T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ SİSTEMLERİNDE KALİTE PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ İÇİN FOTOVOLTAİK ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN STATKOM OLARAK KULLANILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Musab OKSAR

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

TEMMUZ 2025

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ SİSTEMLERİNDE KALİTE PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ İÇİN FOTOVOLTAİK ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN STATKOM OLARAK KULLANILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Musab OKSAR
(36213615002)

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

TEMMUZ 2025

İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Güç Sistemlerinde Kalite Problemlerinin Çözümü İçin Fotovoltaik Enerji Dönüşüm Sistemlerinin STATKOM Olarak Kullanılması

Tezi Hazırlayan: Musab OKSAR
Yüksek Lisans Tezi

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Akademik alanda çalışmam yönünde beni sürekli teşvik eden ve hayatımın her döneminde maddi manevi desteğini hissettiren başta rahmetli babam Mustafa OKSAR olmak üzere tüm aileme; yüksek lisans eğitimimi başarılı bir şekilde tamamlamam için beni sürekli motive eden ve yardımcı olan İnönü Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı'ndaki mesai arkadaşlarıma; bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemeden beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ'a teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum "Güç Sistemlerinde Kalite Problemlerinin Çözümü İçin Fotovoltaik Enerji Dönüşüm Sistemlerinin STATKOM Olarak Kullanılması" başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Musab OKSAR

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ ..... **i**
ONUR SÖZÜ ..... **ii**
İÇİNDEKİLER ..... **iii**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **v**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **vi**
SEMBOLLER VE KISALTMALAR ..... **viii**
ÖZET ..... **x**
ABSTRACT ..... **xi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 2
1.2 Tez İçeriği 2
1.3 Literatür Özeti 2
2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER VE GÜÇ KALİTESİ **8**
2.1 Türkiye'de Yenilenebilir Enerji 8
2.2 Fotovoltaik Sistem (FV Sistem) 12
2.2.1 FV paneller 13
2.3 Fotovoltaik Sistem Topolojileri 15
2.3.1 Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemler 15
2.3.2 Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler 16
2.4 FV Sistemlerin Şebekeye Etkileri 17
2.4.1 Gerilim dalgalanması 17
2.4.2 Gerilim kırpışması 18
2.4.3 Harmonikler ve rezonanslar 18
2.4.4 Geçici aşırı gerilim 19
2.4.5 Şebekede koruma problemi 19
2.5 Güç Kalitesi Problemi Çözümleri 19
2.5.1 Geleneksel yöntemler 21
2.5.2 FACTS cihazları kullanımı 21
3. STATKOM **23**
3.1 STATKOM Çalışma Prensibi 25
3.2 STATKOM Yapısı ve Elemanları 30
3.2.1 DC-AC eviriciler 30
3.2.2 DC hat kondansatörü 34
3.2.3 Bağlantı endüktansı 35
3.3 STATKOM Kontrol Metotları 35
3.3.1 Faz açı denetim metodu 36
3.3.2 Sabit DC hat gerilim metodu 37
3.3.3 Doğrudan akım denetim metodu 38
3.3.4 Dolaylı akım denetim metodu 38
4. FOTOVOLTAİK STATKOM (FV-STATKOM) **41**
4.1 Giriş 41
4.2 FV-STATKOM Çalışma Modları 43
4.3 FV-STATKOM Kontrolü 46
4.4 FV-STATKOM Avantajları 48
5. MODEL VE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI **50**
5.1 Kullanılan Kontrol Tekniği ve Bileşenleri 50
5.1.1 Clarke dönüşümü (a,b,c → α,β) 51
5.1.2 Park dönüşümü (α, β → dq) 52
5.1.3 Faz kilitleme döngüsü (PLL-phase locked loop) 53

5.1.4 Oransal-integral (PI) kontrolör 53
5.1.5 Çapraz kuplaj 54
5.2 Modelleme 55
5.2.1 Fotovoltaik sistem modeli 56
5.2.1.1 FV panel 56
5.2.1.2 Boost konvertör & MGNİ 59
5.2.2 FV-STATKOM modeli 60
5.2.2.1 İnverter (DC-AC Evirici) 61
5.2.2.2 DC hat kondansatörü değerinin belirlenmesi 62
5.2.2.3 Bağlantı endüktans değerinin belirlenmesi 63
5.2.2.4 STATKOM ve FV-STATKOM kontrolör 64
5.3 Simülasyon Çalışmaları 72
5.3.1 Senaryo-1 73
5.3.2 Senaryo-2 76
5.3.3 Senaryo-3 78
5.3.4 Senaryo-4 80
6. SONUÇ 84
KAYNAKLAR 87
ÖZGEÇMİŞ 91

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 : Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre gelişimi 9
Çizelge 2.2 : Türkiye'nin 2023 yılı yenilenebilir kaynaklardan elektrik enerjisi üretiminin dağılımı..... 11
Çizelge 2.3 : Standartlardaki gerilim dalgalanması sınır değerleri 17
Çizelge 2.4 : Kırpışma için belirlenen sınır değerler 18
Çizelge 2.5 : Gerilim harmoniği sınır değerleri 18
Çizelge 3.1 : Şebeke-STATKOM güç ilişkisi..... 28

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: FV-STATCOM ve Klasik STATCOM genel gösterimi 3
Şekil 2.1 : Türkiye kurulu gücünün yıllar itibariyle gelişimi 8
Şekil 2.2 : Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre gelişimi 9
Şekil 2.3 : 2023 yılı Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı 10
Şekil 2.4 : Türkiye'nin 2023 yılı yenilenebilir kaynaklardan elektrik enerjisi üretiminin dağılımı 11
Şekil 2.5 : 2025 yılı Mart ayı sonu itibariyle Türkiye'deki yenilenebilir enerji üretim tesis adedi 12
Şekil 2.6 : Fotovoltaik panel gösterimi 12
Şekil 2.7 : İdeal FV panel modeli 13
Şekil 2.8 : İdeal FV panel denkleminin parça parça çizimi 14
Şekil 2.9 : FV panelin farklı çalışma koşullarındaki IxV eğrisi 14
Şekil 2.10 : FV panelin farklı çalışma koşullarındaki PxV eğrisi 15
Şekil 2.11 : Şebekeden bağımsız FV sistem şeması 16
Şekil 2.12 : Şebeke bağlantılı FV sistem şeması 16
Şekil 2.13 : Geleneksel ve FACTS cihazların özet gösterimi 20
Şekil 2.14 : Bir iletim hattındaki seri ve şönt cihazlar 20
Şekil 2.15 : FACTS cihazlarının karşılaştırılması 22
Şekil 3.1 : STATKOM basitleştirilmiş gösterimi 23
Şekil 3.2 : (a) STATKOM V-I karakteristiği **(b)** SVC V-I karakteristiği 25
Şekil 3.3 : STATKOM tek hat görünümü 26
Şekil 3.4 : STATKOM reaktif güç değişimi fazör diyagramları 27
Şekil 3.5 : STATKOM aktif güç değişimi fazör diyagramları 28
Şekil 3.6 : STATKOM genel gösterimi 30
Şekil 3.7 : İki seviyeli 3 fazlı gerilim kaynaklı evirici 31
Şekil 3.8 : İki seviyeli 3 fazlı gerilim kaynaklı evirici 32
Şekil 3.9 : Çok seviyeli evirici bir faz bacak diyagramı **(a)** iki seviyeli **(b)** üç seviyeli **(c)** n seviyeli 32
Şekil 3.10 : Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu üretimi 33
Şekil 3.11 : Faz açı denetim metodu blok şeması 37
Şekil 3.12 : Sabit DC hat gerilim metodu blok şeması 37
Şekil 3.13 : Doğrudan akım denetim metodu blok şeması 38
Şekil 3.14 : Dolaylı akım denetim metodu blok şeması 39
Şekil 4.1 : Fotovoltaik sistem tek hat şeması 41
Şekil 4.2 : (a) Temel bir FV sistem **(b)** Temel bir STATKOM **(c)** Temel bir FV-STATKOM sistemi 42
Şekil 4.3 : FV-STATKOM reaktif güç kapasite diyagramı 44
Şekil 4.4 : FV-STATKOM çalışma modları 45
Şekil 4.5 : FV-STATKOM kontrolü akış şeması 46
Şekil 5.1 : Modellenen sistem genel blok şeması 50
Şekil 5.2 : SRF kontrol tekniği prensip şeması 51
Şekil 5.3 : Clarke dönüşümü fazör diyagramı 52
Şekil 5.4 : Park dönüşümü fazör diyagramı 52
Şekil 5.5 : PI kontrolör içeren geri beslemeli sistem şeması 53
Şekil 5.6 : Dekuplaj işlemi temel gösterimi 55
Şekil 5.7 : Şebeke bağlantılı Fotovoltaik STATKOM'un MATLAB modeli 55
Şekil 5.8 : FV sistem MATLAB modeli 56
Şekil 5.9 : Kullanılan FV panele ait teknik veriler 57

Şekil 5.10 : Kullanılan FV panelin IxV ve PxV grafikleri 58
Şekil 5.11 : Gün içi değişen ışınım değerleri 58
Şekil 5.12 : MATLAB Boost konvertör alt bloğu 59
Şekil 5.13 : Değiştir ve Gözlemle (P&O) algoritması MATLAB kodu 60
Şekil 5.14 : MATLAB inverter alt bloğu 61
Şekil 5.15 : MATLAB şebeke bloğu parametreleri 62
Şekil 5.16 : DC hat kapasitör bloğu parametre ayarı 63
Şekil 5.17 : Bağlantı endüktans bloğu parametre ayarı 64
Şekil 5.18 : STATKOM ve FV-STATKOM kontrol blokları 65
Şekil 5.19 : abc-dq dönüşümleri bloğu 65
Şekil 5.20 : PLL bloğu 66
Şekil 5.21 : DC gerilim kontrol bloğu 67
Şekil 5.22 : İç akım kontrol bloğu 68
Şekil 5.23 : FV-STATKOM kontrolör bloğu 69
Şekil 5.24 : AC gerilim kontrol bloğu 70
Şekil 5.25 : Modülasyon ve PWM bloğu 71
Şekil 5.26 : Taşıyıcı üçgen dalga bloğu parametreleri 72
Şekil 5.27 : Senaryo-1 3 fazlı RL yük bloğu parametreleri 73
Şekil 5.28 : Senaryo-1 şebeke, inverter ve yükün aktif güç grafikleri 73
Şekil 5.29 : Senaryo-1 şebeke, inverter ve yükün reaktif güç grafikleri 74
Şekil 5.30 : Senaryo-1 şebeke cosΦ grafiği 74
Şekil 5.31 : Senaryo-1 V_D gerilimi grafiği 75
Şekil 5.32 : Senaryo-2 3 fazlı RC yük bloğu parametreleri 76
Şekil 5.33 : Senaryo-2 şebeke, inverter ve yükün aktif güç grafikleri 76
Şekil 5.34 : Senaryo-2 şebeke, inverter ve yükün reaktif güç grafikleri 77
Şekil 5.35 : Senaryo-2 şebeke cosΦ grafiği 77
Şekil 5.36 : Senaryo-2 V_D gerilimi grafiği 78
Şekil 5.37 : SIMULINK kesici bloğu parametreleri 79
Şekil 5.38 : Senaryo-3 anahtarlanan RL yüklü sistemin cosΦ ve V_D grafikleri 79
Şekil 5.39 : Senaryo-3 anahtarlanan RC yüklü sistemin cosΦ ve V_D grafikleri 80
Şekil 5.40 : SIMULINK arıza bloğu parametreleri 81
Şekil 5.41 : Senaryo-4 RL yüklü sistemin arıza durumundaki cosΦ ve V_D grafikleri 82
Şekil 5.42 : Senaryo-4 RC yüklü sistemin arıza durumundaki cosΦ ve V_D grafikleri 83

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

I_{pv} : Fotovoltaik Panel Akımı

I_d : Diyot Akımı

I_0 : Diyot Ters Doyum Akımı

α : Diyotun İdealizasyon Faktörü

q : Coloumb Cinsinden Birim Elektron Yük Değeri

k : Boltzman Sabiti

T : Kelvin Cinsinden Sıcaklık Değeri

V_s : Şebeke Gerilimi

V_i : Eviricinin Çıkış Gerilimi

V_L : Endüktans Üzerindeki Gerilim

P : Aktif Güç

Q : Reaktif Güç

δ : Şebeke ve Evirici Gerilimleri Arasındaki Faz Açısı Farkı

L : Bağlantı Endüktansının Kaçak Endüktansı

$j\omega L=jX$: Endüktif Reaktans

V_{DC} : DC Hat Gerilimi

V_a, V_b, V_c : a, b, c Üç Faz Gerilimleri

I_a, I_b, I_c : a, b, c Üç Faz Akımları

m_i : Modülasyon İndeksi

C_{DC} : DC Hat Kondansatörü

I_{rms} : Akımın Efektif Değeri

f : Frekans

ω : Açısal Frekans

ΔV_{DC} : DC gerilimin değişim miktarı

V_{PCC} : Ortak Bağlantı Barası Gerilimi

P_{inv} : İnverter Aktif Gücü

Q_{inv} : İnverter Reaktif Gücü

S_{inv} : İnverter Görünür Gücü

K_p : Oransal Kazanç

K_i : İntegral Kazancı

V_d, V_q : Gerilimin dq Eksen Bileşenleri

I_d, I_q : Akımın dq Eksen Bileşenleri

V_{LL} : Fazlar-arası Gerilim

Z_{baz} : Sistemin Baz Empedansı

PV : Photovoltaik

FV : Fotovoltaik

STATCOM : Static Synchronus Compensator

STATKOM : Statik Senkron Kompanzatör

FACTS : Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri

DC : Doğru Akım

AC : Alternatif Akım

SSR : Senkron Olmayan Rezonans

CHB : Kaskad H-Köprüsü

W : Watt

VA : Volt-Amper

VAR : Volt-Amper Reaktif

TEİAŞ : Türkiye Elektrik İletim A.Ş.

Off-Grid : Şebeke Bağlantılı Sistemler

On-Grid : Şebekeden Bağımsız Sistemler

MPPPT : Maximum Power Point Tracking

MGNİ : Maksimum Güç Noktası İzleyici

SVC : Statik VAR Kompanzatör

GKE : Gerilim Kaynaklı Evirici

PWM : Pulse Width Modulation

DGM : Darbe Genişlik Modülasyonu

SDGM : Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu

UVDGM : Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu

GR : Gerilim Regülasyonu

SRF : Senkron Referans Düzlem

PLL : Faz Kilitleme Döngüsü

PI : Oransal-İntegral

cosΦ : Güç Faktörü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÜÇ SİSTEMLERİNDE KALİTE PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ İÇİN FOTOVOLTAİK ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN STATKOM OLARAK KULLANILMASI

MUSAB OKSAR

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

91+XI sayfa

2025

Danışman: Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

Enerjiye olan ihtiyacın arttığı ve bundan dolayı da akıllı şehir ve akıllı şebeke uygulamalarının arttığı son yıllarda, merkezi enerji üretiminden ziyade dağıtık enerji üretimine geçme konusunda eğilimler görülmektedir. Dağıtık enerji üretim sistemlerinde ise güneş enerjisi yani fotovoltaik enerji (FV) sistemleri önemli bir yere sahiptir. Akıllı şebekelerde, dağıtık enerji sistemlerinin şebekeye entegrasyonuyla birlikte iletim sisteminin kararlılığı ve güç kalitesi önemli bir konu haline gelmiştir. Bu sistemler, sürekli çalışma durumunda iken şebekenin enerji kalitesinde -özellikle gerilim regülasyonuna- olumsuz etkiler oluşturabilmekte ve bazı güvenlik problemlerini doğurabilmektedir. Güç kalitesi sorunlarını çözebilmek için klasik veya güç elektroniği tabanlı birçok teknoloji kullanılmaktadır. İletim sistemlerinde güç kalitesi problemlerini iyileştirerek hattın güç transfer kapasitesini arttırmayı amaçlayan güç elektroniği tabanlı aygıtlar olan Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) kullanılmaktadır. FACTS aygıtları içerisinde ise STATKOM; aktif ve reaktif güç kontrolü yapabilme, tepki süresinin hızlılığı vs. gibi avantajlarından dolayı daha fazla tercih edilmektedir. Fakat STATKOM'un ilk kurulum maliyeti yüksektir. Bundan dolayı her FV sistemin olduğu bölgeye STATKOM kurulması ekonomik değildir. FV sistemdeki DC-AC dönüştürücünün, gerekli özelliklerle donatıldığı takdirde STATKOM olarak kullanılabileceği literatürde gösterilmiştir. Bu şekilde kullanılan FV sistemlere FV-STATKOM adı verilmiştir. FV-STATKOM, şebeke bağlantılı FV sistemdeki birçok güç kalitesi problemine çözüm getirmekte ve bu problemleri harici olarak kullanılacak FACTS cihazlarına göre daha az maliyetle çözmektedir

Bu çalışmada şebekeye bağlı dağıtık enerji sistemlerinin şebekeye olan etkilerinden bahsedilmiş ve FV enerji sisteminin bulunduğu bir şebekedeki güç kalitesi problemlerini gidermek için FV-STATKOM konsepti üzerinde çalışılmıştır. MATLAB/SIMULINK ortamında simülasyonu yapılan çalışmada, FV sistemin farklı yük profillerinde ve arıza durumunda şebekeye etkileri incelenmiş ve FV-STATKOM kullanılarak bu sorunlar çözülmeye çalışılmıştır. Şebekeye bağlı FV sistemlerde FV-STATKOM yapısı sayesinde güç kalitesi problemlerinin daha az ekipman ve maliyetle çözülebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: FV, STATKOM, FV-STATKOM, FACTS, Fotovoltaik, Güç kalitesi

ABSTRACT

Master Thesis

USING OF PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION SYSTEMS AS STATCOM FOR SOLUTION OF QUALITY PROBLEMS IN POWER SYSTEMS

Musab OKSAR

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Electric Electronical Engineering

91+XI sayfa

2025

Supervisor: Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

In recent years, where smart city and smart grid applications have increased for need of energy, there has been a tendency to switch to decentralized energy production rather than centralized energy production. In distributed power generation systems, solar energy (photovoltaic energy) (PV) systems have an important position. In the smart grids, with the integration of distributed energy systems in the grid, stability and power quality of the transmission system has become an important issue. These systems during continuous operation can have negative effects on the energy quality of the grid, especially voltage regulation, and may cause some security problems. Many conventional or power electronics-based technologies are used to solve power quality problems. Flexible Alternative Current Transmission Systems (FACTS), which are power electronics-based devices aiming to increase the power transfer capacity of the line by improving power quality problems, are used in transmission systems. STATCOM have a lot of advantages which are active and reactive power control, speed of response time, etc. because of these advantages, STATCOM is more preferred than other FACTS devices. However, the initial installation cost of STATCOM is high. Therefore, installing of STATCOM in every PV system it is not economic. In literature, it has been shown that DC-AC converter in PV system can be used as STATCOM if it is equipped with necessary features. The PV systems which used in this form are called PV-STATCOM. PV-STATCOM provides solutions to many power quality problems in grid-connected PV systems and solves these problems at a lower cost than external FACTS devices.

In this study, the effects of the grid-connected distributed energy systems on the grid are mentioned and have been studied on a PV-STATCOM to eliminate the power quality problems in grid-connected PV energy system. In the study, which was simulated in MATLAB / SIMULINK environment, the effects of PV system on the grid in different load profiles and case of faults were examined and these problems were tried to be solved by using PV-STATCOM. It is seen that power quality problems can be solved with less equipment and less cost thanks to PV-STATCOM structure in grid-connected PV systems.

Keywords: PV, STATCOM, PV-STATCOM, FACTS, Photovoltaic, Power quality

1. GİRİŞ

Enerji ihtiyacının arttığı ve fosil yakıtların yasaklanmasının gündemde olduğu günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim kaçınılmaz olmuştur. Tüketim noktasındaki üretime dağıtık sistemler denilmektir. Dağıtık sistemler içerisinde ise en büyük paya yenilenebilir enerji sistemleri sahiptir. Dağıtık sistemlerin kullanılması; enerji ihtiyacının yerinden karşılanması, çevreye zararın minimize edilmesi gibi birçok avantajı sağlasa da güç kalitesi bağlamında bazı sorunlara sebebiyet verebilmektedir. Dağıtık sistemler içerisinde ciddi bir paya sahip olan Fotovoltaik Sistemlerin de şebekeye entegrasyonunda da güç kalitesi problemleriyle karşılaşılmaktadır. Güç kalitesi problemlerine çözüm sunmak için klasik veya güç elektroniği tabanlı birçok teknoloji kullanılmaktadır. İletim sistemlerinde güç kalitesi problemlerini iyileştirerek hattın güç transfer kapasitesini arttırmayı amaçlayan güç elektroniği tabanlı aygıtlar olan Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) kullanılmaktadır. FACTS aygıtları içerisinde ise STATKOM; aktif ve reaktif güç kontrolü yapabilme, tepki süresinin hızlılığı vs. gibi avantajlarından dolayı daha fazla tercih edilmektedir. Fakat STATKOM'un ilk kurulum maliyeti yüksektir. Bundan dolayı her FV sistemin olduğu bölgeye STATKOM kurmak mümkün olamamaktadır. Fakat FV sistemdeki DC-AC dönüştürücüyü gerekli özelliklerle donatarak STATKOM olarak kullanım sağlanabileceği yapılan çalışmalarla gösterilmiştir: Bu şekilde kullanılan FV sistemlere FV-STATKOM adı verilmiştir. FV-STATKOM, FV sistemdeki DC-AC Dönüştürücünün kontrol yöntemleri düzenlenerek birçok güç kalitesi problemine çözüm getirmektedir. Örneğin; iletim kapasitesinin arttırılması, reaktif güç kompanzasyonu, gerilim regülasyonu, güç faktörü düzeltmesi, güç salınımlarının sönümlenmesi vb. İlk çalışmalarda FV sistemden sadece geceleri STATKOM olarak faydalanılırken daha sonra yapılan çalışmalarda hem gece hem de gündüzleri STATKOM olarak faydalanılacağı gösterilmiştir. Daha sonraki çalışmalarla birlikte FV-STATKOM'un birçok kalite problemine çözüm olacağına dair sonuçlar alınmıştır.

Bu tez çalışmasında da güç sistemlerindeki güç kalitesi problemlerini gidermek için gerilim regülasyonu ve güç faktörü düzeltimi (reaktif güç kompanzasyonu) yapan bir FV-STATKOM üzerinde çalışılmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, FV sistem veya sistemlerin bağlı olduğu bir şebekede FV-STATKOM kullanarak şebekedeki güç kalitesi problemlerini etkin bir şekilde çözmektir. Güç sistemlerimdeki gerilim regülasyonu ve düşük güç faktörü gibi güç kalite sorunlarını FV sistemin kendi içerisinden daha az maliyetle çözmek amaçlanmaktadır. Bunun için de FV sistemdeki DC-AC Dönüştürücü kısmı düzenlenerek oluşturulan FV-STATKOM yapısı üzerinde çalışılmıştır.

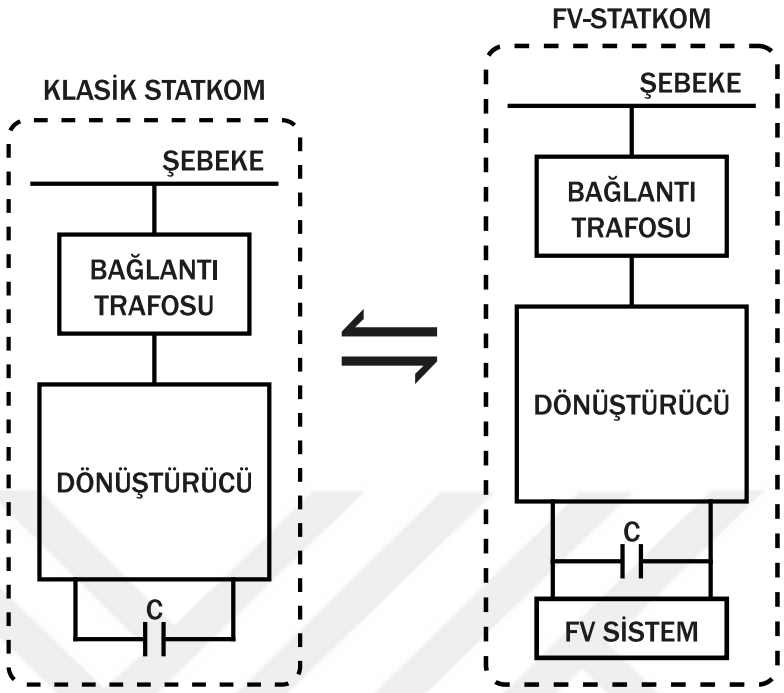
1.2 Tez İçeriği

Bu tez çalışması altı ana bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1'de FV-STATKOM yapısı ile ilgili genel bir giriş yapılmış, tezin amaç ve içeriklerinden bahsedilerek konu ile daha önce yapılmış çalışmalarla ilgili literatür özeti sunulmuştur. Bölüm 2'de ülkemizdeki yenilenebilir enerji kullanımı ve standartlarla ile ilgili bilgiler verilmiş, şebekeden bağımsız ve şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler ve bu sistemlerin şebekeye olan etkilerinden bahsedilmiştir. Bölüm sonunda da güç kalite problemleri için kullanılan çözümlere değinilmiştir. Bölüm 3'te Statik Senkron Kompanzatör (STATKOM) yapısı detaylı bir şekilde anlatılmış, uygulama alanlarından ve diğer çözümlere göre üstünlüklerinden bahsedilmiştir. Bölüm 4'te FV-STATKOM yapısı kapsamlı bir şekilde anlatılmıştır. Bölüm 5'te FV-STATKOM sisteminin MATLAB/SIMULINK ortamındaki benzetim çalışmalarına değinilmiştir. Gerekli hesaplamalar yapılmış ve farklı durumlar için simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Son bölüm olan Bölüm 6 ise; bu tez çalışmasından elde edilen sonuçları içermektedir.

1.3 Literatür Özeti

FV-STATCOM fikri, FV sistemlerin şebeke entegrasyonu sırasında oluşturduğu problemleri ortadan kaldırmak üzere 2009 yılında Rajiv K. Varma, V. Khadkikar ve Ravi Seethapathy'ın çalışmalarıyla ortaya çıkmıştır ve patent alınmıştır [1], [2]. Hem bu araştırmacıların hem de farklı araştırmacıların yaptıkları akademik çalışmalarla bahsedilen birçok problemin önerilen sistemle çözüldüğü belirtilmektedir. Şekil 1.1'de Klasik

STATKOM ile FV-STATKOM'u karşılaştıran bir gösterim bulunmaktadır. Şekil 1.2'de ise bir klasik FV sistem ile bir FV-STATKOM aynı görselde verilmiştir.



Şekil 1.1: FV-STATCOM ve Klasik STATCOM genel gösterimi

Varma ve diğ [1]'nin FV-STATKOM alanında yaptıkları bu ilk çalışmada hem rüzgâr hem de fotovoltaik sistemlerin bağlı olduğu bir şebekede geceleri meydana gelen güç kalitesi problemlerine karşı FV sistemlerin STATKOM olarak kullanılması önerilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmalarıyla da önerilen kontrol stratejisi neticesinde; FV-STATKOM'un farklı rüzgâr hızlarında ve hata durumlarında sistemin tepkisi incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre FV-STATKOM bahsedilen koşullarda iyi bir sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada STATKOM'un sadece gece çalışması incelenmiştir.

Varma ve diğ. [3] tarafından gerçekleştirilen çalışmada; daha önce sadece geceleri çalıştırılan FV-STATKOM'un gündüz çalıştırılabilmesi için optimal bir çözüm sunulmuştur. Gerçek bir dağıtım sisteminde de uygulanan çalışmada; önerilen kontrol teknikleriyle güç faktörü düzeltmesi ve gerilim regülasyonu işlevleri hem gece hem de gündüz gerçekleştirilmiştir. FV sistem çıkışına yük olarak bir motor bağlanmıştır. Yapılan çalışmada; 'Eğer önerilen FV-STATKOM, endüksiyon motor yüklerine sahip endüstriyel bir müşterinin çıkış terminallerine bağlanıldığında, gün içerisinde gerçek elektrik satışı nedeniyle gelir elde etmenin yanı sıra, 24 saatlik bir sürede potansiyel ceza tarifelerinden kaçınmaya yardımcı olunacağı sonucuna varılmıştır. Çalışma hem simülasyon ortamında hem de reelde gerçekleştirilmiştir.

Varma ve diğ. [4]'nin yaptıkları çalışmada; yazarlar daha önce yaptıkları çalışmalara birkaç kontrol tekniği geliştirerek ve iyileştirmeler yaparak, başka güç kalitesi problemlerini de azaltmışlardır. PV ve Rüzgâr sistemlerinin birlikte kullanıldığı bir şebeke üzerinden simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada damping kontrolü ve gerilim kontrolü kullanılarak özellikle iki yeni uygulamada gelişme sağlanmıştır; i) İletim hatlarının güç aktarma kapasitesinin arttırılması; ii) Komşu rüzgâr santrallerinin bağlantılarının arttırılması. Simülasyon çalışmalarıyla sistemde gerçekleşen iyileşmeler gösterilmiştir. Yaklaşık hesaplamalara FV-STATKOM kontrolörü 200.000$ iken; FV-STATKOM kontrolörü yerine ilave SVC/STATCOM gibi FACTS aygıtlarının kullanıldığı durumda 50 Milyon $ gibi bir rakam ortaya çıkmıştır.

Bhaskar M.A [5] doktora tez çalışmasında, dağıtık üretim sistemlerinde gerilim yükselmesi, düşük güç kalitesi ve harmonik gibi sorunları gidermek amacıyla Fotovoltaik (PV) tabanlı bir STATKOM'un modellenmesini gerçekleştirmiştir. Bu FV tabanlı STATCOM, normalde sadece aktif güç üreten PV sisteminin inverter kapasitesini geceleri tamamen, gündüz ise aktif güç üretiminden sonra kalan kısmını kullanarak STATKOM işlevlerini yerine getirecek şekilde tasarlanmıştır. MATLAB/SIMULINK'te yapılan analiz ve simülasyonlar sonucunda gerilim kararlılığı iyileştirmesi, arıza azaltma ve doğrusal olmayan yüklerden kaynaklı harmonikleri bastırma gibi konularda başarı sağlandığı belirtilmiştir.

Siavashi [6] doktora tez çalışmasında, adını Akıllı FV İnverter olarak belirlediği çalışmasını gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada standart FV STATKOM çalışmalarından farklı olarak FV İnverteri sistemin ihtiyaçlarına göre 3 modda çalışacak şekilde kontrol etmiştir. 1. Mod Tam FV modu, 2. Mod Kısmi (Parçalı) STATKOM Modu ve 3. Mod da Tam STATKOM Modudur. Çalışmada, simetrik gerilim regülasyonu, geçici aşırı gerilimlerin azaltılması, güç faktörü düzeltmesi ve reaktif güç kontrolü üzerine yeni kontrol yöntemleri sunulmuştur.

Lakshman ve diğ. [7] tarafından yapılan bu çalışmada şebekeye bağlı değişken rüzgar hızlı PV-Rüzgâr sisteminde güç kalitesini iyileştirmek için FV-STATKOM'un aktif güç iletimi ve reaktif güç kompanzasyonu şeklinde iki yönlü çalışması gösterilmiştir. PV-STATKOM'un aktif güç iletimi sayesinde harmonik etkisinin azaltılması; reaktif güç kompanzasyonu sayesinde de güç faktörü iyileştirmesi gerçekleştirilmiştir. MATLAB Simulink ortamında analizler yapılmıştır.

Varma ve diğ. [8] tarafından yapılan çalışmada; FV-STATKOM kullanılarak hem gündüz hem de geceleri şebekenin iletim kapasitesini arttıracak metot önerilmiştir. Bunun için iki durum incelenmiştir. Birinci durumda STATKOM olarak çalışan 100 MW iki adet FV sistem, ikinci durumda ise STATKOM olarak çalışan bir adet 100 MW FV sistem ve inverter kontrollü bir adet 100 MW rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi kullanılmıştır. Çalışma neticesinde şebekenin iletim kapasitenin istenilen ölçülerde arttırılabildiği görülmüştür. FV-STATKOM sayesinde pahalı herhangi bir ilave FACTS ekipmanına gerek kalmadan şebekenin iletim kapasitesi arttırılmıştır.

Varma V. [9] tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında, dağıtık yenilenebilir enerji üretim santrallerinin (FV ve rüzgâr santralleri) neden olduğu sürekli durum gerilim yükselmesi, gerilim dalgalanması ve harmonik enjeksiyonu gibi sorunları azaltmak amacıyla FV güneş enerjisi santralinin dinamik bir reaktif güç kompanzatörü (STATKOM) olarak kullanılması stratejisini sunmaktadır. Bu strateji ile ortak bağlantı noktası (PCC) ve yük barasındaki gerilimin düzenlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma, FV-STATKOM'un farklı konumlara entegrasyonunun etkisini ve üç faz-toprak arızası durumundaki performansını da incelemiştir. DIgSILENT PowerFactory yazılımı kullanılarak yapılan çalışmalar, kontrol stratejisinin rüzgâr santrali çıkışı ve yüklerdeki geniş değişimler sırasında voltajları önceden belirlenmiş sınırlar içinde başarıyla düzenleyebildiğini göstermiştir. FV güneş enerjisi santrali gündüzleri aktif güç sağlarken, geceleri reaktif güç sağlayarak STATCOM olarak işlev görmüştür. Çalışma sonucunda, uygulanan kontrol tekniğinin 3faz-toprak arızası sırasında iyi sonuçlar verdiği ve FV-STATKOM'un arızalı baraya yakın konumlandırıldığında en iyi performansı gösterdiği belirtilmiştir.

Subramanian, B.S [10] yaptığı doktora tez çalışmasında; Akıllı PV İnverter ve FV-STATKOM konseptlerinin kontrol stratejilerini karşılaştırmış ve FV sistemlerinin şebekeye entegrasyonunda karşılaşılan gerilim dalgalanmaları ve FV sistemlerinin devre dışı kalması gibi sorunları ele almıştır. Tezin temel iddiası, dinamik reaktif akım enjeksiyonu (reaktif güç kompanzasyonu) ve düşük gerilim sürüşü (LVRT) gibi işlevlerde FV-STATKOM kontrolleri kullanılarak geleneksel Akıllı FV İnverter kontrollerine göre daha kararlı bir performansla elde edilebileceğidir. İki yapı arasındaki performans farkını göstermek için, FV-STATKOM'un doğrusallaştırılmış bir durum uzayı modeli geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda FV STATKOM kontrolörlerinin Akıllı FV İnverter kontrolörlerine göre daha kararlı çalıştığı belirtilmiştir. FV-STATKOM'un Tam STATKOM modunda çalışmasıyla

Düşük Gerilim Sürüşü (LVRT) sırasında etkin gerilim desteği sağladığından da bahsedilmiştir.

Varma ve diğ. [11] bu çalışmada iletim hatlarına bağlı buhar türbini tahrikli senkron jeneratörlerde eşzamanlı olmayan rezonansı (SSR) azaltmak için FV-STATKOM olarak kullanılan ölçekli FV solar çiftliklerini otonom olarak kontrol eden yeni bir patentli konsept sunmuştur. Önerilen FV STATKOM kontrolü; gece veya gündüz herhangi bir vakitte meydana gelen SSR'leri azaltmaktadır. Geceleri, güneş enerjisi santrali boşta olduğu için, tüm inverter kapasitesi FV-STATKOM işlemi için kullanılır. Gün içerisindeki bir zamanda, herhangi bir sistemde bozulma nedeniyle SSR tetiklenirse, güneş enerjisi santrali normal gerçek enerji üretim fonksiyonunu otomatik olarak durdurur ve SSR azaltma için tam inverter kapasitesine sahip bir STATKOM'a dönüşür. Senkronize olmayan rezonanslar kabul edilebilir bir seviyenin altına düştüğünde, güneş enerjisi santrali kendiliğinden önceki gerçek enerji üretim seviyesine yavaşça geri döner.

Vavilapalli Sridbar, V. [12] tarafından yapılan doktora tez çalışmasında, büyük ölçekli PV sistemleri için Kaskad H-Köprüsü (CHB) tabanlı çok seviyeli inverterlerin kullanımı incelenmiştir. Bu inverterler, her bir H-Köprüsü için bağımsız DC kaynakları gerektirmesi nedeniyle, her PV dizisi için bağımsız maksimum güç noktası takibi (MPPT) kontrolü yapılmasına olanak tanımaktadır. Tezde ayrıca CHB inverter tabanlı FV-STATKOM'un fizibilite çalışması yapılmış ve farklı enerji depolama sistemi konfigürasyonları tartışılmış, karşılaştırılmış ve en uygun olanları seçilmiştir. Önerilen kontrol mimarisi ve kontrol sistemleri, gerçek zamanlı simülatör kullanılarak doğrulanmaya çalışılmıştır. Çalışma, CHB inverterlerin geleneksel iki seviyeli inverterlerin avantajlarını sunarken dezavantajlarını ortadan kaldırabildiğini ve modüler yapısı sayesinde daha yüksek güç dereceleri için tasarımın basitleştiğini iddia etmektedir. Özellikle, kıyıcı tabanlı çift yönlü enerji depolama sistem konfigürasyonunun kırsal yerler ve mikro şebeke uygulamaları için daha uygun olduğu ve kesintisiz güç sağlayabildiği belirtilmiştir.

Popavath, L.N. [13]'nin doktora tez çalışması, dağıtım şebekelerindeki; harmonikler, düşük güç faktörü ve aşırı gerilim değişimlerinin neden olduğu adalanma gibi güç kalitesi sorunlarını gidermek için FV-STATKOM kontrolünde Şönt Aktif Filtrelerin de entegre edildiği bir sistem önermektedir. Bu çalışmada, PV-STATKOM'un kontrolöründe P-Q Kontrol teorisi ve Birim Vektör Şablonu Yöntemini kullanılmıştır. Tezin temel odak noktası, FV-STATKOM'un şebekeye bağlı sistemlerde güç kalitesi iyileştirmesi ve Düşük Gerilim Sürüşü (LVRT) performansını göstermektir. MATLAB/Simulink sonuçlarının, gerilim

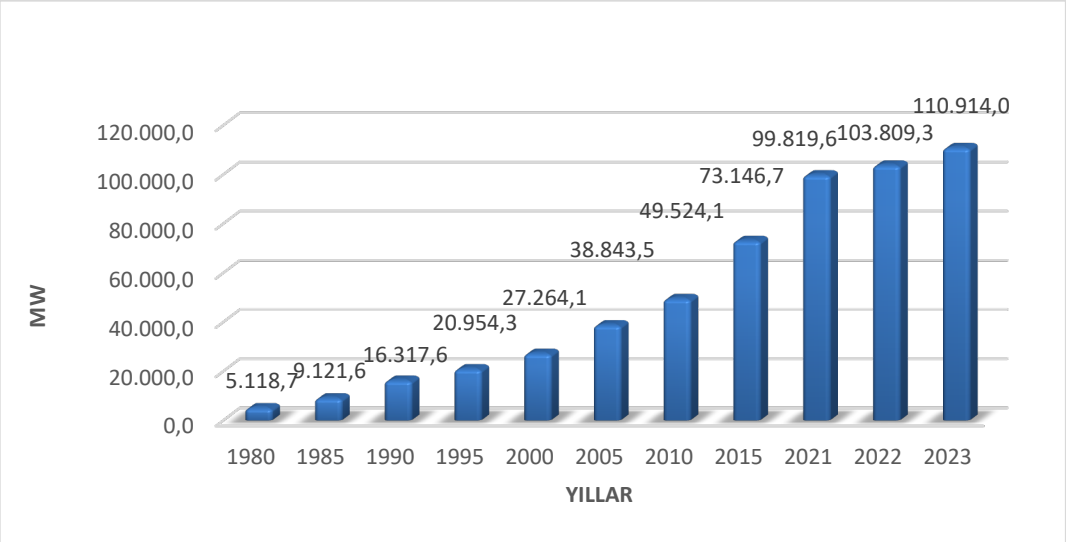
kaynaklı dönüştürücü (VSC) tabanlı FV-STATKOM'un PCC'de gerekli reaktif ve aktif güçleri enjekte edip absorbe ederek güç kalitesi sorunlarını hafiflettiğini gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, önerilen LVRT stratejisinin şebeke arızaları sırasında harmonikleri ve gerilim düşümlerini azalttığı belirtilmiştir

Lourenc ve diğ. [14] tarafından yapılan çalışmada FV-STATKOM alanında yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak, geceleri STATKOM olarak çalıştırılan PV sistemlerin teknik maliyeti incelenmiştir. Bu teknik maliyet, STATKOM'un güç kayıplarını kompanze edebilmek için şebekeden satın alınan enerjiyi içermektedir. Hem PV sahiplerine hem de enerji tedarikçilerini ilgilendiren bir hesaplama çalışması gerçekleştirilmiştir.

2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER VE GÜÇ KALİTESİ

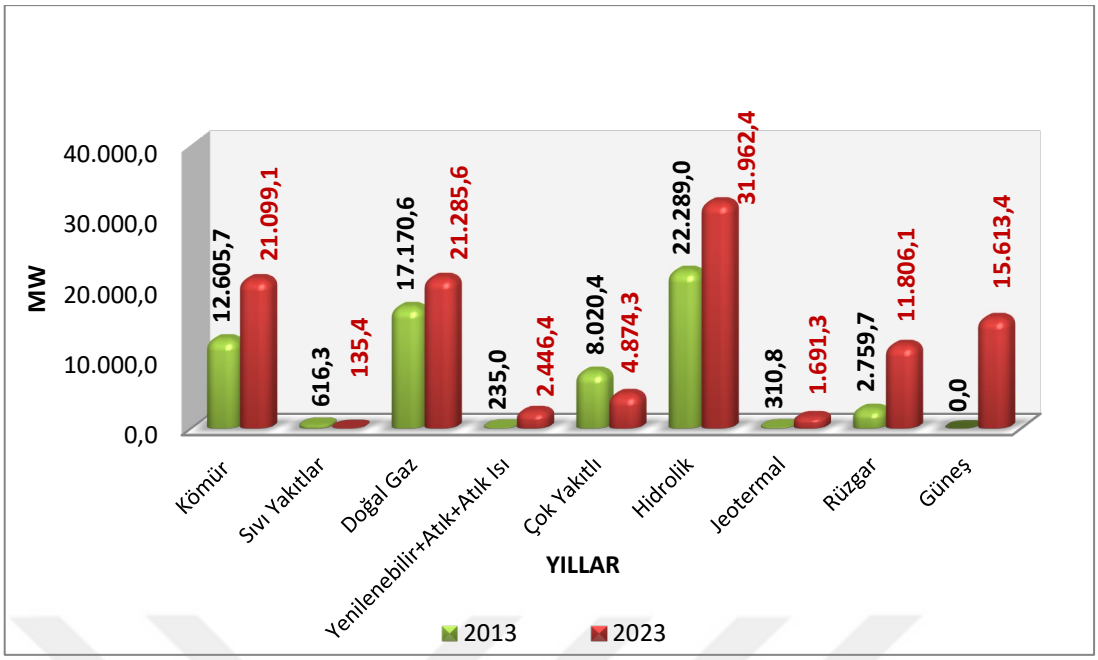
2.1 Türkiye'de Yenilenebilir Enerji

Elektrik enerjisi üretimin özellikle rüzgâr ve güneş başta olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı dünya genelinde artmaktadır. Enerjide dışa bağımlılığın yüksek olduğu ülkemizde de enerji maliyetlerini düşürmenin en etkili yolu yenilenebilir enerji kullanımından geçmektedir. Sanayileşmenin, kentleşmenin ve dijitalleşmenin artışının doğal sonucu olarak elektrik enerjisi talebimiz de artmaktadır. Ülkemizde enerji talebine karşılık vermek için birçok enerji kaynağından elektrik enerjisi üretilmektedir. Türkiye'nin toplam elektrik kurulu gücü 2023 yılı sonu itibariyle 110.914 MW'a ulaşmıştır. Şekil 2.1'de ülkemizin kurulu gücünün yıllara göre değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere her geçen yıl artan enerji talebine karşılık kurulu güç de artmaktadır.



Şekil 2.1 : Türkiye kurulu gücünün yıllar itibariyle gelişimi [15].

Şekil 2.2'de 2013-2023 yılları arasında ülkemiz kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre gelişimi verilmiştir. Çizelge 2.1'de de 2013 ve 2023 yıllarına ait enerji kaynaklarına göre kurulu güç dağılım değerleri gösterilmiştir



Şekil 2.2 : Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre gelişimi [16].

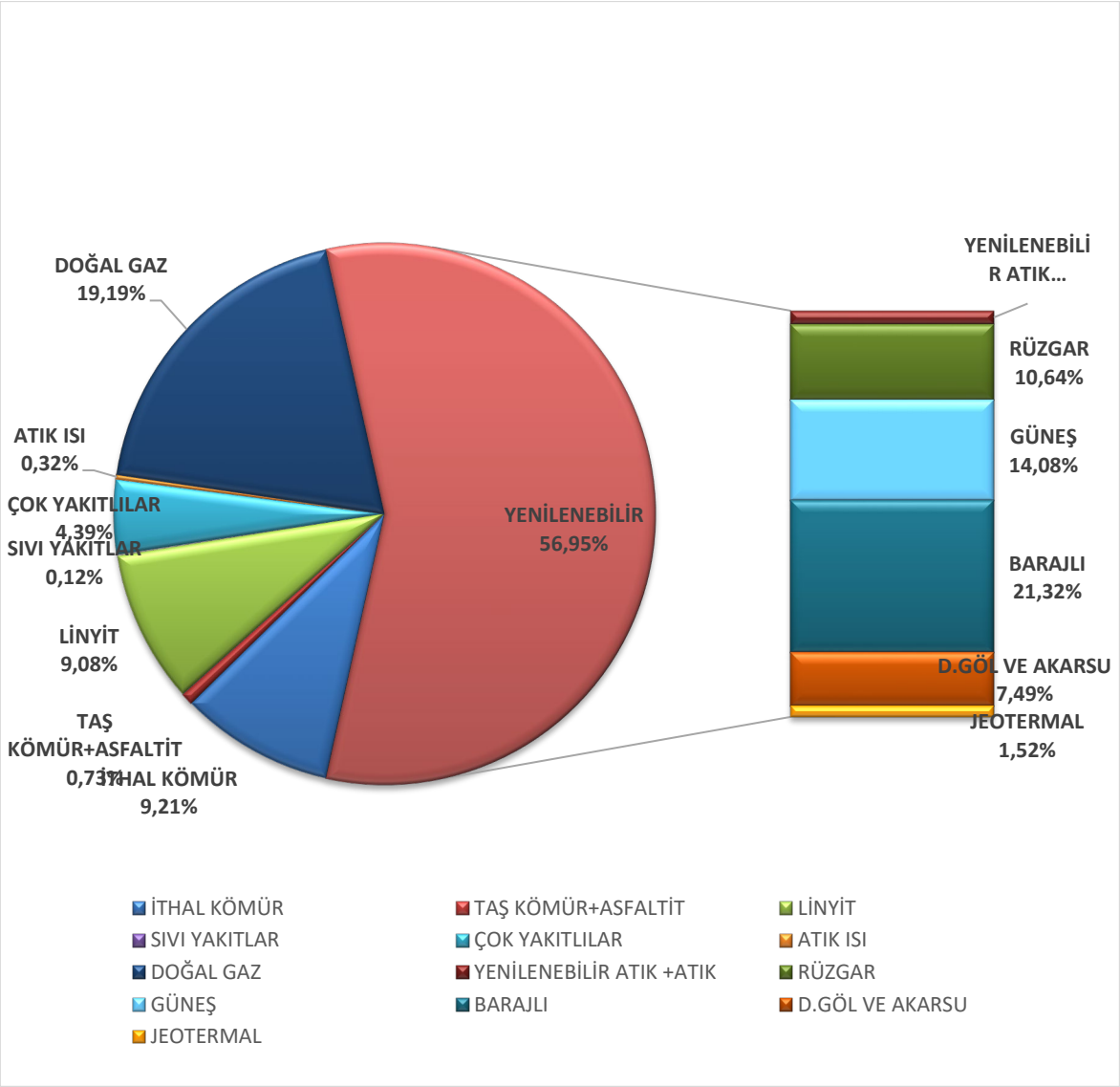
Çizelge 2.1 : Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre gelişimi [16].

Birim :MW

	Kömür	Sıvı Yakıtlar	Doğal Gaz	Yenilenebilir +Atık+Atık Isı	Çok Yakıtlı	Hidrolik	Jeotermal	Rüzgar	Güneş	Toplam
2013	12.605,7	616,3	17.170,6	235,0	8.020,4	22.289,0	310,8	2.759,7	-	64.008
%	19,69	0,96	26,83	0,37	12,53	34,82	0,49	4,31	-	100,00
2023	21.099,1	135,4	21.285,6	2.446,4	4.874,3	31.962,4	1.691,3	11.806,1	15.613,4	110.914
%	19,02	0,12	19,19	2,21	4,39	28,82	1,52	10,64	14,08	100,00

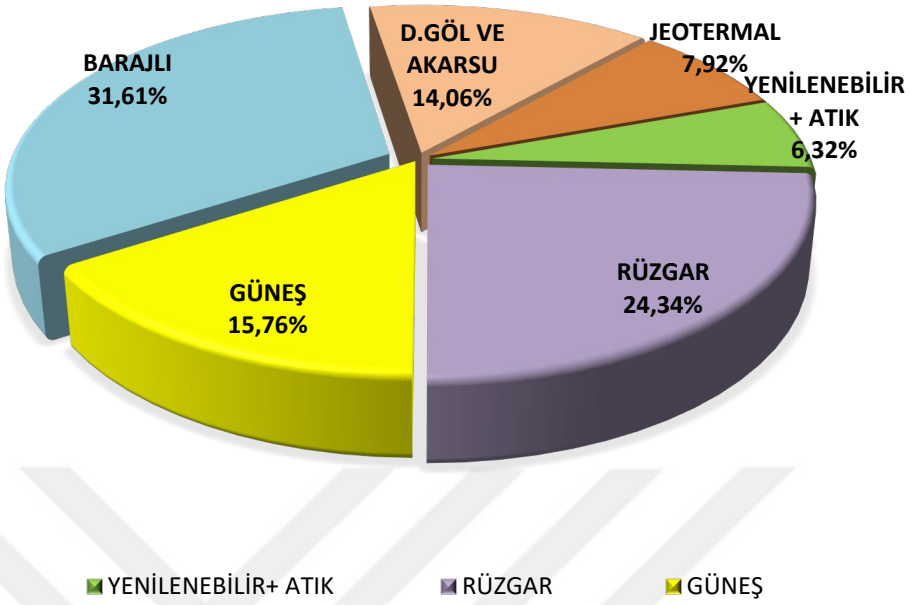
Şekil 2.2 ve Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi kurulu güç içerisindeki enerji kaynakları arasında özellikle rüzgâr ve güneş dikkat çekmektedir. Güneş enerjisi kurulu gücü 2013 yılında hiç yok iken 2023 yılı sonunda 15.613,4 MW değerine ve kurulu güç içerisindeki payı %14,08 değerine doğru ciddi bir yükseliş gerçekleştirmiştir. Rüzgâr enerjisi kurulu gücü 2013 yılında 2.759,7 MW iken 2023 yılı sonunda 11.806,1 MW değerine, kurulu güç içerisindeki payı ise 2013 yılında %4.31 değerinde iken 2023 yılı sonunda %10,61 değerine doğru ciddi bir yükseliş gerçekleştirmiştir. Ayrıca 2013 yılında yenilenebilir enerji kaynakları kurulu gücü, ülkemiz kurulu gücünün %39,99'unu oluşturmakta iken 2023 yılında bu değer %57,26'ya yükselmiştir.

Şekil 2.3'te 2023 yılı Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı verilmiştir. Buna göre 2023 yılındaki elektrik enerjisi üretiminin içerisinde yenilenebilir enerji kaynaklardan üretim oranı %56,95'tir.



Şekil 2.3 : 2023 yılı Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı [17].

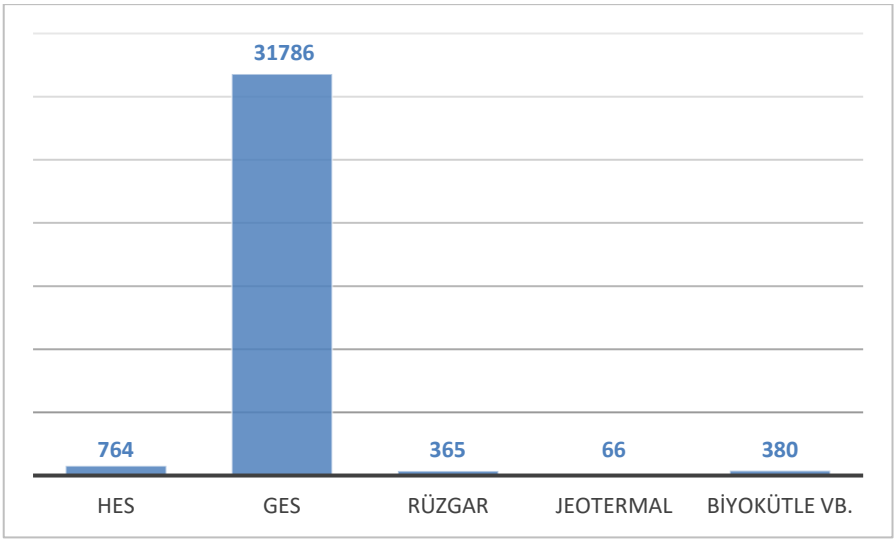
Şekil 2.4 ve Çizelge 2.2'de ise 2023 yılında Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjinin kaynaklara göre dağılımı ve üretim değerleri verilmiştir. Üretim verilerine göre ilk sırada sudan üretilen elektrik enerjisi bulunmakta, 2. sırada rüzgâr enerjisi 3. sırada ise güneş enerjisi bulunmaktadır.



Şekil 2.4 : Türkiye'nin 2023 yılı yenilenebilir kaynaklardan elektrik enerjisi üretiminin dağılımı [18].

Çizelge 2.2 : Türkiye'nin 2023 yılı yenilenebilir kaynaklardan elektrik enerjisi üretiminin dağılımı [18].

	GWh	%
YENİLENEBİLİR+ ATIK	8.855,5	6,32
RÜZGÂR	34.109,0	24,34
GÜNEŞ	22.090,6	15,76
BARAJLI	44.302,2	31,61
D.GÖL VE AKARSU	19.700,3	14,06
JEOTERMAL	11.102,1	7,92
TOPLAM	**140.159,6**	**100,00**

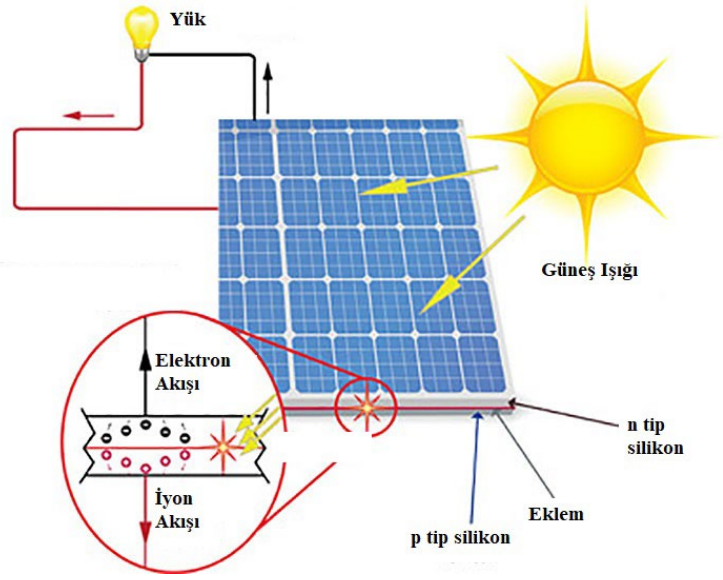


Şekil 2.5 : 2025 Mart ayı sonu itibariyle Türkiye yenilenebilir enerji üretim tesis adedi [19].

2.2 Fotovoltaik Sistem (FV Sistem)

Fotovoltaik kavramı, Yunanca "Phos" ile elektromotor kuvveti birimi olan aynı zamanda ünlü fizikçi Alessandro Volta'nın soyadı olan "Volt" kelimesinin birleşiminden meydana gelmiştir. Güneşten gelen enerjiyi fotovoltaik etkiyle elektron akışına dönüştürmek için güneş pillerini kullanarak elektrik enerjisi üretme yöntemi olarak tanımlanır [20].

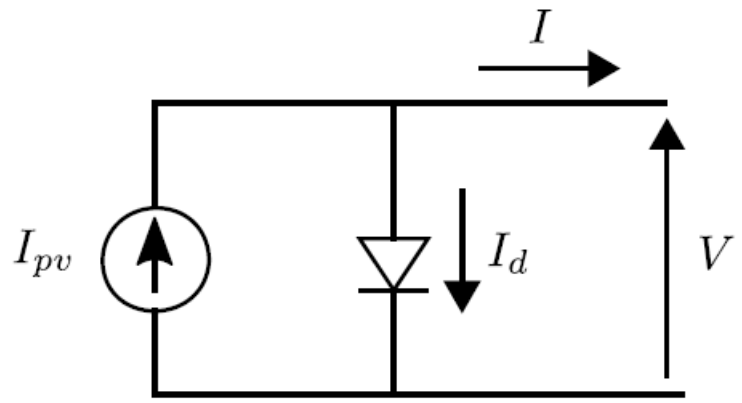
Fotovoltaik hücre üretimi çalışmaları 1839 yılından başlayarak günümüze kadar devam etmiştir. İlk başlarda %1 olan hücre verimi son çalışmalarla %41,5'lere ulaşmıştır. Bahsi geçen verimli hücre 2009 yılında Spectrolab firması tarafından geliştirilmiştir [21].



Şekil 2.6 : Fotovoltaik panel gösterimi

2.2.1 FV paneller

FV paneller güneşten gelen ışığı elektrik enerjisine dönüştürürler. PV panellerin temel ögesi, seri şekilde bir araya gelerek FV dizileri oluşturan FV hücrelerdir. FV diziler ise panelden istenen güce seri veya paralel olarak bir araya getirilirler. İdeal bir FV panel, Shocley diyotuna paralel bağlı bir akım olarak modellenir. İdeal FV panel modeli Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7 : İdeal FV panel modeli

FV panel çıkış akımı (I) formülü Denklem 2.1'deki gibi yazılabilir:

$$I = I_{pv} - I_d \tag{2.1}$$

Burada: I FV panel çıkış akımıdır, I_{pv} fotonların enerjisinden dönüştürülen elektrik enerjisinin ürettiği akımdır, I_d ise diyot akımıdır. Denklemdeki I_{pv} panel akım değeri sadece solar ışınım değerine ve panelin p-n eklemleri arasındaki sıcaklık değerine bağlıdır [22].

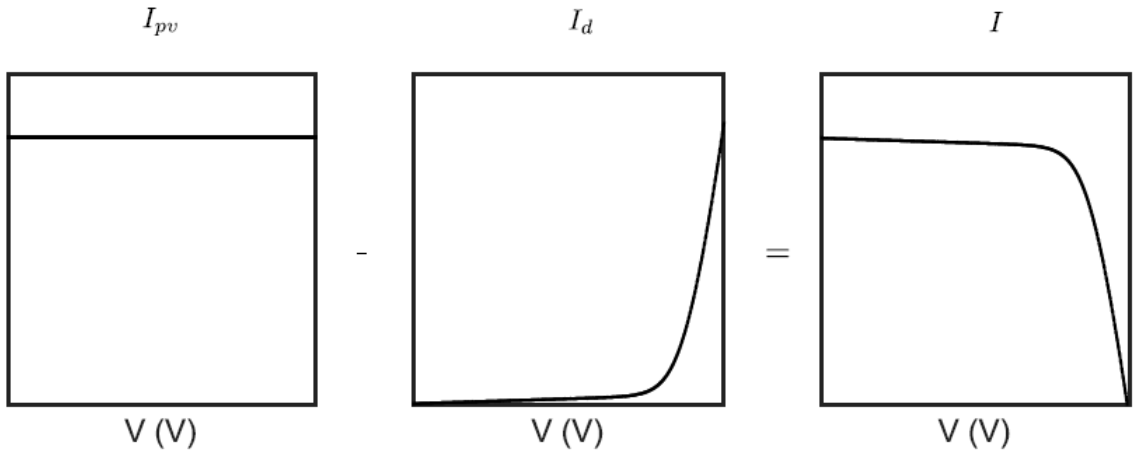
I_d diyot akımı Denklem 2.2'den elde edilir:

$$I = I_0 \left[e^{\frac{qV}{\alpha kT}} - 1 \right] \tag{2.2}$$

Burada; I_0, diyot ters doyum akımıdır. q, Coloumb cinsinden birim elektron yük değeridir. α diyotun idealizasyon faktörüdür. k Boltzman sabiti T ise Kelvin cinsinden sıcaklık değeridir.

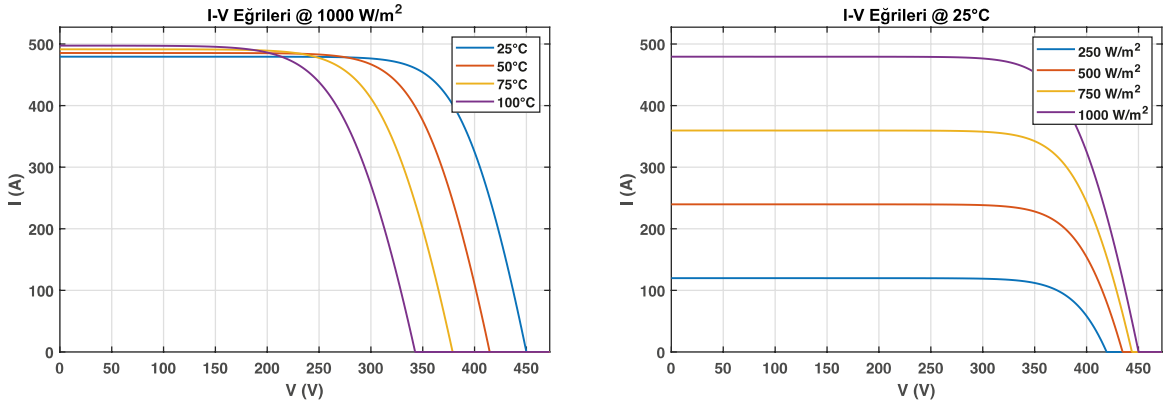
FV panelin çıkış akımının IxV grafiği Denklem 2.1'deki akımların ayrı ayrı grafikleri çizilip Denklem 2.1'deki gibi çıkarma işlemi sonucu elde edilebilir. Sabit çalışma koşullarında I_{pv} panel akımının IxV grafiği Şekil 2.8'deki 1. kısım gibi olur çünkü I_{pv} sadece

solar ışınım ve sıcaklık değerine bağlıydı ve işletme koşullarında bu değerler sabit kabul edildi. I_d diyot akımı uygulanan V gerilimine bağlı olarak değişecektir. Şekil 2.8'deki 2. kısım grafik I_d akımının IxV grafiği olur. I çıkış akımının IxV grafiği ise I_{pv} ve I_d akımlarının grafiklerinin çıkarımı ile elde edilir [22].



Şekil 2.8 : İdeal FV panel denkleminin parça parça çizimi

FV panel IxV eğrisi belirli bir ışınım ve sıcaklık değerlerinde elde edilmektedir. Bu test değerleri Standart Test Koşulları (STK) denilmektedir. Standart test değerleri ışınım için 1000 W/m^2 ve sıcaklık için 25 °C'dir. Fakat bir FV panel neredeyse hiçbir zaman STK'da çalışmayacaktır. Bundan dolayı farklı çalışma durumlarındaki IxV eğrisi Şekil 2.9'da verilmiştir. Şekil 2.9 (a)'da sabit 1000 W/m^2 ışınım değerinde ve sıcaklığın 25 °C ile 100 °C arasında değiştiği durum için IxV eğrisi verilmiştir. Şekil 2.9 (b)'de ise sabit 25 C sıcaklık değerinde ve ışınımın 250 W/m^2 ile 1000 W/m^2 arasında değiştiği durum için IxV eğrisi verilmiştir.

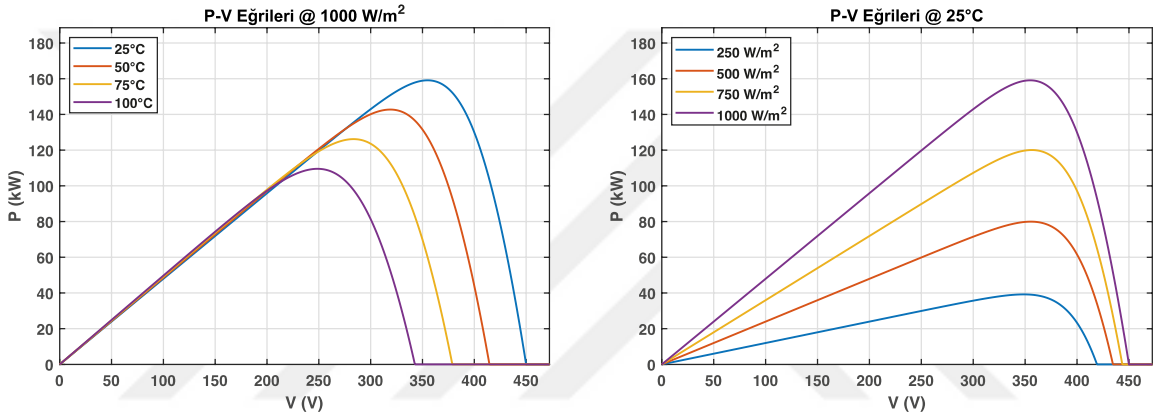


Şekil 2.9 : FV panelin farklı çalışma koşullarındaki IxV eğrisi

FV panellerin IxV eğrilerinde iki tane önemli kavram karşımıza çıkmaktadır. Bunlar; FV panel kısa devre akımı, FV açık devre gerilimi. Kısa devre akımı, FV panel çıkışı kısa

devre olduğu durumdaki FV panel akımı olarak tanımlanmaktadır. Açık devre gerilimi ise çıkış terminallerinde herhangi bir elektriksel yük bulunmadığında oluşan gerilim değeri olarak tanımlanmaktadır.

Bir başka eğri de FV panele uygulanan gerilim ile elde edilen çıkış gücü arasındaki ilişkiyi gösteren eğridir. Bu eğriyi elde etmek için, Şekil 2.9'da verilen I ve V değerleri çarpılmalıdır. Ortaya çıkan PxV eğrisi Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Bu eğriden, PV panele uygulanan gerilimin çıkıştaki elektriksel güç üzerinde çok önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Bundan dolayı PV sistemlerinden maksimum güç üretimini garanti etmek için, DC devre voltajı için referans oluşturmak üzere bir maksimum güç noktası izleyici (MGNİ) gerekmektedir. [22].



Şekil 2.10 : FV panelin farklı çalışma koşullarındaki PxV eğrisi

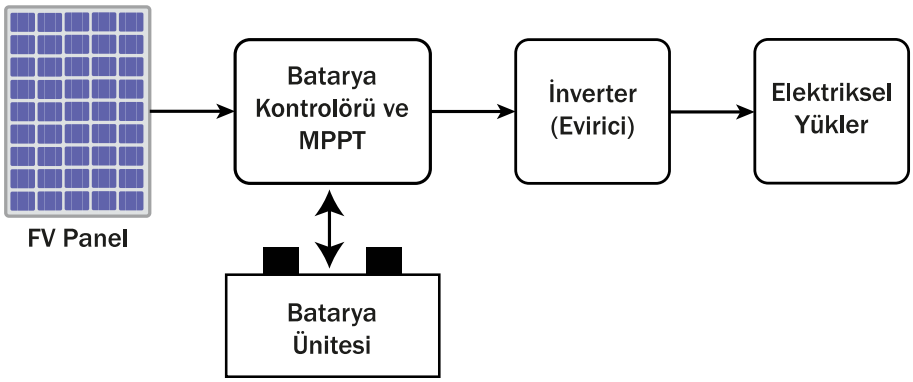
2.3 Fotovoltaik Sistem Topolojileri

Fotovoltaik sistemler şebeke bağlantılarına göre iki gruba ayrılabilir.

- Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Sistemler (Off-Grid)
- Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Sistemler (On-Grid)

2.3.1 Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemler

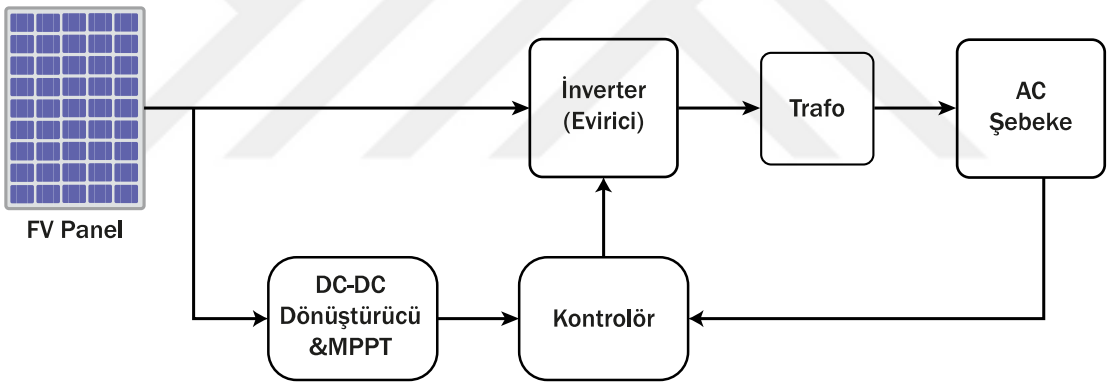
Özellikle elektrik dağıtım şebekesine uzak olan veya yakınında enerji beslemesi bulmanın zor olduğu bölgelerde kullanılırlar. Bu sistemlerde depolama isteği bulunursa şarj regülatörü ve aküler kullanılması gerekmektedir. Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemlerle ilgili örnek bir şema Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11 : Şebekeden bağımsız FV sistem şeması

2.3.2 Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler

FV hücre, panel teknolojinin gelişmesiyle ve maliyetlerinin de düşmesiyle birlikte şebekeye bağlı FV sistemlerin sayısında artışlar görülmektedir. Geçmiş dönemlere nazaran amortisman sürelerinin kısalması ve teşviklerin artması da bu alandaki yatırımların artmasını sağlamıştır. Şebeke bağlantılı FV sistemlerde güç akışını gösteren temel bir şema Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 : Şebeke bağlantılı FV sistem şeması

Şebeke bağlantılı FV sistemlerde PV paneller aracılığıyla üretilen Doğru Akım (DA) formundaki gerilim DC/AC dönüştürücü ile Alternatif Akım (AA) formundaki gerilime dönüştürülür. Bu AA gerilim şebekeye verilerek kullanıma sunulur. Bu şekilde üretilen enerjinin kullanılmayan kısmı şebekeye verilerek tesis sahibi için gelir sağlanmaktadır. Eğer FV üretim tesisi elektrik üretim santrali gibi kullanılıyorsa yani sürekli şebeke besleniyorsa içerisinde tüketim noktası yoksa, sistemin şebekeye bağlantı noktası tesisin gücüne değişiklik gösterecektir. Ülkemizde mevzuatlara göre kurulu gücü 50 MVA'ya tesisler 34,5 kV'luk dağıtım hattı gerilim seviyesinden, kurulu gücü 50 MVA'dan fazla olan tesisler ise 154 kV veya 380 kV'luk iletim hattı gerilim seviyesinden bağlanmaktadır. Şebekeye bağlı

FV sistemlerde depolama gerekliliğinin bulunmaması akü, şarj kontrol cihazı gibi elemanların masrafından kurtarmaktadır ve maliyet açısından avantaj oluşturmaktadır [23].

2.4 FV Sistemlerin Şebekeye Etkileri

Dağıtık sistemlerin artması enerji talebinin yerinden karşılanması ve ülke kurulu gücünün artması açısından faydalı olmasına rağmen mevcut enterkonnekte şebekeye bağlantısı sırasında olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Bunlar başlıca; gerilim dalgalanması, gerilim kırpışması, geçici aşırı gerilim, harmonik bileşenlerde artış ve mevcut şebeke koruma sisteminin çalışmasını zorlamalardır.

2.4.1 Gerilim dalgalanması

PV santrallerin devreye giriş çıkışları gerilimde düşüş veya yükselmeye sebebiyet verebilir. Gerilim değişmelerindeki sınırlar IEC 61000-3-3 standartlarına göre belirlenmiştir. Buna göre şebeke bağlantılı FV sistem devreye girip ve çıkarken nominal gerilimin ± %3,3'ünü aşmayacak şekildeki gerilim değişimlerine izin verilmiştir. Fakat sistemin devrede olduğu sürenin %95'inde izin verilen gerilim dalgalanma sınırı nominal değerin maksimum ± %10'dur [24].

Çizelge 2.3 : Standartlardaki gerilim dalgalanması sınır değerleri [24].

PV Sistem Çalışma Durumu	**Maksimum Değer**
Şebeke bağlantılı PV sistem Devreye Girerken	± %3,3 V
Şebeke bağlantılı PV sistem Devreden Çıkarken	± %3,3 V
Devrede olduğu sürede (%95)	± %10

PV sistemlerde geceleri genelde gerilim yükselmesi sorunuyla karşılaşılmaktadır. PV üretim tesisi gibi dağıtık sistemlerin dağıtım sisteminin alıcı ucuna bağlanması, yüklenmenin görece az olduğu durumlarda özellikle geceleri ters güç akışını başlatabilir. Bu durumda, normalde kaynak ucundan yük ucuna doğru belirli miktarda güç taşımak için çalıştırılan dağıtım hattının, ters güç akışı nedeniyle alıcı uçta yüksek gerilime sahip olması muhtemeldir [9].

2.4.2 Gerilim kırpışması

Gerilim kırpışması en sık karşılaşılan güç kalite problemidir. Gerilim kırpışmasının en büyük nedeni yük akımındaki sürekli ve ani değişimlerdir. Bu güç kalitesi olayı şebekeden bağımsız sadece yüke bağlı olan bir problemdir. Kırpışma olayı iki parametre üzerinden değerlendirilir. P_{ST} kısa dönem kırpışma yoğunluğu, P_{LT} uzun dönem kırpışma yoğunluğu olarak tanımlanmıştır. Çizelge 2.4'te IEC 61000-2-2 ve IEC 6100-3-3 standartlarına göre P_{ST} ve P_{LT} sınır değerleri verilmiştir [24].

Çizelge 2.4 : Kırpışma için belirlenen sınır değerler [24].

EC 61000	**PV Santral (IEC 100-3-3)**	**Tüketici (IEC 6100-2-2)**
PST (Kısa Dönem)	≤ 1.00	≤1.00
PLT (Uzun Dönem)	≤ 0.65	≤ 0.80

2.4.3 Harmonikler ve rezonanslar

PV sistemlerdeki inverterler içerisinde barındırdığı yarı iletken elemanların karakteristiğinden dolayı harmonikler üretmektedir. Bu durum rezonans oluşumunu tetikleyebilir ve sistemden yüksek akımların geçmesine sebebiyet verebilir. Harmonikler ayrıca hattan beslenen trafoların ve motorların ısınmasına, elektronik cihazların bozulmasına neden olurlar. Harmonikler ile ilgili sınırlamalar Toplam Harmonik Bozulma (THB) ve iç harmonik değeri üzerinden tanımlanmıştır. IEEE 519'a göre gerilim harmonik sınır değerleri Çizelge 2.5'te verilmiştir.

Çizelge 2.5 : Gerilim harmoniği sınır değerleri [24].

PCC Noktasındaki Bara Gerilimi (V)	**İç Harmonik Değeri (%)**	**Toplam Harmonik Bozulma (THB) (%)**
V ≤ 1.0 kV	5,0	8,0
1 kV < V ≤ 69 kV	3,0	5,0
69 kV < V ≤ 161 kV	1,5	2,5
161 kV < V	1,0	1,5

2.4.4 Geçici aşırı gerilim

Geçici aşırı gerilimlerde genelde dağıtık sistemlerin ve bu sistemlerde kullanılan transformatörlerin konfigürasyonu rol oynar. Geçici aşırı gerilimler tek faz-toprak arızası veya faz-faz arızası sırasında sağlam olan faz üzerinde oluşur. Bir faz ile toprak arasındaki veya iki faz arasındaki aşırı gerilimler, gerilimin şekline, nominal değerden yüzde artışına ve uygulama süresine göre sınıflandırılır. Anahtarlama veya sistem arızalarından (örn. Yük reddi, dengesiz arızalar vb.) veya doğrusal olmayan etkenlerden (ferrorezonans etkileri, harmonikler) kaynaklanan geçici aşırı gerilimler genellikle sönümsüzdür veya zayıf şekilde sönümlenir. Dağıtım hattındaki geçici aşırı gerilimler; temel olarak arıza öncesi gerilime, arıza tipine, arıza direncine, vb. bağlıdır [9].

2.4.5 Şebekede koruma problemi

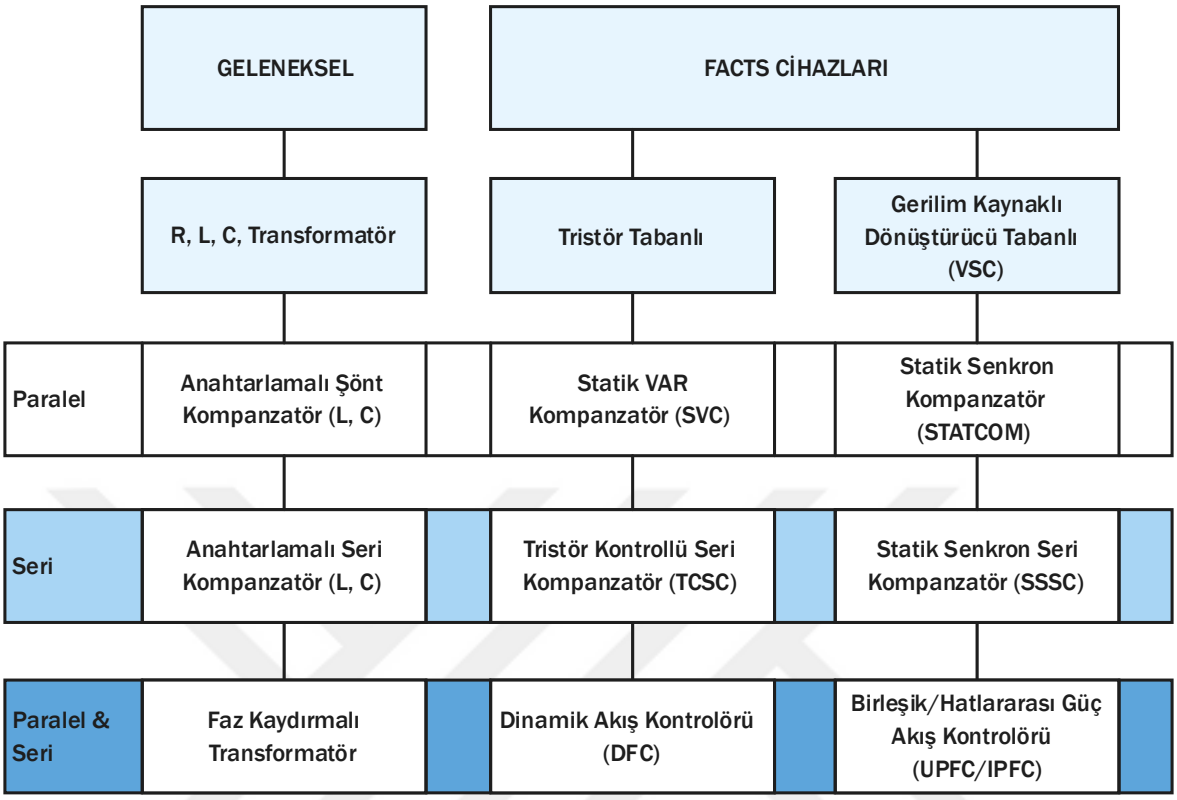
Dağıtım şebekesi koruması, normalde basit bir aşırı akım koruma şemasından oluşur, çünkü yalnızca bir besleme kaynağı vardır ve güç akışı ve yönü tanımlanarak koruma sağlanır. Dağıtık sistemlerinin dağıtım şebekesine bağlanması, arızaların ve bozuklukların tespitini zorlayacak birden fazla arıza akımı kaynağı oluşturur. Dağıtık sistemin arıza akımına katkısı, sistemdeki bölümlerin tipine ve dağıtık sistemin dağıtım şebekesinde bağlı olduğu noktadaki sistem düzenine bağlıdır. Dağıtık sistemlerin şebekeye bağlanması durumunda koruma sisteminde tespit edilen ana sorunlar şunlardır [9]:

- Otomatik tekrar kapamanın yapılmaması
- Senkronize edilmeyen tekrar kapanma
- Sigorta tekrar kapama koordinasyonu
- Ada sorunları
- Korumanın devreden çıkması
- Yanlış açma

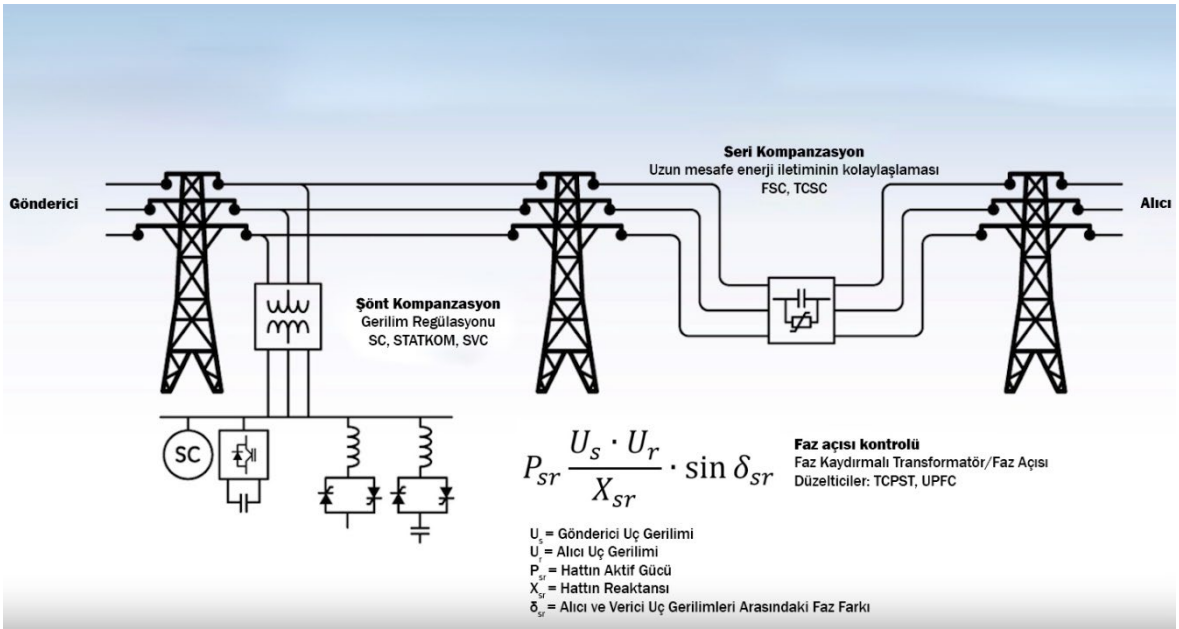
2.5 Güç Kalitesi Problemi Çözümleri

PV sistemlerin şebekeye entegrasyonunun meydana getirdiği problemler geleneksel yöntemlerle ve güç elektroniği tabanlı Esnek Güç İletim Sistemleri (FACTS) cihazları kullanılmaktadır. Geleneksel ve FACTS yöntemleri gösteren özet bir tablo Şekil 2.13'te ve

bir enerji iletim hattında kullanılan seri ve şönt cihazlarını gösterimi Şekil 2.14'te sunulmuştur.



Şekil 2.13 : Geleneksel ve FACTS cihazların özet gösterimi [25].



Şekil 2.14 : Bir iletim hattındaki seri ve şönt cihazlar [26].

2.5.1 Geleneksel yöntemler

Geleneksel dağıtım sisteminde, sistem voltajı; voltaj regülatörleri ve yük ucu reaktif güç kompansatörleri takılarak korunur. Gerilim kontrolü, güç dağıtım şebekesinin çeşitli bölgelerine gerilim regülatörleri konularak yapılır. Gerilim regülatörleri genelde kaynaktan yüke doğru tek yönlü bir akış için uygulanmaktadır. Fakat yoğun yükün olmadığı saatlerde dağıtık sistemlerden şebekeye doğru ters bir güç akışı olmaktadır. Bu durumlarda gerilim regülatörleri ters güç akışından etkilenmektedir. Dağıtık sistemlerin kendilerinin şebekedeki bara voltajlarını düzenlemesine izin verilmez [9].

Geleneksel dağıtım şebekelerinde reaktif güç kompanzasyonu, şönt kapasitör ve indüktörler kullanılarak yapılmaktadır. Gerilim yükseltmek istenildiğinde kapasitörler devreye alınmakta, gerilim düşürülmek istendiğinde ise indüktörler devreye alınmaktadır. Kapasitörler ve indüktörler sabit değerlerde olduğundan ve ara değerlere geçiş yapılacak kontrole izin vermediğinden sistemdeki değişimlere cevap verilememektedir. Ara değerleri sağlamak için birçok kapasitör ve indüktör kullanılarak anahtarlama yapılmaktadır. Fakat bu çözüm de dağıtık sistemlerin entegre edildiği bir şebeke için efektif olmamaktadır. Senkron kondenser yapısı da kullanılan diğer bir reaktif güç kompanzasyon yöntemidir. Bu yöntemde sürekli bir reaktif güç sağlansa da değişimlere karşı tepkisi yavaş kalmaktadır ayrıca yüksek maliyetinden ötürü çok tercih edilmemektedir [27].

2.5.2 FACTS cihazları kullanımı

Geleneksel alternatif akım (AA) şebekelerinde, uzun yıllar boyunca ve hala da yer yer şebeke güç kalitesini iyileştirmek amacıyla çeşitli pasif elemanlar kullanılmaktadır. Bu klasik bileşenler arasında anahtarlamalı senkron kondenserler, şönt/seri reaktörler ve kapasitörler ve faz kaydırıcı/kademe ayarlı transformatörler sayılabilir. Söz konusu elemanlar; sürekli büyüyen, gelişen ve hızla değişen şebeke dinamikleri karşısında doğru performansı göstermekte yetersiz kalmaktadır. Yarı iletken teknolojilerindeki gelişmeler neticesinde, güç elektroniği temelli cihazlar geliştirilmiştir. Alternatif akım iletim sistemlerinde kontrol edilebilirliği artırmak ve güç transfer kapasitesini yükseltmek amacıyla güç elektroniği tabanlı ve diğer statik kontrolörleri içeren aygıtlara Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) adı verilmektedir. FACTS cihazları, güç sistemlerinin kontrolünde daha yüksek hız ve hassasiyet sağlayarak, modern şebekelerin artan taleplerine yanıt vermektedir. FACTS cihazlarının şebekeye faydaları aşağıdaki gibi sıralanabilir [9].

- Reaktif güç kompanzasyonu sağlar
- Voltaj regülasyonu sağlar
- Kararlı ve geçici hal kararlılığını geliştirir
- Güç sistemi salınımlarını sönümler
- Güç aktarım kabiliyetini artırır

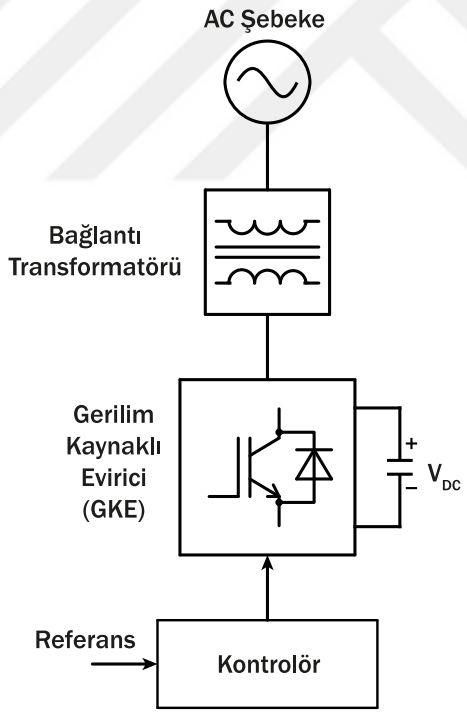
Orta gerilim dağıtım şebekelerinde, şönt FACTS cihazları genellikle çok hızlı ve sürekli reaktif güç desteği sağlamak için kullanılır. Sistem güç faktörünü iyileştirmeye ve sistem voltajını belirtilen sınırlar dahilinde düzenlemeye yardımcı olur. Hızlı yanıt vermeleri ve dinamik reaktif güç destek yetenekleri nedeniyle, FACTS Kontrolörleri, güneş ve rüzgâr enerjisinin şebekeye entegrasyonundan dolayı oluşan voltaj dalgalanmasını azaltmak için en uygun olanıdır [28]. Çoğunlukla Statik Var Kompanzatör (SVC) - tristör tabanlı bir FACTS Kontrolörü [29], [30] ve Statik Senkron Kompanzatör (STATKOM), reaktif güç kompanzasyonu sağlamak için orta gerilim dağıtım ağında sıklıkla kullanılır. FACTS cihazlarının yeteneklerinin ve birbirlerine olan üstünlüklerinin karşılaştırıldığı gösterim Şekil 2.15'te sunulmuştur. Şekilden de görüleceği gibi STATKOM cihazları hem ekonomik hem de teknik yeterlilik olarak diğer cihazlardan daha avantajlı durmaktadır.

Özellik / FACTS	Tepki Hızı	İşlemin Tekrarlanma İmkanı	Adımlar	Endüktif Kontrol	Aktif Güç Kontrolü	Maliyet
Anahtarlamalı Kapasitör	Yavaş	Kapasitörlerin boşalma süresi ve anahtarların yıpranmasından dolayı sınırlı	Sabit	Yok	Yok	Düşük
Tristör Anahtarlamalı Kapasitör	Hızlı	Var	Sabit	Yok	Yok	Orta
Senkron Kondenser	Hızlı	Sürekli	Sürekli	Var	Var	Yüksek işletme maliyeti
Statik VAR Kompanzatör (SVC)	Hızlı	Sürekli	Sürekli	Var	Yok	Büyük sistemlerde STATKOM'dan ucuz
STATKOM	Hızlı	Sürekli	Sürekli	Var	Enerji depolayıcı eleman bulunması durumunda mümkün	Yüksek kurulum maliyeti

Şekil 2.15 : FACTS cihazlarının karşılaştırılması [31].

3. STATKOM

FACTS cihazlarının keşfinden önce güç sistemlerindeki reaktif güç kontrolü, reaktör ve kapasitör ünitelerinin anahtarlanması temeline dayanmaktaydı. Fakat 80'li yılların başında güç elektroniği ve yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler arttıkça daha güçlü ve gelişmiş özellikteki evirici tabanlı FACTS aygıtları da ortaya çıkmaya başlamıştır. STATKOM teknolojisi itibariyle büyük enerji depolama elemanları olmadan doğrudan şebeke ile reaktif güç alışverişi yapabilmektedir. Bu özelliğiyle SVC'nin önüne geçmektedir. Çünkü SVC'de sabit büyük güç kapasitörleri bulunmakta ve bu kapasitörlerin anahtarlanması ile iletim veya dağıtım hattında kompanzasyon işlemleri yapılmaya çalışılmaktadır [32].



Şekil 3.1 : STATKOM basitleştirilmiş gösterimi

Şekil 3.1'de bir STATKOM'un basitleştirilmiş bir gösterimi verilmiştir. Görüldüğü üzere bir STATKOM; bir evirici, (şekildeki evirici gerilim kaynaklı fakat akım kaynaklı da olabilirdi), bir DC kondansatör, bağlantı transformatörü veya endüktansı ve bir kontrolörden meydana gelir. STATKOM girişindeki DC gerilimi; genliği ve faz açısı kontrol edilebilen, bağlantı noktasındaki frekansla aynı frekansta AC gerilime dönüştürür. STATKOM'larda

genellikle gerilim kaynaklı evirici kullanılmaktadır. Bu dönüşüm işleminin yapılması için eviriciye iletilmesi gerekli olan sinyaller kontrolör tarafından üretilir. Çünkü bu dönüştürücüler kullanıldığında harmonik bozulmalar ve çalışma kayıplar düşük olmaktadır ve cevap zamanları hızlıdır [33].

STATKOM literatürde Gelişmiş SVC olarak da adlandırılmıştır. İlk STATKOM 1 MVar gücünde üretilmiş olup bugünden bakıldığında küçük güçlü gibi görünse de ileriki uygulamalar için potansiyelini göstermiştir [34]. Daha sonraki yıllarda güç elektroniğindeki gelişmelerle birlikte birçok farklı yerde büyük güçlerde STATKOM'lar devreye alınmaya başlanmıştır. Türkiye'de ise 2004 yılında TUBİTAK-UZAY tarafından Türkiye Kömür İşletmeleri tesislerindeki reaktif güç sorununu çözmek amacıyla Akım kaynaklı Evirici (CSC) tabanlı STATKOM geliştirilmiştir [35].

Bilindiği üzere FACTS aygıtlarından olan Senkron Kondenser, içerisinde uyartımı kontrol edilen bir senkron motora sahiptir. Bu sayede güç kalite problemlerini çözmeye çalışmaktadır. STATKOM aygıtının da isminin Statik Senkron Kompanzatör olmasının nedeni Senkron Kondenser ile benzer çalışma karakteristiklerine sahip olmasıdır. Hatta STATKOM için günümüzdeki isminden önce Statik Senkron Kondenser'in kısaltması olan STATKON ismi kullanılmıştır [36]. STATKOM Senkron Kondenser'e göre hareketli parça içermediğinden reaktif güç talebine karşılık verme hızı daha yüksektir. Ayrıca STATKOM'u SVC'lere göre üstün yapan özelliklerinden biri de sistem empedansını çok değiştirmemesidir [32].

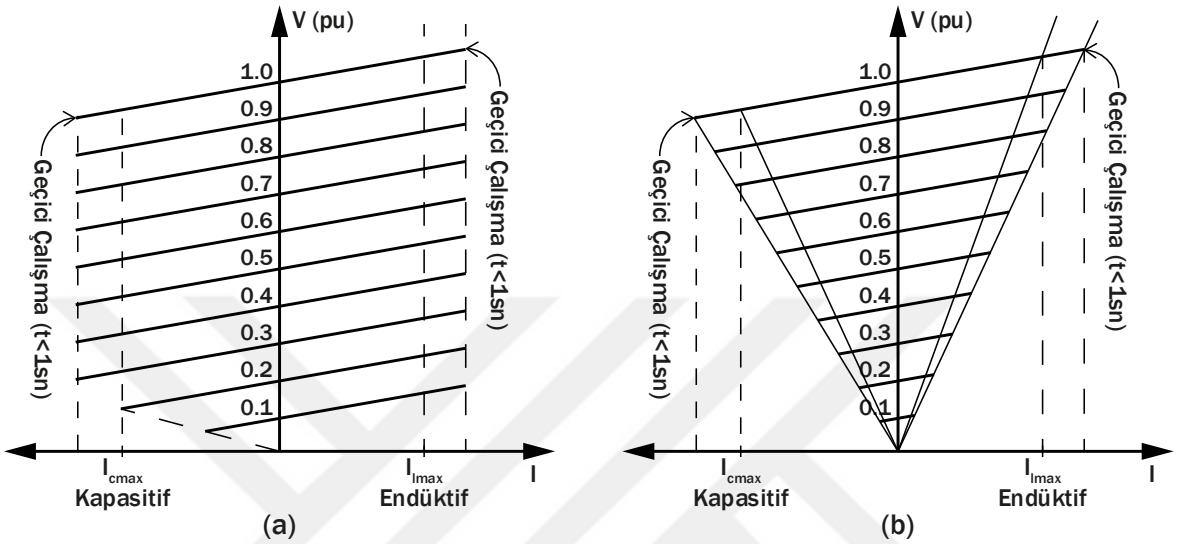
STATKOM'lar kullanıldığı enerji hatlarına göre isimlendirilmektedir ve kullanıldığı yere sağladığı faydalar farklıdır. Eğer STATKOM iletim hattında kullanılıyorsa T-STATKOM (Transmission STATCOM) veya başında herhangi bir harf olmadan STATKOM olarak, eğer ki dağıtım hattında kullanılıyorsa D-STATKOM (Distribution STATCOM) olarak isimlendirilmektedir [37]. Her iki STATKOM da aynı devre yapısına sahiptir. Fakat çözdükleri güç kalite problemleri değişmektedir.

Enerji dağıtım sistemleri, hassas yüklere de enerji sağladığından dolayı bu sistemlerde oluşan güç kalite problemlerinin olabildiğince en kısa sürede kompanze edilmesi gerekmektedir. Kompanzasyonu sağlayan FACTS cihazının kalite problemlerine hızlı cevap vermesi için FACTS cihazında kullanılan eviricinin anahtarlamasının yüksek frekanslı anahtarlama metotlarıyla yapılması gerekir. Bundan dolayı dağıtım sistemlerindeki STATKOM (D-STATKOM) eviricilerinde yüksek anahtarlama frekans kullanan Sinüzoidal

Darbe Genişlik Modülasyonu (SDGM) ve Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM) teknikleri tercih edilir [32].

3.1 STATKOM Çalışma Prensibi

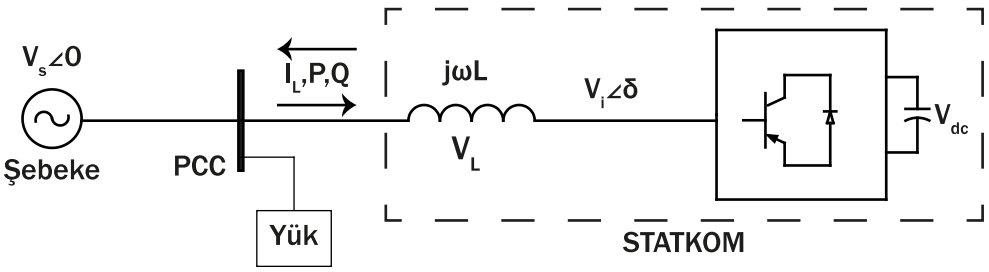
Şekil 3.2'de STATKOM'un V-I karakteristiği gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : (a) STATKOM V-I karakteristiği **(b)** SVC V-I karakteristiği [38].

Şekil 3.2'deki STATKOM akım-gerilim karakteristiğinden görüleceği gibi; STATKOM, AC şebeke geriliminden bağımsız şekilde endüktif ve kapasitif akımı belli limitler dahilinde verebilmektedir. STATKOM'un özellikle herhangi bir sistem geriliminde kapasitif güç üretebilmesi, sistemdeki gerilim çökmeleri esnasında ve sonrasında sistem gerilimini destekleyici olarak kullanılmasına olanak sunar. STATKOM akım-gerilim karakteristiği; evirici çıkış gerilimi ve bağlantı elemanının kaçak reaktans değerine bağlıdır. Literatürde bu kaçak reaktans değeri; %10 ila %20 arasındaki gerilim düşümü ve gerilim yükselmelerini karşılayabilmesi 0,1 ile 0,2 per-unit (pu) arasında seçilir [39]. STATKOM'un düşük şebeke gerilimlerinde dahi reaktif akım üretebilme yeteneği SVC karşısında üstünlüğünü gösteren bir diğer unsurdur.

Şekil 3.3'te bir Dağıtım STATKOM (D-STATKOM)'unun tek hat görünümü verilmiştir. Burada PCC olarak gösterilen kısım "Ortak Bağlantı Noktası" ifadesinin İngilizcesinin kısaltmasıdır.



Şekil 3.3 : STATKOM tek hat görünümü

V_s : Şebeke gerilimi

V_i : Eviricinin çıkış gerilimi

V_L : Endüktans üzerindeki gerilim

I_L : Hat akımı

P : STATKOM aktif gücü

Q : STATKOM'un reaktif gücü

δ : Şebeke (V_s) ve Evirici (V_i) gerilimleri arasındaki faz açısı farkı

L : Bağlantı endüktansının kaçak endüktansı

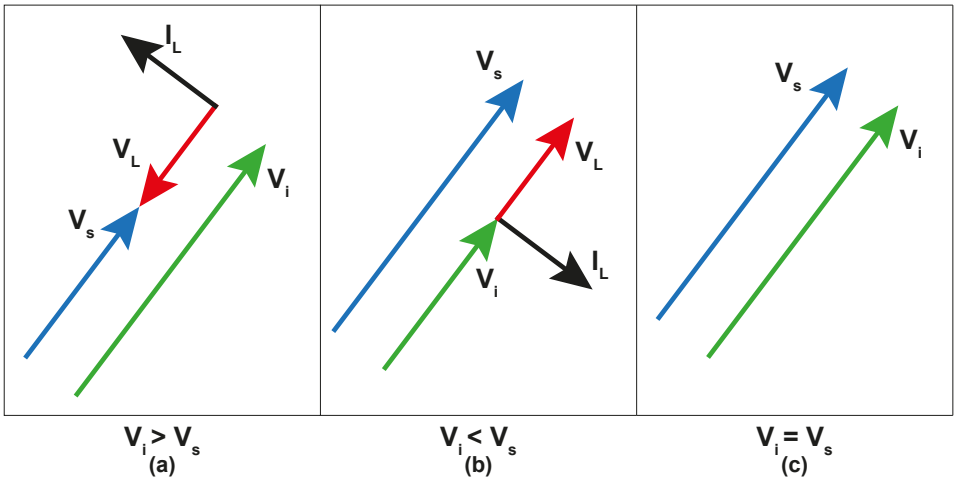
jωL=jX : Endüktif reaktans

AC sistemlerde, bilindiği üzere frekansı aynı olan iki AC kaynak bir seri endüktans ile bağlandığında aralarındaki güç değişimleri; gerilimlerinin faz açılarına ve genliklerine bağlıdır. Buna göre kaynaklar arasındaki aktif güç transferi faz açısı ileri olandan faz açısı geri olana doğrudur. Reaktif güç transferi ise yüksek genlikli gerilime sahip olan kaynaktan düşük genlikli gerilime sahip olan kaynağa doğrudur [33].

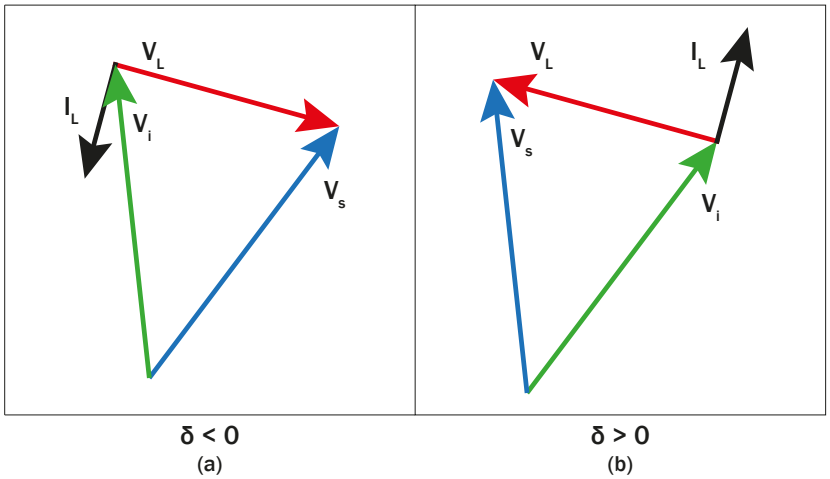
STATKOM ve AC sistem arasındaki güç değişiminin kontrolü; STATKOM evirici çıkış geriliminin genliği ve faz açısının ayarlanmasıyla yapılır. STATKOM'larda eğer büyük bir akümülatör veya büyük güçte bir DC gerilim kaynağı yoksa sadece küçük bir kondansatör varsa STATKOM ve AC sistem arasında sadece reaktif güç değişimi olur. Aktif güç akışı ise sadece AC sistemden STATKOM'a doğrudur. STATKOM'un evirici çıkışındaki AC gerilimin, girişindeki DC gerilim ile arasındaki ilişki $V_i = kV_{DC}$ şeklinde gösterilebilir. Buradaki k katsayısı; eviricinin kontrol tekniğine, anahtarlama sinyallerine ve evirici konfigürasyonu gibi birçok farklı parametreye göre değişmektedir [34]. Bahsi geçen parametrelerin kontrolüyle çıkış geriliminin genliği değiştirilebilir ve bu sayede reaktif güç akışı kontrol edilebilir.

STATKOM ile güç sistemi arasındaki reaktif güç alışverişi evirici çıkış gerilimi olan V_i'in genliğinin değişimiyle kontrol edilir. V_i gerilimi, sistem gerilimi (V_s) arasındaki farka göre hat reaktansı ($j\omega L$) üzerinden reaktif akım akışı olacaktır. Akan akımın yönünü ise V_s ve V_i gerilimlerinden hangisinin genliğinin daha büyük olduğu belirler. Eğer evirici çıkış geriliminin genliği şebekenin geriliminin genliğinden daha büyükse ($V_i > V_s$) I_L akımı hat reaktansı aracılığıyla ($j\omega L$) STATKOM'dan şebekeye doğru akar ve evirici AC şebeke için kapasitif güç üretmiş olur. Eğer evirici çıkış geriliminin genliği şebekenin geriliminin genliğinden daha küçükse ($V_i < V_s$) bu kez de I_L akımı hat reaktansı ($j\omega L$) aracılığıyla şebekeden STATKOM'a doğru akar ve evirici endüktif güç tüketmiş olur. Eğer evirici ve AC şebeke gerilimlerinin genlikleri arasında fark yoksa ($V_i = V_s$) bu durumda I_L akımı akmayacak ($I_L = 0$) ve STATKOM ile şebeke arasında herhangi bir reaktif güç değişimi olmayacaktır. STATKOM ve şebeke arasındaki reaktif güç alışverişini gösteren fazör diyagramları Şekil 3.4'te verilmiştir. Şekil 3.4'teki çizimlerde STATKOM evirici çıkış gerilimi V_i ile AC şebeke gerilimi V_s arasındaki faz açıları farkı olan δ açısı yaklaşık olarak 0 kabul edilmiştir.

Evirici gerekli olan DC gerilim uçlarına bağlı olan kondansatör ile karşılanmaktadır. Kondansatör, evirici gerilimi ile şebeke gerilim arasındaki faz farkına göre şarj veya deşarj olmaktadır. STATKOM eviricisinde ve bağlantı endüktansında -kullanıldığı yere göre bu bir transformatör de olabilir- oluşan aktif güç kayıplarını telafi edebilmek için şebekeden STATKOM'a doğru bir aktif güç akışına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu aktif güç ihtiyacı için evirici gerilimi ile şebeke gerilimi arasında geri fazda küçük bir faz farkı oluşturulur. STATKOM ve şebeke arasındaki aktif güç alışverişini gösteren fazör diyagramları Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.4 : STATKOM reaktif güç değişimi fazör diyagramları



Şekil 3.5 : STATKOM aktif güç değişimi fazör diyagramları

Çizelge 3.1'de yukarıda anlatılan STATKOM ve şebeke arasındaki aktif-reaktif güç ilişkileri özetlenmiştir.

Çizelge 3.1 : Şebeke-STATKOM güç ilişkisi [40].

Gerilim ve Açı İlişkisi	***Güç Alışverişi***		
	STATKOM	→ ←	***AC Şebeke***
$\|V_i\| > \|V_s\|$ (δ = 0)	Q	(endüktif) →	
$\|V_i\| < \|V_s\|$ (δ = 0)		(endüktif) ←	Q
δ < 0	P	→	
δ > 0		←	P

STATKOM ve şebeke arasındaki güç alışverişlerini açıklayan denklemler aşağıda belirtilmiştir. Denklemler, Şekil 3.3'teki tek hat çizimine göre elde edilmiştir. STATKOM'dan şebekeye doğru şekilde akan I_L akımı Denklem 3.1 ile hesaplanır.

$$I_L = \frac{V_i \angle \delta - V_s \angle 0}{jX} = \left[\frac{V_i \cdot sin\delta}{X} + j\frac{V_s - V_i \cdot cos\delta}{X}\right] \qquad (3.1)$$

I_L akımının aktif ve reaktif bileşenleri Denklem 3.2 ve Denklem 3.3 ile gösterilmiştir.

$$I_p = \frac{V_i \cdot sin\delta}{X} \tag{3.2}$$

$$I_q = \frac{V_s - V_i \cdot cos\delta}{X} \tag{3.3}$$

Aktif ve reaktif güç eşitlikleri ise Denklem 3.4 ve 3.5 ile elde edilebilir.

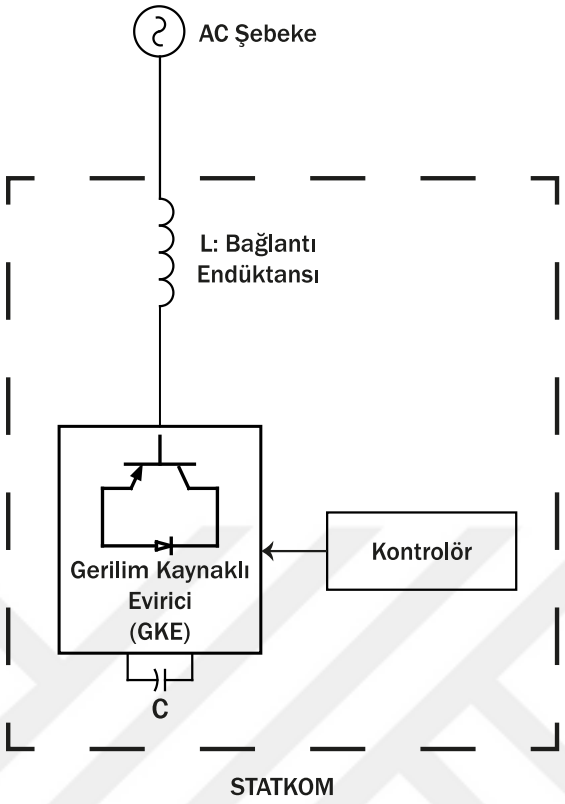
$$P = \frac{V_s \cdot V_i \cdot sin\delta}{X} \tag{3.4}$$

$$Q = V_s \cdot \frac{V_s - V_i \cdot cos\delta}{X} \tag{3.5}$$

Bağlantı endüktansı ve eviricinin kayıplarının olmadığı varsayılırsa kaynaklar arasında aktif güç akışı olmayacaktır ve bu durumda da evirici çıkış gerilimi V_i ile V_s arasındaki faz farkı $\delta = 0$ olacaktır. Bu şartlar altında Denklem 3.5 $\delta = 0$ durumuna göre düzenlenirse Denklem 3.6 elde edilecektir.

$$Q = V_s \cdot \frac{V_s - V_i}{X} \tag{3.6}$$

3.2 STATKOM Yapısı ve Elemanları

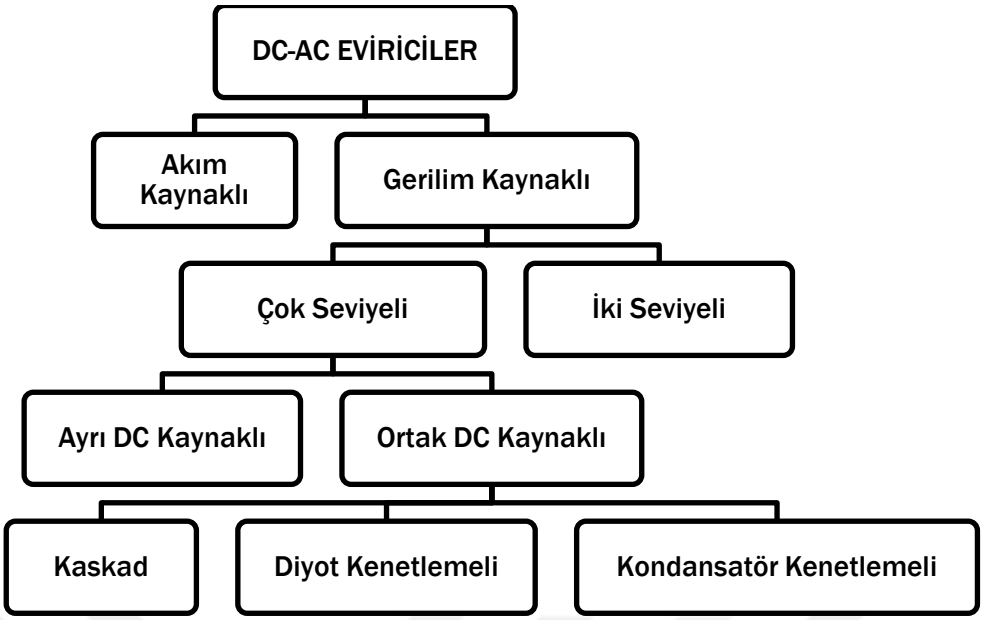


Şekil 3.6 : STATKOM genel gösterimi

STATKOM'a ait genel bir gösterim Şekil 3.6'da sunulmuştur. Bir STATKOM yapısal olarak; DC gerilim sabit tutan bir kapasitör, gerilim kaynaklı evirici (inverter), AC sistem bağlantısı için endüktans ve kontrolörden meydana gelir. STATKOM tasarımı yapılırken bu elemanlara ait büyüklükler doğru hesaplanıp belirlenmelidir.

3.2.1 DC-AC eviriciler

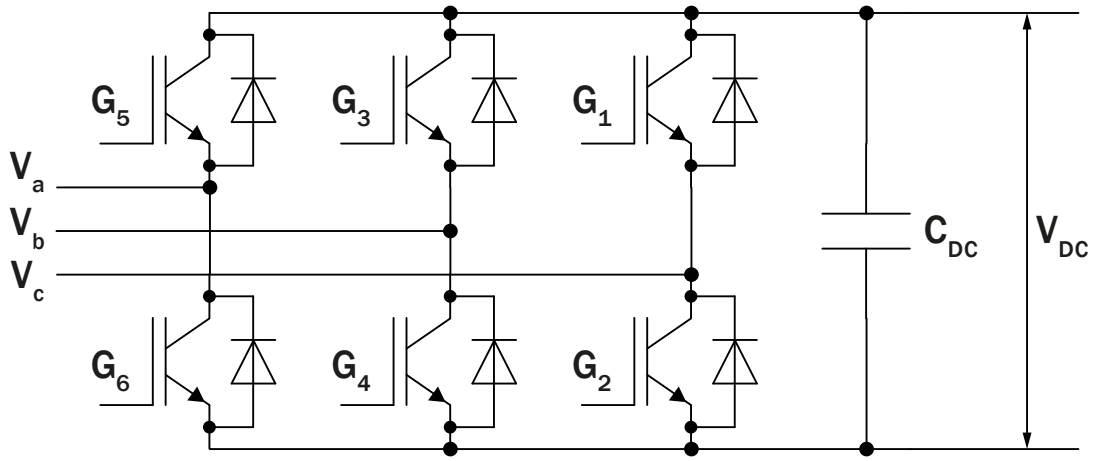
STATKOM'larda DC gerilimi istenilen özelliklerdeki AC gerilime dönüştürmek için diğer FACTS aygıtlarında olduğu gibi DC-AC eviriciler kullanılmaktadır. Şekil 3.7'de DC-AC dönüştürücülerin genel bir sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 3.7 : İki seviyeli 3 fazlı gerilim kaynaklı evirici

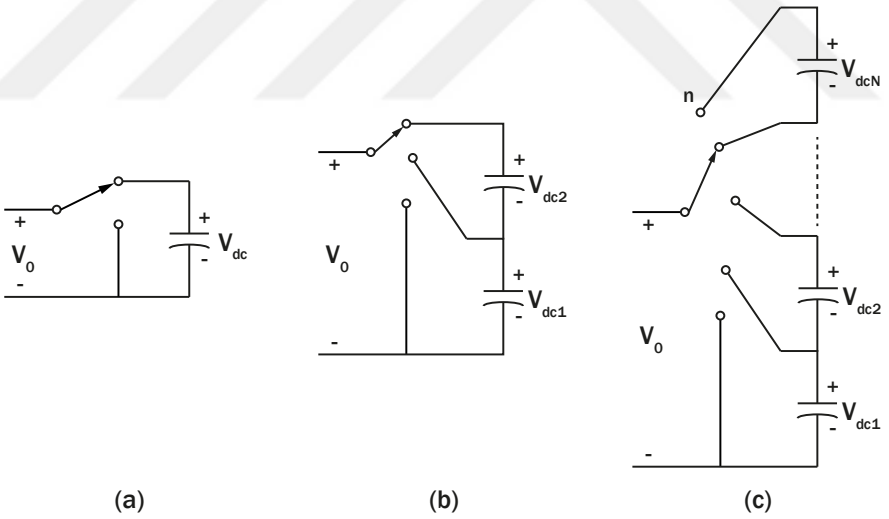
Eviriciler girişindeki kaynağa göre adlandırılmaktadır. Eğer girişinde sabit gerilim var ise gerilim kaynaklı evirici, girişinde sabit akım var ise de akım kaynaklı evirici olarak adlandırılmaktadır. Güç sistemlerinde kalite problemlerinde kullanılan eviriciler akım kaynaklı veya gerilim kaynaklı olabilmektedir. Ancak STATKOM'larda iki yönlü güç alışverişi olduğundan dolayı eviricilerde kullanılan yarıiletken elemanların iki yönlü akım tutabilmesi gerekmektedir. Eviricinin bu işlevselliği kazanması için ilave elamanlar eklenmesi ve bazı düzenlemeler yapılması gerekmektedir. Bu durumda sistemdeki kayıplar artacak ve maliyet de yükselecektir. Bundan dolayı dağıtım sistemlerinde akım kaynaklı eviricilerden ziyade gerilim kaynaklı eviriciler tercih edilmektedir [32].

Eviricilerde özellikle daha düşük güçlü sistemler için iki seviyeli eviriciler kullanılarak daha kaliteli akım ve gerilim dalga karakteristikleri elde edilmektedir. Fakat orta ve yüksek güçlü sistemler için iki seviyeli eviriciler hem ekonomik olarak uygun olmamakta hem de kayıpları fazla olmaktadır. Şekil 3.8'de iki seviyeli 3 fazlı gerilim kaynaklı eviricinin devre şeması verilmiştir. Çok seviyeli eviricilerin çıkış gerilimlerinde daha az harmonik bulunması ve seviye sayısının kolayca artırılıp şebekeye kolay bağlanabilmesinden dolayı yüksek güçlü veya yüksek gerilimli sistemlerdeki STATKOM'larda tercih edilmektedir [32].



Şekil 3.8 : İki seviyeli 3 fazlı gerilim kaynaklı evirici

Çok seviyeli eviriciler birden fazla güç elektroniği yarı iletken elemanından ve kondansatörler içerir. Bu eviricilerde çıkış gerilimi kapasitör gerilimlerinin toplamından oluşmaktadır. İki seviyeli evirici 1 adet kondansatör içerir ve 2 seviyeli gerilim oluşturur, 3 seviyeli evirici 2 adet kondansatör içerir ve 3 seviyeli gerilim oluşturur, N seviyeli evirici ise (N-1) adet kondansatör içerir ve N seviyeli gerilim oluşturur [41]. Çok seviyeli eviricilere ait olan genel diyagram Şekil 3.9'da verilmiştir.

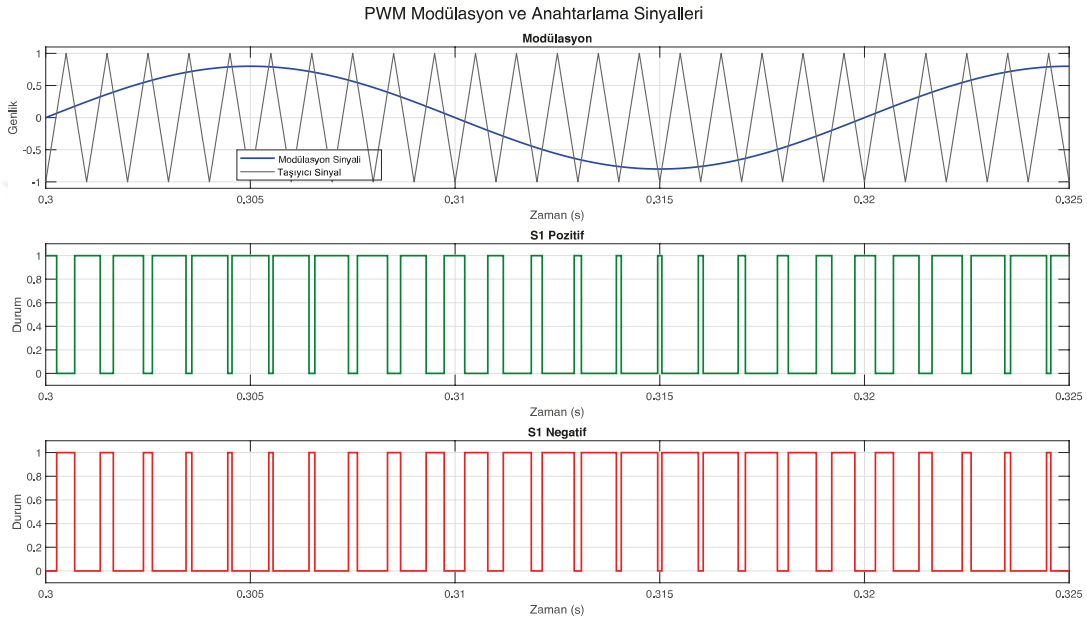


Şekil 3.9 : Çok seviyeli evirici bir faz bacak diyagramı **(a)** iki seviyeli **(b)** üç seviyeli **(c)** n seviyeli

Eviricinin anahtarlanması

Daha önceki kısımlarda dağıtım sistemlerindeki STATKOM'larda eviricilerin anahtarlanmasında yüksek anahtarlama frekansına sahip olan Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SDGM) ve Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM) tekniklerinin kullanıldığından bahsedilmişti. Bu tez çalışmasında SDGM tekniği kullanıldığı için bu tekniğin anlatımına yer verilecektir.

SDGM yönteminde; istenilen sinüzoidal çıkış gerilimini içeren faz dalgaları aralarında 120 derece olacak şekilde ($V_a = V \cdot \sin(\omega t)$, $V_b = V \cdot \sin(\omega t - 120)$, $V_c = V \cdot \sin(\omega t + 120)$) referans olarak kabul edilir. Daha önceden anahtarlama parametreleri ayarlanmış üçgen dalga ise taşıyıcı dalga olarak alınır. Yöntem, referans dalga ile taşıyıcı dalganın karşılaştırılmasına dayanır. Fazlara ait yarı iletken anahtarlar; üçgen dalga ve referans dalganın karşılaştırılması sonucu tetiklenmektedir. Her bir faz için 1 adet pozitif ve 1adet negatif tetikleme sinyalleri üretilerek sinüzoidal dalga oluşturulmaya çalışılır [42].



Şekil 3.10 : Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu üretimi

Şekil 3.10'da Bir faza ait Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu üretimini gösteren çizimler bulunmaktadır. Modülasyon başlığı altındaki grafikte referans sinüzoidal dalga ve taşıyıcı üçgen dalga görünmektedir. S1 anahtarlama başlığı altındaki grafikte pozitif anahtarlama sinyalleri ve S2 negatif başlığı altındaki grafikte ise negatif anahtarlama sinyalleri gösterilmektedir. Referans yani modülasyon dalganın genliğinin taşıyıcı dalganın genliğine oranına modülasyon indeksi (m_i) denilmektedir.

$$m_i = \frac{V_{referans}}{V_{taşıyıcı}} \tag{3.7}$$

Modülasyon indeksinin 0 ile 1 değerleri arasında olduğu durumda evirici lineer çalışma bölgesindedir ($0 \leq m_i \leq 1$). Bu bölgede çıkış geriliminin 1. harmonik bileşeni modülasyon indeksi ile doğrusal olarak değişmektedir. Lineer çalışma bölgesindeki evirici

çıkışı faz-faz gerilim değeri Denklem 3.8'deki eşitlikle elde edilir. Eviricide bir fazda maksimum $V_{DC}/2$ değerinde gerilim oluşabileceğinden ve çıkış hat gerilimi faz-nötr gerilimin $\sqrt{3}$ katı olduğundan Denklem 3.8'deki eşitlik oluşmuştur. Burada hesaplanan gerilim değerleri faz-faz geriliminin genlik değerleridir. Gerilimin RMS (efektif) değeri istenirse elde edilen değer $\sqrt{2}$'ye bölünmelidir.

$$0 \leq m_i \leq 1 \; durumunda; \; V_{ab} = V_{bc} = V_{ac} = \sqrt{3} \cdot \frac{V_{DC}}{2} \cdot m_i \qquad (3.8)$$

Daha yüksek çıkış gerilim genliği elde etmek için modülasyon dalgasının genliği üçgen dalganın genliğinden daha fazla yapıldığında modülasyon indeks değeri 1'in üzerine çıkar. Modülasyon indeksinin 1'den büyük olduğu çalışma bölgesi aşırı modülasyon bölgesi olarak adlandırılır. Bu bölgede evirici çıkış gerilimi ile DC giriş gerilim arasındaki ilişki doğrusal olmaktan çıkar. Aşırı modülasyon durumunda ($m_i > 1$) çıkış hat gerilimi Denklem 3.9 ile elde edilir. Burada hesaplanan gerilim değerleri faz-faz geriliminin genlik değerleridir. Gerilimin RMS (efektif) değeri istenirse elde edilen değer $\sqrt{2}$'ye bölünmelidir.

$$\sqrt{3} \cdot \frac{V_{DC}}{2} < V_{ab} = V_{bc} = V_{ac} =< \frac{4}{\pi} \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{V_{DC}}{2} \qquad (3.9)$$

Aşırı modülasyon bölgesinde çalışıldığında evirici çıkış geriliminde yüksek dereceli harmonik bileşenlerin sayısı artmaktadır.

3.2.2 DC hat kondansatörü

STATKOM'u oluşturan pasif elemanlardan olan DC hat kondansatörü evirici girişindeki DC gerilimin; kontrolör tarafından istenilen değerlerde kalmasını sağlar. Kondansatör boyutlandırılırken minimum kapasite değeri Denklem 3.10'daki gibi hesaplanır [43].

$$C_{DC} = \frac{I_{rms}}{\sqrt{3}\pi \cdot f \cdot \Delta V_{DC}} \left[1 - sin\left(cos^{-1}(m_i \cdot \frac{\pi}{4})\right)\right] \qquad (3.10)$$

C_{DC}: Minimum kapasite değeri

I_{rms}: STATKOM'un kompanze edebileceği maksimum reaktif gücü sağlayan efektif akım değeri

f: Temel frekans

ΔV_{DC}: DC gerilimin değişim miktarı

m_i: Modülasyon indeksi

Denklem 3.10 göz önüne alındığında gerilim dalgalanması ve modülasyon indeksi büyüklüklerinin kapasite değerini belirlemedeki önemi görülmektedir. Modülasyon indeksi (m_i) ve DC gerilim dalgalanması (ΔV_{DC}) parametreleri kondansatör boyutlandırmasında zıt etkilere sahiptir. Bundan dolayı daha geniş çalışma aralıklarında çalışabilmek için maksimum modülasyon oranı kullanılarak hesaplamaların yapılması gerekmektedir. DC gerilim dalgalanmasında en fazla %10'luk bir dalgalanma olacak şekilde hesaplamalar yapılmaktadır.

3.2.3 Bağlantı endüktansı

STATKOM'daki bir diğer önemli pasif eleman ise uygulamaya göre bağlantı trafosu veya bağlantı endüktansıdır. STATKOM'un şebekeyle güç alışverişi yapabilmesi için bir bağlantı endüktansı üzerinden şebekeye bağlanması gerekmektedir. Aynı zamanda bu bağlantı endüktansı evirici akımları için bir nevi filtre olarak da kullanılmaktadır. Literatürde; bağlantı endüktansının değerinin, sistem empedansının 0,1 ile 0,2 pu değerleri arasında alınmasının uygunluğu belirtilmektedir [44].

3.3 STATKOM Kontrol Metotları

Önceki sayfalarda "STATKOM'un çalışma ilkesi" başlığı altındaki bölümde STATKOM'un bir fazına ait güç denklemleri türetilmiştir. Türetilen STATKOM aktif ve reaktif güç eşitlikleri Denklem 3.11 ve 3.12'deki gibidir.

$$P = \frac{V_s \cdot V_i \cdot sin\delta}{X} \tag{3.11}$$

$$Q = V_s \cdot \frac{V_s - V_i}{X} \cdot cos\delta \tag{3.12}$$

STATKOM evirici çıkış geriliminin 1. harmonik bileşeninin faz-nötr etkin değeri Denklem 3.13'teki gibi hesaplanır.

$$V_i = m_i \cdot \frac{V_{DC}}{2 \cdot \sqrt{2}} = 0{,}35 \cdot m_i \cdot V_{DC} \tag{3.13}$$

V_{DC}, DC hat gerilimini; m_i ise modülasyon indeksini temsil etmektedir. Denklem 3.13'teki eşitlik 3.11 ve 3.12'de yerine yazıldığında; DC hat gerilimi ve modülasyon indeksinin de içerisinde olduğu ve daha anlaşılır olan eşitlikler ortaya çıkar.

$$P = \frac{0{,}35 \cdot V_s}{X} \cdot m_i \cdot V_{DC} \cdot sin\delta \tag{3.14}$$

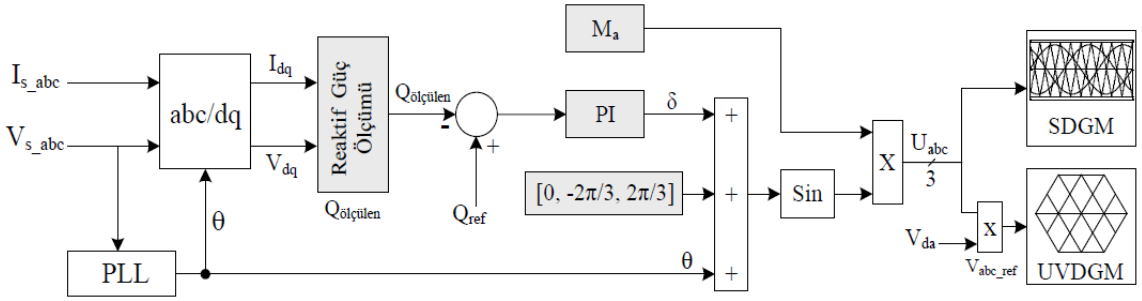
$$Q = \frac{V_s}{X} \cdot (V_s - 0{,}35 \cdot m_i \cdot V_{DC} \cdot cos\delta) \tag{3.15}$$

Denklem 3.15'teki reaktif güç eşitliğine bakıldığında, şebeke ve STATKOM'un ürettiği veya tükettiği reaktif gücün; şebeke gerilimi, bağlantı endüktansı, DC giriş gerilimi, modülasyon indeksi ve faz farkına (δ) bağlı olduğu görülmektedir. Parametreler arası bu ilişkilerden dolayı şebeke STATKOM arasındaki reaktif gücün kontrolü; DC hat gerilimini sabit tutup modülasyon indeksi değiştirilerek veya modülasyon indeksini sabit tutup DC hat gerilimi değiştirilerek veya her ikisinin de değiştirilmesi ile yapılabilir [32]. Bahsedilen bu yöntemlerden hareketle STATKOM reaktif gücünün denetimi için literatürde aşağıdaki kontrol metotları sunulmaktadır.

- Faz açı denetim metodu
- Sabit DC hat gerilim metodu
- Doğrudan akım denetim metodu
- Dolaylı akım denetim metodu

3.3.1 Faz açı denetim metodu

Bu denetim metodunda reaktif gücün kontrolü için modülasyon indeksi sabit tutulup DC hat gerilimi değiştirilmektedir. Bilindiği üzere STATKOM'da şebeke gerilimi V_s ile evirici çıkış gerilimi V_i'nin genlikleri arasındaki ilişki reaktif gücün akış yönünü belirlemektedir. Bu yöntemde de eviricinin girişindeki DC kapasitörün şarj ve deşarjı kontrol edilerek DC hat gerilimi artırılıp azaltılmakta ve bu şekilde de evirici çıkışındaki AC gerilim V_i değiştirilmektedir. Kapasitörün şarj veya deşarjı ise aktif güç kontrolü için kullanılan δ (faz açısı)'nın değiştirilmesiyle sağlanmaktadır. Reaktif güç kontrolü sağlanırken sistemde olan kayıpların telafisi için V_i gerilimi V_s geriliminden geri fazda tutulur.



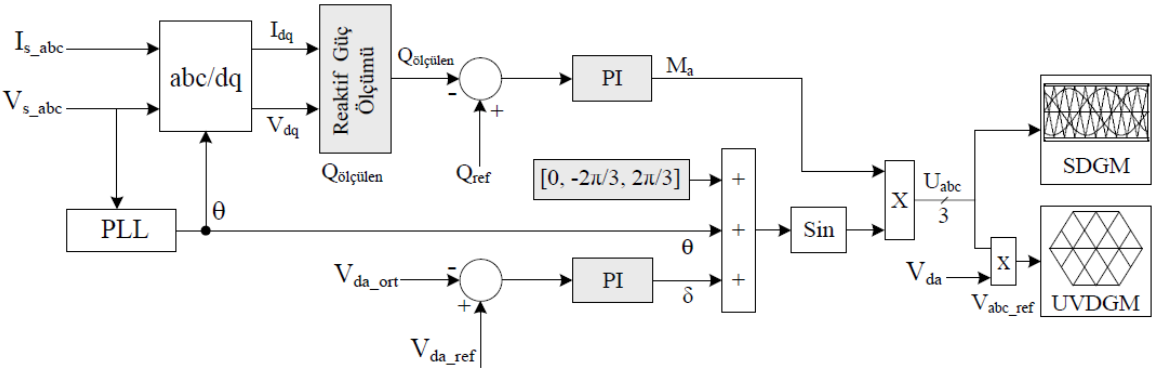
Şekil 3.11 : Faz açı denetim metodu blok şeması [32].

Faz açı denetim metoduna ait blok şeması Şekil 3.11'de verilmiştir. Şebekeden ölçülen akım ve gerilim değerleri Faz Kilitleme Döngüsü (FKD) bloğuna girilerek buradan şebekenin faz açısı olan θ açısı bulunur. Ayrıca ölçülen şebeke akım ve gerilimleri dq ekseni bileşenlerine dönüştürülerek Reaktif Güç Ölçümü bloğunda şebekenin reaktif güç değeri hesaplanır. Referans reaktif güç ile ölçülen (hesaplanan) reaktif güç değerinin farkı alınarak PI denetleyicisine girilir ve buradan eviricinin faz açısı olan δ açısı belirlenir. Daha sonra da δ açısı, şebeke faz açısı ve sabit olan modülasyon indeksi kullanılarak evirci için gerekli olan sinyaller üretilir.

3.3.2 Sabit DC hat gerilim metodu

DC hat geriliminin sabit tutulup modülasyon indeksinin değiştirilerek reaktif güç kontrolünün yapıldığı bu metotta δ faz açısı denetlenerek kondansatör gerilimi sabit değerde tutulmaktadır.

Sabit DC hat gerilim metoduna ait blok şeması Şekil 3.12'de verilmiştir. Şebekeden ölçülen akım ve gerilim değerleri Faz Kilitleme Döngüsü (FKD) bloğuna girilerek buradan şebekenin faz açısı olan θ açısı bulunur.



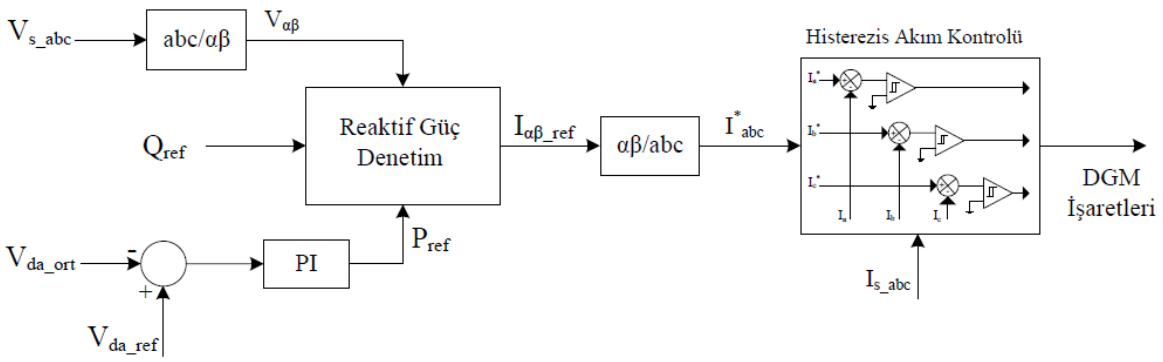
Şekil 3.12 : Sabit DC hat gerilim metodu blok şeması [32].

Ayrıca ölçülen şebeke akım ve gerilimleri dq ekseni bileşenlerine dönüştürülerek Reaktif Güç Ölçümü bloğunda şebekenin reaktif güç değeri hesaplanır. Referans reaktif güç ile ölçülen (hesaplanan) reaktif güç değerinin farkı alınarak PI denetleyicisine girilir ve buradan eviricinin modülasyon indeksi belirlenir. 3 fazlı eviricinin fazlara ait DC gerilimlerinin ortalaması ile referans DC gerilim karşılaştırılarak PI denetleyiciye girilir ve denetleyici çıkışında evirici faz açısı olan δ açısı elde edilir. Daha sonra da δ açısı, şebeke faz açısı ve modülasyon indeksi kullanılarak evirici için gerekli olan sinyaller üretilir.

3.3.3 Doğrudan akım denetim metodu

Anlık P-Q Güç Teorisi'ne dayanan bu denetim metodunda üç faz akım-gerilim büyüklüklerinin Park dönüşümleri yardımıyla αβ iki faz eksenine dönüştürülür ve aktif ve reaktif güç hesaplamaları αβ çatısı altında yapılır. DC hat gerilimi bu yöntemde sabit kalmaktadır.

Şekil 3.13'te Doğrudan akım denetim metoduna ait blok şema bulunmaktadır. Diyagram açıklanacak olursa; Şebekeden ölçülen gerilim değerleri Clarce dönüşümüyle αβ iki faz değişkenlerine ($V_{\alpha\beta}$) dönüştürülür. 3 fazlı eviricinin fazlara ait DC gerilimlerinin ortalaması ile referans DC gerilim karşılaştırılarak PI denetleyiciye girilir ve denetleyici çıkışında şebekeden eviriciye akması gereken aktif güç değeri (P_{ref}) elde edilir. $V_{\alpha\beta}$, P_{ref} ve Q_{ref} değerleri Reaktif Güç Denetimi bloğun girilir. Blok içerisinde anlık P-Q teorisine göre hesaplama yapılarak STATKOM akımının referans αβ bileşenleri ($I_{\alpha\beta_ref}$) elde edilir. Sonra $I_{\alpha\beta_ref}$ akım bileşenleri üç faz abc akım (I^*_{abc}) bileşenlerine dönüştürülerek şebeke akımı (I_s) ile birlikte Histerezis Akım Kontrolörüne girilir ve evirici için gerekli sinyaller üretilir [36].



Şekil 3.13 : Doğrudan akım denetim metodu blok şeması [32].

3.3.4 Dolaylı akım denetim metodu

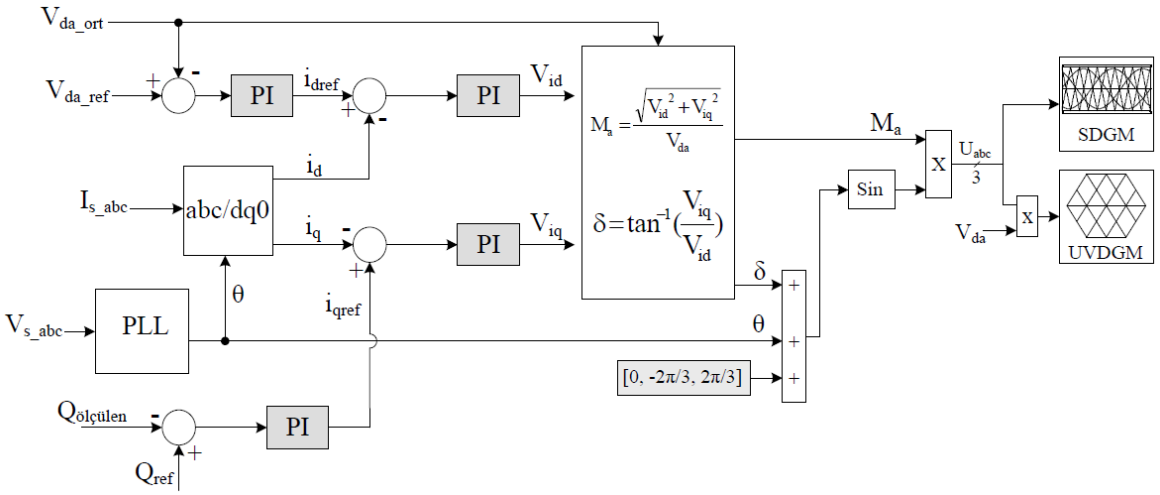
Bu denetim metodunda da DC hat gerilimi sabittir ve modülasyon indeksi değiştirilerek reaktif güç kontrolü gerçekleştirilmektedir. DC hat gerilimi δ açısının

denetlenmesi sayesinde sabit kalmaktadır. Modülasyon indeksinin denetimiyle referans aktif ve reaktif güce göre anlık P-Q teorisi kullanılarak evirici çıkış gerilimi ve dolayısıyla reaktif güç kontrolü sağlanmış olur. Bu şekilde hat akımları dolaylı olarak kontrol edilmiş olmaktadır [32]. Denklem 3.16'da Anlık P-Q kullanılarak elde edilen aktif ve reaktif güç eşitlikleri verilmiştir.

$$p = V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q$$
$$q = V_q \cdot I_d + V_d \cdot I_q \qquad (3.16)$$

Dengeli üç fazlı bir sistemde I_q bileşeni 0 olduğundan; sistem geriliminin sabit olduğu durumda I_d değeri aktif gücün anlık değerini, I_q değeri ise reaktif gücün anlık değerini göstermektedir.

Dolaylı akım denetim metoduna ait blok şeması Şekil 3.14'te verilmiştir. Şebekeden ölçülen gerilim değerleri Faz Kilitleme Döngüsü (FKD) bloğuna girilerek buradan şebekenin faz açısı olan θ açısı bulunur. Bu θ açısı da kullanılarak ölçülen şebeke akımı dq eksen bileşenlerine dönüştürülür i_d ve i_q değerleri bulunur. 3 fazlı eviricinin fazlara ait DC gerilimlerinin ortalaması ile referans DC gerilim karşılaştırılarak PI denetleyiciye girilir ve denetleyici çıkışında referans aktif akım bileşeni i_{dref} elde edilir. i_{dref} ve i_d karşılaştırılarak PI denetleyiciye girilir ve çıkışında V_{id} elde edilir. Aynı şekilde şebekeden ölçülen reaktif güç değeri $Q_{ölçülen}$ ile referans reaktif güç değeri Q_{ref} karşılaştırılarak PI denetleyiciye girilir ve çıkışında referans reaktif akım bileşeni i_{qref} elde bulunur.



Şekil 3.14 : Dolaylı akım denetim metodu blok şeması [32].

$İ_{qref}$ ve i_q karşılaştırılarak PI denetleyiciye girilir ve çıkışında V_{iq} elde edilir. Elde edilen V_{id} ve V_{iq} değerleri Denklem 3.17 ve 3.18'deki eşitliklerde kullanılarak modülasyon

indeksi ve δ faz açısı hesaplanır. Son olarak δ açısı, şebeke faz açısı ve modülasyon indeksi kullanılarak evirici için gerekli olan sinyaller üretilir.

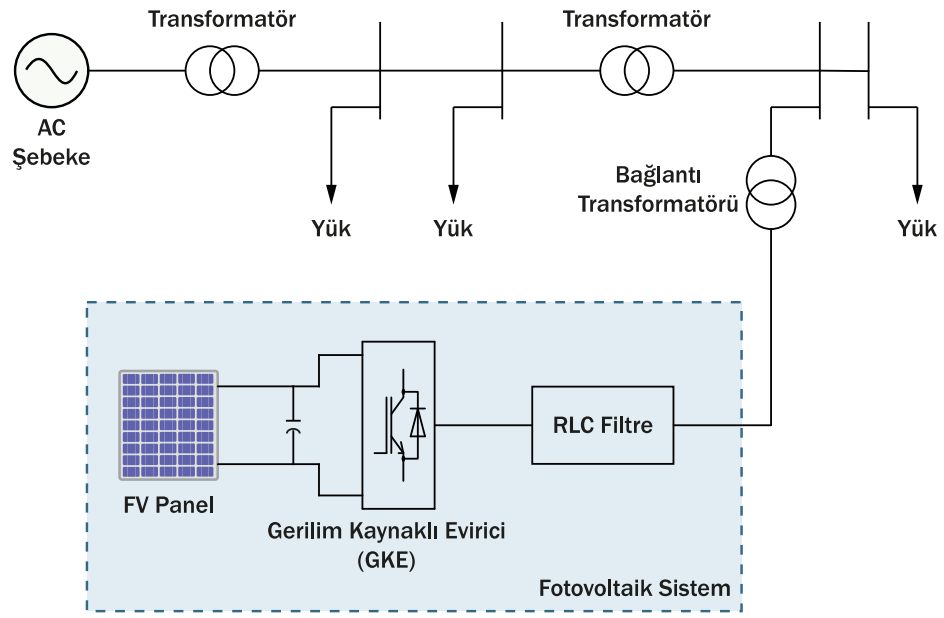
$$m_i = \frac{\sqrt{{V_{id}}^2 + {V_{iq}}^2}}{V_{DC}} \tag{3.17}$$

$$\delta = tan^{-1}\left(\frac{V_{iq}}{V_{id}}\right) \tag{3.18}$$

4. FOTOVOLTAİK STATKOM (FV-STATKOM)

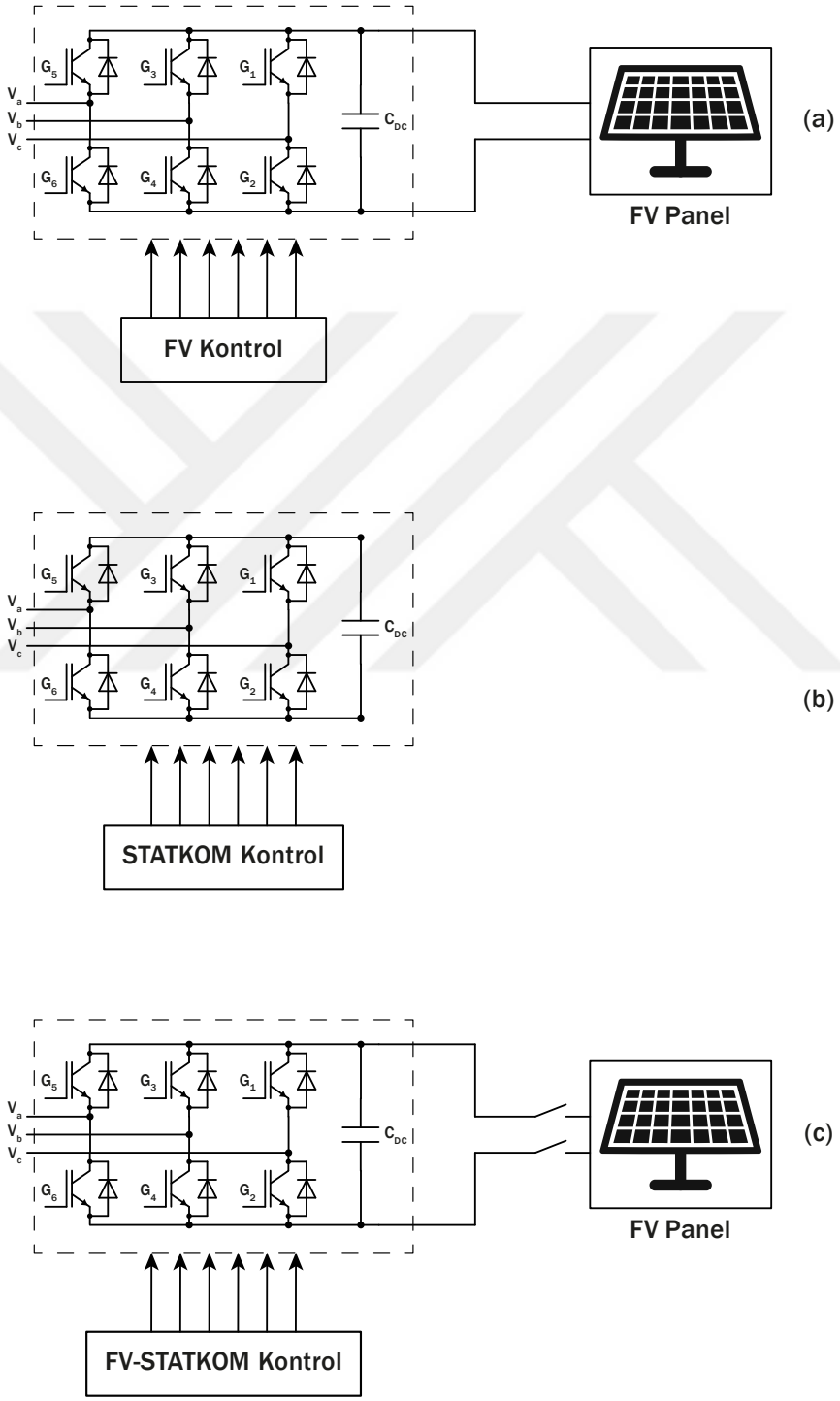
4.1 Giriş

Enerji ihtiyacının artışıyla birlikte daha fazla güç kapasitesini sağlamak amacıyla dağıtık enerji üretim tesisi sayıları artırılmıştır. Özellikle yenilebilir enerji kaynaklı dağıtık enerji üretim santrali sayıları hızlıca artmaktadır. Fakat dağıtık üretim sistemleri enerji üretiminde fayda sağlasa da şebekenin güç kalitesinde sorunlara sebebiyet vermektedir. Hem dağıtık üretim tesislerinin şebekeye olan olumsuz etkileri hem de şebekenin kendisi veya yüklerinden kaynaklı kalite problemlerini çözmek için Fotovoltaik STATKOM (FV-STATKOM) isimli bir metot önerilmektedir [1]. Bu metoda göre fotovoltaik enerji santrallerinde hali hazırda kullanılan DC-AC eviriciler uygun kontrolör düzenlemeleriyle birlikte STATKOM şeklinde çalışarak birçok kalite probleminin çözümünde de kullanılabilmektedir. Bu şekilde daha ekonomik bir çözüm sunulabilmektedir. Aynı zamanda FV-STATKOM, literatürde "Smart PV Inverter" yani "Akıllı FV Evirici" olarak da adlandırılmaktadır [6]. Şekil 4.1'de şebekeye bağlanmış bir fotovoltaik enerji üretim sisteminin tek hat şeması verilmiştir.



Şekil 4.1 : Fotovoltaik sistem tek hat şeması [6]

Önceki bölümde STATKOM yapısı anlatılmıştı. STATKOM ve fotovoltaik sistemlerin en kritik bileşeni DC-AC eviricidir. Fotovoltaik sistem ve STATKOM'da ortak özellik olarak eviricinin kullanılıyor olması FV-STATKOM konseptinin oluşmasındaki en büyük motivasyonlardan biri olmuştur. Şekil 4.2'de bu durum açıklayıcı biçimde gösterilmiştir.



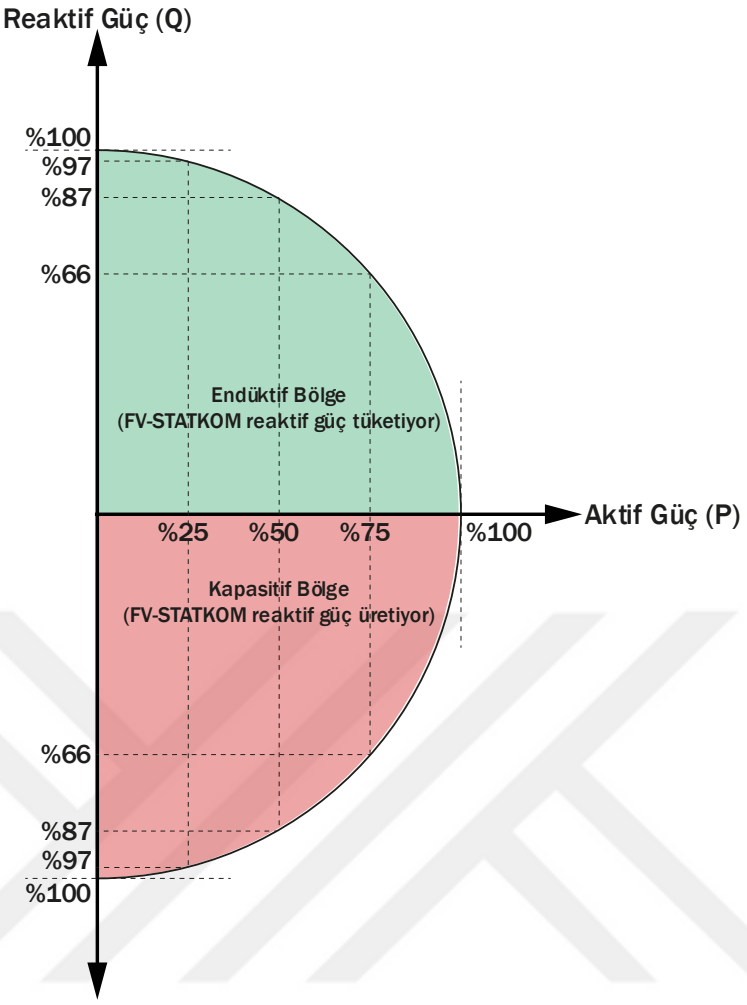
Şekil 4.2 : (a) Temel bir FV sistem **(b)** Temel bir STATKOM **(c)** Temel bir FV-STATKOM sistemi [45].

4.2 FV-STATKOM Çalışma Modları

FV-STATKOM konsepti ilk geliştirildiğinde sadece FV sistemin aktif güç üretmediği yani invertere ihtiyacının olmadığı gece saatleri için çalışması önerilmiştir [1]. Fakat sonraki çalışmalarda günün her saatinde sistemin ihtiyacına göre otomatik olarak çalışan FV-STATKOM modelleri sunulmuştur. FV sistemler basitçe anlatılırsa; FV sistemler güneş ışığına maruz kaldıkları saatlerde DC gerilim üretir ve bu DC gerilimler bir DC-AC evirici aracılığıyla AC gerilime dönüştürülerek şebekeye iletilirler. FV sistemlerin öncelikli amacı şebekeye aktif güç sağlamak olduğundan mevcut eviricileri reaktif güç değişimi yapmamaktadır. FV sistem, günün her saatinde kendi evirici kapasitesinin tamamı kadar güç üretemez hatta akşamları hiçbir şekilde güç üretimi yapamaz. FV-STATKOM; gerek gün içerisinde kalan evirici güç kapasitesini gerekse geceleri üretim yapılmadığından dolayı eviricinin tüm kapasitesini kullanabilmek için geliştirilmiştir. Bir FV sistem eviricisinin görünür güç kapasitesi S (VA), anlık aktif gücü P (W) ve anlık reaktif gücü de Q (VAr) ile ifade edilirse; günün herhangi bir anında reaktif güç alışverişi için kullanabilecek evirici kapasitesi Denklem 4.1 ile hesaplanır.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \tag{4.1}$$

Denklem 4.1'e göre aktif ve reaktif güç kapasitelerinin grafiksel olarak gösterimi Şekil 4.3'teki gibi olur. Şekil 4.3'e bakıldığında %75'lik bir aktif güç üretiminde bile eviricide reaktif güç üretimi için %66'lık kapasite bulunmaktadır. Yani yüksek aktif güç üretiminin olduğu anlarda dahi önemli miktarda reaktif güç üretilebilme imkanının bulunduğu görülmektedir.



Şekil 4.3 : FV-STATKOM reaktif güç kapasite diyagramı

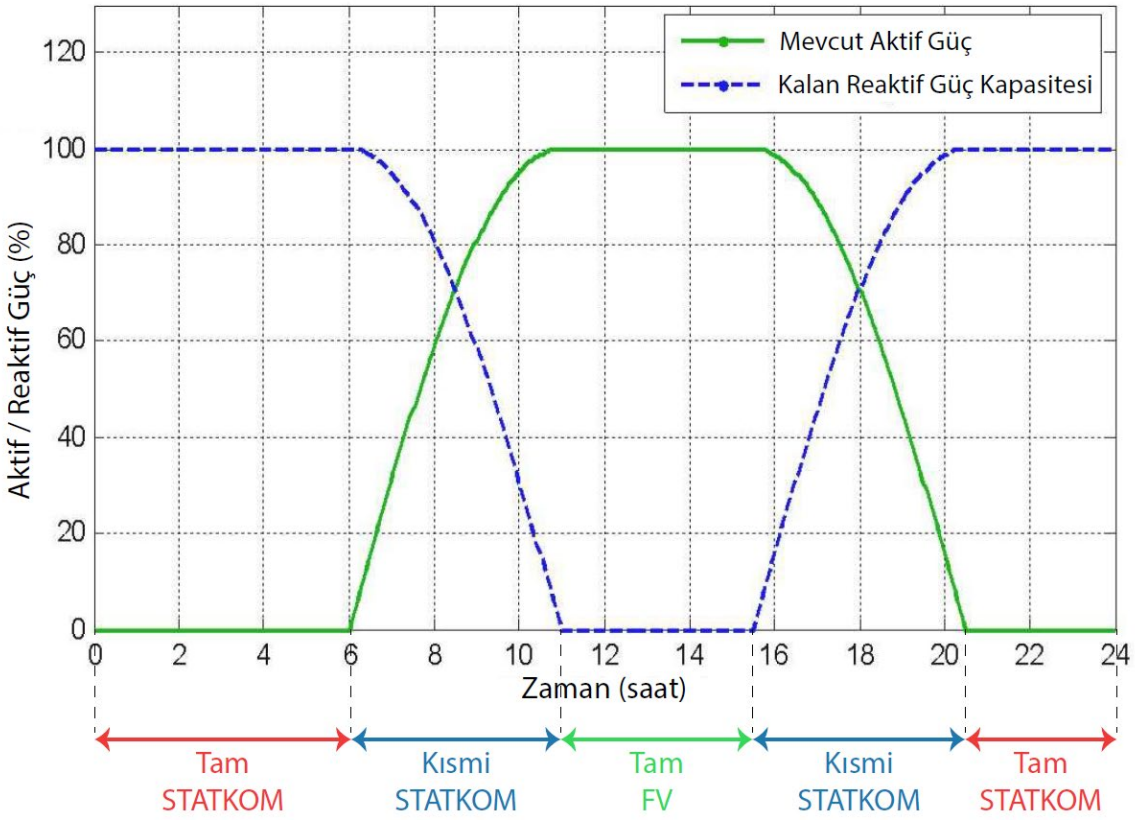
FV-STATCOM sistemi gün içerisindeki çalışma durumuna göre 3 modda çalıştırılacak şekilde sınıflandırılmıştır [46]. Bu sınıflandırma aktif güç üretimi öncelenerek yapılmıştır. Yani eğer aktif güç üretimi mümkünse öncelik, eviricinin STATKOM olarak çalışması değil de FV eviricisi olarak görev yapmasıdır.

A. **Tam FV / Aktif Güç Modu:** Bu modda evirici tüm kapasitesini aktif güç üretimine ayırır ve reaktif güç üretimi yoktur. Eviricinin güç faktörü 1'dir. Çünkü reaktif güç üretmez veya tüketmez. Klasik FV santraller sürekli bu modda çalışır. İnverter kapasitesi eğer ki FV santrali maksimum aktif güç kapasite değerinde seçildiyse bu modda STATKOM olarak çalışmak için bir kapasite kalmayacaktır. Fakat IEEE 1547-2018 standardına göre Dağıtık Enerji Üretim Tesislerinde kullanılan inverterlerin nominal aktif güç değerinde bile en az %44 reaktif güç sağlayabilmesi gerekmektedir. Buna göre aslında bir FV santral tam kapasitesinde aktif güç sağlarken bile Kısmi STATKOM modunda çalıştırılabilir [47].

B. **Kısmi STATKOM Modu:** FV santral üretebileceği kadar aktif güç üretimini yaptığı bu modda kalan evirici kapasitesi ise STATKOM olarak çalışmak için kullanılır.

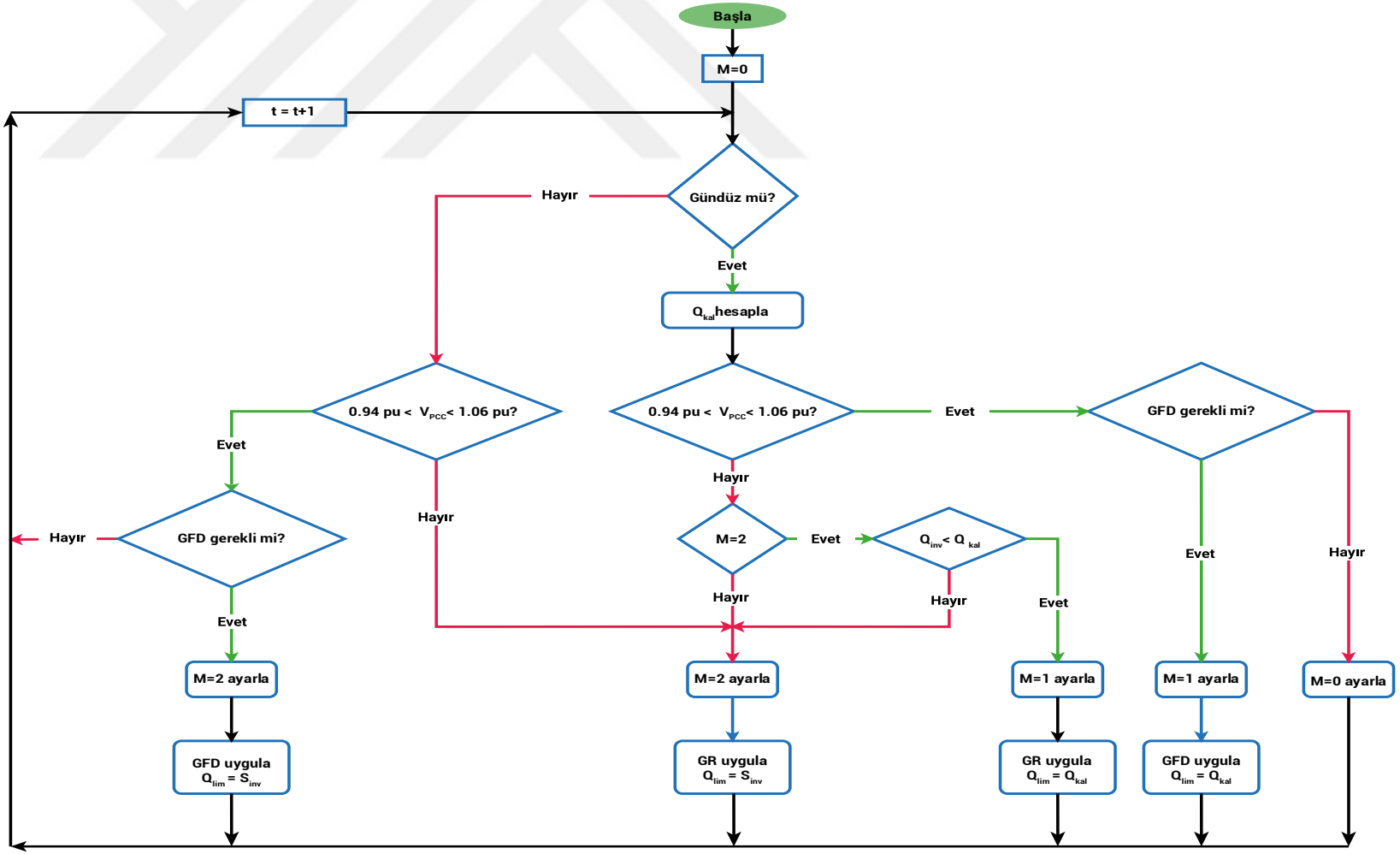
C. **Tam STATKOM Modu:** Bu mod, FV enerji üretiminin yani yeterli gün ışığının olmadığı gece saatlerindeki moddur. Burada Aktif güç üretimi olmayacağından eviricinin tüm kapasitesi STATKOM çalışması için kullanılabilir. Reaktif güç değişimleri yapılarak güç sistem kalitesinde iyileştirmeler sağlanmaya çalışılır.

Şekil 4.4'te bir FV santralin bir gününe ait saatlere göre güç üretimini, ($Q = \sqrt{S^2 - P^2}$) formülüne göre hesaplanan kalan evirici kapasitelerini gösteren ve çalışma modlarını belirten grafik verilmiştir.



Şekil 4.4 : FV-STATKOM çalışma modları

4.3 FV-STATKOM Kontrolü



Şekil 4.5 : FV-STATKOM kontrolü akış şeması [48].

Şekil 4.5'te FV-STATKOM'un kontrolü için örnek bir akış diyagramı verilmiştir. Diyagramda kısaltmaları ve notasyonları verilen ifadelerin açılım ve açıklamaları aşağıdaki gibidir.

M: Çalışma Modu (M=0; Tam FV, M=1; Kısmi STATKOM, M=2; Tam STATKOM)

V_{PCC}: Ortak bağlantı barası gerilimi

Q_{kal}: Herhangi bir andaki aktif güç üretiminden sonra inverter kapasitesinden kalan reaktif güç

Q_{lim}: STATKOM'un kullanmasına izin verilen reaktif güç limiti

Q_{inv}: İnverter reaktif gücü

S_{inv}: İnverter güç nominal gücü

GR: Gerilim Regülasyonu

GFD: Güç Faktörü Düzeltmesi

Bu kontrol metodunda güç kalite problemlerinden olan gerilim regülasyonu ve reaktif güç kompanzasyonu konularına odaklanılmış ve buna göre algoritma oluşturulmuştur. Burada gerilim regülasyonu Güç Faktörü Düzeltimi işleminden ve FV aktif güç üretiminden daha öncelikli tutulmuş olup (maks. %6 gerilim dalgalanmasına izin verilerek) kritik durumlarda gerekirse FV sistem aktif güç üretimi durdurulabilmektedir. Farklı kontrol algoritmaları farklı güç kalite problemin çözümlerini önceleyerek algoritmalarını tasarlayabilmektedir. Şekil 4.5'te verilen kontrol algoritması gece ve gündüz çalışmaları için ayrı ayrı incelenebilir [48].

a. **Gündüz Çalışması:** Gün ışığının FV enerji üretimine izin verdiği gündüz saatlerinde algoritmanın her bir çalışma iterasyonunda FV aktif güç üretiminden kalan inverter reaktif güç kapasite değeri olan Q_{kal} değeri hesaplanır. Sistemde sürekli olarak V_{PCC} ve güç faktörü denetlenmektedir. V_{PCC} değeri standartlardaki limitlerin üstünde dalgalandığı taktirde çalışma modu Tam STATKOM moduna geçer (M=2). Gerilim regülasyonu için STATKOM tarafından kullanılabilecek reaktif güç limiti (Q_{lim}) eviricinin tüm kapasitesi (S_{inv}) kadardır ($Q_{lim}= S_{inv}$). Gerilim regülasyonu sırasında STATKOM'un ihtiyaç duyduğu reaktif güç miktarı Q_{inv}, Q_{kal} değerinden küçük olmaya başladığında çalışma modu Kısmi STATKOM moduna geçirilir (M=1). Artık STATKOM'daki reaktif güç limiti de kalan reaktif güç kapasitesine eşit olur ($Q_{lim}= Q_{kal}$). Bu durumda FV santral aktif güç üretimine devam edebilir. Eğer gerilim

regülasyonu belirlenen sınırlar içerisine getirilirse ve sistemde GFD ihtiyacı varsa sistem Kısmi STATKOM Modunda (M=1) çalışmaya devam eder ve kalan reaktif gücün tamamı GFD işlemi için kullanılabilir ($Q_{lim}= Q_{kal}$). GFD ihtiyacı bulunmuyorsa sistem artık Tam FV moduna geçer (M=0).

b. **Gece Çalışması:** Geceleri zaten FV sistemden dolayı aktif güç üretimi olmadığından tüm inverter kapasite STATKOM için kullanılabilmektedir ($Q_{lim}= S_{inv}$). Bundan dolayı geceleri Tam STATKOM Modunda çalışma olur (M=2). Eğer sistemde gerilimle alakalı bir regülasyon problemi varsa öncelikli olarak reaktif güç kapasitesi gerilim regülasyonu için kullanılır. Regülasyon problemi yoksa ve GFD ihtiyacı varsa bu kez inverterin tüm kapasitesi GFD için kullanılır.

4.4 FV-STATKOM Avantajları

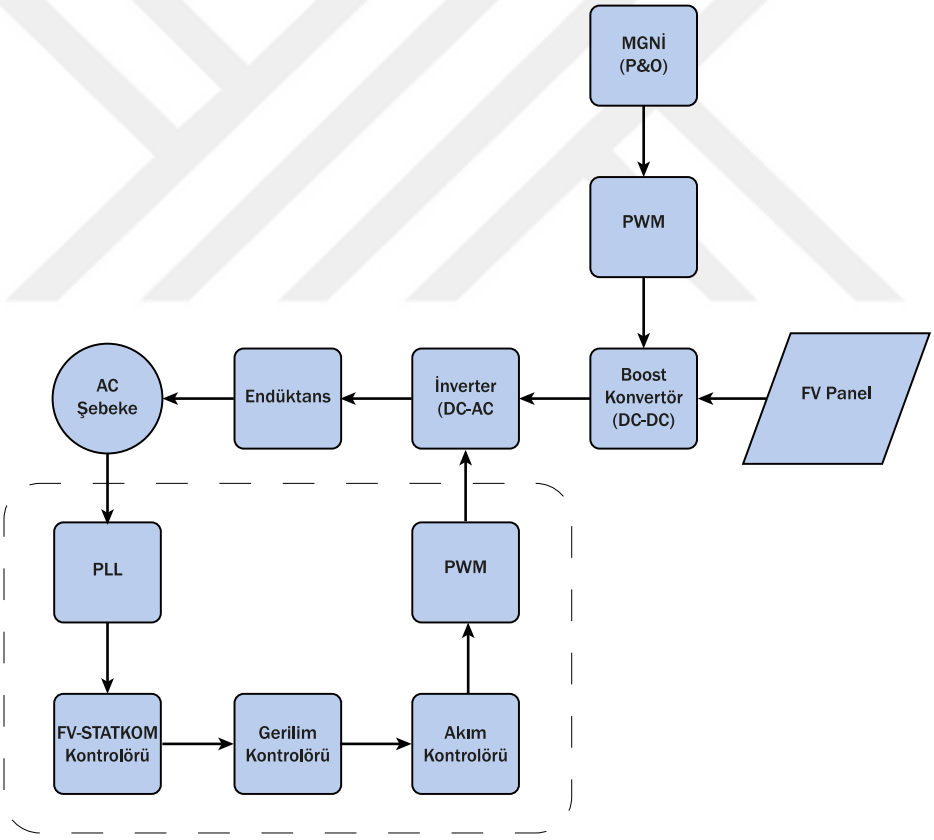
FV-STATKOM teknolojisi mevcut teknolojisi ve FV sistemlerin geleceği düşünüldüğünde birçok avantaj ve potansiyel taşımaktadır. Bu fırsatlar ve avantajlar aşağıda birkaç maddede sıralanmıştır [45].

- Bir FV STATKOM, klasik STATKOM ve SVC gibi reaktif güç kompanzasyonu marifetiyle FACTS fonksiyonlarını yerine getirebilir.
- En basit şekilde sadece geceleri bile kullanılsa zaten mevcutta geceleri boşta kalan FV inverter kapasitesini kullanacaktır.
- Aynı kapasitedeki klasik STATKOM'dan yaklaşık 10 kat daha ucuzdur.
- Klasik STATKOM bile SVC'den yaklaşık 1,4 kat ucuzken FV-STATKOM SVC'ye göre kat kat ekonomiktir.
- Mevcut bir FV sistemini FV-STATKOM'a dönüştürmek için gerekli süre tüm izinler vs. dahil edilse bile harici bir STATKOM sistemi kurulum süresine göre daha kısadır.
- İhtiyaç olan her yere FV-STATKOM kurulumu mümkün olmayabilir fakat FV sistemlerin sayısının hızlıca artması gelecekte ihtiyaç olan yerlere yakın FV santralin bulunacağı ve FV-STATKOM kurulabilme potansiyelini göstermektedir.

- FV-STATKOM'un klasik STATKOM ve SVC'ye göre ekonomik olduğundan bahsedilmişti. Bu aradaki fiyat farkı FV-STATKOM'un kontrol sisteminin geliştirilmesine harcanabilir.
- FV santral sahibi özel ve tüzel kişilikler FV-STATKOM'lar kullanarak FACTS işlevlerini yerine getirerek şebekenin güç kalitesini iyileştirir. Yani FV-STATKOM hizmeti sunarak belki de bunu gelir elde etme yöntemi olarak kullanabilir.

5. MODEL VE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Tez çalışmasının bu kısmında bir şebeke bağlantılı Fotovoltaik STATKOM yapısı modellenecek ve simülasyon çalışmaları gerçekleştirilecektir. Bu bölümde, modellemenin kontrol mimarisinin daha iyi anlaşılabilmesi için gerekli olan vektörel koordinat dönüşümlerinden, kullanılan kontrol yönteminden ve bileşenlerinden kısaca bahsedilecek; FV Sistem, FV-STATKOM ve diğer sistem elemanlarının modellemeleri gerçekleştirilecek ve gerekli hesaplamalar da yapılıp simülasyona geçilecektir. Modellenen sistemin genel blok şeması Şekil 5.1'deki gibidir.

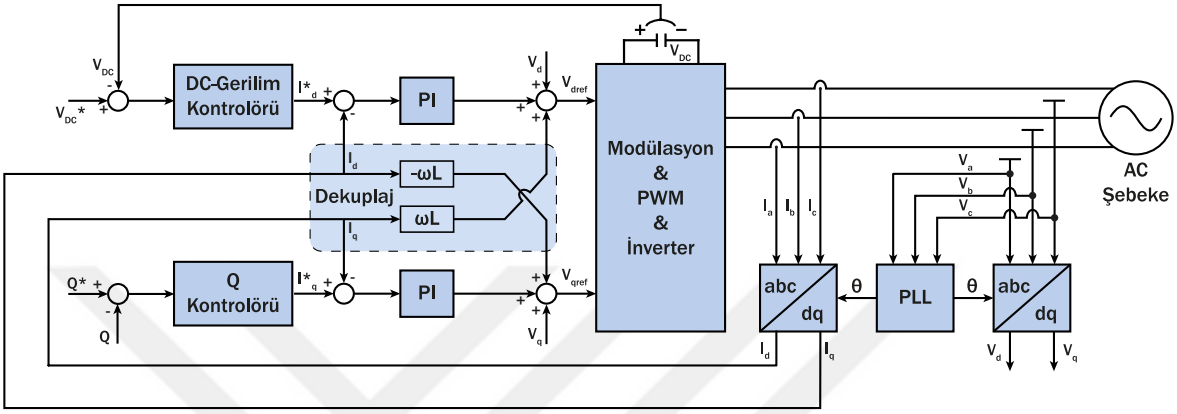


Şekil 5.1 : Modellenen sistem genel blok şeması

5.1 Kullanılan Kontrol Tekniği ve Bileşenleri

Bu tez çalışmasında FV-STATKOM kontrolü için Senkron Referans Düzlemi (SRF) tekniği kullanılmıştır. Bu teknikle AC sinyaller dönen eksen dq koordinatlarına dönüştürülür AC sinyallerin DC bileşenleri elde edilir [49]. DC sinyallerle kontrol gerçekleştirmek AC'ye

göre çok kolay olmaktadır. PI kontrolörler, DC sinyalleri kontrol etmede oldukça başarılıdır ve kararlı ve hassas kontrol sağlayabilmektedirler. SRF tekniğine ait prensip kontrol şeması Şekil 5.2'de verilmiştir. Tekniğin uygulanması için vektörel dönüşümler (Clarke ve Park Dönüşümleri), Faz kilitleme döngüsü (PLL-phase locked loop) ve Oransal-Integral (PI) Kontrolörler gibi bileşenlerden faydalanılmaktadır. Bu bileşenlere ve çapraz kuplaj kavramına bu başlık altında yer verilmiştir.

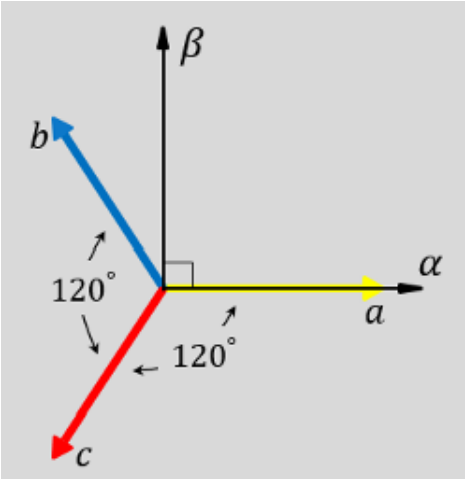


Şekil 5.2 : SRF kontrol tekniği prensip şeması

5.1.1 Clarke dönüşümü (a,b,c → α,β)

3 fazlı sistemlerin analizini kolaylaştıran bu yöntemde 3 boyuttaki 3 fazlı elektriksel büyüklükler (a,b,c) iki boyutlu koordinata (α, β) taşınır. 3 fazlı dengeli bir sistemin α, β bileşenleri elde etmek için Denklem 5.1 kullanılır. Ters Clarke dönüşümü yapılmak istenirse verilen matrisin transpozesi alınır (α, β → a,b,c). Clarke dönüşümüne ait fazör diyagram ise Şekil 5.3'te verilmiştir.

$$\begin{bmatrix}\alpha\\ \beta\end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix}1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2}\\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a\\ b\\ c\end{bmatrix} \qquad (5.1)$$

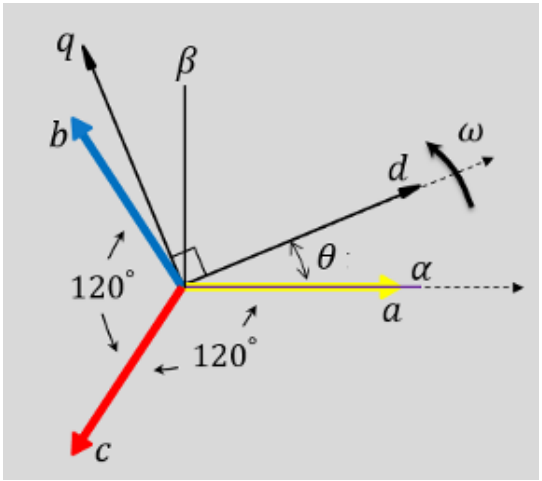


Şekil 5.3 : Clarke dönüşümü fazör diyagramı [50].

5.1.2 Park dönüşümü (α, β → dq)

3 fazlı büyükler direkt olarak dönen referans koordinat (dq) büyüklüklerine dönüştürülemez. Bundan dolayı üç boyutlu bilgiler (a,b,c) öncelikle Clarke dönüşümüyle α,β koordinat sistemine taşınır daha sonra da Park dönüşümüyle dq koordinat sistemine taşınır. Dönüşümü sağlayan matematiksel ifade Denklem 5.2 ile ve fazör diyagramı da Şekil 5.4 ile verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta & sin\theta \\ -sin\theta & cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \tag{5.2}$$



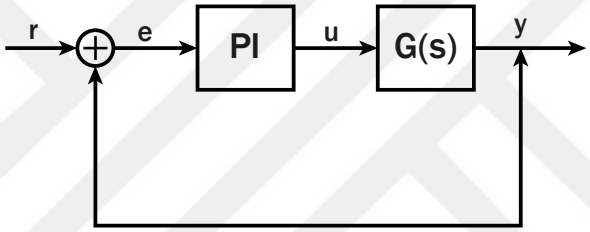
Şekil 5.4 : Park dönüşümü fazör diyagramı [51].

5.1.3 Faz kilitleme döngüsü (PLL-phase locked loop)

Şebekenin geriliminin faz açısının doğru elde edilmesi inverter kontrolünde büyük önem taşımaktadır. Özellikle STATKOM sistemlerinde faz açısının kontrolü şebeke ile STATKOM arasındaki aktif güç ilişkisini belirlemektedir. Ayrıca şebekenin faz açısı doğru ölçülmemiş veya hesaplanmamışsa dq dönüşümleri yapılamayacaktır. Şebeke geriliminin faz açısını bulmak için Faz kilitleme döngüsü (PLL-phase locked loop) kullanılmaktadır.

5.1.4 Oransal-integral (PI) kontrolör

PI kontrolörün amacı bulunduğu sistemin çıkışını istenen referans değerine getirmek ve bu değerde tutmaktır. Bunu, sistemin referans ile ölçülen çıkışı arasındaki hata sinyalini kullanıp işleyerek yapmaktadır. PI kontrolör içeren basit bir sistem şeması Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5 : PI kontrolör içeren geri beslemeli sistem şeması

PI kontrolörün transfer fonksiyonu PI(s) Denklem 5.3'teki gibi elde edilir. u(s) kontrolör çıkışı, e(s) hata sinyali, K_p oransal kazanç K_i ise integral kazancıdır.

$$PI(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{5.3}$$

Ulaşılmak istenen çıkış sinyali (r(t)) sisteme referans olarak girilir. Gerçek çıkış değeri ile istenen çıkış değeri arasındaki fark hata sinyalidir (e(t)=r(t)−y(t)). PI kontrolöre gelen hata sinyalinin kendisini ve integralini hesaplar. PI kontrolörden çıkan sinyal; oransal kazanç ile hata değeri, integral kazancı ile hatanın integralinin çarpımları toplamına eşittir. ($u(t)=K_p \cdot e(t)+K_i \int e(t).dt$) Daha sonra çıkış sinyali G(s)'in bulunduğu bloğa gönderilir ve buradan yeni çıkış oluşur (y(t)). Çıkış sinyali sistemin girişine geri besleme olarak gönderilir ve yeni hata değeri hesaplanarak aynı işlemler istenilen y çıkış değeri elde edilene kadar tekrar edilir [52].

5.1.5 Çapraz kuplaj

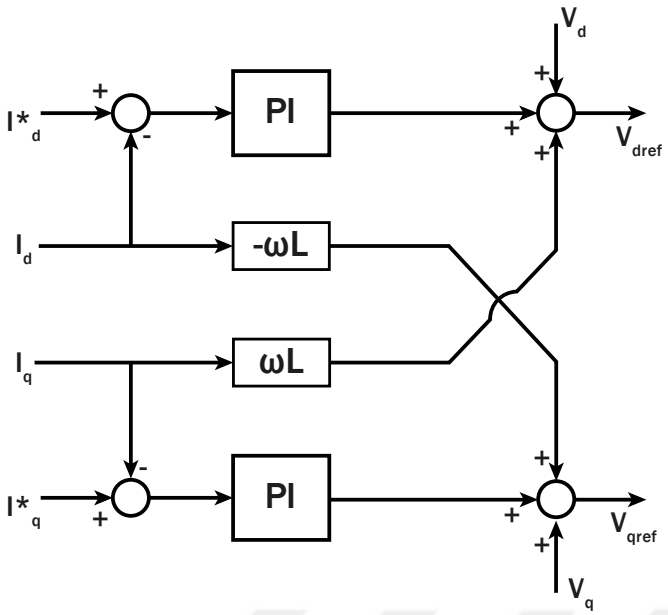
Şekil 5.1'deki SRF prensip kontrol şemasındaki önemli kısımlardan birisi de Dekuplaj bloğuyla gösterilen kısımdır. SRF tekniğinde işlem ve kontrol kolaylığı açısından dq döner eksen koordinat bileşenleri kullanılmaktadır. Hem akım hem de gerilimlerin d-q bileşenleri elde edilerek hesaplamalar ve kontroller gerçekleştirilmektedir.

Bir indüktörden (L) geçen akımdaki değişim, indüktör üzerinde bir gerilim düşümüne neden olur. AC sistemlerde, d ve q eksenleri birbirine diktir ve dönen bir referans çerçevesinde sürekli olarak birbirlerini etkilerler. Bu etkileşim, bir eksendeki bir değişikliğin diğer ekseni de etkilemesine neden olur ve PI kontrolörlerin bağımsız olarak çalışmasını zorlaştırır. Matematiksel olarak, bir AC devresindeki gerilim denklemleri d-q eksenlerinde aşağıdaki gibi yazılır.

$$V_d = RI_d + L\frac{dI_d}{dt} - \omega L I_q \tag{5.4}$$

$$V_q = RI_q + L\frac{dI_q}{dt} + \omega L I_d \tag{5.5}$$

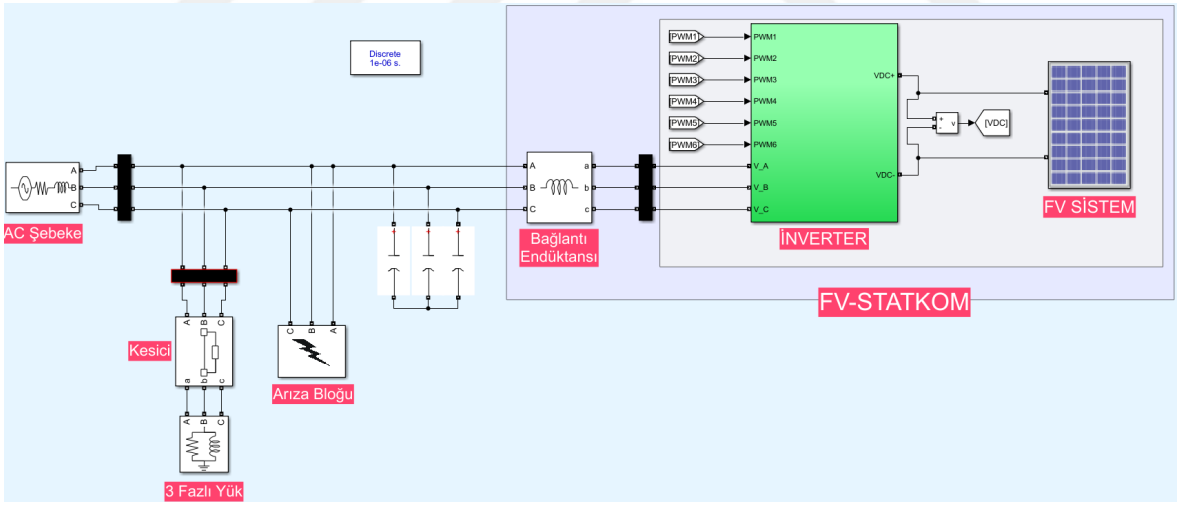
V_d,V_q d ve q ekseni gerilimlerini, I_d, I_q d ve q ekseni akımlarını, R direnci, L endüktansı, ω ise açısal frekansı ifade etmektedir. Denklemlerden görüldüğü üzere V_d ve V_q gerilim ifadelerinin her ikisi de farklı eksenden büyüklükler içermektedir. V_d geriliminde I_q akımı V_q gerilimde ise I_d akımının etkisi bulunmaktadır. İşte bu etkilenme durumuna Çapraz Kuplaj denilmektedir. Kuplaj etkisi yok edilmezse V_d ve V_q gerilimlerini kontrol eden PI denetleyiciler etkin bir şekilde görevini yapamaz. Bir PI kontrolörün hassas ve doğru şekilde çalışması için tek bir bileşene sahip olan büyüklükleri kontrol etmesi gerekir. Şekil 5.1'deki şemadaki Dekuplaj bloğunun amacı bahsedilen Çapraz Kuplaj etkisini yok etmektir. Dekuplajda; V_d ve V_q gerilimlerinin, kendi ekseni dışındaki ifadelerinin toplama işlemine göre tersleri alınır, V_d ve V_q gerilimleriyle toplanarak tek eksenli gerilim ifadeleri elde edilmiş olur. Dekuplaj işleminin bir gösterimi Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6 : Dekuplaj işlemi temel gösterimi

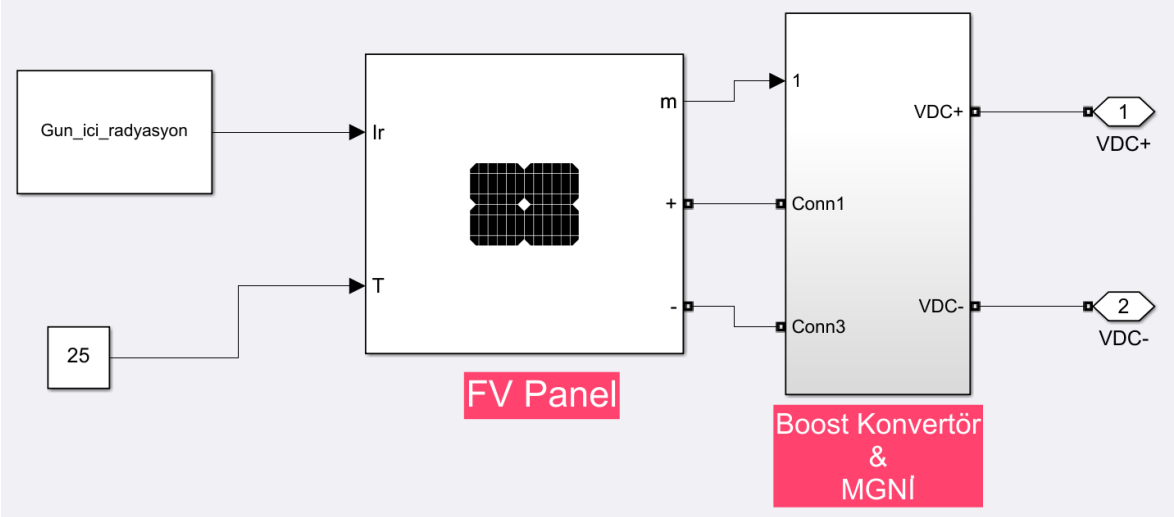
5.2 Modelleme

MATLAB/SIMULINK ortamında yapılan modellemenin genel görünümü Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7 : Şebeke bağlantılı Fotovoltaik STATKOM'un MATLAB modeli

5.2.1 Fotovoltaik sistem modeli



Şekil 5.8 : FV sistem MATLAB modeli

Fotovoltaik sistemin genel MATLAB modeli Şekil 5.8'de sunulmuştur. Buna göre FV sistem; FV panel, Maksimum Güç Noktası İzleyici (MGNİ) ve DC-DC yükseltici dönüştürücü (Boost konvertör)'den oluşmaktadır. DC-AC evirici de bir FV sistem bileşenidir fakat STATKOM modellemesinde değinileceği için bu başlık altında bahsedilmemiştir.

5.2.1.1 FV panel

Bu çalışmada FV santral için Advanced Power API-365 marka/model güneş paneli kullanılmıştır. Panel teknik bilgileri Şekil 5.9'da verilmiştir. 54 Paralel dizi ve her dizide 10 adet panel bulunacak şekilde tasarım yapılmıştır. FV santralin üretebileceği maksimum gerilim, Denklem 5.2'deki eşitlikle, FV santralin üretebileceği maksimum akım Denklem 5.3'teki eşitlikle ve FV santralin üretebileceği maksimum güç ise Denklem 5.4'teki eşitlikle bulunabilir. Hesaplamalar yapılırken Şekil 5.3'te verilen teknik veriler kullanılmıştır.

$$V_{max} = V_{mp} \cdot n_s \tag{5.6}$$

$$I_{max} = I_{mp} \cdot n_p \tag{5.7}$$

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} \tag{5.8}$$

$\mathbf{V_{max}}$: Bir panelin üretebileceği maksimum gerilim

I_{max}: Bir panelin üretebileceği maksimum akım

P_{max}: Bir panelin üretebileceği maksimum güç

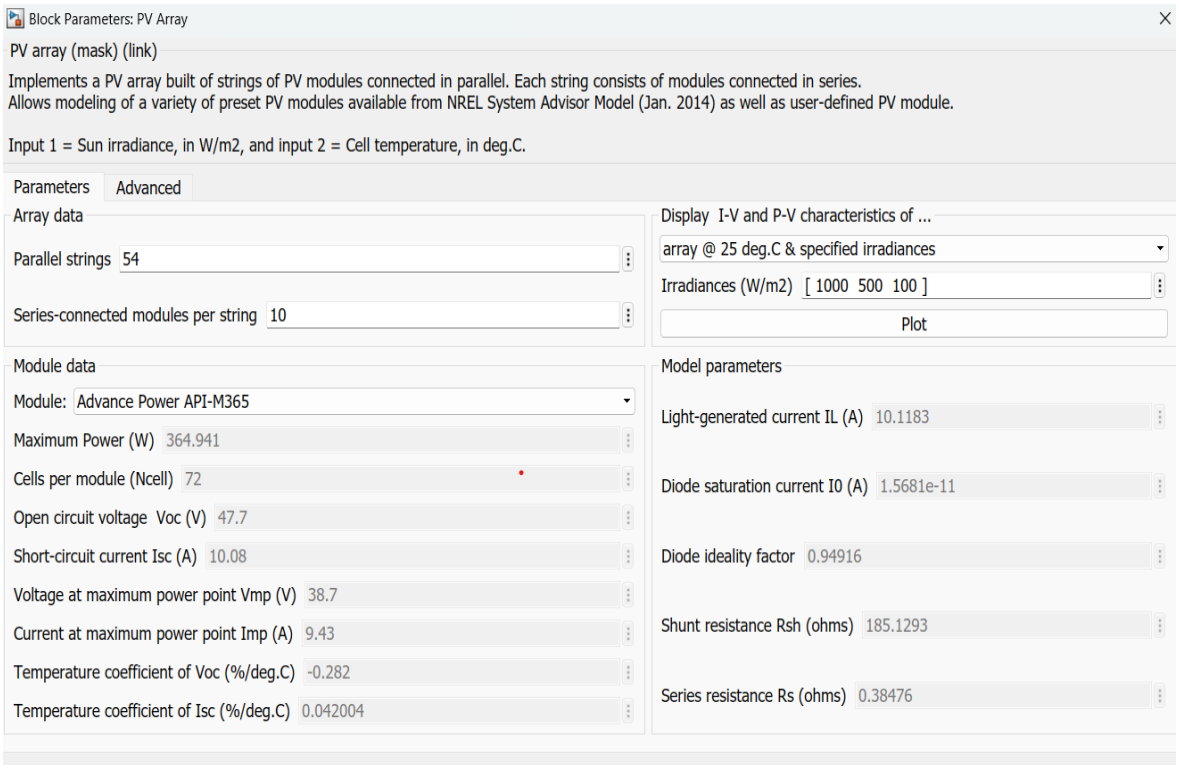
n_p: Paralel dizi sayısı

n_s: Bir dizideki seri panel sayısı

$$V_{max} = 38{,}7 \cdot 10 = 387 \text{ V}$$

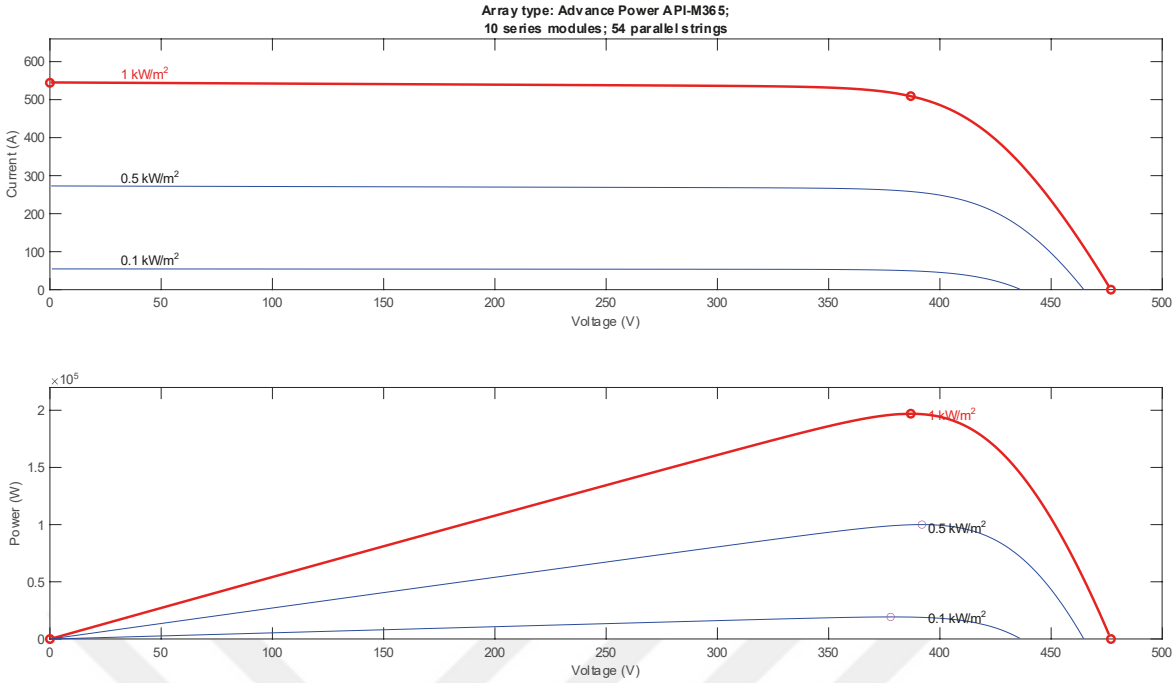
$$I_{max} = 9{,}43 \cdot 54 = 509{,}22\ A$$

$$P_{max} = 387 \cdot 509{,}22 = 197.068{,}14\ W$$



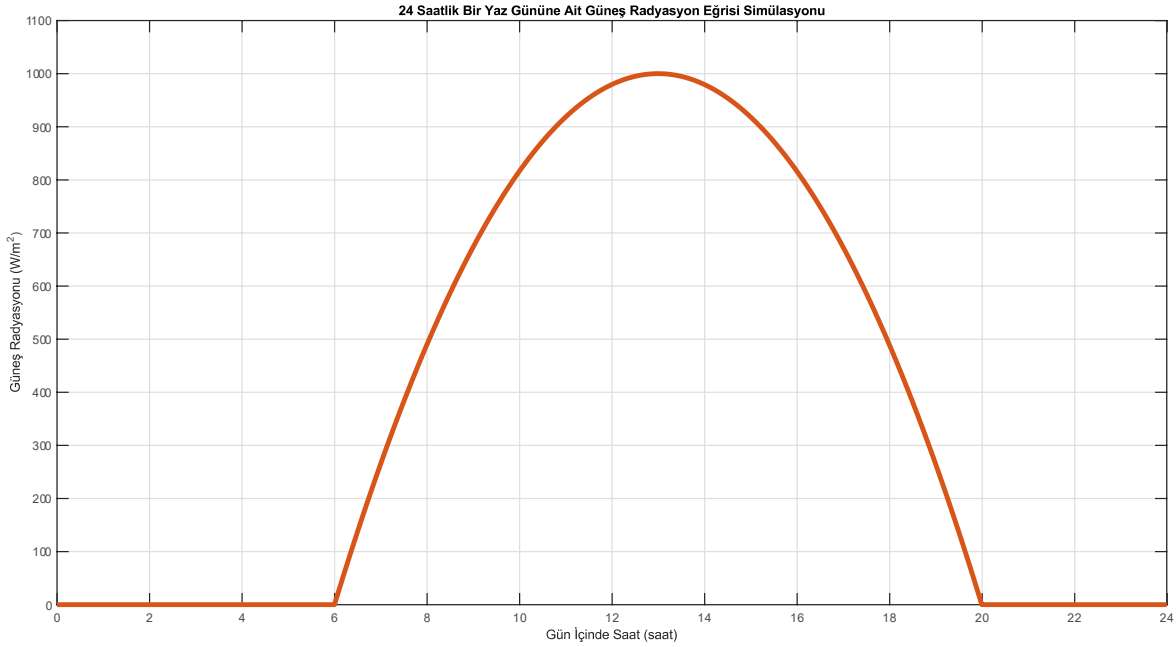
Şekil 5.9 : Kullanılan FV panele ait teknik veriler

Kullanılan panelin farklı ışınım (radyasyon) değerlerine göre 25 °C sıcaklığa ait IxV ve PxV grafikleri de Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10 : Kullanılan FV panelin IxV ve PxV grafikleri

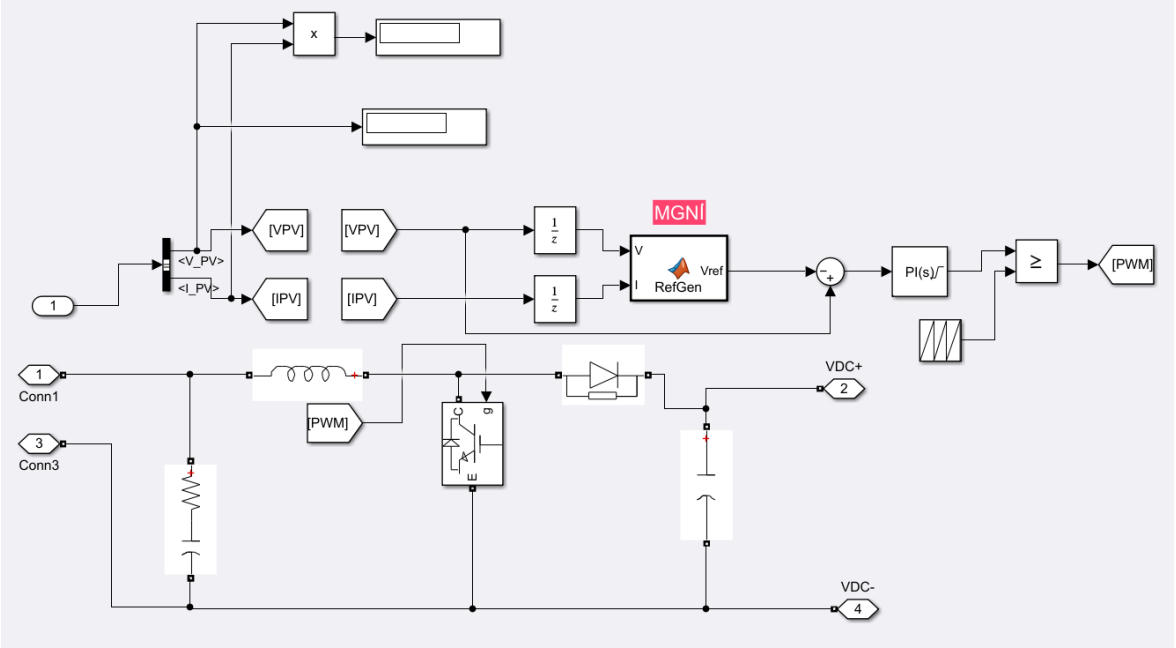
Simülasyonda güneş panelinin bir yaz gününe ait gün içerisindeki davranışını yaklaşık olarak modellemek için ışınım değerleri aşağıdaki gibi saatlere göre değişken olarak girilmiştir. Simülasyon yapılırken grafikteki her saat simülasyon süresindeki 0.1 saniyeye denk getirilmiş olup toplam 2.4 saniyelik sürede bir gün içerisindeki sistem davranışı gözlenmiştir.



Şekil 5.11 : Gün içi değişen ışınım değerleri

5.2.1.2 Boost konvertör & MGNİ

FV paneller genellikle düşük ve değişken DC (doğru akım) gerilim üretir. Bu gerilim, güneş ışınım şiddeti ve panel sıcaklığı gibi çevresel faktörlere bağlı olarak sürekli değişir. Ancak, şebekeye bağlı bir sistemin verimli ve stabil çalışması için DC-AC eviricilere üretilen gerilimden daha yüksek ve sabit bir gerilimin gönderilmesine ihtiyaç duyulur. Boost konvertörler FV panellerden gelen düşük DC gerilimi, eviricinin ihtiyaç duyduğu daha yüksek bir DC gerilime dönüştürür. Boost Konvertörler genelde MPPT adı verilen Maksimum Güç Noktası İzleme (MGNİ) algoritmalarıyla birlikte çalışır. MGNİ'den gelen Vref değeri kullanılarak PWM sinyalleri oluşturulur ve bu sinyallerle Boost konvertör anahtarlanır. Şekil 5.12'de MATLAB'da kurulan Boost Konvertör & MGNİ alt bloğunun içeriği verilmiştir.



Şekil 5.12 : MATLAB Boost konvertör alt bloğu

Maksimum güç noktası izleyici (MGNİ)

Fotovoltaik sistemlerin verimleri çok düşük (yaklaşık %18-%20) olduğundan genellikle bir Maksimum güç noktası izleyici (MGNİ veya literatürdeki adıyla MPPT) algoritmasına ihtiyaç duyarlar. MGNİ'lerin temel amacı, sistemin mevcut işletim koşullarına göre maksimum gücü ürettiği noktayı bulmak ve orada kalmasını sağlamaktır. Bu çalışmada uygulanma kolaylığı ve popülerliği olan aynı daha az parametre ile maksimum güç noktasını takibi yapan, literatürde adı Perturb and Observe (P&O) olarak geçen Değiştir ve Gözlemle algoritması kullanılmıştır. Şekil 5.13'te modellemede kullanılan Değiştir ve Gözlemle algoritmasına ait MATLAB kodunun ekran görüntüsü bulunmaktadır.

Algoritma, sistemin çalışma noktasını (genellikle çıkış gerilimi veya akımı) küçük bir miktarda değiştirir (artırır veya azaltır). Örneğin; DC-DC dönüştürücünün doluluk boşluk oranı (duty cycle) değiştirilerek panelin çıkış gerilimi hafifçe değiştirilir. Sistemin mevcut akım ve gerilim değerleri çarpılarak çıkış gücü gözlemlenir. Gücün değişimi önceki adımlarla karşılaştırılarak karar verilir. Eğer çıkış gücü artmışsa, yapılan değişiklik (gerilim artışı veya azalışı) doğru yönde demektir. Algoritma bir sonraki adımda aynı yönde bir değişiklik daha yapar. Eğer güç azalmışsa, yapılan değişiklik yanlış yönde demektir. Algoritma bir sonraki adımda ters yönde bir değişiklik yapar. Bu döngü sürekli şekilde devam eder sistem maksimum güç noktası etrafından hafifçe salınarak çalışarak bu noktayı takip etmeye çalışır.

```
function Vref = RefGen(V,I)

Vrefmax=367;
Vrefmin=0.0;
Vrefinit=300;
deltaVref=1;
persistent Vold Pold Vrefold;

dataType='double';
if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Vrefold=Vrefinit;
end
P=V*I;
dV=V-Vold;
dP=P-Pold;


if dP~=0
    if dP<0
        if dV<0
            Vref=Vrefold+deltaVref;
        else
            Vref=Vrefold-deltaVref;
        end
    else
        if dV<0
            Vref=Vrefold-deltaVref;
        else
            Vref=Vrefold+deltaVref;
        end
    end
else Vref=Vold;
end
if Vref>=Vrefmax|Vref<=Vrefmin
    Vref=Vrefold;
end
Vrefold=Vref;
Vold=V;
Pold=P;
```

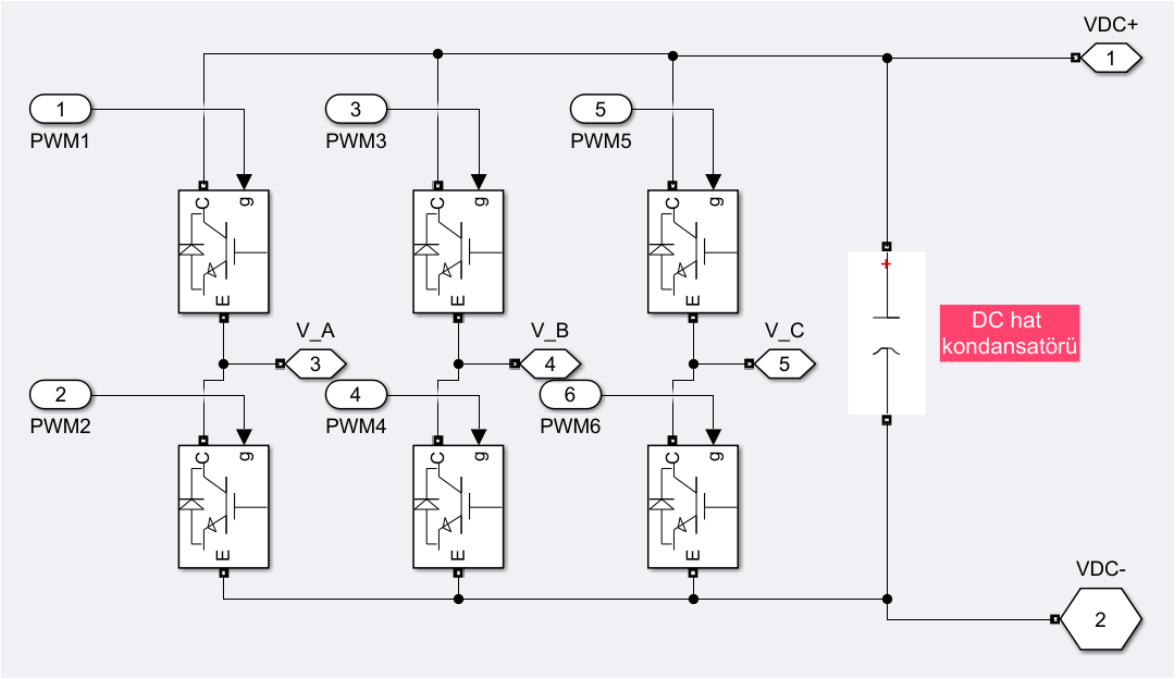
Şekil 5.13 : Değiştir ve Gözlemle (P&O) algoritması MATLAB kodu

5.2.2 FV-STATKOM modeli

Bu bölümde FV-STATKOM bileşenlerinden olan DC-AC Evirici (İnverter), DC hat kondansatörü, bağlantı endüktansı, STATKOM ve FV-STATKOM kontrolörlerin modellemesi ve bu elemanların uygun değerleri için gerekli hesaplamalar yapılacak.

5.2.2.1 İnverter (DC-AC Evirici)

İnverter, FV sistemlerin ve FV-STATKOM'un en önemli parçasıdır. Bu çalışmada inverter kontrolü FV-STATKOM operasyonu için kullanılacağından inverter modellemesine bu başlık altında değinilmiştir. Şekil 5.14'te invertere ait MATLAB alt bloğu görüntüsü verilmiştir. Diğer kontrol bloklarının çeşitli işlemlerinden elde edilen PWM işaretleri inverter yarı iletken elemanlarını anahtarlayarak istenilen AC çıkış geriliminin elde edilmesi sağlanır.



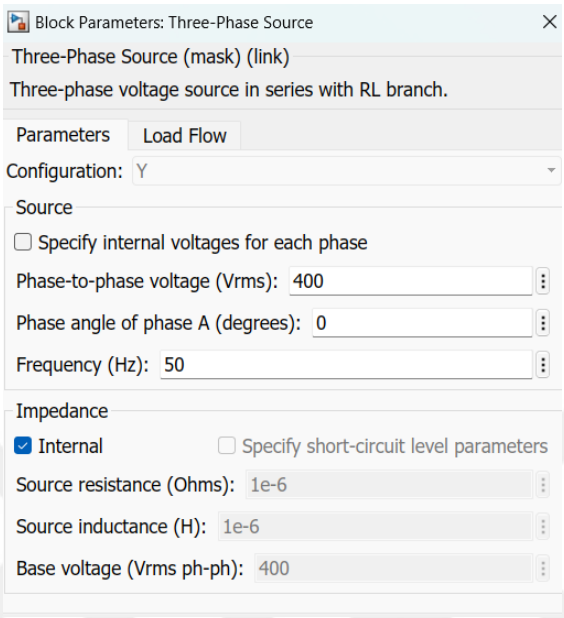
Şekil 5.14 : MATLAB inverter alt bloğu

İnverterin çıkışında istenilen AC gerilimin oluşabilmesi ve bazı diğer hesaplarda kullanmak için DC hat geriliminin doğru hesaplanması gerekmektedir. Bunun için Denklem 5.4'teki eşitlik kullanılır. Hesaplama için şebeke parametreleri de gerekmektedir bu parametreler Şekil 5.15'teki ekran görüntüsünde verilmiştir. Modülasyon indeks değeri m_i=0,83 olarak alınmıştır [32]. V_{LL} fazlar-arası gerilimi, m_i ise modülasyon indeksini ifade etmektedir.

$$V_{DC} \geq \frac{2\sqrt{2} \cdot V_{LL}}{\sqrt{3} \cdot m_i} \tag{5.9}$$

$$V_{DC} \geq \frac{2\sqrt{2} \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0{,}83} \approx 785 \text{ V}$$

Yukarıdaki hesaplamalardan sonra DC hat gerilim değeri 800 V olarak alınmıştır.



Şekil 5.15 : MATLAB şebeke bloğu parametreleri

Hesaplamalar için inverter gücü belirlenirken FV sistemin maksimum aktif güç üretim kapasitesi P_{max} değerinin üstünde seçilmiştir. Bundan dolayı hesaplamalarda inverter gücü S_{inv}=200 kVA olarak alınmıştır.

5.2.2.2 DC hat kondansatörü değerinin belirlenmesi

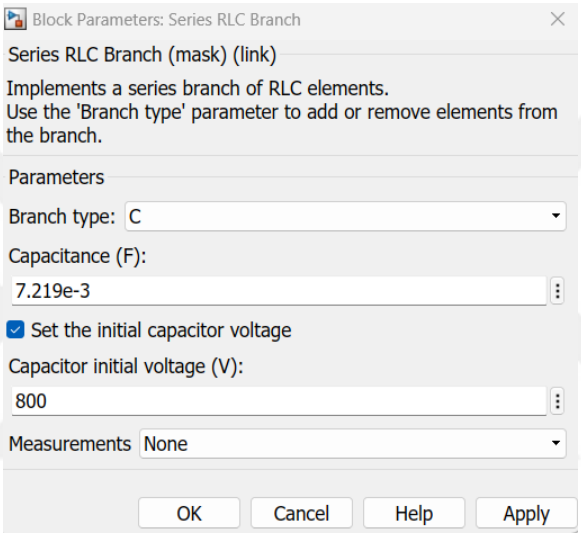
DC hat kondansatörünün öneminden hesaplama parametrelerinden 3. Bölümde bahsedilmişti. Minimum hat kondansatör değerinin belirlenmesi için kullanılacak formül Denklem 5.5'te verilmiştir. Burada doğru değerin elde edilmesi için modülasyon indeksi maksimum değerinde alınmalıdır. Hesaplama yapılırken m_i=1, ΔV_{DC}=%7*V_{DC} (V_{DC} yukarıda hesaplanıp 800 V olarak belirlenmişti bundan dolayı ΔV_{DC}=56 V alınır), f= 50 Hz olarak alınmıştır. I_{rms} değeri hesaplanırken sistemin STATKOM modunda reaktif güç alışverişi için kullanabileceği maksimum inverter kapasitesinden yararlanılır. Aktif güç üretiminin olmadığı bir anda FV-STATKOM inverter kapasitesinin tamamını reaktif güç değişimi için kullanılır. Bundan dolayı maksimum reaktif güç Q_{max}= S_{inv}=200 kVAR olarak hesaplamalarda kullanılmıştır. I_{rms} değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$I_{rms} = \frac{Q_{max}}{\sqrt{3} \cdot V_{LL}} = \frac{200.000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 288{,}68 \text{ A}$$

$$C_{DC} = \frac{I_{rms}}{\sqrt{3}\pi \cdot f \cdot \Delta V_{DC}} \left[1 - sin\left(cos^{-1}(m_i \cdot \frac{\pi}{4})\right)\right] \quad (5.10)$$

Minimum C_{DC} değeri;

$$C_{DC} = \frac{288{,}68}{\sqrt{3}\pi \cdot 50 \cdot 56} \left[1 - sin\left(cos^{-1}(\frac{\pi}{4})\right)\right] = 7{,}219 \text{ mF}$$



Şekil 5.16 : DC hat kapasitör bloğu parametre ayarı

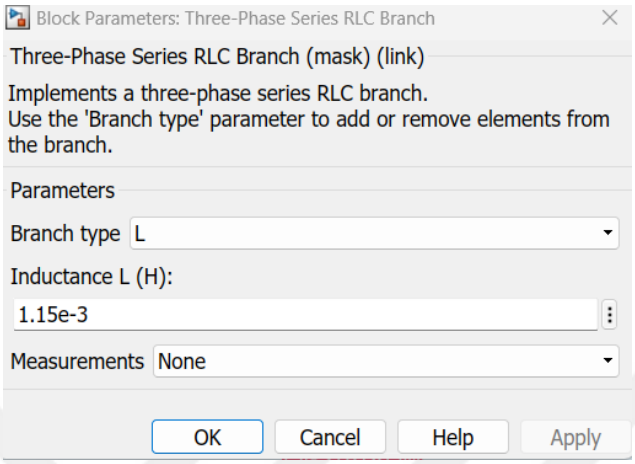
5.2.2.3 Bağlantı endüktans değerinin belirlenmesi

STATKOM ve şebeke arasındaki reaktif güç transferi için bağlantı hattında bir transformatör veya endüktans bulunması gerekir. Bu çalışmada AC şebeke ile STATKOM arasına hem filtre görevi görmesi hem de güç alışverişine imkân tanıyacak bir endüktans bağlanmıştır. Endüktansın değeri belirlenirken öncelikle sistem empedansı (Z_{baz}) hesaplanır ve baz empedans olarak kabul edilir. Daha sonra da sistem empedansının 0,1-02 pu (bu çalışmada 0,15 pu alınmıştır.) değerleri arasında bir endüktif reaktans (X_L) değeri belirlenir. Endüktif reaktans değerinden endüktans değerine (L) geçiş yapılır. Endüktans değeri (L) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Z_{baz} = \frac{(\sqrt{3} \cdot V_{LL})^2}{S} = \frac{(\sqrt{3} \cdot 400)^2}{200.000} = 2{,}4\ \Omega\ (1 \text{ pu})$$

$$X_L = 0{,}15 \cdot Z_{baz} = 0{,}15 \cdot 2{,}4 = 0{,}36\ \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi \cdot f} = \frac{0{,}36}{2\pi \cdot 50} = 1{,}15\ mH$$

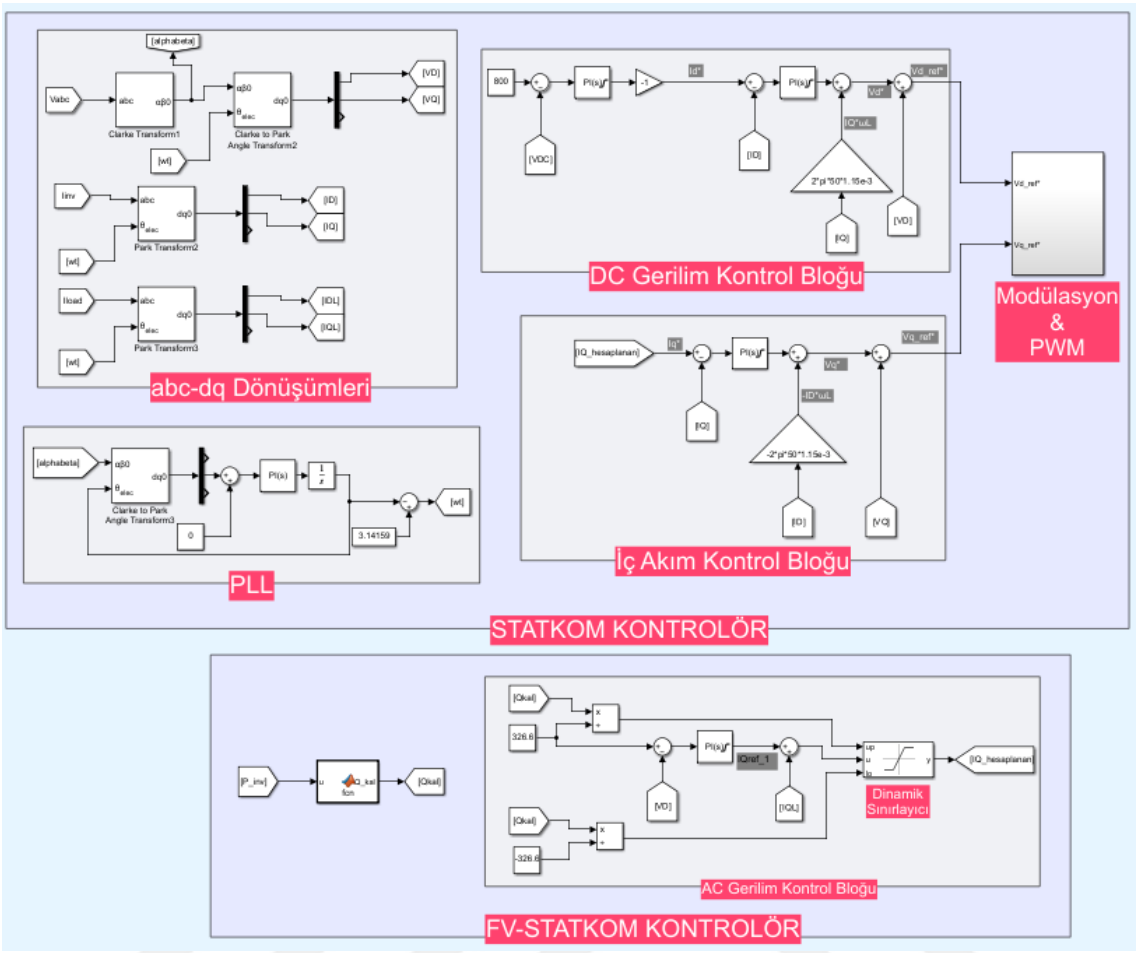


Şekil 5.17 : Bağlantı endüktans bloğu parametre ayarı

5.2.2.4 STATKOM ve FV-STATKOM kontrolör

MATLAB'da modellenen sistemdeki STATKOM ve FV-STATKOM kontrolü için oluşturulan bloklar genel olarak Şekil 5.18'deki gibidir.

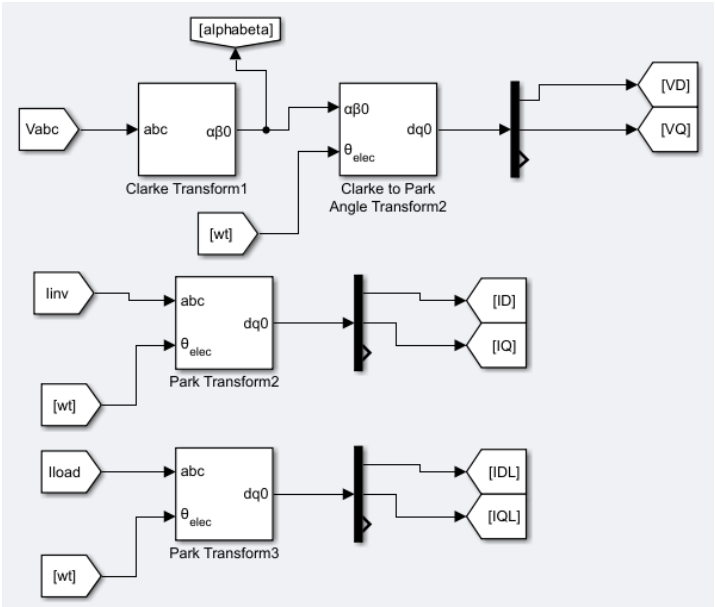
Sistemden FV-STATKOM kontrolörü çıkarılsa sistem klasik bir STATKOM'a dönüşür. Veya sistemden reaktif güç kontrolünü sağlayan işlevler ve FV-STATKOM kontrolörü birlikte çıkarılsa bu kez de sistem klasik FV sisteme dönüşür. Sisteme FV-STATKOM kontrolörünün eklenmesi bu sistemin artık FV-STATKOM olarak çalışmasını sağlamaktadır.



Şekil 5.18 : STATKOM ve FV-STATKOM kontrol blokları

Bu başlık altında bloklar üzerinden sistemin kontrol mantığı anlatılacaktır.

- **abc-dq Dönüşümleri Bloğu**

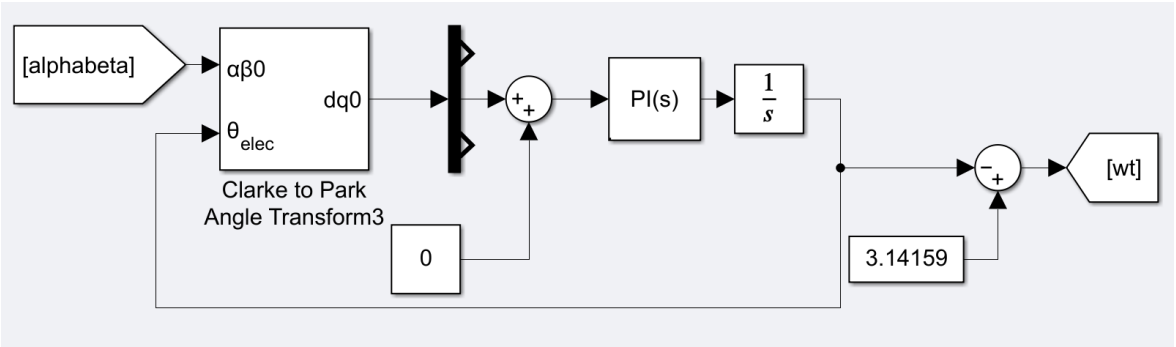


Şekil 5.19 : abc-dq dönüşümleri bloğu

Bu blok, güç sistemlerinde ölçülen üç fazlı (abc) gerilim ve akım sinyallerinin, kontrol algoritmaları için daha elverişli olan dönen bir koordinat sistemine dönüştürülmesini sağlar. Bu dönüşüm Senkron Referans Düzlem (Synchronous Reference Frame- SRF) tabanlı Vektör Kontrolü'nün temelini oluşturur.

- Gerçek zamanlı olarak ölçülen V_{abc} (üç fazlı gerilim) sinyalleri ilk olarak Clarke Dönüşümüne tabi tutulur. Bu dönüşüm, üç fazlı abc koordinat sistemindeki sinyalleri, genlikleri ve faz açıları korunarak, iki fazlı sabit αβ koordinat sistemine dönüştürür. Bu sayede, üç boyutlu bir sistem iki sabit bileşene indirgenerek analiz ve işlem yükü azaltılır.
- Clarke dönüşümünden elde edilen V_{abc} (üç fazlı gerilim)'in αβ bileşenleri, Clarke to Park Transform bloğu aracılığıyla dq dönen koordinat sistemine aktarılır. Bu dönüşüm için sistemin faz açısı (θ_{elec}) kullanılır. Gerçek zamanlı olarak ölçülen I_{inv} (inverter akımı) ve I_{load} (yük akımı) sinyalleri Simulinkteki Park Transform bloğu sayesinde θ_{elec} açısı da kullanılarak Clarke dönüşümü bloğuna girmeden doğrudan dq bileşenlerine ayrılmıştır. Park dönüşümü, AC sinyallerini d ve q eksenlerinde zamanla değişmeyen (DC) bileşenlere dönüştürerek kontrolü büyük ölçüde basitleştirir. d-ekseni aktif güç ile ilişkili akım veya gerilim bileşenini, q-ekseni ise reaktif güç ile ilişkili akım veya gerilim bileşenini temsil eder. abc-dq Dönüşümleri Bloğunun çıktıları; V_{abc}, I_{abc}, I_{inv} sinyallerinin dq eksenindeki bileşenleri olan; V_D, V_Q, I_D, I_Q, I_{DL}, I_{QL} 'dir.

- **PLL (Faz Kilitleme Döngüsü) Bloğu**



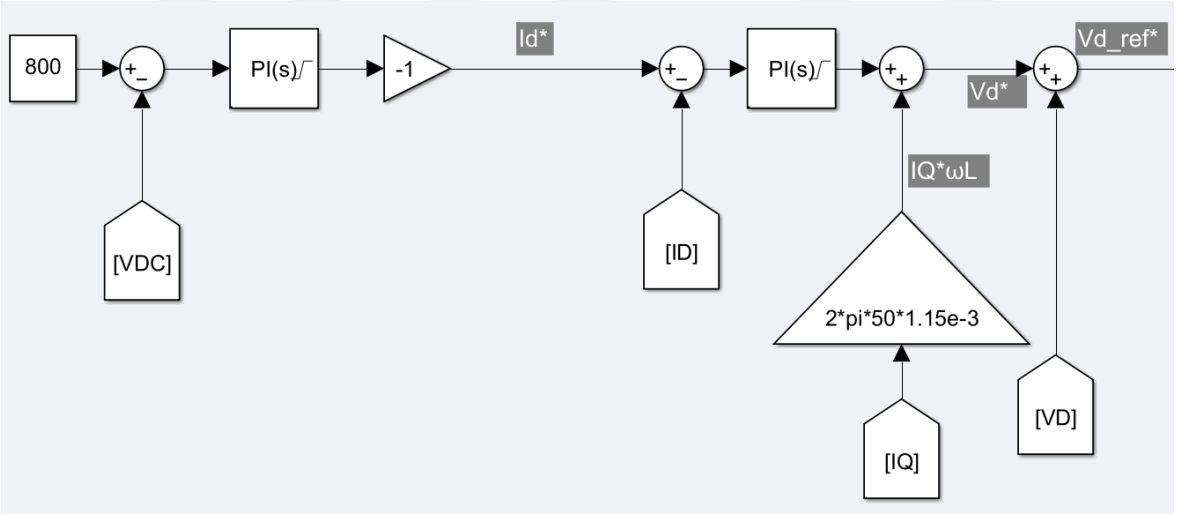
Şekil 5.20 : PLL bloğu

Bu blok, sistemin şebeke ile senkronizasyonunu sağlamak ve tüm Park dönüşümleri için gerekli olan faz açısı bilgisini (θ_{elec}) elde etmekle görevlidir.

- Geri beslemeli bir kontrol döngüsü olan PLL, Clarke dönüşümünden elde edilen αβ eksenindeki gerilim bileşenlerini kullanarak şebekenin faz açısını takip eder. Dönüşümden elde edilen q-ekseni gerilim bileşeni PLL'nin hata sinyali olarak kullanılır.
- Hata sinyali bir Oransal-İntegral (PI) kontrolör tarafından işlenir. PI kontrolör katsayıları deneme yanılma yoluyla bulunarak K_p=10, K_i=50000 olarak alınmıştır. PI kontrolörün çıkışı, şebekenin açısal frekans sapmasını temsil eder. Bu frekans sapması daha sonra bir integratör (1/s) bloğundan geçirilerek doğru faz açısı (θ_{elec}) elde edilir. Doğru senkronizasyon sağlandığında, q-ekseni gerilim bileşeni sıfıra yaklaşır ve PLL kilitlenmiş duruma gelir. Bu θ_{elec} (ωt) bilgisi, diğer tüm abc-dq ve dq-abc dönüşümleri için referans olarak kullanılır.

- **DC Gerilim Kontrol Bloğu**

Bu blok, sistemin DC hat gerilimini istenen referans değerde tutmak için bir dış kontrol döngüsü olarak çalışır. Bu blok kontrol, temel olarak d-ekseni akım bileşeninin kontrolü üzerinden gerçekleştirilir.



Şekil 5.21 : DC gerilim kontrol bloğu

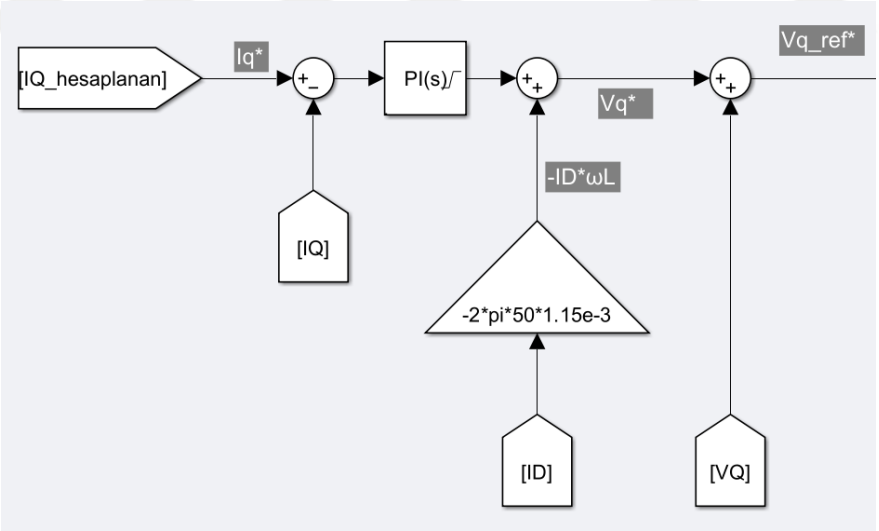
- Öncelikle, referans DC gerilim değeri (Denklem 5.9 kullanılarak 800V olarak hesaplanmıştı) ile ölçülen gerçek DC bara gerilimi (V_{DC}) arasındaki fark alınarak bir gerilim hatası oluşturulur.
- Bu hata sinyali, 1. PI kontrolör tarafından işlenir. PI kontrolörün çıkışı, sabit DC bara gerilimini elde etmek için inverterin şebekeyle aktif güç değişimini

temsil eden d-ekseni akım referansı olan I_d* değerini belirler. 1. PI kontrolörün katsayıları deneme yanılma yoluyla bulunarak Kp=5, Ki=200 olarak alınmıştır.

- I_d* sinyalinin inverter d-ekseni akım bileşeni (I_D) ile farkı alınır ve ikinci PI kontrolörün hata sinyali yapılır. PI kontrolör çıkışına; q-ekseni akımının (I_Q) neden olduğu çapraz kuplaj etkisini yok etmek için, ωLI_Q ($2\pi*f*L*I_Q=2\pi*50*1{,}15e\text{-}3*I_Q$) terimi eklenir (modelde kullanılan L değeri yukarıda 1,15 mH olarak hesaplanmıştı). Bu sayede d-ekseni akım kontrolünün q-ekseninden bağımsız çalışması sağlanır. Şebekenin d-ekseni gerilimi (V_D) de ileri besleme olarak kullanılarak V_d* değerine eklenir. Bu bileşenlerin toplamı, d-ekseni gerilim referansını (V_{d_ref}) oluşturur. 2. PI kontrolörün katsayıları deneme yanılma yoluyla bulunarak K_p=25, K_i=500 olarak alınmıştır.

- **İç Akım Kontrol Bloğu**

Bu blok, inverterin reaktif güç akışını kontrol eden iç kontrol döngüsüdür ve q-ekseni akım bileşeninin kontrolüne odaklanır.



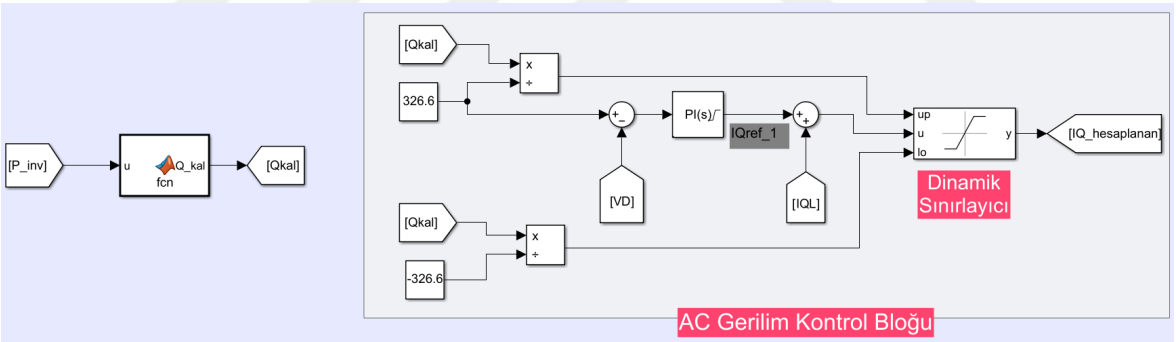
Şekil 5.22 : İç akım kontrol bloğu

- FV-STATKOM Kontrolör tarafından oluşturulan $I_{Q_hesaplanan}$ isimli sinyal reaktif güç referans akım değeri (I_q*) olarak kullanılır. I_q* ile inverterin ölçülen q-ekseni akım bileşeni (I_Q) arasındaki fark alınarak bir akım hatası oluşturulur.

- Bu hata sinyali, PI kontrolör tarafından işlenir. PI kontrolör çıkışına; d-ekseni akımının (I_D) neden olduğu çapraz kuplaj etkisini yok etmek için, $-\omega L I_D$ ($-2\pi*f*L*I_D=-2\pi*50*1{,}15e\text{-}3*I_D$) terimi eklenir (modelde kullanılan L değeri yukarıda 1,15 mH olarak hesaplanmıştı) terimi eklenir. Bu sayede q-ekseni akım kontrolünün d-ekseninden bağımsız çalışması sağlanır. Şebekenin q-ekseni gerilimi (V_Q) de ileri besleme olarak kullanılarak V_q* değerine eklenir. Bu bileşenlerin toplamı, q-ekseni gerilim referansını (V_{q_ref}) oluşturur. PI kontrolörün katsayıları deneme yanılma yoluyla bulunarak K_p=25, K_i=500 olarak alınmıştır.

- **FV-STATKOM Kontrolör Bloğu**

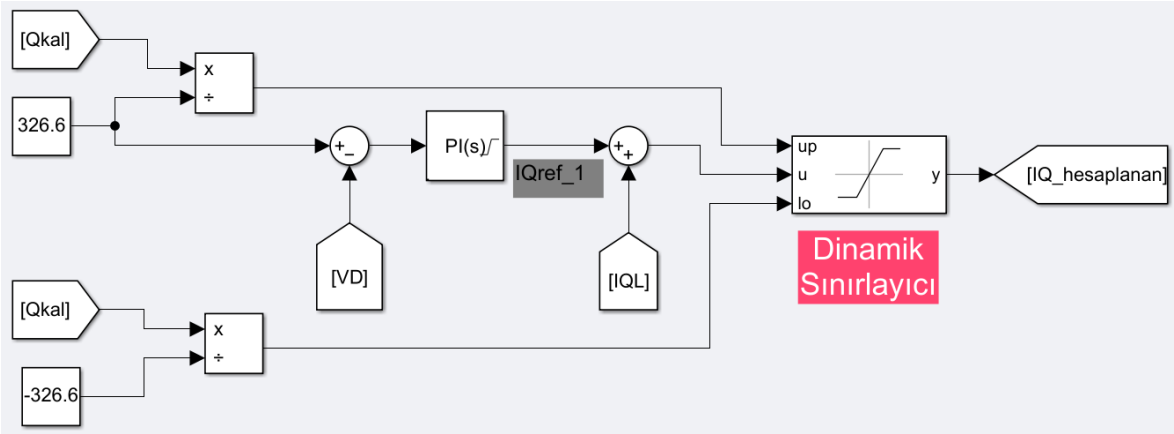
FV-STATKOM'un klasik STATKOM'dan farkı, FV sistemle birlikte çalıştığı için ilave kontrol işlevlerinin olmasıdır. Çünkü FV-STATKOM konseptinde harici bir inverter bulunmaz FV sistem ve STATKOM inverteri ortak olarak kullanır. FV-STATKOM kontrolör bloğu bu birlikte çalışma durumunun senaryosunu içermektedir. Hangi koşullarda STATKOM olarak hangi koşullarda da FV olarak çalışıldığı veya ortak çalışıldığı durumlar bu senaryoyla belirlenir. FV-STATKOM kontrolör bloğu şekil 5.23'te verilmiştir.



Şekil 5.23 : FV-STATKOM kontrolör bloğu

Kontrolör oluşturulurken FV sistemin aktif güç üretimi öncelenmiştir. Yani sistemi STATKOM olarak kullanmak için FV sistemin inverterinin kalan gücünden faydalanılmıştır. Bunun için öncelikle işlemin başında FV inverter aktif gücü fonksiyon bloğuna girilmiştir. Oluşturulan modeldeki inverter gücü S_{inv}; Denklem 5.8 ile hesaplanan 197 kW gücünün biraz üstünde 200 kVA olarak girilmiştir. FV sistemin anlık ürettiği aktif güçten kalan reaktif güç kapasitesi $Q_{kal} = \sqrt{{S_{inv}}^2 - {P_{inv}}^2} = \sqrt{200.000^2 - {P_{inv}}^2}$ formülüyle edilmektedir.

FV-STATKOM kontrolör bloğunun içerisindeki en önemli parçalardan birisi AC Gerilim Kontrol Bloğudur ve bloğun iç yapısı Şekil 5.24'te sunulmuştur.



Şekil 5.24 : AC gerilim kontrol bloğu

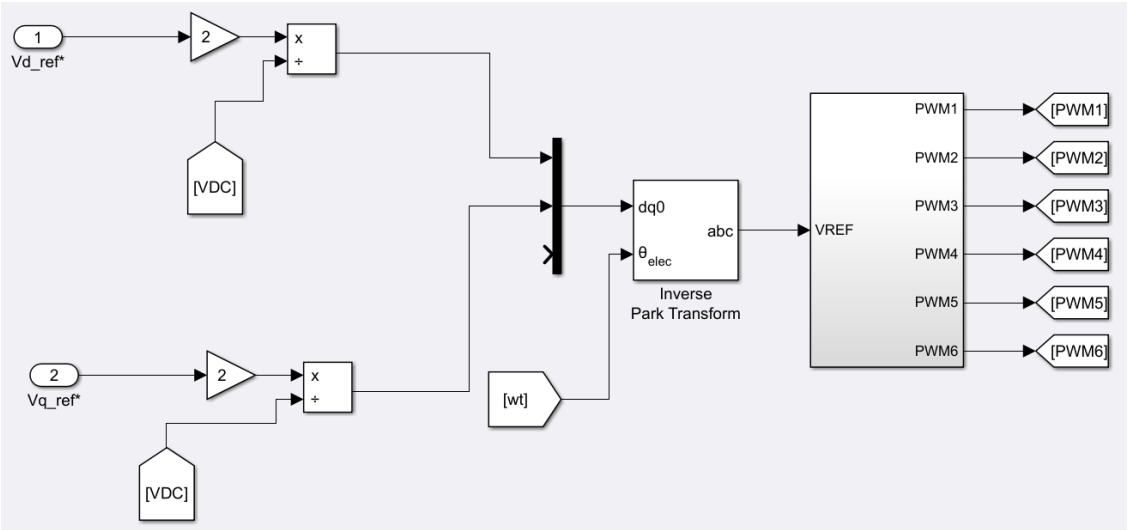
Bu bloğun amacı ortak bağlantı noktasındaki 3 fazlı AC gerilimin d ekseni bileşeni olan V_D gerilimini kontrol ederek gerilim regülasyonunu sağlamaktır ve buna paralel olarak güç faktörünü iyileştirmektir. Fonksiyon bloğunda hesaplanan Q_{kal} değeri bu bloktaki en önemli en çok kullanılan parametredir. Çünkü inverter kapasitesinin gerçek hayattaki fiziksel sınırlılığı, modelde bu parametre sayesinde uygulanabilmektedir. Bloğun çalışma mantığı aşağıdaki gibidir.

- d-q çerçevesi kontrol stratejisinde V_D bileşeni doğrudan faz-nötr tepe gerilimini ifade etmektedir. 400 V etkin faz-faz gerilimine sahip bir AC sistemin faz-nötr etkin gerilim değeri ($\frac{400}{\sqrt{3}} = 230{,}94\ V$) 230,94 V olur. Faz-nötr tepe değeri ise ($230{,}94 \cdot \sqrt{2} = 326{,}6\ V$) 326,6 V olur. Bu yüzden V_{D_ref}=326,6 V'tur.
- Bloğun amacı V_D değerini V_{D_ref} değerinde tutmaktır. Bu sayede gerilim regülasyonu sağlanmış olur. Hata sinyali V_{D_ref} - V_D olarak hesaplanır.
- Hesaplanan hata sinyali bir Oransal-İntegral (PI) kontrolörüne (PI(s)) beslenir. Bu kontrolörün çıktısı, gerilim hatasını düzeltmek için gereken temel reaktif akım referansını (I_{Qref_1}) oluşturur. PI kazançları (K_p, K_i) gerilim hatasını hızla sıfırlamak ve kararlı bir yanıt elde etmek üzere ayarlanır. Burada K_p ve K_i değerleri sırasıyla 0.2 ve 2 alınmıştır.
- I_{QL} sinyali, yükün anlık reaktif akım talebini temsil eder. Bu terim, AC gerilim kontrolörünün çıktısı olan I_{Qref_1} sinyaline bir toplam bloğu

aracılığıyla eklenir. Bunun amacı yükteki reaktif güç değişimlerine, gerilim hatası oluşmasını beklemeden anında tepki vermektir. Bu ileri besleme terimi, kontrolörün geçici yanıtını iyileştirerek güç faktörünün daha hızlı toparlanmasına yardımcı olur. Toplam bloğunun çıkışında da $I_{Qref_1} + I_{QL}$ sinyali oluşur.

- Toplam bloğunun çıkışı dinamik sınırlayıcı bloğunun u girişine girilir. Bu blok inverterin fiziksel sınırları dahilinde çalışmasını garanti eder. Toplam bloğundan elde edilen değerin direkt olarak kullanılması inverteri fiziksel sınırlarının dışına çıkartabileceği için dinamik sınırlayıcı bloğun girişindeki alt ve üst limit girişlerinin doğru belirlenmesi gerekmektedir.
- Dinamik sınırlayıcı bloğun üst limit değeri; yukarıda hesaplanan V_D (326,6) değeri ve Q_{kal} kullanılarak hesaplanır. Üst limit değeri: Q_{kal} / V_D yani Q_{kal} / 326,6 'dır.
- Aynı şekilde dinamik sınırlayıcı bloğun alt limit değeri: -Q_{kal} / V_D yani -Q_{kal} / 326,6 'dır.
- Bu kontrol bloğunun nihai çıktısı, kapasite sınırlaması uygulanmış reaktif akım referansı olan $I_{Q_hesaplanan}$ sinyalidir. Bu sinyal, inverterin iç I_Q akım kontrol döngüsüne beslenerek inverterin reaktif akım çıkışını kontrol eder.

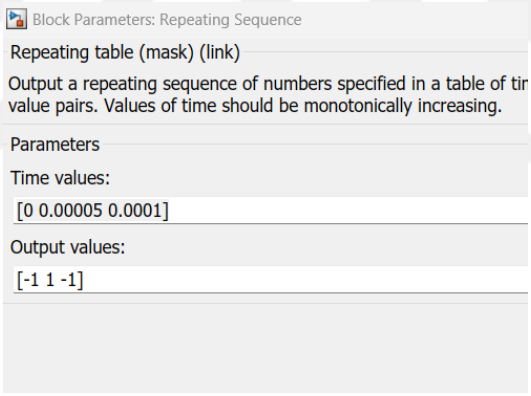
- **Modülasyon ve PWM Bloğu**



Şekil 5.25 : Modülasyon ve PWM bloğu

Bu blok, kontrolörler tarafından hesaplanan dq ekseni gerilim referanslarını, inverterin anahtarlama elemanları için fiziksel olarak uygulanabilir PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) sinyallerine dönüştürür.

- DC gerilim ve iç akım kontrol bloklarından gelen V_{d_ref} ve V_{q_ref} referansları, Ters Park Dönüşümüne tabi tutulur. Bu dönüşüm, PLL'den alınan faz açısı (θ_{elec}) bilgisini kullanarak dq koordinat sistemindeki gerilim referanslarını tekrar üç fazlı abc koordinat sistemindeki (V_{REF}) referans sinyallerine dönüştürür.
- V_{REF} sinyalleri bir PWM ünitesine iletilir. PWM ünitesi, bu referans sinyalleri ile yüksek frekanslı bir taşıyıcı üçgen dalgayı karşılaştırarak, inverterin güç yarı iletkenlerini açıp kapatarak Darbe Genişlik Modülasyonlu sinyalleri (PWM1-PWM6) üretir. Bu sinyaller, inverterin istenen AC gerilimleri üretmesini sağlar. Bu çalışmada taşıyıcı üçgen dalganın frekansı 10 kHz olarak seçilmiştir.

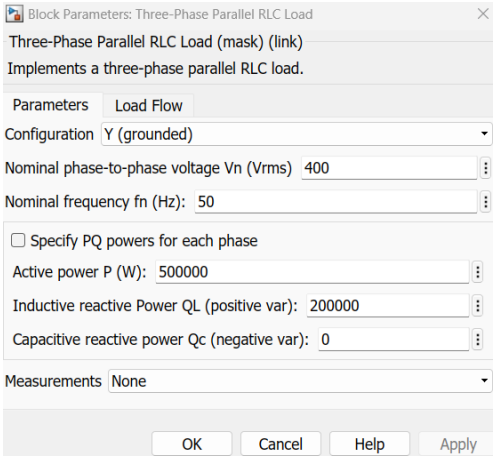


Şekil 5.26 : Taşıyıcı üçgen dalga bloğu parametreleri

5.3 Simülasyon Çalışmaları

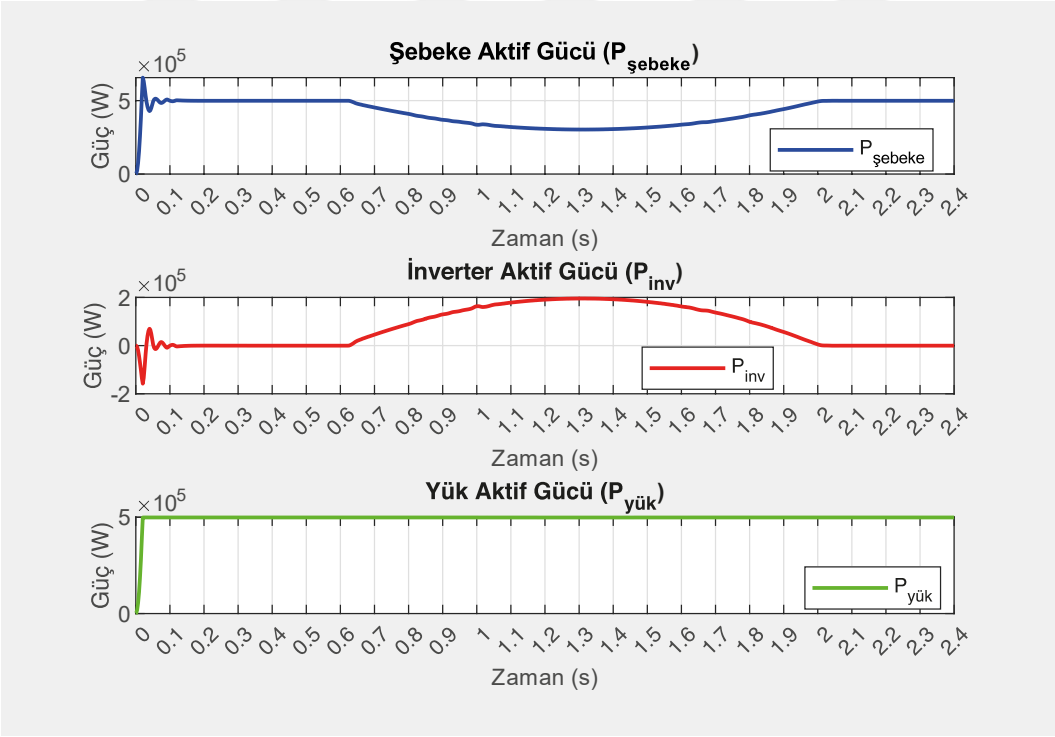
Simülasyon çalışması yapılırken iki farklı yük durumuna göre sistem davranışı incelenmiştir. Simülasyon süresi de günün 24 saatini temsilen 2,4 saniye alınmış olup her saniye gün içerisindeki bir saate karşılık gelmektedir. Buna göre gün içerisindeki farklı ışınım değerlerine göre sistem farklı modlarda çalışacaktır.

5.3.1 Senaryo-1



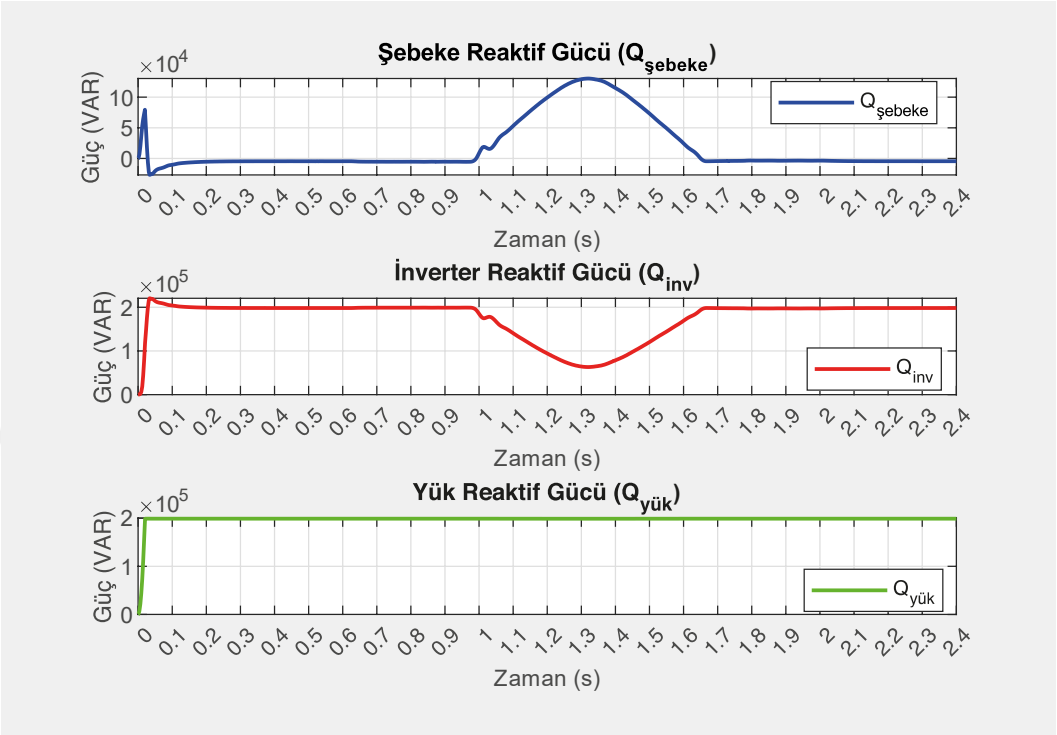
Şekil 5.27 : Senaryo-1 3 fazlı RL yük bloğu parametreleri

İlk senaryoda yük olarak 500 kW aktif güç ve 200 kVAR endüktif reaktif güç çeken 3 fazlı RL yükü kullanılmıştır. RL yükü simülasyon boyunca sistemde devrededir. Işınım değerleri gün içinde değişecek şekilde ayarlanmış ve FV-STATKOM'un kalan evirici kapasitesiyle yaptığı gerilim regülasyonu ve reaktif güç kompanzasyonu için; şebeke, inverter ve yük aktif-reaktif güç grafikleri, cosΦ'nin değişim grafiği ve V_D gerilim grafiği incelenmiştir.



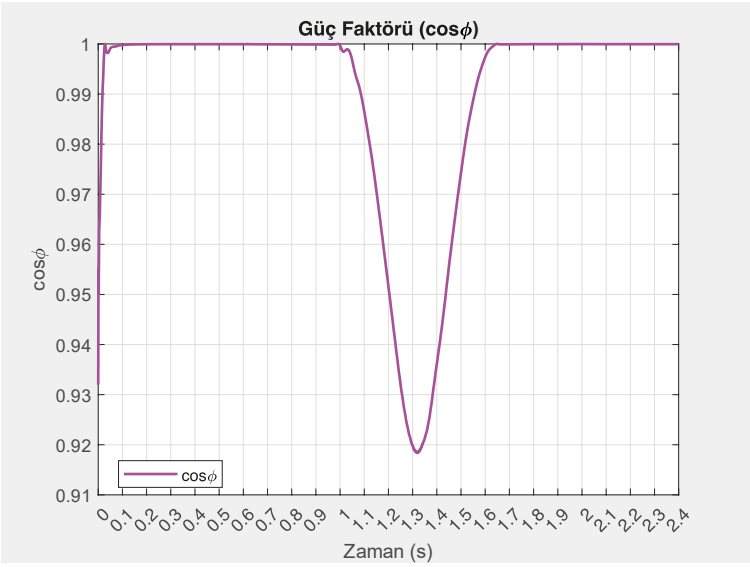
Şekil 5.28 : Senaryo-1 şebeke, inverter ve yükün aktif güç grafikleri

Şekilden de görüldüğü üzere gece saatlerinde ışınım olmadığı için yükün sabit olan aktif güç talebi şebeke tarafından karşılanmış, ışınım olduğu saatlerde de FV sistem ve şebeke güç talebini birlikte karşılamışlardır.



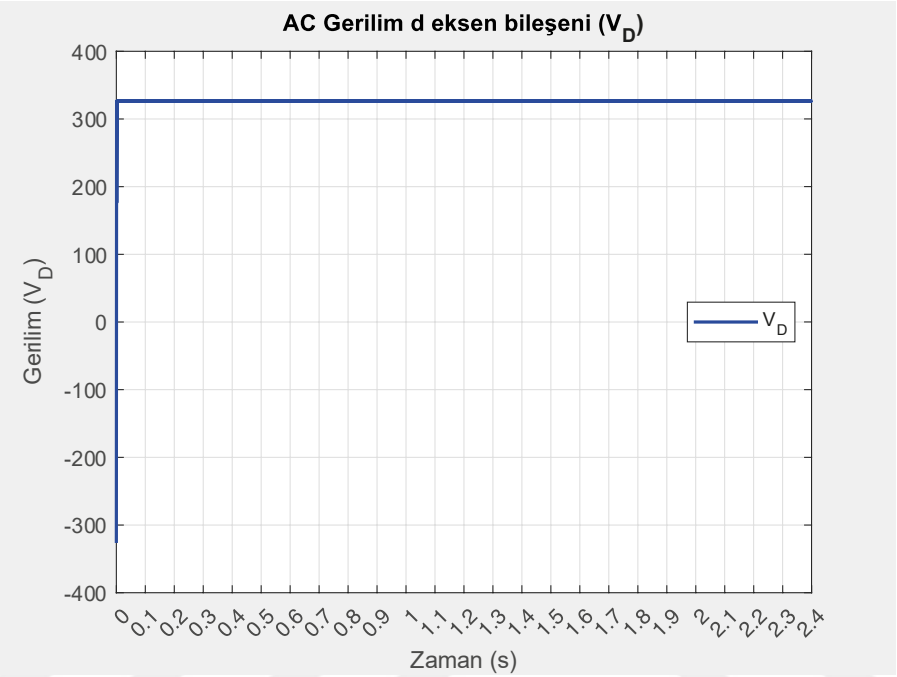
Şekil 5.29 : Senaryo-1 şebeke, inverter ve yükün reaktif güç grafikleri

RL yükün 200 kVAR'lık endüktif reaktif güç ihtiyacı, gece saatlerinde üretim olmadığından dolayı eviricinin tüm kapasitesini kullanan STATKOM tarafından karşılanmıştır. Üretim arttıkça STATKOM aktif güce öncelik verdiği için reaktif güç talebinin bir kısmını karşılamaya başlamıştır.



Şekil 5.30 : Senaryo-1 şebeke cosΦ grafiği

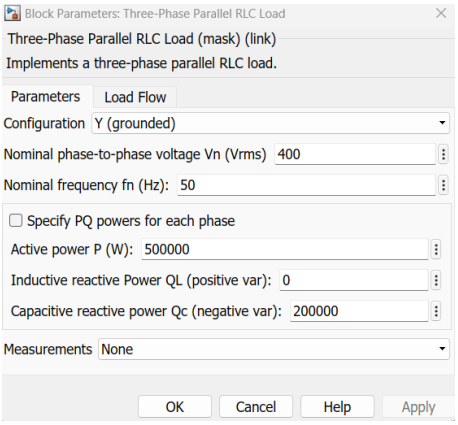
Şekil 5.30'daki grafikte şebekenin güç faktörünün değişimi verilmiştir. Görüldüğü üzere ışınım olmadığı vakitlerde STATKOM cosΦ değerini kısa sürede 1'e getirmektedir. Fakat ışınımın artıp FV sistemin aktif güç üretmeye başlamasıyla birlikte sadece kalan evirici kapasitesiyle yapabildiği maksimum reaktif güç kompanzasyonunu gerçekleştirmektedir.



Şekil 5.31 : Senaryo-1 V_D gerilimi grafiği

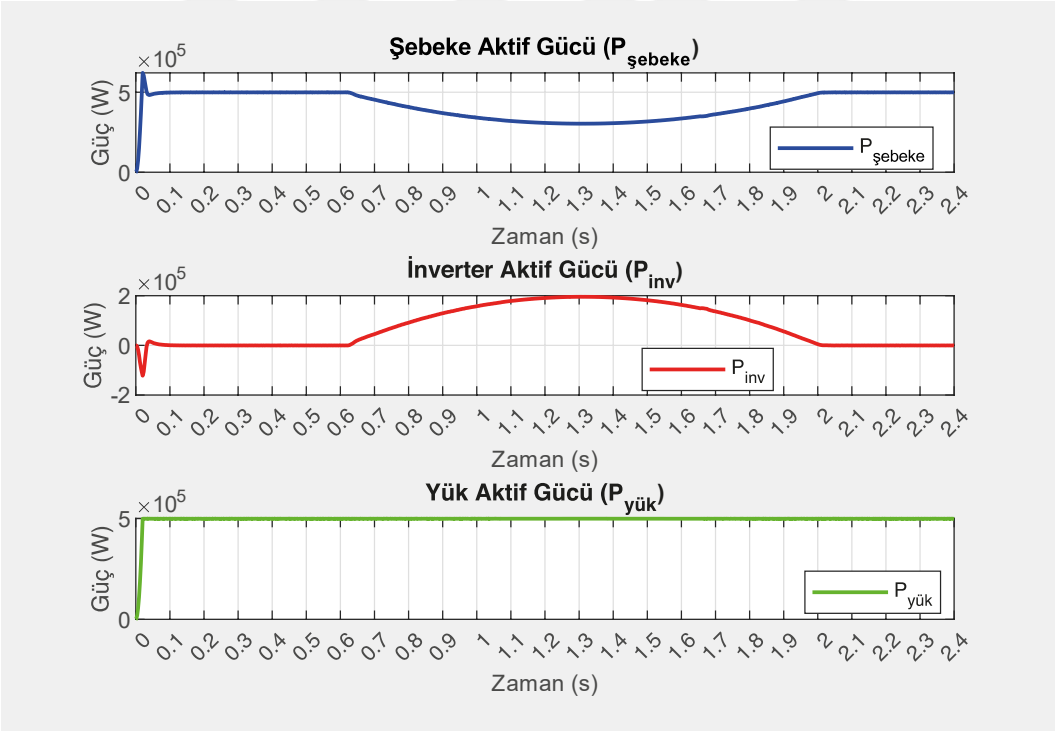
Yukarıdaki grafikte sistemin çalışma süresi boyunca V_d gerilimindeki değişimler gösterilmektedir. V_D geriliminde hafif dalgalanmalar gözükse de referans gerilim olan 326.6 V civarlarında seyretmektedir. Bu da gerilim kontrol bloğunun işlevini gayet iyi şekilde yerine getirdiğini göstermektedir. FV sistemin tam aktif olduğu saatlerde cosΦ değeri 1'eşitlenemese bile V_D değeri istenilen değer etrafında salınmış ve gerilim regülasyonu başarıyla sağlanmıştır. Kontrol mekanizması da zaten gerilim regülasyonunu öncelemektedir.

5.3.2 Senaryo-2



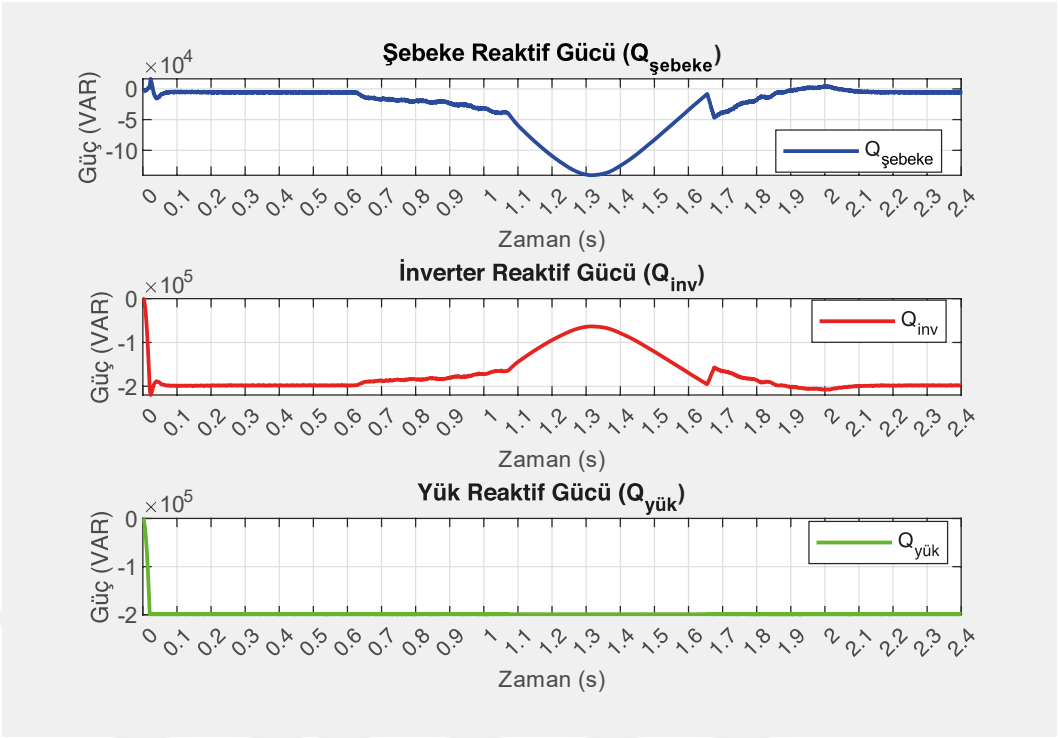
Şekil 5.32 : Senaryo-2 3 fazlı RC yük bloğu parametreleri

Bu senaryoda yük olarak 500 kW aktif güç ve 200 kVAR kapasitif reaktif güç çeken 3 fazlı RC yükü kullanılmıştır. RC yükü simülasyon boyunca sistemde devrededir. Işınım değerleri gün içinde değişecek şekilde ayarlanmış ve FV-STATKOM'un kalan evirici kapasitesiyle yaptığı reaktif güç kompanzasyonu için; şebeke, inverter ve yük aktif-reaktif güç grafikleri, cosΦ'nin değişim grafiği ve V_D gerilim grafiği incelenmiştir.



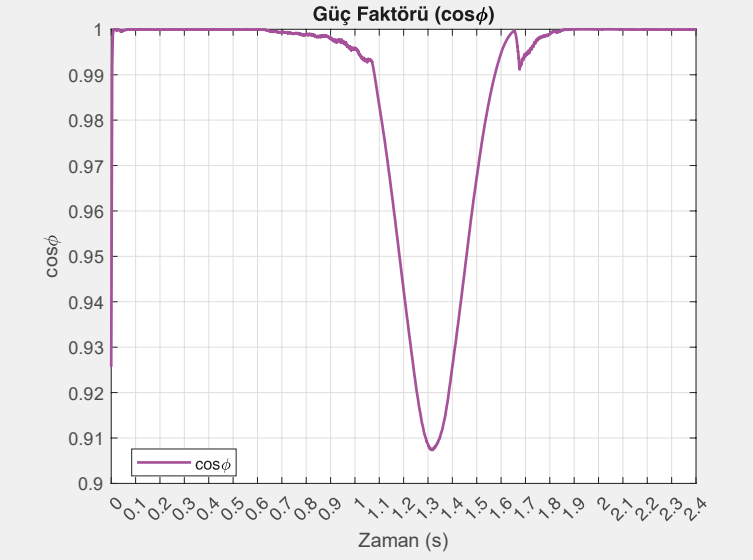
Şekil 5.33 : Senaryo-2 şebeke, inverter ve yükün aktif güç grafikleri

Şekilden de görüldüğü üzere gece saatlerinde ışınım olmadığı için yükün sabit olan aktif güç talebi şebeke tarafından karşılanmış, ışınım olduğu saatlerde de FV sistem ve şebeke güç talebini birlikte karşılamışlardır.



Şekil 5.34 : Senaryo-2 şebeke, inverter ve yükün reaktif güç grafikleri

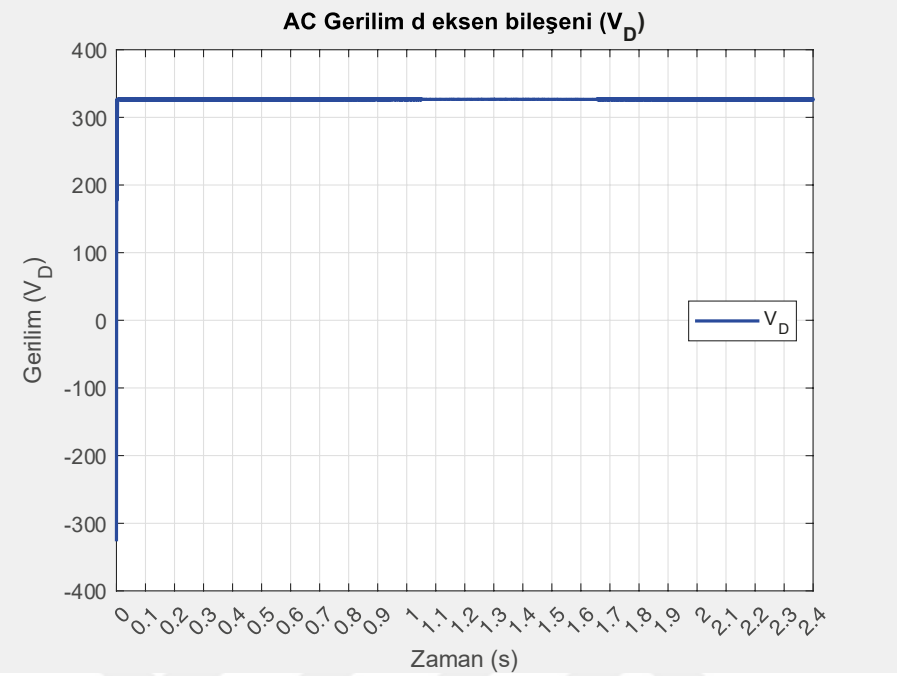
RC yükün 200 kVAR'lık reaktif güç ihtiyacı, gece saatlerinde üretim olmadığından dolayı eviricinin tüm kapasitesini kullanan STATKOM tarafından karşılanmıştır. Üretim arttıkça STATKOM aktif güce öncelik verdiği için reaktif güç talebinin bir kısmını karşılamaya başlamıştır.



Şekil 5.35 : Senaryo-2 şebeke cosΦ grafiği

Şekil 5.35'teki grafikte şebekenin güç faktörünün değişimi verilmiştir. Görüldüğü üzere ışınım olmadığı vakitlerde STATKOM cosΦ değerini kısa sürede 1'e getirmektedir. Fakat ışınımın artıp FV sistemin aktif güç üretmeye başlamasıyla birlikte sadece kalan

evirici kapasitesiyle yapabildiği maksimum reaktif güç kompanzasyonunu gerçekleştirmektedir.



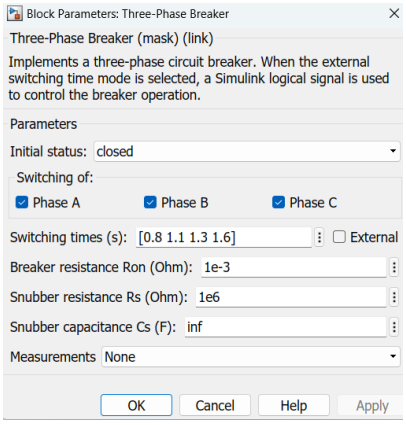
Şekil 5.36 : Senaryo-2 V_D gerilimi grafiği

Yukarıdaki grafikte sistemin çalışma süresi boyunca V_D gerilimindeki değişimler gösterilmektedir. V_D geriliminde hafif dalgalanmalar gözükse de referans gerilim olan 326.6 V civarlarında seyretmektedir. Bu da gerilim kontrol bloğunun işlevini gayet iyi şekilde yerine getirdiğini göstermektedir. FV sistemin tam aktif olduğu saatlerde cosΦ değeri 1'eşitlenemese bile V_D değeri istenilen değeri etrafında salınmış ve gerilim regülasyonu başarıyla sağlanmıştır.

5.3.3 Senaryo-3

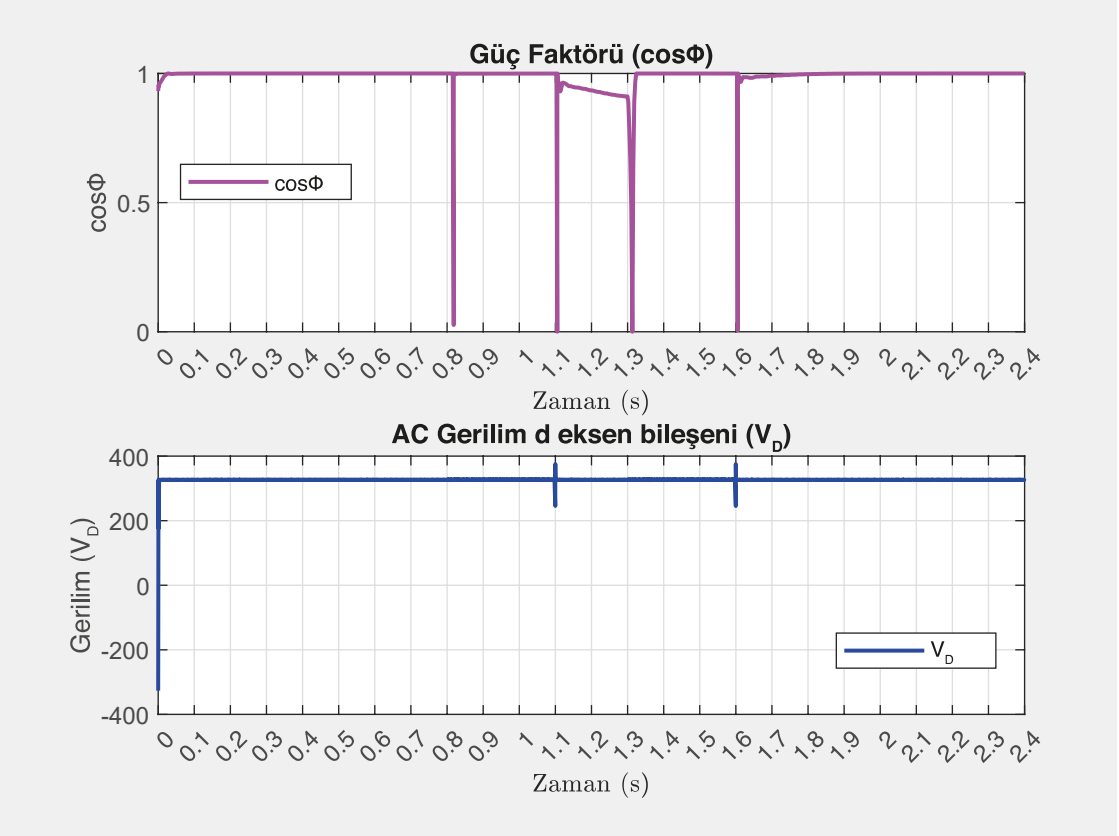
Bu çalışma senaryosunda 500 kW aktif güç ve 200 kVAR endüktif reaktif güç çeken 3 fazlı RL yükü ve 500 kW aktif güç ve 200 kVAR kapasitif reaktif güç çeken 3 fazlı RC yükü devreye belli zamanlarda girip çıkacaktır. RL ve RC yükleri için simülasyon ayrı ayrı çalıştırılacaktır. Simülasyonda yüklerin; devreye girme ve devreden çıkma anlarında ve sonrasında sistemin verdiği cevaplar incelenmiştir. Bu senaryoda gerilim regülasyonu için V_D grafiğine, güç faktörü düzeltimi için cosΦ grafiğine bakılacaktır. Yükleri anahtarlayan kesici parametreleri 5.37'deki gibi girilmiştir. Buna göre başlangıçta devrede olan yük; simülasyonun t=0.8sn anında devreden çıkarılmakta, t=1.1sn anında tekrar devreye alınmaktadır. Aynı şekilde t=1.3sn anında devreden çıkarılmakta ve t=1.6sn anında tekrar devreye alınmaktadır. FV sistem bu saatler içerisinde üretim yapmaktadır ve sürenin büyük

kısmında sistem Kısmi FV-STATKOM modunda çalışmakta çok kısa bir aralıkta ise Tam FV modunda çalışmaktadır.



Şekil 5.37 : SIMULINK kesici bloğu parametreleri

Şekil 5.37'deki kesici parametrelerine göre anahtarlanan RL yüklü sistemin cosΦ ve V_D grafikleri Şekil 5.38'de birlikte verilmiştir.

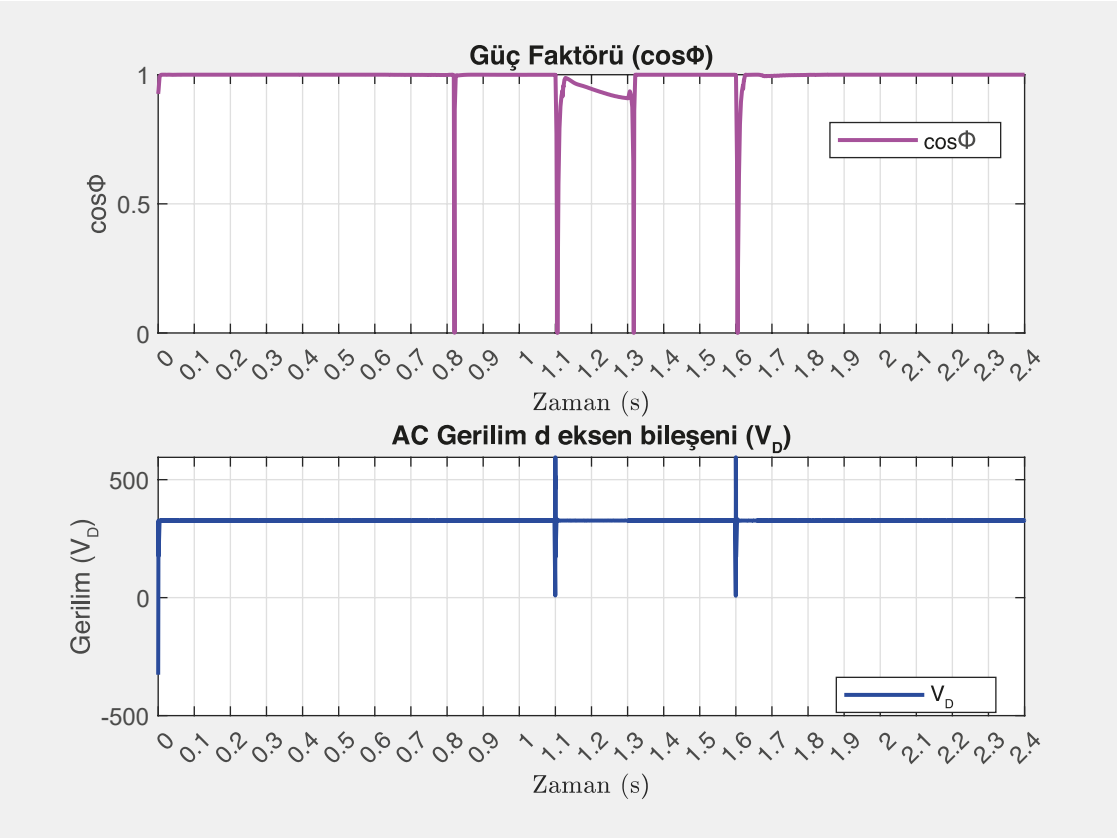


Şekil 5.38 : Senaryo-3 anahtarlanan RL yüklü sistemin cosΦ ve V_D grafikleri

FV-STATKOM aktif güç üretiminden kalan kapasiteyi öncelikle gerilim regülasyonunda kullanmakta ve aynı zamanda yettiğince güç faktörü düzeltimi yapmaktadır. Grafiklere bakıldığında yükün devreden çıkış ve devreye tekrar giriş anlarında kısa sürede hem gerilim

regülasyonu hem de güç faktörü düzeltimi başarıyla gerçekleşmiştir. Güç faktörü anahtarlama anlarından sonra yaklaşık 28 ms içerisinde düzeltilmiştir. Gerilim regülasyonu ise yaklaşık 0.2 ms içerisinde sağlanmıştır.

Şekil 5.37'deki kesici parametrelerine göre anahtarlanan RC yüklü sistemin cosΦ ve V_D grafikleri Şekil 5.39'da birlikte verilmiştir.



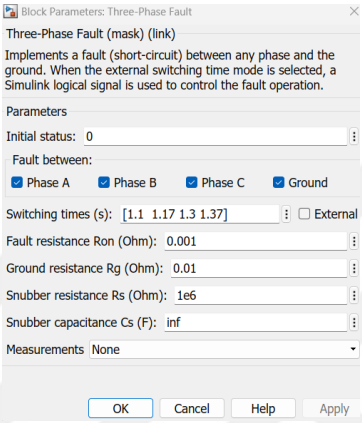
Şekil 5.39 : Senaryo-3 anahtarlanan RC yüklü sistemin cosΦ ve V_D grafikleri

FV-STATKOM aktif güç üretiminden kalan kapasiteyi öncelikle gerilim regülasyonunda kullanmakta ve aynı zamanda yettiğince güç faktörü düzeltimi yapmaktadır. Grafiklere bakıldığında yükün devreden çıkış ve devreye tekrar giriş anlarında kısa sürede hem gerilim regülasyonu hem de güç faktörü düzeltimi başarıyla gerçekleşmiştir. Güç faktörü anahtarlama anlarından sonra yaklaşık 27 ms içerisinde düzeltilmiştir. Gerilim regülasyonu ise yaklaşık 4 ms içerisinde sağlanmıştır.

5.3.4 Senaryo-4

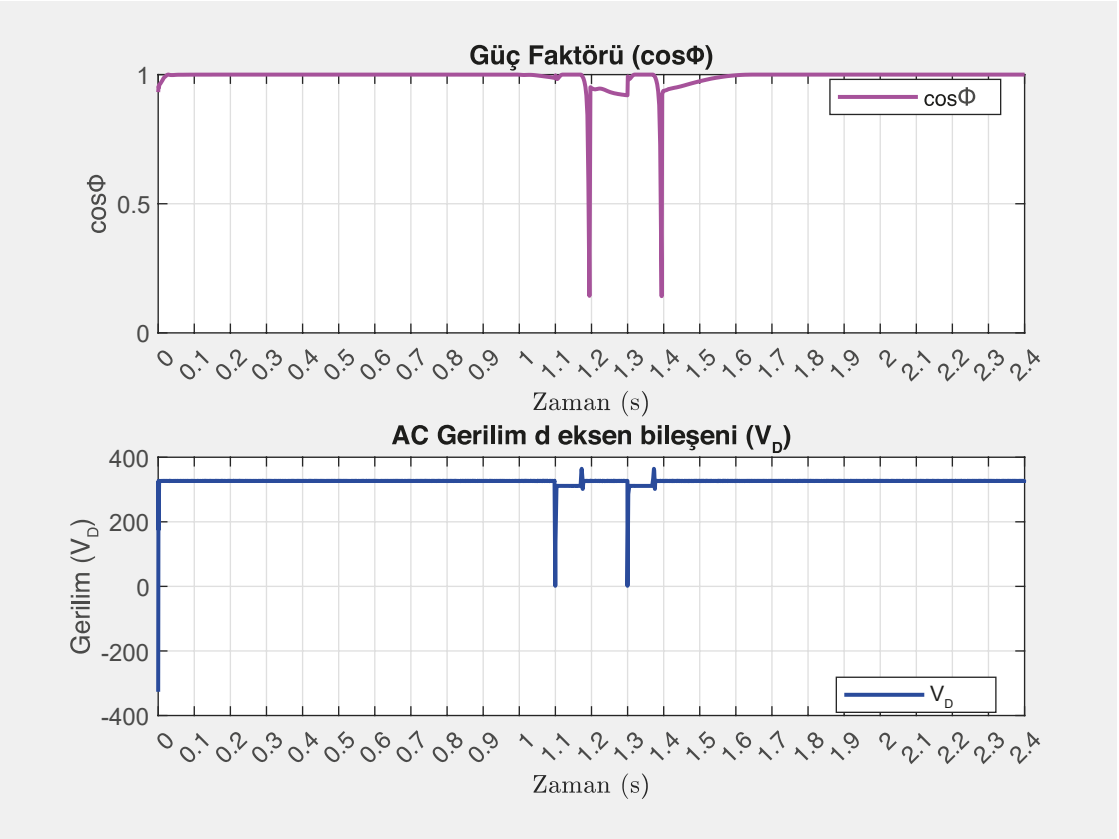
Bu çalışma senaryosunda 500 kW aktif güç ve 200 kVAR endüktif reaktif güç çeken 3 fazlı RL yükü ve 500 kW aktif güç ve 200 kVAR kapasitif reaktif güç çeken 3 fazlı RC yükü ayrı ayrı devredeyken sisteme 3 faz-toprak arızası verilmektedir. RL ve RC yükleri için

simülasyon ayrı ayrı çalıştırılacaktır. Simülasyonda arıza anlarında ve sonrasında sistemin verdiği cevaplar incelenmiştir. Bu senaryoda gerilim regülasyonu için V_D grafiğine, güç faktörü düzeltimi için cosΦ grafiğine bakılacaktır. Arıza bloğuna ait parametreler 5.40'daki gibi girilmiştir. Buna göre arıza, simülasyonun t=1.1sn anında oluşmakta ve t=1.17sn anında bitmektedir 70ms sürmektedir. Aynı şekilde t=1.3sn anında arıza tekrar oluşturulmakta ve t=1.37sn anında bitmektedir. FV sistem bu saatler içerisinde üretim yapmaktadır ve sürenin büyük kısmında sistem Kısmi FV-STATKOM modunda çalışmakta çok kısa bir aralıkta ise Tam FV modunda çalışmaktadır.



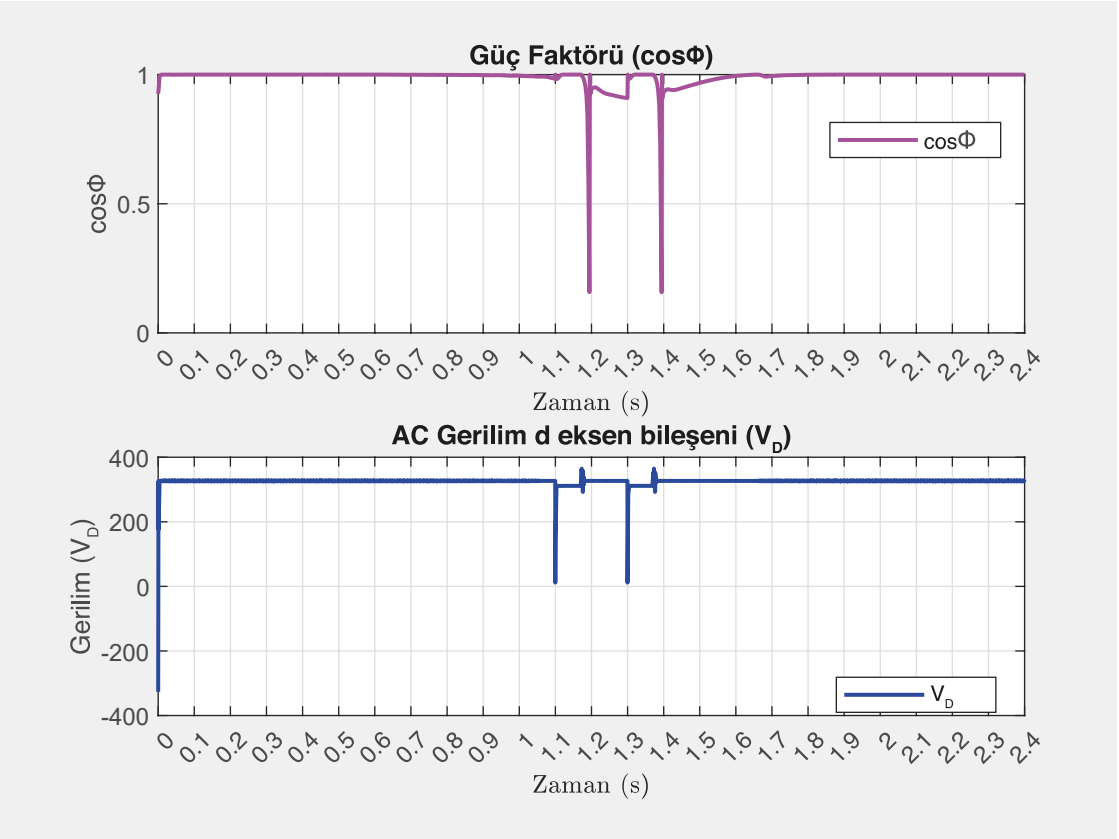
Şekil 5.40 : SIMULINK arıza bloğu parametreleri

Şekil 5.40'taki arıza parametrelerine göre simüle edilen RL yüklü sistemin V_D ve cosΦ grafikleri Şekil 5.41'de verilmiştir. Grafiklere bakıldığında arızanın verildiği anlarda cosΦ grafiği çok değişmemekte fakat V_D değeri 0 değerine doğru gitmektedir. Ancak arızanın üzerinden yaklaşık 5.5 ms geçmeden V_D tekrar toparlanmakta ve gerilim regülasyonunu sağlamaktadır. Arızanın bittiği anda ise cosΦ değeri 0 değerine hızlıca düşüp yaklaşık 6.5 ms içerisinde güç faktörü düzeltimine devam etmektedir. Arızaların bittiği anlarda V_D değeri biraz yükselip yaklaşık 10 ms içerisinde tekrar istenilen seviyelerde seyrederek gerilim regülasyonunu sağlamaktadır.



Şekil 5.41 : Senaryo-4 RL yüklü sistemin arıza durumundaki cosΦ ve V_D grafikleri

Şekil 5.40'taki arıza parametrelerine göre simüle edilen RC yüklü sistemin V_D ve cosΦ grafikleri ise Şekil 5.42'de verilmiştir. Grafiklere bakıldığında arızanın verildiği anlarda cosΦ grafiği çok değişmemekte fakat V_D değeri 0 değerine doğru gitmektedir. Ancak arızanın üzerinden yaklaşık 4 ms geçmeden V_D tekrar toparlanmakta ve gerilim regülasyonunu sağlamaktadır. Arızanın bittiği anda ise cosΦ değeri 0 değerine hızlıca düşüp yaklaşık 25 ms içerisinde güç faktörü düzeltimine devam etmektedir. Arızaların bittiği anlarda V_D değeri biraz yükselip yaklaşık 13 ms içerisinde tekrar istenilen seviyelerde seyrederek gerilim regülasyonunu sağlamaktadır.



Şekil 5.42 : Senaryo-4 RC yüklü sistemin arıza durumundaki cosΦ ve V_D grafikleri

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, özellikle dağıtık enerji sistemlerin şebekeye entegrasyonuyla ortaya çıkan güç kalitesi sorunlarına ve bu sorunların çözümünde kullanılan FACTS cihazları içerisindeki Statik Senkron Kompanzatör (STATKOM) cihazına etraflıca değinilmiştir. FV sistemler ve STATKOM'un ortak bileşeni olan inverterin, bir kontrolör tarafından doğru denetlendiğinde, aktif güç üretiminin olmadığı gece saatlerinde veya inverter kapasitesinin tamamının kullanılmadığı diğer zaman dilimlerinde Statik Senkron Kompanzatör (STATKOM) olarak çalışabilmesi konsepti, yani FV-STATKOM yapısı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmanın temel odak noktası, FV-STATKOM'un sistemin gerilim regülasyonuna ve güç faktörünü (cosΦ) iyileştirmesine olan katkısı olmuştur. Gerilim regülasyonunun iyileştirilmesi öncelik olarak görülerek kontrol mekanizması buna göre şekillendirilmiştir.

Tez kapsamında, FV-STATKOM yapısı MATLAB/SIMULINK ortamında gerçeğe yakın koşulları temsil edecek şekilde modellenmiştir. Modelde, FV sistemin gerçek hayattaki davranışını daha doğru yansıtmak amacıyla ışınım (solar radyasyon) değeri, simülasyon zamanının saniyelerine göre değişken olarak verilmiştir. 2.4 saniye olarak belirlenen simülasyon süresi, her 0.1 saniyenin normal bir günün 1 saatini temsil etmesi esasına göre ölçeklendirilerek analizde kolaylık ve anlaşılırlık sağlanmıştır. STATKOM inverteri için Senkron Referans Düzlem (SRF) kontrol tekniği kullanılmış ve sistemin FV-STATKOM olarak çalışabilmesi için $Q_{inv} = \sqrt{{S_{inv}}^2 - {P_{inv}}^2}$ mantığına dayalı bir kontrol algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma, FV sistemin aktif güç üretimini önceliklendirerek, inverterin kalan kapasitesini reaktif güç kompanzasyonu için etkin bir şekilde kullanmaktadır.

Yapılan simülasyon çalışmaları 4 senaryo üzerinden gerçekleştirilmiş ve FV-STATKOM sisteminin gerilim regülasyonu ve güç faktörü düzeltme yeteneği incelenmiştir:

- Senaryo-1'de; şebekeye 500 kW aktif güç ve 200 kVAR endüktif reaktif güç çeken bir yük bağlanmıştır. Bu durumda FV-STATKOM, inverterin kalan kapasitesini kullanarak endüktif reaktif gücü başarıyla kompanze etmiştir. Simülasyon sonuçları,

sistemin devreye girmesiyle FV-STATKOM'un şebeke güç faktörünü, inverterden kalan reaktif güç kapasitesinin yettiği ölçüde hızlıca cosΦ=1 değerine yaklaştırmaya çalıştığını göstermiştir. İnverterde, yükün talep ettiği reaktif güçten daha fazla kapasite bulunduğu anlarda ise güç faktörü değeri nerdeyse 1 olmuştur. Gerilim regülasyonunda başarılı sonuçlar elde edilmiş istenilen değerlere ulaşılmıştır.

- Senaryo-2'de; şebekeye 500 kW aktif güç ve 200 kVAR kapasitif reaktif güç çeken bir yük bağlandığında da FV-STATKOM benzer şekilde inverterin kullanılmayan kapasitesini kapasitif reaktif gücü kompanze etmek için değerlendirmiştir. Bu senaryoda da FV-STATKOM'un şebeke güç faktörünü, inverterde yeterli reaktif güç kapasitesi olduğu durumlarda cosΦ=1 değerine yaklaştırmaya çalıştığı gözlemlenmiştir. İnverterde, yükün talep ettiği reaktif güçten daha fazla kapasite bulunduğu anlarda ise güç faktörü değeri nerdeyse 1 olmuştur. Gerilim regülasyonunda başarılı sonuçlar elde edilmiş istenilen değerlere ulaşılmıştır.
- Senaryo-3'te; önceki senaryolardaki aynı güç değerlerine sahip RL ve RC yükleri ayrı ayrı simülasyonlarda belli anlarda devreden çıkarılarak belli anlarda tekrardan devreye sokularak sistemin davranışı incelenmiştir. Buna göre modellenen sistem, yükün anahtarlama anlarında ve sonrasında hızlıca hem gerilim regülasyonunu sağlamış hem de inverter kalan kapasitesinin elverdiği ölçüde reaktif güç kompanzasyonu gerçekleştirmiştir.
- Senaryo 4'te; önceki senaryolardaki aynı güç değerlerine sahip RL ve RC yüklerin ayrı ayrı bulunduğu model, belli anlarda sisteme arızalar verilerek ve arızalar belli anlarda sonlandırılarak simüle edilmiştir. Buna göre modellenen sistem, arıza anlarında ve sonrasında hızlıca hem gerilim regülasyonunu sağlamış hem de inverter kalan kapasitesinin elverdiği ölçüde reaktif güç kompanzasyonu gerçekleştirmiştir.

Tüm senaryolarda; geliştirilen kontrol algoritmasının, FV sistemin aktif güç üretim önceliğini korurken; gerilim regülasyonunu önceleyerek kalan kapasiteyi hem endüktif hem de kapasitif reaktif yükleri kompanze etmek için esnek bir şekilde kullanabildiği görülmüştür.

Ayrıca, FV-STATKOM sisteminin kritik bir bileşeni olan DC hat gerilimi kontrol bloğu, DC hat gerilimini referans değer olarak hesaplanıp belirlenen 800V değerinde sabit tutma görevini başarılı bir şekilde yerine getirmiş ve gerilimi yaklaşık 800V değerinde sabitlemiştir. Simülasyonlar boyunca DC hat geriliminin yaklaşık 800V değerinde sabit

tutulduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, inverterin kararlı ve güvenilir bir şekilde çalışabilmesi için gerekli olan DC bara geriliminin istenilen seviyede tutulabildiğini ve böylece sistemin genel stabilitesinin korunduğunu göstermektedir.

Bu tez çalışması, FV-STATKOM sisteminin fotovoltaik enerji üretim tesislerine kurulumunun son derece pratik ve ekonomik bir çözüm olduğunu ortaya koymaktadır. Mevcut FV inverterlerine sadece ek bir kontrolörün entegrasyonuyla sağlanabilen bu fonksiyonellik, harici bir STATKOM kurmanın kat kat üzerindeki maliyetinden kaçınmayı mümkün kılmaktadır. Dünya genelinde sayıları hızla artan FV sistemler göz önüne alındığında, bu konseptin yaygınlaşması hem ekonomik (daha düşük yatırım ve işletme maliyetleri) hem de teknik (şebeke güç kalitesi iyileştirmesi, mevcut altyapının daha verimli kullanılması) açıdan önemli avantajlar sağlayacağı görülmektedir. FV sistemlerin gündüz aktif güç üretirken, gece veya düşük ışınım koşullarında şebeke için bir gerilim regülatörü, reaktif güç kompanzatörü veya güç kalite iyileştiricisi olarak görev yapabilmesi FV santral sahipleri ve işletmecileri açısından büyük fırsatlar sunmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] **Varma, R. K., Khadkikar, V., & Seethapathy, R.** (2009). Nighttime application of PV solar farm as STATCOM to regulate grid voltage. *IEEE transactions on energy conversion*, *24*(4), 983-985.

[2] **Varma, R. K., Khadkikar, V., & Rahman, S. A.** (2016). *Utilization of distributed generator inverters as STATCOM* (U.S. Patent No. 9,325,173). U.S. Patent and Trademark Office.

[3] **Varma, R. K., Das, B., Axente, I., & Vanderheide, T.** (2011, July). Optimal 24-hr utilization of a PV solar system as STATCOM (PV-STATCOM) in a distribution network. In *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting* (pp. 1-8). IEEE.

[4] **Varma, R. K., Rahman, S. A., Mahendra, A. C., Seethapathy, R., & Vanderheide, T.** (2012, July). Novel nighttime application of PV solar farms as STATCOM (PV-STATCOM). In *2012 IEEE Power and energy society general meeting* (pp. 1-8). IEEE.

[5] **Bhaskar, A. M.** (2013). *Modelling of photo voltaic based statcom for distributed generation system* (Doctoral dissertation). SRM University. Retrieved from http://hdl.handle.net/10603/32802

[6] **Siavashi, E. M.** (2015). *Smart PV inverter control for distribution systems* (Doctoral dissertation). The University of Western Ontario. Retrieved from https://ir.lib.uwo.ca/etd/3065

[7] **Popavath, M. L. N., & Palanisamy, K.** (2015). A dual operation of PV-Statcom as active power filter and active power injector in grid tie wind-PV system. *International journal of renewable energy research*, *5*(4), 978-982.

[8] **Varma, R. K., Rahman, S. A., & Vanderheide, T.** (2014). New control of PV solar farm as STATCOM (PV-STATCOM) for increasing grid power transmission limits during night and day. *IEEE transactions on power delivery*, *30*(2), 755-763.

[9] **Varma, V.** (2016). *Study of PV solar farm as STATCOM for voltage regulation* (Master's thesis). Delhi Technological University. Retrieved from http://dspace.dtu.ac.in:8080/jspui/handle/repository/15276

[10] **Subramanian, S. B.** (2016). *State space modeling of smart PV inverter as STATCOM (PV-STATCOM) for voltage control in a distribution system* (Master's thesis). The University of Western Ontario. Retrieved from https://ir.lib.uwo.ca/etd/3764

[11] **Varma, R. K., & Salehi, R.** (2017). SSR mitigation with a new control of PV solar farm as STATCOM (PV-STATCOM). *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *8*(4), 1473-1483.

[12] **Sridhar, V.** (2019). *Grid connected cascaded H bridge inverter based PV STATCOM with energy storage system for optimal 24hr utilization* (Doctoral dissertation). Vellore Institute of Technology. Retrieved from http://hdl.handle.net/10603/264903

[13] **Popavath, L. N.** (2019). *Enhancement of power quality in grid integrated system using PV Statcom* (Doctoral dissertation). Vellore Institute of Technology. Retrieved from http://hdl.handle.net/10603/264961

[14] **Lourenço, L. F. N., de Camargo Salles, M. B., Monaro, R. M., & Quéval, L.** (2017, November). Technical cost of PV-STATCOM applications. In *2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)* (pp. 534-538). IEEE.

[15] **Türkiye Elektrik İletim A.Ş.** (2023). *1-GRAFİK I.I- TÜRKİYE KURULU GÜCÜNÜN YILLAR İTİBARİYLE GELİŞİMİ* [Grafik]. Erişim 5 Mayıs 2025, https://webim.teias.gov.tr/file/b7449455-00a2-423d-9f77-8d48904a6530?download

[16] **Türkiye Elektrik İletim A.Ş.** (2023). *1-GRAFİK I.II- 2013 VE 2023 YILLARI İÇİN BİRİNCİL ENERJİ KAYNAKLARINA GÖRE TÜRKİYE KURULU GÜCÜ* [Grafik]. Erişim 5 Mayıs 2025, https://webim.teias.gov.tr/file/00d76a08-9aee-4773-8463-be4ba7bcdb04?download

[17] **Türkiye Elektrik İletim A.Ş.** (2023). *38-Grafik III.I - 2023 Yılı Türkiye Elektrik Enerjisi Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı* [Grafik]. Erişim 5 Mayıs 2025, https://webim.teias.gov.tr/file/2e8f7a79-8861-4a1e-8e29-0319f6c0b0af?download

[18] **Türkiye Elektrik İletim A.Ş.** (2023). *40-Grafik III.IV - 2023 Yılı Türkiye Yenilenebilir Enerji Kaynakları Dağılımı* [Grafik]. Erişim 5 Mayıs 2025, https://webim.teias.gov.tr/file/677eb36f-deec-424f-9fb3-f39aa73c7f0c?download

[19] **Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.** (t.y.). *Bilgi Merkezi - Enerji Elektrik*. Erişim 16 Nisan 2025, https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik

[20] **Photovoltaics.** (t.y.). *Vikipedi*. Erişim 10 Nisan 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics

[21] **Majidzade, N.** (2018). *Mikro Ölçekli Şebeke Bağlantılı Bir Fotovoltaik Santralin Tasarlanması ve Uygulanması* (Yüksek lisans tezi). Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

[22] **Lourenço, L. F. N.** (2017). *Technical cost of operating a PV installation as a STATCOM during nighttime* (Doctoral dissertation). University of São Paulo. Retrieved from http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-23102017-104035/

[23] **Bayrak, G.** (2013). *Şebeke Bağlantılı Bir Fotovoltaik Sistemin Tasarımı ve Farklı Şebeke Koşulları Altında Analizi* (Doktora tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.

[24] **Yılmaz, A.** (2018). *Şebeke Bağlantılı Bir Fotovoltaik Sistemin Tasarımı ve Farklı Şebeke Koşulları Altında Analizi* (Yüksek lisans tezi). Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

[25] **WPS 1051 Project Group.** (2010). *Reactive power control for Wind Power Plant with STATCOM* (Master's thesis). Aalborg University, Denmark. Retrieved from https://projekter.aau.dk/projekter/files/32251172/MasterFINAL.pdf

[26] **GE Grid Solutions.** (t.y.). *How STATCOM Can Solve Dynamic Grid Problems* [Video]. Erişim 12 Mayıs 2025,

https://resources.gegridsolutions.com/industry-expert-talks/how-statcom-can_sol_dyn_gri_pro#main-content

[27] **Zhang, Y., Wang, S., Liu, Z., Sun, Y., Liu, J., Sun, X., ... & Liu, L.** (2019, October). Applicability analysis of synchronous condenser and statcom in frequency and time domains. In *8th Renewable Power Generation Conference (RPG 2019)*. Stevenage UK: IET.

[28] **Mathur, R. M., & Varma, R. K.** (2002). *Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems*. John Wiley & Sons.

[29] **Rahman, S. A., Varma, R. K., & Litzenberger, W. H.** (2011). Bibliography of FACTS applications for grid integration of wind and PV solar power systems: 1995–2010 IEEE working group report. In *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting* (pp. 1-17). IEEE.

[30] **Lahaçani, N. A., Aouzellag, D., & Mendil, B.** (2010). Contribution to the improvement of voltage profile in electrical network with wind generator using SVC device. *Renewable Energy*, *35*(1), 243-248.

[31] **Michael Neutz.** (2013). *Power Quality* [Presentation slides]. ABB. Retrieved June 13, 2025, from https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/chile-documentos/jornadas-tecnicas-2013---presentaciones/7-michael-neutz---power-quality.pdf

[32] **Deniz, E.** (2010). *Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu Kullanan Üç Seviyeli H-Köprü Evirici Tabanlı D-STATKOM'un Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi* (Doktora tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.

[33] **Anadol, M. A.** (2012). *Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu Kullanan Üç Seviyeli H-Köprü Evirici Tabanlı D-STATKOM'un Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi* (Doktora tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

[34] **Uzunovic, E.** (2001). *EMTP, transient stability and power flow models and controls of VSC based FACTS controllers* (Ph.D. dissertation, University of Waterloo). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global database (UMI No. 304782432).

[35] **Bilgin, H. F., Ermis, M., Kose, K. N., Cetin, A., Cadirci, I., Acik, A., ... & Yorukoglu, M.** (2007). Reactive-power compensation of coal mining excavators by using a new-generation STATCOM. *IEEE transactions on industry applications*, *43*(1), 97-110.

[36] **Çetin, A.** (2007). *Design and Implementation of A Voltage Source Converter Based STATCOM for Reactive Power Compensation and Harmonic Filtering* (Doktora tezi). Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[37] **Ertay, M. M., Dijle, M., & Yücedağ, I.** (2016). Dinamik kompanzasyon cihazlarında kullanılan evirici yapıları: STATCOM ve DSTATCOM topolojileri. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *20*(2), 265-279.

[38] **Rahman, S. A.** (2015). Novel Controls of Photovoltaic (PV) Solar Farms (Doctoral dissertation). The University of Western Ontario. Retrieved from https://ir.lib.uwo.ca/etd/922

[39] **Kara, Y.** (2008). *Statik Senkron Kompanzatörün (STATCOM) Yapay Sinir Ağları (YSA) ile Denetimi* (Yüksek lisans tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.

[40] **Yalçın, F.** (2013). *FACTS Cihazları İçeren AA–DA Sisteminde Optimal Güç Akışı Hesabı İçin Yeni Bir Yaklaşım* (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

[41] **Yanmaz, K.** (2018). *Küçük Ölçekli Rüzgâr Enerji Sistemleri İçin Yeni Bir STATCOM Tasarımı ve Uygulaması* (Doktora tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

[42] **Çakmak, F.** (2018). *Dağıtım Şebekelerinde D-STATKOM ile Gerilim Kalitesinin İyileştirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.

[43] **Sirisukprasert, S**. (2004). *The Modeling and Control of a Cascaded-Multilevel Converter-Based STATCOM* (Doctoral dissertation). Virginia Polytechnic Institute and State University. Retrieved from https://vtechworks.lib.vt.edu/items/75ff5ef4-ca58-4302-9148-b27cba791bc3

[44] **Han, C.** (2006). *Power system dynamic voltage management with advanced STATCOM and energy storage system* (Doctoral dissertation, Virginia Tech). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global database (UMI No. 305287171).

[45] **Varma, R. K.** (2021). *Smart Solar PV Inverters with Advanced Grid Support Functionalities*. Wiley - IEEE Press.

[46] **Srinivasarangan R. S., Sharma, J., & Sundarabalan, C. K.** (2020). Novel exertion of intelligent static compensator based smart inverters for ancillary services in a distribution utility network-review. *Electronics*, *9*(4), 662.

[47] **IEEE.** (2018). *IEEE Standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces* (IEEE Std 1547–2018).

[48] **Varma, R. K., & Siavashi, E. M.** (2018). PV-STATCOM: A new smart inverter for voltage control in distribution systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *9*(4), 1681-1691.

[49] **Blaabjerg, F., Teodorescu, R., Liserre, M., & Timbus, A. V.** (2006). Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. *IEEE Transactions on industrial electronics*, *53*(5), 1398-1409.

[50] **MathWorks.** (t.y.). *Clarke Transform*. Erişim 21 Mayıs 2025, https://www.mathworks.com/help/sps/ref/clarketransform.html

[51] **MathWorks.** (t.y.). *Clarke to Park Angle Transform*. Erişim 21 Mayıs 2025, https://www.mathworks.com/help/sps/ref/clarketoParkAngletransform.html

[52] **Bakır, H.** (2021). *STATCOM İçeren Güneş-Rüzgar Hibrit Mikroşebekenin Modellenmesi ve Optimizasyonu* (Doktora tezi). Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Musab OKSAR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2014, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM:

- 2015-2017: Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi.
- 2017-(devam ediyor): İnönü Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığında Elektrik Mühendisi.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

- **Oksar, M., & Kaygusuz, A.** (20–21 Haziran 2025). *Güç Sistemlerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu İçin Fotovoltaik Enerji Dönüşüm Sistemlerinin STATKOM Olarak Kullanımı*. [Bildiri özeti]. 11. Uluslararası Palandöken Bilimsel Çalışmalar Kongresi Kongre Kitabı, s. 197–198. Erzurum, Türkiye.
- **Oksar, M., & Kaygusuz, A.** (20–21 Haziran 2025). FV-STATKOM konsepti üzerine bir inceleme. [Bildiri özeti]. 11. Uluslararası Palandöken Bilimsel Çalışmalar Kongresi Kongre Kitabı, s. 199–200. Erzurum, Türkiye.

DİĞER ÇALIŞMALAR

- **Yilmaz, Z., Oksar, M., & Basciftci, F.** (2017). Multi-objective artificial bee colony algorithm to estimate transformer equivalent circuit parameters. *Period. Eng. Nat. Sci*, *5*(3), 271-277.
- **Okşar, M., Yetiş, H., Göktaş, T., Kaygusuz, A., & Meşe, E.** (2020). Dişlisiz Asansör Uygulamaları için Yüzey Montajlı Senkron Motorun Optimal Tasarımı. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *32*(2), 335-344.