

**STATİK SENKRON KOMPAZATÖRLERİN
YAPAY SİNİR AĞLARI İLE KONTROLÜ**

Bilal COŞKUN

**Yüksek Lisans Tezi
Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Muammer GÖKBULUT
ŞUBAT-2015**

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STATİK SENKRON KOMPANZATÖRLERİN
YAPAY SINIR AĞLARI İLE KONTROLÜ

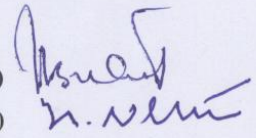
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bilal COŞKUN

112131105

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 19 Ocak 2015
Tezin Savunulduğu Tarih: 4 Şubat 2015

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Muammer GÖKBULUT (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Hüseyin ALTUN (F.Ü)
Doç. Dr. Servet TUNCER (F.Ü)



ŞUBAT-2015

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması boyunca; engin bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, değerli zamanını benden esirgemeyen hocam Sayın Prof. Dr. Muammer GÖKBULUT'a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Yine tez çalışması boyunca benden yardım ve ilgilerini esirgemeyen Doç. Dr. Resul ÇÖTELİ'ye ve Arş. Gör. Deniz KORKMAZ'a teşekkürü borç bilirim. Ayrıca her zaman desteğini gördüğüm aileme teşekkür ve sevgilerimi sunarım.

Bilal COŞKUN

ELAZIĞ - 2015

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
KISALTMALAR LİSTESİ	XIV
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması.....	3
1.2. Tezin amacı.....	9
1.3. Tezin yapısı	10
2. REAKTİF GÜÇ KOMPAZASYONU	12
2.1. Reaktif Güç Kompanzasyonunun Faydaları	13
2.2. Reaktif Güç Kompanzasyonu Temel Kavramlar ve Tanımlar	14
2.3. Kompanzasyon İçin Gerekli Kondansatör Gücünün Hesaplanması	15
2.3.1. Sistem İçin Gerekli Kondansatör Gücü Hesaplanması.....	16
2.4. Reaktif Güç Kompanzasyon Yöntemleri.....	16
2.4.1. Mekanik Anahtarlama Kondansatör ve Reaktör Grubu Kullanmak	17
2.4.2. Senkron Makine Kullanmak (Dinamik kompanzasyon)	17

2.4.3. Esnek AA İletim Sistemleri (FACTS) Kullanmak	19
2.4.3.1. Paralel Statik VAR Kompanzatörler	20
2.4.3.1.1. Tristör Kontrollü Reaktör (TCR).....	20
2.4.3.1.2. Tristör Anahtarlama Reaktör (TSR).....	22
2.4.3.1.3. Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC).....	23
2.4.3.1.4. Sabit Kapasitör Tristör Kontrollü Reaktör (FC-TCR).....	23
2.4.3.2. Statik Seri Kompanzatörler	24
2.4.3.2.1. Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC)	24
2.4.3.2.2. Tristör Anahtarlama Seri Kapasitör (TSSC)	25
2.4.3.2.3. Tristör Kontrollü Seri Reaktör (TCSR).....	25
2.4.3.2.4. Tristör Anahtarlama Seri Reaktör (TSSR)	26
2.4.3.2.5. Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC)	26
2.4.3.3. Birleştirilmiş Güç Akış Denetleyicisi.....	27
3. STATİK SENKRON KOMPANZATÖRLER (STATCOM).....	28
3.1. Darbe Genişlik Modülasyonu	29
3.2. Bir Fazlı Gerilim Kaynaklı Eviriciler	31
3.2.1. Yarım köprü evirici	31
3.2.2. Tam Köprü Evirici.....	31
3.3. Üç Fazlı İki Seviye Evirici	32
3.4. STATCOM'un Çalışma İlkesi.....	34

3.5. STATCOM V-I Karakteristiği	35
3.6. Statcom Kontrol Yöntemleri	37
3.6.1. Faz Açđ Denetim Yöntemi	39
3.6.2. Doğrudan Akım Denetim Yöntemi	39
3.6.2.1. Anlık Güç Teorisi	40
3.6.3. Sabit DA-Hat Gerilim Yöntemi.....	41
3.6.4. Dolaylı Akım Kontrol Yöntemi.....	42
4.YAPAY SİNİR AĞLARI İLE STATCOM DENETİMİ	44
4.1. Yapay Sinir Ağları.....	44
4.1.1. Biyolojik Sinir Sistemi	44
4.1.2. Yapay Sinir Ağı	45
4.1.3. Statik Hücre modeli	46
4.1.4. Çok katmanlı Ađ Yapısı	47
4.1.5. Geriye Yayılım Öğrenme Algoritması	47
4.2. Statcom Benzetimleri	49
4.2.1. Benzetim 1.....	50
4.2.1.1. PI Kontrolörlü STATCOM ile Reaktif Güç Denetimi	50
4.2.1.2.YSA Kontrolörlü STATCOM ile Reaktif güç Denetimi.....	52
4.2.2. Benzetim 2.....	54

4.2.2.1. Kontrollü Gerilim Kaynağı Tabanlı. STATCOM'un PI Kontrolör ile Reaktif Güç Denetimi	54
4.2.2.2. Kontrollü Gerilim Kaynağı Tabanlı STATCOM'un YSA Kontrolör ile Reaktif Güç Denetimi	57
4.2.3. Benzetim 3.....	60
4.2.3.1. Evirici Tabanlı STATCOM'un PI Kontrolörle Reaktif Güç Denetimi	60
4.2.3.2. Evirici Tabanlı STATCOM'un YSA Kontrolörle Reaktif Güç Denetimi.....	63
4.2.4. Benzetim 4.....	65
5. SONUÇLAR.....	67
6. KAYNAKLAR.....	68
7. ÖZGEÇMİŞ	72

ÖZET

Günümüzde enerji talebinin artması ve hassas cihazların kullanımının yaygınlaşması, enerji verimliliği ve güç kalitesi gibi kavramların ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Gerilim çökmeleri, yükselmeleri, reaktif güç ve harmonikler, karmaşık güç sistemlerinin en önemli kalite problemleridir. Bu problemleri en aza indirmek için reaktif güç kompanzasyonu yapmak etkin bir yöntemdir. Güç elektroniği elemanlarının gelişmesiyle birlikte geleneksel mekanik anahtarlama şönt reaktör/kondansatör gruplarıyla yapılan kompanzasyonun yerini evirici tabanlı statik kompanzatörler almaya başlamıştır. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri olarak söylenen bu cihazların başında Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM) gelmektedir.

Bu tez çalışmasında, şebekeden beslenen bir yüke paralel bağlanan STATCOM ile reaktif güç kompanzasyonu incelenmiştir. Evirici tabanlı STATCOM' un ürettiği gerilimin genliği kontrol edilerek reaktif güç kompanzasyonu yapılabilir. Dolayısıyla, reaktif güç kompanzasyonu için eviricinin DC besleme gerilimi ya da darbe genişlik modülasyonu indeksi kontrol edilmelidir. Bu tez çalışmasında, yapay sinir ağları (YSA) ile eviricinin modülasyon indeksi kontrol edilmek suretiyle reaktif güç kompanzasyonu yapılmıştır. YSA kontrollü STATCOM' un benzetim çalışmaları, hazırlanan MATLAB *.m dosyalarından ve ayrıca tasarlanan MATLAB/Simulink ortamından elde edilmiştir. YSA ve PI kontrollü STATCOM' un reaktif güç kompanzasyon performansını gösteren benzetim sonuçları, YSA kontrollü STATCOM' un etkinliğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Güç Kalitesi, Reaktif Güç Kompanzasyonu, STATCOM, PI kontrolör, YSA kontrolör.

SUMMARY

Neural Network Control of Static Synchronous Compensators

In last years, increasing energy demands and widespread use of precision equipment has led to concepts of energy efficiency and power quality. Voltage drops, surges, harmonics and reactive power are the most important quality problems of complex power system. To minimize this problem, reactive power compensation is an effective method. With developments in power electronic devices, inverter-based static compensators have become popular rather than conventional compensation techniques based on mechanically switched shunt reactor or capacitor groups. Static Synchronous Compensator (STATCOM) is the most prominent devices, known as Flexible AC Transmission Systems.

In this thesis, reactive power compensation is studied by using STATCOM which is connected to load fed from power system. Reactive power compensation can be accomplished by controlling the inverter voltage in the inverter based STATCOMs. Hence, DC supply voltage or pulse with modulation index should be controlled for the reactive power compensation. In this study, reactive power compensation is performed by controlling the modulation index with Neural Networks (NN). Simulation results of neural network based STATCOM are obtained from the prepared MATLAB *.m files and the designed MATLAB / Simulink environment also. Simulation results showing the reactive power compensation performance of PI and NN controlled STATCOM represent the effectiveness of the NN controlled STATCOM.

Keywords: Power Quality, Reactive Power Compensation, STATCOM, PI Controller, Neural Network Controller.

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 Endüktif Devrede Akım Ve Gerilim Arasındaki İlişki	12
Şekil 2.2 Kapasitif Devrede Akımlar Ve Gerilimler Arasındaki İlişki	13
Şekil 2.3 Aktif, Reaktif Ve Görünür Akımların Vektörel Gösterimi.....	14
Şekil 2.4 Görünür Gücün Güç Faktörüne Göre Değişimi	15
Şekil 2.5 Mekanik Anahtarlama Kompanzasyon Sistemi.....	17
Şekil 2.6 Senkron Makine Prensip Şeması	18
Şekil 2.7 Senkron Kompanzatör V Eğrisi	19
Şekil 2.8 Statik Var Kompanzatör V-I Karakteristiği	20
Şekil 2.9 a) TCR (Tristör Kontrollü Reaktör) Prensip Şeması	22
b) (α) 'ya Göre Açısına Göre Akımın Değişimi	22
Şekil 2.10 Tristör Anahtarlama Reaktör (TSR) Prensip Şeması	22
Şekil 2.11 Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC) Prensip Şeması	23
Şekil 2.12 Sabit Kapasitör Tristör Kontrollü Reaktör (FC-TCR) Prensip Şeması.....	24
Şekil 2.13 Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) Prensip Şeması	25
Şekil 2.14 Sırasıyla Devreye Giren Seri Kapasitör (FC-TCR) Prensip Şeması.....	25
Şekil 2.15 Tristör Kontrollü Seri Reaktör (TCSR) Prensip Şeması	26
Şekil 2.16 Tristör Anahtarlama Seri Reaktör (TSSR) Prensip Şeması	26
Şekil 2.17 Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC) Prensip Şeması	27
Şekil 2.18 Birleştirilmiş Güç Akış Denetleyicisi Prensip Şeması.....	27
Şekil 3.1 Statik Senkron Kompanzatör Şebeke Bağlantısı Blok Diyagram.....	29
Şekil 3.2 Bir Faz Dalga Genişlik Modülasyonu	30
(a) Sinüzoidal Dalga Karşılaştırma	30

(b) Anahtarlama Sinyali Üretme	30
Şekil 3.3 Tek Faz Yarım Köprü Evirici	31
(a) Yarım Köprü Evirici Prensip Şeması.....	31
(b) Yarım Köprü Evirici Gerilim Çıkış Grafiği.....	31
Şekil 3.4 Tek Faz Tam Köprü Evirici	32
(a) Tam Köprü Evirici Prensip Şeması	32
(b) Tam Köprü Evirici Gerilim Çıkış Grafiği.....	32
Şekil 3.5 Üç Faz İki Seviye Evirici Prensip Şeması	32
Şekil 3.6 Üç Faz Sinüs Dalga İle Üçgen Dalga Karşılaştırma	33
b) V_{ab} Gerilimi	33
c) V_{bc} Gerilimi	33
d) V_{ac} Gerilimi	33
Şekil 3.7 Gerilim Kaynaklı Evirici Tabanlı STATCOM'un Şebeke Bağlantısı	34
Şekil 3.8 STATCOM V-I Karakteristiği	35
Şekil 3.9 Kayıplı Sistem Fazör Diyagramı.....	36
a) Kapasitif Mod.....	36
b) Endüktif Mod	36
Şekil 3.10 Kayıpsız Sistem Fazör Diyagramı	36
a) Endüktif Mod	36
b) Bekleme Modu	36
c) Kapasitif Mod	36
Şekil 3.11 STATCOM Farklı Çalışma Modlarında Şebeke ve STATCOM Gerilimleri Arasındaki İlişki	37
a) Endüktif Çalışma Modu	37
b) Bekleme Modu	37

c) Kapasitif Çalışma Modu	37
Şekil 3.12 Faz Açık Denetim Yöntemi Kontrol Şeması	39
Şekil 3.13 Doğrudan Akım Denetimi Kontrol Şeması	40
Şekil 3.14 Sabit DA- Hat Yöntemi Prensip Şeması	42
Şekil 3.15 Dolaylı Akım Kontrol Yöntemi Prensip Şeması	43
Şekil 4.1 Biyolojik Sinir Hücresi Yapısı	44
Şekil 4.2 Biyolojik Sinir Sistemi Katman Yapısı	45
Şekil 4.3 Yapay Hücre Modeli	46
Şekil 4.4 Statik Hücre Modeli	46
Şekil 4.5 İleri Beslemeli Üç Katmanlı YSA Sinyal Akış Şeması	47
Şekil 4.6 STATCOM Eşdeğer Devresi	49
Şekil 4.7 STATCOM PI Kontrolör İle Denetimi Blok Diyagramı	51
Şekil 4.8 PI Kontrolörlü STATCOM Sistem Akımları	51
a) Şebekeden Çekilen Reaktif Akımın Değişimi	51
b) STATCOM Çıkış Akımı	51
c) Şebekeden Çekilen Üç Faz Akımların Değişimi	51
Şekil 4.9 STATCOM'un YSA İle Denetimi Blok Diyagramı	52
Şekil 4.10 STATCOM YSA Kontrolör İle Denetimi Blok Diyagramı	53
a) Şebekeden Çekilen Reaktif Akımın Değişimi	53
b) STATCOM Çıkış Akımı	53
c) Şebekeden Çekilen Üç Faz Akımların Değişimi	53
Şekil 4.11 STATCOM Şebeke Bağlantısı MATLAB/Simulink Modeli.....	54
Şekil 4.12 STATCOM Bloğu İyapısı MATLAB/Simulink Modeli.....	55
Şekil 4.13 STATCOM Denetleyici Bloğu İyapısı MATLAB/Simulink Modeli	55
Şekil 4.14 PI Kontrolörlü STATCOM Sistem Akımları.....	56
a) Şebekeden Çekilen Reaktif Akımın Değişimi	56

b) STATCOM Çıkış Akımı	56
c) Şebekeden Çekilen Üç Faz Akımlarının Değişimi.....	56
Şekil 4.15 YSA Denetleyici Bloğu MATLAB/Simulink Modeli	57
Şekil 4.16 YSA Kontrolör MATLAB/Simulink Modeli	58
Şekil 4.17 STATCOM YSA Kontrolör İle Denetimi Blok Diyagramı	59
a) Şebekeden Çekilen Reaktif Akımın Değişimi	59
b) STATCOM Çıkış Akımı	59
c) Şebekeden Çekilen Üç Faz Akımların Değişimi	59
Şekil 4.18 PI Kontrolörlü Evirici Tabanlı STATCOM MATLAB/Simulink Modeli.....	60
Şekil 4.19 PI Kontrolörlü STATCOM Denetleyici bloğu MATLAB/Simulink Modeli	61
Şekil 4.20 PI Kontrolörlü STATCOM Sistem Akımları	62
a)Şebekeden Çekilen Reaktif Akımın Değişimi	62
b) STATCOM Çıkış Akımı	62
c) Şebekeden Çekilen Üç Faz Akımların Değişimi	62
Şekil 4.21 YSA Denetleyici Bloğu MATLAB/Simulink Modeli	63
Şekil 4.22 YSA Kontrolörlü STATCOM Sistem Akımları	64
a)Şebekeden Çekilen Reaktif Akımın Değişimi	64
b) STATCOM Çıkış Akımı	64
c) Şebekeden Çekilen Yük Akımların Değişimi	64
Şekil 4.23 PI Kontrolörlü STATCOM Referans Akımı İzlemesi	65
a) -15 A'den +15 A'e Geçişte STATCOM'un Referans Akımı İzlemesi	65
b) STATCOM'un Bir Faz Akım Ve Gerilimi Arasındaki Faz Farkı	65
c) Referans Akım İzlemede Modülasyon İndeksinin Değişimi.....	65
d) STATCOM Çıkış Akımlarının Değişimi	65
Şekil 4.24 YSA Kontrolörlü STATCOM Referans Akımı İzlemesi	66
a) -15 A'den +15 A'e Geçişte STATCOM'un Referans Akımı İzlemesi	66

b) STATCOM'un Bir Faz Akım Ve Gerilimi Arasındaki Faz Farkı	66
c) Referans Akım İzlemede Modülasyon İndeksinin Değişimi.....	66
d) STATCOM Çıkış Akımlarının Değişimi	66

KISALTMALAR LİSTESİ

AA	: Alternatif Akım
DA	: Doğru Akım
YSA	: Yapay Sinir Ağı
PI	: İntegral+Oransal
VSC	: Gerilim Kaynaklı Evirici
FACTS	: Esnek A.C İletim Sistemi
STATCOM	: Statik Senkron Kompanzatör
SVC	: Statik Var Kompanzatör
TSC	: Tristör Anahtarlama Kapasitör
FC-TCR	: Sabit Kapasitör- Tristör Kontrollü Reaktör
TCSC	: Tristör Kontrollü Seri Kondansatör
TSSC	: Tristör Anahtarlama Seri Kapasitör
TCSR	: Tristör Kontrollü Seri Reaktör
TSSR	: Tristör Anahtarlama Seri Reaktör
SSSC	: Statik Senkron Seri Kompanzatör
NFC	: Nöro-Fuzzy Denetleyici
UPFC	: Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü
IGBT	: Kapıdan İzoleli Bipolar Transistör
GTO	: Kapıdan Tıkamalı Tristör
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
FLC	: Fuzzy Logic Denetleyici

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle enerji talebi her geçen gün artmakta, elektrik enerjisi üretmek amaçlı kullanılan fosil yakıt rezervleri günden güne azalmaktadır. Bununla beraber güç sistemleri daha karmaşık hal almaktadır. Karmaşıklaşan güç sistemini daha kararlı sınırlar içinde çalıştırmak yani gerilim çökme ve yükselmeleri, flikerler, harmonikler gibi güç sisteminin problemlerini çözmek enerji üretim, iletim, dağıtım maliyetlerini düşürmek hatların taşıma kapasitelerini arttırmak, dağıtım sistemlerinde kayıp enerjiyi en aza indirmek ve var olan enerji kaynaklarını verimli kullanmak amacıyla çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. İletim ve dağıtım sistemlerinde bu problemleri en aza indirmek ve enerjiyi verimli kullanmak için geliştirilen en etkin yöntemlerden biri reaktif güç kompanzasyonu yapmaktır [1,2].

Dağıtım sistemlerinde sabit mekanik anahtarlamalı reaktör-kondansatör grupları uzun yıllar reaktif güç kompanzasyonu amacıyla kullanılmıştır. Cevap sürelerinin kısa olmaması ve lineer olmayan yüklerde etkili olmaması bu tekniğin dezavantajlarından. Yarı iletken teknolojisinin gelişmesiyle birlikte tristör kontrollü reaktör (TCR), tristör anahtarlamalı kondansatör (TSC) ve tristör kontrollü statik VAR kompanzatör (TCSVC) yöntemleri, geleneksel yöntemlerin yerini almaya başlamıştır. Yukarıda bahsedilen birinci nesil tristör tabanlı kompanzasyon Statik VAR Kompanzatörleri (SVC) yerine, yeni nesil olarak da ifade edilen evirici tabanlı Statik Senkron Kompanzatörler (STATCOM), etkin bir kompanzasyon yöntemi olmuştur [3].

STATCOM' larda temel amaç, reaktif güç üretmek ve/veya tüketmek için eviricinin, anahtarlama ve kontrol devreleri yardımıyla şebeke gerilimi ile aynı frekansta fakat farklı genlikte ve gerektiğinde farklı fazda ayarlanabilir bir gerilim üretmesini sağlamaktır. Dolayısıyla, ark fırınları gibi hızlı değişen yüklerde güç faktörünü bire yakın tutmak için ihtiyaç duyulan reaktif güç ihtiyacını hızlı bir şekilde karşılayabilmek, bu yüklerin şebekede oluşturacağı titreşimleri yok etmek ve simetrisizlikleri dengelemek açısından STATCOM' ların anahtarlama ve kontrol yöntemleri önem kazanmaktadır [4,5].

Elektrik tesislerinde kullanılan manyetik ve statik alanla çalışan alıcılar aktif gücün yanında reaktif güç de çekerler. Motorlar, balastlı lambalar, transformatörler, bobinler, kaynak makinaları endüktif (geri fazlı akım) reaktif yük çekerken, ups, boşta gerilim altında havai hat ve kablolar kapasitif (ileri fazlı akım) reaktif yük çekerler. Bunların

yanında reaktif güçten tamamen vazgeçmek ya da ortadan kaldırmak diye bir şey söz konusu değildir. Çünkü yukarıda bahsedilen elektrodinamik özellikli motor, balast, generatör, trafo, bobinli alıcılar ve cihazlar gerekli manyetik alanı oluşturmak için şebekeden mıknatıslanma akımı çekerler. İş yapan faydalı gücün yanında reaktif güce de ihtiyaç duyarlar. Reaktif güç mıknatıslanma anında şebekeden yüke doğruyken, mıknatıslanma ortadan kalkarken yükten şebekeye doğrudur. Reaktif güç şebekeyle yük arasında osilasyon yapar [1,2]. Bu reaktif güç, iletim hatlarında, kablolarda hattın meşgul edilmesine aktif akım taşıma kapasitelerinin düşmesine sebep olur. Reaktif enerji yüzünden hattın meşgul edilmesini önlemek aktif güç taşıma kapasitesini arttırmak için, sistemin ihtiyacı olan reaktif gücü şebekeden karşılamak yerine bu gücü şebekeye verebilecek sistemler kurmak hem ekonomik hem de diğer avantajları sebebiyle kullanımı daha uygundur [2].

Geleneksel olarak reaktif güç kontrolü mekanik olarak anahtarlanan, şebekeye paralel bağlı kapasitör ve/veya reaktörler grupları ile sağlanır. Bu sistem yavaş değişen yük durumlarında şebeke voltajını istenen seviyede tutmada ve güç faktörünü düzeltmede yardım eder. Fakat hızlı değişen yükler için bu sistem güç faktörünü düzeltmede ve gerilim regülasyonunu sağlamada yetersiz kalır. Sistemi kararlı durum sınırlarına yakın çalıştırmak için hızlı bir reaktif güç kompanzasyonuna gereksinim vardır. İstenen bu özellikler Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) cihazları tarafından sağlanabilir [3]. Bu cihazlar arasında ilk olarak Tristör kontrollü reaktör (TCR), Tristör anahtarlama kapasitör (TSC) ve Tristör kontrollü statik var kompanzatör (TCSVC) gibi tristör tabanlı cihazlar kullanılmıştır [6]. Ancak SVC (Statik Var Kompanzatör) sistemleri reaktif güç problemlerini çözerken harmonik akım problemlerine sebep olurlar. Bu durum, ek maliyet ve büyük boyutlu sabit paralel filtreler veya özel transformatör bağlantıları gerektirmektedir [7]. Günümüzde ise senkron kompanzatör mantığında çalışan fakat reaktif güç üretme-tüketme işini reaktör ve kapasitör grupları kullanmadan GTO, IGBT, IGCT gibi kontrollü anahtarların uygun şekilde tetiklenmesiyle gerçekleştiren STATCOM tarafından etkili bir şekilde sağlanır.

STATCOM (Statik Senkron Kompanzatör) genel olarak bir DA kaynaktan (genellikle kondansatör) beslenen bir evirici tarafından DA enerjii AA'ya çeviren bunu bir reaktans üzerinden şebekeye enjekte eden cihazdır. STATCOM reaktif gücü üretebilme ve tüketebilme, ayrıca elektrik güç sisteminin özel parametrelerinin kontrolünü yapabilmesi

için çıkış değerlerini değiştirebilme yeteneğine sahip şönt bağlı bir reaktif güç ekipmanıdır [3].

1.1 Literatür Araştırması

STATCOM'un güç sisteminin problemlerini çözmedeki başarısından dolayı farklı kontrol ve güç sistemi yapılarına sahip birçok çalışma ve uygulama yapılmıştır. FACTS cihazlarının geleneksel reaktif güç kompanzasyonu yapan cihazlara göre daha iyi cevap hızlarının olmasından dolayı son yıllarda kullanımları artmıştır. Yapılan bir çalışmada FACTS cihazlarından olan STATCOM'un kontrolü için DGM (Darbe Genişlik Modülasyonu) tekniği kullanılmış ve benzetim MATLAB/Simulink ortamında yapılmış, Bara geriliminin genliği değiştirilerek STATCOM'un dinamik cevabı gözlemlenmiştir. Benzetim sonuçlarına göre STATCOM ani güç değişimlerine göre cevabının çok hızlı olduğu ve sistem için gerekli olan reaktif gücü kısa sürede sağladığı görülmüştür [9].

[10]'da, yük dengeleme ve güç katsayısı doğrulaması için STATCOM kullanılmıştır. Üç bacaklı VSC kullanılan STATCOM için birkaç kontrol yöntemi önerilmiştir. Benzetim için PSCAD programı kullanılmıştır. Aynı sistem için histeresis akım kontrolü metodu ve DGM metodu kullanılmış. Yük dengeleme ve güç katsayısı düzeltimi için benzetimler yapılmış ve karşılaştırılmıştır. İki farklı evirici yapısı kullanılmıştır. Bunlar üç bacaklı evirici ve H-köprü eviricidir. DGM metodu için uygun anahtarlama frekansı ve PI katsayıları uygun seçildiğinde, histeresis metodu için ise uygun histeresis band seçilirse dengesiz yükte akım ve gerilim dalga formları dengeli yükteki gibi kalır. Fakat sözü edilen kontrolör parametresini ve anahtarlama frekansını seçmenin bazen çok zor olduğu görülmüştür [10].

[11]'de, Dengesiz bir dağıtım sisteminde gerilim çökmeleri için D-STATCOM prototipi diyazn edilmiş ve yaygın bir şekilde kullanılan SVC (Statik Var Kompanzatör) yerine kullanılmıştır. DGM tekniği iki seviye VSC kontrol şemasına uygulanmıştır. Benzetim MATLAB/Simulink ortamında yapılmıştır. Benzetim sonuçlarına göre D-STATCOM gerilim çökmelerini hafiflettiği gibi güç kalitesini de geliştirmiştir [11].

YSA'nın, statik senkron güç kompanzatörlerinin kontrolünde kullanımına yönelik sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Yapılan bir çalışmada D-STATCOM'un denetimi için geleneksel PI kontrolör yerine üç katmanlı ileri beslemeli YSA kontrolör kullanılmıştır. Yük akımı ve DA bara gerilimi izlenmiş, buna göre YSA blokları referans kompanzasyon akımlarından güç devresi için kontrol sinyalleri üretmiştir. Güç sistemine

D-STATCOM vasıtasıyla kompanzasyon akımı enjekte edilmiştir. Bunun sonucunda sistem akımı sistem gerilimiyle aynı fazda ve yaklaşık sinüs formunda olmuştur. Benzetim sonuçlarına göre önerilen kontrol yönteminin etkili olduğu gözlemlenmiştir [12].

Bu alanda yapılan başka bir çalışmada STATCOM'un DA denetiminde YSA-PI kontrolör kullanılarak denetimi yapılmıştır. YSA-PI denetleyicisinin kullanılmasıyla; matematiksel işlemlere gerek kalmamış ve YSA'nın öğrenbilme ve genelleme yapabilme yeteneği ile doğrusal olmayan, uyarlanabilir parametrelili ve dayanıklı bir PI denetleyici elde edilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre YSA-PI denetimli STATCOM'un iletim hattına müdahalesi literatüre uygun bulunmuştur [13].

Güç kontrol merkezlerinde, gerilim ve reaktif güç kontrolü amacıyla operatörlere gerçek zamanlı çözüm için geriye yayımlı YSA denetimli STATCOM önerilmiş, EHV Hindistan Güç Sistemi için pratik olarak eğitilmiş ve test edilmiştir. Sonuçlara göre enerji kontrol merkezlerinde bu sistem operatörlere, yardımcı karar verme aracı olarak kullanılabilirliği görülmüştür [14].

Geleneksel kontrol yöntemleri temelli D-STATCOM optimum performansı dizayn edildikleri sınırlı çalışma aralığında sağlar. Buna rağmen FLC (Fuzzy Logic Controller) ve YSA kontrolörler daha güçlü ve geniş çalışma aralığı sağlarlar. YSA ve PI kontrolörlerin güç faktörü düzeltimi için performans karşılaştırması yapılmış ve YSA kontrolör sınırlı çalışma aralığında iyi sonuç veren PI kontrolörden daha iyi bulunmuştur. Güç faktörü düzeltmede yük değişikliği durumunda DA baradaki gerilim salınımları azalmış tepe değerleri düşmüştür. Sistemin geçici rejimi YSA tabanlı D-STATCOM ile daha da iyileşmiştir [15].

Başka bir çalışmada, çok makinalı güç sisteminde kullanılan STATCOM için geleneksel PI kontroller yerine NFC (Neuro-Fuzzy Kontrolör) önerilmiş ve birkaç test yapılmış on baralı çok makineli güç sisteminde adım adım değiştirilen referans gerilimini izlemeye önerilen NFC geleneksel PI kontrolörden daha hızlı davranmıştır. Daha sonra 100 ms boyunca baralarda üç faz kısa devresi yapılmış kısa devreden sonra generatör sistemden ayrılmış hata temizlenmiş generatör 50 ms sonra tekrar devreye sokulmuş ve NF denetleyicinin kısa devre süresince geçici rejim performansının çok daha etkili olduğu görülmüştür. Başka bir testte çok makinalı enerji sistemine reaktif enerji STATCOM tarafından enjekte edilmiş ve iki kontrolörün etkinliği karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları göstermiştir ki NFC STATCOM sisteme daha az reaktif enerji enjekte ederek osilasyonları sömümlenmiş, evirici anahtarlarının daha az akım çekmesini sağlamıştır [16].

[17]'de, STATCOM NN tabanlı tanımlanmış ve güç sisteminin üç faz kısa devre olması durumunda geçici rejimin iyileştirilmesi için kullanılmıştır. Burada VSC (gerilim kaynaklı evirici)'li STATCOM ve çok katmanlı perception (algılayıcı) ve geriye yayılım algoritması kullanılmıştır. YSA ile kontrol edilen STATCOM ve YSA'sız STATCOM benzetim sonuçları göstermiştir ki YSA ile kontrol edilen STATCOM'un kısa devre sonrası güç açısı ve hattın gücü daha stabil kalmıştır [17].

Diğer bir çalışmada, çok katmanlı algılayıcı YSA kontrolörlü STATCOM ile geleneksel PI ve PID kontrolörlü STATCOM karşılaştırılmıştır. Çok katmanlı algılayıcı (MLP) güç sistemlerinin problemlerini çözmede örneğin planlama, kontrol, analiz, koruma dizaynı, arıza tespiti, yük tahmini özellikle son üçünde oldukça popülerdir. YSA'nın eğitiminde yani ağırlıkların yenilenmesinde süpervizörlü öğrenme kullanılmıştır. Bu yöntem avantajlarından dolayı bilinen bir yöntemdir. Bu üç farklı kontrolörlü STATCOM maximum aşma, oturma zamanı, hata miktarı kriterleri için MATLAB/Simulink'de 230 kV 500 km uzunluğunda bir sistemin benzetimi yapılmış. Benzetim sonuçlarına göre akım enjekte ederken çok katmanlı algılayıcıya sahip YSA kontrolörlü STATCOM, PI ve PID kontrolörlü STATCOM'dan daha düşük aşmaya sebep olmuş ve yerleşme süresinin daha kısa sürdüğü görülmüştür [18].

[19]'da, STATCOM güç kompanzasyonu ve gerilim kontrolü yapmak amacıyla rüzgâr türbinine sahip bir şebekeye bağlanmıştır. Rüzgar türbini tarafından çekilen reaktif güç kaynaklı voltaj sapmalarını engellemesi öngörülmüştür. Benzetim çalışmaları sonrası YSA kontrollü STATCOM çekilen reaktif güç kaynaklı olası gerilim düşmelerini engellemek için gerekli olan hızlı gerilim desteğini sağlamıştır. Sonraki aşamada YSA'nın eğitimi sonrası baralara herhangi bir andaki, herhangi bir değerdeki rezistif yüklerin bağlanması durumunda ki gerilim değerini tahmin edebilmiştir [19].

STATCOM'un tek başına (off-line) çalışan rüzgâr santrali sisteminde kullanılması önerilen bu çalışmada, adaptif yapay çıkartım devresi yük akımlarından referans akım üretmek için kullanılmıştır. Önerilen kontrol yönteminin basitlik ve güvenilirliğinden faydalanmak amaçlanmıştır. NN eğitimi Levenberg-Marquardt geriye yayılım algoritması ile sağlanmıştır. Sisteme ilişkin reaktif güç üretme senaryosu şöyledir. Sistem 25 kW rezistif yüklerle birim güç faktöründe işletmeye alınmış bir saniye sonra lineer olmayan yük aniden sisteme bağlanmıştır. Daha sonra 1.4. sn'de lineer olmayan yükün sistemle bağlantısı kesilmiştir. Lineer olmayan yük modeli için 3 fazlı diyot anahtarlama $R=2.5$ ohm $L=20$ mH R-L yük oluşturulmuştur. Bu süre boyunca STATCOM nonlineer yük

tarafından çekilen reaktif yükü yaklaşık olarak kompanze etmiştir. Daha sonra 1.8-2.2 sn'leri arası boyunca 55 kW 0.75 geri güç faktörlü yük sisteme yüklemiş ve STATCOM sisteme yaklaşık 50 kVAr güç sisteme enjekte etmiştir. Sonuçlar kullanılan kontrol stratejisinin esneklik ve uygulanabilirliği doğrulanmıştır [20].

[21]'de, Güç kalitesi problemlerinden olan gerilim çökmesi olayı YSA ile tespit edilmiş, bu elde edilen verilerle YSA eğitilmiştir. YSA'lı kontrol bloğuyla kontrol edilen D-STATCOM ile gerilim çökmesinin hafifletilmesi amaçlanmıştır. Farklı sistem ve işletme durumları için YSA'lı D-STATCOM benzetimi yapılmıştır. Benzetim senaryosuna göre normal işletme durumundaki (sağlıklı durum) sistem YSA için hedef gösterilmiş ve sonrasında üç fazlı asenkron motor devreye alınarak sistem yükü bu şekilde arttırılmıştır. Gerilim çökmesi normal işletme gerilimine göre %30 oranında olmuştur. Sonra D-STATCOM'lu sistem için aynı şartlarda yapılan benzetim sonucuna göre gerilim %20 gibi bir oranda düşmüş ve 20 ms içinde gerilim kendini toparlayarak referans gerilime uyum sağlamıştır [21].

Yapılan diğer bir çalışma da, STATCOM'un ortak bağlantı noktasına enjekte ettiği akımın, Toplam harmonik bozulmasının (THD) düşürülmesi amaçlanmıştır. Bu model ayrıca DA kapasitör, gerilim dengesizliği ve şebeke harmoniklerini de içine alır. Yapılan çalışmada adaptif yapay kontrolör tasarımı ve performansı VSC tabanlı STATCOM için açıklanmıştır. Gerilim regülasyonu Ma'nın optimizasyonu harmonik eliminasyonu ise SHEM tekniğiyle yapılmış. Test devresi iki seviyeli üç bacaklı VSC'dir. VSC için tetikleme palsleri adaptif nöro kontrolör tarafından üretilmiş, geri besleme devresi geleneksel VSC devresinden alınmıştır. Yani üç fazlı VSC çıkış gerilimi YSA kontrolöre geri beslenmiş bu şekilde tetikleme palslerini YSA kontrolör üretmiştir. Benzetim sonuçları göstermiştir ki YSA kontrollü VSC YSA'sız olan VSC tabanlı STATCOM'dan daha başarılı olmuş, akım ve gerilim harmoniklerini büyük oranda engellemiştir. Bu yöntem üzerinde hafif değişiklikler yaparak reaktif güç kompanzasyonu amacıyla da uygulanabilir [22].

[23]'de, D-STATCOM gerilim çökmelerini ve harmonikleri azaltmak için kullanılmış YSA kontrollü tabanlı D-STATCOM MATLAB/Simulink ortamında benzetimi yapılmıştır. Benzetim sonuçlarını doğrulamak için ayrıca bir fazlı D-STATCOM gerçekleştirilmiş ve benzetim sonuçlarıyla karşılaştırması yapılmıştır. YSA'lı bu kontrol sisteminde üç katmanlı yapı kullanılmıştır. Girişler V_a, V_b, V_c çıkışlar V_a^*, V_b^*, V_c^* dir. Çıkışlar DGM generatörüne gönderilmeden önce bir taşıyıcı sinyal ile karşılaştırılmıştır.

Giriş ağırlıkları YSA eğitilmiş, eğitim kriteri olarak Mean Square Error fonksiyonu kullanılmıştır. Senaryo şu şekildedir. 0 ile 0.05 sn arası kritik olmayan güç dağıtım sistemine bağlıdır. 0.05. sn'den sonra kritik yük devreye alınmış ve gerilim %50 oranında düşmüştür. 0.06 ile 0.14 sn'leri arası YSA kontrollü D-STATCOM gerekli gerilimi sisteme enjekte ederek gerilim çökme olayını engellemiştir. Ayrıca YSA'lı D-STATCOM Toplam harmonik bozulma (THD)'sı 0.41 iken, D-STATCOM'suz sistemin geriliminin Toplam harmonik bozulması %4.96 olmuştur. Benzetim sonuçlarını doğrulamak için gerçekleştirilen bir fazlı D-STATCOM prototipi benzetim sonuçlarıyla uygun sonuçlar vermiştir [23].

Dağıtım sistemlerinde güç kalitesini arttırmak için yapılan çalışmalar giderek artmaktadır. Geleneksel olarak sabit mekanik anahtarlama reaktör / kapasitör bankları ve statik VAr kompanzatörler dağıtım sistemlerinde güç kalitesi sorunlarını çözmek için kullanılmıştır. Son yıllarda ise geleneksel kompanzatörlerden cevap hızları daha iyi olan evirici tabanlı kompanzatör kullanımı yaygınlaşmıştır. Evirici tabanlı D-STATCOM bu işlem için kullanılır. D-STATCOM genellikle sabit parametrelili PI kontrolörler tarafından kontrol edilir. Lineer olmayan yapılarda arzu edilen performansı sabit parametrelili PI kontrollü D-STATCOM sağlayamaz. Bu çalışmada Fuzzy-PI kontrollü D-STATCOM lineer olmayan ve dayanıklı olan yapısından dolayı önerilmiştir. Akımlar $dq0$ eksen takımlarına dönüşümü yapıldıktan sonra akım kontrolü yapılmıştır. MATLAB/Simulink ortamında Fuzzy-PI kontrollü D-STATCOM'un benzetimi yapılmıştır. Benzetim sonuçları geleneksel PI kontrolörlü D-STATCOM ile karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları göstermiştir ki önerilen Fuzzy-PI akım kontrollü D-STATCOM geleneksel PI kontrollü D-STATCOM'a göre referans reaktif akımın değişmesi durumunda daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca Fuzzy-PI kontrolör daha kolay dizayn edilmiş kontrol edilen sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duyulmamıştır. Sonuç olarak bu özellikler Fuzzy-PI kontrolörü daha cazip hale getirir [24].

İletim hatları kendi başlarına reaktif güç kaynaklarıdır. Hat açık olduğunda veya yüksüz olduğunda hat bir kapasitör olarak davranır. FACTS aygıtları reaktif güç sağlayan aygıtlar olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada YSA kontrollü VSC tabanlı STATCOM uzun iletim hattının gerilim profilini sabit tutmak ve hat boyunca ortaya çıkan reaktif gücü kontrol etmek için kullanılmıştır. Bunun için laboratuvar ortamında 220kV 100 MVA'lık 750 km hat modeli oluşturulmuştur. Ayrıca gerçekleştirilen sistemin MATLAB ortamında benzetimi yapılmıştır. Gerçek sonuçlar ve benzetim sonuçları YSA kontrollü

STATCOM'un, PI kontrolörlü STATCOM'dan daha hızlı gerilim regülasyonunu yaptığı görülmüştür. Yük değişimlerine karşı etkin bir biçimde reaktif güç kompanzasyonunu sağlamıştır. Ayrıca H-köprü VSC topolojisi üç seviyeli VSC tabanlı STATCOM'a göre harmonik bozulması daha az olmuştur [25].

[26]'da, Güç dağıtım sisteminde gerilim çökmelerini önlemek için kaskat H-köprü çok seviye eviricili D-TATCOM kullanılmıştır. Benzetim MATLAB/Simulink ortamında yapılmıştır. Birinci durumda D-STATCOM olmadan yüklerin devreye girmesi halinde hat gerilimi %30 oranında düşmüştür. YSA kontrolörlü D-STATCOM kullanılarak aynı senaryo tekrarlandığında hat gerilimindeki çökme yaklaşık olarak %98 oranında giderilmiştir. Toplam harmonik bozulma kabul edilebilir limitler (IEEE'ye göre %5'ten az olması gerekli) arasında kalmıştır [26].

Diğer bir çalışmada, LMS algoritması üzerinde çalışan referans akım çıkarıcı tabanlı YSA (Yapay Sinir Ağı) ile ilgilidir. YSA yük akımının bileşenlerinden gerçek pozitif sıralı akımlarını çıkarmak için kullanılmıştır. DA gerilimini sabit tutmak için PI kontrolör ve aynı şekilde gerilim regülasyonu içinde başka bir PI kontrolör kullanılmıştır. Nötr akımını kompanze etmek amacıyla dört telli VSC, DA bara için ise kapasitör kullanılmıştır. Bu gibi sistemlerin performansı D-STATCOM'u kontrol etmek için çıkarılan referans akımların nasıl çıkarıldığına bağlıdır. Referans akım tahmini, adaline vasıtasıyla online ağırlık hesaplamak için LMS algoritmasını kullanır. Bu yüzden önerilen kontrol yönteminin ani yük değişimlerine karşı etkinliğini ispatlar. Ayrıca çıkartım tabanlı YSA ile endirekt akım kontrolü LC filtreden kaynaklı gecikmeler için herhangi bir ileri beslemeli kompanzasyon gerektirmemiştir [27].

[28]'de, Nonlinear ve dayanıklı kontrolör olmasından dolayı D-STATCOM'un kontrolü Nöro-Fuzzy Kontrolör (NFC) ile yapılmıştır. Burada üç seviye H-köprü evirici yapısı kurulmuştur. Reaktif güç kompanzasyonu için kullanılan D-STATCOM'un kontrolü için faz açısı kontrol yöntemi kullanılmıştır. Kontrol algoritması MATLAB/Simulink ortamında hazırlanmış sonrasında DS1103 kontrolör kartına yüklenmiştir. Mandami tipinde NFC D-STATCOM'un reaktif güç kompanzasyonu için dizayn edilmiştir. Önerilen kontrol yönteminin doğruluğu değişken reaktif güç talebiyle denenmiştir. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki önerilen kontrolör değişik yük durumlarında çok iyi performans göstermiş, çok hızlı cevap vermiş ve tam kompanzasyon yapmıştır [28].

Üç faz dört telli dağıtım sisteminde güç faktörünü geliştirmek için yapılan çalışmada, YSA kontrollü D-STATCOM dSPACE işlemcisiyle uygulanmıştır. Üç bacaklı Gerilim

Kaynaklı Evirici (VSC) tabanlı D-STATCOM ile zig-zag bağılı transformatör reaktif gerilim regülasyonu, reaktif güç kompanzasyonu, güç faktörü düzeltme, harmonik eliminasyonu, ve nötr akımı kompanzasyonu için kullanılmıştır. Önerilen sistemin doğruluğu MATLAB/Simulink ortamında, Power System Toolbox kullanılarak benzetimi yapılmıştır. Adaline (Adaptif Lineer Element) tabanlı Yapay Sinir Ağı VSC'nin kontrolü için uygulanmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki önerilen bu kontrol tekniği, diğer kontrol yöntemleriyle benzer olmasına rağmen uygulama kolaylığı, cevap hızının daha iyi olması ve yaklaşık sıfır faz kayması sağlamış olması gibi avantajları vardır [29].

1.2. Tezin Amacı

Bu tezin amacı Yapay Sinir Ağıyla kontrolü sağlanan, STATCOM (Statik Senkron Kompanzatör) kullanarak şebekenin ihtiyacı olan reaktif gücü üretmek yani reaktif güç kompanzasyonu yapmaktır.

Reaktif güç kompanzasyonu amacıyla kullanılan STATCOM'un tasarımı önce MATLAB *.m ortamında, daha sonra MATLAB/Simulink ortamında Powersim Blokları kullanılarak yapılmıştır. Yapılan benzetim senaryosuna göre alçak gerilim şebekesine bağlı geri fazlı endüktif yük ile STATCOM şebekeye paralel bağlanmıştır. Yükün şebekeden çektiği reaktif akımının STATCOM tarafından karşılanması amaçlanmıştır. STATCOM devrede değilken ve devreye girdikten sonra sistem akımlarının değişimi verilmiştir. STATCOM'ların kontrolü sırasıyla geleneksel PI ve YSA denetleyici ile yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

İlk benzetimde, Statik Senkron Kompanzatör, şebeke ve şebekeye bağlı yük MATLAB ortamında MATLAB *.m kodlarıyla oluşturulmuştur. Şebekeden çekilen akımlar abc/dq dönüşümü yapılarak i_q akımı ve referans reaktif akımın farkı alınmış ve sırasıyla PI ve YSA denetleyicilere uygulanmıştır. Bu denetleyiciler ile evirici çıkış gerilimi kontrol edilmiş ve şebekeden çekilen reaktif akımın azaltılması amaçlanmıştır. STATCOM'un devrede olmadığı ve devrede olduğu he iki durumda sistem akımları verilmiştir.

İkinci benzetim için, MATLAB/Simulink ortamında kontrollü gerilim kaynağıyla oluşturulan Statik Senkron Kompanzatör kullanılmıştır. İlk olarak şebekeden ölçülen üç faz akımlar dq -eksen akımlara dönüştürülmüş, ölçülen reaktif akım ile referans reaktif akım değeri karşılaştırılmış ve çıkan fark PI denetleyiciye uygulanmıştır. PI denetleyici ile kontrollü gerilim kaynağının genliği ayarlanmıştır. Böylece, değişken genlikli bir gerilim

kaynağı elde edilmiştir. Burada, yük endüktif olduğu için STATCOM çıkış geriliminin genliği şebeke gerilimden daha yüksektir. Başlangıçta R-L yük şebekeye bağlıdır. STATCOM sonradan devreye alınarak şebekeden çekilen akımlar, STATCOM'un ürettiği akımlar ve reaktif akımın değişimi verilmiştir. Daha sonra aynı güç devresi için aynı yük şartlarında PI denetleyici yerine MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan YSA denetleyici kullanılmıştır. Kontrollü gerilim kaynağıyla oluşturulan STATCOM'un benzetim sonuçları iki farklı denetleyici için de sunulmuştur.

Daha sonraki benzetimde, üç fazlı iki seviye gerilim kaynaklı evirici tabanlı STATCOM ikinci benzetimde olduğu gibi MATLAB/Simulink ortamında tasarlanmıştır. Literatürde STATCOM kontrolü için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bunlar modülasyon indeksini sabit tutup DA-hat gerilimini değiştirmek, DA-hat gerilimini sabit tutup modülasyon indeksini değiştirmek veya her ikisinin kombinasyonu ile STATCOM'un kontrolünü yapmaktır. Bu çalışmada kullanılan kontrol yöntemi için DA-hat gerilimini sabit tutulmuş, şebekeden ölçülen üç faz akımlar dq -eksen bileşenlerine dönüştürülmüş, ölçülen i_q reaktif akımı ile referans reaktif akımın farkı alınmış sonra geleneksel PI denetleyiciye uygulanmıştır. PI kontrolör çıkışı olan modülasyon indeksi (M_a) ile reaktif güç akışı denetlenmiştir. Bir önceki benzetimde olduğu gibi bu benzetimde de R-L yük şebekeye bağlıyken benzetim başlatılmış ve STATCOM sonradan devreye alınarak reaktif akım, şebekeden çekilen üç faz akımlar ve STATCOM çıkış akımı verilmiştir. Ayrıca, gerilim kaynaklı evirici tabanlı STATCOM'lu aynı güç devresi kullanılmıştır. Kontrolör olarak Geleneksel PI yerine MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan YSA denetleyici kullanılarak aynı sonuçlar sunulmuştur.

Son benzetimde ise, referans akımın -15 A'den +15 A' geçişi esnasında STATCOM'un referans akımı izleme başarımı PI ve YSA kontrolör için test edilmiştir. Ayrıca STATCOM'un mod değişikliği esnasındaki bir faza ait çıkış akım ve gerilimi arasındaki faz farkı, mod değişikliği esnasındaki modülasyon indeksinin değişimi ve STATCOM çıkış akımları verilmiştir.

1.2. Tezin Yapısı

Tezin ilk kısmında, güç sistemlerinin problemlerinden, reaktif güç kompanzasyonunun güç sistemlerine etkisinden, STATCOM'un kontrolü ile ilgili literatür de yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir.

Tezin ikinci kısmında reaktif güç tanımı yapılmış, reaktif güç üreten cihazlardan, elektrik şebekesinin kalite ölçütlerinden bahsedilmiştir. Daha sonra reaktif güç kompanzasyonunun geleneksel yöntemleri diyebileceğimiz mekanik anahtarlı kompanzasyon sistemleri ve senkron kompanzatörler açıklanmıştır. Sonrasında, daha esnek yapıda olan Esnek AA İletim Sistemi (FACTS) aygıtlarından olan Tristör Kontrollü Reaktör (TCR), Tristör anahtarlama Reaktör (TSR), Sabit kapasiteli Tristör Kontrollü Reaktörler (FC-TCR)'den ve Statik Seri Kompanzatörlerin çalışması anlatılmıştır.

Tezin üçüncü kısmında, temel evirici yapılarından bahsedilmiş, şönt bağlı Esnek AA İletim Sistemleri (FACTS) aygıtlarından olan STATCOM (Statik Senkron Kompanzatör)'un gelişiminden, çalışma prensibinden, çalışma karakteristiğinden ve kontrol yöntemlerinden detaylı olarak bahsedilmiştir.

Tezin dördüncü kısmında, Yapay Sinir Ağları (YSA) tanımı yapılmış, YSA ağ yapısından bahsedilmiş, YSA'nın kullanıldığı alanlar açıklanmıştır. STATCOM'un kontrolü için kullanılan YSA denetleyicinin ağ yapısından ve öğrenme yönteminden bahsedilmiş ve reaktif güç denetimi için PI ve YSA kontrolörlü STATCOM benzetimleri endüktif özellikli R-L yük devredeyken STATCOM devreye alınarak yapılmıştır. Sonrasında PI ve YSA kontrolörlü STATCOM'ların referans akımı izleme başarımını test etmek için referans akım eksiden artıya değiştirilerek STATCOM'un bu akımı hangi oranda izlediğine bakılmıştır.

Tezin beşinci kısmında, Tezin genel yapısı özetlenmiştir

Tezin dördüncü bölümünde, benzetimleri yapılan PI ve YSA kontrolörlü STATCOM'ların reaktif güç denetimi ile elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

2 . REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU

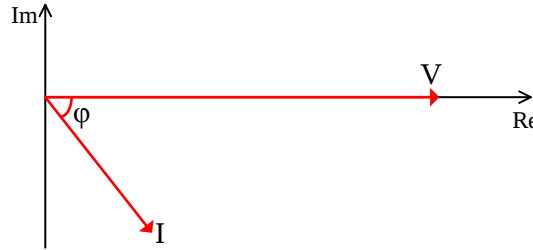
Reaktif güç bir elektrik şebekesinde akımla gerilimin reaktif bileşeninin çarpımına eşittir ve aşağıdaki gibi elde edilir:

$$Q = VI \sin \varphi \quad (2.1)$$

Burada V gerilim, I akım, Q ise reaktif güçtür. Birimi Volt-Amper reaktiftir (Var). Aktif güç ise elektrik şebekesinde akımla gerilimin aktif bileşenlerinin çarpımıdır ve şu şekilde bulunur:

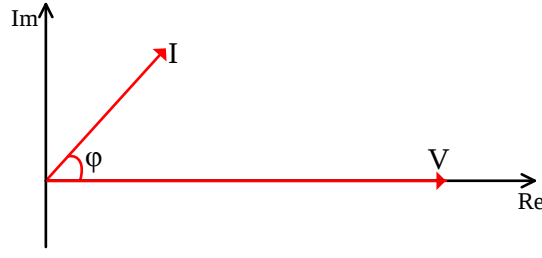
$$P = VI \cos \varphi \quad (2.2)$$

Burada, P aktif güçtür ve birimi Watt'ır (W). Akımın etkin genliğiyle gerilimin etkin genliği arasındaki açı φ dir. $\cos \varphi$ ise güç faktörü olarak adlandırılır [30]. Reaktif güç kompanzasyonun amaçlarından biride akımla gerilim arasındaki açıyı yani $\cos \varphi$ 'yi küçültmek, akımla gerilim arasındaki faz farkını azaltmak dolayısıyla güç katsayısını bire yaklaştırmaktır. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de Endüktif ve kapasitif devrelerdeki akımlar ile gerilimler arasındaki ilişki verilmektedir.



Şekil 2.1 Endüktif devrede akım ve gerilim arasındaki ilişki

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi endüktif devrede akım gerilimi geriden izler. Kapasitif devrede bu durum tersidir. Yani gerilim akımı geriden izler. Omik devrede ise akımla gerilim arasında faz farkı yoktur.



Şekil 2.2 Kapasitif devrede akımlar ve gerilimler arasındaki ilişki

2.1. Reaktif Güç Kompanzasyonunun Faydaları

Akımla gerilim arasındaki açı büyürse Denklem (2.2) ifadesindeki $\cos\phi$ küçülür. Gerilimin sabit olduğu şebekede, aktif güç sabit tutulmak isteniyorsa I akımının büyümesi gerekecektir. Bu hattın daha fazla yüklenmesi anlamına gelir. Bu durumda iletim hattı aktif anlamda iş yapmayan işe yaramayan bir güçle yüklenecektir. Aynı olumsuzluklara generatör ve transformatörlerde maruz kalacaktır. Reaktif gücün yapılmasını zorunlu kılan diğer bir faktörde iletim hatlarındaki gerilimi sabit tutma ihtiyacıdır. Bunun için hattın belli yerlerine kompanzasyon cihazları bağlanarak gerilim sabit tutulmaya çalışılır [30]. Bir AC şebekenin kaliteli sayılması için beklenen özellikler şu şekildedir:

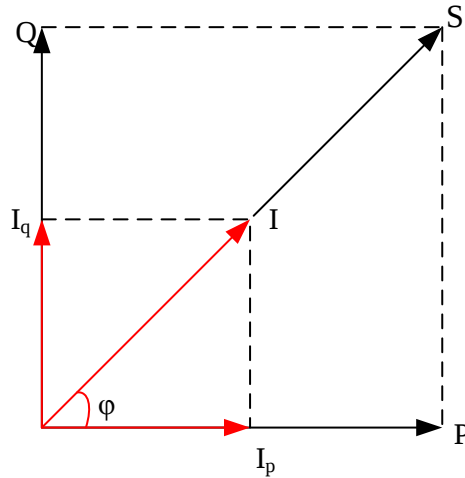
- Enerjinin sürekliliği,
- Gerilim ve frekansın sabit olması,
- Güç faktörünün bire yakın olması,
- Faz gerilimlerinin dengeli olması,
- Harmoniklerin belirli bir değerde tutulması,
- Bunların gerçekleşmesi reaktif güç kompanzasyonu ile sağlanır [30].

Ülkemizde, elektrik dağıtım kuruluşları kurulu gücü 50 KVA ve üzeri olan abonelerinden gereksinimleri olan reaktif gücü kompanse etmelerini ister. Kompanze edilmiş bir sistemde geçen akım daha az olduğundan kablo kayıpları daha düşüktür. Dolayısıyla hat iletkenleri trafolar ve generatörler daha küçük seçilebilir. Akım ve reaktif güç kompanzasyonu ile azaltılır etkin güç aynı kalır güç faktörü büyütülür. Şebeke ve tesis arasında salınım yapan reaktif güç ise elektrik tesisi ve kompanzasyon sistemi üzerinde olur ve şebeke boş yere yüklenmemiş olur. Ayrıca tüketiciler elektrik dağıtım şirketlerine reaktif kayıplardan dolayı bedel ödemekten kurtulur.

EPDK'nın 10/11/2004 tarihli ve 25639 sayılı resmi gazetede yayımladığı elektrik iletim sistemi arz güvenilirliği ve kalitesi yönetmeliğinin reaktif enerji kompanzasyonu başlıklı 11. Maddesine göre “iletim sistemine doğrudan bağlı tüketiciler ve dağıtım lisansına sahip tüzel kişiler tarafından; iletim sistemine bağlantıyla ilgili her bir ölçüm noktasında ve her bir uzlaşma periyodunda, sistemden çekilen endüktif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı yüzde yirmiye, sisteme verilen kapasitif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı ise yüzde onbeşi geçemez” [31].

2.2. Reaktif Güç Kompanzasyonu Temel Kavramlar ve Tanımlar

Sistemden çekilen toplam akımın I ile ifade edilirse, I_p sistemden çekilen akımın aktif bileşeni I_q ise sistemden çekilen akımın reaktif bileşenidir. Şekil 2.3’de verildiği gibi sistemden çekilen akımın aktif bileşeni I_p ’ye denk gelen reel eksendeki aktif güç P , sistemden çekilen akımın reaktif bileşeni I_q ’ye denk gelen reaktif güç Q ve sistemden çekilen toplam akım I ’ya denk gelen ise S yani görünür güçtür.



Şekil 2.3 Aktif, reaktif ve görünür akımların vektörel gösterimi

Sistemden çekilen toplam akımdan Şekil 2.3’den yararlanılarak akımın aktif ve reaktif bileşenleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$I_p = I \cdot \cos\varphi \quad (2.3)$$

$$I_q = I \cdot \sin\varphi \quad (2.4)$$

Sistemden çekilen toplam akım ise akımın aktif ve reaktif bileşenlerinin vektörel toplamına eşittir ve aşağıdaki gibi bulunur:

$$I = \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (2.5)$$

2.3. Kompanzasyon İçin Gerekli Kondansatör Gücünün Hesaplanması

Aktif güç sabit kabul edilir ve reaktif güç kompanzasyonu için gerekli olan güçte kondansatör sisteme eklenirse Şekil 2.4'den de görüleceği gibi sistemden çekilen reaktif güç azalır ve dolayısıyla görünür güçte buna paralel azalır. Denklem (2.6)'da S (görünür güç)'ün karmaşık sayılarla ifadesi Denklem (2.7)'de ise görünür gücün aktif ve reaktif güçlerle elde edilişi verilmiştir:

$$S = P + jQ \quad (2.6)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.7)$$

Q_1 tesise kompanzasyon yapılmadan önceki reaktif güç, Q_2 tesise kompanzasyon yapıldıktan sonraki reaktif güç aşağıdaki gibi ifade edilir:

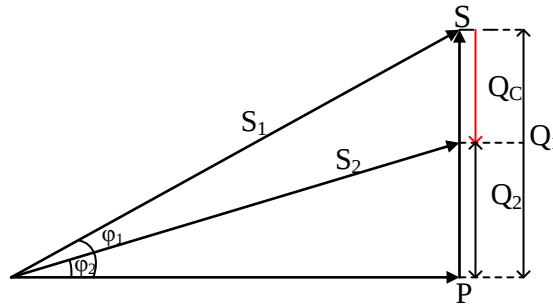
$$Q_1 = S \cdot \sin\phi_1 \quad (2.8)$$

$$Q_2 = S \cdot \sin\phi_2 \quad (2.9)$$

Kompanzasyon için gerekli reaktif güç Q_c aynı zamanda kullanılacak kondansatörün gücünü de belirler. Aşağıdaki gibi elde edilir:

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P(\tan\phi_1 - \tan\phi_2) \quad (2.10)$$

Burada $\cos\phi_1$ tesise kompanzasyon yapılmadan önceki güç katsayısı, $\cos\phi_2$ tesise kompanzasyon yapıldıktan sonraki güç katsayısı



Şekil 2.4 Görünür gücün güç faktörüne göre değişimi

2.3.1 Sistem İçin Gerekli Kondansatör Gücünün Hesaplanması

50 kw aktif gücü olan bir tesis için gerekli kondansatör gücü hesaplanacaktır. Daha önceki bölümdeki tanımlama ve denklemlerden bu hesaplama yapılabilir.

Tesiste ölçülen $\cos\phi_1$ değeri = 0,67

Yükseltilmesi İstenen $\cos\phi_2$ değeri = 0,95

$$\cos\phi_1 = 0,67 \text{ açı değeri} = 0,83^\circ \quad \tan\phi_1 = 1,093$$

$$\cos\phi_2 = 0,95 \text{ açı değeri} = 0,31^\circ \quad \tan\phi_2 = 0,320$$

$$Q_c = P(\tan\phi_1 - \tan\phi_2) \quad Q_c = 50*(1,093-0,320)$$

Kompanzasyon için gerekli olan kondansatör gücü;

$$Q_c = 38 \text{ kVAr olarak bulunur.}$$

2.4. Reaktif Güç Kompanzasyon Yöntemleri

Daha önceden de bahsedildiği gibi reaktif güç kompanzasyonunun iki önemli sebebi vardır. Birincisi şebekenin ihtiyacı olan reaktif gücün şebekeden çekilmesini önlemek, ihtiyaç duyulan reaktif gücün ihtiyaç duyulan yerde üretmek ve şebekeyi meşgul etmemektir. Reaktif güç üretiminin ikinci önemli sebebi ise tüketiciye nominal gerilim sağlamaktır. Bu işlem gerilim regülasyonu ismini alır [30]. Enerji iletim hatlarında orta nokta paralel kapasitif kompanzasyon şeklinde yapılır. Ayrıca enerji iletim hatlarında seri kapasitif kompanzasyonda yapılır. Hattın seri olarak kapasitif kompanzasyonu düşüncesinin temelinde hat empedansının azaltılması fikri yatar. Böylelikle hattın akan etkin ve tepkin gücün denetimi sağlanmış olur [2,34].

Elektrik tesislerinde güç sabit ise yüke uygun sabit bir kondansatör veya reaktör grubu kullanmak sorunu çözebilir. Fakat yük değişkense sabit kondansatör ve reaktör grubu kullanmak uygun bir yöntem değildir. Böyle bir problemin çözümü için geliştirilen yöntemler aşağıda verilmiştir:

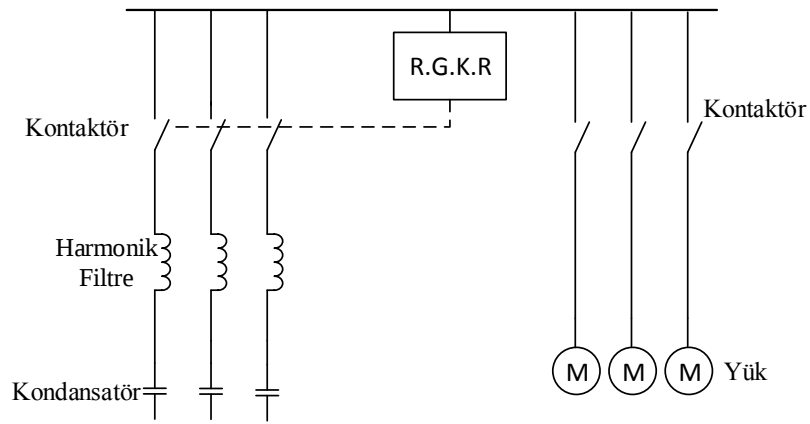
- Besleme sisteminin kısa devre gücünü arttırmak,
- Mekanik anahtarlama şönt kondansatör ve reaktör grupları kullanmak,

- Senkron makinaları kapasitif veya endüktif bölgede çalıştırarak reaktif gücü karşılamak,
- Esnek AC iletim sistemleri(FACTS) kullanmak.

2.4.1. Mekanik Anahtarlama Kondansatör ve Reaktör Grubu Kullanmak

Mekanik anahtarlama şönt kondansatör ve şönt reaktör grupları kullanarak reaktif güç kompanzasyonu yapmak, kurulum maliyetlerinin düşük olması sebebiyle sanayide, işletmelerde okullar ve resmi dairelerde çok geniş kullanım oranına sahiptir. Bir reaktif güç rölesi tesiste devreye giren yüklerin durumuna göre kondansatör veya reaktör gruplarını devreye alır veya çıkarır.

Ani yük değişimleri, bu yüklerin lineer olmayan özellik göstermesi, ups, elektronik balast ve benzeri kapasitif özellikli yüklerinde kullanılmaya başlaması, mekanik anahtarlar zamanla açma kapamadan dolayı deformasyon oluşması ve sistemin çok hassas olmaması gibi sakıncalarından dolayı bu yöntem yetersiz kalmaktadır. Şekil 2.5’de mekanik anahtarlama bir kompanzasyon sistemi gösterilmiştir.

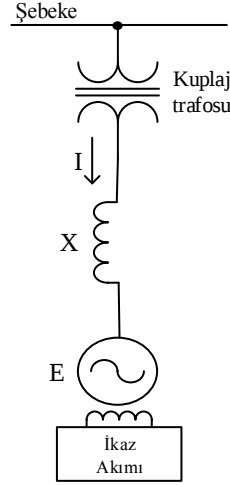


Şekil 2.5 Mekanik anahtarlama kompanzasyon sistemi

2.4.2. Senkron Makine Kullanmak (Dinamik Kompanzasyon)

Senkron kompazatör yüksüz şekilde çalışan bir senkron motordur. Dinamik kompanzasyon da denilen bu yöntemle şebekeye paralel bağlı senkron makinenin uyarım akımı değiştirilerek makinenin endüktif veya kapasitif çalışması sağlanabilir. Düşük akımla uyarılmış senkron makine endüktif özellik gösterirken, aşırı uyarılmış senkron makine kapasitif özellik gösterir. Ölçülen güç faktörü ikaz akımı olarak makineye geri

beslenerek kompanzasyon yapılır. Şekil 2.6’da Senkron kompanzatörün şebekeye bağlantı şeması görülmektedir.



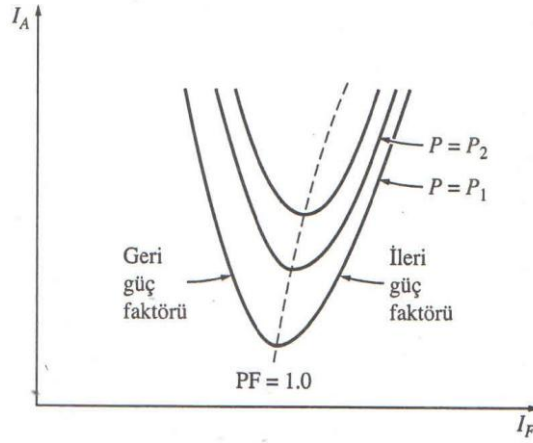
Şekil 2.6 Senkron makine prensip şeması

Senkron makinenin verebileceği aktif güç VA ile ifade edilebilirken, reaktif gücü ifade etmek zordur. Makinenin verebileceği reaktif gücü üç husus sınırlar. Bunlar armatür akımı, ikaz akımı ve ısınma sorunudur [32]. Aşağıda sayılan sakıncalardan dolayı, Statik VAR kompanzatörler kullanılır:

- Ani değişen yüklerde senkron makinenin hızlı cevap verememesi,
- Döner makine olması sebebiyle işletme, bakım ve kurulum maliyetlerinin yüksek olması,
- Fazların ayrı ayrı kontrol edilememesinden dolayı,

dinamik kompanzasyon çok kullanılmamaktadır.

Şekil 2.7’de gösterilen V eğrisinden de görüldüğü gibi I_F (ikaz akımı) ile senkron kompanzatörün aktif gücü değişmeden ürettiği ve tükettiği reaktif güç değişir. Burada rotor manyetik alanı tarafından üretilen gerilimin stator çıkış geriliminden küçük olması durumunda senkron motor $R-L$ devresi gibi davranarak endüktif güç tüketir. Rotor manyetik alanı tarafından üretilen gerilimin stator çıkış gerilimine eşit olması durumunda senkron makine saf omik yük gibi davranır. Stator gerilimden yüksek olması durumunda $R-C$ yükü gibi davranarak kapasitif güç üretir.



Şekil 2.7 Senkron Kompanzatör V Eğrisi

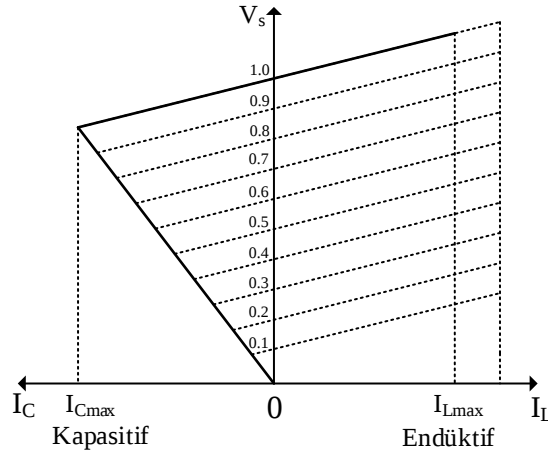
2.4.3. Esnek AA İletim Sistemleri (FACTS) Kullanmak

Geleneksel olarak reaktif güç kontrolü mekanik olarak anahtarlanan, şebekeye paralel bağlı kapasitör ve/veya reaktör gruplarıyla sağlanır. Bu sistem yavaş değişen yük durumların da şebeke voltajını istenen seviyede tutmada yardım eder. Buna rağmen hatların hata durumunda açma kapama yapması veya generatörlerin ani tripleri (açma) sistem stabilitesi ve gerilim sorunlarına sebep olabilir. Sistemi kararlı durum sınırlarına yakın çalıştırmak için hızlı bir reaktif güç kompanzasyonuna gereksinim vardır. Dinamik senkron kompanzatörler ve doyumlu reaktörler istenen hızda ve kararlılık sınırlarında değildir. Bu özellikler Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) cihazları tarafından sağlanabilir [33]. FACTS teknolojisi uygulamalarında güç sistemlerinde kalıcı durum performansını iyileştirmede, güç akışı kontrolünde osilasyonları söndürmede önemli rol oynar. Paralel kompanzasyon uygulamalarında FACTS cihazlarının başında STATCOM gelir [17]. Bu cihazlar arasında ilk olarak Tristör kontrollü reaktör (TCR), Tristör anahtarlama kapasitör (TSC) ve Tristör kontrollü statik var kompanzatör (TCSVC) gibi tristör tabanlı cihazlar kullanılmıştır [2]. Günümüzde ise GTO, IGBT, IGCT gibi kontrollü anahtarlarla gerçekleştirilen dönüştürücüler kullanılmaktadır. 1970’li yıllarda hızlı değişen yükler için (ark fırınları) reaktif güç ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılan bu sistemler daha sonraları AA iletim hatlarında şönt kompanzatör olarak adapte edildi. Statik VAr Kompanzasyonu güç faktörünü bire yakın tutmanın yanında reaktif gücün hızlı değişimiyle şebekede oluşan rahatsız edici fliker titreşimleri yok edebilir, bu gibi yüklerin neden olduğu simetrisizlikleri de dengeleyebilir [35,36]. Statik VAr

sistemlerinin bir diğer kullanım yeri ise AA güç sisteminde dinamik gerilim ayarı sağlayarak sistem kararlılığını kuvvetlendirmesidir [36]. Ancak SVC (Statik VAr Kompanzatör) sistemleri reaktif güç problemlerini çözerken harmonik akım problemlerine sebep olurlar. Bu durum, ek maliyet ve büyük boyutlu sabit paralel filtreler veya özel transformatör bağlantıları gerektirmektedir [37].

2.4.3.1. Paralel Statik VAR Kompanzatörler

Statik VAr kompanzasyon sistemleri, yükün reaktif gücünü kompanze ederek, gerilim dalgalanmalarının minimize edilmesini ve kaynak güç faktörünün yükseltilmesini sağlarlar. Kontaktörlerin ve rölelerin kullanıldığı yavaş, güvensiz, yüksek anahtarlama streslerinin olduğu ve sık bakım gerektiren yöntemlerin yerine, yüksek güçlü yarı iletken elemanların kullanıldığı metotlardır [38]. Şekil 2.8’de ise SVC’nin V-I grafiğinden görüleceği gibi gerilim düştükçe SVC’ nin kapasitif durumdaki başarımı azalır.



Şekil 2.8 Statik Var kompanzatör V-I karakteristiği

2.4.3.1.1. Tristör Kontrollü Reaktör (TCR)

Şekil 2.9 (a)’da gösterildiği gibi birbirine ters ve paralel bağlı tristörlerin bir reaktöre seri bağlanmasıyla oluşturulan bir fazlı TCR, hızlı bir şekilde güç faktörü düzeltme ve gerilim kontrolü sağlama kabiliyetine sahiptirler. Bunlar; güç frekansında geçici aşırı gerilimlerin kontrolü, gerilim çökmesinin önlenmesi, geçici kararlılığın artırılması, iletim ve dağıtım sistemlerinde dengesiz yükleri besleyen üç fazlı sistemlerin dengelenmesi ve kesintili sürelerde çalışan yüklerin sebep olduğu gerilim salınımlarının önlenmesi olarak sıralanabilir [30].

Tristörlerin iletimde kalma süresi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (2.11)$$

Tetikleme açısı α , tristörlerin iletimde kalma süresi σ , reaktör akımı i_L X_L bobinin ana frekanstaki reaktansdır.

Reaktörden geçen akım $i_{L(t)}$ 'nin değeri aşağıdaki gibidir:

$$i_{L(t)} = \frac{\bar{V}}{X_L} (\cos - \cos \omega t) \quad \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \quad (2.12)$$

Reaktörden geçen akımın etkin değeri ise:

$$I_L = \frac{V}{X_L} \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi} \quad (2.13)$$

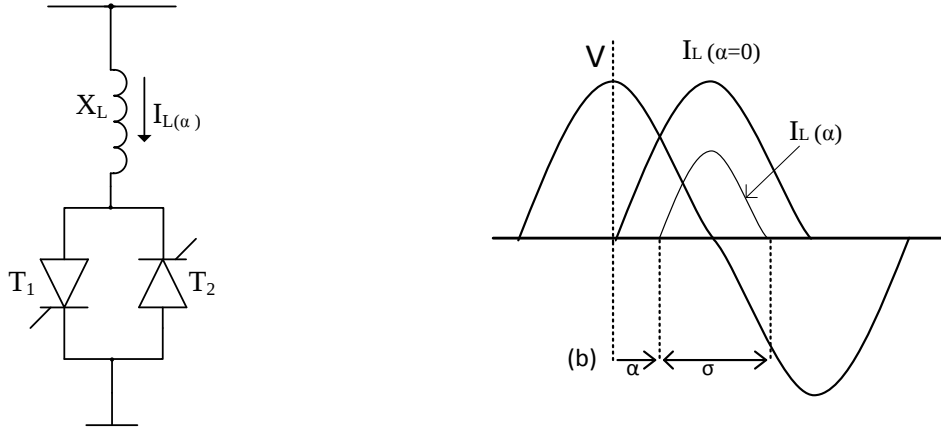
V bara geriliminin etkin değeri, X_L bobinin reaktansdır. Şekil 2.9 (b)'de gösterildiği gibi tetikleme açısı α ve iletimde kalma açısı σ uygun değerlerde seçilerek reaktör akımının etkin değeri ayarlanabilir. Tristör kontrollü reaktör değişken bir süseptans elemanı gibi davranır [30,39]:

$$B(\alpha) = \frac{I_L}{V} = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi - X_L} = \frac{2 \pi - \alpha + \sin 2\alpha}{\pi X_L} \quad (2.14)$$

Üretilen reaktif güç değeri ise:

$$Q(\alpha) = B(\alpha) V^2 \quad (2.15)$$

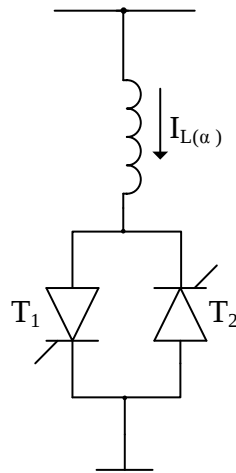
Burada, B süseptans değeri, Q ise reaktörün reaktif güç değeridir. TCR tek başına kullanılabileceği gibi sabit bir kondansatörle beraber veya tristör anahtarlama bir kapasitör ile kullanılarak daha geniş bir aralıkta reaktif güç kontrolü yapar TCR'nin tetikleme açısı $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ arasında kısmi iletim vardır. 90° nin altındaki iletim açılarında doğru akımlı asimetrik bileşenler ortaya çıkar. Bu yüzden 90° nin altında tristör tetiklenmez [30,39,40].



Şekil 2.9 TCR a) TCR prensip şeması b) (α) 'ya göre reaktör akımının değişimi

3.4.3.1.2. Tristör Anahtarlama Reaktör (TSR)

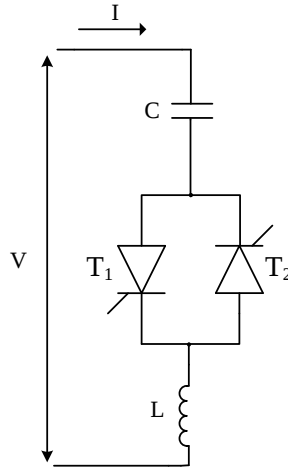
TSR kullanılarak oluşturulan SVC yapısındaki filtreler, SVC yapısındaki güç elektroniği elemanlarının neden olduğu ve büyük değerli endüstriyel yüklerden kaynaklanan harmonikleri ortadan kaldırmak amacıyla kullanılır. Genellikle harmonik üretimi açısından TCR yerine bu TSR yapısı tercih edilir. TSR yapısındaki tristörler kaynak geriliminin pozitif/negatif tepe noktalarında veya hat akımının sıfır geçiş noktalarında tetiklenmektedir. Böylece enerji sistemindeki harmonik üretimi engellenmiş olur. Tek fazlı basit bir TSR şeması Şekil 2.10'da verilmiştir. Sistemde TSR yapısı kullanılan SVC, yük değişimlerinde gerilim kontrolünü hızlı bir şekilde sağlar [3,39,40].



Şekil 2.10 TSR prensip şeması

2.4.3.1.3. Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC)

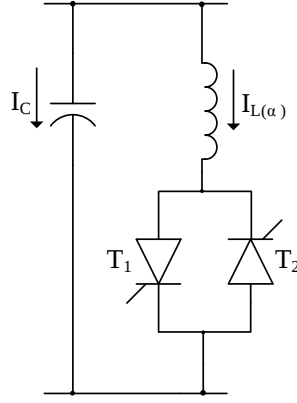
Şekil 2.11’de görüldüğü gibi tristör anahtarlama kapasitör ters ve paralel bağlanmış tristör bloğu bu bloğa seri bağlı bir kapasitör ve küçük bir akım sınırlayıcı bobinden oluşur. Birden fazla TSC yapısı aynı yük barasına paralel bağlanır. Reaktif güç ihtiyacı arttıkça tristörler tetiklenerek ihtiyaç duyulan kapasitör devreye alınır. Tristörlere seri bağlı düşük değerli selfin amacı tetikleme anında oluşması muhtemel geçici olayları bastırmak ve rezonansı önlemektir [30]. TSC herhangi bir anda sıfırdan geçerken devre dışı bırakılmalıdır. Aynı şekilde kapasite üzerine uygulanan gerilim tepe değerine ulaştığında veya bu değere yakın noktada iken tristör tetiklenmelidir. Böyle bir tetikleme yöntemi kullanılarak açma–kapama anında aşırı gerilimler ve geçici olaylar önlenmiş olur [2,30,40].



Şekil 2.11 TSC prensip şeması

2.4.3.1.4. Sabit Kapasitör Tristör Kontrollü Reaktör (FC-TCR)

Şekil 2.12’de görüldüğü gibi şebekeye sürekli bağlı bir kapasitör ve tristör kontrollü reaktörden oluşan sisteme FC-TCR denilir. Reaktör akımı daha önce bahsedilen yöntemle tetikleme açısı ile ayarlanabilir. Maximum kapasitif VAR çıkışı, tristör kontrollü reaktör kapalı durumdayken elde edilir. ($\alpha=90^\circ$) kapasitif VAR çıkışının azaltılması ise reaktör akımının artırılmasıyla yani tetikleme açısının düşürülmesiyle mümkündür [2]. Şekil 2.12’de FC-TCR’ nin prensip şeması görülmektedir.



Şekil 2.12 FC-TCR prensip şeması

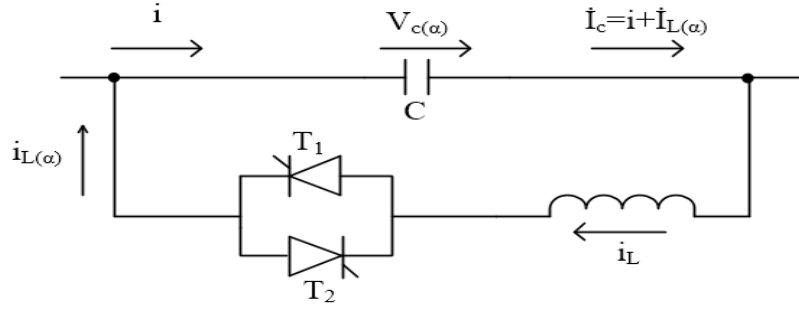
2.4.3.2. Statik Seri Kompanzatörler

Paralel kompanzasyon iletim hattı boyunca güç talepleri artışında, istenen voltaj profilini sağlamakta çok etkilidir. Yani şönt kompanzasyon hat boyunca yeterli aralıklarda uygulandığında teorik olarak güç akışını hattın termal limitlerine kadar yükseltir. Bu olay iki uç gerilimi arasında yeterince büyük bir açı oluşması durumunda gerçekleşir [2].

Ancak şönt kompanzasyon aktif güç iletiminin kontrolünde etkisizdir. Önceden, uzun hatlarda AA güç iletiminin ilk olarak hattın seri reaktansı tarafından sınırlandırıldığı düşünülürdü. Seri kapasitif kompanzasyon on yıllar önce güç iletimini arttırmak için reaktif hat empedansının bir kısmını yok etmek amacıyla kullanılmıştır. Daha sonra değişken seri reaktif kompanzasyonun hattaki güç akışını ve kararlılığı arttırmada son derece etkili olduğu görüldü [2].

2.4.3.2.1. Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC)

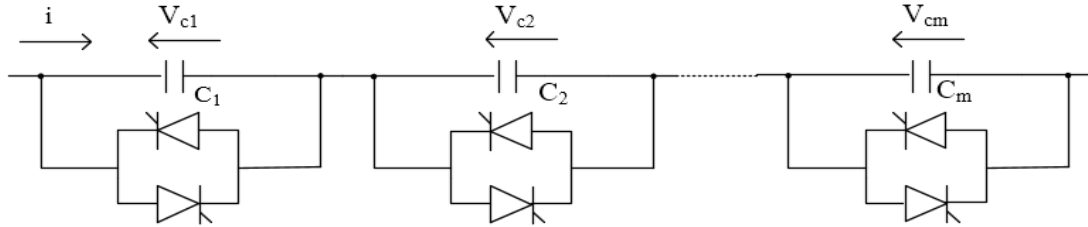
Şekil 2.13’de görüldüğü gibi TCSC hatta seri bağlı olan kapasiteye paralel bağlı bir tristör kontrollü reaktörden oluşur. Tristör denetimli seri kapasitör ismini alır. TCSC paralel bir LC devresi gibidir. Sabit bağlı kapasitör ve değişken empedanslı bir reaktördür. İletim hattına düzgün değişebilen kapasitif reaktans eklemek için kullanılır [2,40].



Şekil 2.13 TCSC prensip şeması

2.4.3.2.2. Tristör Anahtarlama Seri Kapasitör (TSSC)

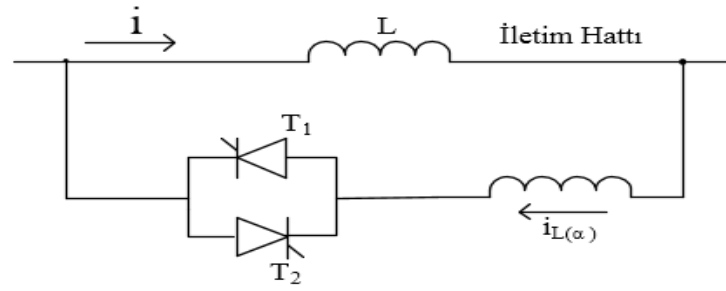
Tristör anahtarlama seri kapasitörler, hatta seri bağlı kapasitörlere paralel bağlanan tristörlerden oluşur. TCSC den farklı olarak TSSC iletim açıları sabittir. Tristörler kesimdeyken kapasitörler devrede tristörler iletimdeyken kapasitörler by-pass durumundadır. Şekil 2.14’de birden fazla kademeden oluşan TSSC azalarak veya artarak eklenen seri kapasitörlerden oluşur [2,40].



Şekil 2.14 Sırasıyla devreye giren seri kapasitör prensip şeması

2.4.3.2.3. Tristör Kontrollü Seri Reaktör (TCSR)

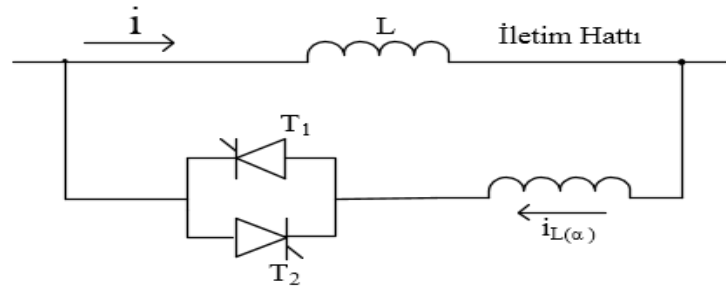
Tristör kontrollü seri reaktör, düzgün değişken bir seri endüktif reaktans elde etmek için kullanılır. Uygulamada birden fazla TCSR kullanılabilir. Tristör kesimdeyken hatta seri bağlı endüktans devredeyken, kontrollü reaktör devreye girdikçe hattın toplam seri reaktansı düşecektir [2,34,40]. Şekil 2.15’de TCSR prensip şeması görülmektedir.



Şekil 2.15 TCSR prensip şeması

2.4.3.2.4. Tristör Anahtarlama Seri Reaktör (TSSR)

Tristör Anahtarlama Seri Reaktör (TSSR) yapı bakımından TCSR' den hiçbir farkı yoktur. Fakat çalışma mantığı olarak TCSR'den ayrılır. Çok kademeli olarak kullanılabilir. Paralel reaktansların kademeli devreye alınma prensibine göre çalışır. Şekil 2.16'da görüldüğü gibi TCSR'den yapı olarak farkı yoktur [39,40].



Şekil 2.16 TSSR prensip şeması

2.4.3.2.5. Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC)

Statik senkron kompanzatör olarak adlandırılan gerilim kaynaklı evirici tabanlı seri kompanzatör çalışma prensibi olarak daha önceden açıklanan seri kapasitif kompanzasyona çok yakındır [2]. Seri kapasitif kompanzasyon, hattın empedansının uçlarındaki gerilimin arttırılması prensibi ile gerçekleştirilir. Bu durum da hattın akımının ve gücünün artmasını sağlar. SSSC uygun faz açısında gerilim enjekte ederek hattın empedansını değiştirebilmektedir. İletim hattıyla hem aktif hem reaktif güç akışı yapabilir. SSSC sadece hat reaktansını değil aynı zamanda hattın omik direncini de değiştirebilme kabiliyetine sahiptir. Şekil 2.17'de Statik Senkron Seri Kompanzatörün şebeke bağlantısı blok şeması görülmektedir [2,40-41].

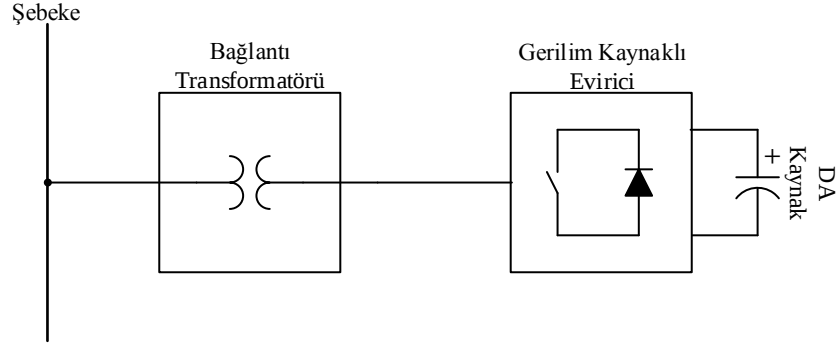
3. STATİK SENKRON KOMPANZATÖRLER

Daha önceki kısımlarda anlatılan reaktif güç üreten ve/veya tüketen sistemler kapasitör ve reaktör banklarından oluşan şebekenin ihtiyacı olan reaktif güç ihtiyacına göre anahtarlanan şebekeye reaktif güç veren ve/veya alan sistemlerdi. Bu yaklaşımın amacı iletim hattının gereksinimi olan reaktif gücü, ayarlanabilir şönt empedanstan sağlamaktı. A.A kapasitör ve reaktör olmadan anahtarlama güç dönüştürücülerle doğrudan kontrol edilebilir reaktif güç üretme Gyugyi tarafından 1976'da açıklandı [2].

Güç endüstrisinde 1980'lerden beri güç sisteminin kararlılığını arttırmada STATCOM önemli rol oynamıştır. Kansai Electric Power Co.Inc. (KEPCO) and Mitsubishi Motors Inc. Dünyada ilk olarak zorlanmış komutasyonlu tristör tabanlı 20MVar'lık STATCOM'u geliştirdi. Ekim 1986'da ± 1 MVar'lık STATCOM EPRI ve Westinghouse Electric Company tarafından işletmeye alındı. Bu yüksek güçlü GTO evirici tabanlı ilk STATCOM'du. 1991'de KEPCO ve Mitsubishi Motors Inc. ± 80 MVar'lık STATCOM'u Inuyama Switching İstasyonunda voltaj stabilitesini düzenlemek için 154 kV sisteme adapte etti. 1997'de Siemens rüzgâr türbinlerinin dinamik kontrolü için 8MVar'lık STATCOM'u Rejsby Hede rüzgar çiftliğinde kurdu. Aynı yıl EPRI and Westinghouse ± 2 MVar D-STATCOM'u BC-Hydro şirketi için kurdu ve 25 kV'luk baraya bağladı [44]. 2004 yılında TUBİTAK-UZAY Akım kaynaklı Evirici (CSC) tabanlı STATCOM'u Türkiye Kömür İşletmeleri kömür kazıcılarındaki kazıcı motorların reaktif güç sorununu çözmek için geliştirdi [1].

STATCOM güç faktörünü geliştirme ve voltaj regülasyonunu sağlamak için dağıtım sistemlerine veya yüklere yakın yerlere kuruldu. Bu tip STATCOM, D-STATCOM olarak isimlendirilir ve orta güç sistemlerinde (5 MVar'a kadar) kullanılır. D-STATCOM Statik VAr sistemleri ve iletim STATCOM'ları ile karşılaştırıldıklarında cevap hızları daha iyidir [1].

Şekil 3.1'de verildiği gibi STATCOM genel olarak bir DA kaynaktan (genellikle kondansatör) beslenen bir evirici tarafından DA enerjiyi AA'ya çeviren bunu bir reaktans üzerinden şebekeye enjekte eden cihazlara verilen addır. STATCOM reaktif gücü üretebilme ve tüketebilme, ayrıca elektrik güç sisteminin özel parametrelerinin kontrolünü yapabilmesi için çıkış değerlerini değiştirebilme yeteneğine sahip şönt bağlı bir reaktif güç ekipmanıdır [2,33].



Şekil 3.1 Statik senkron kompanzatör şebeke bağlantısı blok diyagram

STATCOM'un esas fonksiyonu bağlantı noktasında iletim hattının gerilimini düzenlemektir. STATCOM bunu iletim hattından kontrollü bir reaktif akım çekerek başarır. STATCOM 'un çalışma karakteristiği senkron kompanzatör ile aynıdır. Şekil 3.1'den de görüleceği gibi STATCOM en basit şekilde bir bağlantı transformatörü, bir GBD(Gerilim beslemeli Dönüştürücü) ve bir adette doğru gerilim enerji depolama aygıtından meydana gelir [3]. Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM) Şebekeye bir endüktans tarafından bağlı değişken genlikli ve faz açılı bir gerilim kaynağı olarak da düşünülebilir. Şebekeye aktif ve reaktif güç akışı denetimi bu yolla yapılabilir.

3.1. Darbe Genişlik Modülasyonu

Bir eviricinin çıkışındaki AA dalgasının hem genliğinin hem de dalga şeklinin sinüse yaklaştırılması gerekmektedir. İstenen frekansta bir sinüzoidal dalga elde etmek için, bu frekansta bir kontrol işareti ile daha yüksek frekanslı bir üçgen dalga karşılaştırılır. Bu yöntemin adı Sinüzoidal darbe genişlik modülasyon tekniğidir. SDGM yani Sinüzoidal darbe genişlik modülasyon tekniği, güç elektroniğinde kullanılan en geniş şekilde kullanılan darbe genişlik modülasyonu düzenlemelerinden biridir. Bu kontrol yönteminde en genel anlamda bir üçgen olan taşıyıcı dalga ile sinüzoidal bir modülasyon dalgasının karşılaştırılması esasına dayanır. DGM tekniği ne kadar başarılı olursa olsun evirici çıkış dalga şekli hiçbir zaman saf sinüs olamaz. Evirici çıkış frekansı ile orantılı harmonikler çıkışta vardır [36,42].

Modülasyon indeksi veya modülasyon genliği olarak tanımlanan M_a oranı aşağıdaki gibidir:

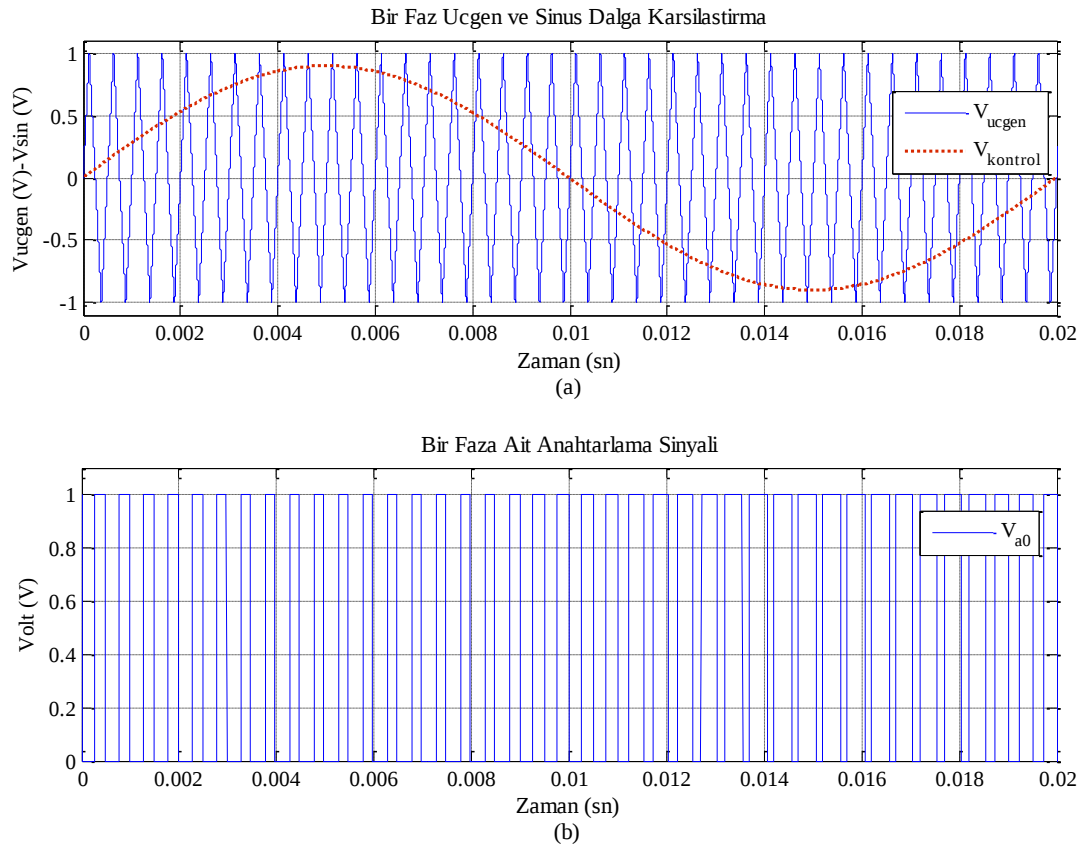
$$M_a = \frac{V_{kontrol}}{V_{üçgen}} \quad (3.1)$$

Burada taşıyıcı dalga olarak tanımlanan $V_{\text{üçgen}}$ ve kontrol dalgası olarak tanımlanan V_{kontrol} 'dür. Frekans Modülasyonu aşağıdaki gibidir:

$$M_f = \frac{f_s}{f_l} \quad (3.2)$$

Taşıyıcı dalga frekansı f_s ve kontrol dalgasının frekansı f_l 'dir. Üçgen dalga frekansı genellikle sabit tutulur ve bu eviricinin anahtarlama frekansını oluşturur. Evirici frekansını belirleyen f_l anahtarlama frekansı ise f_s 'dir.

Şekil 3.2'de tek fazlı DGM dalga şekli gözükmemektedir. İki dalganın kesiştiği noktalarda anahtarlama işaretleri üretilir.

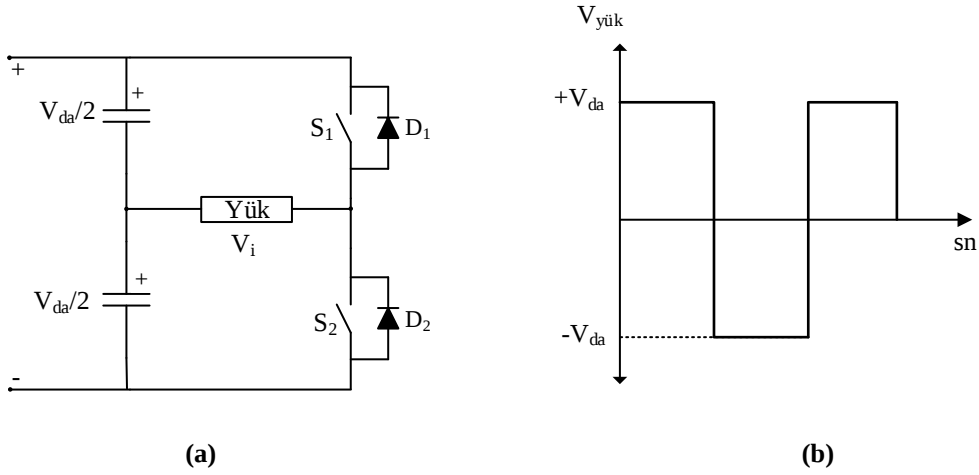


Şekil 3.2 Bir faz dalga genişlik modülasyonu, **a)** Üçgen ve sinüs dalgası karşılaştırma, **b)** Anahtarlama sinyali üretme

3.2. Bir Fazlı Gerilim Kaynaklı Eviriciler

3.2.1. Yarım Köprü Evirici

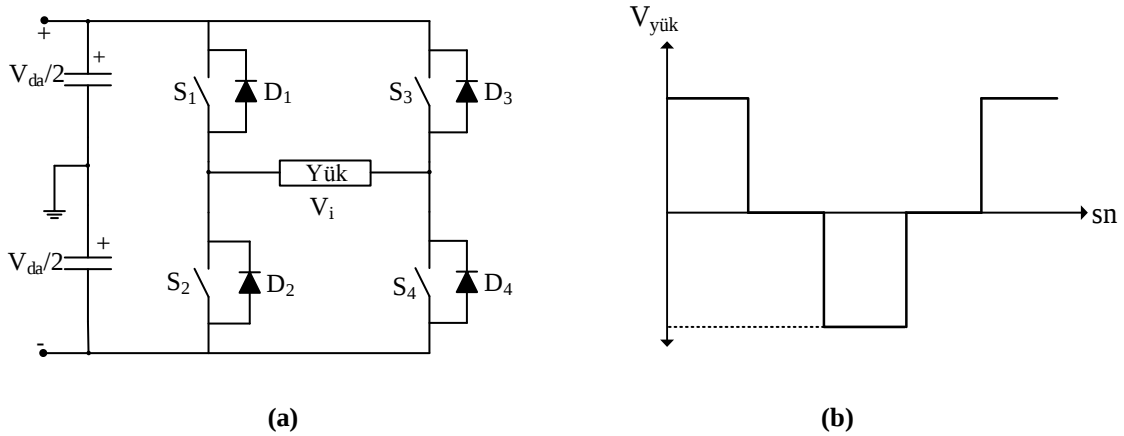
Yarım köprü eviricinin girişine bağlanan iki kapasitenin üzerinde $1/2 V_{da}$ potansiyel olacak şekildedir. Her bir periyotta S_1 veya S_2 anahtarı iletimdedir. Her iki anahtarın ayrı ayrı iletimde olduğu iki durum ve her ikisinin kesimde olduğu bir durum olmak üzere eviricinin çalışmasında toplam üç durum vardır. Bir fazlı yarım köprü evirici iki seviyeli çıkış gerilimi üretmek için en temel evirici devresidir. Şekil 3.3 (a)'da bir faz yarım köprü evirici prensip Şekil 3.3 (b)'de ise çıkış dalga şekli gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Tek faz yarım köprü evirici **a)** Yarım köprü evirici prensip şeması, **b)** Yarım köprü evirici çıkış gerilimi

3.2.2. Tam Köprü Evirici

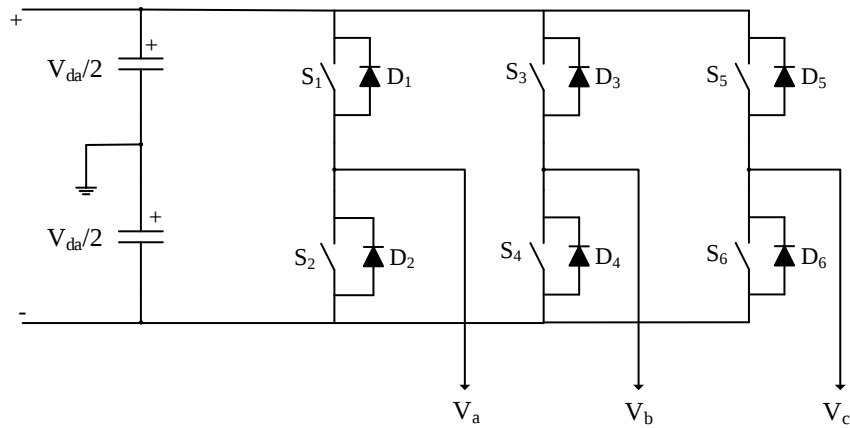
Tam köprü evirici iki adet yarım köprü eviriciden meydana gelmektedir. S_1 ve S_4 , S_2 ve S_5 aynı anda iletimdedir. Yük uçlarındaki gerilim $+V_{da}$ ve $-V_{da}$ 'dir. Bu devre aynı zamanda H-köprü eviricinin bir bacağına ait devredir. Şekil 3.4 (a)'da bir faz tam dalga evirici ve (b)'de çıkış dalga şekli gözükmemektedir.



Şekil 3.4 Tek faz tam köprü evirici **a)** Tam köprü evirici prensip şeması **b)** Tam köprü evirici çıkış gerilimi

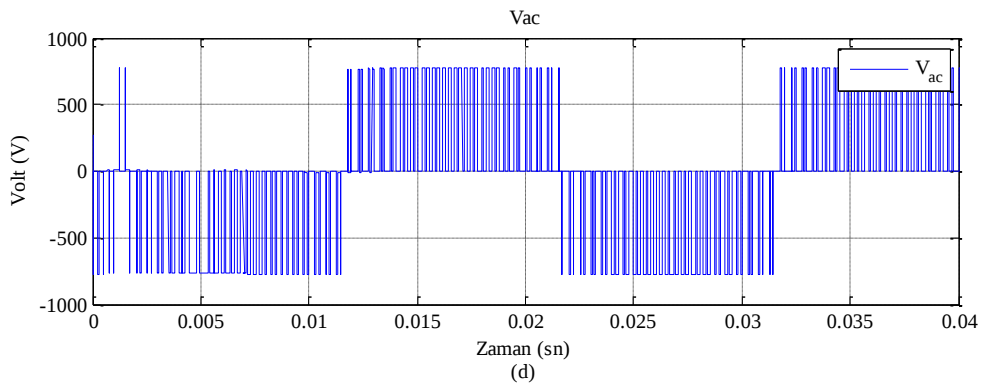
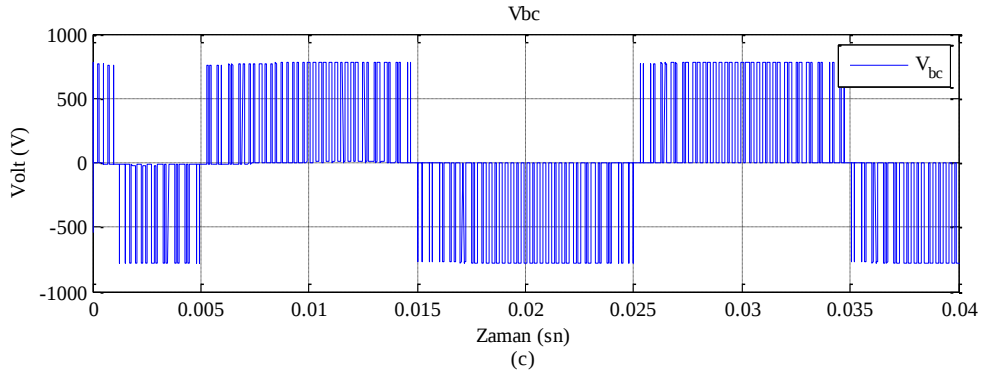
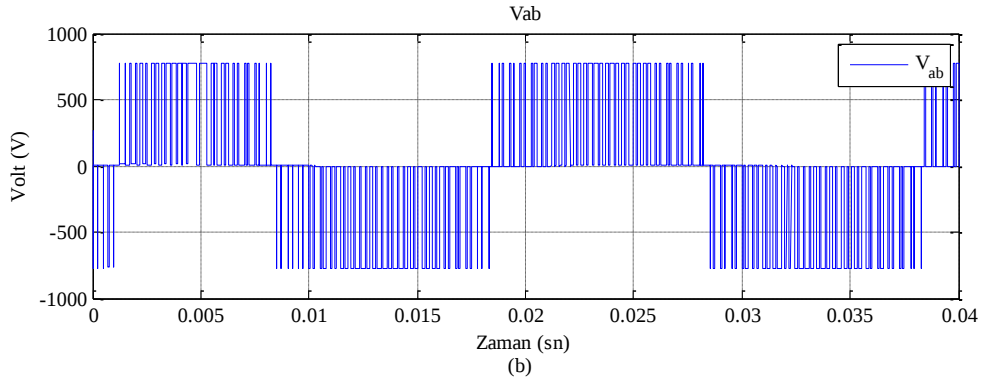
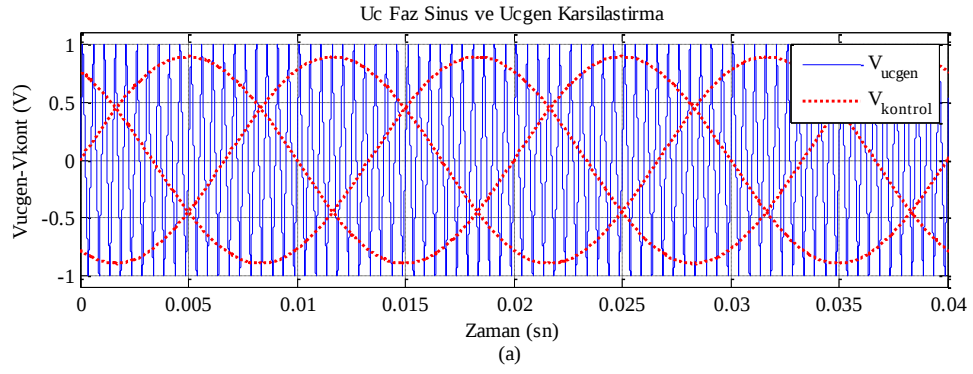
3.3. Üç Fazlı İki Seviye Evirici

Üç faz iki seviye evirici devresi Şekil 3.5’den de görüleceği gibi girişine bağlanan DA kaynak üzerinden beslenen ve faz bacaklarına bağlı anahtarların uygun sıraya göre anahtarlamaıyla çıkışında alternatif akım üretir.



Şekil 3.5 Üç faz iki seviye evirici prensip şeması

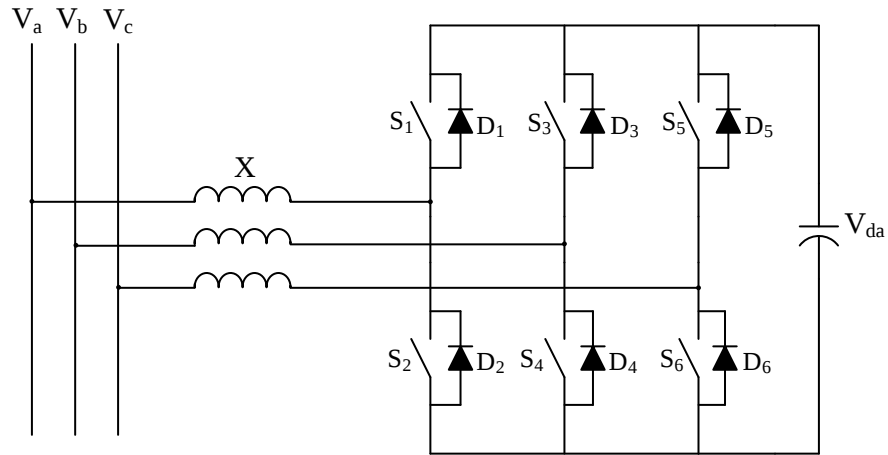
Üç fazlı DGM tekniğinde ise anahtarlara uygulanan darbeler, Şekil 3.6 (a)’da görüldüğü gibi bir üçgen sinyal ve aralarında 120° faz farkı bulunan üç modülasyon sinyalinin karşılaştırılmasıyla üretilir. Üçgen ve sinüs dalgaların kesiştikleri yerlerde anahtarlama sinyali üretilir. Şekil 3.6 (b), Şekil 3.6 (c) ve Şekil 3.6 (d)’de faz- faz arası çıkış gerilimleri verilmiştir.



Şekil 3.6 Üç faz dalga genişlik modülasyonu **a)** Üç faz Sinüs dalga ile üçgen dalga karşılaştırma **b)** V_{ab} gerilimi **c)** V_{bc} gerilimi **d)** V_{ac} gerilimi

3.4. STATCOM'un Çalışma İlkesi

STATCOM'da, güç sistemi ile dönüştürücü arasındaki reaktif güç alışverişi STATCOM geriliminin genliği değiştirilerek ayarlanır. Eğer dönüştürücü gerilimi, hat geriliminin üzerinde tutulursa dönüştürücüden bir reaktans üzerinden hatta bir akım akacaktır. Böylelikle dönüştürücü AA sistemi için bir kapasitif güç üretmiş olacaktır. Eğer dönüştürücünün çıkış gerilimi, AA sisteminin geriliminden küçük tutulursa bu durumda dönüştürücüye bir akım akacak ve dönüştürücü bir endüktif güç çekmiş olacaktır. Eğer çıkış gerilimi AA sistemi gerilimine eşit olursa tepkin güç alışverişi sıfır olacaktır. Dönüştürücü ve şebeke arasında faz farkı oluşturularak reaktif gücün yanında aktif güç alışverişi de yapılabilir. Nitekim dönüştürücü kayıplarından dolayı deşarj olan kondansatör bu şekilde tekrar şarj olur [3,34]. Şekil 3.7'de gerilim kaynaklı iki seviyeli evirici girişine bağlı doğru akım kaynağı ve eviricinin endüktans üzerinden şebekeye bağlantısı gösterilmiştir.



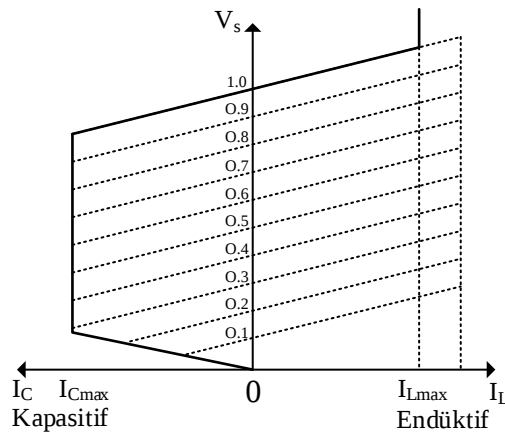
Şekil 3.7 Gerilim kaynaklı evirici tabanlı STATCOM'un şebeke bağlantısı

Dönüştürücü 3 fazlı sistemin fazları arasında tepkin gücün akışını sağlar. Fakat STATCOM'un aktif güç alışverişi yapması için DA uçlarındaki kapasitelerin aktif güç çekmesi ya da vermesi gerekir. Dönüştürücü anahtarlama ile reaktif güç sağlanmasına rağmen bir doğru gerilimli kapasitenin dönüştürücünün girişine bağlı olması gerekir. Çünkü kapasiteler bir gerilim kaynağı olarak bir sirkülasyon akımını sağlayacaktır. Dönüştürücüye bağlanan kapasitenin değeri, doğru akım dalgalanmalarında kondansatör uçları arasındaki gerilim sabit kalacak şekilde büyük değerde seçilir. Dönüştürücü çıkışındaki gerilimin dalga şekli merdiven şeklinde olup çekilen akımın sinüsoidal

olmasından dolayı girişteki doğru akım dalgalı bir akımdır. Kararlı durumda dönüştürücü kayıplarının küçük tutulması amacıyla dönüştürücü temel frekans anahtarlamaıyla çalıştırılır. Fakat hat arızalarından kaynaklanan geçici durumlarda arıza akımlarının etkilerinden uzak durmak amacıyla bir DGM (darbe genişlik modülasyonu) modu kullanılır [34].

3.5. STATCOM V-I Karakteristiği

Şekil 3.8’de belirtilen V-I karakteristiğinden de görüldüğü gibi bir STATCOM AA sistemi geriliminden bağımsız olarak hem endüktif hem de kapasitif akımı belli bir aralık içinde sağlayabilmektedir. STATCOM sistem geriliminden bağımsız olarak hatta gerilim 0.15 pu’ya kadar düşse bile tam bir kapasitif tepkin güç sağlayabilmektedir. Bu durum aslında STATCOM’un gerilim çökmeleri esnasında ve sonrasında gerilimi destekleyici olarak kullanılmasını sağlar [34].



Şekil 3.8 STATCOM V-I karakteristiği

STATCOM, şebekeye bir bağlantı endüktansı üzerinden bağlanır. Bu durumda endüktansdan dolayı bir gerilim düşümü meydana gelir. Sistem kayıplı kabul edilirse şebeke gerilimi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$V_s = V_i + V_R + V_X \quad (3.3)$$

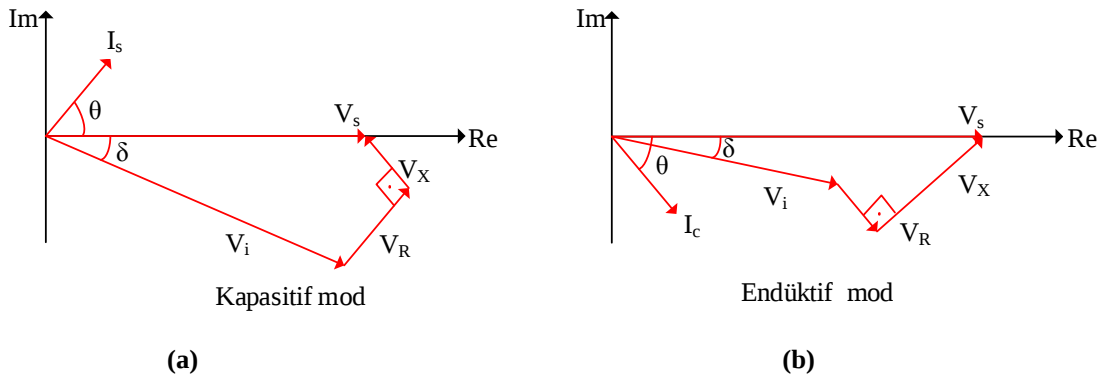
Burada V_s şebeke gerilimi, V_i STATCOM çıkış gerilimi, V_X bağlantı reaktansı üzerine düşen gerilim, V_R Bağlantı direnci üzerine düşen gerilimdir:

$$X = 2\pi f L \cdot I_i \quad (3.4)$$

$$V_R = R.I_i \quad (3.5)$$

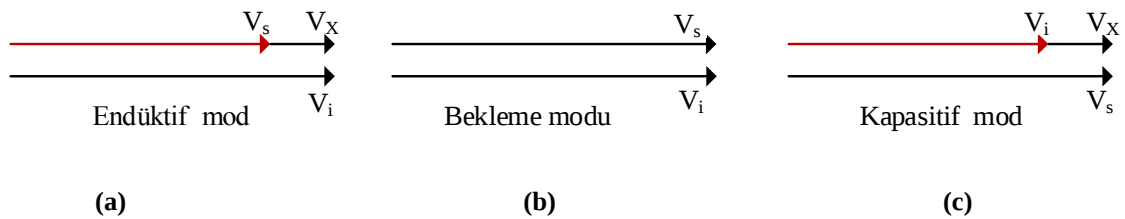
$$V_X = jX.I_i \quad (3.6)$$

Burada f frekans, X bağlantısı reaktansı, I_i evirici akımı, R bağlantı reaktansı iç direnci, X bağlantı reaktansıdır. Sistem kayıplı olarak kabul edilirse bu eşitliklerden Şekil 3.9'daki fazör diyagramı elde edilir:



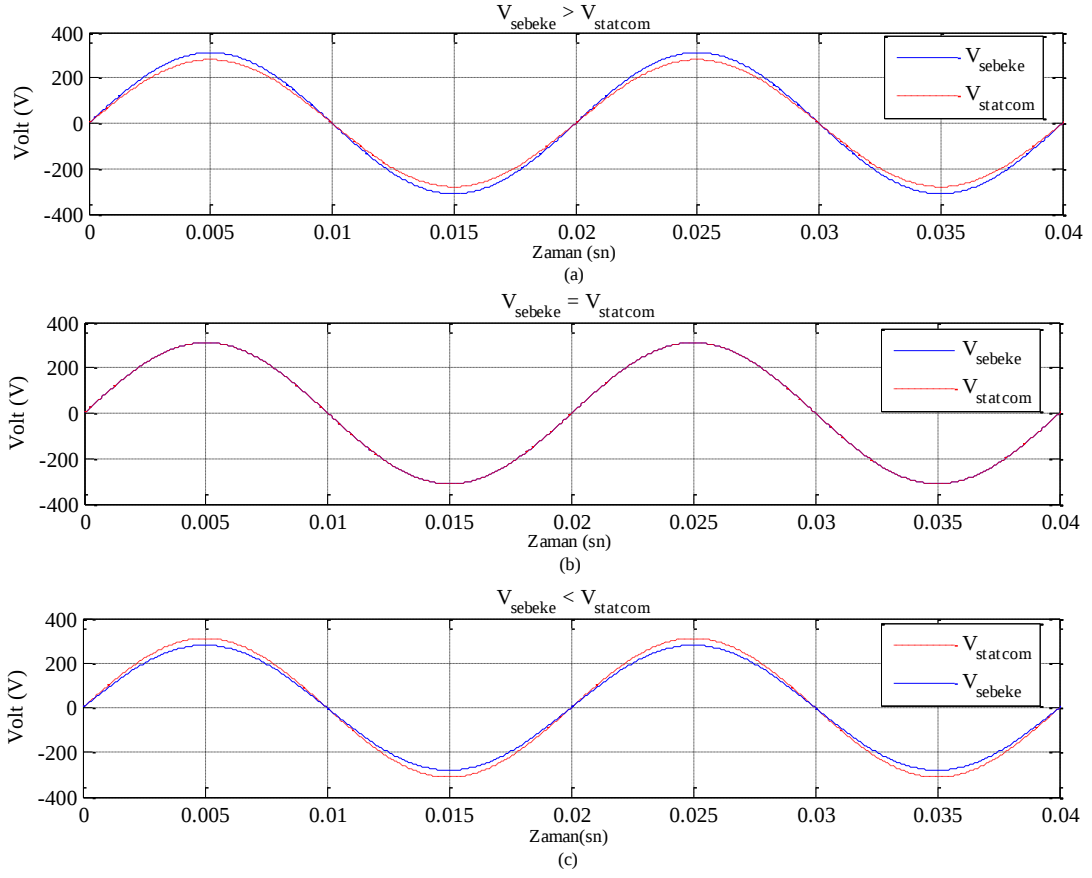
Şekil 3.9 Kayıplı sistem fazör diyagramı a) Kapasitif mod b) Endüktif mod

Sistem kayıpsız olarak düşünülürse STATCOM, şebeke ve bağlantı endüktansı üzerine düşen gerilim vektörel ifadesi Şekil 3.10'daki gibi olacaktır.



Şekil 3.10 Kayıpsız sistem fazör diyagramı a) Endüktif mod b) Bekleme modu c) Kapasitif mod

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi STATCOM reaktif güç üretebilen aynı zamanda tüketebilen bir cihazdır. Reaktif güç üretimi için STATCOM'un üç modundan bahsedilebilir. Bunlar endüktif çalışma modu, kapasitif çalışma modu, ve üretim/tüketimin olmadığı stand-by (bekleme) modudur. Bunu yaparken evirici çıkış geriliminin genliği bağlı bulunduğu şebekeden yüksek, düşük veya şebekeye eşittir. Üç farklı çalışma modu için şebeke ve STATCOM'un gerilimlerinin genlikleri Şekil 3.11'deki gibidir.



Şekil 3.11 STATCOM farklı çalışma modlarında şebeke ve STATCOM gerilimleri arasındaki ilişki **a)** Endüktif çalışma modu **b)** Bekleme modu **c)** Kapasitif çalışma modu

3.6. STATCOM Kontrol Yöntemleri

STATCOM denetimi yapmak için öncelikle şebekenin STATCOM'un ürettiği akım gerilimler ve evirici girişine bağlı DA kaynağın gerilimi anlık olarak ölçülür. Ölçülen bu akım gerilimler sistemde istenen referans olacak şekilde çeşitli yöntemlerle hesaplanır. Hesaplanan referans sinyaller PI, PID, YSA veya Neuro-fuzzy kontrollerden geçirilerek evirici için anahtarlama sinyalleri üretilir. Ayrıca faz kilitleme döngü devresi şebeke ve evirici gerilimin senkronize edilmesi için kullanılır [43]. STATCOM ve şebeke arasındaki iletilebilecek aktif güç değeri P 'dir. Aşağıdaki gibi elde edilir:

$$P = \frac{V_s V_i}{X} \sin \delta \quad (3.7)$$

Burada V_s şebeke gerilinin etkin değeri, V_i STATCOM gerilimin etkin değeri, X bağlantı reaktansı, δ açısı şebeke ve STATCOM gerilimleri arasındaki açıdır.

Q gücü STATCOM ve şebeke arasında iletilebilecek reaktif güç değeridir ve aşağıdaki gibi elde edilir:

$$Q = \frac{V_s}{X} (V_s - V_i \cos \delta) \quad (3.8)$$

STATCOM çıkış gerilimin tepe değeri üç fazlı iki seviye inverter için aşağıdaki gibidir:

$$V_i = M_a \frac{V_{da}}{2} \quad (3.9)$$

Burada (M_a) modülasyon indeksi, (V_{da}) ise evirici girişine bağlı DA kaynak gerilimidir. Aynı şekilde STATCOM çıkış geriliminin etkin değeri aşağıdaki gibi olur:

$$V_i = M_a \frac{V_{da}}{2} = V_i = 0,35 M_a \cdot V_{da} \quad (3.10)$$

Denklem (3.10), denklem (3.7) ve (3.8)'de yerine koyulursa aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

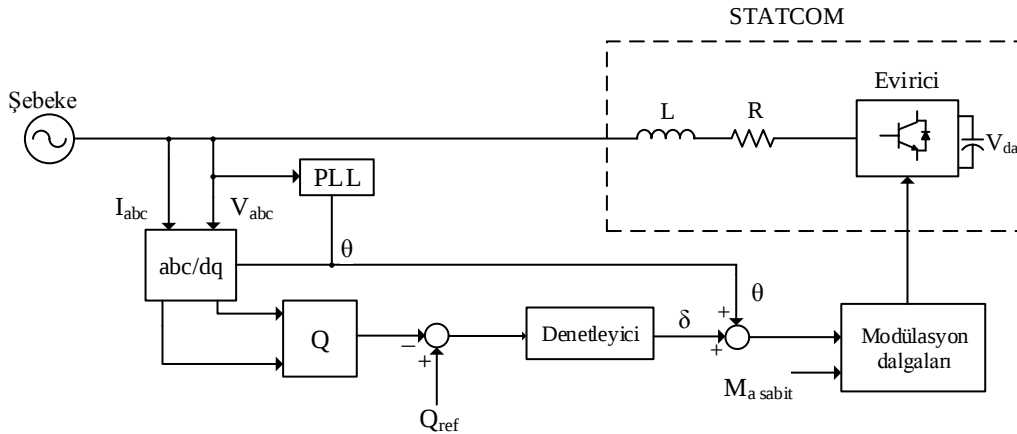
$$P_i = \frac{V_s}{X} 0,35 M_a V_{da} \sin \delta \quad (3.11)$$

$$Q_i = \frac{V_s}{X} (V_s - 0,35 M_a V_{da} \cos \delta) \quad (3.12)$$

Bu eşitliklere göre reaktif güç denetimi için iki değişik çalışma modu ortaya çıkar. Eğer $0,35 M_a V_{da} \cos \delta$ değeri şebeke geriliminden küçük ise evirici reaktif gücü absorbe eder. Yani evirici endüktif operasyon modda çalışır. Eğer $0,35 M_a V_{da} \cos \delta$ değeri şebeke geriliminden büyük ise evirici reaktif gücü şebekeye verir. Evirici kapasitif modda çalışır [1]. Ayrıca $0,35 M_a V_{da}$ denkleminde baktığımızda STATCOM'un reaktif güç üretip tüketmesini sağlamak için DA-hat geriliminin ve/veya modülasyon indeksinin değişmesi gerekmektedir. Buna göre; DA-hat gerilimi sabit tutulup modülasyon indeksi değiştirilerek, Modülasyon indeksini sabit tutulup DA-hat gerilimi değiştirilerek, yada ikisini birden değiştirilerek STATCOM'un kontrolü sağlanır. Bu tekniklerden yola çıkarak STATCOM için önerilen kontrol yöntemleri şu şekildedir; Faz aç denetim yöntemi, doğrudan akım denetim yöntemi, sabit DA-hat gerilim denetim yöntemi ve dolaylı akım denetim yöntemidir [1,8,43].

3.6.1. Faz Açı Denetim Yöntemi

Faz açısı denetim yönteminde, modülasyon indeksi sabit tutulur. Reaktif güç üretme ve tüketme işi evirici girişindeki DA-hat gerilimin değiştirilmesiyle yapılır. DA-hat gerilimi evirici ve şebeke gerilimin arasındaki faz açısı (δ) yardımı ile değiştirilir. Şekil 3.12’de gösterilmiş olan blok şemada faz kilitleme devresine (FKD) girilen üç faz gerilimlerinden açısal frekans bilgisi elde edilir. Elde edilen frekans bilgisi kullanılarak akım ve gerilimler dq -eksen bileşenlerine dönüştürülür. Daha sonra dq -eksen bileşenleri kullanılarak elde edilen akım ve gerilim reaktif güç hesaplanması için kullanılır. Referans reaktif güç miktarı ile hesaplanan reaktif gücün farkı alınarak denetleyiciye girilir. Denetleyici çıkışında ise evirici ve şebeke gerilimlerinin temel bileşenleri arasındaki olması gereken faz farkı bulunur. Elde edilen bu açı bilgisi ve FKD’den elde edilen açı bilgisi toplanır. Sonuç olarak bulunan açı bilgisi modülasyon indeksi ile çarpılarak eviriciye modülasyon dalgası olarak gönderilir. STATCOM her iki çalışma modunda da (endüktif, kapasitif) şebekeden geri fazda ($\delta > 0$) çalıştırılır. Sistemde oluşan aktif kayıplar şebeke tarafından karşılanır [1,8,43].

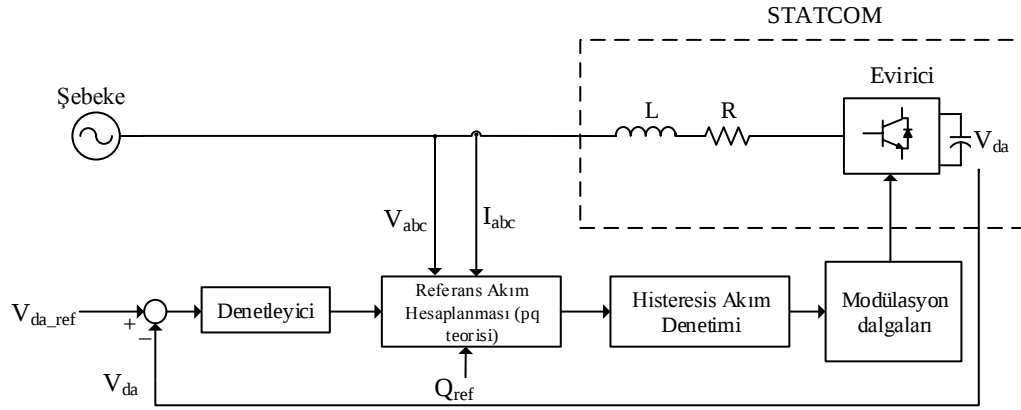


Şekil 3.12 Faz açısı denetim yöntemi kontrol şeması

3.6.2. Doğrudan Akım Denetim Yöntemi

Şekil 3.13’de verildiği gibi, bu yöntem ile DA hat gerilimi ile referans DA gerilim karşılaştırılır. Karşılaştırma sonucu ortaya çıkan fark denetleyiciye girilir. Denetleyici çıkışında DA-hat geriliminin sabit kalması için şebekeden çekilmesi gereken aktif güç miktarı belirlenir. Dolayısıyla P_{ref} denetlenerek DA hat geriliminin sabit kalması sağlanır.

Şebeke gerilimleri clack dönüşümleriyle $\alpha\beta 0$ bileşenlerine dönüştürülür. $V_{\alpha\beta}$ P_{ref} ve Q_{ref} değerleri anlık pq teorisi kullanılarak STATCOM'un hat çıkışındaki $I_{\alpha\beta}$ iki faz bileşenleri elde edilir daha sonra Denklem 3.19 Kullanılarak bu iki faz akım bileşenleri üç faza çevrilerek referans akımlar bulunur. Daha sonra referans ve ölçülen akımlar histeresiz denetleyicide karşılaştırılarak eviriciye göndermek için DGM sinyalleri üretilir [1,8,43].



Şekil 3.13 Doğrudan akım denetimi kontrol şeması

3.6.2.1. Anlık Güç Teorisi

Pq teorisi olarak adlandırılan anlık güç teorisi 1970 yılında Akagi tarafından önerilmiştir. Referans akım üretme tekniği olarak kullanılan bu teori aralarında 120°'er derece faz farkı bulunan akım ve gerilim büyüklüklerini Clark dönüşümü kullanarak iki fazlı sisteme aşağıdaki gibi dönüştürür:

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Burada V_a V_b ve V_c şebeke gerilimleri, I_a I_b ve I_c şebeke akımları $V_{\alpha\beta}$, $I_{\alpha\beta}$ iki eksen gerilim ve akımlarıdır.

P ve Q Anlık güç teorisi ile hesaplanan aktif ve reaktif güçlerdir. Aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$P = V_{\alpha}I_{\alpha} + V_{\beta}I_{\beta} \quad (3.15)$$

$$Q = V_{\alpha}I_{\beta} - V_{\beta}I_{\alpha} \quad (3.16)$$

Anlık güç teorisi aktif ve reaktif güç bileşenlerinin α ve β koordinatlarına göre matris formunda şu şekilde ifade edilir:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

P_{ref} ve Q_{ref} kullanılarak elde edilen aktif ve reaktif akım referansları. I_{α_ref} ve I_{β_ref} dir ve aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha_ref} \\ I_{\beta_ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Burada P_{ref} referans aktif güç, Q_{ref} referans reaktif güçtür. İki faz referans akımlar kullanılarak üç faz referans akımlar üretilir. Aşağıdaki matris formunda gösterildiği gibi ifade edilir:

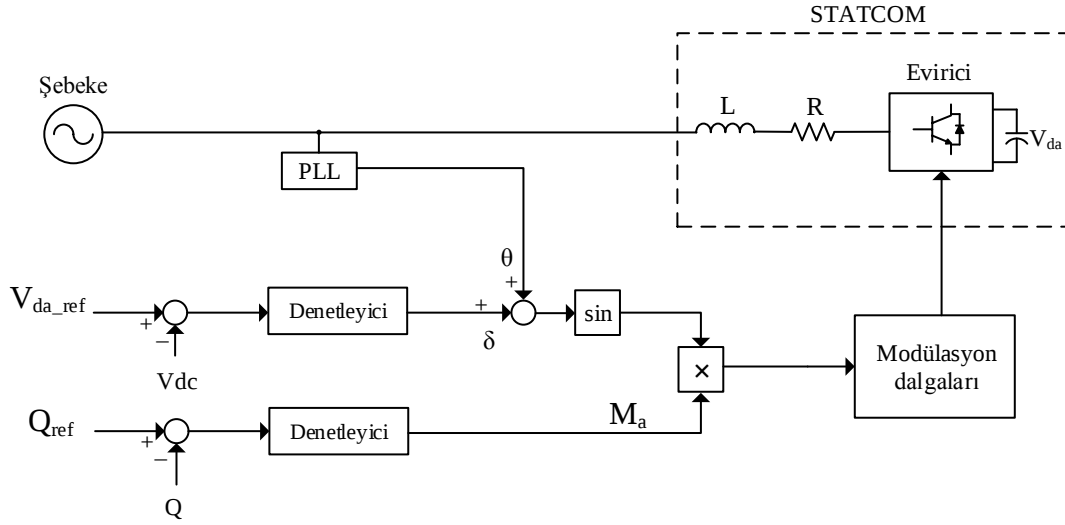
$$\begin{bmatrix} I_a^* \\ I_b^* \\ I_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha_ref} \\ I_{\beta_ref} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

I_a^*, I_b^*, I_c^* Anlık güç teorisine göre üretilen referans akımlardır.

3.6.3. Sabit DA-Hat Gerilim Yöntemi

Faz açısı denetim yönteminde hat kondansatörü ve bağlantı endüktansından dolayı sistemin reaktif güç sağlamadaki hızı çok iyi değildir. Bu yöntemde ise bu dezavantajı ortadan kaldırmak için DA-hat gerilim δ açısı ile sabit tutulur. Çıkış geriliminin genliği modülasyon indeksi denetlenerek değiştirilir. Böylece modülasyon indeksi denetlenerek STATCOM ve şebeke arasındaki reaktif güç akışı kontrol edilmiş olur. Şekil 3.14'den de görüldüğü gibi faz gerilimleri FKD'ye girilerek θ faz açısı belirlenir. Aynı zamanda akım ve gerilimler abc/dq dönüştürülerek istenen noktadaki reaktif güç ölçümü yapılır. Reaktif güç ölçümü yerine dq dönüşümü yapılarak elde edilen I_q reaktif akımı da referans bir I_q ile

karşılaştırılarak denetleyiciye girilebilir. Ya da Referans reaktif güç ile karşılaştırılan ölçülen reaktif güç PI denetleyiciye girilir ve denetleyici çıkışında Modülasyon indeksi M_a elde edilir. V_{da} ve V_{daref} farkı denetleyiciye girilerek faz açısı (δ) elde edilir. Daha sonra faz açısı (δ), şebeke geriliminin faz açısı (θ) toplanır kaydırılmış sinüs elde edilir. Modülasyon indeksi M_a ile kaydırılmış sinüs dalgaları çarpılarak üç faz modülasyon sinyalleri elde edilir [1,8,43].

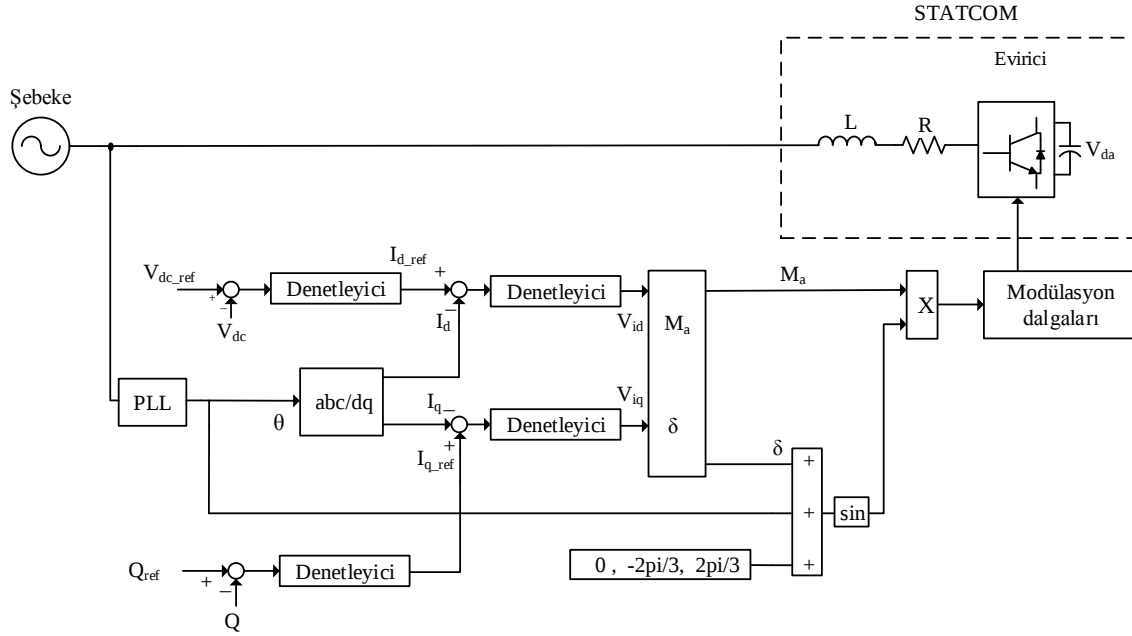


Şekil 3.14 Sabit DA-hat yöntemi denetim şeması

3.6.4. Dolaylı Akım Kontrol Yöntemi

Dolaylı akım kontrol yönteminde sabit DA kontrol yönteminde olduğu gibi DA gerilim sabit tutulur. Reaktif güç denetimi STATCOM gerilimin çıkış dalgalarının genliği değiştirilerek sağlanır. Bunun içinde değişken modülasyon indeksinden yararlanılır. Yani şebekeyle STATCOM arası faz farkı değiştirilerek STATCOM'a aktif akım akması sağlanır. Bu aktif akım kayıplardan dolayı deşarj olan kondansatörü doldurur dolayısıyla kondansatör gerilimi sabit kalmış olur. Bunun için V_{da} ile V_{da_ref} 'in farkı alınarak denetleyiciye girilir denetleyici çıkışı I_{d_ref} 'dir. I_{d_ref} ile abc/dq dönüşümünden elde edilen I_d 'nin farkı alınarak tekrar denetleyiciye girilir ve V_{id} elde edilir. Aynı zamanda referans reaktif güç ile ölçülen reaktif gücün farkı alınır denetleyiciye girilir. Denetleyici çıkışı I_{q_ref} ile abc/dq dönüşümü sonrası elde edilen yani şebekeden ölçülen I_q farkı alınarak tekrardan denetleyiciye girilir. Denetleyici çıkışı V_{iq} 'dir. Son olarak V_{id} ile V_{iq} kullanılarak elde edilen faz açısı bilgisi faz kilitleme devresinden gelen şebeke faz bilgisi ve 120° faz farklı

abc fazları toplanarak fazı kaydırılmış abc fazları elde edilir. Bu abc fazları V_{id} , V_{iq} , V_{da} elde edilen M_a (modülasyon indeksi) ile çarpılarak modülasyon dalgaları elde edilerek eviriciye gönderilir. Şekil 3.15’de dolaylı akım kontrol yöntemi prensip şeması görülmektedir [1,8,43].

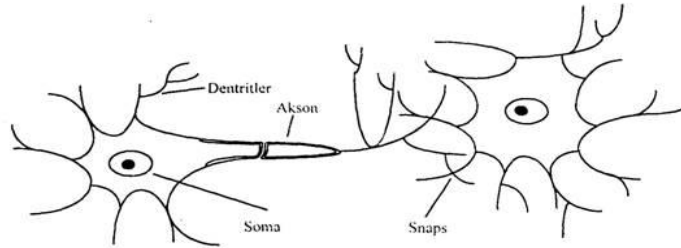


Şekil 3.15 Dolaylı akım kontrol yöntemi prensip şeması

4. YAPAY SİNİR AĞLARI İLE STATİK SENKRON KOMPANZATÖR'ÜN DENETİMİ

4.1. Yapay Sinir Ağları

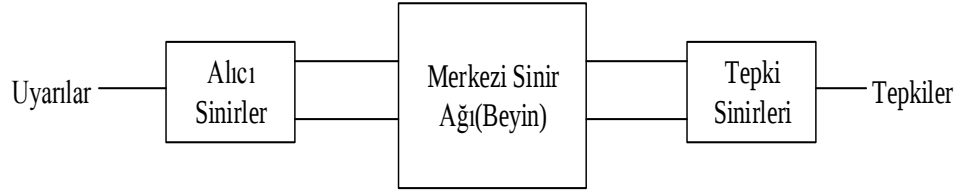
İnsan beyninin çalışma prensibini yapay olarak modellemeyi amaçlayan Yapay Sinir Ağları (YSA); Nesne/örüntü tanıma, sinyal işleme, arıza analizi ve tespiti, sistem tanılama (modelleme) ve denetimi v.s gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve kullanıldığı alanlardaki problemlerin çözümüne yeni yaklaşımlar getirmiştir. Genel olarak bir YSA, tek katmanlı ya da çok katmanlı olarak düzenlenebilen ve paralel olarak çalışan çok sayıda doğrusal olmayan yapay hücreden (işlem elemanı) meydana gelen bir sistem ya da matematiksel model olarak tanımlanır. Hücreler arasındaki ağırlıklar, arzu edilen tasarım amaçlarını sağlayacak şekilde çeşitli öğrenme kuralları ile ayarlanır. Bu yapısı ile YSA, öğrenme sürecinde bilgiyi toplayan ve ağırlıkları yardımıyla bu bilgiyi saklayan paralel bir işlemcidir. Bugün, çeşitli YSA yapıları ve öğrenme algoritmaları geliştirilmiştir [45-49]. Şekil 4.1'de biyolojik sinir sistemi yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Biyolojik sinir hücresi yapısı

4.1.1. Biyolojik Sinir Sistemi

Biyolojik sinir sistemi, çevresinden sürekli bilgi alan bu bilgiyi işleyen, yorumlayan ve buna uygun tepki veren sistem olarak tanımlanır. Şekil 4.2'den görüldüğü gibi bu sistem üç katmanlı bir yapıdan oluşur.

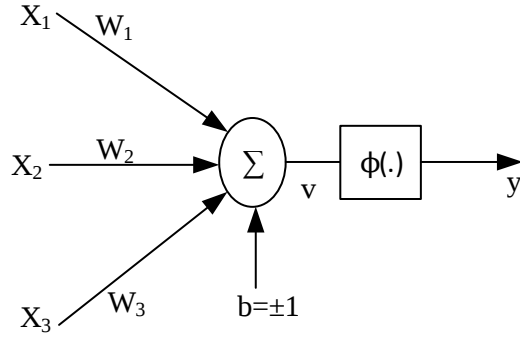


Şekil 4.2 Biyolojik sinir sistemi katman yapısı

İnsan beyni yaklaşık 10^{11} nörondan oluşur ve nöron temel sinir hücresi olup sinir sisteminin temelidir. Biyolojik sinir hücresi hücre gövdesi, akson ve dentritlerden oluşmuştur. Hücre gövdesi çevresinde bulunan dentritler sinyali aldıktan sonra aksonlar vasıtasıyla sinapsislere oranda diğer hücrelerin dentritlerine geçerek sinirsel iletim sağlanır. Synapse gelen ve dentritler tarafından alınan darbeler genellikle elektriksel darbelerdir. Gelen elektriksel darbeler belli bir eşik değerini aşarsa hücre tepki üretir. Şekil 4.1’den de görüldüğü gibi sinir hücresi hücre gövdesi (soma), akson, dentrit olmak üzere 3 kısımdan oluşmaktadır [51].

4.1.2. Yapay Sinir Ağı

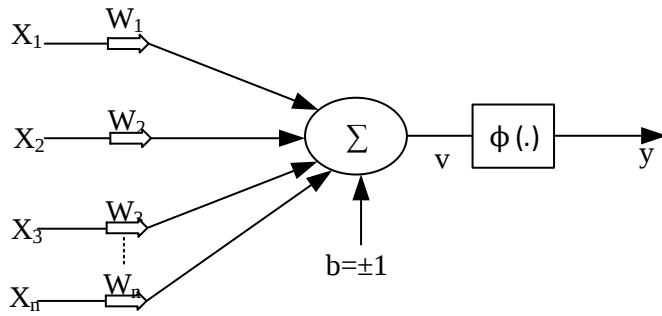
İnsan beyninin üstün özelliklerinden esinlenerek, bunu modellemeyi amaçlayan bilim adamları beynin bir olay karşısındaki tepkisini modellemeyi amaçlamış ve yapay sinir ağları kavramı ortaya çıkmıştır. Yapay sinir ağları insan sinir hücrelerini taklit etme girişiminin bir sonucudur [52]. Normal bilgisayarların bilgi işleme ve hesap algoritmalarından farklı olarak işlem yapan YSA yapay sinir hücrelerinin birbirleriyle farklı şekilde bağlanmasından oluşur. Genel olarak katmanlı bir yapı şeklinde düzenlenir. Beynin çalışma prensibine uygun olarak bilgiyi alma ağırlıklarını yenileyerek onu saklama ve genelleme yeteneğine sahip paralel dağılmış bir işlemcidir. YSA’ da öğrenme hücreler arasındaki ağırlıkları yenilenerek gerçekleşir [51]. YSA, girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki herhangi bir ön bilgiye ihtiyaç duymaz. Doğrusal ve doğrusal olmayan modellemeyi sağlar [52].



Şekil 4.3 Yapay hücre modeli

4.1.3. Statik Hücre Modeli

Ağırlıkların sabit olduğu geri besleme sinyallerinin ve geciktirilmiş sinyallerin olmadığı hücre modelidir. Şekil 4.4’de statik hücre modeli verilmiştir.



Şekil 4.4 Statik hücre modeli

Hücresinin net girdisi ve hücre çıkışı aşağıdaki gibi elde edilir:

$$v = \sum_{i=1}^n W_i x_i + b \quad (4.1)$$

$$y = \phi(v) \quad (4.2)$$

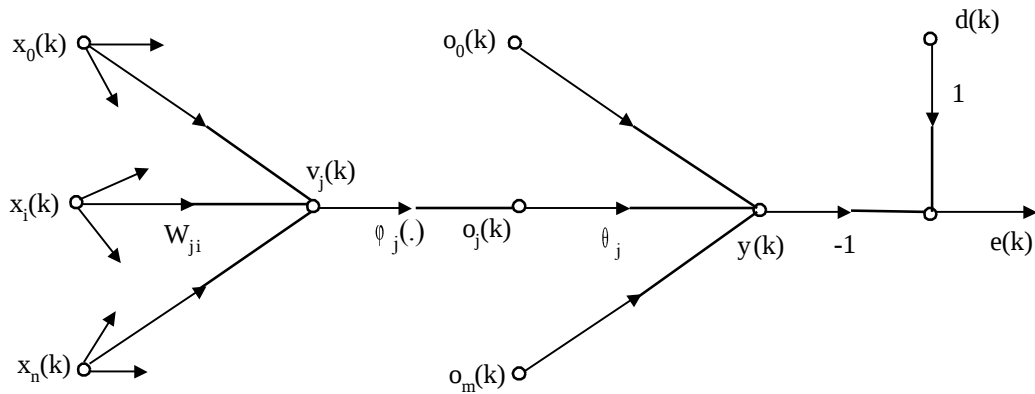
Burada; W - hücrenin ağırlıklar matrisini, x hücrenin giriş vektörünü, v hücrenin net girişini, y hücre çıkışını ve $\phi(.)$ hücrenin aktivasyon fonksiyonunu göstermektedir.

4.1.4. Çok katmanlı Ağ Yapısı

Çok katmanlı algılayıcı YSA'nın öğrenmesi istenen olayların girdi ve çıktıları arasındaki ilişkiler doğrusal olmadığı durumlarda kullanılır. Gerçek hayattaki problemlerin çoğu doğrusal olmayan problemlerdir. Örneğin XOR problemini basit adaline yapısıyla çözmek mümkün değildir. Çünkü doğrusal sınıflama ile XOR çıkışlarını sınıflamak mümkün değildir. Bu ağın temel amacı ağın çıktısı ve beklenen çıktı arasındaki hatayı en aza indirmektir. Bunu hatayı çıkıştan başlayarak geriye doğru yayarak (geriye yayılım öğrenme algoritması) yapar.

4.1.5. Geriye Yayılım Öğrenme Algoritması

Geriye yayılım öğrenme algoritması eğitim düşme algoritmasının katmanlı YSA'larına uyarlanmış halidir. Algoritmada geçen sinyaller ayrık zamanda gösterilmiş ve ayrık zaman değişkeni k olmak üzere $\mathbf{x}(k)$ - ağ giriş vektörü, $\mathbf{o}(k)$ - orta katman çıkış vektörü, $\mathbf{d}(k)$ - arzu edilen çıkış vektörü, $\mathbf{y}(k)$ - gerçek ağ çıkış vektörü ve $\mathbf{W}$ ve $\boldsymbol{\theta}$ ağırlıklar matrisini göstermektedir. Eğitim düşme esasına dayanan geriye yayılım algoritmasında, seçilen amaç ölçütünün (performans kriteri) bir katmandaki ağırlığa göre doğru eğiminin hesaplanması gerekir. Bu nedenle, ağ çıkışındaki hata sinyali, katmanlardan geriye doğru yayılır [53]. Çıkış katmanı doğrusal olan ileri beslemeli 3 katmanlı YSA'nın sinyal akış şeması Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5 İleri beslemeli 3 katmanlı YSA sinyal akış şeması

Şekil 4.5’de ki sinyal akış şemasından YSA’nın ileri yöndeki matematiksel modeli aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} v_j &= \sum_{i=0}^n W_{ji} \cdot x_i, \quad o_j = \varphi(v_j) \quad j=1,2,\dots,m \\ y_\ell &= \sum_{j=0}^m \theta_j \cdot o_j \end{aligned} \quad (4.3)$$

YSA çıkışındaki hata aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$e_k = d_k - y(k) \quad (4.4)$$

Burada; $d(k)$ istenen ağ çıkış değeri, $y(k)$ ağ çıkışı, $e(k)$ ağ çıktısıyla istenen çıktı arasındaki farktır. Tek çıkışlı bir YSA için ağ çıkış hatası, hataların kareleri (örneksel amaç ölçütü) ve toplam amaç ölçütü (hataların karelerinin ortalaması) aşağıdaki gibi tanımlanır [51] ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$E_k = \frac{1}{2} e^2(k) \quad (4.5)$$

Toplam amaç ölçütü aşağıdaki gibi ifade edilir:

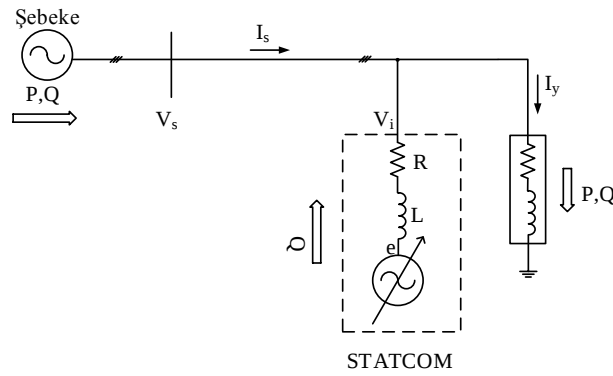
$$J = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N E(k) \quad (4.6)$$

Burada amaç ölçütü J , N adet eğitim örneği için hataların karelerinin ortalaması olduğundan örneksel ya da toplu amaç ölçütünün ağırlıklara göre eğimi bulunarak geriye yayılım algoritması gerçekleştirilebilir. Hatalarının karelerinin eğimine göre, her bir eğitim örneğinin uygulanışında ağırlıklar yenilenirse örneksel öğrenme kuralı elde edilir. Toplam amaç ölçütünün eğimine göre, N adet eğitim örneğinin uygulanışından sonra ağırlıklar yenilenirse toplu öğrenme kuralı elde edilir. Buna göre, hataların karelerinin, doğrusal çıkış katmanındaki bir ağırlığa göre eğimi, zincir kuralına göre kısmi türevlerle belirlenebilir [51]:

$$\frac{\partial E(k)}{\partial \theta_j(k)} = \frac{\partial E(k)}{\partial e(k)} \cdot \frac{\partial e(k)}{\partial y(k)} \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial \theta_j(k)} \quad (4.7)$$

4.2. STATCOM Benzetimleri

STATCOM, bağlı olduğu şebekede yükün durumuna göre gerilim ve faz açısını değiştirerek şebeke STATCOM arası aktif ve reaktif güç alışverişini sağlar. Eğer STATCOM'un kullanılmasındaki amaç sadece reaktif güç akışını kontrol etmekse STATCOM çıkış geriliminin genliği değiştirilerek şebekeden çekeceği ve/veya şebekeye vereceği reaktif güç denetlenebilir. Bu çalışmada reaktif güç kontrolü amaçlanmıştır. İlk benzetim MATLAB *.m ortamında, Şekil 4.6'daki STATCOM eşdeğer devre modeli kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.62'daki model şebeke, şebekeye paralel bağlı bir R-L yük ve STATCOM'dan oluşur.



Şekil 4.6 STATCOM eşdeğer devresi

Şekil 4.6'daki eşdeğer devreden STATCOM aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{aligned} V_{sa} - e_a &= RI_a + L \frac{dI_a}{dt} \\ V_{sb} - e_b &= RI_b + L \frac{dI_b}{dt} \\ V_{sc} - e_c &= RI_c + L \frac{dI_c}{dt} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Burada çıkış geriliminin bir fazı e_a , STATCOM çıkış gerilimi bir fazı V_i , bağlantı reaktansı ve iç direnci R, L ve şebeke geriliminin bir fazı V_{sa} 'dır. $p = \frac{d}{dt}$ olmak üzere, akımlar R, L ortak paranteze alınırsa ifade aşağıdaki şeklini alır.

$$L.p \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} + R \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_a - e_a \\ V_b - e_b \\ V_c - e_c \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Park dönüşümü yapılarak i_d (şebekeden çekilen aktif akım) ve i_q (şebekeden çekilen reaktif akım) akımları aşağıdaki gibi elde edilir;

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & L\omega \\ -L\omega & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d - V_{sd} \\ e_q - V_{sq} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Daha önce verildiği gibi STATCOM ve şebeke arası aktif ve reaktif güç değerleri aşağıdaki hesaplanır. Denklem (4.11)'e göre STATCOM ve şebeke gerilimleri arasındaki δ açısı sıfır ise STATCOM ve şebeke arası herhangi bir aktif güç akışı olmaz. Denklem (4.12)'ye göre evirici geriliminin genliği değiştirilerek STATCOM ve şebeke arası reaktif güç akışı sağlanabilir. STATCOM güç denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$P = \frac{V_s V_i}{X} \sin \delta \quad (4.11)$$

$$Q = \frac{V_s}{X} (V_s - V_i \cos \delta) \quad (4.12)$$

Benzetim için kullanılan yük değerleri ve STATCOM evirici bağlantı reaktansı değerleri bütün benzetimler için aynı olup aşağıdaki gibidir;

$$P = 15 \text{ KW}, Q = 15 \text{ kVAr}$$

Bağlantı Reaktansı ise:

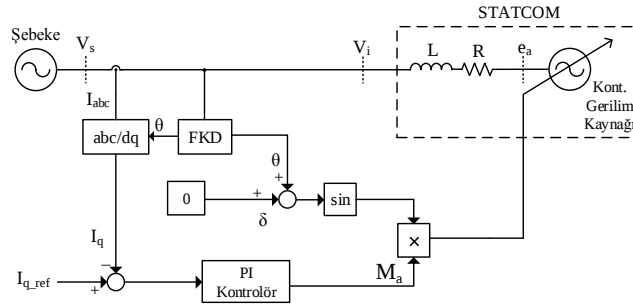
$$R = 0.05 \, \Omega, L = 3 \text{ mH}$$

4.2.1. Benzetim 1

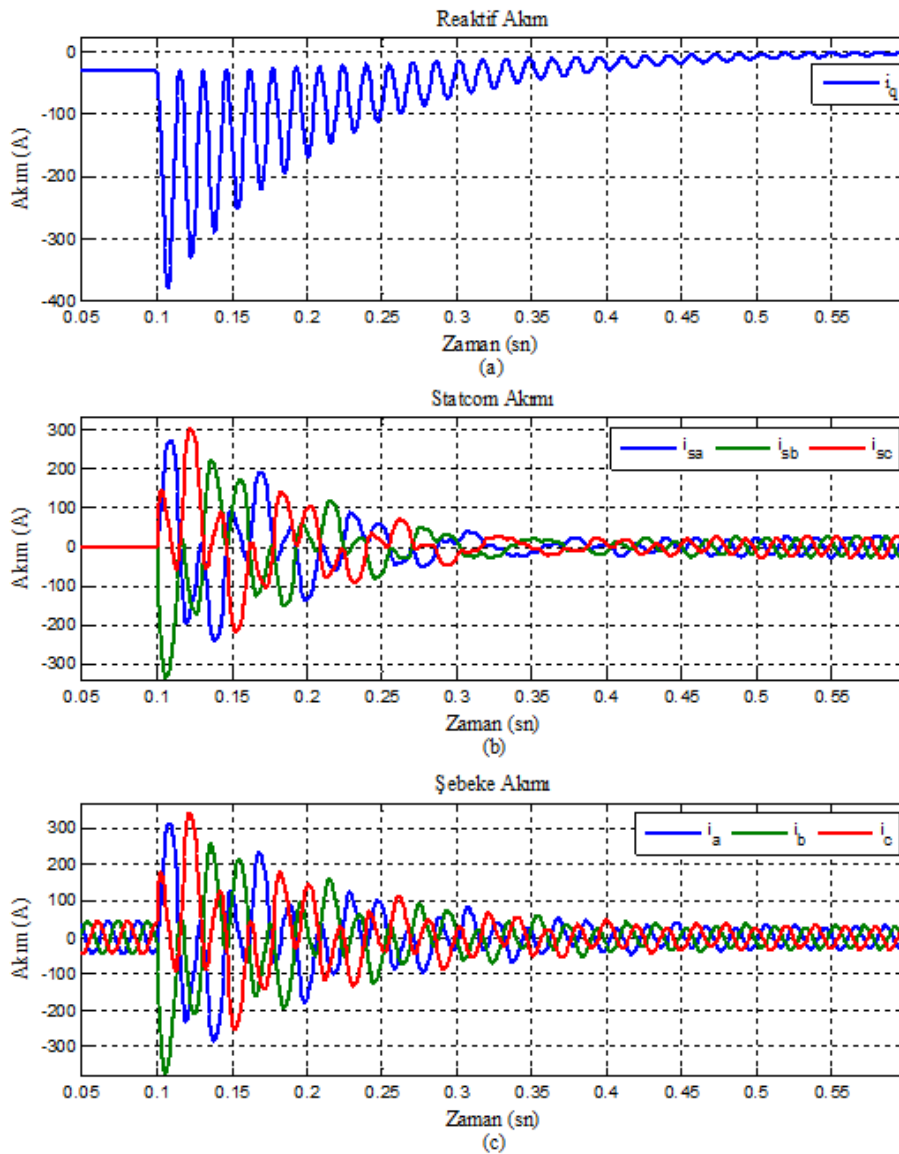
4.2.1.1. PI Kontrolörlü STATCOM ile Reaktif Güç Denetimi

Benzetim için MATLAB programı kullanılmıştır. Matlab *.m ortamında oluşturulan şebeke, STATCOM ve şebekeye bağlı yükün matematiksel modeli oluşturulmuştur. Sırasıyla PI ve YSA denetleyici kullanılarak benzetimler yapılmıştır. Şekil 4.7'de STATCOM'un PI kontrol devresinden görüldüğü gibi şebekeden ölçülen üç faz akımların abc/dq dönüşümü yapılmış ve i_q akımıyla referans akımın farkı alınarak PI denetleyiciye hata olarak girilmiştir. Referans akım değeri sıfır olarak alınmıştır. PI denetleyici ile STATCOM çıkış geriliminin genliği kontrol edilmiştir. Denetleyici parametreleri olan oransal kazanç $K_p=0.002$, integral kazancı $K_i= 0.04$ olarak deneme-yanılma yöntemi ile

ayarlanmıştır. Yük akımları STATCOM devrede değilken ve devreye girdikten sonra değişmediğinden verilmemiştir.



Şekil 4.7 STATCOM PI kontrolör ile denetimi blok diyagramı

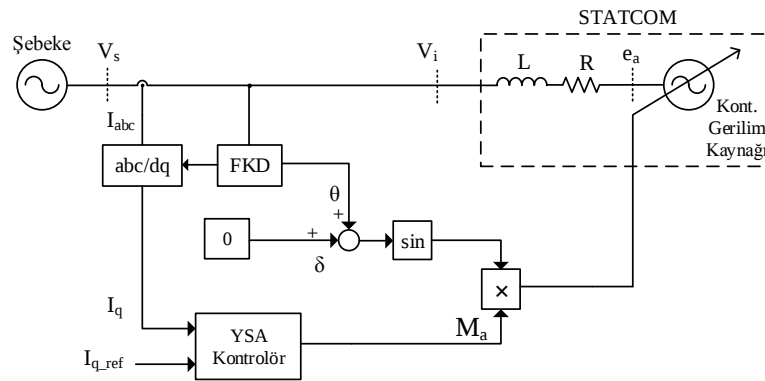


Şekil 4.8 PI kontrolörlü STATCOM sistem akımları **a)** Şebekeden çekilen reaktif akımının değişimi **b)** STATCOM çıkış akımı **c)** Şebekeden çekilen üç faz akımlarının değişimi

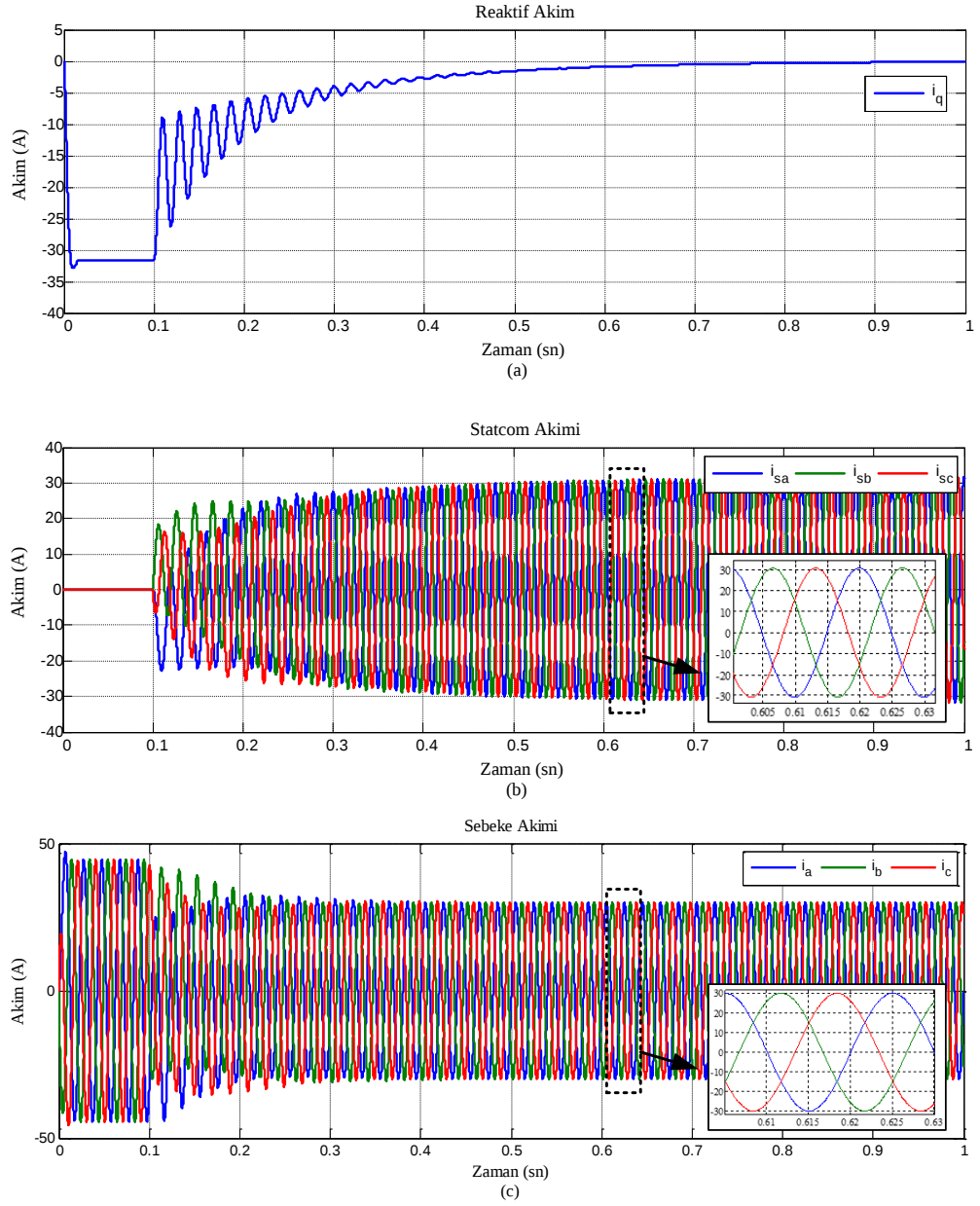
Şekil 4.8 (a)'da STATCOM devrede değilken ve devreye girdikten sonra şebekeden çekilen reaktif akımı göstermektedir. Şebekeden çekilen i_q akımı yaklaşık 32 A'dır. Şekil 4.8 (b)'de görüldüğü gibi STATCOM devreye girinceye kadar STATCOM çıkış akımları sıfırdır. 0.1. sn'de STATCOM devreye girmiş ve akım üretmeye başlamıştır. Şekil 4.8 (c)'de STATCOM devreye girdikten sonra, şebekeden çekilen reaktif akımı STATCOM üretmiştir. Şebekeden çekilen i_q geçici rejimden sonra sıfır olmuştur.

4.2.1.2. YSA Kontrolörlü STATCOM ile Reaktif Güç Denetimi

YSA denetleyicili STATCOM ile reaktif güç kompanzasyonu yaparken, güç modelinde bir değişiklik olmamıştır. PI denetleyici yerine çok katmalı YSA denetleyici kullanılmıştır. PI denetleyici kullanırken referans reaktif akım ile ölçülen reaktif akımın farkı alınarak denetleyiciye girilmiştir. Referans akım değeri sıfır olarak alınmıştır. Burada ise hem referans hem de ölçülen reaktif akım YSA denetleyiciye girilmiştir. Şekil 4.9'da YSA denetleyicili STATCOM reaktif güç denetim prensip şeması görülmektedir. YSA denetleyicili STATCOM'un PI kontrollü STATCOM ile arasında güç devresi olarak bir fark yoktur. Buradaki fark kontrolörden kaynaklanır. İlk benzetimde olduğu gibi bu benzetimde de yük akımları benzetim boyunca değişmediğinden yük akımları verilmemiştir.



Şekil 4.9 STATCOM'un YSA ile denetimi blok diyagramı



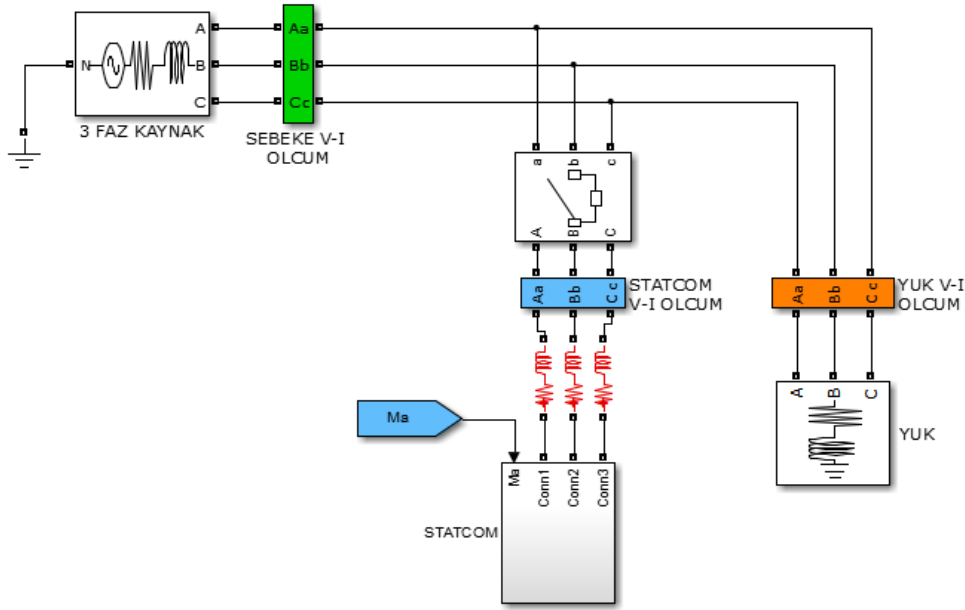
Şekil 4.10 YSA kontrolörlü STATCOM sistem akımları **a)** Şebekeden çekilen reaktif akımının değişimi **b)** STATCOM çıkış akımı **c)** Şebekeden çekilen üç faz akımlarının değişimi

Şekil 4.10 (a)'da YSA kontrolörlü STATCOM devrede değil iken ve devreye girdikten sonra şebekeden çekilen reaktif akım verilmiştir. Şekil 4.10 (b)'de STATCOM çıkış akımları verilmiştir. Şekil 4.10 (c)'de STATCOM devreye girdikten sonra şebekeden çekilen üç faz akımlarındaki düşüş görülmektedir.

4.2.2. Benzetim 2

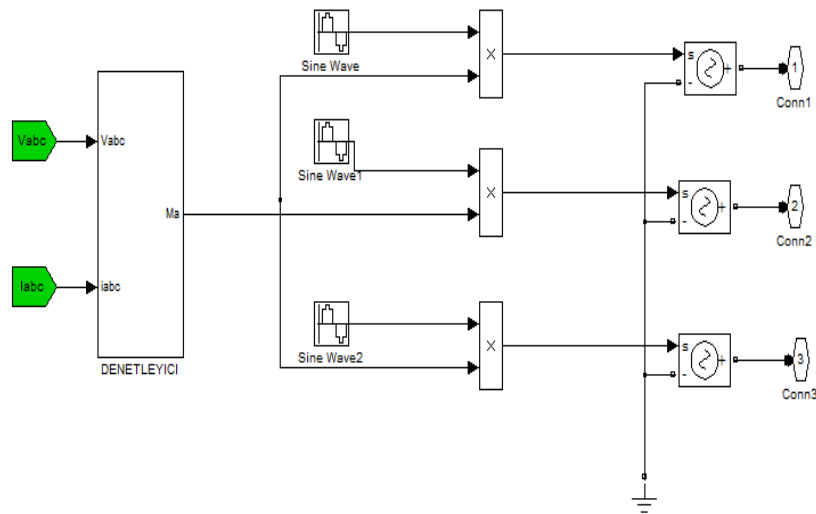
4.2.2.1. Kontrollü Gerilim Kaynaklı STATCOM'un PI Denetleyici ile Reaktif Güç Denetimi

Şekil 4.11' de üç fazlı kaynağa bağlı R-L yük ve bir kesici üzerinden şebekeye bağlı kontrollü gerilim kaynağı tabanlı STATCOM verilmiştir. Şebeke, STATCOM ve yük için ayrı ayrı ölçme bloğu kullanılmıştır. Şebekeden ölçülen üç faz akımlar iki eksen dq akımlarına çevrilir. Daha sonra şebekeden ölçülüp $dq0$ eksenine çevrilen akımlardan i_q akımı alınarak referans akımdan çıkarılır. Burada referans akım değeri sıfır olarak alınmıştır. Referans akım ile ölçülen akım arasındaki ortaya çıkan fark PI denetleyiciye girilir. PI Denetleyici çıkışından elde edilen uygun katsayı ile kontrollü gerilim kaynağının çıkış genliği kontrol edilmiştir.



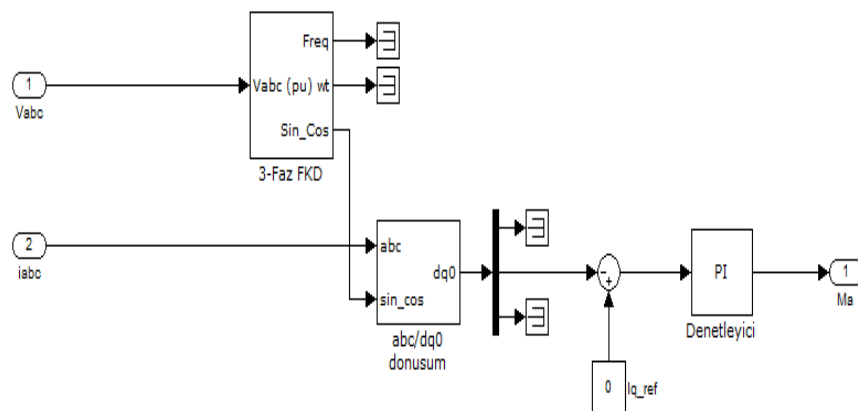
Şekil 4.11 STATCOM şebeke bağlantısı MATLAB/Simulink modeli

Şekil 4.12'de Kontrollü gerilim kaynağı tabanlı STATCOM'un MATLAB/Simulink modeli ve kontrolör bağlantısı verilmiştir. Görüldüğü gibi 120° faz farkı olan sinüs kaynakların genlikleri denetleyici çıkışıyla denetlenmiştir.

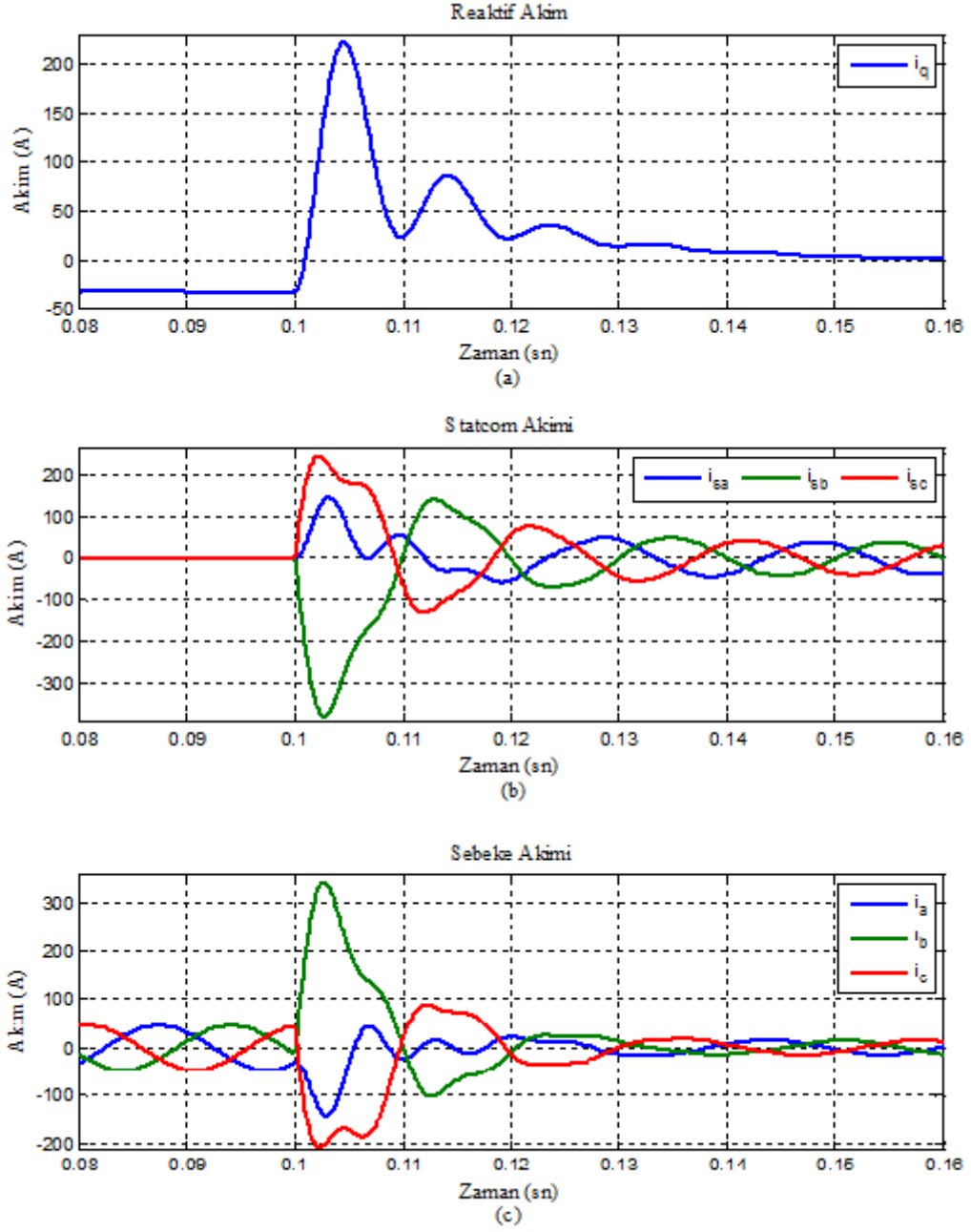


Şekil 4.12 STATCOM bloğu içyapısı MATLAB/Simulink modeli

Şekil 4.13’de denetleyici bloğunun MATLAB/Simulink modeli verilmiştir. Görüldüğü gibi denetleyici bloğu, bir Faz Kilitleme Devresi (FKD) bloğundan, abc/dq (park dönüşümü) bloğundan ve PI denetleyiciden oluşur. Kullanılan PI denetleyici parametrelerini elde etmek için deneme yanılma yöntemi kullanılmıştır. Burada K_p oransal kazanç, K_i ise integral kazancıdır. $K_p = 0.01$ ve $K_i = 1$ olarak ayarlanmıştır. Denetleyici parametrelerini ayarlamak için deneme- yanılma yöntemi kullanılmıştır. Yük akımlarında STATCOM devreye girmeden önce ve girdikten sonra değişiklik olmadığından yük akımları verilmemiştir.



Şekil 4.13 STATCOM denetleyici bloğu içyapısı MATLAB/Simulink modeli



Şekil 4.14 PI kontrolörlü STATCOM sistem akımları **a)** Şebekeden çekilen reaktif akımın değişimi **b)** STATCOM çıkış akımları **c)** Şebekeden üç faz akımlarının değişimi

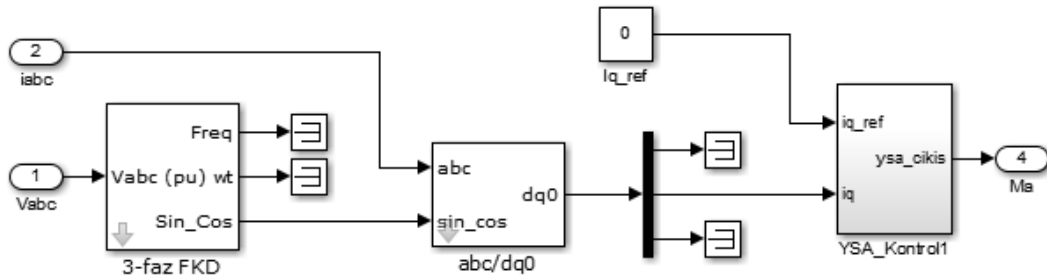
Şekil 4.14 (a)'da STATCOM devrede değilken, endüktif yük akımları yaklaşık 50 A (tepe değer)'dir. 0.1 sn.'de STATCOM devreye alındığında şebekeden çekilen reaktif akımda düşüş başlamış ve kısa süre sonra sıfır olmuştur. Şekil 4.14 (b)'de STATCOM çıkış akımı verilmiştir. STATCOM devrede değilken STATCOM çıkış akımı sıfırdır yani herhangi bir reaktif güç üretimi ve tüketimi yoktur. 0.1 sn'de STATCOM devreye alındıktan sonra reaktif akım üretmeye başlamıştır. Şekil 4.14 (c)'da şebekeden çekilen üç faz akımları verilmiştir. Şebekeden çekilen akımların tepe değeri yaklaşık 50 Amper iken STATCOM

devreye girdikten sonra bu akımlarda 30 A(tepe değeri)'e düşmüştür. Yük akımlarında herhangi bir değişiklik olmamış ve yükün ihtiyacı olan reaktif güç STATCOM tarafından sağlanmıştır.

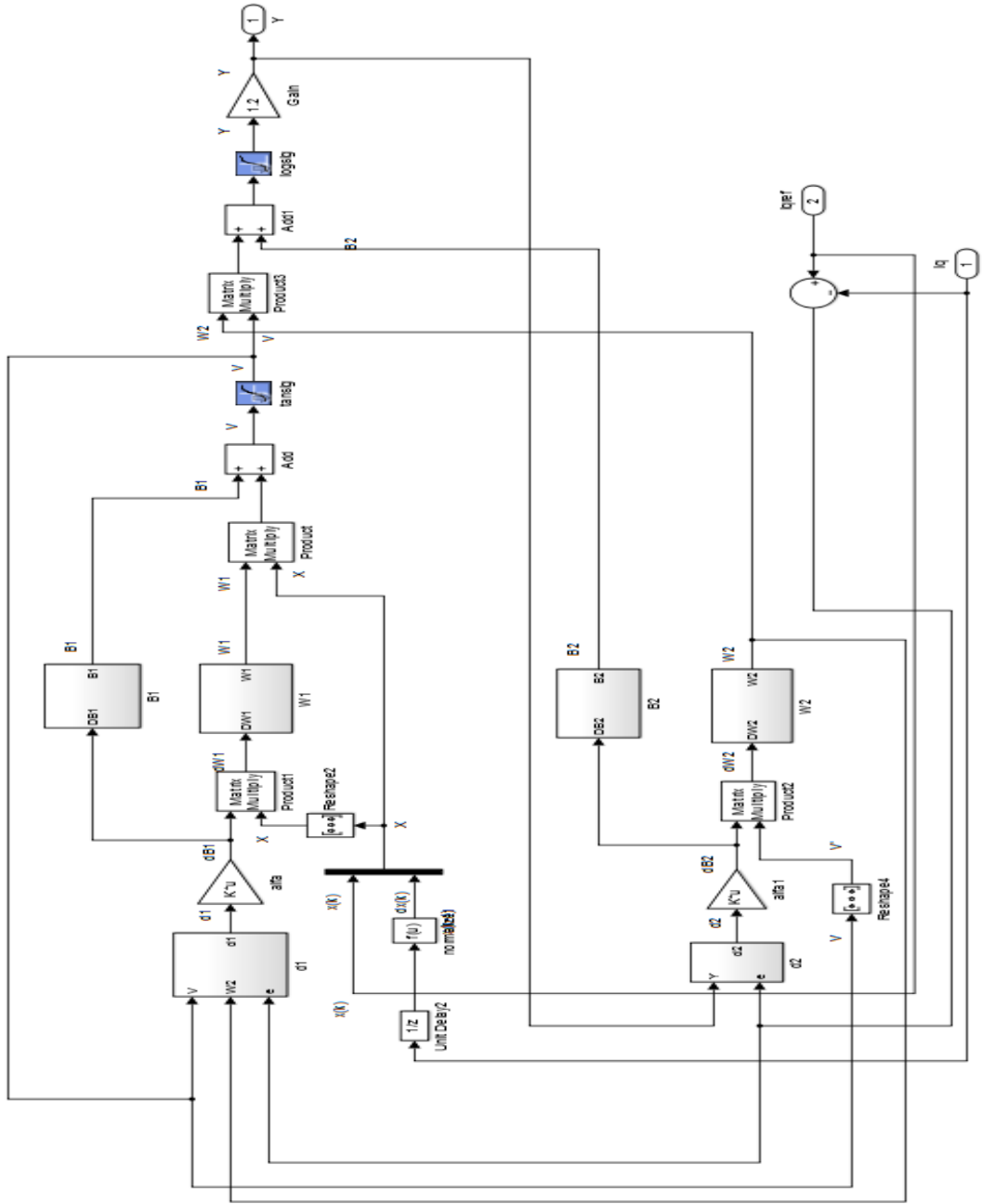
4.2.2.2. Kontrollü Gerilim Kaynağı Tabanlı STATCOM'un YSA Denetleyici ile Reaktif Güç Denetimi

Bu benzetimde güç devresi 4.11'de verilen devre ile aynıdır. Yani aynı şartlarda PI denetleyici devreden çıkarılmış yerine MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan YSA denetleyici koyulmuştur. PI kontrolörlü benzetimde şebekeden ölçülen i_q akımı ve i_{q_ref} 'in farkı alınmış hata PI denetleyiciye girilmiştir. Denetleyici çıkışı ile kontrollü gerilim kaynağının genliği çarpılarak kompanzasyon yapılmıştır. YSA denetleyici giriş, ara katman ve çıkış katmanına sahiptir. PI denetleyicinin aksine i_q ve i_{q_ref} 'in farkı alınmamıştır. Her iki sinyalde giriş bilgisi olarak YSA denetleyiciye girilmiştir. i_q akımı denetleyiciye girilmeden önce normalize edilmiştir. Ağın eğitimi için geriye yayılım algoritması kullanılmıştır. Geriye yayılım algoritmasına göre ağ çıkışındaki hatanın türevi alınarak geriye doğru yayılmış ağ çıkışındaki hatanın bu şekilde sıfıra yakın bir değer olması sağlanmıştır.

Şekil 4.15'de YSA denetleyici bloğu verilmiştir. Burada bir önceki benzetimde kullanılan denetleyici bloğuna benzerdir. FKD bloğundan alınan senkronizasyon sinyalleri ve abc/dq bloğu kullanılarak i_q akımı elde edilmiş i_q ve i_{qref} akımı YSA kontrolöre giriş sinyali olarak girilmiştir. YSA kontrolör çıkış sinyali STATCOM'un genliğini denetlemek için kullanılmıştır.

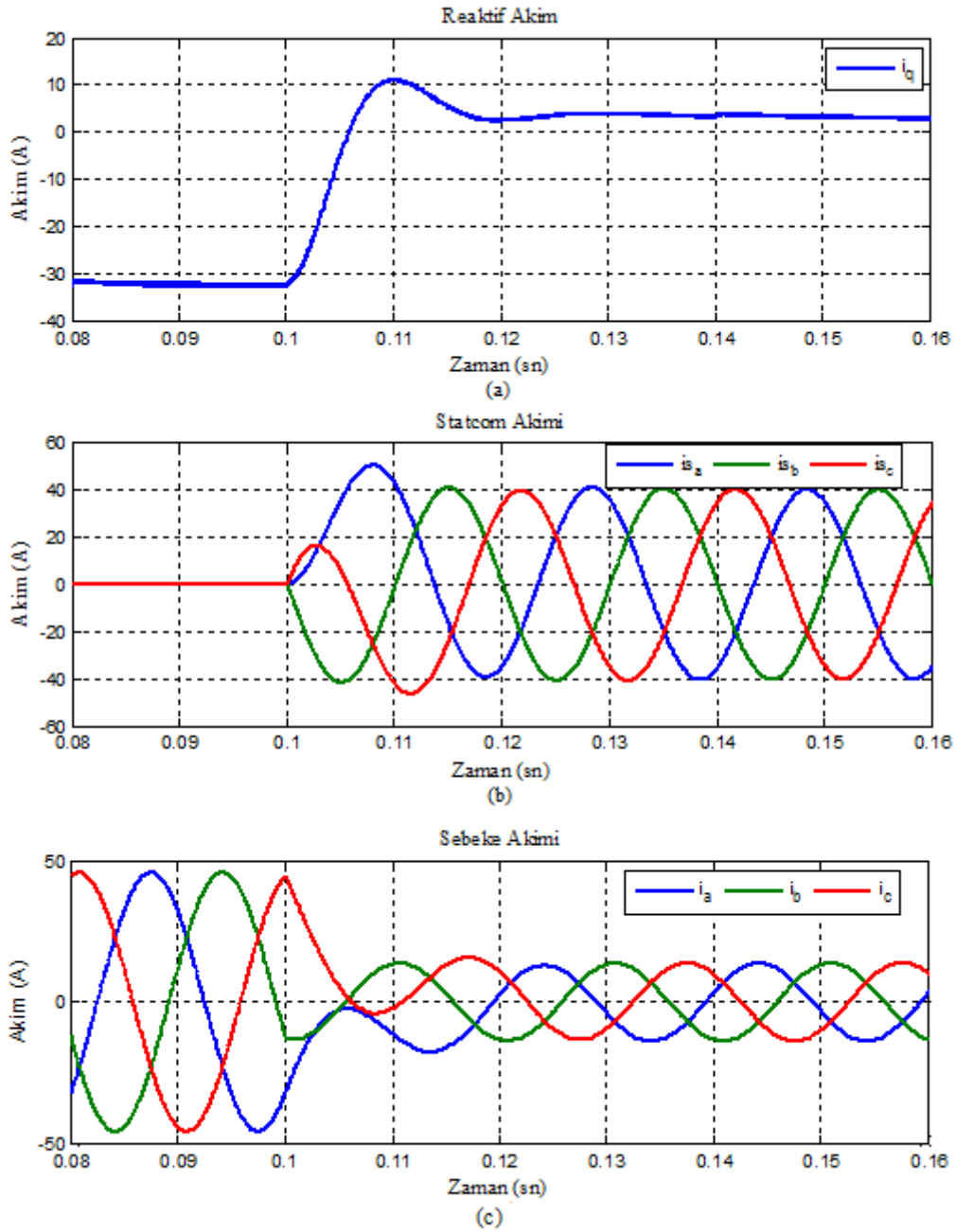


Şekil 4.15 YSA Denetleyici bloğu MATLAB/Simulink modeli



Şekil 4.16 YSA kontrolör MATLAB/Simulink modeli

Şekil 4.16’da YSA kontrolörün MATLAB/Simulink modeli verilmiştir. Ağ yapısı üç katmanlıdır. Giriş, orta ve çıkış katmanından oluşur. Üç katmanlı ileri beslemeli YSA’nın orta katmanında yeterli sayıda hücre bulunması durumunda sürekli bir fonksiyonu istenen oranda yaklaştıracak gösterilmiştir [51]. Burada orta katmanda 12 hücre kullanılmıştır. $x(k)$ ve $x(k-1)$ hücre girişleri W_1 , B_1 giriş katmanı ağırlıkları, V orta katman girişi W_2 , B_2 orta katman giriş ağırlıkları, Y ise çıkış katmanıdır. α_1 ve α_2 öğrenme oranıdır.



Şekil 4.17 YSA kontrolörlü STATCOM sistem akımları **a)** Şebekeden çekilen reaktif akımın değişimi **b)** STATCOM çıkış akımı **c)** Şebekeden çekilen üç faz akımların değişimi

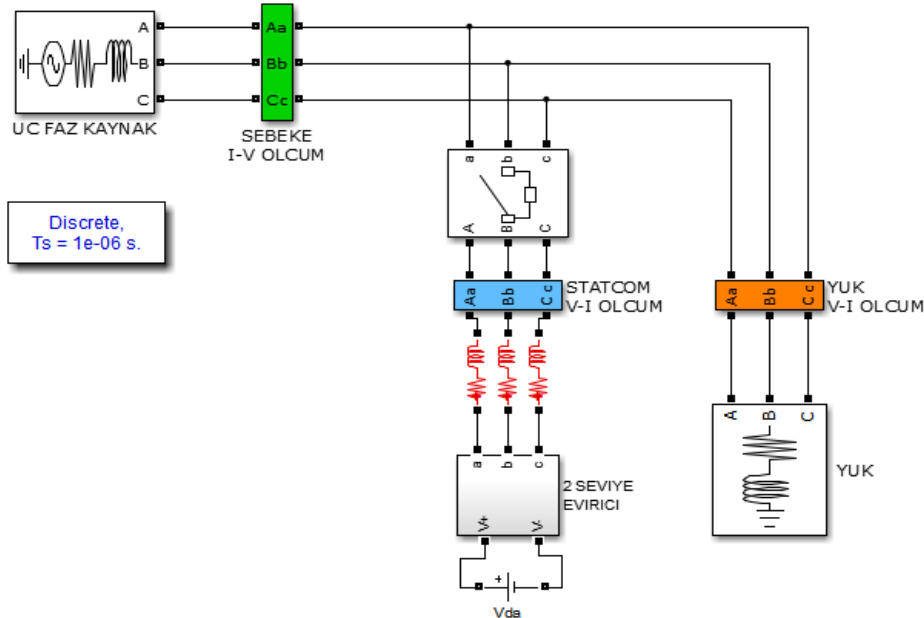
Şekil 4.17’de MATLAB/Simulink ortamında kontrollü gerilim kaynağıyla oluşturulan YSA kontrolörlü STATCOM’un benzetim sonuçları görülmektedir. Şekil 4.17 (a)’da YSA kontrolörlü STATCOM devreye girmeden önce ve girdikten sonra şebekeden çekilen reaktif akımın değişimini göstermektedir. Şekil 4.17 (b)’de STATCOM çıkış akımlarını göstermektedir. Şekil 4.17 (c)’de şebekeden çekilen üç faz akımların değeri verilmiştir. STATCOM devreye girmeden yaklaşık 50 A (tepe değer) iken bu akım STATCOM

devreye girdikten sonra belli oranda düşmüştür. STATCOM devreye girmeden önce veya girdikten sonra yük akımları daha önceki benzetimlerde olduğu gibi değişmemiştir. PI kontrolörlü STATCOM'dan farklı olarak STATCOM çıkış akımların ve reaktif akımın aşma oranları daha düşük olmuştur. Fakat şebekeden çekilen reaktif akım tam olarak sıfır olmamıştır. Bu YSA kontrolörün giriş ağırlıklarının tam olarak uygun seçilememesinden kaynaklanır. Daha uygun giriş ağırlıkları seçilebilirse bu durum ortadan kaldırılabilir.

4.2.3. Benzetim 3

4.2.3.1. Evirici Tabanlı STATCOM'un PI Denetleyiciyle Reaktif Güç Denetimi

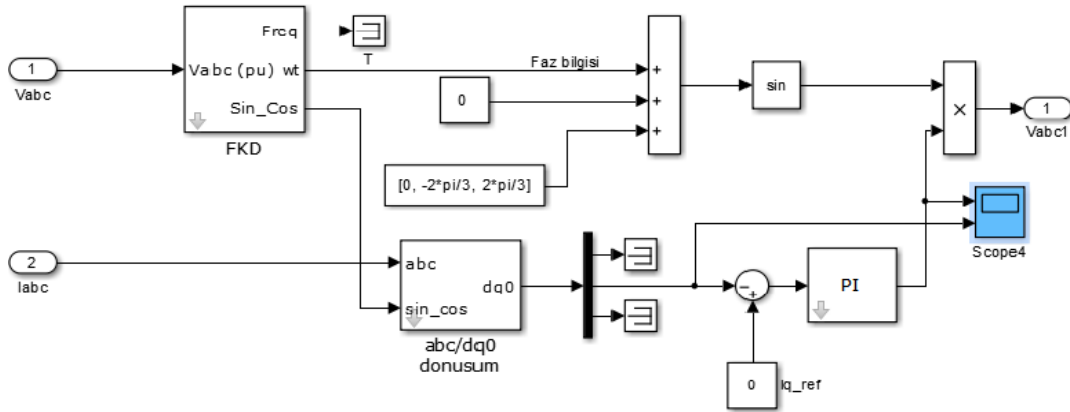
Şekil 4.18'de şebeke, şebekeye bir kesici üzerinden bağlanan STATCOM ve sürekli devrede olan $R-L$ yük MATLAB/Simulink modeli gözükmektedir. STATCOM, üç fazlı iki seviye evirici, girişine bağlı DA kaynak ve bağlantı reaktansından oluşur. Evirici anahtarlama için SDGM (Sinüsoidal Dalga Genişlik Modülasyonu) tekniği kullanılmıştır. Benzetim başlatıldığında $R-L$ yük devrededir. 0.1. saniyede STATCOM devreye alınmıştır. Böylece yükün çektiği reaktif akımın şebeke yerine STATCOM tarafından karşılanması amaçlanmıştır.



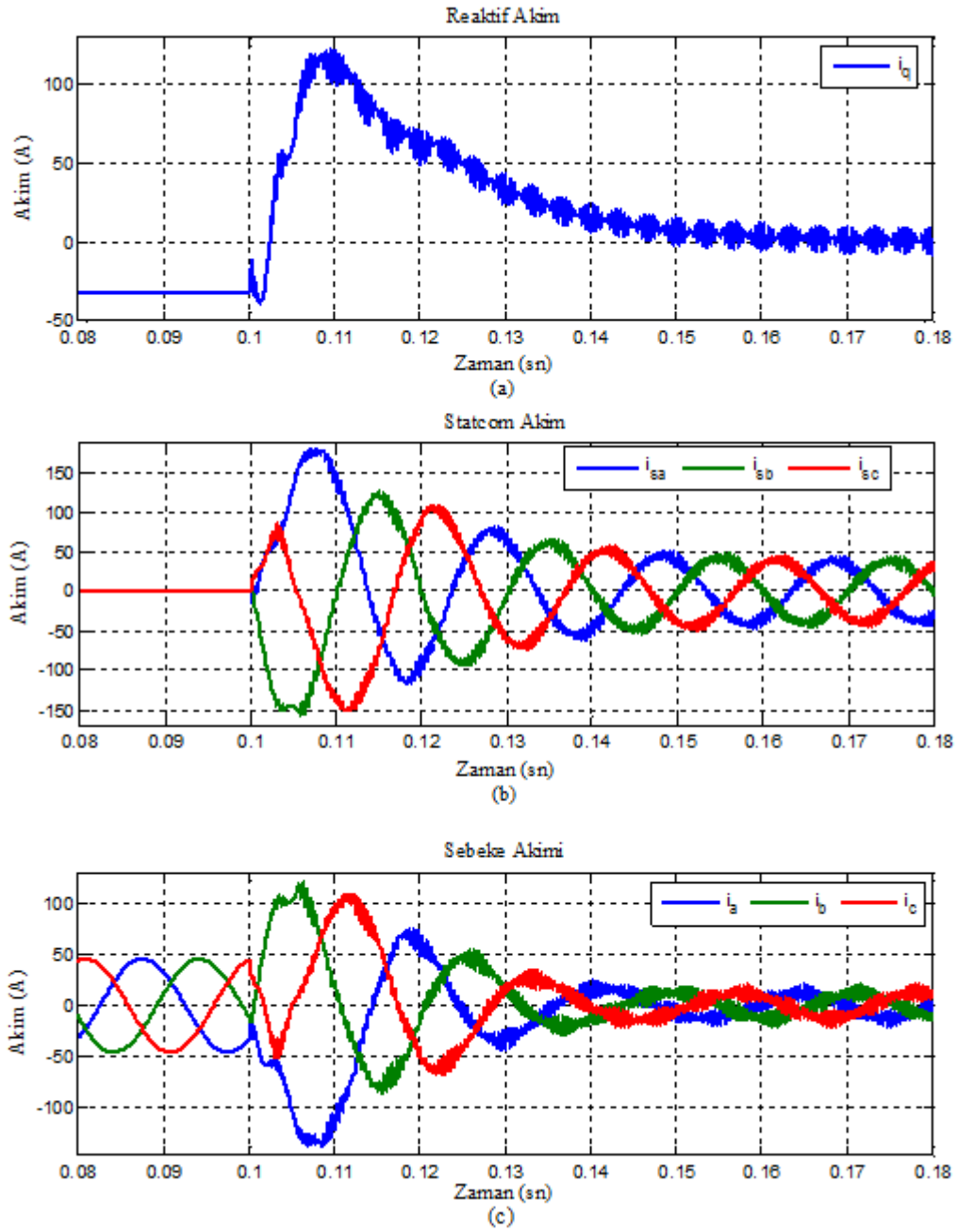
Şekil 4.18 PI Denetleyicili evirici tabanlı STATCOM şebeke bağlantısı MATLAB/Simulink modeli

Şebekeden ölçülen reaktif akım referans reaktif akımla karşılaştırılmıştır. Çıkan fark PI kontrolöre girilmiş ve denetleyici çıkışı olarak M_a (Modülasyon indeksi) elde edilmiştir.

Burada referans iki türlü olabilir. Birincisi eğer ölçüm şebekeden yapılıyorsa referansın sıfır olması gerekir. Çünkü şebekeden çekilen reaktif akımın azaltılması istenir. İkinci durumda ise yükün çektiği reaktif akım ölçülür ve aynı büyüklükte fakat zıt işaretli reaktif akım referans olarak sisteme girilir. Bu benzetimde akım ölçümü şebekeden yapılmış ve referans akım sıfır olarak seçilmiştir. Şekil 4.19’da verilen denetleyici bloğuna bakıldığında, FKD (Faz Kilitleme Devresi)’den alınan faz bilgisi ile üç faz bilgisi toplanmıştır. Burada sadece reaktif güç denetimi yapıldığı için STATCOM’un DA kaynağı sabit bir DA kaynak seçilmiştir. Şebeke ve STATCOM arası faz farkı sıfır alınmış bu yüzden FKD’den alınan faz bilgisi, üç faz bilgisi ve aktif güç akışı denetlenmediği için sıfır bilgisi toplanmıştır. Toplam, sinüs sinyaline çevrilmiş ve denetleyici çıkışı olan M_a (Modülasyon indeksi) ile kullanılarak, V_{abc} gerilimleri elde edilmiştir. Elde edilen 50 Hz’lik V_{abc} gerilimleri ile 2 kHz frekanslı üçgen sinyal karşılaştırılarak üç bacaklı iki seviye evirici için anahtarlama sinyali üretilmiştir.



Şekil 4.19 PI kontrolörlü STATCOM denetleyici bloğu MATLAB/Simulink modeli



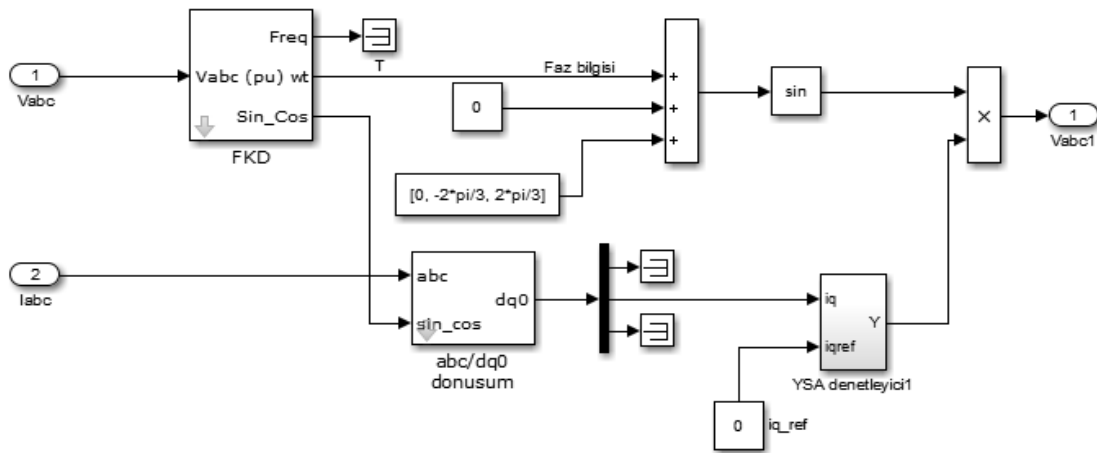
Şekil 4.20 PI kontrolörlü STATCOM sistem akımları **a)** Şebekeden çekilen reaktif akımın değişimi **b)** STATCOM çıkış akımları **(c)** Şebekeden çekilen üç faz akımlarının değişimi

Şekil 4.20’de Evirici tabanlı STATCOM’un benzetim sonuçları verilmiştir. Şekil 4.20 (a)’daki grafik şebekeden çekilen reaktif akımı göstermektedir. Bu grafiğe göre STATCOM devrede değilken şebekeden, endüktif yükten dolayı reaktif akım çekilmektedir. 0.1. sn’de STATCOM devreye girmiş ve benzetim 0.18. sn’ye kadar devam ettirilmiştir. Şekil 4.20 (b)’de STATCOM devreye girdikten sonra ürettiği üç faz akımları, Şekil 4.20 (c)’de ise PI kontrolörlü STATCOM devreye girmeden önce ve girdikten sonra şebekeden çekilen üç faz akımları verilmiştir. Evirici tabanlı PI kontrolörlü STATCOM’un

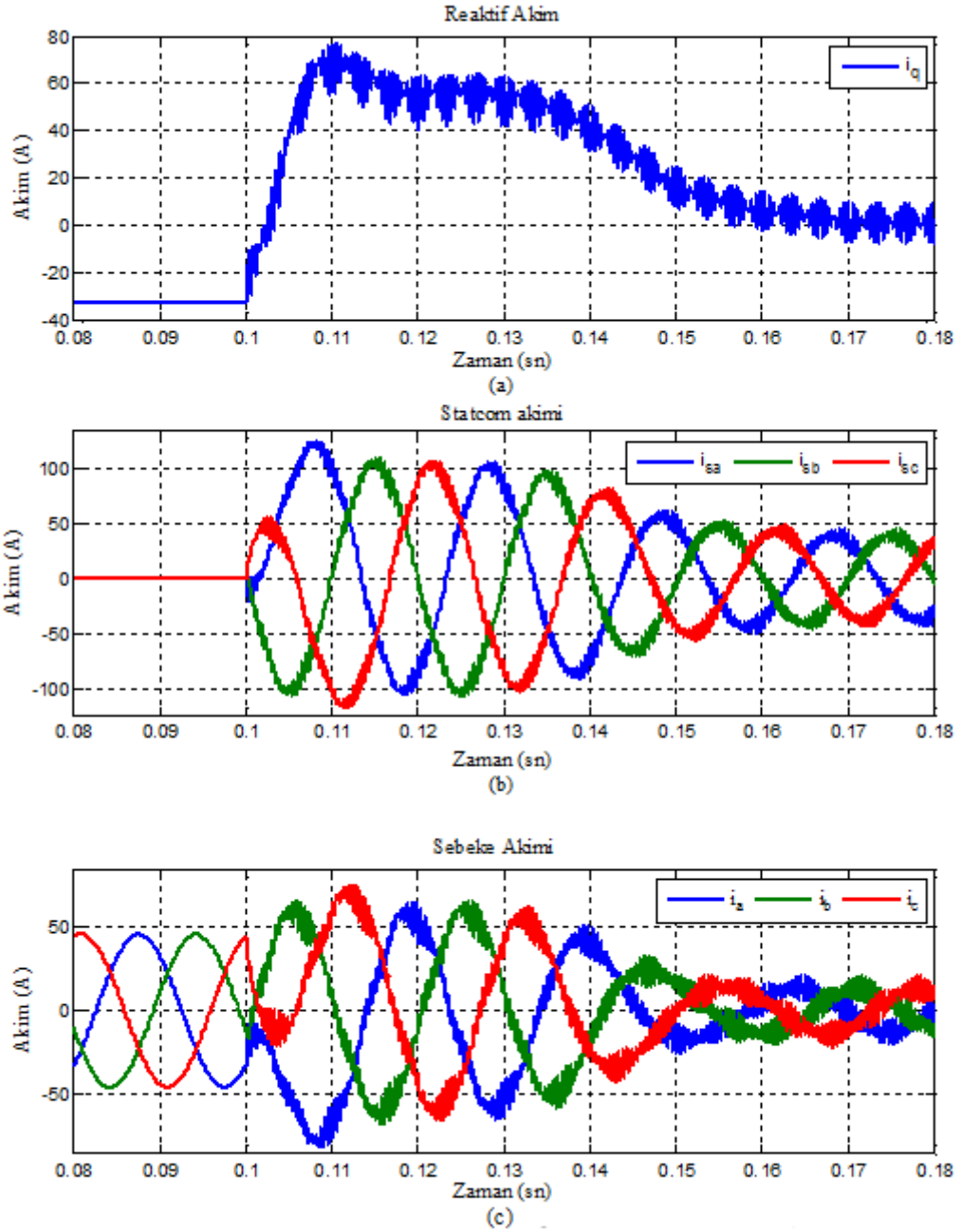
benzetim sonucuyla, benzetim 1 ve benzetim 2'deki ideal şartlarda benzetimi yapılan PI kontrolörlü STATCOM'un benzetiminden benzer sonuçlar elde edilmiştir.

4.2.3.2. Evirici Tabanlı STATCOM'un YSA Denetleyiciyle Reaktif Güç Denetimi

Bu benzetimde kullanılan güç devresi, Şekil 4.19'da MATLAB/Simulink modeli verilen güç devresi ile aynıdır. i_q akımı bir önceki benzetimde olduğu gibi şebekeden ölçülen i_{abc} akımların dq dönüşümü yapılarak elde edilmiştir. YSA kontrolöre elde edilen i_q akımı ve i_{q_ref} giriş bilgisi olarak girilmiştir. Aynı şekilde, ağ çıkışı ve sinüs sinyali kullanılarak elde edilen V_{abc} sinyali ile üçgen dalga karşılaştırılmış ve evirici anahtarlama sinyali üretilmiştir. Şekil 4.21'de denetleyici bloğu içyapısı verilmiştir. Yük akımlarında değişiklik olmadığından, yük akımlarının değışimi verilmemiştir.



Şekil 4.21 YSA denetleyici bloğu MATLAB/Simulink modeli

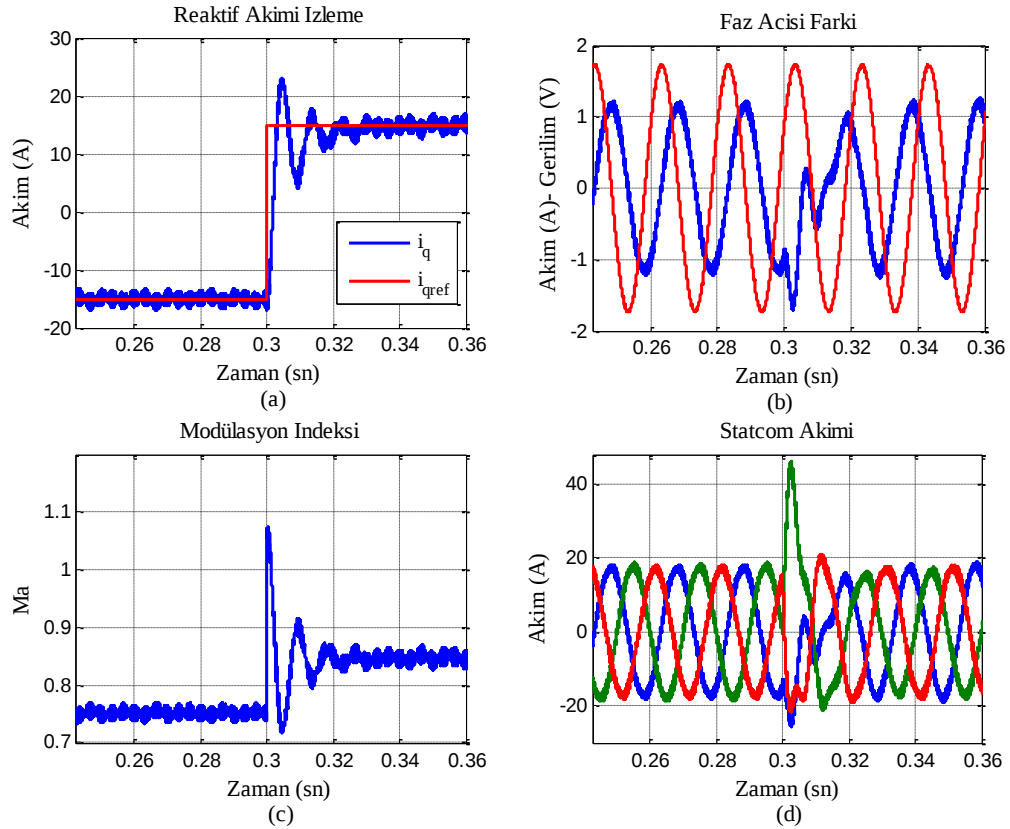


Şekil 4.22 YSA kontrolörlü STATCOM sistem akımları **a)** Şebekeden çekilen reaktif akımın değişimi **b)** STATCOM çıkış akımları **c)** Şebekeden çekilen üç faz akımların değişimi

Şekil 4.22’de YSA kontrolörlü evirici tabanlı STATCOM’un benzetim sonuçları verilmiştir. Buna göre Şekil 4.22 (a)’da YSA kontrolörlü STATCOM’un devreye girdikten sonra şebekeden çekilen reaktif akımın değişimini, Şekil 4.22 (b) STATCOM çıkış akımlarını, Şekil 4.22 (c)’de ise şebekeden çekilen akımları göstermektedir. Benzetim sonuçlarına göre; YSA kontrolörlü STATCOM, PI kontrolörlü STATCOM’dan farklı olarak devreye girdiğinde sistem akımlarının aşma oranları daha düşük olmuştur.

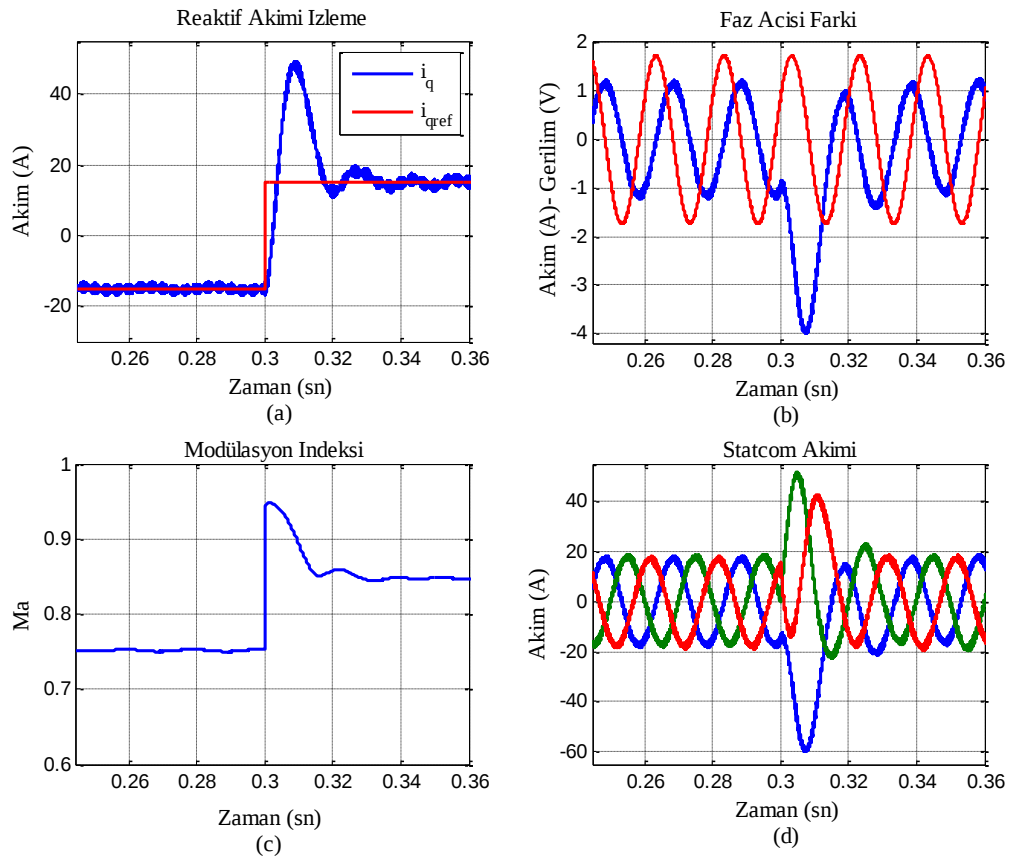
4.2.4. Benzetim 4

Bu benzetimde amaçlanan STATCOM'un reaktif akım değişimindeki başarımını test etmektir. Bunun için referans akım -15 A'den +15 A'e değiştirilerek STATCOM'un bu referans reaktif akımı hangi oranda izlediğine bakılmıştır. İlk olarak PI kontrolörlü STATCOM ile bu benzetim yapılmıştır. Şekil 4.23 (a) referans akımın -15 A'den +15 A'e geçişinde PI kontrollü STATCOM'un bu referans akımı hızlı bir şekilde izlediği görülmüştür. Şekil 4.23 (b)'de PI kontrolörlü STATCOM'un mod değişikliği sırasında ürettiği akım ve gerilim arasındaki faz farkının değişimi verilmiştir. Başlangıçta akım gerilimden ileri fazda iken, mod değiştikten sonra gerilim akımdan ileri faza geçmiştir. Şekil 4.23 (c)'de mod değişikliği esnasında modülasyon indeksinin değişimi verilmiştir. Şekil 4.23 (d)'de ise STATCOM çıkış akımları verilmiştir.



Şekil 4.23 PI kontrolörlü STATCOM referans akım izlemesi **a)** -15 A'den +15 A'e geçişte STATCOM'un referans akımı izlemesi **b)** STATCOM'un bir faz akım ve gerilimi arasındaki faz farkı **c)** Referans akım izlemeye modülasyon indeksinin değişimi **d)** STATCOM çıkış akımlarının değişimi

Aynı şekilde YSA kontrolörlü STATCOM'un, referans akımın -15 A 'den $+15\text{ A}$ 'e değişmesi durumunda bu akımı izleme oranı çizdirilmiştir. Şekil 4.24 (a)'da referans reaktif akım ve STATCOM'un bu akımı izleme başarımı verilmiştir. Buna göre YSA kontrolörlü STATCOM referans akımı izlemiştir. Fakat mod değişikliği esnasında STATCOM'un ürettiği reaktif akımda aşma fazla olmuştur. Bu durum, daha uygun giriş ağırlıkları seçilerek giderilebilir. Şekil 4.24 (b)'de mod değişikliği esnasında STATCOM akım ve gerilimi arasındaki faz farkının değişimi Şekil 4.24 (c)'de modülasyon indeksinin değişimi, Şekil 4.24 (d)'de ise STATCOM çıkış akımları verilmiştir.



Şekil 4.24 PI kontrolörlü STATCOM referans akım izlemesi **a)** -15 A 'den $+15\text{ A}$ 'e geçişte STATCOM'un referans akımı izlemesi **b)** STATCOM'un bir faz akım ve gerilimi arasındaki faz farkı **c)** Referans akım izlemede modülasyon indeksinin değişimi **d)** STATCOM çıkış akımlarının değişimi

5. SONUÇLAR

Günümüzde enerji talebi her geçen gün artmakta, artan enerji talebini karşılamak ve tüketiciye kaliteli enerji sunma yönünde çalışmalar hız kazanmaktadır. Enerji iletim ve dağıtım sistemlerinde, güç sisteminin problemlerini en aza indirmek, iletim hatların taşıma kapasitelerini arttırmak, dağıtım sistemlerinde kayıp enerjiyi azaltmak için reaktif güç kompanzasyonu kullanılan etkin bir yöntemdir. Geleneksel olarak mekanik anahtarlamalı, sabit kapasitör/reaktör gruplarıyla veya senkron kompanzatörlerle yapılan kompanzasyon sistemleri uzun yıllar kullanılmıştır. Güç elektroniğinin gelişmesiyle FACTS cihazları ortaya çıkmış ve geleneksel kompanzasyon sistemlerinin yerini almaya başlamıştır. Tristör tabanlı TCR, TSC, FC-TCR gibi Statik VAr Kompanzatörleri en başta kullanılmaya başlanan FACTS aygıtlarındandır. Sonrasında kapasitör ve reaktör gruplarına ihtiyaç duymayan, şebeke gerilimden bağımsız bir şekilde kontrollü reaktif güç sağlayabilen evirici tabanlı FACTS aygıtlarından STATCOM kullanılmaya başlanmıştır. STATCOM ayrıca şebekeyle aktif güç alışverişi yapma yeteneğine de sahiptir.

Bu çalışmada STATCOM reaktif güç kompanzasyonu amacıyla kullanılmıştır. Kontrol yöntemi olarak sabit DA-hat yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemde STATCOM girişine sabit doğru akım kaynağı bağlanarak şebeke ile aktif güç alışverişi sıfır kabul edilmiştir. Genel olarak STATCOM'un kontrolü PI denetleyicilerle gerçekleştirilir. Bu çalışmada YSA kontrollü STATCOM ile şebekeye bağlı R-L yükün ihtiyacı olan reaktif gücün STATCOM tarafından karşılanması amaçlanmıştır. İlk olarak MATLAB *.m dosyalarında sonrasında MATLAB/ Simulink ortamında ideal şartlarda oluşturulan PI ve YSA kontrolörlü STATCOM ile reaktif güç kompanzasyonu yapılmıştır. Sonrasında MATLAB/ Simulink ortamında hazırlanan PI ve YSA kontrolörlü üç fazlı iki seviye evirici tabanlı STATCOM ile aynı yük şartlarında reaktif güç kompanzasyonu yapılmıştır. Geleneksel diyebileceğimiz PI kontrolörlü STATCOM ve YSA kontrolörlü STATCOM'lar ile yapılan benzetimlerde yaklaşık olarak aynı sonuçlar alınmıştır. YSA kontrolörlü STATCOM ile yapılan reaktif güç denetiminde reaktif akımın ve sistem akımlarının aşması daha düşük olmuştur. Bununla beraber PI kontrolörlü STATCOM'un referans reaktif akımı izleme başarımı, YSA kontrolörlü STATCOM'dan daha iyi olmuştur. Bu durum YSA kontrolörün giriş ağırlıklarının daha uygun seçilmesiyle giderilebilir. Ayrıca YSA kontrolörler lineer olmayan sistemlerin kontrolünde daha etkilidir.

KAYNAKLAR

- [1] **Çetin, A.** 2007. Design And Implementation Of a Voltage Source Converter Based Statcom For Reactive Power Compansation And Harmonic Filtering, Doktora Tezi Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [2] **Hingorani, N.G. and Gyugyi L.,** 2000. Understanding Facts, IEEE Press, New York.
- [3] **Çöteli, R.,** 2006. STATCOM ile Güç Akış Kontrolü, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- [4] **Padiyar. K.C.,** 2008. Power System Dynamics Stability and Control, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- [5] **Mohan, N.,Undeland, T.M. and Robbins,W.P.,** 2010. Güç Elektroniği, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- [6] **Mathur, R. M.,** 2002. Thyristor-Basedfacts Controller for Electrical Transmission Systems, IEEE Press, Canada.
- [7] **Deniz, E., ve diğerleri,** 2009. STATCOM İle İletim Hatlarında Reaktif Güç Kompanzasyonu, Kaynak Elektrik, Elazığ, **247**, 109-113,
- [8] **Çöteli, R.** 2010. Üç Seviyeli H-Köprü Evirici Tabanlı D-STATCOM'un Sinirsel Bulanık Ağ İle Denetimi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [9] **Çöteli, R., ve Aydoğmuş Z.,** 2007. DGM-STATCOM ile Reaktif Güç Kompanzasyonu, Politeknik Dergisi,Elazığ, **10(2)**, 123-128
- [10] **Hasanzadeh, A., Parniani, M. and Sadriyeh, S.M.R.,** 2005. A Compansative Study on Current Control Methods for Balancing and Power Factor Correction using STATCOM, Power Tech IEEE, 978-5-93208-034-4,Iran, 1-7.
- [11] **Patil, D.R., and K.Madhale K.,** Design and Simulation Studies Of D-STATCOM for Voltage Sag, Swell Mitigation, International Journal of Power System Operation and Energy Management,ISSN 2231-4407, India, **2(1)**, 23-29.
- [12] **Yang, Xp., ve diğerleri,** 2006. A Novel Control Method for D-STATCOM Using Artificial Neural Network, Power Electronics and Motion Control Conference, 2006, China, 1-4.
- [13] **Kara, Y.,** 2008. Statik Senkron Kompanzatörün Yapay Sinir Ağıyla Denetimi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- [14] **Sumathi, S., ve diğerleri,** 2009. Atificial neural network application for control of STATCOM in power systems for both voltage control mode and reactive power mode, Third International Conference on Power Systems, Kharagpur, India, 27-29.

- [15] **Singh,B ve diğerleri**, 2006. Neural Network Based D-STATCOM Controller for Three-phase Three-wire System, IEEE, India, 1-6.
- [16] **Mohagheghi, S., ve diğerleri**, 2006. Adaptive Critic Design Based Neuro-Fuzzy Controller for a Static Compensator in a Multimachine Power System, IEEE, USA, **21(4)**, 1774-1754,
- [17] **Balavar,M.**, 2012. Using Neural Network to Control STATCOM for Improving Transient Stability, Journal of Artificial Intelligence in Electrical Engineering, Iran, 26-31.
- [18] **Abharian,E.K, ve M. Karimi, P. Farhadi**, 2011. Statcom Controller Design Based on MLP for Power Flow Control, International Journal of Modeling and Optimization,Iran, **1(4)**, 327-333.
- [19] **Garg, A., and Singh R.P.**, 2013. Voltage Profile Analysis in Power Transmission System based on Statcom using ANN in MATLAB/Simulink, International Journal of Applied Information Systems, India, **6(1)**, 7-15.
- [20] **Hafez, A.A.ve diğerleri**, 2005. Viable Adaptive NN Controller for STATCOM in Stand-Alone Wind Power System, Journal of Electrical System, Egypt.1-8.
- [21] **Singh,M. and Zagaonkar A.S.**, 2012. Power Measurement by ANN and Mitigation Using Dstat com, International Journal of Computational Engineering Research, India, **2(6)**, 9-13.
- [22] **Ganesh, A. ,G.K. Singh and Dahiya R.**, 2011. Design and Analysis of Adaptif Neural Controller for Voltage Source Converter for Statcom, ACEEE Int. J. On Control System and Instrumantation, India, **2(1)**, 1-5.
- [23] **Rajasekaran, D., ve diğerleri**, 2013. ANN controller Based Distribution Static Compensatör For Valtage Sag Mitigation, American Journal of Applied Sciences India, **10(7)**, 688-695.
- [24] **Çöteli, R., ve diğerleri**, 2011. Fuzzy-PI Controlled D-STATCOM, Gazi Universty Journal of Science, Turkey, **24(1)**, 91-99.
- [25] **Dhekekar, R.S., and Srikanth N.V.**, 2012. ANN Controlled VSC STATCOM with Harmonic Reduction for VAR Compensation, International Journal of Power Electronics and Drive System, India, **2(1)**, 76-84.
- [26] **Reddy, G.P., and Reddy R.K.**, 2012. Power Qulality Improvement Using Neural Network Controller Based Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter Type D-STATCOM, International Conferance on Computer Communication and Informatics, India, 10-12.
- [27] **Singh, B., Solanki, J. And Verma, V.** 2005. Neural Network Based Control of D-TATCOM with Rating Reduction for Three-Phase Four-Wire System, Power Electonic and Drives Systems,0-7803-9296-5, India, November 2005, 920-925.

- [28] **Çöteli, R., ve diğerleri.,** 2012. Phase Angel Control of Three Level Inverter Based D-STATCOM Using Neuro-Fuzzy Controller, Advances in Electirical and Computer Engineering, **12(1)**, Turkey.
- [29] **Singh B., Jayaprakash, P. Kumar, S. and Kothari, D.P.** 2009. Implementation of Neural Network Controlled Three-Leg VSC and a Transformer as Three-Phase Four-Wire D-STATCOM, Industry Applications, IEEE Transactions on **47** (4), India, 1892 – 1901.
- [30] **Arifoğlu, U.,** 2002. Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi , Alfa Basım, İstanbul.
- [31] **URL-1** <http://www.epdk.gov.tr/index.php/elektrik-piyasasi/mevzuat?id=46>, Elektrik Piyasası Düzenleme Kurulu, Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenliği ve Kalitesi Yönetmeliği, 11 Aralık 2014.
- [32] **Momoh J.A. and El-Hawary M.E.,** 1999. Electric Systems, Dynamics, and Stability with Artificial Intelligence Applications (Power Engineering (Willis)) CRC Press
- [33] **Bostancı, A.** 2008. Statik Var Kompanzasyon Sistemi Tasarımı ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [34] **Dirik, H.,** 2006. STATCOM Ve SSSC Denetleyicilerin Güç Sistemi Gerilim Karalılığı Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, 19 Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- [35] **Padiyar. K.C.,** 2008. Power System Dynamics Stability and Control, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- [36] **Mohan, N., Undeland, T.M. and Robbins, W.P.,** 2010. Güç Elektronikliği, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- [37] **Deniz, E., ve diğerleri,** 2009. Statcom İle İletim Hatlarında Reaktif Güç Kompanzasyonu, Kaynak Elektrik, Elazığ, **247**, 109-113.
- [38] **Reddy, S.R.,** 2000. Fundamentals of Power Electronics, Alpha Science International, India.
- [39] **Mathur, R. M.,** 2002. Thyristor-Based facts Controller for Electrical Transmission
- [40] **Zhang, X.P.,** 2006. Flexible AC Transmission Systems Modelling and Control, Springer, Berlin.
- [41] **Aydoğmuş, Z., ve Ertay M.M.,** 2010. Statcom ile Bir Enerji İletim Sisteminde Gerilim Kontrolü, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Kütahya, **21**, 91-105.
- [42] **Bose, B.K.,** 2002. Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall, USA.

- [43] **Deniz, E.**, 2010. Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu Kullanan Üç seviyeli H-Köprü Evirici Tabanlı D-STATCOM'un Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [44] **Yu, O., ve diğerleri**, 2004. Overview of STATCOM Technologies, 4 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Hong Kong, 647-652.
- [45] **Tekin, A., ve Gökbulut M.**, 2008. Yapay Sinir Ağları İle Asenkron Motorların Hız Kontrolü için Bir Eğitim Yazılımının Geliştirilmesi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Elazığ, **20**, 449-458.
- [46] **Taşkafa, Ş.**, 2006. Asenkron Motorların Yapay Sinir Ağları ile Vektör Kontrolü, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [47] **Yegnanarayan, B.**, 2005. Artificial Neural Networks, Rajkamal Electric Press, India.
- [48] **Hagan, M.T.**, 2002. Neural Network Design, Chine Machine Press, Chine.
- [49] **Beale, M.H.**, 2012. Neural Network Toolbox™ User's Guide, The MathWorks, Inc., USA.
- [50] **Suresh, A.V.**, 2013. Design of Neural Network Controlled D-STATCOM Using SRF Algorithm To Improve Power quality, International Journal of Engineering Research & Technology, **2(8)**, August, 1205-1212.
- [51] **Gökbulut, M.**, 2012. Yapay Sinir Ağları Yüksek Lisans Ders notları, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [52] **Öztemel, E.**, 2012. Yapay Sinir Ağları, Papatya Yayıncılık, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Muş Merkez’de doğdu. Orta öğrenimi Muş Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümünde tamamlamadı. Daha sonra Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümünü kazandı. 2008 yılında buradan mezun oldu. 2011 yılında Muş Alparslan Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu Elektronik ve Otomasyon Bölümünde Uzman olarak göreve başladı. Halen bu görevi yürütmektedir. Aynı zamanda Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.