

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**STATİK SENKRON KOMPANZATÖRÜN (STATCOM)
YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA) İLE DENETİMİ**

Yunus KARA

Tez Yöneticisi
Yrd. Doç. Dr. Beşir DANDIL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAĞIĞ, 2008

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**STATİK SENKRON KOMPANZATÖRÜN (STATCOM)
YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA) İLE DENETİMİ**

Yunus KARA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Bu tez, tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Beşir DANDIL

Üye: Yrd. Doç. Dr. Servet TUNCER

Üye: Yrd. Doç. Dr. Selçuk YILDIRIM

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu 'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŐEKKÖR

Bu seminer çalışmasında bana bilgi ve tecrübesi ile her zaman yol gösteren değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Beşir DANDIL’a, bana değerli vakitlerini ayıran ve beni her zaman destekleyen Arř. Gör. Resul ÇÖTELİ’ye ve Arř. Gör. Erkan DENİZ’e teőekkürü bir borç bilirim.

Yunus KARA

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	
İÇİNDEKİLER.....	I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	III
SİMGELER.....	V
KISALTMALAR.....	VIII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT.....	X
1. GİRİŞ.....	1
2. STATCOM	5
2.1. STATCOM Modelinin Doğrusallaştırılması.....	14
2.2. STATCOM'un Denetimi	15
3. YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA).....	22
3.1. Giriş.....	22
3.2. Yapay Sinir Hücresinin Yapısı.....	23
3.2.1 Yapay Sinir Ağı Modeli	23
3.2.2 Yapay Sinir Ağı Bileşenleri.....	23
3.3. Yapay Sinir Ağının Çalışması	25
3.3.1 Aktivasyon Fonksiyonları	26
3.3.1.1 Eşik Aktivasyon Fonksiyonu.....	26
3.3.1.2 Doğrusal Aktivasyon Fonksiyonu.....	27
3.3.1.3 Logaritma Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu.....	27
3.3.1.4 Tanjant Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu.....	28
3.4. Yapay Sinir Ağları Yapıları.....	28
3.4.1 İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağı.....	29
3.4.2 Geri Beslemeli Yapay Sinir Ağı.....	29
3.4.3 Çok katmanlı YSA yapıları.....	29
3.4.3.1 Çok katmanlı ileri beslemeli YSA.....	29
3.4.3.2 Çok katmanlı geri beslemeli YSA.....	31
3.5. Yapay sinir ağlarında öğrenme.....	32
3.5.1 Geriye yayılım öğrenme algoritması.....	32

3.6	YSA ile Sistem Tanılama.....	34
3.6.1	Düz modelleme	34
3.6.2	Ters Modelleme	35
3.6.3	Bellek Hücreli Yapay Sinir Ağları ile Modelleme	36
3.6.4	Yöresel Geri Küresel İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağı ile Modelleme	36
3.7	YSA ile Sistem Denetimi	37
3.7.1	Doğrudan Uyarlamalı Denetim.....	37
3.7.2	Dolaylı Uyarlamalı Denetim	37
3.7.3	Model Referans Uyarlamalı Denetim	38
3.7.4	Dahili Model (DM) Denetim.....	39
3.7.5	Tahmini Denetim.....	39
3.7.6	Öz Uyarlamalı Denetim.....	40
3.7.7	Sabit Denetleyicili Denetim.....	41
3.7.8	Sınıflandırıcı YSA ile Denetim.....	41
3.8	YSA-PI denetleyici ağ yapısı	41
4.	BENZETİM SONUÇLARI.....	44
5.	SONUÇ.....	60
	KAYNAKLAR.....	62
	ÖZGEÇMİŞ.....	64

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 STATCOM 'un tek hat gösterimi.....	5
Şekil 2.2 STATCOM tek hat devre modeli ve tepkin güç akışının vektörel gösterimi.....	7
Şekil 2.3 STATCOM'un akım gerilim karakteristiği.....	8
Şekil 2.4 İki seviyeli evirici kullanan STATCOM.....	9
Şekil 2.5 STATCOM'un iç denetim şeması	16
Şekil 2.6 STATCOM'da kondansatör geriliminin değiştirilmesi ile tepkin güç denetiminin dolaylı yolla yapılmasına ait blok şeması.....	18
Şekil 2.7 STATCOM'da tepkin güç çıkışının doğrudan iç denetim blok şeması	19
Şekil 2.8 a) Eviricinin bir fazına ait devre şeması b) DGM dalgalarının üretilmesi	20
Şekil 3.1 Biyolojik nöron yapısı.....	22
Şekil 3.2 Yapay nöron	24
Şekil 3.3 Yapay sinir ağı modeli	24
Şekil 3.4 Toplam ve Aktivasyon fonksiyonlu bir yapay sinir ağı hücresi.....	25
Şekil 3.5 a) Eşik aktivasyon fonksiyonunu b) Signum aktivasyon fonksiyonu.....	26
Şekil 3.6 Doğrusal aktivasyon fonksiyonunu.....	27
Şekil 3.7 Logaritma Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu.....	27
Şekil 3.8 Tanjant Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu.....	28
Şekil 3.9. İleri beslemeli üç katmanlı YSA yapısı.....	30
Şekil 3.10. Geri beslemeli üç katmanlı YSA yapısı.....	31
Şekil 3.11 Düz modelleme.....	35
Şekil 3.12 Ters modelleme	35
Şekil 3.13 Bellek hücreli yapay sinir ağı ve bellekli bir hücrenin yapısı	36
Şekil 3.14 YGKİ Yapay sinir ağı yapısı	36
Şekil 3.15 Doğrudan uyarlamalı denetim.....	37
Şekil 3.16 Dolaylı uyarlamalı denetim	38
Şekil 3.17 Model referans uyarlamalı denetim	38
Şekil 3.18 Dahili model denetim.....	39
Şekil 3.19 Tahmini denetim.....	39
Şekil 3.20 Öz uyarlamalı denetim.....	40
Şekil 3.21 Sabit denetleyicili denetim.....	41
Şekil 3.22 Sınıflandırıcı YSA ile denetim.....	41
Şekil 3.23 YSA-PI denetleyici yapısı	43

Şekil 4.1 Simulink 'te oluşturulan güç sistemi ve STATCOM devre modeli	44
Şekil 4.2 STATCOM filtre ve denetleme kısmı.....	44
Şekil 4.3 Denetim bloğunun iç yapısı.....	45
Şekil 4.4 Sabit parametrelili PI denetleyici kullanan doğru gerilim denetleyicisinin MATLAB-Simulink bloğu	45
Şekil 4.5 Yükün şebekeden çektiği tepkin güç miktarının belirlenmesine ait MATLAB-Simulink bloğu.....	46
Şekil 4.6 Akım denetleyicisinin MATLAB-Simulink benzetim bloğu	46
Şekil 4.7 Modülasyon dalgalarının elde edilmesi	47
Şekil 4.8 PI denetleyici kullanan STATCOM'un DA geriliminin değişimi (a;0-1s aralığı, b;0-0,3s aralığı)	47
Şekil 4.9 STATCOM'un tepkin akımının benzetim programı sonucu	48
Şekil 4.10 STATCOM'un etkin akımının benzetim programı sonucu	49
Şekil 4.11 STATCOM'un bir fazına ait akım-gerilim ilişkisi	50
Şekil 4.12 Şebeke akım-gerilimi arasındaki faz ilişkisi	50
Şekil 4.13 Modülasyon indeksinin değişimi	51
Şekil 4.14 Referans tepkin akımının +1 pu'dan -1 pu'ya değişimine STATCOM'un cevabı ...	51
Şekil 4.15 Referans tepkin akımının +1 pu'dan -1 pu'ya değişimi esnasında STATCOM'un bir fazına ait akım ve gerilimi arasındaki faz ilişkisi	52
Şekil 4.16 YSA denetleyici kullanan doğru gerilim denetleyicisi	53
Şekil 4.17 YSA denetim bloğunun iç yapısı	53
Şekil 4.18 YSA denetleyici kullanan STATCOM'un DA geriliminin değişimi	54
Şekil 4.19 YSA'lı tepkin akım bileşeni ile referans tepkin akım bileşeni	55
Şekil 4.20 YSA'lı etkin akım bileşeni ile referans etkin akım bileşeni	55
Şekil 4.21 a) STATCOM'suz sisteme ait akım-gerilim grafiği	56
Şekil 4.21 b) STATCOM olan sisteme ait akım-gerilim grafiği	57
Şekil 4.22 YSA ile yapılan denetime ait modülasyon indeksinin değişim grafiği	58
Şekil 4.23 Referans tepkin akımının +1 pu'dan -1 pu'ya değişimine YSA'lı STATCOM'un cevabı	58
Şekil 4.24 Referans tepkin akımının +1 pu'dan -1 pu'ya değişimi esnasında YSA yapıları STATCOM'un bir fazına ait akım ve gerilimi arasındaki faz ilişkisi	59

SİMGELER

AA	: Alternatif akım
DA	: Doğru akım
V	: Gerilim (V)
C	: Kondansatör (F)
V_i	: Eviricinin çıkış gerilimi (V)
i_i	: Eviricinin çıkış akımı (A)
V_s	: Şebeke gerilimi (V)
X_s	: Bağlantı transformatörünün kaçak reaktansı
I_c	: Kompanzasyon akımı
P	: Etkin güç (W)
Q	: Tepkin Güç (VAR)
α	: Eviricinin çıkış geriliminin faz açısı
θ	: Şebeke geriliminin faz açısı
V_{da}	: Kondansatör gerilimi (V)
p	: Faz
n	: Nötr
i_p	: Faz akımı (A)
i_a	: A Fazına ait akım (A)
i_b	: B Fazına ait akım (A)
i_c	: C Fazına ait akım (A)
V_a	: A fazına ait gerilim (V)
V_b	: B fazına ait gerilim (V)
V_c	: C fazına ait gerilim (V)
L	: Endüktans (H)

R	: Direnç (Ω)
d	: Etkin bileşen
q	: Tepkin bileşen
I_d	: Akımın etkin bileşeni
I_q	: Akımın tepkin bileşeni
I_o	: Akımın sıfır bileşeni
e_d	: Gerilimin etkin bileşeni
e_q	: Gerilimin tepkin bileşeni
$D_{AP-BP-CP}$	: Anahtarlama fonksiyonları
T	: Periyot (sn)
ω	: Açısal hız (rad/sn)
I_{d-Ref}	: Referans etkin akım bileşeni
I_{q-Ref}	: Referans tepkin akım bileşeni
k	: Eviricinin kazancı
V_{aaref}	: Referans AA gerilim
V_{daref}	: Referans DA gerilim
m_a	: Modülasyon İndeksi
V_M	: Modülasyon Dalgası
V_T	: Taşıyıcı Dalga
f	: Frekans (1/sn)
f_T	: Taşıyıcı dalganın frekansı
f_m	: Modülasyon dalgasının frekansı
x	: YSA girişler vektörü
w	: YSA ağırlıklar vektörü
y	: YSA çıkış vektörü
E	: Örneksele Hataların kareleri

J	: Hataların kareleri toplamı
e	: Örneksele hata
α	:Öğrenme oranı
β	:Momentum katsayısı
u	:Sistem girişı
r	: Referans giriş
y_m	:Model çıkışı
y_r	: Referans model çıkışı

KISALTMALAR

FACTS	: Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri
TSC	: Tristör Anahtarlama Kondansatör
TCR	: Tristör Denetimli Reaktör
TSSC	: Tristör Anahtarlama Seri Kondansatör
SVC	: Statik VAR Kompanzatör
STATCOM	: Statik Senkron Kompanzatör
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
YSA	: Yapay Sinir Ağları
GTO	: Kapıdan tıkamalı tristör
IGBT	: Kapıdan izoleli bipolar tristör
PLL	: Faz Kilitleme Devresi
S-DGM	: Sinüsoidal Darbe Genişlik Modülasyonu

ÖZET
YÜKSEK LİSANS TEZİ

**STATİK SENKRON KOMPANZATÖRÜN (STATCOM)
YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA) İLE DENETİMİ**

Yunus KARA

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı
2008, Sayfa: 64

Gelişen teknolojiye bağlı olarak enerji ihtiyacı artmış ve güç sistemleri daha karmaşık bir hal almıştır. Bu nedenle güç sistemlerinin hem taşıma kapasitesinin artırılması hem de iletim sistemlerinin kararlı hale getirilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Güç sistemlerinin tepkin güç kompanzasyonu yapılarak yük taşıma kapasitesinin artırılması ve kararlı hale getirilmesi kanıtlanmıştır. Geleneksel kondansatör ve reaktör grupları ve uyartım devreli cihazlar ile yapılan kompanzasyon yetersiz kalmıştır. Güç sistemlerinin kompanzasyonunu gelişen güç elektroniği tabanlı aygıtlar ile yapılması halinde, güç sistemi tam ve esnek bir şekilde denetlenebilir. FACTS olarak adlandırılan bu aygıtların çoğu güç sistemlerinde dinamik kompanzasyon, kararlılığın iyileştirilmesi ve güç akışının denetimi için kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, bir iletim hattındaki güç akışının kontrolü için, MATLAB-SIMULINK Toolbox 'ı kullanılarak evirici tabanlı FACTS aygıtı olan STATCOM 'un (Statik Senkron Kompanzatör) bilgisayar benzetimi yapılmıştır. STATCOM 'un denetiminde Sabit Parametrelili PI denetleyici ve Yapay Sinir Ağı (YSA) kullanılmıştır. YSA' nın öğrenme ve genelleme yeteneklerinden yararlanarak PI denetleyicinin tasarım zorluğu giderilmiş ve PI parametrelerinin otomatik olarak ayarlanabilirliği sağlanmıştır. YSA-PI yapısıyla STATCOM DA denetimi yapılmıştır. PI ile YSA arasındaki farkı gösteren benzetim sonuçları verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: FACTS, Kompanzasyon, STATCOM, YSA.

ABSTRACT
MASTER THESIS

**CONTROL OF THE STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR (STATCOM) BY
USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK (ANN)**

Yunus KARA

THE UNIVERSITY OF FIRAT
THE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE
DEPARTMENT OF ELECTRICAL EDUCATION

2008, Page: 64

Due to improving technology, the demand of the energy has significantly increased and as a result of this circumstances the power systems have become more complicated over this period. Thus, to both develop the carrying capacity and make the transfer system stable have become an essential issue. In this dissertation, it is proved that applying reactive compensation to the power systems results that the load carrying ability and the stability of the system are enhanced. As a consequence of on going process in the power systems, traditional capacitor, reactor groups and devices using exciters became insufficient. The compensation of power systems applied with sophisticated power devices allows complete and flexible control of the power systems. Devices which are called FACTS are implemented to control dynamic compensation and energy flow in the power systems, and also obtain a better stability .

In this study, a computer simulation of STATCOM which is FACTS devices based on converter for power flow in transmission line is carried out by using MATLAB SIMULINK Toolbox. The computer simulation results show that STATCOM have fast response ability for any change in the power system. The static parameter PI controllers with Neural Networks (NN) have been used in the STATCOM controller. PI controller design complexity is eliminated and automatic tuning of the PI controller parameters is provided by utilizing the learning and generalization capabilities of the neural networks. STATCOM DC controller has been done by NN-PI. Simulation result showing, between PI with NN difference was given.

Key words: FACTS, Compensation, STATCOM, Neural Networks.

1. GİRİŞ

Günümüzün değişen enerji talebine bağlı olarak enerji iletim sistemlerinde denetlenebilirliği ve sistemin etkin güç taşıma kapasitesinin artırılması konuları son derece önem kazanmıştır. Etkin güç taşıma kapasitesinin artırılması; tepkin gücün yok edilmesi veya dengelenmesi ile sağlanır. Tepkin güç, iletim sisteminde kayıpları artırır, iletim hattının güç iletim kapasitesini azaltır ve hat sonundaki gerilimin genliğinde çok büyük değişimler meydana getirir (Gyugyi, 1988). Bu yüzden güç sistemlerinde iletilebilir gücü arttırmak, kayıpları azaltmak ve iletim hatlarında hat endüktansının ve kapasitesinin etkisini, az yüklü durumlarda aşırı gerilimlere ve çok yüklü durumlarda ise gerilim azalmalarına neden olmasından dolayı iletim hattının tepkin gücünün ve geriliminin denetlenmesi gerekmektedir. Bu da hattın belli noktalarında güç akış denetleyicileri ile kompanzasyon yapılarak gerçekleştirilir. Kompanzasyon ile bara gerilimi ve baranın tepkin gücü denetlenerek, kararlılığı artırılır, iletim kapasitesinin etkili kullanımı sağlanır ve gerilim düşümü azaltılır.

Tepkin güç kompanzasyonu, yük kompanzasyonu ya da gerilim desteği için yapılabilir. Yük kompanzasyonunda amaç, sistemin güç faktörünü düzeltmek, şebekeden çekilen etkin gücü dengelemek ve büyük güçlü doğrusal olmayan yüklerden dolayı oluşan akım harmoniklerini yok etmektir. Gerilim kompanzasyonunda ise amaç denetlenmek istenilen noktadaki gerilim dalgalanmalarını azaltmaktır (Wanner, 1983).

Geleneksel kompanzasyon yöntemlerinde, güç sistemine bağlı bulunan elemanların çektiği tepkin gücün karşılanması sabit anahtarlamalı kondansatörlerle veya şebekeye paralel bağlanan bir senkron generatör ile yapılmaktadır. Sabit kondansatörlerle yapılan kompanzasyonda talep edilen tepkin güç çok kısa bir sürede sağlanamaz. Senkron generatörler ile yapılan kompanzasyonda ise, senkron generatörlerin uyartım akımlarının değiştirilmesi ile genetatörün kapasitif veya endüktif olarak çalıştırılması sağlanabilir. Bundan dolayı, senkron genetatörler dinamik güç kompanzatörü olarak kullanılmaktadırlar. Senkron genetatör eğer kompanzasyon yapılan sistemde başka bir amaçla kullanılmıyorsa ekonomik değildir. Senkron faz kaydırıcıların kayıpları kondansatörlere göre daha yüksek olmasının yanında bunların devamlı bir bakıma ihtiyaçları vardır. Ayrıca döner makine kullanılması ve eylemsizlik momentinden dolayı, tepki hızının yavaş olması ve üç fazın ayrı ayrı denetiminin mümkün olmaması gibi dezavantajları vardır.

Son yıllarda kompanzasyon, yarı iletken tabanlı güç elektroniği elemanları ile yapılmaktadır. Güç sistemleri için hızlı kompanzasyon ihtiyacı giderek önem kazanmaktadır ve güç elektroniği elemanları iletim sistemlerinin bu hızlı kompanzasyon ihtiyacına cevap verebilen elemanlar olduklarından kompanzasyon uygulamalarda tercih edilmektedir (Gyugyi,

1994). Yarı iletken anahtar teknolojisindeki gelişmeye paralel olarak harmonik içeriğinin azaltılması için Darbe Genişlik Modulasyon (DGM) tekniklerinin kullanılabilirliği yapılan çalışmalarda gösterilmiştir. Ayrıca çok darbeli eviricilerin oluşturulması için kullanılan zigzag transformatör kullanım ihtiyacını ortadan kaldırdığı için çok seviyeli evirici yapısı üzerinde çalışmalar yapılmaktadır(Çötel R, 2006).

Yarı iletken tabanlı anahtarlama eviriciler ile şönt tepkin kompanzatör aygıtları tasarlanabilir. Kompanzasyon için kullanılan bu tip aygıtları FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems, Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri) olarak adlandırılmaktadır. FACTS aygıtları, iletim hatlarının kompanzasyonunda kondansatör veya reaktör gruplarına ihtiyaç duymadan anahtarlama evirici devreleri yardımı ile tepkin güç üretip tüketebilmektedirler. Güç iletim sistemlerinde FACTS 'lerin kullanılması ve gelişmesi güç sistemlerinin kararlılığını iyileştirmek için birçok uygulamayı da beraberinde getirmiştir (Hingorani, 1993). FACTS aygıtları, sistemin kararlılığını arttırmak ve güç akışını denetlemek için kullanılabilir. Bu tip aygıtların en büyük avantajı esneklik ve denetlenebilir olmalarıdır (Cheng, 1998). Birinci nesil FACTS aygıtları tristör tabanlıdır. Kompanzasyon için gerekli olan tepkin güç kondansatör gruplarından sağlanır. Bu pasif elemanlar devreye tristörler yardımı ile alınarak sisteme değişken bir tepkin admitans göstermeleri sağlanır (Gyugyi, 1998). Tristör Anahtarlama Kondansatör (TSC), Tristör Kontrollü Reaktör (TCR), Tristör Anahtarlama Seri Kondansatör (TSSC), Tristör Kontrollü Seri Kondansatör (TCSC) ve Statik Var Kompanzatör (SVC) birinci nesil FACTS aygıtlarına örnek olarak gösterilebilir.

Birinci nesil FACTS aygıtlarının düşük dinamik cevapları, bağlantı noktasındaki gerilimin değişmesi durumunda çıkış tepkin gücünde değişmesi ve boyutlarının büyük olması gibi dezavantajları vardır. Bu sebeplerden dolayı ikinci nesil FACTS aygıtları olarak adlandırılan evirici tabanlı FACTS aygıtları iletim ve dağıtım sistemlerinin kompanzasyonunda kullanılmaya başlanmıştır. Evirici tabanlı FACTS aygıtlarının geleneksel SVC'lere göre avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Zhang, 1999).

- Evirici tabanlı FACTS aygıtları geleneksel SVC'lere göre daha az yer kaplar ve süzgeç için küçük bir endüktans kullanılması yeterlidir ya da fazladan endüktans kullanmaya gerek kalmadan bağlantı transformatörünün kaçak reaktansı süzgeç olarak kullanılabilir.
- Evirici tabanlı FACTS aygıtları hızlı ve sürekli değişken bir tepkin çıkış gücü verir.
- Evirici tabanlı FACTS aygıtları bağlantı noktasındaki gerilim değerinden bağımsız olarak istenilen tepkin gücü verebilirler.
- Evirici tabanlı FACTS aygıtları arıza cevap zamanı ve gerilim desteği diğer tepkin güç kompanzatörlerinden daha üstün bir performansa sahiptir.

İkinci nesil FACTS aygıtı olan STATCOM (Statik Senkron Kompanzatör); boyutunun, ağırlığının ve maliyetinin daha az olması, eşit kapasitif ve endüktif tepkin çıkış gücü verebilmesi, tam ve hızlı cevaplı sürekli tepkin çıkış gücü denetimi yapılabilmesi ve aktif harmonik süzgeç olarak kullanılabilmesi gibi özelliklerinden dolayı evirici tabanlı FACTS aygıtları içinde en çok tercih edilendir (Xing, 2003).

STATCOM, FACTS aygıtları içerisinde en çok tercih edilen denetleyicilerden biridir. Mekanik eylemsizliği olmayan senkron kompanzatörün işletme karakteristiğine benzemesi nedeniyle STATCOM olarak isimlendirilmiştir. STATCOM tepkin gücü üretebilme ve tüketebilme, ayrıca elektrik güç sisteminin özel parametrelerinin denetimini yapabilmesi için çıkış değerlerini değiştirebilme yeteneğine sahip şönt bağlı bir tepkin güç aygıtıdır. STATCOM'da güç elektroniği elemanları kullanıldığı için STATCOM üç faz geriliminin değerini ve faz açısını hızlı bir şekilde denetleyebilir.

STATCOM' un denetiminde, eviricinin doğru geriliminin sabit olup olmamasına bağlı olarak STATCOM 'un basitleştirilmiş bir matematiksel modeli çıkarılır. Bu matematiksel model Park dönüşümü kullanılarak elde edilir. Bu model yardımı ile denetim sistemi için gerekli olan transfer fonksiyonu türetilir. STATCOM'un matematiksel modeli incelendiğinde doğrusal olmayan denklem takımlarından oluştuğu görülür. Bu nedenle STATCOM'un denetiminde, doğrusal olmayan denetim yöntemleri veya STATCOM modeli belirli bir çalışma noktası civarında doğrusallaştırılarak doğrusal denetim yöntemleri kullanılması daha uygundur.

Güç sistemi için STATCOM'un denklemlerinin doğrusallaştırılmasıyla elde edilen matematiksel model kullanılarak STATCOM için doğrusal denetleyiciler tasarlanabilmektedir. Literatürde STATCOM'un doğrusal denetim yöntemleri ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Schauder, gerilim beslemeli evirici (GBE) kullanan bir STATCOM'un çıkış geriliminin genliğini ve/veya faz açısını denetlemek için iki ayrı doğrusal denetim tekniği geliştirilmiştir (Schauder, C. ve Mehta, H., 1993). Shen, güç sistemi için STATCOM'un denklemlerini doğrusallaştırarak bir matematiksel model elde edilmiştir (Shen, D. ve diğ.,2000). Rao, STATCOM için doğrusal PI denetleyici tasarlamış ayrıca PI denetleyicinin performansını kutup yerleştirme yöntemi ile iyileştirmiştir (Rao P. ve diğ.,2000). Sun ve Chen gerilim kırpışmalarını azaltmak amacı ile Dağıtım STATCOM'un (D-STATCOM) iç denetiminde PI denetleyici kullanılmıştır (Shen, D. ve diğ. ,2000, Sun, J. Ve diğ., 2004).

STATCOM'un çalışması sırasında güç sisteminde parametre ve yük değişimleri meydana gelir. Bu durum çalışma noktasının değişmesine ve matematiksel modelin doğrusallığını kaybetmesine neden olabilir. Bunun sonucunda, doğrusallaştırılmış model kullanılarak tasarlanan sabit denetleyici parametreleri işlevini kaybederek denetleyicinin performansı kötüleşir.

Geleneksel denetim yöntemlerinde karşılaşılan bu sorunlardan dolayı son yıllarda insanın yaratıcı, birleştirici ve uyarlayıcı davranışlarını benzetebilecek sistemlerin geliştirilmesi amacıyla akıllı denetleyiciler geliştirilmiş ve bu konuda büyük ilerlemeler sağlanmıştır. Bu gelişime paralel olarak akıllı denetleyicilerin bir kolu olan YSA da paralel çalışabilme, öğrenme ve genelleme yeteneklerinden dolayı denetim alanında yaygın olarak uygulama olanağı bulmuştur. YSA öğrenme ve genelleme yeteneklerinden dolayı doğrusal olmayan, dinamikleri belirsiz veya yarı belirgin sistemleri denetleyebilme yeteneğine sahiptir. YSA bu özelliklerinden dolayı günümüze kadar; kimyasal ve ısıl süreçlerin denetimi, ters sarkaç, robotik, motor sürücüler ve STATCOM' un denetimi gibi pek çok alanda denetleyici olarak kullanılmıştır. YSA'nın denetleyici olarak kullanıldığı bu alanlarda kullanılabilmesi için birçok denetim yapısı geliştirilmiştir. Bu yapılarda YSA; tek başına uyarlayıcı bir denetleyici olarak, sabit parametrelili bir denetleyici ile birlikte (melez denetim yapısı) bulanık mantık uygulamaları ile beraber (Neuro-Fuzzy denetleyiciler) veya klasik denetleyicilerin parametrelerinin uyarlanmasıyla kullanılabilirler (YSA-PID yapıları) (K.S. Narendra, 1997, T. Fukuda, 1992, B. Dandil, 2004).

Bu tez çalışmasında, tepkin güç kompanzasyonunda kullanılan şönt bağlı FACTS aygıtlarından STATCOM'un MATLAB Simulink'te benzetimi yapılmış ve tek makineli bir güç sisteminde tepkin güç kompanzasyonu amacı ile uygulanmıştır. Çalışmada STATCOM'un DA gerilim denetiminde sabit parametrelili PI ve ağ parametreleri gerçek zamanlı (online) olarak uyarlanan Yapay Sinir Ağı (YSA) kullanılmış ve bu iki denetleyicinin performansları aynı koşullar altında test edilmiştir. YSA'nın STATCOM'un denetiminde kullanılmasının temel amacı, sistemin çalışma noktasının ve yük koşullarının değişmesi durumunda STATCOM' un işlevini aynı şekilde sürdürebilmesidir.

Bu tezin giriş bölümünde tepkin gücün FACTS aygıtları ile hızlı bir şekilde kontrol edilmesinin önemi, FACTS aygıtları ile tepkin güç kompanzasyonunun yapılması ile sağlanan avantajlarına ve bir şönt FACTS aygıtı olan STATCOM'un avantajları üzerinde durulmuştur.

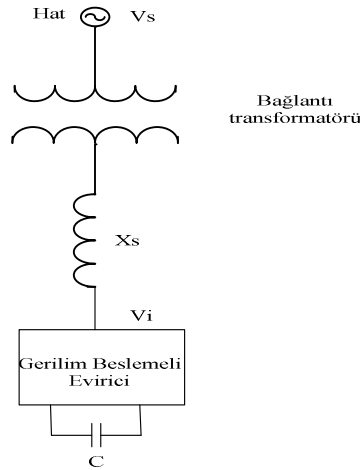
İkinci bölümde, STATCOM'un yapısı, karakteristik özellikleri, STATCOM 'un uygulamaları, çalışma prensibi ve STATCOM denetimi üzerinde durulmuştur.

Üçüncü bölümde, denetim sistemlerinden olan YSA'nın yapısı, çalışması, öğrenme algoritmaları ve YSA ile sistem eğitilmesi üzerinde durulmuştur.

Uygulama kısmında ise MATLAB-SIMULINK Toolbox'ı kullanılarak benzetimi yapılan STATCOM'un akım ve DA gerilim denetimi için sabit parametrelili PI, DA gerilim denetimi için ağırlıklı gerçek zamanlı (online) olarak uyarlanan YSA denetleyicisi ile aynı çalışma şartları altında benzetim sonuçları verilmiştir.

2. STATCOM

STATCOM (Statik Senkron Kompanzatör) evirici tabanlı ikinci nesil paralel FACTS denetim elemanıdır. Güç sistemlerine paralel bağlanarak tepkin güç kompanzasyonu ve gerilim regülasyonu için kullanılır. STATCOM'un paralel tepkin güç kompanzatörü olarak çalışması ve performans karakteristiğinin ideal senkron hareketli kompanzatör ile benzer olması nedeniyle Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM) olarak adlandırılmaktadır. STATCOM şebeke ile senkron olarak çalışan gerilim ve denetlenebilir tepkin güç kaynağı olarak tanımlanabilir. STATCOM, büyük değerde dış reaktörlere veya kondansatör gruplarına ihtiyaç duymaksızın kademe noktasında tepkin güç tüketerek veya üreterek gerilim desteği sağlar. Çıkış geriliminin frekansı sistemin temel frekansına eşit olması gerekmektedir. Çıkış gerilimi ile sistem gerilimi arasındaki faz farkına göre sistemden etkin güç çekmekte veya sisteme etkin güç aktarılmaktadır. Çekilen etkin güç ile kondansatör şarj olmakta ve evirici çıkış gerilimi denetlenmektedir. STATCOM sisteme tepkin güç aktarırken (kapasitif modda çalışırken) kondansatörün sistem için gerekli olan gerilim seviyesini sağlayabilmesi için şarj olması gerekir. Bu da STATCOM çıkış geriliminin sistem geriliminden geri fazda olacak şekilde denetlenmesi ile sağlanabilmektedir. Böylece sistemden çekilen etkin güç hem dahili kayıpları karşılar hem de gerekli olan DA gerilimi sağlamış olur. STATCOM geleneksel tristör kontrollü SVC'lerle aynı karakteristiğe sahiptir. Evirici çıkış gerilimindeki harmonikleri azaltmak için üç fazlı sistemlerde birden fazla evirici gurupları kullanılır. Evirici devrelerinde yüksek güç ve akım kapasitesine sahip GTO ve IGBT'ler kullanılmaktadır. (Sahoo, 2002)



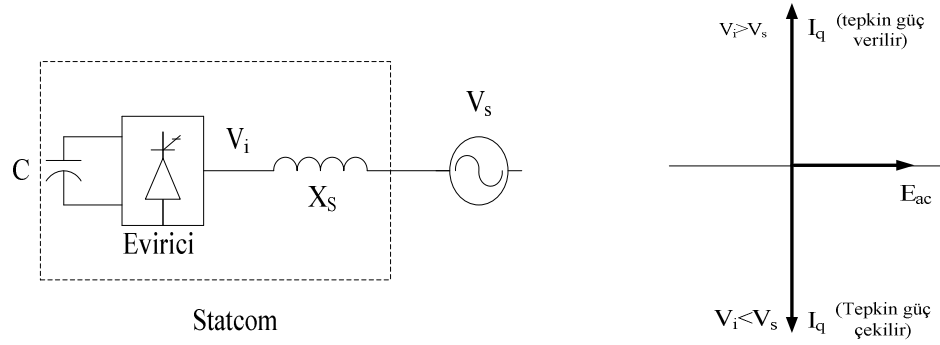
Şekil 2.1 STATCOM 'un tek hat gösterimi

STATCOM'un esas fonksiyonu bağlantı noktasında iletim hattının gerilimini düzenlemektir. STATCOM bunu iletim hattından kontrollü bir tepkin akım çekerek sağlar (Schauder ve Mehta, 1993).

Şekil 2.1'den de görüleceği gibi STATCOM en basit şekilde bir bağlantı transformatörü, bir evirici ve bir adette doğru gerilim enerji depolama aygıtından meydana gelir. Bu doğru gerilim enerji depolama aygıtı genellikle küçük bir kondansatör olduğu için STATCOM iletim hattı ile sadece tepkin güç alışverişi yapar. Eviricinin doğru gerilim tarafında bulunan kondansatörün değeri STATCOM 'un fiziksel boyutu, performansı ve maliyeti üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu nedenle kondansatör değerinin uygun şekilde seçilmesi STATCOM 'un maliyetinin düşürülmesi ve performansı açısından önemlidir (Liang ve Nwankpa, 1999).

Eviricinin çalışması anahtarların detaylı çalışması düşünülmezsizin giriş gücünün çıkış gücüne eşit olması gerekliliği ile açıklanabilir. Eviricide kullanılan anahtarlama elemanları doğru gerilimli giriş devresini direkt olarak alternatif gerilimli çıkış devresine bağlar. Bu yüzden, kayıplar ihmal edilirse alternatif gerilim tarafındaki net anlık güç daima doğru gerilim tarafındaki net anlık güce eşit olmalıdır (Gyugyi, 1998). Evirici sadece tepkin güç çıkışı sağladığı zaman (evirici çıkış gerilimi ile bara gerilimi aynı fazda) doğru akım kaynağı (dolu kondansatör) tarafından sağlanan etkin güçte sıfır olmalıdır. Ayrıca tanımlardan sıfır frekansta tepkin güç de (kondansatörde) sıfırdır ve kondansatörün tepkin güç üretiminde hiçbir etkisi yoktur. Yani evirici, sadece tepkin çıkış akımlarını fazlar arasında serbest dolaşacak bir biçimde üç fazlı alternatif gerilim çıkışlarını şebekeye bağlar. Şebekeden bakıldığında evirici net anlık güç değişiminin sıfır olduğu fazlar arasında dolaşan bir akım akışı meydana getirir (Hingorani ve diğ., 1999). Doğru gerilimi depolayan kondansatöre duyulan ihtiyaç kuramsal olarak anlık giriş-çıkış güçleri arasındaki eşitlik koşulundan ve gerilim kaynağına duyulan ihtiyaçtan dolaydır.

STATCOM da, güç sistemi ile evirici arasındaki tepkin güç alışverişi STATCOM gerilimi (V_i)'nin genliği değiştirilerek ayarlanır. Eğer V_i gerilimi, hat gerilimi (V_s)'nin üzerinde tutulursa eviriciden bir reaktans üzerinden hatta bir akım akacaktır. Böylelikle evirici AA sistemi için bir kapasitif güç üretmiş olacaktır. Eğer eviricinin çıkış gerilimi (V_i), AA sisteminin V_s geriliminden küçük tutulursa bu durumda eviriciye bir akım akacak ve evirici bir endüktif tepkin güç çekmiş olacaktır. Bu durumlar için STATCOM un genel devre modeli ve tepkin güç alışveriş modları Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2 STATCOM tek hat devre modeli ve tepkin güç akışının vektörel gösterimi

Eğer çıkış gerilimi AA sistem gerilimine eşit olursa tepkin güç alışverişi sıfır olacaktır. Evirici çıkışındaki gerilim ile AA sistem gerilimi arasındaki faz farkı değiştirilerek eviriciyle AA sistemi arasındaki etkin güç alışverişi de ayarlanabilmektedir. Eğer evirici gerilimi AA sistem gerilimine göre ileride tutulursa evirici DA enerji kaynağından AA sistemine bir etkin güç akışını gerçekleştirir. V_i gerilimi AA sistem geriliminden geri fazda tutulursa evirici AA sisteminden bir etkin güç çekecektir.

STATCOM, AA sistemin fazları arasında anlık tepkin güç akışı sağlar. Evirici girişindeki net tepkin güç, evirici çıkışındaki net tepkin güce eşit olmalıdır. Girişteki kaynak bir DA kaynağı olup tepkin güç girişi sıfırdır. Aslında DA kaynağı tepkin güç üretiminde herhangi bir rol oynamaz.

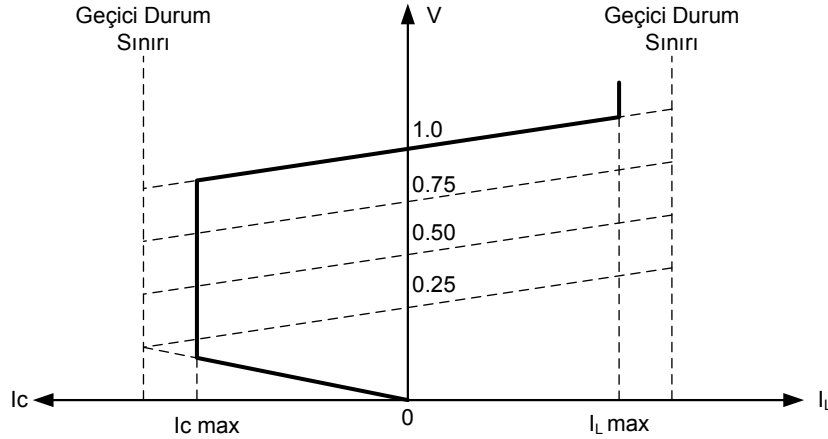
STATCOM'u daha kısa olarak anlatacak olursak, evirici AA sisteminin fazları arasında tepkin gücün akışını sağlar. Fakat etkin güç alış-verişi yapması için DA uçlarındaki kapasitelerin etkin güç çekmesi ya da vermesi gerekir.

Eviricinin anahtarlanması ile tepkin güç sağlanmasına rağmen bir doğru gerilimli kapasitenin eviricinin girişine bağlı olması gerekir. Çünkü kapasiteler bir gerilim kaynağı olarak bir sirkülasyon akımını sağlayacaktır. Eviriciye bağlanan kapasitenin değeri, doğru akım dalgalanmalarında kondansatör uçları arasındaki gerilim sabit kalacak şekilde büyük değerde seçilir. Evirici çıkışındaki gerilimin dalga şekli merdiven şeklinde olup çekilen akımın sinüsoidal olmasından dolayı girişteki doğru akım dalgalı bir akımdır.

Kararlı durumda evirici kayıplarının küçük tutulması amacıyla eviricinin anahtarlama frekansı temel frekansında seçilir. Fakat hat arızalarından kaynaklanan geçici durumlarda arıza akımlarının etkilerinden uzak durmak amacıyla bir DGM modu kullanılır.

Şekil 2.3'te STATCOM akım gerilim karakteristiği görülmektedir. V-I karakterisitenin görüleceği gibi STATCOM AA sistemi geriliminden bağımsız olarak hem endüktif hemde kapasitif akımı belli sınırlar içerisinde sağlayabilmektedir. STATCOM sistem geriliminin

herhangi bir anında tam bir kapasitif tepkin güç sağlayabilmektedir. Bu durum aslında STATCOM'un gerilim çökmeleri esnasında ve sonrasında gerilimi destekleyici olarak kullanılmasını sağlar.



Şekil 2.3 STATCOM'un akım gerilim karakteristiği

STATCOM'un V-I karakteristiği bağlantı transformatörünün kaçak reaktansına ve eviricinin çıkış gerilimine bağlıdır. Genelde kaçak reaktans değeri %10 ile %20 arasındadır (STATCOM 'un nominal akımında nominal sistem geriliminin yaklaşık %10 ile %20 'lik gerilim düşümü ve gerilim yükselmesi için). STATCOM kendi aşırı gerilim tutucusunun sağladığı koruma seviyesine kadar olan geçici ve dinamik aşırı gerilimlere dayanmalıdır. Anlık uygulanan gerilimin genliği, referans doğru gerilimin genliğini aştığı geçici durum boyunca STATCOM'da kullanılan diyotlar yardımıyla akım akacak ve bu akım kondansatörün daha yüksek bir gerilim değerinde dolmasına neden olacaktır.

STATCOM ile güç sistemi arasındaki etkin güç alışverişi ise güç sisteminin gerilimi ile eviricinin çıkış gerilimi arasındaki faz farkı ayarlanarak denetlenebilir. Eviricinin çıkış gerilimi bara geriliminden ileri fazda ise evirici kendi doğru gerilim enerji deposundan sisteme etkin güç sağlar. Eviricide çıkış gerilimi bara geriliminden geri fazda tutulursa, evirici şebekeden etkin güç çeker. Eviricide, süzgeçte ve bağlantı transformatöründe meydana gelen etkin güç kaybı şebekeden karşılanmazsa bu kayıpları kondansatör karşılamaya çalışacak ve kondansatör boşalacaktır. Kondansatörde depolanan enerji sınırlı olduğundan STATCOM'un çalışmasını düzgün bir şekilde sürdürebilmesi için eviriciye doğru bir etkin güç akışı ile bu kayıpların şebekeden karşılanması gerekir.

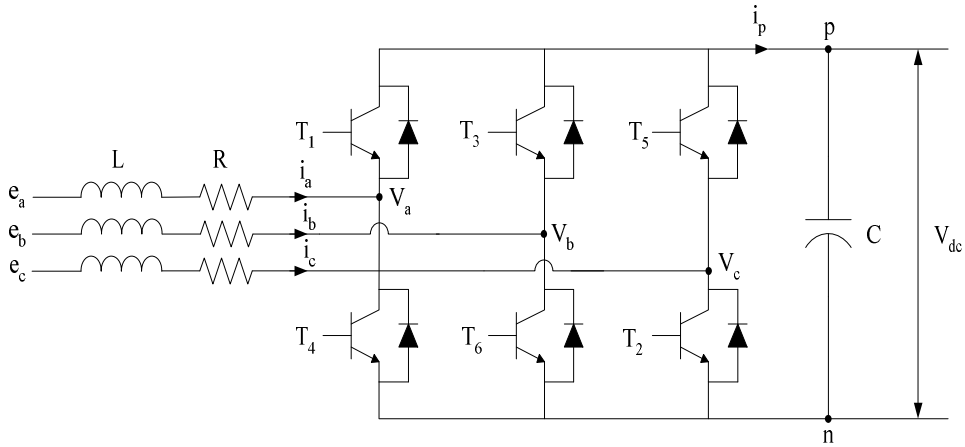
Şebeke ile evirici arasındaki etkin güç alışverişini ise STATCOM'un şebekeye vereceği ya da şebekeden çekeceği etkin ve tepkin güç miktarı denk.(2.1)'de verilmiştir.

$$P = \frac{V_i V_s}{X_s} \sin(\alpha - \theta)$$

(2.1)

$$Q = \frac{V_i (V_i - V_s \cos(\alpha - \theta))}{X_s}$$

Denk.(2.1)'de, V_i eviricinin çıkış gerilimi, V_s şebeke gerilimi, α eviricinin çıkış geriliminin faz açısı, θ şebeke geriliminin faz açısı, X_s bağlantı transformatörünün kaçak reaktansı ve filtre reaktanslarının toplamıdır. Ayrıca STATCOM'da doğru gerilim enerji depolama aygıtı genellikle küçük bir kondansatör olduğu için STATCOM iletim hattı ile sadece tepkin güç alışverişi yapar. STATCOM'un etkin güç verebilmesi için eviricinin DA tarafının akü, yakıt hücresi gibi elemanlar ile beslenmesi gerekir. İki seviyeli bir evirici kullanan STATCOM devresi Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4 İki seviyeli evirici kullanan STATCOM

STATCOM'un matematiksel modeli Şekil 2.4'ten türetilir (Xing, 2003). DA taraftaki akım anahtarlamasının bir fonksiyonu olduğundan,

$$i_p = \begin{bmatrix} D_{ap} - D_{bp} \\ D_{bp} - D_{cp} \\ D_{cp} - D_{ap} \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada D_{ap} , D_{bp} ve D_{cp} anahtarlama fonksiyonları, $i_{ab} = \frac{1}{3}(i_a - i_b)$, $i_{bc} = \frac{1}{3}(i_b - i_c)$ ve $i_{ca} = \frac{1}{3}(i_c - i_a)$ 'dır. Anahtarlama fonksiyonuna bağlı olarak eviricinin üreteceği gerilimler,

$$\begin{bmatrix} V_a - V_b \\ V_b - V_c \\ V_c - V_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{ap} - D_{bp} \\ D_{bp} - D_{cp} \\ D_{cp} - D_{ap} \end{bmatrix} \times V_{pn} \quad (2.2)$$

şeklinde yazılır.

Şekil 2.4'te verilen STATCOM devresinden,

$$\begin{aligned} Ri_a + L \frac{di_a}{dt} &= e_a - V_a \\ Ri_b + L \frac{di_b}{dt} &= e_b - V_b \\ Ri_c + L \frac{di_c}{dt} &= e_c - V_c \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$L \frac{di_{ab}}{dt} = \frac{1}{3} L \left(\frac{di_a}{dt} - \frac{di_b}{dt} \right)$$

Denk.(2.3) düzenlenirse,

$$\begin{aligned} L \frac{di_{ab}}{dt} &= \frac{1}{3} [(e_a - e_b) - (V_a - V_b)] - i_{ab} R \\ L \frac{di_{bc}}{dt} &= \frac{1}{3} [(e_b - e_c) - (V_b - V_c)] - i_{bc} R \\ L \frac{di_{ca}}{dt} &= \frac{1}{3} [(e_c - e_a) - (V_c - V_a)] - i_{ca} R \end{aligned} \quad (2.4)$$

elde edilir. Denk.(2.4) matris şeklinde yazılırsa denk.(2.5) elde edilir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3L} \begin{bmatrix} e_a - e_b \\ e_b - e_c \\ e_c - e_a \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_a - V_b \\ V_b - V_c \\ V_c - V_a \end{bmatrix} - \frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Denk.(2.2)'yi denk.(2.5)'te yerine yazarsak,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3L} \begin{bmatrix} e_a - e_b \\ e_b - e_c \\ e_c - e_a \end{bmatrix} - \frac{1}{3L} \begin{bmatrix} D_{ap} - D_{bp} \\ D_{bp} - D_{cp} \\ D_{cp} - D_{ap} \end{bmatrix} V_{pn} - \frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

denklemini elde edilir. Ayrıca DA taraftaki kondansatör akımı anahtarlama ile ilgili olarak değiştiği için denk.(2.7)'deki gibi ifade edilir.

$$i_p = C \frac{dV_{pn}}{dt} = \begin{bmatrix} D_{ap} - D_{bp} \\ D_{bp} - D_{cp} \\ D_{cp} - D_{ap} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Üç fazlı akımlar denk.(2.7)'de Park dönüşümü ile,

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

d (etkin bileşen) ve q (tepkin bileşen) bileşenlerine ayrılır. Burada P,

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\omega t) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

şeklinde yazılır. Burada ω açısal hızdır. Akımlar d ve q bileşenleri cinsinden yazılırsa,

$$\begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} i_a - i_b \\ i_b - i_c \\ i_c - i_a \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \left(\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_b \\ i_c \\ i_a \end{bmatrix} \right) = \bar{T}^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

denklemleri elde edilir. Burada,

$$\bar{T}^{-1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -\sin(\omega t - 120) & \cos(\omega t - 120) & 1 \\ \sin(\omega t) & -\sin(\omega t) & 1 \\ -\sin(\omega t + 120) & \cos(\omega t + 120) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

ile ifade edilir. Denk.(2.10) düzenlenirse,

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

elde edilir. Aynı şekilde e_d , e_q , D_d ve D_q yazılırsa,

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} e_{ab} \\ e_{bc} \\ e_{ca} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\begin{bmatrix} D_d \\ D_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} D_{ab} \\ D_{bc} \\ D_{ca} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

elde edilir. Denk.(2.12) denk.(2.6)'nın sol tarafına uygulanırsa,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} = \frac{d \left(T^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \right)}{dt} = \frac{dT^{-1}}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + T^{-1} \begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

elde edilir. Ayrıca denk.(2.6)'ya denk.(2.13) ve denk.(2.14) uygulanırsa,

$$\frac{dT^{-1}}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + T^{-1} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3L} T^{-1} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} - \frac{1}{3L} T^{-1} \begin{bmatrix} D_d \\ D_q \end{bmatrix} V_{pn} - \frac{R}{L} T^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

bulunur.

$$e_d = V_m, e_q = 0 \quad (2.17)$$

$$T \frac{dT^{-1}}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Denk.(2.16)'nın her iki tarafı T ile çarpılırsa ve denk.(2.18)'e uygulanırsa,

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & -\frac{D_d}{3L} \\ -\omega & -\frac{R}{L} & -\frac{D_q}{3L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{3L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_m \quad (2.19)$$

denklemleri elde edilir. Denk.(2.12) ve (2.14) denk.(2.7)'e uygulanırsa,

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_p = \frac{1}{C} \begin{bmatrix} D_{ap} - D_{bp} \\ D_{bp} - D_{cp} \\ D_{cp} - D_{ap} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_d \\ D_q \end{bmatrix}^T T^{-T} T^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{3}{2C} \begin{bmatrix} D_d \\ D_q \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

denklemleri elde edilir. Denk.(2.20)'den görülebileceği gibi STATCOM'un dış çevrim dinamikleri anahtarlama fonksiyonuna bağlı olarak ifade edilebilir. Denk.(2.19) ve (2.20) durum uzay matrisi şeklinde yazılırsa,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & \omega & -D_d/3L \\ -\omega & -R/L & -D_q/3L \\ (3/2C)D_d & (3/2C)D_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_{da} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{3L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_m \quad (2.21)$$

elde edilir. Denk.(2.21)'den STATCOM'un dinamik çevrim durumlarının i_d , i_q ve V_{da} , denetim değişkenlerinin ise D_d ve D_q olduğu görülür. Denk.(2.21) incelenirse STATCOM'un matematiksel modelinin doğrusal olmadığı görülür. Doğrusal olmayan sistemleri denetlemek için farklı yöntemler vardır. Bu yöntemlerden biri sistemin çalışma noktası biliniyorsa sistem denklemlerini çalışma noktası etrafında doğrusallaştırmaktır (Xing, 2003).

2.1 STATCOM Modelinin Doğrusallaştırılması

Denk.(2.21) Jacobian metodu kullanılarak verilen bir çalışma noktası için doğrusallaştırılacaktır. $f(x)$ doğrusal olmayan ve $f(x) \in \Re^{3 \times 1}$ fonksiyon ise bu $f(x)$ fonksiyonunun Jacobian matrisi,

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} \partial f_1 / \partial x_1 & \partial f_2 / \partial x_1 & \partial f_3 / \partial x_1 \\ \partial f_1 / \partial x_2 & \partial f_2 / \partial x_2 & \partial f_3 / \partial x_2 \\ \partial f_1 / \partial x_3 & \partial f_2 / \partial x_3 & \partial f_3 / \partial x_3 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

şeklinde ifade edilir. Doğrusal olmayan bir sistemin dinamikleri $\dot{X} = f(x, u)$ şeklinde gösterilebilir. Durum denklemlerinde doğrusal olmayan terimlerin bulunmasından dolayı denk.(2.23)'te gösterildiği gibi A ve B Jacobian matrisleri kullanılarak x^o ve u^o çalışma noktaları etrafında doğrusal olmayan vektör fonksiyonu doğrusallaştırılabilir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A x + B u \\ y &= C x + D u \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x^o, u^o} \quad (2.24)$$

$$B = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{x^o, u^o} \quad (2.25)$$

$x = x^o + \delta x$ ve $u = u^o + \delta u$ şeklinde tanımlanırsa yeni doğrusal sistem,

$$\dot{\delta x} = A \delta x + B \delta u \quad (2.26)$$

şeklinde bulunur. Denk.(2.26) doğrusal zamanla değişmeyen bir denklemdir. STATCOM için doğrusal bir model elde etmek için denk.(2.26) kullanılabilir. Çalışma noktaları,

$$X^o = \begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \\ V_{dco} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$U^o = \begin{bmatrix} D_{do} \\ D_{qo} \end{bmatrix}$$

şeklinde tanımlanıp Jacobian matrisi hesaplanırsa,

$$A = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{(x^o, u^o)} = \begin{bmatrix} -R/L & \omega & -D_{do}/3L \\ -\omega & -R/L & -D_{qo}/3L \\ 3D_{do}/2C & 3D_{qo}/2C & 0 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

ve

$$B = \frac{\partial f}{\partial u} \Big|_{(x^o, u^o)} = \begin{bmatrix} -V_{dc}/3L & 0 \\ 0 & -R/L \\ 3i_{do}/2C & 3i_{qo}/2C \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

bulunur. C birim matristir. Eğer $\tilde{X} = X - x^o$ ve $\tilde{U} = U - u^o$ kabul edilirse denk.(2.30)'da verilen STATCOM'un küçük işaret modeli elde edilir.

$$\dot{\tilde{X}} = A\tilde{X} + B\tilde{U} \quad (2.30)$$

V_m sabit olduğu için denk.(2.9)'da verilen STATCOM'un küçük işaret modelinde bulunmaz.

2.2 STATCOM'un Denetimi

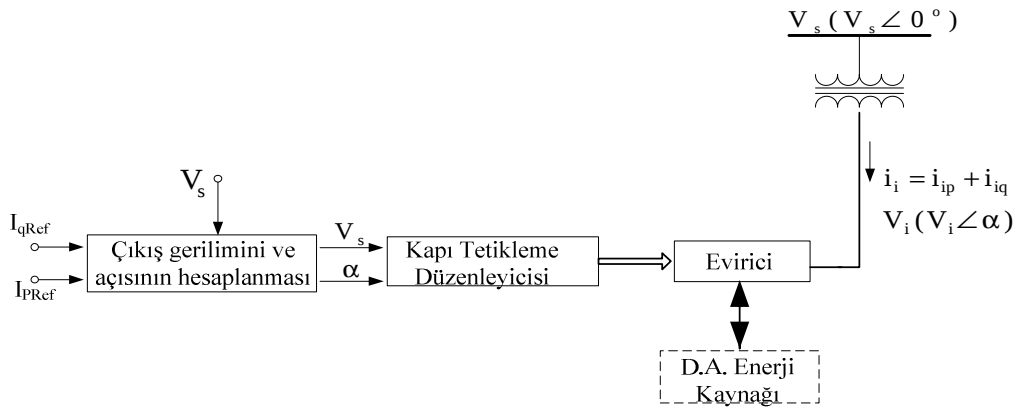
STATCOM doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki farklı denetim yöntemi ile denetlenir, her iki denetim yönteminde alternatif gerilim tarafı bir transformatöre, doğru gerilim tarafı ise bir kondansatöre bağlanan eviriciden oluşur.

STATCOM'un denetimi eviricinin çıkış gerilimini şebeke gerilimine göre birkaç derece geri ya da ileri fazda tutulması için denetimli anahtarların anahtarlama açılarının değiştirilmesi ile gerçekleştirilir. Eviricinin çıkış gerilimi denetlenmek istenen baranın gerilimine göre ileri yada geri fazda tutulmasındaki amaç, etkin güç akışının şebekeden eviriciye doğru ya da eviriciden şebekeye doğru olmasını sağlamaktır. Bu durumda kondansatörün dolup boşalması ile doğru gerilim değeri ve buna bağlı olarak eviricinin çıkış gerilimi değişir. İki farklı eviricinin doğru gerilim tarafı aynı kondansatöre paralel bağlanabilir. Ayrıca seri olarak ta bağlanabilir, bu durumda eviricinin çıkış geriliminin genliği paralel bağlanan durumdakinin iki katı olur. Ancak eviricilerin doğru gerilimlerinin eşit olması gerektiğinden bu tip yapılandırma genelde tercih edilmez. Eviricilerin alternatif gerilim tarafında karakteristik harmoniklerinin yok edilebilmesi için transformatörün hat tarafında eviriciler seri bağlanır. Bununla birlikte daha düşük harmonik içerikli gerilim dalga şekli elde etmek için evirici ve transformatörlerini paralel bağlamak gereklidir (Cavaliere ve diğ., 2002). Ayrıca harmonikleri azaltmak için STATCOM çıkış geriliminin darbe sayısı artırılır.

Bir statik tepkin güç üretici olan STATCOM çok sayıda kapıdan denetlenebilen yarıiletken güç anahtarlarından oluşur. Kapı tetiklemeleri etkin/tepkin güç referans işaretleri ile evirici iç denetim devreleri tarafından üretilir. Dış referans işaretler ise STATCOM'un işlevsel çalışmasını belirler.

İç denetim devreleri eviricinin en önemli kısmını oluşturur. Bu yapının ana görevi eviricinin anahtarlama elemanlarının kendi maksimum akım ve gerilim sınırları içinde tutulması ile istenilen genlik ve açıda ve AA sisteminin frekansı ile aynı frekansta bir gerilim üreterek senkronize olmuş bir şekilde temel çıkış gerilimi dalgasını üretmeyi sağlamaktır. İç denetim, istenilen genlik ve faz açısındaki gerilimin dış denetim tarafından sağlanan referans işaretlerle güç sistemine bir reaktansla bağlanan sinüsoidal bir gerilim kaynağı olarak görülebilir.

Bahsedildiği gibi iç denetimin asıl görevi kompanzasyon için gerekli olan tepkin ve etkin güç değişimini gerçekleştiren senkron bir çıkış gerilimi üretecek şekilde yarı iletken anahtarlama elemanlarını çalıştırmaktır. Bunu dış denetim tarafından sağlanan I_{qref} ve I_{pref} değerlerinden hesaplanan gerekli çıkış geriliminin genliği ve faz açısını hesaplayarak gerçekleştirir. Bu şekilde bir denetim yaparak sistem gerilimine uygun gerilim üretilir.



Şekil 2.5 STATCOM'un iç denetim şeması

Şekil 2.5'te eviricinin dalga şeklini belirleyen genel iç denetim şeması görülmektedir. Şemadan da görüleceği gibi referans akımlardan (I_{qref} ve I_{pref}) ve evirici çıkış geriliminden elde edilen yeni evirici çıkış gerilimi genliği ve faz açıları (V_i ve α) kapı tetikleme devresine giriş olarak verilir. Kapı tetikleme devresine verilen girişlere uygun olarak hat gerilimi (V_s) kullanılarak kapı tetikleme işaretleri üreterek yarı iletken anahtarlama elemanlarını denetler. Böylece evirici ile hat arasında istenilen değere etkin ve tepkin akım akışı sağlanmış olur.

Burada çıkış geriliminin genliği ve faz açısı eviricinin güç sisteminden çekeceği tepkin ve etkin gücü ve güç sistemi ile tepkin ve etkin güç alış verişini belirleyen iç parametrelerdir. Eğer sadece tepkin güç değişimi yapılması isteniyorsa, iç denetime gerekli olan giriş tepkin

akımdır. İç denetim ile eviricinin çıkış gerilimi ve faz açısı ile orantılı olan kondansatör gerilimi denetlenir. Bu orantı ile tepkin çıkış akımı, kondansatör geriliminin denetimiyle dolaylı olarak denetlenir.

Eviricinin ürettiği gerilim harmonikleri ihmal edilirse, evirici çıkış gerilimi,

$$V_i = k V_{dc} \cos(\alpha - \theta) \quad (2.31)$$

şeklinde yazılır. Burada k eviricinin kazancı, $\alpha - \theta$ şebeke gerilimi ile eviricinin çıkış gerilimi arasındaki faz farkıdır.

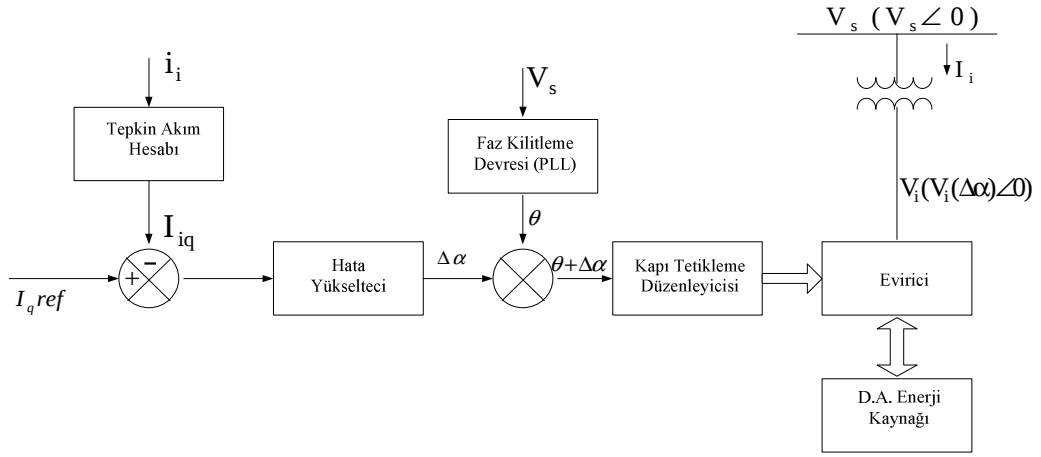
Uygulamada yariletken anahtarlar kayıpsız değildir. Bundan dolayı kondansatörlerde bulunan enerji anahtar kayıplarında kullanılarak zamanla azalır. Bu durumu önlemek için evirici çıkış gerilimi AA sistem geriliminden küçük bir açı kadar ($0.1^\circ - 0.2^\circ$) geri fazda tutulur. Böylece eviricinin anahtarlama kayıpları AA sisteminden sağlanmış olur. Bu şekilde yapmakla kondansatör gerilimi istenilen seviyede sağlanmış olur. Bu yöntemle evirici çıkış geriliminin tepkin güç denetiminin yapılabilmesi için kapasitelerin gerilimleri değiştirilebilir. Dolayısıyla kapasite gerilimi değiştirilerek evirici çıkışındaki gerilim değiştirilir ve tepkin güç denetimi sağlanmış olur.

Çıkış geriliminin genlik ve açıları birer iç parametre olup bu değerler eviricinin çekeceği etkin ve tepkin akımları belirler. Bu sayede eviricinin AA sistemi ile etkin ve tepkin güç alışverişi belirlenir. Eviricinin çıkış gerilimini üretmek için doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki yaklaşım vardır. Evirici ile tepkin güç alışverişi yapılacaksa, (etkin güç alışverişi sıfır) evirici bir statik Var generatör gibi çalışır. Dolayısıyla iç denetim referans girişi bir tepkin akım olacaktır ve buradan istenilen genlik ve faz açısını elde etmek üzere gereken kapasite doğru gerilimi belirlenir. Çünkü AA geriliminin çıkış genliği doğrudan doğruya kapasite gerilimine bağlı olup arada bir oran vardır. Bu orandan dolayı eviricinin çıkışındaki tepkin akımı denetleme yollarından biri dolaylı bir yoldan kapasite geriliminin değiştirilmesine dayanır. Dolaylı denetim yönteminde evirici için kapı darbelerinin üretilmesinde kare dalga anahtarlama stratejisi uygulanır ve eviricinin kazancı sabit tutularak STATCOM'un çıkış gerilimi faz açısı ayarlanarak değiştirilir. Bu yöntemde eviricinin çıkış geriliminin etkin değeri,

$$V_i = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{dc} \cos(\alpha - \theta) \quad (2.32)$$

denklemleri ile ifade edilir.

Şekil 2.6'da tepkin güç denetiminin dolaylı yolla yapılmasına ait blok şeması görülmektedir.



Şekil 2.6 STATCOM’da kondansatör geriliminin değiştirilmesi ile tepkin güç denetiminin dolaylı yolla yapılmasına ait blok şeması

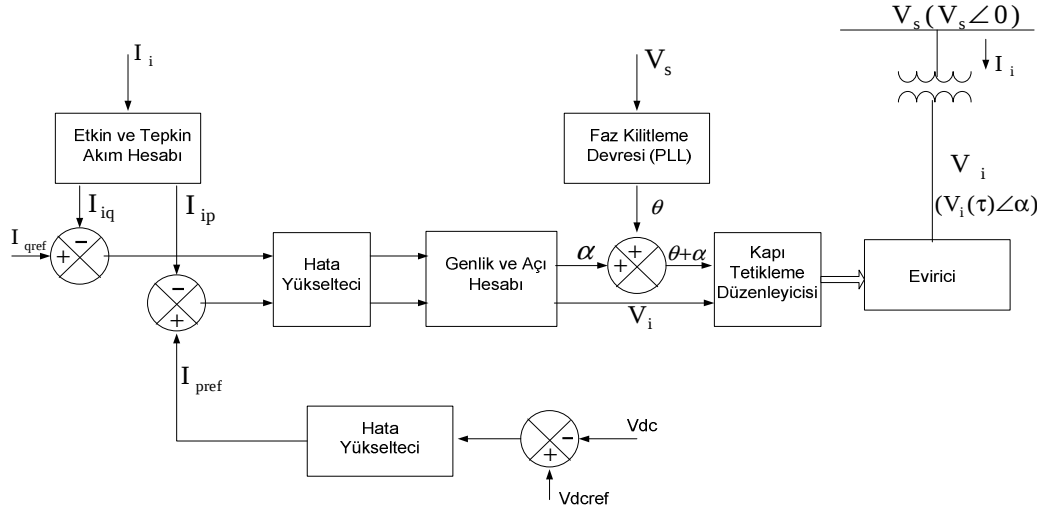
Burada iç denetim girişleri; denetlenmek istenen baranın gerilimi (V_s), evirici çıkış akımı (I_i) ve referans tepkin akım (I_{qref}) değerleridir. Bara gerilimi temel (V_s) bir senkronizasyon işareti elde etmek için Faz Kilitleme Devresine (PLL) girerek θ açısını sağlar. Evirici çıkış akımı (I_i) temel bileşenleri olan I_{ip} ve I_{iq} bileşenlerine ayrılıp, I_{iq} (tepink akım bileşeni)’nin genliği referans akım olan I_{qref} ile karşılaştırılır. Bu iki akım arasındaki fark daha sonra uygun bir hata yükselteciden geçirilerek α açısı bulunur. Bu α açısı evirici çıkışındaki gerilim ile AA sistem gerilimi arasındaki açı farkıdır. Bu açının değişimi ile gereken kapasite gerilim seviyesi elde edilir. θ ile α ’nın toplamından elde edilen açı istenilen senkronizasyon işaretini temsil etmekte olup tepkin akım değerini belirler. $\theta + \alpha$ açısı kapı tetikleme düzenleyicisinin uygun kapı tetikleme açılarını oluşturmasını sağlar.

Eviricinin çıkış geriliminin genliğini denetlemek için kullanılan diğer bir yöntemde doğrudan denetim yöntemidir. Bu yöntemde DA denetimi de yapılarak kondansatör gerilimi sabit tutulur. Çıkış gerilimi DGM tekniği gibi iç gerilim denetim mekanizması yardımıyla denetlenir. Doğrudan denetim yönteminde eviricinin çıkış geriliminin etkin değeri,

$$V_i = \frac{m_a}{2\sqrt{2}} V_{dc} \cos(\alpha - \theta) \quad (2.33)$$

denklemleri ile hesaplanır. Burada m_a modülasyon indeksidir.

Şekil 2.7’de çıkış geriliminin doğrudan denetim bloğu görülmektedir. Bu bloktan görüleceği gibi kondansatör gerilimi denetlenerek istenilen referans değerinde tutulur. DA denetleyicisi eviricinin iç kayıplarını karşılamak üzere AA sisteminden çekilen etkin gücü belirler.

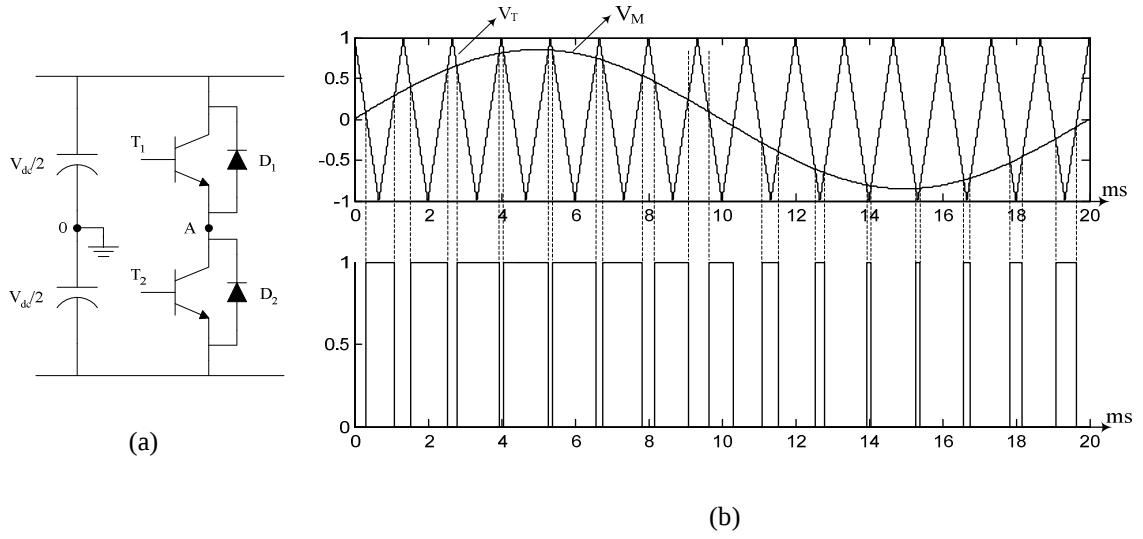


Şekil 2.7 STATCOM’da tepkin güç çıkışının doğrudan iç denetim blok şeması

Doğrudan denetim bloğuna giriş işaretleri, bara gerilimi (V_s), evirici çıkış akımı (I_i), tepkin akım referansı (I_{qref}), ve doğru gerilim (V_{daref}) tir. Blok şemasından da görüleceği üzere evirici çıkış akımı etkin ve tepkin bileşenlerine ayrılır. Bu akım bileşenleri dış tepkin akım referansı ile karşılaştırılır. Elde edilen hata işaretleri yükselticiden geçirildikten sonra etkin ve tepkin saptamaları uygun genlik ve açıda evirici çıkış gerilimini oluşturmak üzere kapı sürme işaretlerine dönüştürülür. Bu kapı işaretleri Faz Kilitleme Devresi (PLL) referansına uygun olacak şekilde oluşturulur.

Bu denetim yapısında evirici girişi olan kondansatör yerine bir DA güç kaynağı ve yakıt pili gibi gerilim kaynağı kullanılabilir. Bu durumda etkin akım referansı bu dış enerji kaynağı etkin akımı ile toplanacaktır. Böylece AA sisteminden çekilecek veya verilecek etkin güç istenilen seviyeye getirilmiş olur.

Eviricide kullanılan anahtarlara kapı darbelerinin üretilmesi için birçok DGM modeli olmasına rağmen bunlardan en çok kullanılan Sinüsoidal Darbe Genişlik Modülasyonudur (SDGM). SDGM’ler de evirici kazancı ve buna bağlı olarak da eviricinin çıkış gerilimi denetlenir. Şekil 2.8’de sistem frekansı ile aynı frekansta bir sinüs dalgası (modülasyon dalgası) ve testere dişli (taşıyıcı dalga) olmak üzere iki işaretin karşılaştırılması ile bir faz bacağına ait anahtarlar için kapı darbelerinin üretilmesi gösterilmiştir. Anahtarların iletme geçmesi veya kesime girmesi için gerekli darbeler, sinüs dalgası ile testere dişli dalganın geçiş noktaları kullanılarak üretilir (Çöteli R, 2006).



Şekil 2.8 a) Eviricinin bir fazına ait devre şeması **b)** DGM dalgalarının üretilmesi

Modulasyon dalgasının frekansı eviricinin çıkış geriliminin frekansını, taşıyıcı dalganın frekansı ise anahtarlama frekansını belirler. Taşıyıcı dalganın frekansının modulasyon dalgasının frekansına oranı,

$$m_f = \frac{f_T}{f_m} \quad (2.34)$$

olarak yazılır ve bu oran frekans modulasyon oranı olarak isimlendirilir. Burada f_T , taşıyıcı dalganın frekansı ve f_m ise modulasyon dalgasının frekansındır. m_f tek tamsayı seçildiği için faz-nötr gerilimi ve faz-faz gerilimleri tek simetrilere oluşur. Bu yüzden eviricinin çıkış geriliminin Fourier analizi yapıldığında sadece sinüs serisinin katsayıları sonludur, kosinüs serisinin katsayıları ise sıfırdır. Bu yüzden faz-nötr ve faz-faz gerilimlerinde tek sayılı harmonikler görülür, çift harmonikler görülmez. Frekans modulasyon oranı, m_f , $2m_f$, $3m_f$ gibi anahtarlama frekansı veya katlarında merkezlenmiş yan bantlar olarak görülen harmonik derecelerine etki eder. Eğer frekans modulasyon oranı üçün katları seçilirse m_f 'nin katlarında meydana gelen harmonikler eviricinin çıkış geriliminde yok edilir. Harmoniklerin meydana geldiği frekanslar aşağıda belirtilmiştir.

$$\begin{aligned} m_f, m_f \pm 2 \\ 2m_f, 2m_f \pm 1 \\ 3m_f, 3m_f \pm 2 \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$4m_f, m_f \pm 1, \dots$$

Modulasyon indeksi m_a ise,

$$m_a = \frac{V_T}{V_m} \quad (2.36)$$

şeklinde ifade edilir. Modulasyon dalgasının genliği değiştirilerek (0 ile V_T arasında) darbe genişlikleri 0 ile 180° arasında değiştirilebilir. Bir eviricin orta nokta N 'ye göre faz-nötr çıkış gerilimi,

$$V_{aN_{\max}} = m_a \frac{V_{dc}}{2} \quad (2.37)$$

olarak yazılabilir. V_{bN} ise a fazından 120° geride olan b fazının kondansatörün orta noktasına göre çıkış gerilimidir. Transformatörün yıldız bağlı ikincil tarafının nötr noktasının gerilimi V_n ,

$$V_n = \frac{V_{aN} + V_{bN} + V_{cN}}{3} \quad (2.38)$$

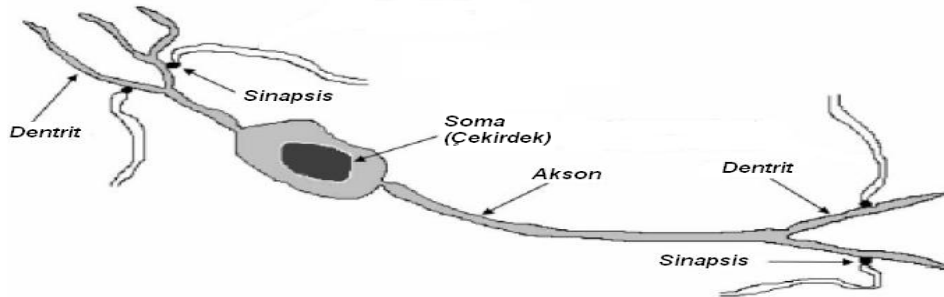
şeklinde ifade edilir.

3. YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA)

3.1 Giriş

Yapay Sinir Ağları; insan beyninin çalışma ilkesinin yapay olarak benzetimi olarak tanımlanır. En genel anlamda bir YSA; insan beynindeki birçok nöron gibi yapay olarak basit işlemcilerin birbirine değişik etki seviyeleri ile bağlanmasıyla oluşan karmaşık bir sistem olarak düşünülebilir. Önceleri temel tıp bilimlerinde, insan beynindeki nöronların matematiksel modelleme çabaları şeklinde başlayan çalışmalar, son yıllarda yoğunlaşmıştır. YSA günümüzde fizik, matematik, elektrik-elektronik ve bilgisayar mühendisliği gibi çok farklı bilim dallarında araştırma konusu haline gelmiştir. YSA'nın pratik kullanımı, genel olarak çok farklı yapıda ve formda bulunabilen enformasyon verilerini hızlı bir şekilde tanımlama ve algılama üzerinedir. Mühendislik uygulamalarında YSA'nın çok geniş çaplı kullanılmasının en önemli nedeni, klasik tekniklerle çözümü zor problemler için etkin bir alternatif oluşturmastır.(Cetin, 2006)

Bir insan beyni, yaklaşık olarak 10^{11} nörondan oluşmaktadır. Nöron temel sinir hücresi olup, biyolojik sinir sisteminin temel yapı taşıdır. Bir nörona ait şema şekil 3.1'de gösterilmiştir. Basitleştirilmiş bir hücre soma adı verilen içerisinde çekirdek bulunan hücre gövdesi, akson ve dentritler olmak üzere 3 kısımdan oluşur. Dentritler çekirdek etrafını saran bir ağaç biçiminde olup bilgiyi, iletim hattı işlevi gören aksonlar aracılığı ile nöronlardan alır. Bir aksonun uç kısmı dallanır ve bu dalların her biri komşu nöronların dentritleriyle hemen hemen temas halinde bir noktada son bulur. Bu akson- dentrit temas noktasına sinapsis denir. Sinapsiste temasın oluşması bir eşik değerinin aşılmasına bağlıdır. Akson tarafından bir elektriksel darbenin üretilmesi için 40 mV'luk eşik gerilimini aşacak bir gerilim oluşmalıdır. Sinapsislerin etkileşimleri sonucu somaya gelen verilerin ağırlıklı toplamı akson üzerinde çıktı oluşturacak eşik değere uygulanır ve veriler nöron tarafından değerlendirilerek çıktıya dönüştürülmüş olur. (Korn, 1991).



Şekil 3.1 Biyolojik nöron yapısı

İnsan vücudunda yer alan diğer tüm hücreler belli bir süre sonra ölürlere ve yerlerini yenisi alırken nöronlar ölmezler. Bu durum insan hafızasının kalıcı olduğunu da açıklamaktadır. Sinir hücreleri işlevlerine göre, çevreden gelen verilerin sinir sistemine girişini sağlayan duysal sinir hücresi, işaretleri kaslara ve diğer organlara ileten motor sinir hücresi ve sinir sisteminin çok büyük bir bölümünü oluşturan bilgilerin işlenmesi ve işaretlerin bir yerden başka bir yere taşınmasını sağlayan ara sinir hücresinden oluşmaktadır.(Schalkof, 1997)

Binlerce sinir hücreleri birlikte görev yaptıklarında ağ (network) ve bu sinir ağlarının toplamı (neural network) beyin olarak görülmektedir.(Trippi R. R. ve Turban E., 1996)

YSA, beyindeki sinirlerin varsayılan çalışma prensibini taklit ederek sistemlere öğrenme, genelleme yapma, hatırlama gibi yetenekler kazandırmayı amaçlayan bir bilgi işleme sistemidir. Genel anlamda YSA, beynin bir işlevi yerine getirme yöntemini modellemek için tasarlanan bir sistem olarak tanımlanabilir. YSA, işlem elemanlarının birbirleri ile çeşitli şekillerde bağlanması ile oluşur ve genellikle katmanlı şekillerde tasarlanır. Beynin bilgi işleme yöntemine uyun olarak YSA, bir öğrenme sürecinden sonra bilgiyi toplama, işlem elemanları arasındaki bağlantı ağırlıkları ile bu bilgiyi saklama ve genelleme yeteneğine sahip paralel tasarlanmış bir işlemcidir (Sezer, M., 2007).İnsan beyninin taklit edilmesi 1940'lı yıllardan beri literatüre girmiş fakat dikkat çeken çalışmalar 1980'li yıllarda başlamıştır. Yapay sinir ağları ile tanımı Teuvo KOHONEN şöyle tanımlamıştır;"Yapay sinir ağları paralel olarak bağlantılı ve çok sayıdaki basit elemanın, gerçek dünyanın nesneleriyle biyolojik sinir sisteminin benzeri yolla etkileşim kuran, hiyerarşik bir organizasyondur". (Kohonen, 1988)

3.2 Yapay Sinir Hücresinin yapısı

3.2.1 Yapay Sinir Ağı Modeli

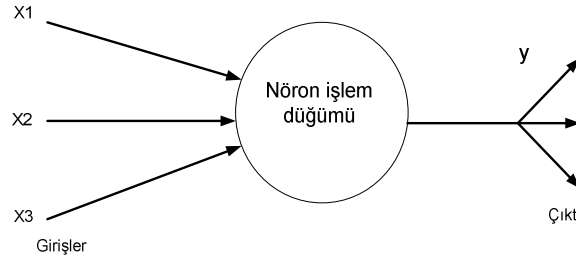
Yapay sinir ağı ile aslında biyolojik sinir ağının bir modeli oluşturulmak istenmektedir. Bu amaçla bilgisayar donanım ve yazılımları kullanılarak paralel işlem yapan YSA geliştirilmiştir.

3.2.2 Yapay Sinir Ağı Bileşenleri

Yapay sinir ağı; nöron, bağlantılar ve ağırlıklar olmak üzere 3 kısımdan oluşur.

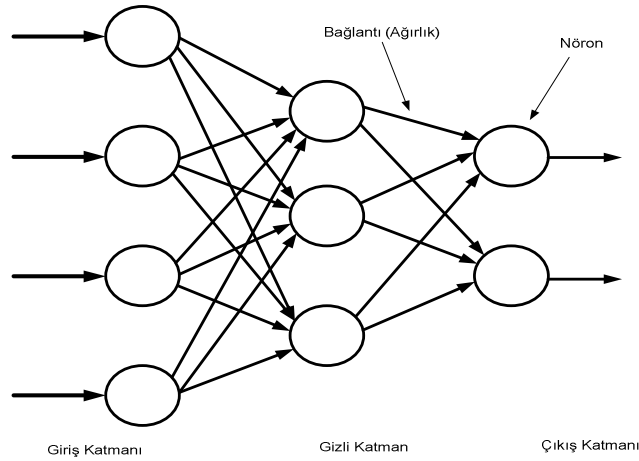
Nöron: Biyolojik sinir ağlarında olduğu gibi yapay sinir ağlarında da temel etmen yapay nöron'dur (artificial neuron). Yapay nöron, bir ağın temel işlem elemanıdır. Ağ içinde yer alan tüm nöronlar bir veya birden fazla girdi alırlar ve tek bir çıktı verirler. Bu çıktı yapay sinir

ağının dışına verilen çıktılar olabileceği gibi başka nöronlara girdi olarak da kullanılabilirler (Şekil3.2).



Şekil 3.2 Yapay nöron

Bağlantılar: Yapay nöronların birbirine bağlanmasını sağlar ve yapay sinir ağını oluşturur.



Şekil 3.3 Yapay sinir ağı modeli

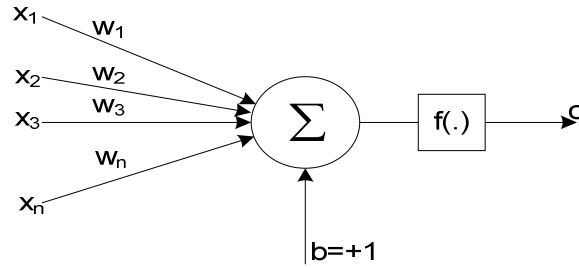
Nöronların aynı doğrultu üzerinde bir araya gelmeleriyle katmanlar oluşmaktadır. İlk katman girdi katmanı (input layer) olarak adlandırılır ve dışarıdan verilerin yapay sinir ağına alınmasını sağlar. Diğer katman ise çıktı katmanıdır (output layer). Bu katman da bilgilerin dışarıya iletildiği katmandır. Girdi ile çıktı katmanları arasında katman varsa bu katmanlara gizli katman (hidden layer) adı verilir. Bir yapay sinir ağında gizli katman olması gerekmediği gibi, birden fazla gizli katman da bulunabilir. (Vemuri, 1992) Literatürde hemen hemen tüm çalışmalarda girdi katmanı, girdilerin ağına girmesinde bir kapı işlevi görmesi nedeniyle, katman olarak sayılmamaktadır. Bundan dolayı girdi katmanı ile birlikte 3 katmandan oluşan ağ iki katmanlı ağ olarak kabul edilir.

Ağırlıklar: Bir yapay sinir ağındaki en önemli unsurlardan biri de bağlantılardır. Nöronların bir birilerine veri aktarımını sağlayan bağlantılar aynı zamanda bir ağırlık (weight) değerine sahiptirler. Ağırlıklar bir nöronda girdi olarak kullanılacak değerlerin göreceli kuvvetini

(matematiksel katsayısını) gösterir. Yapay sinir ağı içinde girdilerin nöronlar arasında iletimini sağlayan tüm bağlantıların farklı ağırlık değerleri bulunmaktadır. Böylelikle ağırlıklar her işlem elemanının her girdisi üzerinde etki yapmaktadır. (Trippi R. R. and Turban E., 1996)

3.3 Yapay Sinir Ağı'nın Çalışması

Bir yapay sinir hücresi biyolojik sinirlerde olduğu gibi, girişine gelen bilgileri değerlendirerek çıkışına verir. Bir yapay sinir hücresi, dış ortamdan veya diğer sinir hücrelerinden gelen bilgileri giriş olarak alır. Sinir hücresine gelen bilgiler bağlantı ağırlıkları ile ağırlıklandırılır ve her bir girişin hücre üzerindeki etkisi belirlenmiş olur. Ağırlıklandırma işlemi, giriş bilgi değerleriyle bağlantı ağırlık değerlerinin çarpımı şeklinde elde edilir. Sinir hücresinin bilgiyi işleme ve yerine getirmesi biri toplam fonksiyonu diğeri geçiş fonksiyonu olmak üzere iki fonksiyon tarafından gerçekleştirilir. Hücreye gelen bu ağırlıklandırılmış bilgiler hücre içerisinde toplanarak birleştirilir ve hücreye gelen net bilgi elde edilir. Hücre içerisinde birleştirilen bu bilgiler daha sonra biyolojik sinirlerde olduğu gibi bir $f(.)$ fonksiyonu ile işlenir ve sonuçta yapay bir sinir hücresinin çıkışı elde edilir. Ayrıca, yapay sinir hücrelerine, net girdiyi artıran sabit +1 değerli bias girişi de uygulanabilir. Şekil 3.4' teki gibi elde edilen bir yapay sinir hücresinin matematiksel modeli aşağıdaki şekilde çıkarılabilir.



Şekil 3.4 Toplam ve Aktivasyon fonksiyonlu bir yapay sinir ağı hücresi

YSA'nın çıkışı Denk.(3.1)'deki gibi hesaplanır.

$$o = f(w.x + b) \quad (3.1)$$

Burada, girişler x , ağırlıklar w matrisiyle toplu olarak gösterilir. n giriş sayısı olmak üzere;

$$x = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \quad (3.2)$$

$$w = w_1, w_2, w_3, \dots, w_n \quad (3.3)$$

şeklinde yazılabilir. Bu değerler normalize edilirse;

$$net = \sum_{i=1}^n w_i x_i + b \quad \text{ve} \quad o = f(net) \quad (3.4)$$

$$o = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b\right) \quad (3.5)$$

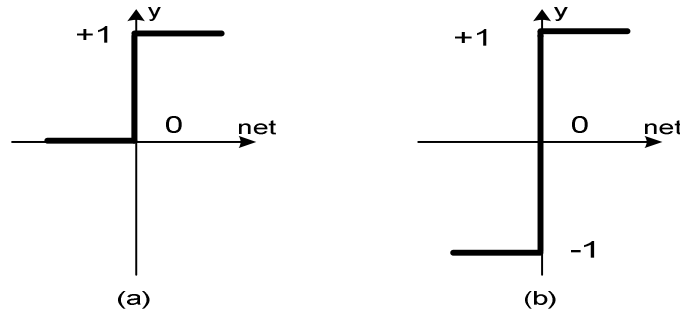
şeklinde yazılabilir. Yukarıdaki formülde görülen $f(\cdot)$ fonksiyonu, net girişlerin değerlendirildiği bir aktivasyon fonksiyonudur. Genelde doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonunun çeşitli tipleri vardır.

3.3.1 Aktivasyon Fonksiyonları

YSA da kullanılan aktivasyon fonksiyonları; eşik, doğrusal, logaritma sigmoid ve tanjant sigmoid fonksiyonları şeklinde olabilirler.

3.3.1.1 Eşik Aktivasyon Fonksiyonu

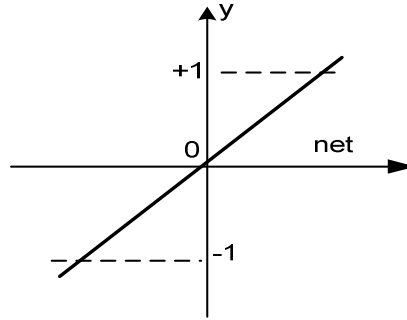
Eşik aktivasyon fonksiyonu, eğer net değeri sıfırdan küçükse sıfır, sıfırdan daha büyük bir değer ise net çıkışında +1 değeri verir. Eşik aktivasyon fonksiyonunun -1 ile +1 arasında değişeni ise signum aktivasyon fonksiyonu olarak adlandırılır. Signum aktivasyon fonksiyonu, net giriş değeri sıfırdan büyükse +1, sıfırdan küçükse -1, sıfıra eşitse sıfır değerini verir. Şekil 3.5 de eşik aktivasyon fonksiyonunu ve signum aktivasyon fonksiyonu grafiği görülmektedir.



Şekil 3.5 a) Eşik aktivasyon fonksiyonunu b) Signum aktivasyon fonksiyonu

3.3.1.2 Doğrusal Aktivasyon Fonksiyonu

Şekil 3.6’da ise doğrusal aktivasyon fonksiyonu görülmektedir. Doğrusal aktivasyon fonksiyonunun çıkışı girişine eşittir. Sürekli çıkışlar gerektiği zaman çıkış katmanındaki aktivasyon fonksiyonunun doğrusal aktivasyon fonksiyonu olabildiğine dikkat edilmelidir.



Şekil 3.6 Doğrusal aktivasyon fonksiyonunu

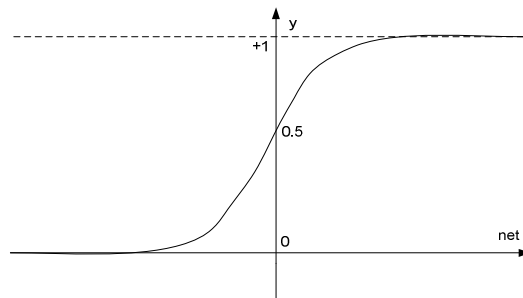
Doğrusal aktivasyon fonksiyonu;

$$f(x) = x \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilir.

3.3.1.3 Logaritma Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu

Logaritma sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu, türevi alınabilir, sürekli ve doğrusal olmayan bir fonksiyon olması nedeniyle uygulamada en çok kullanılan aktivasyon fonksiyonudur. Bu fonksiyon, girdinin her değeri için 0 ile 1 arasında bir değer üretir.



Şekil 3.7 Logaritma Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu

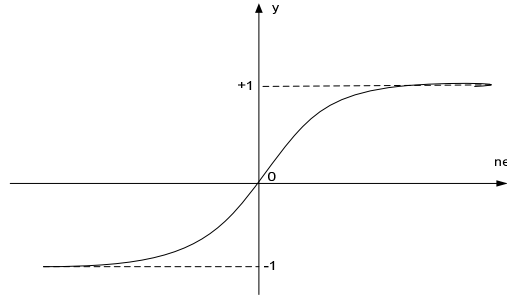
Logaritma sigmoid fonksiyonu matematiksel olarak;

$$y = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (3.7)$$

şeklinde gösterilir.

3.3.1.4 Tanjant Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu

Tanjant sigmoid fonksiyonu, logaritma sigmoid fonksiyonunun biraz farklı şeklidir. Giriş uzayının genişletilmesinde etkili bir aktivasyon fonksiyonudur. Logaritma Sigmoid fonksiyonun çıktı aralığı 0 ve 1 olurken, tanjant Sigmoid fonksiyonunun çıktısı -1 ve 1 aralığında oluşmaktadır.



Şekil 3.8 Tanjant Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu

Tanjant sigmoid fonksiyonu matematiksel olarak;

$$y = \frac{1 - e^{-2x}}{1 + e^{2x}} \quad (3.8)$$

şeklinde gösterilir.

Bu aktivasyon fonksiyonlarından başka fonksiyonlar da vardır. Yapay sinir ağına hangi aktivasyon fonksiyonunun kullanılacağı probleme bağlı olarak değişmektedir. Yukarıda verilen fonksiyonlar en genel aktivasyon fonksiyonlarıdır.

3.4 Yapay Sinir Ağları Yapıları

Yapay sinir ağı modelleri genel olarak iki grupta toplanmaktadır. İleri beslemeli yapay sinir ağları ve geri beslemeli yapay sinir ağları. İleri beslemeli yapay sinir ağlarında gecikmeler

yoktur, işlem girişlerden çıkışlara doğru ilerler. Çıkış değerleri öğreticiden alınan istenen çıkış değeriyle karşılaştırılarak bir hata işareti elde edilerek ağ ağırlıkları güncellenir. Geri beslemeli yapay sinir ağlarında ise gecikmeler söz konusudur. Geri beslemeli Yapay Sinir ağı, çıkışlar girişlere bağlanarak ileri beslemeli bir ağdan elde edilir.

3.4.1 İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağı

İleri beslemeli YSA'da, hücreler katmanlar halinde sıralanır ve bir katmandaki hücrelerin çıkışları bir sonraki katmana giriş olarak verilir. Giriş katmanı, dış ortamdan aldığı bilgileri herhangi bir değişikliğe uğratmadan orta katmandaki hücrelere aktarır. Bilgi, orta ve çıkış katmanında işlenerek ağ çıkışı belirlenir.

3.4.2 Geri Beslemeli Yapay Sinir Ağı

Geri beslemeli YSA'da, en az bir hücrenin çıkışı kendisine ya da diğer hücrelere giriş olarak verilir ve genellikle geri besleme bir gecikme elemanı üzerinden yapılır. Geri besleme, bir katmandaki hücreler arasında olduğu gibi katmanlar arasındaki hücreler arasında da olabilir. Bu yapısı ile geri beslemeli YSA, doğrusal olmayan dinamik bir davranış gösterir.

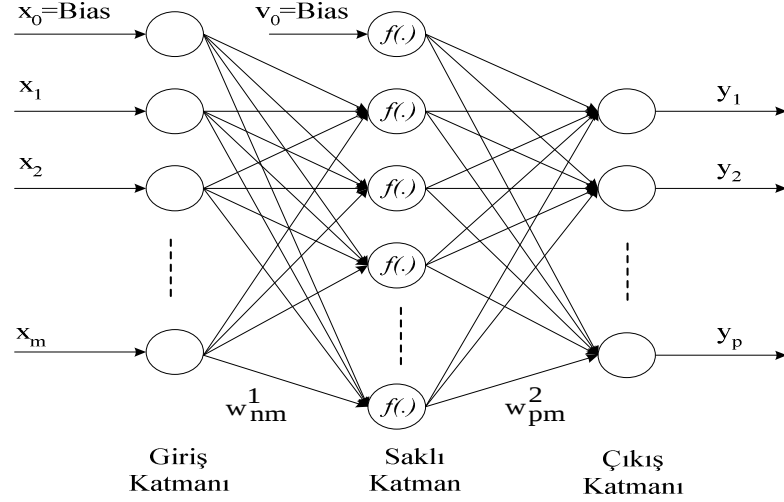
3.4.3 Çok katmanlı YSA yapıları

YSA, yapay sinir hücrelerinin çeşitli şekillerde birbirleriyle bağlanmasından elde edilir. YSA'nın elde edilmesinde, farklı sayıda hücreden oluşan katmanlar ve bu katmanların birbirleriyle bağlantısı şeklinde oluşturulur. Farklı uygulama alanlarında çok değişik YSA yapıları kullanılmasına karşın, denetim alanında daha çok, ileri beslemeli çok katmanlı YSA ve geri beslemeli çok katmanlı YSA yapıları kullanılmaktadır.

3.4.3.1 Çok katmanlı ileri beslemeli YSA

Çok katmanlı ileri beslemeli YSA yapılarında, hücreler katmanlar halinde düzenlenir ve bir katmandaki hücrelerin çıkışları bir sonraki katmana giriş olarak uygulanır. Şekil 3.9' da 3 katmanlı ileri beslemeli bir YSA yapısı görülmektedir. Burada giriş katmanı, dış ortamdan alınan giriş verilerini bünyesinde bulundurduğu hücrelerle değerlendirerek çıkışlarına verir. Giriş katmanlarından elde edilen bu çıkış değerleri orta katmandaki hücrelere giriş işareti olarak sunulur. Orta katmandaki hücreler de giriş katmanından gelen verileri değerlendirerek kendi

çıkışlarına, yani çıkış katmanına giriş işareti olarak uygular. Son olarak da çıkış katmanı, orta katmandan gelen verileri değerlendirerek kendi çıkışlarına iletir. Çıkış katmanından elde edilen bu veriler artık ağ çıkışlarıdır.



Şekil 3.9. İleri beslemeli üç katmanlı YSA yapısı

Şekil 3.9’ da verilen 3 katmanlı ileri beslemeli ağın matematiksel modeli aşağıdaki şekilde oluşturulur.

$$\text{net}_i = \sum_{j=0}^m w_{ji}^1 x_j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.9)$$

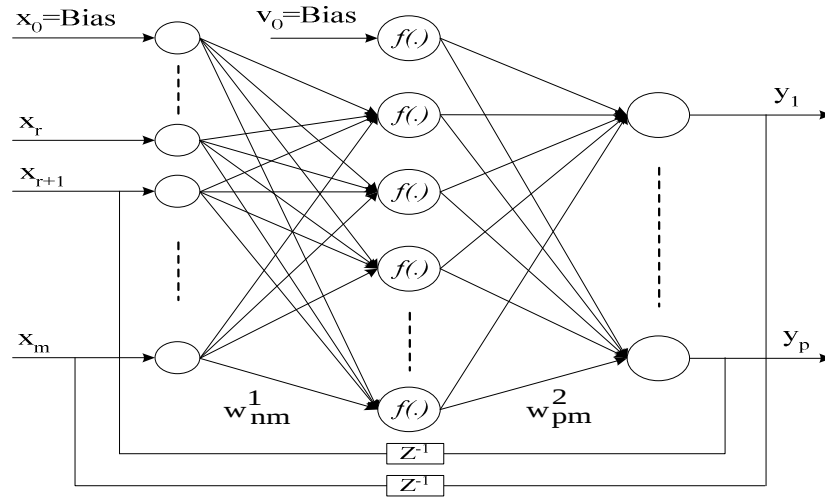
$$v_j = f(\text{net}_j) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.10)$$

$$y_\ell = \sum_{j=0}^n w_{\ell j}^2 v_j \quad \ell = 1, 2, \dots, p \quad (3.11)$$

Bu ağ yapısında, giriş katmanındaki hücre sayısı x giriş vektörüne, çıkış katmanındaki hücre sayısı ise y çıkış vektörüne göre seçilir. İleri beslemeli ağlarda kullanılan orta katman sayısı ve bu katmanlardaki hücre sayısının belirlenmesinde kesin bir yöntem yoktur. Katman sayısı ve her bir katmandaki hücre sayısı deneyimle bulunur.

3.4.3.2 Çok katmanlı geri beslemeli YSA

Geri beslemeli YSA yapıları, en az bir hücrenin çıkışının kendisine yada diğer hücelere giriş olarak uygulandığı çok katmanlı ağlardır. Geri besleme hücreler arasında olabileceği gibi, katmanlar arasındaki hücreler arasında da olabilir. Bu yapısı ile geri beslemeli YSA, doğrusal olmayan dinamik bir davranış gösterir. Şekil 3.10’ da, 3 katmanlı ve çıkış katmanından giriş katmanına geri besleme yapılan bir YSA yapısı verilmiştir. Bu yapıda, YSA’ ya giriş vektörü olarak r adet dış giriş ve p adet gecikmiş ağ çıkışı uygulanmıştır. Giriş katmanında toplam $m=r+p$ adet hücre vardır.



Şekil 3.10. Geri beslemeli üç katmanlı YSA yapısı

$$\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_r, y_1(-1), y_2(-1), \dots, y_p(-1)) \quad (3.12)$$

$\mathbf{x}$ giriş vektörü, $\mathbf{v}$ orta katman çıkış vektörü ve $\mathbf{y}$ çıkış vektörü olmak üzere, geri beslemeli bu ağın matematiksel modeli aşağıdaki gibi oluşturulabilir.

$$\text{net}_i = \sum_{j=0}^m w_{ji}^1 x_j \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.13)$$

$$v_j = f(\text{net}_j) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.14)$$

$$y_l = \sum_{j=0}^n w_{lj}^2 v_j \quad l = 1, 2, \dots, p \quad (3.15)$$

3.5 Yapay sinir ağlarında öğrenme

Yapay sinir ağları, programlama yerine sayısal örneklerle eğitilirler. Eğitici, sinir ağlarına tanınacak cisimlerin nicel tanımlarını veya söz konusu cisimleri benzer cisimlerden ayırmak için mantık kriter kümeleri sağlamak zorunda değildir. Bunun yerine sinir ağlarına bazen tanımları ile beraber veri örnekleri girilir. Ağ, ağırlık matrisindeki değerleri değiştirerek bunları öğrenir ve bir cisim yeniden görüldüğünde uygun cevabı üretir (Gökbulut, 1998).

YSA' da ağırlıklar sabit değildir. YSA' nın öğrenme kuralı, ağ çıktılarının değerlerine cevap olarak üretilen, hücreler arasındaki ağırlıkların hepsini veya bazılarını değiştiren bir denklemden ibarettir.

$$w(t+1) = w(t) \mp \beta \Delta w(t) \quad (3.16)$$

Burada $\Delta w(t)$, t anında belirli bir kurala göre hesaplanarak, o andaki ağırlıklara uygulanacak düzeltme miktarıdır. YSA' nın eğitiminde kullanılan öğrenme algoritmaları, $\Delta w(t)$ düzeltme miktarını bulmak için tanımlanmış kurallardır.

YSA, denetimli ve denetimsiz olmak üzere iki şekilde eğitilir. Her ikisinde de, ağ bir seri deneme üzerinden çalışır. Denetimli öğrenmede, ağa hem giriş hem de istenen çıkış bilgisi girilir. Her denemeden sonra, ağ kendi çıkışını doğru cevaplar ile karşılaştırır ve çıkış hatası kabul edilebilecek seviyeye ininceye kadar ağırlıklarını yeniler. Denetimsiz öğrenmede ise hiçbir hedef vektörü yoktur. Giriş vektörü sisteme uygulanır ve sistem bu giriş vektörü sisteme uygulandığında uyumlu bir çıkış üretecek şekilde kendisini organize eder.

Bazı uzmanlar, denetimli öğrenmenin biyolojik olarak geçerli olmayacağını iddia etmişlerdir. Çünkü bir biyolojik sistem içinde doğrudan eğitim için veya cevapları istenen çıkış ile karşılaştırmak için bir eğitici yoktur. Bu eleştirilere rağmen denetimli öğrenme özellikle denetim alanında birçok probleme uygulanabilmekte ve tatmin edici sonuçlar elde edilmektedir.

3.5.1 Geriye yayılım öğrenme algoritması

Geriye yayılım öğrenme algoritması, çok katmanlı ağ yapılarına uygulanabilirliğinden dolayı denetim alanında en fazla tercih edilen öğrenme algoritmasıdır. Denetimli öğrenme sınıfında olan geriye yayılım algoritması, eğim-iniş esasına dayanır ve seçilen bir amaç ölçütünün bir katmandaki ağırlığa göre eğiminin doğru bir şekilde elde edilmesini amaçlar. Aşağıda Şekil 3.9' da verilen 3 katmanlı ileri beslemeli ağ yapısı için, giriş katmanında m adet, çıkış katmanında ise 1 adet hücre bulunması durumunda geriye yayılım algoritması çıkarılmıştır. Algoritmada t ayrık zaman değişkeni olmak üzere, $\mathbf{x}(t)$ -ağ giriş vektörü, $\mathbf{v}(t)$ -orta

katman çıkış vektörü, $\mathbf{d}(t)$ -istenilen çıkış vektörü, $\mathbf{y}(t)$ -gerçek ağ çıkış vektörü, $\mathbf{e}(t)$ - vektörü ve $\mathbf{w}$ -ağırlık matrisidir. Hata ve arzu edilen çıkış vektörüne göre karesel hata ($E(t)$) ve amaç ölçütü J aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{d}(t) - \mathbf{y}(t) \quad E(t) = \frac{1}{2} \mathbf{e}^2(t) \quad (3.17)$$

$$J = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N E(t) \quad (3.18)$$

Denklem (3.17) ve (3.18)' in ağırlıklara göre eğimi bulunarak geriye yayılım algoritması gerçekleştirilebilir. Eğer hataların karelerinin eğimine göre, her bir eğitim verisi için ağırlıklar yenilenirse örneksel öğrenme kuralı elde edilir. Diğer taraftan, amaç ölçütünün eğimine göre, N adet eğitim verisi için ağırlıklar yenilenirse toplu öğrenme kuralı olarak adlandırılır. Buna göre, hataların karelerinin doğrusal çıkış katmanındaki bir ağırlığa göre eğimi aşağıdaki gibi zincir kuralına göre kısmi türevleri alınarak belirlenebilir.

$$\frac{\partial E(t)}{\partial w_j^2(t)} = \frac{\partial E(t)}{\partial e(t)} \frac{\partial e(t)}{\partial y(t)} \frac{\partial y(t)}{\partial w_j^2(t)} \quad (3.19)$$

δ^2 , 2. katmandaki hücrenin yöresel hata olmak üzere, Denklem (3.14), (3.15) ve (3.17)' den

$$\delta^2(t) = \frac{\partial E(t)}{\partial e(t)} \frac{\partial e(t)}{\partial y(t)} = -e(t) \quad \frac{\partial y(t)}{\partial w_j^2(t)} = v_j(t) \quad (3.20)$$

olarak bulunur. Buna göre α öğrenme oranı ve β momentum katsayısı olmak üzere ($0 < \beta < 1$), çıkış katmanındaki ağırlıklara uygulanacak düzeltme ve yeni ağırlıklar aşağıdaki gibi bulunur.

$$\Delta w_j^2(t) = \alpha \delta^2(t) v_j(t) + \beta \Delta w_j^2(t-1) \quad (3.21)$$

$$w_j^2(t+1) = w_j^2(t) + \Delta w_j^2(t) \quad (3.22)$$

Saklı katman ağırlıkları ise benzer şekilde, hataların karelerinin orta katmandaki bir ağırlığa göre kısmi türev zincirinden,

$$\frac{\partial E(t)}{\partial w_{ji}^1(t)} = \frac{\partial E(t)}{\partial e(t)} \frac{\partial e(t)}{\partial y(t)} \frac{\partial y(t)}{\partial v_j(t)} \frac{\partial v_j(t)}{\partial \text{net}_j(t)} \frac{\partial \text{net}_j(t)}{\partial w_{ji}^1(t)} \quad (3.23)$$

1. katmandaki j. hücrenin yöresel gradyanı δ_j^1 olarak alınırsa,

$$\delta_j^1(t) = \frac{\partial E(t)}{\partial e(t)} \frac{\partial e(t)}{\partial y(t)} \frac{\partial y(t)}{\partial v_j(t)} \frac{\partial v_j(t)}{\partial net_j(t)} = -e(t)w_j^2 f'(net(t)) \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial net_j(t)}{\partial w_{ji}^1(t)} = x_i(t) \quad (3.25)$$

Buna göre orta katmandaki ağırlıklara uygulanacak düzeltme ve yeni ağırlıklar aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\Delta w_{ji}^1(t) = \alpha \delta_j^1(t) x_i(t) + \beta \Delta w_{ji}^1(t-1) \quad (3.26)$$

$$w_{ji}^1(t+1) = w_{ji}^1(t) - \Delta w_{ji}^1(t) \quad (3.27)$$

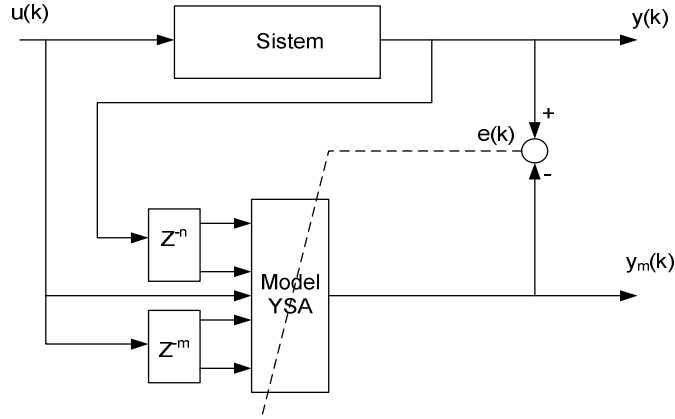
Yukarıda 3 katmanlı, giriş katmanı m hücreden, çıkış katmanı doğrusal aktivasyon fonksiyonlu tek bir hücreden oluşan ileri beslemeli bir ağ için; hataların karelerinin ağırlıklara göre eğimi belirlenerek örneksel öğrenme ile geriye yayılım algoritması çıkarılmıştır. Bu algoritma, orta katman sayısı ve çıkış katman hücre sayısı farklı olan diğer ağ yapılarına kolaylıkla uyarlanabilir.

3.6 YSA ile Sistem Tanılama

YSA'nın sistem giriş çıkış verilerini kullanarak eğitilmesi, doğrusal olmayan bir fonksiyon yaklaştırma problemi olarak incelenir. Doğrusal olmayan sürekli fonksiyonları yeterli doğrulukta yaklaştırabilme yeteneği, YSA'nın doğrusal olmayan sistemlerin tanınması ve denetimi alanında kullanılmasını sağlayan en önemli özelliktir. Genel olarak YSA'nın sistem modellemede kullanılan modeller aşağıdaki gibidir.

3.6.1 Düz modelleme

Bir sistemin düz yön dinamikleri gösterecek şekilde, YSA tanı modelinin seçilmesi ve eğitilmesi düz modelleme olarak tanımlanır. Bir sistemin düz yön dinamikleri matematiksel olarak, $y(k) = f(y(k-i), u(k-j))$ ile ifade edilebilir. Şekil 3.11'de düz modelleme blok şeması görülmektedir.

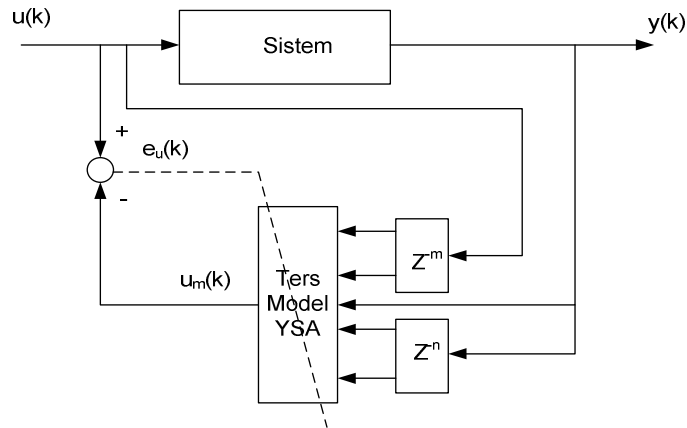


Şekil 3.11 Düz modelleme

Düz modellemede YSA, sistem çıkışı ile model çıkışı arasındaki hata kullanılarak geriye yayılım algoritması ile eğitilir.

3.6.2 Ters Modelleme

YSA'nın kullandığı denetim sistemlerinde, genellikle sistemin ters modeli denetleyici olarak kullanılır ve sistemin ters yön dinamiklerini, $u_m(k) = f(y(k-i), u(k-j))$, verecek şekilde YSA modelin seçilmesi ve eğitilmesi ters modelleme olarak tanımlanır. Şekil 3.12'de ters modelleme blok şeması görülmektedir.

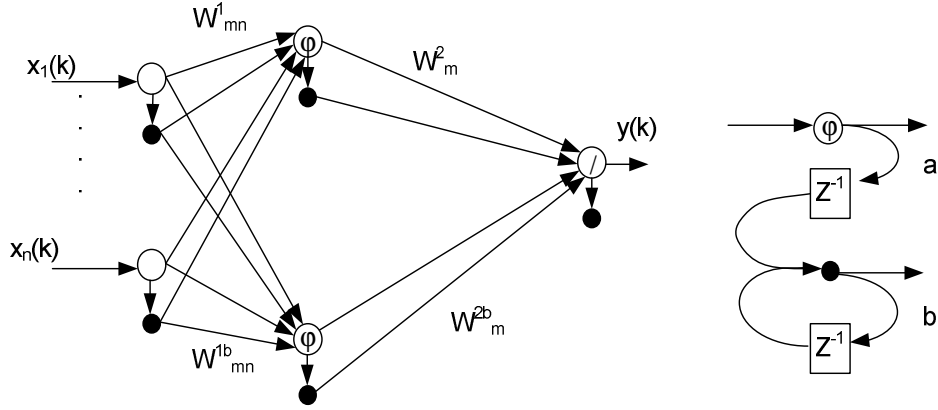


Şekil 3.12 Ters modelleme

Ters modellemede sistemin o anki ve önceki çıkışları ile sistem girişinin önceki örnekleri, ters YSA modelinin girişleri olarak alınır. Ters YSA modelinin eğitimi için arzu edilen çıkış, sistem girişidir ve YSA, sistem girişi ile model çıkışı arasındaki hata sinyalinden yararlanılarak eğitilir.

3.6.3 Bellek Hücreli Yapay Sinir Ağları ile Modelleme

Bellek Hücreli Yapay Sinir Ağı (BHYSA) yapısı şekil 3.13'te gösterilmiştir.

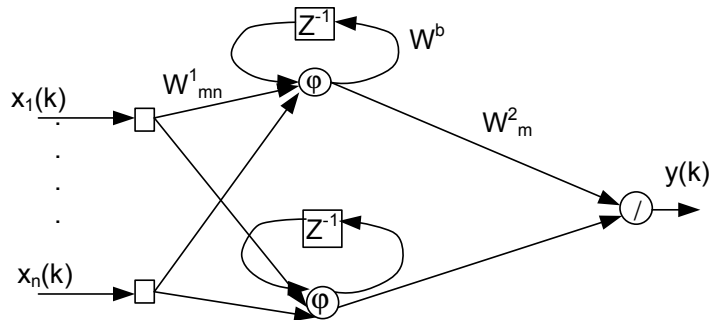


Şekil 3.13 Bellek hücreli yapay sinir ağı ve bellekli bir hücrenin yapısı

BHYSA'da her bir ağı hücrelerine ait olan bellek hücresi, bir ağırlık (b) üzerinden öz geri besleme girişine ve başka bir ağırlık üzerinden (a) ait olduğu hücrenin gecikmiş girişine göre bir çıkış üretir.

3.6.4 Yöresel Geri Küresel İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağı ile Modelleme

Derecesi bilinmeyen sistemleri tanılamada kullanılan diğer bir YSA yapısı, gizli katman hücrelerinde öz geri beslemenin kullanıldığı ve yöresel geri küresel ileri beslemeli (YGKİ), YSA yapısıdır. Şekil 3.14'te yöresel geri küresel ileri beslemeli (YGKİ), YSA yapısı görülmektedir.



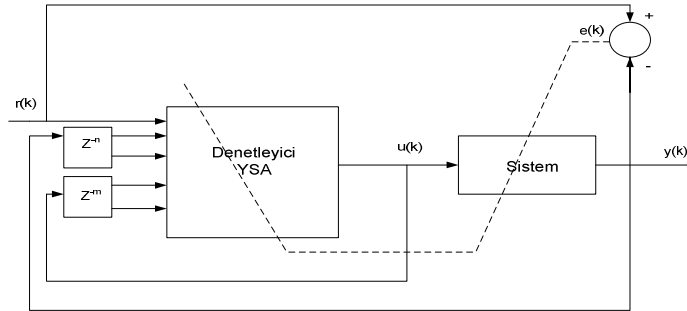
Şekil 3.14 YGKİ Yapay sinir ağı yapısı

3.7 YSA ile Sistem Denetimi

Denetimin temel ilkesi denetlenen sistemin istenilen sınırlar içerisinde sistemin tasarımını ve çalışmasını sağlamaktır. Denetlenen sistemin matematik modelinin bilinmesi, istenilen denetleyicinin tasarlanmasını sağlayacaktır. YSA ile sistem denetiminde, modellenen çıkışları gerçek çıkışlara benzer yapmak için YSA'nın parametreleri olan eşik ve ağırlıklar ayarlanır. Denetlenecek sistemler doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Her iki modelinde denetimi aynı mantıktadır, çünkü doğrusal olmayan modeller doğrusallaştırılarak denetlenir. Çalışmalarda doğrusal olmayan sistemlerin denetimine YSA kullanımı artmıştır. YSA ile sistem denetiminde, doğrusal sistemlerin denetiminde kullanılan uyarlamalı denetim yapıları esas alınmış ve doğrusal olmayan sistemler için YSA'nın denetim yeterliliği incelenmiştir (K.S.Narendra ve S.Mukhopadhyay,1997). Genel olarak YSA denetim yapıları aşağıdaki gibidir.

3.7.1 Doğrudan Uyarlamalı Denetim

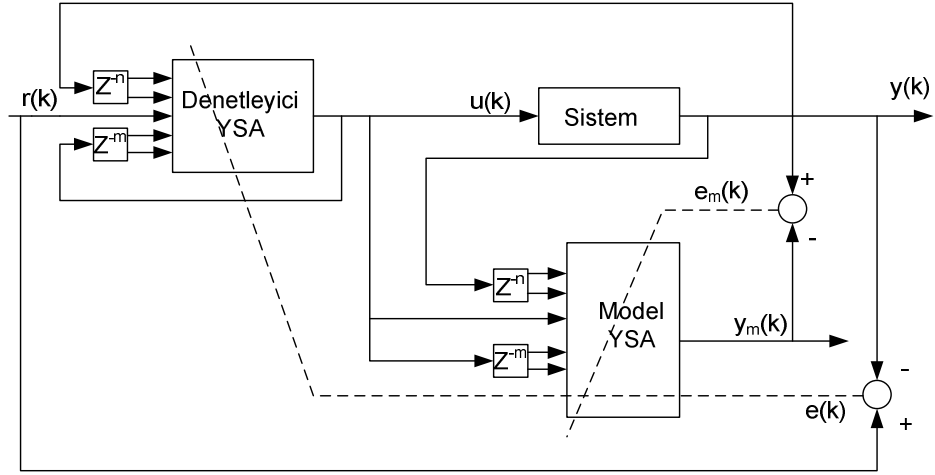
Burada sistemin ters denetleyici olarak kullanılır. Dolayısıyla doğru bir ters modelin oluşturulması gerekir. Denetleyici YSA referans giriş ile sistem çıkışı arasındaki hataya göre eğitilir.



Şekil 3.15 Doğrudan uyarlamalı denetim

3.7.2 Dolaylı Uyarlamalı Denetim

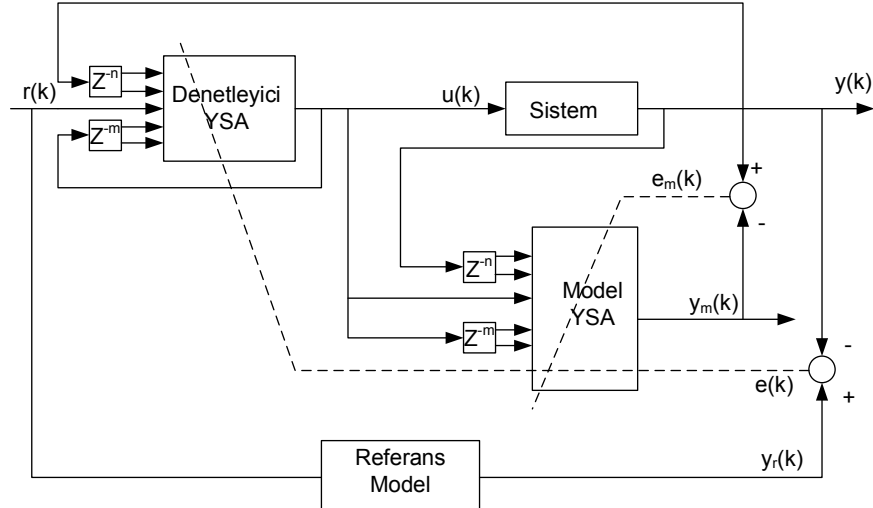
Doğrudan denetim yapısında, sistem çıkış hatası doğrusal olmayan sistem üzerinden yayılarak denetleyici YSA'nın eğitilmesi gerekir. Yaklaşık yöntemlerle sistem çıkış hatası geriye yayılmakla birlikte sistemin doğru bir ters modeli elde edilmeyebilir. Bu nedenle, sistem yerine sistemin düz modeli kullanılarak sistem çıkış hatası, düz model üzerinden geriye yayılır ve denetleyici YSA eğitilir. Şekil 3.16 da Dolaylı Uyarlamalı Denetim blok şeması görülmektedir.



Şekil 3.16 Dolaylı uyarlamalı denetim

3.7.3 Model Referans Uyarlamalı Denetim

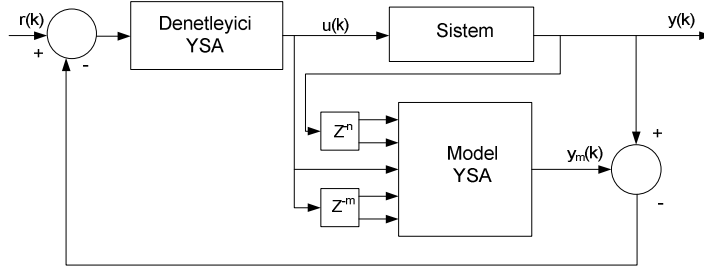
Model referans uyarlamalı denetimde, kapalı çevrim denetim sisteminin arzu edilen davranışı, sistemin dinamiklerine uygun ve kararlı bir referans model ile tanımlanır. Referans model girişi $r(k)$ ve çıkışı $y_r(k)$ ile gösterilirse denetim sisteminin amacı, sistem çıkışının, referans model çıkışını doğru olarak izlemesini sağlayacak şekilde denetim girişini belirlemektir. Şekil 3.17 de Model Referans Uyarlamalı Denetim blok şeması görülmektedir.



Şekil 3.17 Model referans uyarlamalı denetim

3.7.4 Dahili Model (DM) Denetim

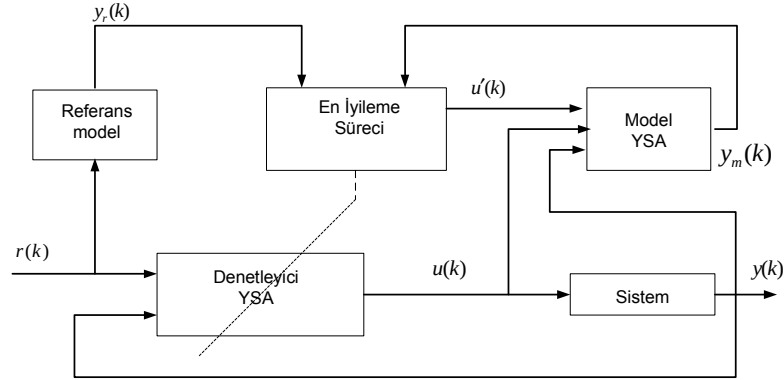
Doğrusal olmayan sistemlerin denetiminde etkin bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu denetimde sistem çıkışı ile düz YSA model çıkışı arasındaki hata geri beslemeyi oluşturur.



Şekil 3.18 Dahili model denetim

3.7.5 Tahmini Denetim

Bu denetimin esası, sistem çıkışının ve denetim girişinin d adım sonraki değerini tahmin ederek en iyi denetim girişinin belirlenmesidir. Denetimde, sistemin düz ve ters modelleri kullanılır. İlk denetim işareti sisteme de uygulanır.



Şekil 3.19 Tahmini denetim

Tahmini denetimde aşağıdaki ölçüt kullanılır;

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} Q[y_r(k+j) - y_m(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} R[u'(k+j-1) - u'(k+j-2)]^2 \quad (3.28)$$

Burada N_1 ve N_2 eğitimin oluşturduğu sistem çıkışının gelecekteki zaman dilimi, N_u ise denetim girişinin gelecekteki zaman dilimini gösterir. Q ve R , ağırlık katsayılarıdır.

Tahmini denetimin en önemli üstünlüğü denetleyici YSA'nın eğitimden sonra sistemin modeli ve en iyileme sürecine ihtiyaç duymamasıdır.

3.7.6 Öz Uyarlamalı Denetim

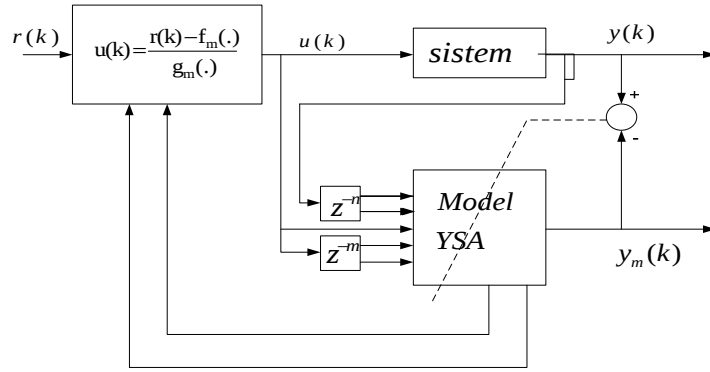
Doğrusal olmayan ve geri besleme ile doğrusallaştırılabilen bir denetimdir. Bu denetim sisteminde d sistem bağıl derecesini göstermek üzere;

$$y(k+1) = f(y(k-i)u(k-i+j)) + g(y(k-i)u(k-i+j)).u(k-i+j+1) \quad (3.29)$$

Burada $i = 0.1$, $n-1$ ve $j = 0.1$, $m-1$ sistem giriş ve çıkışındaki gecikmeleri gösterir. Bağıl derecesi $d = 1$ olan bir sistem için denetim girişi;

$$u(k) = \frac{r(k) - f_m(.)}{g_m(.)} \quad (3.30)$$

Burada r ; referans giriş, $f_m(.), g_m(.)$ ise sistemin $f(.)$ ve $g(.)$ fonksiyonlarının tanımlanan yaklaşığıdır.



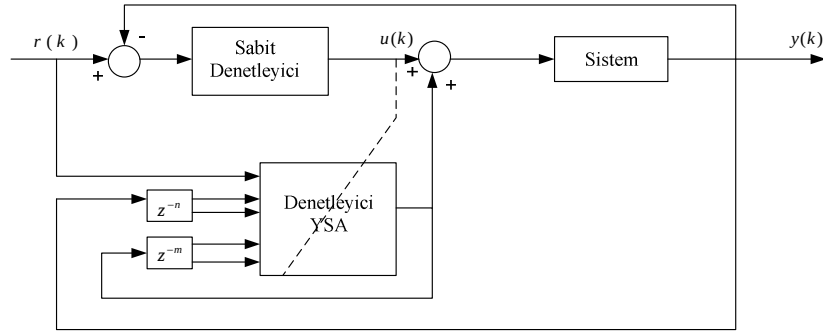
Şekil 3.20 Öz uyarlamalı denetim

$d > 1$ ise denetim girişi denklem 3.31'deki gibidir.

$$u(k) = \frac{r(k) - F_m(.)}{G_m(.)} \quad (3.31)$$

3.7.7 Sabit Denetleyicili Denetim

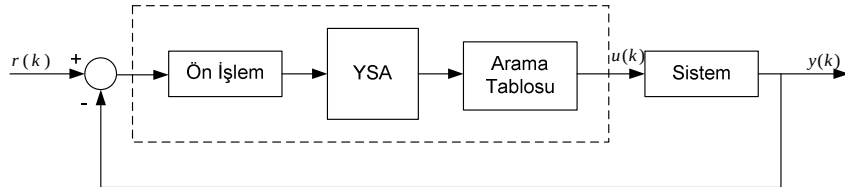
En basit doğrudan denetim yapısıdır. Sitemin ters modelini verecek şekilde eğitilir. Şekil 3.15'te gösterilen denetleyici kapalı çevrim sisteminin kararlılığını sağlayacak şekilde tasarlanır ve çıkışı, denetleyici YSA için eğitim işareti oluşturur.



Şekil 3.21 Sabit denetleyicili denetim

3.7.8 Sınıflandırıcı YSA ile Denetim

Sınıflandırıcı YSA'da ön işlem bloğunda hata işareti küçük bölümlere ayrılarak gruplandırılır. Bu gruplar sınıflandırıcı YSA'nın girişlerini oluşturur. YSA çıkışı 0 normal durumu göstermek üzere 0 ile 1'e dönüştürülür. Arama tablosu YSA çıkışındaki duruma göre uygun denetim girişini üretir.



Şekil 3.22 Sınıflandırıcı YSA ile denetim

3.8 YSA-PI denetleyici ağ yapısı

Bu tez çalışmasında STATCOM denetiminde YSA-PI denetleyici kullanılmıştır. YSA'nın tek başına denetleyici olarak kullanıldığı denetim yapılarında sistemde sürekli durum hatası oluşabilmekte ve bu durumun önüne geçebilmek için bir PI/PID denetleyici ile birlikte kullanılmaktadır. Bu yapılarda YSA uyarılama ve genelleme yapabilen bir denetleyici olarak kullanılırken, PI/PID denetleyici de meydana gelebilecek dinamik davranıştaki bozulmalar ve sürekli durum hatalarını gidermek için kullanılmaktadır. Bu şekildeki melez denetim yöntemlerinin yerine, parametreleri YSA tarafından belirlenen doğrusal olmayan yapıda ve

parametreleri uyarlanabilen YSA-PI/PID yapıları da kullanılmaktadır. Böylece bir PID denetleyicinin sistemin geçici ve sürekli durum davranışlarını düzetme gücü ile YSA'nın doğrusal olmayan, dinamikleri belirsiz veya yarı belirgin sistemleri denetleyebilme, öğrenme, uyarılma ve genelleme yapabilme özellikleri birleştirilmektedir. YSA-PID denetim yapıları kimyasal ve ısı süreçlerinin denetimi, ters sarkaç denetimi gibi bazı doğrusal olmayan sistemlerin denetimine uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

STATCOM DA gerilim denetiminde kullanılan YSA-PI denetleyicisi bir PI denetleyicinin K_P -oransal kazanç ve K_I -integral kazancını uyarlayacak şekilde seçilmiştir.

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt \quad (3.32)$$

Burada e -izleme hatası ve u -denetleyici çıkışıdır. YSA-PI denetleyici ağı Şekil 3.23'te verildiği gibi; girişleri hata ve hatanın değişimi, çıkışları k_p ve k_I kazançları olan ileri beslemeli 3-4-2 yapısında bir YSA ile gerçekleştirilmiştir. YSA'nın eğitimi geriye yayılım algoritması ile örneksel olarak gerçekleştirilmiştir. Eğitim işlemi için gerekli olan k . örnekteki E-eğitim işareti, $V_{da_{ref}}$ referans DA gerilim ve V_{da} kondansatör gerilimi olmak üzere aşağıdaki gibi elde edilir.

$$e(k) = V_{da_{ref}}(k) - V_{da}(k-1) \quad (3.33)$$

$$E(k) = \frac{1}{2} e^2(k) \quad k=1,2,N \quad (3.34)$$

YSA'nın eğitimi Denklem 3.34 ile verilen eğitim işaretinin sistem üzerinden yansıtılarak geriye yayılım algoritmasıyla giriş katman ağırlıkları w_{ij}^1 ve saklı katman ağırlıkları w_{jl}^2 'nin güncellenmesiyle sağlanır. w_{ij}^1 ve w_{jl}^2 ağırlıklarının her k örnekteki güncellemesi aşağıdaki şekilde yapılır.

$$w_{jl}^2(k) = w_{jl}^2(k-1) + \Delta w_{jl}^2(k) \quad (3.35)$$

$$\Delta w_{jl}^2(k) = -\alpha \frac{\partial E(k)}{\partial w_{jl}^2(k)} + \beta \Delta w_{jl}^2(k-1) \quad (3.36)$$

$$w_{ij}^1(k) = w_{ij}^1(k-1) + \Delta w_{ij}^1(k) \quad (3.37)$$

$$\Delta w_{ij}^1(k) = -\alpha \frac{\partial E(k)}{\partial w_{ij}^1(k)} + \beta \Delta w_{ij}^1(k-1) \quad (3.38)$$

$i=1,2,...,p$; $j=1,2,...,m$; $l=1,2,...,n$;

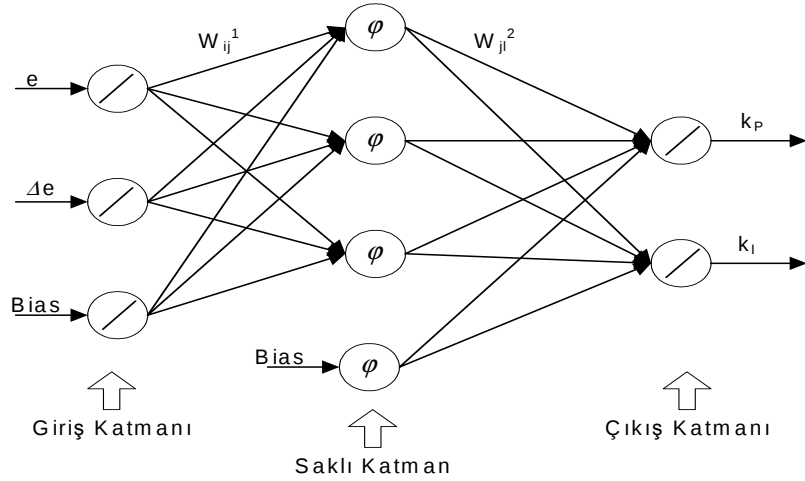
Burada α -öğrenme oranı, β -momentum katsayısıdır. Eğitim işaretinin saklı katman ağırlıklarına doğru geriye yansıtılması aşağıda verildiği gibi elde edilebilir.

$$\frac{\partial E(k)}{\partial W_{jl}^2(k)} = \frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \omega} \frac{\partial \omega}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial W_{jl}^2} \quad (3.39)$$

Bu ifadede eğitim işaretinin sistem üzerinden bir şekilde yansıtıldığı $\partial E/\partial y$ jakobyeninin doğru bir şekilde hesaplanması oldukça önemlidir, ancak sistemin dinamiklerinden kaynaklanan belirsizliklerden dolayı bu ifade doğru bir şekilde bulunamaz. Bu sorunun giderilebilmesi amacıyla delta uyarlama kuralı kullanılarak eğitim işaretinin sistem üzerinden yansıtılması kullanılmıştır(Chen Y.C. and Teng C.C., 1995).

$$\frac{\partial E}{\partial y} = \delta^2 = Ae + \dot{e} \quad (3.40)$$

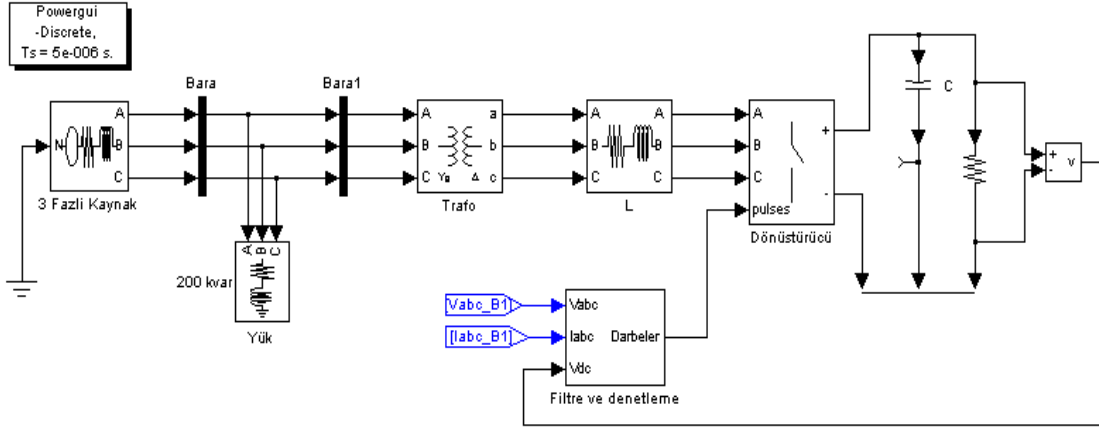
Burada A pozitif değerli bir sabit, δ^2 saklı katman ağırlıklarının yenilenmesi için gerekli olan yöresel gradyandır. Giriş katman ağırlıklarının güncellemesi de benzer şekilde elde edilebilir.



Şekil 3.23 YSA-PI denetleyici yapısı

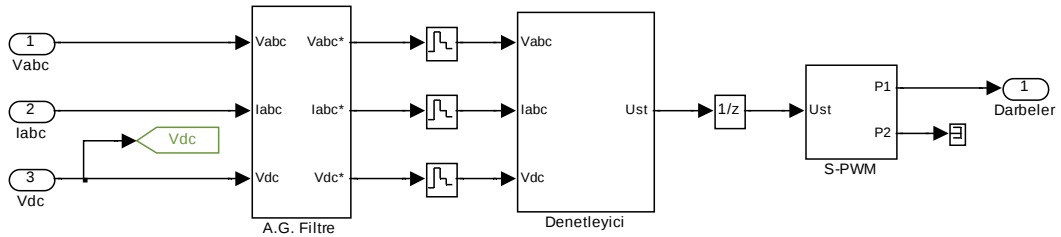
4. BENZETİM SONUÇLARI

Bu tez çalışmasında güç sistemlerinin tepkin güç kompanzasyonunda kullanılan STATCOM'un MATLAB-SIMULINK Toolbox'ı kullanılarak benzetimi yapılmıştır. STATCOM'un DA link kısmı sabit parametrelili PI denetleyici ve YSA ile denetlenmiş ve benzetim sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.1 Simulink 'te oluşturulan güç sistemi ve STATCOM devre modeli

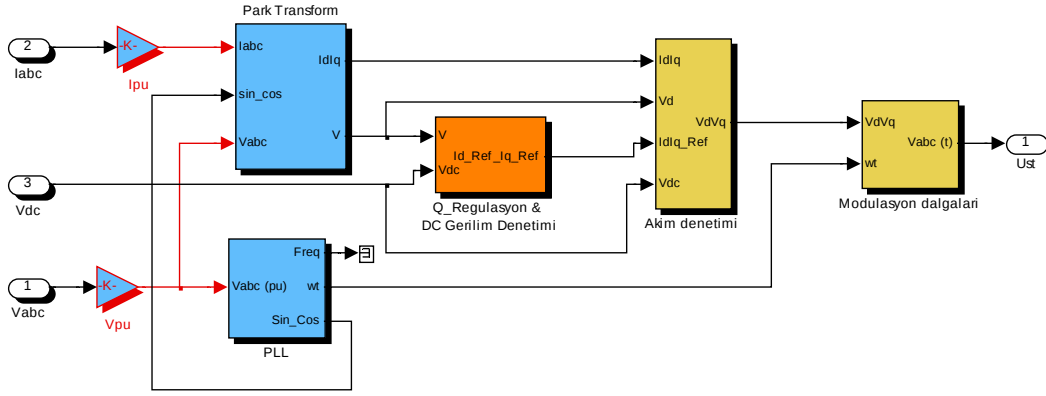
Şekil 4.1'de MATLAB-SIMULINK'te oluşturulan STATCOM'un devre modeli görülmektedir. Bu şekilden de görüleceği gibi STATCOM'un bağlı bulunduğu baranın (Bara_1) akımları, gerilimleri ve eviricinin DA linkinde bulunan kondansatörün gerilimi alçak geçiren süzgeçten geçirilerek denetleyici bloklarına girilir. Denetleyici bloğunun çıkışında elde edilen modülasyon dalgaları yardımı ile evirici için anahtarlama darbeleri üretilir. Bununla ilgili benzetim bloğu Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 STATCOM filtre ve denetleme kısmı

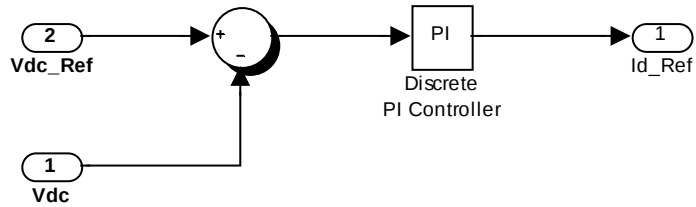
Alçak geçiren (AG) süzgecin köşe frekansı 750 Hz seçilerek yüksek frekanslı harmoniklerin ve gürültülerin süzülmesi sağlanmıştır.

Şekil 4.3'te denetim bloğunun iç yapısı görülmektedir. İlk olarak, denetlenmek istenilen baranın anlık akım ve gerilim değerleri ölçülür. Ölçülen bu değerler pu 'ya çevrildikten sonra gerilim senkronizasyon bloğuna (PLL) giriş olarak kullanılır. PLL, STATCOM'un bağlandığı baranın a fazının geriliminin ana bileşeninin sıfır geçişine senkronize olur. Yani a fazının geriliminin faz açısını, frekansını ve açısal hızını belirler. Park dönüşümü kullanılarak baranın akım ve geriliminin etkin ve tepkin bileşenleri (d ve q) elde edilir. Daha sonra Q_Regulasyon ve DA gerilim denetim bloğundan referans akım bileşenleri elde edilir. Bu referans akım değerleri akım denetimde kullanılmak üzere akım denetimi bloğuna girilir. Akım denetim bloğunda eviricinin üretmesi gereken gerilimin d ve q bileşeni elde edildikten sonra bu bileşenler vektörel dönüşümle üç fazlı büyüklüklere dönüştürülür.



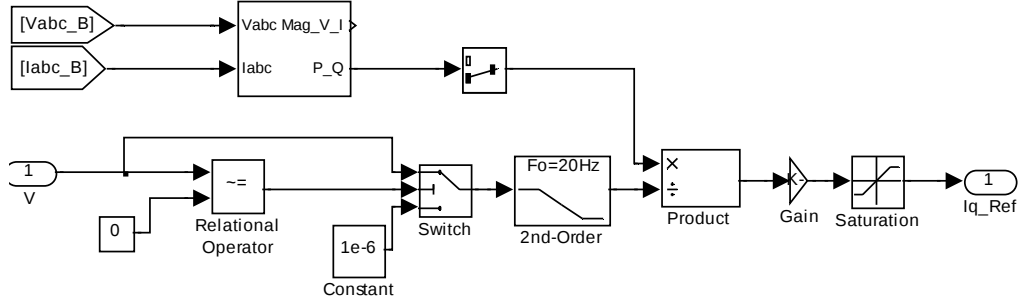
Şekil 4.3 Denetim bloğunun iç yapısı

STATCOM 'da DA gerilim denetimi ile sistemden eviriciye ya da eviriciden sisteme akacak olan etkin güç miktarı belirlenir. Sabit parametrelili PI denetleyici kullanan doğru gerilim denetleyicisinin MATLAB-Simulink bloğu Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Referans DA gerilim ile ölçülen DA gerilim karşılaştırılarak hata sabit parametrelili PI denetleyiciden geçirilerek referans etkin akım değeri (i_{dref}) elde edilir.



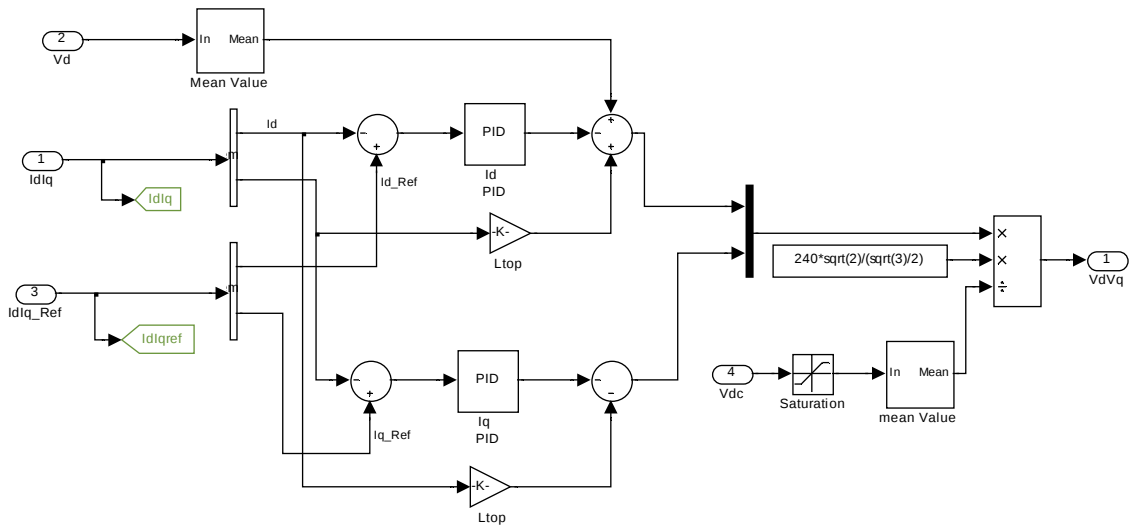
Şekil 4.4 Sabit parametrelili PI denetleyici kullanan doğru gerilim denetleyicisinin MATLAB-Simulink bloğu

Tepkin güç kompanzasyonunu gerçekleştirmek amacıyla STATCOM'un bağlı bulunduğu baranın akım ve gerilimleri ölçülerek yükün şebekeden çektiği tepkin güç miktarı belirlenir. Böylece yükün şebekeden çektiği tepkin gücün tam tersi bir tepkin gücün STATCOM tarafından üretilmesi istenir. Benzetim çalışmasında bu işlemler Simulink bloklarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu blok şeması Şekil 4.5'te verilmiştir.



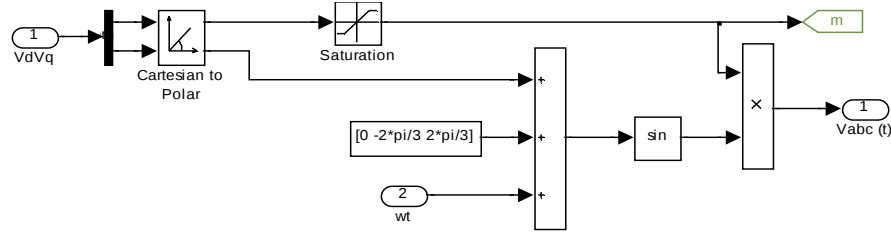
Şekil 4.5 Yükün şebekeden çektiği tepkin güç miktarının belirlenmesine ait MATLAB-Simulink bloğu

Ölçülen akımlar d ve q bileşenlerine ayrılarak akım denetim bloğuna girilir. Akım denetiminde kenetlemesiz (decoupling) bir yapı kullanılarak bu iki bileşenin birbirinden bağımsız bir şekilde denetlenmesi sağlanır. Akımın d ve q bileşenleri (I_d - I_q) DA gerilim denetimi ve Q regülasyon denetiminden elde edilen referans d ve q (I_{dref} - I_{qref}) bileşenleri ile karşılaştırılır. Elde edilen hata bir PI denetleyiciye girilerek eviricinin üretmesi gereken gerilimlerin d ve q bileşenleri bulunur. Akım denetleyicisinin MATLAB Simulink bloğu Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



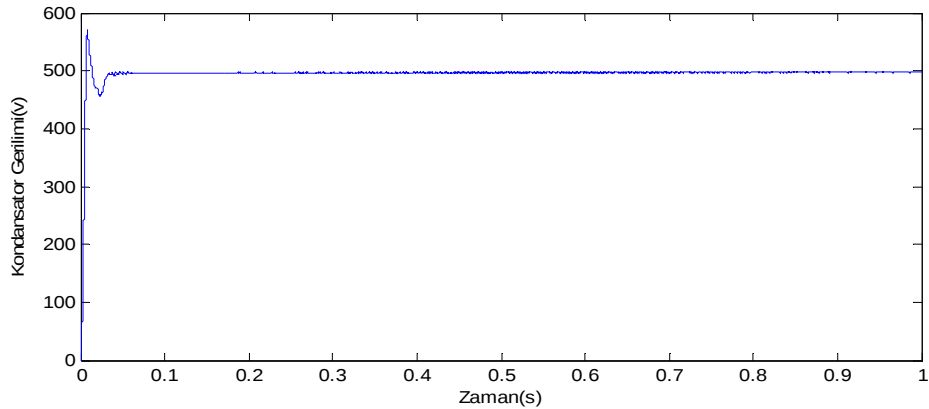
Şekil 4.6 Akım denetleyicisinin MATLAB-Simulink benzetim bloğu

Daha sonra elde edilen V_d ve V_q gerilimleri vektörel dönüşümle tekrar üç faza çevrilerek DGM için gerekli olan modülasyon dalgaları elde edilir. Şekil 4.7’de modülasyon dalgalarının elde edilmesine ilişkin MATLAB-Simulink benzetim bloğu gösterilmiştir.

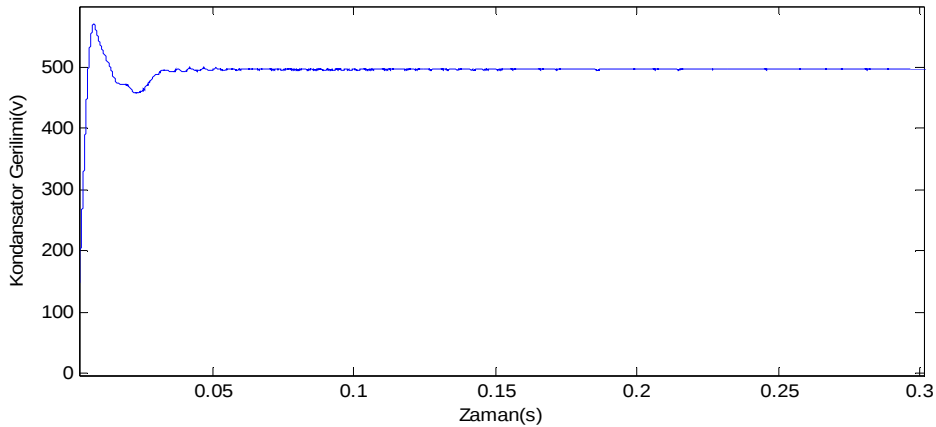


Şekil 4.7 Modülasyon dalgalarının elde edilmesi

Bu benzetim çalışmasında doğrudan denetim yöntemi kullanılmıştır. Doğrudan denetim yönteminde DA sabit tutulmaktadır. İlk olarak DA gerilim denetleyicisinde PI kullanılmıştır. PI kullanan DA gerilim denetleyicisinin benzetim sonucu Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Referans DA gerilim 500 V alınmıştır. Şekil 4.8’de DA geriliminin PI ile denetiminden elde edilen kondansatör geriliminin değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kondansatör gerilimi referans değeri 75ms de yakalamaktadır.



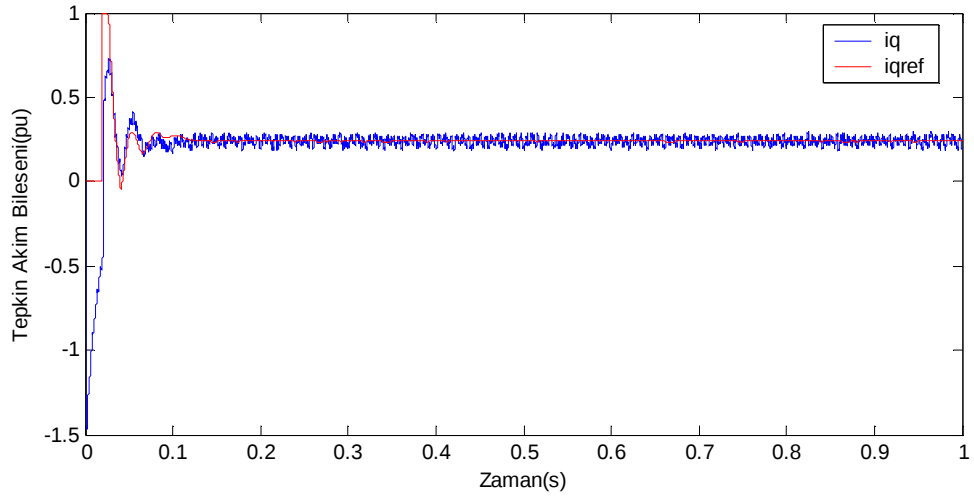
(Şekil 4.8.a)



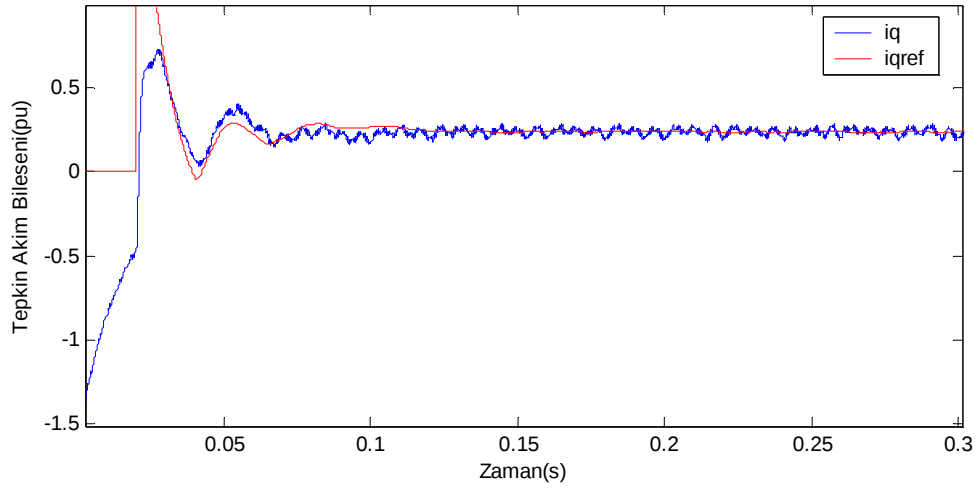
(Şekil 4.8.b)

Şekil 4.8 PI denetleyici kullanan STATCOM’un DA geriliminin değişimi (a;0-1s aralığı, b;0-0,3s aralığı)

STATCOM tepkin güç kompanzasyonu modunda çalıştırılırken yükün talep ettiği tepkin akımı çok kısa sürede sağlaması istenir. Bu benzetim çalışmasında şebekeye 200 kVAR'lık endüktif bir yük bağlanmıştır. Bu yükün çektiği tepkin akım STATCOM tarafından sağlanarak yük kompanzasyonu yapılmıştır. Benzetim çalışmasında modellenen STATCOM'un verebileceği ya da üretebileceği tepkin güç ± 500 kVAR olduğundan STATCOM tam endüktif çalıştırılmıştır. Şekil 4.9'da STATCOM'un tepkin akım bileşenine (kompanzasyon akımı) ait benzetim programı sonucu verilmiştir. Sonuçtan görüleceği gibi kompanzasyon çok kısa sürede (yaklaşık 150 ms) kompanzasyon akımını sağladığı görülür.



(Şekil 4.9.a)

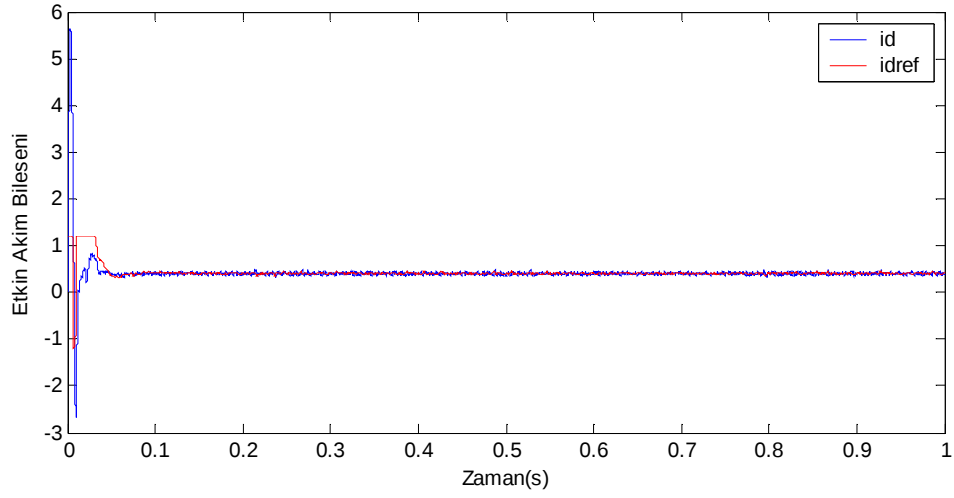


(Şekil 4.9.b)

Şekil 4.9 STATCOM'un tepkin akımının benzetim programı sonucu (a;0-1s aralığı, b;0-0,3s aralığı)

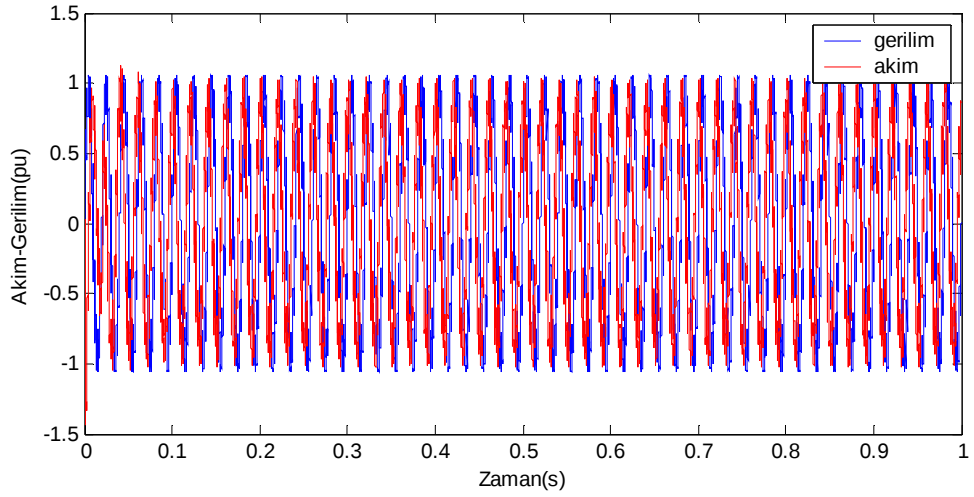
Doğrudan denetimde kondansatör geriliminin istenilen değerde sabit kalması istenir. Bunun sağlanabilmesi için evirici, süzgeç ve transformatörde meydana gelen kayıpların şebekeden karşılanması gerekir. Bunun için DA gerilim denetimi yapılır ve bu denetleyici

kondansatörün şarjlı kalabilmesi için şebekeden çekilecek etkin akım bileşenini belirler. Etkin akım bileşenine ait benzetim programı sonucu Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

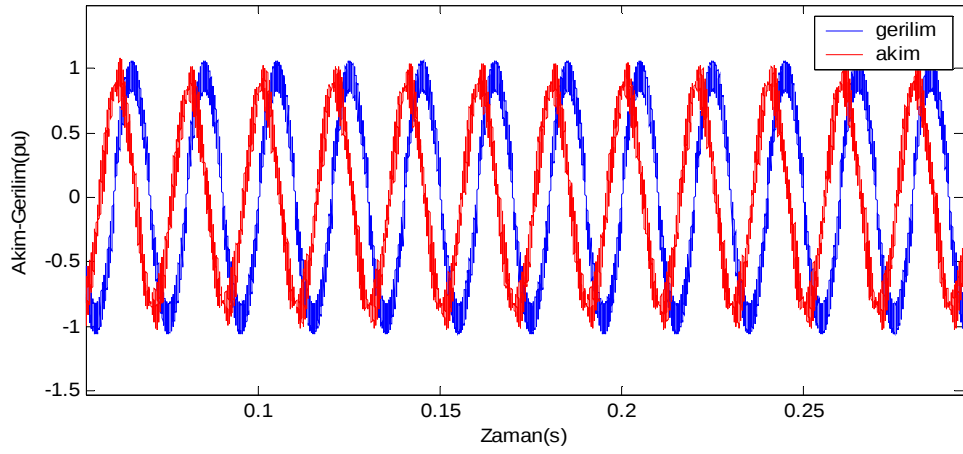


Şekil 4.10 STATCOM'un etkin akımının benzetim programı sonucu

STATCOM'un bir fazına ait akım-gerilim ilişkisi Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Şekil 4.11'den görüleceği gibi STATCOM tam kapasitif çalışmış, yükün talep ettiği kompanzasyon akımını sağlamıştır.



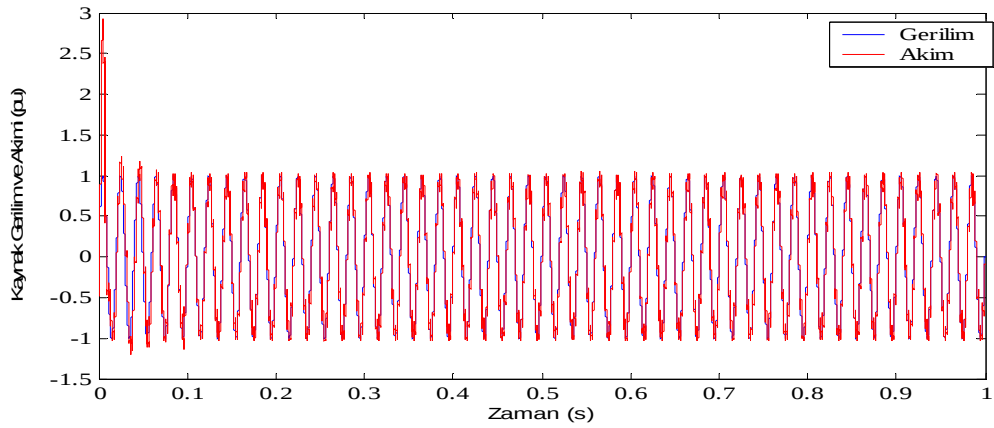
(Şekil 4.11.a)



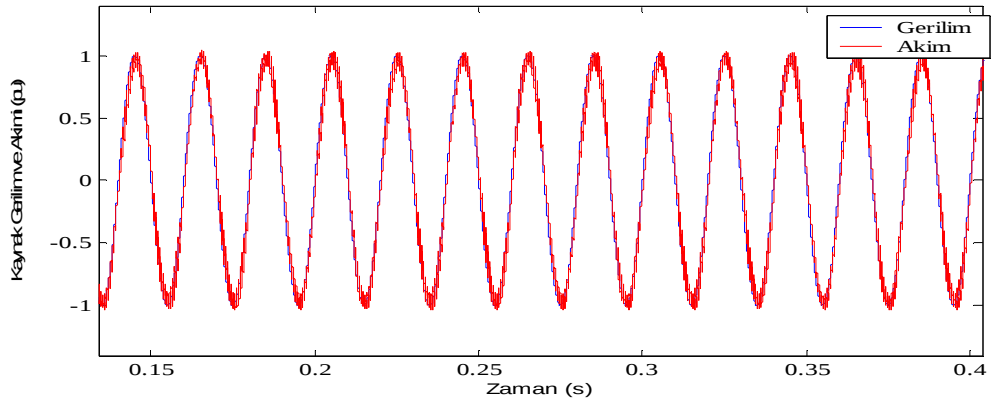
(Şekil 4.11.b)

Şekil 4.11 STATCOM'un bir fazına ait akım-gerilim ilişkisi (a;0-1s aralığı, b;0-0,3s aralığı)

STATCOM yükün talep ettiği kompanzasyon akımının tamamını karşıladığı için şebeke akım ve gerilimi aynı fazda olur. Bununla ilgili benzetim sonucu Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Böylece şebekeden tepkin güç çekilmez. Hatta meydana gelen kayıplar azalır.



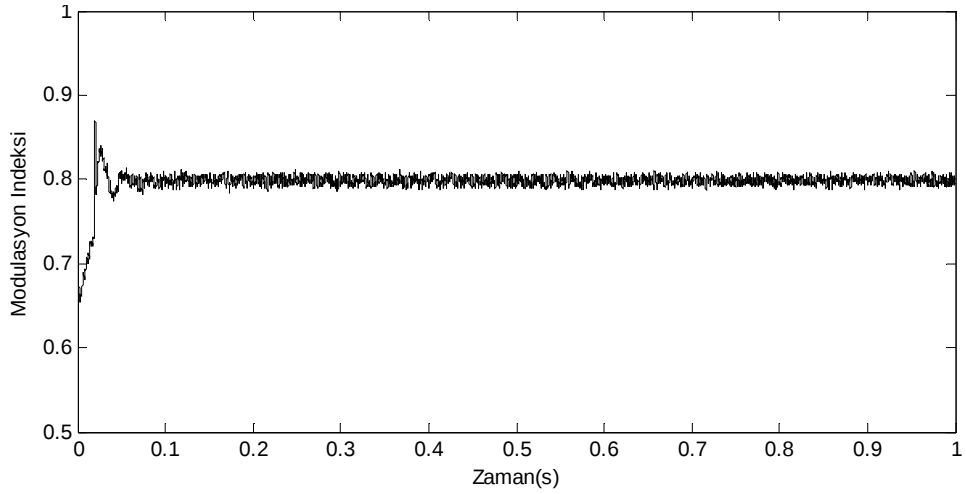
(Şekil 4.12.a)



(Şekil 4.12.b)

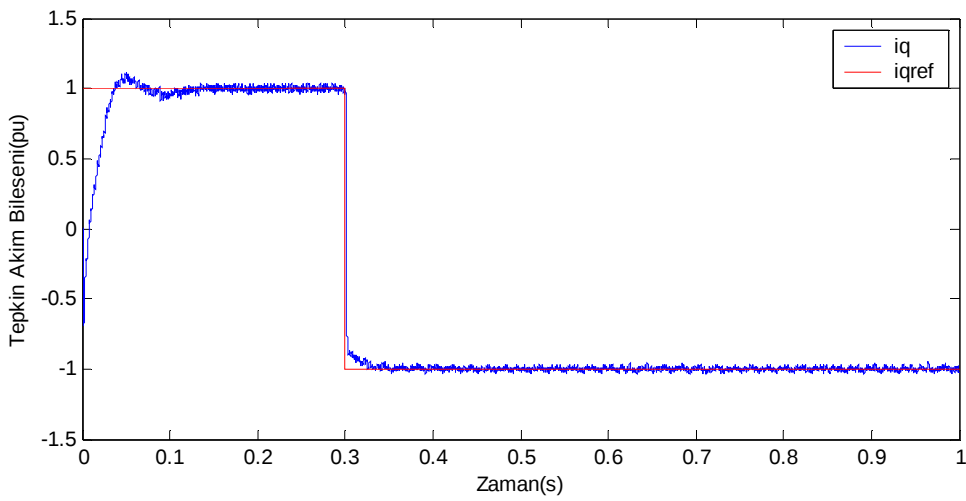
Şekil 4.12 Şebeke akım-gerilimi arasındaki faz ilişkisi (a;0-1s aralığı, b;0-0,4s aralığı)

STATCOM ile şebeke arasındaki tepkin güç alış verişi STATCOM'un ürettiği gerilimin genliği ile şebeke geriliminin genliğinin arasındaki farka göre meydana gelmektedir. DGM eviricilerde çıkış gerilimini değiştirmek için eviricinin kazancının (Modülasyon indeksi) değiştirilmesi gerekir. Bu benzetim çalışmasında eviricinin modülasyon indeksinin değişimi Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



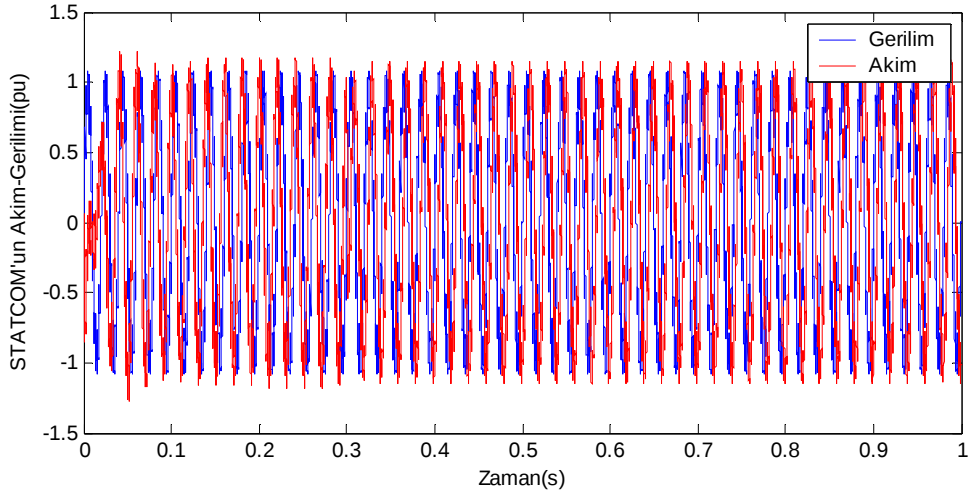
Şekil 4.13 Modülasyon indeksinin değişimi

Benzetim çalışmasında ayrıca tepkin akım bileşeni +1 pu'dan -1 pu'ya değiştirilerek bu ani değişime STATCOM'un verdiği dinamik cevap gözlemlenmiştir. Yani STATCOM tam kapasitif çalışırken 0.3 s'de tam endüktif tepkin güç vermesi istenmiştir. Şekil 4.14'ten görüldüğü gibi bu ani değişime STATCOM çok kısa sürede cevap vermiştir.

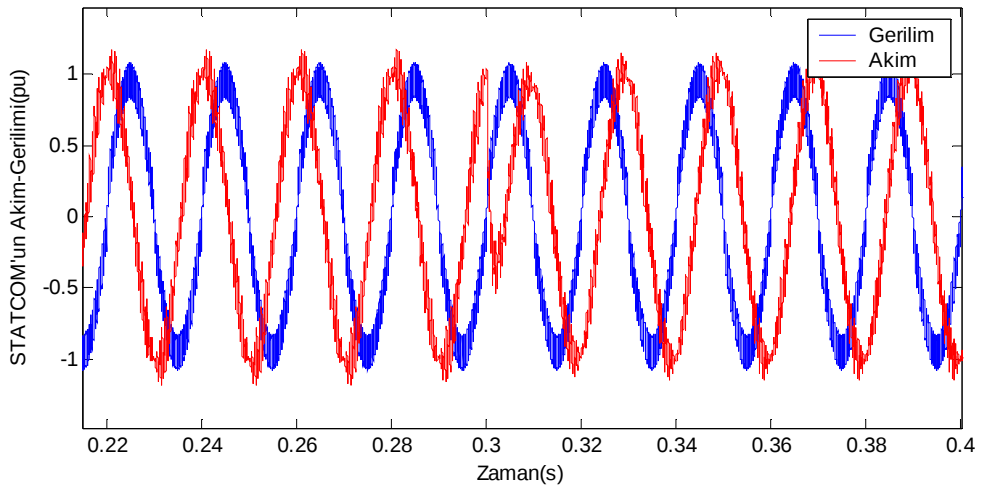


Şekil 4.14 Referans tepkin akımının +1 pu'dan -1 pu'ya değişimine STATCOM'un cevabı

Referans tepkin akımının +1 pu'dan -1 pu'ya değişimi esnasında STATCOM'un bir fazına ait akım ve gerilimi arasındaki faz ilişkisi Şekil 4.15'te gösterilmiştir. STATCOM kapasitif çalışmadan endüktif çalışmaya 0.01 s'de (yarım periyot) cevap vermiştir.



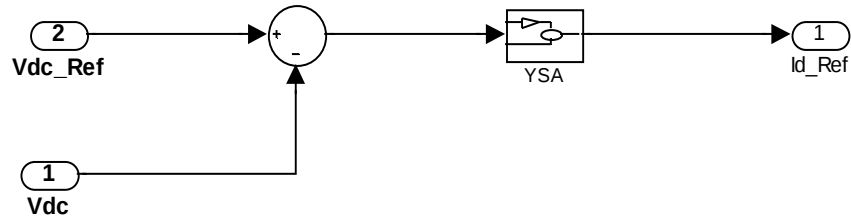
(Şekil 4.15.a)



(Şekil 4.15.b)

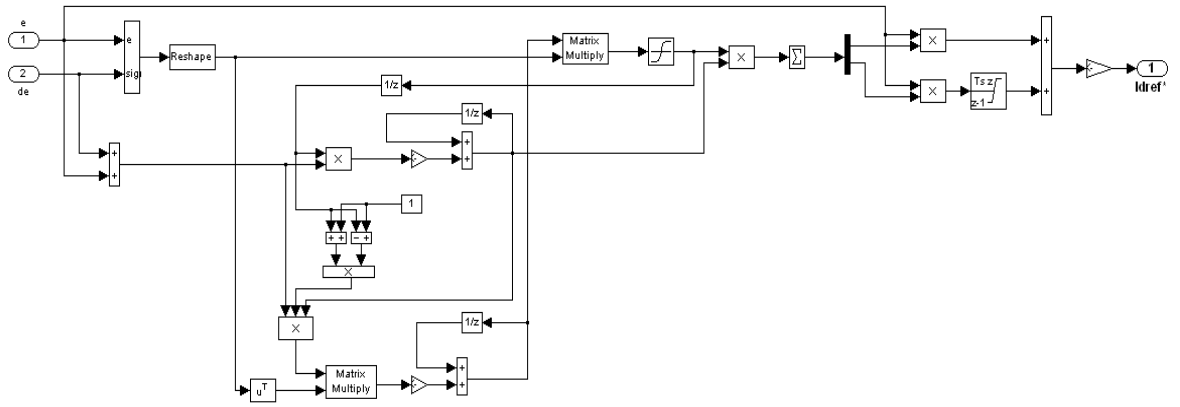
Şekil 4.15 Referans tepkin akımının +1 pu'dan -1 pu'ya değişimi esnasında STATCOM'un bir fazına ait akım ve gerilimi arasındaki faz ilişkisi (a;0-1s aralığı, b;0,2-0,4s aralığı)

MATLAB-Simulink'te oluşturulan YSA denetleyici bloğu Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Doğru gerilim denetleyici kısmında ölçülen doğru gerilim değeri referans doğru gerilim değeri ile karşılaştırılarak YSA'ya girilir. Doğru gerilimin denetimi için tasarlanan YSA; DA gerilimi istenilen seviyede tutmayı sağlar. Bu denetleyici kondansatörleri istenilen seviyede dolu tutmak için şebekeden çekilmesi gereken etkin güç miktarı kısaca I_{d_Ref} 'i belirler.



Şekil 4.16 YSA denetleyici kullanan doğru gerilim denetleyicisi

Şekil 4.17’de MATLAB-Simulink’te oluşturulan YSA denetleyici bloğunun içyapısı verilmiştir. Burada kullanılan DA gerilim denetleyicisi olarak; 2 girişli 3 katmanlı bir gizli katmana sahip, gizli katmanda 4 hücreli ve 2 çıkışlı YSA kullanılmıştır. YSA ağırlıkları geriye yayılım (back propagation) algoritması kullanılarak gerçek zamanlı olarak (online) uyarlanmıştır. YSA’nın çıkışları PI denetleyicinin oransal ve integral kazançları (k_p ve k_i) olarak seçilmiştir. Böylece parametreleri gerçek zamanlı olarak uyarlanabilen bir PI denetleyici elde edilmiştir.

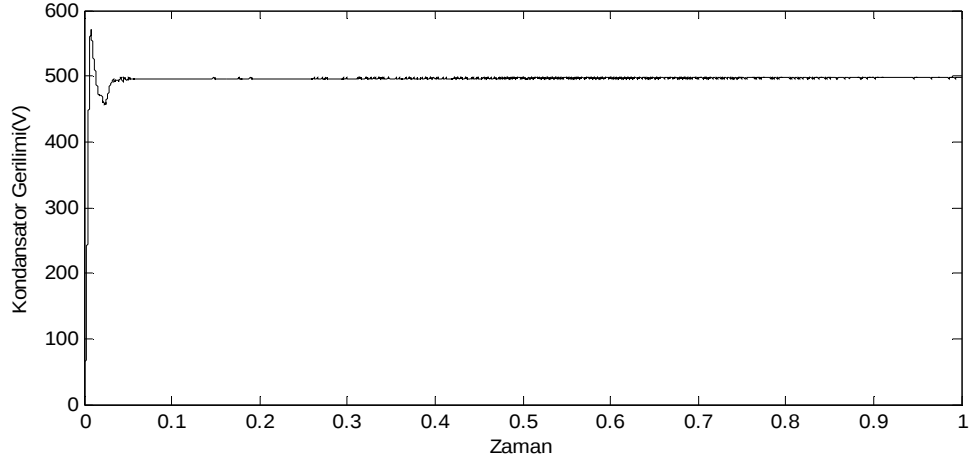


Şekil 4.17 YSA denetim bloğunun içyapısı

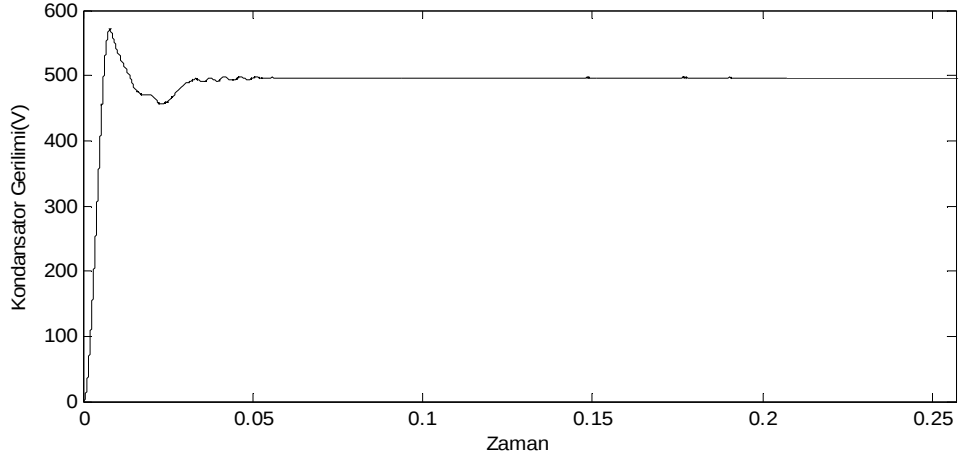
YSA çıkışından elde edilen referans d-eksen akım bileşeni (I_{dref}), ölçülen etkin akım bileşeni (I_d) değeri ile karşılaştırılır. Hata değeri bir PI denetleyiciden geçirilerek eviricinin üretmesi gereken gerilimin tepkin bileşeni (V_q) elde edilir. Aynı şekilde referans tepkin akım bileşeni (I_{q_Ref}) değeri ile ölçülen tepkin akım değeri (I_q) karşılaştırılıp hata değeri bir PI denetleyiciden geçirildikten sonra eviricinin üretmesi gereken gerilimin etkin bileşeni (V_d) bileşeni bulunur.

Benzetim çalışmasında DA gerilim referans değeri 500 V alınmıştır. YSA denetleyici kullanan DA gerilim denetleyicisi referans DA gerilim değerini yaklaşık 50ms de

yakalamaktadır. Bu cevap süresi PI denetleyici ile kıyaslandığı zaman daha kısa olduğu görülür. Bununla ilgili benzetim sonucu Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



(Şekil 4.18.a)

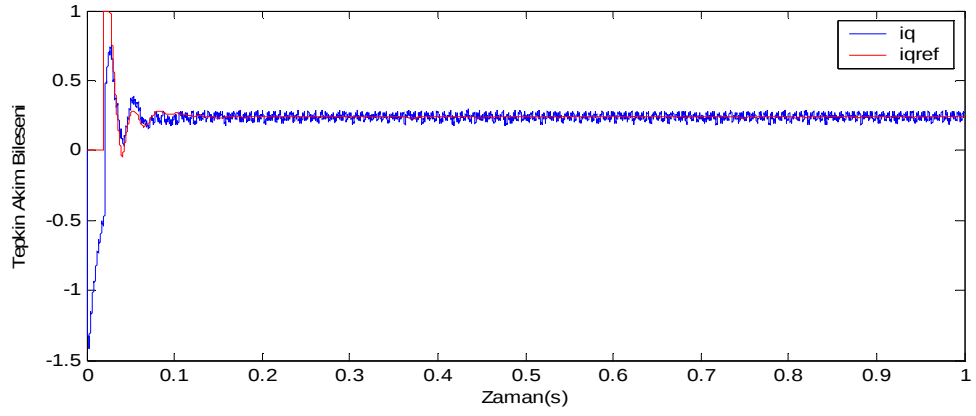


(Şekil 4.18.b)

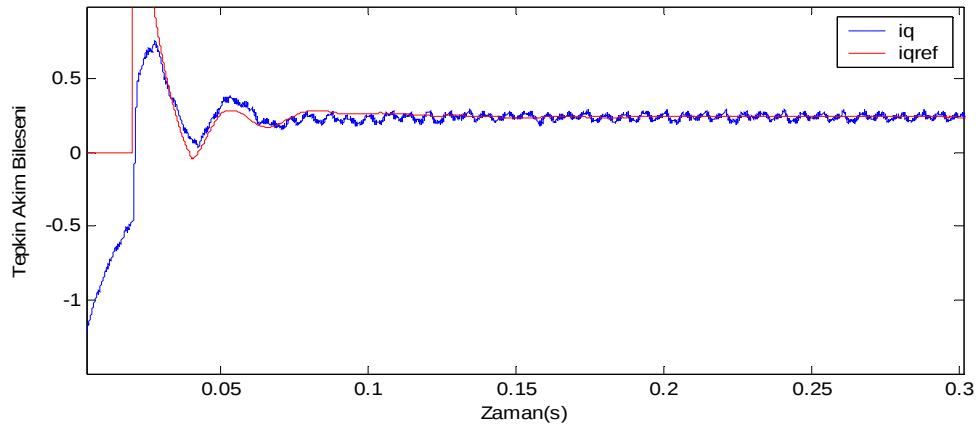
Şekil 4.18 YSA denetleyici kullanan STATCOM’un DA geriliminin değişimi
(a;0-1s aralığı, b;0-0,25s aralığı)

Ölçülen doğru gerilim değeri ile referans doğru gerilim değeri karşılaştırılıp YSA’dan geçirildikten sonra referans etkin akım bileşeni (I_{d_Ref}) bulunur.

Şekil 4.19’da, tepkin akım bileşeni ile referans tepkin akım bileşeni gösterilmiştir. Görüldüğü gibi I_q , I_{q_Ref} ’i takip ederek STATCOM sistem için gerekli kompanzasyon akımını sağlamakta ve istenilen oranda sistemi kompanse edebilmektedir.



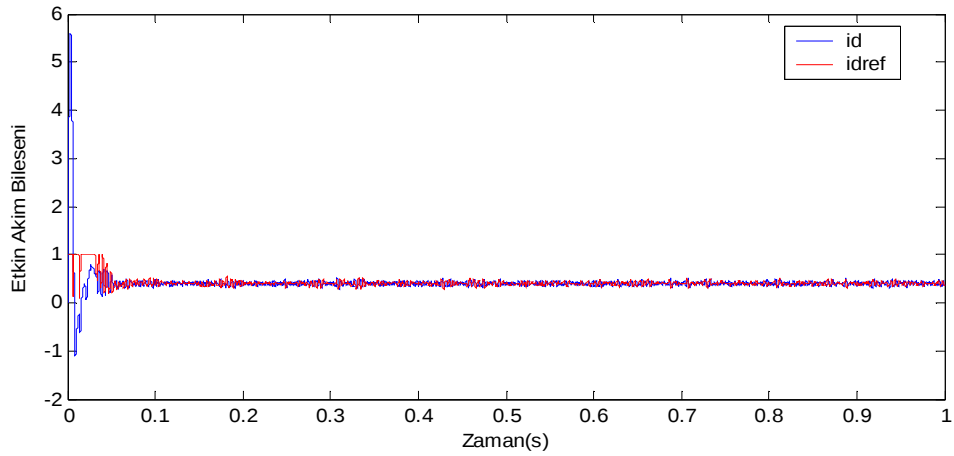
(Şekil 4.19.a)



(Şekil 4.19.b)

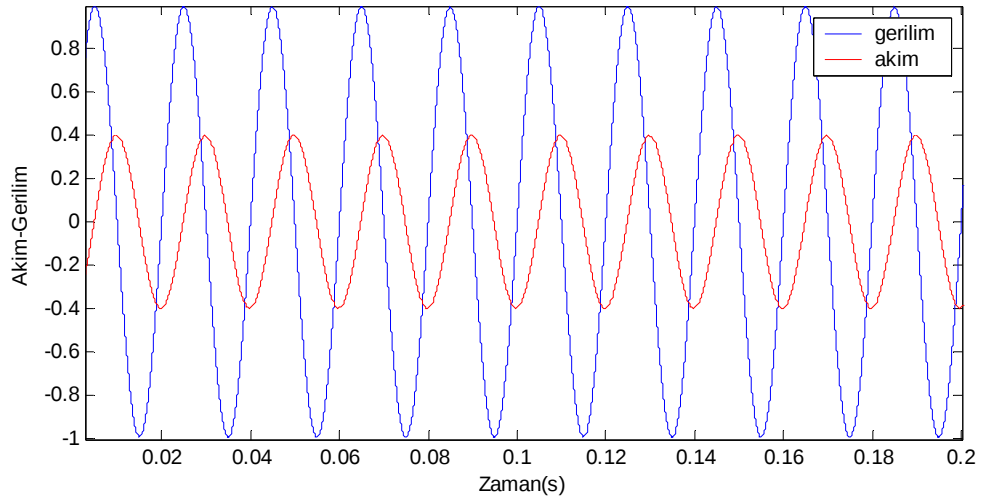
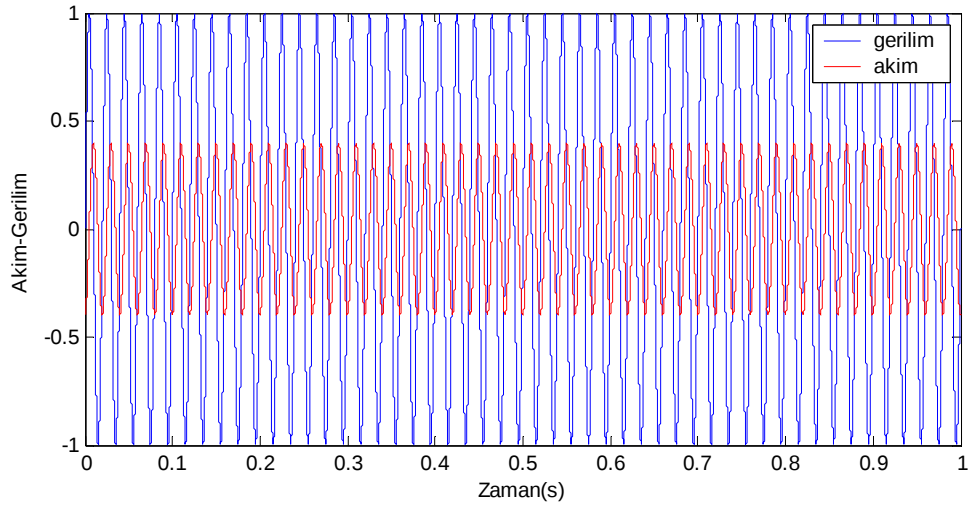
Şekil 4.19 YSA'lı tepkin akım bileşeni ile referans tepkin akım bileşeni (a;0-1s aralığı, b;0-0,3s aralığı)

Benzetim programı sonucundan da görüleceği gibi I_d bileşeni pozitifdir. I_d bileşeninin pozitif olması, şebekeden eviriciye doğru bir etkin güç akışının olduğu anlamına gelir (tersi durumda eviriciden şebekeye etkin güç akışı anlamına gelir). Bu durumla ilgili benzetim programının sonucu Şekil 4.20 'de gösterilmiştir.

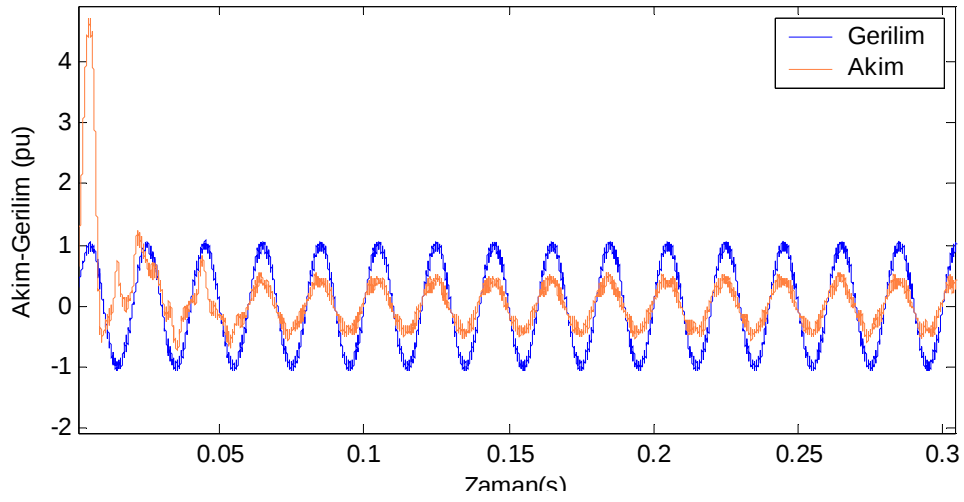
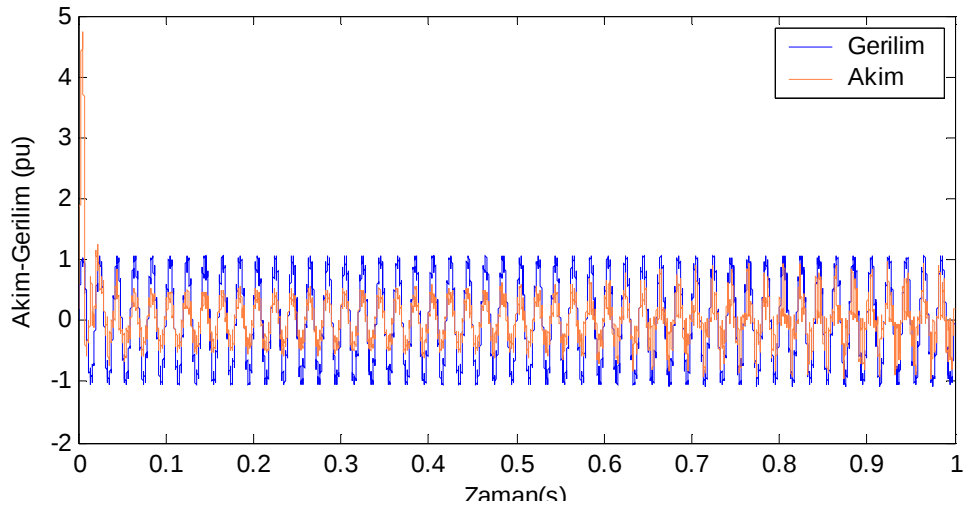


Şekil 4.20 YSA'lı etkin akım bileşeni ile referans etkin akım bileşeni

Benzetim programında STATCOM; denetlenmek istenilen baraya bir transformatör yardımı ile paralel bağlanmıştır. STATCOM'un akım ve gerilimi arasındaki faz ilişkisi, güç sisteminin çalışma şartlarına (endüktif ya da kapasitif) bağlıdır. Yani, güç sisteminin endüktif olduğu durumda STATCOM kapasitif bir tepkin akım, güç sisteminin kapasitif olduğu durumda ise endüktif bir tepkin akım üretir. Şekil 4.21 (a) ve (b) de STATCOM bağlanmamış bir sistem ve STATCOM bağlanmış olan sistemin akım-gerilim grafikleri görülmektedir. Grafiklerde görüldüğü gibi endüktif olan sisteme STATCOM aracılığı ile akım-gerilim arasındaki faz farkı düzeltilmektedir.



(a)

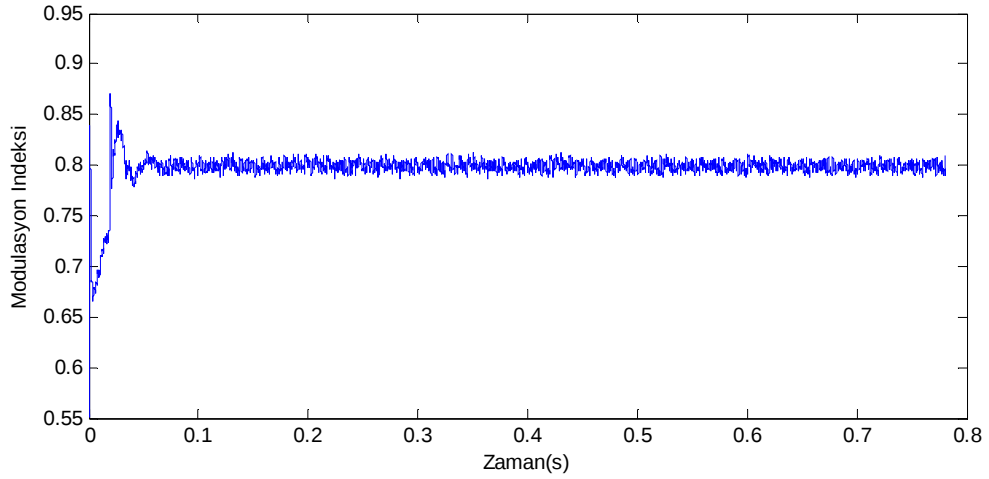


(b)

Şekil 4.21 a) STATCOM'suz sisteme ait akım-gerilim grafiği

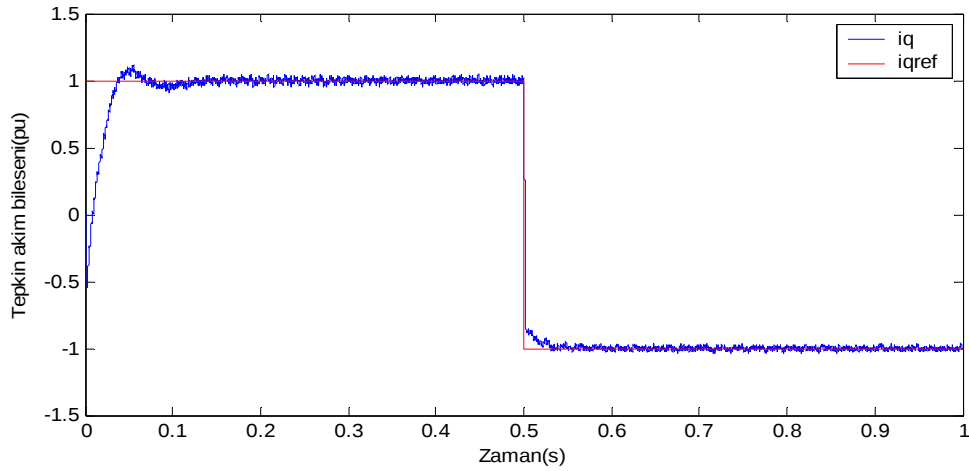
b) STATACOM olan sisteme ait akım-gerilim grafiği

STATCOM 'da doğru gerilim sabit olduğu için eviricinin çıkış geriliminin genliği, modülasyon indeksi değiştirilerek ayarlanır. STATCOM 'da çıkış geriliminin genliği $V = m V_{DA} \angle \phi$ olarak ifade edilir. STATCOM 'un kapasitif çalışabilmesi için, STATCOM 'un çıkış geriliminin genliğinin bara geriliminin genliğinden büyük olması bunun başarılabilmesi için de modülasyon indeksinin artması gerekmektedir. Şekil 4.22'de YSA ile yapılan benzetime ait modülasyon indeksinin değişim grafiği görülmektedir.



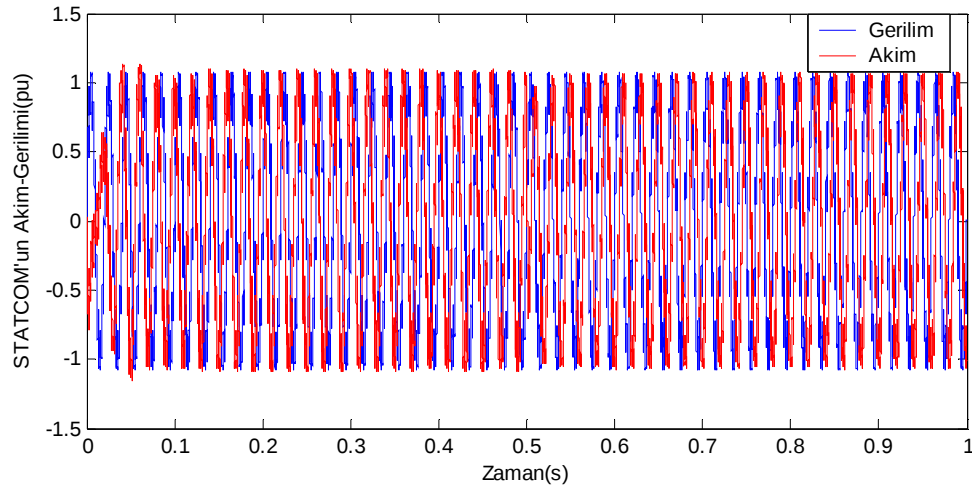
Şekil 4.22 YSA ile yapılan denetime ait modülasyon indeksinin değişim grafiği

Benzetim çalışmasında ayrıca, DA gerilim denetiminin sabit parametrelili PI ve ağırlıkları gerçek zamanlı (online) uyarlanan YSA, DA gerilimi denetlenen STATCOM'un ani yük değişimlerine verdiği dinamik cevabı görmek amacıyla tepkin akım bileşeni +1 pu'dan -1 pu'ya değiştirilerek verdiği cevap gözlemlenmiştir. Şekil 4.23'te görüldüğü gibi 0,5. s'de STATCOM tam kapasitif çalışırken, tam endüktif çalışması istenmiş ve STATCOM'un bu değişime çok kısa sürede cevap verdiği görülmüştür.

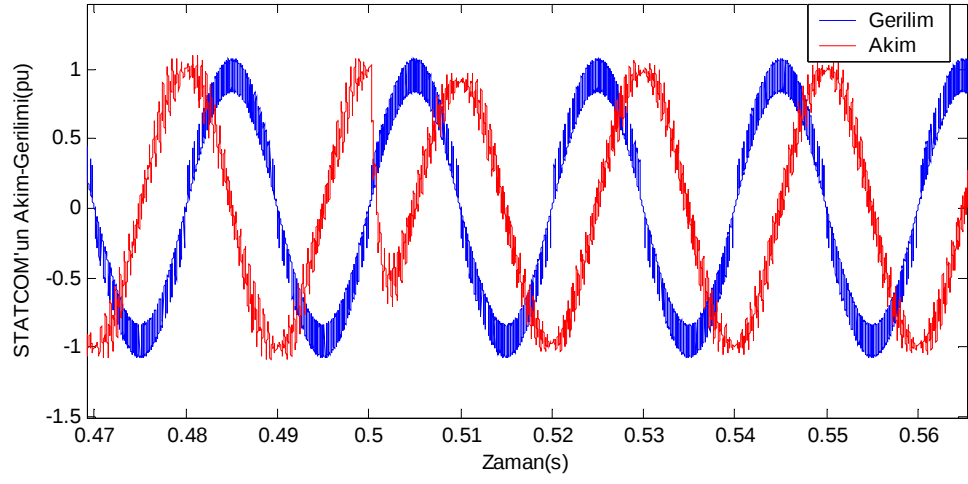


Şekil 4.23 Referans tepkin akımının +1 pu'dan -1 pu'ya değişimine YSA'lı STATCOM'un cevabı

Şekil 4.24'te STATCOM'un tam kapasitif çalışmadan tam endüktif çalışmaya geçerken bir fazına ait akım-gerilim arasındaki faz ilişkisini göstermektedir. Burada 0,5.s'deki değişime STATCOM'un cevap verme süresi yaklaşık yarım periyot gibi çok kısa bir süre olduğu görülmüştür.



(Şekil 4.24.a)



(Şekil 4.24.b)

Şekil 4.24 Referans tepkin akımının +1 pu'dan -1 pu'ya değişimi esnasında YSA yapılı STATCOM'un bir fazına ait akım ve gerilimi arasındaki faz ilişkisi
(a;0-1s aralığı, b;0,45-0,60s aralığı)

5. SONUÇ

Günümüz dünyasında elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç sürekli artmaktadır. Gelişen teknolojilere paralel olarak elektrikli alıcıların sayısı artmış ve bundan dolayı da iletim sistemlerine daha fazla yüklenilmektedir. Buna bağlı olarak iletim sistemlerinde yeniden yapılanma ve mevcut iletim hattı sistemlerinin enerji taşıma kapasitesini artırma yönünde çalışmalar yoğunlaşmıştır. İletim hatlarının taşıma kapasitesini artırmak için FACTS aygıtları kullanılmaktadır. FACTS aygıtları güç akış kontrolü, paralel hatlar arasındaki yük paylaşımı, gerilim regülasyonu, geçici kararlılığı iyileştirme ve sistemdeki salınımların azaltılmasında kullanılmaktadır. İletim hatları; gelişen teknolojinin yük isteğine karşılık verecek şekilde esnek bir yapıda olmalı, üzerinde yapılacak değişimlere kolaylıkla cevap vermeli ve ekonomik açılımlara uyumlu olmalıdır.

FACTS bu ihtiyaçlara cevap veren bir teknolojidir ve sistemin esnekliği, performansı ve aygıt kullanımını geliştirme ile birlikte iletim hatlarının işleyişini önemli bir şekilde değiştirir. Güç elektroniği teknolojisinin gelişmesi var olan iletim sistemlerinin daha iyi kullanılmasına imkân verir. Yaklaşık son 40 yıldır tristör tabanlı güç elektroniği elemanları elektrik güç iletim sistemlerinin kontrolü ve kompanzasyonu için kullanılmaktadır. Tristör anahtarlama ve kontrollü kondansatör veya reaktör ile alternatif iletim sistemlerinin tepkin seri ve şönt kompanzasyonu için enterkonnekte sisteme bağlı şebekelere uygulanmasına çok büyük katkıda bulunmaktadır. Tam denetimli anahtarlama elemanları kullanılarak yapılan anahtarlama tip kompanzasyonlar, hızlı sistem cevabına, bağımsız bir şekilde aktif tepkin güç akışı yeteneğinin elde edilmesine, ayrıca sistemin kararlılığının artırılmasına ve tam hat yüklenmelerinin sağlanması için gerilimin kontrolüne olanak sağlar. Ayrıca bu kontrolörler değişen çalışma ve şebeke gereksinimlerine bağlı olarak geliştirilebilme ve dönüştürülebilme avantajları bize sunar.

FACTS aygıtları, hızlı bir şekilde kontrol edilebilen statik, senkron alternatif gerilim kaynağı gerçekleştirmek için kendinden komutasyonlu gerilim kaynaklı eviriciler kullanılır. Bu yaklaşım sistem geriliminden bağımsız tepkin kompanzasyon akımı ya da sistem akımından bağımsız tepkin kompanzasyon gerilimi sağlayabilir. FACTS aygıtları, hem kontrol edilebilir bir tepkin kompanzasyon sağlayabilme hem de sistem ile etkin güç alışverişi yapabilme yeteneğine sahiptirler. FACTS aygıtları yarı iletken teknolojisi kullanılarak tasarlandıkları için kurulumu kolay ve daha az yer kaplamaktadırlar.

Bu tez çalışmasında iletim sistemlerinde güç akış kontrolü için MATLAB-SIMULINK Toolbox kullanılarak evirici tabanlı FACTS aygıtı olan STATCOM'un benzetimi yapılmıştır. STATCOM, büyük değerlerde dış reaktörlere veya kondansatör gruplarına ihtiyaç duymadan, kademe noktasında tepkin güç tüketerek veya üreterek hızlı bir şekilde denetlenebilir güç ve

gerilim regölasyonu sağlamıştır. STATCOM'un DA denetiminde YSA-PI denetleyici kullanılarak denetim yapılmıştır. YSA-PI denetleyicisinin kullanılmasıyla; matematiksel işlemlere gerek kalmamış ve YSA'nın öğrenebilme ve genelleme yapabilme yeteneği ile doğrusal olmayan, uyarlanabilir parametrelili ve dayanıklı bir PI denetleyici elde edilmiştir. Bu denetim yapısının denetimini görebilmek amacıyla, yük altında benzetimi yapılmış ve benzetim sonuçları değerlendirilmiştir. Bulunan sonuçlar, YSA-PI denetimli STATCOM'un iletim hattına müdahalede beklenen sonucu sağladığı ve literatürdeki sonuçlarla karşılaştırıldığı zaman, oluşturulan benzetim modelinin sonuçlarının uyumlu olduğu görölmektedir.

KAYNAKLAR

- Cavaliere, C.A.C., Watanabe, E.H., Aredes, M., 2002, Multi-pulse STATCOM operation under unbalanced voltages. IEEE. 1;567 – 572.
- Chen Y.C. and Teng C.C.,1995, A model reference control structure using a fuzzy neural network, Fuzzy Sets and Systems, 73, 291-312.
- Chen, S. and G. Joós, 2001, Direct Power Control of DSTATCOMs for Voltage Flicker Mitigation, Proceedings of the 36th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 4, 2683–2690.
- Cheng, H., In, I. and Chen S., 1998, DC-Link Voltage Control and Performance Analysis of STATCOM,CIGRE, Static Synchronous Compensator, Working Group 14.19.
- Çötel, R., 2006, STATCOM ile Güç Akış Kontrolü, Yüksek Lisans tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çetin, N.S., 2006, Şebeke Bağlantısız PM Generatörlü Rüzgar Türbinlerinin YSA İle Sistem Optimizasyonu, Doktora tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dandıl B.,Gökbulut M., Ata F., 2004, Doğrusal Olmayan Yük Şartlarındaki Asenkron Motorun YSA-PI Hız Denetimi, F. Ü. Fen ve Müh. Bil. Derg., 16(1), 39-48.
- Gyugyi, L., 1988, Power Electronics in Electric Utilities: Static Var Compensators, Proceedings of The IEEE, 76, 4, 483-493.
- Gyugyi, L., 1994, Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-State Synchronous Voltage Sources, IEEE Trans. On Power Delivery, 9, 2, 904-908.
- Gyugyi, L., 1998, Converter Based FACTS Controller, IEE Colloquium on FACTS, 1-11,.
- Gökbulut, M., 1998, Fırçasız Doğru Akım Motorlarının YSA İle Uyarlamalı Denetimi, Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hingorani, N. G., 1993, Flexible AC Transmission Systems. IEEE Spectrum, 40–5.
- Hingorani, G., and Gyugyi, L., 1999, Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, IEEE Pres.
- Narendra K.S. and Mukhopadhyay S., 1997, Adaptive control using neural Networks and approximate models, IEEE Transactions on neural networks, 8, 3, 475-485.
- Kohonen T., 1988, An Introduction to Neural Computing, Neural Networks, 1, 4.
- Korn G., 1991. A Neural Network Experiments on Personel Computers and Workstations, A Bradford Book The MIT Press, London, p.4.
- Liang, Y. and Nwakpa, C. O., 1999, A New Type of STATCOM Based on Cascading Voltage-Source Eviricis with Phase Shifted Unipolar SPWM, IEEE Transactions on Industry Applications, 35, 5.
- Rao, P., Crow, M. L. and Yang, Z., 2000, STATCOM Control for Power System Voltage

- Control Applications, IEEE Transaction on Power Delivery, 15, 4, 1311-1317.
- Sahoo N.C., Panigrahi B.K., Dash P.K., Panda 2002, G., "Application of multivariable feedback linearization scheme for STATCOM control", Elektrik Power Sysytem Research, 62.
- Schauder, C., and Mehta, H., 1993, Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensators, IEE Proceedings-C, 140, 4, 299–306.
- Schalkof R. J., 1997. Artificial Neural Networks, The McGraw-Hill Companies, Inc., Newyork, 62-63.
- Sezer, M., 2007, Yapay Sinir Ağları (YSA) Kullanılarak KOİ Parametresinden BOİ Parametresinin tahmin Edilmesi , Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Shen, D., Linag, X., and Yingduo, H., 2000, A Modified Per-Unit STATCOM Model and Analysis of Open Loop Response Time, Proceeding of the IEEE Power Engineering Winter Meeting, 4, 2624-2629.
- Sun, J., Czarkowski, D. and Zabar, Z., 2004, Voltage Flicker Mitigation Using PWM-Based Distribution STATCOM, Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1, 616-621.
- T. Fkuda and T. Shibata, 1992, Theory and applications of neural networks for industrial control systems", IEEE Trans. Ind. Electron., 378-405.
- Trippi R. R. and Turban E., 1996, Neural Network in Finance and Investing, Irwin Professional Pub., Chicago, p.4.
- Vemuri V. R., 1992, Artificial Neural Networks: Concepts and Control Applications, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California, p. 42.
- Wanner, E., Mathys, R. and Hausler, M., 1983, Compensation Systems for Industry, Brown Boveri Rev., 70, 330-340.
- Xing, L., 2003, A Comparison of Pole Assignment & LQR Design Methods for Multivariable Control for STATCOM, the Florida State University College of Engineering, USA, p. 58.
- Zhang, Y., 1999, DSP-Based Control Strategies for An Inverter- Based Compensator, The Department of Electrical and Computer Engineering the University of Manitoba, Canada, Master Thesis, p. 88.

ÖZGEÇMİŞ

Yunus KARA, 1980 yılında Sivas'ta doğdu. İlköğrenimini Gürün'de tamamladı orta öğretimini Sivas Merkez Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümü'nde tamamladıktan sonra 1998 yılında Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü'nde lisans eğitimine başladı ve 2003 yılında lisans eğitimini tamamladı. 2004 yılında Fırat Üniversitesi Muş Meslek Yüksekokulu'nda Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. Eylül 2005 döneminde Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında yüksek lisansa başladı. Halen Muş Alparslan Üniversitesi Meslek Yüksekokulu'nda Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

Yunus KARA