



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNDE GÜÇ
FAKTÖRÜ VE GERİLİM KARARLILIĞININ
BELİRLENMESİ

Emine İŞİN

YÜKSEK LİSANS

Temmuz-2022

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Emine İŞİN tarafından hazırlanan ‘‘Güneş Enerji Santrallerinde G Faktörü ve Gerilim Kararlılığının Belirlenmesi’’ adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri yeleri

İmza

Başkan

Unvanı Adı SOYADI

.....

Danışman

Unvanı Adı SOYADI

.....

ye

Unvanı Adı SOYADI

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
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.

Emine İŞİN

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNDE GÜÇ FAKTÖRÜ VE GERİLİM KARARLILIĞININ BELİRLENMESİ

Emine İŞİN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA

2022, 102 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA
Doç. Dr. Bahadır AKBAL
Doç. Dr. Mustafa YAĞCI

Fosil kaynakların rezervlerinin gün geçtikçe azalması, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgilinin artmasına sebep olmuştur. En çok tercih edilen yenilenebilir enerji, rüzgar, güneş, hidroelektrik sistemleri tarafından üretilmektedir. Bu tez çalışmasında yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi sistemini şebekeye bağlayarak farklı yük senaryolarındaki güç faktörünün, gerilim kararlılığı harmonik analizi ve yük akışları değerlendirilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjili sistemleri ile çalışılmış olup, fotovoltaik (PV) panel, Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT), DC/AC evirici, filtre ve lineer olmayan yükten oluşan bir sistem tasarlanarak MATLAB/SİMULİNK ile benzetim çalışmaları yapılmıştır. Kullanılan sinyal bloğu ile farklı sıcaklık ve ışıınım değerlerinde santralin üretim yapması sağlanmıştır.

Güç sistemlerinin sorunsuz ve kesintisiz çalışabilmesi için sistem kararlılığının sağlanması gerekmektedir. Enerjiye olan talebin gün geçtikçe artış olması kararlılık problemlerini de beraberinde getirmiştir. Tez çalışmasında sistem kararlılığını etkileyen parametreler üzerinde durulmuştur. Güneş sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu gerilim kontrolünü sağlamak için kullanılmaktadır. Güneş enerji sistemlerinde güç faktörünün doğru tespit edilmesi büyük önem arz eder. Güneş enerji santralleri kurulurken önceden tespit edilmesi gereken hususlar oldukça önemlidir. Bunlar arasında: kablo, invertör şartel seçiminde güç faktörünün etkisi bulunmaktadır. Güç faktörünün bilinmesi malzeme seçiminde önemli bir yol gösterici olacaktır. Siemens firmasının PSS@SINCAL güç sistem analizi programı kullanılarak yük akışı, gerilim kararlılığı ve güç faktörü analizleri ile mevcut yüke bağlı farklı senaryolar için değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: aktif güç, gerilim kararlılığı, güç faktörü, kompanzasyon, PV, reaktif güç

ABSTRACT

MS THESIS

DETERMINATION OF POWER FACTOR AND VOLTAGE STABILITY IN SOLAR POWER PLANTS

Emine İŞİN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical-Electronics Engineering**

Advisor: Assoc.Prof.Dr. Nurettin ÇETİNKAYA

2022, 102 Pages

Jury

Assoc.Prof.Dr. Nurettin ÇETİNKAYA

Assoc.Prof.Dr. Bahadır AKBAL

Assoc.Prof.Dr. Mustafa YAĞCI

The decrease in the reserves of fossil resources day by day has led to an increase in the interest in renewable energy resources. The most preferred renewable energy is produced by wind, solar, hydroelectric systems. In this thesis, the power factor, voltage stability harmonic analysis and load flows in different load scenarios were evaluated by connecting the solar energy system, which is one of the renewable energy sources, to the grid. Working with solar energy systems from renewable energy sources, a system consisting of photovoltaic (PV) panel, Maximum Power Point Tracking (MPPT), DC/AC inverter, filter and non-linear load has been designed and simulated with MATLAB/Simulink-SimPower Systems. With the signal block, the power plant has been enabled to produce at different temperatures and radiation values.

In order for power systems to operate smoothly and uninterruptedly, system stability must be ensured. The increasing demand for energy has brought along stability problems. In the thesis study, the parameters that affect the system stability are emphasized. Reactive power compensation is used to provide voltage control in solar systems. Correct determination of the power factor in solar energy systems is of great importance. It is very important to determine the issues that need to be determined beforehand when installing solar power plants. Among them: the power factor has an effect on cable, inverter conditional selection. Knowing the power factor will be an important guide in material selection. By using PSS@SINCAL power system analysis program of Siemens company, load flow, voltage stability and power factor analyzes and evaluations were made for different scenarios depending on the current load.

Keywords: active power, compensation, PV, power factor, reactive power, voltage stability

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca engin bilgileri ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, beni her zaman cesaretlendiren saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA başta olmak üzere, eğitim hayatımın her aşamasında emek vermiş değerli hocalarıma, tez çalışmam süresince desteğini her an yanımda hissettiğim tüm arkadaşlarıma bütün zorluklarda benimle birlikte çabalayan sevgili aileme çok teşekkür ederim.

Emine İŞİN
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1 Güneş Enerji Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı ile İlgili Çalışmalar	3
2.2 Güneş Enerji Sistemlerinde Harmonik ile İlgili Çalışmalar	6
2.3 Güneş Enerji Sistemlerinde Aktif ve Reaktif Güç ile İlgili Çalışmalar.....	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	13
3.1. Fotovoltaik Enerji Sistemleri	13
3.1.1. Güneş pilleri çalışma şekli	15
3.1.2. Güneş pilinin eşdeğer devresi ve matematiksel modeli.....	16
3.2. PV Panel Çeşitleri	20
3.2.1. Tek kristalli PV panel	21
3.2.2. Çok kristalli PV panel.....	21
3.2.3. İnce film PV panel	22
3.3. Güneş Panellerinin Karakteristikleri.....	23
3.3.1. PV Sistemlerin Çalışmasını Etkileyen Faktörler	25
3.3.2. Fotovoltaik Panellerde Verimlilik	30
3.4. Bağlantı Şekillerine Göre PV Santraller	31
3.4.1. Şebeke bağlantısız PV santraller (Off-grid).....	31
3.4.2. Şebeke bağlantılı PV santraller (On-Grid).....	32
3.4.3. Hibrit PV santraller	35
3.5. Güç Sistemlerinde Kararlılık Analizi	35
3.5.1. Açısal kararlılık.....	36
3.5.2. Frekans kararlılığı	38
3.5.3. Gerilim kararlılığı	38

3.6. Güç Akış Analizi	39
3.6.1. Newton-Raphson yöntemi ile güç akış analizi	40
3.7. Güç Sistemlerinde Kararlılık Analizi	40
3.7.1. Statik gerilim kararlılığı.....	40
3.7.2. Dinamik gerilim kararlılığı	41
3.8. Reaktif Güç Kompanzasyonu	42
3.8.1. Şönt kompanzasyon	43
3.8.2. Seri kompanzasyon	44
3.8.3. FACTS cihazları	45
3.8.4. Statik VAR kompanzatör (SVC)	45
3.8.5. Tristör kontrollü reaktör (TCR)	47
3.8.6. Statik senkron kompanzatör (STATCOM).....	48
3.9. MATLAB/SİMULİNK ile PV Panel Modellemesi	50
3.9.1. Tek fazlı şebekeye bağlı güneş enerji sisteminin modellenmesi	50
3.9.2. Üç fazlı şebekeye bağlı güneş enerji sisteminin modellenmesi.....	53
3.10. MATLAB/SİMULİNK’te kullanılan bloklar	55
3.10.1. Fotovoltaik paneller	55
3.10.2. Evirici bloğu	56
3.10.3. Trafo bloğu	57
3.10.4. Sinyal bloğu	58
3.10.5. Yük bloğu	59
3.10.6. P-Q güç ölçüm bloğu	59
3.10.7. İnverter bloğu.....	60
3.10.8. Üç fazlı V-I ölçüm bloğu	61
3.10.9. Şebeke (Vgrid) benzetimi	62
3.10.10. MPPT bloğu.....	62
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	65
4.1. Üretimin ve Tüketimin Tam Kapasite Gerçekleştiği Durum.....	69
4.2. Üretimin ve Tüketimin Yarı Kapasite Gerçekleştiği Durum.....	76
4.3. Üretimin Tam Kapasite, Tüketimin Yarı Kapasite Gerçekleştiği Durum	80
4.4. Tüketimin Tam Kapasite, Üretimin Yarı Kapasite Gerçekleştiği Durum	84
4.5. Üretimin Hiç Olmayıp Tüketimin Tam Kapasite Gerçekleştiği Durum.....	87
4.6. Tüketimin Hiç Olmayıp Üretimin Tam Kapasite Gerçekleştiği Durum.....	88

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	92
5.1. Sonuçlar	92
5.2. Öneriler	93
KAYNAKLAR	95
EKLER	101



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

f	: Frekans (Hz)
G	: Işınım seviyesi (kW/m^2)
I	: Akım (A)
I_{ph}	: Güneş hücresi akımı
I_r	: Işınım (W/m^2)
I_s	: Diyotun ters doyma akımı
I_{sc}	: Kısa devre akımı
K	: Boltzmann Sabiti
L	: Endüktans (H)
N_p	: Paralel bağlı hücre sayısı
N_s	: Seri bağlı hücre sayısı
P	: Aktif güç (W)
P_m	: Maksimum güç noktası
Q	: Reaktif Güç (VAr)
R	: Direnç (Ω)
T	: Sıcaklık (K)
T	: Birleşme sıcaklığı
T_c	: Hücre çalışma sıcaklığı
T_{ref}	: Referans hücre sıcaklığı
V	: Gerilim (V)
V_{oc}	: Açık devre gerilimi
δ	: Senkron makinanın rotorları arasındaki faz açısı
δ_g	: Generatörün iç açısı
δ_m	: Motorun iç açısı

Kısaltmalar

AA/AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
DSPWM	: Dijital Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu
EESS	: Elektrik Enerjisi Depolama Sistemleri
FF	: Fiil Faktörü-Doluluk Faktörü
FPGA	: Programlanabilir Kapı Dizisi
GES	: Güneş Enerji Santrali
HES	: Hidro Elektrik Santrali
HFH	: Yüksek Frekanslı Harmonik
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITDD	: Akım Talep Bozulması
kVA	: Kilovolt-Amper
LMS	: En Küçük Kare
MATLAB	: Matrix Laboratory
MLI	: Çok Katmanlı İnverter
MPPT	: Maksimum Güç İzleme Noktası
NR	: Newton Raphson
NRS	: Newton-Raphson-Seydel
P&O	: Doğrula ve Gözlem (Perturb and Obserb)
PEC	: Güç Elektroniği Dönüştürücüsü
PF	: Güç faktörü
PI	: Orantısal- İntegral Kontrolör
PSIM	: Power Sim
PSS	: Güç Sistemi Dengeleyici
PV	: Fotovoltaik
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
RES	: Rüzgar Enerji Santrali
RPCA	: Reaktif Güç Kompanzasyon Algoritması
RPI	: Reaktif Güç Enjeksiyonu
SPVG	: Solar PV Generator
SPVPP	: Solar Photovoltaic Power Plants
STATCOM	: Statik Senkron Kompanzatör
SVC	: Statik Var Kompanzatör
THD	: Toplam Harmonik Bozulma
VAR	: Volt-Amper-Reaktif
VSI	: Voltaj Kaynak İnverteri
VST	: Voltaj Kararlılığı Araç Kutusu
VTHD	: Voltaj Toplam Harmonik Bozulması
YSA	: Yapay Sinir Ağları
FACTS	: Esnek İletim Cihazları
TCS	: Tristör Kontrollü Kapasite
TCR	: Tristör Kontrollü Reaktör

1. GİRİŞ

Fosil yakıtların kullanımı ciddi çevre sorunlarına yol açmaktadır. Bu durum ise yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi gün geçtikçe artırmıştır. Fosil kaynakların azalan rezervleri, artan nüfus, fiyatlardaki dalgalanmalar, sanayileşme, elektrik enerjisine olan talep yenilenebilir enerjiyi cazip hale getirmiştir.

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde yenilenebilir enerji kaynaklarından çeşitli şekillerde faydalanılmaktadır. Güneş, biokütle, rüzgar, dalga, hidrojen vb. kaynaklardan başta elektrik üretimi olmak üzere faydalanılmaktadır. Elektrik enerjisi gereksinimi karşılamak için güneş enerji santralleri (GES), rüzgar enerji santralleri (RES) ve hidro elektrik santralleri (HES) alternatif örnek verilebilir. Yenilenebilir enerji alanında meydana gelen gelişmelere rağmen fosil kaynaklar da üstünlüğünü korumaya devam edecektir.

Artan enerji ihtiyaçları kullanıcı tarafında çeşitli sorunları beraberinde getirmiştir. Şebeke elemanları kullanılarak meydana gelen harmonik, gerilim çökmesi, gerilim yükselmesi, fliker, güç faktörü bozunumları teknolojik gelişmelerle daha sık görülmektedir. Gerilim seviyesindeki değişimler abone tarafındaki güç kalitesi parametrelerini etkilemektedir. Gerilim seviyesindeki değişimler aktif ve reaktif güç tüketimini etkilemektedir. Bu tüketim abone tarafındaki güç faktörünün değişmesine sebep olmaktadır. Meydana gelen değişimler şebeke tarafındaki güç akışlarına etki ederek faturalandırmayı etkilemektedir.

Üretim santrallerinin şebeke entegrasyonlarında gerilim dalgalanması, fliker, harmonik bozunumlar, şebeke gerilim ve frekans değişimleri karşılaşılan problemlerden bazılarıdır.

Güç sistemlerinde kararlılık incelemeleri uzun yıllardır devam etmektedir. Güç sistemlerinde yapılan incelemelerin amacı, sistemlerin gerçek zamanlı değerlendirmesini yaparak, sistemin kararlı çalışabileceği sınır değerleri belirlemektir. Karmaşık güçler güç sistemlerinde gerilim kararsızlıklarına neden olabilmektedir. Büyük işletmelerde gerilim kararlılığı değerlendirmeleri, gerilimin çökmesi ve birçok şebeke bozuklarını engelleyebilecektir.

Gerilim kararlılığı, sistemde meydana gelen bozucu etkiden sonra kararlı gerilim değerini devam ettirebilmesidir.

Talep edilen reaktif gücün karşılanamaması, sistemlerde gerilim kararsızlığına sebep olmaktadır. Sistemde kullanılan reaktif güç talebinin artması halinde, gerilim düşüşleri meydana gelir. Sistem bu gerilim düşümünü dengeleyebilmek için akım çeker. Çekilen fazla akım ise hatlarda fazla reaktif güç tüketilmesine ve sistemde kararsızlıklara neden olur. Uzun süre giderilemeyen gerilim düşümleri gerilim çöküşlerine sebep olabilmektedir. Sistemde meydana gelen arızaların, hat kesintilerinin ve gerilim çökmesinin önüne geçebilmek için gerilim kararlılığı çalışmaları büyük önem arz etmektedir.

Dağıtım tesislerinin şebekeye entegrasyonunda güç faktörünün istenilen değerlere ayarlanamaması, birçok teknik soruna sebep olmaktadır. Düşük güç kalitesi, güç faktörünün belirtilen aralıklarda olmaması tüketici tarafında bazı sorunlara neden olmaktadır. Şebekenin etkin ve verimli çalışabilmesi için sistemdeki problemler tespit edilmeli, çözüm önerileri sunulmalıdır. Bu çözüm önerilerine katkı sağlayabilmek için bir sistemde güç faktörünün ve gerilim kararlılığının belirlenmesi hayati öneme sahiptir.

Bu tez çalışmasında güneş enerji santrallerinin benzetimi MATLAB/SİMULİNK ortamında gerçekleştirilmiş olup çalışmada güç faktörünün belirlenmesi sağlanmış, PSS@SINCAL programı ile güç akışı ve güç sisteminin kararlılık analizinin elde edilmesi sağlanmıştır. Elde edilen değerler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yapılan çalışmanın birinci bölümünde şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerin özellikleri ve konuya ait özet bilgiler verildikten sonra daha önce yapılmış olan çalışmalara değinilmiştir. İkinci bölümde; güneş enerji sistemlerinde gerilim kararlılığı, harmonik ve aktif- reaktif güç ile ilgili yapılmış çalışmalar hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Ayrıca güneş pilleri, fotovoltaik sistem, güç kalitesi parametreleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde; şebekeye bağlı tek fazlı ve üç fazlı fotovoltaik sistemin MATLAB/SİMULİNK' te modellenmesi yapılmış kullanılan bloklar açıklanmıştır. Dördüncü bölümde; fotovoltaik sistemin PSS@SINCAL programı ile oluşturulan her bir senaryo için gerilim kararlılıkları incelenmiştir. Bunun yanında senkronizasyon sürecinde fotovoltaik sistem-şebeke arasındaki gerilim kararlılığı, sistem yüksüz iken şebekede meydana gelen gerilim artışları, senkronizasyon sonrasında fotovoltaik sistem, yük ve şebekede ölçülen gerilim, güç ayrı ayrı gösterilmiş program ile elde edilen grafiklerle desteklenmiştir. Beşinci bölümde ise simülasyon sonucunda ortaya çıkan grafiklere ve ölçüm değerlerine göre fotovoltaik sistemin performansı analiz edilmiş, elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve tartışılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışmasında güneş enerji santrallerinde gerilim kararlılığı ve güç faktörü konuları literatürde taranmıştır. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında yapılan çalışmaların güç faktörü noktasında sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak araştırması bölümü güneş enerji sistemlerinde kararlılık, harmonik, aktif reaktif güç ile ilgili çalışmalar olmak üzere üç alt başlıkta incelenmiştir.

2.1 Güneş Enerji Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı ile İlgili Çalışmalar

Tan ve ark. (2004), MPPT kontrolörünün PV sisteminin dinamik yanıtında kritik bir rol oynadığını gösteren deneysel sonuçlara dayanarak bir model geliştirmiştir. Önerilen model, sistemin ışımaya ve AC şebeke geriliminde hem küçük hem de büyük değişikliklere tepkisini temsil etme yeteneğine sahiptir. Modelin doğruluğu, simüle edilen yanıtın deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasıyla gösterilir. Güç sistemi kararlılık analizi için modern yazılım bu tür ayırık zaman modelini geleneksel sürekli zaman modelleriyle birleştirebilir.

Sode-yome ve ark. (2005), yaptıkları statik gerilim kararlılık çalışmasında yük yönünün etkisini araştırmışlardır. Pratik yük değişimi, kullanılan yük yönünü belirlemek için pratik bir yöntemdir. Tayland güç sistemi gerçek günlük yük eğrileri ile temsil edilir. Gerçekçi yük yönünün kullanılması, statik gerilim kararlılık çalışmasında pratik bir çözüm sunar. Pratik yük yönü doğrulanır ve çeşitli sistem koşulları altında IEEE 14-baralı bir test sisteminde geleneksel yük yönü ile karşılaştırılır.

Keskin, (2007) yaptığı çalışmada bir güç sistemi için gerilim kararlılığını sürekli güç akışı yöntemini kullanarak incelemektedir. Gerilim kararsızlığının ciddi bir sonucu olabilecek gerilim çökmesi senaryosu sunulmakta ve gerilim çökmesini etkileyen parametreler tartışılmaktadır. Güç sistemi gerilim kararlılığının analizinde, ardışık yük akışlarından oluşan sürekli güç akışı yöntemi kullanılır. Bu yöntem örnek bir test sistemine uygulanmış yük baraları için yük-gerilim (P-V) eğrileri elde etmiştir.

Katsanevakis ve ark. (2011), yaptıkları çalışmada orta gerilim şebekesine bağlı olan güneş santrallerinin şebekeye olan etkilerini araştırmışlardır. Fotovoltaik (PV) tesislerin dağıtım etkisini incelenmişlerdir. PV santrallerinin simülasyonlar aracılığıyla bara gerilim profili, trafo yüklemesi ve iletim hattı yüklemesi incelenmiştir. Ek olarak PV

santrallerinden elektrik şebekesine destek olarak reaktif gücün değişimini araştırmışlardır. Yapılan güç akışı ve gerilim kararlılığı analizleriyle şebekenin günlük olarak gerilim profilini hesaplanmıştır.

Wei ve ark. (2011), yaptıkları çalışmada MATLAB'da kullanılan Gerilim Kararlılığı Araç Kutusu (VST) tanıtmışlardır. Güç sisteminin gerilim kararlılığını analiz etmek için standart Newton-Raphson (NR) ve Newton-Raphson-Seydel (NRS) algoritmaları uygulamışlardır. VST, gerilim kararlılığı ve doğrusal olmayan çatalanma kavramlarını anlamak için kullanılmıştır. Bu araç kutusunun üç jeneratörlü beş baralı ve IEEE 30 baralı bir test sisteminde uygulanmasının sonuçları sunulmuştur.

Shah ve ark. (2012), büyük ölçekli PV ile IEEE-14 bara test sisteminde statik voltaj kararlılığının araştırmışlardır. Çalışma, büyük ölçekli PV penetrasyonlarının ve dinamik VAR (Volt-amper-reaktif) yerleşimlerinin alt iletim sisteminin voltaj kararlılığı üzerinde durmaktadır. Bu çalışma için test sistem yükleri, gerçekçi bir sistemin yükü olarak modellenmiştir.

Li ve ark. (2012), tarafından yapılan çalışmada şebekeye bağlı fotovoltaik (PV) sistem, uygun kontrol algoritmaları ile güç sistemi ihtiyaçlarını karşılamak için hem gerçek hem de reaktif güç üretebildiğini göstermiştir. Maksimum güç noktası takibi (MPPT) veya belirli bir miktarda gerçek güç enjeksiyonunun yanı sıra Voltaj/VAR kontrolü elde etmek için üç fazlı şebeke bağlantılı bir PV tasarımı gerçekleştirilmiştir. PV DC gerilim kararlılığını sağlamak için PV evirici çıkışının dinamik düzeltmesine dayalı yöntem önerilmiştir.

Tamimi ve ark. (2013), SPVG (Solar PV Generator) penetrasyon seviyesinin Ontario güç sisteminin kararlılığı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. SPVG ve gerçek bir sistem arasındaki etkileşimlerin daha iyi anlaşılması için çalışmalarda Ontario'nun sistem verileri kullanılmıştır. SPVG içeren sistem dinamik davranışı, küçük sinyal kararlılığı, gerilim kararlılığı ve beklenmedik durum analizleri aracılığıyla farklı penetrasyon seviyeleri için incelenmiştir.

Lakshmanan ve ark. (2015), şebekeye bağlı güneş PV sistemi, Güç Elektroniği Dönüştürücüleri (PEC) alanındaki yaptığı çalışmalar ile iyi bir güç kalitesi elde etmek ve sistemin dinamik tepkisini iyileştirmek için şebekeye bağlı olan Voltaj Kaynak İnverterini (VSI) kontrol etmek için farklı kontrol teknikleri üzerinde durmuşlardır. Bu çalışmada, şebekeye bağlı güneş PV sistemi için ileri beslemeli DC gerilim regülatörlü yeni bir akım kontrol tekniği önerilmektedir. Yeni akım kontrol tekniği, şebeke akımının düşük Toplam

Harmonik Bozulma (THD) seviyesini ve DC bağlantı voltajının etkin kontrolünü içerir. Önerilen kontrol tekniği MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, şebeke bağlantılı güneş PV sistemi için önerilen kontrolör, DC bağlantı gerilimini verimli bir şekilde kontrol etmektedir ve şebeke akımının THD seviyesi, istenilen seviyeye getirilmiştir. PV sistemden kaynaklanan doğrusal olmama durumu da azaltılmıştır. Sistemin gerilim kararlılığını sağlamıştır.

Shah ve ark. (2015), PV'nin farklı özellikleri ve mevcut şebeke düzenlemesi nedeniyle, sistemin gerilim kararlılığının yüksek PV penetrasyonlarından hangi oranda etkilenebileceğini araştırmışlardır. Büyük ölçekli PV'nin, merkezi ve dağıtılmış PV'li Ontario güç sisteminin statik gerilim kararlılığı üzerindeki etkisini analiz ettiler. Analiz, 2000 MW'a kadar çeşitli penetrasyon seviyeleri dikkate alınarak yapılmıştır. Analizden, gerilim kararlılığının iyileştirmesinden elde edilen uzun vadeli tasarrufların, gerilim ve reaktif güç kontrollü merkezileştirilmiş PV ile karşılaştırıldığında dağıtılmış PV sistemi için daha yüksek olduğu açıktır.

Fotovoltaik panellerdeki gelişmelerden yola çıkan Mohamadi ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada yeni santrallerin klasik santrallerle birlikte çalışması gerektiğini vurgulamıştır. Güneş enerjisi santralının bir buhar santrali ile bir güç sisteminde eş zamanlı çalışması ele alınmıştır. Güneş enerjisi santralının invertörü, DC gücünü AC'ye dönüştürmenin yanı sıra aktif güç filtrelemesi yapmak için manipüle edilir. Buharlı güç santrali ayrıca güç sistemini stabilize etmek için bir PSS (Güç Sistemi Dengeleyici) kullanır. PSS parametresini optimize etmek için akıllı hat arama öğretme öğrenme tabanlı optimizasyon (SLS-TLBO) adı verilen meta sezgisel bir yöntem kullanılır. PSS'nin parametreleri, sistemin dinamik performansı ayrıca üç faz-toprak arızasından sonra araştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre gerilim kararlılığı sağlanmış olur.

Fateh ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada sistem herhangi bir bozulmaya maruz kaldıktan sonra sistemdeki baralardaki gerilim kararlılığını incelemiştir. Bu araştırma çalışmasında güç sistemi olarak IEEE 30-baralı sistemi seçilerek gerilim kararlılığı, aktif güç (P), reaktif güç (Q), reaktif güç voltajı (QV) ve aktif güç gerilimi incelenmiştir. Yük akışı analizi, Power World Simulator kullanılarak simüle edilmiştir.

2.2 Güneş Enerji Sistemlerinde Harmonik ile İlgili Çalışmalar

Bravo, (2018) yaptığı çalışmada 12 farklı trafo merkezi, 11 dağıtım ve 1 alt iletim ile birbirine bağlı 17 güneş enerji santralinin (SPVPP) güç kalitesi (PQ) performansı üzerine çalışmıştır. Çizilen güç kalitesi grafiklerinde her bir SPVPP'nin (Solar photovoltaic power plants) performansını araştırılmıştır. Bu grafikler, akım talep bozulmasını (ITDD), toplam gerilim harmonik bozulmasını (VTHD) ve zamana karşı güneş PV santral gücünü (P) içermektedir. PV invertörlerinin harmoniklerinin azaltılmasına yardımcı olmak için uygun güç faktörü (PF) ile ayarlanması sağlanmıştır. En sonunda, bu cihazların şebekede harmonik oluşumunu azaltmak için yapılması gerekenleri içeren bu araştırmanın sonuç ve önerileri sunulmuştur.

Sinvula ve ark. (2019), PV sistemlerde ortaya çıkan harmonik bozulmasını analiz etmeye ve olası kısıtlamalarını vurgulamaya yönelik bir vaka çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada, 5 MW Solar PV santrali ile bir radyal dağıtım ağının saha çalışması ele alınmıştır. Sistem, ortak bağlantı noktasındaki toplam harmonik bozulmayı (THD) değerlendirmek için DigSilent yazılımı kullanılarak modellenip, simüle edilmiştir. Harmonik etkisini azaltıp uygun çözümü geliştirmek için dağıtım sistemi operatörlerine çeşitli metodolojiler önerilmiştir.

Mesemanolis ve ark. (2011), bu çalışmada akım kontrolü kullanan tek fazlı bir PV eviricisinin modellenmesi ile ilgili iki kontrol yöntemini açıklamıştır; histerezis bandı ve sıfır tolerans kontrolü yöntemidir. Çıkış akımının (THD) optimizasyonu ve anahtarlama kayıplarının minimizasyonu için çeşitli modülasyon yöntemi de sunulmuştur. Modülasyon yöntemleri arasında bir karşılaştırma yapıp en iyi model belirlenmiştir.

Alhafadhi ve Teh (2020), yaptıkları çalışmada hava koşullarındaki sürekli değişiklikler nedeniyle iletilen gücün çoğu zaman kararsız olduğunu göstermişlerdir. Güneş ışınımındaki dalgalanma, üretilen güçte PV sisteminin performansını etkileyecek harmonikler oluşturur. PV sistemlerde çıkış sinyalinde THD'yi azaltmak için maksimum güç noktası takibi (MPPT) gibi farklı teknikler ve çok seviyeli invertör (MLI), darbe genişlik modülatörü gibi kontrol stratejileri (PWM) kullanılmıştır. Alhafadhi ve Teh Kalman filtrelerini kullanan PV sisteminde yeni bir THD yöntemi sunmuştur. Elde edilen sonuçlar, Kalman filtresinin THD indirgeme açısından çok etkili olduğunu göstermiştir. THD'yi %19,8'den %3'e düşürülmüştür.

Alhafadhi ve ark. (2020), yaptıkları çalışmada fotovoltaiik (PV) sistemlerin toplam harmonik bozulmasını (THD) tahmine dayalı bir modele uyarlanabilir bir filtre kullanarak azaltmak için yeni bir yöntem denemişlerdir. Uyarlanabilir filtrenin bağlantı topolojisi, normal aktif ve pasif filtrelere benzemektedir. Önerilen yöntem, yöntemin geçerliliğini doğrulamak için en küçük ortalama kare (LMS), normalleştirilmiş LMS (NLMS) algoritmalarını tek fazlı bağımsız bir PV sistemine uygulamışlardır. Farklı adım boyutları ve filtre uzunlukları, THD azaltılmasını doğrudan etkilemiştir.

Al-Majidi ve ark. (2021), yaptıkları çalışmada güç üretiminin, güneş ışınımına bağlı değiştiğini göstermişlerdir. PV'deki bu değişiklik, alçak gerilim dağıtım şebekesinde Toplam Harmonik Bozulmaya (THD) neden olabilir. Bu çalışmada, çatı üstü PV sistem kurulumlarının toplam harmonik bozulma üzerindeki etkisi, farklı hava koşulları altında değerlendirilmektedir. Bununla ilgili olarak, Brunel Üniversitesi Londra Kampüsünün çatı katında bulunan şebekeye bağlı bir PV sisteminin voltajı ve akımı, güneşli ve bulutlu günler için ölçülüp analiz edilmiştir. Ayrıca, PV sistemin modellenmesi MATLAB/Simulink ortamında da gerçekleştirilmiştir.

Torquato ve ark. (2016), Fotovoltaiik (PV) inverterlerde bulunan modern güç elektroniği anahtarları, yüksek frekanslı harmonik (HFH) bozulmalar oluşturma potansiyeline sahiptir. Yapılan bu çalışmada, Brezilya'daki bir güneş enerjisi çiftliğine kurulan PV inverterlerdeki bu tür bozulmaları incelenmektedir. Ölçümler, her biri 15 kVA nominal kapasiteli üç farklı ticari invertör üzerinde gerçekleştirilir. Elde edilen sonuçlar, HFH akım bozulmalarının temel frekans akımının %2'sine kadar ulaşabileceğini, HFH gerilimlerinin ise temel frekans geriliminin %0,2'sinin altında kaldığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, sonuçlar bu belirli PV eviriciler tarafından yayılan HFH bozulmalarının, şebekede önemli sorunlara neden olma olasılığının düşük olduğunu göstermektedir.

Batrinu ve ark. (2006), bu çalışmada fotovoltaiik (PV) tesislerin işletiminde meydana gelen harmonik bozulma ile ilgili bazı durumları ele almıştır. Toplam harmonik distorsiyon, çok dizili bir PV santrali için sabah saatlerinde gölgeleme etkisinin sonuçlarından etkilenip etkilenmediği değerlendirilir. PV santrallerinin boyutundaki öngörülebilir artışla birlikte, asıl sorun PV santral terminallerinde temel frekansta değerlendirilen gerilim artışı olabileceği ortaya konmuştur.

2.3 Güneş Enerji Sistemlerinde Aktif ve Reaktif Güç ile İlgili Çalışmalar

Hassaine ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada şebekeye bağlı fotovoltaik (PV) sistemlerin genel verimliliği, güneş enerjisi modüllerinin doğru akımının (DC) alternatif akım (AC) invertör dönüşümüne verimliliğine bağlı olduğu gösterilmiştir. Alan programlanabilir kapı dizisi (FPGA) kullanılarak şebekeye bağlı PV sistemleri için güç faktörü kontrolü ve reaktif güç düzenlemesi için bir yaklaşım önerilmiştir. Şebeke taleplerine göre; hem enjekte edilen aktif hem de reaktif güçler kontrol edilir. Bu çalışmada, tek fazlı bir invertör için yeni bir dijital kontrol stratejisi yürütülmektedir. Bu kontrol stratejisi, evirici çıkış gerilimi ile şebeke gerilimi arasındaki faz kaymasına bağlı değişmektedir. İnvörtör çıkış akımı için güç faktörünü kontrol dijital sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu (DSPWM) desenleri ve sonuç olarak reaktif gücün kontrolü ve düzenlenmesini sağlayacaktır. Bu çalışmada, Matlab/Simulink ve PSIM kullanılarak bu stratejinin bir simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Güç faktörünü ve şebekeye enjekte edilen gücü kontrol etmek için bu kontrolün uygulanabilirliğini gösteren deneysel testler yapılmıştır. Güç faktörünü geniş bir inverter çıkış akım aralığı için kontrol etmek reaktif gücün kontrolü ve düzenlenmesi sağlayacaktır.

Albuquerque ve ark. (2010), yaptıkları çalışmada anlık güç teorisine göre, inverterin reaktif gücü, çıkış voltajının genliği değiştirilerek düzenlenebilir. Ayrıca inverter aktif gücü, çıkış voltajının faz açısı değiştirilerek ayarlanabilir. Bu teoriye bakılarak hem aktif güç kaynağı hem de reaktif güç kompanzasyonu (RPC) aynı anda gerçekleştirilebilir. Işınım zayıf olduğunda veya PV modülleri gece çalışmadığında, bir PV sisteminin reaktif güç kompanzasyonu özelliği, inverter kullanım faktörünü iyileştirmek için kullanılabilir. MATLAB simülasyon sonuçları, yöntemin uygulanabilirliğini göstermek için çalışmaya dahil edilmiştir.

Hashemi ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada PV eviricilerin kullanıldığı reaktif güç yönetimi ve elektrik enerjisi depolama sistemlerinin (EESS) kapasitesinin azaltılmasında kullanılmıştır.

Yang ve ark. (2014), şebeke gereksinimlerini dikkate alan tek fazlı PV sistemleri için Reaktif Güç Enjeksiyon (RPI) stratejileri üzerinde durmuşlardır. Önerilen reaktif güç enjeksiyon stratejileri arasında, sabit ortalama aktif güç kontrolü, sabit aktif akım kontrolü, sabit tepe akım kontrolü ve LVRT çalışması, reaktif güç kontrol stratejisi yer

alır. Önerilen reaktif güç kontrol stratejileri, simülasyonlar veya deneylerle de test edilmiştir.

Tharani ve Dahiya (2014) yaptıkları çalışmada, Fotovoltaik (PV) modülü ile entegre edilmiş bir Statik senkron kompansatör (STATCOM) kaynak bara gerilimine göre gerilim seviyesini değiştirerek reaktif güç akışını optimize etmek için kullanılacağı gösterilmiştir. Yapılan çalışmada PV modüllerini doğrudan STATCOM'a bağlayarak DC-DC Dönüştürücü gereksinimi tamamen ortadan kaldırmayı amaçlamıştır. Gerekli simülasyonlar SIMULINK yazılımında gerçekleştirilmiştir. PV Modülleri farklı ışınım koşulları altında test edilmiş ve reaktif güç üretimi üzerindeki etkisi formüle edilmiştir. Işınım artışı ile reaktif güç ihtiyacının azaldığı sonucuna varılmıştır.

Suyata ve Po-ngam (2014), bu çalışma ile, üç fazlı şebekeye bağlı fotovoltaik (PV) eviriciler için maksimum güç noktası takibi (MPPT) ile basitleştirilmiş aktif güç ve reaktif güç kontrolünü incelemiştir. Önerilen kontrol stratejisi ile, basit MPPT algoritması için P&Q yöntemi kullanılmıştır. Önerilen şebeke bağlantılı eviricilerin geçerliliği simülasyon ile onaylanmıştır.

Qian ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada PV santrallerin neden olduğu olumsuz etkileri ve güç kaybını azaltmak için, PV santralının reaktif güç kontrolü araştırılmış ve hem gerilim hem de güç faktörünü dikkate alan yeni bir koordinasyon kontrol stratejisi önermişlerdir. İlk olarak, aktif ve reaktif gücün ara bağlantı noktasının gerilimi üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. İkinci olarak, günümüzde her zaman kullanılan dokuz bölge reaktif güç kontrol stratejisine ek olarak on bir bölge reaktif güç kontrol stratejisi önerilmiştir, önerilen strateji, ilgili kontrolü gerçekleştirmek için kriter olarak ara bağlantı noktasının hem gerilimi hem de güç faktörünü dikkate alınmıştır.

PV dönüştürücü modüllerinden gelen güç uyumsuzluğu, gerilim ve sistem işletim sorunlarına yol açabilir. L. Liu ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada kademeli bireysel PV dönüştürücü modüllerinden gelen güç uyumsuzluğu, gerilim ve sistem işletim sorunlarını ele almıştır. Reaktif güç kompanzasyonu ve sistem optimizasyonun güç kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ele alınan sorunları çözmek için koordineli aktif ve reaktif güç dağıtımını önerilmiştir. İlk önce güç dağıtım ilkesini göstermek için bir vektör yöntemi geliştirilmiştir. Buna göre güç ve gerilim arasındaki ilişki geniş bir çalışma aralığı incelenmektedir. Sonra, sistem çalışma kararlılığını ve güvenilirliğini geliştirmek ve aynı anda her dönüştürücü modülü için MPPT uygulamasını kolaylaştırmak için reaktif güç kompanzasyon algoritması (RPCA) önerilmiştir. PV sistemlerinde önerilen

reaktif güç kompanzasyonu yaklaşımının etkinliğini göstermek için simülasyon ve deneysel sonuçlar sunulmaktadır.

Jaalam ve ark. (2017) üç fazlı şebekeye bağlı PV sisteminin LVRT kapasitesini geliştirmek için tek aşamalı üç fazlı şebekeye bağlı bir PV sistemi için aktif ve reaktif gücün bir kontrol stratejisi önermiştir. Güç şebekesine bağlı dağıtık üretimin (DG) artan kapasitesiyle, gelecek nesil fotovoltaik (PV) sistemlerin, düşük gerilimli sürüşü iyileştirmek için şebeke arızaları sırasında tam bir gerilim regülasyonu sağlaması beklenmiştir. Böyle bir durumda, DG reaktif güç desteği için şebekeye bağlı kalarak gerilim profilini iyileştirmelidir. Çoklu DG çalışması sırasında farklı lokasyonlarda değişen ışım, yerel yük kesilmesi ve kısa devre gibi çeşitli senaryolar dikkate alınarak sistemin dinamik davranışları araştırılmıştır.

Ali ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada gerilim yükselmesi/düşüşü ve toplam aktif/reaktif kayıpların artması dahil olmak üzere, PV sistemlerinden kaynaklanan birçok pratik sorunu incelemişlerdir. PV eviricinin kapasitesini PV modüllerinin kapasitesi üzerine optimal olarak artırarak PV ile ilgili pratik problemleri çözmek için bazı yöntemler önerilmiştir. Evirici maliyetini, gücün maliyetini, dağıtım sistemindeki kayıpların maliyetini en aza indirirken optimum evirici kapasitesini hesaplamak için bir optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Optimizasyon modelinde genel sistem kısıtlamaları dikkate alınmıştır. Önerilen yöntem, IEEE 69-baralı dağıtım sistemi kullanılarak test edilmiştir.

Mohamed ve ark. (2018), yaptıkları çalışmada ana sorunlardan birinin dağıtım şebekesi baralarındaki gerilim dalgalanması olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmada yeni bir yaklaşımı olan PF-P ve QV yöntemini incelenmiştir. Bu yöntemde aktif güç kontrolü ve Volt-VAR yöntemlerini birleştirerek sistemdeki gereksiz reaktif güç emilimini azaltmayı amaçlamışlardır. Bu yöntem, şebekenin gerilim profilini iyileştirir ve herhangi bir yeni altyapı gerektirmeden özellikle uç fiderde hat gerilim düşüşünü izin verilen sınırdan telafi edilmiştir. PV barasındaki gerilimi korumak için orantısız- integral (PI) kontrolör kullanılarak gerçekleştirilir, ağır toplam kayıplarını azaltılması ve sistem kapasitesinin %4,5 oranında artırılabilmesi sağlamıştır.

Y. Liu ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada yüksek hat empedansı ve fotovoltaik (PV) penetrasyon nedeniyle, alçak gerilim dağıtım şebekesindeki gerilim sınırı aşılabileceğini göstermişlerdir. Alçak gerilim dağıtım şebekesindeki aşırı gerilim, PV inverterin aktif güç ve reaktif güç çıkışı kontrol edilerek çözülebileceği savunulmuştur.

Bu strateji ile, PV eviricinin çıkışı, yerel gerilim kontrolünün amacına uygun olarak kontrol edilebilir. Yüksek fotovoltaik penetrasyon ve düşük yük durumunda, kullanılan strateji hattın sonundaki voltajın sınırını aşmasını önleyebileceği öne sürülmüştür.

Sundar (2018), yaptığı simülasyonda şebeke bağlantısındaki PV'nin güç açısı ve gerilim genliğinin kontrolü başarılı bir şekilde yapmıştır. Yapılan çalışmanın amacı, güneşlenme seviyesine göre aktif gücün şebekeye akışını kontrol etmektir. Aynı zamanda şebekeden çekilen reaktif gücün kontrolünü sunar. Ayrıca reaktif güç akışının kontrolü şebekenin güç faktörünü iyileştirir, trafo ve kablo aşırı yüklerinden kaçınılır, iletim kayıplarını azaltılmasına yardımcı olur. Önerilen bu PV sistem ile, güneşlenmenin olmadığı durumlarda şebekeye reaktif güç destek sistemi olarak da kullanılabilir. Önerilen çalışmada aktif güç kontrolü anahtarlar kullanılarak manuel olarak yapılmaktadır.

Dai ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada, PV güç panelleri mümkün olduğu kadar fazla aktif güç çıkışı sağlamak için genellikle birim güç faktöründe çalıştırılması gerektiği, yoksa güç kaybı meydana geleceği öne sürülmüştür. Tek PV eviricinin reaktif kapasitesinin analizine ve PV santralin reaktif güç ile gerilim arasındaki ilişkiye dayanarak, büyük ölçekli PV güç santrali için bir reaktif güç optimizasyon kontrol stratejisi önerilmiştir. Kontrol stratejisi, şebekeye voltaj desteği sağlamak için reaktif güç kompanzasyon cihazını ve inverterin reaktif kapasitesini koordine eder, ve inverterin reaktif güç dağılımını reaktif hat kaybına göre optimize eder. Simülasyon sonuçları, kontrol stratejisinin PV güç istasyonunda gerilim kararlılığını sağlayabildiğini ve hat kaybını azaltabileceğini göstermektedir. Simülasyon sonuçları, önerilen kontrol stratejisinin SVG ve PV üreten üniteler arasındaki reaktif güç çıkışını iyi bir şekilde koordine edebileceğini ve şebekenin gerilim kararlılığını sağlayabileceğini göstermektedir.

Dhaneria (2020), yaptığı çalışmada PV eviricilerin normal işlevselliğine ek olarak reaktif gücü emme ve enjekte etme açısından çalıştırılması için farklı yöntemler önermiştir. Reaktif güç kompanzasyonu özelliğine sahip, şebeke bağlantılı bir fotovoltaik evirici sistemin özelliklerinden bahsedilmektedir. PV inverterde reaktif güç üretiminin gerekliliği tartışılmıştır. Üç fazlı çift kademeli şebeke bağlantılı solar PV inverterin Simulink modeli MATLAB' da geliştirilmiştir. Aktif ve reaktif güç üretim modunda PV evirici çalışması simüle edilmiştir. Analiz için çeşitli aktif ve reaktif güç ölçümleri alınmıştır. Çeşitli kontrol modları için sunulan simülasyon sonuçları, aktif güç üretiminde

gözle görülür bir düşüğe neden olmadan PV inverter reaktif çıkış gücünü kontrol etmek için solar inverter kontrol sisteminde VAR kompanzasyon şemalarının uygulanabileceğini göstermiştir.

Krishnendu ve ark. (2021) fotovoltaiik bir sistemde hem aktif hem de reaktif güç akışının kontrol eden bir metodoloji geliştirmişlerdir. Geliştirilen sisteme göre PV sistemden maksimum güç çıkması şebeke için reaktif güç desteği sağlar. Perturb & Observe (P&O) algoritması MPPT için en çok kullanılan algoritmalar arasındadır. SPWM tabanlı evirici, DC gerilimine ve yükün reaktif güç talebine bağlı olarak sabit aktif güç ve değişken reaktif güç üretir. Kullanılan yöntemlere bağlı olarak sistem verimliliğinin yaklaşık olarak %97 olarak tespit edilmiştir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde güneş enerji santrallerinde gerilim kararlılığının ve aktif-reaktif gücün farklı yöntem ve metotlarla yapıldığı görülmektedir. Öncelikle gerilim kararlılığını sağlanması için farklı metodolojiler uygulanmıştır. Güneş enerji santrallerinde kullanılan P&Q yönteminin olumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Bunlara ek olarak gelişen ve değişen şebeke koşulları incelenmiştir. Güneş enerji santrallerinde kompanzasyon yöntemleri incelenmiştir. Tezin ilerleyen kısımlarında MATLAB/Simulink-SimPower Systems aralığıyla tek fazlı şebekeye direkt bağlı PV sistemin modellenmesi, ve üç fazlı şebekeye bağlı bir PV sistemin modellenmesi ve güç faktörünün tespiti yapılmıştır. Siemens firmasının PSS®SINCAL güç sistem analizi programı kullanılarak yük akışı, gerilim kararlılığı ve güç faktörü analizleri ile mevcut yüke bağlı farklı senaryolar için değerlendirmelerde bulunulmuştur.

3.1. Fotovoltaik Enerji Sistemleri

Yenilenebilir enerji kaynakları içinde güneş enerjisi, önemli bir paya sahiptir. Güneş enerjisi ısınma, elektrik elde etme gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Temiz ve çevreci oluşu güneş enerjisini cazip hale getirmiştir. Türkiye coğrafi konumu itibarıyla güneş enerji potansiyeli dikkat çekmektedir (Yılmaz, 2012).

Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğünden alınan verilere göre oluşturulan Türkiye'nin aylık güneşlenme verileri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli

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

Güneş pilleri, ışığı doğrudan elektrik enerjisine çeviren ekipmanlardır. Güneş pillerinin içerisinde p-n yarı tipi yarıiletken kısımlar bulunur. Güneş ışığının yansıtılmaması için en üstte bir tane katman bulunmaktadır. Güneş pillerinin iç yapısına bağlı olarak fotovoltaik panellerde %5 - %20 arasında verim oranı değişmektedir. Üzerine düşen ışınım miktarı ve sıcaklığa bağlı olarak üretim yapmaktadır. Şekil 3.1'de güneş pilinin yapısı gösterilmiştir.

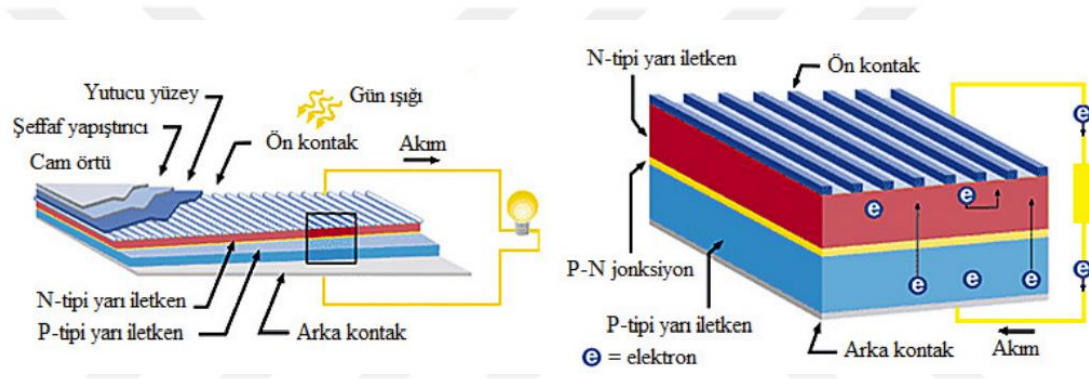
Panellerde elde edilmek istenen güç miktarına bağlı olarak paneller, seri veya paralel bağlanabilir.

**Şekil 3.1.** Güneş Pili (Hekim, 2011)

3.1.1. Güneş pilleri çalışma şekli

Güneş panellerinin üzerine düşen güneş ışığı hücreler tarafından emilir. Güneş pilinde elektrik elde edebilmek için p-n yarıiletken eklem bölgesine güneş ışını düşmesi gerekmektedir (Oymak, 2021).

PV hücrenin iç yapısı Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Fotonların yarıiletken yüzeye çarpması sonucunda, yarıiletken yüzeyden elektron koparılır. Koparılan elektronlar p-n jonksiyon bölgesinde elektrik alan oluşmasına sebep olur. Fotovoltaik dönüşümün sağlanması için eklem bölgesine düşen fotonlar elektron-boşluk oluşturmayı amaçlar. Daha sonra oluşturulan boşluklar elektrik alan etkisiyle birbirinden ayrılır (Kayri, 2017).

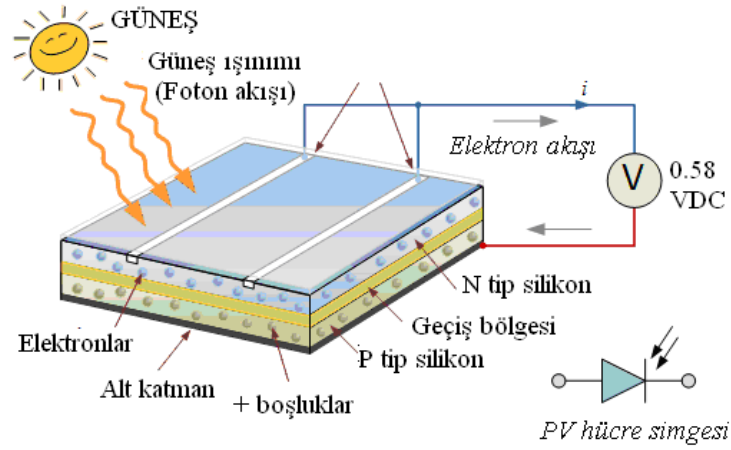


Şekil 3.2. PV hücrenin iç yapısı (İçel, 2019)

Fotonlar P tipi yarıiletken kısımdan elektron koparır. Enerji kazanan elektronlar N tipi yarıiletken kısma akarlar. Elektronların sabit yönlü akışı ile doğru akım (DC) üretilmiş olur.

Güneş pilleri, kare yuvarlak dikdörtgen şeklinde biçimlendirilen ve yüzey alanları 100 cm² civarında olup kalınlıkları 0,2-0,4 mm arasında değişmektedir (İçel, 2019).

Elektronlar oluşturulan devre boyunca akarak pilin şarj olması gibi farklı alanlarda da kullanılabilir. Güneş pilinin yapısı ve çalışma ilkesi şeması Şekil 3.3.’te verilmiştir.

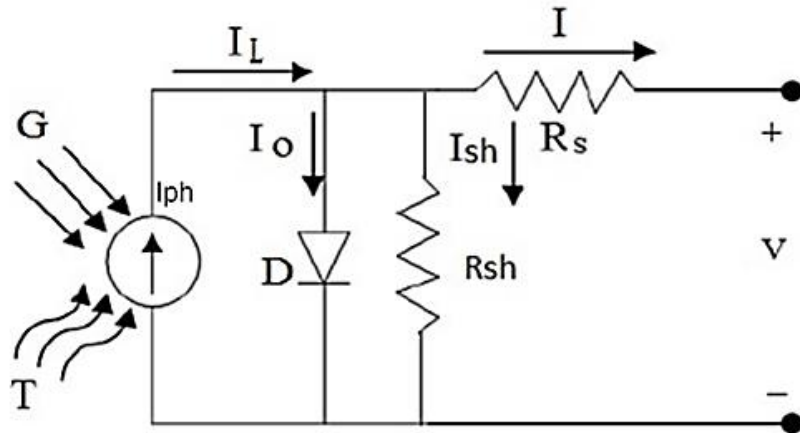


Şekil 3.3. PV hücrenin çalışma tekniği (Çelik ve Koç, 2020)

3.1.2. Güneş pilinin eşdeğer devresi ve matematiksel modeli

Güneş pilinin eşdeğer devresi 1994 yılında Lorenzo tarafından yapılmıştır (Lorenzo, 1994). Güneş pillerinin eşdeğer devresi oluşturulurken bir akım kaynağı, buna bağlı paralel bir diyottan ve bunlara bağlı seri ve paralel dirençler kullanılarak devre modeli oluşturulur.

Güneş pilinin elektriksel eşdeğer devre modeli Şekil 3.4'te verilmiştir (Chouder ve ark., 2012).



Şekil 3.4. PV hücrenin çalışma tekniği

Şekil 3.4'teki devreye Kirchoff Akım Yasası uygulanırsa Eşitlik 3.1 elde edilir.

$$IL = I_o + I_{sh} + I \quad (3.1)$$

Foton akımı temelde, ışınım seviyesine ve hücrenin çalışma sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Buna ilişkin denklem Eşitlik (3.2)'de verilmiştir.

$$I_{ph} = G(I_{sc} + K_1(T_c - T_{ref})) \quad (3.2)$$

G : Işınım seviyesi (kW/m²),

I_{sc} : 25°C ve 1000 W/m²' de hücrenin kısa devre akımı,

K₁ : Kısa devre akımına bağlı sıcaklık katsayısı,

T_{ref} : Referans hücre sıcaklığı,

T_c : Hücre çalışma sıcaklığını ifade etmektedir.

Diyot gerilimi ve akımına ilişkin denklemler Eşitlik (3.3) ve (3.4) ve (3.5)'te verilmiştir.

$$V_d = V + R_s I \quad (3.3)$$

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{qV_d}{nkT}} - 1 \right) \quad (3.4)$$

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{nkT}} - 1 \right) \quad (3.5)$$

Şekil 3.4'te verilen devrede diyota paralel olan R_{sh} direncinin üzerindeki akım Eşitlik (3.6)'da verilmiştir.

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (3.6)$$

(3.5) ve (3.6) eşitlikleri (3.1) denkleminde yerine koyulursa hücreye ilişkin akım değerleri elde edilmiş olur.

$$I = IL - I_s \left(\frac{\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{Ns.K.T} \right) - 1}{(Ns.K.T)} \right) - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (3.7)$$

(3.7) eşitliğindeki paralel direnç değerinden akan akım değeri çok küçük olduğundan ihmal edilebilir. (3.7)'deki V değeri çekilirse fotovolttaik hücrenin uçlarındaki gerilim değeri Eşitlik (3.8)'de elde edilmiş olur.

$$V = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L + I_0 - I}{I_0} \right) - R_s I \quad (3.8)$$

Bu denklemde

I_{ph} : güneş hücresi akımını,

I_s : diyotun ters doyma akımını,

V : diyot üzerindeki gerilimi,

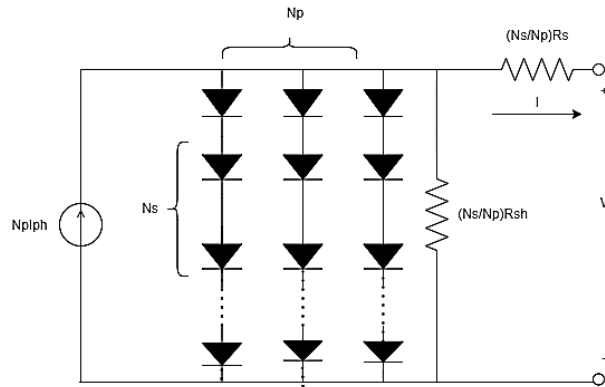
K : Boltzmann sabiti (1.381×10^{-23} J/K),)

T : birleşme sıcaklığı,

N_s : hücre katsayısını,

q : elektron yükünü (1.602×10^{-19} C) ifade etmektedir.

Shockley diyot eşitliğine bağlı olarak bir güneş pilinin I-V karakteristiği yorumlanabilir (Şahin ve ark., 2013). Paralel direnç, PV hücrenin açık devre gerilimini etkilerken seri direnç, kısa devre akımını azaltan bir etkidir. PV modül için oluşturulan eşdeğer elektriksel devre modeli Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

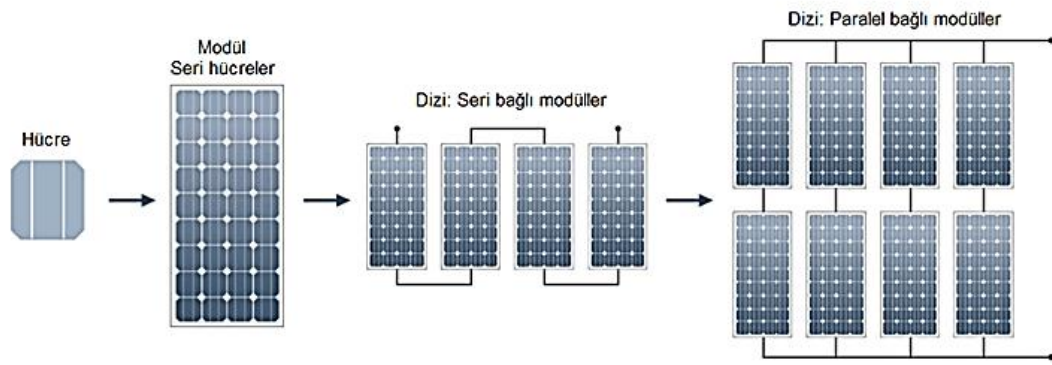


Şekil 3.5. PV modülün eşdeğer elektriksel devre modeli

PV hücrenin bir tanesinden elde edilebilecek güç değeri 0.5 V için yaklaşık 1 W'tır. Bu sebepten çıkış gücünü artırmak için PV hücreleri paralel veya seri konfigürasyonlarda bağlanarak PV diziler oluşturulmuştur. Şekil 3.6'da oluşturulan PV

hücre, modül ve dizi yapısı gösterilmiştir. PV hücrelerin birleştirilmesiyle modüller, modüllerin bir araya gelmesiyle PV paneller, PV panellerin birleşimiyle diziler ve dizilerin birleştirilmesiyle de PV santraller oluşturulur. PV modülde seri bağlı hücre sayısı (N_s) panel gerilimi artırırken, paralel bağlı hücre sayısı (N_p) panel akımını artırmaktadır.

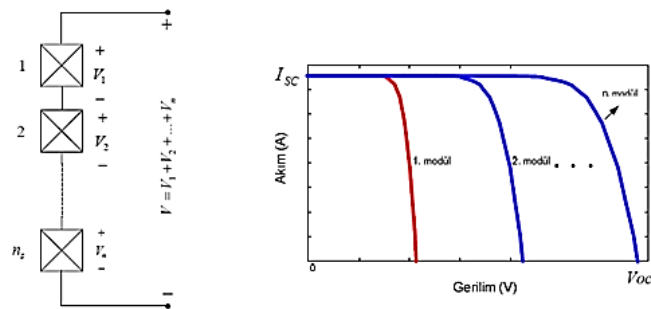
PV santral için sıklıkla tercih edilen, 250 W'lık PV paneller genelde 60 hücre, 6 modülden oluşmaktadır (Abamor, 2016). Yani her bir modülde 10 hücre yer almaktadır. Şekil 3.6'da grup dizilimi gösterilmiştir.



Şekil 3.6. PV hücre, modül ve dizi tasarımları (Öztürk, 2019)

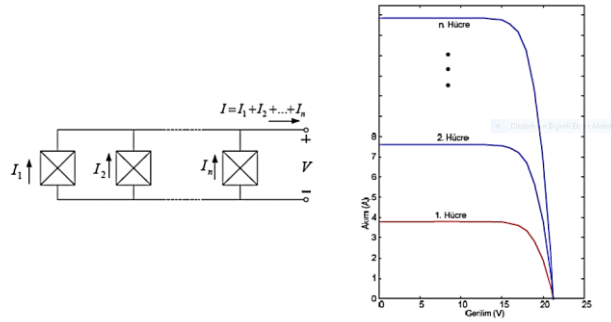
PV santrallerde üretilecek enerjinin hesabı, birçok parametreye bağlı olduğu için benzetim yapılarak tasarımın doğrulanması ve daha güvenilir, daha gerçeğe yakın sonuçlara ulaşmak için matematiksel model daha uygun bir yaklaşım olacaktır (Boztepe, 2017).

Modüllerin Şekil 3.7'de gösterildiği gibi seri bağlanmasıyla modül gerilimi artırılmış olur.



Şekil 3.7. PV modüllerin seri bağlantısı (Hekim, 2011)

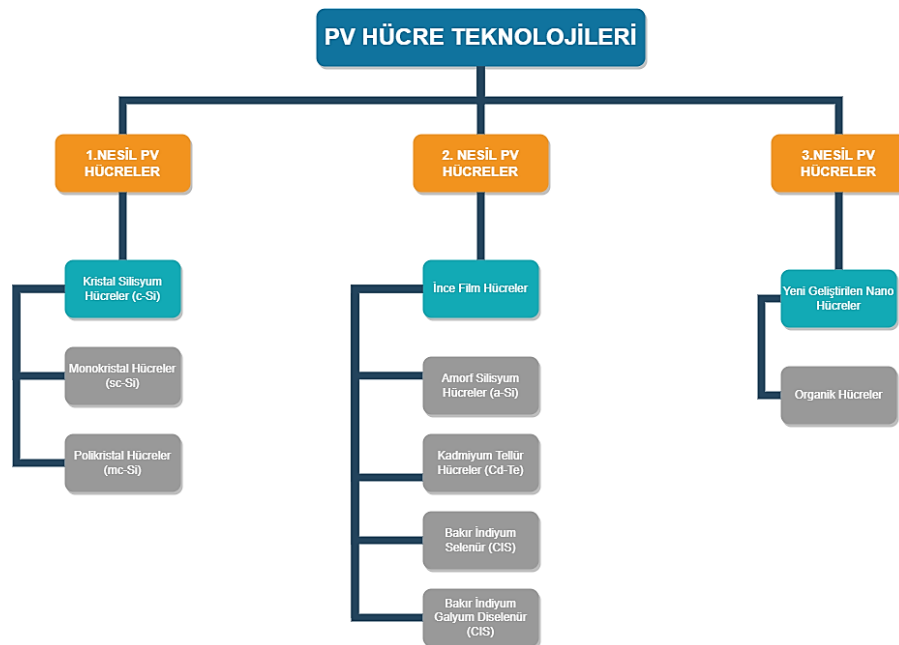
Modüllerin Şekil 3.8’de görüldüğü gibi paralel bağlanmasıyla modülün sağlayacağı akımın miktarı ayarlanır.



Şekil 3.8. PV modüllerin paralel bağlantısı (Hekim, 2011)

3.2. PV Panel Çeşitleri

Günümüzde PV panellerin üretimi için farklı teknolojik gelişmeler kullanılmaktadır. Kullanılan en yaygın teknolojiler, kristalize silikon ve ince film teknolojileridir. Kristalize silikon hücre üretim maliyeti diğer teknolojilere nazaran düşük olması ve sahip olduğu yüksek enerji dönüştürme verimliliği ile üretimin büyük kısmını oluşturmaktadır. Şekil 3.9’da olan PV hücre teknolojileri gösterilmiştir.



Şekil 3.9. PV hücre çeşitleri

3.2.1. Tek kristalli PV panel

Tek kristalli modüller (Şekil 3.10), yüksek saflıkta silikon kristalden yapılmıştır. Tek kristalli silikon külçe silindirik forma, 13-20 cm çapa ve 200 cm uzunluğa sahiptir. Daha sonra, bu silindir 200-250 µm kalınlığında dilimlenir ve yansıma kayıplarını en aza indirmeyi amaçlayan "mikro oluklar" elde etmek için üst yüzey işlenir. Bu hücreler için verimlilik %16-16,5, yüksek performanslı modüller için %20 ila %22'dir. Bu teknolojiyle yapılan modüller genellikle homojen koyu mavi renkle karakterize edilir.



Şekil 3.10. Tek kristalli modül

3.2.2. Çok kristalli PV panel

Çok kristalli modüller (Şekil 3.11) farklı biçim ve yönlerde silikon kristallerin bir araya gelmesiyle oluşur. Kristallerin farklı yönleri ve buna bağlı olarak ışığa göre farklı davranışlara neden olur. Çok kristalli silikon külçe, silikonun eritilip paralel boru şeklinde bir kalıba dökülmesiyle elde edilir. Mono kristal modüllerle karşılaştırıldığında verimlilik daha düşüktür %15-16 yüksek performanslı modüller için ise %18 ila %20 arasında değişmektedir.



Şekil 3.11. Çok kristalli modül (ABB, 2014)

3.2.3. İnce film PV panel

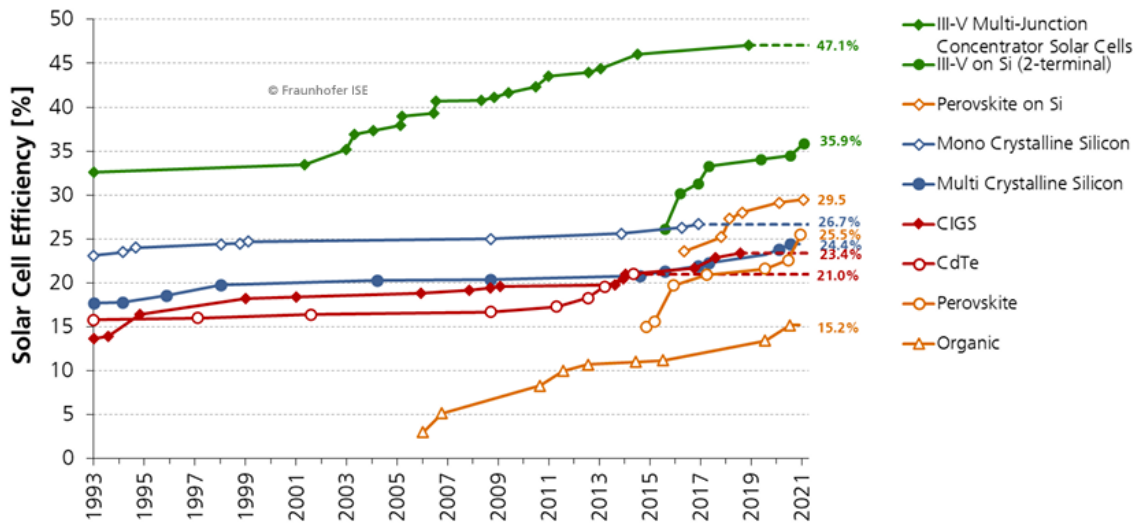
İnce film hücreler, karışıma fiziksel kıvam veren cam, polimerler, alüminyum gibi destekler üzerine genellikle gaz karışımları olarak bırakılan yarı iletken malzemelerden oluşur. Yarı iletken film tabakası, kristalin silikon hücrelere göre birkaç μm kalınlığındadır.

İnce film panellerin verimleri, diğer PV panel tipleri ile kıyaslandığında daha düşük olduğu görülmektedir (Ise ve GmbH, 2022). İnce film panellerin verimleri günümüzde %9' dan %13' e yükselmiştir. İnce film teknolojisindeki gelişmeler, yüksek maliyetlerine karşın umut vericidir. İnce film hücrelerinde kullanılan malzemeler şunlardır:

- amorf silikon (a-Si)
- kadmiyum tellür (CdTe)
- indiyum diselenid ve bakır alaşımları (CIS, CIGS, CIGSS)
- galyum arsenit (GaAs)



Şekil 3.12. İnce film teknolojisi (İçel, 2019)



Şekil 3.13. Hücrelerdeki verim yıllara göre karşılaştırması (Ise ve Gmbh, 2022)

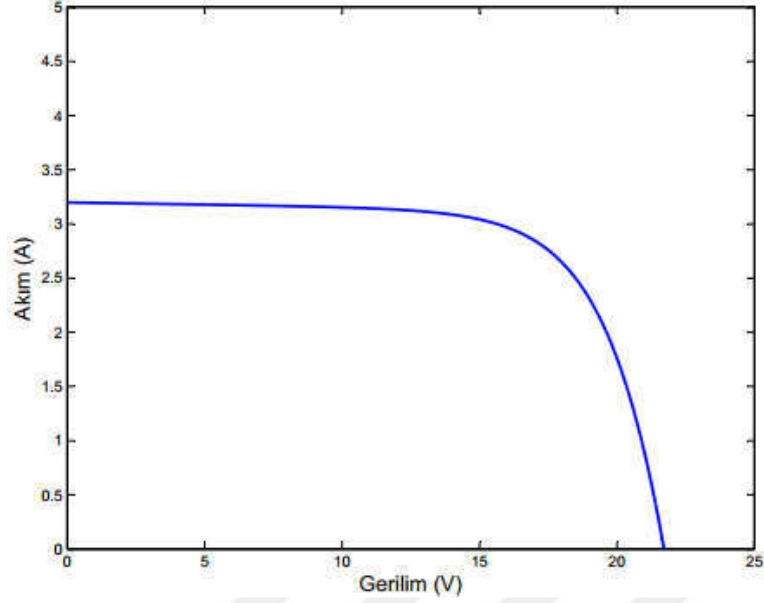
3.3. Güneş Panellerinin Karakteristikleri

Bu çalışmada kullanılan Trina Solar TSM-250PA05.08 model güneş panelin tüm teknik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Trina Solar TSM-250PA05.08 PV karakteristikleri

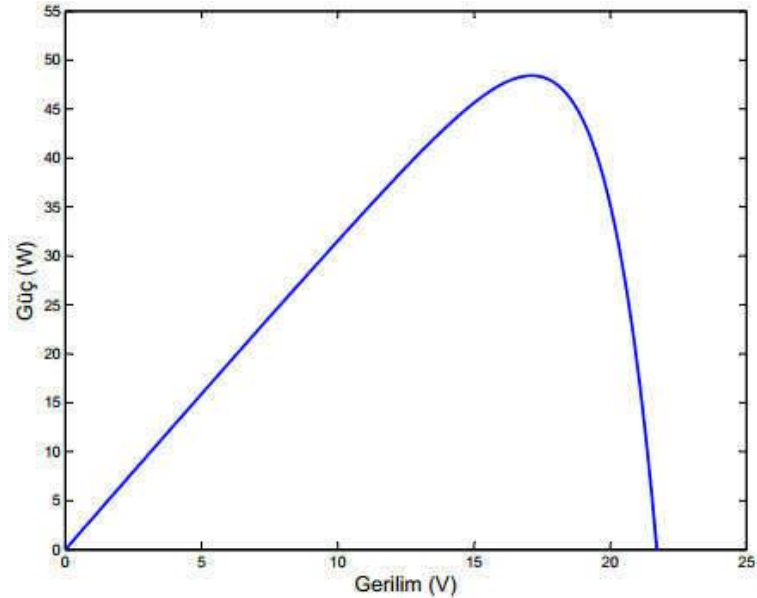
Güneş Panelinin Özellikleri	Modüldeki Hücre Sayısı Ncell=96
Maksimum Güç	Pmax=249,86 W
Maksimum Güç Gerilimi	Vmp=31 V
Maksimum Güç Akımı	Imp=8,06 A
Açık devre Gerilimi	Voc=64,9 V
Kısa devre Akımı	Isc=8,55 A
Açık Devre Gerilim Sıcaklık Katsayısı	Kv= -0,35 %/deg.C
Kısa Devre Akım Sıcaklık Katsayısı	Kv= -0,06 %/deg.C

PV modülün genel karakteristikleri I-V ve P-V grafikleriyle Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’ te sırasıyla verilmiştir.



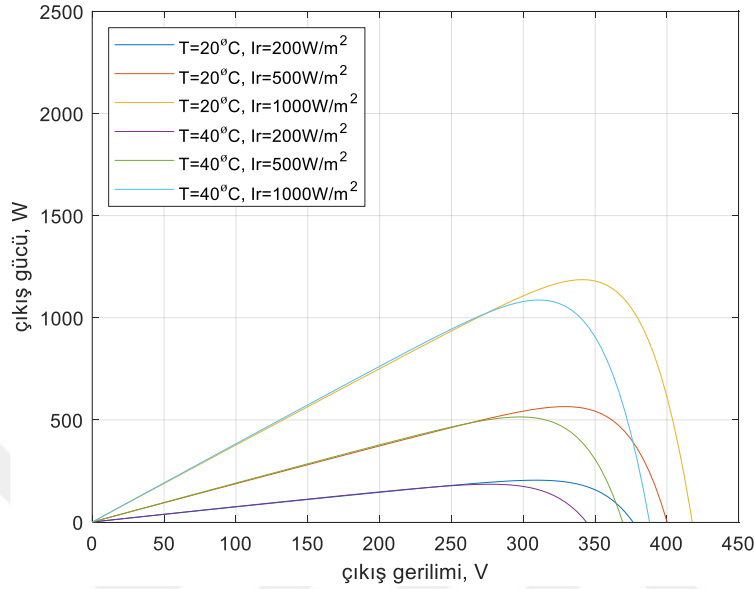
Şekil 3.14. PV modülün I-V karakteristiği

PV hücrelerin güç-gerilim karakteristiğine bakıldığında, ilk önce gücün hücre gerilimi ile doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. Hücre maksimum güç noktasına ulaştıktan sonra akımda büyük bir düşüş meydana gelmektedir, bu düşüş ise çıkış gücünü düşürmektedir (Imhoff ve ark., 2007). Şekil 3.15'te PV hücrenin güç-gerilim karakteristiği gösterilmiştir.



Şekil 3.15. PV modülün P-V karakteristiği

Özellikleri verilen güneş panelinin farklı ışınım değerlerindeki (200 W/m^2 , 500 W/m^2 ve 1000 W/m^2) ve farklı sıcaklık değerleri (20°C , 40°C) altındaki P-V karakteristik eğrileri şekil 3.16.'da sunulmuştur.

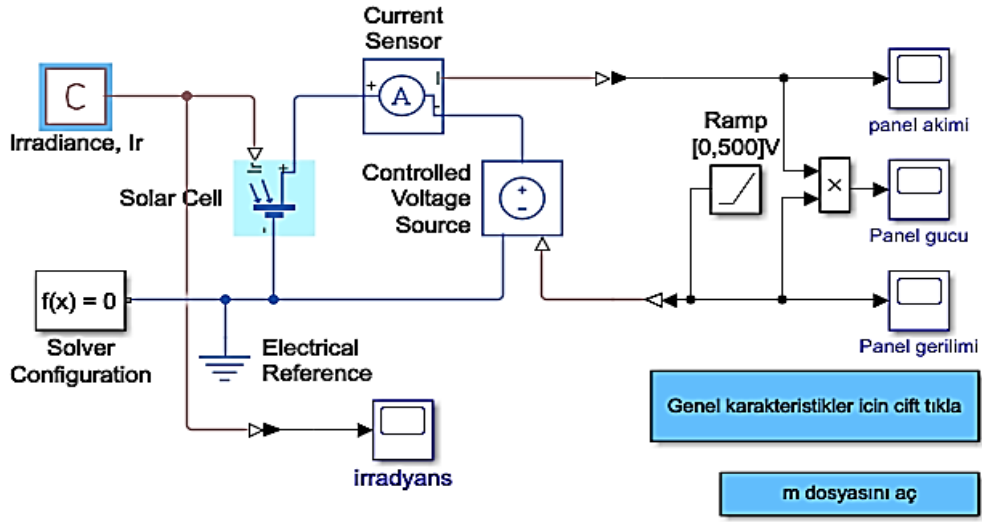


Şekil 3.16. PV modülün sıcaklık ve ışınımına bağlı P-V karakteristiği

3.3.1. PV sistemlerin çalışmasını etkileyen faktörler

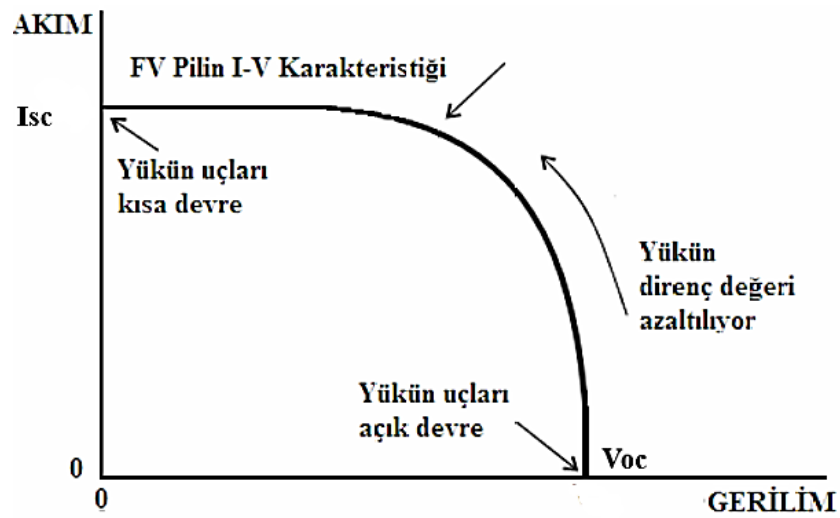
Güneş pili, güneş ışığına maruz kaldığında fotovoltaik etki ile elektrik üretilmiş olur. Güneş ışığı yarıiletken malzeme tarafında emilir ve p-n jonksiyon bölgesinde elektrik alan meydana gelir. Güneş ışınlarıyla orantılı fotoakım oluşur. PV hücreler hücre sıcaklığıyla değişen doğrusal olmayan I-V P-V karakteristik özellikler gösterir.

Şekil 3.17'de gösterilen solar hücre karakteristiği için tasarlanan model güç-gerilim eğrisinin nasıl üretildiğini gösterir. P-V grafiklerini oluşturmak için sistemde kullanılacak olan evirici, çok önemlidir. Işıma seviyesi, panel sıcaklıkları PV panelin en yüksek güç üreteceği koşullar altında çalıştırılması oldukça önemlidir.



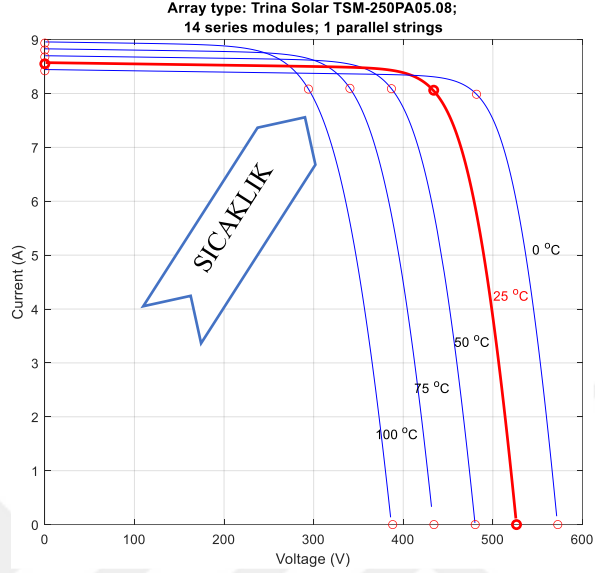
Şekil 3.17. Solar hücre karakteristiği

PV panellerde akım parametresi, sıcaklık artışından etkilenmektedir. Sıcaklıkta meydana gelen değişimler, çıkış gerilimini etkilemektedir. Ortam sıcaklığının aşırı yükselmesi PV piller için istenen bir durum değildir. Ortam sıcaklığındaki artış panel çıkış gücünü de olumsuz etkilemektedir. PV panellerde grafiğin, I_{sc} (kısa devre akımı), P_m (maksimum güç noktası), V_{oc} (açık devre gerilimi) noktalarında geçiyor olması I-V grafiklerini oluştururken dikkat edilecek noktalar arasındadır (Acar ve Kılınçdemir, 2016). Şekil 3.18'de I_{sc} ve V_{oc} ilişkisi gösterilmiştir.

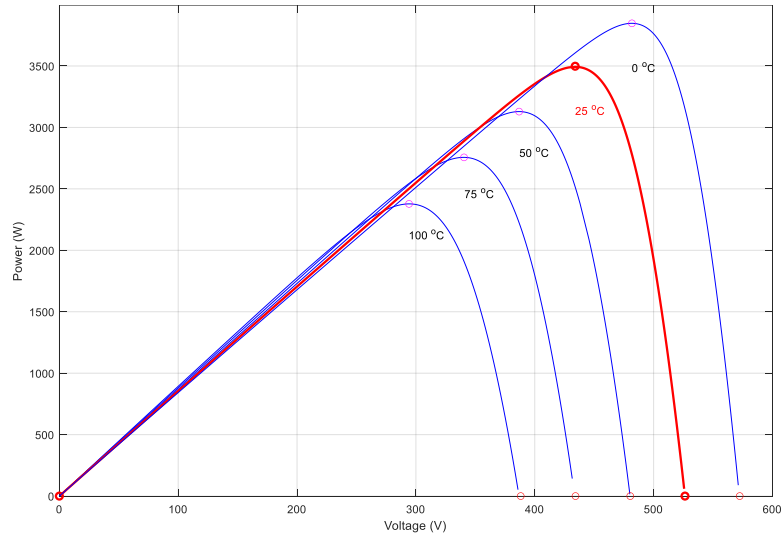


Şekil 3.18. I_{sc} ve V_{oc} ilişkisi (Acar ve Kılınçdemir, 2016)

Özellikleri verilen güneş panelinin farklı sıcaklık değerlerindeki (0°C, 25°C, 50°C, 75°C, 100°C) I-V karakteristik eğrileri Şekil 3.19'da, P-V karakteristik eğrileri Şekil 3.20'de sunulmuştur.

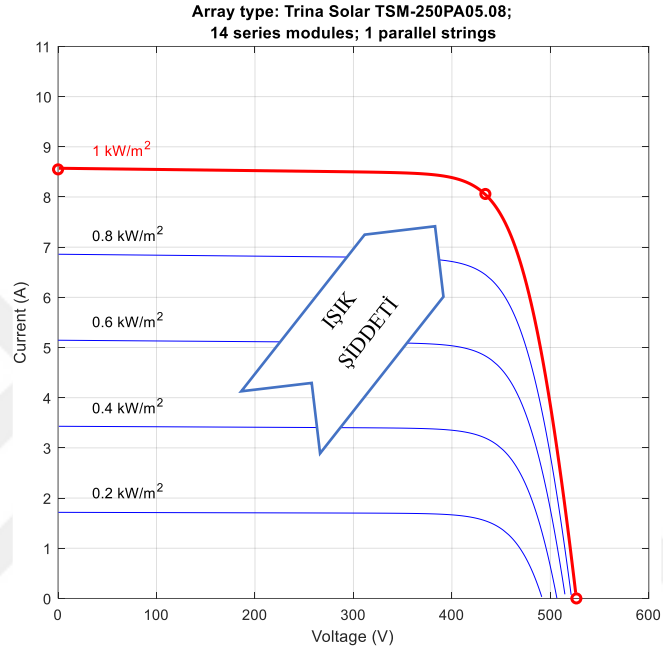


Şekil 3.19. Trina Solar TSM-250PA05.08 paneline ait farklı sıcaklık değerlerinde I-V karakteristik eğrisi

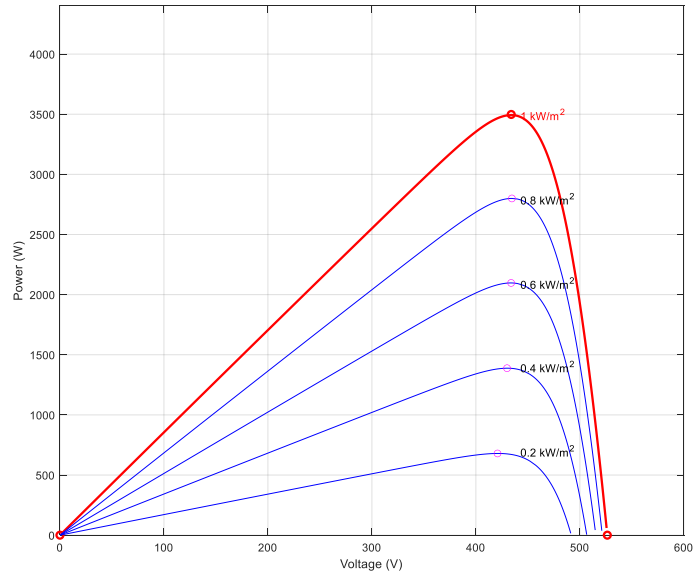


Şekil 3.20. Trina Solar TSM-250PA05.08 paneline ait farklı sıcaklık değerlerinde P-V karakteristik eğrisi

PV panelin üzerine düşen ışık şiddetini artması panel çıkış akımını artıracaktır. Işık şiddetindeki artış ile sıcaklıktaki artış kıyaslanacak olursa, ışık şiddetindeki artışın akım üzerindeki etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. Işık şiddetindeki artış hem akımı hem de gerilimi artırdığı için panel çıkış gücü de artmaktadır. PV modülün sabit sıcaklık (25°C) ve değişen ışınım seviyesi altında (200 W/m^2 , 400 W/m^2 , 600 W/m^2 , 800 W/m^2 , 1000 W/m^2) altında I-V ve P-V karakteristikleri Şekil 3.21 ve 3.22’de sırasıyla verilmiştir.

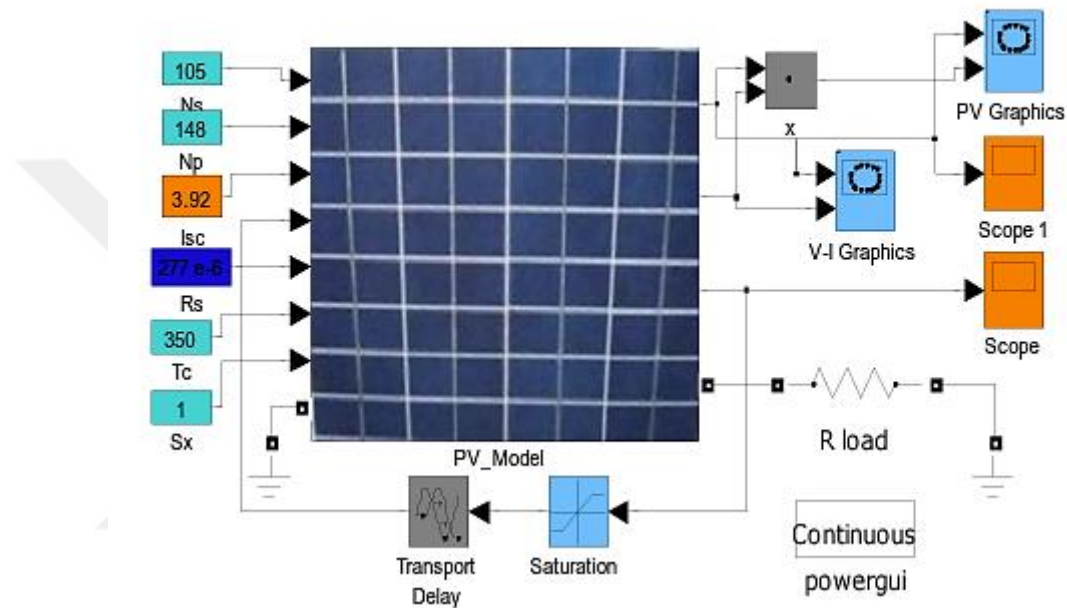


Şekil 3.21. Trina Solar TSM-250PA05.08 paneli farklı ışınım değerlerinde I-V eğrisi

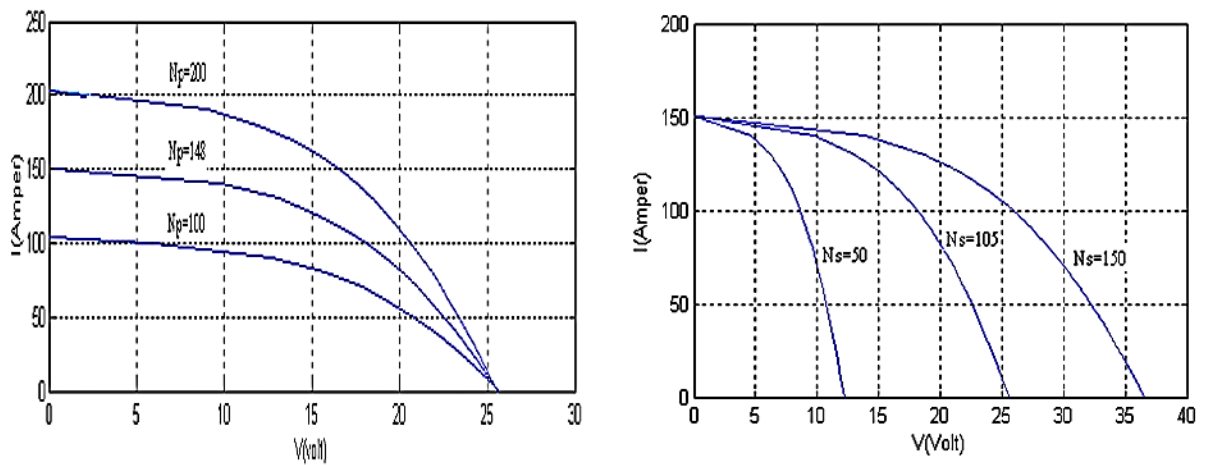


Şekil 3.22. Trina Solar TSM-250PA05.08 paneli farklı ışınım değerlerinde P-V eğrisi

Şahin ve ark. (2013) yaptığı MATLAB-Simulink modellemesinde PV paneli değişik sayılarda paralel ve seri bağlamak suretiyle akım-gerilim karakteristiklerini araştırmışlardır. Seri hücre sayısı (N_s) artarken, gerilim değerinin arttığı ve kısa devre akımının sabit kaldığı ortaya konmuştur. Paralel hücre sayısı (N_p) arttırıldığında akım değerinin arttığı, açık devre geriliminin değişmediği görülmüştür. Şekil 3.23'te devre modeli Şekil 3.24'te ise simülasyon sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Güneş pilinin Simulink genel modeli (Şahin ve ark., 2013)



Şekil 3.24. PV panelin farklı seri ve paralel hücre sayıları için I-V karakteristiği.(Şahin ve., 2013)

Çizelge 3.3. Panellerde parametre değişiminin incelenmesi

	AKIM	GÜÇ
Işık şiddetinin artışı	Artar	Artar
Sıcaklık artışı	Artar	Azalı
Eşdeğer Devrenin Seri Direncinin artışı	-	Azalı
Paralel kol sayısının artışı	Artar	Artar
Seri bağlı hücre sayısının artışı	-	Azalı

Panellerde akım ve güç parametresine etkisi olan değişkenlerin değişimi Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

3.3.2. Fotovoltaik panellerde verimlilik

PV panellerinin verimi STC (Standart Test Koşulları) altında (1000 W/m^2 , 25°C) tespit edilmektedir. PV hücre üzerindeki maksimum güç çıkışının, fotovoltaik pilden elde edilen güç miktarı oranıyla Eşitlik 3.9 ile verimlilik hesaplanabilmektedir.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \quad (3.9)$$

Panel verimi hesaplanırken karşılaşılan kavramlar; açık devre voltajı, kısa devre voltajı, fill faktör-doluluk oranı (FF)'tir.

Açık Devre Voltajı (Voc): PV hücrelere bağlanan yük direncinin (RL) çok büyük olması durumunda devreden akan akım değeri sıfır olur. Devrede akımının sıfır olduğu anda, pil uçlarında ölçülen gerilim değerine açık devre voltajı (Voc) denir.

Kısa Devre Akımı (Isc): PV hücrelerde gerilim değerinin sıfır olduğu an aydınlatma altında ölçülen akım değerine kısa devre akımı (Isc) denir. Kısa devre akımı, seri direnç kayıpları ihmal edildiğinde ışınım miktarına doğrudan bağlı olur.

Fill Faktörü (FF): PV hücrelerde, açık devre voltajı ve kısa devre akımına bağlı olarak maksimum çıkış gücünü ifade ederken kullanılan bir parametredir. Fill faktörüne doluluk faktörü de denilmektedir. Hücrenin seri iç direncinin artması FF değerinin azalmasına sebep olur. Doluluk oranı, Eşitlik (3.10)'da verimliliği Eşitlik (3.11)'de gösterilmiştir.

$$FF = \frac{V_m * I_m}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (3.10)$$

$$\eta = \frac{(V_{oc} * I_{sc}) * FF}{P_{in}} * 100 \quad (3.11)$$

3.4. Bağlantı Şekillerine Göre PV Santraller

Güneş enerjisi santralleri temel olarak kullanım yerlerine, kullanım amacına, kapasitesine göre sınıflandırılmaktadır. Bağlantı şekillerine göre ise şebekeye bağlı güneş enerjisi santrali, şebekeden bağımsız güneş enerjisi santrali ve hibrit güneş enerjisi santrali olarak üçe ayrılmaktadır.

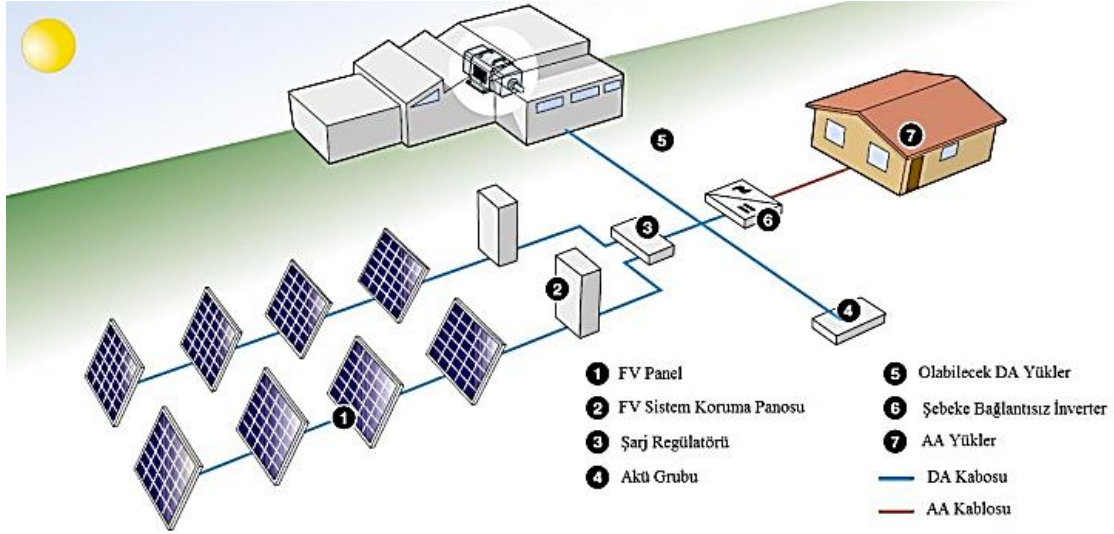
3.4.1. Şebeke bağlantısız PV santraller (Off-grid)

Şebeke bağlantısız santraller, şebekeye bağlı olmayan ve aydınlatmanın zayıf olduğu veya karanlık olduğu zamanlarda da elektrik enerjisi beslemesini sağlayan depolama sisteminden oluşan tesislerdir. PV sistemler bataryalı veya bataryasız olarak kullanılmaktadır. PV jeneratörü tarafından iletilen akım DC olduğu için, kullanıcı AC akıma ihtiyaç duyarsa bir invertör gerekli olur. Bu tür tesisler, elektrik şebekesi olmadığı veya ulaşımın kolay olmadığı durumlarda motor jeneratör setlerini değiştirebildikleri için teknik ve mali açıdan avantajlıdır. Şekil 3.25'te şebeke bağlantısız PV santrallerin bileşenleri, Şekil 3.26'da ise şebeke bağlantısız sistemler gösterilmiştir.

Şu anda en yaygın kullanılan şebeke bağımsız fotovoltaik uygulamalar:

- Sulama suyu ekipmanı
- radyo tekrarlayıcılar
- hava durumu veya sismik gözlem ve veri iletim istasyonları
- yıldırım sistemleri
- yollar, limanlar ve havaalanları için işaret sistemleri
- kamplarda elektrik ihtiyacının karşılanması
- reklam panolarının kurulumları
- yüksek irtifalardaki sığınakların aydınlatılması

- İlk yardım, güvenlik noktaları gibi birçok alanda şebekeden bağımsız (off-grid) sistemler kullanılmaktadır (Bilgin, 2008).



Şekil 3.25. Şebeke bağlantısız PV santraller (ABB, 2014)

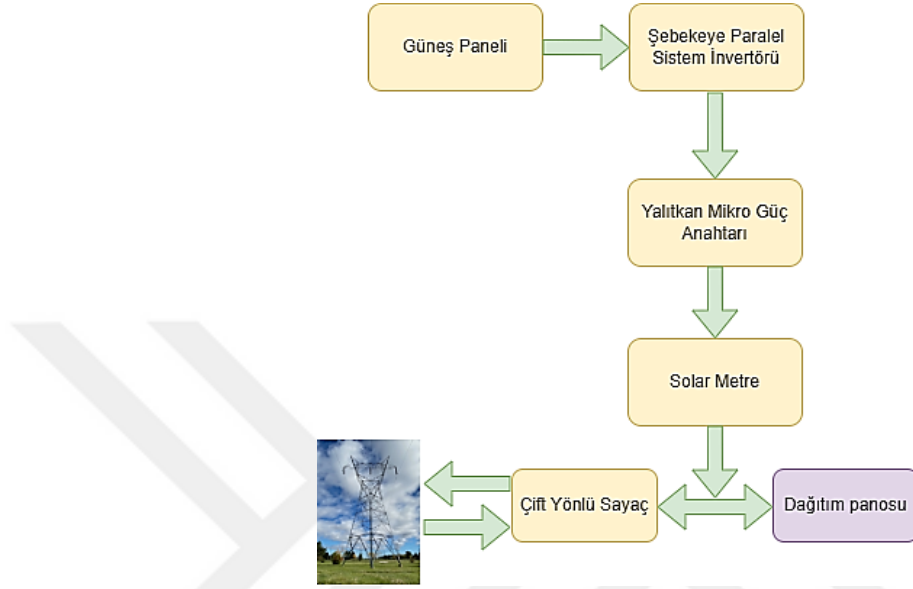


Şekil 3.26. Negev'de bir çiftlikte off-grid sistem örneği (Agency, 2008)

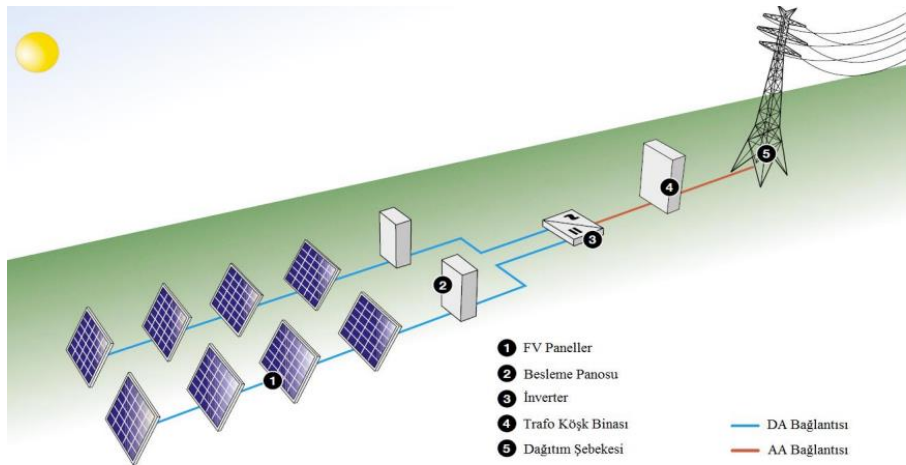
3.4.2. Şebeke bağlantılı PV santraller (On-Grid)

Şebeke bağlantılı PV santraller, şebeke ile direkt bağlantısı sağlanmış yüksek güçte santraller olabileceği gibi küçük güçte örnekleri de bulunan sistemlerdir. Ürettiği enerji dağıtım hattına aktaran sistemler, bir alandan maksimum güç elde etmek için tasarlanmışlardır. Şebeke bağlantılı sistemler ürettiği enerji sisteme aktardığı için

depolama ara birimine ihtiyaç duymazlar. Şekil 3.28’de görüldüğü gibi şebeke bağlantılı PV santraller, iki farklı şekilde tasarlanabilmektedir. DC akımı, AC akıma çevirmek suretiyle sayaç üzerinden şebekeye iletirken, bir diğer yol ise sanayi, mesken vs. elektrik enerji olduğu kısımlarda inverterden sonra çift yönlü sayaç konularak sistem tamamlanır.



Şekil 3.27. Şebeke bağlantılı PV santraller akış şeması

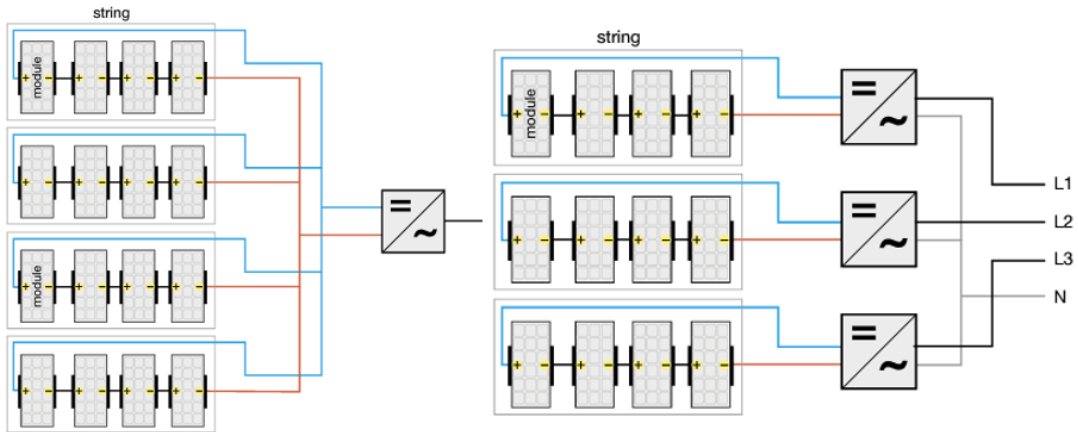


Şekil 3.28. Şebeke bağlantılı PV santraller (ABB, 2014)

Şebekeye bağlı sistemlerde bulunan inverterler DC akımı, AC akıma çeviren devre elamanlarıdır. Piyasada kullanılan inverterlerin verimleri yaklaşık %98’dir. İlk yatırımın ve bakım maliyetlerinin azaltılması açısından tek bir invertörün varlığından

kaynaklanan ekonomik avantajlar vardır. Ancak tek bir inverterin arızalanması tüm tesisin üretiminin durmasına neden olur. Ayrıca, PV santralin boyutu (ve bununla birlikte tepe gücü de) arttıkça bu çözüm çok uygun değildir, çünkü bu aşırı akımlara karşı koruma sorunlarını ve farklı bir gölgelemeden kaynaklanan sorunları ortaya çıkarmaktadır.

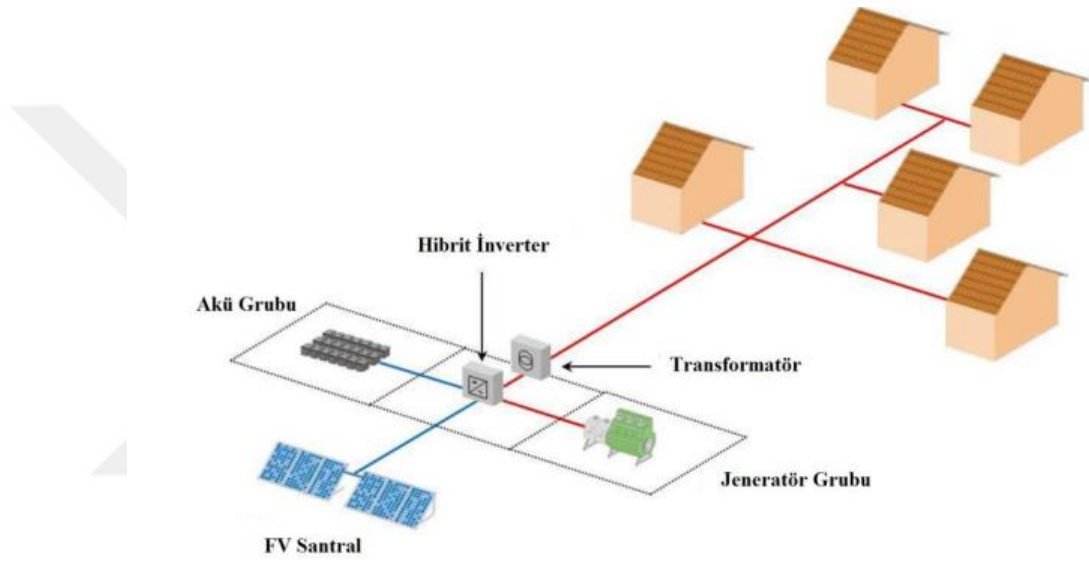
İnverterler güç büyüklerine göre iki gruba ayrılabilir. Birincisi; merkezi inverter, ikincisi ise dizi inverterdir. Şekil 3.29'da merkezi ve dizi inverter gösterilmiştir. Merkezi inverterlerde sistemde kullanılan PV panel dizilerinin hepsi toplanıp tek invertere giderken, dizi inverterlerde ise her PV panel dizisi farklı bir invertere gitmektedir. İnverter, invertere bağlı dizilerin ortalama parametrelerini dikkate alarak MPPT aracılığıyla çalışmasını düzenler; bu nedenle, tüm diziler tek bir invertere bağlıysa, bunların birinin veya bir kısmının gölgelemesi veya arızalanması, diğer yerleşimlere kıyasla tesisin elektrik performanslarında daha yüksek bir azalmaya neden olur. Orta büyüklükteki bir tesiste, her bir dize doğrudan kendi invertörüne bağlanabilir ve böylece kendi maksimum güç noktasına göre çalışır. Bu düzende, kaynak yönünün tersine dönmesini önleyen bloke edici diyot genellikle invertöre dahil edilir, üretimdeki teşhis doğrudan invertör tarafından gerçekleştirilir, bu da DC tarafındaki atmosferik kökenli aşırı akımlara ve aşırı gerilimlere karşı koruma sağlar. Ayrıca, her dizede bir invertöre sahip olmak, modüller ve invertörler arasındaki bağlantı problemlerini ve gölgeleme veya farklı gösterimlerin neden olduğu performanslardaki azalmayı sınırlar.



Şekil 3.29. Merkezi ve dizi inverter (ABB, 2014)

3.4.3. Hibrit PV santraller

PV santrallerin üretimi meteorolojik şartlara bağlı olduğu için sürekli bir üretim söz konusu değildir. Santralin kesildiği veya sistem için yetersiz olduğu anda diğer sistemler ile telafi edilmesi hibrit sistemler aracılığıyla sağlanır. Hibrit PV santraller çoğunlukla rüzgar ve dizel jeneratörlerle üretim yapmaktadır. Bu arada güneş enerjisi, üretim yapmadığı süre boyunca her iki teknolojiyi birleştirerek, gerekli üretim sağlanmış olur (Léna, 2013). Şekil 3.30’da hibrit PV santraller gösterilmiştir.



Şekil 3.30. Hibrit PV santral

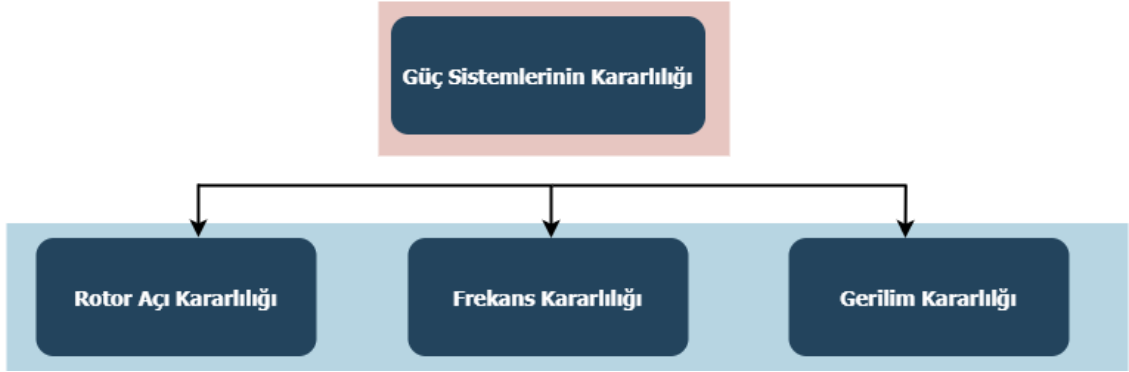
3.5. Güç Sistemlerinde Kararlılık Analizi

Güç sistemleri her geçen gün daha da büyümektedir. Gelişen teknoloji, artan nüfus vs. üretim ve tüketim noktaları artmaktadır. Yenilenebilir enerjinin de kullanıldığı bu tesislerde güvenli üretim yapılması için gerekli kararlılık analizleri yapılmalıdır.

Güç sistemlerinde kararlılık analizi, sistemin mevcut koşullarını sürdürmesi veya herhangi bir arıza durumu ile karşılaştığında sistemin tekrar denge konumuna gelmesi olarak tanımlanır (Ova, 2017).

Güç sistemlerinin güvenli, kesintisiz çalışması endüstriyel ve ticari açıdan oldukça önemlidir. Sistemin bu şartlar altında işletilebilmesi için gerekli analizlerin

yapılması ve planlanması şarttır. Güç sistemlerinde kararlılık akış şeması Şekil 3.31’de gösterilmiştir.

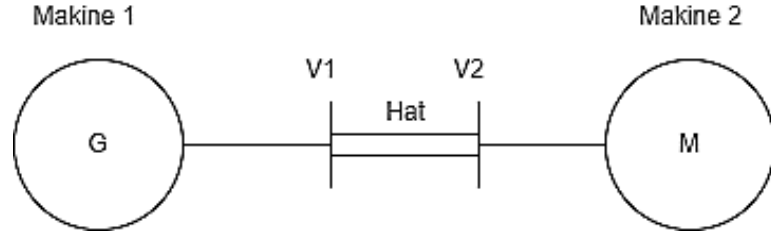


Şekil 3.31. Güç sistemlerinde kararlılık akış şeması

Güç sistemi analizinde kullanılan en yaygın hesaplama prosedürlerinden biri yük akış hesaplama güç sistemlerinin planlanması, tasarımı ve işletilmesidir. Bu tür güç sisteminin kararlı durum performansını analiz etmek için kullanılan hesaplamalar çeşitli çalışma koşullarını ve ekipman konfigürasyonundaki değişikliklerin etkilerini incelemektedir. Bu yük akışı çözümleri, özel olarak tasarlanmış bilgisayar programları kullanılarak gerçekleştirilir. Yükün güç tüketimi göz önüne alındığında bilinen bir elektrik güç sistemi konfigürasyonunun baraların her birinde güç üretimi, ara bağlantı, şebekenin her bir hattaki güç akışını ve her bir baradaki gerilim büyüklüğü ve faz açısı tespit edilir (IEEE, 1997).

3.5.1. Açısal kararlılık

Açısal kararlılık güç sistemindeki makinelerin, herhangi bir arıza veya bozunum sonrasında çalışma koşullarında kalabilme yeteneği olarak ifade edilir. Fakat, güç sisteminde oluşan arızaların sınıflandırılması yapılmalıdır, çünkü kullanılan senkron makinelerin sadece bir kısmı sistem içerisinde kalabilmektedir (Eremia ve Shahidehpour, 2013). Şekil 3.32’de güç sistem modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.32. Güç sistem modeli

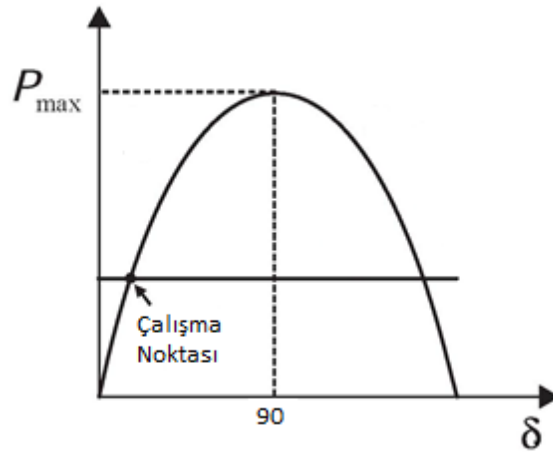
Sisteme ait aktif reaktif güç ifadeleri Eşitlik 3.12, 3.13 ve 3.14'te verilmiştir.

$$P = \frac{V_1 \cdot V_2}{X} \sin \delta \quad (3.12)$$

$$Q = \frac{V_1 \cdot (V_1 - V_2)}{X} \cos \delta \quad (3.13)$$

$$x = x_g + x_h + x_m \quad (3.14)$$

Gösterilen eşitliklerde P aktarılan aktif güç miktarını, Q reaktif güç miktarını, V1 hat başı gerilimi, V2 hat sonu gerilimini ve x toplam reaktansı ifade etmektedir.



Şekil 3.33. Güç-Açı karakteristiği (Ova, 2017)

Güç (P) ve açı (δ) arasındaki ilişki Şekil 3.33'te gösterilmiştir. Bu şekilde gösterilen P-δ karakteristiği, güç sistemlerinde sistemin kararlı durumda olup

olmadığının değerlendirilmesi açısından önemlidir. Aktarılan güç, açı değeri arttıkça artar. Açının $\pi/2$ olduğu durumda güç değeri maksimuma ulaşır.

3.5.2. Frekans kararlılığı

Frekans kararlılığı güç sisteminde üretim ve yük arasında dengesizliğe sebep olacak sistem bozunmasının ardından frekans kararlılığını sürdürebilme yeteneğidir. Sistemin kararlılık seviyesine ulaşması ya da kararlılığını sürdürebilmesi için sistemden çekilen ve sisteme verilen aktif güç arasındaki dengeye bağlıdır. Şiddetli sistem bozuklukları genellikle büyük sapsmalara neden olur. Frekans, güç akışları, voltaj ve diğer sistem değişkenleri, böylece geleneksel geçici kararlılıkta modellenmeyen süreçlerin, kontrollerin ve korumaların eylemlerini çağırır (Hatziargyriou ve ark., 2021).

Frekans kararlılığında meydana gelen arızalar yenilenebilir enerji kaynaklarının sistem entegrasyonundan da kaynaklanabilmektedir.

Elektrik enerjisi şebeke yönetmeliğine göre nominal frekans değeri 50 Hz'dir. TEİAŞ kabul edilebilir sınırları 49.5-50.5 Hz olarak belirlemiştir.

3.5.3. Gerilim kararlılığı

Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı, sistemde çalışma koşullarının bozulmasının ardından, kararlı gerilim değerini devam ettirebilmesidir. Güç sistemlerinde reaktif güç dengesizliği gerilim kararsızlığı oluşturmaktadır. Bir sistemde V-Q hassasiyeti pozitif ise sistem gerilim yönüyle kararlı, V-Q hassasiyeti negatif ise sistem kararsızdır. Gerilim kararsızlığının altına iki temel sebep yatmaktadır: yük kaybı veya yük arzının kesilmesidir.

Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı, sistemde bir arıza meydana geldikten sonra sistemin kabul edilebilir gerilim sınırlarında çalışmasıdır. Sistemin gerilim parametresi açısından kararlı kabul edileceği sınır değerleri 0.9-1.1 pu'dir. Bir sistemde bozunum meydana geldikten sonra sistem dengeye ulaşmazsa sistem frekansı da kararsız hale gelebilir (Amjady ve Fallahi, 2010).

Reaktif güç ihtiyacının karşılanmaması, üretim tarafında gerilim çok düşük olması, kompanzasyonun yetersiz kalması, kullanılan elemanlar ve sistem kapasitesinin gerilim kararlılığını etkileyen parametreler arasında olduğu görülmüştür. Sistemde

gerilim kararlılığını sağlamak için kompanzasyon sistemleri, koruma kontrol sistemleri, FACTS cihazları, sıra dışı bir arıza durumunda UVLS (düşük-gerilim yük atma) ile yük atma, yöntemleri tercih edilmiştir.

3.6. Güç Akış Analizi

Bilgisayar teknolojisinin ilerlemesi ile endüstriyel teknolojinin karmaşıklığı artmaktadır. Artan karmaşıklık, sistemlerin incelenmesi ve analiz edilmesi ihtiyacını beraberinde getirmiştir. Analiz yöntemleri ile sistem hakkında birçok soruya cevap aranmıştır. Sistemin kısa devre kapasitesi, kararlılığı, yük dağılımı, bara gerilimi, faz açısı, aktif reaktif güç değerleri analiz edilen parametrelerden sadece birkaçıdır. (Ova, 2017)

Güç akış analizi, sistemin mevcut durumu hakkında bilgi edinmek için kullanılan analiz yöntemlerinden biridir. Şebeke hesaplamalarının temeli olan yük akışı analizi olarak da anılmaktadır.

Güç akışı problemi, gerilim büyüklüğü ve fazın hesaplanmasıdır. Bir güç sistemindeki her bir baradaki dengeli üç fazlı sabit durum altında her bir baradaki açı hesaplanır. Bu hesaplama ek olarak, iletim hatları ve transformatörler gibi ekipmanlarda gerçek ve reaktif güç akışları, hat kayıpları da hesaplanabilir (Glover ve ark., 2010) .

Güç sistemlerinde analizlerin doğru bir şekilde yapılabilmesi için yük ve generatör verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sistemin güç akışını yapabilecek veriler yoksa da bazı kabuller üzerinden sonuca gidilmektedir (da Costa vd., 2007). Bu kabuller şu şekilde sıralanabilir:

- Generatörler, şebekedeki kayıplarla şebekenin yük taleplerine cevap verebilmelidir.
- Sistemdeki baraların gerilim değerleri nominal işletme sınırları içinde olmalıdır.
- Generatörler, belirlenen aktif ve reaktif güç sınırları içinde çalışmalıdır

Güç akış analizi hesaplamalarında; gerilimin genliği (V), aktif güç (P), reaktif güç(Q), faz açısı (δ) değerlerinden en az iki tanesinin bilinmesi halinde güç akış analizi yapılabilir (Çetinkaya, 2016).

3.6.1. Newton-Raphson yöntemi ile güç akış analizi

Güç sistem problemleri incelendiğinde doğrusal olmadığı görülmektedir. Bu sebepten iterasyon yönteminden faydalanılmaktadır. Gauss-Seidel metodu, doğrusal olmayan denklemlerin çözümünde kullanılan en basit iterasyonlu çözüm yöntemidir. İçerisinde fazlaca iterasyon barındırır, fakat iterasyon süreleri kısa olduğu için çözüme kolayca ulaşılır. Büyük kapsamlı sistemlerin çözüme ulaştırılmasında ise Newton-Raphson metodu kullanılır (Ramkhelawan, 2019).

n baralı bir sistemde i barasındaki güç ifadeleri Eşitlik 3.15, 3.16, 3.17 ve 3.18'de verilmiştir.

$$P_i + jQ_i = V_i I_i = V_i \sum_{j=1}^n (Y_{ij} V_j) \quad (3.15)$$

$$P_i + jQ_i = V_i I_i = V_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (3.16)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (3.17)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (3.18)$$

3.7. Güç Sistemlerinde Kararlılık Analizi

Güç sistemlerinde kararlılık analizi yapılırken farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden birincisi statik kararlılık analizi iken diğer bir yöntem ise dinamik kararlılık analiz yöntemidir. Statik kararlılık analizi sürekli durumlarda daha faydalı sonuçlar verirken, dinamik durum ise geçici durum analizlerinde kullanılmaktadır. Dinamik yöntemler, generatör ve trafo gibi elemanlar üzerinde incelemeler yapar.

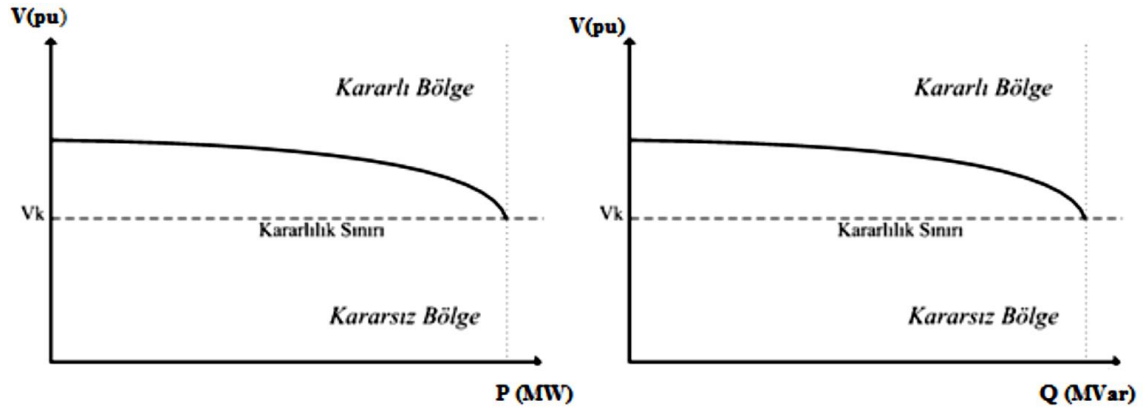
Güç sistemlerinde gerilim kararlılık analizi farklı metotlar uygulanarak yapılmaktadır. Gerilim çökmesini incelemek için Jacobian matrisi kullanılır. Özgün değer ve özgün vektör hesaplamaları yapılır (Althowibi ve Mustafa, 2013).

3.7.1. Statik gerilim kararlılığı

Gerilim kararlılık analiz yöntemleri ile baraların mevcut durumu incelenir. Kullanılan gerilim kararlılık analiz yöntemleri: P-V eğrisi, Q-V eğrisi, Jacobian Matris Determinantı, süregelen güç akış analizidir (Ramkhelawan, 2019).

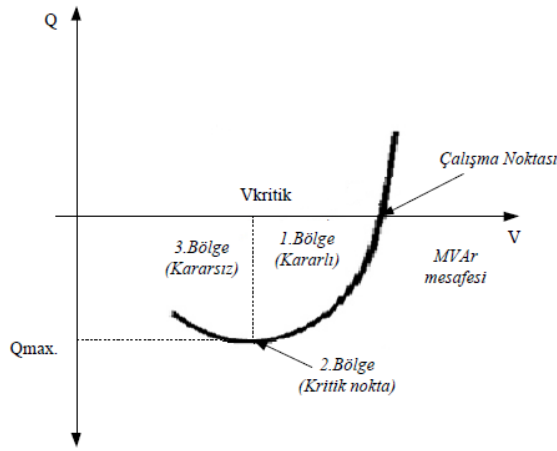
Şebekenin işletme sınırları içerisinde kalıp kalmayacağını araştırmak için P-V ve Q-V eğrileri yöntemi kullanılır. Şekil 3.34'te P-V ve Q-V eğrileri ile kararlılık sınırları

gösterilmiştir. Baralardaki gerilim çökmesi, güç limitleri, aktif-reaktif güç oranları bu eğriler yardımıyla anlaşılabilir. Güç sistemlerinde değişen durumlarına göre P-V ve Q-V eğrileri ile analiz yapılır.



Şekil 3.34. P-V ve Q-V eğrileri (Çetinkaya, 2016)

Sistemdeki reaktif güç gerilim ilişkisi Şekil 3.35'te verilmiştir.



Şekil 3.35. Q-V (Reaktif Güç-Gerilim) eğrisi (Ova, 2017)

3.7.2. Dinamik gerilim kararlılığı

Gerilim kararlılığı dinamik bir problem olduğu için, sistem modellemelerinin tam olarak yapılmasının ardından gerilim kararsızlığına sebep olan olayların incelenmesinde kullanılır. Dinamik kararlılık analizleri, sistemde meydana gelen arıza sonrasında

sistemin durumunu inceler. Bu yüzden dinamik analizler sistem ve sistem performansı açısından oldukça önemlidir.

3.8. Reaktif Güç Kompanzasyonu

Elektrik sistemleri, bağlanan cihazların karakteristiğine bağlı olarak aktif ve reaktif güç çekerler. Reaktif güç, sistem için yararlı bir etki oluşturmaz ama aktif gücün yanında reaktif güce de ihtiyaç duyulmaktadır. Sistemdeki endüktif reaktif güç için kapasitif güç verilerek reaktif gücün ayarlanması işlemine reaktif güç kompanzasyonu denir. Güç faktörü, reaktif güç kompanzasyonu ile düzeltilebilir (Bilki, 2008)

Güç faktörü terimine birkaç farklı tanım ve ifade uygulanabilir. Güç faktörü (PF), toplam görünen gücün yüzdesi olarak görülebilir. Bir elektrik sisteminde, güç faktörü 0,80 ise, görünen gücün %80'i faydalı çalışmaya dönüştürülür. Aktif güç, görünür gücün faydalı işler gerçekleştiren kısmıdır. Daha yüksek güç faktörü, bir tesiste elektrik akımının daha optimum kullanımına yol açar (Dixon ve ark., 2005).

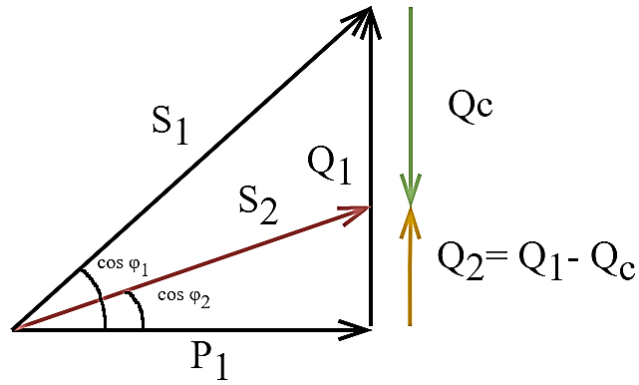
Kompanzasyon işlemlerinde güç faktörünün ($\cos\phi$) 1'e yaklaştırılması amaçlanır. Sistem için gerekli kompanzasyon ya da güç faktörünün kontrolü yapılmazsa hatlarda gerilim dengesizlikleri, ani reaktif güç değişiklikleri meydana gelebilir. Bu değişiklikler kullanıcı tarafında arızaya sebep olabilir. Bu yüzden güç faktörü belirlenen aralıklarda tutulmalıdır.

Güç faktörü, çeşitli nedenlerle güç kalitesi tartışmasına dahil edilir. Güç faktörü, düşük güç faktörünün bazen neden olabileceği bir güç kalitesi sorunudur. Birçok durumda, düşük güç faktörünün maliyeti yüksek olabilir; kamu hizmetleri, düşük güç faktörüne sahip tesisleri cezalandırır. Güç kalitesi çalışması, güç sisteminin performansını mümkün olan en düşük işletme maliyetiyle optimize etmeyi amaçlar (Sankaran, 2002).

Reaktif güç kompanzasyonu yapmanın şebeke ve tüketiciye faydaları şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ Tesisin reaktif güç bedeli ödemeleri azalır.
- ✓ Besleme hattının, tesisin verimi yükselir.
- ✓ Sistemin verimi artar, ısı kayıpları azaltılmış olur.
- ✓ Gerilim düşümü azaltılır, faz dengesizlikleri giderilir.

Güç üçgeni Şekil 3.36'da ile ilgili formüller ise Eşitlik 3.19, 3.20, 3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.36. Güç faktörü düzeltilmesi

$$Q_2 = Q_1 - Q_c \quad (3.19)$$

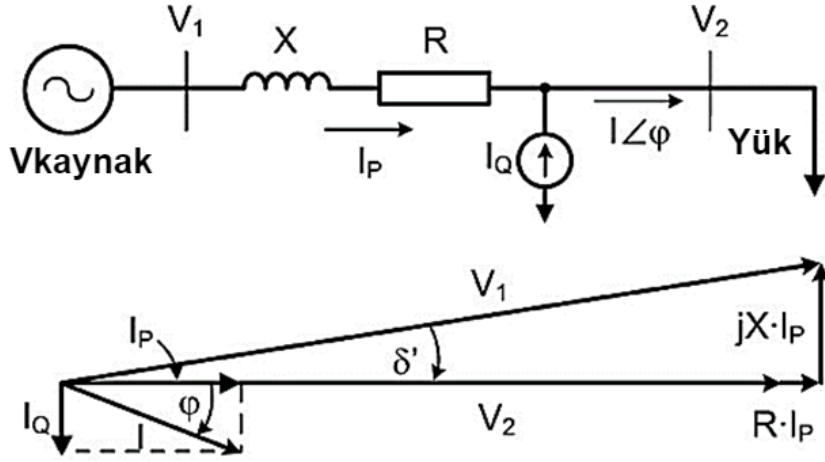
$$S_2 = \sqrt{P_1^2 + Q_2^2} \quad (3.20)$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{P_1}{S_2} \quad (3.21)$$

3.8.1. Şönt kompanzasyon

Elektrik sistemlerinde gerilim kararlılığını sağlamak, gerilim büyüklüğünü düzenlemek, kalitesini iyileştirmek için şönt reaktif güç kompanzasyonu kullanılmaktadır. Sistem yükleri endüktif karakterde ise sistemin düzgün çalışabilmesi için sisteme reaktif güç eklenmesi gerekir. Eklenen reaktif güç, hat akımının düşmesine sebep olabilir. Bu sayede güç kayıpları azaltılarak gerilim düzenlenmiş olur (Dixon, Morán, 2005).

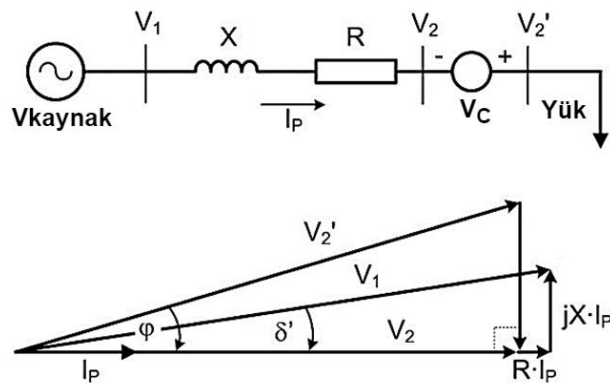
Yükün önde gelen kompanzasyona ihtiyacı varsa, sistem için bir indüktör gerekli olacaktır. Endüktif şönt kompanzasyonu için bir akım kaynağı veya bir voltaj kaynağı kullanılabilir. Gerilim veya akım kaynaklı VAR jeneratörleri (indüktörler veya kapasitörler yerine) kullanmanın avantajı, üretilen reaktif gücün bağlantı noktasındaki voltajdan bağımsız olmasıdır. Şekil 3.37'de akım kaynağı ile şönt kompanzasyonun fazör diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3.37. Şönt kompanzasyon

3.8.2. Seri kompanzasyon

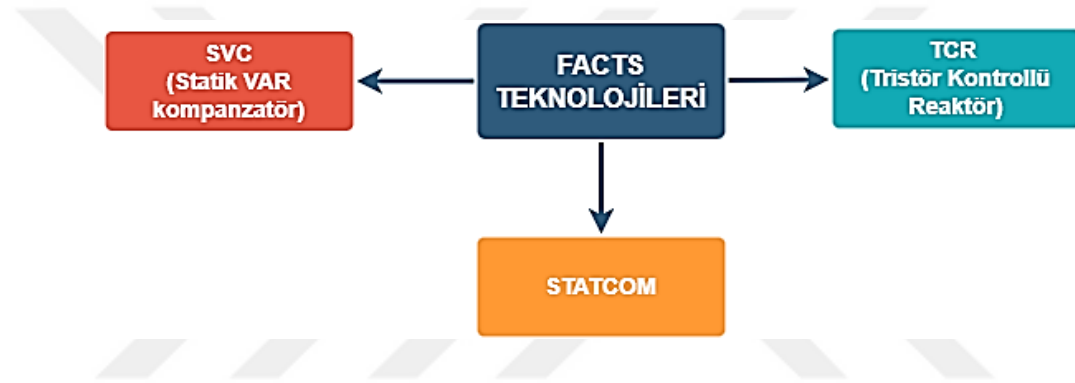
Seri kompanzasyon işleminde sisteme seri bir reaktör bağlanarak sistemin reaktansı artırılarak hattan geçen güç azaltılmış olur. Bundan dolayı reaktif güç gereksinim duyulur. Seri bir kapasitör bağlanarak reaktif güç üretilmiş olur. Bunun sonucunda ise sistem ve gerilim kararlılığının sağlanmasında seri ve şönt kompanzasyonda farklılık göstermektedir. Hat ve yük arasında V_c gerilimi bağlanarak yük tarafında bulunan V_2 açısı değiştirilmiştir. V_c uygun değere ayarlaması ile güç faktörü ayarlaması yapılabilir. Şekil 3.38'de gösterilen fazör diyagramına göre V_c hat indüktansının gerilim düşüşüne zıt yönde bir gerilimi üretmektedir.



Şekil 3.38. Seri kompanzasyon (Dixon, Morán, 2005)

3.8.3. FACTS cihazları

FACTS cihazları, mekanik denetleyicilerin yerini daha hızlı ve güvenli olan güç elektroniği elemanlarının alması fikriyle ortaya çıkmıştır. Bu cihazlar sayesinde güç sisteminin kapasitesi optimize edilip denetlenebilirliği artırılmış olur. FACTS cihazları güç elektroniği tabanlı oldukları için şönt kapasitör, seri kapasitör, faz kaydırıcılı sistem vs. göre daha hızlıdır. FACTS cihazları sistemlerde gerilim kontrolü ve güç akış kontrolü için kullanılmaktadır. Bu cihazlar elektriksel sistemlerde kompanzasyon yoluyla hattın aktif reaktif gücünü ayarlayarak sistemin kontrolünü sağlamış olur. FACTS cihazları iletim sistemlerinde güç akışını kontrol etmek ve güç kapasitesini artırmak için kullanılır.



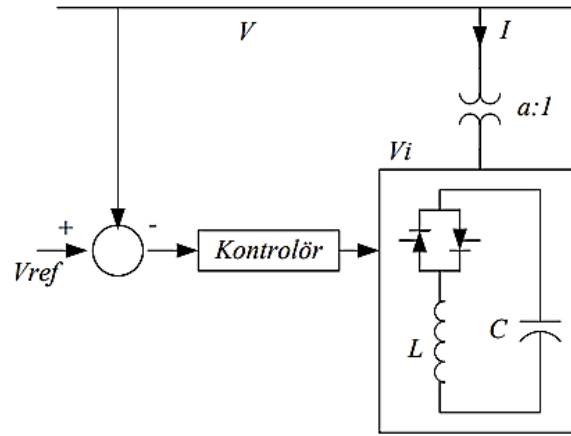
Şekil 3.39. FACTS Teknolojileri

3.8.4. Statik VAR kompanzator (SVC)

Statik VAR kompanzatorlar, sisteme paralel bağlanan kapasitör ve reaktansın eş değeri olup sistem parametrelerini düzenlemek için reaktif güç üreten veya tüketen sistemlerdir. Statik VAR kompanzatorların görevi, sisteme endüktif veya kapasitif akım ilave ederek reaktif güç kontrolü ile sistem parametrelerini belirlenen sınırlar içerisinde tutar. Statik VAR kompanzatorlar ikiye ayrılır: sabit kapasiteli tristör kontrollü reaktör(TCR) ve ikincisi ise tristör kontrollü kapasite (TSC)'dir.

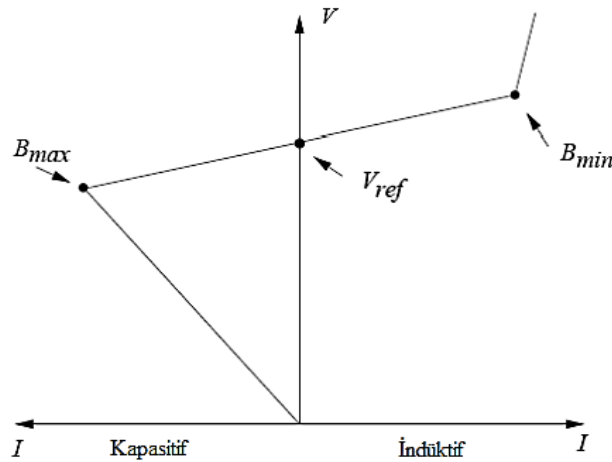
Şekil 3.40'ta SVC'nin devre yapısı ve gerilim kontrolü gösterilmiştir. Statik VAR kompanzatorlar, değişken değerli empedans elde ederek belirlenen tetikleme açılarına bağlı olarak devreye alınıp devreden çıkarılmaktadır.

Sistemde maksimum kapasitif reaktif değeriden maksimum endüktif reaktif değerine kadar olan güç ayarlaması uygun tetikleme şartları ayarlanarak yapılmış olur. Endüktans, sistemin kapasitif veya endüktif çalışma durumunu belirler. Statik VAR kompanzatorların sürekli çalışma durumundaki gerilim karakteristiği şekil 3.40'ta gösterilmiştir.



Şekil 3.40. SVC devre şeması (Tosun ve ark., 2011)

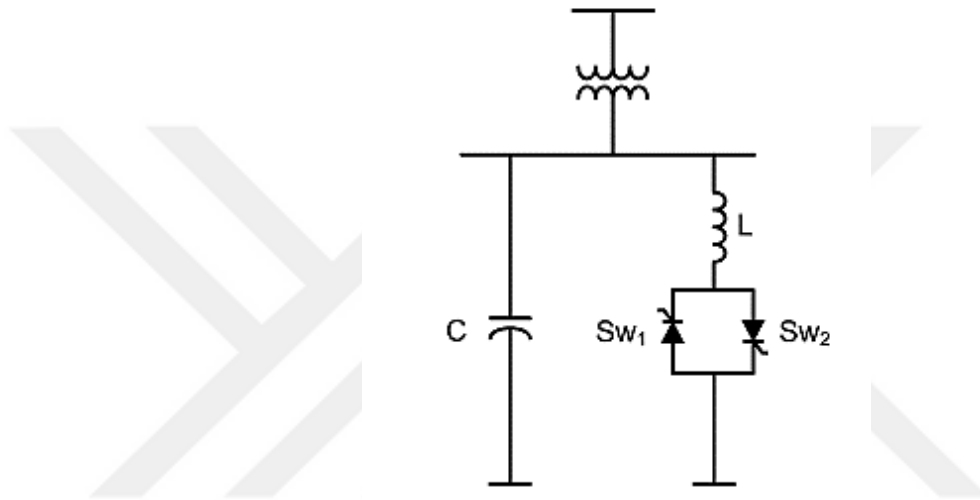
Statik VAR kompanzatorlar sürekli çalışma altındaki yüklenme halindeki normal gerilimi V_{ref} olarak gösterilmiştir. Sistemdeki tüm kapasitelerin devreye alınması halinde B_{max} , devreden çıkarılması halinde ise B_{min} olduğu görülmektedir. Bu parametrelere bağlı olarak akımın karakteristiği belirlenir. Şekil 3.41'de SVC'nin sürekli çalışma karakteristiği verilmiştir.



Şekil 3.41. SVC'nin sürekli çalışmada V-I karakteristiği

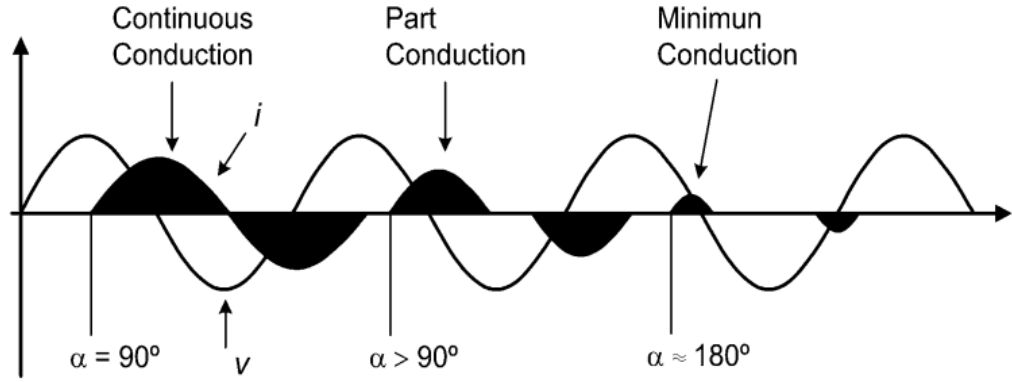
3.8.5. Tristör kontrollü reaktör (TCR)

Tristör kontrollü reaktör tristörlerin kullanımıyla, tristörün iletimde ve kesimdeki durumuna göre akım yönü belirlenerek reaktif güç kontrolü sağlanmaktadır. Çoğu durumda, kompensatör ayrıca sabit bir kapasitör ve bu şekilde gösterilmeyen düşük dereceli harmonikler için bir filtre içerir. Üç faz dalının her biri bir indüktör L ve tristör anahtarları S1 ve S2 içerir. TCR Şekil 3.42'de statik TCR tipi kompensatörün şemasını gösterilmektedir.



Şekil 3.42. Tristör kontrollü reaktör şeması

Reaktörler hem anahtarlmalı hem de faz açısı kontrollü olabilir. Faz açısı kontrolü kullanıldığında, sürekli reaktif güç tüketimi aralığı elde edilir. Bununla birlikte kontrol süreci, s tek harmonik akım bileşenlerinin üretilmesiyle sonuçlanır. Tam iletim 90° 'de sağlanır. Şekil 3.43'te gösterildiği gibi 90° ile 180° arasında kısmi iletim sağlanır. Tristör geçit açısının artırılmasıyla, akım reaktörü azalır. Bu, reaktör tarafından emilen reaktif gücü azalması endüktansı artırmaya eşdeğerdir. Bununla birlikte, reaktör akımındaki değişikliğin sadece farklı noktalarda gerçekleşebileceği belirtilmelidir. Bu konfigürasyonun başlıca dezavantajları, düşük frekanslı harmonik oluşumudur. Akım bileşenleri ve endüktif bölgede çalışırken daha yüksek kayıplar yani, reaktif gücün soğurulması ile sonuçlanır.

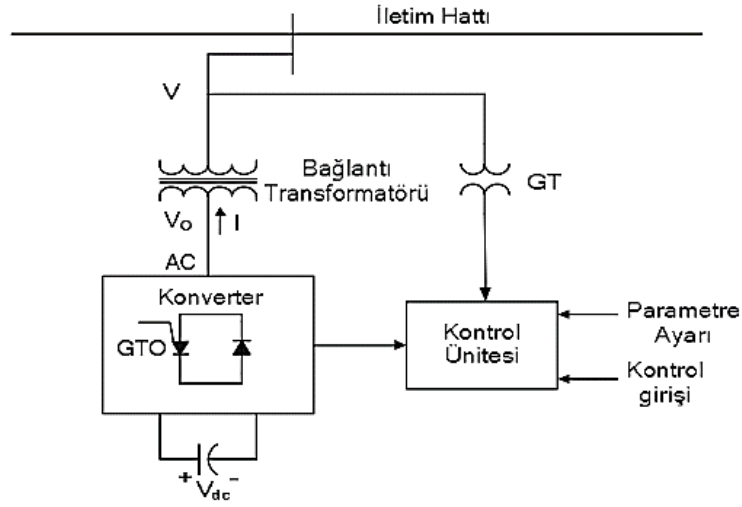


Şekil 3.43. Tristör kontrollü reaktör şeması

3.8.6. Statik senkron kompanzator (STATCOM)

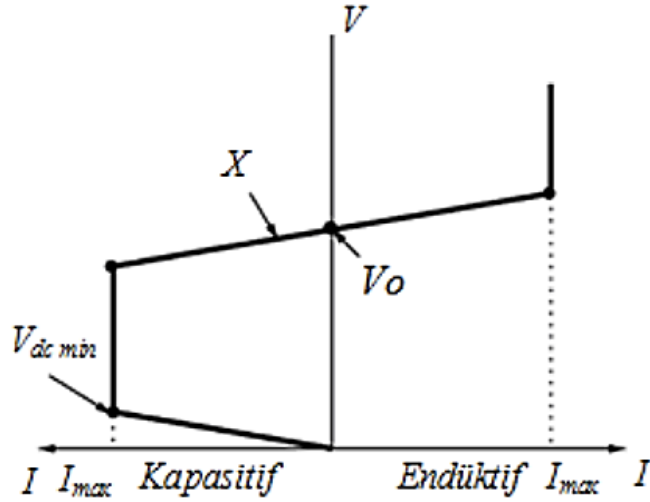
Gelişmiş Statik Var Kompansatör olarak tanımlanan STATCOM, bir DC depolama elemanı ile üç fazlı sistem arasına invertör bağlanarak yapılan FACTS kontrolörüdür. Hattın gerilim düzenlenmesini, iletim hattına paralel bağlanarak iletim hattından reaktif güç çekerek sağlar. Şekil 3.44'te görüldüğü bir STATCOM, bir bağlantı transformatörü, gerilim kaynaklı inverter ve DC enerji depolama elemanından meydana gelmektedir. Enerji depolama elemanı olarak kullanılan küçük bir kondansatör ise STATCOM hat ile sadece reaktif güç alışverişini yapılılabilesine yardımcı olur. İletim sistemi ile aktif ve reaktif güç alışverişini akümülatör DC gerilim kaynağı kullanılırsa tamamlayabilir. STATCOM'un faz açısı ve genliği ayarlanabilir. Bir inverterin AC çıkış geriliminin temel bileşeninin genliği $V_0 = m_a V_{dc}$ şeklinde kontrol edilir. Burada m_a modülasyon indeksidir.

Reaktif güç kompanzasyonu ile bağlı bulunduğu sistemin gerilim sınırlarını belirli bir aralıkta tutmaya yardımcı olan, inverter tabanlı sistemlerin başında STATCOM teknolojisi gelir. İnverter çıkış gerilimi ile AC sistemin gerileme arasındaki fark STATCOM reaktif gücünü vermektedir. STATCOM teknolojisinden gerilim ayarlamasının yanı sıra kompanzasyon yük dengeleme güç faktörü düzeltme işlemlerinde de kullanılmaktadır.



Şekil 3.44. STATCOM devre şeması (Ertay ve Aydoğmuş, 2012)

Şekil 3.45'te STATCOM'un sürekli halde çalışma halinde V-I grafiği gösterilmiştir. Grafiğe göre güç sisteminde, belli zaman aralığında hem endüktif ve hem de kapasitif akım verebildiği görülmektedir.



Şekil 3.45. STATCOM'un sürekli durumda V-I karakteristiği.

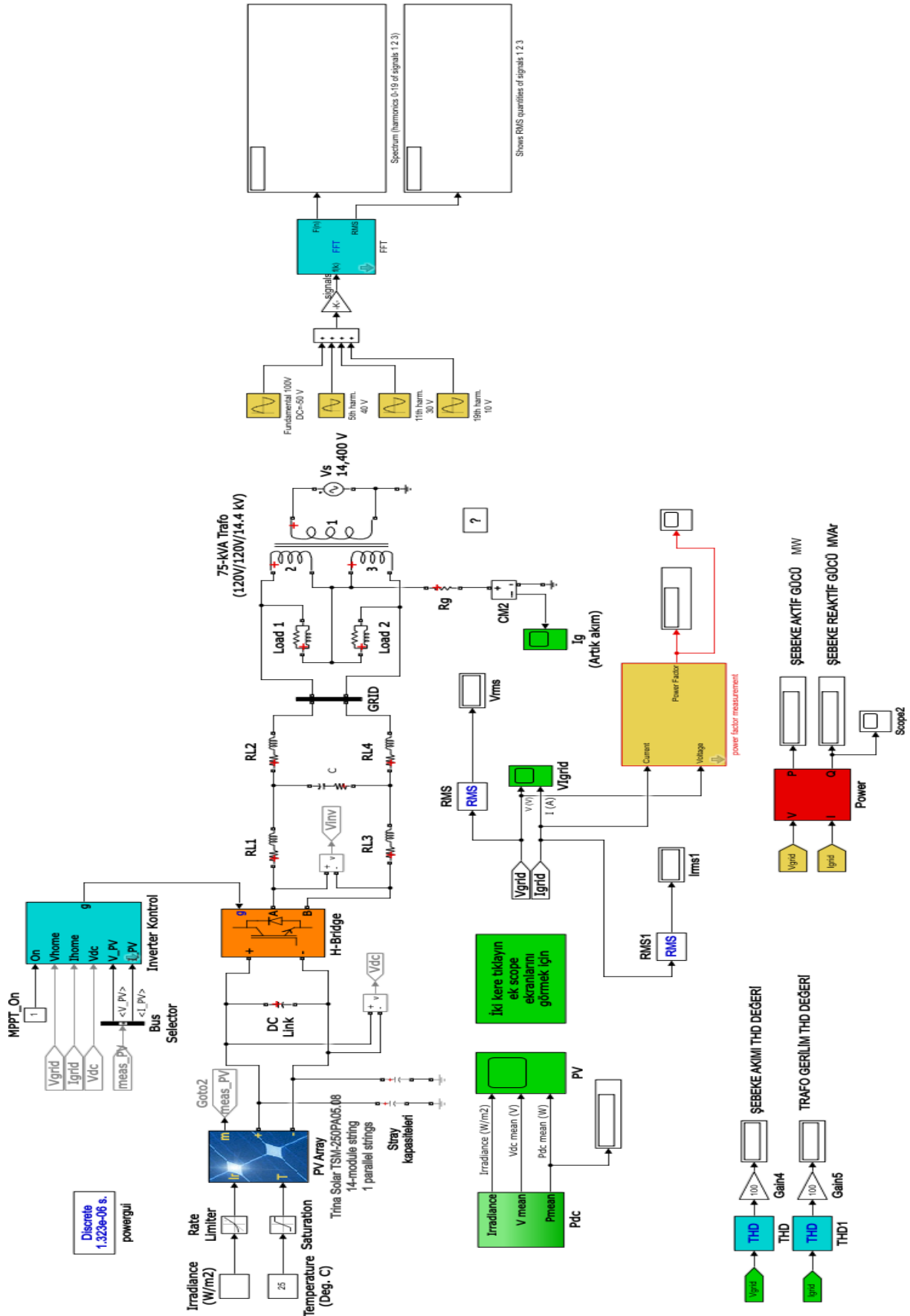
Eğer inverter çıkış gerilimi AC sistem geriliminden geride ise, inverter AC sistemden aktif güç çekecektir. Sürekli durumda alınıp verilen aktif güç miktarı genellikle küçüktür. Burada X bağlantı transformatorünün kaçak reaktansıdır.

3.9. MATLAB/SİMULİNK ile PV Panel Modellemesi

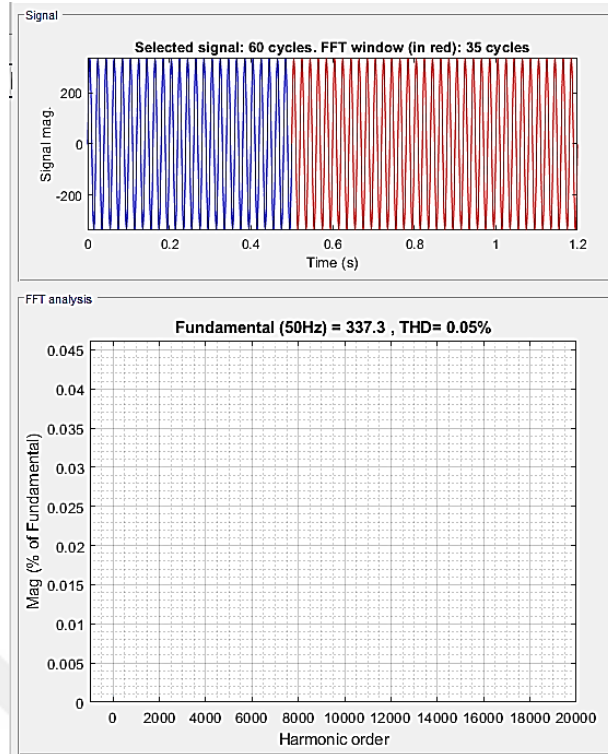
On-grid fotovoltaik sistemlerin kullanımı günden güne artmaktadır. Bu artış fotovoltaik sistemler ve şebekeye etkileri üzerine araştırmaları beraberinde getirmiştir. Bu araştırmalar enerji kalitesinin artırılmasını, güneş enerji santrallerinin performans analizi yapılması, PV'den kaynaklanan sorunların çözüme kavuşturulmasını amaçlamıştır. Halen şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler üzerine yapılan araştırmalar devam etmektedir. Bu tez çalışmasında, fotovoltaik sistem ile şebeke arasındaki senkronizasyon sürecini MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. Simülasyon ortamında yapılan bu çalışmayla, şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin daha verimli bir şekilde çalışması güç faktörünün istenilen aralıkta olması ve fotovoltaik sistem ile şebekenin bir arada çalışma sürecinin simülasyon ortamında gösterilmesi amaçlanmıştır.

3.9.1. Tek fazlı şebekeye bağlı güneş enerji sisteminin modellenmesi

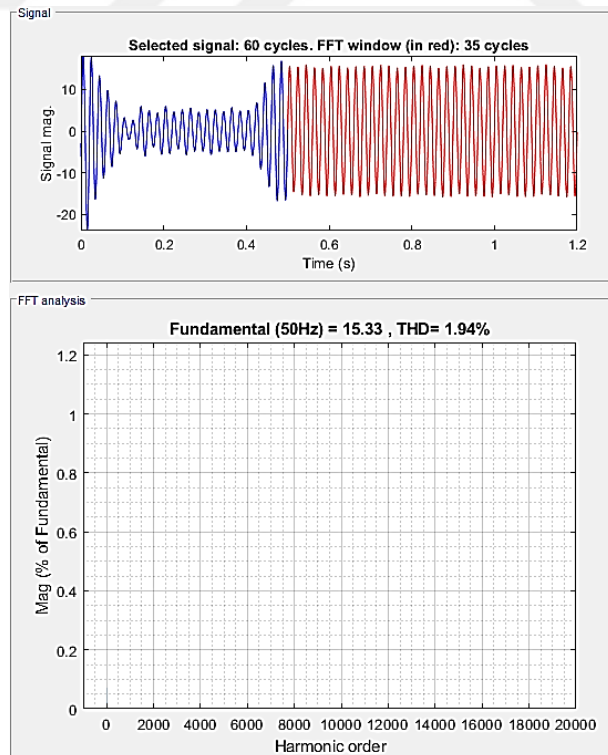
Tek fazlı şebekeye bağlı sistemde güneş paneli olarak SunPower SPR-327NE-WHT-D modeli seçilmiştir. Sistemde 14 seri, 1 paralel bağlı panel kullanılmıştır. Fotovoltaik panellerin toplam gücü yaklaşık olarak 3500 W'tır. Gün içinde elde edilen farklı sıcaklık ve ışınım değerleri için uygulanmıştır. Sistemde PWM kontrollü 3 seviyeli IGBT köprüsü seçilmiştir. Eviriciyi şebekeye bağlamak için 5 kVA 120/14.4 kV trafo kullanılmıştır. Sistemde Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT) ile kontrol edilmiştir. MPPT'de ise 'Perturb and Obserb' tekniği kullanılmıştır. Fotovoltaik sistem şebeke ile paralel bağlanarak mevcut yük üzerindeki aktif güç ve şebekeden çekilen reaktif güçler okunmuştur. Şekil 3.46'da Tek fazlı doğrudan şebeke bağlantılı sistemin modellenmesi gösterilmiştir. MATLAB ile modellenen sistemden elde akım ve gerilim harmonikleri Şekil 3.47 ve Şekil 3.48'de gösterilmiştir.



Şekil 3.46. Tek fazlı doğrudan şebeke bağlantılı sistemin MATLAB modeli



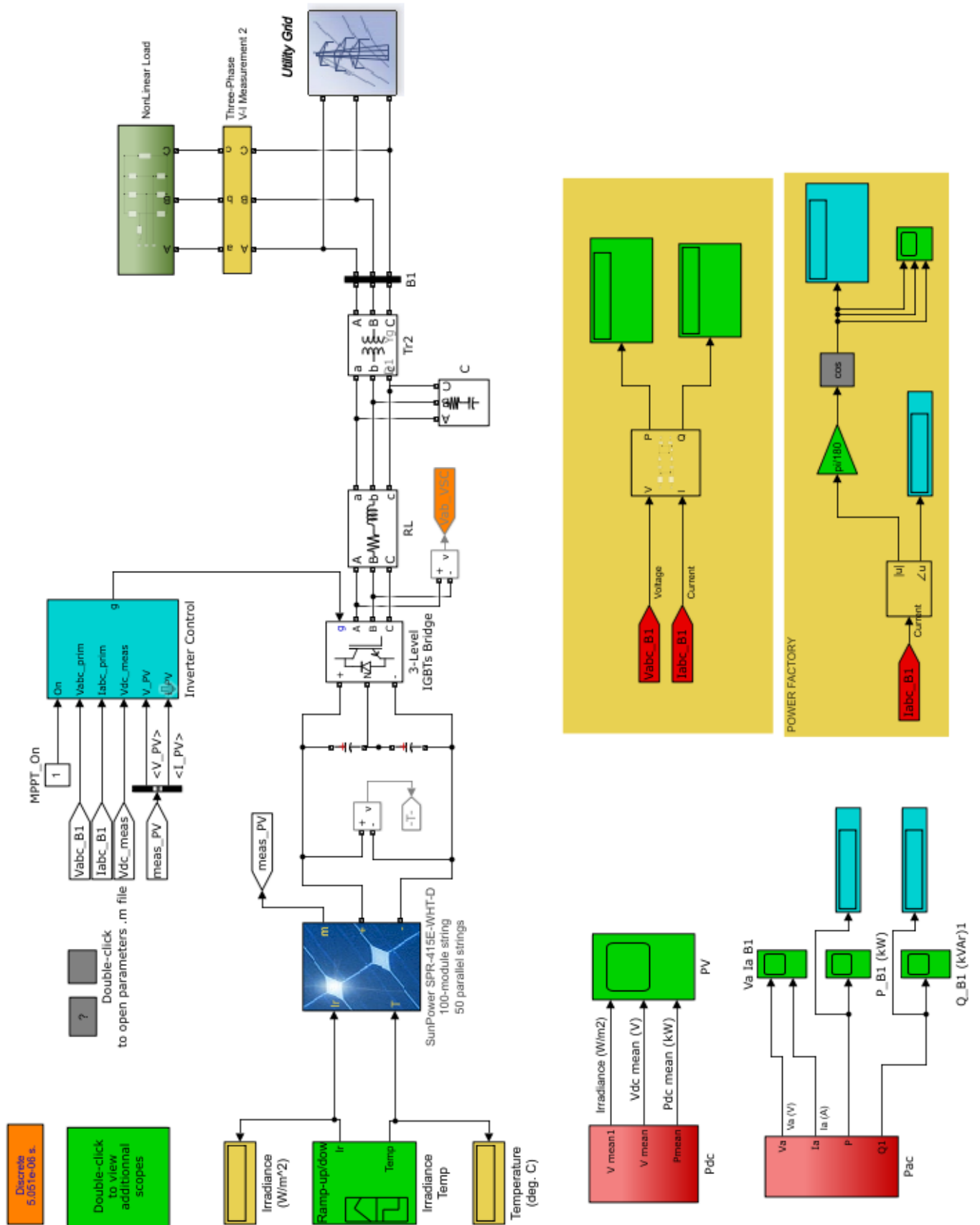
Şekil 3.47. Vgrid THD gösterimi



Şekil 3.48. Igrid THD gösterimi

3.9.2. Üç fazlı şebekeye bağlı güneş enerji sisteminin modellenmesi

MATLAB’da oluşturulan üç fazlı şebekeye bağlı güneş enerjisi simülasyon çalışmasında güneş paneli olarak SunPower SPR-327NE-WHT-D modeli kullanılmış ve 100 seri, 50 paralel bağlı fotovoltaik panellerin toplam gücü yaklaşık olarak 35.25 kW olarak elde edilmiştir. Gün içinde elde edilen farklı sıcaklık ışıınım değerleri için uygulanmıştır. Modelde PWM kontrollü 3 seviyeli IGBT köprüsü seçilmiştir. Eviriciyi şebekeye bağlamak için 1600 kVA 33.5/400 V trafo kullanılmıştır. Sistemde Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT) ile kontrol edilmiştir. MPPT’de ise 'Perturb and Obserb' tekniği kullanılmıştır. Fotovoltaik sistem şebeke ile paralel bağlanarak mevcut yük üzerindeki aktif güç ve şebekeden çekilen reaktif güçler okunmuştur. Şekil 3.49’da üç fazlı şebeke bağlantılı sistemin MATLAB modeli gösterilmiştir.



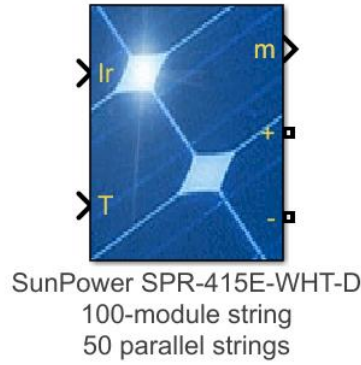
Şekil 3.49. Üç fazlı Şebeke Bağlantılı Sistemin MATLAB/Simulink-SimPower Systems

3.10. MATLAB/SİMULİNK'te Kullanılan Bloklar

3.10.1. Fotovoltaik paneller

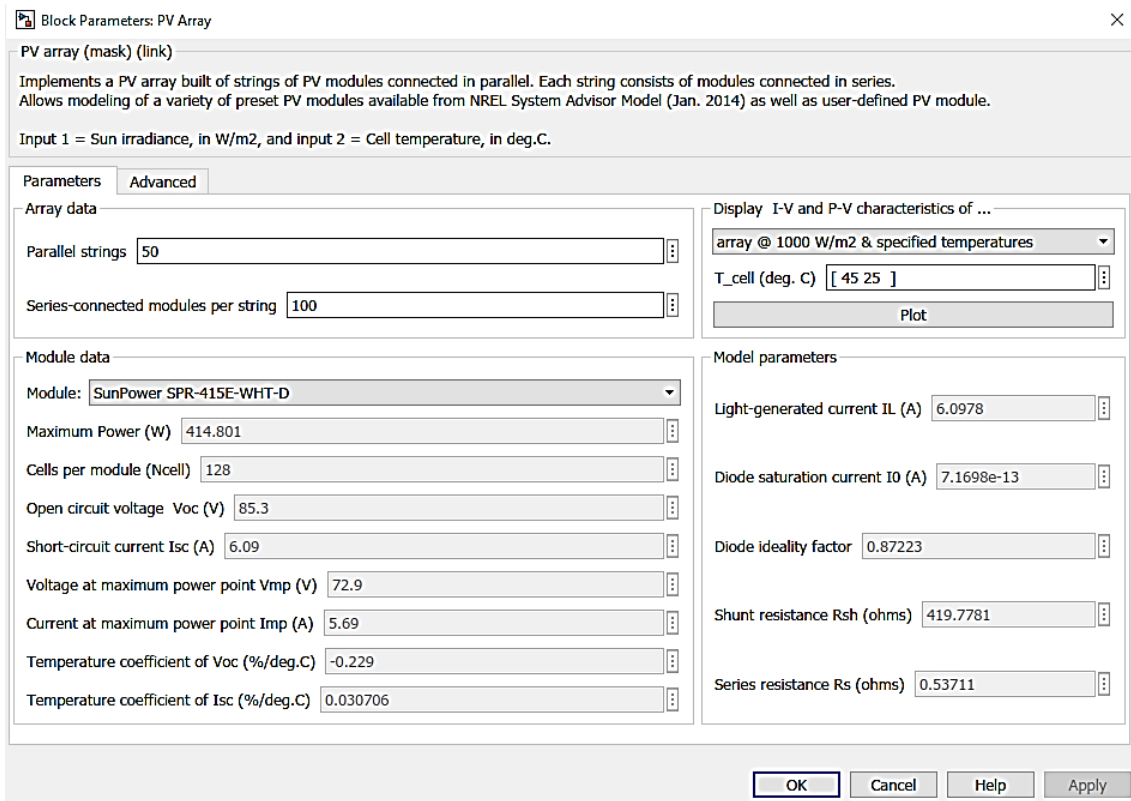
Bir dizi fotovoltaik (PV) modül PV panel bloğunu oluşturur. PV panel, seri ve paralel bağlı modüllerin bir araya gelmesiyle oluşmuştur. MATLAB simülasyonlarında kullanılan PV panel Şekil 3.50'de gösterilmektedir.

PV panel bloğunun üzerinde bulunan sinyal girişleri, m , I_r ve T 'dir ve m ölçüm sinyalidir. Bu sinyaller V_{PV} (PV panel gerilimi, (V)) I_{PV} (PV panel akımı (A)), I_{diode} (diyot akımı (A)), Işınım (W/m^2), Sıcaklık ($^{\circ}C$) sinyalleridir. I_r girişi güneş ışınımını temsil eder ve birimi W/m^2 'dir. T hücre sıcaklığını temsil eder ve birimi $^{\circ}C$ 'dir.



Şekil 3.50. MATLAB/Simulink-SimPowerSystems PV panel bloğu

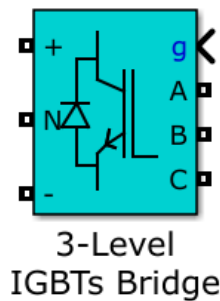
PV panelin üzerine çift tıklandığında da Şekil 3.51'de güneş panelinin parametreleri açılır ve buradan güneş panelinin özellikleri girilir. Bu çalışmada kullanılan SPR-327NE-WHT-D model güneş panelinin özellikleri seçilmiştir. Bu çalışmada 50 tane paralel ve 100 tane seri panel kullanılmıştır.



Şekil 3.51. PV panel özellikleri

3.10.2. Evirici bloğu

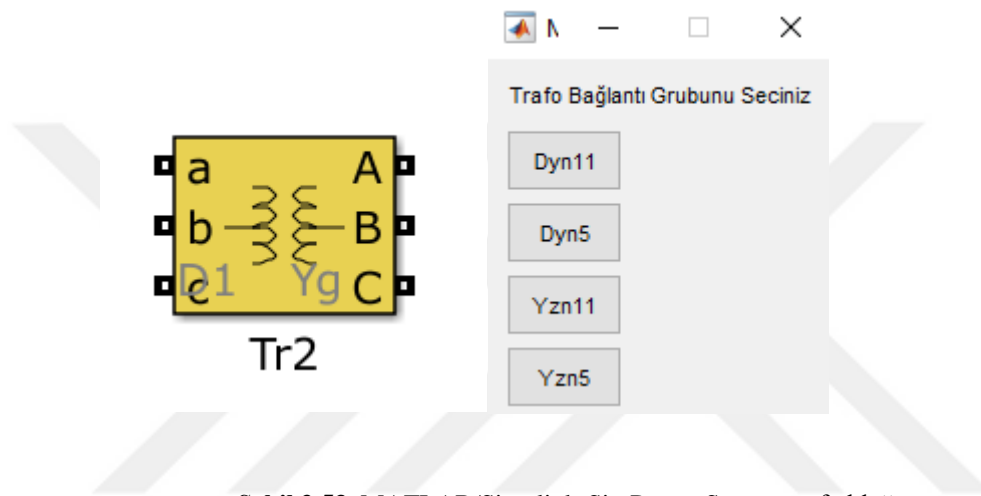
Evirici, doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) çevirmeye yarayan elektriksel bir güç dönüştürme elemanı olarak tanımlanabilir. Çıkışta üretilen AC akım oluşturulan devrenin yapısına, transformatörlere, elemanlara bağlı olarak farklı gerilim ve frekans değerlerinde olabilir. Bu tez çalışmasında kullanılan evirici Şekil 3.52’de gösterilmiştir.



Şekil 3.52. MATLAB/Simulink-SimPower System evirici bloğu

3.10.3. Trafo bloğu

Oluşturulan simülasyon çalışmasında 33 kV/400 V trafo seçilerek sistem modellenmiştir. Benzer şekilde 33 kV şebeke gerilimini 400 V'ye düşürmek için de 33 kV /400 V trafo kullanılmıştır. Kullanılan trafonun MATLAB/Simulink'te gösterimi Şekil 3.53'te gösterilmektedir. trafonun konfigürasyon parametreleri Şekil 3.54'te görülmektedir. Sargı 1 ABC terminaline, sargı 2 ise abc terminaline bağlıdır. Seçilen trafo delta-yıldız bağlıdır (Dyn11).



Şekil 3.53. MATLAB/Simulink-SimPower System trafo bloğu

```

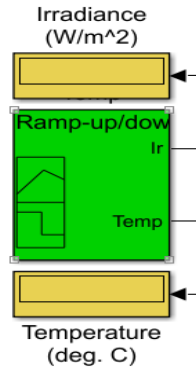
Trafo Gücünü Giriniz (kVA) : 1600
Trafo Primer Gerilimini Giriniz (V) : 33000
Trafo Sekonder Gerilimini Giriniz (V) : 400
Trafo Kısa Devre Deneyi Kayıplarını Giriniz (W): 13200
Trafo Boşta Çalışma Deneyi Kayıplarını Giriniz (W): 1380
Trafo Kısa Devre Gerilimini(%uk) Giriniz (%): 6
Trafo Boşta Çalışma Akımı Yüzdesini Giriniz (% Io/In): 1.2
fx >> |

```

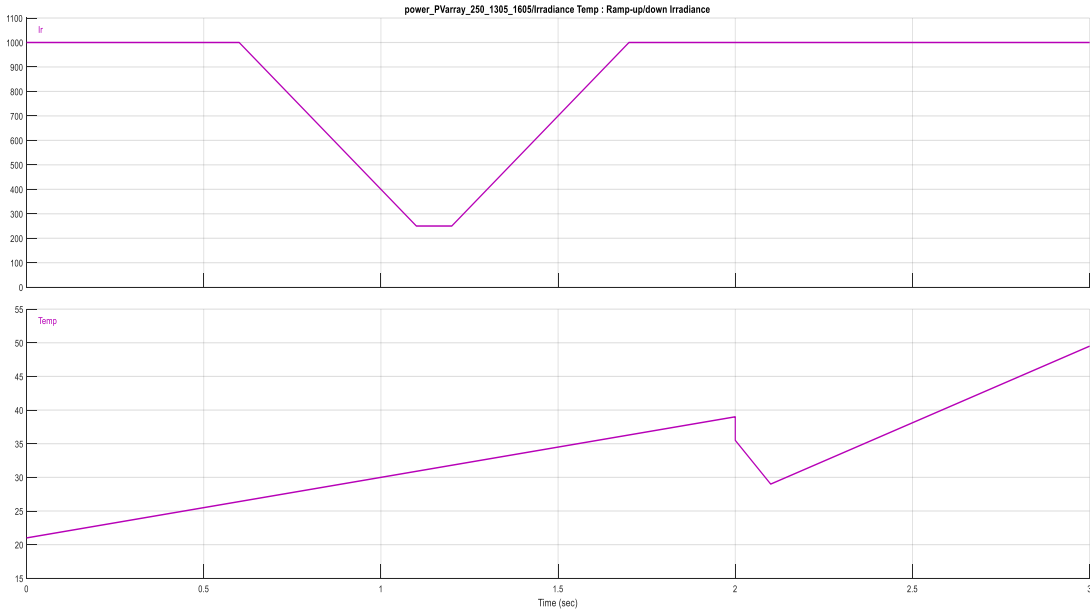
Şekil 3.54. MATLAB/Simulink-SimPower System trafo bloğu parametreleri

3.10.4. Sinyal bloğu

Sinyal oluşturucu bloğu, parçalı doğrusal sinyal kaynaklarının değiştirilebilir gruplarını oluşturmanıza ve bunları bir modelde kullanmanıza olanak tanır. Testi kolaylaştırmak için sinyal gruplarını hızlı bir şekilde değiştirilebilir ve modelden çıkarılabilir. Şekil 3.55'te MATLAB/Simulink-SimPower System sinyal bloğu gösterilmiştir. Signal Builder penceresinde, Şekil 3.56'da gösterilen sıcaklık ve ışınım sinyalleri oluşturulur ve çıkış dalga formlarını tanımlanır.



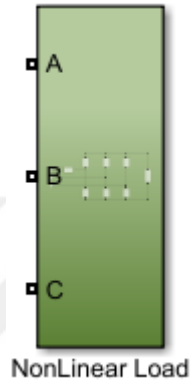
Şekil 3.55. MATLAB/Simulink-SimPowerSystem sinyal bloğu



Şekil 3.56. Sıcaklık ve ışınım sinyalleri

3.10.5. Yük bloğu

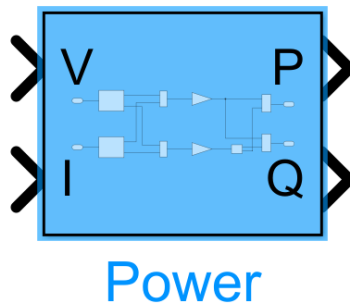
Kullanılan üç fazlı seri RLC yük bloğu, elemanlarının seri bir kombinasyonu olarak üç fazlı dengeli bir yük uygular. Simülasyonda kullanılan yük Şekil 3.57’de gösterilmektedir. Belirlenen frekansta, yük sabit bir empedans sergiler. Yük tarafından çekilen aktif ve reaktif güçler, uygulanan gerilimin karesiyle orantılıdır.



Şekil 3.57. MATLAB/Simulink-SimPower Systems yük bloğu

3.10.6. P-Q güç ölçüm bloğu

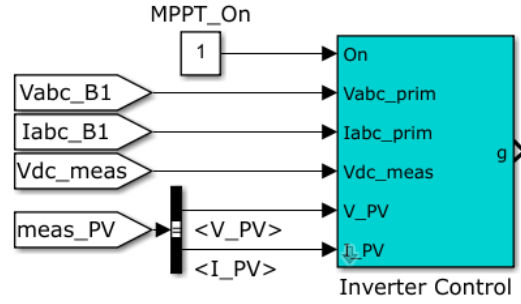
Güç ölçüm bloğu Şekil 3.58’de gösterilmektedir ve üç fazlı gerilim ve akımların periyodik bir çevrimin aktif gücünü P (Watt) ve reaktif gücünü Q (VAR) olarak hesaplar. Blok bu hesaplamayı gerçekleştirmek için blok önce sistemin giriş gerilimlerinin pozitif akımını ve belirtilen temel frekansın bir çevrimi üzerinden akım değerinin hesaplanmasını sağlar.



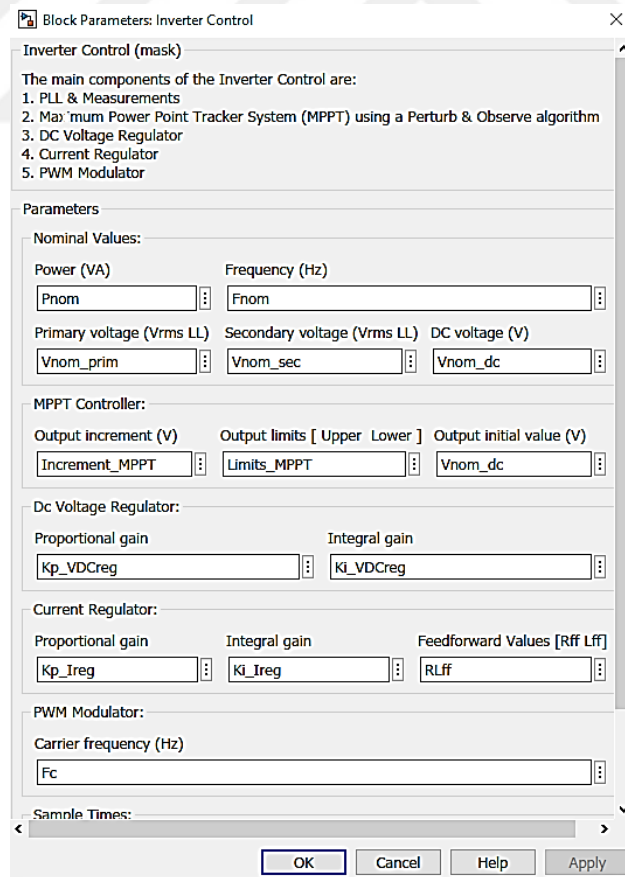
Şekil 3.58. MATLAB/Simulink-SimPower Systems güç ölçüm bloğu

3.10.7. İverter bloğu

İverterler, DC gerilimden AC gerilim dalga biçimi elde eden, frekansı ve gerilimi birbirinden bağımsız olarak ayarlayabilen bileşendir. Şekil 3.59'da MATLAB/Simulink-SimPower Systems inverter bloğu, Şekil 3.60'ta inverter bloğunun bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 3.59. MATLAB/Simulink-SimPower Systems inverter bloğu



Şekil 3.60. MATLAB/Simulink-SimPower Systems inverter bloğunun bileşenleri

3.10.8. Üç fazlı V-I ölçüm bloğu

Üç Fazlı V-I Ölçüm bloğu, bir devredeki anlık üç fazlı gerilimleri ve akımları ölçmek için kullanılır. Üç fazlı elemanlarla seri olarak bağlandığında, üç fazdan toprağa veya fazdan fazda tepe voltaj ve akımlarını döndürür. Blok, gerilimleri ve akımları birim (pu) değerleri veya volt ve amper cinsinden verebilir. Faz-toprak gerilimleri Eşitlik 3.22 ve 3.23 ile bulunur. Faz-faz gerilimleri Eşitlik 3.24 ve 3.25 ile bulunur.

$$V_{abc}(pu) = \frac{V_{faz-toprak}(V)}{V_{base}(V)} \quad (3.22)$$

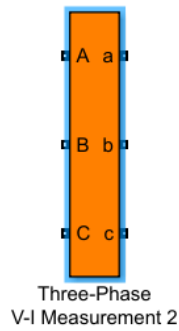
$$V_{base} = \frac{V_{nom}(V_{rms})}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \quad (3.23)$$

$$V_{abc}(pu) = \frac{V_{faz-faz}(V)}{V_{base}(V)} \quad (3.24)$$

$$V_{base} = V_{nom}(V_{rms}) \cdot \sqrt{2} \quad (3.25)$$

Birim başına akımları ölçmeyi seçerseniz, blok ölçülen akımları nominal akımın tepe değerine göre dönüştürür. Nominal akım değeri Eşitlik 3.26 ile bulunur.

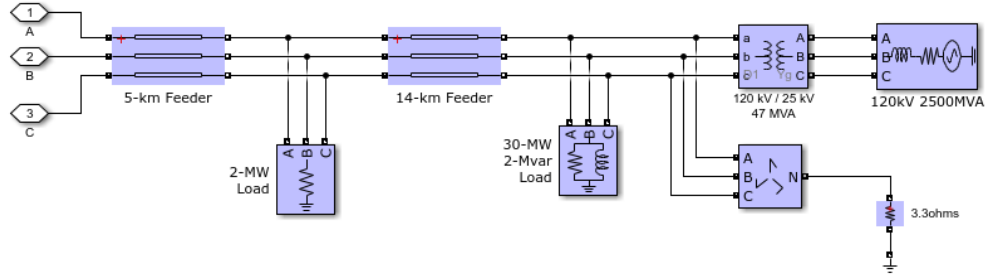
$$I_{abc}(pu) = \frac{I_{abc}(A)}{I_{base}(A)} \quad (3.26)$$



Şekil 3.61. MATLAB/Simulink-SimPower Systems V-I ölçüm bloğu

3.10.9. Şebeke (Vgrid) benzetimi

Şebekeyi modellemek için oluşturulan blok Şekil 3.62’de gösterilmiştir.

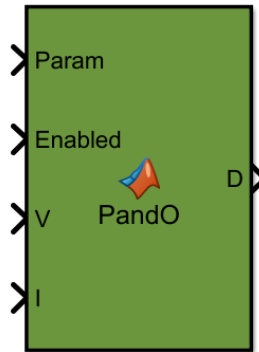


Şekil 3.62. MATLAB/Simulink-SimPower Systems Vgrid

3.10.10. MPPT bloğu

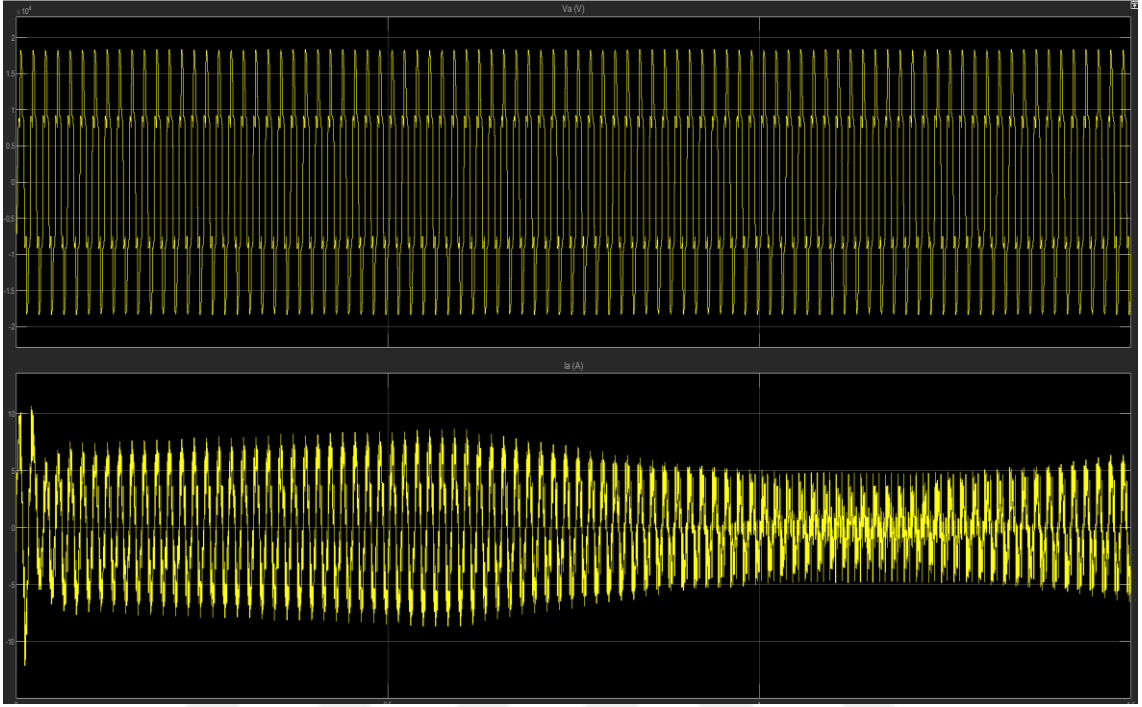
PV sistemlerde beslenen yüklerle her zaman maksimum güç aktarılabilmesi için PV sistemin takibi ve gözlemi ile mümkündür. Bu sebepten MPPT yöntemi geliştirilmiştir. MPPT, Doğrula ve Gözle yönteminde çıkış gücü maksimum seviyede mi kontrol edilir. MPPT’de kullanılan fonksiyon Ek-1’de verilmiştir. Referans sinyali ve çıkış sinyali arasında bağlantı kurulmuştur. Şekil 3.63’te MATLAB/Simulink-SimPower Systems MPPT bloğu ve girişleri gösterilmiştir.

MPPT Controller
using Perturbe
& Observe technique

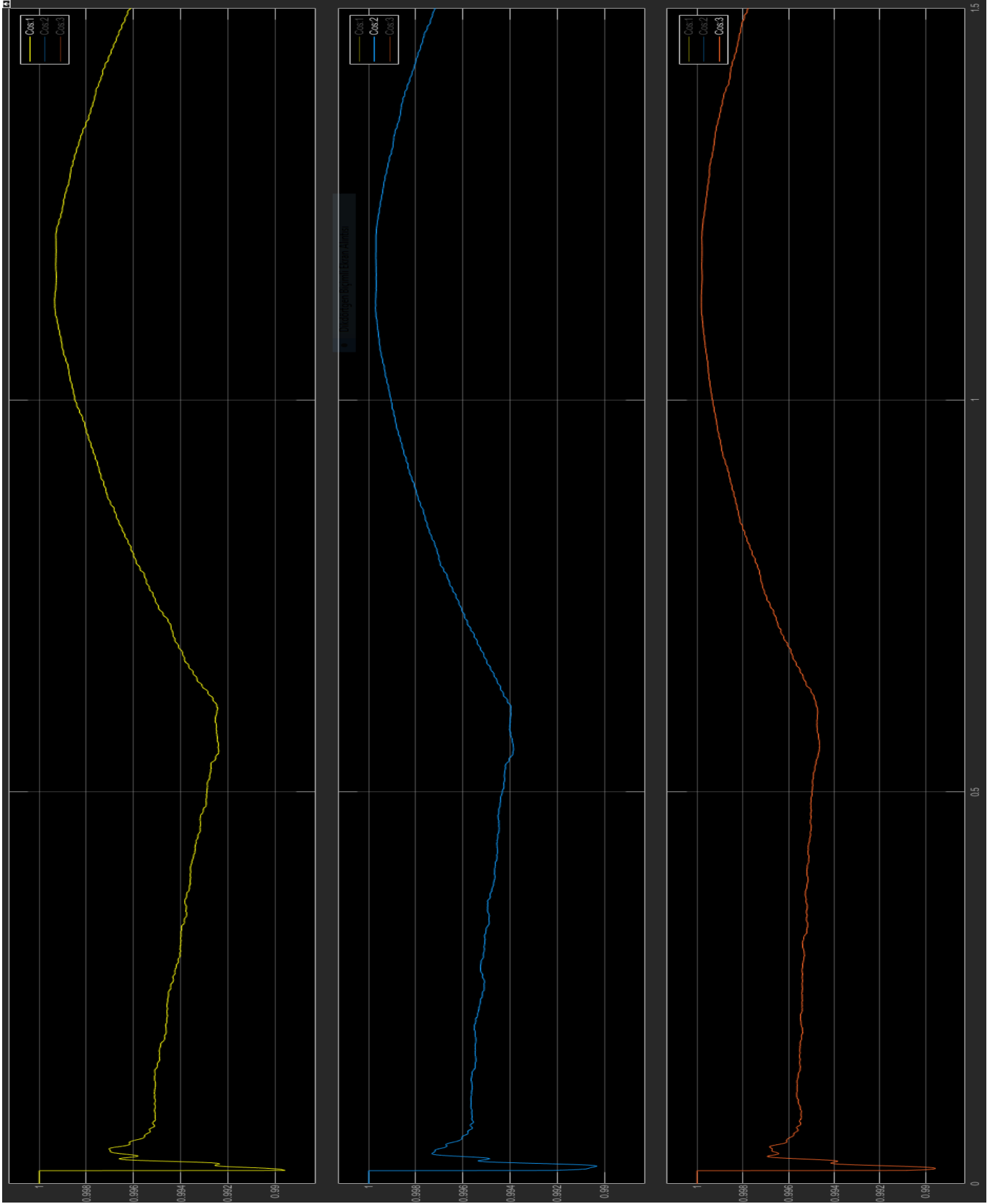


Şekil 3.63. MATLAB/Simulink-SimPower Systems MPPT bloğu

MATLAB simülasyonun çalıştırılmasıyla elde edilen gerilim akım grafikleri Şekil 3.64'te, güç faktörü değerleri ise Şekil 3.65'te ifade edilmiştir.



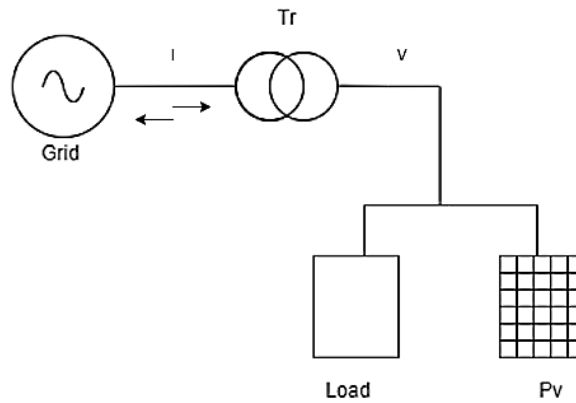
Şekil 3.64. MATLAB/Simulink-SimPowerSystems



Şekil 3.65. Doğrudan şebeke bağlantılı sistemin güç faktörü

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Elektrik enerjisi sistemlerinde gelişmeler, birçok sorunu beraberinde getirmiştir. Bu sorunların analizinin doğru bir şekilde yapılabilmesi için güç sistem analizlerinin doğru bir şekilde yapılması gerekir. PV üretimi sisteme aktif güç sağlayabilir, fakat reaktif güç kontrol etme kabiliyeti gerilim kararlılığını önemli ölçüde etkileyecektir. Bu yüzden reaktif güç ve voltaj kontrolü son zamanlarda önemli bir nokta haline geldi. Bu çalışmada güneş enerji santralının MATLAB benzetimi yapılarak farklı senaryolar karşısında güç faktörünün nasıl değiştiği, THD, gerilim kararlılığı parametreleri incelenmiştir. Ayrıca PSS@SINCAL ve PSS@NETOMAC güç analiz programları ile tesisin durumu hakkında yorumlarda bulunulmuştur. Dağıtılmış üretim kaynağının gerilim profiline, kayıplara ve hat veya trafo yüklenmelerine etkileri araştırılmıştır. Üretim devrede ise ($\cos\phi$) sürekli değişkenlik göstermiştir.



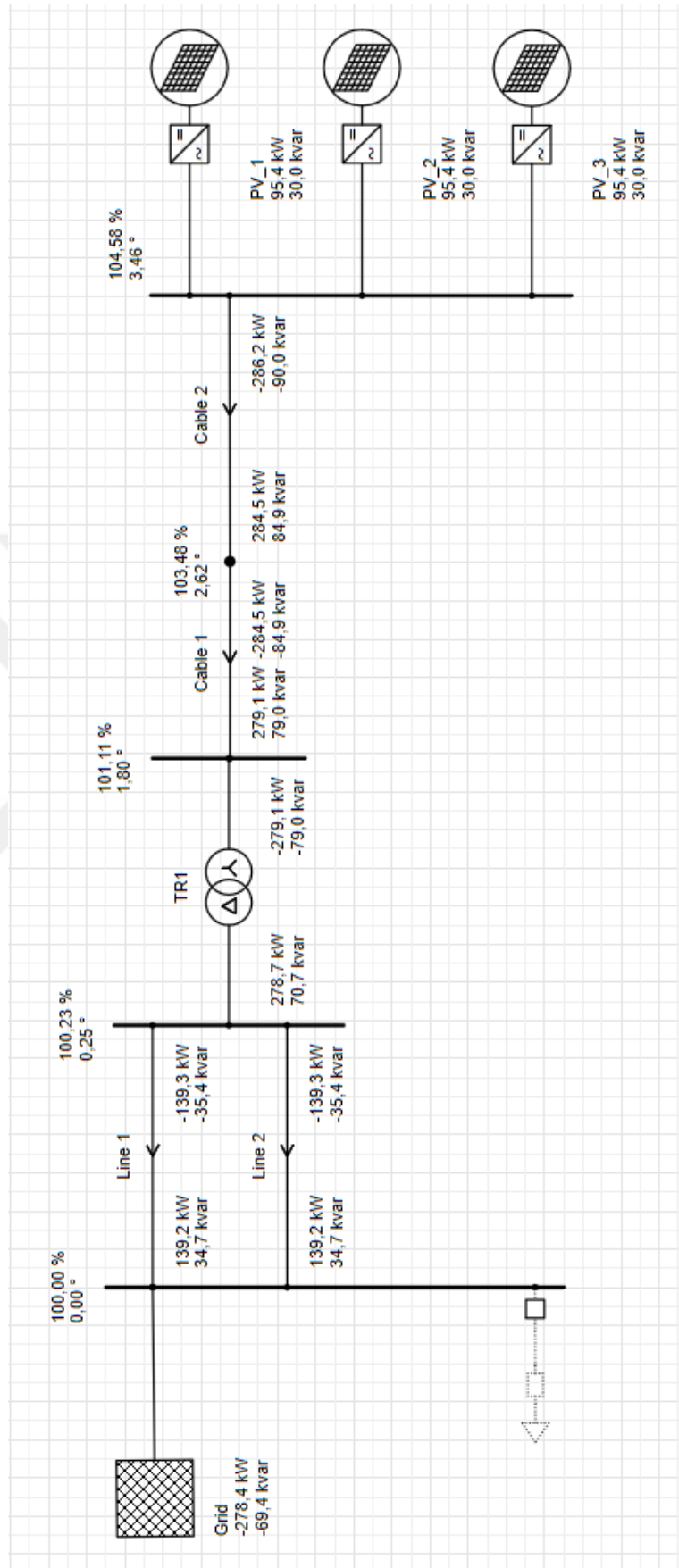
Şekil 4.1. PSS@SINCAL PV benzetimi

Şebekedeki güneş enerji santrallerinin gerilim profiline meydana gelen değişimlerin PSS@SINCAL programı ile ele alındığı çalışmada yük akış analizleri çıkarılmıştır. Bu çalışmada ilk önce analizi yapılacak on-grid sistemin modellenmesi yapılmış oluşturulan modele göre farklı senaryolar için yük akışı parametreleri incelenmiştir. Oluşturulan modelde kullanılan ekipmanlar Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Fider Üzerindeki Ekipmanların Elektriksel Parametreleri

Malzeme	Tip	Miktar
Transformatör	110/10 kV-10 MVA	4
Transformatör	10/0.4 Kv- 0.2 MVA	1
PV1	P ve $\cos\phi$ 2 MW-0.98	1
PV2	P ve $\cos\phi$ 4 MW-0.99	1
PV3	P ve Q 4 MW	1
PV4	P ve Q 4 MW - 0.5Mvar	1
PV5	P ve Q 4 MW	1
Yük	P ve Q sabit 1.5 MW-0.2Mvar	1
Yük	P ve Q sabit 0.1MW	2
Yük	P ve Q sabit 0.01MW	1
Yük	P ve Q sabit 0.02 MW-0.004 Mvar	1
Yük	P ve Q sabit 0.1MW-0.01 Mvar	1
Yük	P ve Q sabit 0.2 MW-0.1 Mvar	1
Yük	P ve Q 4 MW – 1 Mvar	2
Yük	P ve Q 2 MW – 0.5 Mvar	1
Yük	P ve Q 0,4 MW – 0.5 Mvar	1
Yük	P ve Q 0,3 MW – 0.3 Mvar	1

Şekil 4.2’de PSS@SINCAL programında oluşturulan PV sisteminin şebeke ile bağlantısının basit gösterimi verilmiştir. Programda kullanılan sıcaklık ve ışınım verileri EK-2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. PSS@SINCAL PV benzetimi

Oluşturulan modelde elektriksel ekipmanların özellikleri ihtiyaç doğrultusunda ayarlanır. Sistem tipi PV seçildikten sonra, güç akış modelleri belirlenir.

Konvertör

Temel Veri | Eleman Verisi | Ek Veri | Sistem Verisi | Sınırlar | Kontrolör | Harmonik

Düğüm: 17

Eleman Adı: PV2

Gerilim Seviyesi: 10kV (10 kV)

Standart Tip: (Hiçbiri)

Santral Tipi: Fotovoltaik sistem

L123

Servis Dışı

Ada İşletim

Konvertör Verisi

Nominal Görünür Güç	Sn	5,0	MVA
Inverter Anma Gerilimi	Vn	10,0	kV
Minimum Gerilim	vmin	80,0	%
Maksimum Gerilim	vmax	110,0	%

İşletme Durumu

DC Girişleri	P ve cosφ	
Aktif Güç	P	4,0 MW
Güç Faktörü	cosφ	-0,99
P Faktörü	fP	1,0
Q Faktörü	fQ	1,0
Manipülasyon Faktörü	*	(Hiçbiri)

Transformatör Verileri

Bağlantı: Doğrudan doğruş

Bağlantı tarafındaki Anm	VnN	10,0	kV
Anma Görünür Gücü	TrSn	25,0	MVA
Ref. SC Gerilimi	vsc	10,0	%
R/X Oranı	R/X	0,0	pu

Depolama

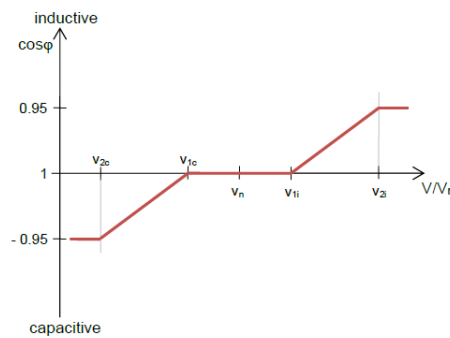
Enerji Depolama: (Hiçbiri)

TAMAM iptal

Şekil 4.3. PSS@SINCAL PV benzetimi

PV panelin parametre ayarları yapılırken $\cos\phi$ değerinin -0.99 değerlerinde ayarlanabildiği görülmüştür. Kapasitif üretim olan noktalarda, gerilim yüksek olan yerlerde bu durumun gerçekleşmesi normaldir. Gerilim-güç faktörü karakteristiği Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

Voltage Characteristics – Power Factor (volt-power factor)



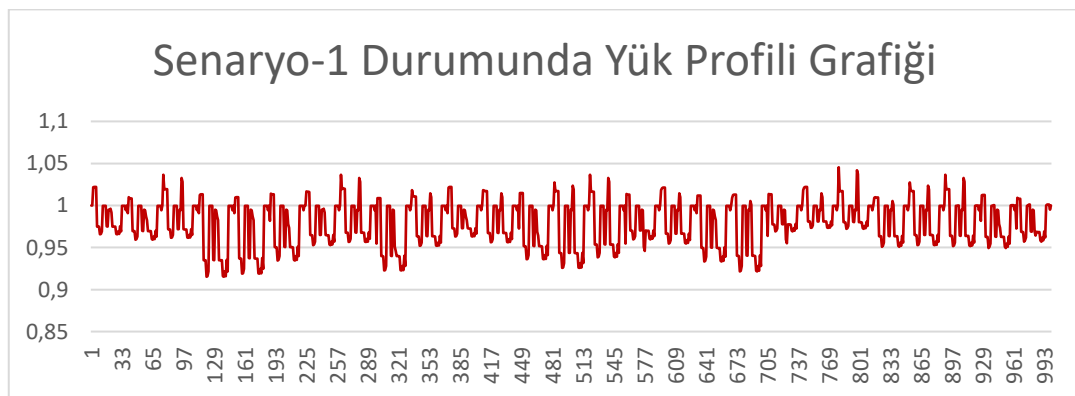
Şekil 4.4. PSS@SINCAL Gerilim-güç faktörü karakteristiği

Şebekeye bağlı sistem için, bölgede bulunan yükler ile farklı senaryolar üretilip yük profilleri grafiklerle incelenmiştir. Üretilen senaryolar aşağıda verilmiştir.

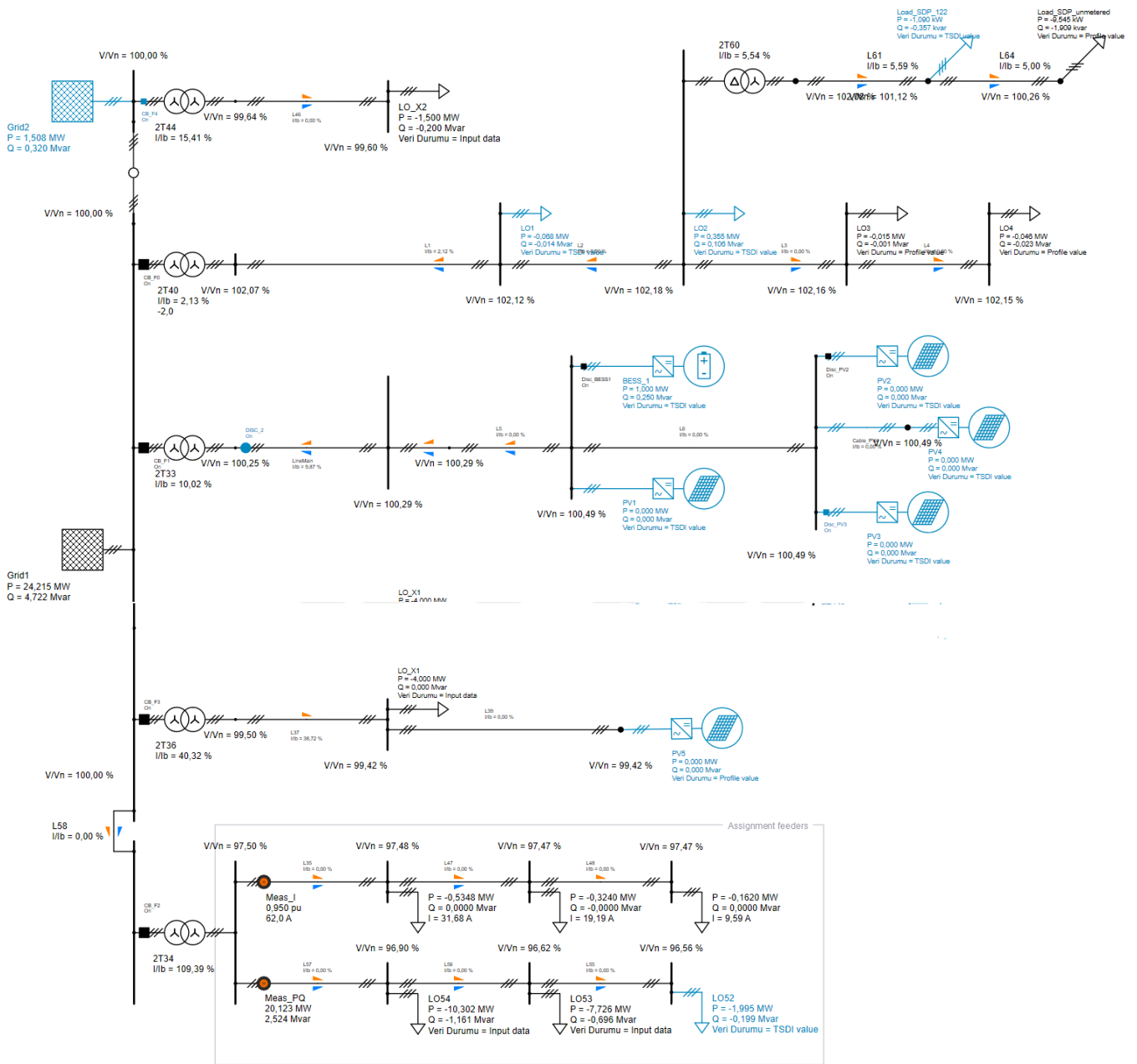
- ✓ Üretimin ve tüketimin tam kapasitede gerçekleştiğinin varsayıldığı durumda,
- ✓ Üretimin ve tüketimin yarı kapasitede olduğu durumda,
- ✓ Üretimin tam kapasitede, tüketimin yarı kapasitede olduğu durumda,
- ✓ Tüketimin tam kapasitede, üretimin yarı kapasitede olduğu durumda,
- ✓ Üretimin hiç olmayıp tüketimin tam kapasitede olduğu durumda,
- ✓ Tüketimin hiç olmayıp üretimin tam kapasitede olduğu durumda olacak şekilde belirlenmiştir.

4.1. Üretimin ve Tüketimin Tam Kapasite Gerçekleştiği Durum

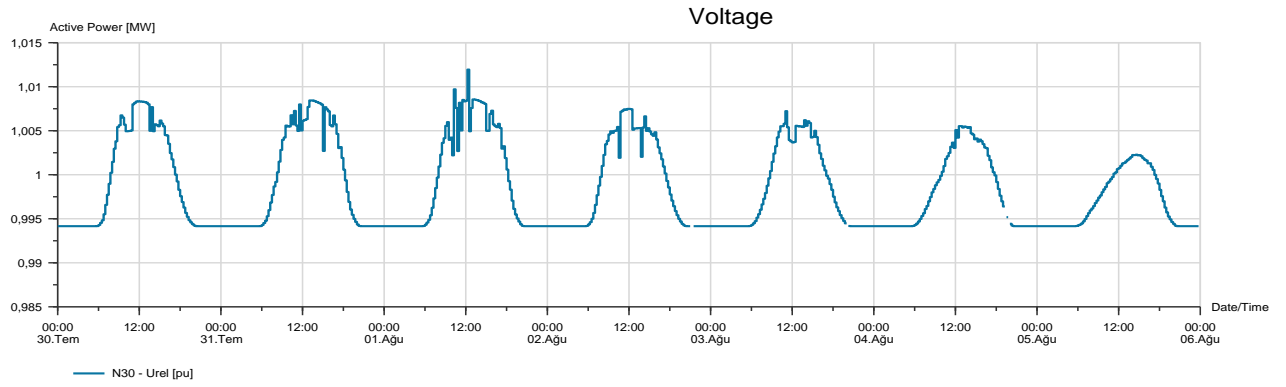
Gerçekleştirilen analize göre, güneş enerji santrallerinin yaz aylarında üretim yaptığı ve sistemin tam kapasitede çalıştırıldığı düşünülmüştür. Program için kullanılan sıcaklık ve yük grafikleri Ek-2’de gösterilmiştir. Tüketimlerin ise trafo kapasitesinin tamamıyla karşılandığı düşünülmüştür. PSS@SINCAL programı çalıştırıldığında Şekil 4.6’da gösterildiği gibi trafo merkezinin sağ tarafında yer alan üretim santrallerinin yoğun olduğu bölgede üretilen enerjinin tüketilen enerjiden fazla olması, santral çıkışlarındaki hatlarda yüklenmenin fazla olmasına sebep olmuştur. Bu durum sonucunda 18.2 MW kurulu güce sahip 7.02 MW kurulu güce sahip genel yük bulunmaktadır. PSS@SINCAL programı zamana bağlı yük akışı çalıştırıldığında gerilim 1,045 p.u. değerine kadar artmış, %4,5 oranında bir gerilim yükselmesi gözlenmiştir. PV2 bulunan kısımda ise 0,915 p.u. değerine kadar inmiş ve yaklaşık %8,5 oranında bir gerilim düşümü gözlenmiştir.



Şekil 4.5. Senaryo-1 durumunda yük profili grafiği

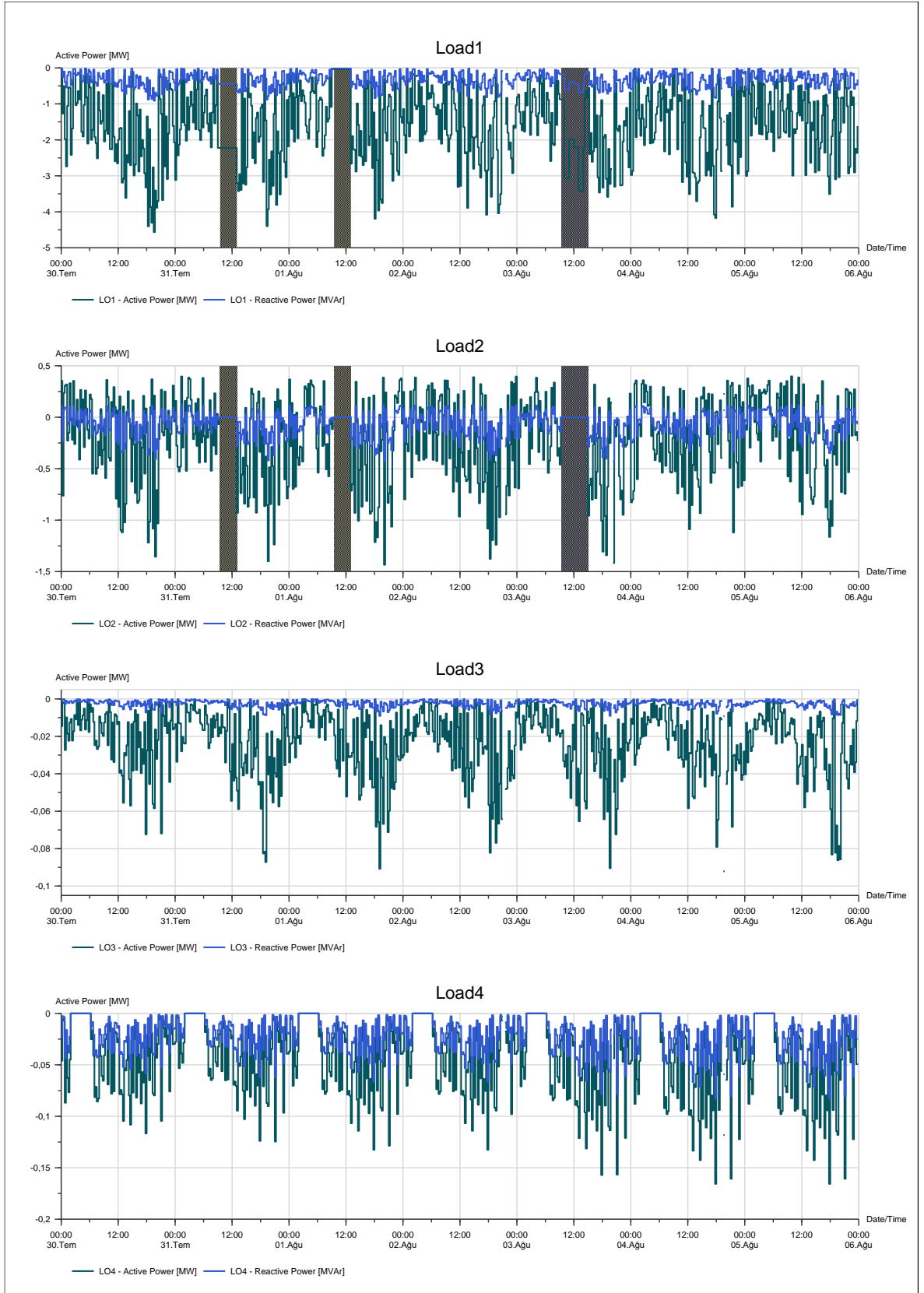


Şekil 4.6. PSS@SINCAL yük akış modeli



Şekil 4.7. PSS@SINCAL zaman bağı yük profili Uref [pu]

Yük akış programının çalıştırılması sonucu yüklere ve PV santrallere ait güç grafikleri Şekil 4.7, 4.8, 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.8. Load1, Load2, Load3, Load4'e ait aktif-reaktif güç oranları



Şekil 4.9. PV1, PV2, PV3, PV4'e ait aktif-reaktif güç oranları

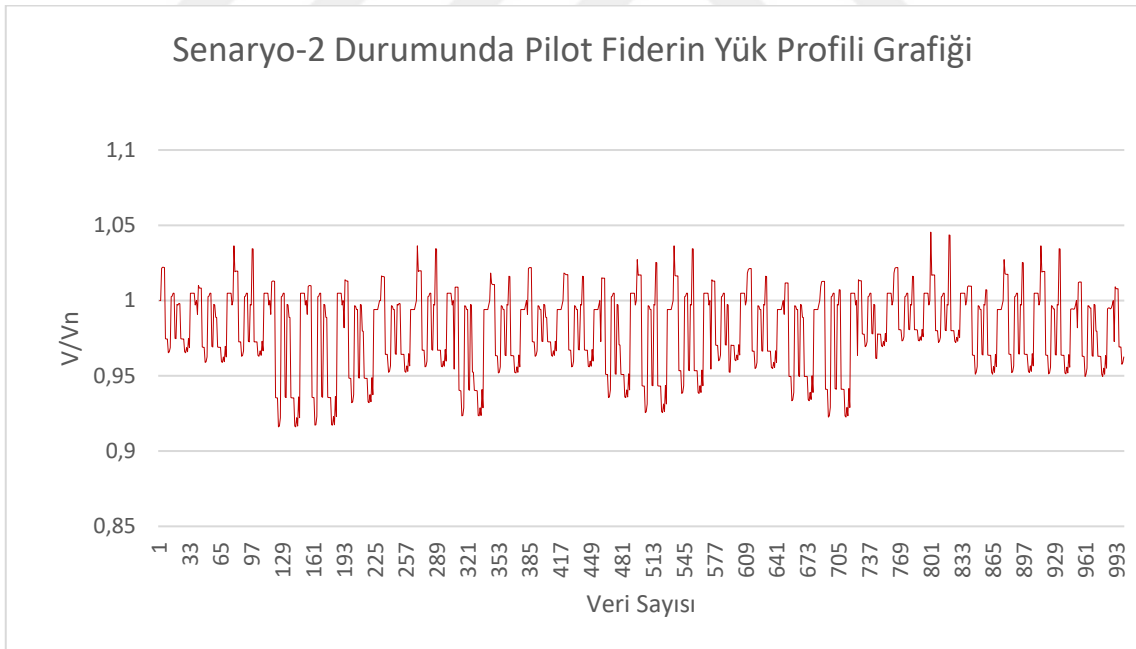
Çizelge 4.2. Fider Üzerindeki Ekipmanların Ölçüm Verileri

Eleman Adı	Sb [MVA]	S/Sb [%]	P [MW]	Q [Mvar]	S [MVA]	cosφ
2T33	10	115,072	10,293	-5,145	11,507	-0,894
2T33	10	111,707	-10,43	4	11,171	-0,934
2T34	20	255,986	-46,472	-21,482	51,197	0,908
2T34	20	232,3	45,16	10,915	46,46	0,972
2T36	10	6,001	-0,242	-0,549	0,6	0,403
2T36	10	5,06	0,237	0,447	0,506	0,468
2T40	10	30,795	-2,947	-0,893	3,08	0,957
2T40	10	30,198	2,933	0,718	3,02	0,971
2T44	10	15,41	-1,508	-0,318	1,541	0,978
2T44	10	15,14	1,5	0,202	1,514	0,991
2T60	0,2	10,818	-0,021	-0,005	0,022	0,971
2T60	0,2	10,796	0,021	0,005	0,022	0,973
L1	10,392	29,058	-2,933	-0,718	3,02	0,971
L1	10,392	28,894	2,924	0,683	3,003	0,974
L2	0	0	-0,929	-0,283	0,971	0,956
L2	0	0	0,928	0,28	0,969	0,957
L3	0	0	-0,037	-0,014	0,039	0,938
L3	0	0	0,037	0,014	0,039	0,938
L4	0	0	-0,025	-0,012	0,028	0,894
L4	0	0	0,025	0,012	0,028	0,894
L5	0	0	10,456	-3,895	11,158	-0,937
L5	0	0	-10,588	3,368	11,111	-0,953
LineMain	10,392	107,49	10,43	-4	11,171	-0,934
LineMain	10,392	107,369	-10,456	3,895	11,158	-0,937
L6	0	0	9,67	-2,728	10,047	-0,962
L6	0	0	-10,208	0,576	10,224	-0,998
L30	0	0	-10,456	3,895	11,158	-0,937
L30	0	0	10,456	-3,895	11,158	-0,937
Cable_PV4	0	0	3,299	-0,015	3,299	-1
Cable_PV4	0	0	-3,302	0,002	3,302	-1
L35	0	0	-1,671	-0,004	1,671	1
L35	0	0	1,67	0,001	1,67	1
L37	10,392	4,869	-0,237	-0,447	0,506	0,468
L37	10,392	4,867	0,237	0,447	0,506	0,468
L39	0	0	3,763	-0,447	3,79	-0,993
L39	0	0	-3,836	0,157	3,839	-0,999
L43	0	0	0	0	0	0
L43	0	0	0	0	0	0
L46	0	0	-1,5	-0,202	1,514	0,991
L46	0	0	1,5	0,2	1,513	0,991
L47	0	0	-1,091	-0,001	1,091	1

L47	0	0	1,091	0	1,091	1
L48	0	0	-0,364	0	0,364	1
L48	0	0	0,364	0	0,364	1
L55	0	0	-0,66	-0,066	0,663	0,995
L55	0	0	0,66	0,066	0,663	0,995
L56	0	0	-18,86	-3,635	19,207	0,982
L56	0	0	18,766	3,263	19,048	0,985
L57	0	0	-43,489	-10,911	44,837	0,97
L57	0	0	43,002	8,963	43,926	0,979
L58	0	0	-46,472	-21,482	51,197	0,908
L58	0	0	46,472	21,482	51,197	0,908
L61	0,485	4,452	-0,021	-0,005	0,022	0,973
L61	0,485	4,367	0,021	0,005	0,021	0,974
L64	0,485	3,416	-0,016	-0,003	0,017	0,979
L64	0,485	3,364	0,016	0,003	0,016	0,981
Grid1	0	0	39,369	28,068	48,35	0,814
Grid2	0	0	1,508	0,318	1,541	0,978
LO2	0,908	100	-0,87	-0,261	0,908	0,958
LO1	2,035	100	-1,996	-0,399	2,035	0,981
LO3	0,012	100	-0,012	-0,001	0,012	0,995
LO4	0,028	100	-0,025	-0,012	0,028	0,894
LO_X1	4	100	-4	0	4	-1
LO_X2	1,513	100	-1,5	-0,2	1,513	0,991
LO49	0,579	100	-0,579	0	0,579	-1
LO50	0,727	100	-0,727	0	0,727	-1
LO51	0,364	100	-0,364	0	0,364	-1
LO52	0,663	100	-0,66	-0,066	0,663	0,995
LO53	18,387	100	-18,107	-3,197	18,387	0,985
LO54	24,724	100	-24,143	-5,328	24,724	0,977
Load_SDP_122	0,005	100	-0,004	-0,001	0,005	0,951
Load_SDP_unmetered	0,016	100	-0,016	-0,003	0,016	0,981
PV1	3	65,233	1,918	-0,389	1,957	-0,98
PV2	5	69,74	3,452	-0,492	3,487	-0,99
PV3	5	69,049	3,452	-0,048	3,452	-1
PV4	6	55	3,3	0	3,3	1
PV5	5	76,838	3,836	-0,218	3,842	-0,998

4.2. Üretim ve Tüketimin Yarı Kapasite Gerçekleştiği Durum

Bu analizde; güneş enerji santrallerinin yaz aylarında gün ortası dışında ya da yaz ayları dışındaki bir günde gün ortasına denk gelen bir vakitte üretim yaptığı düşünülerek yarı kapasite çalıştığı, tüketimlerin ise mevcut trafo kapasitesinin yarısıyla gerçekleştirildiği varsayılmıştır. PSS@SINCAL programı ile yük akışı çalıştırıldığında, Şekil 4.10'da görüleceği üzere seçilen fider üzerinde yer alan üretim santrallerinin ürettiği enerjinin burada tüketilen enerjiden fazla olmasına rağmen üretim kapasitesinin yarıya düşmüş olması, santral çıkışlarındaki hatlarda yüklenmenin fazla olmamasını sağlamıştır. Bu durum sonucunda 9.1 MW kurulu güce sahip 3.51 MW kurulu güce sahip genel yük bulunmaktadır. PSS@SINCAL programı zamana bağlı yük akışı çalıştırıldığında gerilim 1,035 p.u. değerine kadar artmış, %3,5 oranında bir gerilim yükselmesi gözlenmiştir. PV2 bulunan kısımda ise 0,9619 p.u. değerine kadar inmiş ve yaklaşık %3 oranında bir gerilim düşümü gözlenmiştir. Sisteme ait elde edilen güç faktörü ve aktif-reaktif güç değerleri Şekil 4.11 ve Çizelge 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.10. Senaryo-2 durumunda yük profili grafiği



Şekil 4.11. PV1, PV2, PV3, PV4'e ait aktif-reaktif güç oranları

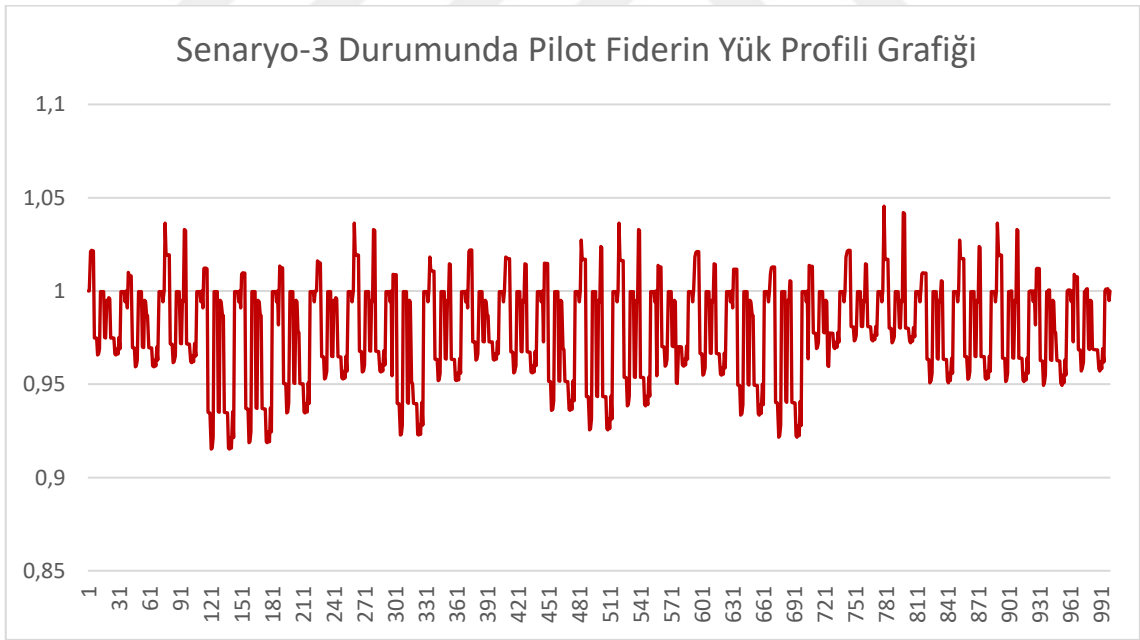
Çizelge 4.3. Fider Üzerindeki Ekipmanların Ölçüm Verileri

Eleman Adı	Sb [MVA]	S/Sb [%]	P [MW]	Q [Mvar]	S [MVA]	cosφ
2T33	10	114,669	10,292	-5,056	11,467	-0,898
2T33	10	111,399	-10,428	3,919	11,14	-0,936
2T34	20	255,023	-46,317	-21,358	51,005	0,908
2T34	20	231,54	45,014	10,869	46,308	0,972
2T36	10	2,484	-0,105	-0,225	0,248	0,423
2T36	10	1,601	0,1	0,125	0,16	0,625
2T40	10	30,503	-2,92	-0,882	3,05	0,957
2T40	10	29,912	2,906	0,709	2,991	0,972
2T44	10	7,824	-0,756	-0,203	0,782	0,966
2T44	10	7,568	0,75	0,1	0,757	0,991
2T60	0,2	6,499	-0,013	-0,003	0,013	0,969
2T60	0,2	6,49	0,013	0,003	0,013	0,97
L1	10,392	28,783	-2,906	-0,709	2,991	0,972
L1	10,392	28,623	2,897	0,674	2,975	0,974
L2	0	0	-0,902	-0,274	0,943	0,957
L2	0	0	0,901	0,271	0,941	0,958
L3	0	0	-0,018	-0,007	0,02	0,938
L3	0	0	0,018	0,007	0,02	0,939
L4	0	0	-0,012	-0,006	0,014	0,894
L4	0	0	0,012	0,006	0,014	0,894
L5	0	0	10,454	-3,814	11,128	-0,939
L5	0	0	-10,585	3,291	11,085	-0,955
LineMain	10,392	107,194	10,428	-3,919	11,14	-0,936
LineMain	10,392	107,08	-10,454	3,814	11,128	-0,939
L6	0	0	9,667	-2,652	10,024	-0,964
L6	0	0	-10,201	0,514	10,214	-0,999
L30	0	0	-10,454	3,814	11,128	-0,939
L30	0	0	10,454	-3,814	11,128	-0,939
Cable_PV4	0	0	3,297	-0,014	3,297	-1
Cable_PV4	0	0	-3,3	0,001	3,3	-1
L35	0	0	-1,547	-0,003	1,547	1
L35	0	0	1,547	0,001	1,547	1
L37	10,392	1,541	-0,1	-0,125	0,16	0,625
L37	10,392	1,541	0,1	0,125	0,16	0,625
L39	0	0	1,9	-0,125	1,904	-0,998
L39	0	0	-1,918	0,052	1,919	-1
L43	0	0	0	0	0	0
L43	0	0	0	0	0	0
L46	0	0	-0,75	-0,1	0,757	0,991
L46	0	0	0,75	0,1	0,757	0,991

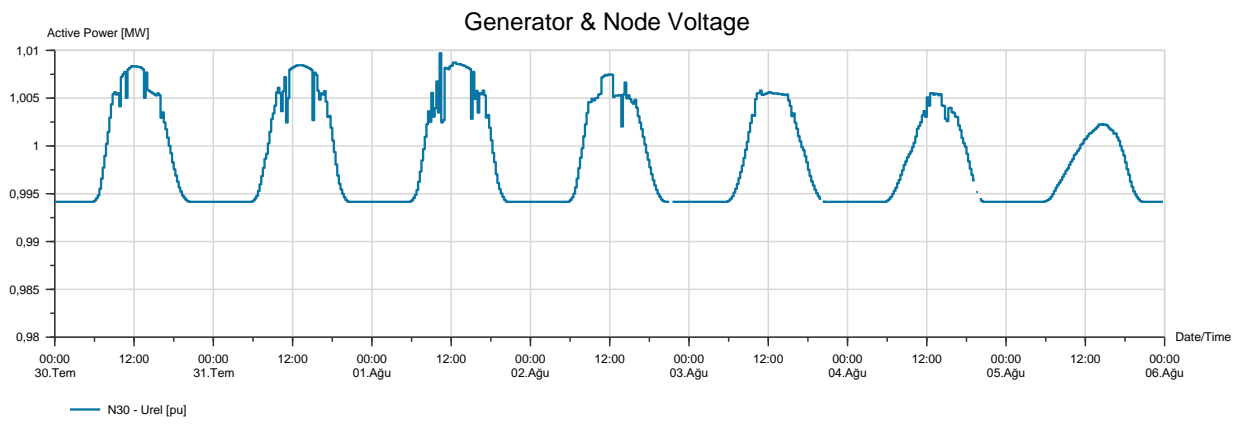
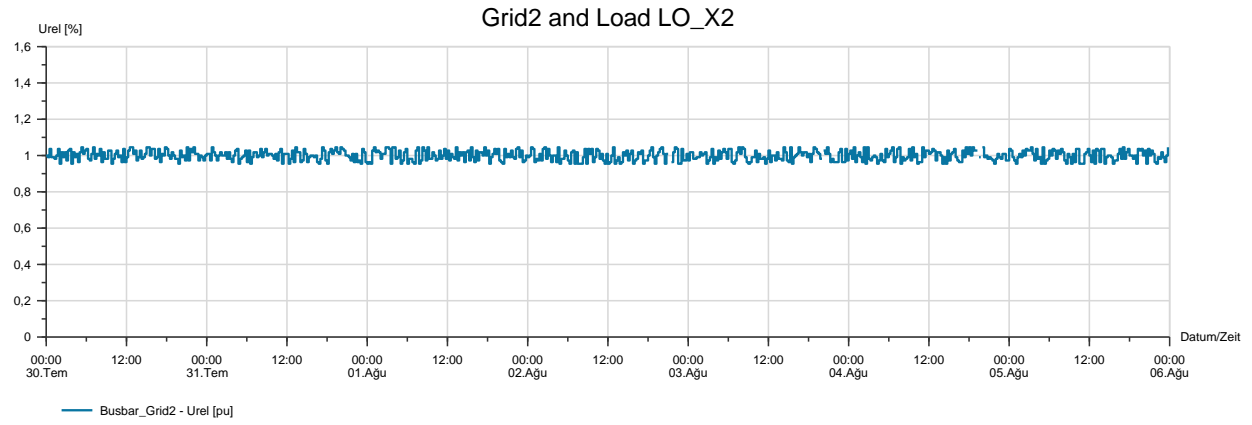
L47	0	0	-1,011	-0,001	1,011	1
L47	0	0	1,011	0	1,011	1
L48	0	0	-0,337	0	0,337	1
L48	0	0	0,337	0	0,337	1
L55	0	0	-0,66	-0,066	0,663	0,995
L55	0	0	0,66	0,066	0,663	0,995
L56	0	0	-18,851	-3,62	19,195	0,982
L56	0	0	18,758	3,248	19,037	0,985
L57	0	0	-43,467	-10,865	44,805	0,97
L57	0	0	42,981	8,922	43,898	0,979
L58	0	0	-46,317	-21,358	51,005	0,908
L58	0	0	46,317	21,358	51,005	0,908
L61	0,485	2,677	-0,013	-0,003	0,013	0,97
L61	0,485	2,646	0,012	0,003	0,013	0,971
L64	0,485	1,695	-0,008	-0,002	0,008	0,98
L64	0,485	1,682	0,008	0,002	0,008	0,981
Grid1	0	0	39,051	27,521	47,774	0,817
Grid2	0	0	0,756	0,203	0,782	0,966
LO2	0,908	100	-0,87	-0,261	0,908	0,958
LO1	2,035	100	-1,996	-0,399	2,035	0,981
LO3	0,006	100	-0,006	-0,001	0,006	0,995
LO4	0,014	100	-0,012	-0,006	0,014	0,894
LO_X1	2	100	-2	0	2	-1
LO_X2	0,757	100	-0,75	-0,1	0,757	0,991
LO49	0,536	100	-0,536	0	0,536	-1
LO50	0,674	100	-0,674	0	0,674	-1
LO51	0,337	100	-0,337	0	0,337	-1
LO52	0,663	100	-0,66	-0,066	0,663	0,995
LO53	18,376	100	-18,098	-3,182	18,376	0,985
LO54	24,707	100	-24,131	-5,303	24,707	0,977
Load_SDP_122	0,005	100	-0,004	-0,001	0,005	0,951
Load_SDP	0,008	100	-0,008	-0,002	0,008	0,981
PV1	3	65,233	1,918	-0,389	1,957	-0,98
PV2	5	69,74	3,452	-0,492	3,487	-0,99
PV3	5	69,042	3,452	-0,002	3,452	-1
PV4	6	55	3,3	0	3,3	1
PV5	5	38,372	1,918	-0,053	1,919	-1

4.3. Üretimin Tam Kapasite, Tüketimin Yarı Kapasite Gerçekleştiği Durum

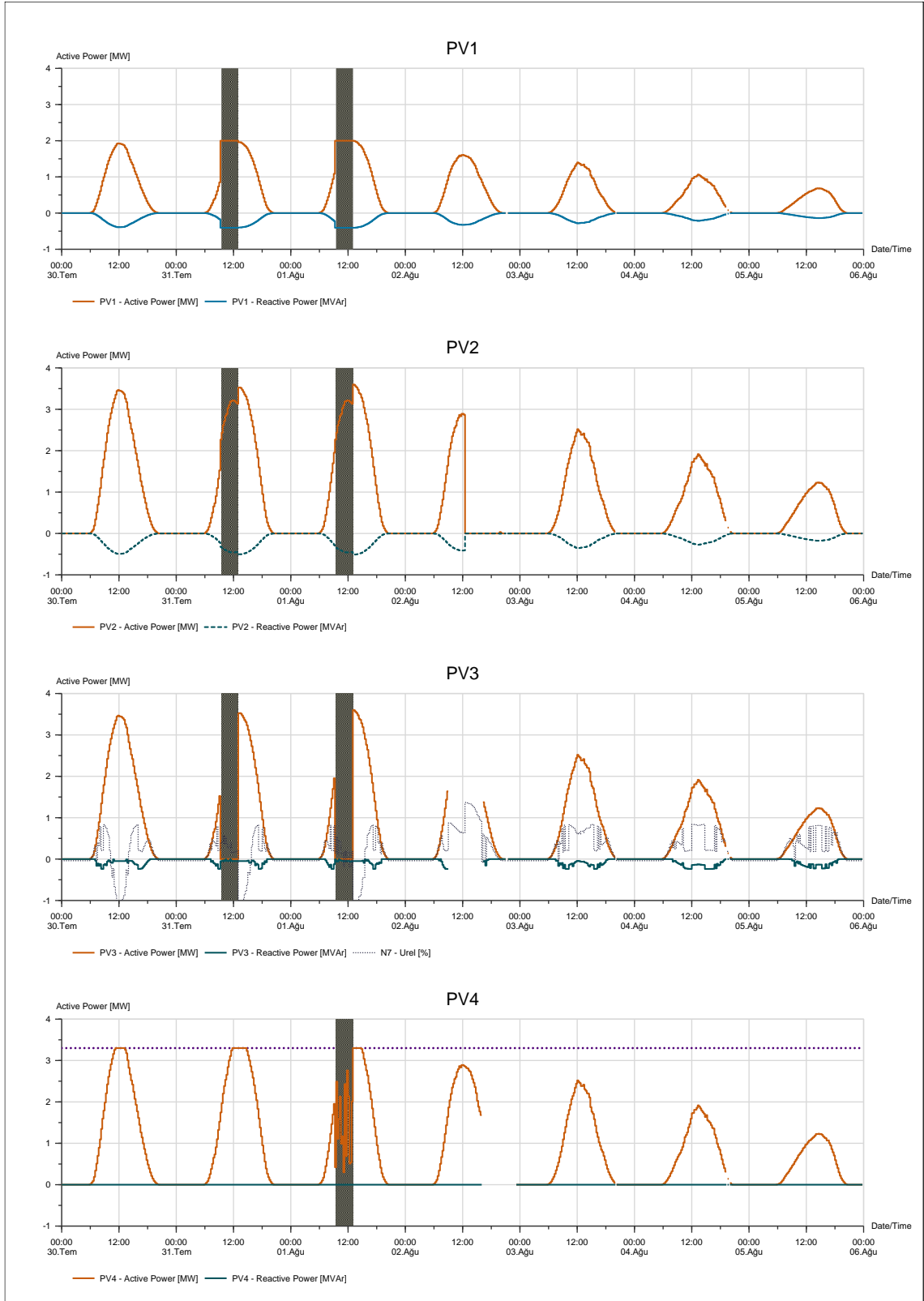
Bu analizde; güneş enerji santrallerinin yaz aylarına ve gün ortasına denk gelen bir vakitte üretim yaptığı düşünülerek tam kapasite çalıştığı, tüketimlerin ise mevcut trafo kapasitesinin yarısıyla gerçekleştirildiği varsayılmıştır. PSS@SINCAL programı ile yük akışı çalıştırıldığında, Şekil 4.12'den de görüleceği üzere seçilen fider üzerinde yer alan üretim santralleri tarafından üretilen enerjinin burada tüketilen enerjiden fazla olmasının beraberinde tüketilen enerjinin yarıya düşmüş olması, santral çıkışlarındaki hatlarda yüklenmenin daha da fazla olmasına sebep olmuştur. Bu durum sonucunda 18.2 MW kurulu güce sahip 3.51 MW kurulu güce sahip genel yük bulunmaktadır. PSS@SINCAL programı zamana bağlı yük akışı çalıştırıldığında gerilim 1,045 p.u. değerine kadar artmış, %4,5 oranında bir gerilim yükselmesi gözlenmiştir. PV2 bulunan kısımda ise 0,945 p.u. değerine kadar inmiş ve yaklaşık %5,5 oranında bir gerilim düşümü gözlenmiştir. Sisteme ait elde edilen güç faktörü ve aktif-reaktif güç değerleri Şekil 4.13, 4.14 ve Çizelge 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.12. Senaryo-3 durumunda yük profili grafiği



Şekil 4.13. PSS@SINCAL zaman bağı yük profili Uref [pu]



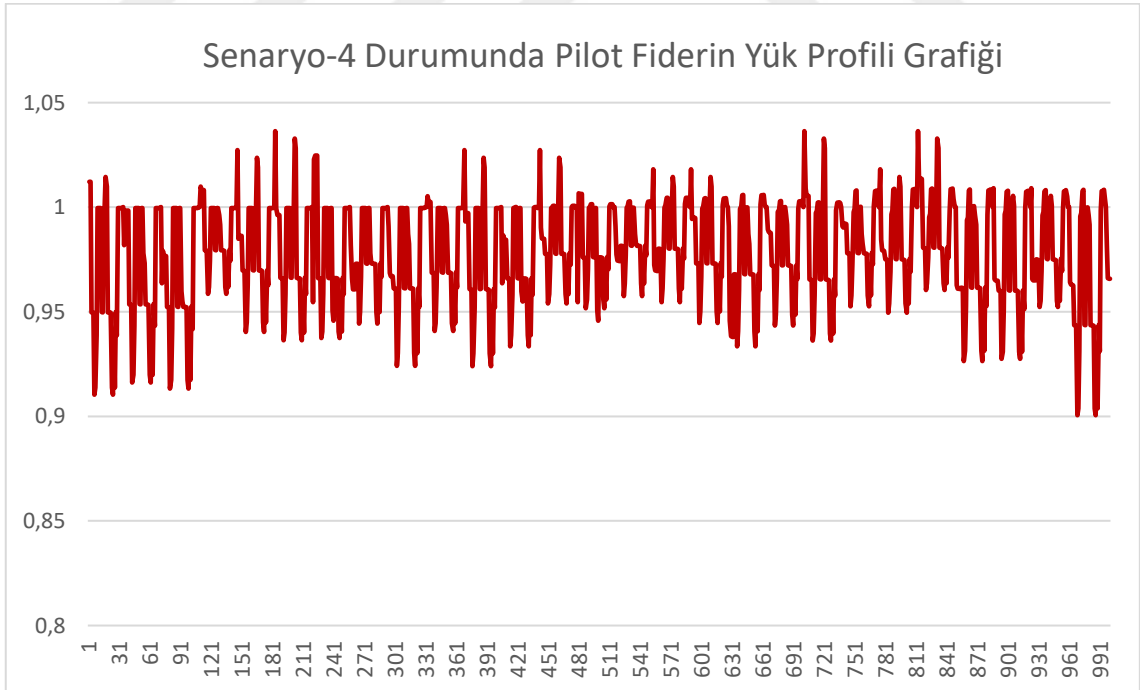
Şekil 4.14. PV1, PV2, PV3, PV4'e ait aktif-reaktif güç oranları

Çizelge 4.4. Fider Üzerindeki Ekipmanların Ölçüm Verileri

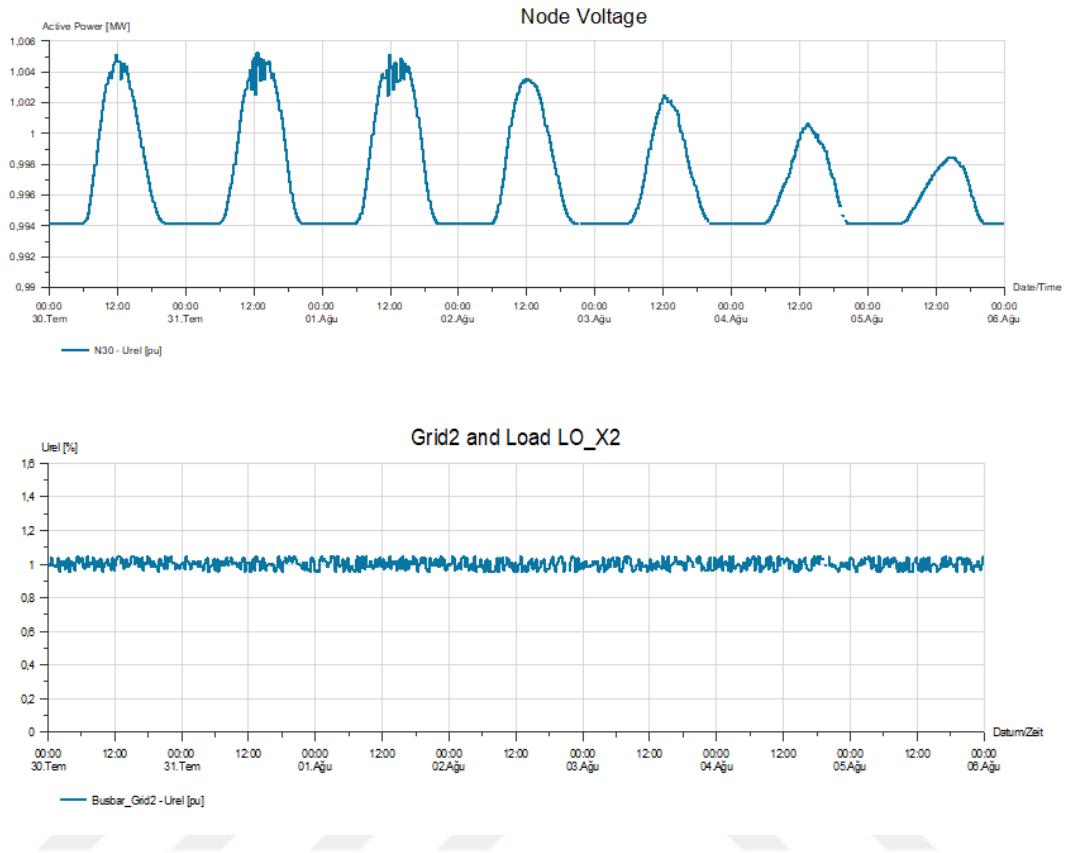
Eleman Adı	Sb [MVA]	S/Sb [%]	P [MW]	Q [Mvar]	S [MVA]	cosφ
L61	0,485	4,452	-0,021	-0,005	0,022	0,973
L61	0,485	4,367	0,021	0,005	0,021	0,974
L64	0,485	3,416	-0,016	-0,003	0,017	0,979
L64	0,485	3,364	0,016	0,003	0,016	0,981
Grid1	0	0	38,407	28,062	47,566	0,807
Grid2	0	0	1,508	0,318	1,541	0,978
LO2	0,908	100	-0,87	-0,261	0,908	0,958
LO1	2,035	100	-1,996	-0,399	2,035	0,981
LO3	0,012	100	-0,012	-0,001	0,012	0,995
LO4	0,028	100	-0,025	-0,012	0,028	0,894
LO_X1	4	100	-4	0	4	-1
LO_X2	1,513	100	-1,5	-0,2	1,513	0,991
LO49	0,578	100	-0,578	0	0,578	-1
LO50	0,726	100	-0,726	0	0,726	-1
LO51	0,363	100	-0,363	0	0,363	-1
LO52	0,663	100	-0,66	-0,066	0,663	0,995
LO53	18,387	100	-18,107	-3,197	18,387	0,985
LO54	24,724	100	-24,143	-5,328	24,724	0,977
Load_SDP_122	0,005	100	-0,004	-0,001	0,005	0,951
Load_SDP_unmetered	0,016	100	-0,016	-0,003	0,016	0,981
PV1	3	65,233	1,918	-0,389	1,957	-0,98
PV2	5	69,74	3,452	-0,492	3,487	-0,99
PV3	5	69,049	3,452	-0,048	3,452	-1
PV4	6	55	3,3	0	3,3	1
PV5	5	76,838	3,836	-0,218	3,842	-0,998

4.4. Tüketimin Tam Kapasite, Üretimin Yarı Kapasite Gerçekleştiği Durum

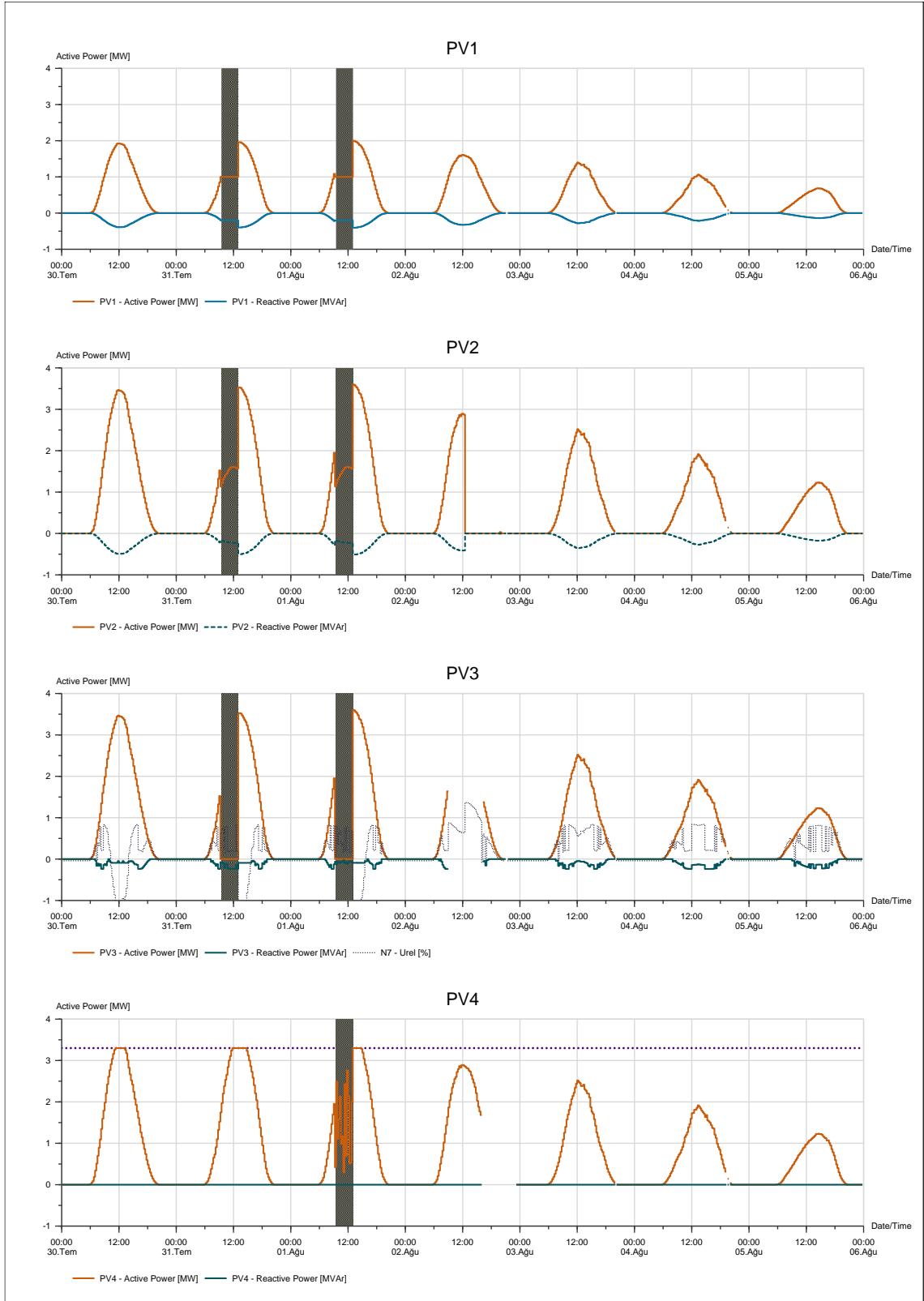
Bu analizde; güneş enerji santrallerinin yaz aylarında gün ortası dışında ya da yaz ayları dışındaki bir günde gün ortasına denk gelen bir vakitte üretim yaptığı düşünülerek yarı kapasite çalıştığı, tüketimlerin ise mevcut trafo kapasitesinin tümüyle gerçekleştirildiği varsayılmıştır. PSS@SINCAL programı ile yük akışı çalıştırıldığında, Şekil 4.15'te de görüleceği üzere seçilen fider üzerinde yer alan üretim santrali kapasitesinin mevcut durumda burada tüketilen enerjiden fazla olmasına rağmen kapasitenin yarıya düşmüş olması, santral çıkışlarındaki hatlarda yüklenmenin daha az olmasını sağlamıştır. Bu durum sonucunda 9.1 MW kurulu güce sahip 7.02 MW kurulu güce sahip genel yük bulunmaktadır. PSS@SINCAL programı zamana bağlı yük akışı çalıştırıldığında gerilim 1,035 p.u. değerine kadar artmış, %3 oranında bir gerilim yükselmesi gözlenmiştir. Sistemde 0,90 p.u. değerine kadar inmiş ve yaklaşık %10 oranında bir gerilim düşümü gözlenmiştir. Sisteme ait elde edilen aktif-reaktif güç değerleri Şekil 4.16, 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.15. Senaryo-4 durumunda yük profili grafiği



Şekil 4.16. Senaryo-4 için zamana bağlı yük profili Uref [pu]

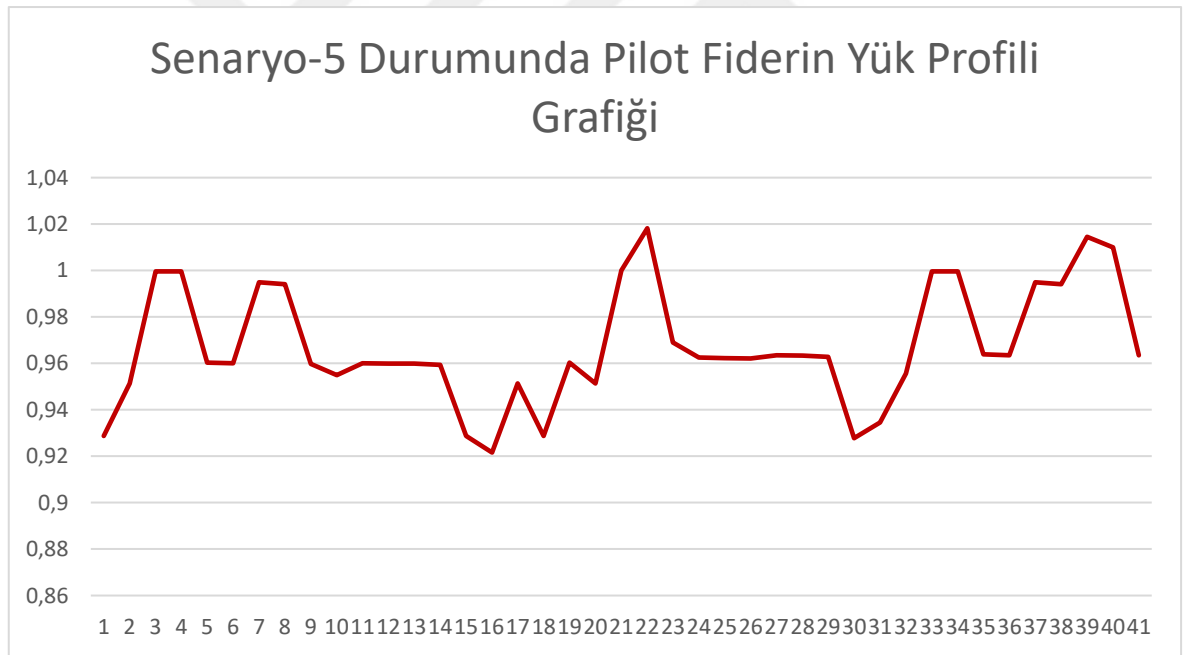


Şekil 4.17. PV1, PV2, PV3, PV4'e ait aktif-reaktif güç oranları

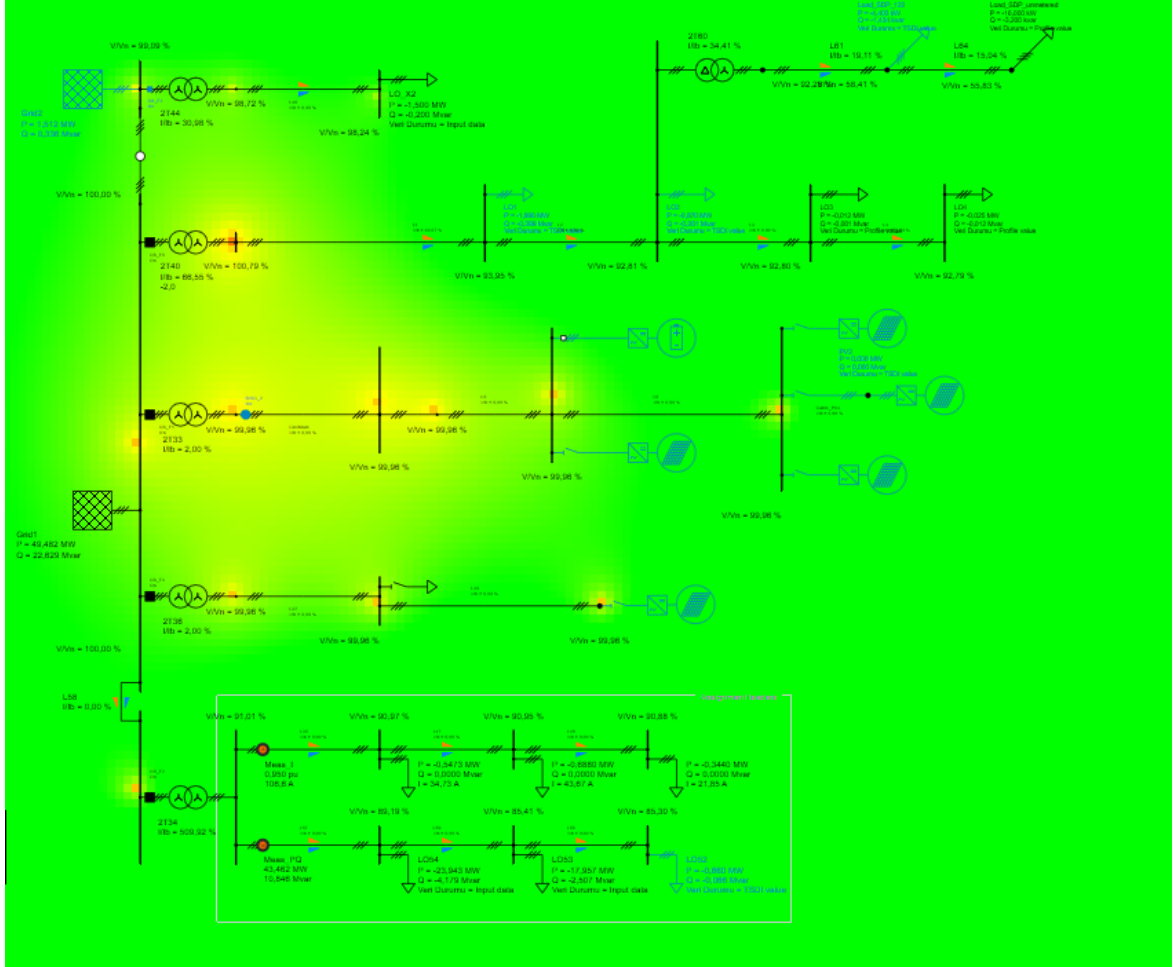
4.5. Üretimin Hiç Olmayıp Tüketimin Tam Kapasite Gerçekleştiği Durum

Bu senaryoda; güneş enerji santrallerinin devrede dışı olduğu tüketimlerin ise mevcut trafo kapasitesinin tümüyle gerçekleştirildiği varsayılmıştır. PSS@SINCAL programı ile yük akışı çalıştırıldığında, Şekil 4.18'den de görüleceği üzere seçilen fider üzerinde hiç üretim santralinin bulunmamasının yanı sıra tüketimlerin tam kapasite olarak devam ediyor olması sebebiyle hat yüklenmeleri görülmemiş, aksine hattın ilerleyen kısımlarında gerilim düşümü gözlenmiştir.

Bu durum sonucunda 7.02 MW kurulu güce sahip genel yük bulunmaktadır. PSS@SINCAL programı zamana bağlı yük akışı çalıştırıldığında gerilim Şekil 4.16'dan da görüleceği üzere seçilen fider boyunca gerilim, 0.939 p.u. değerine kadar inerek yaklaşık %6,1 oranında bir gerilim düşümü görülmüştür. Sisteme ait elde edilen ısı haritası Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.18. Senaryo-5 durumunda yük profili grafiği

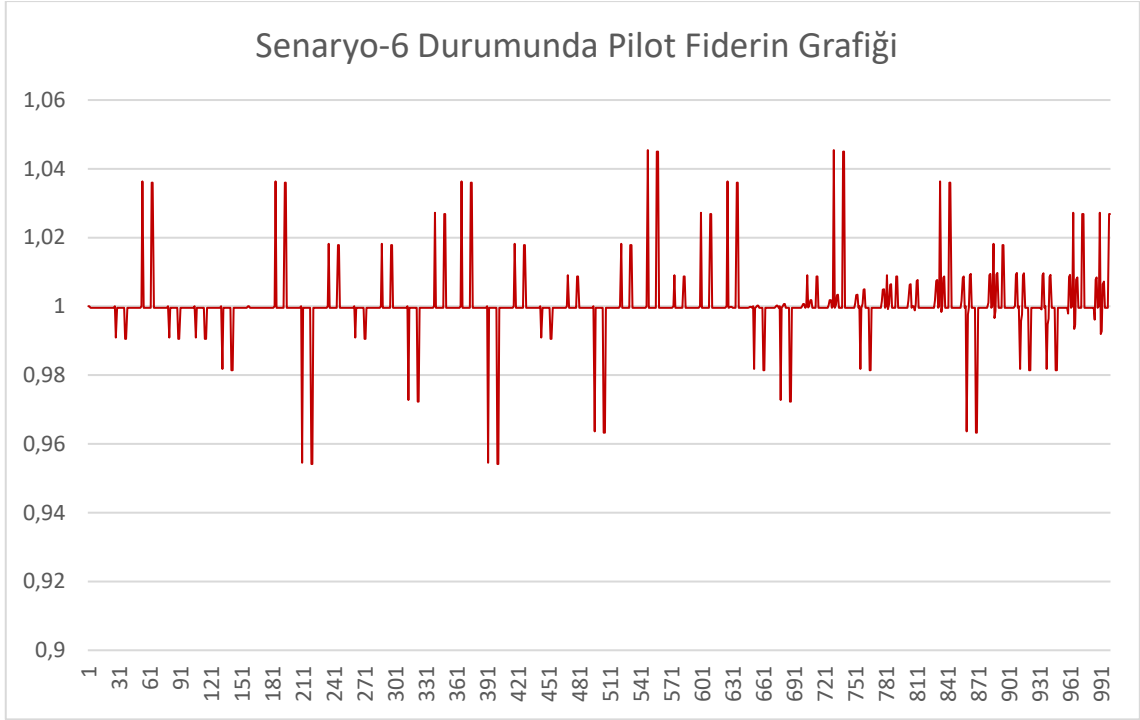


Şekil 4.19. Senaryo-5 durumunda yük profili ısı haritası

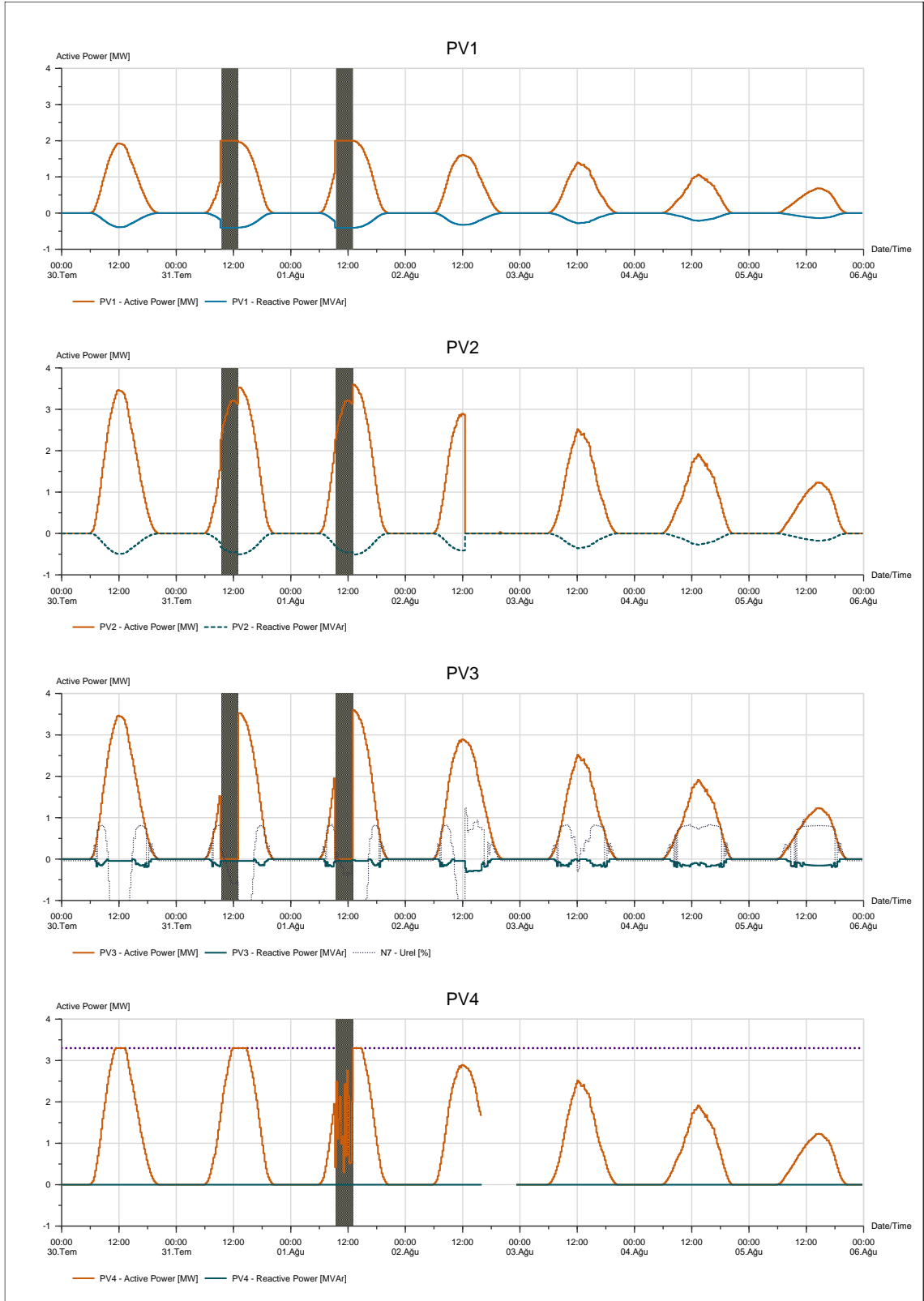
4.6. Tüketimin Hiç Olmayıp Üretimin Tam Kapasite Gerçekleştiği Durum

Tüketimin hiç olmayıp üretimin tam kapasite gerçekleştiği senaryoda; güneş enerji santrallerinin yaz aylarına ve gün ortasına denk gelen bir vakitte üretim yaptığı düşünülerek tam kapasite çalıştığı, buna karşılık bölgede hiç tüketim yapılmadığı düşünülmüştür. PSS@SINCAL programı ile yük akışı çalıştırıldığında, Şekil 4.18'den de görüleceği üzere seçilen fider boyunca hatlarda yüklenme görülmüş olup özellikle üretim santrallerinin yoğun olduğu kısımda santral çıkışlarındaki hatlarda yüklenmenin daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum sonucunda 18.2 MW kurulu güç bulunmaktadır. PSS@SINCAL programı zamana bağlı yük akışı çalıştırıldığında gerilim Şekil 4.20'den

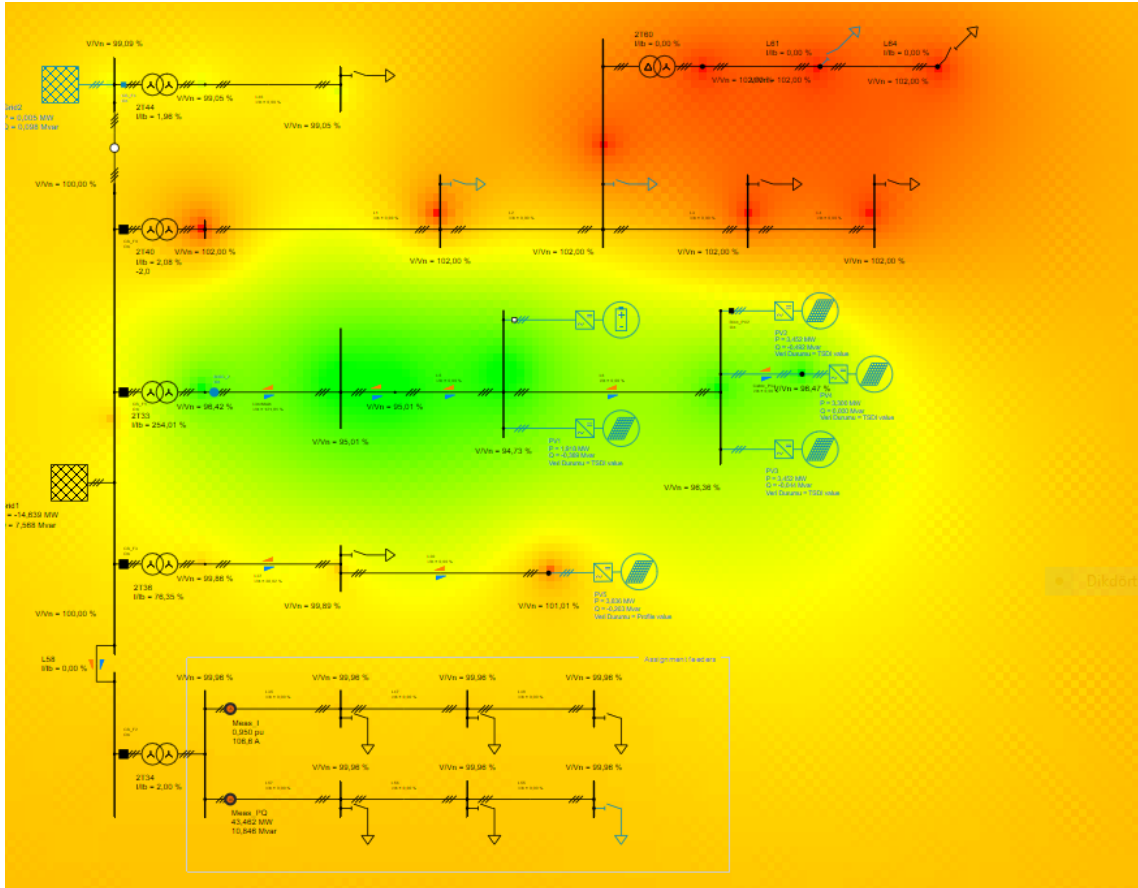
de görüleceği üzere seçilen fider boyunca gerilim, 1.04 p.u. değerinde olduğu ve yaklaşık %4 oranında bir gerilim yükselmesi görülmüştür. Sisteme ait elde edilen PV1, PV2, PV3, PV4'e ait aktif-reaktif güç oranları Şekil 4.21'de, ısı haritası ise Şekil 4.22'de verilmiştir



Şekil 4.20. Senaryo-6 durumunda yük profili grafiği



Şekil 4.21. PV1, PV2, PV3, PV4'e ait aktif-reaktif güç oranları



Şekil 4.22. Senaryo-6 durumunda yük profili ısı haritası

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yapılan bu tez çalışmasında şebeke bağlantılı güneş enerjisi sistemlerinde reaktif güç kontrolü benzetim çalışması yapılmıştır. Ek olarak sistemde meydana gelen endüktif reaktif güç, MATLAB'da modellenmesi yapılan fotovoltaik sistem tarafından üretilen kapasitif reaktif güç sayesinde bastırılıp sistemin güç güç faktörü belirlenmiştir.

Bu sayede şebekenin ve mevcut yüklerin ihtiyaç duyduğu kapasitif reaktif güç güneş panelleri ile karşılanmış olacaktır. Bu da mevcut kompanzasyon maliyetlerinin düşmesi, gerilim düşümünün azaltılmasına ve harmoniklerin yok edilmesine zemin hazırlayacaktır.

Kurulu olan sistemlerde ne kadar endüktif reaktif enerji güç oluştuğuna bağlı olarak, güneş panelleri seçilerek üretilen kapasitif reaktif güçler sisteme entegre edilerek kompanzasyon sağlanabilir. Ayrıca bir kompanzasyon sistemi kurulmasının önüne geçilebilir.

Gerilim kararlılığını sağlamak, güç sistemlerinin güvenli ve kararlı sınırlarda işletilmesini sağlamak ve elektrik enerjisi arzının kaliteli, kesintisiz ve yeterli bir şekilde yapılabilmesi için, güç sistemlerinin hem planlama hem de işletme aşamasında yüklenebilirlik, arz-talep dengesi, güç akışı ve kararlılık yönüyle incelenip, analizlerin doğru bir şekilde yapılarak, gerekli önlemlerin alınması oldukça önemlidir.

Güneş enerji santrallerinin işletilmesi ile oluşacak gerilim regülasyonu sorunlarının ele alındığı bu tez çalışmasında, şebekeye bağlı çok sayıda güneş enerji santralinin şebeke analiz programı olan yük akışı analizi PSS@SINCAL ve MATLAB ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre gerilim kararlılıkları tespit edilmiş, farklı senaryolardaki yük akış profilleri değerlendirilmiştir. Çizelge 5.1'de fider üzerindeki ekipmanların gerilim karakteristikleri verilmiştir.

Çizelge 5.1. Fider üzerindeki ekipmanların ölçüm verileri

Senaryolar	Sistemin üretim ve yük durumu	Gerilim Düşümü	Gerilim Yükselmesi
Üretimin ve tüketimin tam kapasitede gerçekleştiğinin varsayıldığı durumda	18.2 MW kurulu güç 7.02 MW kurulu güce sahip genel yük	%8,5	%4,5
Üretimin ve tüketimin yarı kapasitede olduğu durumda	9.1 MW kurulu güç 3.51 MW kurulu güce sahip genel yük	%3	%3,5
Üretimin tam kapasitede, tüketimin yarı kapasitede olduğu durumda	18.2 MW kurulu güç 3.51 MW kurulu güce sahip genel yük	%5,5	%4,5
Tüketimin tam kapasitede, üretimin yarı kapasitede olduğu durumda	9.1 MW kurulu güç 7.02 MW kurulu güce sahip genel yük	%10	%3
Üretimin hiç olmayıp tüketimin tam kapasitede olduğu durumda	7.02 MW kurulu güce sahip genel yük	%6,1	-
Tüketimin hiç olmayıp üretimin tam kapasitede olduğu durumda	18.2 MW kurulu güç	-	%4

5.2. Öneriler

Oluşturulan durum senaryolarına göre yapılan analiz çalışmaları güneş enerji santrallerinin farklı koşullarda farklı seviyelerde üretim yaptığı durumlarda değişen gerilim profilleri PSS@SINCAL programı ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlarına göre güneş enerji santrallerinin üretimi bölgede tüketilen enerjiden fazla ise gerilim yükselmeleri yaşanmakta, güneş enerji santrallerinin üretimi tüketilen enerjiye yaklaşması halinde ise gerilim yükselmelerinde azalmalar görülmüştür.

Sistemde hiç üretim yapılmadığı durumda gerilim düşümlerinde artış olurken, tüketimin hiç olmadığı yerde ise gerilim yükselmesi, gerilim regülasyonundaki bozunumlar kaçınılmaz hale gelmiştir. Güneş enerjisi santrallerinde elektrik üretimi yapılırken santrallerinin şebekeye entegrasyonlarında bölgedeki yük durumu, özellikle gerilim regülasyonunun sağlanmasında önemli bir paya sahiptir. Yapılan çalışma sonucunda gerilim regülasyonu gibi problemlerin en aza indirilip şebeke entegrasyonunun sağlanması oldukça önemlidir. Sistemde tüketim seviyesinin düşük olduğu noktalarda, az sayıda ve küçük güçte üretim tesisi şebekeye entegre edilmelidir.

tüketim seviyesinin yüksek olduğu kısımlarda ise bu tüketim noktasına yakın kapasitelerde üretim tesisi entegrasyonunun gerçekleştirilmesi önem arz etmektedir. Bu şekilde üretilen yüksek seviyelerdeki enerjinin şebekeye verilmesi gerilim profilinde önemli ölçüde iyileştirmeler sağlayacaktır.

Donanımların seçimi, yatırım maliyetinin geri dönüş hızını etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Donanım seçimi yapılırken ilk yatırım maliyetini göz önünde bulundurmak gerekir. İşletme ve bakım maliyetlerini, santralin ömrü boyunca ihtiyaç duyulacak yedek malzeme maliyetini ve santralin ömrü boyunca yapacağı üretimi de göz önünde bulundurmak gerekir. Güneş enerji santralleri kurulurken önceden tespit edilmesi gereken hususlar oldukça önemlidir. Bunlar arasında:

- Kablo
- İnvertör
- Şartel

seçiminde güç faktörünün etkisi bulunmaktadır. Güç faktörünün bilinmesi bize malzeme seçiminde önemli bir yol gösterici olacaktır.

PV santralde kompanzasyon için kullanılacak rölenin, akım ölçümü alçak gerilim barasından değil yüksek gerilim barasından yapılması gereklidir bu sayede şebekeden hem enerji çekiş hem de şebeke enerji veriş durumunda doğru ve etkili kompanzasyon yapılmış olur. Bu çalışma aynı zamanda doğru yatırım için gerçek veri elde edilmesinin önemini vurgulamaktadır.

KAYNAKLAR

- Abamor, S. 2016. "Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Enerji Santrallerinin Elektrik Güç Kalite Parametrelerinin İzlenmesi ve Analizi".
- ABB. 2014. "Technical Application Papers No.10 Photovoltaic plants", (10).
- Acar, C., Kılınçdemir, İ. 2016. "Güneş Pillerinin Çalışma Prensipleri". Güneş, Türkiye'de Potansiyeli, Enerjisi.
- Agency, I. E. 2008. "Photovoltaic Power Systems Programme, Annual Report 2008", (10).
- Al-Majidi, S. D., Al-Nussairi, M. K., Rashed, J. R., Abbod, M. F. 2021. "Assessment of roof-top photovoltaic installations on the total harmonic distortion of low voltage distribution networks". 2021 56th International Universities Power Engineering Conference: Powering Net Zero Emissions, UPEC 2021 - Proceedings, 22–26.
- Albuquerque, F. L., Moraes, A. J., Guimarães, G. C., Sanhueza, S. M. R., Vaz, A. R. 2010. "Photovoltaic solar system connected to the electric power grid operating as active power generator and reactive power compensator". *Solar Energy*, 84(7), 1310–1317.
- Alhafadhi, L., Lai, C. M., Teh, J., Salem, M. 2020. "Predictive adaptive filter for reducing total harmonics distortion in PV systems". *Energies*, 13(12), 1–15.
- Alhafadhi, L., Teh, J. 2020. "Kalman Filter for Reducing Total Harmonics Distortion in Stand-alone PV System B . Mathematical Definition of Kalman Filter", 81–87.
- Ali, A., Raisz, D., Mahmoud, K. 2017. "Optimal Capacity of PV Inverter Considering Reactive Power Capability and Active Power Curtailment". 7 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), (December), 19–21.
- Althowibi, F. A., Mustafa, M. W. 2013. "Power System Voltage Stability : Indications , Allocations and Voltage Collapse Predictions", 2(7), 3138–3152.
- Amjady, N., Fallahi, F. 2010. "Determination of frequency stability border of power system to set the thresholds of under frequency load shedding relays". *Energy Conversion and Management*, 51(10), 1864–1872.
- Batrinu, F., Chicco, G., Schlabbach, J., Spertino, F. 2006. "Impacts of grid-connected photovoltaic plant operation on the harmonic distortion". *Proceedings of the Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON, 2006*, 861–864.
- Bilgin, M. 2008. "Fotovoltaik Panellerin Verimine Panel Yüzey Sıcaklığı Etkisinin İncelenmesi".
- Bilki, F. 2008. "Reaktif Güç Kompanzasyon Teknikleri".

- Boztepe, M. 2017. "Fotovoltaik Güç Sistemlerde Verimliliği Etkileyen Parametreler". IV. İzmir Enerji Verimliliği Günleri, EMO İzmir Şubesi Aylık Bülteni, 322. Sayı, 1–8.
- Bravo, R. J. 2018. "Solar PV Power Plants Harmonics Impacts". Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 2018-April, 12–16.
- Çelik, A. N., Koç, F. 2020. "Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi". Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8, 2491–2515.
- Çetinkaya, Ü. 2016. "Enerji Sistemlerinde Dinamik Güç Akışı İzleme ve Gerilim Kararlılık Analizi".
- Chouder, A., Silvestre, S., Sadaoui, N., Rahmani, L. 2012. "Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters Simulation Modelling Practice and Theory Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters". Simulation Modelling Practice and Theory, 20(1), 46–58.
- da Costa, V. M., de Oliveira, M. L., Guedes, M. R. 2007. "Developments in the analysis of unbalanced three-phase power flow solutions". International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 29(2), 175–182.
- Dai, J., Member, S., Tang, Y., Xu, Y., Yan, Q. 2018. "Reactive Power Optimization Coordinated Control Strategy of the Large-Scale PV Power Station". conference on Power System Technology, (201804270000683), 1–6.
- Dhaneria, A. 2020. "Grid Connected PV System with Reactive Power Compensation for the Grid". 2020 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 1–5.
- Dixon, J., Member, S., Morán, L., Rodríguez, J., Member, S., Domke, R. 2005. "Reactive Power Compensation Technologies : State-of-the-Art Review", 93(12).
- Dixon, J., Morán, L., Rodríguez, J., Domke, R. 2005. "Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review". Proceedings of the IEEE, 93(12), 2144–2163.
- Eremia, M., Shahidehpour, M. 2013. "Handbook Of Electrical Power System Dynamics".
- Ertay, M. M., Aydoğmuş, Z. 2012. "Güç Sistemlerinde Facts Uygulamaları", 4(2), 40–58.
- Fateh, A., Nor, M., Sulaiman, M., Fazliana, A., Kadir, A., Omar, R. 2016. "Voltage Instability Analysis for Electrical Power System Using Voltage Stability Margin and Modal Analysis Voltage Instability Analysis for Electrical Power System Using Voltage Stability Margin and Modal Analysis", (September), 655–662.
- Glover, J. D., Sarma, M. S., Overbye, T. J. 2010. "Power System Analysis and Design (Fifth Edition). United State of America: Cengage Learning".

- Hashemi, S., Ostergaard, J., Yang, G. 2013. "Effect of reactive power management of PV inverters on need for energy storage". Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2304–2308.
- Hassaine, L., Olias, E., Quintero, J., Haddadi, M. 2009. "Digital power factor control and reactive power regulation for grid-connected photovoltaic inverter". *Renewable Energy*, 34(1), 315–321.
- Hatziargyriou, N., Milanovic, J., Rahmann, C., Ajjarapu, V., Canizares, C., Erlich, I., ... Vournas, C. 2021. "Definition and Classification of Power System Stability - Revisited & Extended". *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(4), 3271–3281.
- Hekim, M. 2011. "Mayis, 2011".
- İçel, Y. 2019. "Güneş panelleri ile üretilen enerjinin ortam bilgileri kullanılarak yapay sinir ağları ile tahmini", 182.
- IEEE, 1997. "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.". *ANSI Stand.*
- Imhoff, T. J., Rodrigues, G. F., Pinheiro, J. R., Hey, H. L., Roraima, A., Maria, S. 2007. "A Stand-Alone Photovoltaic System Based on Dc-Dc Converters in a Multi-String Configuration Keywords Centralized stand-alone photovoltaic system". *European Conference on Power Electronics and Applications*, 1–10.
- Ise, F., Gmbh, P. S. E. P. 2022. "Photovoltaics Report", (February).
- Jaalam, N., Rahim, N. A., Bakar, A. H. A., Eid, B. M. 2017. "Strategy to enhance the low-voltage ride-through in photovoltaic system during multi-mode transition". *Solar Energy*, 153, 744–754.
- Katsanevakis, M., Demirok, E. 2011. "Solar Plant Integration and Analysis of Effect in the MV Electricity Grid". 1st Solar Integration Workshop, (January), 3–9.
- Kayri, İ. 2017. "Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Danışman : Prof. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU Anabilim Dalı : Elektrik Elektronik Mühendisliği Programı : Elektrik Tesisleri".
- Krishnendu, S., Maji, A., Mandal, K. ., Tudu, B. 2021. "Control Strategy for Active and Reactive Power Regulation of Grid Tied Photovoltaic System". 2021 Innovations in Energy Management and Renewable Resources (IEMRE) IEEE |, 5–10.
- Lakshmanan, S. A., Jain, A., Rajpourhit, B. S. 2015. "A novel current controlled technique with feed forward DC voltage regulator for grid connected solar PV system". 2014 18th National Power Systems Conference, NPSC 2014.
- Léna, G. 2013. "Rural Electrification with PV Hybrid Systems". Tarihinde adresinden erişildi www.iea-pvps.org

- Li, H., Xu, Y., Adhikari, S., Rizy, D. T., Li, F., Irminger, P. 2012. "Real and reactive power control of a three-phase single-stage PV system and PV voltage stability". IEEE Power and Energy Society General Meeting, 1–8.
- Liu, L., Member, S., Li, H., Member, S., Xue, Y., Member, S. 2015. "Reactive Power Compensation and Optimization Strategy for Grid-Interactive Cascaded Photovoltaic Systems". IEEE Transactions On Power Electronics, 30(1), 188–202.
- Liu, Y., Qin, W., Dq, L., Lqj, D. Q. J., Lei, D. Q. J., Li, F. 2018. "Distribution Network Voltage Control by Active Power / Reactive Power Injection from PV Inverters". 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 543–547.
- Lorenzo, E. 1994. "Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems".
- MEHMET B. KESKİN. 2007. "Continuation Power Flow And Voltage Stability In Power Systems", 7(3), 213–221.
- Mesemanolis, A., Pontikidis, D., Demoulias, C. 2011. "A new modulation technique for reduced harmonic distortion of current in PV inverters". EUROCON 2011 - International Conference on Computer as a Tool - Joint with Conftele 2011, (1).
- Mohamadi, M., Roshandel, E., Gheasaryan, S. M., Khoshkalamyan, P. 2016. "Stability and power factor improvement in a power system with simultaneous generation of steam and solar power plant". 6th Conference on Thermal Power Plants, CTPP 2016, 83–88.
- Mohamed, E., Hasanien, H. M., Atallah, A., El-debeiky, S. 2018. "Reactive power control of three-phase low voltage system based on voltage to increase PV penetration levels". Ain Shams Engineering Journal, 9(4), 1831–1837.
- Ova, A. 2017. "Güç Sistemlerinde Pv-Qv Eğrisi Yöntemi İle Statik Gerilim Kararlılığı Analizi".
- Oymak, A. 2021. "Güneş Enerjisi Dağıtım Sistemlerinde PV-STATCOM'un Etkilrinin İncelenmesi".
- Öztürk, H. H. 2019. "Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi Ve Etkili Etmenler".
- Qian, M., Liu, Y., Chen, N., Zhu, L., Zhao, D., Jiang, D. 2015. "A Static Reactive Power Coordination Control Strategy of Solar PV Plant Considering Voltage and Power Factor". International Conference on Renewable Power Generation.
- Ramkhelawan, R. 2019. "Power System Load Flow Analysis using Microsoft Excel – Version 2", 12(1), 1–20.

- Şahin, M. E., Okumuş, H. İ., Üniversitesi, R. T. E., Elektronik, E., Bölümü, M., Mühendislik, K. T. Ü., Fakültesi, M. 2013. "Güneş Pili Modülünün Matlab / Simulink ile Modellenmesi ve Simülasyonu". *EMO Bilimsel Dergi*, 3(5), 17–25.
- Sankaran, C. 2002. "Power quality © 2002".
- Shah, R., Mithulananathan, N., Bansal, R., Lee, K. Y., Lomi, A. 2012. "Influence of large-scale PV on voltage stability of sub-transmission system". *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 4(1), 148–161.
- Shah, R., Mithulananathan, N., Bansal, R. C., Ramachandaramurthy, V. K. 2015. "A review of key power system stability challenges for large-scale PV integration". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1423–1436.
- Sinvula, R., Abo-Al-Ez, K. M., Kahn, M. T. 2019. "Total harmonics distortion (THD) with PV system integration in smart grids: Case study". *Proceedings of the 27th International Conference on the Domestic Use of Energy, DUE 2019*, 102–108.
- Sode-yome, A., Mithulananthan, N., Lee, K. Y. 2005. "Voltage Stability Study", 1–6.
- Sundar, K. S. 2018. "PHOTOVOLTAIC SOLAR SYSTEM FOR ACTIVE POWER GENERATION AND REACTIVE POWER", 5(7).
- Suyata, T., Po-ngam, S. 2014. "Simplified Active Power and Reactive Power Control with MPPT for Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters". 2014 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON).
- Tamimi, B., Canizares, C., Bhattacharya, K. 2013. "System stability impact of large-scale and distributed solar photovoltaic generation: The case of Ontario, Canada". *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(3), 680–688.
- Tan, Y. T., Kirschen, D. S., Jenkins, N. 2004. "A model of PV generation suitable for stability analysis". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(4), 748–755.
- Tharani, K., Dahiya, R. 2014. "PV Module integration with STATCOM for Reactive Power Compensation". *International Conference on Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their Impact on Humanity (CIPECH14)*, (November), 400–404.
- Torquato, R., Freitas, W., Hax, G. R. T., Donadon, A. R., Moya, R. 2016. "High frequency harmonic distortions measured in a Brazilian solar farm". *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, 2016-December*, 623–627.
- Tosun, S., Öztürk, A., Yalcın, M. A., Döşoğlu, K., Güvenç, U. 2011. "Güç Sisteminde SVC ve STATCOM Denetleyici Etkilerinin İncelenmesi". 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), (May), 16–18.

- Wei, Y., Wei, Z., Sun, G. 2011. "Matlab-based Voltage Stability Analysis toolbox and its validity check". 2011 IEEE Electrical Power and Energy Conference, EPEC 2011, 244–248.
- Yang, Y., Wang, H., Blaabjerg, F. 2014. "Reactive Power Injection Strategies for Single-Phase Photovoltaic Systems Considering Grid Requirements", *50*(6), 4065–4076.
- Yılmaz, M. 2012. "Türkiye'nin Enerji Potansiyeli ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Açısından Önemi The energy potential of Turkey and its importance of renewable energy sources in terms of electricity production Mutlu YILMAZ". *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, *4*(2), 33–54.



EKLER

EK-1 MPPT Fonksiyonu

```

function D = PandO(Param, Enabled, V, I)
% MPPT controller based on the Perturb & Observe algorithm.
% D output = Reference for DC link voltage (Vdc_ref)
%
% Enabled input = 1 to enable the MPPT controller
% V input = PV array terminal voltage (V)
% I input = PV array current (A)
%
% Param input:
Dinit = Param(1); %Initial value for Vdc_ref
Dmax = Param(2); %Maximum value for Vdc_ref
Dmin = Param(3); %Minimum value for Vdc_ref
deltaD = Param(4); %Increment value used to increase/decrease Vdc_ref
%persistent Vold Pold Dold;

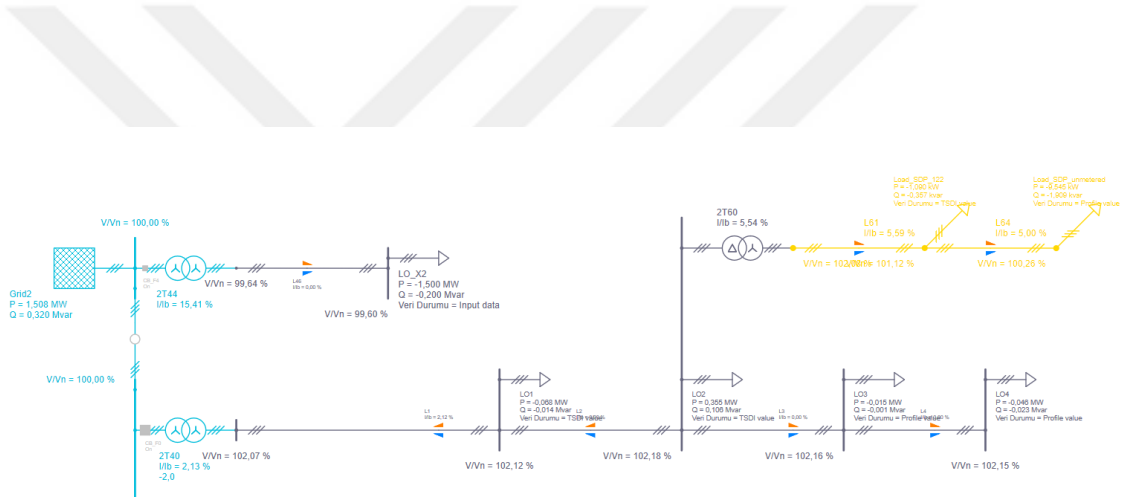
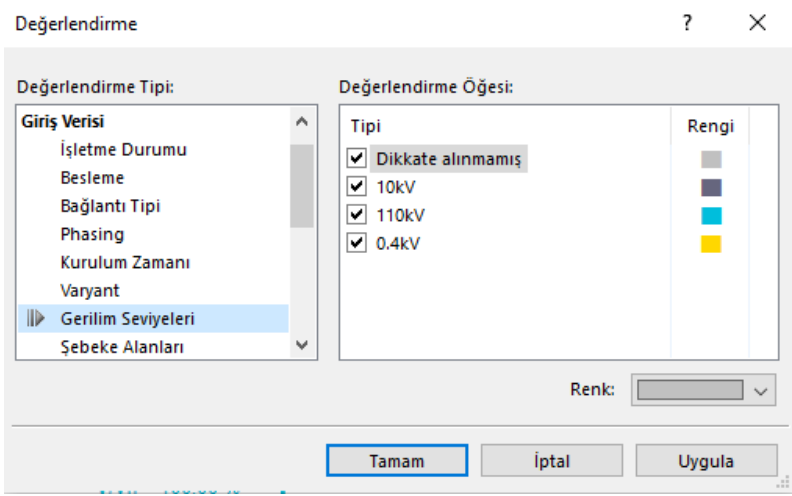
dataType = 'double';

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

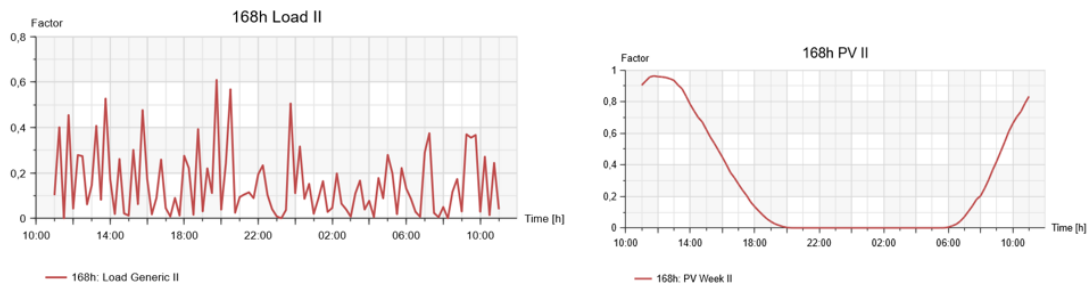
if dP ~= 0 & Enabled ~=0
    if dP < 0
        if dV < 0
            D = Dold + deltaD;
        else
            D = Dold - deltaD;
        end
    else
        if dV < 0
            D = Dold - deltaD;
        else
            D = Dold + deltaD;
        end
    end
end
else D=Dold;
end

```


EK-2 PSS@SINCAL Yük ve Aydınlanma Verileri



PSS@SINCAL Gerilim seviyelerine göre gruplandırma



PSS@SINCAL kullanılan yük ve sıcaklık verileri