şekil 5.22. Kullanılan PV sistemi modeli iç yapısı

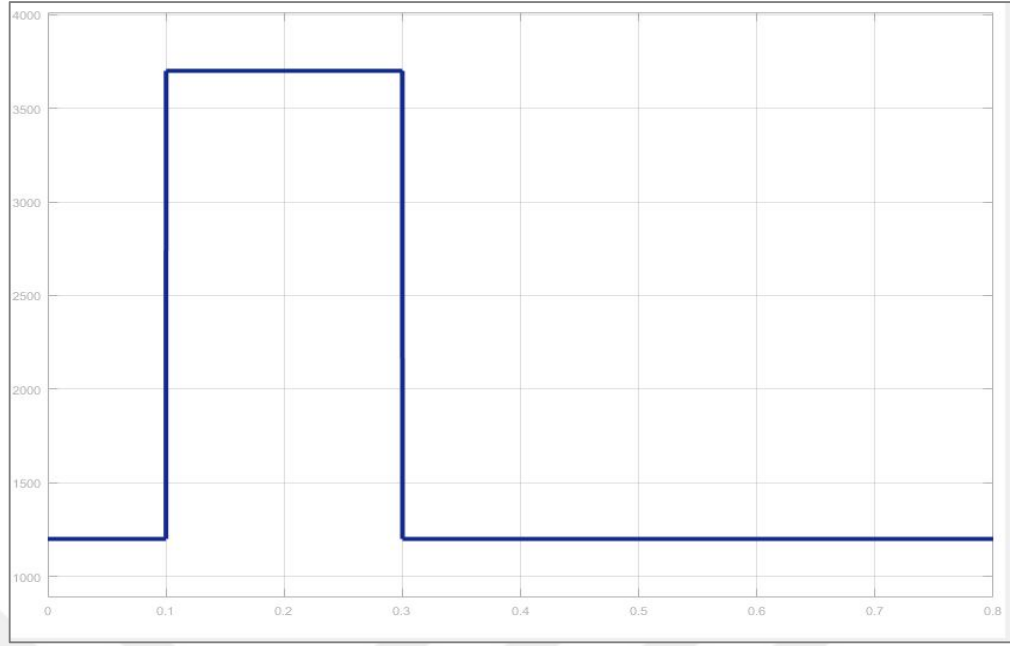
PV penetrasyonunun optimal seviyesinin belirlenmesi hakkında özetle; PV sistemlerinin maksimum penetrasyon seviyesini gerilim ihlaline neden olmadan

değerlendirmek amacıyla, güç akışını ve sistem geriliminin saatlik fider yüklemesine göre çözmek için üç fazlı yük akışı analizi uygulanmıştır. İletken boyutu, uzunluğu, dağıtım trafosu kapasitesi ve empedansı gibi hat bölümleri özellikleri, IEEE-9 baralı sistem baz alınarak simüle edilmiştir. Dağıtım şebekesinin ağ konfigürasyonu, dağıtım bileşenlerinin bağlantı özelliklerine göre topoloji işlemi gerçekleştirildikten sonra tanımlanır. Ardından, çalışma dağıtım besleyicisinin empedans matrisi oluşturulur ve PV güç enjeksiyonundan kaynaklanan değişimi çözmek için yük akışı analizi için uygulanmıştır.

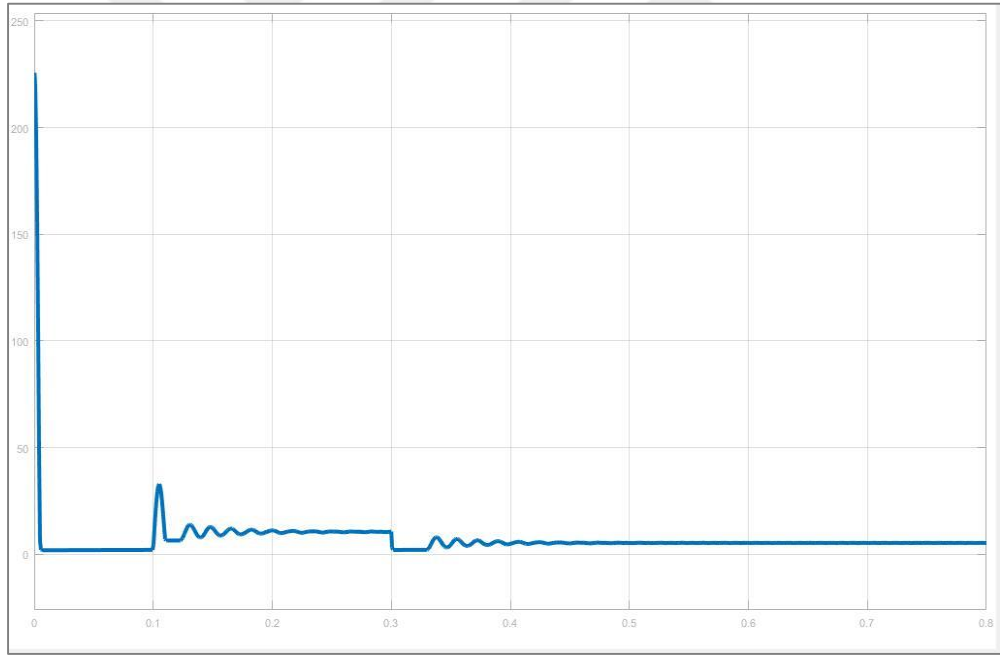
Şekil 5.23’de solar ışınlımı grafiği gösterilmiştir, buna göre solar ışınlımdaki değişime bağlı olarak PV çıkış gücünün düştüğünü göstermektedir. Ayrıca yine solar ışınlıma bağlı olarak MPPT geriliminde değişim yaşanmıştır Şekil 5.24 ve buna bağlı olarak PV çıkış geriliminde düşüş yaşanmıştır.



Şekil 5.23. Solar ışınlım grafiği

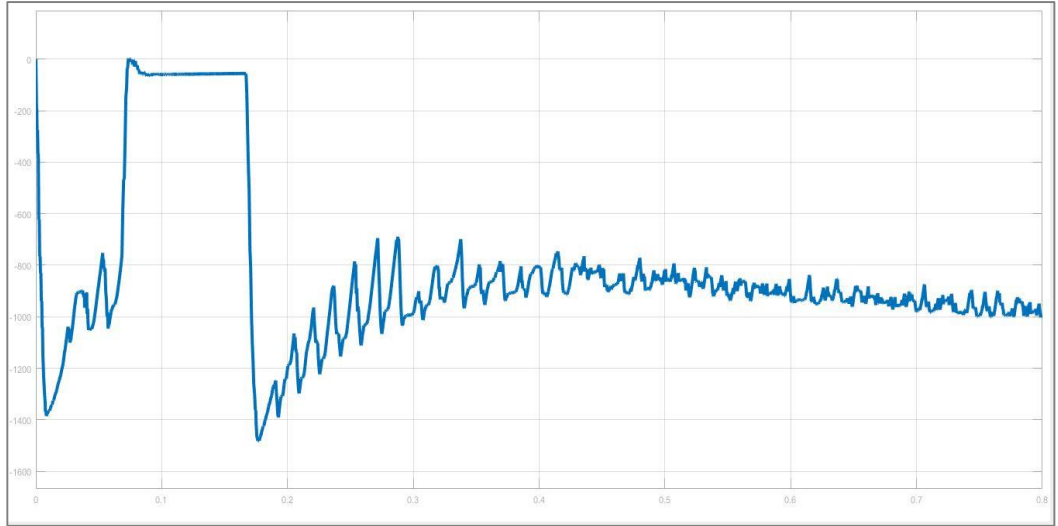


Şekil 5.24. PV – MPPT gerilimi değişimi

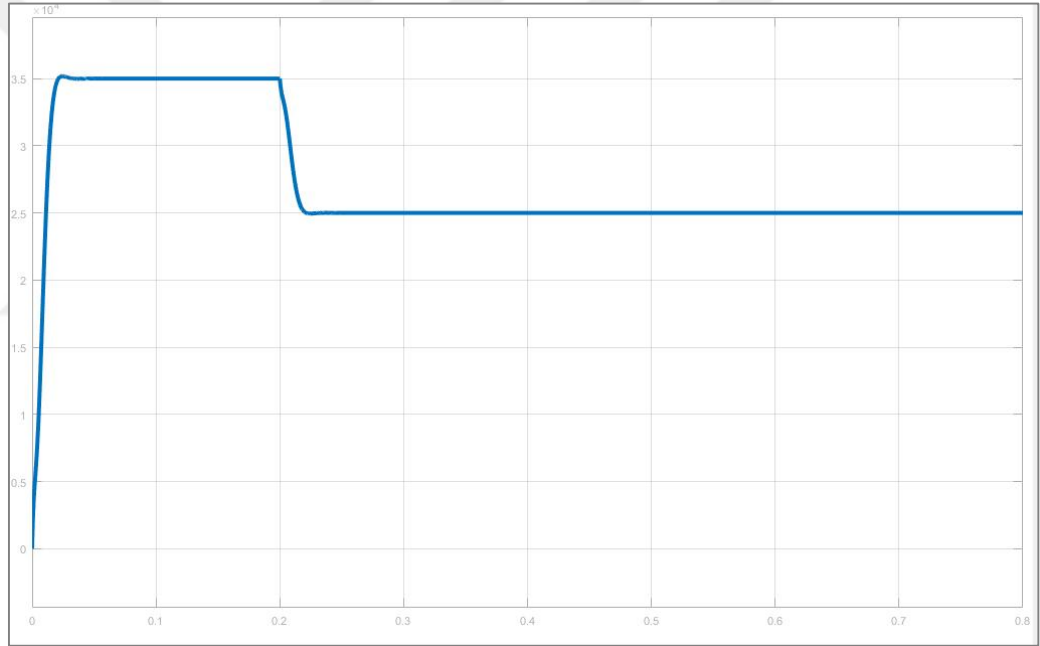


Şekil 5.25. PV dizinin çıkış gerilimi değişimi

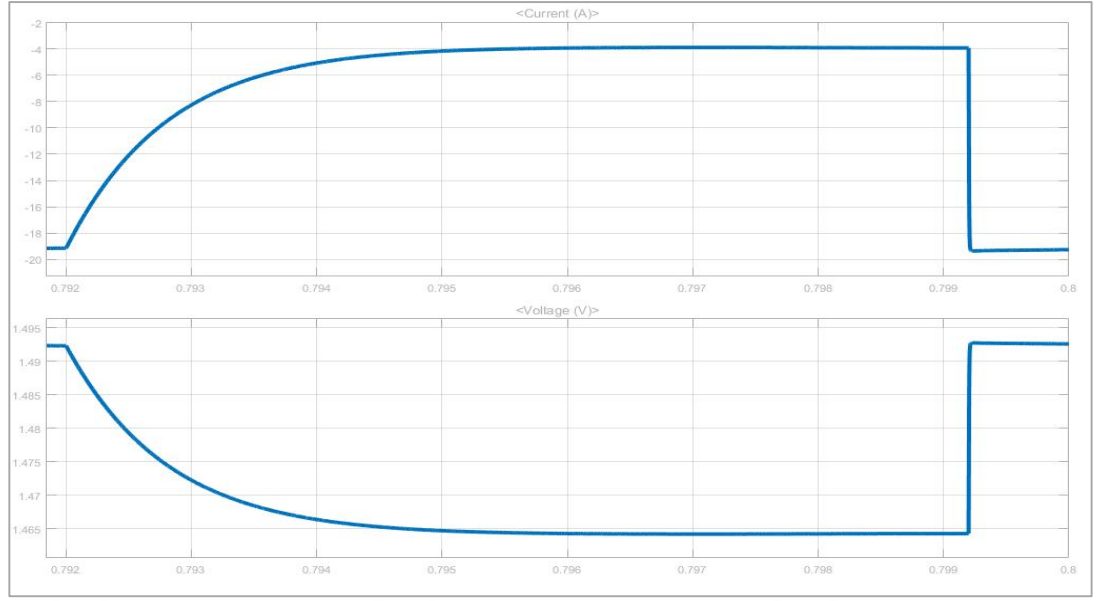
Şekil 5.25'te gösterilen PV dizinin çıkış gerilimi grafiği, solar ışıınımdaki değişim ve buna bağlı olarak MPPT'de yaşanan gerilim değişimine bağlı olarak oluşmuştur. Şekil 5.26'da ışıınımlı ve MPPT'e bağlı olarak inverter girişindeki DC gerilimin değişimini göstermektedir.



Şekil 5.26. İnverter giriş gerilimi değişimi

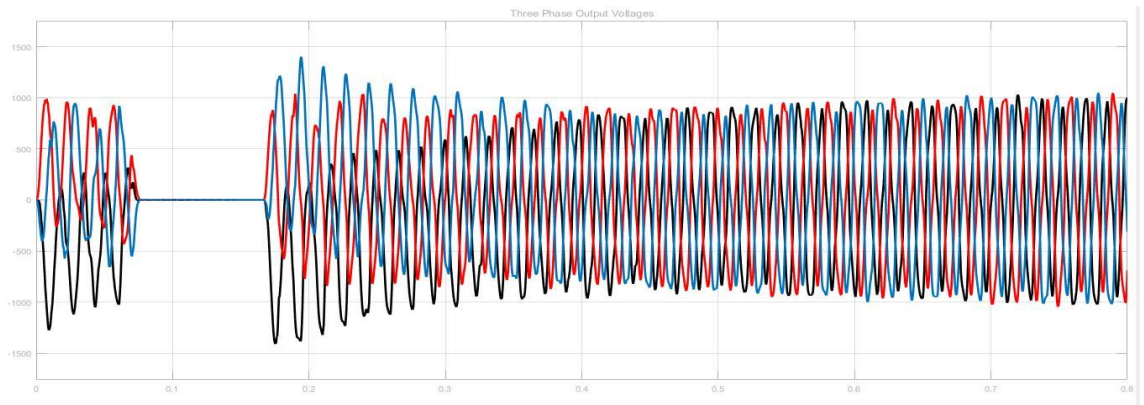


Şekil 5.27. PV gücü değişimi (Matlab Simulink)

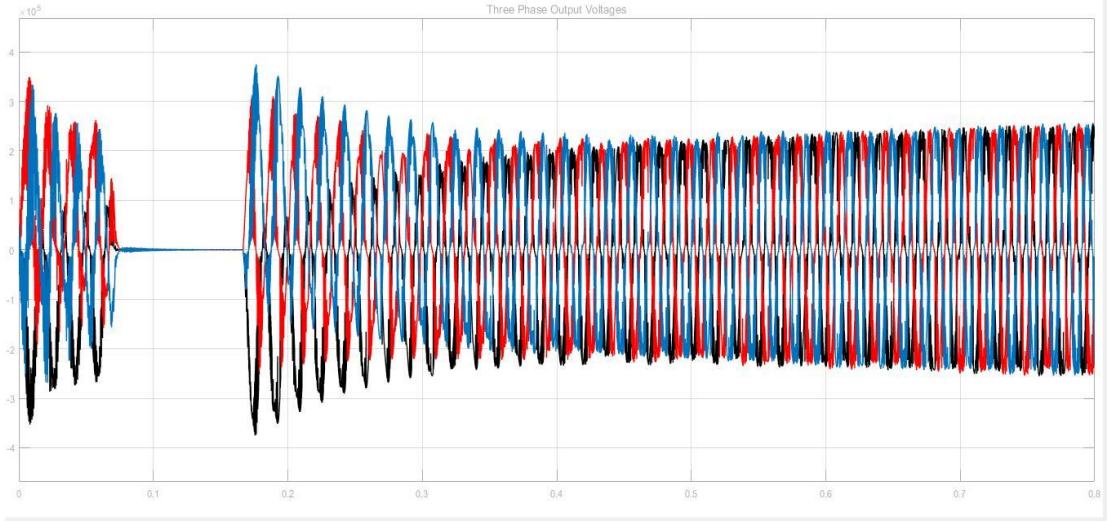


Şekil 5.28. Batarya çıkışı akım ve gerilim değişimleri

Batarya geriliminin düşme nedeni Şekil 5.27’de gösterildiği üzere PV sistemin gücündeki düşüş kaynaklıdır. PV sistemin gücündeki düşüş ise sistemdeki herhangi bir arızadan da kaynaklanabilir ya da anlık büyük bir bulut kümesi sistem üzerinde geçmiş ve ürettiği gücü düşürmüştür. Buna bağlı olarak yani büyük bir güç düşüşünden kaynaklı olarak baradaki gerilim sıfıra düşmüştür. Daha sonra batarya devreye alınmış ve bara gerilimi normal seviyeye çıkartılmıştır. Şekil 5.29’da gösterilen bara gerilimi grafiğine göre PV sistem gücünün düşmesine bağlı olarak gerilimin düştüğü görülmekte daha sonra batarya devre alınarak sistemin bara gerilimi tekrar istenilen seviye getirilmiştir.



Şekil 5.29. PV Sisteme Bağlı Baraya Ait 3 Faz Gerilimleri, PCC Bağlantı Noktası (Matlab Simulink)



Şekil 5.30. PV Sisteme Bağlı Baraya Ait 3 Faz-Nötr Gerilimleri, PCC Bağlantı Noktası (Matlab Simulink)

5.8.2 Uygulamadaki PV Güç Üretiminin Analizi

Bilindiği üzere, PV güç üretimi tahminleri PV panellerin güneş ışınımına ve yüzey sıcaklığına bağlıdır. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğünden alınan veriler 10 Temmuz 2020'daki saatlik güneş ışınımını ve 400 kWp ile 3000 kWp arasında değişen bir kapasiteye sahip PV sistemi tarafından üretilen güç hesaplanmıştır. 1300 kWp kurulu güce sahip PV sisteminde, maksimum güç üretimi 13:30'da 1005 kW'tır. PV güç üretimi ile çalışma dağıtım fiderinin yük akışı analizi, %2,5 voltaj değişimi kısıtlamasını ihlal etmeden enjekte edilebilecek maksimum PV gücünün 1380 kW olduğunu ve bu da 1780 kWp'lik bir kurulum kapasitesine karşılık geldiğini göstermektedir. Bu durumda, PV kurulum kapasitesi 1900 kWp'yi aştığında elektrik üretiminin azaltılması gerektiğini göstermektedir.

Güneş ışınımı için yıllık süre eğrisini dikkate alındığında bir yıllık süre içinde 1000'in üzerinde güneş ışınımı ile 139 saat vardır. Gerilim değişiminin ihlalini önlemek için kısılması gereken toplam PV enerjisi, PV kurulum kapasitesi ile birlikte artar. Örneğin, 2400 kWp kapasiteli PV sisteminde, gerilim kontrol şeması 796 saat boyunca toplam 105 MWh PV enerji kesintisi ile yürütülmelidir. PV sistemin kapasitesi 3500 kWp'e yükseldiğinde, bir yıllık süre içerisinde 1106 MWh PV enerjisinin kısılması gerekmektedir.

Enerji dağıtım sistemleri genellikle ana bara ve transfer barası olarak iki tür baradan oluşmaktadır. Temelde yük transferleri ana bara üzerinden sağlanmaktadır. Dağıtım sistemi üzerinde olası bir arıza veya bakım çalışması sürecinde kesici ve ayırıcılar devreye girerek açılır ve buna senkron bir şekilde transfer barası üzerindeki kesici ve ayırıcılar kapatılır. Bu işlemle beraber yük dağıtımını transfer barası üzerinde akmaya başlar. Arıza durumlarına tedbiren faz-faz arası ve faz-toprak arası açma röleleri uygun bir şekilde konumlandırılıp aktif durumda tutulmuş olmalıdır. Rölelerin kullanım amacına uygun olarak her rölenin içeriğinde kısa devre koruma direnci bulunmakta, kesinti veya arıza durumlarında üzerinden geçen kısa devre akımına bağlı olarak röleler sistemi devre dışı bırakmaktadır. Türkiye'deki enerji altyapısı enterkonnekte sistem ile birbiriyle bağlantılı olup çalışma frekansı 50 Hz'dir. Ani frekans düşüşlerinde veya yükselmelerinde sisteme müdahale ihtiyacı doğmaktadır. Frekans düşüşlerinde sistemdeki enerji ihtiyacı artmakta ve buna paralel üretim arttırılmalıdır. Frekansın yükselmesi durumunda ise enerji üretimi veya arzının fazlalaştığını göstermekte buna karşılık olarak belirli bölgelerde enerji üretiminde kısıtlamaya düşürmeye gidilmelidir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tezinde, PV dağıtılmış üretimin (PVDG) geleneksel şebekeye entegrasyonunda dağıtım sistemi üzerindeki olası etkilerine dair genel bir durum incelemesi yapılmıştır. Bu çalışmada, PVDG 'nin arka planını ve güç kalitesi üzerindeki etkilerini ve bir dağıtım sistemine bağlı PVDG 'nin izin verilen maksimum penetrasyon seviyesi ile ilgili değerlendirme ve analizler sonucu tespitler sunulmuştur. Kayıpların en aza indirilmesi, THDv ve voltaj sapması gibi çok amaçlı fonksiyonlarla PVDG probleminin optimal yerleştirilmesi ve boyutlandırılması için genel optimizasyon tekniğinin uygulanması izah edilmiştir. Belli güçte PV üretimin dağıtılmış geleneksel şebekeye bağlantı ve entegrasyonunda karşılan durumlara, çıkışta alınan gücün verimini analiz için test simülasyon uygulamaları değerlendirilmiş olup sonuçları incelenmiştir. Dağıtım sisteminde optimum planlama PVDG için yararlı teknik faktörler ile ilgili bilgi paylaşılmıştır. PVDG 'yi bir dağıtım sistemine kurarken teknik, ekonomik ve çevresel faydalar gibi büyük fırsatların ve faydaların olduğu sonucuna varılmıştır.

Batman ili için yapılan PV optimizasyonu simülasyon çalışmasında; 60 Hz sistem frekansında 1500W, 1300W ve 700W güçlerindeki 1000 Vrms voltajına sahip 3 yük IEEE-9 baralı bir dağıtım sistemi ile modellenmiştir. Simülasyonda 13.8kV gücünde senkron generator ve bir batarya ünitesi dağıtım sistemine dahil edilmiştir. Bu uygulamada PV sistemde yaşanan herhangi bir güç düşümüne karşı baranın gerilimini istenilen seviyede tutmak amaçlanmıştır. PV gücünün kısa süreli bir arıza veya bulut gölgelenmesi sonucu aniden düşmesi neticesinde PV sistemin bağlı olduğu bara geriliminin de senkron bir şekilde düştüğü görülmüştür. Bu durumla beraber batarya sistemi devreye alınarak Şekil 5.29'da görüldüğü üzere PV sistemin bağlı olduğu baranın gerilimi istenilen seviyeye çıkartılmıştır.

Tez kapsamında yapılan şebeke bağlantılı PV simülasyon dışında ayrıca literatürden örnek simülasyonlar ile PV paneller birleştirilerek elde edilen PV dizisi konverter ve inverterler de kullanılarak şebekeye entegre edilmesi, belli bir sıcaklık ve ışıyım altında PV yapıdan üretilen gerilim, akım değerleri ve elde edilen güç tespitleri paylaşılmıştır. PV diziler tarafından sağlanan gerilim yeterli seviyede değilse DC-DC konverterlar vasıtasıyla belli bir seviyeye yükseltilir. Konverterlerden çekilen güç seviyesi ile başlangıçta panelden alınan güce oranlandığında konverter verimi

hesaplanabilmektedir. Konverter çıkışından alınan güç invertere aktarılarak gerekli DC-AC dönüşüm işlemi ile inverter verimi de hesaplanabilmektedir. Bu işlemler ile solar ışıının ile alınıp önce DC enerjiye ardından AC enerjiye dönüştürölüp PV enerjının elektriğe dönüştürölmesi ve şebekeye aktarılacak duruma getirilmesi aşamaları gösterilmiştir. PV sistemlerin şebekeye bağlantısında; PV sistem, şebeke ve yük arasındaki elektriksel geçişlerin eşzamanlı senkron olması, şebekede ve yükteki kısa devre akımların tespiti, güç frekans gerilim akım ve harmonik gibi değerlerin entegrasyon yapısında temel unsurlar olduğu etkileriyle görölmüştür.

Bununla birlikte, PVDG 'yi bir dağıtım sistemine dahil ederken ortaya çıkan bazı teknik sorunlar ve zorluklar vardır. Bazı araştırmacılar tarafından değerlendirilen bu sorunlar ve zorlukların, dağıtım ağında uygun PVDG planlaması ve çalışması için değerlendirilmesi gerekir. Bu sorunları aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür (Kadir ve ark., 2014).

- (i) Güvenilirlik: Yenilenebilir enerji kaynaklı PVDG tarafından üretilen güç miktarı tam tutarlı değildir. Bu nedenle, PVDG 'nin şebekeye yüksek oranda nüfuz etmesi, güç sistemi ağının güvenilirliğini azaltabilir.
- (ii) Güç kalitesi: PVDG 'lerin yüksek penetrasyonu, güç sistemi ağına daha fazla harmonik yayılmaya neden olabilir, kayıpları artırabilir ve muhtemelen ekipman ömrünü kısaltabilir.
- (iii) Gerilim dalgalanması: PVDG 'nin yüksek penetrasyon seviyesi için önemli bir sorundur. Örneğin, yüke güç sağlarken güneş kaynağının dalgalanması aşırı gerilime veya düşük gerilime neden olacaktır. Voltaj dalgalanması, hassas ekipman üzerinde çok olumsuz etkilere sahiptir.
- (iv) Ters güç akışı: Dağıtım şebekesine PVDG dahil edilince koruma sistemlerinin arızalarına neden olabilir tek yönlü form ile yapılandırılır.
- (v) Sistem frekansı: Arz ve talep arasındaki dengesizlikler, sistemin nominal frekansından sapmalara neden olacaktır. PVDG 'nin yüksek penetrasyonu, sistem frekansını etkiler ve kontrol sürecini daha karmaşık hale getirir.
- (vi) Koruma şemaları: Ortak dağıtım ağları, radyal biçimde yapılandırılır. Böylelikle koruma sistemi tek yönlü akış modellerine göre tasarlanmıştır ancak PVDG entegrasyonu akışı çift yönlü ve topraklama, kısa devre, kesme kapasitesi ve denetleyici kontrol ve veri

toplama (SCADA) sistemleri gibi ek güvenlik ekipmanına ve ağı yeniden boyutlandırılmasına ihtiyaç duyar.

(vii) Ada koruma: Adalanma önleyici koruma programları, şebeke (LOG) koruma sisteminin kaybı yoluyla şebeke arızalarını hızlı gidermek için mevcutta PVDG 'lere uygulanmaktadır. Bu, PVDG dağıtımının avantajlarını önemli ölçüde azaltır (Kadir ve ark., 2014).

Bu tez çalışması; gittikçe gelişip yaygınlaşan ve ileri zamanlarda yenilenebilir olmayan kaynakların tükeneyeceği varsayılarak çok daha yaygınlaşması beklenen PV sistemlerin ve bu sistemlerin şebekeye bağlanıp aktarılması, geleneksel şebeke ile PV sistemin bağlantı entegrasyonunda genel olarak dikkat edilecek hususlarda; akım, gerilim, güç, kayıp, harmonik, senkronizasyon, penetrasyon gibi kritik hususlarda bilgi alınabilecek kaynaklar arasına girerek teorik kaynaklara katkı sağlayacaktır. Özellikle güneş enerjisinden alınan ışıının önceden kesin olmaması ve sabit bir ısı, ışık durumunun olmaması PV'lerdeki enerji dalgalanmalarına neden olacağını öngörerek PV'lerin geleneksel şebekeye ne güçte uygulanacağı yani penetrasyon durumunun en önemli konuların başında geldiği ve dikkat edilmesi gerektiği bilinmelidir. Ayrıca yapılan simülasyon ile PV sistemde kısa süreli bir arıza durumunda veya ışıındaki kısa süreli bir gölgelenme durumunda başta üretimdeki PV gücünün nasıl etkilendiği, buna bağlı olarak bara gerilimleri ve batarya gerilimindeki düşüş yönündeki etkilenme gösterilmiştir.

Öneri olarak mikrodan makroya yani küçük ölçekli özellikle konut tipi PV sistemlerin çok daha fazla yaygınlaşması gerekmekte olup bu planlama yolu ile sonuçta ülkeler seviyesinde büyük oranda PV yapıya geçilmesi sağlanabilir. Bu şekilde kaynağı sınırlı olan enerji kaynaklarına olan bağımlılık azalacak ve yenilenebilir kaynaklarla enerji üretimi özellikle güneş enerjisi ve bunun sistemleri olan PV sistemler geleneksel enerjinin yerini alacaktır. PV sistemler ihtiyaç ve talep durumuna göre farklı kapasite ve ölçeklerde kurulabildiğinden, iletim kayıpları daha düşük olduğundan, üretilen fazla enerjinin enterkonnekte diğer şebekelere satılabilmesi mümkün olduğundan, herhangi bir arıza durumunda veya PV sistemin yetersizliği durumunda şebeke devreye girerek üretim ve dağıtım devamlılığı mümkün olduğundan bu faydalarla tüm enerji temini çeşitlilikleri içerisinde PV üretimin oranının sürekli artırılması mutlak bir gerekliliktir.

KAYNAKLAR

- Afifi, S. N. and Darwish, M. K., 2014, Impact of hybrid renewable energy systems on short circuit levels in distribution networks, *49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 1-5.
- Agüero, J. R. and Steffel, S., 2011, Integration challenges of photovoltaic distributed generation on power distribution systems, *Proceedings of IEEE PES 2011 General Meeting*, Detroit, MI.
- Amanifar, O. and Hamedani, G. M. E., 2011, Optimal distributed generation placement and sizing for loss and THD reduction and voltage profile improvement in distribution systems using Particle Swarm Optimization and sensitivity analysis, *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 3, 47–53.
- Anonim, 2014, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, “*Türkiye’nin Enerji Görünümü*,” Yayın No: MMO/2014/616, Ankara.
- Anonim, 2020, <https://gunder.org.tr/wp-content/uploads/Güneşin-Yol-Haritası-Rapor-KAPAK.pdf> [Online] [Ziyaret Tarihi: 28.04.2022].
- Anonim, 2021, [online], <https://www.myenerjisolar.com/2021-turkiyede-satilan-gunes-panelleri-gucleri-ve-satis-fiyatlari-nedir/>, [Ziyaret Tarihi: 01.09.2022].
- Anonim, 2022, *Türkiye’nin Coğrafi Konumu* [online]. <https://www.cografyabilimi.gen.tr/turkiyenin-cografik-konumu/>, [Ziyaret Tarihi: 01.09.2022].
- Anonim, 2022, [online], <https://mundasolar.com/urun-kategori/gunes-paneli/>, [Ziyaret Tarihi: 01.09.2022].
- Arıcı N. ve İskender A., 2020, Fotovoltaik güneş santrallerinde şebeke bağlantı sorunları ve çözümleri”, *Politeknik Dergisi*, 23(1), 215-222.
- Arora, N.D. and Hauser, J.R., 1982, Temperature dependence of silicon solar cell characteristics. *Sol. Energy Mater*, 6, 151–158
- Arrillaga, J. and Watson, N. R., 2003, *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA.
- Azmy, A. M. and Erlich, I., 2005, Impact of distributed generation on the stability of electrical power systems, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1056–1063.
- Barker, P. P. and De Mello R. W., 2000, Determining the impact of distributed generation on power systems. I. radial distribution systems, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 3, 1645–1656.

- Bayrak, G., 2013, Şebeke bağlantılı bir fotovoltaik sistemin tasarımı ve farklı şebeke koşulları altında analizi, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 23-27, 50-55.
- Bazilian M, Onyeji I, Liebreich M, MacGill I, Chase J, Shah J, Gielen D, Arent D, Landfear, D. and Zhengrong, S., 2013, Re-considering the economics of photovoltaic power, *Renewable Energy*, 53, 329-338.
- Begovic M., Kim, I., Novosel, D., Agüero, J. R. and Rohatgi, A., 2012, Integration of photovoltaic distributed generation in the power distribution grid, 45th Hawaii International Conference on System Sciences.
- Begovic, M. and Kim, I., 2011, Distributed renewable PV generation in urban distribution networks, *Proceedings 2011 IEEE PSCE*, Phoenix, AZ.
- Begovic, M. and Pregelj, A., 2000, Four-year performance assesment of the 342 kW PV system at Geoegia Tech, *Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE 15-22 Sept. 2000*, 1575–1578.
- Begovic, M., 2001, Sustainable energy technologies and distributed generation, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 540–545.
- Benhabib, M. C., Myrzik, J. M. A. and Duarte, J. L., 2007, Harmonic effects caused by large scale PV installations in LV network, *9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU'07)*, 1–6.
- Bielskis, E., Baskys, A. and Valiulis, G., 2020, "Controller for the Grid-Connected Microinverter Output Current Tracking", *Symmetry*, 12(1), 112. <https://doi.org/10.3390/sym12010112>
- Bilal, H. M. ve Khan, A. Z., 2015, Economic planning of network for integration of renewable: A review, *Power Generation System and Renewable Energy Technologies (PGSRET)*, 1-3.
- Bollen, M. H. J., 2003, What is power quality?, *Electric Power Systems Research*, vol. 66 (1), 5–14.
- Bonnett, A., 1996, *The Application Considerations of PWM Inverters and A.C. Induction Motors to a Total System*, U.S. Electrical Motors, EASA Convention.
- Borbely, A. M. and Kreidel, J. F., 2001, Distributed Generation: *The Power Paradigm for the New Millennium*, CRC Press, NewYork, NY, USA.
- Borges, C. L. T. and Falcao, D. M., 2006, Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 28 (6), 413–420.
- Branker, K., Pathak, M.J.M. and Pearce, J. M., 2011, A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15 (9), 4470–4482.

- Casavola, A., Franz`e, G., Menniti, D. and Sorrentino, N., 2011, Voltage regulation in distribution networks in the presence of distributed generation: a voltage set-point reconfiguration approach,” *Electric Power Systems Research*, 81 (1), 25–34.
- Celli, G., Ghiani, E., Mocci, S., and Pilo, F., 2009, Multi-objective programming to maximize the penetration of distributed generation in distribution networks, *20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED '09)*, 1–5.
- Chen, L., Qi, S. and Li, H., 2012, Improved adaptive voltage controller for active distribution network operation with distributed generation, *47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC '12)*, 1–5.
- Chen, P. C., Salcedo, R., Zhu, Q., De Leon, F., Czarkowski, D., Jiang, Z. P., ... and Uosef, R. E. (2012). Analysis of voltage profile problems due to the penetration of distributed generation in low-voltage secondary distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(4), 2020-2028.
- Chen, T., Chiang, L., and Yang, N., 2012, Examination of major factors affecting voltage variation on distribution feeders, *Energy and Buildings*, 55, 494–499.
- Chen, X. and Sun, J., 2011, A study of renewable energy system harmonic resonance based on a DG test-bed,” *26th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'11)*, 995–1002.
- Chua, K. H., 2012, Energy storage system for mitigating voltage unbalance on low-voltage networks with photovoltaic systems, power delivery, *IEEE Transactions on*, 27, 1783-1790.
- Cipcigan, L. M. and Taylor, P. C., 2007, Investigation of the reverse power flow requirements of high penetrations of small-scale embedded generation, *IET Renewable Power Generation*, 3 (1), 160-166.
- Crossing The Chasm. *Deutsche Bank Markets Research* [Online], https://www.db.com/cr/en/docs/solar_report_full_length.pdf [Ziyaret Tarihi: 15 Haziran 2022], 1-82.
- Çavdar B., Akyazı Ö., Sahin E. ve Nuroglu F., 2021, Büyük ölçekli fotovoltaik santrallerde aktif güç kontrol yöntemlerinin frekans kararlılığı analizi. *EMO Bilimsel Dergi*, 11(21), 17-27.
- Daly, P. A. and Morrison, J., 2001, Understanding the potential benefits of distributed generation on power delivery systems,” in *Proceedings of the Rural Electric Power Conference*, A21–A213.
- Demirok, E., Sera, D., Teodorescu, R., Rodriguez, P. and Borup, U., 2010, Evaluation of the voltage support strategies for the low voltage grid connected PV generators, *2nd IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE '10)*, 710–717.
- Dündar, C., 2018, Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyelleri. *TÜBA-Rüzgâr Enerjisi Teknolojileri Çalıştayı ve Paneli*, Sunum Dokümanları, 1-15 Sayfa, Ankara.

- Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2009, Dünya’da ve Türkiye’de güneş enerjisi, Ankara: DEKTMK Yayın No: 0011/2009, EKC Form Ofset, Ankara.
- Dünyadaki ve Türkiye Güneş Enerjisinin Gelişimi- *Fotovoltaik (FV) Sistemler* [Online], <https://www.myenerjisolar.com/dunyadaki-ve-turkiye-gunes-enerjisinin-gelisimi-fotovoltaik-fv-sistemler/> [Ziyaret Tarihi: 25.04.2022].
- Eajal, A. A. and El-Hawary, M. E., 2010, Optimal capacitor placement and sizing in unbalanced distribution systems with harmonics consideration using particle swarm optimization,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25 (3), 1734–1741.
- Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, 2022, *Yenilenebilir Enerji* <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/pages/72.aspx> [Ziyaret Tarihi: Ağustos 2022]
- Ezzt, M., Marei, M. I., Abdel-Rahman, M. and Mansour, M. M., 2007, A hybrid strategy for distributed generators islanding detection, *IEEE PES Power Africa 2007 Conference And Exposition*, 1-7.
- Fri, A., Bachtiri, R. and Ghzizal, A.E., 2016, Improved MPPT Algorithm for Controlling a PV System Grid Connected for Rapid Changes of Irradiance. *International Review of Automatic Control (IREACO)*. 9. 11. 10.15866/ireaco.v9i1.7921.
- GEPA. 2015, [Online], <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/> [Ziyaret Tarihi: 27.04.2020].
- Hota, P., Panda, B. and Panda, Bh., 2016, Fault Analysis of Grid Connected Photovoltaic System, *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 5 (4), 35-44.
- Hunt, T., 2015, The solar singularity is nigh. *Greentech Media* [Online], <https://www.greentechmedia.com> [Ziyaret Tarihi: Haziran 2020].
- Jenkins, N. and Strbac, G., 1995, Effects of small embedded generation on power quality, *IEE Colloquium on Issues in Power Quality*, 6, 1-4.
- Kadir, A. F. A., Khatib, T. and Elmenreich, W. (2014), Integrating photovoltaic systems in power system: power quality impacts and optimal planning challenges,, *International Journal of Photoenergy*, 1-7.
- Kim, P. and Polivarapu, H., 2011, Solar photovoltaic industry: 2011 Outlook – FIT cuts in key markets point to over-supply, Deutsche Bank.
- Kim, S., Jeon, J., Cho, C., Kim, E., and J. Ahn, 2009, Modeling and simulation of a grid-connected PV generation system for electromagnetic transient analysis, *Solar Energy*, 83 (5), 664–678.
- Kirawanich, P. and O’Connell, R. M., 2003, Potential harmonic impact of microturbines on a commercial power distribution system,” *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1118-1123.

- Koca, T., 2016, Türkiye’de güneş enerjisi ile elektrik üretim potansiyeli, *Enerji ve Çevre Dünyası Dergisi*, 130 (6), 50-55.
- Kost, C., Shammugam, S., Jülch, V., Nguyen, H-T. and Schlegl, T., 2018, *Levelized Cost of Electricity—Renewable Energy Technologies*, [Online], <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/cost-of-electricity.html> [Ziyaret Tarihi: 10 Haziran 2022], 1-34.
- Koutitas, G., 2012, Control of flexible smart devices in the smart grid, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3 (3), 1333-1343.
- Louie, K. W., Wilson, P., Rivas, R. A., Wang, A. and Buchanan P., 2006, Discussion on power system harmonic analysis in the frequency domain, *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (TDC '06)*, 6, 1.
- McGranaghan, M., Peele, S. and Murray, D., 2007, Solving harmonic resonance problems on the medium voltage system, *19th International Conference on Electricity Distribution*, 1–4.
- Mengi, O. Ö. ve Altaş, İ. H., 2008, AA ve DA yüklerini besleyen FV/Akü grubunun MATLAB/SIMULINK ortamında modellenmesi ve simülasyonu, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Müh.Sempozyumu ELECO-08*, Bursa.
- Osman, I. H. and Kelly, J. P., 1996, *Meta-Heuristics: Theory and Applications*, Kluwer Academic Publishers, NewYork, NY, USA.
- Özgöçmen, A., 2007, Güneş pilleri kullanarak elektrik üretimi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Batman.
- Öztürk, H. H. ve Kaya, D., 2013, Güneş enerjisinden elektrik üretimi fotovoltaik teknoloji, *UMUTTEPE Yayınları*, Yayın No:97, TSBN:978-605-5100-001.
- Öztürk, H. H., 2008. Güneş enerjisi ve uygulamaları, *BİRSEN Yayınevi*, İstanbul, TSBN 978- 975-511-502-3.
- Öztürk, H. H., 2017, Güneş enerjisinden fotovoltaik yöntemle elektrik üretiminde güç dönüşüm verimi ve etkili etmenler, *TMMOB EMO, Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi*, İzmir-Türkiye, 18–21 Ekim 2017.
- Pandi, V. R., Zeineldin, H. H., Xiao, W., and Zobaa, A. F., 2013, Optimal penetration levels for inverter-based distributed generation considering harmonic limits,” *Electric Power Systems Research*, 97, 68–75.
- Rahman, T., 2017, A PWM Controller of a Full Bridge Single-Phase Synchronous Inverter for Micro-Grid System, *J. Phys.: Conf. Ser.* 949, Malaysia.
- Rau, N. S. and Wan, Y. M., 2014, Optimum location of resources in distributed planning, *IEEE Transactions on Power Systems*, 9 (4), 2014–2020.

- Renewable Energy Policy Network for the 21st century (REN21), *Renewables 2010 Global Status Report*, Paris, 1–80.
- Rodriguez, J. R., Ruiz, F., Biel, D. and Guinjoan, F., 2010, Simulation and analysis of distributed PV generation in a LV network using MATLAB-Simulink, *2010 IEEE*, 2322-2325.
- Rohatgi, A., Ristow, A., Das, A. and Ramanathan, S., 2009, Road to cost effective silicon PV, 18th I-PVSEC.
- Ropp, M., Newmiller, J., Whitaker, C. and Norris, B., 2008, Review of potential problems and utility concerns arising from high penetration levels of photovoltaics in distribution systems, *33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2008*, San Diego, CA.
- Saint, R. and Friedman, N. R., 2002, The application guide for distributed generation interconnection, *IEEE Rural Electric Power Conference*, D2/1–D2/5.
- Sidrach-De-Cardona, M. and Carretero, J., 2005, Analysis of the current total harmonic distortion for different single-phase inverters for grid-connected pv systems, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 87 (1–4), 529–540.
- Snapshot of Global PV 1992–2013, [Online], *International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems Programme*, www.iea-pvps.org/index.php?id=32. [Ziyaret Tarihi: 18 Haziran 2022].
- Wang, F., Duarte, J. L., and Hendrix, M. A. M., 2010, Analysis of harmonic interactions between DG inverters and polluted grids, *IEEE International Energy Conference and Exhibition (EnergyCon '10)*, 194–199.
- Wanik, M. Z. C., 2011, Dynamic simulation and intelligent management of distributed generation, Ph.D. Thesis, Duisburg-Essen University, Germany.
- Wei, L., Qi, Y. ve Qi, H., 2018, Research on design and implementation of relay protection in smart grid, *2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 1439-1443.
- Willis, H. L., 2000, Analytical methods and rules of thumb for modeling DG distribution interaction,” in *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 1643–1644.
- YEGM., 2015, *Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü* [online], http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/g_enj_tekno.aspx, [Ziyaret Tarihi: 25.04.2022].
- Yarıkkaya, S. ve Vardar, K., 2020, Rapid Prototype Development of Single Phase Grid Connected PV Inverter Using Stm32f4 and Matlab. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* , (18) , 213-223 . DOI: 10.31590/ejosat.680586

Yılmaz A., 2018, Şebeke bağlantılı fotovoltaik (PV) sistemlerin mevcut elektrik şebekesi ile entegrasyonu ve güç sistemine etkileri, Yüksek Lisans Tezi, *Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 21-25.

