

**GÜÇ SİSTEMLERİNİN KONTROLÜNDE FACTS - STATCOM
DONANIMLARININ KULLANIMI VE ETKİLERİNİN
SİMULİNK MODEL ÜZERİNDE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

HAŞİM KOÇAKELÇİ

HAZİRAN 2025

DİYARBAKIR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜÇ SİSTEMLERİNİN KONTROLÜNDE FACTS - STATCOM
DONANIMLARININ KULLANIMI VE ETKİLERİNİN
SİMÜLİNK MODEL ÜZERİNDE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

HAŞİM KOÇAKELÇİ

DİCLE ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM-ÖĞRETİM
VE SINAV YÖNETMELİĞİNİN BİR PARÇASI OLARAK
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA
BİLİM DALINDA YÜKSEK LİSANS TEZİ
OLARAK HAZIRLANMIŞTIR.

HAZİRAN 2025

DİYARBAKIR

**GÜÇ SİSTEMLERİNİN KONTROLÜNDE FACTS – STATCOM
DONANIMLARININ KULLANIMI VE ETKİLERİNİN
SİMULİNK MODEL ÜZERİNDE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Haşim KOÇAKELÇİ tarafından Dicle Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin bir parçası olarak hazırlanan bu çalışma, aşağıda bilgileri yazılı jüri üyeleri tarafından değerlendirilerek **Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı**'nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ
Müdür, Fen Bilimleri Enstitüsü

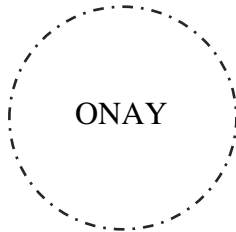
Doç. Dr. Yurdagül BENTEŞEN YAKUT
Danışman, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Dicle Üniversitesi

Sınav Jürisi:

Doç. Dr. Zehra URAL BAYRAK (*)
Havacılık Elektrik ve Elektroniği Bölümü,
Fırat Üniversitesi

Doç. Dr. Yurdagül BENTEŞEN YAKUT (**)
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Dicle Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Muhittin BAYRAM
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Dicle Üniversitesi



Savunma Tarihi: 24/06/2025

(*) Jüri Başkanı.

(**) Tez Danışmanı.



Aileme...

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tez çalışmasında yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bahse konu bu kural ve ilkelerin gerektirdiği üzere, bu çalışmada özgün olmayan tüm bilimsel içerikleri kurallara uygun biçimde alıntılıyıp kaynak gösterdiğimi beyan ederim. Beyanımınla çelişen herhangi bir delil bulunduğu takdirde tüm sorumluluğu üstleneceğimi kabul ederim.

Ad, Soyad: Haşim KOÇAKELÇİ

İmza:

TEŞEKKÜR

Öncelikle danışmanım Doç. Dr. Yurdağül BENTEŞEN YAKUT'a çalışmanın daha fikir aşamasından, örnekleme, deney setlerini oluşturma, analizlerin yorumlanması ve tez taslağındaki düzeltmeler konularına kadar gösterdikleri destek ve sabırdan dolayı teşekkür ederim. Jüri üyelerime de bu tezin daha nitelikli bir hale gelmesi için yaptıkları eleştiri ve önerileri için teşekkür ederim. Tezin her aşamasındaki yardımları ve yol göstericiliğı için de Doç. Dr. Sidar ÇINAR'a ayrıca çok teşekkür ederim.

En önemlisi, beni araştırma hevesiyle coşturdukları ve bana inandıkları için anneme, babama, eşime, abilerime ve ablama teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xiii
ÖZET.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 FACTS Cihazlarının Tanıtılması.....	2
1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı	3
1.3 Tezin Yapısı	4
2. GÜÇ ELEKTRONİĞİ.....	5
2.1 Temel Yarı İletken Güç Elemanları	6
2.1.1 Temel kontrolsüz güç elemanı diyot	6
2.1.2 Zener diyot.....	8
2.1.3 Tristör (SCR)	10
2.1.4 Bipolar transistör (BJT)	13
2.1.5 MOSFET (Metal oksit yarı iletken alan etkili transistör).....	15
2.2 Diğer Yarı İletken Güç Elemanları	18
2.2.1 Tristör tetrot.....	18
2.2.2 Foto tristör	18
2.2.3 Triyak (İki yönlü tristör triyot)	18
2.2.4 Kapı sönmümlü tristör	19
2.2.5 MOS kontrollü tristör (MCT).....	20
2.2.6 İzole kapılı bipolar transistör (IGBT).....	20
2.3 Devrilen Elemanlar.....	22

2.3.1 Shockley	22
2.3.2 Diyak	23
2.3.3 Neon lamba.....	24
2.3.4 Diğer bazı devrilen eleman örnekleri	24
2.4 Sinyal İzolasyon Elemanları.....	25
2.4.1 Opto Bağlayıcılar.....	25
2.4.2 Tetikleme transformatörü	26
2.5 Enerji Dönüşümleri	27
2.5.1 AC-DC dönüştürücüler / doğrultucular, redresörler.....	28
2.5.2 DC-AC dönüştürücüler / inverterler, eviriciler.....	31
2.5.3 DC-DC dönüştürücüler / DC kısıyıcılar.....	33
2.5.4 AC-AC dönüştürücüler / AC kısıyıcılar.....	35
2.6 Güç Elemanlarının Karşılaştırılması	38
3. FACTS CİHAZLARI.....	39
3.1 Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC).....	41
3.2 Tristör Kontrollü Faz Açısı Düzenleyicisi (TCPAR).....	43
3.3 Tristör Kontrollü Statik Var Kompansatör (TCSVC)	44
3.4 Hat Arası Güç Akış Denetleyici (IPFC).....	46
3.5 Birleşik Güç Akış Denetleyici (UPFC)	47
3.6 Statik Senkron Seri Kompansatör (SSSC)	48
3.7 Statik Var Kompansatör (SVC).....	50
4. STATİK SENKRON KOMPANSATÖR (STATCOM)	52
4.1 STATCOM'un Temel Özellikleri	53
4.1.1 STATCOM devre elemanları	54
4.1.2 STATCOM çalışma prensipleri.....	54
4.2 STATCOM Kontrol Yöntemleri	57
4.2.1 Sinüzoidal PWM (SPWM)	57

4.2.2 Uzay vektör PWM	57
4.2.3 Seçili harmoniklerin eliminasyonu PWM	59
4.2.4 Histerezis bant PWM.....	59
4.3 STATCOM Formülleri.....	60
4.3.1 Vektörel dönüşümler	60
4.3.2 Faz kilitleme döngüsü (PLL).....	62
4.3.3 Oransal – Integral (PI) kontrolörler	63
4.4 STATCOM Optimizasyonu	66
4.5 STATCOM Harmonikleri	67
4.6 Türkiye’de Bazı STATCOM Uygulamaları.....	68
4.6.1 Kızıltepe ve Viranşehir trafo merkezleri STATCOM uygulamaları	68
4.6.2 Sincan trafo merkezi STATCOM uygulaması	69
4.6.3 Kemerköy termik santrali STATCOM uygulaması.....	70
5. MATERYAL, YÖNTEM VE SİMÜLASYON.....	71
5.1 Veri Seti ve Uygulanan Ön İşlemler	71
5.2 STATCOM Verileri	76
5.3 Güç Sisteminin Matlab/Simulink Programı Üzerinde Simülasyonu.....	83
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	89
6.1 Sonuçlar.....	89
6.2 Öneriler.....	90
KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	96

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Diyotun Yapısı ve Sembolü	6
Şekil 2.2 Diyot karakteristiği	6
Şekil 2.3 Diyodun kesim dönüşümü süresi	7
Şekil 2.4 Zener diyoda ait akım-gerilim karakteristiği ve sembolü	8
Şekil 2.5 Zener diyodun temel devresi	9
Şekil 2.6 Zener diyodun çalışma prensipleri	9
Şekil 2.7 Zener diyotlu örnek bir devre	10
Şekil 2.8 Tristörün yapısı ve elektriksel gösterimi	11
Şekil 2.9 Tristörün ters kırılma eğrisi	12
Şekil 2.10 BJT'nin sembolleri	13
Şekil 2.11 BJT'nin çıkış karakteristiği	14
Şekil 2.12 MOSFET'in sembolleri	15
Şekil 2.13 MOSFET'in çıkış karakteristiği	16
Şekil 2.14 MOSFET'in modellenmesi	17
Şekil 2.15 Miller kapasitansı	17
Şekil 2.16 Tristör tetrot sembolü	18
Şekil 2.17 Foto tristör sembolü	18
Şekil 2.18 Sembol, karakteristik ve tetikleme bölgeleri (Triyak)	19
Şekil 2.19 Kapı sönümlü tristör sembolü	19
Şekil 2.20 MOS kontrollü tristör sembolü	20
Şekil 2.21 IGBT'ye ait sembol ve çıkış karakteristiği	21
Şekil 2.22 IGBT anahtarlama karakteristiği	21
Şekil 2.23 Shockley diyodunun sembolü ve gerilim-akım karakteristiği	22
Şekil 2.24 Shockley diyodu ile tasarlanan devre ve dalga şekilleri	22
Şekil 2.25 Diyak'a ait sembol ve gerilim-akım karakteristiği	23
Şekil 2.26 Neon lambaya ait sembol ve gerilim-akım karakteristiği	24
Şekil 2.27 Güç elektroniği devlerinde İzolasyon	25
Şekil 2.28 Opto bağlayıcılara ait semboller	26
Şekil 2.29 Tetikleme transformatörü sembolü	26
Şekil 2.30 Enerji dönüşümleri	27
Şekil 2.31 Doğrultucu devresi	28
Şekil 2.32 Doğrultucuların şema halinde gösterimi	29

Şekil 2.33 Doğrultucuların dalga adedi bakımından kıyaslanması.....	30
Şekil 2.34 AC-DC dönüştürücülere ait temel devre şemaları	31
Şekil 2.35 DC-AC dönüştürücülere ait devre yapısı.....	31
Şekil 2.36 DC kıyıcılara ait devre yapısı	34
Şekil 2.37 AC kıyıcılara ait devre yapısı	36
Şekil 2.38 AC kıyıcıların genel olarak sınıflandırılması.....	37
Şekil 3.1 TCSC devre yapısı	42
Şekil 3.2 TCSC'nin X-I karakteristiği	43
Şekil 3.3 TCPAR devre konfigürasyonu.....	44
Şekil 3.4 TCPAR - Faz kayması	44
Şekil 3.5 TCSVC devre yapısı	45
Şekil 3.6 TCSVC'nin V-I karakteristiği	45
Şekil 3.7 IPFC konfigürasyonu	46
Şekil 3.8 UPFC'nin şematik diyagramı	47
Şekil 3.9 SSSC devre yapısı.....	49
Şekil 3.10 SVC devre tasarımı	50
Şekil 3.11 SVC kararlılık modeli.....	51
Şekil 4.1 STATCOM konu başlıkları.....	53
Şekil 4.2 STATCOM devre şeması.....	53
Şekil 4.3 Reaktif güç transferi.....	55
Şekil 4.4 STATCOM ve TCSVC'ye ait akım gerilim karakteristikleri.....	56
Şekil 4.5 STATCOM kontrol modeli.....	57
Şekil 4.6 Uzay vektör diyagramı.....	58
Şekil 4.7 Uzay vektör tabanlı STATCOM modeli.....	58
Şekil 4.8 Histeresiz Bant Modülasyon Tabanlı STATCOM Modeli	59
Şekil 4.9 Clarke dönüşümü fazör diyagramı.....	61
Şekil 4.10 Park dönüşümü fazör diyagramı	61
Şekil 4.11 Faz kilitleme döngüsü - Devre yapısı	62
Şekil 4.12 PI kontrolöre ait transfer fonksiyonu	63
Şekil 4.13 STATCOM kontrol devresi	64
Şekil 4.14 STATCOM simülasyon modeli	64
Şekil 4.15 Kontrol devresinin Matlab / Simulink üzerinde modellenmesi	65
Şekil 4.16 Altı darbeli bir STATCOM devresi	67

Şekil 4.17 Çıkış gerilimi ve 3 numaralı harmoniğin dalga şekli.....	68
Şekil 4.18 Viranşehir ilçesine ait STATCOM uygulaması.....	69
Şekil 4.19 Sincan trafo merkezi STATCOM uygulaması.....	70
Şekil 4.20 Kemerköy termik santrali STATCOM uygulaması.....	70
Şekil 5.1 Kızıltepe-2 Trafo Merkezi tek hat şeması.....	71
Şekil 5.2 TR5 gerilim değerleri.....	72
Şekil 5.3 TR6 gerilim değerleri.....	72
Şekil 5.4 TR5 toplam güç değerleri	73
Şekil 5.5 TR6 toplam güç değerleri	74
Şekil 5.6 TR5 güç faktörü değerleri.....	75
Şekil 5.7 TR6 güç faktörü değerleri.....	75
Şekil 5.8 STATCOM devresinin güç sistemine entegrasyonu	76
Şekil 5.9 TR5 gerilim değerleri (01.06.2022 – 30.06.2022).....	77
Şekil 5.10 TR6 gerilim değerleri (01.06.2022 – 30.06.2022).....	77
Şekil 5.11 TR5 toplam güç değerleri (01.06.2022 – 30.06.2022).....	78
Şekil 5.12 TR6 toplam güç değerleri (01.06.2022 – 30.06.2022).....	79
Şekil 5.13 TR5 güç faktörü değerleri (01.06.2022 – 30.06.2022)	80
Şekil 5.14 TR6 güç faktörü değerleri (01.06.2022 – 30.06.2022)	80
Şekil 5.15 Statcom gerilim değerleri (01.06.2022 – 30.06.2022).....	81
Şekil 5.16 Statcom toplam güç değerleri (01.06.2022 – 30.06.2022).....	82
Şekil 5.17 Statcom güç faktörü değerleri (01.06.2022 – 30.06.2022)	83
Şekil 5.18 Güç sistemine ait model kurgusu.....	83
Şekil 5.19 Güç sisteminin Matlab/Simulink programında modellenmesi	84
Şekil 5.20 Simülasyon sonucu oluşan faz gerilim değerleri - 1	85
Şekil 5.21 Simülasyon sonucu oluşan reaktif güç değerleri	85
Şekil 5.22 Simülasyon sonucu oluşan faz gerilim değerleri - 2.....	86
Şekil 5.23 Simülasyon verileri ile gerçek verilerin karşılaştırılması	87
Şekil 5.24 Simülasyon Sonucu Oluşan faz gerilim değerleri - 3	88

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 AC-DC dönüştürücülerin kontrol bakımından karşılaştırılması.....	30
Tablo 2.2 İnverterlerin sınıflandırılması	33
Tablo 2.3 Güç elemanlarının karşılaştırılması	38



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge	Açıklama
α	Faz kesme veya faz kontrol açısı
A	Amper
C	Kapasitans
Cos	Kosinüs
D	Serbest geçiş diyodu (Komütasyon, Söndürme)
e	Hata Oranı
ε	En İyi Sönüm
F	Frekans
I	Akım
K	Kazanç
L	Endüktans
m	Modülasyon Oranı
M	Metre
N	Nötr
P	Aktif Güç
pu	Per unit
Q	Reaktif Güç
q	Faz Sayısı
R	Direnç
Sin	Sinüs
δ	Gerilim Açısı
T	Zaman
τ	Zaman Sabiti
TM	Trafo Merkezi
U	Gerilim
X	Hat Reaktansı
V	Volt

VA	Volt Amper
VAr	Volt Amper Reaktif
ω	Doğal Frekans
λ	Darbe / Periyot oranı, doluluk oranı

Kısaltma

Açıklama

AC	Alternative Current
ASVC	Advanced Static Var Compensator
BESS	Battery Energy Storage Systems
BJT	Bipolar Junction Transistor
DC	Direct Current
EPRI	Electric Power Research Institute
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
GTO	Gate Turn Of Thyristor
IAE	İntegral Mutlak Hata
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineer
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IPFC	Interline Power Flow Controller
ISE	İntegral Kare Hata
ITAE	İntegral Mutlak Zaman Hatası
ITSE	İntegral Kare Zaman Hatası
MCT	MOS Controlled Thyristor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MOV	Metal Oksit Varistör
PCC	Point Of Common
PI	Proportional Integral
PID	Proportional Integral Derivative
PLL	Phase Locked Loop

PUT	Programmable Unijunction Transistor
PWM	Pulse Width Modulation
RMS	Root Mean Square
SBS	Silicon Bilateral Switch
SCR	Selective Catalytic Reduction
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
SSR	Solid State Relay
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SUS	Silicon Unilateral Switch
SVC	Static Var Compensator
SWM	Sinusoidal Width Modulation
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
TCPAR	Thyristor Controlled Phase Angle Regulator
TCR	Thyristor Controlled Reactor
TCSVC	Thyristor Controlled Static Var Compensator
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TSC	Thyristor Switch Capacitor
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UJT	Unijunction Transistor
UPFC	Unified Power Flow Controller
VSC	Voltage Source Converter

ÖZET

GÜÇ SİSTEMLERİNİN KONTROLÜNDE FACTS - STATCOM DONANIMLARININ KULLANIMI VE ETKİLERİNİN SİMULİNK MODEL ÜZERİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ

KOÇAKELÇİ, Haşim

Yüksek Lisans, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Danışman: Doç. Dr. Yurdağül BENTEŞEN YAKUT

Haziran 2025, 114 sayfa

Enerji kayıpları, ekonomik ve çevresel açıdan önemli sonuçlar doğurabilir. Ekonomik olarak, enerji kayıpları, enerjinin maliyetini artırarak enerji verimliliğini düşürür. Çevresel olarak ise, enerji kayıpları, fazladan enerji üretimine ve bu enerjinin çevreye yaydığı sera gazları ve diğer kirleticilerin artmasına neden olabilir. Bu nedenle, güç sistemlerindeki enerji kayıplarının azaltılması, enerji verimliliğini artırmak ve çevresel etkileri en aza indirmek önemli bir hedeftir. Bu amaçla güç sistemlerinde, FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) ve STATCOM (Static Synchronous Compensator) gibi cihazlar, güç sistemlerinin güvenilirliğini, verimliliğini ve kontrol edilebilirliğini artırmak için kullanılan önemli bileşenlerdir. FACTS cihazları, güç sistemlerindeki gerilim, akım ve güç akışını kontrol etmek için kullanılan statik cihazlardır. Bu cihazlar, genellikle tristör tabanlı anahtarlama teknolojileri kullanılarak gerçekleştirilir. STATCOM ise, güç sistemlerindeki gerilim düzeyini ve güç faktörünü kontrol etmek için kullanılan bir tür FACTS cihazıdır. Bu yüksek lisans tezinde, TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü ile TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi) 16. Bölge Müdürlüğü'nün ortak proje çalışması olan Mardin İli Kızıltepe İlçesinde yer alan 400 kV ve 2*12 MVar bir güç sisteminde STATCOM aracılığı ile gerilim düzenlemesi simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bir enerji iletim sisteminin dağıtım barasından bara gerilimi, yükteki değişikliklere rağmen STATCOM tarafından kontrol edilmiştir. Öncelikle STATCOM'un çalışma prensibi incelenmiş, ardından Mardin ili Kızıltepe İlçesinde yer alan bir güç iletim sisteminin dağıtım veri yoluna STATCOM monte edilerek Matlab programında simülasyonu yapılmıştır. Yapılan simülasyon neticesinde; STATCOM'un bara gerilimini istenilen değerlerde tuttuğu, yük değişimlerine karşı hızlı reaktif kompanzasyon sağladığı ve sistemin gerilim kararlılığını arttırdığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: FACTS Cihazları, Gerilim Kararlılığı, Güç Sistemleri, Reaktif Güç Kompanzasyonu, STATCOM

ABSTRACT

USE OF FACTS - STATCOM HARDWARE IN CONTROL OF POWER SYSTEMS AND EVALUATION OF THEIR EFFECTS ON SIMULINK MODEL

KOÇAKELÇİ, Haşim

Master of Science in Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yurdagül BENTEŞEN YAKUT

June 2025, 114 pages

Energy losses can have significant economic and environmental consequences. Energy losses raise the cost of energy, which economically reduces energy efficiency. Energy losses have the potential to raise greenhouse gas emissions and other environmental pollutants by causing excess energy production. In order to maximize energy efficiency and lessen environmental effects, it is crucial to reduce energy losses in power systems. In order to improve power systems' dependability, efficiency, and controllability, devices like STATCOM (Static Synchronous Compensator) and FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) are crucial parts of the design. Static devices called FACTS devices are used in power systems to regulate voltage, current, and power flow. Typically, switching technologies based on thyristors are used to implement these devices. A kind of FACTS device called a STATCOM is used in power systems to regulate the power factor and voltage level. In this master's thesis, a voltage regulation simulation was performed via STATCOM in a 400 kV and 2*12 MVar power system located in Kızıltepe district of Mardin province, which is a joint project of TUBITAK (Turkish Scientific and Technological Research Council) Marmara Research Center Energy Institute and TEIAS (Turkish Electricity Transmission Joint Stock Company) 16th Regional Directorate. The busbar voltage of an energy transmission system from the distribution busbar was controlled by STATCOM despite the changes in the load. Firstly, the operating principle of STATCOM was investigated, then STATCOM was installed on the distribution bus of a power transmission system located in Kızıltepe district of Mardin province and its simulation was performed in the Matlab program. As a result of the simulation; It has been observed that STATCOM keeps the bus voltage at the desired values, provides fast reactive compensation against load changes and increases the voltage stability of the system.

Keywords: FACTS Devices, Voltage Stability, Power Systems, Reactive Power Compensation, STATCOM

1. GİRİŞ

Çağımızın en önemli ihtiyaçlarından biri enerjidir. Vazgeçilmez olan enerji kullanımının çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik sorunları da göz önünde bulundurulmalıdır. Enerji çeşitlerinden biri olan elektrik enerjisi ise gündelik yaşantımızın her alanında; aydınlatma sistemlerinden iletişim araçlarına, endüstriyel üretimden sağlık hizmetlerine kadar pek çok alanda hayati bir rol oynamaktadır. Dünya nüfusu ve elektrikli cihazların çeşitliliği arttıkça enerji tüketimi her yıl artmaktadır.

Elektrik enerjisinin verimli ve sürdürülebilir bir şekilde üretilmesi ve kullanılması, gelecek nesiller için temel bir zorunluluktur. Güç sistemleri, elektrik enerjisini üretme, iletim ve dağıtma süreçlerini içerir. Aynı zamanda yaygın kullanımından dolayı güç sistemlerinin güvenilir, sürekli ve verimli olması büyük önem taşır. Güç sistemleri, enerji üretim tesislerinden başlayarak, iletim hatları ve transformatörler aracılığıyla elektriği kullanım noktalarına iletir. Bu süreçte enerjinin kaybedilmeden iletilmesi ve kullanım noktalarında istenilen düzeyde ve kalitede sağlanması büyük bir mühendislik başarısı gerektirir. Güç sistemlerinin doğru şekilde planlanması ve yönetilmesi, elektrik enerjisinin kesintisiz ve güvenilir bir şekilde tüm kullanıcıların hizmetine sunulmasını sağlar. Enerjiye olan ihtiyacın fazlaşmasına rağmen, mevcut ve yeni kurulan elektrik üretim tesislerinde enerji üretiminin en verimli şekilde, en düşük maliyetle ve en az kayıpla kullanıcıya iletilmesi gerekmektedir. Kayıpların minimize edilmesi, içinde yaşadığımız çağa uygun bir şekilde güç sistemlerinin işletilmesi ve planlanması, en önemli sorunlardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır [1].

Artan enerji talebi nedeniyle Güç sistemlerini, sistemin kararlılık sınırlarına yakın bir bölgede çalıştırmak önem arz etmektedir. Bu durumda kararlılık sınırı voltaj kararlılığının azalmasına neden olacağından, Enerji talebi arttıkça gerilim kararsızlığının dengelenmesi önem kazanmaktadır. Güç sistemindeki bu dengeden kasıt, her koşulda yük veri yolundaki gerilim genliğini belirli sınırlar içinde tutabilme yeteneği olarak tanımlanabilir [2].

Son yıllarda, güç sistemlerinde hızlı kompanzasyon ihtiyacı giderek daha da önemli hale gelmektedir. Bu bağlamda, güç elektroniği elemanları, iletim sistemlerinin bu

hızlı kompanzasyon ihtiyacını karşılama yetenekleri nedeniyle kompanzasyon uygulamalarında tercih edilmektedir [3].

1.1 FACTS Cihazlarının Tanıtılması

1980 yılının son dönemlerinde FACTS, EPRI (Electric Power Research Institute) tarafından Amerika’da Dünyaya sunulmuştur [4]. 1980’lerden beri iletim hatlarının reaktif kompanzasyonunun tristörler ve diğer yarı iletken elemanlarla hızlı bir şekilde gerçekleşmesi halinde, güç sisteminin dinamik kararlılığının artırılabilceği ve gerilim çöküşlerinin önlenebileceği anlaşılmıştır. 1980 yıllarının sonlarına doğru EPRI tarafından tanıtılan FACTS kavramının temelinde, mekanik kontrolörlerin yerini güvenli ve hızlı güç elektroniği bileşenlerinin alması yer almaktadır. Bu değişim, mevcut güç sistemi kapasitesinin daha verimli kullanılmasını sağlamak ve denetlenebilirliği arttırmak amacı taşımaktadır. FACTS aygıtları, güç akışını ve gerilim kontrolünü sağlamak için geleneksel donanımın yerini, güç elektroniği tabanlı modern ekipmanlarla almaktadır [5]. FACTS kavramı, 1988 senesinde EPRI Elektriksel Sistemler Bölümü Başkan Yardımcısı Dr. Narain Hingorani tarafından tanıtılmıştır. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineer)’ ye göre ise denetlenebilen ve güç transferini arttırmak amacıyla birçok AC (Alternative Current) iletim sisteminin kontrolünü sağlayan güç elektroniğine dayalı bir sistem ya da statik bir donanım olan FACTS, mekanik kontrolörlerin yerini alarak güvenli ve hızlı işlem yapabilen güç elektroniği bileşenlerinin kullanımını öngörmektedir. Bu sayede, sürekli olarak artan güç sistemi kapasitesinin en verimli şekilde kullanılmasını sağlamak ve denetimini kolaylaştırmak mümkün hale gelmiştir [4]. İşte tam bu noktada Esnek AC iletim sistemleri, yani FACTS teknolojisi, aktif ve reaktif güç akışını, paralel ve seri empedansları ile sistem gerilimini kontrol etmek amacıyla geliştirilmiştir [6].

FACTS denetleyici yapılarının temel bileşenleri güç elektroniği elemanlarıdır. Bu elemanlar sayesinde elektrik enerjisinin kontrolü oldukça hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Hızla tepki verebilen bu denetleyiciler, kısa süreli kararsızlıklara istenilen düzeyde müdahale imkânı sunmaktadır [7]. FACTS denetleyici yapılarının temelini güç elektroniği elemanları oluşturmaktadır. Fakat buna rağmen elektrik enerjisinin kontrolü, bu elemanların çalışma kapasitelerine bağlı olarak oldukça hızlı bir biçimde gerçekleştirilebilmektedir. Bu denetleyiciler arasında

en gelişmiş olanları ise STATCOM ve SSSC (Static Synchronous Series Compensator) denetleyicileridir. STATCOM, reaktif gücü üretebilme ve tüketebilme, elektrik güç sisteminin özel parametrelerinin kontrolünü yapabilmesi için çıkış değerlerini değiştirebilme özelliklerine sahip paralel bir reaktif güç ekipmanıdır. STATCOM, güç elektroniği elemanlarının kullanılması neticesinde üç faz geriliminin değerini ve faz açısını olabildiğince çabuk bir şekilde kontrol edebilme yeteneğine sahiptir [8].

1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı

Elektriğin üretim noktalarından başlayarak tüketim noktalarına kadar kaybedilmeden, verimli ve kaliteli bir şekilde transferi tarih boyunca ana hedeflerden biri olmuştur. Bu hedef doğrultusunda her ülke, elektriğin güvenilir ve hızlı bir şekilde nakli için gerekli çalışmalar yapmakta ve bu çalışmalar doğrultusunda güç sistemlerini geliştirmektedir. Geliştirilen bu güç sistemleri sayesinde gündelik yaşam için gerekli olan enerji koşulları iyileşmekte ve böylece ülkelerin refah seviyeleri bir üst noktaya çıkmaktadır.

Güç sistemleri bir ülkenin kan damarları gibidir. Bir insan için kan damarları ne kadar hayati bir önemde ise bir ülke için de güç sistemleri aynı derecede hayati öneme sahiptir. Güç sistemlerinin verimli ve kaliteli bir şekilde geliştirilmesi o ülkenin teknoloji bakımından da bir üst seviyeye çıkmasına olanak tanımaktadır. Teknolojinin üst seviyelere çıkması durumunda ise o ülke gelişmiş ülkeler sınıfına geçmektedir. Günümüz dünyasında teknoloji bakımından başta gelen ülkelere bakıldığında söz konusu bu ülkelerin güç sistemlerini her geçen gün geliştirdiğini ve geliştirdiği bu sistemler ile yeni atılımlar yaptığını görmekteyiz. Bu nedenle güç sistemleri üzerindeki çalışmalar ile elde edilen verilerin analizi çerçevesinde her ülke kendi sistemlerini geliştirmektedir.

Bu kapsamda Mardin ili Kızıltepe ilçesinde yer alan bir dağıtım merkezi baz alınarak elektrik dağıtım süreci ele alınmıştır. Elektrik dağıtım sistemi üzerine FACTS cihazı yerleştirilerek (STATCOM) söz konusu güç sistemi üzerindeki veri akışı incelemeye alınmış ve aynı zamanda da söz konusu güç sisteminin bilgisayar ortamında simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Gerçek veriler ile simülasyon sonrası elde edilen veriler karşılaştırılarak güç sisteminin ne şekilde iyileştirilebileceği üzerinde çalışılmıştır.

1.3 Tezin Yapısı

Bu yüksek lisans tezi toplamda 7 bölümden oluşmaktadır. Tezin genel yapısı aşağıda sıralanmıştır.

1. Bölümde; Enerji ve FACTS cihazlarına ait genel bilgilere değinilirken bölüm sonlarına doğru bu yüksek lisans tezinin amaç ve kapsamlarından bahsedilmiştir.
2. Bölümde; Güç elektroniğinin temel tanımı yapılarak güç elektroniği sistemini oluşturan elemanlardan bahsedilmiştir. Bu elemanlar 6 ana madde üzerinde sırasıyla temel yarı iletken güç elemanları, diğer yarı iletken güç elemanları, devrilen elemanlar, sinyal izolasyon elemanları, enerji dönüşümleri ve güç elemanlarının karşılaştırılması şeklindedir.
3. Bölümde; FACTS cihazlarının temel tanımı yapılarak FACTS cihazları türlerine değinilmiştir. Bunlar sırasıyla tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC), tristör kontrollü faz açısı düzenleyici (TCPAR), tristör kontrollü statik var kompensatör (TCSVC), hat arası güç akış denetleyici (IPFC), birleşik güç akış denetleyici (UPFC), statik senkron seri kompensatör (SSSC) ve statik var kompensatör (SVC) şeklindedir.
4. Bölümde; STATCOM cihazına ait temel özellikler verilmiş olup STATCOM'a ait kontrol yöntemleri, formüller, optimizasyon ve harmoniklerden de bahsedilmiştir. Bölümün sonlarına doğru ise Türkiye'de halihazırda kurulu olan STATCOM uygulamalarına değinilmiştir.
5. Bölümde TEİAŞ 16. Bölge Müdürlüğünün Mardin ili Kızıltepe ilçesine ait TR5 ve TR6 trafo verilerine dayanılarak gerekli analizler yapılmış, bölgede bulunan güç sistemine benzer bir algoritma Matlab/Simulink programı üzerinde derlenerek simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucu çıkan sonuçlar ile gerçek veriler karşılaştırılarak söz konusu bölgedeki güç sistemine ait enerji kalitesi ve verimi hakkında sonuçlar elde edilmiştir.
6. Bölümde; Elde edilen sonuçlar doğrultusunda çıkarımlar yapılmış ve söz konusu bölgenin elektrik altyapısının nasıl ve ne şekilde iyileştirilebileceğine dair önerilerde bulunulmuştur.
7. Bölümde ise bu yüksek lisans tezi oluşturulurken baz alınan kaynaklara yer verilmiştir.

2. GÜÇ ELEKTRONİĞİ

Güç elektroniği fikri, 1957'de keşfedilen ilk Tristörün keşfiyle ortaya çıkmıştır. 1960'lı yıllarda güç elemanlarının hızla gelişmesiyle kullanılmaya başlanmıştır. 1974'te yeni bir devrim olarak kabul edilen ilk mikroişlemci üretildiğinde, güç elektroniği hızlı bir gelişim sürecine girmiş ve refah seviyesinin yükselmesinde önemli bir rol oynamıştır.

Enerjinin dönüşümü ve yönetimi üzerine odaklanan bir bilim dalıdır Güç elektroniği. Elektronik ve kontrol bilimleri, güç elektroniği ile yakından ilişkilidir [9]. Güç elektroniği, yük üzerindeki enerjinin kontrolü ve enerji biçimlerinin dönüşümünü inceleyen bir bilim dalıdır. Elektrik mühendisliği alanında son derece önemli ve ilgi çekici bir yere sahiptir. Güç elektroniği, matematik, elektronik ve devre teorisi gibi çeşitli bilgi birikimlerini kapsamaktadır [10].

Güç elektroniklerinin temel işlevi, elektrik enerjisi akışını işlemek ve kontrol etmek için gerilim ve akımı tüketicilere uygun şekilde ayarlamaktır. Yaklaşık 50 ya da 60 Hz frekansa sahip bir elektrik şebekesi, bu güç işleyişinde genel olarak bir ya da üç fazlı olarak kullanılır. Yani, güç girişi genellikle elektrik şebekelerinden gelir [11].

Yüke verilen enerjinin kontrolü aşağıda özetlenmiştir.

⇒ Statik Şalterler – Yarı İletken

- Alternatif Akım Statik Şalterler
- Doğru Akım Statik Şalterler

⇒ Statik Ayarlayıcılar – Yarı İletken

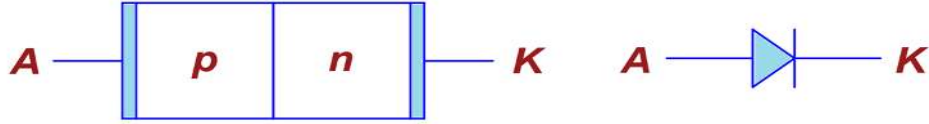
- Alternatif Akım Statik Ayarlayıcılar
- Doğru Akım Statik Ayarlayıcılar

Güç elektroniklerinin temel işlevi, elektrik enerjisi akışını işlemek ve kontrol etmek için gerilim ve akımı tüketicilere uygun şekilde ayarlamaktır. Güç girişi tipik olarak elektrik şebekelerinden gelir. Çıkış, uygulamaya göre doğru akım ya da alternatif akım biçiminde gelişebilir [11].

2.1 Temel Yarı İletken Güç Elemanları

2.1.1 Temel kontrolsüz güç elemanı diyot

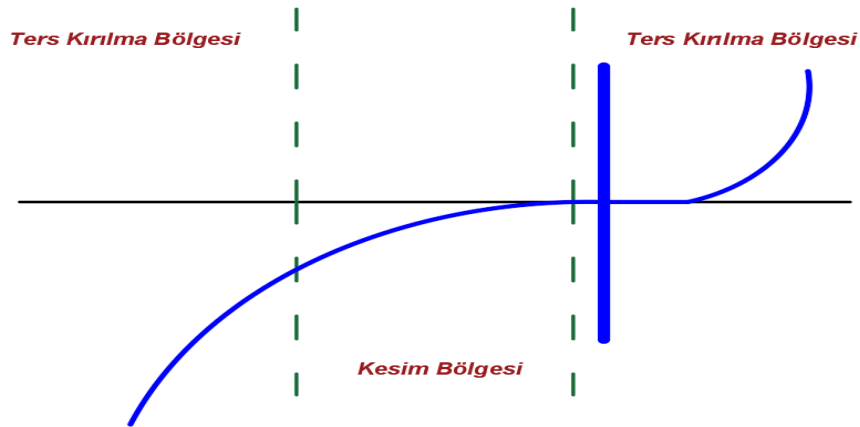
Şekil 2.1’de görüleceği üzere diyotlar genellikle p ve n tipi olmak üzere yarı iletken malzeme, p ve n tipi bileşenlerin bir araya gelmesinden meydana gelmektedir. Bu malzemenin p tipi kısmı anot kısmına temsil ederken n tipi kısmı ise diyodun katot kısmını temsil etmektedir.



Şekil 2.1 Diyotun yapısı ve sembolü

Anoda pozitif bir gerilim uygulandığında diyot iletme geçer ve diyot üzerinde bir gerilim düşümü meydana gelir. Söz konusu bu gerilim düşümü, diyodun yapısına bağlı olarak genellikle bir volt değerini aşmaz. Eşik gerilim değeri, diyodun iletme geçmesi için gereken bu gerilim değerini ifade eder. Bu değerin üzerindeki gerilim, diyodu iletme sokmaz ve kesim bölgesinde kalmasına sebep olur [12].

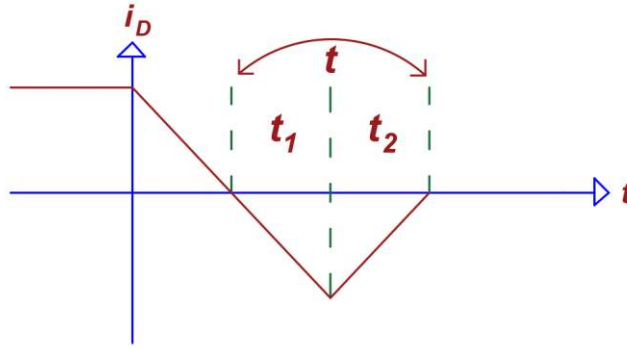
Yukarıda belirtildiği gibi, diyoda ters bir yönde bir gerilim uygulandığında, yani anoda pozitif bir gerilim geldiğinde, diyot iletme geçmez ve üzerinden yalnızca çok küçük bir akım ters yönde geçer. Bu akıma diyodun kaçak akımı denir ve genellikle birkaç mA ya da μA seviyesindedir. Ancak, ters yönde uygulanan gerilim belirli bir değerin üzerinde seyredirse diyot ters yönde kırılma durumu yaşar. Üretici bilgi sayfalarında bu değere “ters yönde kırılma gerilimi” denir.



Şekil 2.2 Diyot karakteristiği

Ters yönde kırılma durumunda, diyot üzerinden yüksek gerilim altında yüksek bir akım geçmeye başlar ve bu durum diyodun tamamen yok olmasına neden olabilir [12]. Bu durumdaki bir diyodun göstereceği karakteristik özellikler şekil 2.2’de gösterilmiştir.

Kesim dönüşümü süresi, diyotun en önemli özelliklerinden biridir. Diyot kesim durumuna geçmeden önce, p ve n jonksiyonu içindeki akım taşıyıcılarının tamamen ortadan kalkması gerekmektedir. Bu nedenle, diyot üzerinden geçen akım sıfıra düştüğünde hemen kapanmaz; aksi takdirde, jonksiyon bölgesindeki fazla akım taşıyıcılarını temizlemek için bir süre ters yönde akım iletmeye devam eder. Kesim dönüşümü süresi, diyotların kesime geçerken gösterdiği bu ters yönde akım iletme süresini ifade eder [12]. Bu durum, 2.3 numaralı şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Diyodun kesim dönüşümü süresi

Frekans 50/60 Hz olduğundan, şebeke uygulamalarında kesim dönüşümü süresi önemli değildir. Kesim dönüşümü süresi nedeniyle çok yavaş kalmaktadır. Bununla birlikte, DC-DC dönüştürücüler veya benzeri yüksek frekansta anahtarlama gerektiren uygulamalarda, kesim dönüşüm süresi oldukça kritik bir öneme sahip olabilir. Sınıflarına göre diyotlar aşağıda listelenmiştir.

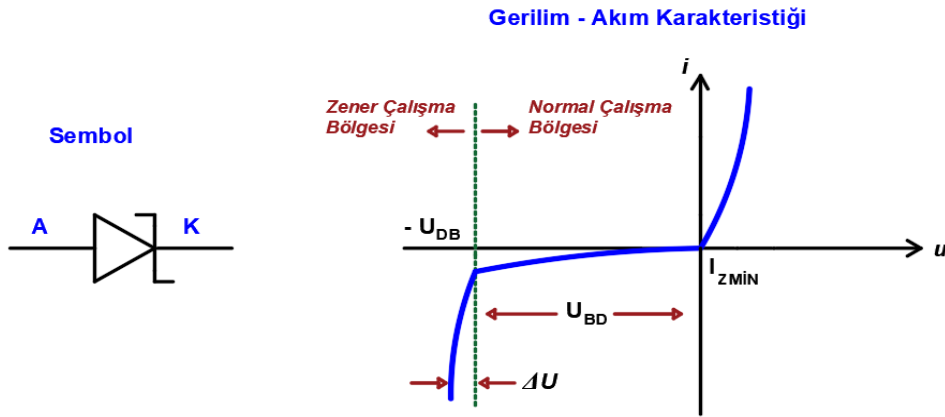
1. **Standart Diyotlar:** Kesim dönüşüm süreleri makul seviyelerde seyreden ve güç sistemlerinde yaygın olarak tercih edilen elemanlardır.
2. **Schottky (Diyot):** Yapısal olarak p ve n jonksiyonu yoktur ve ileri iletim durumunda gerilim düşüm değerleri daha düşüktür. Bu nedenle, standart diyotlara göre kesim dönüşümü süreleri de daha kısadır.

- 3. Hızlı Dönüşümlü Diyotlar:** Kesim dönüşüm sürelerinin yüksek olmaması nedeniyle bu diyotlar frekans bakımından yüksek seviyelerde anahtarlama yapılan uygulamalarda kullanılır.

2.1.2 Zener diyot

Kullanım amacı gerilim regülasyonu yapmak veya doğru gerilimin dalgalı modundan düzgün moda geçişinin sağlanmasıdır [10].

Şekil 2.4'te Zener diyoda ait akım ve gerilim karakteristiğiyle birlikte güç sistemlerindeki sembolü gösterilmiştir.

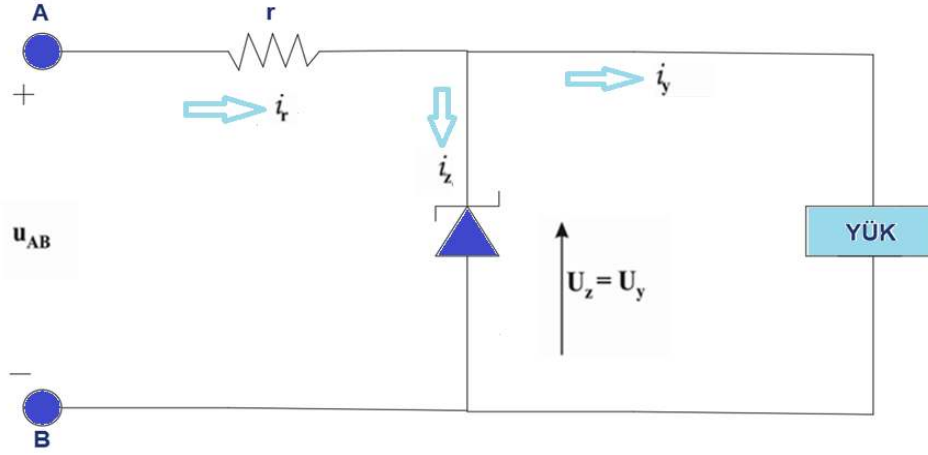


Şekil 2.4 Zener diyoda ait akım-gerilim karakteristiği ve sembolü

Şekil 2.4'ün analizini yapmak gerekirse;

- U_{BD} : Zener Devrilme Gerilimi
- r_Z : Zener diyoda ait direnç
- I_{ZMIN} : Zener diyoda ait minimum akım
- P_{DM} : Zener diyoda ait maksimum güç
- I_{ZMAX} : Zener diyoda ait maksimum ortalama akım
- $P_{DM} = U_Z \cdot I_Z \cong U_{BD} \cdot I_{ZMAX}$ (2.1)
- $u_Z = U_{BD} + r_Z \cdot i_Z$ (2.2)
- $u_Z = U_{BD} + \Delta U$ (2.3)
- $u_Z \cong U_{BD} \cong U_Z \cong \text{Sabit}$ (2.4)

Şekil 2.5'te Zener diyoduna ait temel devre gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Zener diyodun temel devresi

Yukarıdaki devrenin matematiksel analizini yapacak olursak;

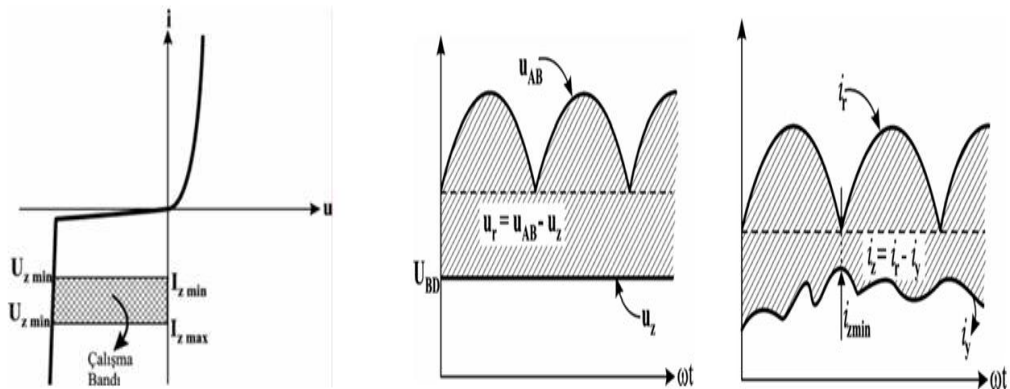
$$\bullet \quad i_z = \frac{u_{AB} - U_Z}{r} - i_y \quad I_{Zmin} = \frac{u_{ABmin} - U_{BD}}{r} - i_{Ymax} \quad (2.5)$$

$$\bullet \quad u_Z = U_{BD} + r_Z \cdot i_z \quad I_{Zmax} = \frac{u_{ABmax} - U_{BD}}{r} - i_{Ymin} \quad (2.6)$$

$$\bullet \quad u_Z \cong U_{BD} = U_Z = U_y \quad I_{Zmin} \leq i_z \leq I_{Zmax} \quad (2.7)$$

Zener diyot kullanırken sabit bir gerilim elde edinilmesi isteniyorsa şayet; $I_{Zmin} \leq i_z$ olma zorunluluğu vardır.

Bu durumda $r \leq \frac{u_{ABmin} - U_{BD}}{I_{Zmin} + I_{Ymax}}$ matematiksel ifadesi genel olarak yazılabilir.

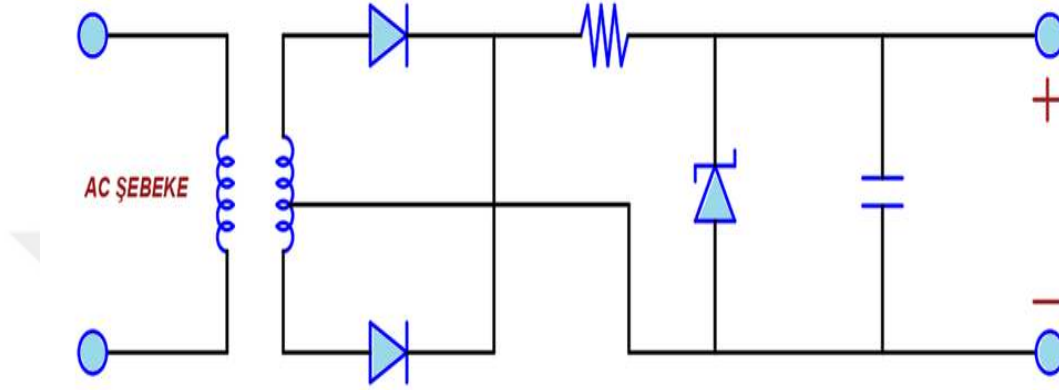


Şekil 2.6 Zener diyodun çalışma prensipleri [10]

Şekil 2.6’da görüleceği üzere; r direncinin değişimi ile bant yönü aşağı ve yukarı olacak şekilde yer değiştirerek Zener diyodun güç kaybının değerinin değişmesine neden olur [10].

En ekonomik bir tasarım için; $I_{Zmin} \cong I_{ZMIN}$ olarak seçilmesi önem taşır [10].

Şekil 2.7’de ise örnek bir Zener diyotlu devre tasarımı gösterilmiştir.

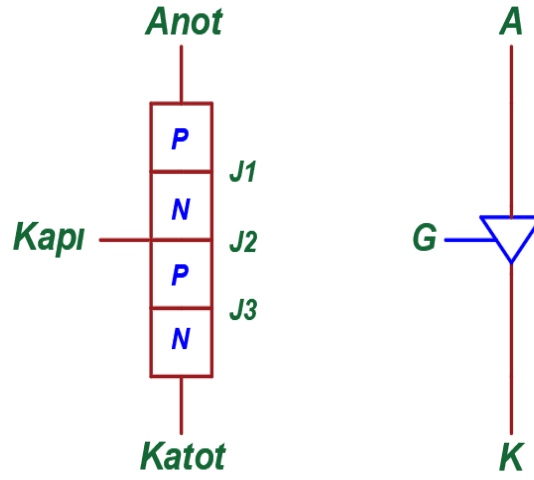


Şekil 2.7 Zener diyotlu örnek bir devre

2.1.3 Tristör (SCR)

Tristör, 4 katmanlı pnpn yapısına sahiptir. Şekil 2.8’de görüleceği üzere 3 adet p-n jonksiyonuna sahiptir. Tristörlere yön olarak ileri bir voltaj uygulandığında, J1 ve J3 parametreleri yön olarak ileriye tercih ederken, J2 parametresi yön olarak ters istikamette polarize olacaktır. Sonuç olarak tristör kesim durumu bakımından ileri yönde olacağından kapı akımı geçmez. Anot ve katot terminalleri arasındaki gerilim belli bir süreye ulaştığında tristör ilettime geçer. İleri kırılma gerilimi, tristörün ileri iletim durumuna geçtiği gerilim değeridir [12].

Tristörler iki ana sınıfa ayrılabilir: inverter ve konverter. İnverter sınıfının kısa kesime gitme süresi, bu iki sınıfı ayırır. Konverter sınıfı tristörleri yavaş tiptir ve doğal komütasyon uygulamalarında kullanılır. Tristörler, Zorlayıcı komütasyon uygulamalarında genellikle inverter kategorisi içerisinde tercih edilir. Ancak, dışarıdan komütasyonlu uygulamalarda meydana gelebilecek güçlü akımlar, bu tristörlere zarar verebilir [13].

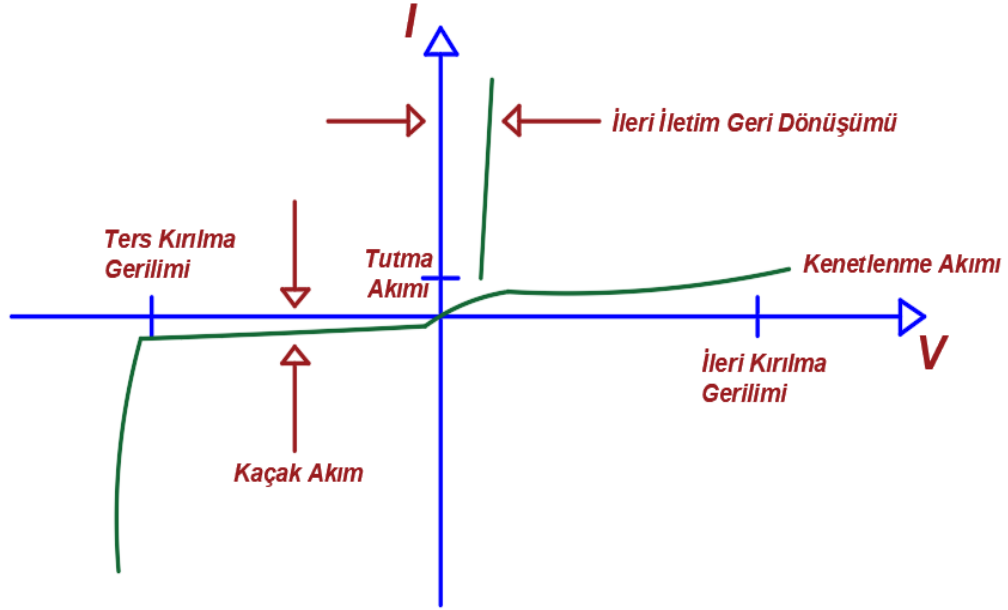


Şekil 2.8 Tristörün yapısı ve elektriksel gösterimi

Kapı terminaline doğru pozitif yönlü bir akım uygulandığında, tristörün iletme geçmesi ile kapı terminalinin tristör üzerindeki kontrol mekanizması işlevini yitirir. Eğer tristöre yön olarak ters polaritede bir voltaj uygulanırsa, bu durumda tristör sönmülenebilir [12]. Kapı terminaline doğru pozitif yönlü bir akım uygulandığında, tristör işlevsel hale gelir. Ancak bu kapı akımı, tristör üzerindeki akıma etki etmeyecek şekilde akarsa, tristör açılmayabilir ve ileri kesim moduna dönüşebilir. Tristörün "kenetlenme akımı" ise tristörün işlevsel moda geçmesi ve bu durumda kalabilmesi için gereken minimum akım değeridir. Benzer şekilde, tristörün iletim durumundan kesim durumuna geçmesi için üzerinden geçen akımın belirli bir değerin altında kalmasına ihtiyacı vardır. Üzerinde negatif bir gerilim olsa bile, tristör, üzerinden geçen akım bu değerin altına düşmediği sürece iletim durumunu koruyacaktır. Tristörün "tutma akımı" budur. Kenetlenme akımı, tutma akımından daha düşüktür [12].

Diyotlar gibi tristörler de anot ve katot terminalleri arasına negatif bir gerilim uygulandığında iletim göstermez; yalnızca yön olarak zıt bir kaçak akım geçişi olur. Bununla birlikte, yön olarak zıt taraftaki bu gerilim belirli bir seviyeyi aştığında tristör yön olarak zıt bir iletimde bulunur. Bu "ters kırılma gerilimi" değeri, tristörün ters yönde iletme geçtiği değerdir. Ters yönde kırılmış bir tristör bozulur ve yenisiyle değiştirilmelidir [12].

Yukarıda anlatılan tüm bu durumlar şekil 2.9’da gösterilmektedir.



Şekil 2.9 Tristörün ters kırılma eğrisi

Tristörlerin iletme geçme şartları aşağıda sıralanmıştır.

a. Kapı terminaline akım uygulanması;

Tristörün asıl olarak iletme geçirilmesini baz alan bir yöntemdir. Kapıya doğru gelen akım yükseldikçe, tristör gerilimi azalır ve tristör üzerindeki akım yükselir; bu sayede tristör işlevsel bir hale gelir. Oldukça yüksek oranda kapı akımları, tristörün daha aşağıda bir anot ve katot gerilimlerinde iletme geçmesini sağlamak için de kullanılabilir [12].

b. Anot – Katot arasına yüksek gerilimin uygulanması;

Anot ve katot terminalleri içerisine, ileri kırılma seviyesinden yüksek bir voltaj uygulandığında tristör ileriye doğru işlevsel hale gelir. Ancak bu yöntem genellikle tercih edilmez, çünkü bu şekilde tristörün faal hale gelmesi kötü sonuçlar doğurabilir [12].

c. dv/dt ile;

Bir tristör, ani bir gerilim artışıyla karşılaştığında iletme geçebilir. Ancak, bu durum tercih edilen yöntemlerden biri değildir [12].

d. Işık ile;

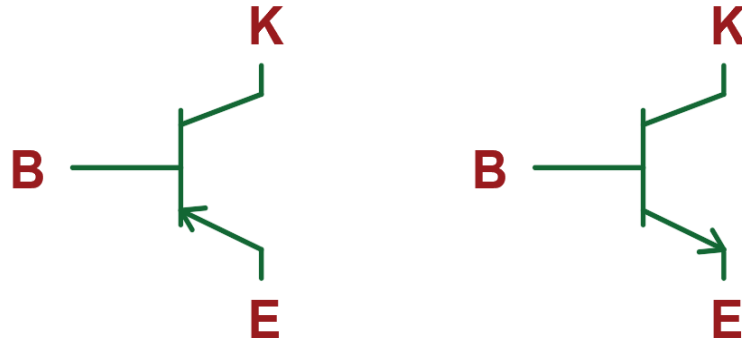
Eğer fotonlar bir tristörün jonksiyonuna değerse, delik-elektron çiftlerinin sayısı yükselerek tristörün faal hale gelmesine neden olabilir. Bu amaçla özel olarak tasarlanmış, ışık ile aktive edilebilen tristörler bulunmaktadır [12].

e. Isı ile;

Isı etkisi, ışık etkisiyle benzer şekilde delik-elektron çiftlerinin sayısını yükselterek tristörün faal hale gelmesini sağlayabilir [12].

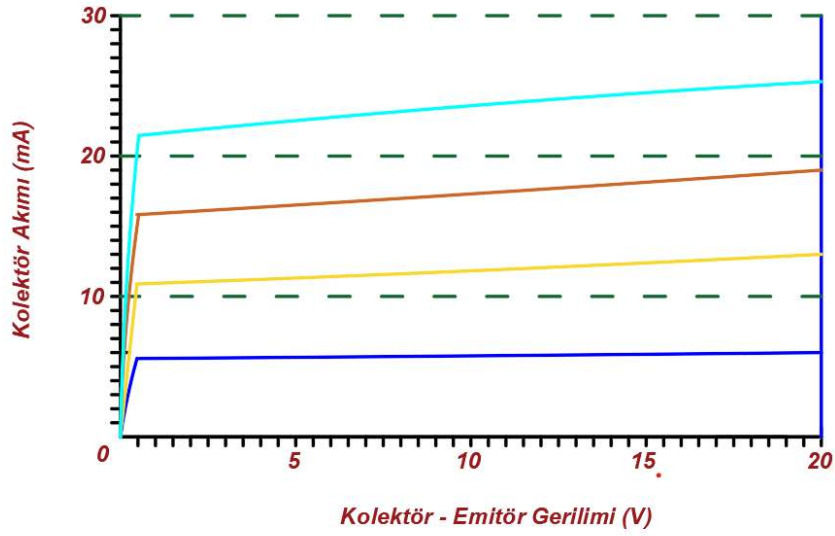
2.1.4 Bipolar transistör (BJT)

BJT'ler, iki p katkılı katman arasında bir n katkılı katmanın (pnp) ya da iki n katkılı katman arasında bir p katkılı katmanın (nnp) yerleştirilmesiyle oluşturulmuş iki pn birleşimi bulunan transistörlerdir. Yapı itibarıyla diyotlarla benzerlik göstermektedirler [12]. Şekil 2.10, bu elemanların sembollerini göstermektedir.



Şekil 2.10 BJT'nin sembolleri

BJT transistörleri, beyz, emitör ve kolektör olmak üzere üç terminale sahiptir. Bu transistörler, beyzine uygulanan akım sayesinde iletim durumuna geçer ve bu durumda kalabilmeleri için devamlı bir şekilde beyz akımına ihtiyaç duyarlar. Belirli bir beyz akımı için BJT transistörlerinin çıkış karakteristikleri, kolektör-emitör gerilimine karşılık gelen kolektör akımının değişimi ile ifade edilmektedir [12]. Bu değişim, Şekil 2.11'de gösterilmektedir.



Şekil 2.11 BJT'nin çıkış karakteristiği

BJT'lerin emitörleri, bir pn birleşimine bağlıdır. Bu nedenle, diyotlarda olduğu gibi transistör iletimdeyken yaklaşık 0.7 voltluk bir gerilim düşüşü gerçekleşir. Transistör, bu gerilimin altında bir beyz gerilimine sahip olduğunda kesim durumunda kalır. Ayrıca, iletim durumunda gerilim düşümü oldukça düşüktür, bu da iletimdeki güç kaybını en aza indirir. Ancak azınlık akım taşıyıcısı özellikleri sebebiyle açılma ve kapanma süreleri zaman zaman yüksek olabilir. Kesim durumunda, BJT'ler transistörün zarara uğramadan taşıyabileceği en yüksek kolektör-emitör gerilimi ile çalışır. Bu gerilim, kırılma gerilimi olarak adlandırılır. Ek olarak, BJT'lerde az sayıda akım taşıyan elemanlara özgü sıfırın altında bir sıcaklık katsayısı nedeniyle ikinci kırılma noktaları meydana gelir. Bu tür bozulmalar, BJT'lerde birincil kırılmalara göre daha yaygın olarak gözlemlenir [12].

BJT çalışmasını anlamak için üç ana alan bulunmaktadır. İlk olarak, kesim bölgesinde baz akımı ya sıfır ya da yetersiz olduğunda, transistör açılmaz ve kolektör akımı iletilmez. İkinci olarak, yükselteçler doğrusal bölgede çalışır; bu durumda gerilim ile akım arasındaki ilişki doğrusaldır. Son olarak, memnuniyet bölgesine geldiğimizde, transistör üzerinden belirli bir baz akımının geçebileceği maksimum akım söz konusudur. Bu noktada, kolektör-emitör geriliminin artışı, kolektör akımını önemli ölçüde etkilemeyecektir [12].

Yukarıda belirtildiği gibi, BJT'lerin doğrusal bölgesi genellikle yükselteç olarak kullanılırken, kesim ve doyum bölgeleri anahtarlama uygulamalarında tercih edilmektedir [12].

2.1.5 MOSFET (Metal oksit yarı iletken alan etkili transistör)

Güç MOSFET'leri piyasaya sürüldüğünden bu yana, birçok uygulamada BJT'lere göre daha popüler hale gelmişlerdir. BJT'lere kıyasla daha yüksek gerilim düşümüne sahip olmalarına rağmen, azınlık taşıyıcılarının olmaması sayesinde daha yüksek anahtarlama frekanslarında kullanılabilmektedirler. Ayrıca, genel olarak daha düşük kayıplara sahip olmaları da onların tercih edilme nedenlerinden biridir [12].

MOSFET'ler kaynak, akaç ve kapı terminallerine sahiptir. Anahtarın kapı terminali, diğer bileşenlerden silikon dioksit bir tabaka ile ayrılmıştır. Bu durum, MOSFET'in kapı terminalinden azınlık taşıyıcı akımının geçmesini engeller. Dolayısıyla, MOSFET'lerde BJT'lerde görülen ikincil kırılma gerilimi mevcut değildir. Böylece azınlık taşıyıcılarının kanaldan çıkarılması gereken kesim dönüşümü de yoktur, bu da MOSFET'lerin açılma-kapanma sürelerine yansır. Bu, MOSFET'lerin daha hızlı uygulamalarda kullanılabilmesini sağlar [12].

Şekil 2.12'de MOSFET'lerin p ve n kanallı sembolleri gösterilmiştir.

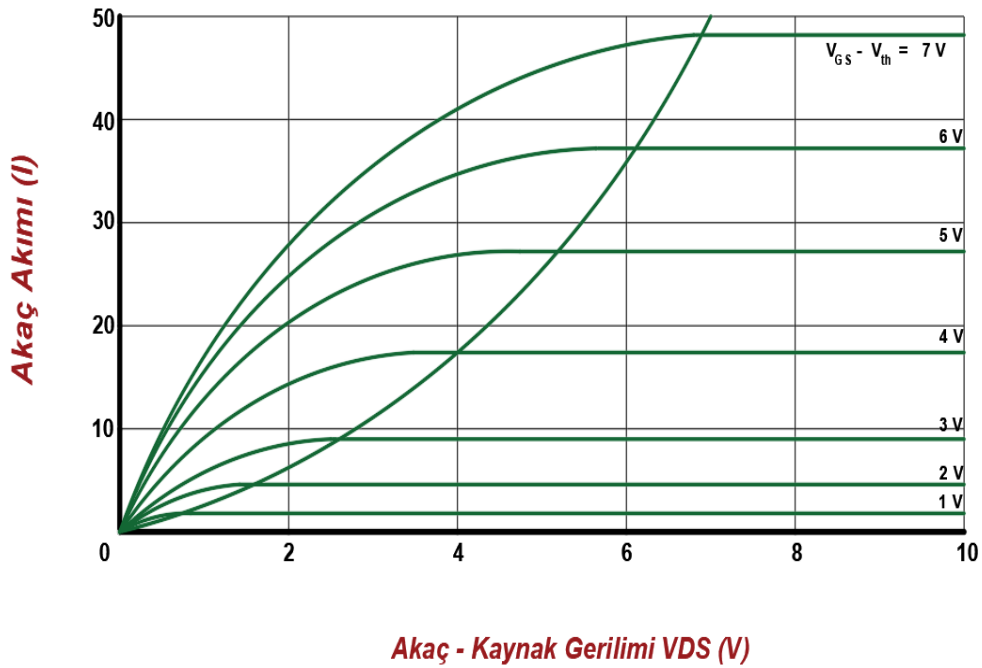


Şekil 2.12 MOSFET'in sembolleri

Gerilim kontrollü bir anahtarlama aracı olan MOSFET'lerin iki türü vardır: kanal oluşturmali ve kanal ayarlamali. Kanal oluşturmali (Enhancement type) MOSFET tipi yaygın olarak kullanılır. MOSFET'i ilettime sokmak için kapı ve kaynak arasını gerilimlendirmek gerekir [12].

Bu voltaj, n-kanallı MOSFET'lerde pozitif, p-kanallı MOSFET'lerde ise negatif olacaktır. Bu voltaj uygulandığında, iletken (akaç) ile kaynak arasında, voltaj sayesinde akım geçirebilecek bir kanal oluşur. Kapı ve kaynak arasındaki gerilim arttıkça, MOSFET'te daha fazla akım geçişine izin verilir. Böylece, MOSFET'in çıkış özellikleri, belirli bir kapı ve kaynak gerilimi altında iletken akımının ve iletken-kaynak geriliminin nasıl değiştiğini ortaya koyacaktır [12].

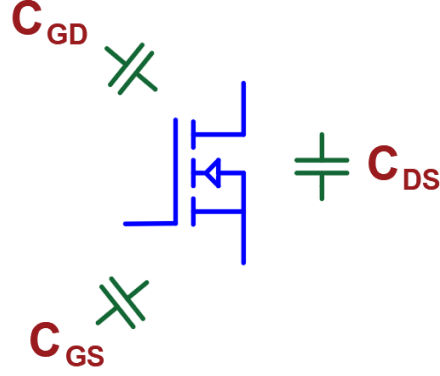
Bu değişim Şekil 2.13'te gösterilmektedir.



Şekil 2.13 MOSFET'in çıkış karakteristiği

Kapı ile kaynak arasında uygulanan bir gerilim ile iletme geçen MOSFET'ler, bu gerilim belirli bir değeri aşmadığı sürece iletme geçemez. Başka bir deyişle, MOSFET, belirli bir kapı ve kaynak arasındaki gerilim seviyesine ulaşınca dek kapalıdır. Bu eşik gerilim değeri MOSFET eşik gerilimi olarak bilinir ve üretici bilgi sayfalarında V_{th} olarak belirtilmektedir [12].

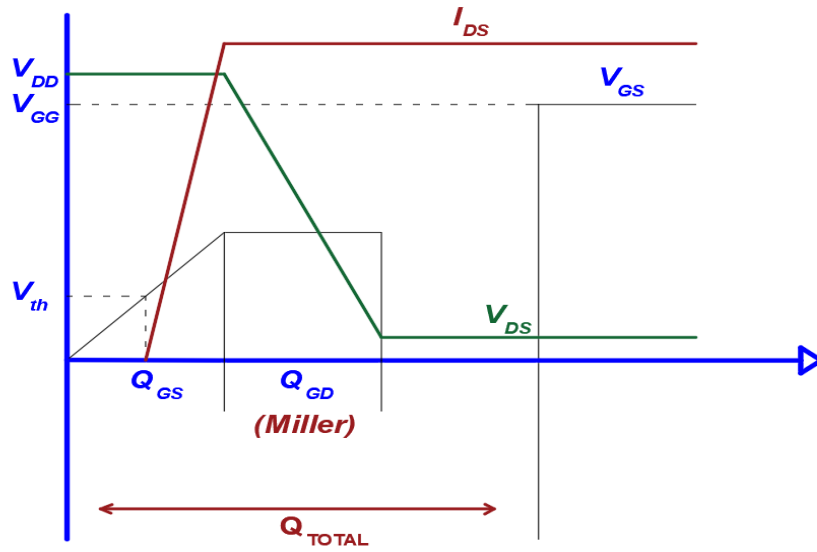
MOSFET'in fiziksel yapısından ötürü MOSFET'in terminalleri arasında kapasitörler yer almaktadır. Bu özellik MOSFET'lerin en nitelikli özelliklerindendir [12]. Şekil 2.14'te MOSFET'in modellenmesi gösterilmektedir.



Şekil 2.14 MOSFET'in modellenmesi

Bu kapasitörler, MOSFET'in anahtarlama özellikleri için çok önemlidir. Bu kapasitörler, transistörün açılma ve kapanma süreleriyle bağlantılı olduğundan, yüksek anahtarlama frekanslarındaki kayıplar da doğrudan bunlarla ilişkilidir. Kapı-akaç arasında görülen "Miller" kapasitansı, bu kapasitör etkilerinden en önemlisidir. Miller kapasitansı, giriş ve çıkış arasında bulunduğu için transistörün yükselteç kazancı da artar. Bu durum, transistörün etkisinin diğerlerine kıyasla daha belirgin olmasına neden olur [12].

Yukarıda açıklanan durum, MOSFET'in anahtarlama karakteristikleri ile birlikte Şekil 2.15'te gösterilmektedir.



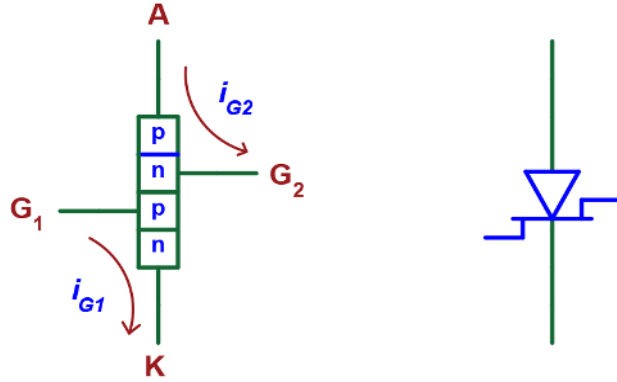
Şekil 2.15 Miller kapasitansı

2.2 Diğer Yarı İletken Güç Elemanları

2.2.1 Tristör tetrot

Dört ucu bulunan özel bir tristör çeşididir. 2 adet kapısı bulunur ve kapıların her birinden tetiklenebilir. Tetikleme akımları ayrı ayrı kullanılabilir [10].

Sembolik gösterimi şekil 2.16’da gösterilmektedir.

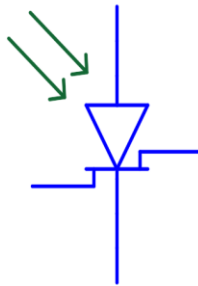


Şekil 2.16 Tristör tetrot sembolü

2.2.2 Foto tristör

İki, üç veya dört ucu bulunan, normal ortamlarda göz ile görülebilen ışıqla ilettime geçen özel bir tristör çeşididir. Bir kapı akımı ile veya ışıqla kontrol edilmesi mümkündür [10].

Sembolik gösterimi şekil 2.17’dedir.



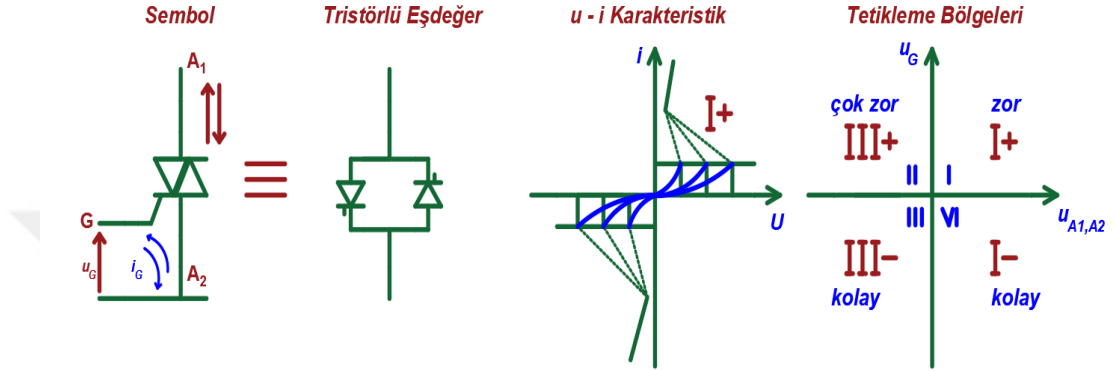
Şekil 2.17 Foto tristör sembolü

2.2.3 Triyak (İki yönlü tristör triyot)

Diğer adı çift taraflı (iki yönlü) tristördür. Paralel ve zıt bir şekilde birleşen iki adet tristörün birleşimi gibidir. Montaj ve tetikleme açısından oldukça kolaylık

sağlamaktadır. Yalnızca alternatif akım uygulamalarında kullanılmak üzere üretimi yapılmaktadır. AC kıyıcılarda güç elverdikçe triyak kullanılmaktadır. Güç yetersiz kalırsa eğer triyak yerine tristör tercih edilir. Hemen hemen 100 - 150 Amperlere kadar dayanım gücü bulunan triyaklar üretilmektedir [10].

Sembolik gösterimi şekil 2.18’de gösterilmiştir.



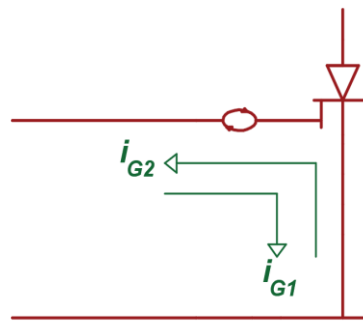
Şekil 2.18 Sembol, karakteristik ve tetikleme bölgeleri (Triyak)

Şekil 2.18’de görüleceği üzere; I- ve III- bölgelerinde Triyak düşük akımlar ile kolay bir şekilde tetiklenebilir. III+ bölgesinde, tetikleme oldukça zor ve hatta imkânsız hale gelebilmektedir. I+ ve III- bölgelerinde çalışmak nispeten daha kolay olduğundan, uygulamalarda bu bölgelerde çalışma yapılması tavsiye edilmektedir [10].

2.2.4 Kapı sönümlü tristör

Yüksek güç ve düşük frekanslarda tercih edilmektedir. Tetikleme devreleri, söndürme sinyallerinin büyük olması nedeniyle pahalı ve karmaşıktır. Yüksek hızlara çıkabilen özel bir tristördür [10].

Sembolik şekli şekil 2.19’dadır.



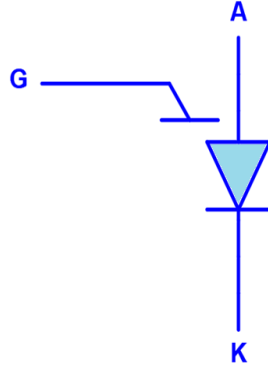
Şekil 2.19 Kapı sönümlü tristör sembolü

Şekil 2.19’da görüleceği üzere bir numaralı kapı akımı (i_{g1}) ile kısa süreli olarak tetiklenir ve iki numaralı kapı akımı (i_{g2}) ile sönümlenir. i_{g1} akımı normal tristörlerdeki gibi çok küçük değerlerdedir ve i_{g2} akımı ise ana akımın dörtte birine denk gelecek şekilde bir artımla çok büyük değerlerde seyretmektedir [10].

2.2.5 MOS kontrollü tristör (MCT)

Tristör ile MOSFET’in harmanlandığı, yüksek hızlara çıkabilen, gerilim kontrollü, karma bir tristördür. Tristörün ideal iletim karakteristiği ile MOSFET’in ideal sürme özelliğini birlikte bünyesinde barındırır. Negatif gerilim sinyali ile tetiklendiğinde, pozitif gerilim sinyali ile sönümlenir. Aynı zamanda iletim ve kesim sırasında kilitlenme özelliği taşımaktadır. Ticari üretim aşamasına geçmemiş olması ve gelişim süreci halen tamamlanmamasına rağmen üstün özellikleri sayesinde elemanlar arasında şu anda en üst klasmanda yer almaktadır [10].

Sembolik şekli şekil 2.20’dedir.



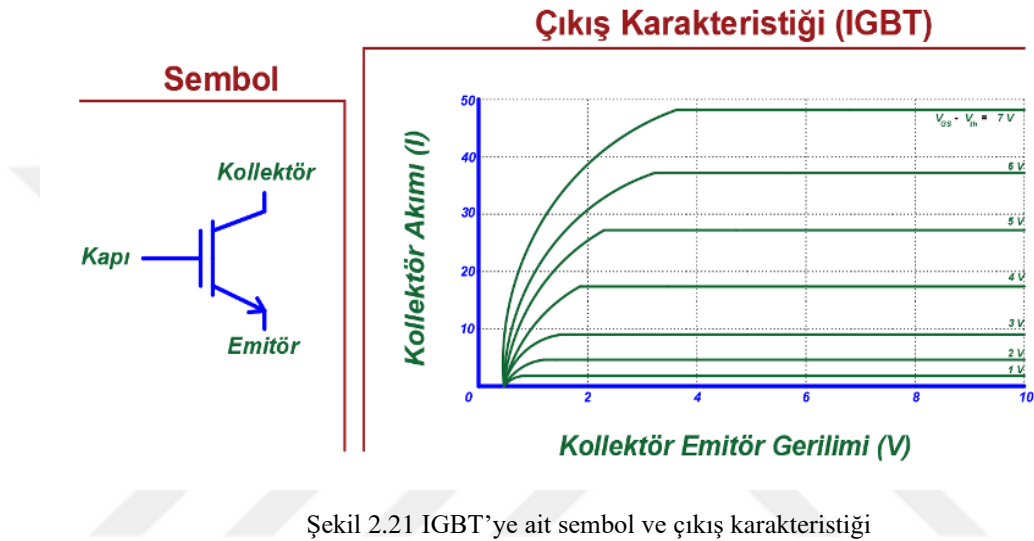
Şekil 2.20 MOS kontrollü tristör sembolü

2.2.6 İzole kapılı bipolar transistör (IGBT)

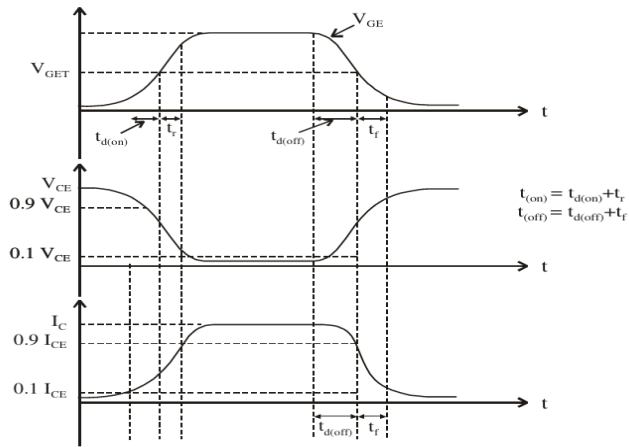
IGBT’ler, MOSFET ve BJT’lerin bazı avantajlarını bir araya getirir. MOSFET’lere benzer şekilde, yüksek bir kapı empedansına sahip oldukları için anahtarlama daha kolaydır. IGBT’lerin, BJT’ler gibi düşük iletim gerilim düşümleri vardır ve ileri kırılma gerilimleri oldukça yüksektir. Kapıdan kanala azınlık taşıyıcıları enjeksiyonu gerçekleşmediğinden, BJT’lerde görülen ikincil kırılma gerilimi problemleri de ortadan kalkmaktadır. Yüksek frekans değerlerinde BJT’lere göre daha iyi performans sergilemesine rağmen, hız açısından MOSFET’lerle kıyaslandığında daha düşük

seviyelerde kalmaktadır. Yine de anahtarlama özellikleri MOSFET'lere oldukça yakın bir performans göstermektedir [12].

IGBT'lerin emitör, kolektör ve kapı olmak üzere 3 adet kısmı bulunmaktadır. Belirli bir Kapı-emitör geriliminde kolektör akımının kolektör-emitör gerilimine göre değişimi çıkış karakteristiğini yansıtır [12]. IGBT'nin çıkış karakteristiği ve sembolü şekil 2.21'de gösterilmiştir.



Şekil 2.22'de ise IGBT'ye ait anahtarlama karakteristiği gösterilmiştir. IGBT'lerin kontrolü, kapı-emiter gerilimi V_{GE} ile sağlanır. Bu elemanlar, orta seviyedeki güçteki uygulamalarda, özellikle alternatif akım ve doğru akım motor sürme devreleri ile güç besleme devrelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [14].



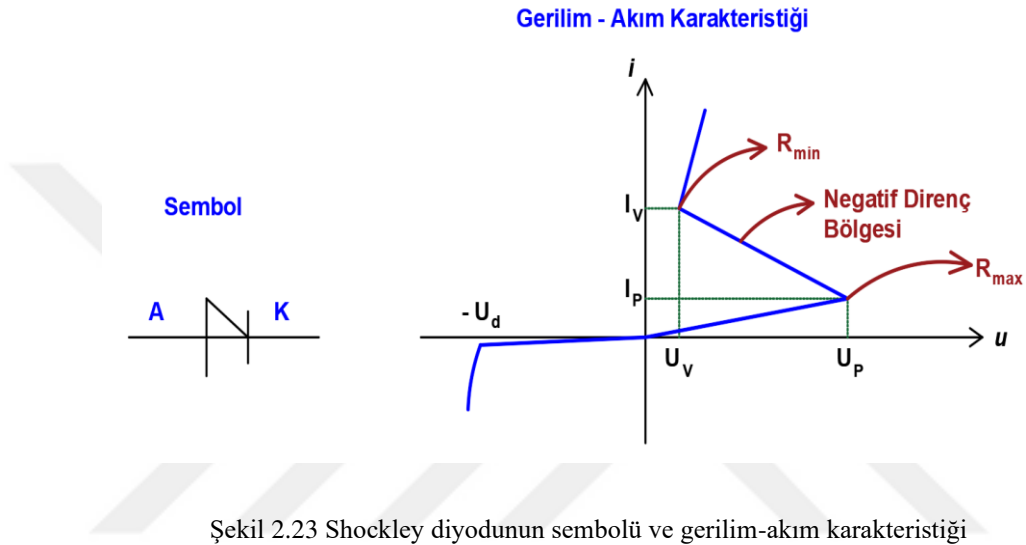
Şekil 2.22 IGBT anahtarlama karakteristiği [11]

2.3 Devrilen Elemanlar

2.3.1 Shockley

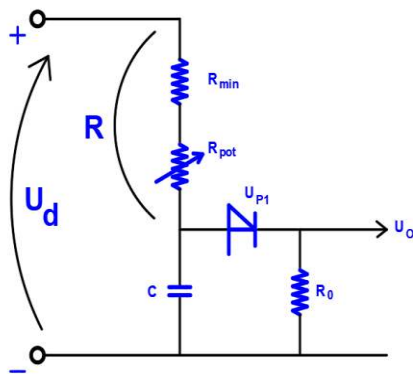
Özel olarak tasarımı yapılan ve kapı tarafındaki uç kısmı atılmamış bir tristör olan Shockley diyodu, yön olarak tek tarafa devrilebilen ve iki ucu bulunan bir elemandır [10].

Şekil 2.23'te Shockley diyoduna ait sembol ve gerilim-akım karakteristiği gösterilmiştir.

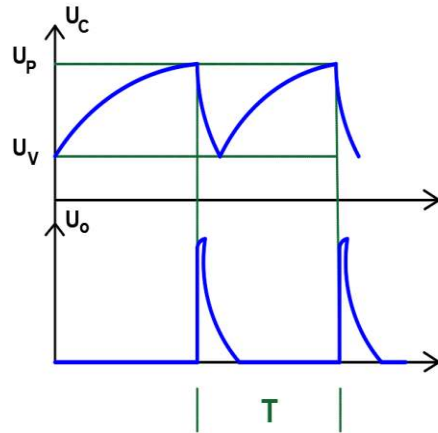


Şekil 2.24'te ise Shockley diyotlu bir osilatör devresinin tasarımı gösterilmiş olup tasarım sonucu oluşan temel dalga şekilleri de hemen yan kısımda sunulmuştur.

Shockley Diyotlu Bir Osilatör Devresi



Temel Dalga Şekilleri



Şekil 2.24 Shockley diyodu ile tasarlanan devre ve dalga şekilleri

Şekil 2.24'ü matematiksel olarak ele alacak olursak;

- $R_{min} \geq \text{Birkaç k}\Omega$ (2.8)

- $R_{pot} \cong \text{Birkaç yüz k}\Omega$ (2.9)

- $R_o \leq 100 \Omega$ (2.10)

- $R = R_{min} + R_{pot}$ $R_{max} = R_{min} + R_{potmax}$ (2.11)

- $R_{min} \geq \frac{U_d - U_V}{I_V}$ $R_{max} \leq \frac{U_d - U_P}{I_P}$ (2.12)

- $I_{Cmax} \leq I_V$ $I_{Cmin} \geq I_P$ (2.13)

- $U_C < U_d$ olması durumunda devre faal haldedir.

- $I_C < I_P$ olması durumunda u_C kati surette U_P 'ye ulaşamaz ve herhangi bir sinyalin elde edilmesi mümkün olamaz.

- $I_C > I_V$ olması durumunda iletimde olan devre elemanı artık iletimden çıkamaz ve ilk sinyalden itibaren bir daha sinyal üretilemez.

Uygulamalarda sınır değerlerden uzak durulması tavsiye edilir.

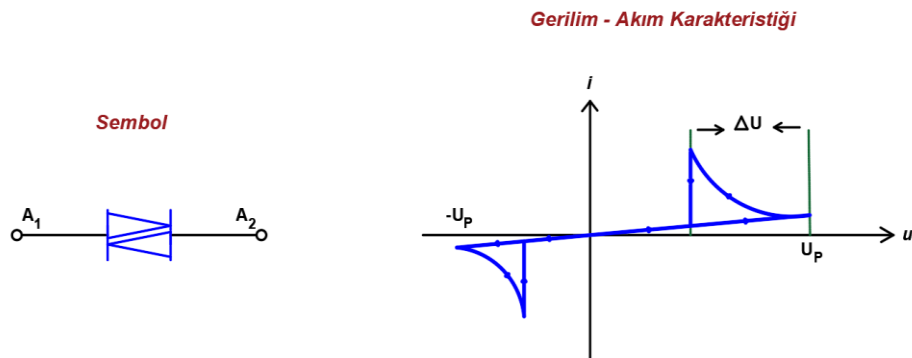
- $u_C = U_d \cdot (1 - e^{\frac{-t}{RC}})$ $\tau = RC$ τ : zaman sabiti (2.14)

- $u_C = U_P \Rightarrow t \cong T \Rightarrow T \cong RC \cdot \ln \frac{U_d}{U_d - U_P}$ olarak bulunur. (2.15)

2.3.2 Diyak

İki yönlü ve iki uçlu bir devre elemanı olan bu tasarım, alternatif akım uygulamalarında sıkça tercih edilir. Basit yapısı ve uygun maliyeti ile en yaygın şekilde kullanılan iki yönlü devre elemanlarından biridir [10].

Şekil 2.25'te sembol ve gerilim-akım karakteristiği gösterilmiştir.



Şekil 2.25 Diyak'a ait sembol ve gerilim-akım karakteristiği

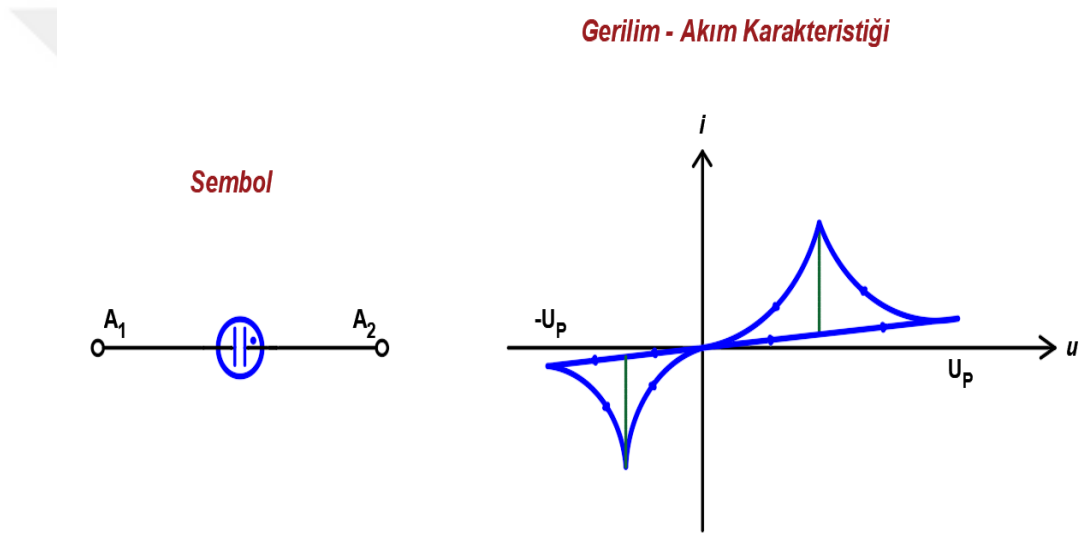
2.3.3 Neon lamba

Diyak'ta olduğu gibi Neon lamba da İki yönlü ve iki uçlu olarak devrilen bir elemandır. Neon gazı ile iç kısmı doldurulan bu lamba bir yarı iletken değildir [10].

Gösterge lambası olarak daha çok Endüstri alanında tercih edilmektedir. Dezavantajı, Devrilme geriliminin oldukça yüksek olmasıdır. Avantajı ise sızıntı akımının oldukça düşük olmasıdır [10].

- $60 \text{ V} < U_P < 100 \text{ V}$, $i_{sız} = \text{Birkaç } \mu A$ (2.16)

Şekil 2.26'da Neon lambaya ait sembol ve gerilim-akım karakteristiği gösterilmiştir.



Şekil 2.26 Neon lambaya ait sembol ve gerilim-akım karakteristiği

2.3.4 Diğer bazı devrilen eleman örnekleri

Diyak'ta olduğu gibi Neon lamba da İki yönlü ve iki uçlu olarak devrilen bir elemandır. Neon gazı ile iç kısmı doldurulan bu lamba bir yarı iletken değildir [10].

UJT (Unijunction Transistor): Çift tabanlı bir transistör olan UJT, 3 ucu bulunan tek yönlü bir devrilen elemandır.

PUT (Programmable Unijunction Transistor): Tıpkı UJT gibi, üç ucu bulunan ve yön olarak tek bir tarafa devrilebilen bir yapıdadır. Anot bölümünden kapı tarafındaki uç kısmı atılarak tasarlanan özel yapım bir tristördür.

SUS (Silicon Unilateral Switch): UJT ve PUT elemanları gibi üç ucu bulunan ve yön olarak tek bir tarafa devrilebilen bir yapıya sahiptir. İki adet transistörü bulunan, Bir zener diyot ve bir adet direnç elemanından meydana gelen kolay bir bütünleşmiş çevrimdir.

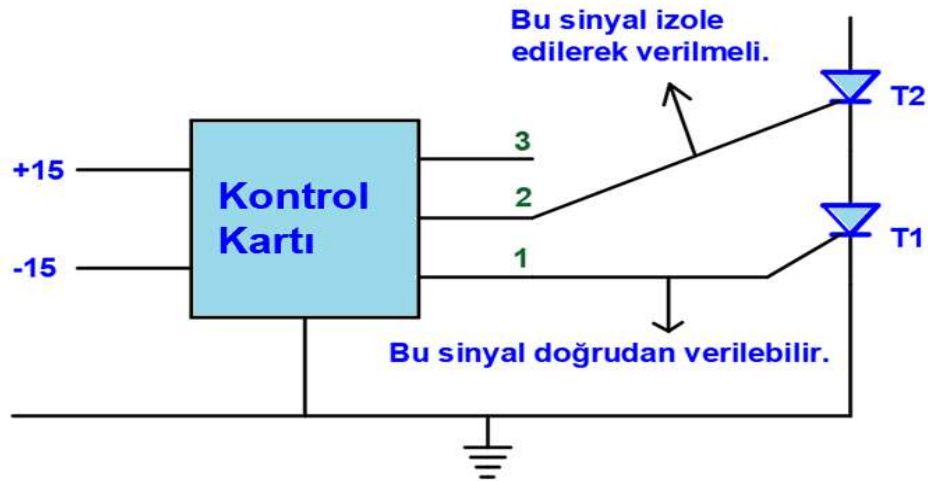
SBS (Silicon Bilateral Switch): UJT, PUT ve SUS elemanları gibi 3 ucu bulunmaktadır. Fakat onlardan ayrılan özelliği çift yönlü olmasıdır. Paralel bir şekilde zıt olarak bağlanmış iki adet SUS devresi şeklinde olan bütünleşmiş bir çevrimdir.

Söz konusu bu elemanlar, 555 ve başka bütünleşmiş çevrimler ile mikro işlemcilerin yaygın olarak tercih edilmeleriyle beraber kullanım ömürleri tamamlanmış olup güç sistemlerinde artık tercih edilmemektedirler [10].

2.4 Sinyal İzolasyon Elemanları

Güç sistemlerinde sürme sinyalleri veya tetiklemeler, ana akım elemanlarına çoğunlukla izole edilerek taşınır. Bu taşınma işlemi 2 şekilde yapılır; manyetik alan ve ışık yardımı [10].

Şekil 2.27’de bu durum özetlenmiştir.

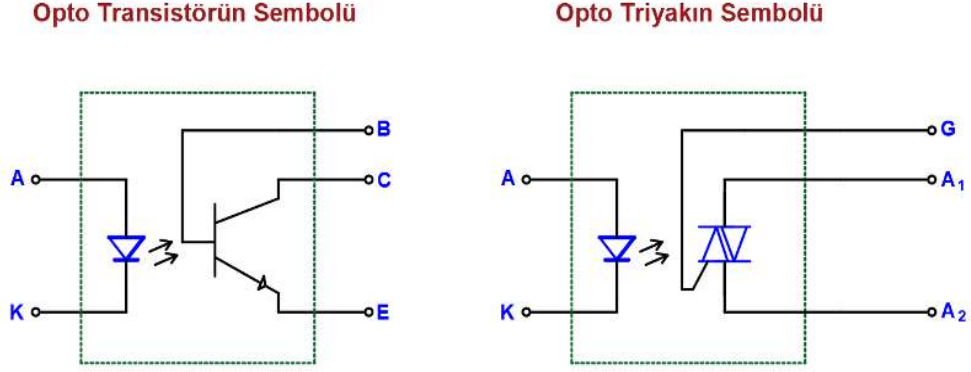


Şekil 2.27 Güç elektroniği devlerinde İzolasyon

2.4.1 Opto bağlayıcılar

Giriş kısmında bulunan Led üzerinden geçen akımın neden olduğu ışık ile çıkış kısmı iletime geçen elemanlardır.

Uzun veya kısa süren sinyallerin iletilmesi hedeflenir. Şekil 2.28’de bu bağlayıcılara ait semboller gösterilmiştir.



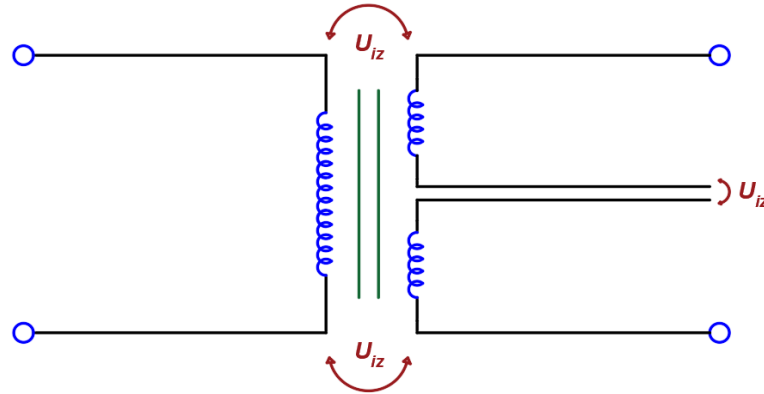
Şekil 2.28 Opto bağlayıcılara ait semboller

Bu bağlayıcıların bazıları aşağıda sıralanmıştır [10].

- a. Opto Tristör
- b. Opto Darlington
- c. Opto Triyak
- d. Opto Transistör

2.4.2 Tetikleme transformatörü

Küçük boyutlu ferit bir nüve üzerine, az sayıda sarıma sahip bir primer sargı ve bir ya da birkaç sekonder sargı yerleştirilerek oluşturulur. Tüm sargıların hem kendilerine hem de nüveye karşı izole edilmesi son derece önemlidir [10]. Söz konusu bu transformatör çeşidinin sembolü şekil 2.29’dadır.

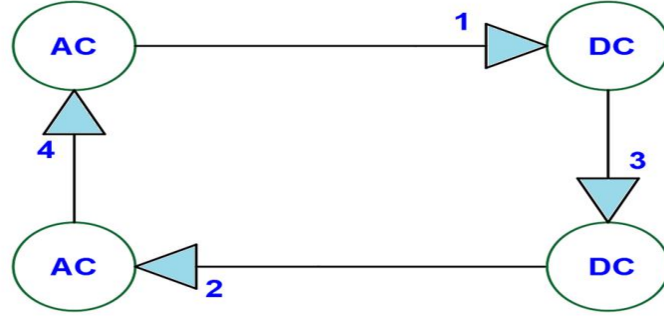


Şekil 2.29 Tetikleme transformatörü sembolü

L'nin değeri birkaç yüz μH dolaylarında olmasına rağmen kısa süren sinyaller iletebilmektedir. Uzun süren sinyallerde, başlangıç anında çıkış verdikten sonra kısa devre özelliği göstermektedir. (U_{iz} : İzolasyon Gerilimi (Birkaç kV dolaylarında))

2.5 Enerji Dönüşümleri

Toplamda dört ana dönüştürücü vardır. Şekil 2.30 bu dönüştürücüleri göstermektedir.



Şekil 2.30 Enerji dönüşümleri

Yukarıdaki Şekil 2.30'u inceleyecek olursak;

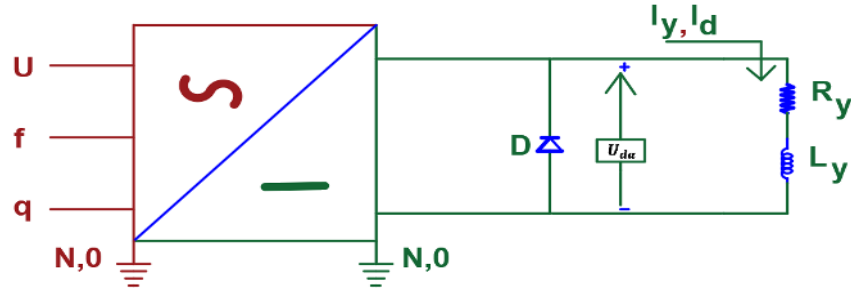
- 1 numaralı dönüşüm alternatif akımdan doğru akıma;
- 2 numaralı dönüşüm doğru akımdan alternatif akıma;
- 3 numaralı dönüşüm doğru akımdan doğru akıma;
- 4 numaralı dönüşüm ise alternatif akımdan alternatif akıma dönüşümü sembolize etmektedir.

Günümüzdeki güç elektroniği uygulamalarının büyük bir kısmı, giriş beslemesi olarak elektrik tesislerinden bağımsız olarak bazı özellikler gerektirir. Güç elektroniği sistemleri, yükün ihtiyaç duyduğu özelliği değiştirerek elektrik enerjisi karakteristiğini sağlar. Güç elektroniği devreleri tarafından kontrol edilen endüksiyon ısısı uygulamaları, güç temelli sistemler, kompanzasyon, ısı ve aydınlatma denetimi ile kontrolü gibi çeşitli uygulamalar için yarı iletken güç anahtarları kullanılarak enerji çeşitlerinin birbirlerine dönüşümü sağlanmaktadır [15]. Güç elektroniği devreleri, bu enerji dönüşümleri esnasında elektrik enerjisinin işlemlerini, filtrelemesini ve kontrolünü en yüksek verimle gerçekleştirir. Söz konusu devreler, güç elektroniği bileşenleri, devre uygulamaları ile tasarımı, elektrik gücünü ve analitik araçların geliştirilmesini içermektedir.

Çeviricilerde yarı iletkenler ya da anahtarlama bileşenleri tercih edilir. Konverterler, yarı iletken güç elemanları tarafından inşa edilen ve kontrol elektroniği tarafından kontrol edilen elektrik gücünü dönüştürür [16].

2.5.1 AC-DC dönüştürücüler / doğrultucular, redresörler

Alternatif akımın doğru akıma dönüştürülmesi olayıdır. Şekil 2.31’de bu dönüştürücülere ait örnek bir devre gösterilmiştir.



Şekil 2.31 Doğrultucu devresi

Şekil 2.31’deki devre yapısı incelenecek olursa;

- U : Alternatif akım girişindeki etkin gerilim
- f : Frekans
- q : Faz adedi
- I_d, I_y : Yük tarafındaki ortalama akım değeri
- $U_{d\alpha}$: Doğru akımın çıkıştaki voltaj değeri, $U_{d\alpha} = f(\alpha)$
- U_d : Doğru akım maksimum çıkış voltajı ($\alpha = 0 \Rightarrow U_{d\alpha} = U_d$)
- α : Fazdaki denetim ya da kesme açısı
- D : Söndürme ya da komütasyondaki bağımsız geçiş diyodu
- U_{fm} : Faz üzerindeki maksimum voltaj
- U_{hm} : Hat üzerindeki maksimum voltaj
- $U_1 = U_2 = U_3 = U_r$: Efektif faz gerilimi
- $U_{12} = U_{21} = U_{13} = U_h$: Efektif fazlar arası gerilim

Sanayi alanında geçmişten süregelen ve çoğunlukla tercih edilen enerji dönüşüm şeklidir. Başlıca özellikleri ve kullanım alanları aşağıda belirtilmektedir [10].

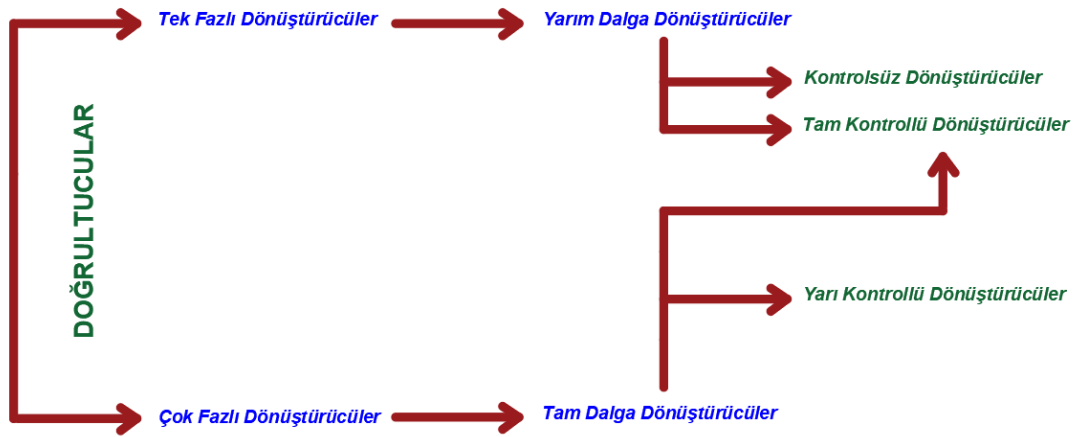
⇒ Temel Özellikleri

- Fazlar arasında doğal bir geçiş yapma süreci vardır.
- Diyot ve tristörler ile sağlanır.
- Şebeke kısmında değerleri oldukça yüksek harmonikler, yük kısmında ise değeri oldukça yüksek dalgalanmalar meydana gelir.
- Çıkış voltajı ortalama bir değerde kontrol altına alınır.
- Faz kontrol metodu sayesinde kontrolü sağlanır.
- Lineer olmayan bir kontrol yapısı bulunmaktadır.

⇒ Başlıca Uygulama Alanları

- Akülerin şarj edilmesi
- Galvanoteknik uygulaması ile kaplama
- Doğru akım motorunun kontrolü
- Doğru akım gerilim kaynakları
- Doğru akım düzenleyiciler
- Doğru akım kaynak makineleri
- Doğru akım motor alan besleme

Doğrultucuların genel olarak şematik sınıflandırılması şekil 2.32'dedir.



Doğrultucular kontrol bakımından karşılaştırılması tablo 2.1'de gösterilmiştir.

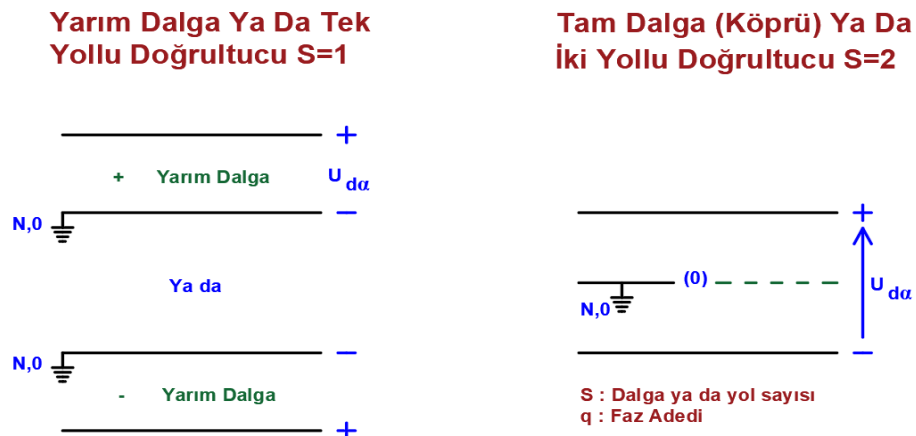
Tablo 2.1 AC-DC dönüştürücülerin kontrol bakımından karşılaştırılması

KONTROLSÜZ DOĞRULTUCULAR	TAM KONTROLLÜ DÖNÜŞTÜRÜCÜLER	YARI KONTROLLÜ DOĞRULTUCULAR
Diyotlar ile gerçekleştirilir.	Tristörler ile gerçekleştirilir.	Tristör ve diyotlar ile gerçekleştirilir.
Yalnızca AC-DC dönüşüm programı temelinde çalışır.	AC-DC dönüşümü ve evirici olarak iki yönlü çalışır.	Yalnızca doğrultucu modu bulunmaktadır.
Serbest bir geçiş diyodu çoğunlukla bulunmamaktadır.	Geçiş diyodu bulunmaz çünkü bulunması durumunda evirici hali çalışmaz.	Serbest bir geçiş diyodu çoğunlukla bulunur.
$\alpha = 0$ $U_{da} = U_d = \text{Sabit}$	$0 < \alpha < \pi$ $+U_d > U_{da} > -U_d$	$0 < \alpha < \pi$ $+U_d > U_{da} > 0$

Doğrultucular dalga adedi bakımından kıyaslanacak olursa eğer; elektrik tesisinin nötr ucu baz alınarak yarım dalga AC-DC dönüştürücüde çıkış voltajı elde edilir. Diğer bir deyişle çıkış ucundaki DC hatların herhangi biri şebekenin nötr uç kısmına entegredir [10].

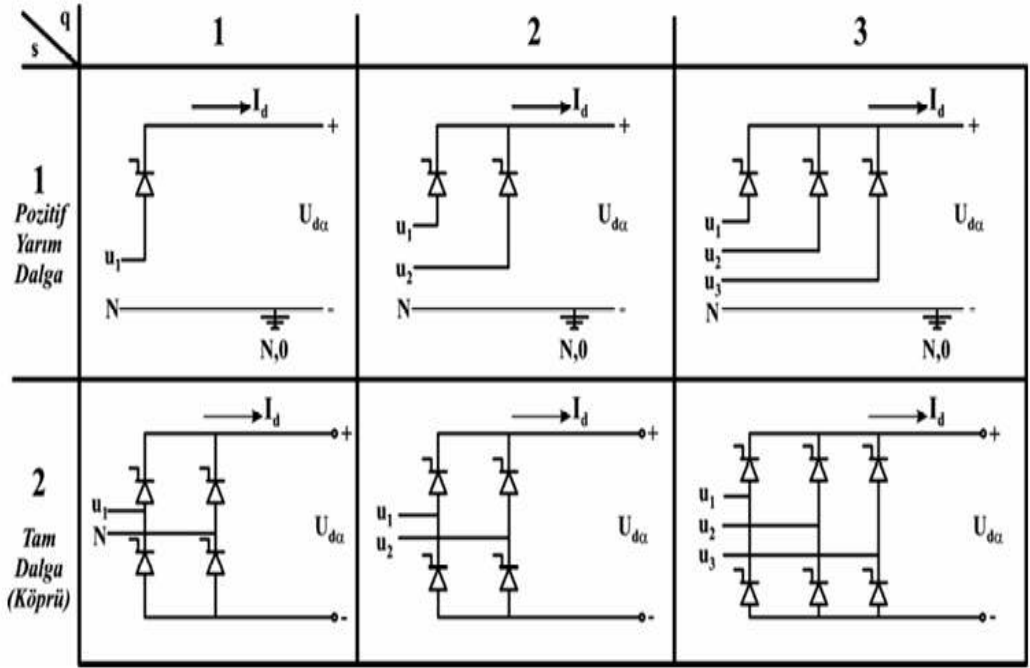
AC-DC tam dalga dönüştürücüde pozitif ve negatif yarım dalga doğrultucularının toplamı kadardır. Çıkış ucunda yer alan nötr uç kısmı tercih edilmez. Fakat, çıkış voltajı olasılıkla nötr uç kısmını ortalamaktadır [10].

Yukarıda bahsedilen bu durumlar şekil 2.33'te gösterilmiştir.



Şekil 2.33 Doğrultucuların dalga adedi bakımından kıyaslanması

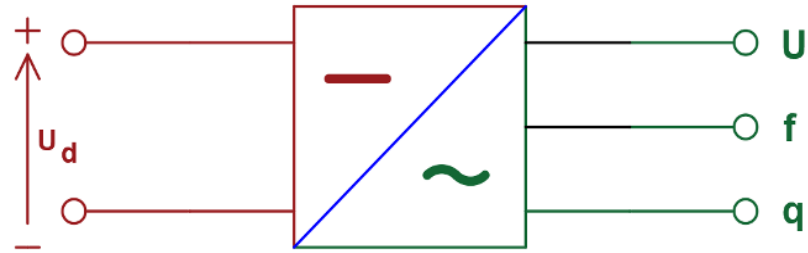
Doğrultuculara ait temel devre şemaları şekil 2.34'tedir [10].



Şekil 2.34 AC-DC dönüştürücülere ait temel devre şemaları [10]

2.5.2 DC-AC dönüştürücüler / inverterler, eviriciler

Doğru akımın alternatif akıma dönüştürülmesi olayıdır. Şekil 2.35'te bu dönüştürücülere ait devre yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.35 DC-AC dönüştürücülere ait devre yapısı

Şekil 3.6'daki devre yapısı incelenecek olursa;

- U_d : Doğru akım girişindeki gerilim
- U_ζ : Alternatif akım çıkışındaki etkin gerilim
($U_\zeta = f(m_d)$ ya da ($U_\zeta = f(m_a)$)
- m_d, m_a, m_f : Doluluk, genlik ve frekans oranı (Modülasyon)

Endüstride frekans bakımından yüksek seviyelerde olan devreler olarak tanımlanan ve son dönemlerde daha sıkça kullanımı tercih edilen dönüştürücülerdir [10].

Temel özellikleri ve başlıca kullanım alanları aşağıda belirtilmektedir [10].

⇒ **Başlıca Özellikler**

- Fazlar arasında zorlayıcı bir geçiş yapma süreci vardır.
- Güç bakımından üst fakat frekans seviyesi olarak düşük modlarda SCR tercih edilir.
- Güç ve frekans seviyesi olarak orta modlarda BJT tercih edilir.
- Güç bakımından alçak fakat frekans seviyesi olarak yüksek modlarda MOSFET tercih edilir.
- GTO'da güç bakımından üst fakat frekans seviyesi olarak düşük modlarda kullanılır.
- IGBT'de güç ve frekans seviyesi olarak ortanın üzerindeki modlarda kullanılır.
- MCT'de güç bakımından üst fakat frekans seviyesi olarak orta modlarda kullanılır.
- Lineer olan bir kontrol yapısı bulunmaktadır.
- Genellikle AC PWM (Pulse Width Modulation) metoduyla denetimi sağlanır.
- Çıkıştaki voltaj değerinin etkin değerlerde denetimi amaçlanır.
- Frekans bakımından oldukça yüksek devreler olarak tanımlanır.
- Giriş kısmında hafife alınamayacak düzeyde dalgalanmalar ve çıkış tarafında ise harmonikler oluşma ihtimali bulunmaktadır. Fakat, bu sorunlar basit bir şekilde düzeltilebilir.

⇒ **Temel Faaliyet Bölgeleri**

- Alternatif akım motorunun denetimi
- Sürekli güç sağlayıcıları
- Endüksiyon ısısı uygulamaları
- Doğru akımda yer alan yüksek voltajlı taşıma yöntemleri
- Alternatif akım bazlı gerilim sağlayıcıları

⇒ **İnverterlerin genel olarak sınıflandırılması**

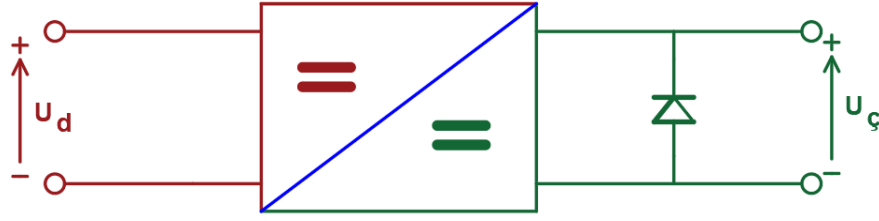
Tablo 2.2 İnverterlerin sınıflandırılması

<i>BESLEME KAYNAĞI</i>	<i>İLETİM SÜRESİ</i>	<i>FAZ SAYISI</i>	<i>KONTROL</i>
Gerilim Kaynaklı İnverterler	180 Derece Eviriciler	Tek Fazlı Eviriciler	Kare Dalga Eviriciler
Akım Kaynaklı İnverterler	120 Derece Eviriciler	Üç Fazlı Eviriciler (1. Yarım Köprü Eviriciler) (2. Tam Köprü Eviriciler) (3. Push-Pull Eviriciler)	Boşluklu (Kısmi) Kare Dalga Eviriciler PWM Eviriciler

İnvertörlerde, enerjinin doğru akım kaynağından alternatif akım kaynağına doğru ilerleyişini aktif elemanlar sağlarken; enerjinin alternatif akım kaynağından doğru akım kaynağına ilerleyişini ise pasif elemanlar sağlar. Bölge sayısı dört olan eviricinin çıkış gerilimi, frekans bakımından eşit seviyede bulunan diğer bir alternatif akım voltajına bağlanır ve bu iki voltaj arasındaki faz farkını kontrol eder. Alternatif akım çıkış voltajı ve akımı, pozitif ile negatif değerlerin ikisini de alabilir [17]. Gerilim kaynaklı PWM inverterler endüstride sıklıkla tercih edilmektedir [10].

2.5.3 DC-DC dönüştürücüler / DC kıyıcılar

DC-DC dönüştürücüler, doğru akımlar arasındaki dönüşüm olayıdır. Bir endüktansa ihtiyaç duymadan, bir DC gerilim frekansını yüksek değerlerde kıyarak çıkış ucundaki ortalama DC voltajını giriş ucundaki gerilim üzerine ayarlayabilen, basitçe alçaltıcı çeşit sınıfında olan ve sıklıkla doğru akım motor denetiminde tercih edilen dönüştürücülerdir. DC-DC dönüştürücülerin, tek, iki ve dört bölgeli olarak çalışan çeşitleri de bulunmaktadır. Şekil 2.36’da bu dönüştürücülere ait devre yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.36 DC kıyıcılara ait devre yapısı

Şekil 3.36'daki devre yapısı incelenecek olursa;

- U_d : Doğru akım girişindeki kaynak voltajı
- $U_ç$: Doğru akım çıkışındaki ortalama voltaj ($U_ç = f(\lambda)$)
- λ : Darbe / Periyot oranı, doluluk oranı
- D : Serbest geçiş diyodu

Temel özellikleri ve başlıca kullanım alanları aşağıda belirtilmektedir [10].

⇒ Başlıca Özellikler

- Fazlar arasında zorlayıcı bir geçiş yapma süreci vardır.
- Eviricilerde olduğu gibi bir eleman tercihi bulunmaktadır.
- Lineer bakımdan bir kontrol yapısı bulunmaktadır.
- DC PWM yöntemi aracılığı ile kontrol edilir. (En basit kontrol metodu olarak tanınır.)
- Çıkış voltajı ortalama bir değerde tutulur.
- Frekans bakımından oldukça yüksek devreler olarak tanımlanır.
- Giriş ve yük tarafları olmak üzere iki tarafta da hafife alınamayacak düzeyde dalgalanmalar meydana gelebilir. Fakat, basit bir şekilde bu dalgalanmaların önüne geçilebilir.
- Sıklıkla, güç bakımından üst fakat frekans seviyesi olarak düşük modlarda SCR, güç ve frekans seviyesi olarak orta modlarda BJT, güç bakımından alçak fakat frekans seviyesi olarak yüksek modlarda MOSFET tercih edilir. IGBT ise güç ve frekans seviyesi olarak ortanın üzerindeki modlarda tercih edilir.

⇒ Başlıca Uygulama Alanları

- Akümülatör şarjı

- Anahtarlama güç kaynakları
- Galvoteknik uygulaması ile kaplama
- Doğru akım motoru beslemesi
- Doğru akım kaynağı makineler
- Doğru akım regülatörleri
- Doğru akım şalterleri
- Doğru akım motorunun denetimi
- Doğru akım voltaj sağlayıcıları

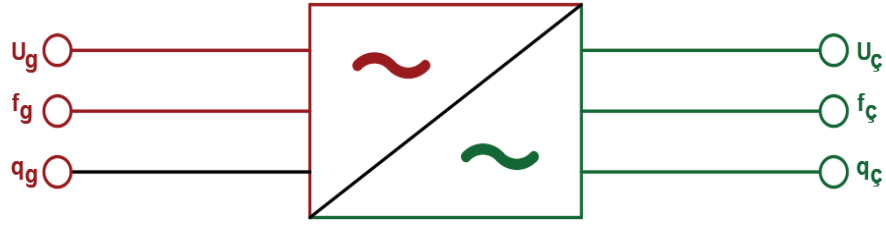
⇒ Doğru akım kıyıcıların sınıflandırılması

- Endüktanslı (Temel, izolasyonsuz, tek çıkışlı)
 - Düşürücü (Buck)
 - Yükseltici (Boost)
 - Düşürücü – Yükseltici (Buck – Boost)
- Transformatörlü (İzolasyonlu, tek veya çok çıkışlı)
 - Geri dönüşlü (Fly Back)
 - İleri yönlü (Towards)
 - Tam köprü (Full Bridge)
 - Yarım köprü (Half Bridge)
 - Push – Pull

Endüktanslı dönüştürücülerin tasarımı, transformatörlü olanlara göre oldukça daha kolaydır. Ancak, giriş ve çıkış uçları arasında izolasyon bulunmaması, bu tür dönüştürücülerin en büyük dezavantajlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Transformatörlü dönüştürücüler ise, giriş ve çıkış uçları arasında izolasyon sağlama özellikleri ile dikkat çekerler ve bu kaynaklardan birden fazla çıkış elde etmek mümkündür. Ayrıca, transformatörlü dönüştürücüler, temel olarak endüktanslı dönüştürücülerden herhangi birine ait özellikleri barındırabilirler [10].

2.5.4 AC-AC dönüştürücüler / AC kıyıcılar

Alternatif akımlar arasında enerji dönüştürülmesi olayıdır. Şekil 2.37’de bu dönüştürücülere ait devre yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.37 AC kıyıcılara ait devre yapısı

Şekil 2.37'deki devre yapısı incelenecek olursa;

- U_g : Alternatif akım girişindeki etkin gerilim
- f_g : Frekans
- q_g : Faz adedi
- $U_ç$: Alternatif akım çıkışındaki etkin gerilim ($U_ç = f(\alpha)$)
- $U_{çmax}$: Alternatif akım çıkışındaki maksimum gerilim
 $\alpha = 0 \Rightarrow U_ç = U_{çmaz} = U_g$
- α : Faz kesme veya faz kontrol açısı
- U_{fm} : Maksimum voltaj değeri (Faz arası)
- U_{hm} : Maksimum voltaj değeri (Hat arası)
- $U_1 = U_2 = U_3 = U_r$: Efektif faz gerilimi
- $U_{12} = U_{21} = U_{13} = U_h$: Efektif fazlar arası gerilim

AC kıyıcılarda, faz sayısı ile frekans sabit kalmak şartıyla, efektif çıkış geriliminin kontrolü yapılmaktadır. Gücün kontrol edilmesinden ziyade yalnızca anahtarlanma yapılması ya da kapatılıp-açılması hedeflendiğinde, statik alternatif akım şalter tanımlaması yapılmaktadır. Endüstride sıklıkla tercih edilen bir dönüştürücü çeşididir [10]. Tristörlü AC hat regülatörleri, endüstride AC gerilim dönüşüm devrelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerin en büyük dezavantajı, kaynak akımında daha yüksek harmoniklerin oluşması, kurulu güç üretilirken faz açısının dikkatlice kontrol edilmesi gerekliliği ve integral kontrol sürecinde daha düşük harmoniklerin meydana gelmesidir [18].

Alternatif akım kıyıcıların giriş ve çıkışında yer alan uçlardaki voltaj ile akım değerleri pozitif veya negatif yönde seyredebildiğinden; alternatif akım kıyıcılar, yön olarak çift taraflı bir enerji iletimi ve bölge sayısı bakımından dört alanda da çalışabilme yeteneğine sahiptirler [19].

Temel özellikleri ve başlıca kullanım alanları aşağıda belirtilmektedir.

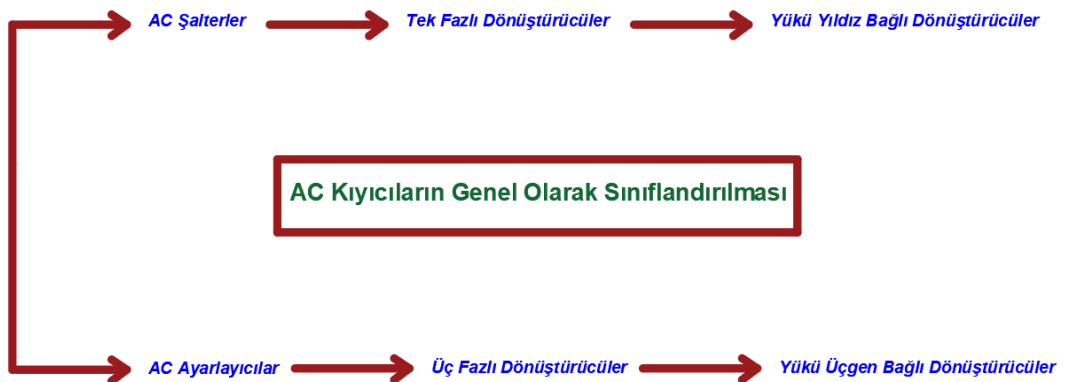
⇒ **Başlıca Özellikler**

- Fazlar arasında doğal bir geçiş yapma süreci vardır.
- Lineer bir kontrol yapısı bulunmamaktadır.
- Faz kontrol metodu sayesinde denetimi sağlanmaktadır.
- Çıkıştaki voltaj, sabit frekans yardımı ile etkin bir biçimde denetim altına alınmaktadır.
- Elektrik şebekesi ve yük tarafları olmak üzere iki kısımda da değeri oldukça yüksek olan harmonikler meydana gelmektedir.

⇒ **Temel Faaliyet Bölgeleri**

- Omik yüklerin tümünde gücün denetimi sağlanır. (Lamba, fırın, ısıtıcı vb.)
- Güç olarak küçük sayılabilen vantilatör karakteristikli AC motorlarda hız kontrolü sağlar. (pompa, kompresör ve fan vb.)
- Statik AC regülatörler voltajlarının kontrolü sağlar.
- Statik alternatif akım şalterlerde sistemi açıp kapatma özellikleri gösterir.
- Statik reaktif güç kompanzasyonu sağlar.

AC kıyıcıların genel sınıflandırılması şekil 2.38’de gösterilmiştir.



Şekil 2.38 AC kıyıcıların genel olarak sınıflandırılması

2.6 Güç Elemanlarının Karşılaştırılması

Tablo 2.3'te güç elemanların karşılaştırılması gösterilmiştir.

Tablo 2.3 Güç elemanlarının karşılaştırılması

<i>GÜÇ ELEMANLARININ İYİDEN KÖTÜYE DOĞRU SIRALANIŞI</i>				
Sürme Kolaylığı	MOSFET	IGBT	GTO	BJT
Sönme Kolaylığı	MOSFET	IGBT	BJT	GTO
İletim Gerilim Düşümü	BJT (1.0 V)	GTO (2.0 V)	IGBT (3.0 V)	MOSFET (5.0 V)
Anahtarlama Güç Kaybı	MOSFET	IGBT	GTO	BJT
Akım Dayanımı	GTO (3000 A)	IGBT (800 A)	BJT (600 A)	MOSFET (100 A)
Gerilim Dayanımı	GTO (3000 V)	IGBT (1500 V)	BJT (1200 V)	MOSFET (1000 V)
Devre Gücü	GTO (10 MW)	IGBT (500 kW)	BJT (100 kW)	MOSFET (10 kW)
Çalışma Frekansı	MOSFET (100 kHz)	IGBT (20 kHz)	BJT (10 kHz)	GTO (1 kHz)
Fiyat	BJT	GTO	IGBT	MOSFET
Not	1.Güç BJT'leri çoğunlukla Darlington biçiminde ve npn yapısındadır. 2.Bu noktada GTO tristör ailesini temsil etmektedir.			

3. FACTS CİHAZLARI

Güç sistemlerindeki elektrik enerjisinin iletim ve dağıtım süreçlerinde enerji kayıpları meydana gelmektedir. Bu kayıplar, genellikle iletkenlerdeki direnç, transformatörlerdeki manyetik kayıplar, hava hattı ve kablo aralarındaki boşluklardan kaynaklanan boşluk kayıpları ve dağıtım ekipmanlarındaki diğer kayıplar gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanır. Enerji kayıpları, ekonomik ve çevresel açıdan önemli sonuçlar doğurabilir. Ekonomik olarak, enerji kayıpları, enerjinin maliyetini artırarak enerji verimliliğini düşürür. Çevresel olarak ise, enerji kayıpları, fazladan enerji üretimine ve bu enerjinin çevreye yaydığı sera gazları ve diğer kirleticilerin artmasına neden olabilir. Bu nedenle, güç sistemlerindeki enerji kayıplarının azaltılması, enerji verimliliğini artırmak ve çevresel etkileri en aza indirmek önemli bir hedeftir. Bu amaçla güç sistemlerinde, FACTS ve STATCOM gibi cihazlar, güç sistemlerinin güvenilirliğini, verimliliğini ve kontrol edilebilirliğini artırmak için kullanılan önemli bileşenlerdir. FACTS cihazları, güç sistemlerindeki gerilim, akım ve güç akışını kontrol etmek için kullanılan statik cihazlardır. Bu cihazlar, genellikle tristör tabanlı anahtarlama teknolojileri kullanılarak gerçekleştirilir.

Elektrik enerji sistemlerinin yönetiminde önemli bir sorun reaktif güç kompanzasyonudur. Dağıtım sistemlerinde yükler genellikle endüktif karakterdedir ve yarı iletken güç sistemi elemanları üretildikçe güç sisteminden farklı fazda ve doğrusal olmayan akımlar geçmektedir. Güç sistemindeki bu olgu, şebekedeki elektrik güç kalitesi sorunlarını beraberinde getirmektedir [20]. Reaktif güç, enerji iletimindeki kayıpların artmasına neden olur. Aynı zamanda sistemin güç iletimini de düşürür. Bu durum, hattın sonuna doğru voltaj genliği değerlerinde belirgin değişikliklere neden olur. Bu nedenle, alternatif akım güdümündeki enerji tesislerinde aktarılabilen güç miktarının artırılması ve kayıpların en aza indirilmesi amacıyla kompanzasyon yapılması gereklidir. Mesafe olarak kısa olmayan enerji iletim hatlarında, hat üzerindeki endüktans ve kapasitenin etkileri, az yüklü koşullarda fazla voltajlara ve tam yüklü koşullarda gerilim düşümlerine yol açabilmektedir. Bu bağlamda, iletim hattı voltajının denetimli bir şekilde izlenmesi önem taşır. Bu, hat üzerindeki belirli noktalarda güç akış kontrolörleri ile sağlanır. Baranın voltaj değerleri ve reaktif gücü doğru şekilde denetlendiğinde, enerji iletim hattının kapasitesi daha verimli kullanılır ve gerilim düşümleri azaltılır.

Uzun süre boyunca kararlı durum güç akışını artırmak ve iletim hatlarındaki gerilim profilini ayarlamak için senkron generatörler ve sabit, mekanik anahtarlama reaktör kondansatör grupları kullanılmaktadır. Geleneksel reaktör ve kondansatör grupları ile kompanzasyonun en belirgin sorunu, güç sistemindeki değişikliklere olabildiğince hızlı bir yanıt verememesidir. Güç iletim hatlarının kapasitesini artırmak ve sistemin reaktif güç talebini hızlı bir şekilde karşılamak için statik kontrolörler ve güç elektroniği elemanları kullanılır. FACTS aygıtları, kompanzasyon için kullanılan aygıtlardır. Anahtarlama dönüştürücü devreleri yardımıyla, FACTS aygıtları reaktif güç üretebilir ve tüketebilir. Bu, iletim hatlarının kompanzasyonuna veya reaktör gruplarına ihtiyaç duymadan yapılabilir. Güç akışını kontrol etmek ve sistemin kararlılığını artırmak için de kullanılabilirler. Bu tür cihazların en büyük avantajları esneklikleri ve kontrol edilebilirlikleridir. Güç sistemlerinde gerilim kontrolü, gerilim kararlılığının artırılması, salınımların sönümlenmesi ve güç sistemlerinin kararlılığının iyileştirilmesi, FACTS uygulamalarının ana konularıdır. Gerilim değerinin ve faz açısının ayarlanmasıyla bu tür uygulamalar gerçekleştirilebilir. Enerji iletiminde FACTS cihazlarının tercih edilmesi ve geliştirilmesi, güç sistemlerinde sistem kararlılığının iyileştirilmesi bakımından çeşitli eylemlere yol açmıştır [21].

Güç elektroniği dönüştürücüleri, geleneksel (petrol, doğalgaz, kömür vb.) ve yenilenebilir (rüzgâr, güneş, dalga vb.) enerji kaynakları arasında bir köprü görevi görür. Bu dönüştürücüler, elektrik kaynağı ile tüketici arasında bir köprü görevi görür ve güvenilir, istikrarlı ve güvenilir güç iletimi ve dağıtım sistemleri sağlar [22].

Güç sistemlerinin karmaşıklığı, elektrik tüketiminin artmasıyla birlikte artmaktadır. Büyük ve karmaşık sistemlerde voltaj dengesizliğini ve çökmeleri önlemek için kullanılan geleneksel yöntemler bazen sistemin gereksinimlerini karşılayamayabilir. FACTS cihazları, karmaşık ve gelişen sistemlerdeki voltaj sorunlarını daha hızlı ve daha etkili bir şekilde çözmeye yeteneğine sahiptir. FACTS cihazlarının doğru bir şekilde kullanılması enerji iletim tesislerinin kararlılık alanlarının gelişmesine ve mevcut kaynakların en verimli şekilde kullanılmasına olanak tanır [23]. Güç sistemine gerçek güç, enerji depolama veya yüksek voltajlı doğru akım iletimi yoluyla enjekte edilebilir. FACTS cihazları aracılığıyla şebekedeki stratejik dallarda gerçek güç akışı kontrol edilebilir [24].

Geleneksel kompanzasyon sistemlerine kıyasla, FACTS cihazları güç elektroniği elemanları kullanılarak tasarlanmıştır ve kompanzasyon işlemini hızlı ve otomatik bir şekilde gerçekleştirir. Güç sistemlerinde genel olarak, FACTS cihazları güç akışı üzerinde kontrol sağlar, güç kayıplarını azaltır ve bara gerilimlerini belirli alt ve üst sınırlar arasında tutar. FACTS cihazları, bağlantı şekline göre üç gruba ayrılır: seri, paralel ve seri-paralel. Kontrol yapısına göre ise FACTS cihazları genellikle iki gruba ayrılır: gerilim kaynaklı-konvertör tabanlı ve tristör kontrollü [25].

Tristör ve konverter bazlı FACTS cihazları aşağıda listelenmiştir.

⇒ **Tristör Bazlı Cihazlar**

- **TCSC** : Tristör Kontrollü Seri Kapasitör
- **TCPAR** : Tristör Kontrollü Faz Açısı Düzenleyicisi
- **TCSVC** : Tristör Kontrollü Statik Var Kompansatör

⇒ **Konverter Bazlı Cihazlar**

- **IPFC** : Hat Arası Güç Akış Denetleyicisi
- **UPFC** : Birleşik Güç Akış Denetleyicisi
- **SSSC** : Statik Senkron Seri Kompansatör
- **STATCOM** : Statik Senkron Kompansatör

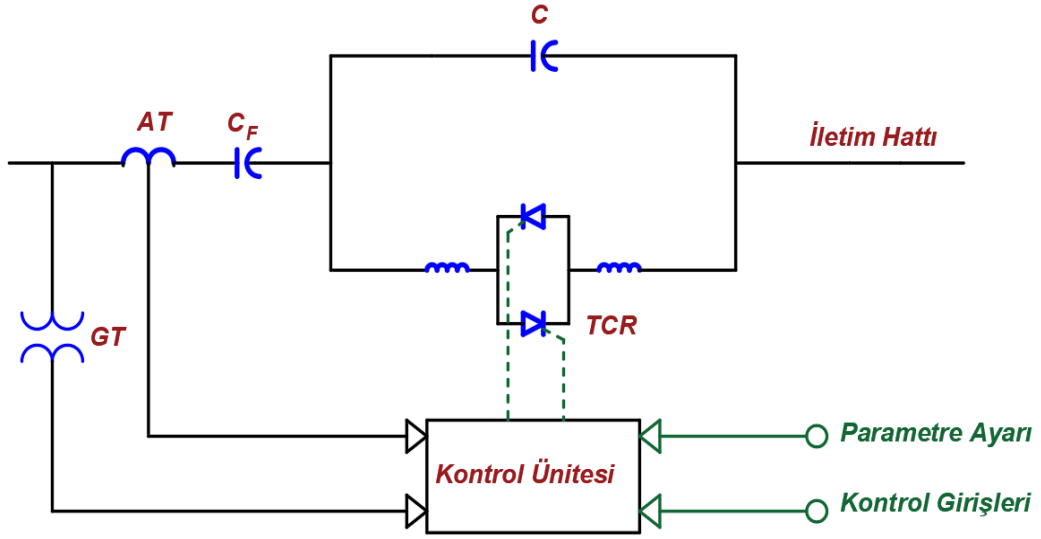
3.1 Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC)

Standart bir seri FACTS elemanıdır. TCSC'ye ait devre yapısı şekil 3.1'de gösterilmektedir. Sabit kapasitörün (CF) yanı sıra tristör denetimli reaktör (TCR) ile bu bileşenlere ek olarak paralel bir şekilde devreye entegre edilen bir adet kapasitör (C) yer almaktadır. TCR-C düzeni sayesinde, esas frekans kapasitif reaktansı geniş bir çerçevede ileri düzeyde komuta edilebilir [26].

Metal oksit varistör (MOV), C kapasitörüne paralel olacak bir şekilde devreye entegre edilir, bu da onu aşırı gerilim seviyelerinden korur. TCSC, 3 ana prensip üzerinde çalışır;

- **I** : Tristörlerin Tamamen İletildiği Mod (By-Pass)
- **II** : Tristörlerin Çalışmadığı Mod

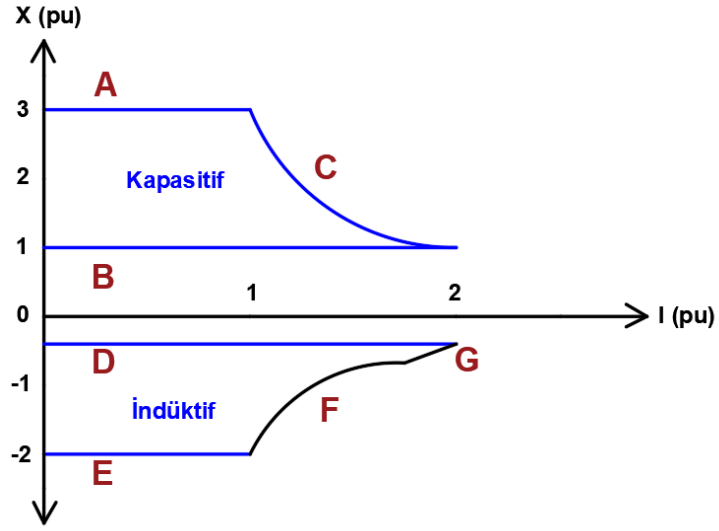
- **III : Vernier Mod (Tristörlerin Kısmen İletilmesi)**



Şekil 3.1 TCSC devre yapısı

TCSC, indüktif veya kapasitif modda çalışabilir. Bu çalışma modu, tristör tetikleme açılarının devamlı değişmesiyle TCSC'nin dinamik olarak randıman vermesini sağlar. SSR (Solid State Relay)'ye engel olmak için bu mod tercih edilir. TCSC, tristör tetikleme açılarını düzenleyerek reaktansını hızlı ve doğru bir biçimde değiştirebilir. TCSC, alternatif durumlarda sistemin güç akışını etkin bir şekilde kontrol altına alabilir. Bunun sonucunda sistemin hat sınırlarına daha yakın çalışmasını sağlar. Güç sisteminin süreklilik arz etmeyen kararlılığını ve dinamik performansını geliştirmek adına hızlı ve esnek bir düzenleme olanağına sahiptir. Ayrıca, güç salınımlarının ve SSR'nin etkisinin azaltılmasında da kullanılabilir. TCSC'nin X-I özellikleri şekil 3.2'de gösterilmektedir. Kararlılık ve sönümlenme denetimi için tipik olarak şekil 3.2'de gösterilen ABC alanı içerisinde çalışır [29;30;31].

Tristör kontrollü seri kapasitör, tristöre dayalıdır ancak tristör içermez. Bu denetleyicide, kontrol edilen değişken bir tristör bulunur. Reaktör seri bağlı bir kapasitöre bağlanır. Bu vesileyle tristör kontrollü reaktörün ateşleme açısı yüz seksen derecedir. Reaktör daha sonra iletken olmayan bir duruma geçer ve seri kapasitör normal empedans kazanır. Ayrıca atış açısı azaldıkça reaktif kapasitans da artar. Ek olarak ateşleme açısı doksan dereceye ulaştığında reaktör tam iletken durumuna ulaşır ve empedans endüktif hale gelir [27].



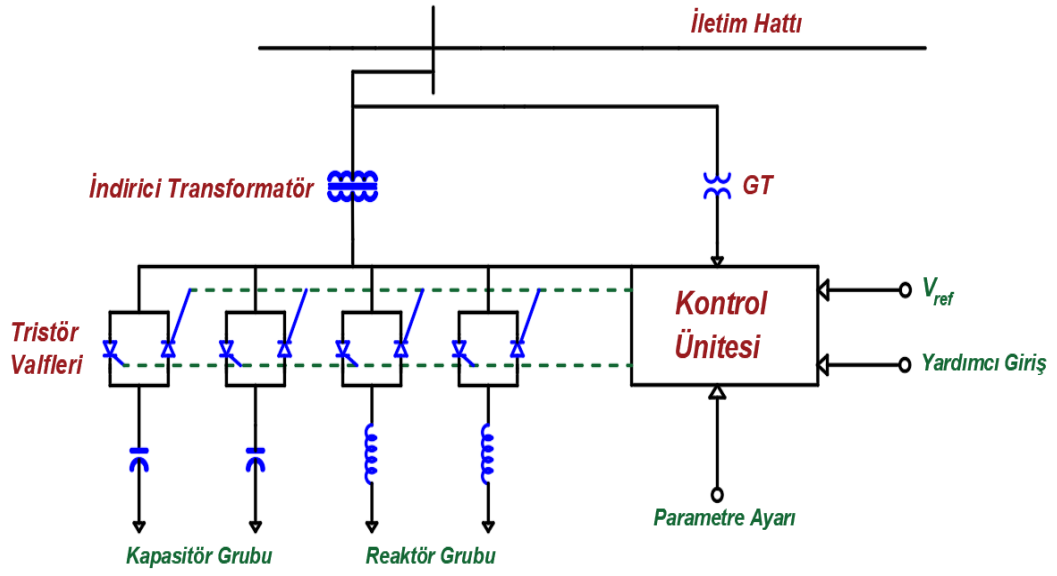
Şekil 3.2 TCSC'nin X-I karakteristiği

Şekil 3.2 üzerindeki harflere ait sınırlar aşağıda tanımlanmıştır.

- **A:** Ateşleme Açısı Sınırı
- **B:** Tristör Elemanlarının Çalışmadığı Mod
- **C:** En Yüksek Voltaj Sınırı
- **D:** Tristör Elemanlarının Tamamen İletim Durumu
- **E:** Ateşleme Açısı Sınırı
- **F:** Harmonik Isınma Sınırı
- **G:** Tristörün En Yüksek Akım Sınırı

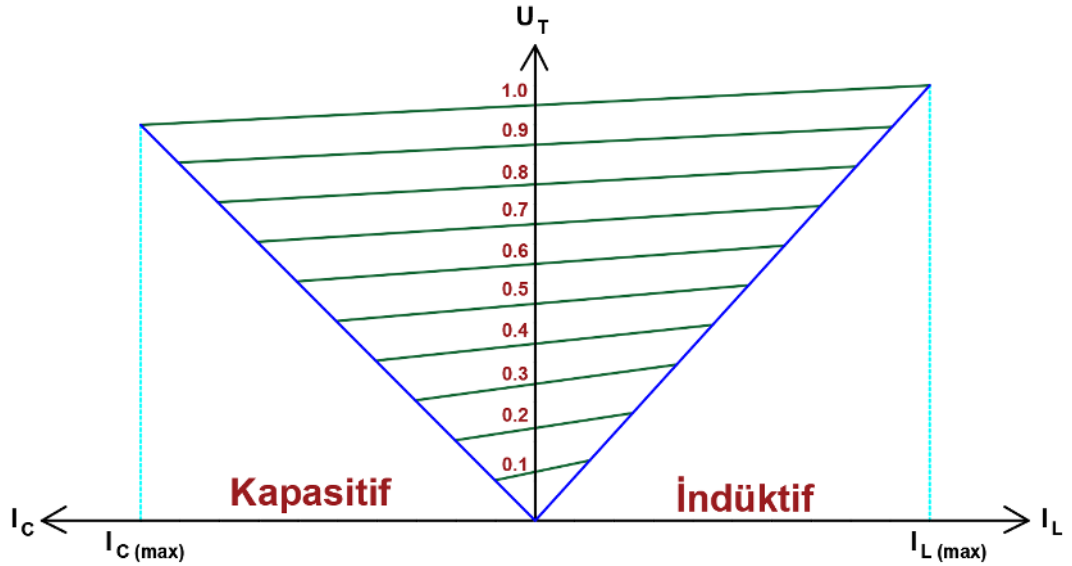
3.2 Tristör Kontrollü Faz Açısı Düzenleyici (TCPAR)

Hattın gerilim fazörüne dik fazlı ve sabit olmayan bir gerilim bileşeni eklenebilir veya çıkarılabilir. Bu, faz kaymasının temel nedenlerinden biridir. Aşağıdaki şekillerde de görüleceği üzere TCPAR, bu tür bir gerilimi meydana getirmek amacıyla kullanılabilir. Şekil 3.3 'de görüleceği üzere TCPAR, oran olarak 1:3:9 değerleri üzerine tasarlanan ve sekonder sargı adedi üç olan, özdeş olmayan bir uyarım transformatörü kullanır [28].



Şekil 3.5 TCSVC devre yapısı

TCSVC, genellikle iletim hattındaki belirli bir terminalin voltajını ayarlamak amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca, dinamik ve geçici bir kararlılık sağlar [28]. Şekil 3.6'da TCSVC'nin V-I karakteristiği gösterilmektedir.



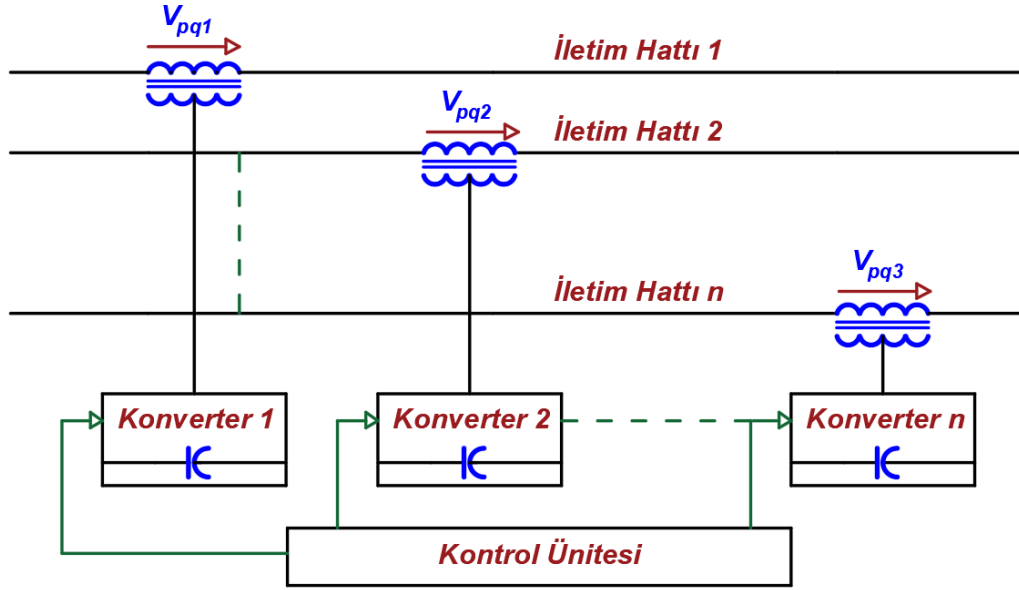
Şekil 3.6 TCSVC'nin V-I karakteristiği

Yukarıdaki şekilde de görüleceği üzere TCSVC'ye ait karakteristik özellikler, cihazın voltaj sağlama kapasitesinin sistem voltajı ile azaldığını göstermektedir. Bundan

dolayı reaktörlerin ve kapasitörlerin, düşen sistem voltajı sebebiyle çıkış ucunda daha az akım ürettiği ortaya çıkmaktadır [4].

3.4 Hat Arası Güç Akış Denetleyici (IPFC)

1998 senesinde sunulmuştur. Belirlenen bir terminalde birden fazla güç hattının kompanzasyon sorununu sonlandırmak için kurgulanmıştır. IPFC, Aşağıdaki şekilde görüleceği üzere; iki ya da daha birçok noktada SSSC kullanımı ile doğru akım istasyonlarının kenetlendiği bir devre yapısına sahiptir.



Şekil 3.7 IPFC konfigürasyonu

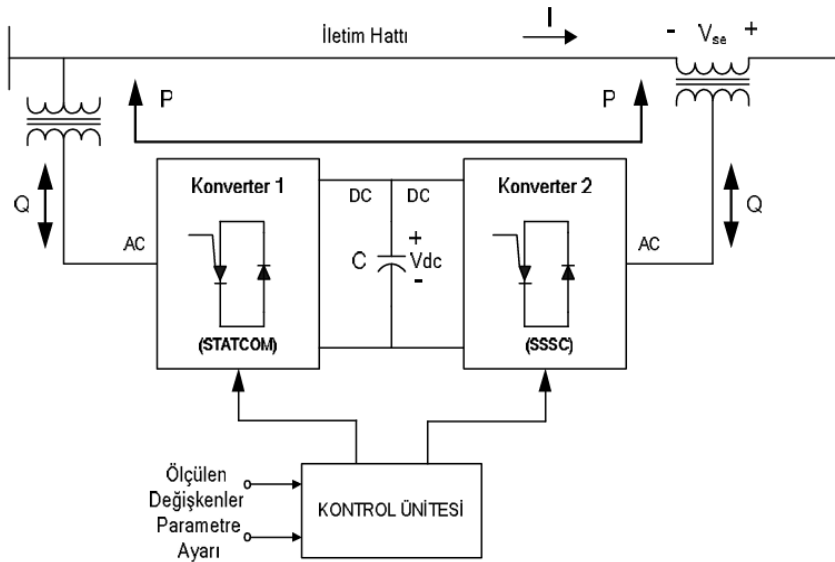
DC kapasitörlerin birbirine bağlanması, konverterler arasında çift yönlü aktif güç dolaşımını sağlar. Tüm iletim hattını bağımsız bir şekilde kontrol edilebilen seri kompanzasyonu sayesinde, kompanzasyona tabi hatlar içerisinde doğrudan aktif güç transferi gerçekleştirmektedir [29]. Yukarıda bahsi geçen kapasitenin izin verdiği veriler aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- Aktif ve reaktif güç akışını hatlar arasında mümkün kılar.
- Fazla yüklenmiş hatların yükünü aktif güç transferi aracılığıyla düşürür.
- Kompanzasyonun tüm aktifliğini artırarak dinamik bozucu etkiler meydana getirir.
- Reaktif güç talebi ile rezistif voltajlara gerekli kompanzasyonu sağlar.

IPFC'nin yukarıda belirtilen yapısında, her bir çevirici farklı enerji iletim hattını seri bir şekilde kompanse etmektedir. Bahsi geçen çeviriciler, reaktif gücün seri kompanzasyonu dışında kendisine bağlı enerji iletim hattından ortak doğru akıma bağlantıya aktif güç sağlamak amacıyla özel bir kontrol mekanizmasına sahiptir. Ayrıca, yapısı itibarıyla IPFC'ler, SSSC'lerin aktif güç talebini karşılamak ve reaktif gücü şönt bir şekilde kompanse edebilmek amacıyla bir STATCOM içerebilir. Söz konusu bu STATCOM, ortak bir DC-link'e bağlanabilir [34;36].

3.5 Birleşik Güç Akış Düzenleyici (UPFC)

Laszlo Gyugyi tarafından 1991 senesinde sunulmuştur. Birden fazla yönü bulunması, onu FACTS cihazları içerisinde etkin ve önemli bir yere getirmektedir. Alternatif akım güç iletim sistemlerini reel zaman içerisinde bir şekilde kontrol etmek ve dinamik olarak kombinasyonu sağlamak amacıyla önerilir. Aşağıdaki şekilde görüleceği üzere; UPFC, bir adet STATCOM ile bir adet SSSC'nin bütünleşmesi ile kurulmuş entegre bir devredir. Bu durumda STATCOM 1 numaralı çeviri olarak, SSSC ise 2 numaralı çevirici olarak adlandırılmıştır. Bu yapı, ideal bir AC-AC güç çeviricisidir çünkü iki çeviricinin alternatif akım terminalleri arasında aktif gücün çift yönlü akışına izin vermektedir. Her çevirici ayrıca kendi AC çıkış terminalinde reaktif güç üretebilmekte veya tüketebilmektedir [31].



Şekil 3.8 UPFC'nin şematik diyagramı [4]

UPFC, birbirinden tam anlamıyla ayrı olan, faz kaydırma, seri ve şönt kompanzasyon, gerilim kontrolü, aktif ve reaktif güç akış kontrolü ve iletim hattı üzerindeki faz kaydırma gibi çok sayıda görevi yerine getirir. UPFC'nin amacı, fazla yük taşıyan enerji iletim hatları, birbirlerine şönt bir şekilde kurgulanmış olan iletim hatları arasındaki yük transferi, döngü akış kontrolü ve güç sistemlerinin dinamik ve sürekli olmayan rejim koşullarındaki kararlılığını denetlemek gibi çeşitli problemleri çözmektir. UPFC, mekanik olarak denetim modlarından birine geçiş yapamaz; ancak güç elektroniği sayesinde elektronik kip değiştirme yeteneğine sahiptir. Bu özellik, sistemdeki değişken koşullara göre son derece esnek bir işlevsel ortam sunar [32]. Birleşik güç akışı denetleyicisi esas olarak açısı iletim hattına seri olan bir voltajı enjekte eder. Fazın terminaldeki voltaja göre değiştiği ve ayrıca büyüklüğün sıfırdan tanımlanmış bir maksimum değere kadar değiştiği gözlemlenir [33].

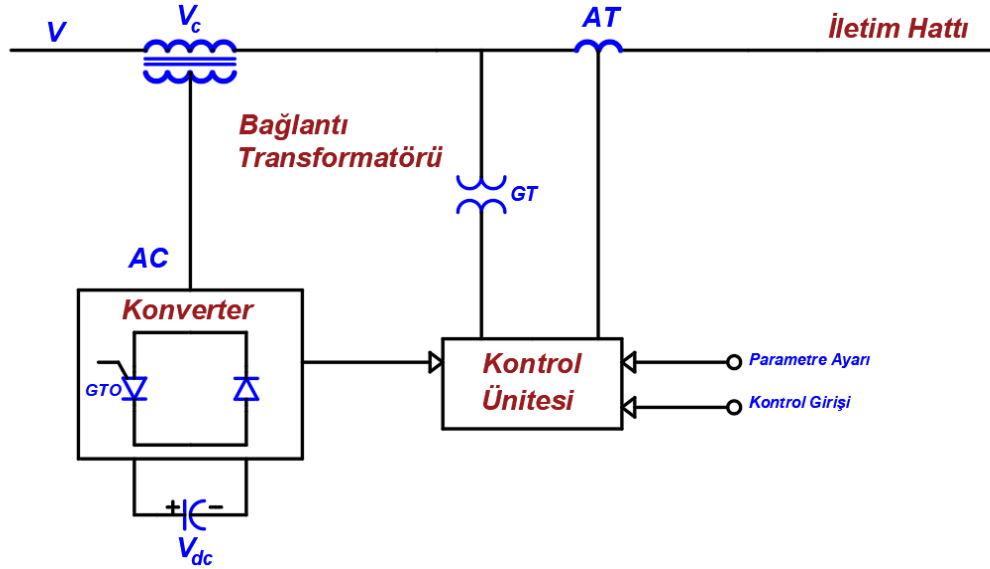
UPFC, geleneksel tristör kontrollü yaklaşımların önemli eksikliklerini giderme yeteneğine sahiptir. Enerji iletim hattının kompanse sorunları ile tüm güç akış denetimini düzenli bir şekilde yönetmek teknolojik açıdan pratiktir. Kademe değiştirici transformatörler veya anahtarlamalı kapasitörler yerine yalnızca senkron gerilim kaynakları kullanır [31]. Gerilim kaynağı tabanlı evrensel güç akışı yaklaşımı, geleneksel tristör kontrollü sistemlerle karşılaştırıldığında çalışma performansına ulaşamaz. Bu, evrensel bakımdan gerçekleştirilebilir tek bir kompensatör veya kontrol cihazının genel çekiciliğinin yanı sıra, aynı zaman da fonksiyonel esneklik de sağlar [30].

UPFC, hat empedansını, gerilimi ve faz açısını eşzamanlı olarak (çok fonksiyonlu) veya tercihe bağlı olarak tek bir paralel olmayan voltaj sağlayıcı enjeksiyonu yardımıyla değiştirip ayarlayabilir. Geleneksel yöntemler ise bu işlemler için farklı serbest ekipmanlar gerektirmektedir. Ancak, tristör denetimli bir faz açısı düzenleyici ve statik var kompensatör benzeri geleneksel FACTS cihazları bu işlevleri yerine getirebilmektedir [30].

3.6 Statik Senkron Seri Kompensatör (SSSC)

Şekil 3.9'da görüleceği üzere iletim hattına seri olarak bağlanan SSSC ile STATCOM'un devre özellikleri hemen hemen benzerlik göstermektedir [29]. Yarı iletken aygıtlar, SSSC'nin faz açısını ve büyüklüğünü hızlı bir şekilde değiştirebilen,

hat akımına dik olan, dengeli üç fazlı bir gerilim meydana getirir. Bu gerilim hat üzerine paralel olmayacak bir şekilde entegre edilebilir. Aktif ve reaktif güç denetimi amacıyla iki yönlü bir şekilde kullanılabilir. SSSC, STATCOM gibi yeterli büyüklükte bir DC depolama aygıtına bağlandığı vakit aktif güç kontrolünü gerçekleştirebilir. Reaktif gücü kontrol etmek amacıyla sadece büyük olmayan bir adet doğru akım kapasitörü yeterli olabilir. SSSC, enerji iletim hattında uygulanan voltajın etki kapasitesine göre seri kapasitör ya da reaktör bakımından sınıflandırma yapabilir. Kapasitif faaliyet koşulları, iletimde olan aktif güce katkıda bulunur. İndüktif faaliyet koşulları söz konusu olduğunda, iletimde olan aktif güç benzer miktarda düşmektedir. SSSC, benzer görev doğrultusunda çalışan TCSC'den genişçe bir denetim kapasitesi meydana getirmektedir [34].



Şekil 3.9 SSSC devre yapısı

SSSC, TCSC ile mukayese edildiğinde paralel olmayan bir voltaj enjeksiyonunu denetim altında tutar. TCSC cihazı bu durumu empedans yardımı ile yönetir. Enerji iletim hattında aktif gücün artırılması için SSSC'nin tercih edilmesi nispeten daha uygundur. Konuyu başka bir açıdan ele alacak olursak; TCSC değişken empedans tipinde seri kompensatörlerdir ve SSSC gerilim kaynağı tipidir. Ek olarak, SSSC cihazının olay örgülerine karşı vereceği cevap süresi daha kısadır. SSSC, kontrol sıklığı mukayese edildiğinde kapasitiften endüktife geçiş yapma yeteneğine sahiptir. Ancak, TCSC bu geçişi rezonans sorunu nedeniyle gerçekleştirememektedir [34;41].

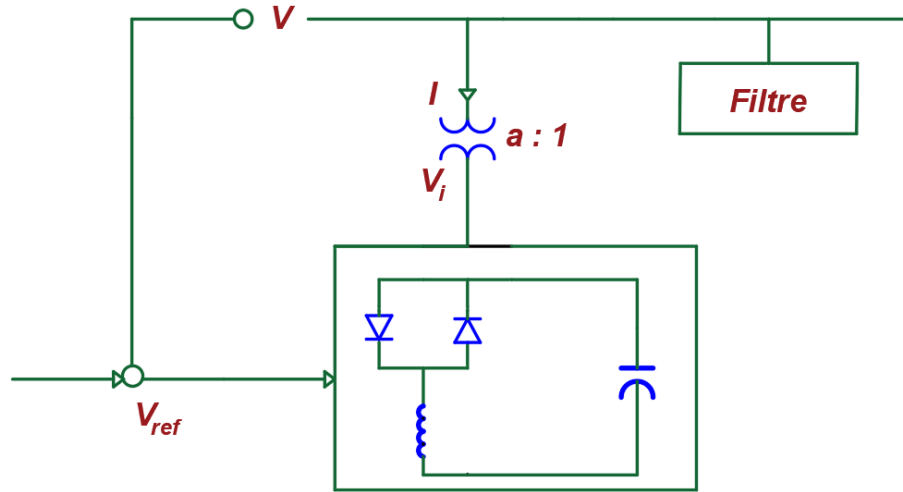
SSSC'ler, hat akımından bağımsız olarak kapasitif ve indüktif aralıkta kompanzasyon gerilimi üretebilir. TCSC'nin kompanzasyon gerilimi ise hat akımına orantılıdır. Seri kompanzasyon derecesinden bağımsız olarak, SSSC, hat reaktansına sağladığı kompanzasyon gibi hat rezistansı içinde aktif güç desteğiyle kompanse edebilir, böylece etkin X/R oranını yüksek tutar. Bununla birlikte, TCSC yalnızca reaktif kompanzasyon sağlayabilir [34;40].

3.7 Statik Var Kompansatör (SVC)

SVC, enerji iletim hatlarında mevcut bulunan baraların voltaj değerlerini denetim altında tutabilmek amacıyla reaktif ve endüktif akım transferi sağlayan durağan bir kontrol cihazıdır. Mekanik senkron jeneratörler, reaktif güç sağlarken dönen bir parçaya sahiptir. Ancak SVC'nin dönen bir parçası bulunmadığı için "statik" olarak adlandırılmaktadır [2].

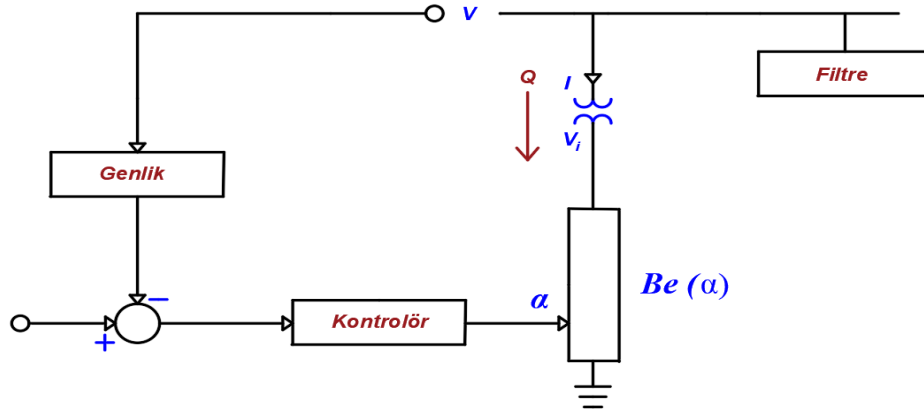
SVC, yöntem bakımından iki şekilde uygulanabilir. İlk yöntemde, TCR desteği ile buna şönt bir şekilde entegre edilmiş bir kapasite kullanılır. İkinci yöntemde ise, TSC desteğiyle, TCR ile buna seri bir şekilde entegre edilmiş bir kapasiteden oluşur. İlk yapıdaki SVC modeli daha yaygın bir şekilde tercih edilmektedir [2].

SVC'ye ait devre şekli Şekil 3.10'dadır.



Şekil 3.10 SVC devre tasarımı

SVC'ye ait kararlılık modeli ise Şekil 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 3.11 SVC kararlılık modeli

SVC cihazı denetlenebilen paralel yapıdaki bir reaktör ile kapasiteler içerir. Barın SVC cihazı içerisindeki enerji sistemindeki voltaj değerini denetim altında tutar. SVC'nin suseptansı, Şekil 3.11'de gösterildiği gibi tristörler elemanlarının açısı aralığı bakımından elverişli bir ortamda ateşlenmesi ile kontrol edilir. Bu açısı aralığı tipik olarak 90 derece ile 180 derece arasındadır. Son olarak, SVC açısı değışikliğı yoluyla sabit olmayan empedans yardımıyla denetim görevlerini yerine getirir [35].

4. STATİK SENKRON KOMPANSATÖR (STATCOM)

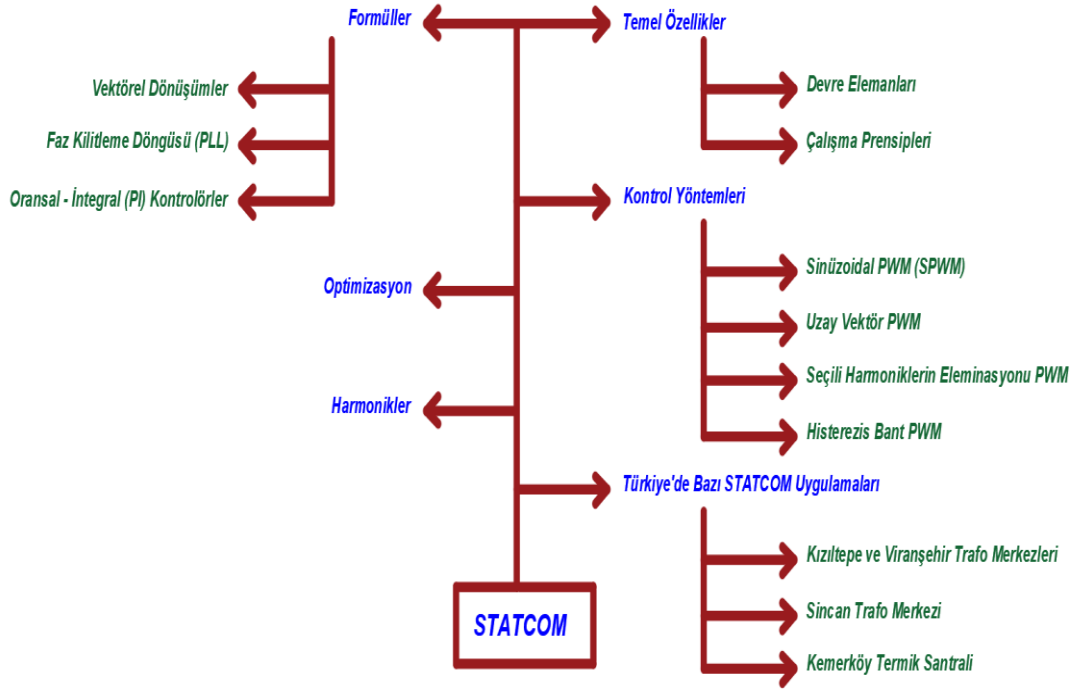
STATCOM, güç sistemlerindeki gerilim düzeyini ve güç faktörünü kontrol etmek için kullanılan ve güç sistemine şönt bir şekilde entegre olan bir tür FACTS aygıtıdır. STATCON ya da ASVC (Advanced Static Var Compensator) şeklinde de anılmaktadır [36]. Güç sistemine kontrollü reaktif güç sağlamak açısından SVC ile sisteme uygulanabilecek iki ayrı FACTS cihazından biridir [37]. Reaktif gücü iyileştirerek gerilim üzerindeki baskıyı azaltan ve sistemin güç kalitesini belirgin bir şekilde arttıran çok önemli bir teknolojidir [38].

FACTS cihazları ailesinden olan STATCOM, düşük güç sistemine bağlı olarak çalışan ya da gerilim ayarları problemleri olan güç şebekelerini korumak amacıyla kullanılan VSC (Voltage Source Converter) bazlı bir cihazdır. Gerilim ayarlamalarında sürekliliğin sağlanması, gerilim kararlılığının artırılması, içerisinde bulunduğu güç sisteminin gereksinimlerine göre cevap verilmesi ve gerektiği zamanlarda güç sistemine müdahalede bulunarak sistemin dengesini sağlamak amacıyla kurulan, güçlü ve uygun maliyetli yöntemlerden biridir [37].

STATCOM, SVC benzeri bir FACTS cihazı olmakla beraber SVC'den daha hızlı çalışır. Bunun nedeni, uygulamadaki cevap süresi (response time) kullanılan IGBT anahtarlama elemanları sayesinde SVC'den daha kısa olmasıdır. Ayrıca düşük alternatif akım değerlerinde SVC'ye nazaran daha iyi reaktif güç desteği sağlamaktadır. Güç sisteminde gerilim kararlılığını dengede tutabilmek amacıyla şebekeye sürekli olarak değişken reaktif güç sağlar [37].

STATCOM'u başka bir şekilde tanımlayacak olursak; STATCOM, paralel bağlı VAR kompensatörü şeklindedir. Bu statik kompensatör alternatif akım sisteminin geriliminden ayırdır ve kapasitif veya endüktif çıkış akımlarını kontrol edebilmektedir. Statik senkron kompensatör, statik var kompensatör olarak tanımlanabilir. Yani şönt bağlantılıdır. Bu tip esnek AC iletim kontrol cihazı endüktif veya kapasitif olan ve bağımsız olarak kullanılabilen bir çıkış akımına sahiptir [39].

Bu bölümde incelenecek olan STATCOM konu başlıkları şekil 4.1'de gösterilmiştir.

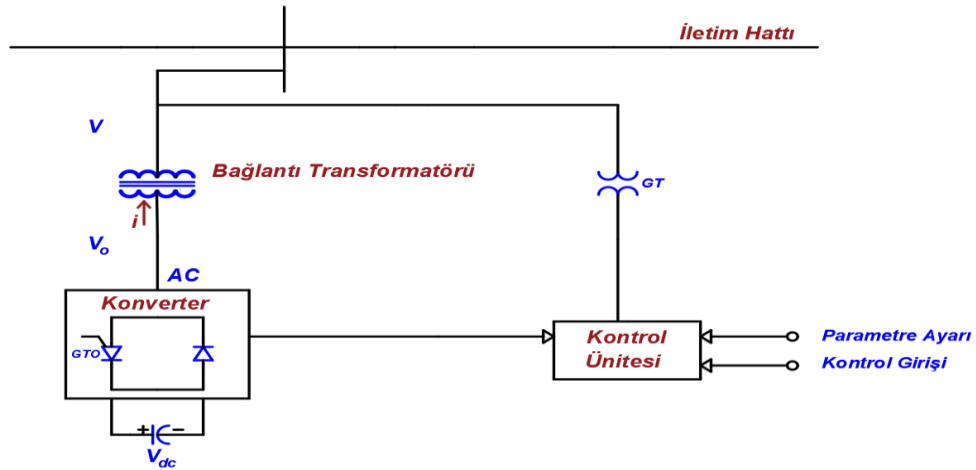


Şekil 4.1 STATCOM konu başlıkları

4.1 STATCOM'un Temel Özellikleri

STATCOM, gerilim kaynaklı inverterler üzerine konumlandırılmıştır. Çıkış parametreleri baz alındığında şebeke frekansında, denetlenebilir genlik ve faz açısında, üç faz dengeli gerilimler elde edilebilir [40]. STATCOM'u yapı olarak basit bir şekilde ele alacak olursak; üç adet şönt (kuplaj) trafo, bir adet kapasitör ve bir adet de voltaj kaynağı dönüştürücüsü (VSC) içerir [41].

Şekil 4.2'de STATCOM'a ait devre şeması gösterilmektedir.



Şekil 4.2 STATCOM devre şeması

4.1.1 STATCOM devre elemanları

STATCOM'a ait devre elemanları aşağıda sıralanmıştır.

a. VSC: Gerilim Kaynağı Dönüştürücüsü

Amaçlanan frekansta, genlikte, faz açısında sinüzoidal gerilim üreten elektronik bir alettir. DC gerilimin AC gerilime dönüşmesine yardımcı olmaktadır [37].

b. Kuplaj Transformatörü

Güç sisteminin gerilimini azaltmak niyetiyle kullanılan bir transformatördür. Harmonik akım bileşenlerinin zararlarını indirgemek maksadıyla kuplaj reaktörü ile çalışır [37].

c. Kontrol Ünitesi

Güç sisteminden aldığı veriler ile STATCOM'a önemli sinyaller gönderir. PCC (Point Of Common) noktasındaki RMS (Root Of Square) gerilim değerini referans aldığı gerilim değeri ile karşılaştırarak sistemin dengede tutulmasında önemli bir rol oynamaktadır [37].

d. DC Enerji Kaynağı

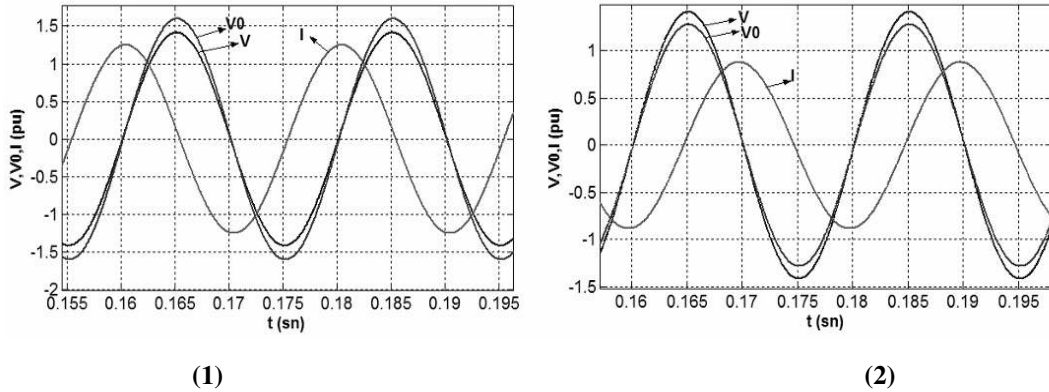
Doğru akım gerilimi, doğru akım tarafına bağlanmış olan Kondansatörlerle veya batarya içeren enerji depolama sistemiyle (BESS) sağlanır. Doğru akım enerji kaynağı Vdc kapasitör ile paralel bağlıdır. Bu kapasitör VSC ya da DC enerji sistemiyle şarj edilir [37].

4.1.2 STATCOM çalışma prensipleri

STATCOM'ların çoğu, yakıt hücreleri, volan depolama, süper kapasitörler, piller ve güç modülasyonu için önemli kapasiteye sahip diğer voltaj kaynaklı dönüştürücüler gibi uygun enerji depolama sistemlerine sahiptir [42]. Kapasitörler ve indüktörler veya reaktörler dahil olmak üzere diğer pasif reaktif güç aygıtlarına bir alternatif olarak hizmet eder. Değişkenler milisaniyeler cinsinden çıkışlara sahiptir ve hem kapasitif hem de endüktif değişkenleri besleyip tüketebilirler. Hızları ve yetenekleri, arıza koşulları veya beklenmedik olaylar gibi dinamik durumlar için daha uygundur. Güç faktörü düzeltilmesi ve gerilim desteği için kullanılabilir [43].

Dönüştürücü çıkışındaki voltaj değeri ile alternatif akım sistemindeki voltaj üzerinde meydana gelebilecek olan faz farkının düzenlenerek; dönüştürücü ile alternatif akım sistemi arasındaki efektif enerji transferi düzenlenebilmektedir. Şayet dönüştürücü voltajı alternatif akım voltajına göre ileride tutulursa dönüştürücü doğru akım enerji kaynağından alternatif akım sistemine doğru etkin bir güç akışı sergiler. Bir başka deyişle, dönüştürücü çıkış voltajı alternatif akım sistemi voltajından geri fazda tutulursa dönüştürücü alternatif akım sisteminden etkin bir güç tüketecektir [7].

STATCOM'un çıkış tarafındaki voltaj değerinin fazlalığı alternatif akım şebeke gerilimini ($V_0 > V$) aştığında, STATCOM' dan transformatörün reaktansı yoluyla AC şebekesinde bir I akımı meydana gelir ve söz konusu cihaz güç sisteminde reaktif güç üretimine başlar. STATCOM yalnızca aktif olmayan gücü değiştirdiğinden, dönüştürücünün çıkış voltajı AC sistem voltajıyla aynı fazdadır ve devredeki kayıplar göz ardı edilir. Bundan ötürü dönüştürücünün çıkış tarafında akan akımın derecesi hat voltajından 90° öndedir. Böylece cihaz kapasite modunda çalışır. Bu durum Şekil 4.3 (a)'da gösterilmektedir. STATCOM'un çıkış voltajı, AC sistem voltajından düşükse ($V_0 < V$), transformatörün reaktansı üzerinden alternatif akım sisteminden STATCOM cihazına doğru bir akım meydana gelir ve sistem şebekenin reaktif gücünü içerisine çeker. Dönüştürücü akım derecesi hat voltajından 90 derece geridedir. (Enerji kaybı göz ardı edilir) Böylece cihaz endüksiyon modunda çalışır. Bu durum Şekil 4.3 (b)'de gösterilmektedir. Konvertör çıkışında yer alan voltaj değeri ile güç iletim hattının voltajı eşitlendiğinde ($V = V_0$), alternatif akım sistemi ile cihaz arasında reaktif güç transferi gerçekleşmez [51;52].

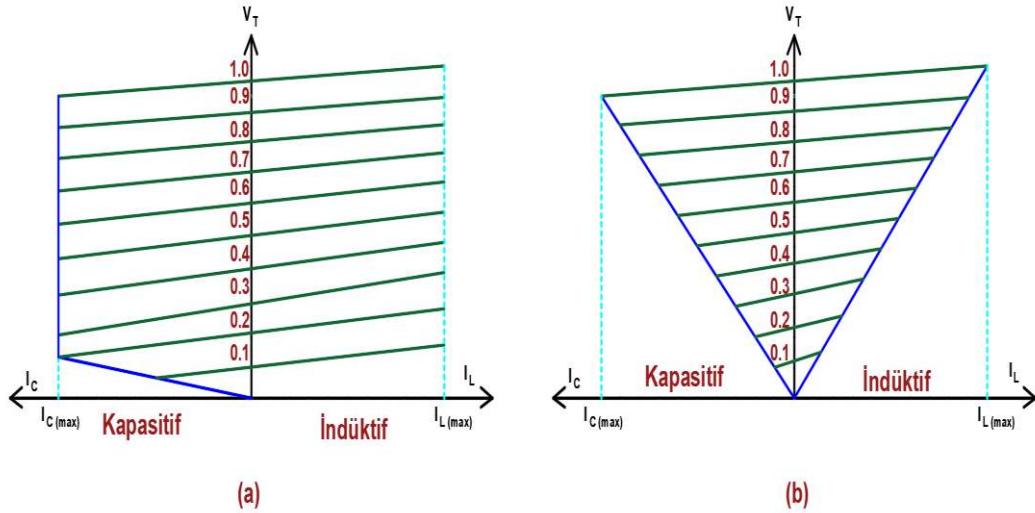


Şekil 4.3 Reaktif güç transferi [36]

1. Kapasitif durumda reaktif gücün sağlanması
2. İndüktif durumda reaktif gücün harcanması

STATCOM, alternatif akım sistemi voltajından ayrı bir şekilde endüktif ve kapasitif akımları belirli bir aralık içerisinde üretmektedir. STATCOM, sistemin gerilimi 0.15 pu (per unit) değerine düşse bile sisteme güç akışını sağlamaya devam edebilir [7].

STATCOM, aynı işlevde bulunan TCSVC'ye nazaran çok daha iyi özelliklere sahiptir. Tepki hızı TCSVC'den çok daha öndedir. Reaktif güç sağlamak amacıyla kapasitör ya da reaktör grupları kullanmadığından rezonans noktası oluşturma yeteneğine sahip değildir. Reaktör ya da kapasitör grupları kullanmadığından ve ayrıca kapasite olarak yüksek seviyelerde bulunan yarı iletken güç cihazlarının varlığı nedeniyle nispeten daha az bir kurulum alanına ihtiyaç duyar. Şayet DC kapasitör yardımıyla uygun bir enerji depolama cihazı ile bağlanır ise STATCOM sayesinde aktif gücün kontrol altına alınması da mümkün olabilmektedir. Şekil 4.4'te STATCOM ve TCSVS cihazlarına ait gerilim-akım karakteristiği gösterilmiştir. Alçak gerilim şebekelerinde STATCOM cihazının sisteme sağladığı akım değerleri TCSVC cihazına oranla üstün seviyelerdedir [36].



Şekil 4.4 STATCOM ve TCSVC'ye ait akım gerilim karakteristikleri

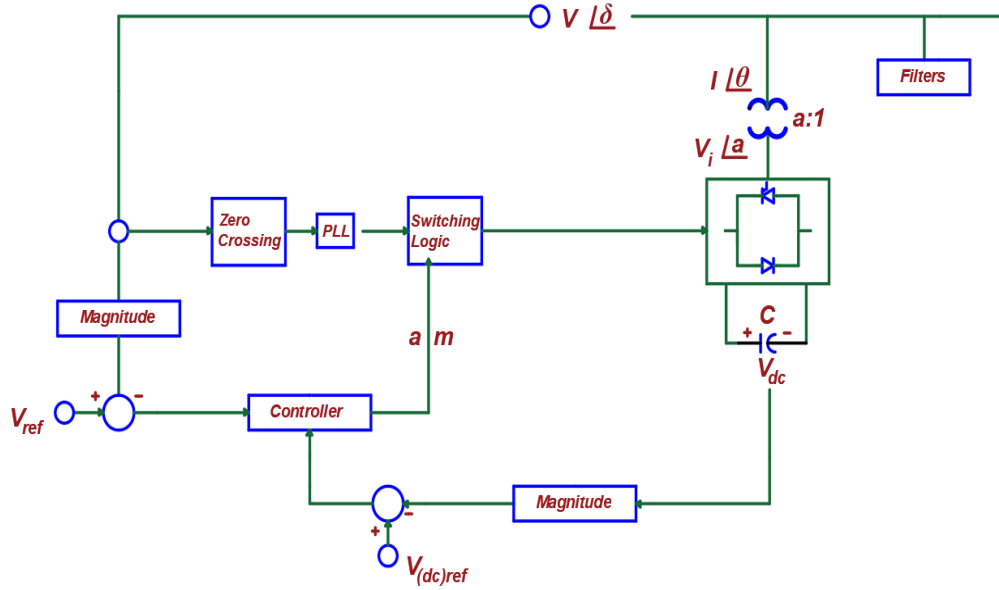
- STATCOM akım gerilim karakteristiği
- TCSVC akım gerilim karakteristiği

STATCOM, herhangi bir sistem voltajında endüktif ya da kapasitif çıkış akımlarını tam anlamıyla sağlayabilir. STATCOM tarafından şebekeye enjekte edilen reaktif güç kompanzasyon seviyesi TCSVC'ye nazaran daha fazladır. Bunun sebebi TCSVC'de reaktif güç, gerilimin karesi ile azalırken (düşük gerilim değerlerinde) STATCOM'da ise gerilim ile doğru orantılı bir şekilde azalmaktadır. Bu da STATCOM'un reaktif güç denetiminin TCSVC'den çok daha iyi seviyelerde olduğunun göstergesidir [36].

4.2 Statcom Kontrol Yöntemleri

Statcom kapasitör ve referans voltajı, hesaplanan voltajı kontrol ünitesine gönderir. Faz-faz açısı ve modülasyon indeksi katsayıları, dönüştürücünün yarı iletkenini tetiklemek için sıfır geçiş ve faz kilitli döngüyü ayarlar [41].

STATCOM kontrolör modeli şekil 4.5'tedir.



Şekil 4.5 STATCOM kontrol modeli

4.2.1 Sinüzoidal PWM (SPWM)

En yaygın kontrol yöntemlerinden biridir. Bu, gerekli anahtarlama çıkışlarına göre düzenlenen sinüzoidal dalga ile üçgen dalga arasında yapılan bir karşılaştırmaya dayanır. Modülasyon indeksi, modülasyon dalga genliğinin taşıyıcı genliğe oranını ifade eder. Lineer çalışma modunda, STATCOM'un çıkış gerilimi elde edilir. ($0 < m_i \leq 1$) Faz gerilim sınırlarının aşıldığı $m_i \geq 1$ aşırı modülasyon modunda bulunur [40].

4.2.2 Uzak vektör PWM

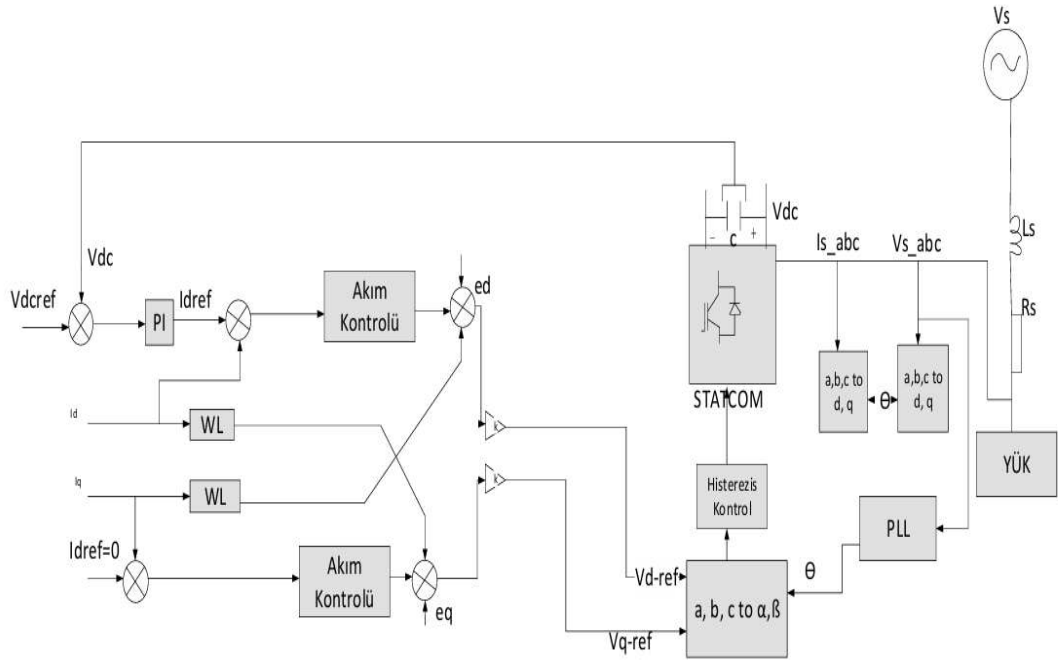
Bu metot, değer olarak 0,866'lık maksimum voltaj aktarım oranı sağlar. Başka yöntemler ile kıyaslandığında %15 oranında daha fazla bir voltaj meydana getirir. Şekil 4.6'da uzak vektör diyagramı gösterilmiştir. Anahtarlama sinyallerinin meydana getirilmesinde de önem arz eder [44].

4.2.3 Seçili harmoniklerin eliminasyonu PWM

Temel frekans teorisine uygun olarak kullanılır. Temel amaç, önceden belirlenmiş harmonikleri ortadan kaldırmaktır. Newton-Raphson iterasyonu, anahtarlama açılarını elde etmek için kullanılır. Anahtarlama açıları hızlı bir şekilde elde edildiğinde, şebekeye bağlı sistem için çevrimiçi kapalı döngü kontrolü, birim güç faktörü elde etme, sistem kararlılığını artırmak ve harmonik bozulmayı azaltmak mümkündür [40].

4.2.4 Histeresiz bant PWM

En basit kapalı döngü kontrol sistemlerinden biridir. Eksen olarak d-q vektörleri, SVM modülatöründe anahtarlama sinyallerini oluşturur ve bu da Histeresiz kontrol edici α - β 'da ölü bandın güçlenmesine olanak tanır. Şekil 4.8'de Histeresiz Bant Modülasyon tabanlı bir STATCOM modeli gösterilmiştir [44]. Çıkış akımının üst ve alt bant arasında hareket etmesine izin vermek ve istenilen histerezis bandında bu akımı tutabilmek için VSC uygun şekilde anahtarlanır. Bu duruma ulaşmak için yük akımları ölçülür ve referans değerlerle karşılaştırılır [40].



Şekil 4.8 Histeresiz Bant Modülasyon Tabanlı STATCOM Modeli [40]

Şekil 4.8'de görüleceği üzere; d ve q eksenli vektörler, SVM modülatöründe olduğu gibi anahtarlama sinyallerini üretir ve histerezis kontrolü α - β doğrultusunda ölü bandı zorlamaktadır [40].

4.3 STATCOM Formülleri

STATCOM'un bütünleştirildiği bir güç sistemine reaktif güç verilebilir veya sistemden reaktif güç çekilebilir. Güç sisteminin gerilimi düşükse STATCOM devreye reaktif güç verir, eğer gerilim yüksekse sistemden reaktif güç çeker [37].

STATCOM'a ait aktif ve reaktif güç formülleri aşağıdaki gibidir.

$$\bullet \quad P = \frac{V_o V_{pcc} \sin \alpha}{X} \quad (4.1)$$

$$\bullet \quad Q = \frac{V_o (V_o - V_{pcc} \cos \alpha)}{X} \quad (4.2)$$

Yukarıdaki formüllerde V_o ile gösterilen değer STATCOM'un çıkış voltajı olup, V_{pcc} ise PCC noktasındaki voltaj olup α açısı ise V_o ve V_{pcc} arasındaki açısal farktır. X ise hat reaktansını ifade eder [37].

$\Rightarrow$ V_o , V_{pcc} 'den büyükse reaktif güç akışı V_o 'dan V_{pcc} 'ye doğrudur ve STATCOM reaktif güç tüketiyor demektir.

$\Rightarrow$ V_o , V_{pcc} 'den küçükse reaktif güç akışı V_{pcc} 'den V_o 'a doğrudur ve STATCOM reaktif güç üretiyor demektir.

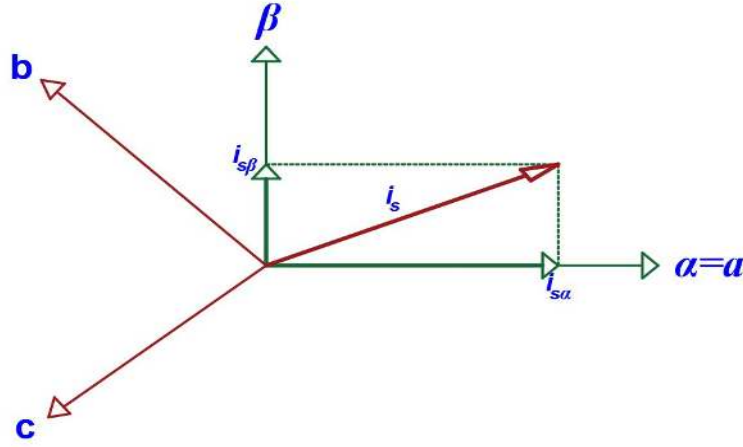
V_o veya faz açısı α kontrol edilerek, STATCOM'un gerçek güç ve reaktif güç çıkışları kontrol edilebilir [37].

4.3.1 Vektörel dönüşümler

Ayrıca; STATCOM'un kontrol mantığının bilinmesi ve tasarımının yapılabilmesi için STATCOM'un matematiksel modelinin ve kullanılan matematiksel ifadelerin bilinmesi gerekir. Uzay vektör diyagramları, bu noktada bilinmesi gereken en önemli konudur. Uzay vektör kuramında yer alan α , β , d ve q dönüşümleri baz alınmalıdır.

a. Clarke dönüşümü

Üç fazlı bir sistemin elektriksel verilerini iki faza çevirir. Fazör diyagramları, Şekil 4.9'da gösterilen vektörlerin üç fazdan iki faza dönüştürülmesini göstermektedir [45].



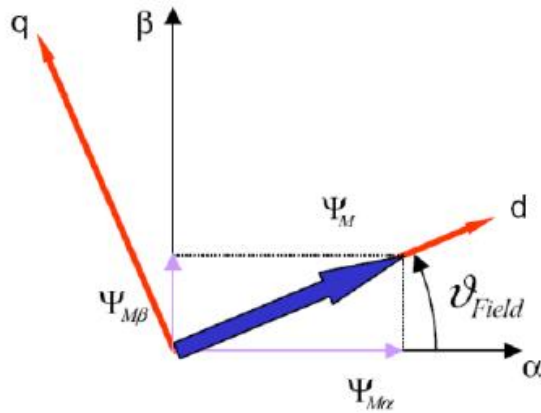
Şekil 4.9 Clarke dönüşümü fazör diyagramı

Şekil 4.9 analiz edilecek olursa; 3 faz vektör bilgisinin (a, b ve c) 2 faza dönüştürülmüş haline ait matematiksel ifadeler aşağıda gösterilmiştir [40].

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

b. Park dönüşümü ($\alpha, \beta \rightarrow d, q$)

Park dönüşümü vektör kontrol sistemi için çok önemlidir. Gerçek zamanda iki fazlı dikey koordinatlarda olan α ve β 'yi d, q dönen referans büyüklüğüne çevirir. Şekil 4.10'daki şekilde bu dönüşüme ait fazör diyagramı gösterilmiştir. Bu diyagramda bulundan d-ekseninin rotor akışıyla değiştirildiği düşünülürse, akım vektörü için iki referans çerçeve arasındaki ilişki ortaya çıkmış olur [45].



Şekil 4.10 Park dönüşümü fazör diyagramı [40]

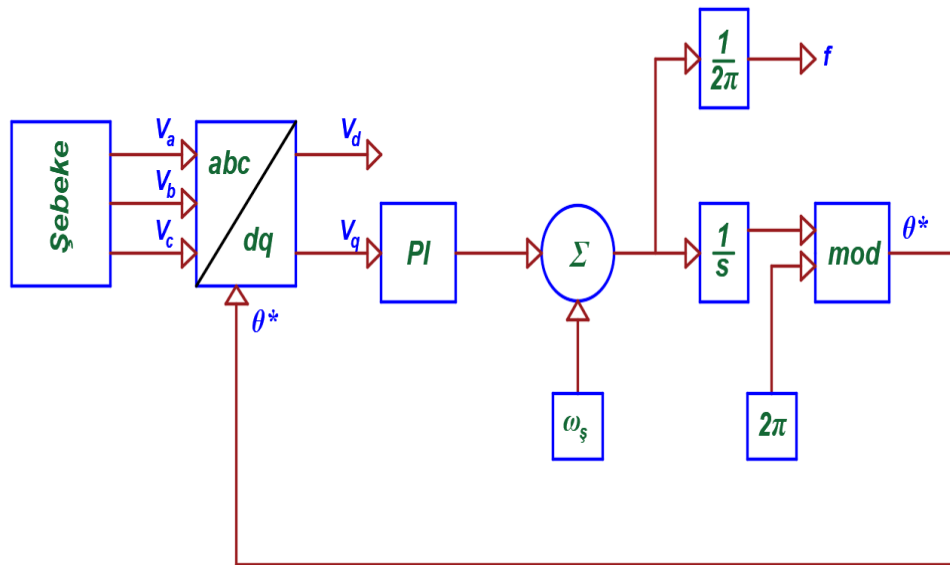
Şekil 4.10 incelendiğinde sistem dönüşümünü sağlayan matematiksel ifadeler aşağıda gösterilmiştir [40].

$$\circ \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

- Matrislerin transpozeleri alınacak olursa ters Park ve ters Clarke dönüşümleri de elde edilir [40].

4.3.2 Faz kilitleme döngüsü (PLL)

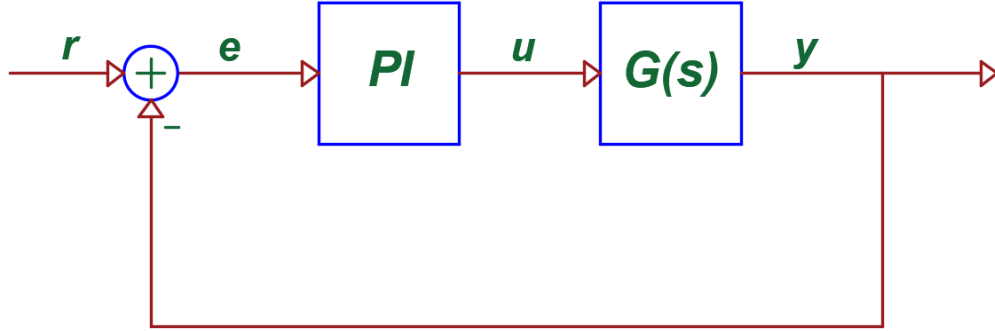
Güç sistemine iletilen akım miktarının sistem gerilimiyle entegre olabilmesi ve inverterlerin sistem ile senkron çalışabilmesi için, öncelikle şebeke geriliminin faz açısının belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için faz kilitleme döngüsü yönteminde, şebeke gerilimlerinin filtrelenmesi ve sıfır geçiş belirleme teknikleri kullanılır. Faz kilitleme döngüsü, rüzgârın hızına bağlı olarak faz açısını doğru ve hızlı bir şekilde belirlemek için kullanılır. Bu döngü çok önemlidir çünkü faz açısı doğru belirlenmediğinde sistem olumsuz etkilenecektir. PLL (Phase Locked Loop), bir giriş veya referans sinyalinin çıkış sinyali ile faz ve frekans eşitliğini sağlar. Kilitleme, giriş ve çıkış sinyallerinin faz hatasını sıfıra indirmektir. Bu nedenle, STATCOM kontrol devresinde 20 milisaniyelik bir geçici durumdan sonra θ faz açısı şebeke fazına kilitlenir [46]. PLL yapısı Şekil 4.11 üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 4.11 Faz kilitleme döngüsü - Devre yapısı

4.3.3 Oransal – Integral (PI) kontrolörler

Geri beslemeli kontrol sistemlerinde, PI (Proportional Integral) kontrolörler en yaygın algoritmalarıdır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan bir kontrol yöntemidir ve geniş bir kullanım alanı vardır [40]. Şekil 4.12’de bir PI kontrolöre ait transfer fonksiyonunun nasıl görüldüğü gösterilmektedir.



Şekil 4.12 PI kontrolöre ait transfer fonksiyonu

Şekil 4.12’de yer alan transfer fonksiyonuna ait matematiksel ifade aşağıda belirtilmiştir [40].

$$\circ \quad G(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (4.5)$$

- $u(s)$: Kontrolör çıkışı
- $e(s)$: Hata sinyali
- K_p : Oransal kazanç
- K_i : İntegral kazancı

Bu eşitliği aşağıdaki şekilde de matematiksel olarak ifade edilebilir [47].

$$\bullet \quad \frac{u(s)}{e(s)} = K_c \left[1 + \frac{T_i}{s} \right] \quad (4.6)$$

$$\bullet \quad T_i : \frac{K_i}{K_c} \text{ (İntegral zaman sabiti)} \quad (4.7)$$

Hata sinyali, beklenen giriş değeri ile gerçek çıkış değeri arasında bir fark oluşturur. Hata sinyali gönderildikten sonra PI, hata sinyalinin integral hesabını yapar. Kontrolörden gelen sinyal, oran bakımından elde edilen kazanım ve hata değerinin, integral kazanımı ve hata değerinin integral çarpımlarının toplamına eşit olduğunu gösterir. Denetlenen sisteme yeni bir çıkış sinyali gönderilir. Çıkış sinyali algılayıcıya

Şekil 4.13'te STATCOM'a ait bir kontrol devresi gösterilmiştir [48].

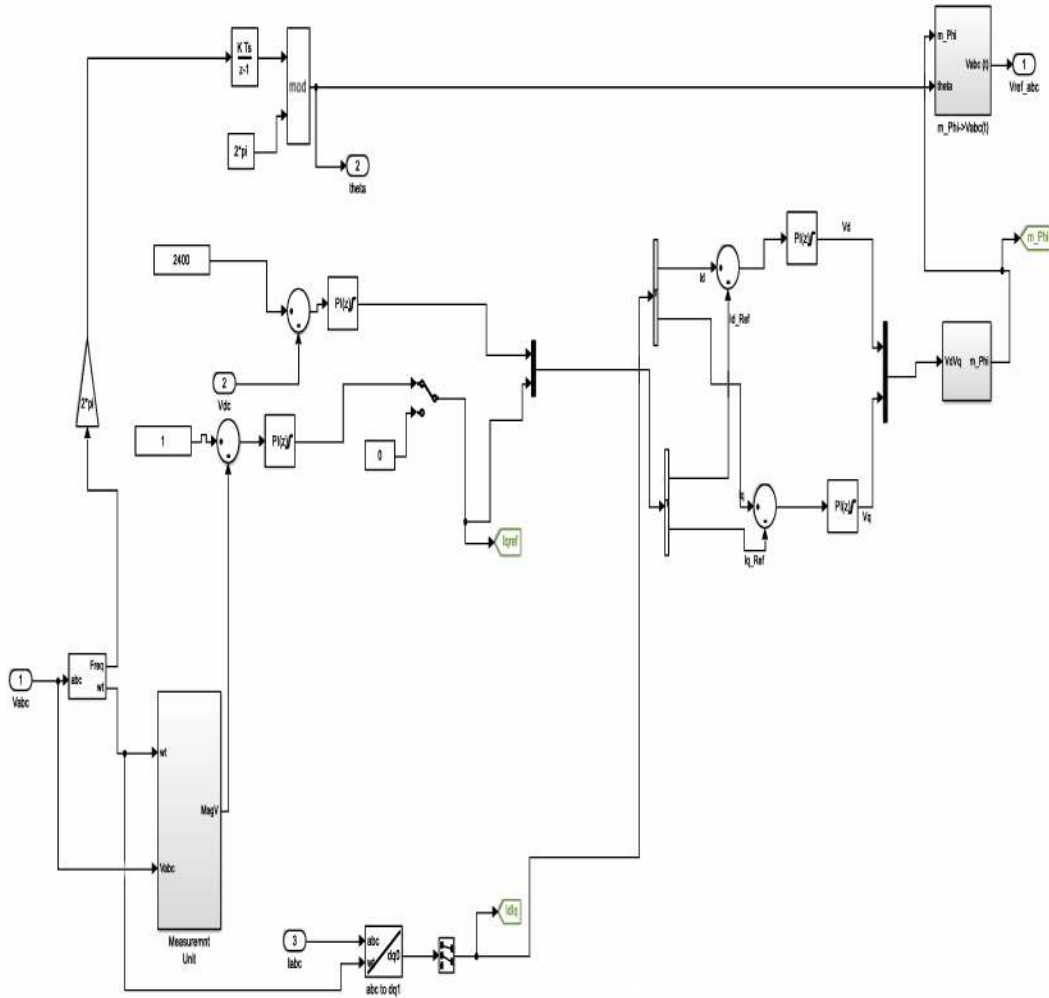
Şekil 4.13 STATCOM kontrol devresi [48]

Şekil 4.13'deki kontrol devresi üzerinde uzay vektör dönüşümleri ile PI ve PLL kontrol metotları baz alınarak Matlab/Simulink programı üzerinde modellenmesi gerçekleştirilen STATCOM'a ait devre modeli şekil 4.14'tedir [40].

Şekil 4.14 STATCOM simülasyon modeli [40]

PLL, akım ve gerilim arasındaki faz farkını ölçer ve PI denetleyici ile sistemin anahtarlama frekansı aracılığıyla bu faz farkını sıfıra getirir. Bu, STATCOM tarafından kontrol edilen birkaç fonksiyondan oluşur. PLL, bir giriş veya referans sinyalinin çıkış sinyali ile faz ve frekans eşitliğini sağlar. Kilitleme, giriş ve çıkış sinyallerinin faz hatasını sıfıra indirmektir. PLL tarafından üretilen $\cos(\omega t)$ ve $\sin(\omega t)$ ve abc-dq dönüşümü ile d-q unsurlarını bulmak için iki ölçüm sistemi vardır [40].

Bir DC gerilim regülatörü, DC gerilimi nominal değerde tutmaya çalışır ve d-q akımlarını kontrol eder ve Vd-q değerini Vabc'ye çevirir. Bir AC gerilim regülatörü, bir PI kontrol edici sistemde belirlenen referans değere eşit birincil gerilimi korumaya çalışır. Matlab/Simulink için STATCOM kontrol devresi iç yapısı bu aşamalar aracılığıyla Şekil 4.15'te gösterilmektedir [40].



Şekil 4.15 Kontrol devresinin Matlab / Simulink üzerinde modellenmesi [40]

4.4 STATCOM Optimizasyonu

Geri bildirim denetleyicilerinde en yaygın algoritma PI denetleyicileridir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan ve geniş bir uygulama alanına sahip bir kontrol yöntemidir [40].

Doğal frekans (w_n), geleneksel PI kontrol cihazının parametrelerini hesaplamak için kullanılır. (w_n) değeri, $w_n = \frac{4.6}{t_{s\varepsilon}}$ matematiksel ifade ile hesaplanır [49].

PI katsayıları aşağıdaki matematiksel ifadeler kullanılarak hesaplanır [50].

$$\circ K_p = \frac{2\varepsilon w_n}{V_{max}} \quad (4.8)$$

$$\circ K_i = \frac{w_n^2}{V_{max}} \quad (4.9)$$

Geleneksel PI kontrolörleri, zaman gecikmeleri, belirsiz dinamikler ve doğrusal olmayan sistemler için uygun değildir. Bu, uygun bir yanıt elde etmek için PI parametrelerinin otomatik olarak ayarlanmasını gerektirir. Zaman alanı kriteri bu çalışmada PI kontrolörünü değerlendirmek için kullanılmıştır. P ve I gibi zaman alanındaki iyi kontrol parametreleri, tepki süresinin kalmasına ve sabit durum hatasının azalmasına neden olur. Kontrol sisteminin ayar sabitleri yanlış seçilirse, sistemin özellikleri bozulabilir ve sistem kararsız hale gelebilir. Sonuç olarak, kontrolör parametrelerinin doğru şekilde ayarlanması ve uygun ayar sabitlerinin seçilmesi, kontrolörün üstün performansında önemli bir rol oynar [40].

İntegral Mutlak Zaman Hatası (ITAE), en yaygın performans kriterine sahiptir. Matematiksel ifadesi aşağıda gösterilmektedir.

$$\circ ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (4.10)$$

İntegral Mutlak Hata (IAE) ve İntegral Kare Hata (ISE) kriterlerinin dezavantajı, en aza indirme süresi nispeten kısa olsa da tepki süresinin uzun olması bu performans kriterlerinin zamandan bağımsız olarak tüm hataları eşit olarak yüklemesi nedeniyledir. Bu kriterlere ait denklemler aşağıda gösterilmiştir [50].

$$\circ IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (4.11)$$

$$\circ ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (4.12)$$

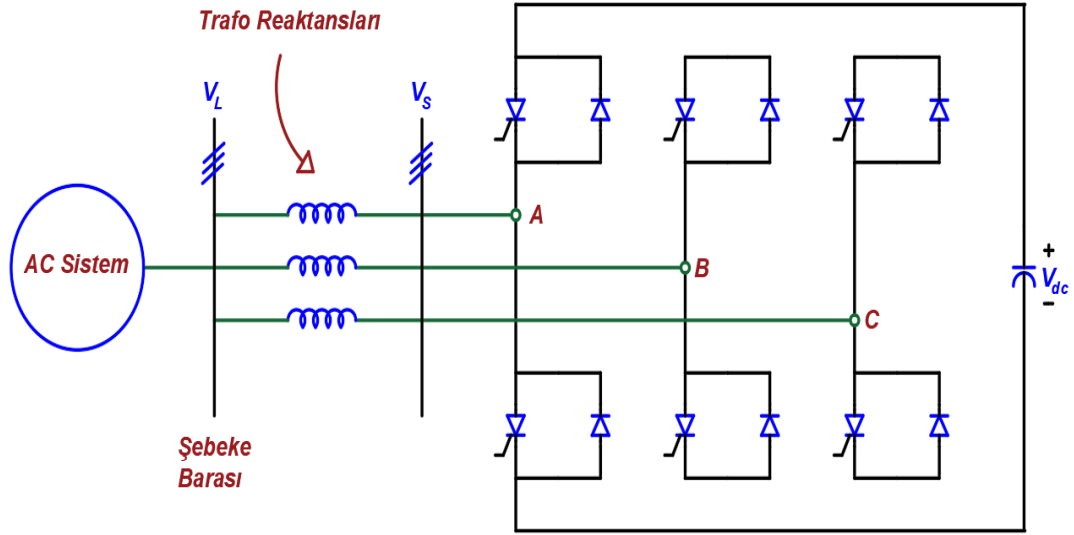
IAE ve ISE kriterlerindeki bu olumsuzluk ITAE kriteri ve aşağıda matematiksel ifadesi gösterilen İntegral Kare Zaman Hatası (ITSE) kullanılarak giderilebilir [51].

$$\circ \text{ ISE} = \int_0^{\infty} t \cdot e_{(t)}^2 dt \quad (4.13)$$

4.5 STATCOM Harmonikleri

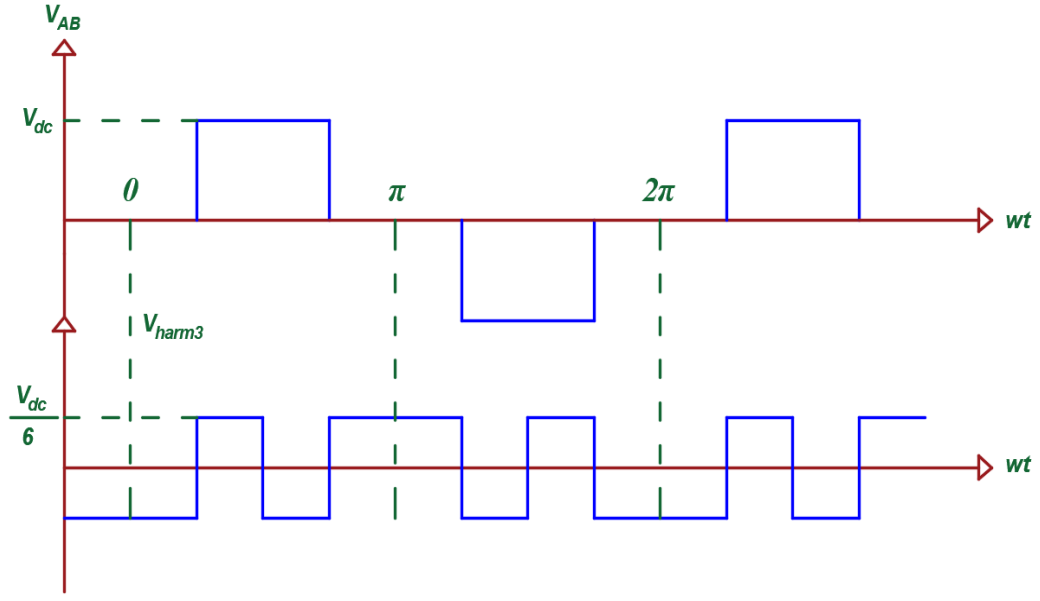
Harmonikler, güç elektroniği cihazları tarafından şebeke gerilimleri ve akımlarının bozulmasına sebebiyet verir. Harmonikli akımlar parazittik kayıpları ve normal dışı manyetik gürültüleri meydana getirmektedir. Harmonik gerilimler ölçüm sistemlerini yanlış yönlendirir. Röle ve denetim sistemlerinde hatalar meydana gelir. Güç elektroniği aygıtları nedeniyle meydana gelen elektromanyetik kaynaklı gürültü kirliliği, sanayide tercih edilen aletlere ve iletişim hatlarına zarar verebilmektedir [7].

STATCOM'un çıkış voltajına ait dalga şekli merdiven biçimindedir [7]. Şekil 4.16'da bu duruma örnek teşkil edecek altı darbeli bir STATCOM devresinin genel yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.16 Altı darbeli bir STATCOM devresi

Şekil 4.16'daki devrenin çalıştırılması sonucunda çıkış voltajında oluşacak dalga şekilleri şekil 4.17'dedir.



Şekil 4.17 Çıkış gerilimi ve 3 numaralı harmoniğin dalga şekli

Çıkış gerilimde meydana gelen harmoniklerin azaltılması amacıyla birden fazla metot geliştirilmiştir. Örnek verilecek olursa üretilen birinci STATCOM cihazında 48 adet darbe yapabilen bir çıkış voltajı bulunmaktadır [52].

4.6 Türkiye’de Bazı STATCOM Uygulamaları

FACTS uygulamaları, dünya çapındaki uygulamalarına kıyasla Türkiye’de geç devreye girmiştir. Türkiye’de yapılan FACTS uygulamalarında, bu kontrolörlerin elektrik üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinde bağlandıkları noktalardaki reaktif güç Kompanzasyonu sağlamak, gerilimi kontrol etmek, geçici rejim ve dinamik kararlılık sınır değerlerini artırmak ve gerilim çökmelerinin önlenmesi için kullanıldığı görülmektedir [53].

Türkiye’de uygulamaya geçirilmiş bazı Statcom Uygulamaları aşağıdadır.

4.6.1 Kızıltepe ve Viranşehir trafo merkezleri STATCOM uygulamaları

TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi ile TEİAŞ tarafından 2013-2014 yılları arasında yürütülen çalışmada, Güneydoğu Anadolu Bölgesi’ndeki Mardin ili Kızıltepe ilçesi ile Şanlıurfa ili Viranşehir ilçesinde bulunan transformatör merkezlerinde çeşitli STATCOM uygulamaları gerçekleştirilmiştir [54].

Çok seviyeli modüler konverter tabanlı STATCOM'lar, Viranşehir transformatör merkezinde 1 adet ± 25 MVar ve Kızıltepe transformatör merkezinde 2 adet ± 12 MVar gücünde olmak üzere tasarlanarak devreye alınmıştır [54].

Bu çalışmalar esnasında Viranşehir ilçesinde devreye alınan STATCOM uygulaması şekil 4.18 üzerinde gösterilmektedir [53].



Şekil 4.18 Viranşehir ilçesine ait STATCOM uygulaması [53]

4.6.2 Sincan trafo merkezi STATCOM uygulaması

TEİAŞ ve TÜBİTAK tarafından yürütülen Güç Kalitesi Milli Projesi kapsamında, 2006-2009 yılları arasında Ankara'nın Sincan ilçesindeki 154 kV TEİAŞ Sincan transformatör merkezinde ± 50 MVar STATCOM uygulaması alt projesi yürütülmüştür. Ülkemizin ilk yerli tasarım STATCOM uygulaması, yerli mühendislik imkanlarıyla tasarlanmıştır [54].

Şekil 4.19'da görüleceği üzere yerli tasarım olan bu ilk STATCOM uygulaması, çok seviyeli çevirgeç tabanlı STATCOM'un işletmeye alınması için 154 kV Sincan transformatör merkezine 154/10,5 kilovolt kuplaj transformatörü desteğiyle sistem faal hale getirilmiştir [54].



Şekil 4.19 Sincan trafo merkezi STATCOM uygulaması [53]

4.6.3 Kemerköy termik santrali STATCOM uygulaması

Şekil 4.20’de görüleceği üzere Kemerköy termik santralinin 154 kV taraflarındaki OBS01 ve OBS02 trafolarının reaktif enerji tüketimini sınırlamaların altına indirmek ve şebekenin güç kalitesini yükseltmek için çok seviyeli bir çevirgeç tabanlı STATCOM tasarlanarak işletmeye alınmıştır. STATCOM, $\pm 6,5$ MVar gücündedir [54].



Şekil 4.20 Kemerköy termik santrali STATCOM uygulaması [54]

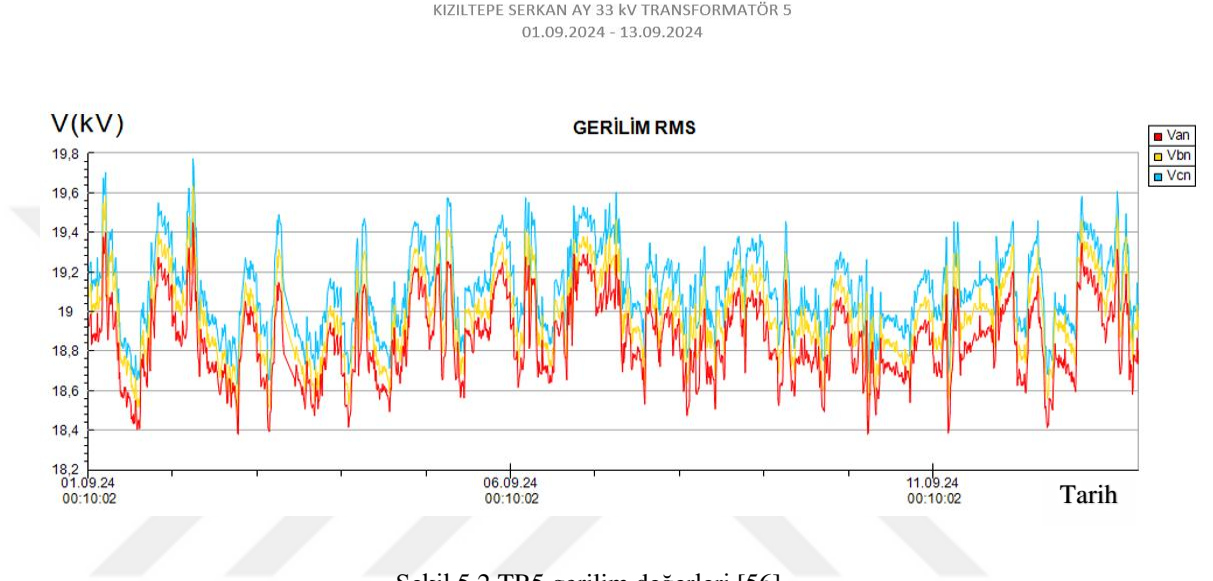
5.1 Veri Seti ve Uygulanan Ön İşlemler

400KV KIZILTEPE-2 TM

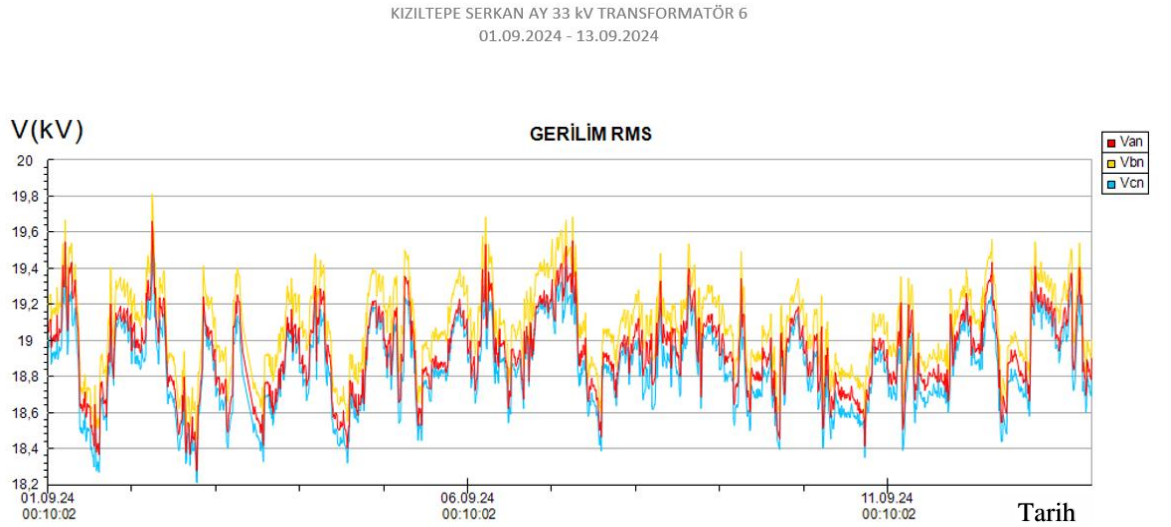
71

Söz konusu bölge TR5 ve TR6 adlı 2 adet ana trafo merkezi ile beslenmektedir. Trafolar, 380/33.6 kV seviyelerinde bir gerilim altında 90/125 MVA dolaylarında bir güç üretmektedir.

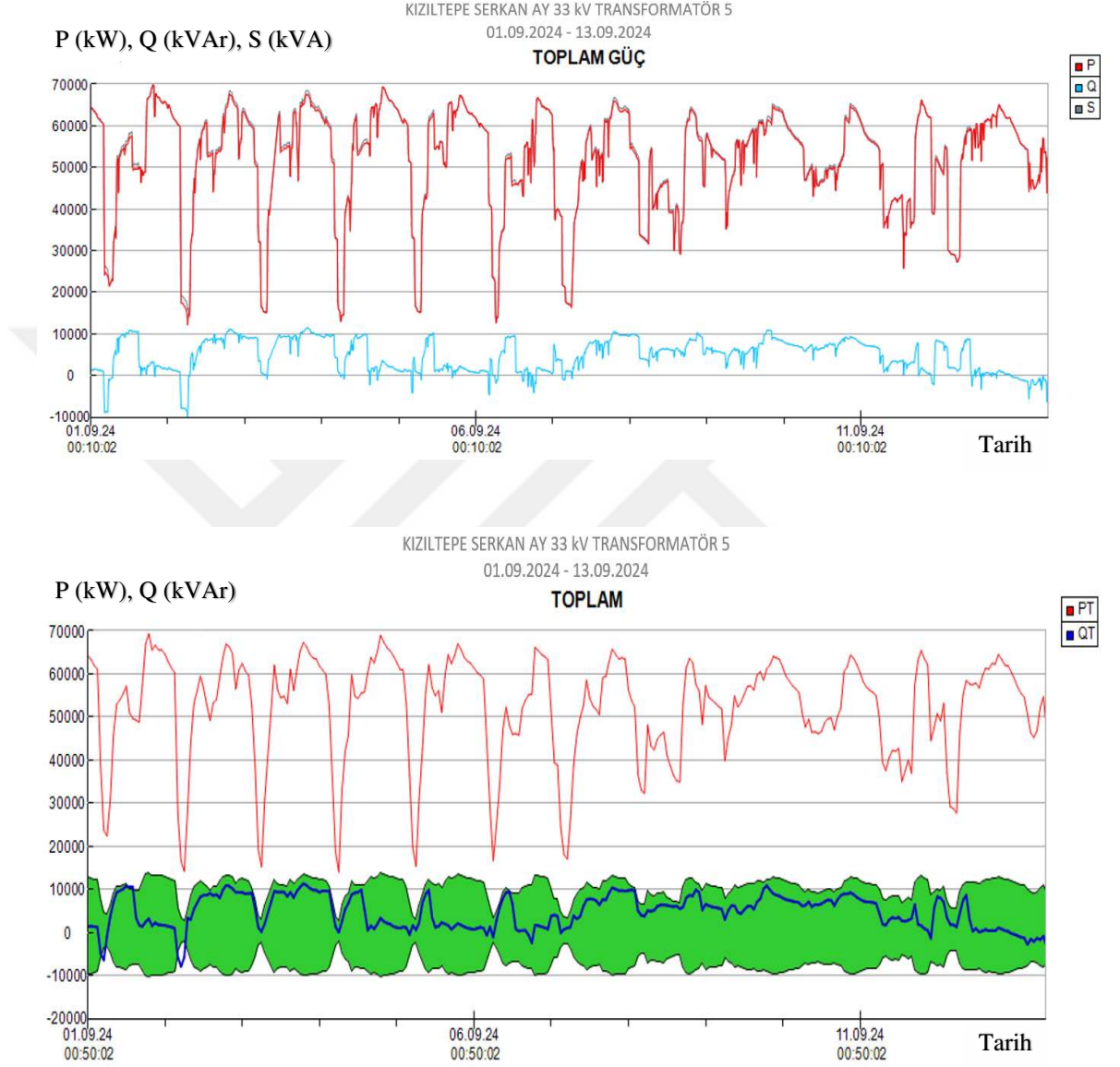
01.09.2024 ve 13.09.2024 tarihleri arasında TR5 ve TR6 numaralı Trafoların güncel verileri aşağıda gösterilmiştir.



TR5 numaralı trafonun A, B ve C fazlarına ait güncel gerilim değerleri şekil 5.2’de gösterilmiştir. A fazına ait gerilim değerleri 18.4–19.4 kV arasında değişirken bu oran B fazında 18.4–19.6 kV ve C fazında ise 18.6–19.8 kV değerleri arasındadır.

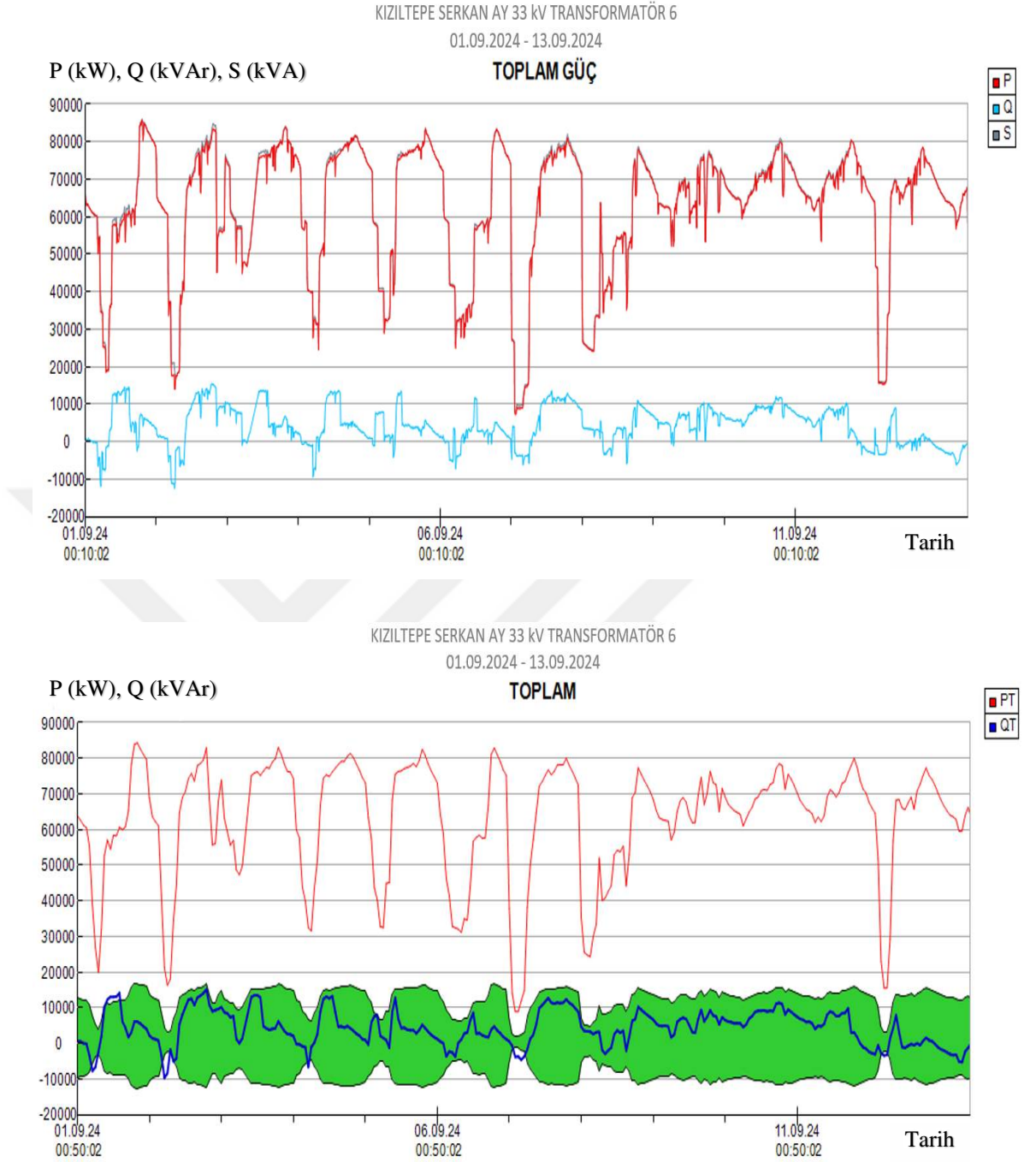


TR6 numaralı trafonun A, B ve C fazlarına ait güncel gerilim değerleri şekil 5.3'te gösterilmiştir. A fazına ait gerilim değerleri 18.2–19.6 kV arasında değişirken bu oran B fazında 18.4–19.8 kV ve C fazında ise 18.2–19.4 kV değerleri arasındadır.



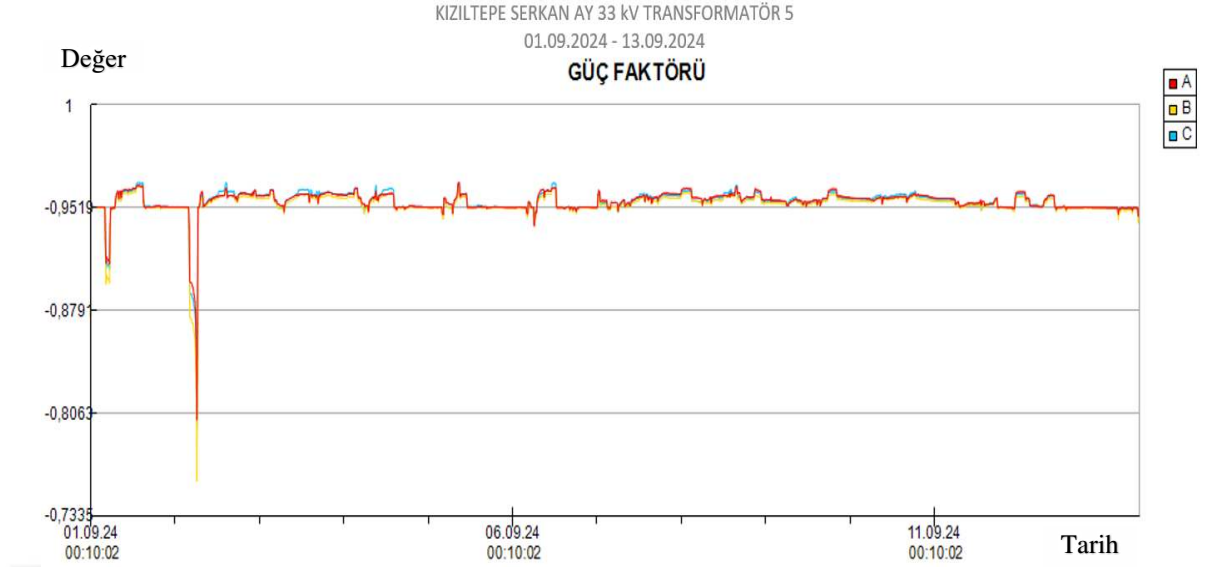
Şekil 5.4 TR5 toplam güç değerleri [56]

TR5 numaralı trafonun toplam güç değerleri şekil 5.4'te gösterilmiştir. Sistemin aktif güç değerleri 10–70 MW, görünür güç değerleri 10–70 kVA dolaylarında iken reaktif güç değerleri -10 ile +10 kVAr seviyelerinde olduğu görülmüştür.



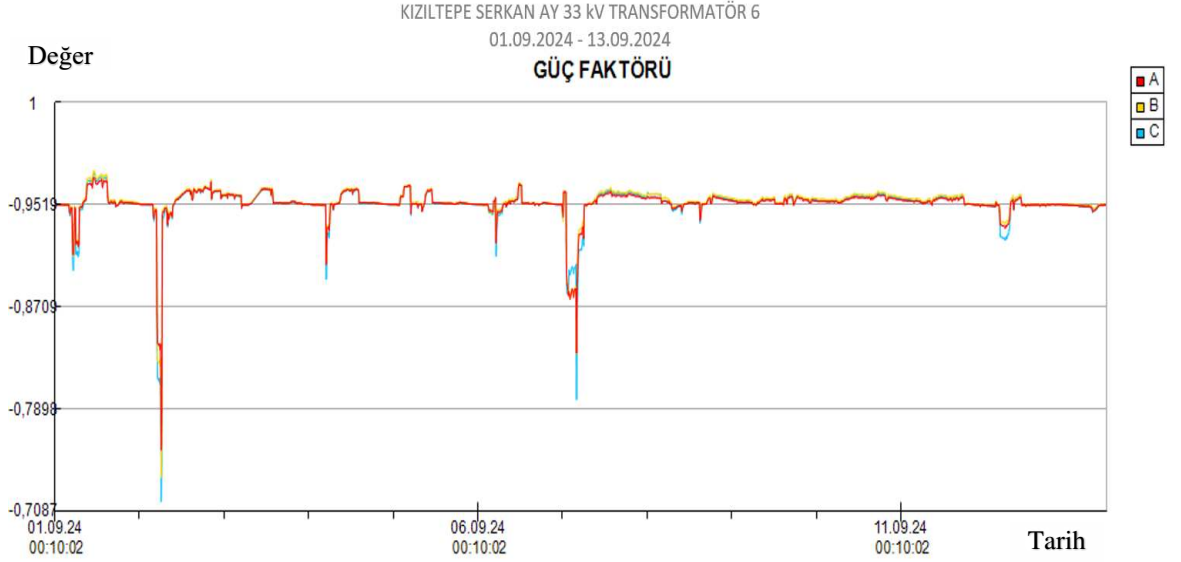
Şekil 5.5 TR6 toplam güç değerleri [56]

TR6 numaralı trafonun toplam güç değerleri şekil 5.5'te gösterilmiştir. Sistemin aktif güç değerleri 10–90 MW, görünür güç değerleri 10–90 kVA dolaylarında iken reaktif güç değerleri -10 ile +15 kVAr seviyelerinde olduğu görülmüştür.



Şekil 5.6 TR5 güç faktörü değerleri [56]

TR5 numaralı trafonun A, B ve C fazlarına ait güç faktörü değerleri şekil 5.6'da gösterilmiştir. A ve C fazlarına ait güç faktörü değerleri -0.806 ile -0.952 seviyeleri arasında değişirken bu oran B fazında -0.733 ile -0.952 değerleri arasındadır.

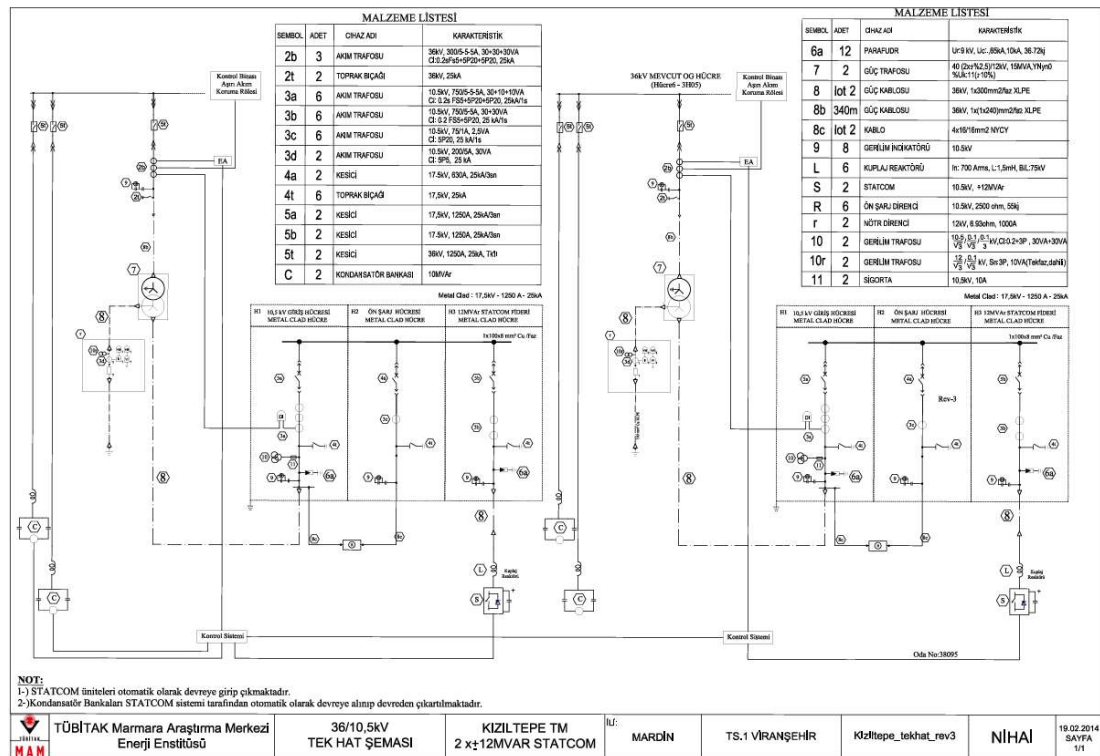


Şekil 5.7 TR6 güç faktörü değerleri [56]

TR6 numaralı trafonun A, B ve C fazlarına ait güç faktörü değerleri şekil 5.7'de gösterilmiştir. 3 fazın da güç faktörü değerleri -0.709 ile -0.952 seviyeleri arasında değişkenlik göstermektedir.

5.2 STATCOM Verileri

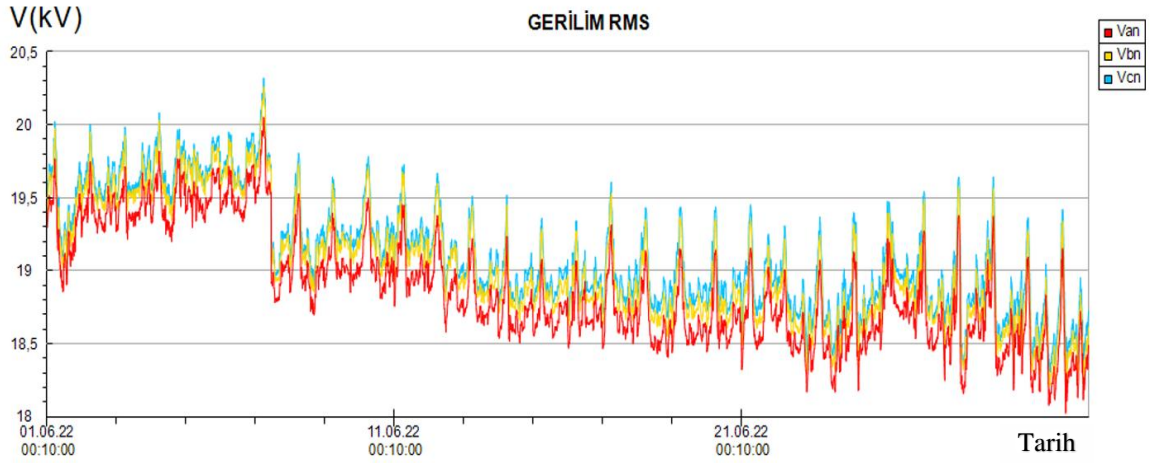
İlçe merkezinin bulunduğu alan üzerinde Akdeniz iklim kuşağı etkisini sürdürmektedir. Bu da yaz aylarının çok sıcak, kış aylarının ise nispeten daha ılıman bir havada yağışlı geçmesini sağlamaktadır. Bölgenin genişçe düz bir alana sahip olması ve ikliminin de elverişli olması sayesinde bölgede tarımsal arazi miktarı çok fazladır. Tarımsal arazinin fazlalığı sebebi ile bölge halkının en önemli temel geçim kaynaklarından biri tarımsal üretime dayanmaktadır [55]. Fakat bölgenin sıcak iklimi dolayısıyla tarımsal üretim yapılırken başta su kaynağı olmak üzere çeşitli enerji kaynaklarında sorunlar yaşanmaktadır. Üretimin en fazla olduğu yaz aylarında (Haziran-Temmuz-Ağustos) elektrik tüketimi maksimum seviyelere ulaşmaktadır. Elektrik enerjisine duyulan bu fazla ihtiyaç beraberinde elektrik iletim hatlarında gerilim kararsızlığı ve güç kayıpları gibi sorunlar getirmektedir. Bu nedenlerden dolayı elektrik iletim hatlarında gerilim kararlılığını dengede tutabilmek, aktif-reaktif güç kayıplarının önüne geçebilmek ve tüketicilere verimli, kaliteli bir enerji sunabilmek adına bölgeye 400 kV - 2*12 MVar gücünde bir STATCOM devresi kurulmuştur (Şekil 5.8) [56].



Şekil 5.8 STATCOM devresinin güç sistemine entegrasyonu [56]

STATCOM'un güç sistemine entegre edildiği dönemlerdeki TR5 ve TR6 numaralı trafoların 01.06.2022 – 30.06.2022 tarihleri arasındaki güç akış verileri aşağıda gösterilmiştir.

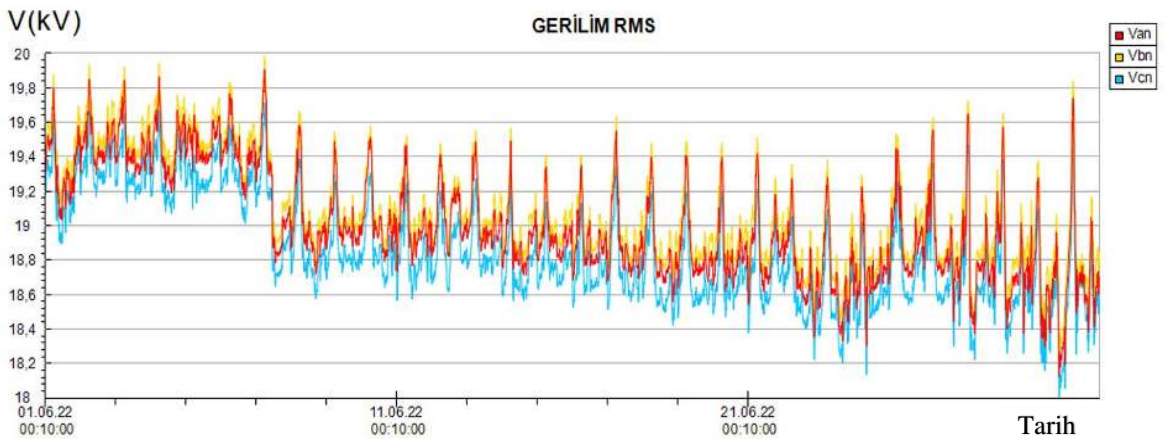
KIZILTEPE SERKAN AY 33 kV TRANSFORMATÖR 5
01.06.2022 - 30.06.2022



Şekil 5.9 TR5 gerilim değerleri (01.06.2022 – 30.06.2022) [56]

TR5 numaralı trafonun 01.06.2022 – 30.06.2022 tarihleri arasındaki A, B ve C fazlarına ait gerilim değerleri şekil 5.9’da gösterilmiştir. 3 fazın da 18–20.5 kV seviyelerinde bir gerilim altında yüklendikleri izlenmiştir.

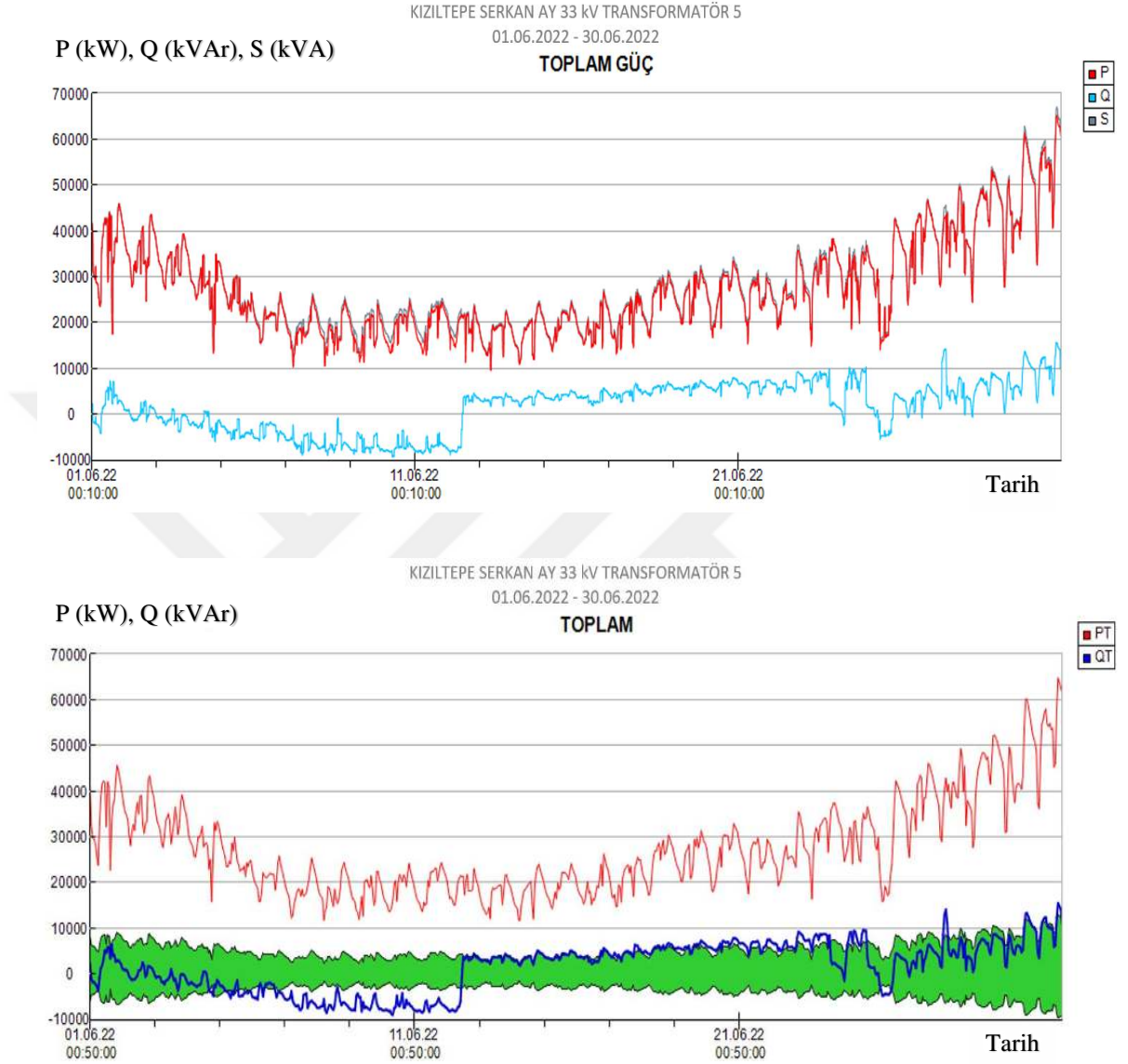
KIZILTEPE SERKAN AY 33 kV TRANSFORMATÖR 6
01.06.2022 - 30.06.2022



Şekil 5.10 TR6 gerilim değerleri (01.06.2022 – 30.06.2022) [56]

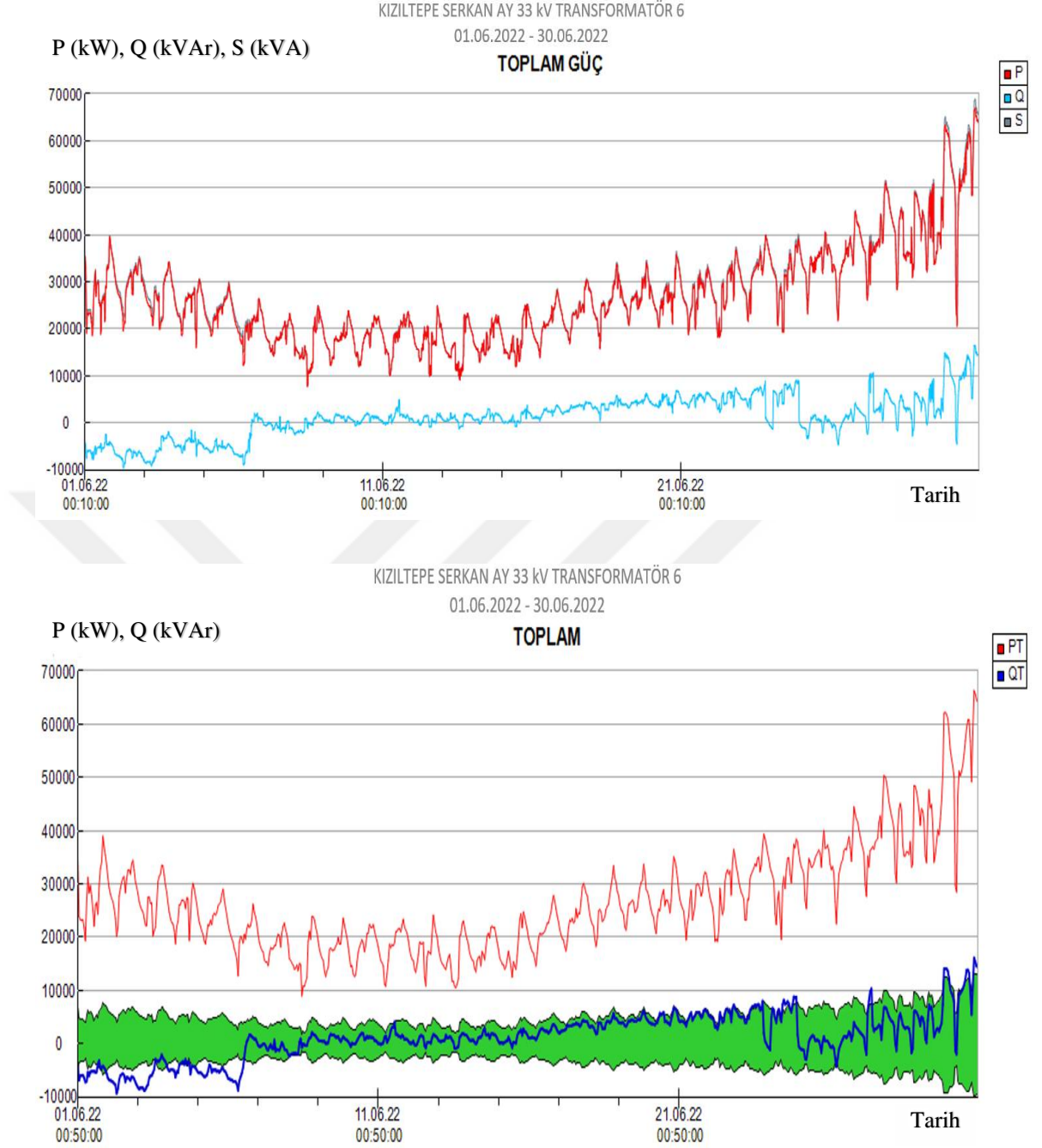
TR6 numaralı trafonun 01.06.2022 – 30.06.2022 tarihleri arasındaki A, B ve C fazlarına ait gerilim değerleri şekil 5.10’da gösterilmiştir. A ve B fazlarının gerilim

değerleri 18.2–20 kV seviyeleri arasında değişkenlik gösterirken bu oran C fazında 18–19.8 kV seviyelerinde olduğu gözlemlenmiştir.



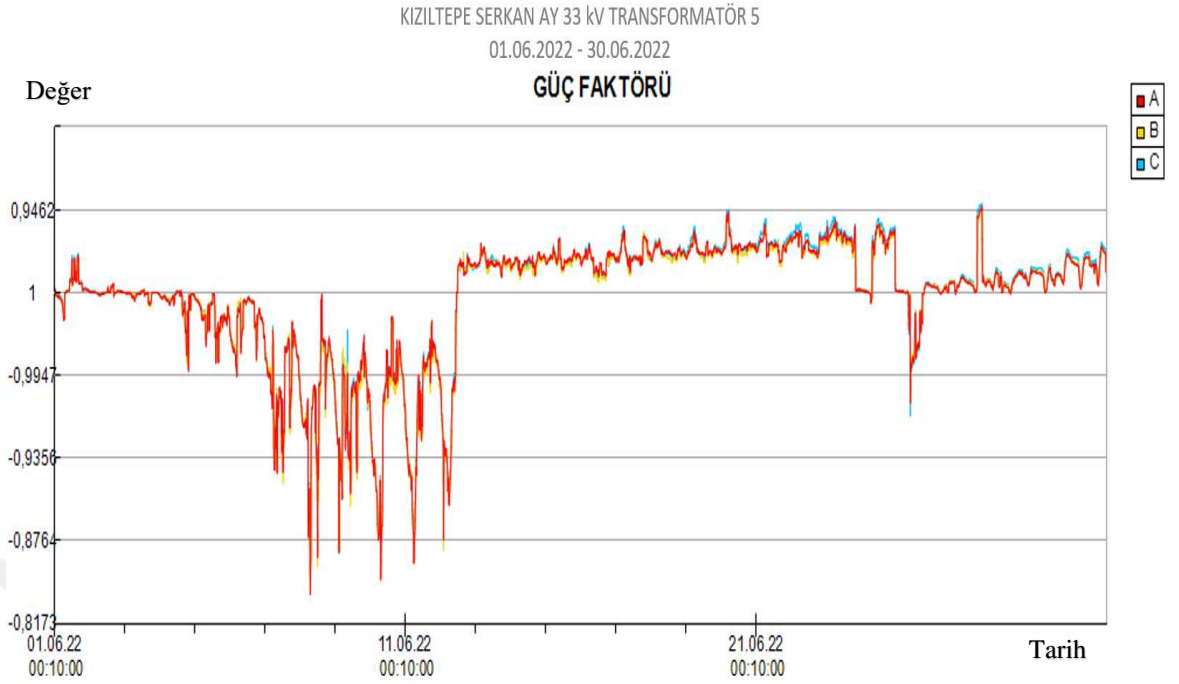
Şekil 5.11 TR5 toplam güç değerleri (01.06.2022 – 30.06.2022) [56]

TR5 numaralı trafonun 01.06.2022 – 30.06.2022 tarihleri arasındaki toplam güç değerleri Şekil 5.11’de gösterilmiştir. Sistemin aktif güç değerleri 10–70 MW, görünür güç değerleri 10–70 kVA dolaylarında iken reaktif güç değerleri -10 ile +10 kVAr seviyelerinde olduğu görülmüştür.



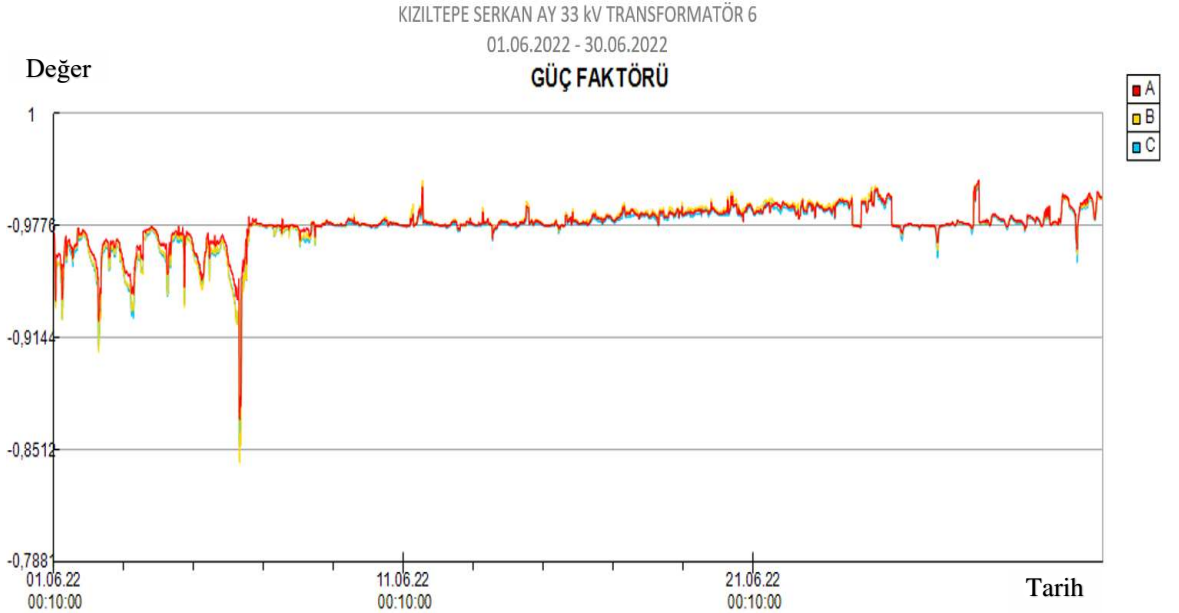
Şekil 5.12 TR6 toplam güç değerleri (01.06.2022 – 30.06.2022) [56]

TR6 numaralı trafonun 01.06.2022 – 30.06.2022 tarihleri arasındaki toplam güç değerleri Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Sistemin aktif güç değerleri 10–70 MW, görünür güç değerleri 10–70 kVA dolaylarında iken reaktif güç değerleri -10 ile +10 kVAr seviyelerinde olduğu görülmüştür.



Şekil 5.13 TR5 güç faktörü değerleri (01.06.2022 – 30.06.2022) [56]

TR5 numaralı trafonun 01.06.2022 – 30.06.2022 tarihleri arasındaki A, B ve C fazlarına ait güç faktörü değerleri Şekil 5.13'te gösterilmiştir. 3 fazın da -0.817 ile +0.946 seviyeleri arasında değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

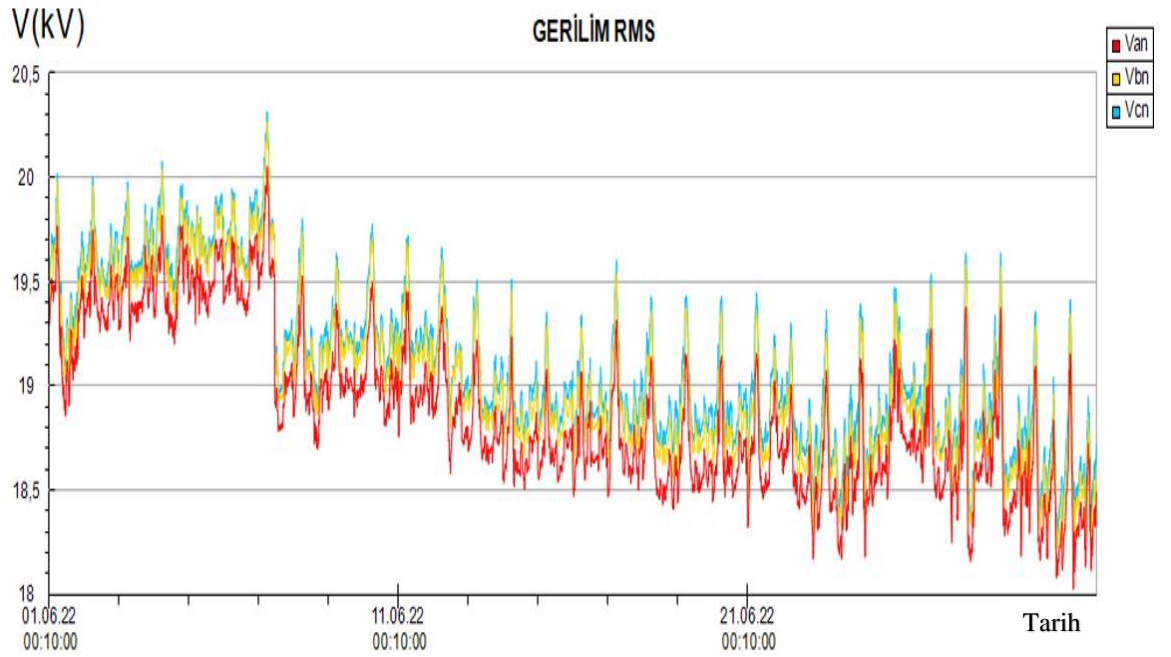


Şekil 5.14 TR6 güç faktörü değerleri (01.06.2022 – 30.06.2022) [56]

TR6 numaralı trafonun 01.06.2022 – 30.06.2022 tarihleri arasındaki A, B ve C fazlarına ait güç faktörü değerleri şekil 5.14’te gösterilmiştir. 3 fazın da -0.851 ile +0.978 seviyeleri arasında değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

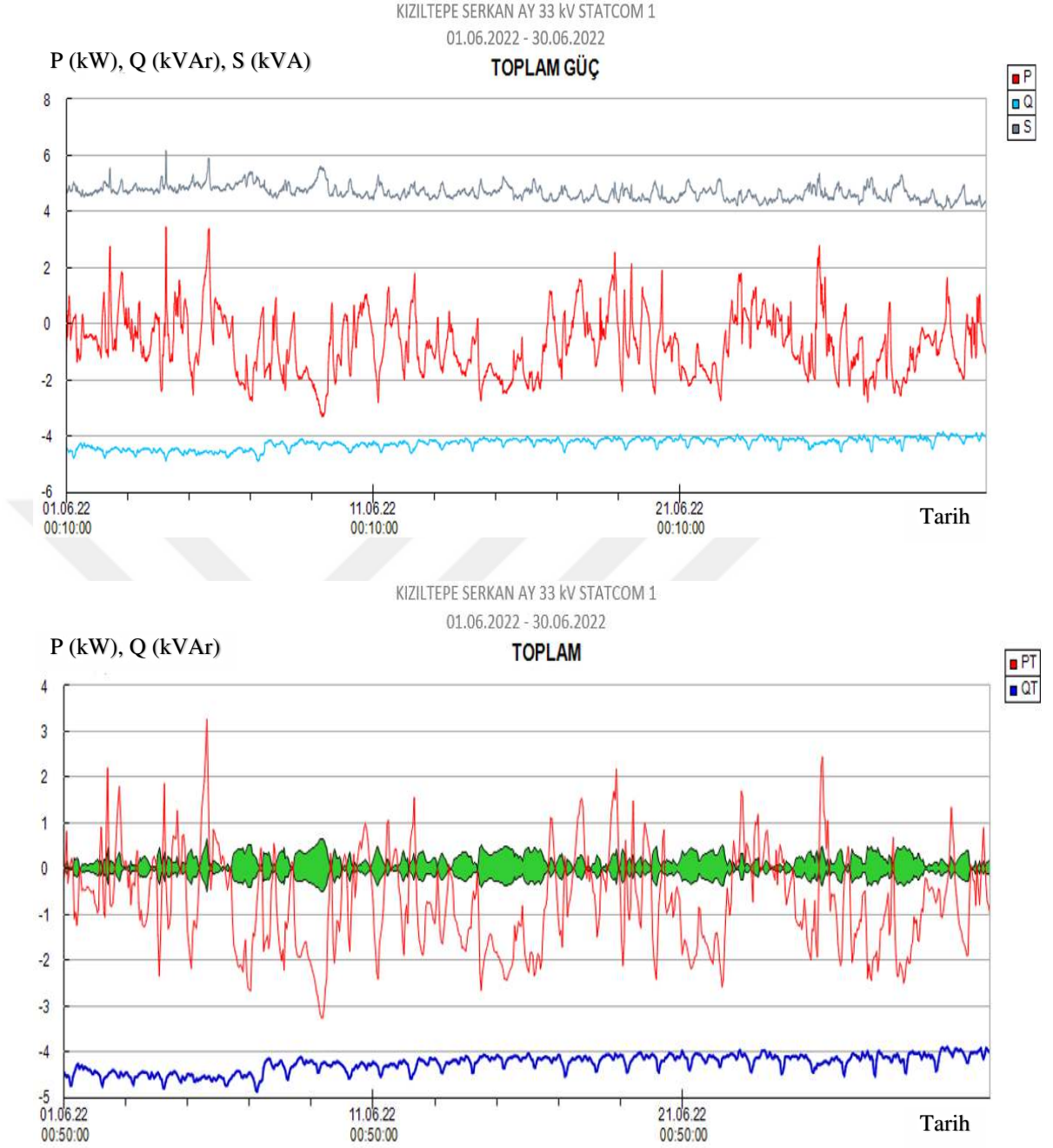
VSC (Voltage-Sourced Converter) bileşeni ile STATCOM kontrol sistemi, faz gerilimini kararlı halde tutar. Güç sistemindeki gerilim, üretilen sistem geriliminden yüksek veya düşük ise STATCOM aracılığı ile reaktör güç ya üretilir ya da absorbe edilir. Statcom devresinin sisteme entegrasyonu ile yine 01.06.2022 – 30.06.2022 tarihleri arasındaki STATCOM verileri kayıt altına alınmıştır. Kaydedilen veriler aşağıda gösterilmiştir.

KIZILTEPE SERKAN AY 33 kV STATCOM 1
01.06.2022 - 30.06.2022



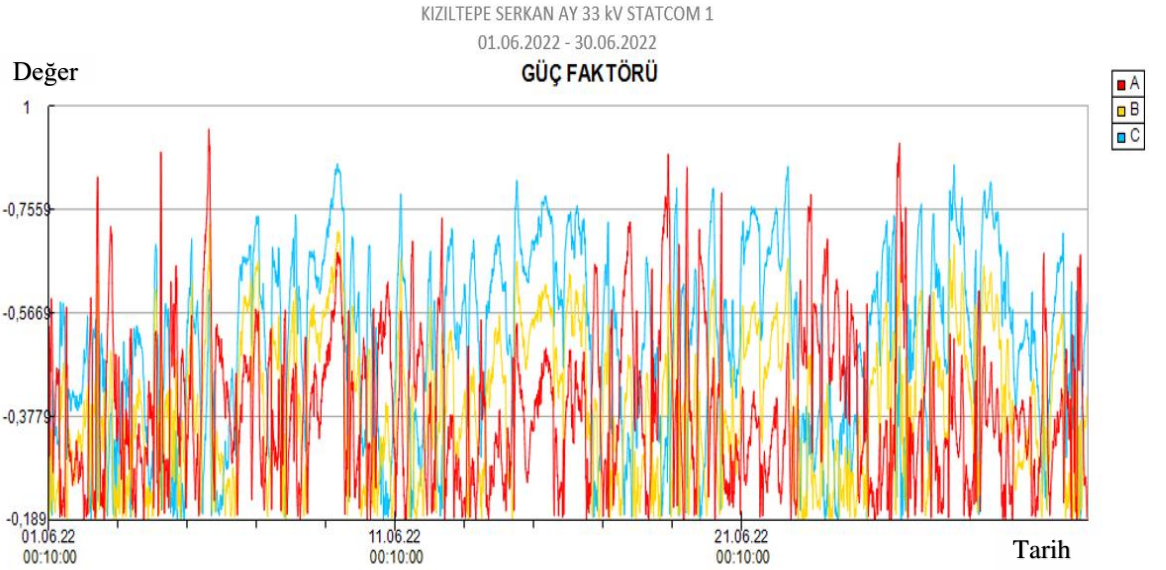
Şekil 5.15 Statcom gerilim değerleri (01.06.2022 – 30.06.2022) [56]

Statcom devresinin 01.06.2022 – 30.06.2022 tarihleri arasındaki A, B ve C fazlarına ait gerilim değerleri şekil 5.15’te gösterilmiştir. 3 fazın da 18–20.5 kV seviyelerinde bir gerilim altında yüklendikleri izlenmiştir.



Şekil 5.16 Statcom toplam güç değerleri (01.06.2022 – 30.06.2022) [56]

Statcom devresinin 01.06.2022 – 30.06.2022 tarihleri arasındaki toplam güç değerleri şekil 5.16’da gösterilmiştir. Sistemin aktif güç değerleri -4 ile +4 MW, görünür güç değerleri 4 ile 6 kVA dolaylarında iken reaktif güç değerleri -4 ile -5 kVAr seviyelerinde olduğu görülmüştür.

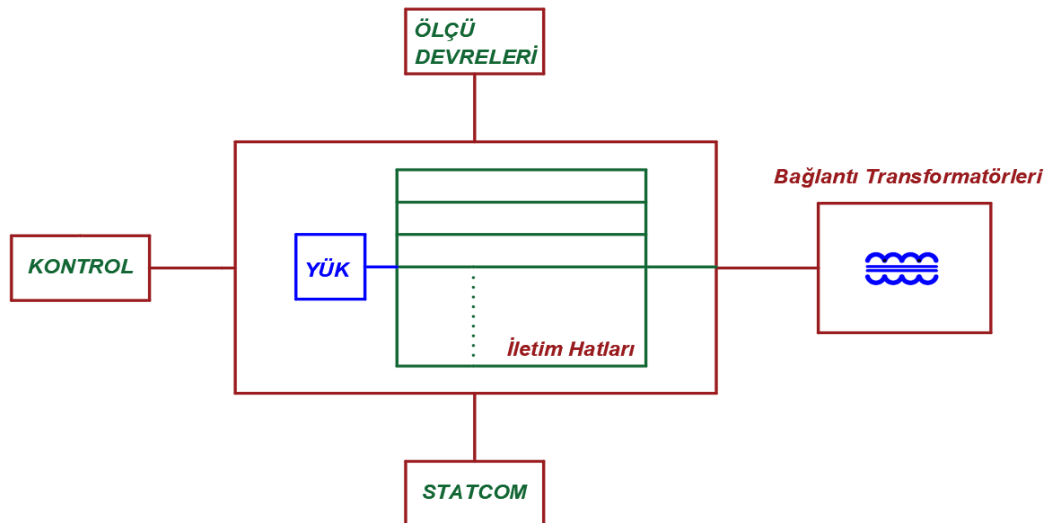


Şekil 5.17 Statcom güç faktörü değerleri (01.06.2022 – 30.06.2022) [56]

Statcom devresinin 01.06.2022 – 30.06.2022 tarihleri arasındaki A, B ve C fazlarına ait güç faktörü değerleri şekil 5.17’de gösterilmiştir. Buna göre Güç faktörü, A ve C fazlarında -0.189 ile -0.756 seviyeleri arasında değişkenlik gösterirken bu oran B fazında -0.189 ile -0.567 değerleri arasındadır.

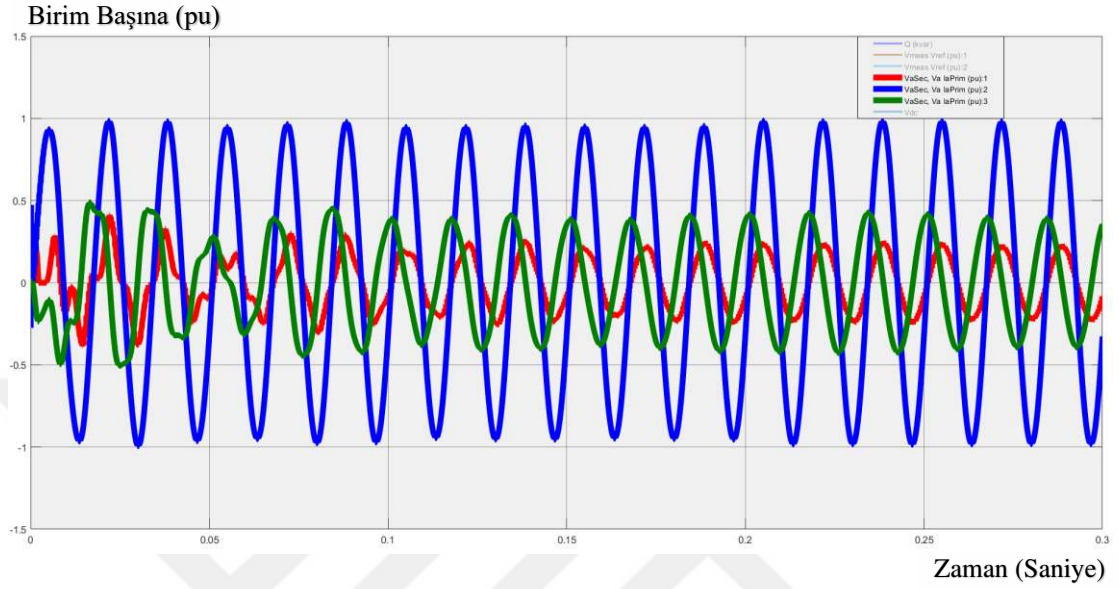
5.3 Güç Sisteminin Matlab/Simulink Programı Üzerinde Simülasyonu

Bölgede yer alan güç sisteminin bir benzeri bilgisayar ortamında şekil 5.18’te de görüleceği üzere basit bir şekilde kurgulanmıştır.



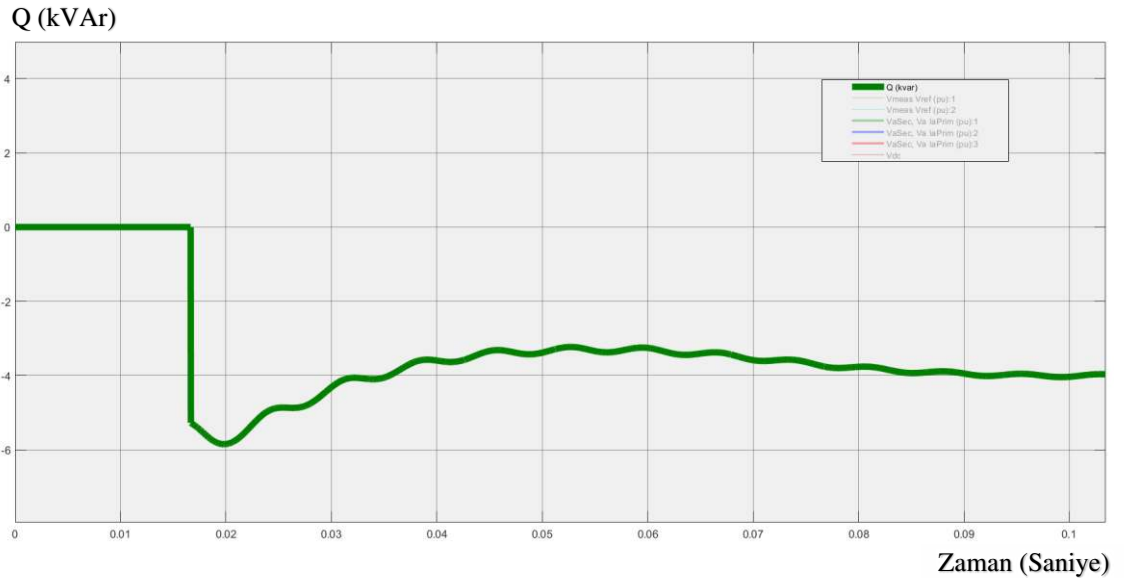
Şekil 5.18 Güç Sistemine ait model kurgusu

Güç sisteminin Matlab / Simulink programı üzerinde bir benzerinin modellenmesi ile simülasyon başlatılmış olup simülasyon neticesinde gerçekleşen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.20 Simülasyon sonucu oluşan faz gerilim değerleri - 1

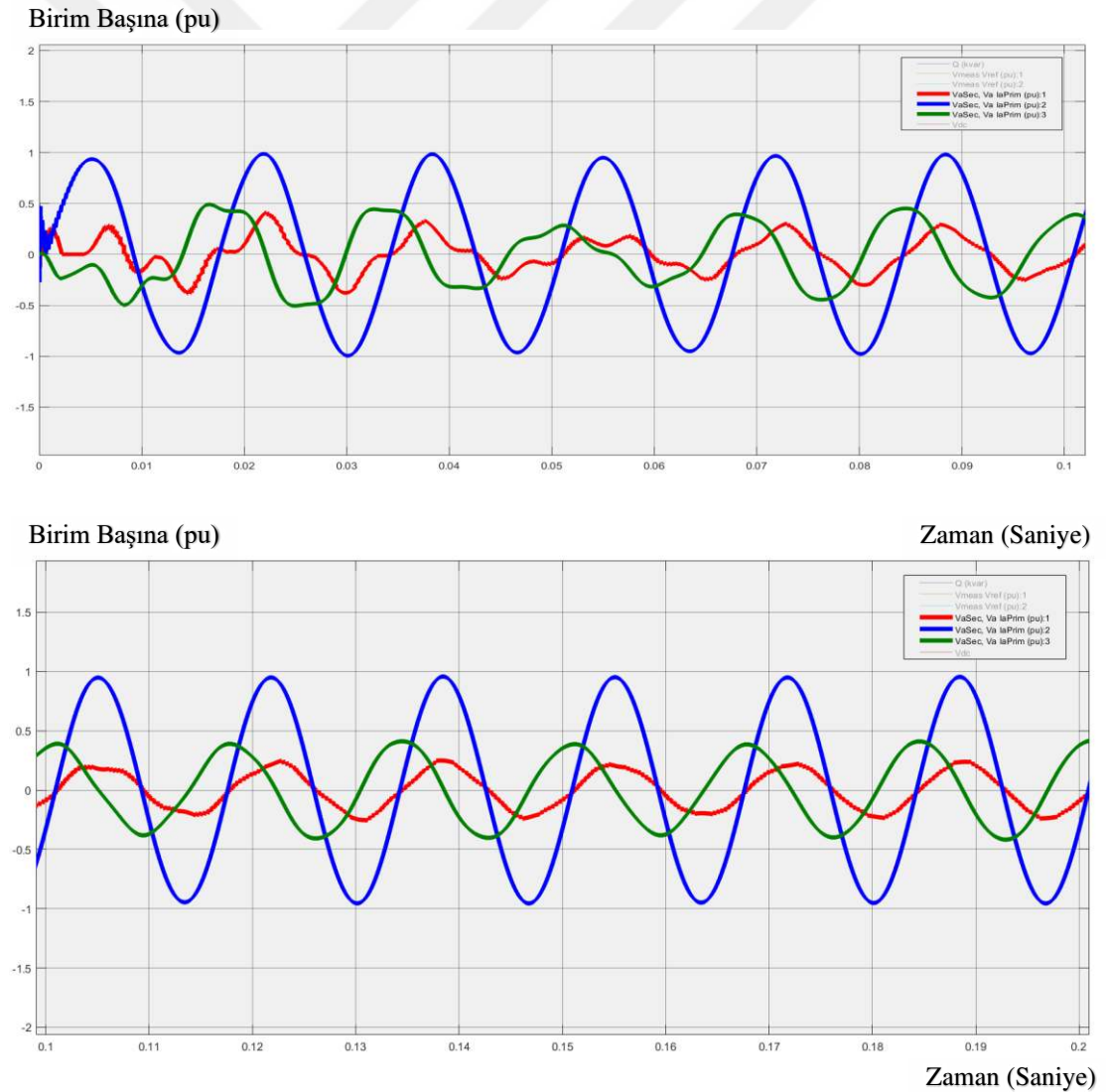
Şekil 5.20’de 1 numaralı faz kırmızı, 2 numaralı faz lacivert ve 3 numaralı faz ise koyu yeşil olarak renklendirilmiştir. 2 numaralı fazda herhangi bir bozulma görülmemesine karşın 1 ve 3 numaralı fazlarda 0 ile 0.15 saniyeleri arasında ciddi gerilim dalgalanmaları neticesinde gerilim çökmeleri meydana gelmiştir.



Şekil 5.21 Simülasyon sonucu oluşan reaktif güç değerleri

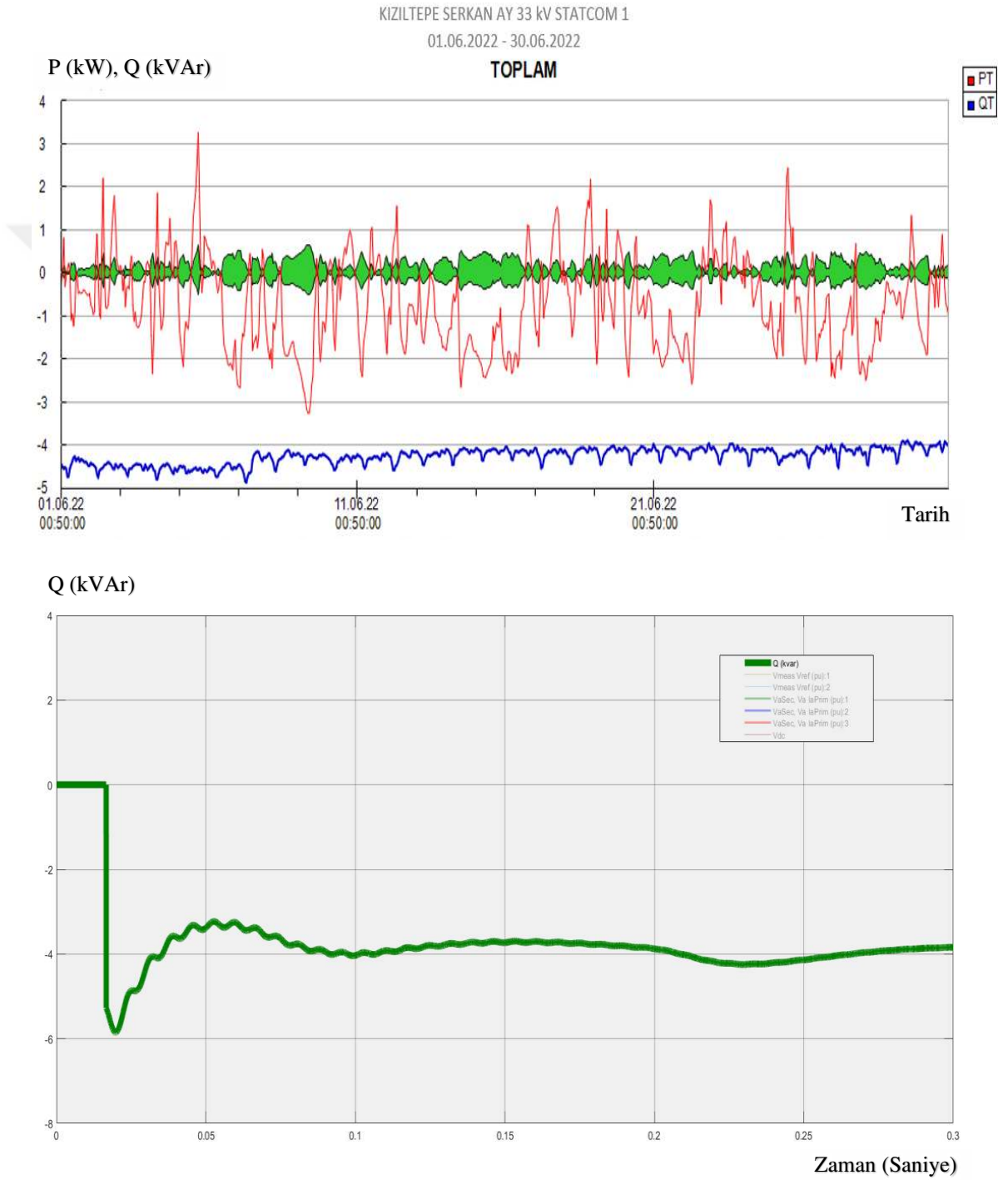
Fazlarda yaşanan bu gerilim çökmelerini algılayan STATCOM, şekil 5.21’de görüleceği üzere çok hızlı bir şekilde tepki göstermektedir. Bu süre zarfında STATCOM, güç sisteminde yaşanan gerilim çökmelerini anında algılayarak çok hızlı bir şekilde devreye girmiştir. Neredeyse saniyenin yüzde biri kadar bir süre içerisinde (0,01 – 0,02 saniye arasında) sisteme reaktif güç bakımından müdahalede bulunmaktadır.

STATCOM’un sisteme müdahalesi ile 3 numaralı faz 0,06.ncı saniyede kendini toplarlarken 1 numaralı faz 0,15.inci saniyede kendini toparlamıştır. Böylece güç sisteminde meydana gelen gerilim çökmeleri STATCOM etkisiyle 0,15 saniye içerisinde (şekil 5.22) giderilmiştir.



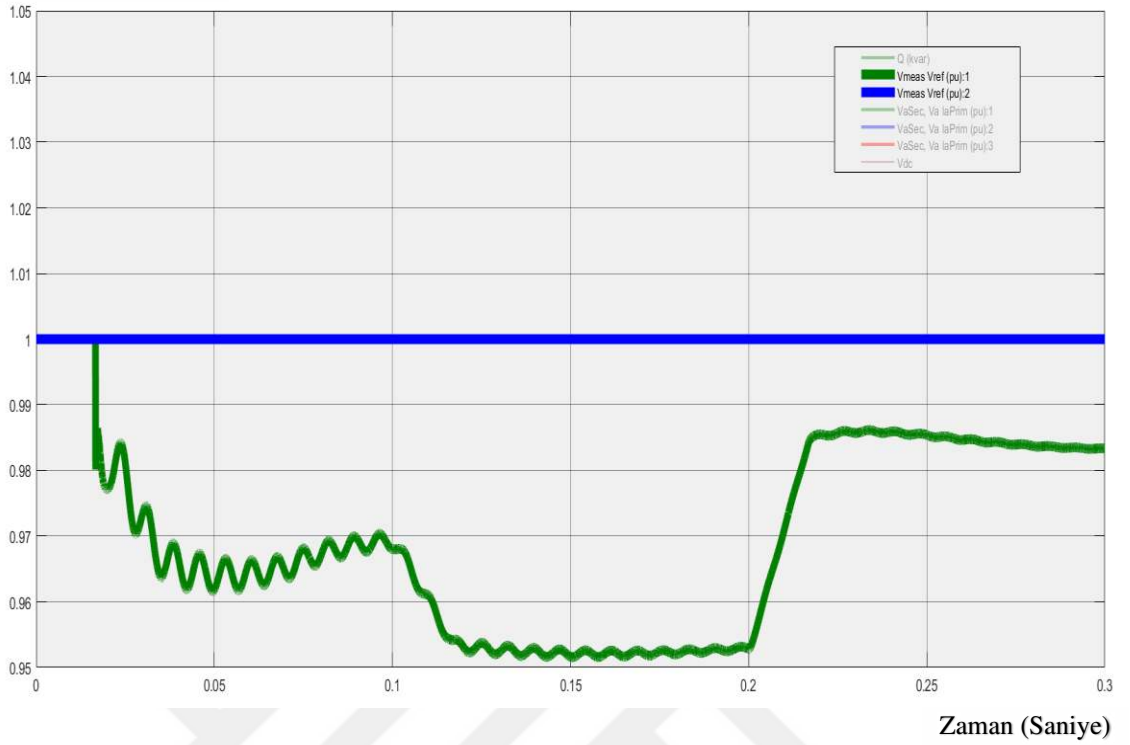
Şekil 5.22 Simülasyon sonucu oluşan faz gerilim değerleri - 2

Şekil 5.23'te ise simülasyon sonucu elde edilen reaktif güç miktarı gerçek veriler ile karşılaştırılmıştır. Söz konusu bölgede 01.06.2022 ile 30.06.2022 tarihleri arasında STATCOM cihazından elde edilen gerçek reaktif güç verilerine bakıldığında simülasyon sonucu STATCOM cihazından elde edilen reaktif güç değerleri ile hemen hemen aynı değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.23 Simülasyon verileri ile gerçek verilerinin karşılaştırılması

Birim Başına (pu)



Şekil 5.24 Simülasyon sonucu oluşan faz gerilim değerleri - 3

Şekil 5.24 incelendiğinde ise 0,01.inci saniyede güç sisteminde meydana gelen gerilim çökmesi nedeniyle STATCOM devreye girmiş ve bunun neticesinde sistemdeki gerilim değerlerinde yaşanan değişiklikler per unit cinsinden grafiğe yansıtılmıştır. 0,01.inci saniyeye kadar sistemin gerilim değeri per unit cinsinden 1 (bir) değerinde iken 0,01.inci saniyeden itibaren fazlarda yaşanan gerilim dalgalanmaları sebebiyle bu değer 0,95 seviyelerine kadar düşmüştür. Fakat STATCOM'un sisteme müdahalesi ile bu değer 0,99 seviyelerine hızlıca yükselerek sistemdeki güç akışı verimli ve kaliteli bir seviyeye çıkmıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu yüksek lisans tezinde TEİAŞ 16. Bölge Müdürlüğü'nün sorumluluk sahasında bulunan Mardin İli Kızıltepe İlçesinde yer alan 400 kV ve 2*12 MVA'lık bir güç sisteminde enerji iletim sisteminin dağıtım barasında yer alan STATCOM cihazı kullanılarak gerilim regülasyonu yapılmıştır.

Gerek gerçek veriler gerekse simülasyon sonuçları birlikte değerlendirildiğinde; STATCOM'un enerji iletim sistemi üzerinde ciddi, güçlü ve çok hızlı bir dengeleyici etken olduğu görülmektedir. Sistem üzerinde oluşan negatif güçler çok hızlı bir şekilde pasivize edilerek voltaj değerlerindeki dalgalanmalar dengelenmiş ve böylece tüketicilere daha kaliteli ve daha verimli bir enerji akışı sağlanmıştır.

STATCOM cihazının geçmişten süregelen mekanik anahtarlama cihazlarına kıyasla süre bakımından hızlıca bir kompanzasyon sunduğu açıkça görülmektedir. Endüktif ve kapasitif yükler nedeniyle güç sistemi üzerinde meydana gelebilecek bozulmalar neticesinde STATCOM cihazının, sistemin ihtiyaç duyduğu kompanzasyonu süratle gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Kompansatörün dinamik tepkisinin hızlı olduğu, aynı zamanda ani yük değişimlerine ve farklı yük özelliklerine rağmen üzerinde yer aldığı güç sistemini dengeleyerek koruduğu görülmüştür.

Simülasyon sonucunda elde edilen sonuçlar, güç sistemi üzerinde meydana gelebilecek reaktif gücün, güç sistemine ait voltaj kararlılık ve değerleri bakımından negatif anlamda sonuçlar doğurduğunu göstermiştir. Söz konusu negatif etkilerin başında gelen gerilim çökmelerine karşı STATCOM'un çok kısa bir süre içerisinde devreye girdiği ve güç sistemi üzerindeki bara gerilim değerini istenilen referans değerine ulaştırdığı gözlemlenmiştir. STATCOM'un iletim sisteminin voltaj kararlılığını iyileştirdiği ve sistemin güvenilirliği ile kapasitesini arttırmaya yardımcı olduğunu göstermiştir.

Sonuç olarak küreselleşen Dünya düzeninde hızdan ve zamandan kazanım çok büyük bir önem arz etmektedir. Hız ve zamana bir de uygun maliyet eklendiğinde ise elde edilen kazanımlar çok yüksek seviyelere çıkmaktadır. İşte bu noktada STATCOM ve benzeri FACTS cihazları enerjideki verimi ve kaliteyi arttırdığı gibi uygun maliyetleri sayesinde de kullanıcılarına çok büyük faydalar sağlamaktadır. Üstelik STATCOM

tüm bunları çok hızlı bir şekilde sergileyerek hayatımızın en önemli ihtiyacı olan zamanı da bizlere hediye etmektedir.

6.2 Öneriler

Elektrik dağıtım sistemi içerisinde gerilim değerlerinde yaşanabilecek ciddi dalgalanmalar istenilen bir durum asla değildir. Gerilimdeki kararlılık, tüketiciye ulaştırılan elektriğin kalitesini ve verimini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bu nedenle gerilim değerleri belirli bir aralık içerisinde süreklilik kazanmalıdır.

Reaktif güç akışlarının güç sistemleri üzerinde yaratmış olduğu olumsuz etkiler, STATCOM aracılığıyla hızlı bir şekilde ortadan kaldırılabilir. STATCOM'un güç sistemi üzerindeki dengeleyici etkisi sayesinde gerilim dalgalanmalarında ve güç kayıplarında kayda değer bir iyileştirme sağlanabilir.

Enerji İletim hatlarının taşıyabileceği maksimum enerji miktarı STATCOM sayesinde daha da arttırabilir. Kızıltepe ilçesinde olduğu gibi özellikle yoğun nüfuslu bölgelerde ya da maddi değeri yüksek tarımsal arazilerin ve su ihtiyacının fazla olduğu alanlarda enerji taşıma kapasitesinin arttırılması hem üretimi hem de bölge insanının refahını arttırmakta önemli bir yapı taşı olabilir.

Dünya nüfusunun hızla artması; sağlıkta, ulaşım, turizmde, trafikte, güvenlik sistemlerinde, iş yerlerinde, haberleşmede, sanayide, su dağıtımında, basın yayın kuruluşlarında ve daha birçok alanda enerjiye olan ihtiyacı, özellikle de elektrik enerjisine olan ihtiyacı çok daha büyük bir hale getirmiştir. Bu artan enerji talebi doğrultusunda STATCOM aracılığı ile tüketicilere hem daha verimli, kaliteli ve kesintisiz bir enerji akışı sağlanmış olur hem de enerji kayıpları ve gerilim çökmeleri gibi daha birçok olumsuz etkinin önüne geçilerek ekonomik anlamda ciddi katkılar elde edilmiş olur. Ayrıca STATCOM'un otomatik olarak kendiliğinden devreye girme özelliği sayesinde de hem insan gücünden hem de zamandan tasarruf edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] S. Duman, ‘‘FACTS Cihazlarını İçeren Reaktif Güç Planlama Probleminin Hibrit PSOGSA Algoritması Kullanarak Çözülmesi’’, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2018.
- [2] T. E. Gümüş, M. A. Yalçın, ‘‘Facts Cihazlarının Gerilim Kararlılığına Etkisinin İncelenmesi’’, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2013.
- [3] R. Çöteli, ‘‘Statcom ile Güç Akış Kontrolü’’, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [4] M. M. Ertay, Z. Aydoğmuş, ‘‘Güç Sistemlerinde Facts Uygulamaları’’, SDU International Technologic Science, 2012.
- [5] M. M. Ertay, ‘‘Enerji İletim Sistemlerinin UPFC ile kontrolü’’, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [6] U. Eminoğlu, S. Herdem, T. Yalçınöz, ‘‘İnvertör Temelli Facts Cihazları Kullanarak Reaktif Güç Kompanzasyonu ile Gerilim Kontrolü’’, Niğde Üniversitesi, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi
- [7] H. Dirik, ‘‘Statcom ve SSSC Denetleyicilerinin Güç Sistemi Gerilim Kararlılığı Üzerine Etkisinin İncelenmesi’’, Yüksek Lisans Tezi, On dokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [8] E. Gencer, ‘‘Orta Gerilim Şebekelerinde Gerilim Sarkmalarına D-Statcom Etkileri’’, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [9] A. B. Karagül, ‘‘Güç Elektroniği Dönüştürücü Modelleri Eğitim Modülü Geliştirilmesi’’, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
- [10] H. Bodur, ‘‘Güç Elektroniği’’, 2. Baskı, Birsen Yayınevi, 2012.
- [11] N. Şahin, ‘‘Güç Elektroniği Devrelerinin Bilgisayar Destekli Analizi’’, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [12] Rapor, ‘‘Güç Elektroniğinde Kullanılan Anahtarlama Elemanlarının İncelenmesi’’, Güç Elektroniği Laboratuvarı, Munzur Üniversitesi, Tunceli
- [13] B. Kılınç, ‘‘Güç Elektroniği Devrelerinin Bilgisayar Destekli Çözümlemesi ve Tasarımı’’, Yüksek Lisans Tezi, On dokuz Mayıs Üniversitesi, 1998.
- [14] E. Akadur, ‘‘Özel Tristörler’’, Proje 1, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, 2000.

- [15] B. K. Bose, "Recent Advances In Power Electronic", 2 Ieee Transactions On Power Electronics. Vol 7, No I. Fellow, Ieee, 1992.
- [16] L. Zhou, "Evaulation And Dsp Based Implementation Of Pwm Approaches For Single –Phase Dc-Ac Converters", Master Thesis, The Florida State University, 2005.
- [17] Ş. Alataş, "Üç Faz Giriş İki Faz Çıkışlı Matris Çeviriciden Beslenen Tek Fazlı Asenkron Motorun Pspice Modellemesi", Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, Türkiye, 2004.
- [18] Z. Fedyczak, R. Strzelecki, K. Sozański "Review Of Three-Phase Pwm Ac/Ac Semiconductor Transformer Topologies And Applications" University Of Zielona Góra, Institute Of Electrical Engineering
- [19] M. H. Rashid, H. M. Rashid, "Spice For Power Electronics And Electric Power", Prentice- Hall International, Taylor&Francis Group, Second Edition, 2006.
- [20] F. Çakmak, "Dağıtım Şebekelerinde D-Statcom ile Gerilim Kalitesinin İyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [21] E. Kayar, H. F. Carlak, H. İ. Aydınöz, "FACTS Applications in 400 kV Interconnected Electric Network System", Güç Sistemleri Konferansı, Ankara, 2022.
- [22] E. Özköp, İ. H. Altaş, A. M. Sharaf, "A Self Adjustable FACTS Device and Controller for Distribution Systems", Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering, 2017.
- [23] B. Bozali, A. Öztürk, S. Tosun, "Güç Sisteminin Kararlılığını İyileştirecek FACTS Cihazlarının Bağlantı Noktalarının Belirlenmesi", Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2018.
- [24] S. T. Fadhil, M. S. Hamad, A. O. Arslan, A. M. Vural, "Comparison of dynamic performances of Statcom, SSSC, IPFC and UPFC on inter-area oscillation damping", The International Journal of Energy & Engineering Sciences, Gaziantep University, 5 (2) 62-79, 2020.
- [25] U. E. Uzun, N. Pamuk, S. Taşkın, "Improvement of voltage stability and loading capacity using FACTS devices and distributed generation resources in power systems", Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 40:1 (2025) 313-330, 2024.
- [26] Cigre Study committee 14 working Group 14.14, (1993), FACTS Tutorial Draft1.

- [27] A. A. Rızan, ‘‘Enhancement Of Power Stability And Damping Oscillation In Multi Machine System Using (SSSC) With Pod Controller’’, M.S. thesis, University Of Gaziantep, 2016.
- [28] N. G. Hingorani, ‘‘Flexible AC transmission, IEEE reprinted from IEEE Spectrum’’, Volume 30, No.4, 40-45.,1993.
- [29] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, ‘‘Understanding FACTS: concepts and techn. of flexible ac transmission systems’’, IEEE Pres. NewYork, 1999.
- [30] L. Gyugyi, ‘‘A unified Power Flow Control Concept For Flexible AC Transmission Systems’’, Presented at the fifth International Con.on AC and DC Power Trans., IEE, London september17-20.,1991.
- [31] L. Gyugyi, ‘‘Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-state Synchronous Voltage Sources IEEE Transactrons on Power Delivery’’, Vol 9, No 2, April, 1994.
- [32] A. Vural, M. Tümay, ‘‘Gelişmiş Güç Akış Denetleyicileri ile Donatılmış Güç Sistemlerinin Newton-Raphson Metodu ile Analizi’’, Niğde Üniversitesi, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, 63-66., 2002.
- [33] X. P. Zhang, ‘‘Modelling of the interline power flow controller and the generalised unified power flow controller in Newton power flow’’. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 150(3), 268-274., 2003.
- [34] L. Gyugyi, C. D. Schauder, K. K. Sen, ‘‘Static synchronous series compensator: asolid state approach to the series compen. of transmission lines’’, Power Delivery, IEEE Trans. on Vol.: 12, Issue:1 ,406– 417., 1997.
- [35] N. Mithulanathan, A. Sode Yome, N. Acharya, ‘‘Application of FACTS Controllers in Thailand Power Systems’’, School of Environment, Resources and Development Asian Institute of Technology, Thailand [2005]
- [36] M. M. Ertay, Z. Aydoğmuş, ‘‘STATCOM ile Bir Enerji İletim Sisteminde Gerilim Kontrolü’’, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2010.
- [37] H. Güzel, ‘‘STATCOM (Statik Senkron Kompansatör)’’, 2023.
- Erişim tarihi: 5 Şubat 2025. <https://www.huseyinguzel.net/post/statcom-statik-senkron-kompansat%C3%B6r-nedir>
- [38] N. Burham, ‘‘Study of Statcom for voltage compensation in 14-Bus IEEE grid’’, M.S. thesis, Uppsala Universitet, 2024.

- [39] M. K. Singh, N. Saxena, ‘‘Performance Analysis and Comparison of Various FACTS Devices in Power System’’, ISSN No. (Online): 2277, 2626., July 2013.
- [40] H. Bakır, ‘‘Statcom içeren Güneş-Rüzgâr Hibrit Mikroşebekenin Modellenmesi ve Optimizasyonu’’, Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, 2021.
- [41] K. Döşoğlu, A. Öztürk, B. Saraçoğlu, ‘‘Sürekli Yük Akışında Statik Gerilim Kararlılığına Statcom ve SSSC’nin Etkisinin İncelenmesi’’, SDU International Technological Science, 2011.
- [42] A. B. Shobole, ‘‘ STATCOM Application to Increase Voltage Stability of Wind Farms’’, European Journal of Technique, 2023.
- [43] Wikipedia, ‘‘Static synchronous compensator’’, Erişim tarihi: 5 Şubat 2025.
https://en.wikipedia.org/wiki/Static_synchronous_compensator
- [44] F. Shahnia, S. Rajakaruna, A. Ghosh, ‘‘Static Compensators (STATCOMs) in Power System’’, In F. Shahnia, Rajakaruna, Sumedha, Ghosh, Arindam (Eds.) (Ed.), 2015.
- [45] H. Sakarya, ‘‘Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar için alan Yönlendirmeli Sürücü Düzeneği Tasarımı ve uygulaması’’, Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Konya, 2009.
- [46] F. Sevilmiş, H. Karaca, ‘‘Performance Analysis of SRF-PLL and DDSRF-PLL Methods for Grid Interactive Inverters’’, Paper presented at the International Advanced Researches & Engineering Congress, Osmaniye, Türkiye, 2017.
- [47] M. Karataş, ‘‘Control of Static Synchronous Compensator with PID Controller’’, Master Thesis, Inonu University, Malatya, 2011.
- [48] L. Xu, ‘‘Control of Power Converter for grid Integration of Renewable Energy Conversion and Statcom Systems’’, Master Thesis, Graduate School of The University of Alabama, Alabama, 2009.
- [49] S. C. Tsai, D. F. Chang, C. M. Hong, P. Xia, D. Senadheera, L. Trump, C. Lutzko, ‘‘Induced overexpression of OCT4A in human embryonic stem cells increases cloning efficiency’’, Am J Physiol Cell Physiol, 306(12), C1108-1118. doi:10.1152/ajpcell.00205.2013, 2014.
- [50] R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodriguez, ‘‘Grid converters for photovoltaic and wind power systems’’, In. doi:10.1002/9780470667057, 2011.

- [51] A. H. Hajisalem, “Optimization of PID Control Parameters for Wind /PV Solar Energy Systems with GA and PSO”, Master Thesis, Karadeniz Technical University, Türkiye, 2013.
- [52] R. M. Mathur, R. K. Varma, “Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems”, John Wiley & Sons, Incorporated, IEEE Press Series on Power Engineering, February 2002
- [53] TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, <https://mam.tubitak.gov.tr>
- [54] İ. H. Dağhan, “CEPSO Algoritması ile TCSC Ve STATCOM’un Optimum Güç Akış Problemine Etkilerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2023.
- [55] Wikipedia, “Batman (il)”, Erişim tarihi: 11 Şubat 2025.
[https://tr.wikipedia.org/wiki/Batman_\(il\)](https://tr.wikipedia.org/wiki/Batman_(il))
- [56] TEİAŞ 16. Bölge Müdürlüğü, “Kızıltepe Serkan Ay 33 kV STATCOM 1 Raporları”, Batman

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyad, Ad

KOÇAKELÇİ, Haşim

Web sayfası

(Research Gate, Academia, vs.)

Eğitim Bilgileri

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Dicle Üniversitesi	2025
Lisans	Dicle Üniversitesi	2014
Lise	Diyarbakır Anadolu Lisesi	2008

İş Deneyimi

Dönem (Yıl)	Şirket, Kurum	Görev
2020 – Devam Ediyor	Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı	Elektrik Elektronik Mühendisi
2016 - 2020	Fırat Elektrik Dağıtım A.Ş.	Şebeke Operasyonları Mühendisi

Yabancı Dil

English, Deutsch

Yayınlar

Koçakelçi, H., Benteşen Yakut, Y. (2024, Mayıs 22-23), “*Güç sistemlerinin kontrolünde FACTS-STATCOM donanımlarının kullanımı ve etkilerinin Simulink model üzerinde değerlendirilmesi*”, 2. Uluslararası Fen Bilimleri Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye

Özel İlgiler

Uzay, Bilim, Teknoloji, Futbol, Basketbol, Tenis

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ BENZERLİK BİLDİRİMİ FORMU

Öğrencinin Adı, Soyadı	Haşim KOÇAKELÇİ
Öğrenci No	23805009
Ana Bilim Dalı	Elektrik Tesisleri
Program Türü	Proje ☐ Yüksek Lisans ☒ Doktora ☐
Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	Doç. Dr. Yurdagül BENTEŞEN YAKUT
(Varsa) II. Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	
Tez Başlığı	GÜÇ SİSTEMLERİNİN KONTROLÜNDE FACTS - STATCOM DONANIMLARININ KULLANIMI VE ETKİLERİNİN SİMULINK MODEL ÜZERİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ
RAPOR BİLGİLERİ	
Raporlama Aşaması	Tez Savunma Sınavı Sonrası
Sayfa Sayısı	114
Raporlama Tarihi	04.07.2025
Benzerlik Oranı (%)	11

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmamın toplam 114 sayfalık kısmına ilişkin, 04/07/2025 tarihinde tez danışmanım tarafından turnitin isimli intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %11 olarak tespit edilmiştir.

Uygulanan filtrelemeler:

- ☐Başlangıç Bölümleri (Kabul ve Onay sayfası, Teşekkür sayfası, Özet/Abstract) hariç
☒Kaynaklar hariç
☐Alıntılar hariç/dâhil
☐Diğer (Açıklayınız)

Tezimin benzerlik oranı, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İntihal Raporu Uygulama Esaslarında belirtilen üst sınır benzerlik oranını aşmamaktadır. Tez benzerlik oranı üst sınır benzerlik oranının altında olsa dahi aksinin tespit edilmesi durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabul ettiğimi ve hukuki sonuçlarına razı olduğumu bildirir, gereğini arz ederim.

Öğrencinin Adı, Soyadı: Haşim KOÇAKELÇİ

Tarih: 10.07.2025

İmza:

Danışman Adı, Soyadı:

İmza:

Doç. Dr. Yurdagül BENTEŞEN YAKUT

Tarih:

Ana Bilim Dalı Başkanı Adı, Soyadı:

İmza:

Prof. Dr. Muhammed Bahaddin KURT

Tarih: