

**BULANIK MANTIK KONTROLLÜ
ÜÇ SEVİYELİ DİYOT KENETLEMELİ
D-STATKOM TASARIMI VE SİMÜLASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet GÖRES

DANIŞMAN

Prof. Dr. Hasan ÇİMEN

ELEKTRİK ANABİLİM DALI

Temmuz, 2014

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BULANIK MANTIK KONTROLLÜ ÜÇ SEVİYELİ DİYOT
KENETLEMELİ D-STATKOM TASARIMI VE SİMÜLASYONU

Mehmet GÖRES

DANIŞMAN

Prof. Dr. Hasan ÇİMEN

ELEKTRİK ANABİLİM DALI

Temmuz, 2014

TEZ ONAY SAYFASI

Mehmet GÖRES tarafından hazırlanan “Bulanık Mantık Kontrollü Üç Seviyeli Diyot Kenetlemeli D-STATKOM Tasarımı ve Simülasyonu” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 09/07/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Hasan ÇİMEN

İkinci Danışmanı :

Başkan : Doç. Dr. Yüksel OĞUZ İmza
Afyon Kocatepe Ü. Teknoloji Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Hasan ÇİMEN İmza
Afyon Kocatepe Ü. Teknoloji Fakültesi

Üye : Yrd. Doç. Dr. Said Mahmut ÇINAR İmza
Afyon Kocatepe Ü. Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Fen Bilimleri
Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Yılmaz YALÇIN

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım
bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

09/07/2014

İmza

Mehmet GÖRES

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BULANIK MANTIK KONTROLLÜ ÜÇ SEVİYELİ DİYOT KENETLEMELİ D- STATKOM TASARIMI VE SİMÜLASYONU

Mehmet GÖRES

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hasan ÇİMEN

Bu çalışmada, dağıtım şebekelerinde gerilim regülasyonu ve yük kompanzasyonu için ± 55 kVAr gücünde üç seviyeli diyot kenetlemeli dağıtım statik senkron kompanzatör (D-STATKOM) tasarlanmış ve Matlab/Simulink ortamında benzetimi yapılmıştır. Tasarlanan D-STATKOM üç seviyeli diyot kenetlemeli invertör yapısında ve invertör kısmı faz kaydırmalı taşıyıcıya sahip sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu (CPS-SPWM) ile sürülmektedir. D-STATKOM kontrol ünitesi senkron referans çatı altında, doğru akım hat (*DA-hat*) gerilimi denetleyici, alternatif (AA) gerilim denetleyici ve akım denetleyici olmak üzere üç alt kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Bu kontrol ünitelerinde toplamda 4 adet PI denetleyici kullanılmaktadır. Bu tezde ilk olarak D-STATKOM gerilim regülasyonu sonrada yük kompanzasyonu için modellenmiştir. Bu modeller üzerinde klasik PI, 25 kurallı ve 49 kurallı bulanık PI denetleyicilerin performansları oturma zamanına göre birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Gerilim regülasyonu modelinde, *DA-hat* geriliminin düzenlemesi ve ortak bağlantı noktası (OBN) geriliminin düzenlemesi için en iyi performansı 49 kural tabanlı bulanık PI kontrolörle sağlandığı gözlemlenmiştir. Yük kompanzasyonu modelinde ise *DA-hat* gerilimi düzenlenmesi için 25 ve 49 kural tabanlı bulanık PI kontrolörlerin klasik PI kontrolörden daha iyi performansa sahip olduğu gözlemlenmiştir.

2014, xv + 109 sayfa

Anahtar Kelimeler: Klasik PI Kontrolör, Bulanık PI Kontrolör, Yük Kompanzasyonu, Gerilim Regülasyonu, D-STAKOM, Üç Seviyeli Diyot Kenetlemeli İnvertör, Faz Kaydırmalı Taşıyıcıya Sahip Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (CPS-SPWM).

ABSTRACT
M.Sc Thesis

**FUZZY LOGIC CONTROLLED THREE-LEVEL DIODE-CLAMPED D-STATCOM
DESIGN AND SIMULATION**

Mehmet GÖRES

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Electric

Supervisor: Prof. Dr. Hasan ÇİMEN

In this study, for voltage regulation and load compensation in the distribution networks, distribution static synchronous compensator (D-STATCOM) that has diode clamped with three levels and that is in the power of ± 55 kVAr was designed and its simulation was carried out in the medium of Matlab/Simulink. D-STATCOM designed is driven by sinusoidal pulse width modulation (CPS-SPWM) that is in the structure of inverter with diode clamped that has three levels and whose inverter has a phase-shift carrier. D-STATCOM control unit consists of three sub-control units under the synchronous reference frame; DA-line voltage controller, AA voltage controller, and current controller. In these control units totally 4 pieces of controllers are used. In this thesis, D-STATCOM was first modeled for voltage regulation and then for load composition. On these models, the performances of classic PI and the fuzzy PI controllers with 25 rules and 49 rules were compared to each other according to the criteria of time to sit down. In the model of voltage regulation, for regulating DA-line voltage and OBN voltage, it was observed that the best performance was provided with 49 rule based fuzzy PI controller. In the model of load composition, for regulating DA-line voltage, it was observed that 25 and 49 rule based fuzzy PI controllers had better performance than classic PI controller.

2014, xv + 109 pages

Key Words: Classical PI Controllers, Fuzzy PI Controllers, Load Compensation, Voltage Regulation, D-STATCOM, Three-Level Inverter with Diode Clamping, Carrier Phase-Shifted Sinusoidal Pulse Width Modulation (CPS-SPWM).

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı gerçekleştirmemde bilgi, tecrübe ve yönlendirmeleri ile daima desteklerini gördüğüm danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hasan ÇİMEN'e, bilgi ve görüşlerini benimle paylaşan Sayın Doç. Dr. Yüksel OĞUZ ve Yrd. Doç. Dr. Murat Caner'e, çalışmam süresince desteklerini benden esirgemeyen tüm okul arkadaşlarıma sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımnda her zaman bana gösterdikleri sabır, ilgi ve desteklerinden dolayı eşim Fatma GÖRES ve biricik oğlum Mehmet başta olmak üzere tüm aileme en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet GÖRES
AFYONKARAHİSAR, 2014

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	9
2.1 Üç Fazlı Senkron Generatör.....	9
2.1.1 Üç Fazlı Senkron Generatörlerde Gerilime Etki Eden Faktörler	9
2.2 Aktif ve Reaktif Güç	13
2.2.1 Güç Faktörünün Düzeltilmesi.....	16
2.2.2 Reaktif Güç Kompanzasyonunun Avantajları	18
2.3 Reaktif Güç ve Gerilim Kontrolü	19
2.3.1 Reaktif Güç Üretimi ve Tüketimi	19
2.3.2 Gerilim Kontrol Metotları	20
2.3.2.1 Şönt Reaktör	21
2.3.2.2 Şönt Kondansatör	22
2.3.2.3 Seri kondansatör	25
2.3.2.4. Senkron Kompanzatör	26
2.3.2.5 Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS).....	27
2.3.2.6 Özel Güç Aygıtları	31
3. DAĞITIM STATİK SENKRON KOMPANZATÖR (D-STATKOM).....	33
3.1 D-STATKOM'un Çalışma Prensipleri	35
3.2 Çok Seviyeli İnvertörler.....	40
3.2.1 Diyot Kenetlemeli Üç Seviyeli İnvertör	41
3.3 D-STATKOM Tasarım Prensipleri.....	43
3.3.1 DA-Hat Gerilim Değerinin Belirlenmesi	43
3.3.2 Bağlantı Reaktörünün Değerinin Belirlenmesi.....	43
3.3.3 DA-hat Kondansatörünün Değerinin Belirlenmesi.....	45
3.4 Çok Seviyeli İnvertörlerde kullanılan PWM Teknikleri.....	46
3.4.1 Çok Seviyeli Taşıyıcı Temelli Darbe Genişlik Modülasyonu	47

3.4.1.1 Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SPWM)	47
3.5 D-STATKOM Kontrol Ünitesi	51
3.5.1 Senkron Referans Çatı Kontrol Yapısı	51
3.5.1.1 Park Dönüşümü	52
3.5.1.2 PI Denetleyici	53
3.5.1.3 Faz Yakalama Döngüsü (PLL).....	54
3.5.1.4 Gerilim Kontrol Şeması	55
3.5.1.5 D-STATKOM İle Yük Kompanzasyonu	57
4. BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ.....	59
4.1 Üyelik fonksiyonları	60
4.2 Bulanık Mantık Denetleyicinin Temel Bileşenleri	61
4.3 Bulanık Çıkarım Sistemleri.....	62
4.3.1 Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi	62
4.3.2 Sugeno Bulanık Çıkarım Sistemi	63
4.4 PID Benzeri Bulanık Denetleyici.....	64
5. MATERYAL ve METOT	68
5.1 D-STATKOM Parametrelerinin Hesaplanması	69
5.1.1 DA-hat Gerilim Değerinin Hesaplanması	69
5.1.2 Bağlantı Reaktör Değerinin Hesaplanması.....	69
5.1.3 DA-hat Kondansatör Değerinin Hesaplanması.....	70
5.2 D-STATKOM'un Matlab/Simulink Ortamında Modellenmesi.....	71
5.2.1 D-STATKOM İç Yapısı	72
5.2.2 Üç Seviyeli Diyot Kenetlemeli Evirici Modeli	72
5.2.3 Kontrol Ünitesi	74
5.2.3.1 Da-Hat Gerilimi Kontrolü	74
5.2.3.2 Şebeke Gerilim Kontrolü	76
5.2.3.3 Akım Denetleyici	76
5.2.3.4 V_d ve V_q değerlerinin abc eksenine dönüştürülmesi	77
5.2.3.5 Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM)	79
5.2.4 D-STATKOM İçin Bulanık PI Denetleyici Tasarımı.....	81
5.2.4.1 25 Kural Tabanlı Bulanık PI Denetleyici	82
5.2.4.2 49 Kural Tabanlı Bulanık PI Denetleyici	84
6. BULGULAR	87
6.1 OBN Gerilimin Düzenlemesi İçin Simülasyon Sonuçları	87
6.1.1 D-STATKOM'suz Simülasyon Sonuçları.....	88
6.1.2 Klasik PI Denetleyicili D-STATKOM Simülasyon Sonuçları.....	89

6.1.3 25 Kural Tabanlı Bulanık PI Denetleyicili D-STATKOM Simülasyon Sonuçları	92
6.1.4 49 Kural Tabanlı Bulanık PI Denetleyicili D-STATKOM Simülasyon Sonuçları	94
6.1.5 Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması	97
6.2 Yük Kompanzasyonu İçin Simülasyon Sonuçları	99
7. TARTIŞMA ve SONUÇ	102
8.KAYNAKLAR.....	104
ÖZGEÇMİŞ.....	109

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Φ	Manyetik akı (wb)
λ	Akı bağıntısı
f	Frekans (Hz)
n	Devir sayısı (devir/dakika)
p	Senkron generatörde çift kutup sayısı
E	Elektro motor kuvvet (Volt)
V	Generatör çıkışındaki terminal gerilimi (Volt)
w	Açısal hız (rad/sn)
K_w	İndirgeme faktörü
X_s	Generatör stator sargıları endüktif reaktansı (Ω)
I_a	Generatör a fazı akımı (Amper)
$P_{3\phi}$	Üç fazın toplam aktif gücü (Watt)
Δ	E ile V arasındaki açı farkı (derece)
S	Görünür güç (VA)
P	Aktif güç (Watt)
Q	Reaktif güç (Var)
S	Görünür güç (VA)
$\cos\phi$	Güç faktörü
X_L	Endüktif reaktans (Ω)
Z	Empedans (Ω)
R	Direnç (Ω)
θ	V ile I arasındaki açı farkı (derece)
I_P, I_Q	Aktif ve reaktif akımlar (Amper)
V_{Mod}	D-STATKOM evirici çıkış gerilimi (Volt)
V_{Hat}	D-STATKOM ortak bağlantı noktası gerilimi (Volt)
δ	V_{Hat} ve V_{Mod} arasındaki faz kayma açısı (derece)
I_c	D-STATKOM akımı (Amper)
V_{DA}	DA-hat gerilimi (Volt)
I_{cp}, I_{cq}	D-STATKOM Aktif ve reaktif akımları (Amper)
V_{ff}	Fazlar arası gerilim değeri (Volt)
M_{Bek}	D-STATKOM bekleme durumundaki modülasyon indeksi
V_{ak}	Evirici giriş gerilimi harmonik bileşeni
k	Harmonik bileşenin derecesi
X_R	Bağlantı reaktörünün endüktif reaktansı (Ω)
L_R	Bağlantı reaktörünün endüktansı (Henri)
ΔV_R	Bağlantı reaktörü üzerindeki maksimum gerilim düşümü(Volt)
A_{ii}	Üçgen kontrol dalga şeklinin genliği
f_t	Üçgen dalga şeklinin frekansı (Hz)
X_{Rpu}	Bağlantı reaktörünün per-unit cinsinden değeri (pu)
X_{Rbaz}	Bağlantı reaktörünün baz değeri (Ω)
M_{Mak}	Modülasyon indeksinin alacağı en büyük değer
X_c	DA-hat kondansatörünün kapasitif reaktansı (Ω)
R_v	DA-hat kondansatörü maksimum gerilim dalgalanma faktörü

Simgeler

I_{ck}	Kondansatör akımının harmonik bileşeni
V_{DA_Mak}	Kondansatör üzerindeki maksimum gerilim artışı (Volt)
V_{DA_0}	Kalıcı durum <i>DA-hat</i> gerilimi (Volt)
$\dot{I}_c(t)$	Kondansatör üzerinden geçen ani akım (Amper)
ΔV_{DA}	<i>DA-hat</i> gerilimi dalgalanması (Volt)
C_{DA}	<i>DA-hat</i> kondansatörünün kapasitesi (Farad)
V_{DA_Min}	<i>DA-hat</i> geriliminin alacağı minimum değer (Volt)
k	Kondansatör değeri belirleme faktörü
V_{fn}	Faz nötr arası gerilim değeri (Volt)
I_f	D-STAKOM bir faz akımı (Amper)
a	Aşırı yüklenme faktörü
M_a	Genlik modülasyon oranı
A_a, A_t	Referans ve taşıyıcı sinyal genliği
i_d, i_q, i_0	Akımın dq0 bileşenleri
K_d, K_i	Oransal ve türev sabiti
V_G	Gerilimin genliği
V_d, V_q, V_0	Gerilimin dq0 bileşenleri
V_{DA_ref}	<i>DA-hat</i> geriliminin referans değeri (Volt)
I_{sd}, I_{sq}	D-STATKOM akımlarının dq bileşenleri
I_{yd}, I_{yq}	Yük akımlarının dq bileşenleri
$e, \Delta e$	Hata ve hatanın değişimi
$u, \Delta u$	Çıkış ve çıkışın değişimi
x	Bulanık çıkarım sisteminde birinci düğüm girişi
y	Bulanık çıkarım sisteminde ikinci düğüm girişi
μ	Bulanık çıkarım sisteminde üyelik fonksiyonunun derecesi
L	Hat uzunluğu (m)
C_f	Pasif filtre kondansatör değeri (Farad)
T_s	Örnekleme zamanı (saniye)
<i>DA-hat</i>	Evirici kısmı doğru akım barası
θ	Hat gerilimi beraberlik açısı
f_s	Anahtarlama frekansı

Kısaltmalar

FACTS	Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri / Flexible AC Transmission Systems
LFC	Yük Frekans Kontrol / Load Frequency Control
AVR	Otomatik Gerilim Düzenleyici / Automatic Voltage Regulator
AA	Alternatif Akım
DA	Doğru Akım
STATKOM	Statik Senkron Kompanzatör / Static synchronous Compensator
D-STATKOM	Dağıtım Statik Senkron Kompanzatör
VSC	Gerilim Kaynak Konvertörü / Voltage Source Converter
SSSC	Statik Senkron Seri Kompanzatör / Static Synchronous Series Compensator
SVC	Statik Var Kompanzatör / Static Var Compensator

Kısaltmalar

TCSC	Tristör Kontrollü Seri Kapasitör / Thyristor Controlled Series Capacitor
TCPST	Tristör Kontrollü Faz Kaydırmalı Transformatör / Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer
IPFC	Hatlar Arası Güç Akış Kontrolü / Interline Power Flow Controller
UPFC	Birleşik Güç Akış Kontrolü / Unified Power Flow Controller
SVS	Statik Var Sistemler
TCR	Tristör Kontrollü Reaktör / Thyristor Controlled Reactor
TSC	Tristör Anahtarlama Kondansatör / Thyristor Switched Capacitor
DVR	Dinamik Gerilim Düzenleyici / Dynamic Voltage Restorer
UPQC	Birleşik Güç Kalitesi Düzenleyici / Unified Power Quality Conditioner
APF	Aktif Güç Filtresi / Active Power Filter
UPS	Kesintisiz Güç Kaynağı / Uninterruptable Power Supply
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu / Pulse-Width Modulation
SPWM	Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu
CPS-SPWM	Faz Kaydırmalı Taşıyıcıya Sahip Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu / Carrier Phase-shifted SPWM
PI	Oransal+İntegral Denetleyici
PID	Oransal+İntegral+Türev Denetleyici
PLL	Faz Yakalama Döngüsü / Phase Locked Loop
OBN	Ortak Bağlantı Noktası

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Üç faz iki kutuplu senkron generatörün temel yapısı.....	10
Şekil 2.2 Senkron makinenin bir faz elektrik eşdeğer devresi	12
Şekil 2.3 Senkron makinenin sınırsız şebeke hattına bağlantısı	12
Şekil 2.4 Sabit güçte alan akımının değişimi	13
Şekil 2.5 Güç üçgeni (aktif, reaktif ve görünür güçler arasındaki ilişki)	14
Şekil 2.6 RL devrede Akım, Gerilim ve Faz Açısı	16
Şekil 2.7 İleri ve geri reaktif güç belirtimi	17
Şekil 2.8 Genel güç faktörü düzeltme üçgeni	18
Şekil 2.9 Hat ve bara bağlantılı yüksek gerilim hat reaktörleri	22
Şekil 2.10 Hat ve transformatör bağlantılı reaktörleri	22
Şekil 2.11 Endüstriyel tesislerde güç faktörünün düzeltilmesi	24
Şekil 2.12 Kondansatör grublarının bağlantıları	25
Şekil 2.13 Ters yönde paralel bağlı tristör çifti	29
Şekil 2.14 Tristör kontrollü reaktör	30
Şekil 2.15 Tristör anahtarlama kondansatör yapısı	31
Şekil 3.1 STATKOM temel diyagramı (a) Güç devresi (b) Eşdeğer devresi	33
Şekil 3.2 Akım kaynaklı konvertörle gerçekleştirilen D-STATKOM yapısı.....	36
Şekil 3.3 Gerilim kaynaklı konvertörle gerçekleştirilen D-STATKOM yapısı	36
Şekil 3.4 Gerilim kaynak eviricili D-STATKOM yapısı	37

Şekil 3.5 D-STATKOM reaktif güç üretmekte iken gerilim ve akım dalga şekilleri ve fazör diyagramı	38
Şekil 3.6 STATKOM reaktif güç tüketmekte iken gerilim ve akım dalga şekilleri ve fazör diyagramı.....	38
Şekil 3.7 Farklı modülasyon indeksi için kompanzatörün çıkış gerilim dalga şekli.....	39
Şekil 3.8 Üç fazlı üç seviyeli diyot kenetlemeli invertör yapısı.....	42
Şekil 3.9 Tek Kutuplu SPWM.....	49
Şekil 3.10 Faz Sıralı Modülasyon	49
Şekil 3.11 Ters Faz Sıralı PWM.....	50
Şekil 3.12 Üç seviyeli faz kaydırmalı taşıyıcıya sahip sinüzoidal PWM.....	51
Şekil 3.13 Eksenlerin şekilsel gösterimi.....	53
Şekil 3.14 Faz yakalama döngüsünün (PLL) blok diyagramı	54
Şekil 3.15 D-STATKOM kontrol blok diyagramı	56
Şekil 3.16 D-STATKOM ile yük kompanzasyonu kontrol şeması.....	58
Şekil 4.1 Üçgen, yamuk, çan, sigma ve tekli üyelik fonksiyonları	61
Şekil 4.2 Bulanık mantık denetleyicinin genel yapısı	61
Şekil 4.3 Mamdani bulanık çıkarım sistemi	63
Şekil 4.4 Sugeno bulanık çıkarım sistemi	64
Şekil 4.5 Bulanık PI denetleyici	65
Şekil 4.6 Bulanık sistem giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları	66

Şekil 5.1 D-STATKOM'un şebeke hattına bağlantısı ve kontrol şeması ile genel görünümü.....	69
Şekil 5.2 Güç sisteminin Matlab/Simulink modeli	71
Şekil 5.3 Bağlantı reaktörü, üç seviyeli evirici ve kontrol ünitesi ile D-STATKOM Matlab/Simulink Modeli.....	73
Şekil 5.4 Diyot kenetlemeli evirici Matlab/Simulink modeli	73
Şekil 5.5 PLL, abc-dq0 eksen dönüşümleri ve denetleyiciler bloğu	74
Şekil 5.6 Şebeke gerilimi, yük ve D-STATKOM akımlarının abc ekseninden dq0 eksenine dönüştürülmesi.....	75
Şekil 5.7 <i>DA-hat</i> geriliminin, referans değerle karşılaştırılarak I_{d_ref} akımının elde edilmesi.....	75
Şekil 5.8 Gerilim genliğinin referans değerle karşılaştırılması ve PI denetleyici ile referans I_q değerinin elde edilmesi	76
Şekil 5.9 Referans akımlar ile D-STATKOM akımlarının karşılaştırılması ve V_d , V_q değerlerinin elde edilmesi.....	77
Şekil 5.10 Matlab/Simulink ortamında modülasyon indeksi ve faz açısı δ 'nın oluşturulması.....	78
Şekil 5.11 Matlab/Simulink ortamında modülasyon indeksi ile abc eksenine dönüşüm	79
Şekil 5.12 Matlab/Simulink ortamında θ 'nın oluşturulması	79
Şekil 5.13 θ 'nın bir periyotluk anahtarlama oranı ile çarpımı ve üçe çoklanması	80
Şekil 5.14 Matlab/Simulink ortamında düz ve 180° ters taşıyıcı üçgen sinyallerin oluşturulması.....	80

Şekil 5.15 Taşıyıcı üçgen sinyallerle referans sinyallerin karşılaştırılarak anahtarlama durumlarının elde edilmesi	80
Şekil 5.16 Matlab/Simulink durum pals kodlayıcı modeli.....	81
Şekil 5.17 Bulanık PI denetleyici tasarım ekranı	82
Şekil 5.18 25 kural tabanı için hata ve hata değişiminin üyelik fonksiyonları	83
Şekil 5.19 25 kural tabanı için çıkış üyelik fonksiyonları	83
Şekil 5.20 49 kural tabanı için çıkış üyelik fonksiyonları	84
Şekil 5.21 49 kural tabanı için hata ve hata değişiminin üyelik fonksiyonları	85
Şekil 5.22 Bulanık PI denetleyici ile AA gerilim denetleyicinin Matlab/Simulink modeli	85
Şekil 5.23 Bulanık PI denetleyici ile <i>DA-hat</i> gerilim denetleyicinin Matlab/Simulink modeli	85
Şekil 5.24 Bulanık PI denetleyici ile akım denetleyicinin Matlab/Simulink modeli	86
Şekil 6.1 D-STATKOM'suz p.u. biriminde OBN gerilim değeri	88
Şekil 6.2 D-STATKOM'suz OBN <i>a</i> faz geriliminin volt biriminde anlık değeri.....	89
Şekil 6.3 PI denetleyicili D-STATKOM ile OBN p.u. biriminde gerilim değeri	90
Şekil 6.4 PI denetleyicili D-STATKOM ile OBN <i>a</i> fazının volt biriminde anlık gerilim değeri	90
Şekil 6.5 Klasik PI denetleyicili D-STATKOM ile <i>DA-hat</i> gerilimindeki değişim	91
Şekil 6.6 Klasik PI denetleyicili D-STATKOM modülasyon indeksi değişimi	92
Şekil 6.7 Klasik PI denetleyicili D-STATKOM evirici çıkış gerilim değeri	92

Şekil 6.8 25 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM ile OBN p.u. biriminde gerilim değeri.....	93
Şekil 6.9 25 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM ile OBN <i>a</i> fazının volt biriminde anlık gerilim değeri	94
Şekil 6.10 25 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM <i>DA-hat</i> gerilimindeki değişim	94
Şekil 6.11 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM ile OBN p.u. biriminde gerilim değeri	95
Şekil 6.12 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM ile OBN <i>a</i> fazının volt biriminde anlık gerilim değeri	96
Şekil 6.13 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM <i>DA-hat</i> gerilimindeki değişim	96
Şekil 6.14 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM; yük ve D-STATKOM <i>a</i> fazı akımlarının p.u. biriminde anlık değerleri.....	97
Şekil 6.15 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM evirici çıkış gerilimi	97
Şekil 6.16 Klasik PI denetleyicili D-STATKOM ile yük kompanzasyonu	99
Şekil 6.17 25 Kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM ile yük kompanzasyonu	100
Şekil 6.18 49 Kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM ile yük kompanzasyonu	100
Şekil 6.19 Yük kompanzasyonunda denetleyici çeşitlerine göre D-STATKOM <i>DA-Hat</i> gerilimindeki tepkiler.....	101

ÇİZELGELAR DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1 Üç seviyeli diyot kenetlemeli invertör gerilim seviyelerine uygun anahtarlama durumları	41
Çizelge 4.1 Bulanık PI için kural tabanı	65
Çizelge 5.1 Sistem Parametreleri	68
Çizelge 5.2 25 kural tabanlı bulanık PI denetleyici için kural tablosu.....	83
Çizelge 5.3 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyici için kural tablosu.....	84
Çizelge 6.1 D-STATKOM parametreleri	87
Çizelge 6.2 Klasik PI denetleyicilerin kazanç değerleri.....	89
Çizelge 6.3 Bozucu etkilere karşı D-STATKOM'un OBN gerilim değerine göre tepki süreleri	98
Çizelge 6.4 Bozucu etkilere karşı D-STATKOM'un <i>DA-hat</i> gerilim değerine göre tepki süreleri	98

1. GİRİŞ

Elektrik güç sistemleri; üretim, iletim ve dağıtım olmak üzere üç temel bölümden oluşmaktadır. Ülkemizde genellikle kömür ve akarsu kaynaklarının olduğu bölgelere büyük güçlü elektrik üretim tesisleri kurulmaktadır. Elektrik enerjisi üretildiği bölgeden tüketim yerlerine enerji iletim hatları ile aktarılmaktadır. Yerleşim ve sanayi bölgelerinden oluşan tüketim yerlerinde elektrik enerjisi dağıtım hatları ile tüketicilere dağıtılmaktadır.

Elektrik enerjisi üretildiği yerden tüketicilere ulaştığında güç kalitesini koruması gerekmektedir. Elektrik güç kalitesi; sabit frekansta, sabit gerilim büyüklüğünde ve kesintisiz olmasına bağlıdır. Bunun yanında yarı iletken teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak dağıtım bölgelerinde lineer olmayan yüklerden kaynaklanan harmonik bozulmalarda kendini göstermeye başlamıştır.

Elektrik üretim tesislerinde bir güç sistemi için üretimin en uygun tarifiesi ve normal çalışma şartlarının oluşturulması sağlanmaktadır. Büyük enterkonnekte sistemlerin kontrolünde, bireysel generatörlerin kontrolü için bazı metotlar geliştirilmiştir ve bu metotlar modern enerji kontrol merkezlerinde çok önemli roller oynamaktadır. Enterkonnekte güç sistemlerinde, yük frekans kontrol (LFC) ve otomatik gerilim regülatör (AVR) ekipmanları her generatör için kurulmaktadır. *Yük frekans kontrol* (LFC) döngüsü frekansı ve aktif gücü kontrol etmekte ve *otomatik gerilim regülatör* (AVR) döngüsü ise reaktif gücü ve gerilimin genliğini kontrol etmektedir (Saadat 1990).

Reaktif gücün üretimi, tüketimi ve sistem içerisindeki tüm seviyelerde reaktif gücün akışı kontrol edilerek gerilim seviyelerinin kontrolü yapılmaktadır. Üretim birimleri gerilim kontrolünün temel araçlarını sağlamaktadır; otomatik gerilim regülatörleri (AVR) generatör terminallerinde belirli bir gerilim seviyesini korumak için generatörün alan uyarımını kontrol etmektedir. Ek olarak kullanılan araçlar genellikle sistem gerilim düşümünü kontrol etmek için kullanılmaktadır (Kundur 1994).

Gerekli sınırlar içerisinde gerilim değerini koruma problemi bazı unsurlar ile karmaşık

bir hal almaktadır. Bu unsur, çok sayıda yükün çok sayıda üretim biriminden oluşan güç kaynağından beslenmesidir. Yüklerdeki değişim, iletim sisteminin reaktif güç gereksinimini değiştirmektedir. Reaktif güç uzun mesafelerde iletilebilir olamayacağına göre, sistem aktif güç dengesi boyunca dağıtık özel cihazlar kullanarak gerilim kontrolünü gerçekleştirmek zorundadır (Kundur 1994).

Elektrik güç iletim sistemlerinde, kondansatör ve reaktörler reaktif güç kontrolü için kullanılan pasif devre elemanlarıdır. Bunlar mekaniksel olarak anahtarlanarak ya da sabit bağlantıları ile reaktif güç kontrolüne katkı sağlamaktadırlar. Uygulamada reaktörler ve kondansatörler mekanik anahtarlama ile değişen koşullara yavaş tepki için geliştirilmiş olsa da VAR düzenleyiciler daha hızlı iyileştirme sağlamaya ihtiyaç duymaktadır. Son yıllarda hem seri hem de paralel uygulamalar için statik FACTS (Esnek AA İletim Sistemleri) denetleyiciler dinamik kompanzasyon için geniş bir çeşitlilik sunmaktadır.

Dağıtım sistemlerinde mekaniksel anahtarlama kondansatör ve sabit kondansatörler reaktif güç kompanzasyonu için önemli bir rol oynamaktadır. Ancak son zamanlarda güç elektroniğindeki gelişmelere paralel olarak güç elektroniği tabanlı özel güç aygıtları olarak tanımlanan VAR kompansatörler reaktif güç kompanzasyonunda daha fazla rol oynamaya başlamıştır.

Dağıtım statik senkron kompanzatör (D-STATKOM) dağıtım noktalarında reaktif güç üreterek yada tüketerek gerilim kararlılığına katkıda bulunan özel bir güç aygıtıdır. D-STATKOM; gerilim düzenleyici, yük kompanzatörü ve aktif güç filtresi olarak kullanılabilir.

İlk olarak Japonyada 1991 yılında 4,5 kV, 3000 A'lık GTO (gate kesimli tristör) elemanların kullanımı ile ± 80 MVA gücünde bir STATKOM geliştirilmiştir. 1995 yıllarının sonlarında Amerika Birleşik Devletlerinin Tennessee Valley Authority (TVA) eyaletinin sullivan alt istasyonunda GTO (4.5 kV ve 4000 A) temelli ± 100 MVA gücünde bir STATKOM tasarlanmıştır. Japonyada 1991 yılında geliştirilen STATKOM'un en önemli amacı, günlük yük değişimlerine karşı hat gerilimini 171

kV'ta regüle ederek transformatörler üzerindeki kademe değıştircilerin görevini en aza indirmektir (Padiyar 2007).

Liang ve Nwankpa (1999) bir takım özdeş H-köprü gerilim kaynak invertörlerin basamaklı sıralanmasından oluşan STATKOM tipi önermişlerdir. Önerilen STATKOM'un her bir gerilim kaynak invertörünün anahtarlama elemanlarını kontrol etmek için faz kaydırmalı sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu (SPWM) kullanılmıştır. Bu çalışmada geliştirilen bir yöntem ile *DA-hat* gerilim dalgalanması nedeniyle oluşan STATKOM akım harmonikleri yok edilmektedir. Önerilen STATKOM daha az sayıda özdeş gerilim kaynak invertörüne ihtiyaç duymakta ve reaktif güç değışimlerine son derece hızlı bir tepki verme yeteneğine sahiptir.

Sensarma, Padiyar ve Ramanarayanan (2001) tarafından telafi gerilim dalgalanmaları için D-STATKOM analiz ve performans değerdendirmesi yapılmıştır. Bu çalışmada, bir OBN geriliminin telafi problemi, bir dağıtım hattının sonunda incelenmiştir. Sistemin doğrusallaştırılmış analizi ve deneysel sonuçlara dayanarak 8 kVA STATKOM için şunlar söylenmiştir. Dağıtım hattının şönt kapasitansları ihmal edildiği zaman, sabit sistem frekansı için transfer fonksiyon skalar bir kazançtır. Doğrusal bir gerilim kontrol edici türetilmiş bir model üzerinden tasarlanmıştır. Deneysel sonuçlar, analitik tahminlere yakından uymaktadır. STATKOM yük ile oluşan gerilim düşüşünü yok etmek için kullanılmıştır. kVA seviyesindeki etkili yükün % 25 artırılması ile STATKOM ile gerilim çökmesi % 39 oranında azaltılabilmektedir.

Ghosh ve Ledwich (2003) güçsüz AA sistemlerde D-STATKOM ile yük kompanzasyonu çalışması yapmışlardır. D-STATKOM'un kaynaktan uzakta bir yük ile birleşik olduğu düşünülmüştür. D-STATKOM'un sert bir kayanağa bağı olduğu düşünülürse, ortak bağlantı noktasında kaynak akım ve geriliminde bozulmalar olacağını D-STATKOM'un çalışması göstermektedir. D-STATKOM'a paralel bağlanan bir kondansatör filtresi akımın yüksek frekans bileşeninin geçmesine izin vererek bu durumu önlemektedir. Ancak bu gibi durumlarda histeresis kontrol gibi standart kontroller kontrol sorunları ürettiklerinden dolayı elverişli değildirler. Yapılan çalışmada, bu sorunu çözümleyici yeni bir anahtarlama kontrol şeması önerilmektedir.

TavakoliBinaa, Eskandarib ve Panahloub (2004) tarafından Tahran elektrik dağıtım sisteminin Khoshnoodi alt istasyonu için ± 250 kVAr D-STATKOM tasarımı ve kurulumunu yapmışlardır. Bu prototip kurulum İran'da ilk kez IGBT tabanlı teknoloji göstermenin yanında pratik dağıtım uygulamaları için ekipman canlılığını kanıtlama yolunda önemli bir adımdır. Tasarım yöntemi güç devresi ve kontrol ünitesi olmak üzere iki parçada detaylandırılır. Yazarlar bu çalışmalarında güç devresi için DA kondansatör, AA filtre ve endüktans seçiminin değişik yöntemlerini ve kontrol ünitesi içinde çeşitli kontrol bloklarını sunmuşlardır. Çalışmanın deneysel sonuçları D-STATKOM için tatmin edici bir çalışma ve iyi bir performans göstermektedir.

Moursi ve Sharaf (2005) tarafından gerilim regülasyonu ve reaktif güç kompanzasyonu için 48-Pals VSC STATKOM ve SSSC için bir kontrol edici çalışması yapmışlardır. Elektrik şebeke ağlarında gerilim kararlılığı ve reaktif güç kompanzasyonunu birleştirmek için 48 palslik GTO tristörlü gerilim kaynak konvertöründen oluşan bir model üzerine temellendirilmiş statik senkron seri kompanzatör (SSSC) ve statik senkron kompanzatörlerin (STATKOM) her ikisi içinde kontrol şemasının dinamik çalışması araştırılmıştır. Önerilen kontrol şemaları dijital simülasyonlarla doğrulanmıştır. Yapılan çalışma, minimum faz yakalama döngü gecikme zamanlaması, minimum salınım davranışı ve hızlı bir kontrol edebilirlik ile sonuçlanmaktadır.

Bernet, Krug, Fazel ve Jalili (2005) tarafından seri bağlı H-Köprü çok seviyeli, nötr nokta bağlantılı ve kondansatör kenetlemeli 4.16 kV'luk üç farklı konvertör tasarımı ve karşılaştırılması yapılmıştır. Bu karşılaştırmada kondansatör kenetlemeli ve 9 seviye seri bağlı H-köprü konvertörlerin yüksek anahtarlama frekanslarında daha cazip olduğu sonucuna varmışlardır.

Eldery, El-Saadany ve Salama (2006) tarafından darbe genişlik modülasyon temelli D-STATKOM için kaymalı mod kontrol edici çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada darbe genişlik modülasyon kontrollü bir gerilim kaynak konvertörü kullanan D-STATKOM'un iyi bir kontrolü için bir denetleyici tasarlanmıştır. Kaymalı mod kontrol ünitesinde, doğrusal olmayan sistemi kontrol altında tutmak için Lyaponov kararlılık metodu uygulanmıştır. Kaymalı mod yaklaşım, yüksek dereceli sistemi birinci

dereceden sisteme dönüştüren bir yaklaşım metodudur. Çok basit ve sağlam bir kontrol algoritması uygulandığı sonucuna varmışlardır.

Gupta ve Ghosh (2006) D-STATKOM uygulamalarında kullanılan bir invertörün kaymalı mod kontrolünün frekans domenii karakteristiğı çalışması yapmışlardır. Önerilen taşıyıcı temelli tasarımın kullanımı ile dengesiz üç fazlı bir dağıtım sisteminin yük hat gerilimi kontrol edilmektedir. Çalışma sonuçları EMTDC / PSCAD simülasyon programı kullanılarak doğrulanmıştır.

Bongiorno ve Svensson (2007) şönt bağı gerilim kaynak konvertörü kullanarak gerilim düşmelerini azaltma çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada, hassas işlemler için şebeke konvertörü sunulmuştur.

Çetin (2007) tarafından yapılan tez çalışmasında reaktif güç kompanzasyonu ve harmonik filtreleme amacıyla kullanılacak gerilim kaynaklı çevirgece dayalı STATKOM'un tasarımı ve gerçekleştirilmesi yapılmıştır.

Aksoy ve Yalçınöz (2007) tarafından bulanık mantık kontrollü statik senkron kompanzatörlerin tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Yapılan çalışmada STATKOM önce PI denetleyiciyle daha sonra ise bulanık mantık denetleyici ile kontrol edilerek iki baralı dinamik yüklü sistem için, STATKOM'suz, PI kontrollü STATKOM'lu ve bulanık mantık kontrollü STATKOM'lu durumların simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

Deniz, Çöteli, Tuncer ve Dandil (2008) üç seviyeli kaskat evirici kullanan D-STATKOM ile gerilim regölasyonu çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada bir dağıtım sistemi barasında meydana gelen gerilim yükselmeleri ve düşmelerine çözüm olabilecek üç seviyeli kaskat evirici kullanan Dağıtım STATKOM'u (D-STATKOM) kullanılmıştır. Bu amaçla bir D-STATKOM “*MATLAB-Simulink-SimpowerSystems*” kullanılarak benzetimi yapılmış ve kaynak gerilimi belli zaman aralıklarında değiştirilerek D-STATKOM'un bağı bulunduğı baranın gerilimini referans değerde tutma başarısı gözlemlenmiştir.

Chang ve Yeh (2009) tarafından dengesiz yüklerin hızlı yük kompanzasyonu için D-STATKOM tasarımı ve gerçekleştirilmesi çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada elektrik güç dağıtım sistemlerinde dengesiz yüklerin hızlı yük kompanzasyonu için bir dağıtım senkron kompanzatör (D-STATKOM) önerilmiştir. Gerekli olan hızlı bir cevaplama için, yeni bir kompanzasyon şeması türetilmiş ve kullanılmıştır. Bu çalışmada simetrik bileşenler metodu ile D-STATKOM'un kompanzasyon şeması elde edilmektedir.

Ertay ve Aydoğmuş (2009) STATKOM ile bir enerji iletim sisteminde gerilim kontrolü çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada bir enerji iletim sistemindeki dağıtım barasında, yük değişimlerine karşı STATKOM ile bara geriliminin kontrolü yapılmıştır.

Çoteli, Dandil, Ata (2010) bulanık PI akım kontrollü D-STATKOM çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada D-STATKOM'un d-q eksen akımlarının kontrolü için bulanık PI denetleyici önermektedirler.

Deniz (2010) tarafından yapılan tez çalışmasında uzay vektör darbe genişlik modülasyonu kullanan üç seviyeli H-köprü evirici tabanlı D-STATKOM'un tasarımı ve gerçekleştirilmesini yapmıştır. Yapılan çalışmada D-STATKOM'un farklı çalışma durumlarındaki performansı dolaylı akım denetim ve faz açısı denetim yöntemleri kullanılarak incelenmiştir.

Tosun, Öztürk, Yalçın, Döşoğlu ve Güvenç (2011) güç sisteminde SVC ve STATKOM denetleyici etkilerinin incelenmesi çalışmasını yapmışlardır. Elde edilen sonuçlardan SVC ve STATKOM denetleyicilerinin, bir güç sisteminin statik yüklenme sınırlarını yükselttiği görülmüştür. Böylece gerilim çökmesi olayına karşı sistemin güvenilirliği arttığı ifade edilebilir. Bu sistemde, SVC ile aktif güç iletim sınır değeri 2.4365pu'den 3.0019 pu'a artarken, STATKOM ile ise aktif güç iletim sınır değerine 3.0792 pu olarak ulaştığı görülmüştür.

Luo, Fang, Xu, Peng, Wu ve Fang (2011) akım sensörsüz yeni kontrol stratejisi ve mühendislik uygulaması çalışmasını yapmışlardır. Dengesiz dağıtım şebekelerinde D-

STATKOM'un negatif bileşen eşdeğer devre analizine göre, araştırmacılar dağıtım barasındaki gerilimi dengeleme ve regüle etmek için bir yeni kaskat döngü kontrol stratejisi önermektedirler. Anlık güç dengeleme algoritmasına dayalı önerilen kontrol stratejisi verilmiştir ve negatif bileşen gerilim kontrol döngüsü pozitif bileşen gerilim döngüsü ile paralel olarak tanıtılmıştır. Gerilimi regüle etmek üzere pozitif bileşen gerilim döngüsü ve gerilimi dengelemek için ise negatif bileşen gerilim kontrol devresi kullanılmıştır. D-STATKOM'un çıkış gerilim komutu doğrudan güç dengesi denkleminde dayanan basit cebirsel algoritma ile elde edilir. Ek olarak akım sensörlerine ihtiyaç olmadığından dolayı uygulama maliyeti azaltılabilir. Önerilen yeni kontrol stratejisinin uygulanabilirliği, geçerliliği ve doğruluğu için simülasyon ve endüstriyel uygulamaların sonuçları sunulmaktadır. Önerilen kontrol yöntemi Çin'in Hunan eyaletinde Lianyuan demir ve çelik şirketinde ± 300 kVAr kapasiteli D-STATKOM üzerinde uygulanmıştır. Çalışma sonuçları güç faktörünün yükseltilmesi yanında gerilim dengelenmesinde de iyi performans gösterdiğini kanıtlamaktadır.

Rao, Dash ve Rajasekaran (2011) D-STATKOM temelli PI ve Bulanık Mantık Denetleyicinin geçici tepkisi çalışmasını yapmışlardır. Bu çalışmada D-STATKOM DA-hat geriliminin kontrolü bulanık mantık denetleyici ile denetlenmiştir. Yapılan çalışmadan önerilen bulanık mantık denetleyicisinin hızlı değişen yükler için daha hızlı geçici yanıt verdiği görülmektedir.

Panda ve Suresh (2012) üç faz transformatör kullanarak tek DA kaynaklı kasket bağlı çok seviyeli invertör üzerinde araştırmaları olmuştur. Yapılan çalışmada DA kaynakların azaltılması ile çok seviyeli kasket invertörün çalışma performansı ve teknik çalışmasının şekillendirilmesi sunulmuştur.

Karmiris, Tsengenes ve Adamidis (2012) üç faz üç seviyeli kondansatör kenetlemeli invertör kullanarak gerilim düşüşünü hafifletme ve harmonik akımları eleme için çok fonksiyonlu kontrol şeması çalışması yapmışlardır. Invertörün mevcut kalitesinin daha da iyileştirilmesi amacıyla örnek desen üretimi için CPS-SPWM anahtarlama tekniği kullanmışlardır.

D-STATKOM'un etkinliği bünyesinde bulunan evirici için anahtarlama sinyalleri üreten kontrol algoritmasına bağlıdır. D-STATKOM'un kontrol algoritması için araştırmacılar tarafından senkron referans eksen, anlık reaktif güç teoresi ve yapay zekâ temelli olmak üzere bir çok farklı matematiksel modellere dayalı kontrol algoritmaları önerilmiştir. Senkron referans çatı altında pq teorisine dayalı kontrol algoritması; AA gerilim denetleyici, *DA-hat* gerilimi denetleyici ve akım denetleyici olmak üzere üç denetleyiciden oluşmaktadır. Literatür taramasında sadece *DA-hat* gerilim denetleyicinin klasik PI yerine bulanık PI denetleyici kullanması ya da sadece akım denetleyicinin klasik PI yerine bulanık PI denetleyici kullanması önerilmiştir. Bu tez çalışmasında ise senkron referans çatı altında pq teorisine dayalı kontrol algoritmasındaki bütün denetleyiciler bulanık PI denetleyici kullanmıştır. Bulanık PI denetleyici 25 ve 49 kural tabanlı olmak üzere iki farklı kural tabanına göre tasarlanmıştır.

D-STATKOM 55 kVAr reaktif güç üretebilecek ya da tüketebilecek büyüklükte tasarlanmıştır. D-STATKOM'un evirici kısmı 3 seviyeli diyot kenetlemeli invertör yapısına sahip ve faz kaydırmalı taşıyıcıya sahip sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu ile sürülmüştür.

Tasarlanan D-STATKOM ilk olarak OBN gerilimi düzenlemesi için Matlab/Simulink ortamında modellenmiş ve klasik PI, 25 ve 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyicilerle simülasyonu yapılmıştır. Daha sonra D-STATKOM yük kompanzasyonu için Matlab/Simulink ortamında modellenmiş ve klasik PI, 25 ve 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyicilerle simülasyonu yapılmıştır. Farklı denetleyici yapılarında simüle edilen D-STATKOM sonuçlarından, denetleyici yapılarının performansları karşılaştırılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

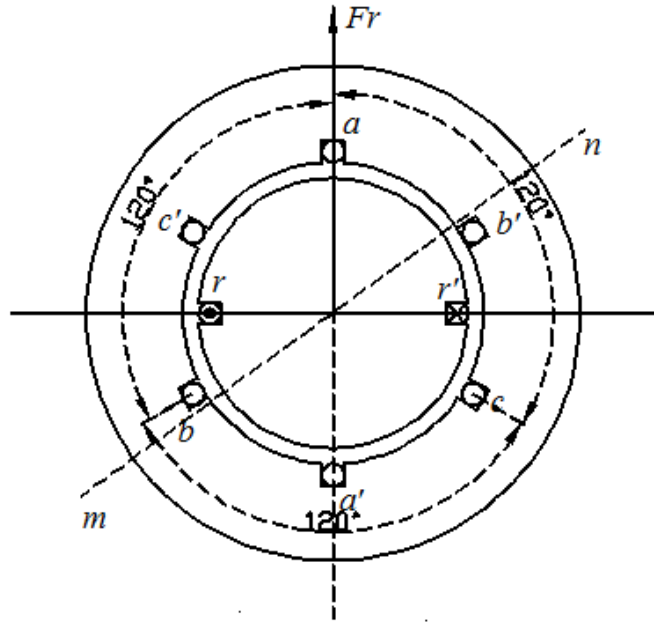
2.1 Üç Fazlı Senkron Generatör

Büyük ölçekli güç, alternatör olarak bilinen üç fazlı senkron generatörler ile üretilir. Bunlar buhar tribünleri, hidrolik tribünler ya da gaz tribünlerinin bir tanesi ile sürülürler. Stator diye adlandırılan sabit parça üzerine bobin sargıları yerleştirilir. Stator bobin sargıları üç fazlı dengeli gerilimin üretimi için tasarlanır. Rotor üzerindeki manyetik alanın oluşumu için generatör gücünün % 0,2- 3'ü aralığında bir küçük güce ihtiyaç vardır, bu güç generatör mili üzerine yerleştirilen ufak bir generatör sayesinde sağlanır. Rotor sürekli hızda ilk hareket ettirici tarafından sürülür ve rotorun alan devresi doğru akım tarafından harekete geçirilir. Senkron makinenin rotoru ile aynı mil üzerine monte edilmiş DA generatörünün parçaları ile kayış çemberler ve fırçalar arasından harekete geçirme olayı sağlanır. Ancak modern harekete geçirme sistemleri genellikle fırçasız uyartım diye bilinen çevirici doğrultuculu AA generatörleri kullanırlar (Saadat 1990).

2.1.1 Üç Fazlı Senkron Generatörlerde Gerilime Etki Eden Faktörler

Senkron generatörün gerilim üretmesi basit olarak iki kutuplu üç fazlı bir model üzerinden anlatılabilir (Şekil 2.1). Stator aa' , bb' ve cc' olmak üzere üç adet bobin grubu içermekte ve bunlar arasında 120° elektriksel açı bulunmaktadır. Rotor hareket ettirildiği zaman her kutbun hava aralığından akan manyetik akı oluşmakta (Φ) ve sürekli açısal bir hızda dönmektedir. Açısal hız; rotor mmk'nin eksen açısının pozisyonu ile bobin sargılarının değişiminin bağlantı akışıdır. “N” sarım sayısındaki bobin sargısı aa' için akı bağıntısı ($N \cdot \Phi$), $wt(açı)=0$ iken maksimum olacak ve $wt(açı) = \frac{\pi}{2}$ iken sıfır olacaktır. Bahsedilen dağıtılmış sargının akı bağıntısı (λ_a) açının (wt) kosinüs değerine göre değişecektir. Böylelikle bobin sargısı a 'nın akı bağıntısı;

$$\lambda_a = N \cdot \Phi \cdot \cos wt \text{ olacaktır.} \quad (2.1)$$



Şekil 2.1 Üç fazlı iki kutuplu senkron generatörün temel yapısı.

aa' bobin sargısı üzerinde indüklenen gerilim değeri faraday kanununa göre aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} e_a &= \frac{d\lambda}{dt} = w.N. \Phi . \sin wt \\ &= E_{\max} . \sin wt \end{aligned} \quad (2.2)$$

Burada;

$$E_{\max} = w.N. \Phi = 2 \pi f N \Phi$$

Bu yüzden, elde edilen gerilimin etkin değeri (rms)

$$E = 2 \pi . 0,707. f.N \Phi = 4,44 f. N. \Phi \quad (2.3)$$

Burada, f frekanstır ve birimi hertz'dir.

AA makine sargılarında, her fazın bobin sargıları, değişik oluklar içine dağıtılmaktadır. Değişik oluklar içinde indüklenen emk faz içinde değildir, fazör toplamaları onların sayısal toplamalarından düşüktür. Böylece sargı faktörü diye adlandırılan, indirgeme

faktörü K_ω ortaya çıkmaktadır. Üç fazlı sargıların çoğunda K_ω yaklaşık olarak 0,85–0,95 arasındadır. Böylelikle, bir dağıtılmış faz sargısı için üretilen gerilimin etkin değeri;

$$E = 4,44 K_\omega f N \Phi \text{ olur.} \quad (2.4)$$

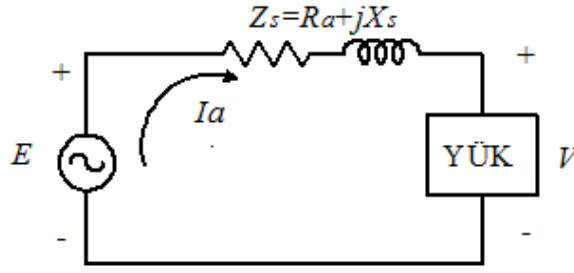
Sürekli hızda dönen rotor devrinin manyetik alanı stator sargıları içinde üç faz sinüzoidal gerilim üretir ve bu değer $\frac{2\pi}{3}$ radyan çarpanı ile değişmektedir. Stator sargıları üzerinde indüklenen gerilimin frekansı, rotor hızı ve makinenin sarımı ile belirlenebilen kutup sayısına bağlıdır. Stator geriliminin frekansı aşağıdaki formül ile bulunur (Oğuz 2007).

$$f = \frac{n \cdot p}{60} \quad (2.5)$$

Burada n devir/dakika biriminde rotor hızıdır, p ise çift kutup sayısıdır.

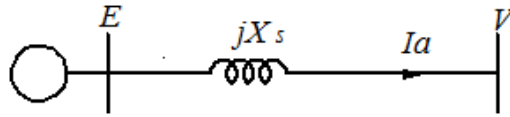
Senkron generatörün bir faz elektrik eşdeğer devresi çizilebilir (Şekil 2.2). Bu elektrik eşdeğer devrede E generatörün üretmiş olduğu elektro motor kuvveti, V generatörün çıkışındaki terminal gerilimini, I_a jenaratör a faz akımını, X_s generatör stator sargı reaktansını, R_a ise generatör stator sargı direncini temsil etmektedir. Generatör yüksüz durumda iken E ile V arasında bir değer farkı yoktur. Generatör yüklendiği zaman değişik yüklenmelere göre E ile V arasındaki değişiklikler gösteren bir fark oluşmaktadır. Bu fark generatör sargılarının empedansı üzerinden geçen akımla oluşan gerilim düşümünden kaynaklanmaktadır. E ile V arasındaki ilişki, stator omik direnci ihmal edilirse aşağıdaki gibi olur (Saadat 1990).

$$E = V + jX_s I_a \quad (2.6)$$



Şekil 2.2 Senkron makinenin bir faz elektrik eşdeğer devresi (Saadat 1990).

Büyük enterkonnekte elektrik güç şebekelerine en çok senkron generatörler bağlanmaktadır (Şekil 2.3). Buradaki şebekeler; bağlantı noktasındaki sabit büyüklükteki bir sistem gerilimi, faz açısı ve frekans gibi önemli karakteristiklere sahiptir. Böyle bir güç sistemi içerisindeki bir nokta sonsuz bir hat olarak kabul edilir. Generatörün çalışma durumları içerisindeki değişimlerinden generatör hattındaki gerilim değeri değişmemektedir.

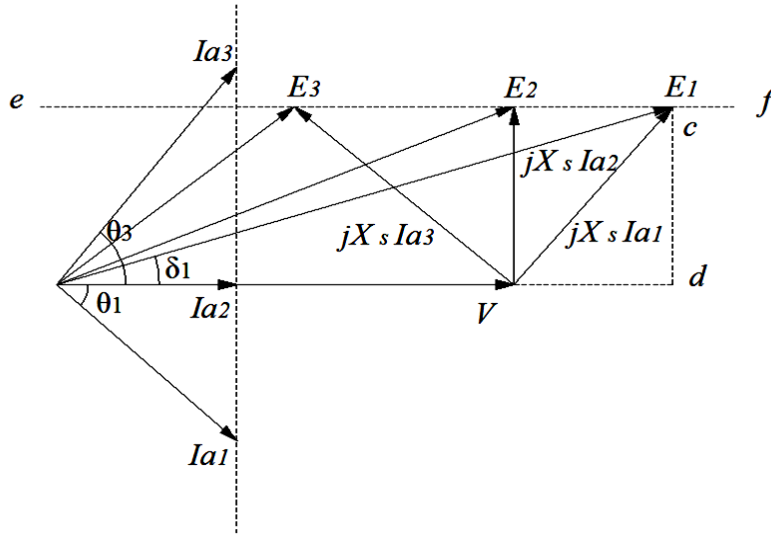


Şekil 2.3 Senkron makinenin sınırsız şebeke hattına bağlantısı (Saadat 1990).

Rotor uyarım akımını değiştirebilme kabiliyeti senkron generatörün önemli bir özelliğidir ve sabit mekanik giriş güçlü bir generatör gibi çalışan makinenin böyle bir değişimdeki etkileri hesaplanabilir. Stator direncinin ihmal edilmesi ile çıkış gücü üretilen güce eşittir ve aşağıdaki denklem oluşturulur.

$$P_{3\phi} = 3 |V| |I_a| \cos \theta \quad (2.7)$$

Burada V , faz nötr arası değişmeyen sabit terminal gerilimidir. Eşitlik (2.7)'de görüldüğü gibi saptanan bir terminal geriliminde üretilen sabit güç için $I_a \cdot \cos \theta$ sabit olmalıdır. Alan akımlarının değişimi güç faktörünü değiştirmektedir, bu değişimde stator akım fazörlerinin uç kısmı bir dikey hat üzerinde olmalıdır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Sabit güçte alan akımının değişimi (Saadat 1990).

$E_1 \cdot \sin \delta_1$ bir sabittir ve E_1 'in yeri $e-f$ hattı üzerindedir (Şekil 2.4). Geri güç faktörüne sahip stator akımı I_{a1} eşitlik (2.6) üzerinde yerine yazılırsa E_1 gerilimi elde edilir. Eğer θ sıfır ise, generatör beraberlik güç faktöründe çalışarak stator akımı I_{a2} nin minimum değerini oluşturur ve E_2 gerilimi elde edilir. Bunlara paralel olarak, bir ileri güç faktöründe I_{a3} 'e uygun E_3 elde edilir. Sabit bir gerçek güç çıktısı korunduğu sürece reaktif güç üretiminin rotor uyarım akımı ile kontrol edilebildiği Şekil 2.4'den anlaşılmaktadır (Saadat 1990).

2.2 Aktif ve Reaktif Güç

Bir elektrik sisteminde görünür güç (S) matematiksel olarak akım ve gerilim değerlerinin çarpımı olarak tanımlanmaktadır.

$$S = V \cdot I^* \quad (\text{Tek faz için})$$

$$S = \sqrt{3} V \cdot I^* \quad (\text{Üç faz için})$$

Burada V faz-faz arası gerilim değeri (Volt) ve I ise hat akımıdır (Amper). Güç faktörü ($\cos \phi$), görünür gücün kullanılabilen ya da aktif güce çevrilebilen yüzdesi olarak tanımlanır. Böylelikle aktif güç aşağıdaki formül ile tanımlanabilir.

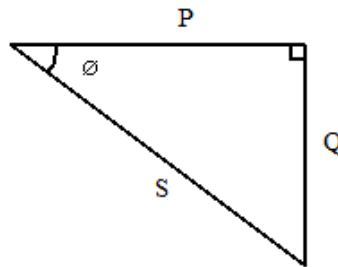
$$P = V.I.\cos\phi \quad (\text{Tek faz için})$$

$$P = \sqrt{3}.V.I.\cos\phi \quad (\text{Üç faz için})$$

Bir elektrik sisteminde eğer güç faktörü 0,8 ise görünür gücün %80'i kullanılan işe çevrilmiştir. Aktif güç, görünür gücün iş yapan kısmıdır. Daha yüksek bir güç faktörü elektrik akımının en uygun bir şekilde kullanılmasına kolaylık sağlamaktadır. Güç faktörü %100'e ulaşabilir mi? Teoride bu mümkündür fakat pratikte güç faktörü düzeltme elemanları bunu yapamamaktadır. Güç faktörü %100' e yaklaşabilmektedir fakat tüm elektrik devreleri bir endüktans ve kapasitansa sahip olduğu için %100'e ulaşamamaktadır. Reaktif güç, tork üretmek amacı ile elektrik motoru içerisinde bir manyetik alan oluşturmaktadır. Aynı zamanda reaktif güç transformatör nüveleri üzerinde primer sargısından sekonder sargısına güç aktarımı yapmak için elektrik alanı oluşturmaktadır (Sankaran 2002).

Her yerde reaktif güç gereksinimi yoktur. Bir elektrik devresi ya da elemanı bir elektrik potansiyeline maruz kaldığı zaman elektrik devresi ya da elemanın endüktansını temsil eden bir manyetik alan oluşturmaktadır. Devreden bir akım geçtiğinde, devrenin endüktansı devre akımına karşı eğilimde bir gerilim üretmektedir. Lenz kanunu olarak bilinen bu etki, devre içerisindeki kaybı temsil eden bir gerilim düşümü oluşturmaktadır. Durum ne olursa olsun, reaktif güce ihtiyaç olsun ya da olmasın AA devrelerde endüktans bulunmaktadır (Sankaran 2002).

Bir elektrik devresinde reaktif ve görünür gücün tanımlanması güç üçgeni ile yapılmıştır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Güç üçgeni (aktif, reaktif ve görünür güçler arasındaki ilişki).

Aşağıda güçler arasındaki ilişki verilmiştir.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.8)$$

$$P = S.\cos\phi \quad (2.9)$$

$$Q = S.\sin\phi \quad (2.10)$$

Burada S ; Görünür Güç, P ; Aktif Güç, Q ; Reaktif güç, ϕ ise faz açısıdır. Şekil 2.6'da, V devreye uygulanan gerilim, I devreden geçen akımdır. Endüktif bir devrede akım ϕ açısı kadar gerilimden geride kalmaktadır.

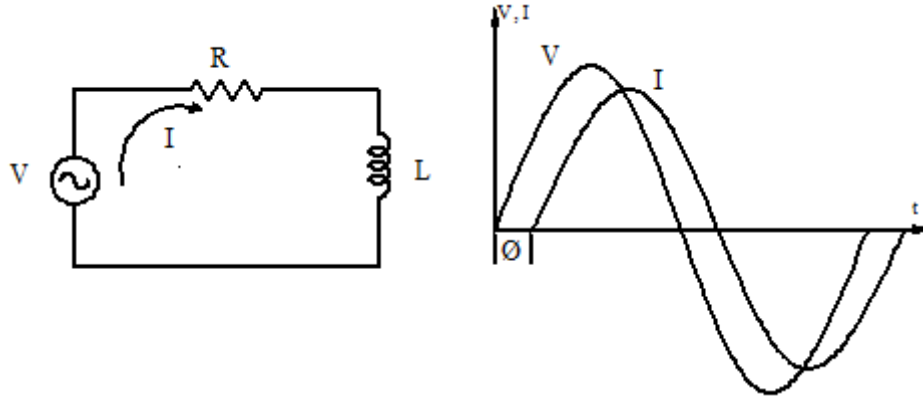
X_L endüktif reaktansı aşağıdaki eşitlik ile elde edilir.

$$X_L = 2\pi fL$$

Böylelikle toplam empedans Z ise;

$$Z = R + jX_L$$

Burada j sanal operatördür ($\sqrt{-1}$).



Şekil 2.6 RL devrede Akım, Gerilim ve Faz Açısı.

Güç faktörünün negatif değeri akımın gerilimden ileride olduğunu göstermektedir. Şekil 2.6'da ki endüktif devreye V gerilimi uygulanırsa devreden geçen I akımı elde edilir ve tek fazlı devre için fazör diyagramı olarak gösterilir. Akım aktif ve reaktif bileşenler içerisine I_P ve I_Q olarak ayrılır.

$$I_P = I \cdot \cos \phi \quad (2.11)$$

$$I_Q = I \cdot \sin \phi \quad (2.12)$$

$$\text{Aktif güç} = P = V \cdot I_P = V \cdot I \cdot \cos \phi \quad (2.13)$$

$$\text{Reaktif güç} = Q = V \cdot I_Q = V \cdot I \cdot \sin \phi \quad (2.14)$$

2.2.1 Güç Faktörünün Düzeltilmesi

Güç kaynağından çekilen görünür gücü en aza indirmek için yükleri en az geri reaktif akım çekecek şekilde tasarlayacağız ya da güç sistemine ileri reaktif akım sağlayarak geri reaktif akımı kompanze edeceğiz. Yükleri en az geri reaktif akım çekecek şekilde tasarladığımızda, yükler yinede geri reaktif akım çekeceklerdir. Tipik bir güç sistemi içerisinde ihtiyaç duyulan ileri reaktif akımı sağlayacak elemanlar hemen hemen yok denilecek kadar azdır. Ancak ileri reaktif akım üreten elemanlar bir güç sistemi içerisine dâhil edilirse yüklerin çekmiş olduğu geri reaktif akım kompanze edilir. Bu elemanlar güç faktörü düzeltme elemanları olarak adlandırılır.

Basit olarak güç faktörünün düzeltilmesi, geri reaktif gücün (Q) ya da geri reaktif

akımın (I_Q) azaltılması olarak tanımlanabilir. Şekil 2.7 'de V kaynağı omik ve endüktif yüklerden oluşan Z empedansını beslemektedir.

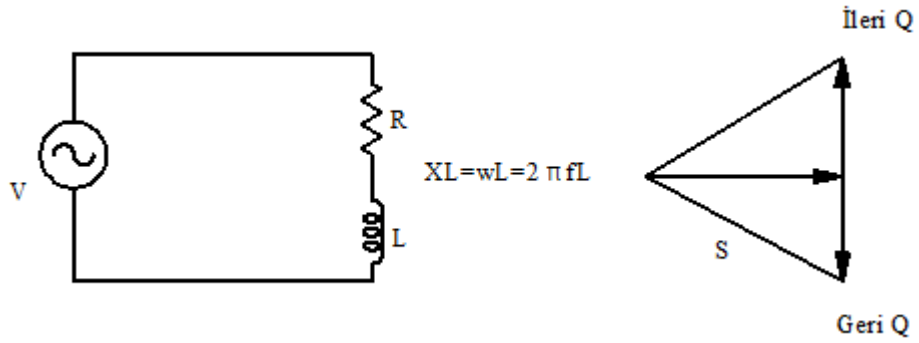
$$Z = R + j\omega L$$

$$I = V / Z = V / (R + j\omega L)$$

$$S = V.I = V^2 / (R + j\omega L)$$

Pay ve paydayı $(R - j\omega L)$ ile çarparsak,

$$S = V^2 (R - j\omega L) / (R^2 + \omega^2 L^2)$$



Şekil 2.7 İleri ve geri reaktif güç belirtimi (Sankaran 2002).

Terimleri ortak parantezden ayırırsak,

$$S = V^2 R / (R^2 + \omega^2 L^2) - jV^2 \omega L / (R^2 + \omega^2 L^2)$$

$$S = P - jQ \text{ Eşitliği elde edilir.} \quad (2.15)$$

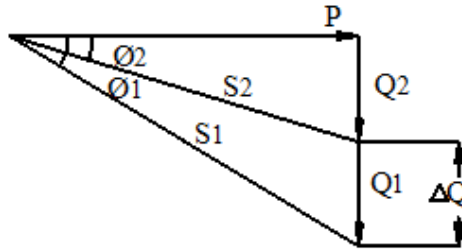
Buradaki $-Q$ geri reaktif gücü belirtmektedir. Q 'ya eşit bir reaktif güç sağlanması ile güç faktörünü bire yakın olacak şekilde düzeltebiliriz.

Tipik bir güç sistemi içerisinde, güç faktörünü hesaplamak için, dirençlerin değerleri ve endüktans verileri kesin olarak bilinmemektedir. Ancak toplam aktif ve reaktif güç değerleri bilinmektedir. Böylelikle, güç faktörünün düzeltilmesi için ihtiyaç duyulan kVAr bilinen değer ile istenilen değer arasındaki farktan hesaplanılabilir. Şekil 2.8’de genel güç faktörü düzeltme üçgeni gösterilmektedir. Bu üçgenin çözümü için sisteme ait üç bilgiye ihtiyaç duyulur; Mevcut güç faktörü ($\cos \phi_1$), istenilen güç faktörü ($\cos \phi_2$) ve aktif (P), reaktif (Q), görünür (S) güçlerden herhangi birisi (Sankaran 2002).

S_1 , $\cos \phi_1$ ve $\cos \phi_2$ biliniyor ise:

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin \phi_1, P = S_1 \cdot \cos \phi_1 \text{ ve } Q_2 = P \cdot \tan \phi_2$$

Güç faktörü düzeltilmesi için gerekli güç; $\Delta Q = Q_1 - Q_2$



Şekil 2.8 Genel güç faktörü düzeltme üçgeni (Sankaran 2002).

2.2.2 Reaktif Güç Kompanzasyonunun Avantajları

Elektrik firmalarının ödemeye zorladığı cezadan kaçınma yararının yanında güç faktörü düzeltilmesi başka yararlar da sağlamaktadır. Diğer avantajları şunlardır:

- Çalışan elektrik elamanların ısınmasını azaltma.
- Çalışan elektrik elamanların ömrünü artırma.
- Çalışma maliyeti ve enerji kayıplarında azalma.
- Mevcut enerjiyi koruma.
- Elektrik sistemlerindeki gerilim düşümünü en aza indirme.

2.3 Reaktif Güç ve Gerilim Kontrolü

Güç sistemlerinin verimli ve güvenilir çalışması için, gerilim ve reaktif gücün kontrolü aşağıdaki hedefleri yerine getirmelidir (Kundur 1994).

(a) Sistemdeki tüm elemanların terminallerindeki gerilimler kabul edilebilir limitler içerisinde olmalıdır. Kullanıcı ve yardımcı elemanların hepsi belirli bir gerilim sınıfında çalışacak şekilde tasarlanmaktadır. İzin verilen gerilim aralığının dışında uzun süre devre elemanlarının çalışması, devre elemanlarının performansını olumsuz etkilemekte ve onların hasara uğramasına da neden olmaktadır.

(b) İletim sisteminin kullanımını maksimize etmek için sistem kararlılığı geliştirilmelidir.

(c) RI^2 ve XI^2 kayıplarını pratikte en aza indirmek için, reaktif güç akışı minimize edilmelidir. Bu durum özellikle aktif güç transferi için iletim sisteminin verimli çalışabilmesini sağlamaktadır.

Gerekli sınırlar içerisinde gerilim değerini koruma problemi bazı unsurlar ile karmaşık bir hal almaktadır. Bu unsur, çok sayıda yükün çok sayıda üretim biriminden oluşan güç kaynağından beslenmesidir. Yüklerdeki değişim, iletim sisteminin reaktif güç gereksinimini değiştirmektedir. Reaktif güç uzun mesafelerde iletilebilir olamayacağına göre, sistem aktif güç dengesi boyunca dağıtık özel cihazlar kullanarak gerilim kontrolü gerçekleşmek zorundadır. Reaktif güç ve gerilim kontrolü için doğru elemanların seçimi ve koordinasyonu güç sistemleri mühendisliğinde en önemli güçlükler arasında yer almaktadır.

2.3.1 Reaktif Güç Üretimi ve Tüketimi

Senkron generatörler uyarım akımına bağlı olarak reaktif güç üretebilir veya tüketebilir. Senkron generatörler aşırı uyarıldıkları zaman reaktif güç üretmekte ve az uyarıldıkları zaman reaktif güç tüketmektedirler. Sürekli olarak reaktif güç üretmesi ya

da tüketmesi senkron generatörün alan akımı ile sınırlandırılmaktadır. Senkron generatörler stator gerilimini kontrol etmek için sürekli olarak uyartım akımını ayarlayan gerilim regülatörleri kullanmaktadırlar.

Yük akımına bağlı olarak havai hatlar, ya reaktif güç kaynağıdır ya da tüketicisidir. Yer altı kabloları yüksek kapasitanslarından dolayı, yüksek doğal yüklere sahiptirler. Yer altı kabloları her zaman kendi doğal yükleri ile yüklenmekte ve bu nedenle tüm çalışma koşulları altında reaktif güç üretmektedirler. Transformatörlerin yükleri ne olursa olsun her zaman reaktif güç tüketmektedirler (Kundur 1994).

Yükler normalde reaktif güç tüketirler. Çok sayıda elemandan oluşan bir güç sistemi tarafından tipik yük hatları beslenmektedir. Günlere, mevsimlere ve hava şartlarına bağlı olarak yük hattının yapısı değişmektedir. Yük hattı normalde reaktif güç tüketecek şekildedir. Yüklerin hem aktif gücü hem de reaktif gücü gerilimin genliğinin bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Düşük-geri güç faktörüne sahip yükler iletim şebekelerinde aşırı gerilim düşümlerine ve ekonomik olmayan bir enerji kaynağına neden olmaktadır. Endüstriyel tüketicilere normalde aktif gücün yanı sıra reaktif güç için de ücret uygulanmaktadır. Bu durum tüketicilerin şönt kondansatörler kullanarak yüklerinin güç faktörünü düzeltmesini sağlamaktadır. Reaktif gücün üretilmesi ve tüketilmesi için dengeleme elemanları eklenerek, istenilen şekilde reaktif gücün dengesi kontrol edilir.

2.3.2 Gerilim Kontrol Metotları

Reaktif gücün üretimi, tüketimi ve sistem içerisindeki tüm seviyelerde reaktif gücün akışı kontrol edilerek gerilim seviyelerinin kontrolü yapılmaktadır. Üretim birimleri gerilim kontrolünün temel araçlarını sağlamaktadır; otomatik gerilim regülatörleri generatör terminallerinde belirli bir gerilim seviyesini korumak için alan uyartımını kontrol eder. Ek olarak kullanılan araçlar genellikle sistem gerilim düşümünü kontrol etmek için gerekmektedir. Bu amaç için kullanılan cihazlar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

(a) Şönt kondansatör, şönt reaktör, senkron kompanzatör, özel güç aygıtları ve FACTS aygıtları gibi reaktif güç kaynakları yada tüketicileri.

(b) Seri kondansatörler gibi hat reaktans kompanzatörleri.

(c) Yükseltici ve kademe değiştirme transformatörleri gibi düzenleyici transformatörler.

Şönt kondansatörler, şönt reaktörler ve seri kondansatörler pasif dengeleyicilerdir (Acha *et al.* 2002). Bunların her biri dağıtım ya da iletim sistemine kalıcı olarak bağlanmakta ya da anahtarlanarak devreye alınıp çıkartılmaktadır. Bu elemanlar iletim hattının karakteristiklerini değiştirerek gerilim kontrolüne katkıda bulunmaktadır (Kundur 1994).

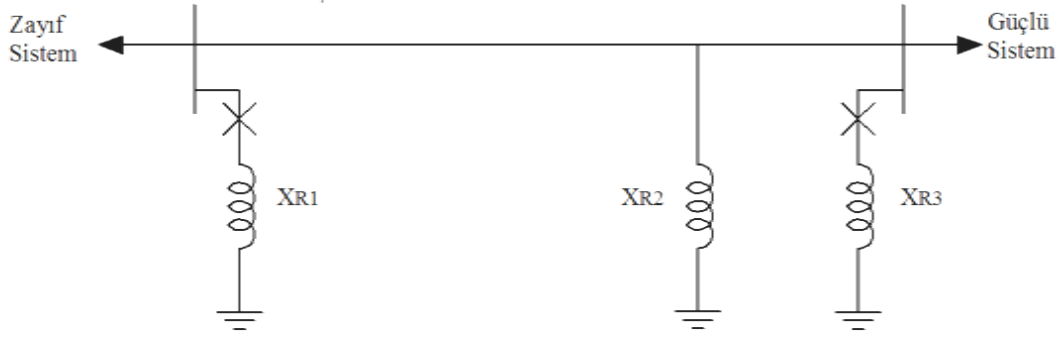
FACTS aygıtları aktif düzenleme sağlamaktadırlar; bunlar bağlı oldukları hattın gerilimlerini korumak için reaktif güç tüketimini/üretimini otomatik olarak ayarlamaktadırlar. Bu elemanlar sistem içerisindeki belirli noktalarda üretim birimleri ile birlikte gerilim değerini ayarlarlar. Pasif düzenleyici cihazlarda dahil olmak üzere, çeşitli devre elemanları üzerinden akan aktif ve reaktif güç sayesinde sistemin diğer bölgelerindeki gerilim değerleri belirlenmektedir.

2.3.2.1 Şönt Reaktör

Şönt reaktörler özellikle açık devre veya düşük yük durumlarındaki gerilim yükselmesini sınırlamak için hat kapasitans etkilerini düzenlemede kullanılır (Acha vd. 2002). Şönt reaktörlere genellikle 200 km üzerindeki yüksek gerilim (YG) havai hatlarda ihtiyaç duyulmaktadır. Eğer hat güçsüz bir sistemden (düşük kısa devre kapasitesi) besleniyor ise daha kısa havai hatlarda da şönt reaktörlere ihtiyaç duyulmaktadır (Kundur 1994).

Hatta kalıcı olarak bağlanan yeterli büyüklükteki bir şönt reaktör, temel frekansta yaklaşık 1.5 p.u. geçici gerilim yükselmesini 1 saniyeden daha az bir sürede sınırlandırmalıdır. Böyle hatta bağlı reaktörler aşırı gerilim enerjileşmelerini (anahtarlama geçicileri) sınırlandırılmasına hizmet etmektedir. Şekil 2.9'da gösterildiği

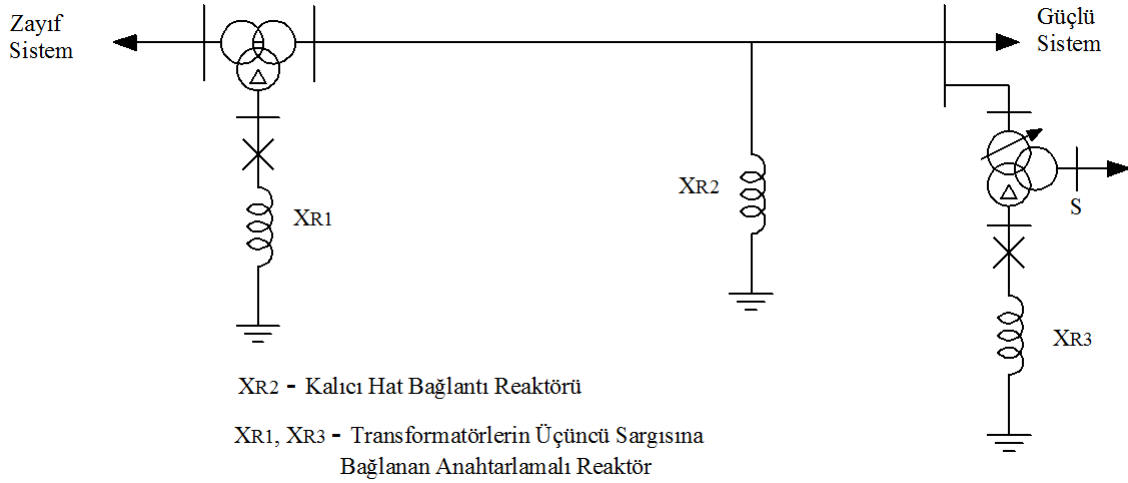
gibi hafif yük koşulları altında normal bir gerilim değerini elde etmek için gerekli olan ek şönt reaktör yüksek gerilim hattına ya da Şekil 2.10'da gösterildiği gibi komşu transformatörlerin 3. Sargısına bağlanmış olabilir. Ağır yükleme koşulları sırasında reaktörlerin bazılarının bağlantısının kesilmesi gerekebilir. Bu olay devre kesici kullanan reaktörlerin anahtarlanması ile elde edilir (Kundur 1994).



XR2 - Kalıcı Hat Bağlantı Reaktörü

XR1, XR3 - Anahtarlamalı Bara Bağlantı Reaktörü

Şekil 2.9 Hat ve bara bağlantılı yüksek gerilim hat reaktörleri (Kundur 1994).



XR2 - Kalıcı Hat Bağlantı Reaktörü

XR1, XR3 - Transformatörlerin Üçüncü Sargısına
Bağlanan Anahtarlamalı Reaktör

Şekil 2.10 Hat ve transformatör bağlantılı reaktörler (Kundur 1994).

2.3.2.2 Şönt Kondansatör

Şönt kondansatörler reaktif güç sağlayarak yerel gerilimleri artırır. Bunlar geniş bir boyut aralığında uygulanmakta ve sistem boyunca kullanılmaktadır.

Şönt kondansatörler ilk olarak güç faktörü düzeltme için 1910'ların ortalarında kullanılmıştır. İlk kondansatörler, yağı dielektrik olarak kullanılmıştır. Onların

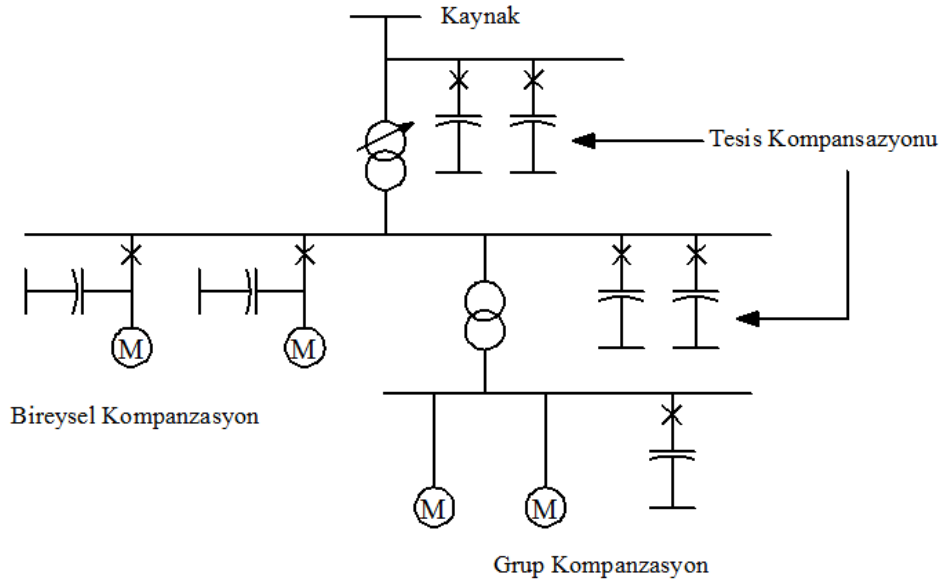
boyutundaki büyüklük, ağırlığı ve yüksek maliyeti zamanla kullanımını sınırlandırmıştır. 1930 yılında, daha ucuz dielektrik malzemelerin başlangıcı ve diğer iyileştirmeler kondansatör yapımında daha az maliyette ve büyüklükte yenilikler getirmiştir. Şönt kondansatörlerin kullanımı 1930'lardan sonra olağanüstü bir şekilde artmıştır. Bugün ise şönt kondansatörler reaktif güç sağlayan ekonomik araçlardır. Kurulum ve çalışma esnekliği ve düşük maliyette olmaları şönt kondansatörlerin temel avantajlarıdır. Onlar sistemin değişik noktalarına kolayca uygulanır ve böylelikle güç iletim ve dağıtım verimine katkı sağlar. Şönt kondansatörlerin başlıca dezavantajı reaktif güç çıkışının, geriliminin karesi ile orantılı olmasıdır. Sonuç olarak, olması muhtemeldir ki en çok ihtiyaç duyulan zamanda, reaktif güç çıkışı düşük gerilimde azalmaktadır (Kundur 1994).

Şönt kondansatörler güç faktörü düzeltme ve besleyici gerilim kontrolü için dağıtım sistemlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Dağıtım kondansatörleri genellikle basit zaman saatlerinin, ya da gerilim veya akım algılama rölelerinin yanıtına göre otomatik olarak anahtarlanmaktadır.

Güç faktörünün düzeltilmesinin amacı, reaktif gücün uzak kaynaklardan tedarik edilmesinin yerine, tüketilen yere yakın bir yerde tedarik edilmesini sağlamaktır. Yüklerin çoğu reaktif güç tüketmekte ve böylelikle geri güç faktörüne sahiptirler.

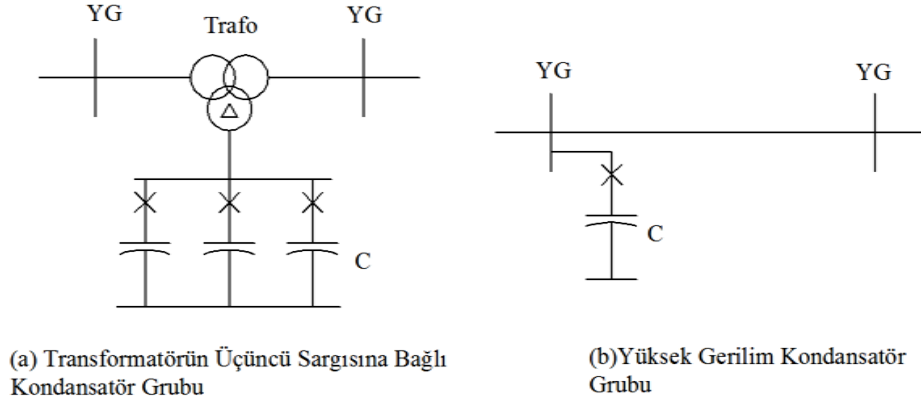
Güç faktörünün düzeltilmesi dağıtım sistemleri boyunca değişik gerilim seviyelerinde sabit (sürekli bağlı) ve şönt kondansatörlerin anahtarlanması vasıtasıyla sağlanmaktadır. Şekil 2.11'de gösterildiği büyük sanayi tesisleri için, güç faktörü düzeltme farklı düzeylerde uygulanır: (1) bireysel motorlar, (2) motor grupları ve (3) genel tesisler (Kundur 1994).

Anahtarlama şönt kondansatörler de besleyici gerilim kontrolü için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar tüm noktalarda gerilimin izin verilen maksimum ve minimum sınırlar içinde kalmasını sağlamak için besleyici uzunluğu boyunca uygun yerlerde bulunur. Şönt kondansatör uygulaması besleyici gerilim regülatörleri ya da yükseltici transformatörler ile koordine edilir.



Şekil 2.11 Endüstriyel tesislerde güç faktörünün düzeltilmesi (Kundur 1994).

Şönt kondansatörler iletim sistemlerinde XI^2 kayıplarını telafi etmek ve ağır yük koşullarında yeterli gerilim seviyelerini sağlamak için kullanılır. Uygun büyüklükteki kondansatör grupları Şekil 2.12’de gösterildiği gibi yüksek gerilim tarafına doğrudan bağlanılmakta ya da ana transformatörün üçüncül sargısı üzerine bağlanılmaktadır. Bu kondansatörler manuel ya da bir gerilim rölesi ile otomatik olarak anahtarlanmaktadır. Kondansatörlerin anahtarlanması iletim sisteminin gerilimlerini denetlemek için uygun bir yol sağlamaktadır. Bunlar kayıpları ve gerilim düşmesini en aza indirecek şekilde normal iletim sistemi boyunca dağıtılır. Sistem tasarım kriterlerini karşılamaya yönelik olarak kondansatör boyutunu ve konumunu belirlemek için ayrıntılı güç-akış çalışmaları yapılır.



Şekil 2.12 Kondansatör gruplarının bağlantıları (Kundur 1994).

2.3.2.3 Seri kondansatör

Seri kondansatörler hattın endüktif reaktansını telafi etmek için hat iletkenleri ile seri bağlanılmaktadır. Bu durumda hatlar arasındaki iletim reaktansı azalmakta, iletilebilir maksimum güç artmakta ve reaktif güç kayıplarının (XI^2) etkisi azalmaktadır. Genelde seri kondansatörler iletim hatlarına gerilim kontrolü için kurulmasada, gerilim kontrolü ve reaktif güç dengesine katkıda bulunmaktadır. Güç transferindeki artış seri kondansatörün üretmiş olduğu reaktif gücüde artırmaktadır. Böylelikle seri kondansatör kendisi tarafından kontrol edilmektedir (Kundur 1994).

Seri kondansatörler 1930'lardan beri dağıtım ve endüstriyel besleyiciler için gerilim regülasyonunu artırmak için uygulanmıştır. Kaynak makineleri ve ark ocakları kötü güç faktörü ve aralıklı talepleri ile tipik yüklerdir. Bir seri kondansatör kararlı durumda gerilim düşümünü azaltmanın yanında yük akımı değişikliklerine neredeyse anında tepki vermektedir. Seri kondansatör, güç kaynakları ve değişen yükler arasındaki empedansı azaltarak, hafif titreme sorunlarını çözmede etkilidir.

Sistem hata akımlarından kondansatörlerin korunmasında karşılaşılan zorluklar nedeni ile günümüz dağıtım sistemlerinde seri kondansatörler çok yaygın olarak kullanılmamaktadır.

Seri kondansatörler uzun iletim hatlarının ekonomik yüklenmesine izin verdiği için, yüksek gerilim iletim hatlarında kullanılmaktadır. Seri kondansatörler öncelikli olarak sistem kararlılığını geliştirmek ve paralel hatlar arasında istenen yük paylaşımını elde

etmek için kullanılmaktadır (Acha *et al.* 2002).

Hat boyunca küçük parçalar halinde kapasitansı dağıtmak pratik değildir. Ancak, hat boyunca bir kaç bölgede, seri kondansatörler toplu halde kurulur. Toplu şekilde kullanılan seri kondansatörler gerilim profilinde düzensizliklerle neden olmaktadır.

Seri kondansatörler hat potansiyelinde çalıştığı için topraktan izole edilmelidir. Zeminden izoleli platformlara kondansatörlerin monte edilmesi yaygın olarak kabul edilen bir uygulamadır. Alternatif olarak, yağ izolasyonlu tank içine yerleştirilen kutu kondansatörlerden oluşan toprak-temelli kondansatör grupları kullanılabilir.

Seri kondansatör teorik olarak hat boyunca herhangi bir yerde bulunabilir. Maliyet, erişebilirlik, hata seviyesi, gerilim profili, güç transfer yeteneği geliştirmedeki etkinlik, koruyucu düzenlemeler yer seçimini etkileyen faktörlerdir. Uygulamada kabul gören yerler aşağıda verilmiştir.

- Hattın orta noktası.
- Hat terminalleri.
- Hattın 1/3 yada 1/4 oranındaki noktalar.

2.3.2.4. Senkron Kompanzatör

Senkron kompanzatör bir ana işletici veya mekanik yük olmadan çalışan bir senkron makinedir. Reaktif gücü üretmesi ya da tüketmesi alan uyartımı tarafından kontrol edilerek yapılmaktadır. Bir gerilim regülatörü ile otomatik olarak sabit terminal gerilimini korumak için reaktif güç çıkışı ayarlanılabilir. Besleme kayıpları için güç sisteminden az miktarda aktif güç çekmektedir (Kundur 1994).

Senkron kompanzatörün statik kompanzatörlere göre birçok avantajı vardır. Senkron kompanzatörler sistemin kısa devre kapasitesine katkıda bulunur. Bunların reaktif güç üretim sistemi, gerilimi ile etkilenmez. Güç salınımı (elektromekanik osilasyonlar) sırasında senkron kompanzatör ve güç sistemi arasında bir kinetik enerji değişimi vardır. Böyle bir güç salınımı sırasında, senkron kompanzatör büyük miktarda bir

reaktif güç sağlayabilir. Senkron kompanzatör, 30 dakika boyunca yaklaşık %20-10 aşırı yük kapasitesine sahiptir. Şönt kompanzasyonun diğer formlarından farklı olarak, Senkron kompanzatör bir iç gerilim kaynağına sahiptir ve düşük sistem gerilim koşulları ile daha iyi başa çıkabilmektedir (Kundur 1994).

2.3.2.5 Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS)

Alternatif akım güç sistemlerinde kondansatör ve reaktörler kalıcı durum karakteristiklerinde ve sistemin yeteneklerinde önemli bir rol oynamaktadırlar. Uygulamada reaktörler ve kondansatörler mekanik anahtarlama ile değişen koşullara yavaş tepki için geliştirilmiş olsa da VAr düzenleyiciler daha hızlı iyileştirme sağlamaya ihtiyaç duymaktadır. Bir zamanlar dinamik kompanzasyon için senkron kompanzatör tek araçtı. Şimdi ise, hem seri hem de paralel uygulamalar için statik FACTS denetleyiciler dinamik kompanzasyon için geniş bir çeşitlilik sunmaktadır (Gavrilovic *et al.* 2003).

Esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS), güç iletim kapasitesini artırmak ve belirlenen rotalar üzerinde güç akışını sağlamayı amaçlamaktadır. FACTS'ların birinci amacı, termal sınırlar içerisinde seri hat empedansına bağlı olan anma akımını zorlayarak belirli bir hat içerisindeki güç akışını artırmak anlamına gelmektedir. İkinci amacı ise bir hattaki akımı kontrol ederek güç akışını seçilen iletim koridorları ile sınırlı tutmaktır (Mora'n *et al.* 2006).

IEEE'ye göre FACTS, FACTS aygıtları ve özel güç aygıtları aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır (Deniz 2009).

Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri: “Denetlenebilirliği geliştirmek ve güç transfer kapasitesini artırmak için güç elektroniği tabanlı ve diğer statik denetleyicileri kapsayan alternatif akım iletim sistemleridir”.

FACTS Aygıtları: “Bir veya daha fazla alternatif akım iletim sistemi parametresinin denetimini sağlayan güç elektroniği tabanlı bir sistem ve diğer statik donanımlardır”.

Özel Güç Aygıtları: “Gerilim değeri 38kV’a kadar olan dağıtım sistemlerinde, seçilen endüstri tesisleri ve bu tesislerdeki her bir üretim sürecinin yeterli performansı için gerekli olan güç kalitesini uygun bir seviyede sağlamak için kullanılan güç elektroniği denetleyicileri kavramıdır”.

FACTS, güç elektroniği ve geleneksel güç iletim donanımının bir birleşimidir. FACTS aygıtları devre yapılarında kullanılan güç elektroniği teknolojisine göre iki kategoride incelenebilir (Deniz 2009). Bunlar;

i. Tristör Tabanlı FACTS Aygıtları:

- Statik VAr Kompanzatör (SVC),
- Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC),
- Tristör Kontrollü Faz Kaydırmalı Transformatör (TCPST)

ii. Evirici Tabanlı FACTS Aygıtları:

- Statik Senkron Kompanzatör (STATKOM),
- Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC),
- Hatlar Arası Güç Akış Kontrolörü (IPFC),
- Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC),

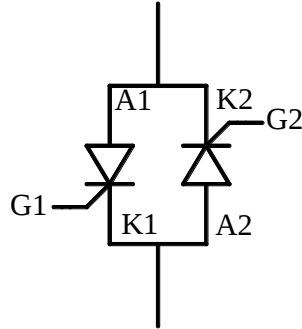
Statik VAr kompanzatörler (SVC) elektrik güç sistemlerinin belirli parametrelerini kontrol etmek için çıkışlarını değiştirebilen güç sistemine şönt bağlı reaktif güç üretici ya da tüketicilerdir. SVC’lerdeki statik terimi senkron makinelerin aksine, hareketli yada dönen ana elemana sahip olmadığını belirtmek için kullanılmaktadır. Bu nedenle SVC’ler, statik VAr üretici ya da tüketiciler ile uygun bir kontrol sisteminden oluşmaktadır. Çıkışları koordineli olan SVC’ler ve mekaniksel anahtarlama kondansatörler ya da reaktörlerin birleştirilmesi bir statik var sistemi oluşturulabilir (Kundur 1994).

Reaktif güç üreten kondansatör ve reaktif güç tüketen reaktör geleneksel tip SVC’lerin ana elemanlarını oluşturmaktadır. SVC’lerin reaktif güç üretimi ve tüketimi modlarında

çalışması için her iki devre elemanını da kullanması gerekmektedir (Gavrilovic *et al.* 2003).

Bir veya daha fazla SVC temel türleri ve sabit kondansatör gruplarının birleştirilmesi ile farklı statik VAr sistem (SVS) yapıları oluşturularak iletim sistemlerinin kompanzasyon uygulamaları yapılmaktadır. Statik VAr sistemleri, bağlı olduğu hattın bireysel faz gerilimlerinin kontrol yeteneğine sahiptir (Kundur 1994).

1960'lı yıllarda endüstriyel uygulamalarda transistörlere duyulan talep, yüksek akımlarda çalışabilen ve yüksek gerilimlere dayanıklı cihazların çok hızlı bir şekilde gelişmesine yol açmıştır. Zaman gecikmesi, aşınma, yıpranma, mekanik anahtarlama bakım gereksinimleri olmadan son derece hızlı ve sık geçiş çalışma yeteneğine sahip ters yönde paralel bağlı tristör çiftleri statik anahtar olarak kullanım için uygundur (Şekil 2.13) (Gavrilovic 2003).



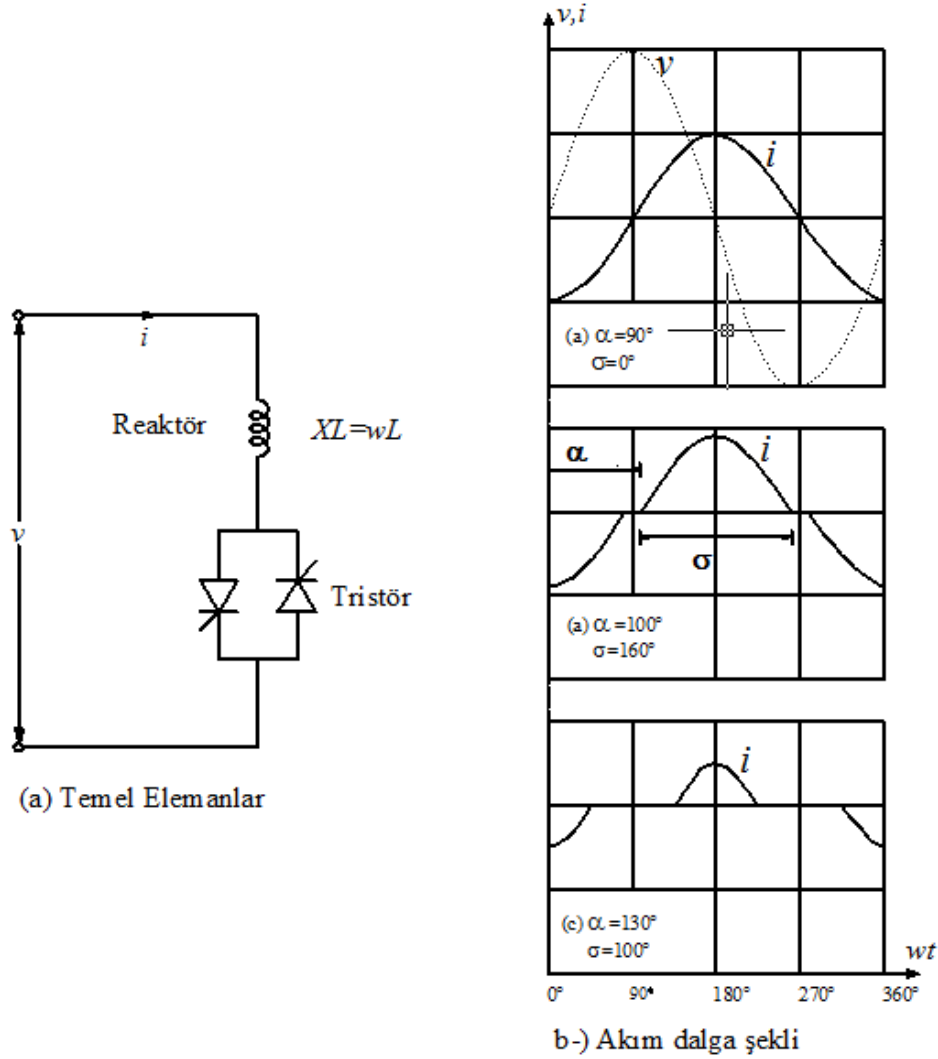
Şekil 2.13 Ters yönde paralel bağlı tristör çifti.

Tristör kullanılarak çeşitli reaktif güç kompanzasyonları yapılmaktadır. Bu kompanzasyon türleri tek başına yapılabildiği gibi birleştirilerek statik Var sistemleri oluşturulabilmektedir. Aşağıda tristör ile yapılan değişik reaktif güç kompanzasyon çeşitleri anlatılmıştır.

TCR, iki yönlü bir tristör anahtarlama elemanı ile ona seri bağlı olan bir reaktörden oluşmaktadır (Şekil 2.14(a)).

Tetikleme açısı α 'ya bağlı olarak kaynak frekansının alternatif yarım saykılında tristör

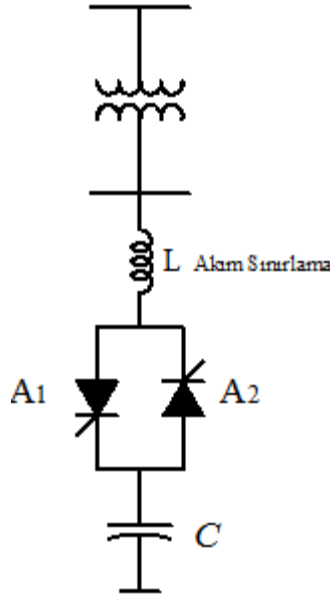
iletimde olmaktadır. Tetikleme açısının 90° olması ile tristör yarım saykılta tam iletimdedir. Akım temelde reaktif ve sinüzoidaldir. Kısmi iletim, 90° ve 180° arasındaki tetikleme açısı ile elde edilir(Şekil 2.14 (b)). 0° ile 90° arasındaki tetikleme açılarında DA bileşenli asimetrik akımlar üretildiği için bu aralıkta tristörün iletimine izin verilmez (Kundur 1994).



Şekil 2.14 Tristör kontrollü reaktör (Kundur 1994).

TSC tipi statik kompanzatör, kondansatörlere seri olarak bağlanan çift yönlü tristörler ile gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.15). İlk olarak 1971 yılında ASEA tarafından tanıtılmıştır. Çift yönlü tristör anahtarlama elemanları kullanılarak, kondansatör ünitelerindeki uygun büyüklükteki kondansatörler ayrı ayrı şönt olarak devreye alınır veya çıkartılır. Her bir faz; kondansatör, A_1 ve A_2 tristör elemanları olmak üzere iki ana

elemandan oluşmaktadır. Tristörlere seri olarak bağlanan düşük değerli endüktansın (L) görevi, tristörlerin tetiklendiği anda akım yükselme hızını sınırlandırmak ve rezonansı önlemektir. Tristör şebeke gerilimi ve kondansatör gerilimi ile aynı değerde olduğu zaman iletme geçirilirse en az geçici dalgalanmalarla anahtarlanmış olur (Mora'n *et al.* 2006).



Şekil 2.15 Tristör anahtarlama kondansatör yapısı (Mora'n *et al.* 2006)

Kendinden doğrultmalı konvertörler reaktif güç kompanzasyonunda etkili bir çözüm yolu olarak kendini göstermiştir. Bu teknoloji, statik senkron kompanzator (STATKOM), birleşik güç akış kontrolörü (UPFC) ve dinamik gerilim dengeleyiciler gibi daha karmaşık kompanzator donanımlarında uygulamak için kullanılmıştır. STATKOM bir bağlantı reaktörü üzerinden sisteme paralel bağlanan, senkron makine ile benzerlikler gösteren, temel frekansta dengeli üç faz sinüzoidal gerilim üreten, kontrol edilebilir genlik ve faz açısına sahip transistörlü gerilim kaynağı temelli bir invertör uygulamasıdır.

2.3.2.6 Özel Güç Aygıtları

Esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS), adı üzerinde iletim sistemlerinde kullanılmaktadır. Dağıtım sistemlerinde kullanılan güç elektroniği tabanlı reaktif güç

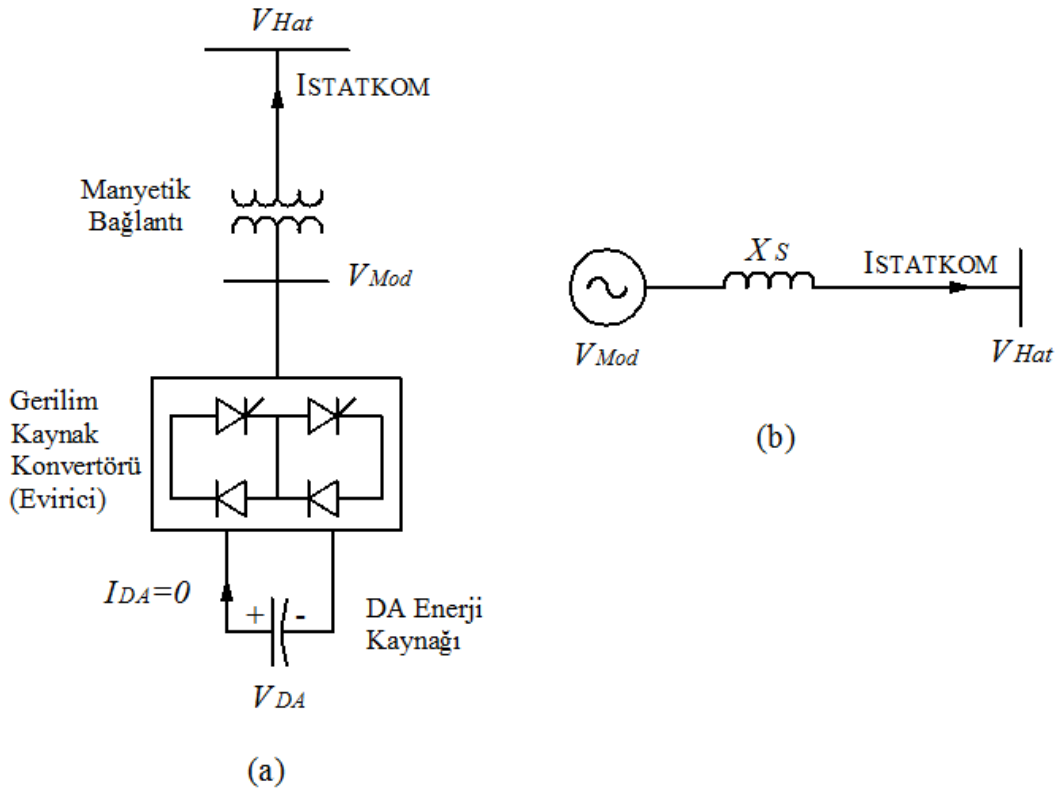
kompanzatörleri FACTS kontrol edici türlerinin çalışmasında benzerlikler göstermektedir. Özellikle STATKOM ve SVC'ler bu benzerliği sağlamaktadır. Özel güç aygıtları; FACTS aygıtlarının düşük gerilim uygulamasıdır. Dağıtım sistemlerinde güç kalitesini iyileştirmeyi ve güç kaynağının güvenilirliğini artırmayı amaçlamaktadır (Deniz 2009). Literatürde özel güç aygıtları ile FACTS aygıtları belirli bir sınıflandırmaya tabi tutulmadan beraber anlatılmıştır.

Dağıtım statik senkron kompanzatör (D-STATKOM), dinamik gerilim düzenleyici (DVR), birleşik güç kalitesi düzenleyicisi (UPQC) , aktif güç filtreleri (APF) ve kesintisiz güç kaynakları (UPS) düşük gerilimlerde çalışmalarından dolayı özel güç aygıtları sınıfına girmektedir (Deniz 2009).

Tez çalışmamın konusu D-STATKOM olmasından dolayı D-STATKOM tasarımı ve çalışma prensibi 3. bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

3. DAĞITIM STATİK SENKRON KOMPANZATÖR (D-STATKOM)

Son zamanlarda, gate kontrollü yarı iletken elemanların dikkat çekici gelişmeleri ile büyük reaktör ve kondansatör gruplarına ihtiyaç duyulmadan reaktif güç üretebilen ve tüketebilen kendinden doğrultmalı FACTS kontrol ediciler üzerine dikkatler odaklanmıştır. STATKOM, bir elektrik sistemi arasında belirli parametreleri denetlemek için reaktif güç üretme ve / veya tüketme yeteneğine sahip paralel bağlı bir reaktif güç dengeleme elemanıdır (Mathur and Varma 2002). STATKOM gerilim kaynağı üzerine temelli, bir bağlantı reaktörü ile güç sistemine paralel bağlanan, senkron makine ile benzerlikler gösteren, kontrol edilebilir genliği ve faz kaydırma açısı ile temel frekansta üç faz dengeli sinüzoidal gerilimler üreten bir invertör uygulamasıdır (Şekil 3.1) (Mora'n *et al.* 2007).



Şekil 3.1 STATKOM temel diyagramı (a) Güç devresi (b) Eşdeğer devresi (Mathur and Varma 2002).

Evirici ile AA sistem arasındaki reaktif gücün değişimi Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, eviricinin 3 faz çıkış gerilimi V_{Mod} 'un genliğinin değiştirilmesi ile kontrol edilebilir. Eğer eviricinin çıkış gerilimi V_{Mod} 'un genliği AA sistem gerilimi V_{Hat} 'ın genliğinden

büyük olacak şekilde artırılırsa, bağlantı reaktörü üzerinden AA sisteme doğru bir akım akar ve evirici AA sistemi için kapasitif-reaktif güç üretir. Eviricinin çıkış gerilimi V_{Mod} 'un genliği AA sistem gerilimi V_{Hat} 'ın genliğinden küçük olacak şekilde azaltılırsa, bağlantı reaktörü üzerinden eviriciye doğru bir akım akar ve evirici AA sistemi için endüktif-reaktif güç çeker. AA sistem gerilimi V_{Hat} ile evirici çıkış gerilim V_{Mod} 'un birbirlerine eşit olduğu durumda ise evirici ile AA sistem arasında reaktif değişimi olmamaktadır (Mathur and Varma 2002).

STATKOM, enerji depolama elemanlarından doğrudan reaktif güç üretmek yerine, bağlı olduğu şebeke ile güç alışverişi yapar. Bu yüzden STATKOM'da kullanılan enerji depolama elemanı, SVC'de kullanılan kondansatör gruplarından daha küçük boyutlu olmaktadır (Deniz 2010). Kendinden doğrultmalı FACTS kontrol edicilerin temel avantajları, boyutta önemli bir azalma, pasif bileşenlerin sayısının azalması ile elde edilen düşük maliyet potansiyeli ve yarıiletken anahtarlar için daha düşük bağlı kapasite gereksinimidir. Daha küçük boyutta olmasından dolayı, alanın öncelikli olduğu yerlerdeki uygulamalar için uygunluğu iyidir (Mora'n *et al.* 2007). Bunun yanında STATKOM'u SVC'lerden daha üstün yapan teknik avantajları vardır (Padiyar 2007). Bunlar;

- 1- Daha hızlı tepki verir.
- 2- Modüler ve taşınabilir.
- 3- Batarya gibi aktif güç kaynakları ile ara yüz olabilir.
- 4- STATKOM düşük gerilim şartlarında, reaktif akımın sabitliğini koruma gibi üstün performansa sahiptir.

STATKOM'un temel davranışı senkron kompanzatöre benzemektedir (Gavrilovic *et al.* 2003). Ancak, STATKOM senkron kompanzatöre göre hareketli parçalara sahip değildir ve daha hızlı tepki verme yeteneğine sahiptir.

STATKOM, FACTS aygıtı olarak iletim sistemlerinde gerilim düzenlemesini artırma, güç faktörünün düzeltilmesi ve hatta yük dengesizliklerini düzeltmek amacı ile iletim hatlarının stabilize edilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca paralel ve seri kompanzatör

uygulamalarının her ikisi içinde kullanılabilmektedir (Mora'n *et al.* 2007).

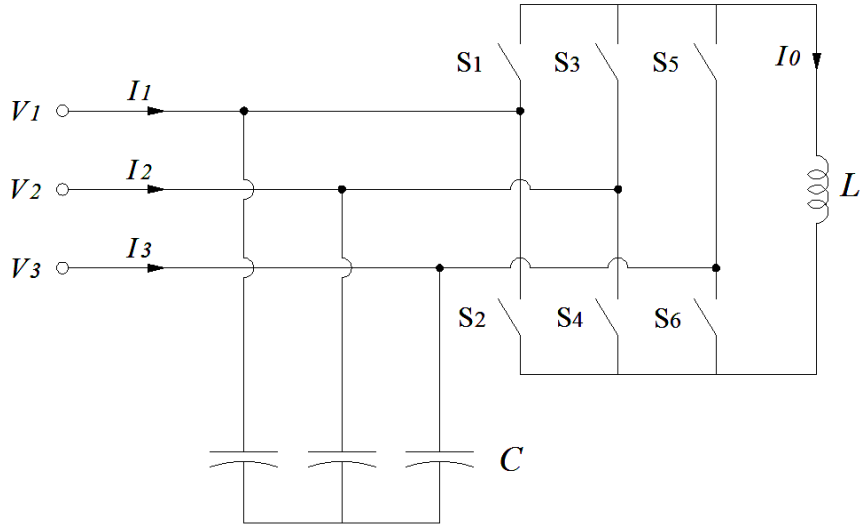
Dağıtım sistemlerinde kullanılan STATKOM, Dağıtım STATKOM olarak adlandırılmış ve D-STATKOM olarak kısaltılmıştır. D-STATKOM bir FACTS elemanı değil özel güç aygıtıdır. STATKOM ile D-STATKOM'un devre yapısı ve çalışma prensibi aynı olmasına rağmen ilgilendikleri güç kalitesi problemleri farklıdır. D-STATKOM, gerilim regülasyonu, güç faktörü düzeltme, yük dengeleme ve yükün harmonik kompanzasyonu için kullanılmaktadır (Deniz 2010).

Literatürde, D-STATKOM'un parçası olan evirici kısmı hem konvertör hemde invertör olarak anılmaktadır. İnvertör, doğru akımı alternatif akıma dönüştürmekte, konvertör ise alternatif akımı doğru akıma dönüştürmekte ya da doğru akım büyüklüklerini değiştirmektedir. D-STATKOM evirici kısmı çalışması sırasında bu işlemlerin her ikisini de yaptığı için değişik kaynaklarda her iki kavramada rastlamak mümkündür.

3.1 D-STATKOM'un Çalışma Prensibi

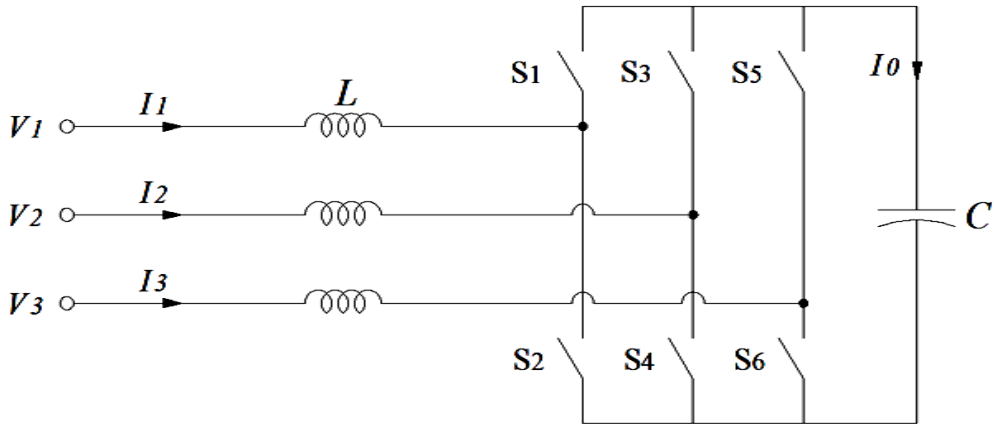
Düzenli bir doğru akım ve reaktör kullanan akım kaynak evirici ile bir D-STATKOM oluşturulabildiği gibi reaktör yerine kondansatör kullanan gerilim kaynak evirici ile de bir D-STATKOM oluşturulabilmektedir (Şekil 3.2 ve Şekil 3.3) (Mora'n *et al.* 2007).

Şekil 3.2'de akım kaynak eviricinin yapısı gösterilmektedir. Akım kaynak evirici enerji depolamak ve akım dalgalanmasını düzenlemek için DA hattında bobin kullanmaktadır. Eviricinin konvertör kısmı yarı iletken doğrultuculardan invertör kısmı ise gate kontrollü yarı iletken anahtarlama elamanlarından oluşmaktadır. Şekil 3.2'de S anahtarları kendinden doğrultmalı gate kontrollü yarı iletken anahtarlama elamanlarından oluşmaktadır. Bu yüzden eviricinin invertör ve konvertör kısımları tek kısımdan oluşmaktadır. İnvertör kısmındaki S anahtarları darbe genişlik modülasyonu (PWM) ile sürülerek istenilen frekansta invertör çıkışını düzenler. Akım kaynak evirici yüksek harmonik içermesinden dolayı çıkış filtreleri gerektirmektedir. Evirici çıkışındaki paralel bağlanan kondansatör grupları filtreleme görevi yapmaktadır (VanderMeulen and Maurin 2010).



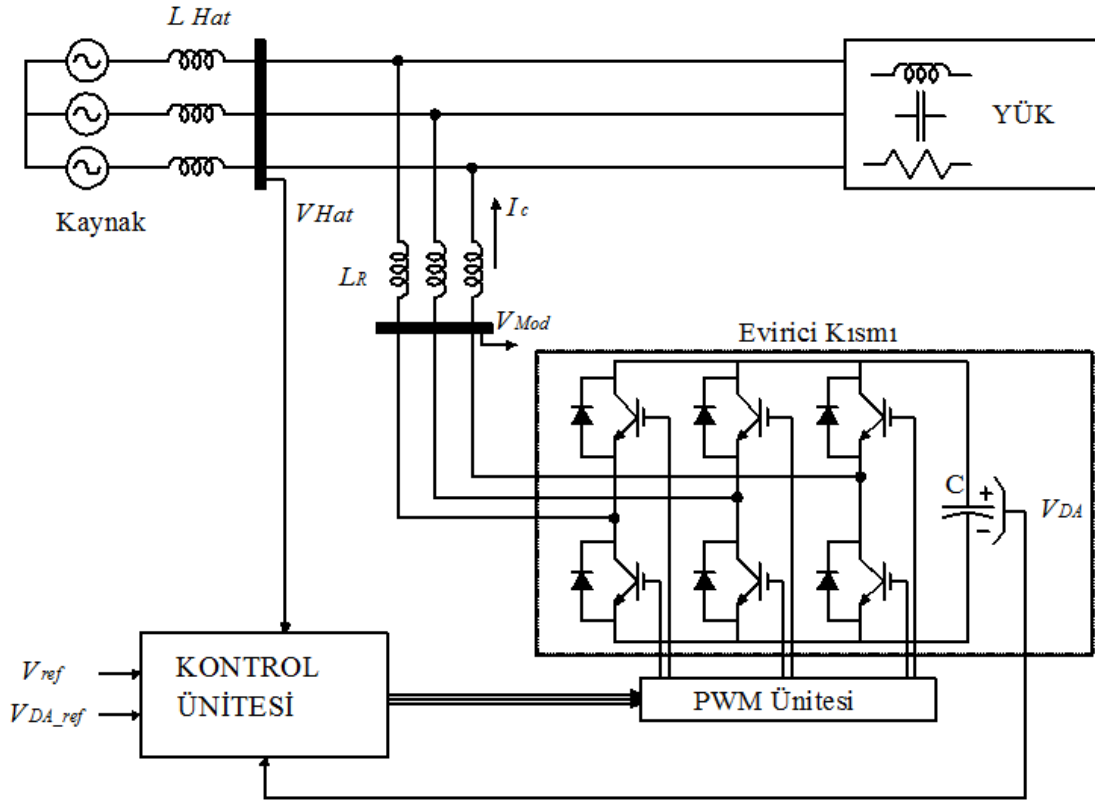
Şekil 3.2 Akım kaynaklı konvertörle gerçekleştirilen D-STATKOM yapısı (Mora'n *et al.* 2007).

Şekil 3.3'de gerilim kaynak eviricinin yapısı gösterilmektedir. Gerilim kaynak evirici enerji depolamak ve DA gerilimindeki dalgalanmaları düzenlemek için DA hattında DA kondansatörü kullanmaktadır. Şekil 3.3'deki devre kendinden doğrultmalı gate kontrollü yarı iletken anahtarlama elemanları olan S anahtarları kullanmasından dolayı invertör ve konvertör kısmı aynıdır. Konvertör kısmı AA gerilimi doğrultarak kondansatörün şarj olmasını sağlamaktadır. İnvertör kısmındaki S anahtarlama elemanları darbe genişlik modülasyonu ile sürülerek istenen frekansta çıkış geriliminin elde edilmesini sağlamaktadır (VanderMeulen and Maurin 2010).

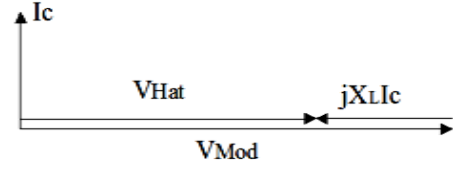
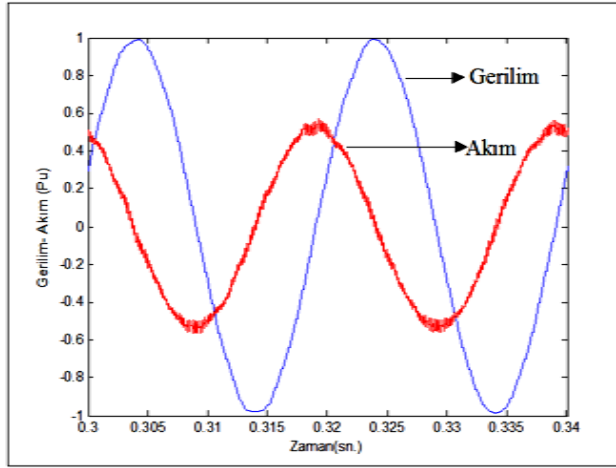


Şekil 3.3 Gerilim kaynaklı konvertörle gerçekleştirilen D-STATKOM yapısı (Mora'n *et al.* 2007).

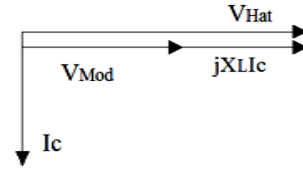
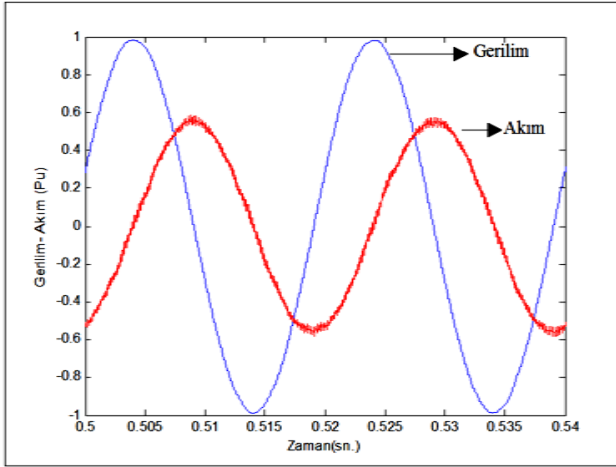
Uygulamada D-STATKOM'lar en fazla gerilim kaynak evirici ile tasarlandığı için çalışma prensibi gerilim kaynak evirici üzerinden anlatılacaktır (Şekil 3.4). Evirici içindeki güç kayıpları ihmal edilerek, evirici çıkış gerilimi V_{Mod} 'un temel bileşen genliğinin ayarlanması ile reaktif gücün kontrolü yapılmaktadır. Çıkış geriliminin genliği PWM modeli ile değiştirilebilir (Şekil 3.7). V_{Mod} gerilimi şebeke gerilimi V_{Hat} 'dan daha büyük olduğu zaman, D-STATKOM reaktif güç üretmekte (Şekil 3.5) ve V_{Mod} gerilimi V_{Hat} 'dan daha küçük olduğunda, D-STATKOM reaktif güç tüketmektedir (Şekil 3.6). V_{Hat} ve V_{Mod} gerilimlerinin bağlı genliklerine bağlı olarak D-STATKOM akımları ileri ya da geri olabilir. Evirici DA-hattı üzerine bağlı olan kondansatörün gerilim değeri V_{DA} özel bir geri besleme kontrol döngüsü vasıtasıyla, bir referans değere (V_{DA_ref}) eşit tutulmaktadır. Bu DA-hat gerilimi, V_{Hat} ve V_{Mod} arasındaki faz kayma açısını (δ) kontrol etmektedir (Mora'n et al. 2007).



Şekil 3.4 Gerilim kaynak eviricili D-STATKOM yapısı (Mora'n et al. 2007).



Şekil 3.5 D-STATKOM reaktif güç üretmekte iken gerilim ve akım dalga şekilleri ve fazör diyagramı.



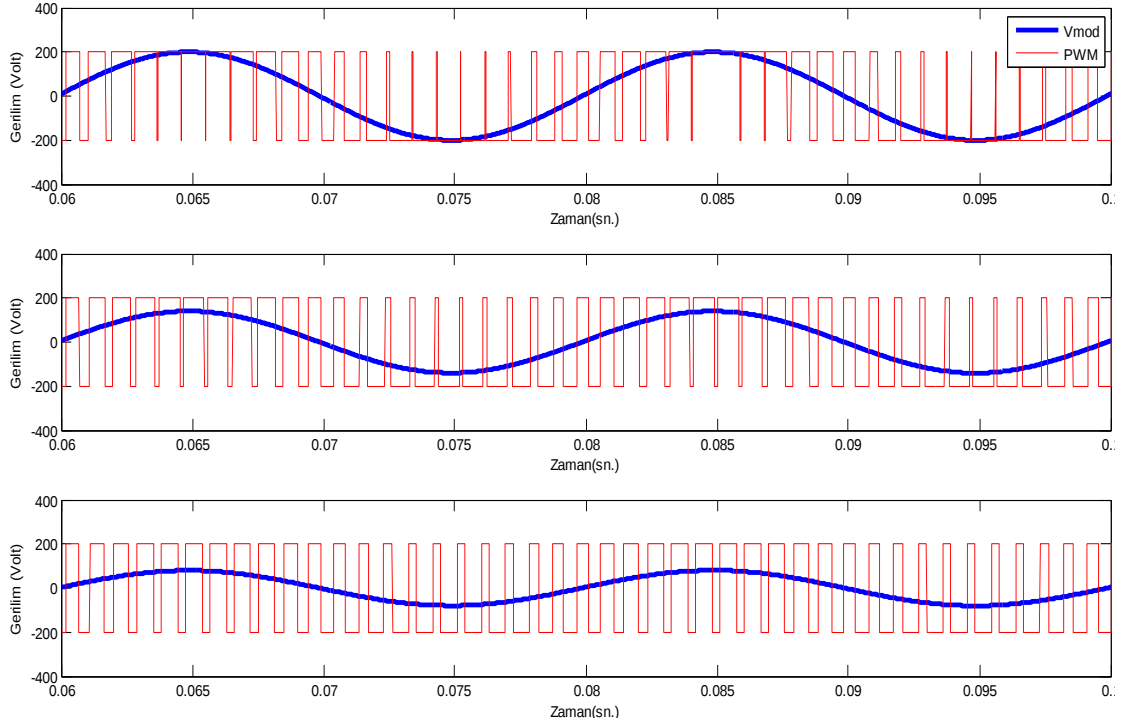
Şekil 3.6 STATKOM reaktif güç tüketmekte iken gerilim ve akım dalga şekilleri ve fazör diyagramı.

D-STATKOM çıkış geriliminin (V_{Mod}) genliği, PWM modülasyon indeksini (Şekil 3.7) değiştirilerek ya da evirici *DA-hat* geriliminin genliğinin değiştirilmesi ile kontrol edilebilir. PWM modülasyon indeksinin değiştirilmesi ile yapılan kontrol, *DA-hat* gerilimin değiştirilmesi ile yapılan kontrolden daha hızlı cevaplama tepkisine sahiptir (Mora'n *et al.* 2007).

Eviricinin az miktarda çekmiş olduğu aktif gücü ayarlayarak eviricinin *DA-hat* gerilimi V_{DA} değiştirilebilir. Bağlantı reaktörünün omik direnci ihmal edilerek D-STATKOM'un çekmiş olduğu I_c akımı, evirici çıkış gerilimi ile hat gerilimi arasındaki farkın bağlantı reaktörünün empedansına oranlanması ile bulunur. Eviricinin çekmiş olduğu aktif güç

eşitlik (3.3) ile tanımlanmıştır.

$$I_C = \frac{V_{MOD} \angle \delta - V_{HAT} \angle 0}{jX_S} = \frac{V_{MOD} \cdot \sin \delta}{X_S} + j \frac{V_{HAT} - V_{MOD} \cdot \cos \delta}{X_S} \quad (3.1)$$



Şekil 3.7 Farklı modülasyon indeksi için kompanzatorün çıkış gerilim dalga şekli.

Eşitlik (3.1) kullanılarak D-STATKOM'un çekmiş olduğu akımların aktif ve reaktif bileşenleri elde edilir.

$$I_{cp} = \frac{V_{MOD} \cdot \sin \delta}{X_S}$$

$$I_{cq} = j \frac{V_{HAT} - V_{MOD} \cdot \cos \delta}{X_S} \quad (3.2)$$

D-STATKOM'un çekmiş olduğu aktif ve reaktif akımlardan, aktif ve reaktif gücüde elde edebiliriz.

$$P = \frac{V_{HAT} \cdot V_{MOD}}{X_S} \cdot \sin \delta$$

(3.3)

$$Q = V_{HAT} \cdot \frac{V_{HAT} - V_{MOD} \cdot \sin \delta}{X_S} \quad (3.4)$$

Burada, X_S evirici hat reaktörü ve δ ise V_{Hat} ve V_{Mod} arasındaki faz kayma açısıdır. V_{DA} 'nın genliğini artırmak için akımın küçük bir pozitif ortalama değeri DA kondansatörü üzerinden geçmesi gerekir. Bu akım V_{DA} 'nın istenen değerine ulaşana kadar akmaya devam eder. V_{DA} 'nın genliği azaltılmak isteniyor ise, akımın küçük bir negatif ortalama değeri DA kondansatörü üzerinden akmalıdır. Eviricinin aktif güç durumu δ açısı ile belirlenmektedir. δ açısı pozitif ise evirici şebekeden aktif güç çekmektedir ve V_{DA} değeri artmaktadır. δ açısı negatif ise evirici aktif güç üretmektedir ve V_{DA} değeri azalmaktadır.

3.2 Çok Seviyeli İnvertörler

D-STATKOM evirici kısmı invertörlerden oluşturulmaktadır. Çok seviyeli diye adlandırılan invertörler 3. dereceden başlamaktadır. İnvertörlerin seviye sayısı arttıkça, basamak şeklindeki çıkış gerilimlerde artmaktadır. Böylelikle çıkış gerilimlerindeki harmonik bozulmalar azalmaktadır. Ancak seviye sayısı arttıkça invertörün kontrolü zorlaşmaktadır (Lai and Peng 1996).

Piyasada gate kontrollü yarı iletkenlerin kapasitelerinin sınırlı olması yüksek gerilim hatlarında kullanılan STATKOM için çözülmesi gereken önemli problemlerden biridir. Mevcut yarı iletkenler birkaç yüz amper iletme ile 6-10 kV ters gerilim bloklama yeteneğine sahiptir. Açıkçası yüksek gerilim uygulamalarında yeterli değildir. Bu sorun, çok seviyeli invertör yapıları kullanılarak aşılabilir (Mora'n *et al.* 2007). Ayrıca çok seviyeli invertörler, anahtarlama frekansını artırmadan veya invertörün güç çıkışını azaltmadan çıkış dalga şekillerindeki harmonikleri azaltmaktadır (Tuncer 2004).

H-köprü, diyot kenetlemeli ve kondansatör kenetlemeli olmak üzere üç farklı temele dayalı çok seviyeli invertör çeşitleri endüstriyel alanlarda uygulanmaktadır. Çok seviyeli konvertör, hem invertör hem de bir doğrultucu modunda çalışan bir güç elektroniği devresidir. Bu yapı doğrultma işlemlerinde de kullanılabilir (Khomfoi and Tolbert).

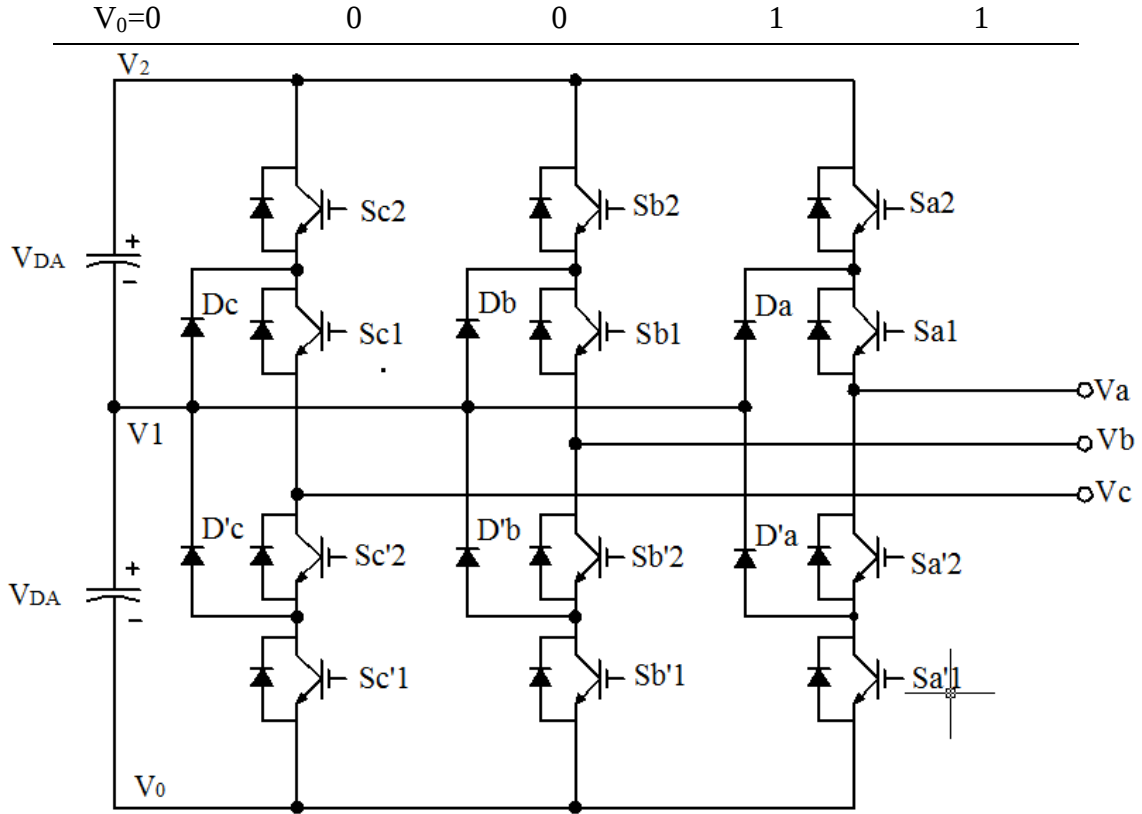
3.2.1 Diyot Kenetlemeli Üç Seviyeli İnvörtör

1981 yılında Nabae, Takahashi ve Akagi tarafından önerilen nötr noktalı konvertör, diyot kenetlemeli üç seviyeli invertörün temelidir. 1990'larda yüksek gerilim sistemi ara bağlantıları, değişken hız motor sürücüleri ve statik var kompanzasyon gibi kullanımlar için 4, 5 ve 6 seviyeli diyot kenetlemeli konvertör deneysel sonuçlarını bazı araştırmacılar makalelerinde bildirmişlerdir. Üç-fazlı üç seviyeli diyot kenetlemeli invertör Şekil 3.8'de gösterilmiştir. İnvörtörün her bir fazı ortak bir DA kaynağı paylaşmaktadır. Bu *DA-hat* 3 seviye için 2 adet kondansatör tarafından bölünmüştür. Kondansatörler üzerindeki DA gerilim ve anahtarlama elemanları üzerindeki gerilim baskısı kenetleme diyotları ile sınırlandırılmaktadır. Çizelge 3.1'de negatif hat gerilimi V_0 referans alınarak invertörün bir fazı için olası çıkış gerilimleri listelenmiştir. 1 durumu anahtarın iletimde, 0 durumu ise anahtarın kesimde olduğunu ifade etmektedir. Bir anahtar iletimde iken tamamlayıcı anahtarının kesimde olması gerekmektedir. Her faz için 2 adet tamamlayıcı anahtarlar vardır. a fazı için tamamlayıcı anahtar çiftleri (S_{a1} , $S_{a'1}$), (S_{a2} , $S_{a'2}$). Çizelge 3.1'de a fazının anahtarlama sistemi bu kurala uyacak şekilde dizayn edilmiştir.

Hat gerilimi V_{ab} , a fazının gerilimi ile b fazının geriliminden oluşmaktadır. m düzeyinde diyot kenetlemeli invertörün bir m düzeyinde çıkış faz gerilimi ve $(2m-1)$ düzeyinde çıkış şebeke gerilimi mevcuttur.

Çizelge 3.1 Üç seviyeli diyot kenetlemeli invertör gerilim seviyelerine uygun anahtarlama durumları.

Gerilim (V_{a0})	Anahtarlama durumu			
	S_{a2}	S_{a1}	$S_{a'2}$	$S_{a'1}$
$V_2=2V_{DA}$	1	1	0	0
$V_1=V_{DA}$	0	1	1	0



Şekil 3.8 Üç fazlı üç seviyeli diyot kenetlemeli invertör yapısı (Khomfoi and Tolbert 2007).

Avantajları:

- 1- Tüm fazlar konvertörün kapasitans gereksinimini en aza indiren bölünmüş bir DA barayı ortak kullanırlar.
- 2- Kondansatörler grup olarak önceden şarj edilebilir.
- 3- Temel frekans anahtarlama için verim yüksektir.

Dezavantajları:

- 1- Tek faz invertör için gerçek güç akışı zordur. İnvertör ara DA seviyelerde izleme ve kontrol olmadan aşırı şarj ve deşarj eğiliminde olacaktır.
- 2- İnverterin seviyesindeki artış kenetleme diyotlarının sayısını çok artıracığından yüksek seviyeli birimler için elverişsizdir (Khomfoi and Tolbert).

3.3 D-STATKOM Tasarım Prensipleri

PWM evirici, bağlantı reaktörü ve *DA-hat* kondansatörü D-STATKOM'un temel parçalarıdır. Eviricinin yapısı anma gerilimi ve gücüne bağlıdır. D-STATKOM en çok gerilim kaynak evirici kullanılarak uygulanmıştır. Ancak gerilim ve akım kaynağı yaklaşımlarının her ikisiyle de uygulanabilmektedir. Onların performans fonksiyonlarına dayandırılarak bağlantı reaktörü ve kondansatör tasarımı yapılmaktadır. Bağlantı reaktörünün görevi, şebeke gerilimi ile evirici giriş gerilimi arasında görülen ani gerilim değişimlerini absorbe etmektir. Üstelik gerilim kaynak evirici kullanılması durumunda, hat akımında meydana gelen harmonik bozulmaların azaltılmasına ve evirici anahtarlama frekansının stabilize etmeye katkıda bulunabilir (Mora'n *et al.* 2007).

3.3.1 DA-Hat Gerilim Değerinin Belirlenmesi

DA-hat geriliminin değeri, ortak bağlantı noktasındaki gerilim değerine bağlıdır ve eviricinin PWM kısmının başarılı olabilmesi için şebeke geriliminin genliğinden daha büyük olması gerekmektedir. Üç faz bir evirici için *DA-hat* gerilimi eşitlik (3.5) ile tanımlanır (Singh and Arya 2012).

$$V_{DA} = 2\sqrt{2} \cdot \frac{V_{ff}}{\sqrt{3}M_{Bek}} \quad (3.5)$$

Burada, V_{ff} D-STATKOM çıkışı fazlar arası alternatif gerilim değeri, M_{Bek} ise D-STATKOM'un reaktif güç alış verişi yapmadığı durumdaki modülasyon indeksidir.

3.3.2 Bağlantı Reaktörünün Değerinin Belirlenmesi

Bağlantı reaktörü tasarımında iki kistas kullanılmıştır. Bu kistaslardan birincisi giriş akımında izin verilen maksimum harmonik akıma dayanır. İkinci kistas ise bağlantı reaktörü üzerine düşmesi istenilen gerilim değeri ile ilgilidir. İlk durum için, reaktörün değeri eşitlik (3.6) ile belirlenir (Mora'n *et al.* 2007).

$$X_R = \frac{1}{THD_I} \sqrt{\sum_{k \neq 1}^{\infty} \frac{(V_{ak})^2}{k^2}} \quad (3.6)$$

Burada THD_I evirici giriş akımında izin verilen maksimum harmonik bozulmadır (Normalde% 5), V_{ak} evirici giriş gerilimi harmonik bileşenidir, k harmonik bileşenin derecesidir. Evirici giriş gerilimi V_{ak} , eviricide uygulanan PWM tekniğine bağlıdır.

İkinci kıstasa göre bağlantı reaktörü değişik şekillerde hesaplanabilmektedir. Bağlantı reaktörünün endüktans değeri eşitlik (3.7) kullanılarak hesaplanabilir (Mora'n *et al.* 2007).

$$L_R = \Delta V_R \cdot \frac{1}{4 \cdot A_u \cdot f_t} \quad (3.7)$$

Burada, ΔV_R bağlantı reaktörü üzerinde beklenen maksimum gerilim düşümü, A_u üçgen kontrol dalga şeklinin genliği, f_t ise üçgen dalga şeklinin frekansdır (evirici anahtarlama frekansına eşittir).

İkinci kıstasa göre bağlantı reaktörünün farklı bir hesaplama yöntemi ise modülasyon indeksinin çalışma aralığına göre belirlenmektedir. Eşitlik (3.8) per-unit biriminde modülasyon indeksi kullanımı ile bağlantı reaktörünün değerini vermektedir (Huang *et al.* 2006).

$$X_{Rpu} = \frac{M_{Mak} - M_{Bek}}{M_{Bek}} \quad (3.8)$$

Bu eşitlikte, X_{Rpu} bağlantı reaktörünün per-unit cinsinden değeri, M_{Mak} modülasyon indeksinin alacağı en büyük değer ve M_{Bek} ise D-STATKOM'un güç alışverişi yapmadığı bekleme durumundaki alacağı modülasyon indeksinin değeridir. Bağlantı reaktörünün baz alınacak değeri ise eşitlik (3.9) ile elde edilmektedir.

$$X_{Rbaz} = \frac{(V_{HAf})^2}{S} \quad (3.9)$$

3.3.3 DA-hat Kondansatörünün Değerinin Belirlenmesi

DA-hat kondansatörün fonksiyonu, kontrol şeması tarafından belirlenen referans değere DA-hat geriliminin sabit ve eşit kalmasını sağlamaktır. Kondansatör değerinin hesaplanması için iki tasarım kistası kullanılır. Birincisi DA-hat gerilimde izin verilen maksimum gerilim harmonik bozulma faktörü ile ilgilidir. İkincisinde yükün azalması ya da artışı durumlarında DA-hat gerilimdeki göze alınabilir gerilim dalgalanması dikkate alınarak kondansatör değeri hesaplanır. İlk durumda kondansatörün değeri eşitlik (3.10)'a göre hesaplanmaktadır. İkinci durum için ise (maksimum gerilim dalgalanması) eşitlik (3.12) kullanılır. Eğer DA-hat kondansatörü önde VAR kompensatör olarak tasarlanacak ise (belirli bir değerden daha az V_{DA} için ripple faktörü), kapasitans değeri aşağıdaki ifade ile tanımlanır (Mora'n et al. 2007).

$$X_c = \frac{R_v \cdot V_D}{\left\{ \sum_k \frac{I_{ck}^2}{k^2} \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (3.10)$$

Burada, R_v DA-hat kondansatör üzerindeki maksimum gerilim dalgalanma faktörüdür, I_{ck} ise kondansatör akımının harmonik bileşenidir.

D-STATKOM'un kontrol şemasından bağımsız olarak yüklerin devreden çıkartılmasında DA-hat geriliminde bir artış, yüklerin devreye alınmasında ise DA-hat geriliminde bir azalma olacaktır (Singh and Arya 2012). Bu gibi geçici durumlarda DA-hat kondansatör kaynağının sistemden ekstradan güç talep etmesinden dolayı DA-hat gerilimde dalgalanmalar meydana gelmektedir. Gerilim dalgalanmalarının genliği, geçici durumların oluşma anına ve hat akımlarındaki değişikliğin miktarına bağlıdır. Hat akımlarından birinin 1 per ünit ileri durumdan 1 per ünit geri kalmasına zorlanması ile maksimum gerilim artışı üretilir ve aşağıdaki eşitliğin kullanımı ile hesaplanır (Mora'n et al. 2007).

$$V_{DA_Mak} = \frac{1}{C_{DA}} \int_{\theta/\omega} i_c(t) dt + V_{DA_0} \quad (3.11)$$

Burada, V_{DA_Mak} kondansatör üzerindeki maksimum gerilim artışı, V_{DA_0} kalıcı durum $DA-hat$ gerilimi ve $i_c(t)$ kondansatörün üzerinden geçen ani akımdır. Eviricinin anahtarlama fonksiyonu ile hat akımı üretilmekte ve DA akımı $i_c(t)$ tanımlanmaktadır. C 'nin belirlenmiş bir değer altında gerilim dalgalanmasını (ΔV_{DA}) tutmak için sınırlandırılmış temel tasarımı aşağıdaki eşitlikle bulunur (Huang *et al.* 2006).

$$C_{DA} = \frac{1}{\Delta V_{DA}} \int i_c(t) dt \quad (3.12)$$

İki tasarım kıstası karşılaştırıldığı zaman, ikincisi daha büyük bir C değeri sağlamaktadır. Böylelikle D-STATKOM kararlılığını artırmaya katkıda bulunarak D-STATKOM çalışmasını daha güvenli yapmaktadır (Huang *et al.* 2006).

İkinci durum için farklı bir kondansatör değerinin belirleme yöntemi ise eşitlik (3.13) ile sağlanabilir (Singh and Arya 2012).

$$C_{DA} = \frac{2k \cdot (3V_{fn} \cdot (a \cdot I_f) \cdot t)}{(V_{DA})^2 - (V_{DA_Min})^2} \quad (3.13)$$

Bu eşitlikte, V_{DA} normal $DA-hat$ gerilimi, V_{DA_Min} $DA-hat$ geriliminin alacağı minimum değer, V_{fn} faz-nötr arası gerilim değeri, I_f D-STATKOM'un bir faz akımı, “ a ” aşırı yüklenme faktörü, t ise $DA-hat$ geriliminin düzelme zamanıdır. Aşırı yüklenme faktörü a 'nın değeri 1.2 alınmaktadır, k faktörünün değeri ise 0.05 ile 0.15 arasında değişmektedir.

3.4 Çok Seviyeli İnvörtörlerde kullanılan PWM Teknikleri

Klasik invertörler de kullanılan PWM stratejileri çok seviyeli invertörlerde kullanılmak üzere modifiye edilebilir. Invertörlerin seviye sayısı arttıkça çıkış gerilim dalga şekli sinüzoidal biçime daha çok yaklaşmakta ve böylelikle toplam harmonik bozulması azalmaktadır (Deniz 2010). Çok seviyeli invertörlerin ortaya çıkması ile birlikte PWM modülasyon yöntemleri, anahtarlama frekansına göre sınıflandırılabilir. Literatürde en çok tartışılan üç seviyeli PWM teknikleri; çok seviyeli taşıyıcı temelli, seçici harmonik ortadan kaldırılması ve çok seviyeli uzay vektör PWM'dir. Çok seviyeli PWM tekniklerinin hepsi iki seviyeli PWM stratejilerinin uzantısıdır.

Çok seviyeli invertör modülasyon stratejileri

1. Temel Anahtarlama Frekansı
 - a. Uzay vektör kontrol
 - b. Seçmeli harmonik eliminasyon
2. Yüksek Anahtarlama Frekanslı PWM
 - a. Uzay vektör PWM
 - b. Seçmeli harmonik eliminasyon PWM
 - c. Sinüzoidal PWM

3.4.1 Çok Seviyeli Taşıyıcı Temelli Darbe Genişlik Modülasyonu

Çok seviyeli invertörlerin aktif aygıtlarını kontrol etmek için birçok farklı iki seviyeli taşıyıcı tabanlı PWM tekniği araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Uygulamada en popüler ve kolay olan PWM tekniği her faz sinyalinde birkaç üçgen taşıyıcı sinyal ve bir referans ya da modülasyon kullanmaktadır.

Tez çalışmamda sinüzoidal PWM kullanıldığı için sinüzoidal PWM detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

3.4.1.1 Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SPWM)

Sinüzoidal PWM tekniği endüstriyel invertörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Padiyar 2007). İki seviyeli sinüzoidal PWM, istenilen frekansa sahip olan sinüzoidal bir referans sinyal ile daha yüksek bir frekansa sahip olan taşıyıcı bir üçgen sinyalin kıyaslanmasından meydana gelmektedir (Şekil 3.12). Basit ve uygulamada en çok kullanılan bir tekniktir. Sinüzoidal referans sinyalin genliği belirli değerler arasında değişebilmektedir. Taşıyıcı üçgen sinyalin genliği ise sinüzoidal referans sinyalin genliğinin alabileceği maksimum değere eşit ve sabittir. Taşıyıcı sinyal ile referans sinyalin karşılaştırılmasından elde edilen kare dalga sinyal ile konvertör anahtarları sürülmektedir (Acha *et al.* 2002).

Genlik modülasyon oranı M_a , aşağıdaki gibi tanımlanır.

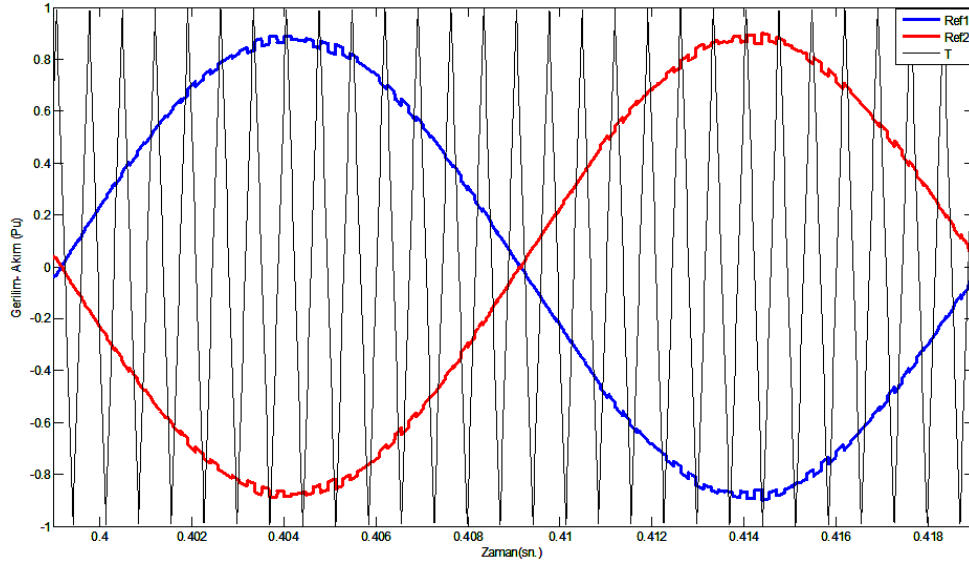
$$M_a = \frac{A_s}{A_t} \quad (3.14)$$

Burada; A_s referans sinyali genliği ve A_t ise taşıyıcı sinyalin genliğidir.

SPWM çift kutuplu ve tek kutuplu olarak iki farklı şekilde tasarlanabilmektedir. Tek kutuplu SPWM de aralarında 180° faz farkı bulunan iki referans sinüzoidal sinyalden oluşmaktadır (Şekil 3.9). Çift kutuplu SPWM de ise sadece bir adet sinüzoidal referans sinyal kullanılmaktadır (Şekil 3.7). Tek kutuplu ve çift kutuplu PWM sistemleri aynı anahtarlama frekansında çalıştırıldığında, çift kutuplu PWM sistemi tek kutuplu PWM sistemine göre daha kararlı çalışmaktadır (Bo *et al.* 2013).

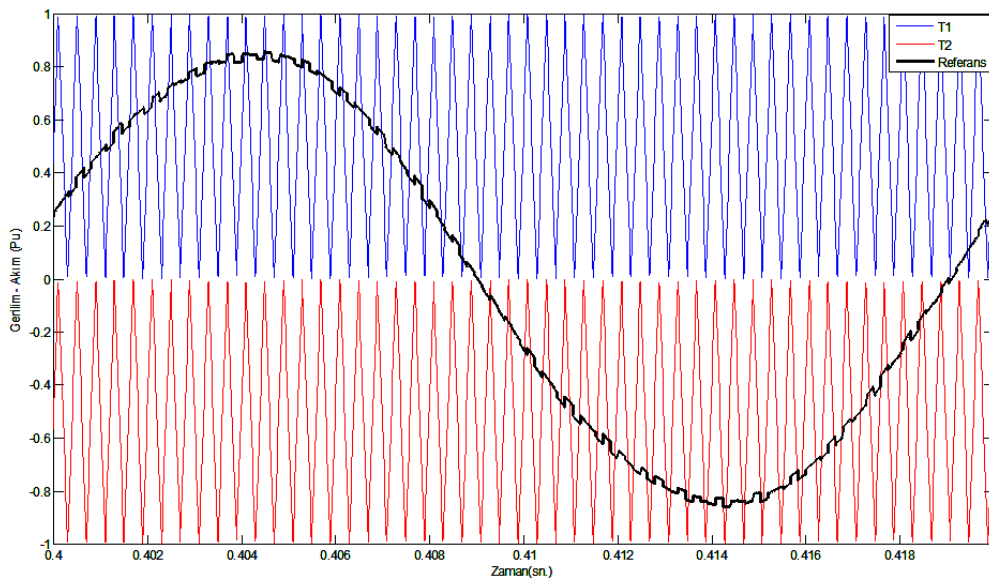
SPWM'in kontrol prensibi, bir adet sinüzoidal sinyale birkaç adet taşıyıcı üçgen sinyalin tutturulmasından oluşmaktadır. m seviyeli bir invertör için $(m-1)$ adet taşıyıcı üçgen sinyal gerekmektedir. Taşıyıcı sinyaller aynı f_c frekansına ve aynı AA genliğe sahiptirler. Modüle sinyali f_a frekansında ve M_a genliğinde bir sinüs eğrisidir. Her an için taşıyıcı sinyaller modülasyon sinyali ile karşılaştırılır ve invertör anahtarlama elemanlarının tetikleme sinyali üretir (Singh *et al.* 2012).

Çok seviyeli sinüzoidal PWM için literatürde değişik metotlara rastlanmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanlar aşağıda detaylı bir şekilde anlatılmıştır.



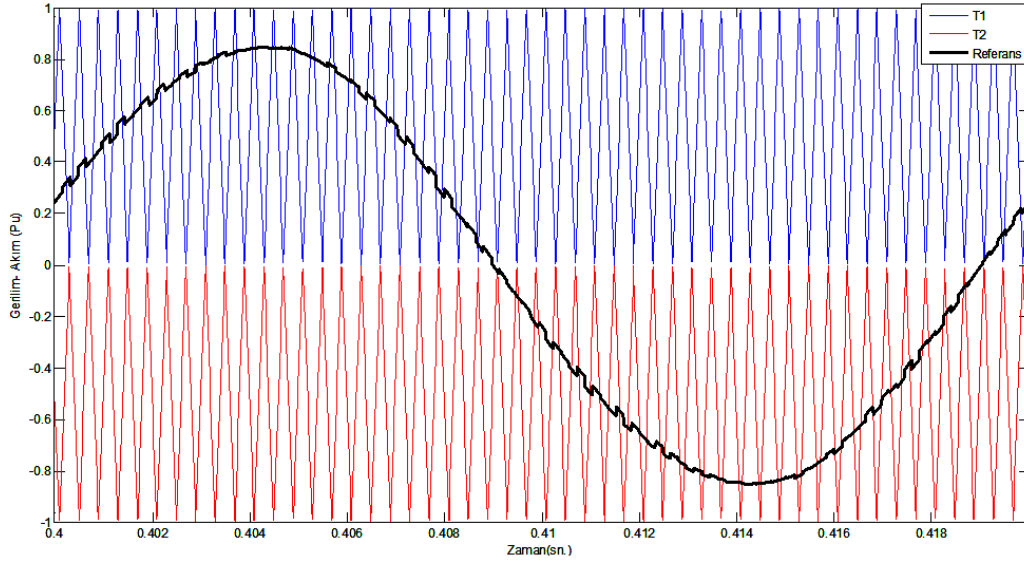
Şekil 3.9 Tek Kutuplu SPWM.

Faz sıralama metotta tüm taşıyıcılar aynı frekans ve genliğe sahiptir. Üstelik $(n-1)$ adet taşıyıcının hepsi aynı faz içerisinde. Bu metot, dikey olarak sıralanan taşıyıcı sinyaller ile sinüzoidal referans sinyalin karşılaştırılmasına dayanmaktadır (Şekil 3.10). Bu metot m seviyeli invertör çıkış gerilimi üretmek için $(m-1)$ adet taşıyıcı kullanmaktadır. (Tolbert and Habetler 1999). Tüm taşıyıcı sinyaller bir faz içerisinde aynı frekansa ve genliğe sahiptirler (Mcgrath and Holmes 2002).



Şekil 3.10 Faz Sıralı Modülasyon.

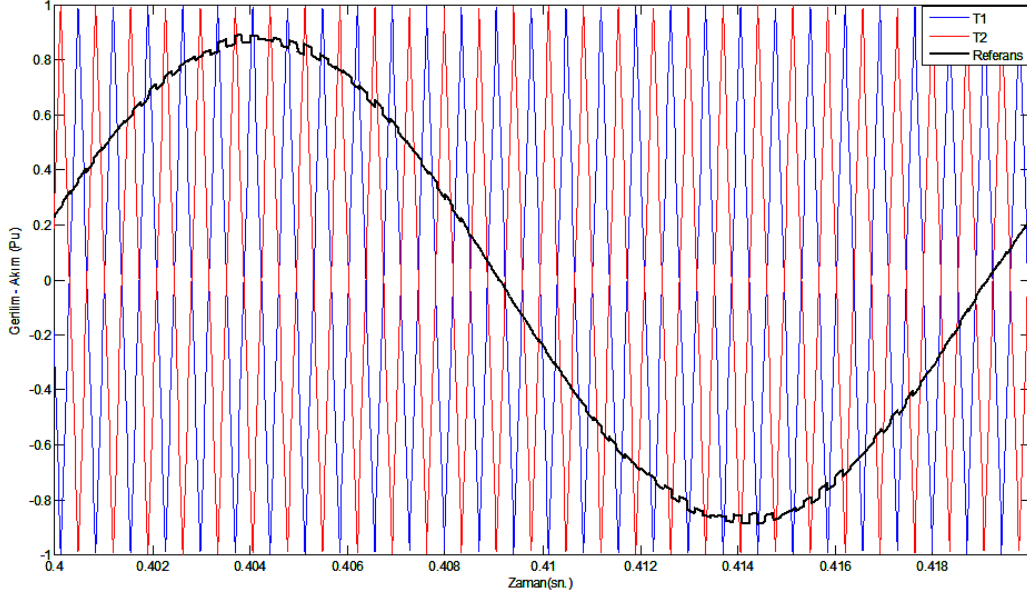
Ters faz sıralı PWM 'de, sıfır eksenini üzerindeki tüm taşıyıcılar bir faz içerisinde aynı frekans ve genliğe sahiptirler. Fakat sıfır ekseninin altındaki tüm taşıyıcı sinyaller, sıfır eksenini üzerindeki taşıyıcılarla 180° faz farkı ile aynı genliğe ve frekansa sahiptirler (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Ters Faz Sıralı PWM.

Faz Kaydırmalı Taşıyıcıya Sahip Sinüzoidal PWM (CPS-SPWM)PWM tekniğinde sinüzoidal referans sinyal sayısı bir adet ve taşıyıcı sinyal sayısı birden fazladır. Taşıyıcı sinyaller arasında faz farkı bulunmaktadır. Ancak taşıyıcı sinyallerin frekansları ve genlikleri aynıdır. Bu teknikte çıkış gerilim dalga şekli daha az bozucu harmoniklere sahiptir (Karmiris et al. 2012). Bu tezde üç seviyeli evirici kullanıldığı için, üç seviyeye göre faz kaydırmalı taşıyıcıya sahip sinüzoidal PWM anlatılmıştır.

Üç seviyeli faz kaydırmalı taşıyıcıya sahip sinüzoidal PWM de taşıyıcı fazlar arasında 180° derece faz farkı bulunmaktadır. Referans sinyal sinüzoidal ve bir adettir. Referans sinyal ile taşıyıcı üçgen sinyallerin karşılaştırılması sonucu eviricinin anahtarlama durumları elde edilir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Üç seviyeli faz kaydırmalı taşıyıcıya sahip sinüzoidal PWM.

3.5 D-STATKOM Kontrol Ünitesi

D-STATKOM'un kontrol edilmesinde araştırmacılar tarafından birçok farklı matematiksel modeller kullanılmıştır. Senkron referans eksen, anlık reaktif güç teoremi ve yapay zekâ temelli olmak üzere bir çok farklı matematiksel modellere dayalı kontrol şemaları araştırmacılar tarafından önerilmiştir (Singh and Solanki 2012). Bu kontrol yöntemlerinin çoğunda, ortak bağlantı noktasındaki gerilimi ve evirici akımını kontrol etmek için Oransal-İntegral (PI) kontrol kullanılmıştır (Bongiorno and Svensson 2007). PI denetleyicinin yanı sıra sürmeli mod (Eldery *et al.* 2006) ve gerekli donanımı azaltan akım sensörsüz metot da (Luo *et al.* 2011) önerilmiştir. Tez çalışmamda senkron referans çatı temelli matematiksel modeli kontrol yapısı kullanılmıştır. Bu yüzden sadece bu matematiksel model üzerinde durulacaktır.

3.5.1 Senkron Referans Çatı Kontrol Yapısı

D-STATKOM'un reaktif güç alışverişi; şebeke gerilimi, bağlantı endüktansının reaktansı, eviricinin *DA-hat* gerilimi, modülasyon indeksi ve evirici ile şebeke arasındaki faz farkı ile orantılıdır. Biz bu değerlerden *DA-hat* gerilimi, modülasyon indeksi ve evirici ile şebeke arasındaki faz farkını, D-STATKOM çalışması sırasında değiştirerek üretilen reaktif gücün kontrolünü sağlayabiliriz. *DA-hat* gerilimini

değiştirilerek reaktif güç kontrolü yapılırsa, *DA-hat* gerilimi bağlantı endüktansı ve *DA-hat* kondansatörü üzerinden şarj veya deşarj edildiği için bu yönteminin cevap hızı kötü olmaktadır (Deniz 2010). Yaptığım uygulamada modülasyon indeksinin değeri değiştirilerek reaktif gücün kontrolü sağlanmaktadır.

Senkron referans çatı kontrol yapısında, dq dönüşümü olarak bilinen park dönüşümü kullanıldığından, park dönüşümü, faz yakalama döngüsü ve PI kontrol edici bilgileri verildikten sonra kontrol şemasının anlatımı yapılacaktır.

3.5.1.1 Park Dönüşümü

Park dönüşümü elektrik makinelerinin analizini kolaylaştırmak için 1929 yılında R.H. Park tarafından sunulmuş bir matematiksel modellemedir. Park, rotor ile beraber dönen hayali sargı değişkenlerin bir değişimini formüle etmiştir. d-q dönüşümü olarak da bilinen dönüşüm rotor direk eksenini ile stator ilk fazı arasındaki θ açısı cinsinden ifade edilip matematiksel olarak modellenir.

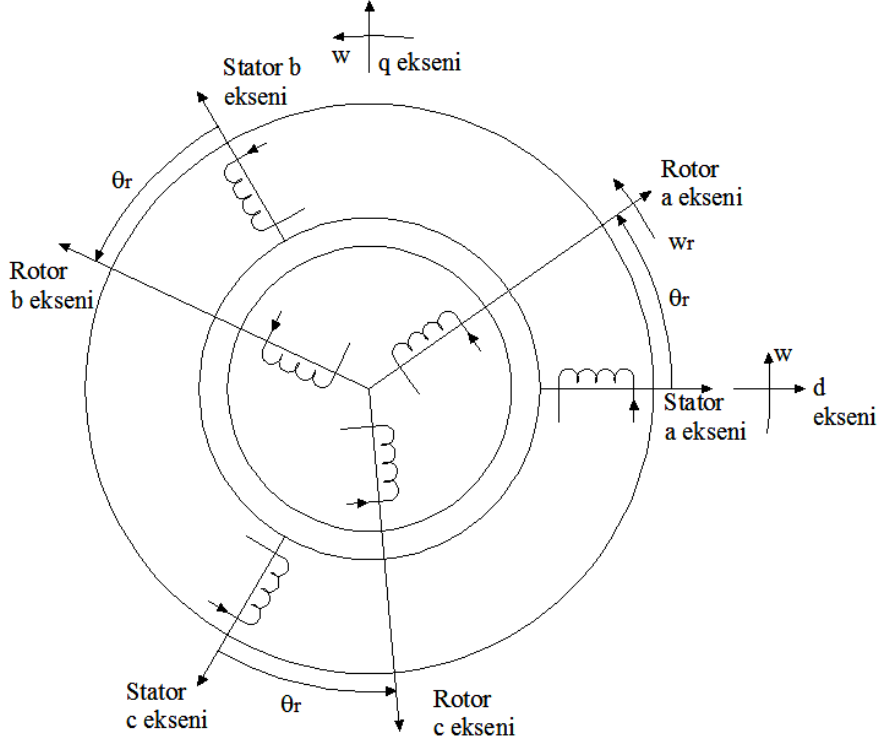
Üç fazlı sistemlerde, özellikle zamana bağlı olarak değişen büyüklüklerden kurtulmak için üç faz alternatif akım değerlerini iki doğru akım büyüklüğüne indirgeyen bu metod, elektrik makinalarının kontrolünde ve analizinde büyük kolaylıklar sağlamaktadır (Güran ve Eren 2012).

i_a , i_b ve i_c dönüşüme tabi tutulan akım büyüklüklerini ve θ rotor direk eksenini ile stator ilk fazı arasındaki açı olmak üzere dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120) & \cos(\theta + 120) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120) & \sin(\theta + 120) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

ve ters dönüşümü de;

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120) & \cos(\theta + 120) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120) & \sin(\theta + 120) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$



Şekil 3.13 Eksenlerin şekilsel gösterimi (Güran ve Eren 2012).

Burada sıfır bileşeni üç fazlı stator dönüşümü için gereklidir ve hava boşluğunda net akı oluşturmayan armatür akımını temsil eder. Bu yüzden rotor devresini kesen bir akı oluşturmaz. Dengeli üç fazlı bir sistemde sıfır bileşeninin değeri sıfıra eşittir.

3.5.1.2 PI Denetleyici

Oransal kontrolde oluşan sapma'yı azaltmak veya ortadan kaldırmak için kontrol cihazı integratör (integral alıcı devre) kullanır. Ölçülen değer ile set edilen değer arasındaki fark sinyalinin zamana göre integrali alınır. Bu integral değeri, fark değeri ile toplanır ve oransal bant kaydırılmış olur. Matematiksel olarak formülize edersek;

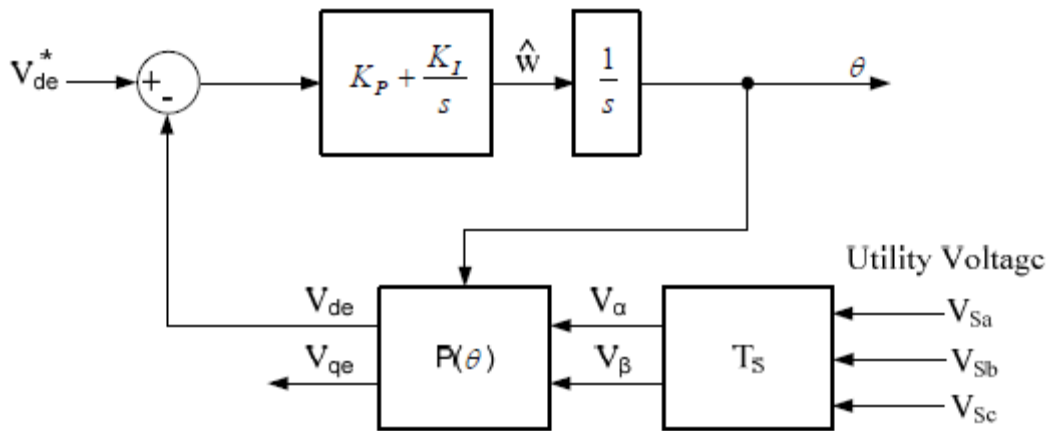
$$P_{DA} = K_p(V_{DA_ref} - V_{DA}) + K_i \int (V_{DA_ref} - V_{DA}) dt \quad (3.17)$$

Bu şekilde sisteme verilen enerji otomatik olarak artırılır veya azaltılır ve proses değişkeni set değerine oturtulur. İntegratör devresi, gerekli enerji değişkenliğine set değeri ile ölçülen değer arasındaki fark kalmayınca kadar devam eder. Fark sinyali sıfır olduğu anda artık integratör devresinin integralini alacağı bir sinyal söz konusu değildir. Herhangi bir şekilde sistem dengesi bozulup, proses değişkeni değeri set değerinden uzaklaşacak olursa tekrar fark sinyali oluşur ve integratör devresi düzeltici etkisini gösterir.

D-STATKOM uygulamalarında, Şebeke gerilimi ile referans gerilimin karşılaştırılmasından elde edilen hata PI kontrol ediciye girmektedir. PI kontrol ediciye giren hata gerilimin hatasıdır. PI kontrol ediciden çıkan sinyal ise referans akımdır (Karmiris *et al.* 2012).

3.5.1.3 Faz Yakalama Döngüsü (PLL)

Şebeke gerilim vektörü ile d-q referans çatının senkronize olması için, $\theta_{\text{Şebeke}}$ faz açısının bilinmesi gerekmektedir (Carmiris *et al.* 2012). $\theta_{\text{Şebeke}}$ faz açısının hesaplanması için faz yakalama döngü algoritması (PLL) kullanılmaktadır (Blaabjerg *et al.* 2006). Şebekeden ölçülen üç faz gerilimleri PLL'e girilerek şebekenin açısal frekansı ile sinüs ve kosinüs değerleri belirlenmektedir.



Şekil 3.14 Faz yakalama döngüsünün (PLL) blok diyagramı.

3.5.1.4 Gerilim Kontrol Şeması

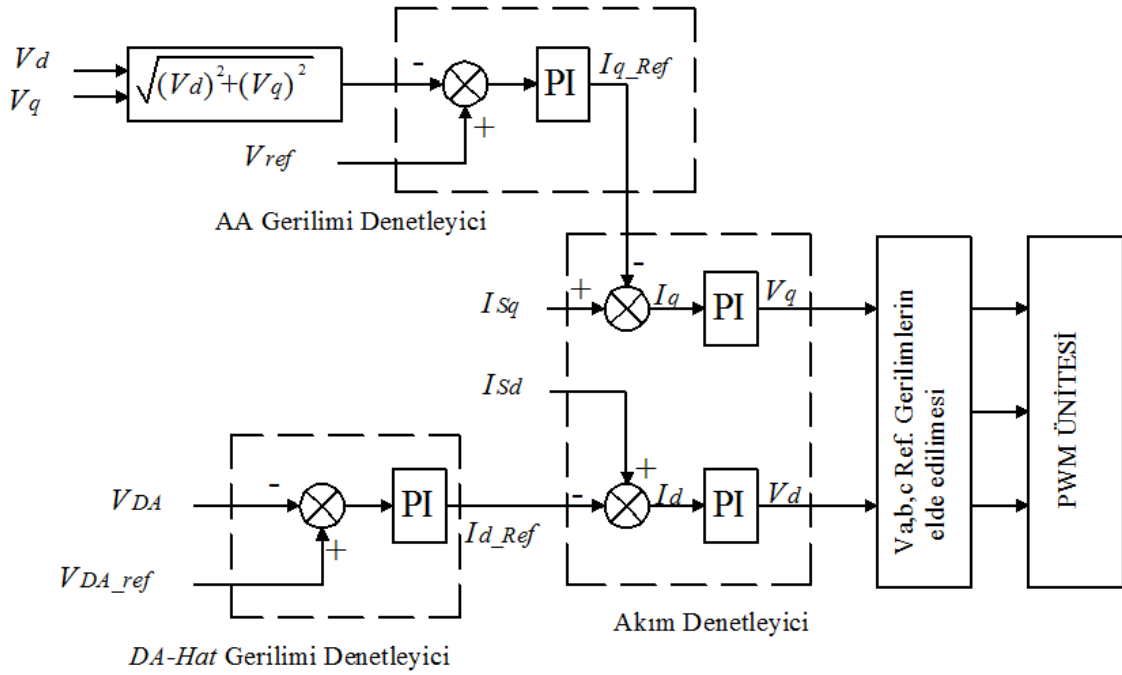
Kontrol ünitesi için şebeke gerilimi, yük akımları, D-STATKOM akımları ve *DA-hat* geriliminin ölçülmesi gerekmektedir. Bu değerlerden *DA-hat* gerilim değeri hariç diğer ölçüm değerlerinin hepsi park dönüşümüne tabi tutularak dq eksen bileşenleri elde edilir. Park dönüşümünün yapılabilmesi için şebeke gerilim değerleri faz yakalama döngüsüne gönderilmelidir. Faz yakalama döngüsü (PLL), şebeke gerilim değerlerinden faydalanarak park dönüşümü için gerekli olan $\sin(wt)$, $\cos(wt)$ ve şebekenin açısal hızı (w) 'yi elde eder.

Şekil 3.15'de gösterildiği gibi kontrol şeması; AA gerilim denetleyici, *DA-hat* gerilim denetleyici ve akım denetleyici olmak üzere üç denetleyiciden oluşmaktadır. AA gerilim denetleyici kısmında, eşitlik (3.18) kullanımı ile şebeke geriliminin büyüklüğü (V_G) elde edilir. Şebeke geriliminin büyüklüğü V_G değeri ile referans gerilim V_{ref} değeri karşılaştırılarak gerilim değerinin hatası elde edilir. Gerilimin hata değeri bir PI denetleyicisine uygulanarak I_q referans değeri belirlenir. Burada, V_{ref} değeri D-STATKOM bağlantı noktasındaki AA gerilimin olması istenen değerdir.

$$V_G = \sqrt{(V_d)^2 + (V_q)^2} \quad (3.18)$$

DA-hat gerilimi denetleyici kısmında, eviricinin *DA-hat* gerilimi ölçülerek referans gerilim V_{DA_ref} ile karşılaştırılır ve *DA-hat* geriliminin hatası elde edilir. İnvertörün *DA-hat* gerilim hatası bir PI denetleyiciye uygulanarak I_d referans değeri belirlenir. Burada V_{DA_ref} değeri *DA-hat* geriliminin olması istenen değeridir.

Akım denetleyici kısmında, D-STATKOM akımlarının dq eksen bileşenleri ile dq eksen bileşenli referans akım değerleri karşılaştırılarak I_d ve I_q değerleri elde edilir (Şekil 3.15). Elde edilen I_d ve I_q değerlerinden V_d ve V_q değerlerinin elde edilmesi için iki adet PI denetleyici kullanılır.



Şekil 3.15 D-STATKOM kontrol blok diyagramı (Banerji *et al.* 2012).

DA-hat geriliminin sabit tutulması, şebeke gerilimi ile evirici çıkışından elde edilen gerilim arasındaki faz farkı değiştirilerek yapılmaktadır. Elde edilen V_d ve V_q değerlerine aşağıdaki eşitlik uygulanarak D-STATKOM ile şebeke arasındaki faz farkı δ belirlenmektedir.

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{V_q}{V_d}\right) \quad (3.19)$$

Şebeke geriliminin kontrolü ise PWM ünitesine referans olan sinüzoidal sinyalin genliğinin değişmesi ile sağlanmaktadır. Sinüzoidal sinyalin genliğinin değiştirilmesi ise modülasyon indeksinin değişimine bağlıdır. Eşitlik (3.20) ile V_d ve V_q değerlerinden modülasyon indeksinin değeri belirlenmektedir.

$$M_a = \sqrt{(V_d)^2 + (V_q)^2} \quad (3.20)$$

Modülasyon indeksi ve DSTATKOM ile şebeke arasındaki faz farkı δ değerleri elde edildikten sonra, PWM ünitesine referans olacak sinüzoidal sinyallerin belirlenmesi

gerekmektedir. Referans sinüzoidal sinyal şebeke ile senkronize olmalı ve *DA-hat* geriliminin sabit kalması için şebeke ile arasında çok az değişen bir faz farkı olması gerekmektedir. Şebeke ile senkronize olmasını faz yakalama döngüsünden elde edilen θ açısı ile ve *DA-hat* gerilimini sabit tutmasını da δ açısı ile sağlamaktadır. Referans sinüzoidal sinyalin genliği ise modülasyon indeksi ile sağlanmaktadır. Eşitlik (3.21)'in kullanımı ile bu üç değerden a fazına ait referans sinüzoidal sinyal elde edilmektedir.

$$V_a = M_a \cdot \sin(\theta + \delta + 0) \quad (3.21)$$

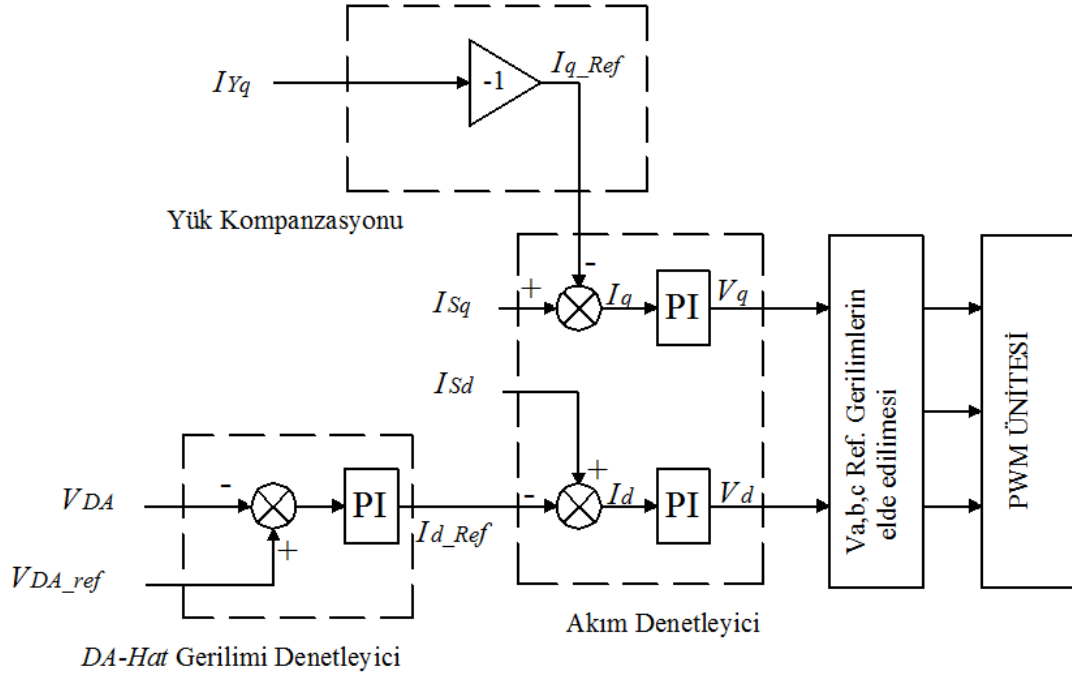
$$V_b = M_a \cdot \sin(\theta + \delta - (\frac{2\pi}{3}))$$

$$V_c = M_a \cdot \sin(\theta + \delta + (\frac{2\pi}{3}))$$

3.5.1.5 D-STATKOM İle Yük Kompanzasyonu

Şimdiye kadar D-STATKOM alıcı ile ortak bağlantı noktasındaki şebeke gerilimini düzenleme işlemi üzerinden anlatıldı. D-STATKOM bunun yanında ortak bağlantı noktasında yükün çekmiş olduğu reaktif enerjiyi karşılama görevi de yapabilmektedir. Yani alıcı ne kadar reaktif güç tüketirse D-STATKOM o kadar reaktif güç üretebilir ya da alıcı ne kadar reaktif güç üretirse D-STATKOM o kadar reaktif güç tüketebilir. Bunun için kontrol ünitesindeki AA gerilim denetleyici iptal edilir ve bu denetleyicinin sağlamış olduğu I_{q_ref} akımı yükün çekmiş olduğu akımın $dq0$ eksenindeki q bileşeninin -1 kazanç ile çarpımıdır. Şekil 3.16'da yük kompanzasyonu için D-STATKOM kontrol şeması gösterilmektedir.

D-STATKOM kontrol ünitesinde 4 adet klasik PI denetleyici bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında, klasik PI denetleyicinin yerine bulanık PI denetleyici kullanılmıştır. 4. Bölümde bulanık mantık ve bulanık PI denetleyici detaylı bir şekilde anlatılmıştır.



Şekil 3.16 D-STATKOM ile yük kompanzasyonu kontrol şeması.

4. BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ

Bulanık küme kavramına dayalı olan bulanık mantık (*fuzzy logic*) ilk olarak Zadeh (1965) tarafından önerilmiştir (Zadeh 1965). 1965 de ortaya atılmasına rağmen, bulanık küme kavramı ancak 1970’li yılların ikinci yarısından sonra kullanılmaya başlanmıştır. 1980’li yılların ikinci yarısından sonra Japonların ürünlerinde bulanık mantığı kullanmalarıyla da hız kazanarak, günümüzdeki doruk noktasına gelmiştir (Altaş 1999). Günümüzde daha çok süreç kontrolü, görüntü işleme, örüntü tanıma ve sınıflandırma, yönetim, ekonomi ve karar vermede yaygın olarak kullanılmaktadır. Bulanık mantık uygulamaları tıp, mühendislik, yönetim, davranış bilimleri gibi alanlarda yapılmıştır (Espinosa *et al.* 2004).

Bulanık denetleyici, kendi kendine hareket ederek ya da kendi kendini düzenleyerek istenilen bir davranış ile uyum içinde bir nesneyi kontrol eden otomatik bir denetleyicidir. Bulanık denetleyici, bulanık mantığın ayırt edici özelliğine dayalı olarak, daha fazla ya da daha az doğal dilde kurallar vasıtasıyla hareket eder ya da düzenleme işlemi yapar. Bu kurallar ise tesis operatörleri veya tasarım mühendisleri tarafından belirlenmektedir (Jantzen 2007).

Bulanık küme teorisi belirsizliği temsil etmek için bir araç sağlamaktadır. Genel olarak, belirsizliğin tesadüf bir süreç olduğunu varsayan olasılık teorisi belirsizliğin analizi için birincil araçtır. Ancak, tüm belirsizlikler tesadüf değildir. Bilgi eksikliği, tutarsızlık, muamma gibi belirsizlik ile ilişkili her şeyin modellenmesinde bulanık küme teorisi kullanılmaktadır (Burns 2001).

Bilgiyi temsil etmede bir yol olarak bulanık mantık yapay zeka (*artificial intelligent*) uygulamalarında kullanılmaktadır. Normal bir programda; programa giren temel girdiler sabit bir sonuç vermektedir. Bulanık mantık uygulamasında ise; sayısı belli olmayan veri yığını programa girer ve bu verilere göre değişen bir veya birden daha fazla sonuç elde edilir.

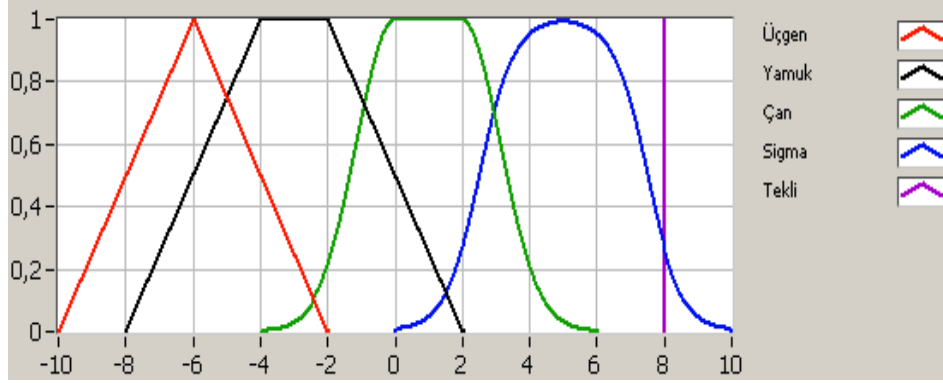
Bir sistemin matematiksel modelinin çıkartılması çeşitli uzmanlık çözüm yöntemlerinde, insan mantığını uygulayabilmek için sistemin matematiksel modeline

ihtiyaç duyulur. Aynı zamanda bulanık mantık algoritmik formda değerlendirme işlemlerini ve insan kararını açıklamaya olanak sağlar. Bulanık mantık ile ne yapılabileceğinin de sınırı vardır. İnsan düşüncesini tamamıyla anlama yeteneği, yaratıcılık ve hayal gücü bulanık mantık ile taklit edilmeyebilir. Bununla birlikte, bulanık mantık verilen kural dışı bir durum için bir çözüm üretebilir ve benzer durumlar için aynı çözüm yöntemi saptanabilir. Kurallarla kesin istenilen durumlar için teknik sistemin arzu edilen performansını tanımlayabilerseniz bulanık mantık etkileyici bir şekilde bu tanımlanan bilgiyi bir çözüm yoluna koyar. Klasik kümeler üzerinde tanımlanmış "ve", "veya", "değil" gibi mantıksal işlemler bulanık kümeler üzerinde de tanımlanabilir. Bulanık kümeler teorisinde bir elemanın üyelik derecesi doğruluk derecesi olarak değerlendirilir. Klasik mantıksal işlemlerde doğruluk değeri olarak sadece $[0,1]$ değerlerini kullanırken, bulanık mantıkta $[0,1]$ aralığındaki sonsuz değer doğruluk değeri olarak kullanılır. Klasik mantıkta bir şey ya doğru ya da yanlış olabilirken bulanık mantıkta bir şey doğruluk derecesine göre doğru ya da yanlış olabilir (Oguz 2012).

4.1 Üyelik fonksiyonları

Üyelik fonksiyonu bulanık kümede içerisindeki küme elemanının bulanık kümeye üyelik derecesini gösteren eğrilerdir. Bir küme elemanının üyelik fonksiyonu maksimum "1" minimum ise "0" değerini almaktadır. Bulanık kümelerde üyelik fonksiyonları belirsizlik değişkenlerinin ifade edilebilmesi için iç içe geçmiş durumdadırlar.

Üyelik fonksiyonları, sistemin parametrelerini tanımlamaktadır. Üyelik fonksiyonlarının sayısında ve şeklinde hiçbir kısıtlama söz konusu değildir. Üyelik fonksiyonlarının şeklini ve sayısını tasarımcının istek ve tecrübesi belirlemektedir. Üyelik fonksiyonlarının seçiminde, bölge sınırlarının belirlenmesinde dilsel ifade kolaylığı sağlaması ve bilgilere ait üyelik ağırlıklarının tespit edilmesine yardımcı olacak şekilde üyelik fonksiyonları belirlenmelidir. Bu zamana kadar en çok kullanılan; üçgen (*triangular*), yamuk (*trapezoid*), çan (*gaussian*), sigma (*sigmoid*) ve tekli (*singleton*) üyelik fonksiyonları Şekil 4.1'de verilmektedir (Çınar 2011).



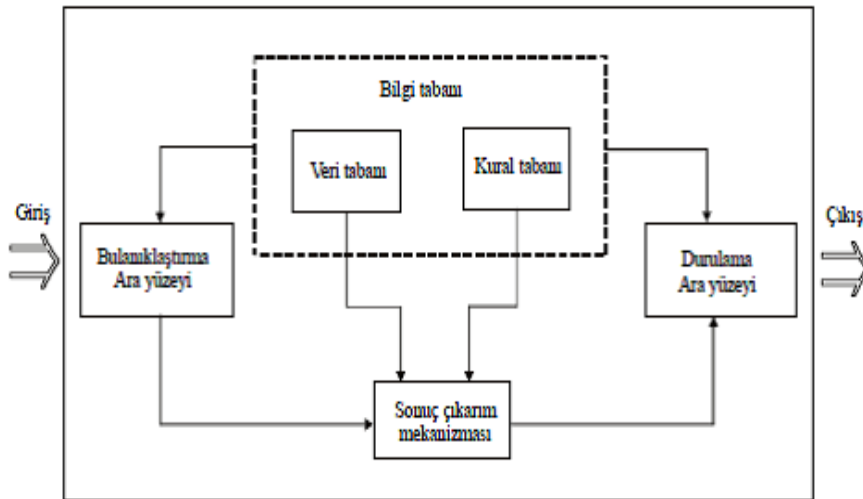
Şekil 4.1 Üçgen, yamuk, çan, sigma ve tekli üyelik fonksiyonları (Çınar 2011).

4.2 Bulanık Mantık Denetleyicinin Temel Bileşenleri

Bulanık denetleyici işleyişine göre dört ana kısımdan oluşmaktadır (Oğuz 2007):

1. Bulanıklaştırma birimi (*fuzzification interface*)
2. Kural tabanı (*knowledge base, rule base*)
3. Çıkarım birimi (*decision making logic, fuzzy inference system*)
4. Durulama birimi (*defuzzification interface*)

Bulanık mantık denetleyicinin birimleri arasındaki ilişkiyi gösteren blok şema Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.2 Bulanık mantık denetleyicinin genel yapısı (Oğuz 2007).

Bulanıklaştırma Ara Yüzeyi: Giriş değerlerinin değer aralığı bulanıklaştırma

modülüne uygun bir şekilde üyelik fonksiyonları ile birlikte dilsel değişkenlere dönüştürür. Daha sonra, değer aralıkları bulanık kümeye uygun dilsel terimlerle adlandırılır.

Kural Tabanı: Bulanık *Eğer-İse* kuralları kümesini içerir.

Veri Tabanı: Bulanık kurallarda kullanılan üyelik fonksiyonlarını tanımlar.

Durulaştırma Ara Yüzeyi: Bulanık işlemler sonucu elde edilen bulanık çıkarım sonuçlarını keskin sayısal çıkış değerlerine dönüştürür.

Bilgi Tabanı: Kontrol amaçlarını uygulama alanındaki kontrol stratejisini belirler. Yani incelenecek olayın girdi değişkenlerini ve bunlar hakkında tüm bilgileri içerir.

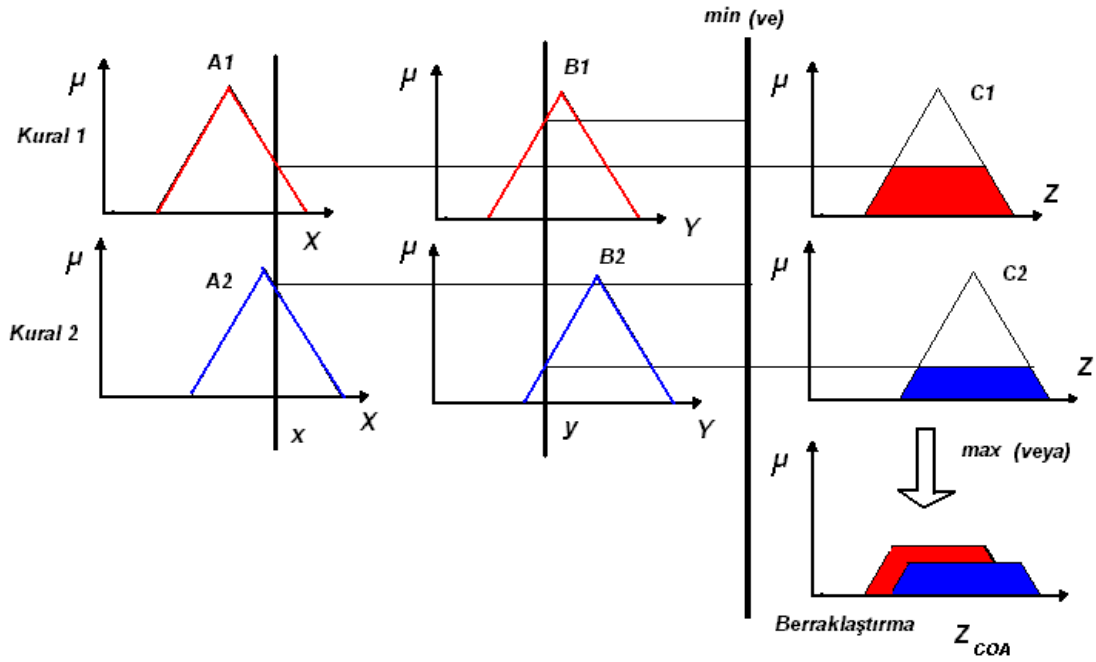
Sonuç Çıkarım Mekanizması: Kural tabanında giriş ve çıkış bulanık kümeleri arasında kurulmuş olan ilişkilerin hepsini bir arada toplayarak sistemin bir çıkışlı davranmasını sağlayan işlemler topluluğunu içeren mekanizmadır (Oğuz 2007).

4.3 Bulanık Çıkarım Sistemleri

4.3.1 Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi

İlk oluşturulan ve en çok kullanılan bulanık çıkarım modelidir. Deneyimli insan beyni operatörlerinden elde edilen dilsel kontrol kuralları kümesinin sentezlenmesi ile bir buhar motoru ve ısıtıcı birleşimini kontrol etmek amacı ile 1975 yılında Ebrahim Mamdani tarafından önerilmiştir. Mamdani bulanık modelinde çıkarım işlemi, A, B ve C bulanık üyelik değerleri olmak üzere;

“ *Eğer $x=A1$ ve $y=B1$ ise $z=C1$* ” formunda yazılabilir. Bu modele göre oluşturulan ve minimum (ve), maksimum (veya) çıkarım operatörlerinin kullanımı ile bir çıkarım ünitesi Sekil 4.3’de görülmektedir (Topuz 2000).

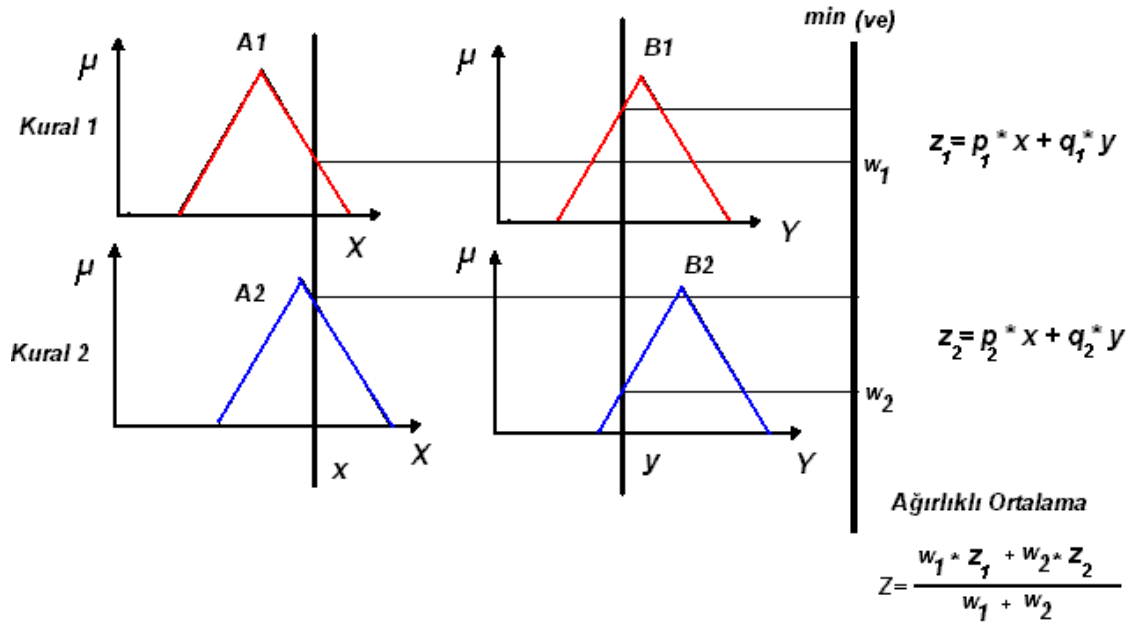


Şekil 4.3 Mamdani bulanık çıkarım sistemi (Topuz 2000).

4.3.2 Sugeno Bulanık Çıkarım Sistemi

1985 yılında tanıtilen Sugeno veya Takagi-Sugeno-Kang olarak adlandırılan bulanık çıkarım sistemi bir çok yönü ile mamdani bulanık çıkarım sistemine benzemektedir. Bulanık çıkarım işleminin ilk iki kısmı, girişlerin bulanıklaştırılması ve bulanık operatörler Mamdani bulanık çıkarım sistemi ile bire bir aynıdır. Mamdani ve Sugeno bulanık çıkarım sistemleri arasındaki temel fark Sugeno çıkış üyelik fonksiyonlarının lineer ya da sabit olmasıdır (Chen and Weus 1995).

Bu model, sugano tarafından giriş çıkış veri bilgilerine dayanan bir sistemde bulanık denetleyici tasarlamak amacıyla geliştirilmiştir. Bu modelde çıkarım işlemi, A, B bulanık üyelik değerleri, Z gerçel değer ve $f(x,y)$ arasında bir fonksiyon olmak üzere; “Eğer $x=A1$ ve $y=B1$ ise $z=f(x,y)$ ” formunda yazılabilir. Bu modele göre oluşturulan maksimum (veya) çıkarım operatörlerinin kullanıldığı bir çıkarım ünitesi Şekil 4.4’de görülmektedir. Burada p ve q sırasıyla A ve B bulanık kümelerinin ağırlık değerleri, W_1 , W_2 her bir kurala ait ağırlık değerleridir (Topuz 2000).



Şekil 4.4 Sugeno bulanık çıkarım sistemi (Topuz 2000).

4.4 PID Benzeri Bulanık Denetleyici

Bulanık PID, klasik PID ile aynı giriş sinyalleri üzerinden hareket eder, fakat kontrol stratejisi bulanık kurallar gibi formüle edilir. Eğer bir kontrol mühendisi daha sonra anlatılacak olan kuralları veya ayarlama kazançlarını değiştirirse, kapalı döngü adım cevabının yükselme zamanını ve yükselme süresi üzerindeki etkilerini tahmin etmek zordur. Çünkü kontrol edici genellikle doğrusal değildir ve yapısı karmaşıktır (Jantzen 2007).

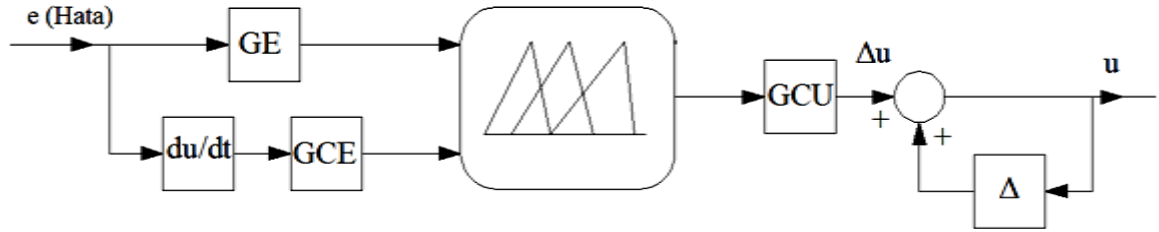
PID benzeri bulanık denetleyicilere kısaca bulanık PID denmektedir. Bulanık PID denetleyici tasarlanabildiği gibi bunun yanında bulanık PI, Bulanık PD denetleyicilerde tasarlanabilmektedir. Bu çalışmada bulanık PI denetleyici kullanılmasından dolayı bulanık PI denetleyicinin tasarımı anlatılmıştır.

Bulanık PI tasarım aşamaları (Espinosa *et al.* 2004);

1. İlk olarak Klasik PI tasarımı yapılır ve parametreleri belirlenir.
2. Tasarlanan PI yapısına eşdeğer bir bulanık denetleyici oluşturulur.
3. Sezgisel yöntem kullanılarak bulanık denetleyiciye hassas ayarlama yapılır.

e, Δe olarak bilinen düşük seviyeli bulanık denetleyici literatürde en popüler tasarımıdır.

Bu bulanık denetleyici, $e = \text{hata}$, $\Delta e = \text{hatanın değişimi}$ olmak üzere iki giriş ve birde çıkışa sahiptir. Çıkış u ya da Δu 'ya bağlı olarak PI (oransal integral) gibi hareket eden bir kontrol eylemidir. Denetleyicinin bu tanımının ilginç bir özelliği, klasik PI denetleyiciler ile doğrudan bir benzetme yapılarak kurulabilir olmasıdır. Bulanık denetleyici artırmalı bir çıkış eylemi ile de PI denetleyiciye benzemektedir (Şekil 4.5) (Espinosa *et al.* 2004).



Şekil 4.5 Bulanık PI denetleyici (Espinosa *et al.* 2004).

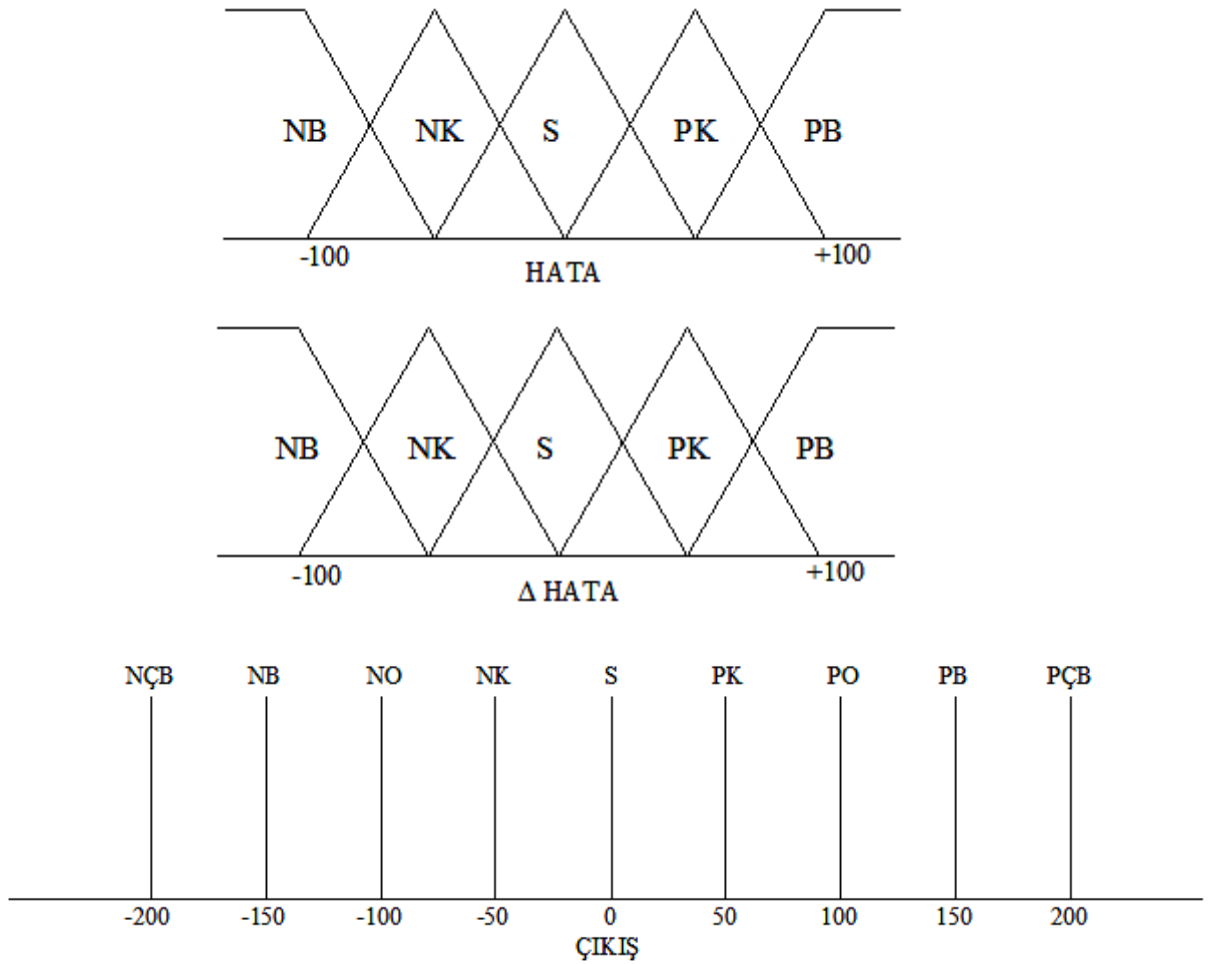
Bulanık denetleyicinin her bir girişini 5 üyelik fonksiyonundan, çıkışını ise 9 üyelik fonksiyonundan oluşturursak Çizelge 4.1'deki kural tabanını yazabiliriz. Giriş üyelik fonksiyonları NB: Negatif büyük, NK: Negatif Küçük, S: Sıfır, PK: Pozitif Küçük, PB: Pozitif Büyük olarak atanmış. Çıkış üyelik fonksiyonları ise NÇB: Negatif çok büyük, NB: Negatif büyük, NO: Negatif Orta, NK: Negatif Küçük, S: Sıfır, PK: Pozitif Küçük, PO: Pozitif Orta, PB: Pozitif Büyük, PÇB: Pozitif çok büyük olarak atanmıştır.

Çizelge 4.1 Bulanık PI için kural tabanı.

$e \backslash \Delta e$	NB	NK	S	PK	PB
NB	PÇB	PB	PO	PK	S
NK	PB	PO	PK	S	NK
S	PO	PK	S	NK	NO
PK	PK	S	NK	NO	NB
PB	S	NK	NO	NB	NÇB

Şekil 4.6 'da gösterildiği gibi giriş üyelik fonksiyonlarının dağılımı, çok düzgün olabilir. Giriş üyelik fonksiyonlarının etki alanı -100 ile 100 arasındadır. Çıkış üyelik fonksiyonları tekli olarak seçilmiş ve etki alanı -200 ile 200 arasında tutulmuştur.

Çizelge 1'deki kural tabanı kullanılarak, 0.5 çakışma ile düzgün dağıtılmış üyelik fonksiyonları mükemmel bir bulanık PI oluşturabilir ve kontrol edicinin giriş ve çıkışlarındaki ölçeklendirme faktörleri ile başlangıç ayarlama parametreleri belirlenebilir. Bir bulanık denetleyicinin ayarlarını yapmak için, ilk önce kararlı bir PI denetleyici parametreleri, eşdeğer bulanık versiyonu üzerine yerleştirilir. Daha sonra üyelik fonksiyonları üzerinde daha hassas ayarlamalar yapılarak denetleyicinin performansı artırılabilir.



Şekil 4.6 Bulanık sistem giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları (Espinosa *et al.* 2004).

Prosedür aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Aşağıdaki transfer fonksiyon ile tanımlanan bir PI denetleyiciyi değiştirmek için

$$C(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right)$$

Ölçekleme faktörleri şu şartları yerine getirmelidir.

$$GCE.GCU = K_p$$

$$GE.GCU = \frac{K_p}{\tau_i}$$

$$GE.mak|e| \leq 100$$

$$GCE.mak|\Delta e| \leq 100$$

İlk iki şartın denetleyici kazançlarının doğru eşlemesini garanti ettiği gözlenmektedir. Öte yanda son iki koşul doymayı önlemeyi amaçlamaktadır. Bu şekilde elde edilen bulanık denetleyici, tam olarak değiştirilmiş PI denetleyici gibi davranacaktır.

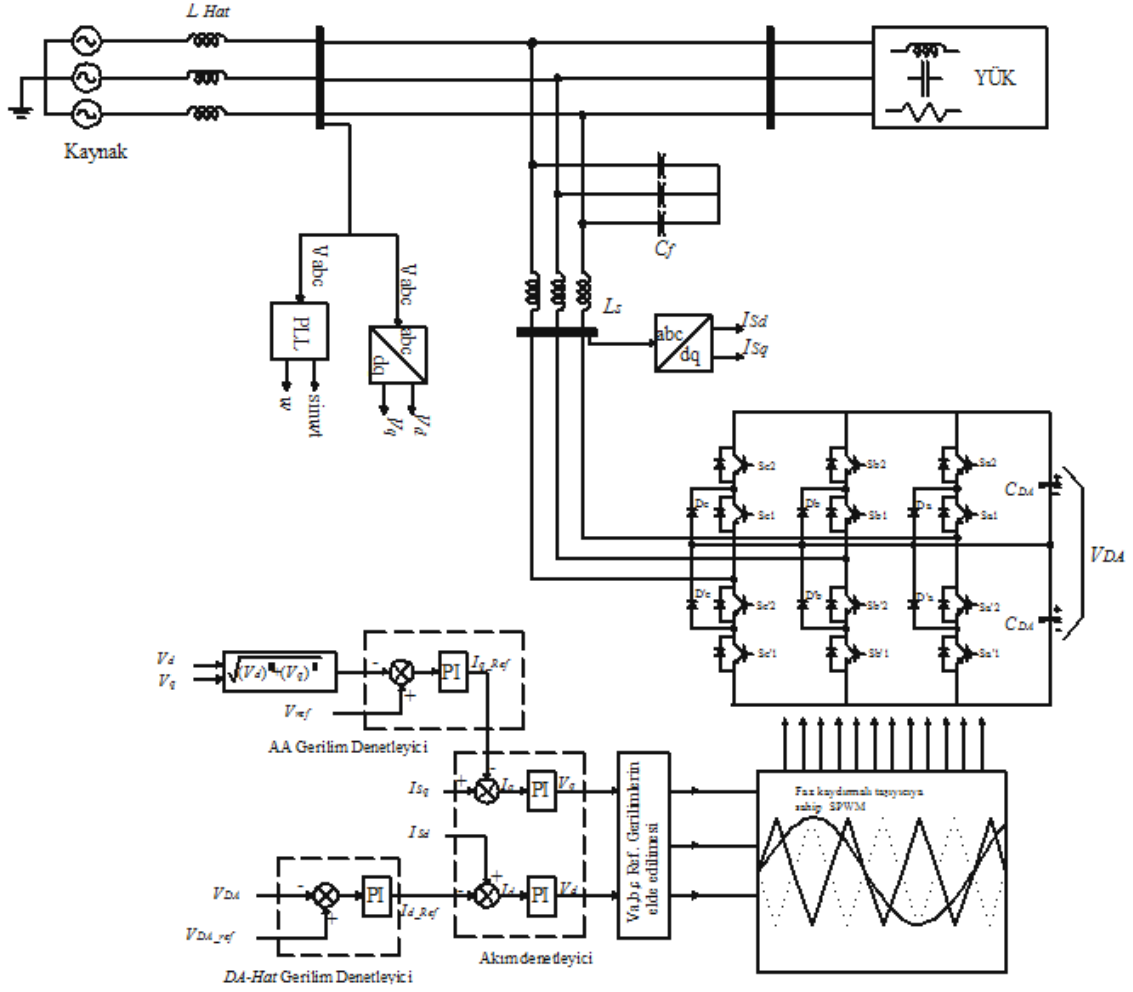
5. MATERYAL ve METOT

Bu bölümde ± 55 kVAr reaktif güç üretebilen ve tüketebilen üç faz üç seviyeli bir D-STATKOM tasarlanmış ve Matlab/Simulink ortamında benzetimi yapılmıştır. D-STATKOM yük alıcısı ile aynı yerde bulunmakta fakat şebeke hattına 500 metre uzaklıkta 70 mm^2 bakır iletken kablo ile bağlanmıştır. D-STAKOM'un şebeke hattına bağlantısı ve kontrol şeması ile birlikte genel görünümü Şekil 5.1'de verilmiştir. Sistem parametreleri ise Çizelge 5.1'de verilmiştir (Karmiris *et al.* 2012). PWM modülasyon indeksinin maksimum değeri $M_{\text{Mak}}=0.9$, bekleme durumundaki değeri ise $M_{\text{Bek}}=0.73$ alınmıştır.

D-STATKOM tasarım prensipleri ve evirici yapıları 3. bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bağlantı endüktansı, *DA-hat* kondansatörü ve *DA-hat* gerilim değerleri 3. bölümdeki bilgilerden yola çıkarak Çizelge 5.1'de verilen sistem parametrelerine göre hesaplanacaktır.

Çizelge 5.1 Sistem Parametreleri (Karmiris *et al.* 2012).

Şebeke gerilimi	V	400 V
Şebeke frekansı	f	50 Hz
Yükün çektiği reaktif güç	$Q_{\text{yük}}$	55 kVAr
Yükün çektiği aktif güç	$P_{\text{yük}}$	40 kW
İletim hattı seri direnci	R_s	0.1325Ω
İletim hattı seri reaktansı	L_s	0.45 mH
Pasif filtre kondansatör değeri	C_f	0,5 mF
Hat Uzunluğu	L	500 m



Şekil 5.1 D-STATKOM'un şebeke hattına bağlantısı ve kontrol şeması ile genel görünümü.

5.1 D-STATKOM Parametrelerinin Hesaplanması

5.1.1 DA-hat Gerilim Değerinin Hesaplanması

Eviricinin bekleme durumundaki modülasyon indeksi $M_{Bek} = 0,73$ kabul edilirse eşitlik (3.5) kullanımı ile DA-hat gerilimi,

$$V_{DA} = 2\sqrt{2} \cdot \frac{V_{ff}}{\sqrt{3}M_{Bek}} = 2\sqrt{2} \cdot \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0.73} \cong 900V \text{ olarak elde edilir.}$$

5.1.2 Bağlantı Reaktör Değerinin Hesaplanması

Bağlantı reaktörünün değeri, üzerine düşmesi istenilen gerilim değerinden

hesaplanmıştır. Çizelge 3.1’de yükün çekmiş olduğu reaktif güç 55kVar olarak verilmiştir ve bu güç D-STATKOM’un çalışma gücüdür. Eşitlik (3.9)’dan faydalanarak bağlantı reaktörünün p.u. baz değeri,

$$X_{Rbaz} = \frac{(V_{ff})^2}{S} = \frac{(400)^2}{55000} = 2.09\Omega \text{ olarak bulunur ve 1 p.u.'dur.}$$

Eviricinin modülasyon indeksinin maksimum değeri $M_{Mak}=0.9$, bekleme durumundaki değeri ise $M_{Bek}=0.73$ alınmıştır. Eşitlik (3.8)’den faydalanarak per-unit biriminde modülasyon indeksi kullanımı ile bağlantı reaktörünün değeri,

$$X_{Rpu} = \frac{M_{Mak} - M_{Bek}}{M_{Bek}} = \frac{0.9 - 0.73}{0.73} = 0.23pu \text{ bulunur.}$$

2.09 baz değerinde 0.27 p.u. olarak elde edilen bağlantı reaktörünün ohm biriminde karşılığı ise,

$$X_R = X_{Rpu} \cdot X_{Rbaz} = 0.23 \times 2.09 = 0.48\Omega \text{ bulunur.}$$

Bağlantı reaktörünün endüktans değeri de yaklaşık olarak 1.5mH’ye tekabül etmektedir.

5.1.3 DA-hat Kondansatör Değerinin Hesaplanması

Kondansatör değerini belirlemede yüklerin devreye alınıp çıkarılmasında DA-hat gerilimindeki dalgalanmayı dikkate alarak hesaplama yapılacaktır. DA-hat geriliminin değeri 900 volt olarak hesaplanmıştır. DA-hat gerilimindeki dalgalanmayı ± 25 volt ile sınırlandırırsak, DA-hat geriliminin alacağı en düşük değer 875 volt, en büyük değer ise 925 voltur. 50 voltluk bir dalgalanma söz konusudur, bu değerde DA-hat gerilim değerinin yaklaşık %5.5 ‘ine tekabül etmektedir. D-STATKOM ‘un bir fazı üzerinden geçecek akımın etkin değeri ise eşitlik (5.1) ile hesaplanır.

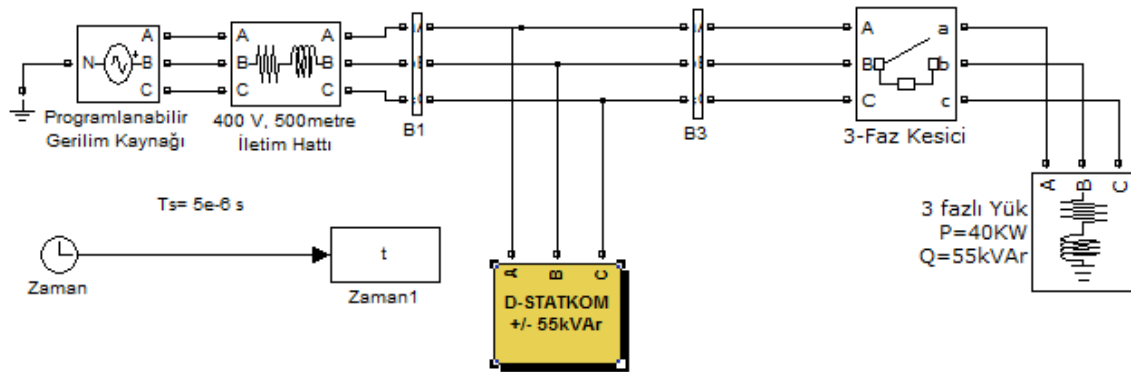
$$I_f = \frac{S}{V_{fn} \cdot 3} = \frac{55.000}{230.3} \cong 79 \text{ Amper} \quad (5.1)$$

Aşırı yüklenme faktörü $a=1,2$ sabittir, k değeri 0,05 ile 0,15 arasından 0,05 seçilmiştir, $DA-hat$ geriliminin düzelme zamanı $t=0,02$ sn belirlenmiştir. Bu parametreler doğrultusunda eşitlik 3.(13)'ün kullanımı ile kondansatör değeri hesaplanır.

$$C_{DA} = \frac{2k \cdot (3V_{fn} \cdot (a \cdot I_f) \cdot t)}{(V_{DA})^2 - (V_{DA_Min})^2} = \frac{2 \times 0,05 \times 3 \times 230 \times 1,2 \times 79 \times 0,02}{(900)^2 - (875)^2} \cong 3 \cdot 10^{-3} F$$

5.2 D-STATKOM'un Matlab/Simulink Ortamında Modellenmesi

Şekil 5.2'de güç sisteminin MATLAB/Simulink ortamında temel görünümü gösterilmektedir. Üç faz ayarlanabilir gerilim kaynağından bara1 (B1) ve bara 3'e (B3) enerji bir hat empedansı ile iletilmektedir. Üç faz ayarlanabilir güç kaynağı fazlar arası etkin değeri 400V olan bir gerilimi sisteme sağlamaktadır. Bara 1'de D-STATKOM ve yükün toplam çekmiş oldukları akımlar ve üzerlerine düşen gerilim değerleri ölçülmektedir. Bara 3 de ise sadece yükün çekmiş olduğu akımlar ölçülmektedir. Üç faz kesici ile yükün istenilen zamanlarda devreye alınıp çıkarılması sağlamaktadır.



Şekil 5.2 Güç sisteminin Matlab/Simulink modeli.

Şekil 5.2'de, üç faz ölçümlerini yapan bara1 ve bara3 üç faz VI ölçme bloğundan oluşturulmuştur. Üç faz VI ölçme bloğu, üç fazlı bir devredeki ani akım ve gerilim değerlerini ölçmede kullanılmaktadır. Bu blok, akım-gerilim değerlerini hem volt-ampere olarak hem de per-unit (p.u.) biriminde çıkış olarak verebilmektedir.

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi D-STATKOM yüke paralel olarak bağlanmaktadır. D-STATKOM’un bu ortak bağlantı noktasında yükün çekmiş olduğu reaktif akımı kompanze etmesi amaçlanmaktadır.

D-STATKOM’un tasarımında kullanılan kontrol algoritması ve diyot kenetlemeli evirici yapısı 3. Bölümde, bulanık PI denetleyici ise 4. Bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır. 3. ve 4. Bölümlerde anlatılanların ışığında Matlab/Simulink ortamında D-STATKOM modellemesi bu bölümde oluşturulacaktır.

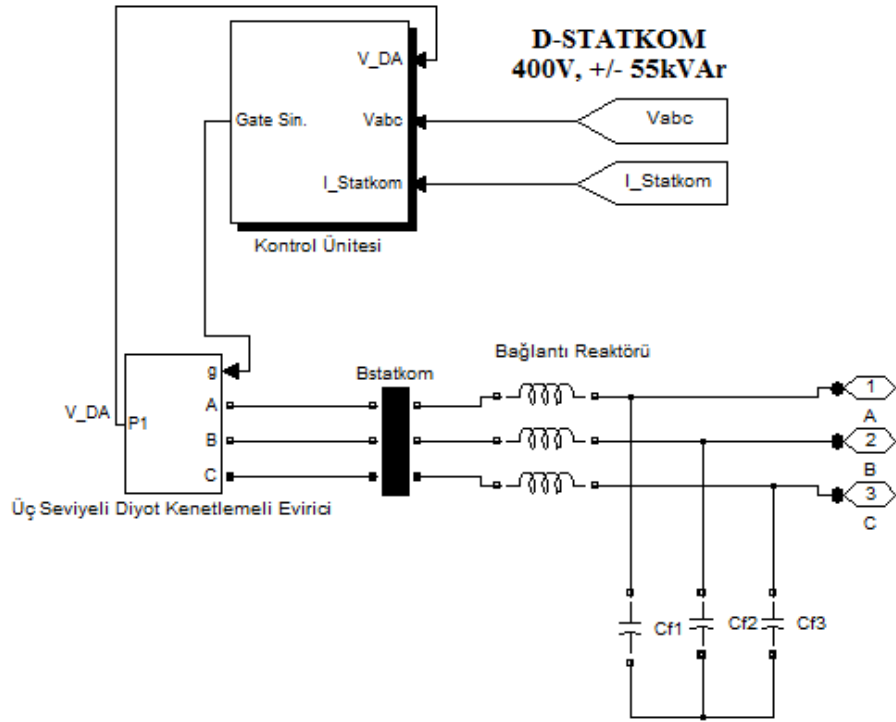
5.2.1 D-STATKOM İç Yapısı

D-STATKOM; kontrol ünitesi, bağlantı reaktörü ve evirici kısmından oluşmaktadır. Şekil 5.3’de D-STATKOM’un üç üniteden oluşumu gösterilmektedir. Üç seviyeli evirici kısmı, üç faz şebekeye bağlantı reaktörleri aracılığı ile bağlanmaktadır. Kontrol ünitesinden gelen tetikleme sinyalleri üç seviyeli eviriciyi sürmektedir. Bstatkom barası D-STATKOM’un şebekeden çektiği akımları ölçerek kontrol ünitesine göndermektedir. Bstatkom barası bağlantı reaktöründen sonra bağlandığı gibi reaktörden öncede bağlanılabilmektedir.

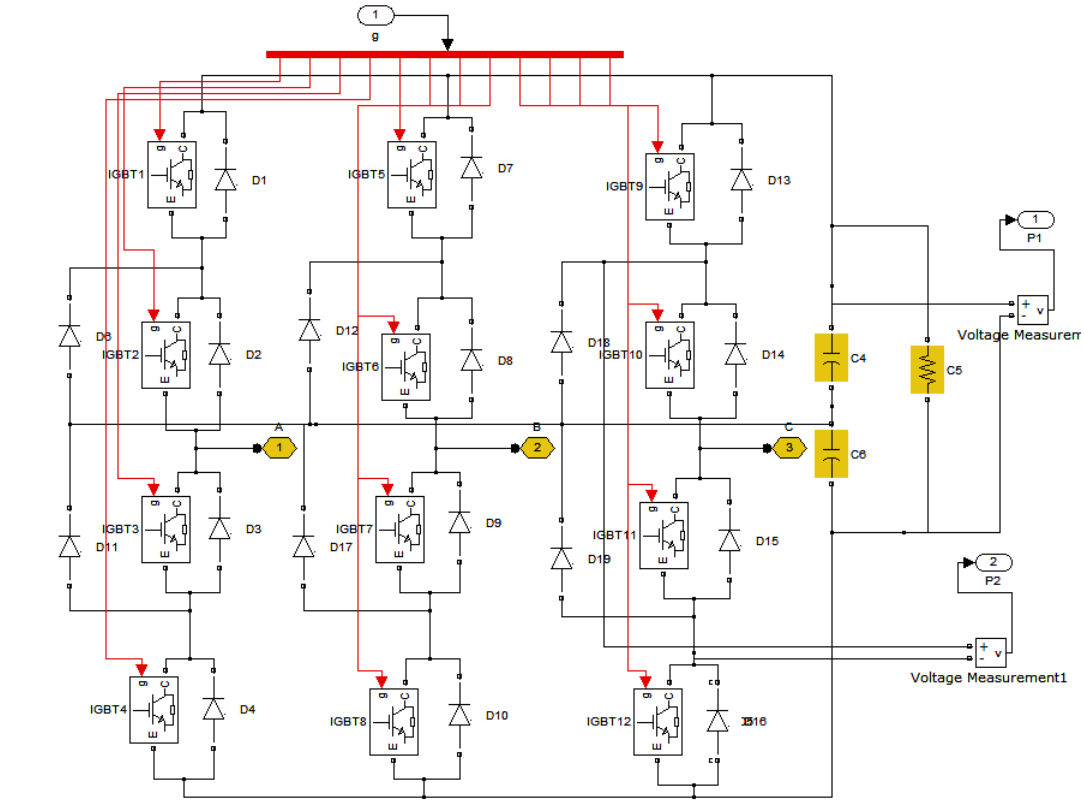
Şekil 5.3’de şebeke hattı tarafına bağlanan yıldız bağlı kondansatör grubu ise pasif filtreleme görevi yapmaktadır.

5.2.2 Üç Seviyeli Diyot Kenetlemeli Evirici Modeli

Şekil 5.4’de MATLAB/Simulink ortamında diyot kenetlemeli evirici yapısı gösterilmektedir. Devrede 12 adet IGBT yarı iletken, iki adet kondansatör ve 6 adet diyot kullanılmıştır. *Da-hat* kondansatörü, birbirine seri bağlanmış iki kondansatörden oluşmaktadır. Her bir kondansatörün ön şarj değeri 450 voltur.



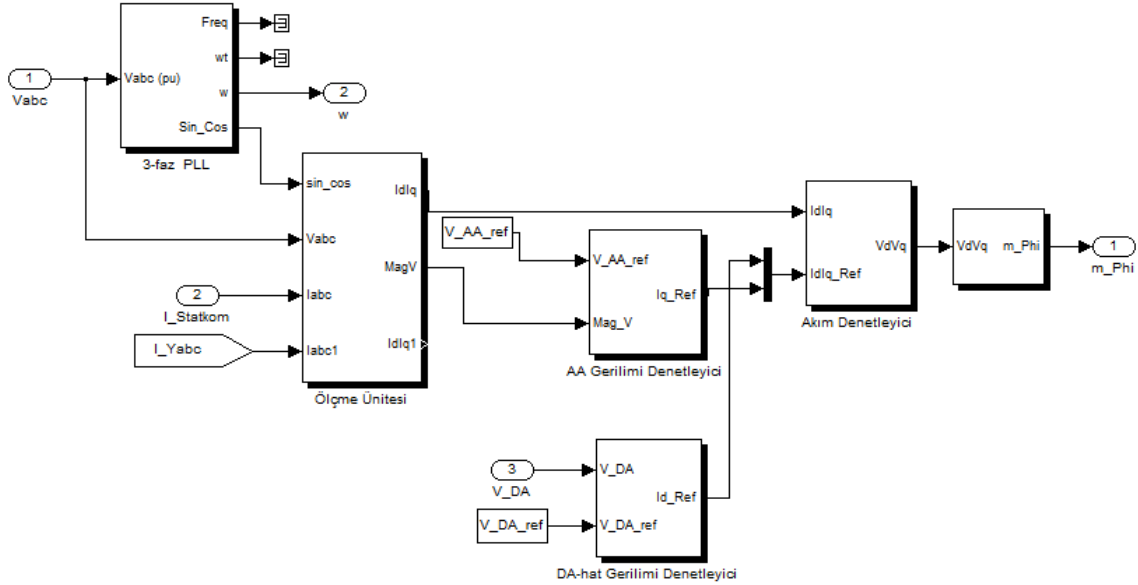
Şekil 5.3 Bağlantı reaktörü, üç seviyeli evirici ve kontrol ünitesi ile D-STATKOM Matlab/Simulink modeli.



Şekil 5.4 Diyot kenetlemeli evirici Matlab/Simulink modeli.

5.2.3 Kontrol Ünitesi

Kontrol ünitesi; faz yakalama döngüsü (PLL), dq0 eksen dönüşümleri, AA gerilim denetleyici, DA-hat gerilim denetleyici, akım denetleyici ve PWM ünitesinden oluşmaktadır. Şekil 5.5’de faz yakalama döngüsü (PLL), abc-dq0 eksen dönüşümleri ve denetleyiciler bloğu gösterilmektedir. Dq0 dönüşümlerini yapabilmek için $\sin(wt)$, $\cos(wt)$, w değerleri faz yakalama döngüsü tarafından (PLL) elde edilmektedir. Üç faz şebeke gerilimi, yük akımları ve D-STATKOM akımları abc ekseninden dq0 eksenine dönüştürülür. Bu dönüşüm eşitlik (3.15) park dönüşümü ile yapılır. MATLAB simulink programında abc-dq0 eksen dönüşümlerini yapan hazır bloksetler bulunmaktadır. Şekil 5.6’da abc-dq0 eksen dönüşümlerinin yapıldığı alt sistem modeli gösterilmektedir.

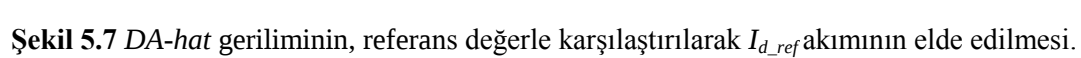


Şekil 5.5 PLL, abc-dq0 eksen dönüşümleri ve denetleyiciler bloğu.

Şekil 5.6’da D-STATKOM akımı ($I_{Statkom}$), Şebeke gerilimi (V_{abc}) ve yükün çekmiş olduğu akım (I_{Yabc}) değerlerinin abc-dq0 eksen dönüşümlerinin yapıldığı gösterilmektedir. Şekil 5.6’da eşitlik (5.2) kullanımı ile şebeke geriliminin dq eksen bileşenlerinden genliğinin elde edilmesi de görülmektedir.

5.2.3.1 Da-Hat Gerilimi Kontrolü

DA-hat gerilimi ölçülerek kontrol sistemine bildirilir. Kontrol sistemi kondansatör



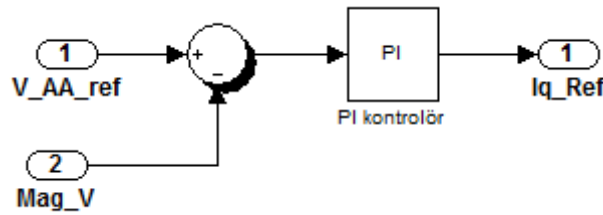
5.2.3.2 Şebeke Gerilim Kontrolü

Ortak bağlantı noktasındaki gerilim değerinin istenilen seviyede tutulması gerilim kontrolünün temel amacıdır. Ortak bağlantı noktasındaki gerilim düşmesi sistemin çok fazla yüklenmesi ya da şebeke gerilimindeki değişimlerden kaynaklanmaktadır. Bu gibi durumlarda D-STATKOM sisteme reaktif enerji vererek gerilim düşmelerini önlemektedir.

Şebeke gerilimi abc ekseninden dq0 eksenine dönüştürülerek V_d ve V_q değerleri elde edilir. Bu değerlere eşitlik (5.2) uygulandığı zaman gerilimin genliği elde edilmektedir. Şekil 5.6'da dq0 dönüşümü uygulanan şebeke geriliminin $f(u)$ fonksiyonu ile gerilim genliğinin elde edilmesi gösterilmektedir.

$$Genlik = \sqrt{(V_d)^2 + (V_q)^2} \quad (5.2)$$

Sistem geriliminin genliği referans gerilim değeri ile karşılaştırılarak hata elde edilir. Referans gerilim değeri, ortak bağlantı noktasında arzu edilen gerilim değeridir. Elde edilen bu hata gerilimin hatasıdır. Gerilim hatası bir PI kontrol edici üzerinden geçirildiği zaman hatanın akım değeri elde edilmektedir. Şekil 5.8'de gerilim hatasının PI denetleyici uygulaması ile referans I_q değerinin elde edilmesinin Matlab/Simulink modeli verilmiştir.

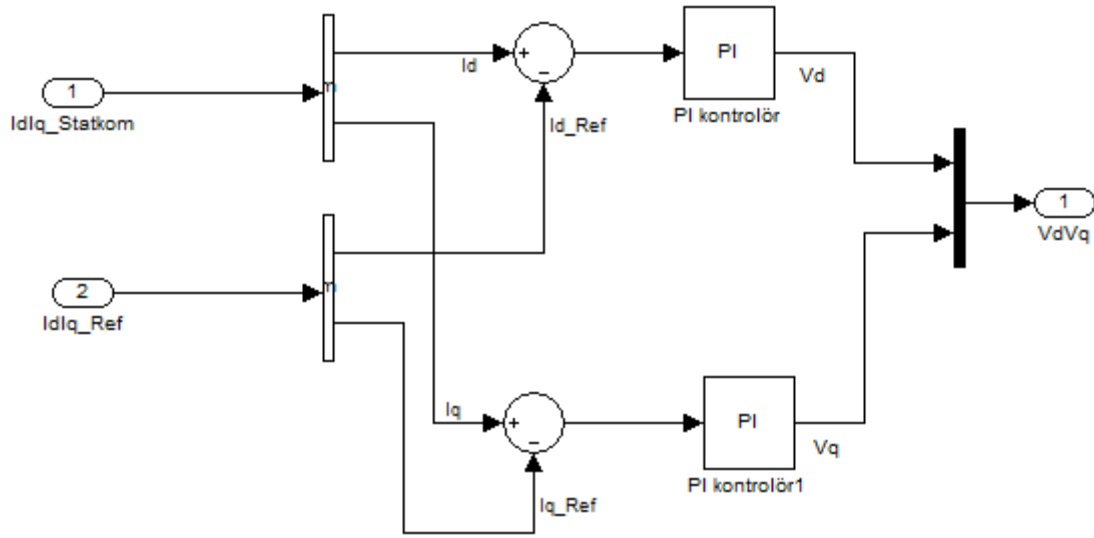


Şekil 5.8 Gerilim genliğinin referans değerle karşılaştırılması ve PI denetleyici ile referans I_q değerinin elde edilmesi.

5.2.3.3 Akım Denetleyici

DA-hat gerilimi hatasından referans I_d akımı, şebeke gerilimi hatasından ise referans I_q akım değerleri elde edilmektedir. Elde edilen bu referans akım değerleri D-STATKOM

akımlarının I_d ve I_q bileşenleri ile karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma sonucunda ise evirici tetiklemesi için gerekli sinyaller üretilmektedir. Tetikleme sinyallerinin üretiminde faz kaydırmalı taşıyıcıya sahip SPWM tekniği kullanıldığından dolayı karşılaştırma sonuçlarına bir PI uygulanarak akım sonuçları gerilim sonuçlarına çevrilmektedir. Şekil 5.9'da referans akımlar ile D-STATKOM akımlarının karşılaştırılması ve PWM için gerekli olan gerilim sonuçlarının üretilmesi gösterilmektedir.



Şekil 5.9 Referans akımlar ile D-STATKOM akımlarının karşılaştırılması ve V_d , V_q değerlerinin elde edilmesi.

PWM için gerekli olan V_d ve V_q yukarıda ki işlemler ile gerçekleştirilmiştir. Ancak gerilim değeri dq0 normunda elde edilmiştir. Faz kaydırmalı taşıyıcıya sahip sinüzoidal PWM için abc normunda gerilim değerleri gerekmektedir. Burada dq0 normundan abc normuna park dönüşümü uygulanacak ya da modülasyon indeksi M_A değerleri elde edilerek PWM için gerekli olan gerilimler üç faz için elde edilecektir.

5.2.3.4 V_d ve V_q değerlerinin abc eksenine dönüştürülmesi

Referans akımların D-STATKOM akımları ile karşılaştırılması sonucu elde edilen V_d ve V_q değerlerinin PWM modülünde kullanılabilmesi için abc eksenine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm için ters park dönüşümü veya modülasyon indeksi metodu kullanılabilir. Bu iki metodun kullanımında elde edilen sonuçlar arasında hiçbir fark bulunmamaktadır. Ancak modülasyon indeksi bulunarak yapılan dönüşümde sistemin

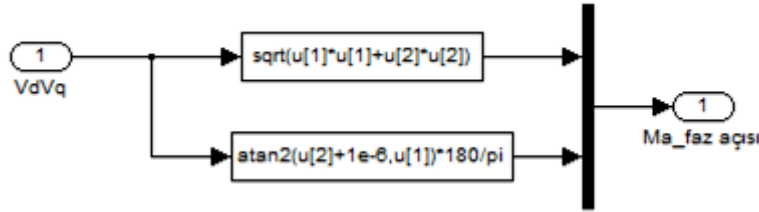
çalışmasının takip edebilmemiz ya da gözlemleyebilmemiz için elimizde mutlak bir değer bulunacaktır.

Modülasyon indeksi bir anlamda gerilimin genliğidir. Eşitlik (5.3)'de modülasyon indeksinin nasıl elde edildiğinin ve eşitlik (5.4)'de faz açısı δ 'nın elde edilmesinin formülü verilmiştir.

$$M_A = \sqrt{(V_d)^2 + (V_q)^2} \quad (5.3)$$

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{V_q}{V_d}\right) \quad (5.4)$$

Şekil 5.10'da modülasyon indeksi ve faz açısı δ 'nın oluşturması gösterilmektedir.



Şekil 5.10 Matlab/Simulink ortamında modülasyon indeksi ve faz açısı δ 'nin oluşturulması.

Modülasyon indeksi oluşturulduktan sonra, üç faz için gerilimlerin abc eksenine dönüşümü yapılacaktır. Faz açısı, faz yakalama döngüsünden elde edilen θ açısı ve modülasyon indekslerinin eşitlik (5.5)'de uygulanması ile abc eksenine dönüşüm tamamlanmaktadır.

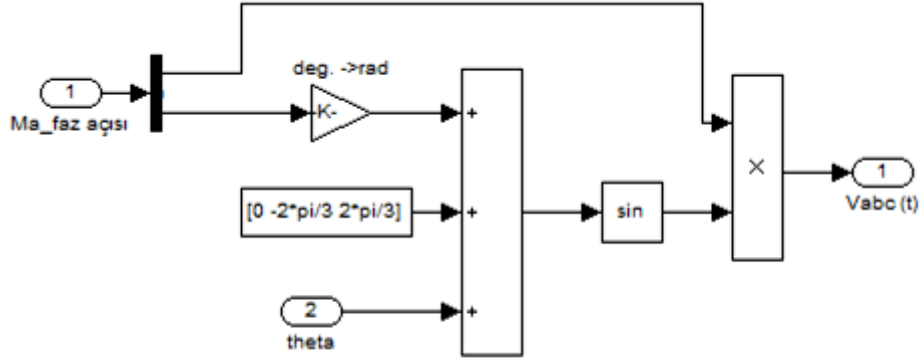
$$V_a = M_a \cdot \sin(\theta + \delta + 0) \quad (5.5)$$

$$V_b = M_a \cdot \sin(\theta + \delta - (\frac{2\pi}{3}))$$

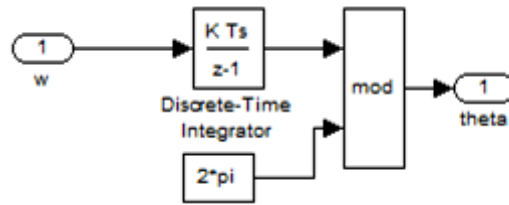
$$V_c = M_a \cdot \sin(\theta + \delta + (\frac{2\pi}{3}))$$

Şekil 5.11'de Matlab/Simulink ortamında modülasyon indeksi ile abc eksenine

dönüşüm modeli verilmektedir. θ 'nın oluşturulması Şekil 5.12'de gösterilmektedir. θ PWM modülü içerisinde de üçgen dalga üretiminde kullanılacaktır.



Şekil 5.11 Matlab/Simulink ortamında modülasyon indeksi ile abc eksenine dönüşüm.

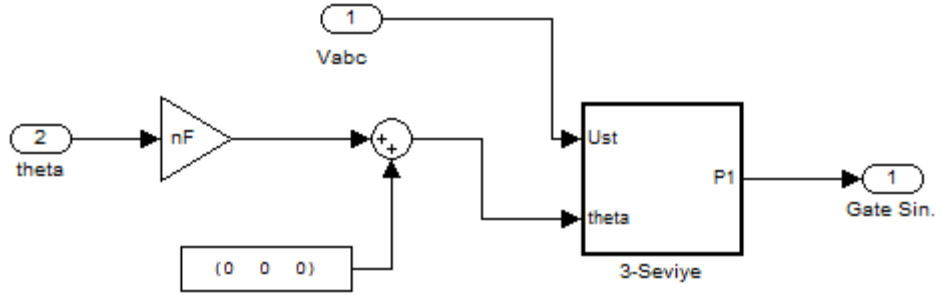


Şekil 5.12 Matlab/Simulink ortamında θ 'nın oluşturulması.

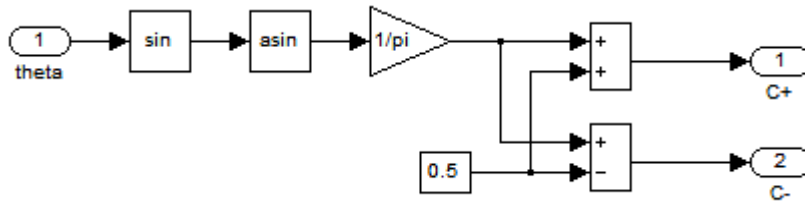
5.2.3.5 Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM)

Darbe genişlik modülasyonu (PWM), evirici yarı iletken elemanlarını sürmek için tetikleme sinyalleri üreten kısımdır. Bu çalışmada 3. bölümde anlatılan faz kaydırmalı taşıyıcıya sahip sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu (CPS-SPWM) kullanılmıştır. CPS-SPWM sinüzoidal sinyaller ile aralarında faz farkı bulunan üçgen sinyaller arasında kıyaslama yaparak tetikleme sinyallerini oluşturmaktadır. Sinüzoidal sinyaller olarak, dq0 ekseninden abc eksenine dönüştürülen üç faz sinyaller kullanılacaktır. Üçgen sinyallerin üretimi için θ açısı kullanılmaktadır. θ açısı ilk olarak bir periyottaki anahtarlama oranı ile çarpılır ve 3 sinyale çoklanır (Şekil 5.13). Bir periyottaki anahtarlama oranı ile temel frekansın çarpımı eviricinin anahtarlama frekansını vermektedir. θ açısının sinüs değeri alınır sonra ters sinüs değeri alınır ve pi değerine oranlanması ile üçgen sinyaller oluşturulur (Şekil 5.14). Üretilen üçgen sinyalin 180° tersi Matlab/Simulink ortamında Şekil 5.14'de gösterildiği gibi elde edilir. Üretilen

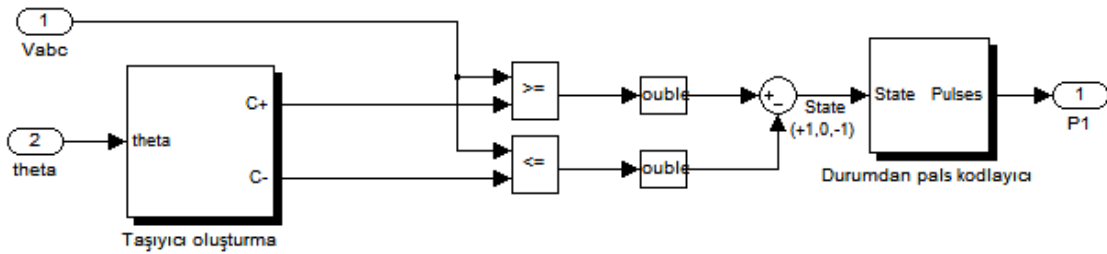
üçgen sinyaller referans sinyallerle karşılaştırılarak her bir faz için -1 0 1 durumları elde edilir.



Şekil 5.13 θ 'nın bir periyotluk anahtarlama oranı ile çarpımı ve üçe çoklanması.

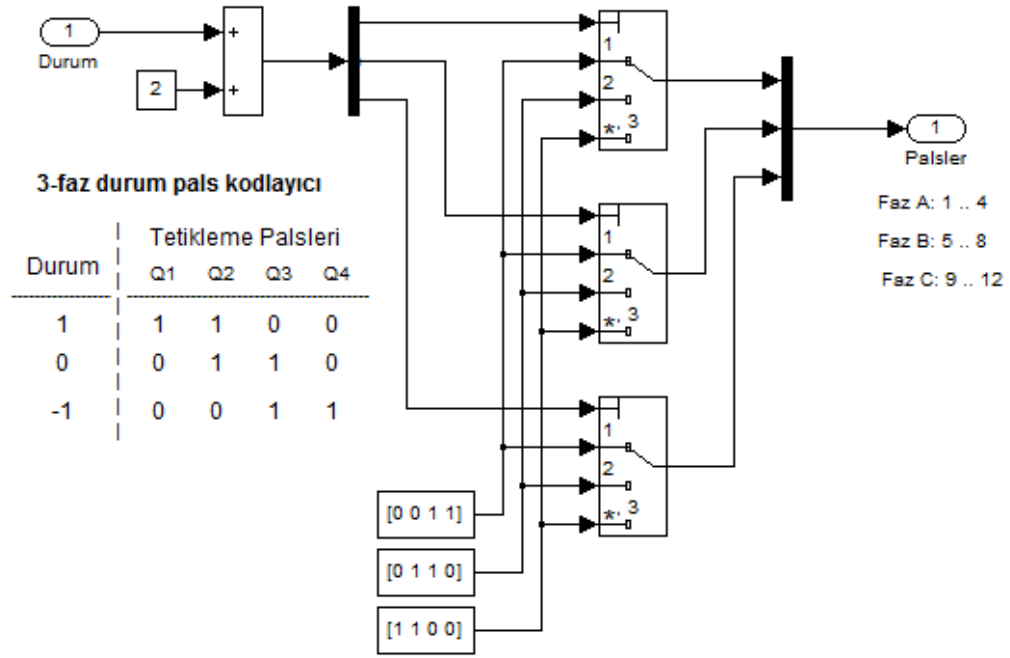


Şekil 5.14 Matlab/Simulink ortamında düz ve 180⁰ ters taşıyıcı üçgen sinyallerin oluşturulması.



Şekil 5.15 Taşıyıcı üçgen sinyallerle referans sinyallerin karşılaştırılarak anahtarlama durumlarının elde edilmesi.

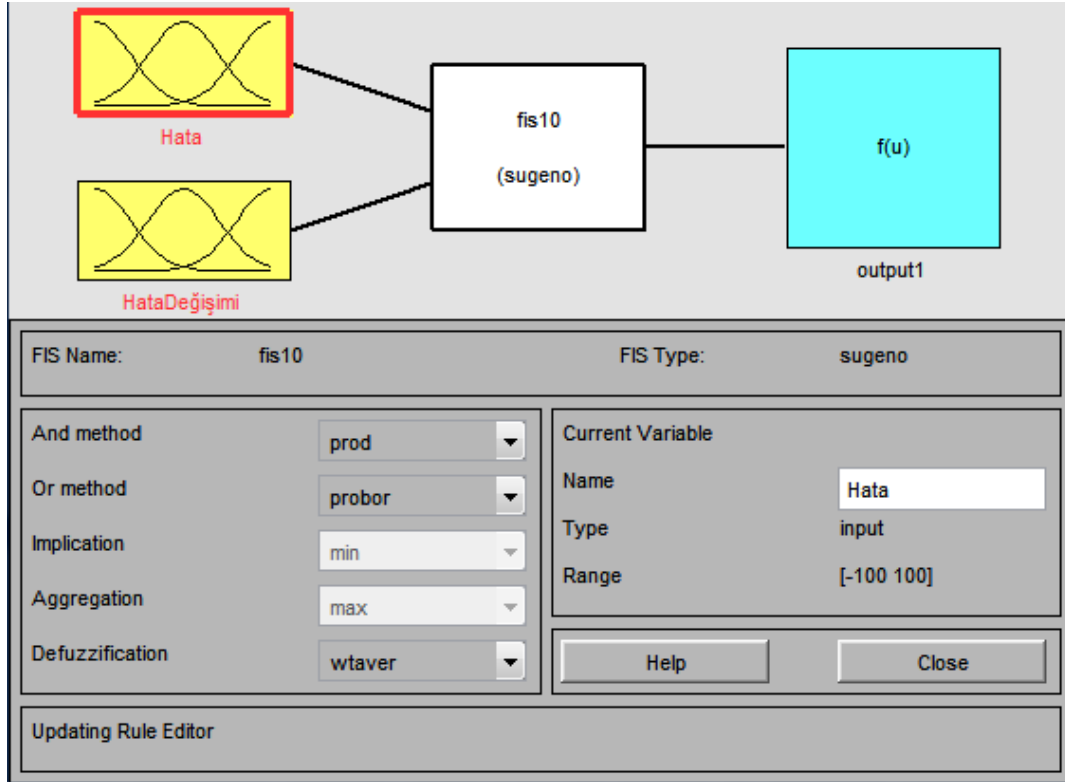
Şekil 5.15'de faz kaydırmalı taşıyıcıya sahip sinüzoidal darbe genişlik modülasyonunun Matlab/Simulink modeli gösterilmektedir. Burada, θ 'dan taşıyıcı üçgen sinyaller üretilerek referans sinüzoidal sinyallerle karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma sonucunda anahtarlama durumları elde edilmektedir. Elde edilen anahtarlama durumları, durum pals kodlayıcı modelinde kullanılarak evirici anahtarlama palsleri üretilmektedir. Şekil 5.16'da durum pals kodlayıcının Matlab/Simulink modeli gösterilmektedir.



Şekil 5.16 Matlab/Simulink durum pals kodlayıcı modeli.

5.2.4 D-STATKOM İçin Bulanık PI Denetleyici Tasarımı

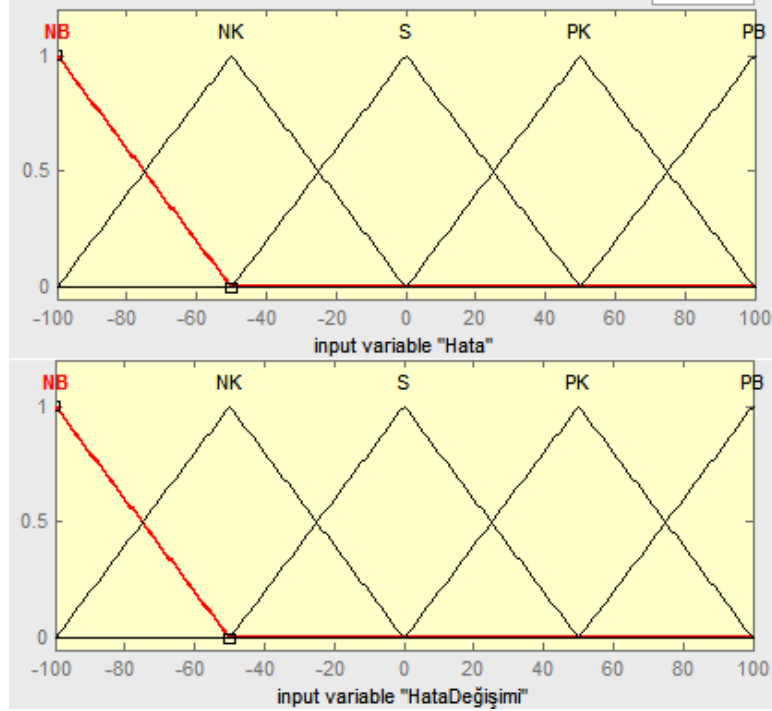
Bulanık PI denetleyici 4. Bölümde detaylı bir şekilde anlatılmış bu bölümde ise Matlab/Simulink ortamında modellemesi yapılmıştır. Bulanık mantık (Fuzzy lojik) denetleyici 2 giriş ve 1 çıkışlı olarak tasarlanmıştır. Girişler hata e ve hatanın türevi Δe 'den oluşmaktadır. Tasarımda Sugeno bulanık çıkarım sistemi kullanılmıştır. D-STATKOM kontrol ünitesinde toplam 4 adet bulanık PI denetleyici kullanılmıştır. Bulanık denetleyicinin ikisi akım denetleyici için diğer ikisi ise $DA-hat$ gerilimi ve AA şebeke gerilim denetleyicileri için kullanılmıştır. Bu dört bulanık PI denetleyicinin iç tasarımı birbirinin aynısıdır. Ancak ölçülendirme faktör değerleri birbirinden farklıdır. Şekil 5.17'de bulanık PI denetleyici tasarım ekranı gösterilmektedir. Bulanık PI denetleyici 25 kural tabanlı ve 49 kural tabanlı olmak üzere iki farklı kural tabanında hazırlanmıştır.



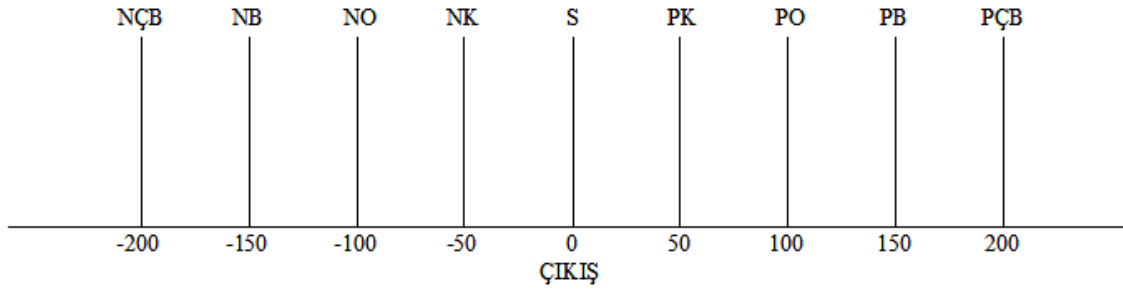
Şekil 5.17 MATLAB ortamında bulanık PI denetleyici tasarım ekranı.

5.2.4.1 25 Kural Tabanlı Bulanık PI Denetleyici

25 kural tabanlı bulanık PI denetleyici girişlerde 5 üçgen üyelik fonksiyonu çıkışında ise 9 tekli üyelik fonksiyonuna sahiptir. Şekil 5.18’de hata e ve hatadaki değişim Δe girişlerinin oluşturduğu üyelik fonksiyonları gösterilmektedir. Giriş üyelik fonksiyonları “NB: Negatif Büyük, NK: Negatif Küçük, S: Sıfır, PK: Pozitif Küçük, PB: Pozitif Büyük” dilsel ifadeleri ile adlandırılmıştır. Giriş üyelik fonksiyonları +100 ile -100 arasında sınırlandırılmıştır. Çıkış üyelik fonksiyonları ise, “NÇB: Negatif Çok Büyük, NB: Negatif Büyük, NO: Negatif Orta, Negatif Küçük, S: Sıfır, Pozitif Küçük, Pozitif Orta, PB: Pozitif Büyük, PÇB: Pozitif Çok Büyük” dilsel ifadeleri ile adlandırılmıştır. Çıkış üyelik fonksiyonları +200 ile -200 arasında sınırlandırılmıştır. Şekil 5.19’da çıkış üyelik fonksiyonları gösterilmektedir.



Şekil 5.18 25 kural tabanı için hata ve hata değişiminin üyelik fonksiyonları.



Şekil 5.19 25 kural tabanı için çıkış üyelik fonksiyonları.

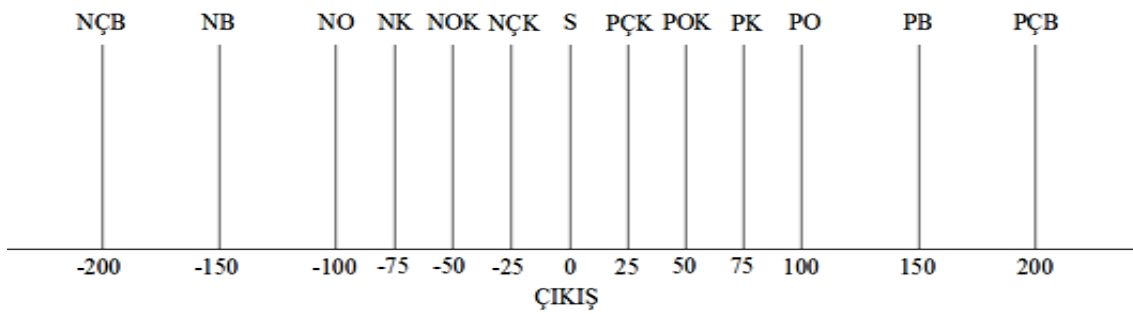
Giriş üyelik fonksiyonları belirlendikten sonra denetleyicimizin nasıl çalışması gerektiğini ve, veya, değil komutları ile tanımlama yaparak istediğimiz çıkışları elde edebiliriz. Çizelge 5.2’de 25 kural tabanına göre kurallar tablosu verilmiştir.

Çizelge 5.2 25 kural tabanlı bulanık PI denetleyici için kural tablosu

$e \Delta e$	NB	NK	S	PK	PB
NB	NÇB	NB	NO	NK	S
NK	NB	NO	NK	S	PK
S	NO	NK	S	PK	PO
PK	NK	S	PK	PO	PB
PB	S	PK	NO	PB	PÇB

5.2.4.2 49 Kural Tabanlı Bulanık PI Denetleyici

49 kural tabanlı bulanık PI denetleyici girişlerde 7 üçgen üyelik fonksiyonuna, çıkışında ise 13 tekli üyelik fonksiyonuna sahiptir. Şekil 5.21’de hata e ve hatadaki değişim Δe girişlerinin oluşturduğu üyelik fonksiyonları gösterilmektedir. Giriş üyelik fonksiyonları, “NÇB: Negatif çok Büyük, NB: Negatif Büyük, NK: Negatif Küçük, S: Sıfır, PK: Pozitif Küçük, PB: Pozitif Büyük, PÇB: Pozitif Çok Büyük” dilsel ifadeleri ile adlandırılmıştır. Giriş üyelik fonksiyonları +100 ile -100 arasında sınırlandırılmıştır.

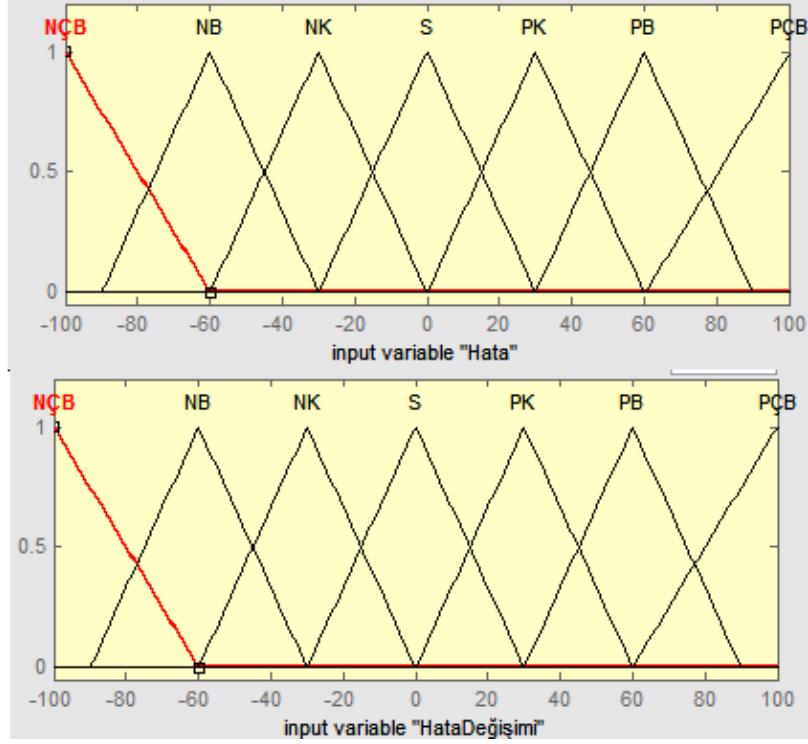


Şekil 5.20 49 kural tabanı için çıkış üyelik fonksiyonları.

Çıkış üyelik fonksiyonları, “NÇB: Negatif Çok Büyük, NB: Negatif Büyük, NO: Negatif Orta, NOK: Negatif Orta Küçük, NO: Negatif Küçük, NÇK: Negatif Çok Küçük, S: Sıfır, Pozitif Çok Küçük: Pozitif Küçük, Pozitif Orta, PB: Pozitif Büyük, PÇB: Pozitif Çok Büyük” dilsel ifadeleri ile adlandırılmıştır. Çıkış üyelik fonksiyonları +200 ile -200 arasında sınırlandırılmıştır. Şekil 5.20’de çıkış üyelik fonksiyonları gösterilmektedir.

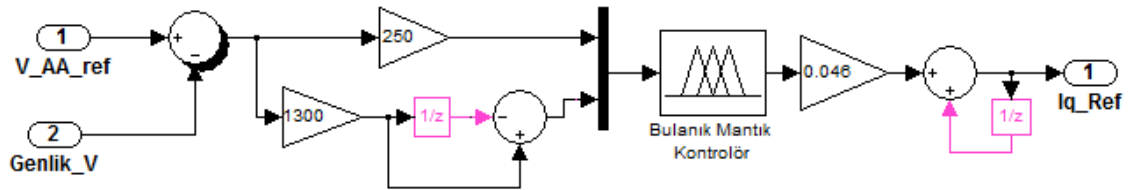
Çizelge 5.3 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyici için kural tablosu.

$e/\Delta e$	NÇB	NB	NK	S	PK	PB	PÇB
NÇB	NÇB	NB	NO	NK	NOK	NÇK	S
NB	NB	NO	NK	NOK	NÇK	S	PÇK
NK	NO	NK	NOK	NÇK	S	PÇK	POK
S	NK	NOK	NÇK	S	PÇK	POK	PK
PK	NOK	NÇK	S	PÇK	POK	PK	PO
PB	NÇK	S	PÇK	POK	PK	PO	PB
PÇB	S	PÇK	POK	PK	PO	PB	PÇB

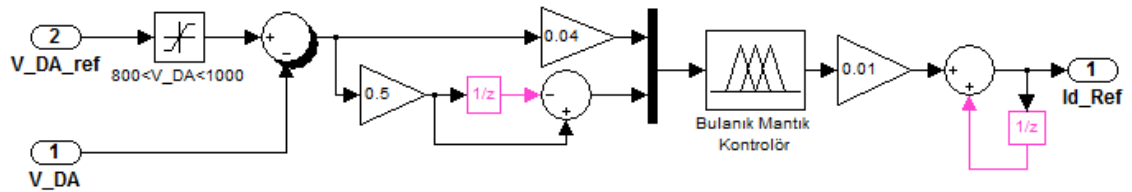


Şekil 5.21 49 kural tabanı için hata ve hata değişiminin üyelik fonksiyonları.

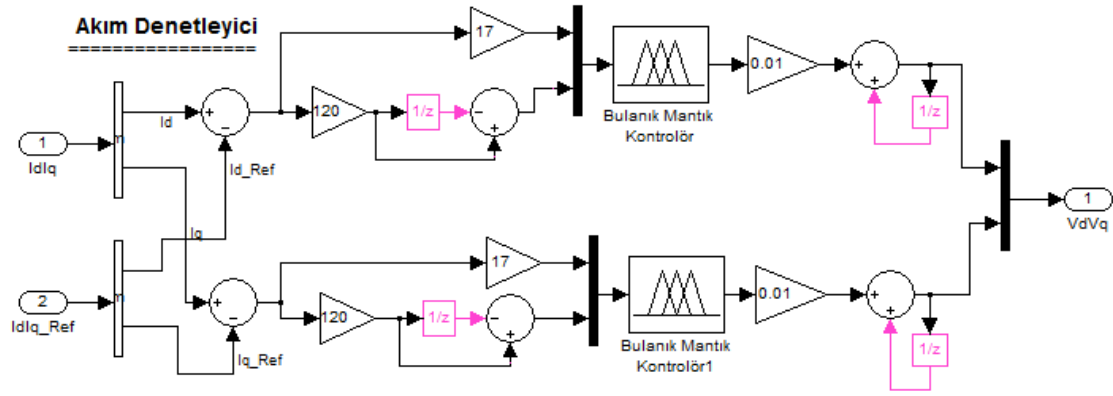
Çizelge 5.3’de 49 kural tabanına göre kurallar tablosu verilmiştir. Şekil 5.22’de bulanık PI denetleyici ile AA gerilim denetleyici, Şekil 5.23’de bulanık PI ile *DA-hat* gerilim denetleyici, Şekil 5.24’de bulanık PI denetleyici ile akım denetleyicinin Matlab/Simulink modeli gösterilmektedir. Bu çalışmada kullanılan ölçülendirme faktör kazançları modeller üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 5.22 Bulanık PI denetleyici ile AA gerilim denetleyicinin Matlab/Simulink modeli.



Şekil 5.23 Bulanık PI denetleyici ile *DA-hat* gerilim denetleyicinin Matlab/Simulink modeli.



Şekil 5.24 Bulanık PI denetleyici ile akım denetleyicinin Matlab/Simulink modeli.

6. BULGULAR

Bu bölümde Şekil 5.1’de verilen elektrik güç sisteminin performansı incelenmiştir. Tasarlanan D-STATKOM’un performans değerlendirmesi için Matlab/Simulink yazılım programı kullanılmıştır. D-STATKOM’un ortak bağlantı noktasında (OBN) gerilim düzenlemesi ve yük kompanzasyon olmak üzere iki amaç için simülasyonu yapılmıştır. Elektrik güç sisteminin D-STATKOM olmadan, klasik PI denetleyicili D-STATKOM ve bulanık PI denetleyicili D-STATKOM ile ortak bağlantı noktasındaki gerilim düzenlemesi için dinamik performansları incelenmiştir. Yük kompanzasyonu için klasik PI ve bulanık PI denetleyicili D-STATKOM ile güç sisteminin simülasyonu yapılmıştır. D-STATKOM parametreleri Çizelge 6.1 de verilmiştir. Simülasyon p.u. biriminde yapılmıştır.

Çizelge 6.1 D-STATKOM parametreleri.

Şebeke gerilimi baz değeri	V_{ff_baz}	400 V
Şebeke frekansı	f	50 Hz
Yükün baz gücü	S_{Y-baz}	100 kVA
D-STATKOM baz gücü	S_{S-baz}	100 kVA
DA-hat kondansatörü	C_{DA}	3 mF
Bağlantı reaktörü endüktansı	L_R	1.5 mH
CPS-SPWM Modülasyon frekansı	f_s	5 kHz
DA-hat gerilimi	V_{DA}	900 V
Örnekleme Zamanı	T_s	5.10^{-6} sn

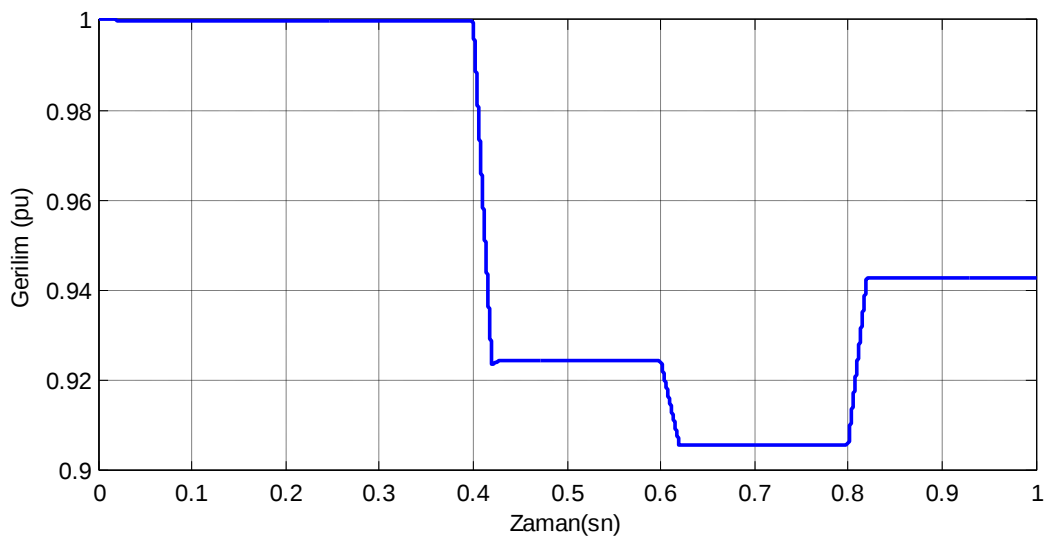
6.1 OBN Gerilimin Düzenlemesi İçin Simülasyon Sonuçları

D-STATKOM’suz ve klasik PI denetleyicili D-STATKOM, 25 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM ve 49 kural tabanlı PI denetleyicili D-STATKOM ile dört şekilde güç sisteminin ortak bağlantı noktasındaki gerilim düzenlemesi için güç sisteminin simülasyonu yapılmıştır. Gerilim düzenlemesi için simülasyon süresi 1 saniyedir. İlk 0,4 saniye süresince sistem yüklenmemiştir. 0,4 saniyede sistem 1 p.u. kaynak gerilimi ile 40 kW aktif güç ve 55 kVAr reaktif güçle yüklenmiştir. 0,6.

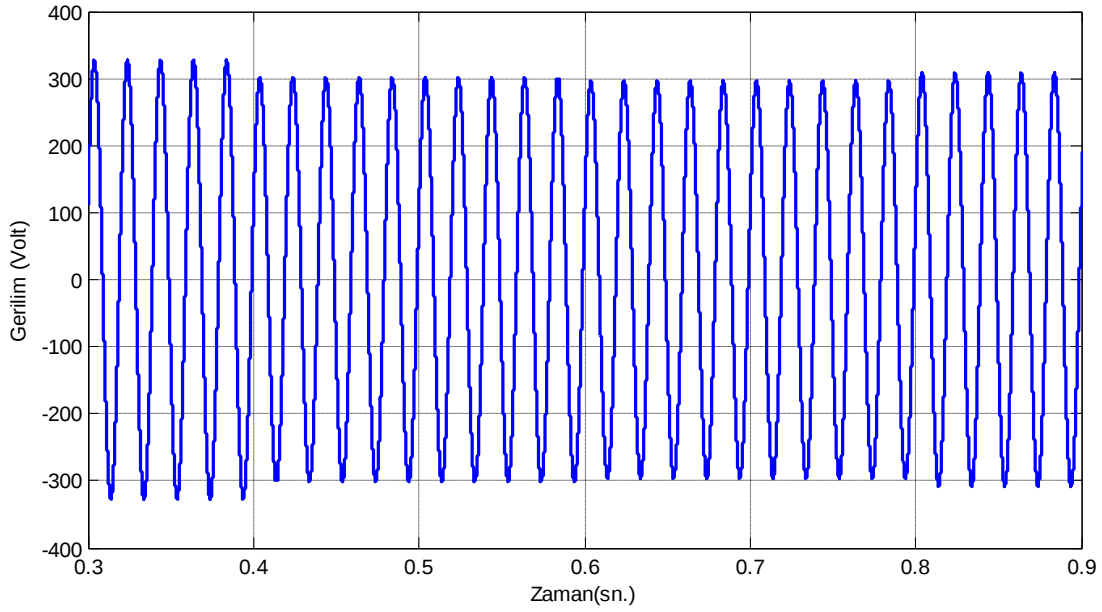
saniyede kaynak gerilimi 0,98 p.u. değerine düşürülmüş ve 0,8. saniyede kaynak gerilimi 1,02 p.u. değerine yükseltilmiştir. Bu çalışma koşullarında D-STATKOM'un dinamik performansı 3 denetleyici yapısı içinde incelenmiştir.

6.1.1 D-STATKOM'suz Simülasyon Sonuçları

Güç sisteminin D-STATKOM'suz çalıştırılmasının amacı yükün ortak bağlantı noktasındaki gerilim değeri üzerinde oluşturmuş olduğu gerilim düşüşlerini görebilmektir. Şekil 6.1'de p.u. biriminde gerilimin genliğindeki değişmelerin simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Şekil 6.1'e bakacak olursak 1 p.u. kaynak geriliminde 0,4. saniyede yükün devreye girmesi ile birlikte ortak bağlantı noktasındaki (OBN) gerilimin değeri yaklaşık olarak 0,925 p.u. değerine düşmüştür. Böylelikle elektrik yükünün şebeke gerilimine 0,075 p.u. bir düşüş etkisi olduğu görülmektedir. Güç sistemlerinde yükün OBN gerilimine etkisi olduğu gibi şebeke gerilimlerinde de çeşitli nedenlerden dolayı gerilim düşmeleri ve yükselmeleri olabilmektedir. Simülasyonun 0,6. saniyede kaynak geriliminin değeri 1 p.u. değerinden 0,98 p.u. değerine düşmüş ve OBN gerilim değerine 0,02 p.u. düşüş etkisi oluşturmuştur. 0,8. saniyede kaynak geriliminin değeri 0,98 p.u. değerinden 1,02 p.u. değerine yükselmiş ve OBN gerilim değerine yaklaşık olarak 0,04 p.u. yükselme etkisi oluşturmuştur. Şekil 6.2'de üç fazlı şebeke geriliminin *a* fazındaki anlık değerler volt biriminde gösterilmektedir.



Şekil 6.1 D-STATKOM'suz p.u. biriminde OBN gerilim değeri.



Şekil 6.2 D-STATKOM'suz OBN *a* faz geriliminin volt biriminde anlık değeri.

6.1.2 Klasik PI Denetleyicili D-STATKOM Simülasyon Sonuçları

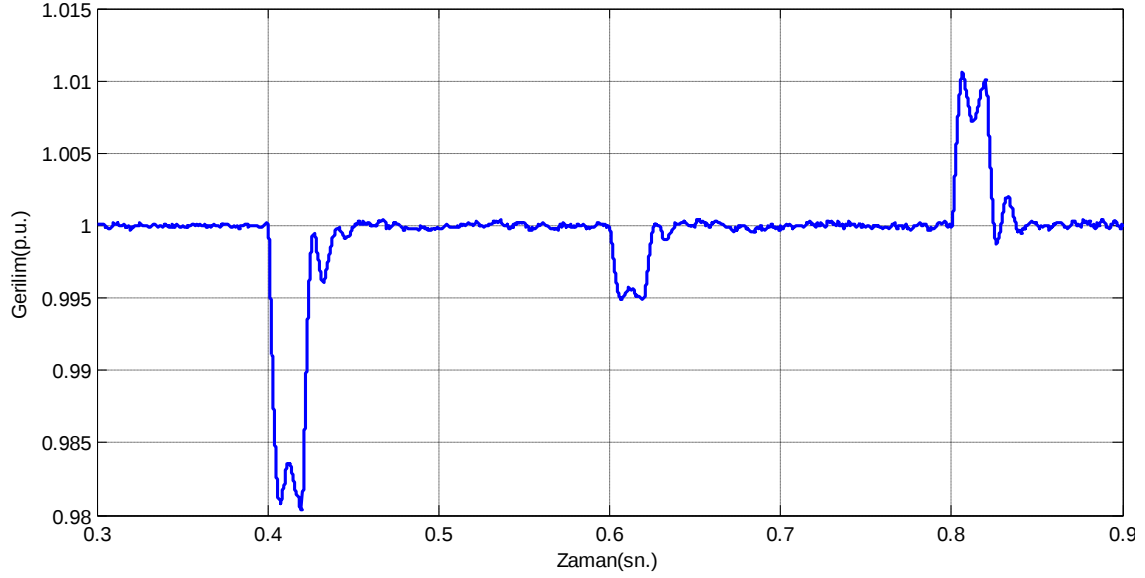
D-STATKOM'un güç sistemine ilave edilmesi ile birlikte ortak bağlantı noktasında (OBN) oluşan gerilim değişimleri giderilecek ve şebeke gerilimi 1 p.u. değerine sabitlenmeye çalışılacaktır. Çizelge 6.2'de D-STATKOM PI denetleyicilerin kazanç değerleri verilmiştir (Matlab/Simulink Demos D-STATKOM Detailed Model).

Çizelge 6.2 Klasik PI denetleyicilerin kazanç değerleri (Matlab/Simulink Demos D-STATKOM Detailed Model).

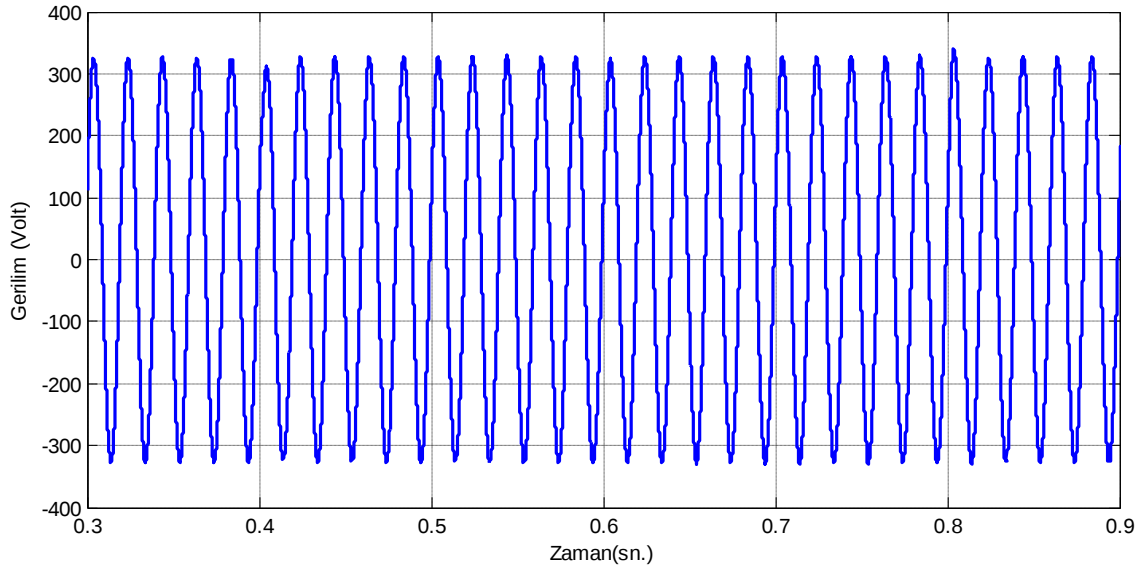
DA-hat Gerilim Denetleyici		AA Gerilim Denetleyici		Akım Denetleyici	
Kp	Ki	Kp	Ki	Kp	Ki
0,001	0,15	0,55	2500	0,8	200

Şekil 6.3'de p.u. biriminde OBN gerilim genliğindeki değişmelerin simülasyon sonuçları gösterilmektedir. 0,4. saniyede yükün devreye girmesiyle oluşan 0,075 p.u. gerilim düşümü D-STATKOM'un 0,05 saniyelik tepki süresi ile 1 p.u. referans değerine çekilmiştir. Burada 0,4. saniyedeki gerilimin yaklaşık 0,02 p.u. düşüş ile referans değere çekildiği de görülmektedir. 0,6 ve 0,8. saniyelerdeki bozucu etkilere D-STATKOM'un vermiş olduğu tepki süresi 0,05 saniyedir. Şekil 6.4'de OBN gerilim değerinin anlık değişimi gösterilmektedir. OBN geriliminin anlık değişiminde 0,4 ve 0,6. saniyelerdeki bozucu etkinin sadece o anki (+) alternasta hafif bir düşüşe, 0,8.

saniyedeki bozucu etkinin ise sadece o anki (+) alternasta hafif bir yükselişe neden olduğu görülmektedir.



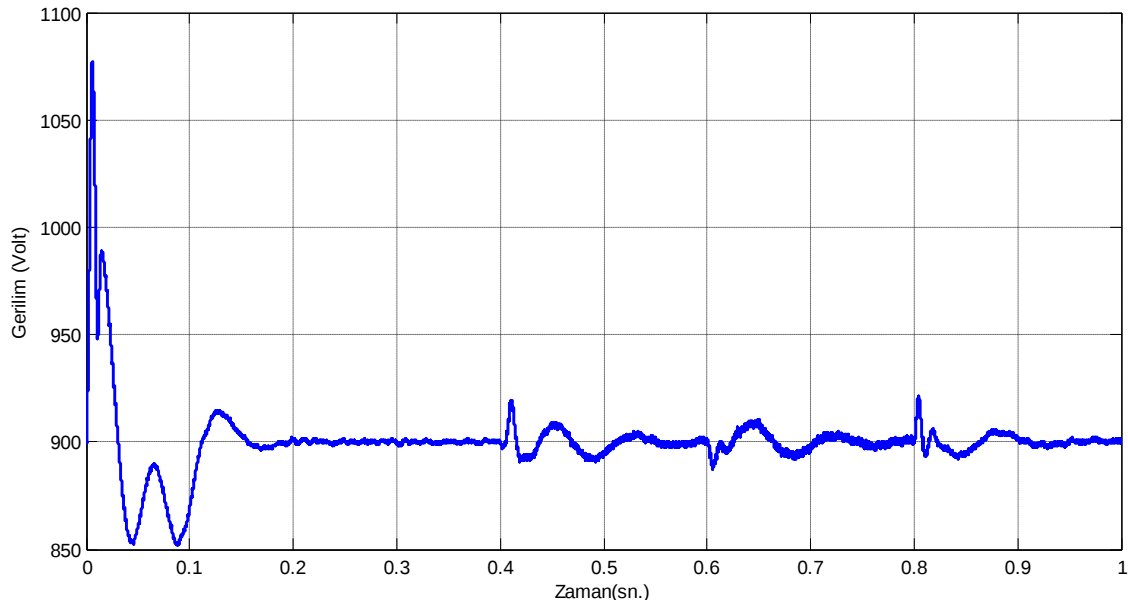
Şekil 6.3 Klasik PI denetleyicili D-STATKOM ile OBN p.u. biriminde gerilim değeri.



Şekil 6.4 Klasik PI denetleyicili D-STATKOM ile OBN *a* fazının volt biriminde anlık gerilim değeri.

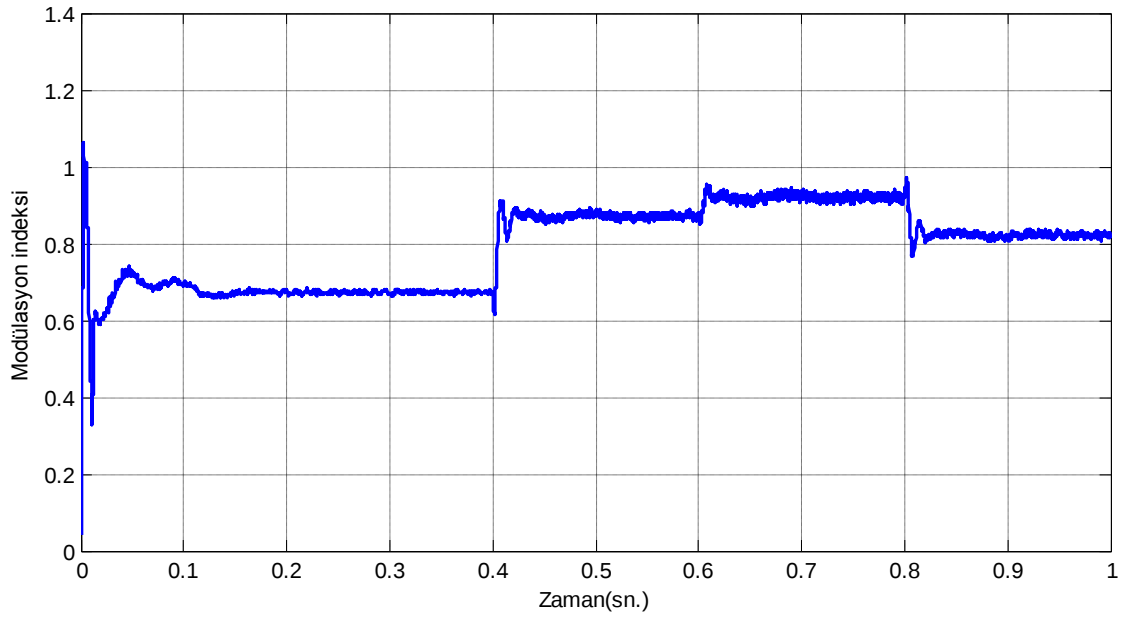
D-STATKOM OBN gerilim değerini kontrol ettiği gibi evirici kısmındaki *DA-hat* gerilim değerini de kontrol etmektedir. Şekil 6.5'de simülasyon süresince *DA-hat* gerilimindeki değişimler gösterilmektedir. Simülasyonun başlangıç aşamasında, *DA-hat* gerilimi 0,15. saniyede 900 volta sabitlenmiştir. 0,4 saniyede yükün devreye alınması ile

DA-hat gerilimi +20 voltluk bir sapma ile 0,15 saniyede referans değere çekilmiştir. Bu süre içerisinde *DA-hat* geriliminde salınımlar gözlenmektedir. 0,6 ve 0,8. Saniyelerdeki bozucu etkilerde de D-STATKOM'un tepki süresi yaklaşık 0,15 saniyedir. *DA-hat* gerilimi referans değere sabitlendiği zaman ripple'lar oluşmaktadır. Bu ripple büyüklüğü D-STAKOM'un ürettiği veya tükettiği reaktif güç değerlerine göre değişiklikler gösterdiği gözlenmektedir.

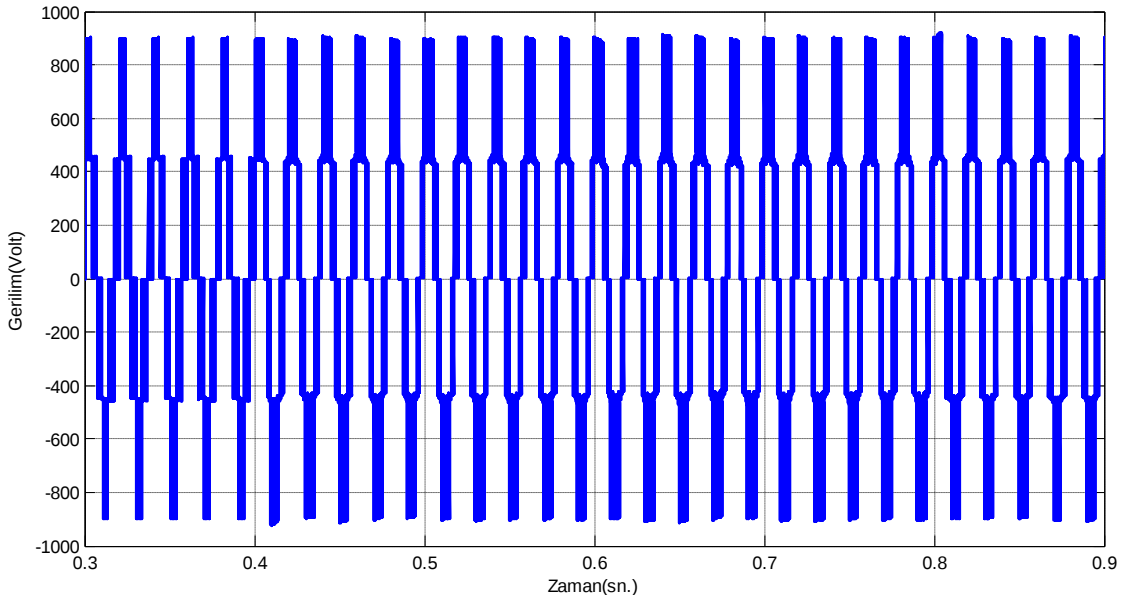


Şekil 6.5 Klasik PI denetleyicili D-STATKOM ile *DA-hat* gerilimindeki değişim.

Şekil 6.6'da modülasyon indeksinin değişimi gösterilmektedir. Modülasyon indeksi ilk 0,4 saniyelik süre içerisinde 0,68'dir. Tasarım yapılırken 0,73 olacak şekilde hesaplama yapılmıştı, farklı çıkmasının sebebi ise filtre kondansatörünün üretmiş olduğu reaktif gücü karşılamak için D-STATKOM'un az bir reaktif güç tüketmesinden kaynaklanmaktadır. Modülasyon indeksi 0,4-0,6. saniyeler arasında 0,88, 0,6-0,8. saniyeler arası 0,93, 0,8-1. saniyeler arası 0,82'dir. Şekil 6.7'de evirici çıkışındaki gerilim değeri gösterilmektedir. Burada, 900 volt *DA-hat* geriliminin darbe genişlik modülasyon tekniği ile genliğinin değiştirilmesi görülmektedir.



Şekil 6.6 Klasik PI denetleyicili D-STATKOM modülasyon indeksi değişimi.

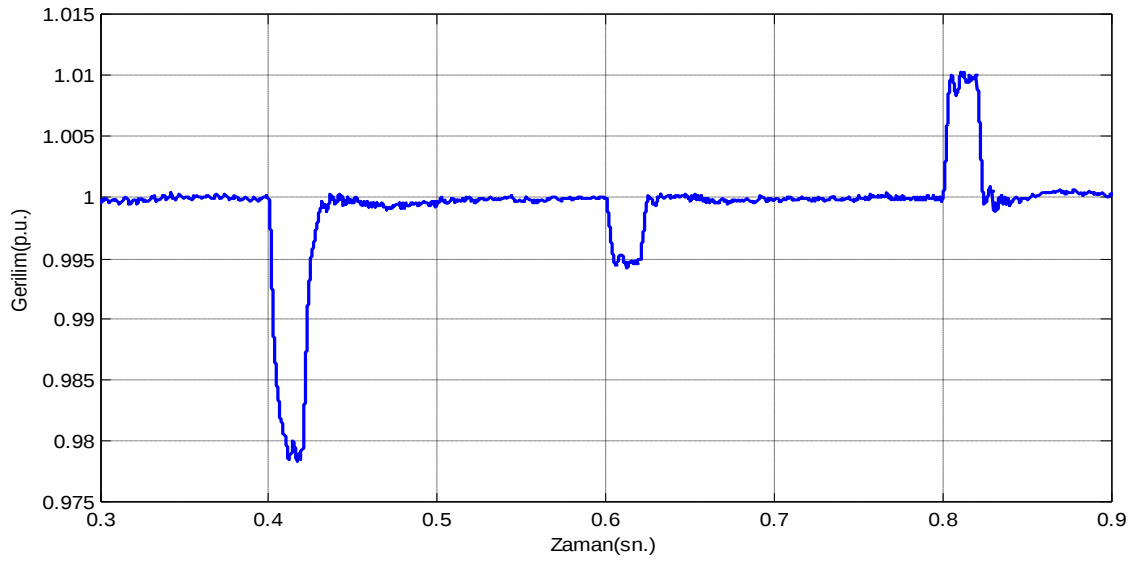


Şekil 6.7 Klasik PI denetleyicili D-STATKOM evirici çıkış gerilim değeri.

6.1.3 25 Kural Tabanlı Bulanık PI Denetleyicili D-STATKOM Simülasyon Sonuçları

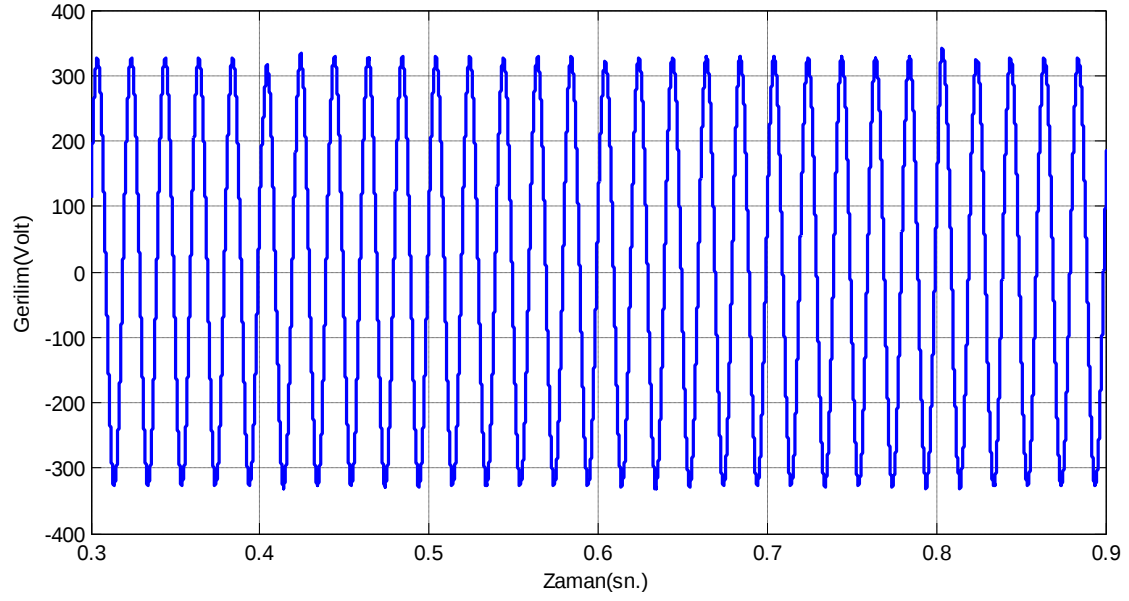
Şekil 6.8’de p.u. biriminde OBN gerilim genliğindeki değişmelerin simülasyon sonuçları gösterilmektedir. 0,4. saniyede yükün devreye girmesiyle oluşan 0,075 p.u. gerilim düşümü D-STATKOM ’un 0,035 saniyelik tepki süresi ile 1 p.u. referans değerine çekilmiştir. Burada 0,4. saniyedeki gerilimin yaklaşık 0,02 p.u. düşüş ile

referans değere çekildiği de görülmektedir. 0,6 ve 0,8. saniyelerdeki bozucu etkilere D-STATKOM'un vermiş olduğu tepki süresi 0,035 saniyedir. Şekil 6.9'da OBN gerilim değerinin anlık değişimi gösterilmektedir. OBN geriliminin anlık değişiminde 0,4 ve 0,6. saniyelerdeki bozucu etkinin sadece o anki (+) alternasta hafif bir düşüşe, 0,8. saniyedeki bozucu etkinin ise sadece o anki (+) alternasta hafif bir yükselişe neden olduğu görülmektedir.

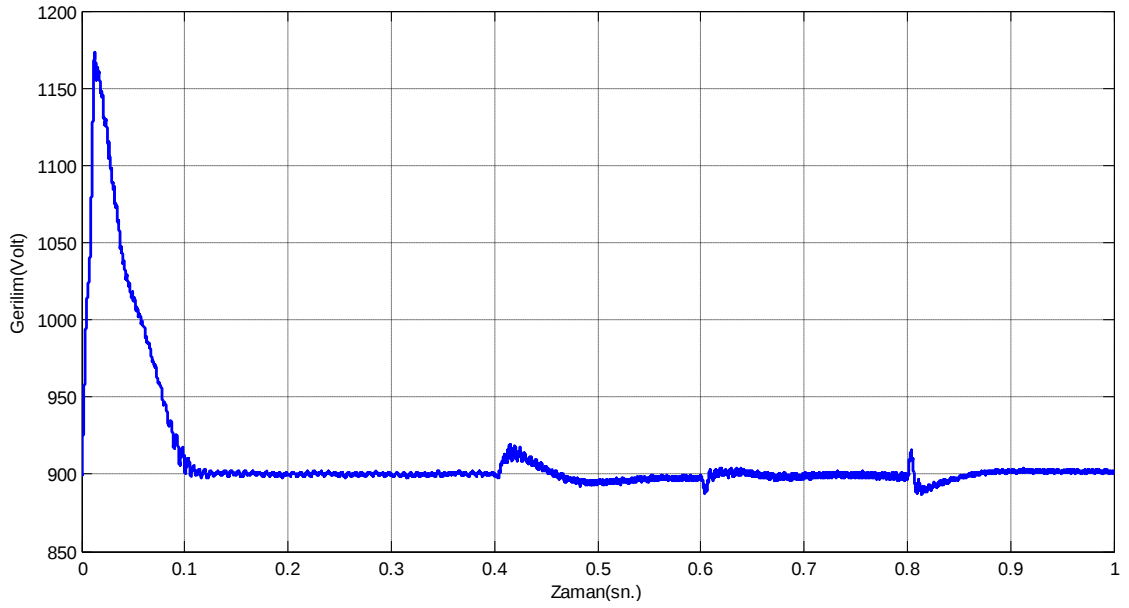


Şekil 6.8 25 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM ile OBN p.u. biriminde gerilim değeri.

Şekil 6.10'da simülasyon süresince *DA-hat* gerilimindeki değişimler gösterilmektedir. Simülasyonun başlangıç aşamasında, *DA-hat* gerilimi 0,1. saniyede 900 volta sabitlenmiştir. 0,4. saniyede yükün devreye alınması ile *DA-hat* gerilimi +20 voltluk bir sapma ile 0,12 saniyede referans değere çekilmiştir. Bu süre içerisinde *DA-hat* geriliminde salınımlar gözlenmemektedir. D-STATKOM'un 0,6. Saniyedeki bozucu etkiye tepki süresi 0,01 saniye ve 0,8. saniyedeki bozucu etkiye de tepki süresi yaklaşık 0,05 saniyedir.



Şekil 6.9 25 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM ile OBN *a* fazının volt biriminde anlık gerilim değeri.

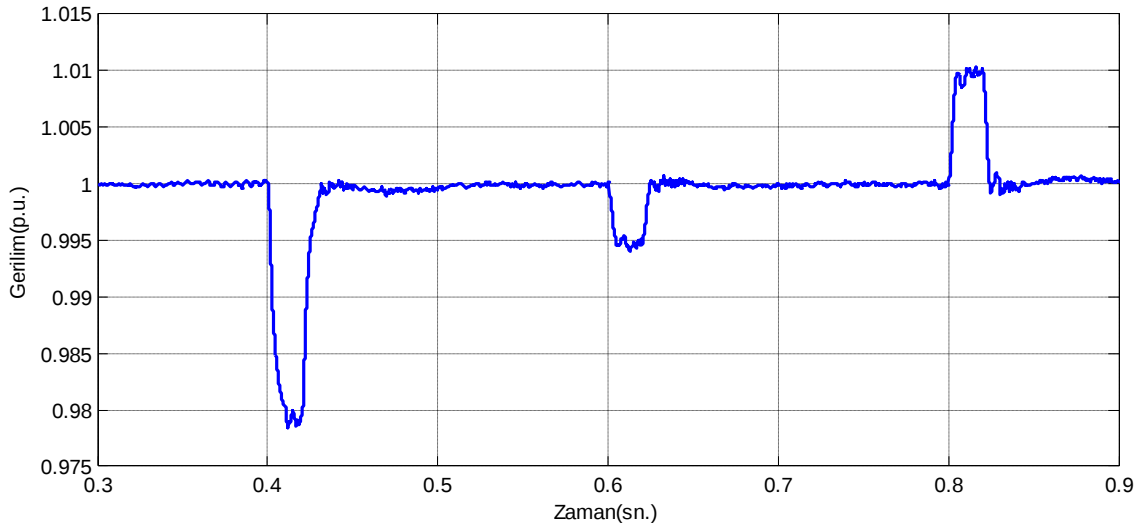


Şekil 6.10 25 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM *DA-hat* gerilimindeki değişim.

6.1.4 49 Kural Tabanlı Bulanık PI Denetleyicili D-STATKOM Simülasyon Sonuçları

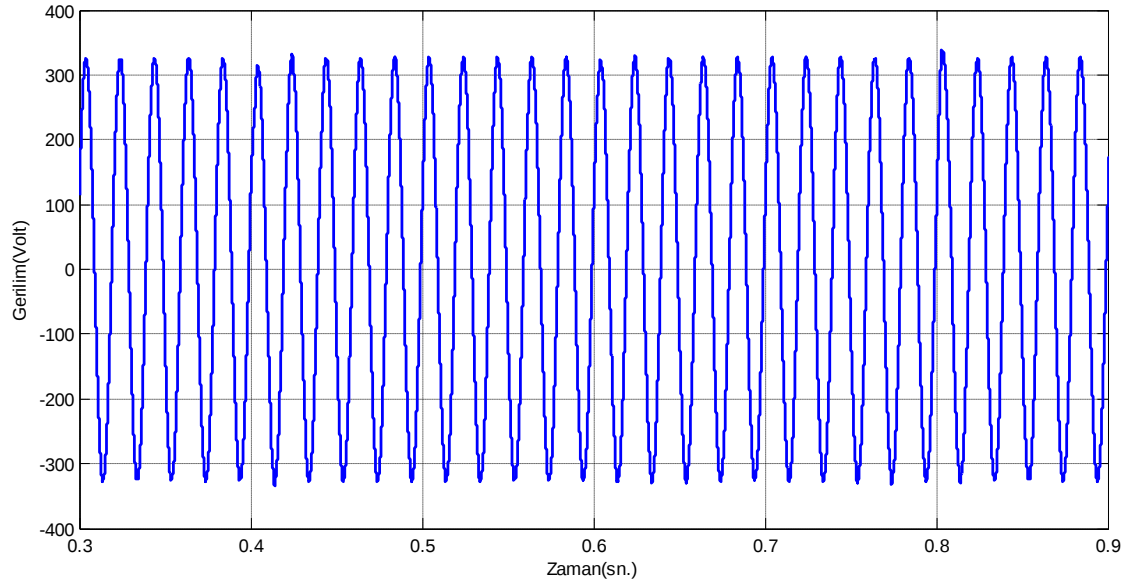
Şekil 6.11’de p.u. biriminde OBN gerilim genliğindeki değişmelerin simülasyon sonuçları gösterilmektedir. 0,4. saniyede yükün devreye girmesiyle oluşan 0,075 p.u. gerilim düşümü D-STATKOM’un 0,03 saniyelik tepki süresi ile 1 p.u. referans değerine

çekilmiştir. Burada 0,4. saniyedeki gerilimin yaklaşık 0,02 p.u. düşüş ile referans değere çekildiği de görülmektedir. 0,6 ve 0,8. saniyelerdeki bozucu etkilere D-STATKOM'un vermiş olduğu tepki süresi 0,03 saniyedir. Şekil 6.12'de OBN gerilim değerinin anlık değişimi gösterilmektedir. OBN geriliminin anlık değişiminde 0,4 ve 0,6. saniyelerdeki bozucu etkinin sadece o anki (+) alternasta hafif bir düşüşe, 0,8. saniyedeki bozucu etkinin ise sadece o anki (+) alternasta hafif bir yükselişe neden olduğu görülmektedir.

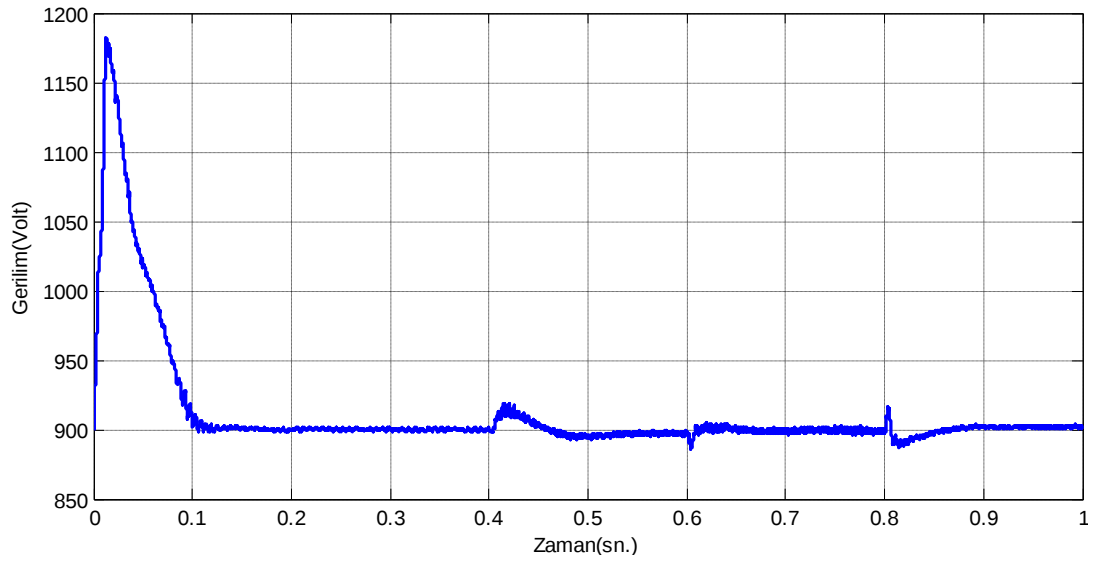


Şekil 6.11 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM ile OBN p.u. biriminde gerilim değeri.

Şekil 6.13'de simülasyon süresince *DA-hat* gerilimindeki değişimler gösterilmektedir. Simülasyonun başlangıç aşamasında, *DA-hat* gerilimi 0,1. saniyede 900 volta sabitlenmiştir. 0,4. saniyede yükün devreye alınması ile *DA-hat* gerilimi +18 voltluk bir sapma ile 0,12 saniyede referans değere çekilmiştir. Bu süre içerisinde *DA-hat* geriliminde salınımlar gözlenmemektedir. D-STATKOM'un 0,6. Saniyedeki bozucu etkiye tepki süresi 0,01 saniye ve 0,8. saniyedeki bozucu etkiye de tepki süresi yaklaşık 0,05 saniyedir.

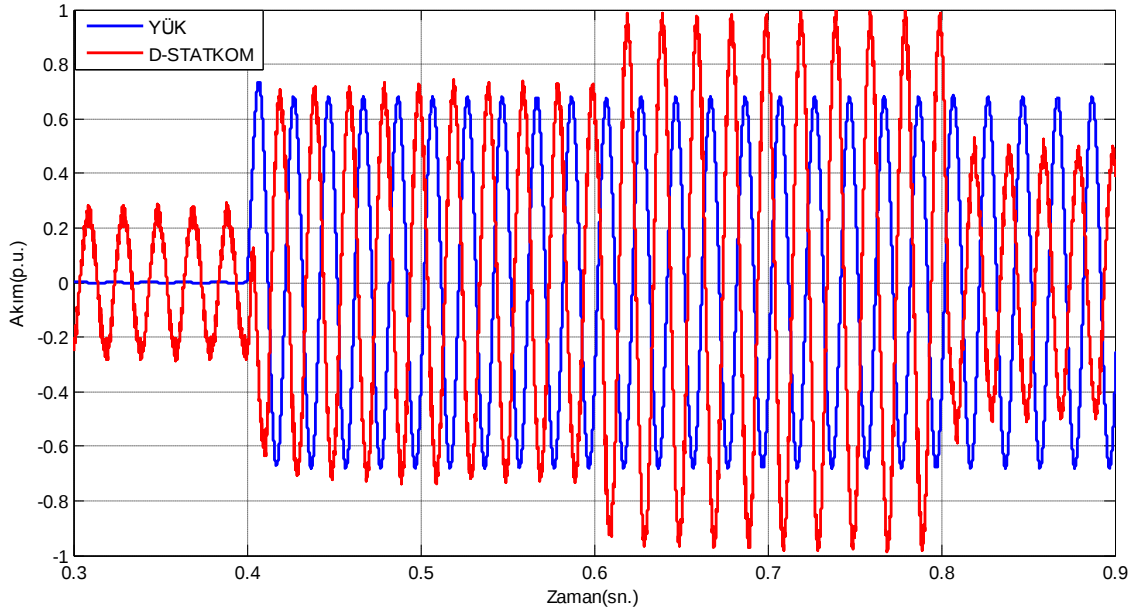


Şekil 6.12 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM ile OBN *a* fazının volt biriminde anlık gerilim değeri.

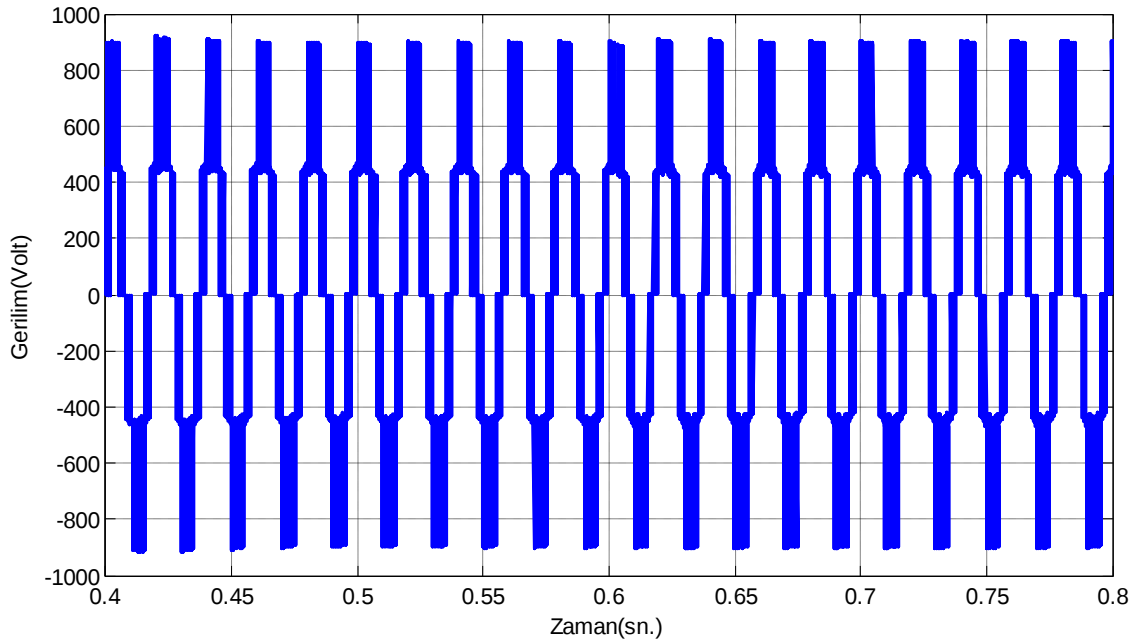


Şekil 6.13 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM *DA-hat* gerilimindeki değişim.

Şekil 6.14’de 49 kural tabanlı D-STATKOM ve yük *a* fazı akımlarının anlık değeri p.u. biriminde verilmiştir. Burada D-STATKOM’un yüklü-yüksüz ve değişik kaynak gerilimi değerlerinde akım değerlerinin değişimi ve yük akımı ile D-STATKOM akımları arasındaki faz açısının farklılığı görülmektedir.



Şekil 6.14 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM; yük ve D-STATKOM a fazı akımlarının p.u. biriminde anlık değerleri.



Şekil 6.15 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM evirici çıkış gerilimi.

6.1.5 Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Güç Sisteminin simülasyonu; klasik PI denetleyicili, 25 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili ve 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM olmak üzere üç farklı denetleyici türünde yapılmıştır. Bu denetleyicilerin bozucu etkilere karşı vermiş

oldukları tepkiler çizelge üzerinden incelenirse kıyaslama kolaylığı sağlanacaktır. Bu kıyaslama ortak bağlantı noktasındaki gerilim değeri ve *DA-hat* gerilim değeri üzerinden olmak üzere iki farklı şekilde yapılmıştır. Çizelge 6.3’de denetleyici türlerine göre ortak bağlantı noktası (OBN) gerilim değeri üzerinden D-STATKOM tepki süreleri verilmiştir. Çizelge 6.4’de ise denetleyici türlerine göre *DA-hat* gerilim değeri üzerinden D-STATKOM tepki süreleri verilmiştir.

Çizelge 6.3 Bozucu etkilere karşı D-STATKOM’un OBN gerilim değerine göre tepki süreleri

Denetleyici Türü	Bozucu etki zamanı ve tepki süresi		
	0,4. saniye	0,6. saniye	0,8. saniye
Klasik PI	50 ms	50 ms	50 ms
25 kurallı bulanık PI	35 ms	35 ms	35 ms
49 kurallı bulanık PI	30 ms	30 ms	30 ms

Çizelge 6.4 Bozucu etkilere karşı D-STATKOM’un *DA-hat* gerilim değerine göre tepki süreleri

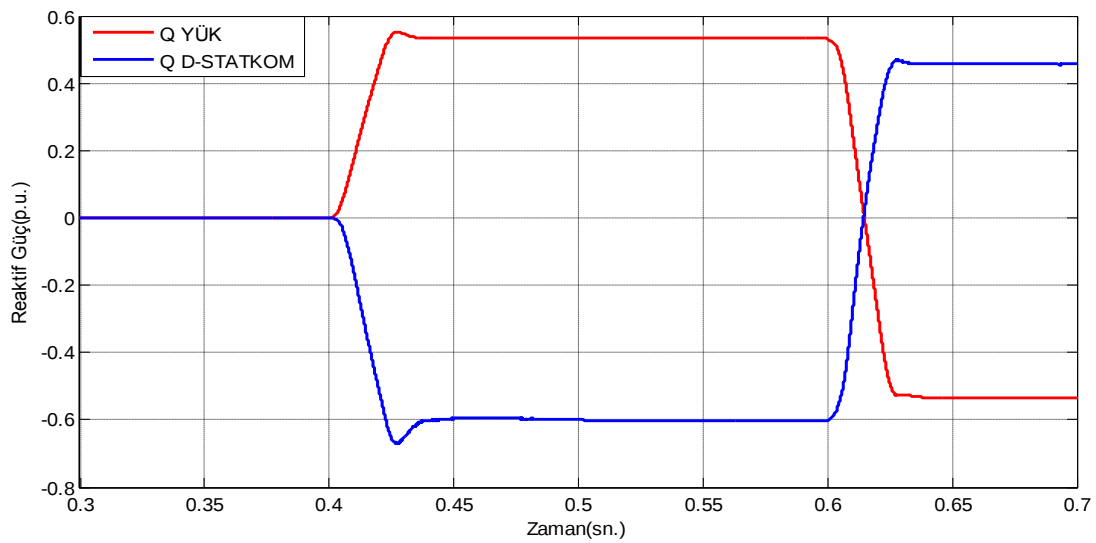
Denetleyici Türü	Bozucu etki zamanı ve tepki süresi			
	Başlangıç	0,4. saniye	0,6. saniye	0,8. saniye
Klasik PI	150 ms	150 ms	150 ms	150 ms
25 kurallı bulanık PI	100 ms	120 ms	10 ms	50 ms
49 kurallı bulanık PI	100 ms	120 ms	10 ms	50 ms

Çizelge 6.3’de görüldüğü gibi OBN gerilim değerindeki en iyi performansı 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM 30 ms ile sağlamıştır. Buradan bulanık PI denetleyicinin kural sayısı arttıkça OBN gerilim değerinin düzelme süresinin azaldığı anlaşılmaktadır. D-STAKOM’un dinamik performansı *DA-hat* gerilimi üzerinden karşılaştırılacak olursa en iyi performansı 25 ve 49 kural tabanlı bulanık PI kontrolör türünün her ikisinde de olduğu gözlenmektedir. *DA-hat* geriliminde bulanık PI denetleyicinin tepki süresinde kural sayısının etkisi görülmemektedir. Ancak, 0,4.

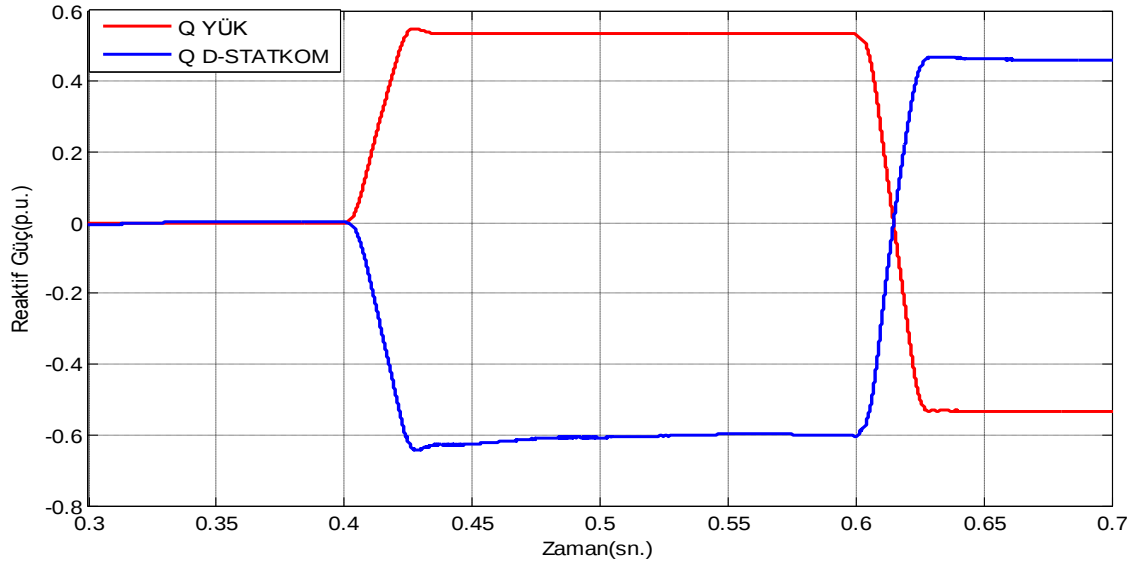
saniyedeki 25 kural tabanlı bulanık PI kontrolörde DA sapması +20 Volt iken 49 tabanlı bulanık PI kontrolörde +19 volt olduğu simülasyon sonuçlarından anlaşılmaktadır. Buda çok az bir farktır. Ancak, OBN gerilimindeki değişimleri en iyi tepkiyi 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM vermesinden dolayı, genel anlamda 49 tabanlı bulanık PI denetleyicinin en iyi performansı sağladığını söyleyebiliriz.

6.2 Yük Kompanzasyonu İçin Simülasyon Sonuçları

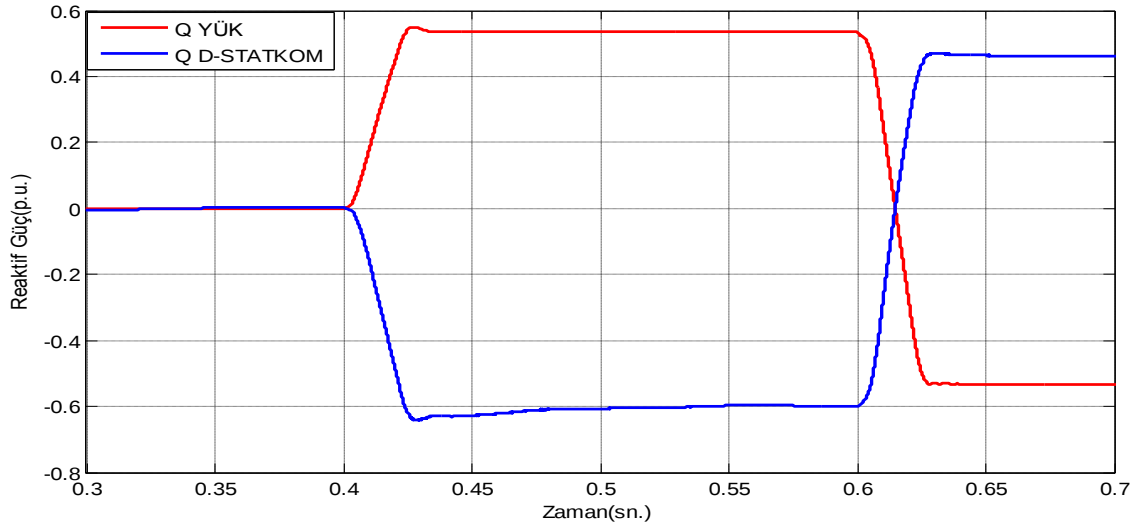
D-STATKOM ortak bağlantı noktasındaki gerilim değerini düzenleme amacı ile kullanıldığı gibi yükün çekmiş olduğu reaktif gücü kompanze etme amacı ile de kullanılabilir. Yük kompanzasyonu için simülasyon süresi 1 saniyedir. Güç sistemi başlangıçta yüksüz, 0,4. saniyede $P=40$ kW, $Q=55$ kVAr güç ile yüklenmiş, 0,6. saniyede aktif güç P sabit kalmış ve reaktif güç $Q=-55$ kVAr olarak değiştirilmiştir. Burada amaç yükün çektiği reaktif gücün aynı değerini D-STATKOM'un üretmesi ya da yükün ürettiği reaktif gücün aynı değerini D-STATKOM'un tüketmesidir. Simülasyonda D-STATKOM'un maksimum reaktif güç üretmesinden maksimum reaktif güç tüketmesine geçişi istenerek dinamik performansı gözlemlenmiştir. Şekil 6.16'da klasik PI denetleyicili, Şekil 6.17'de 25 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili, Şekil 6.18'de 49 tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM yük kompanzasyon p.u. biriminde reaktif güç eğrileri ile gösterilmektedir.



Şekil 6.16 Klasik PI denetleyicili D-STATKOM ile yük kompanzasyonu.

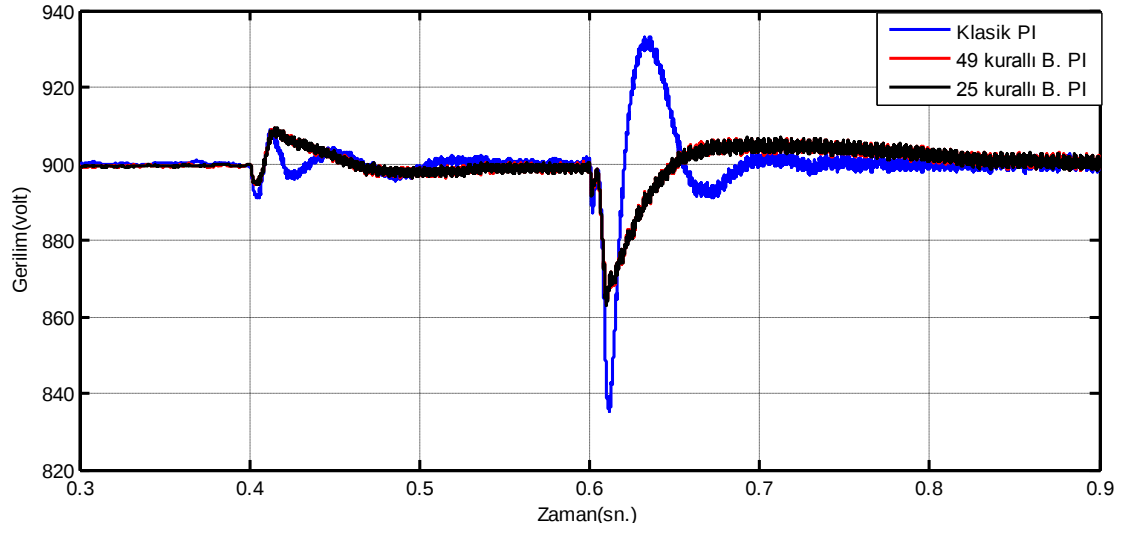


Şekil 6.17 25 Kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM ile yük kompanzasyonu.



Şekil 6.18 49 Kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM ile yük kompanzasyonu.

Simülasyon sonuçlarından yükün çekmiş olduğu reaktif gücün telafi edilmesinde 3 kontrolör yapısının dinamik performansı arasında pek bir farklılık olmadığı gözlemlenmektedir. D-STATKOM yükün çektiği reaktif gücü kompanze ederken *DA-hat* geriliminin kontrolünde ise bulanık PI kontrolör daha iyi bir performans sergilemiştir. Kontrolör çeşitlerine göre yük değişimlerine karşı *DA-hat* gerilimindeki tepkiler Şekil 6.19’da gösterilmektedir.



Şekil 6.19 Yük kompanzasyonunda kontrolör çeşitlerine göre D-STATKOM *DA-Hat* gerilimindeki tepkiler.

7. TARTIŞMA ve SONUÇ

Yapılan bu tez çalışmasında ± 55 kVAr gücünde OBN noktasında gerilim regülasyonu ve yük kompanzasyonu için üç seviyeli diyot kenetlemeli D-STATKOM tasarlanmış ve simülasyonu yapılmıştır. D-STATKOM evirici kısmını sürmek için faz kaydırmalı taşıyıcıya sahip sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu kullanılmıştır. D-STATKOM kontrol algoritması senkron referans çatı altında pq teorisine dayalı olarak yapılmıştır. Kontrol ünitesinde toplam 4 adet PI kontrolör bulunmaktadır. Bu çalışmada klasik PI kontrolör yerine bulanık PI kontrolör kullanılmıştır. Bulanık PI kontrolörler 25 ve 49 kural tabanlı olarak tasarlanmıştır.

Güç sisteminin simülasyonu ilk olarak D-STATKOM'suz olarak yapılmış ve OBN gerilimindeki değişimler izlenmiştir. Daha sonra simülasyon klasik PI kontrollü D-STATKOM ve 25, 49 kural tabanlı bulanık PI kontrollü D-STATKOM ile yapılmıştır. Yapılan simülasyon sonuçları; OBN geriliminin düzenlenmesinde 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM'un 30ms, 25 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM'un 35ms, klasik PI denetleyicili D-STATKOM'un ise 50 ms ile bozucu etkilere tepki verdiğini göstermektedir. OBN geriliminin düzenlenmesinde 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM'un en iyi tepki süresine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Böylelikle bulanık PI denetleyicinin kural sayısı artırıldıkça en iyi tepki süresinin elde edildiği anlaşılmaktadır.

D-STATKOM OBN gerilim düzenleme işlemi yaparken *DA-hat* geriliminin kontrolünde, klasik PI denetleyicili D-STATKOM bütün bozucu etkilere 150 ms , 25 ve 49 kural tabanlı bulanık PI denetleyicili D-STATKOM birbirleri ile aynı performansı göstererek en düşük 10 ms ve en yüksek 120 ms tepki sürelerine sahip olduğunu simülasyon sonuçları göstermektedir. *DA-hat* geriliminin düzenlenmesinde de bulanık PI kontrolörlerin daha iyi performansa sahip oldukları simülasyon sonuçlarından anlaşılmaktadır.

Endüstriyel tesislerde gerilim değerinin korunmasından ziyade uygulanan cezai sorumluluklardan dolayı tüketiciler için reaktif güç tüketimi daha fazla önem arz etmektedir. Reaktif güç tüketimini karşılamaya yönelik olarak D-STATKOM yük

kompanzasyonu amacı ile de kullanılabilir. Tasarlanan D-STATKOM yük kompanzasyonu için klasik PI denetleyicili ve 24, 49 kural tabanlı bulanık PI kontrolör ile simülasyonu yapılmıştır. Bu simülasyon sonuçlarından yükün çektiği reaktif gücü kompanze etmede kontrolörler arasında pek bir fark olmadığı gözlenmektedir. Ancak yük kompanzasyonu yapılırken D-STATKOM *DA-hat* gerilim kontrolünün 25 ve 49 kural tabanlı kontrolörlerle daha iyi yapıldığı gözlemlenmiştir.

Yapılan bu çalışmada D-STATKOM'un dağıtım noktalarında gerilim regülasyonu ve yük kompanzasyonunda etkili bir çözüm olduğu görülmektedir. D-STATKOM'un tek dezavantajı evirici kısmında bulunan yarıiletken anahtarlama elamanlarının maliyetli olmasıdır. Yarı iletken teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak ilerleyen zamanlarda yarı iletken anahtarlama elamanlarının maliyetinde düşüşler beklenmektedir.

Sonuç olarak; OBN gerilim değerini düzenlemede bulanık PI denetleyicili D-STATKOM çok daha iyi bir performans sergilemiştir. Bulanık PI kontrolörlerde ise kural sayıları arttırıldığında daha etkili ve verimli oldukları kanıtlanmıştır. Yük kompanzasyonu için yükün çekmiş olduğu reaktif gücü kompanze etmede klasik PI kontrollü D-STATKOM ile bulanık PI kontrolör D-STATKOM performansları arasında kayda değer bir fark olmadığı gözlemlenmiştir. Ancak yük kompanzasyonunda D-STATKOM *DA-hat* gerilim kontrolünün klasik PI kontrole göre 25 ve 49 kural tabanlı bulanık PI kontrolörle daha iyi sağlandığı gözlemlenmiştir. Daha sonraki çalışmalarda üyelik fonksiyonları genetik algoritmalar ile optimize edilen bulanık PI kontrolör, D-STATKOM kontrol algoritmasına eklenerek daha iyi performans elde edilebilir.

8.KAYNAKLAR

- Acha, E., Agelidis, V., Anaya, O. and Miller, T. J. E. (2002). Power electronic control in electrical systems. Elsevier, Oxford.
- Aksoy, F. A. ve Yalçınöz, T. (2007). Bulanık mantık kontrollü statik senkron kompanzatörlerin tasarımı ve uygulaması. 12. *Elektrik, Elektronik Bilgisayar Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi ve Fuarı*. Eskişehir.
- Alcı, M. ve Karatepe, E. (2002). Bulanık mantık ve Matlab uygulamaları. Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü Bornova, İzmir, Türkiye.
- Altaş, İ. H. (1999). Bulanık Mantık: Bulanıklık Kavramı. *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e* **62**: 80-85
- Banerji, A., Biswas, S. K., and Singh, B. (2012). DSTATCOM Control Algorithms: A Review. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, **2(3)**: 285-296.
- Bollen, M. H. and Hassan, F. (2011). Integration of distributed generation in the power system. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Bose, B. K. (2002). Modern power electronics and AC drives. Prentice Hall, USA.
- Burns, R. (2001). Advanced control engineering. Butterworth-Heinemann. Oxford.
- Chen, G., Phem, T.T., Weus, J.(1995). Fuzzy Modeling of Control Systems. IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems.
- Coteli, R., Dandil, B., and Ata, F. (2011). Fuzzy-pi current controlled d-statcom. *Gazi University Journal of Science*, **24(1)**: 91-99.
- Çelik, H. (2010). Güç Sistemlerinde frekans kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye.
- Çetin, A. (2007). Reaktif güç kompanzasyonu ve harmonik filtreleme amacıyla kullanılacak gerilim kaynaklı çevirgece dayalı statkomun tasarımı ve gerçekleştirilmesi. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

- Çınar, S.M.(2011). Mermer makinelerinde ileri seviye kontrol uygulamaları. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye.
- Deniz, E., Tuncer, S. ve Gençoğlu, M.T. (2009). Statcom ile iletim hatlarında reaktif güç kompanzasyonu, *Kaynak Elektrik*, **247**: 109-113
- Deniz, E. (2010). Uzak vektör darbe genişlik modülasyonu kullanan üç seviyeli H-köprü evirici tabanlı D-STATKOM'un tasarımı ve gerçekleştirilmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye.
- El-Hawary, M. E. (2008). Introduction to electrical power systems. John Wiley & Sons, Hoboken.
- Espinosa, J., Vandewalle, J. and Wertz, V. (2004). Fuzzy logic, identification and predictive control. Springer, Berlin.
- Fouad, A. A. and Anderson, P. M. (1977). Power system control and stability. *Universidade do Estado do Iowa, Ames*.
- Fuchs, E. and Masoum, M. A. (2008). Power quality in power systems and electrical machines. Academic press.
- Güran, F. ve Eren, L. (2012). Motor akım imza analizinde park dönüşümüyle temel harmonik bastırımı. *EMO Bilimsel Dergi*, **2(3)**: 45-49.
- Han, C. (2006). Power System Dynamic Voltage Management with Advanced STATCOM and Energy Storage System. ProQuest, Raleigh.
- Hannan, M. A. (2012). Effect of DC Capacitor Size on D-STATCOM Voltage Regulation performance Evaluation. *Przegląd Elektrotechniczny*, **88**: 243-246.
- Hase, Y. (2013). Handbook of Power Systems Engineering with Power Electronics Applications. John Wiley & Sons, The Atrium.
- Hofmann, W., Schlabbach, J. and Just, W. (2012). Reactive Power Compensation: A Practical Guide. Wiley & Sons, The AtriumJohn.
- Jantzen, J. (2013). Foundations of Fuzzy Control. John Wiley & Sons, Chichester.
- Jose, L. Single Phase Statcom_Its Control Algorithim. *Rajiv Gandhi Institute of technology*, Kottayam.

- Karmiris, G., Tsengenes, G. and Adamidis, G. (2012). A multifunction control scheme for current harmonic elimination and voltage sag mitigation using a three phase three level flying capacitor invertör. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **24**: 15-34.
- Khomfoi, S. and Tolbert, L. M. (2007). Multilevel power converters. *Power electronics handbook*, 451-482.
- Kumar, S. R. and Nagaraju, S. S. (2007). Simulation of D-STATCOM and DVR in power systems. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, **2(3)**: 7-13
- Kundur, P. (1993), "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, New York.
- Lai, J. S., & Peng, F. Z. (1996). Multilevel converters-a new breed of power converters. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, **32(3)**: 509-517.
- Laughton, M. A. and Warne, D. F. (Eds.). (2002). Electrical engineer's reference book. Newnes, Oxford.
- Ledwich, G., and Ghosh, A. (2002). A flexible DSTATCOM operating in voltage or current control mode. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, **149(2)**: 215-224.
- Mathur, R. M. and Varma, R. K. (2002). Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems. IEEE Press, New York.
- McDonald, J.D. (2003). Electric Power Substations Engineering. CRC Press, Boca Raton.
- VanderMeulen, A. and Maurin, J. (2010). Application Engineers. Current source inverter vs. Voltage source inverter topology.
- Mora'n, L., Dixon, J., Espinoza, M. J. and Rodriguez, J. (2006). FACTS Controllers. In: Grigsby, L. L. (2006). Electric Power Engineering Handbook. CRC Press, Boca Raton.
- Mudi, R. K. and Pal, N. R. (2000). A self-tuning fuzzy PI controller. *Fuzzy sets and systems*, **115(2)**: 327-338.

- Oğuz, Y. (2007). Hibrid güç üretim sisteminin modellenmesi, analizi ve neuro-fuzzy kontrolör kullanılarak sistem performansının iyileştirilmesi. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Oguz, E. (2012). Bir laboratuvar aydınlatma sistemi için batarya desteklemeli rüzgar-güneş hibrit güç üretim sisteminin simülasyonu ve bulanık mantık kontrolör ile enerji akış kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Koca Tepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye.
- Padiyar, K. R. (2007). FACTS controllers in power transmission and distribution. New Delhi, New Age International.
- Patil, D. R. and Madhale, K. K. Design and Simulation Studies of D-STATCOM for Voltage Sag, Swell Mitigation. *IRNet Transactions on Electrical and Electronics Engineering*, 97-103
- Pinapatruni, K. K. and Krishna Mohan, L. (2012). DQ based Control of DSTATCOM for Power Quality Improvement. *VSRD International Journal of Electrical, Electronics & Communication Engineering*, **2(5)**: 207-227.
- Revathi, R. and Ramprabu, J. (2012). a zigzag-delta phase-shifting transformer and three-leg vsc based dstatcom for power quality improvement. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, **1(6)**.
- Saadat, H. (1999). Power system analysis. WCB/McGraw-Hill, Singapore.
- Saleh, S. A. and Rahman, M. A. (2011). An Introduction to wavelet modulated invertörs. **87**, John Wiley & Sons, New Jersey.
- Sankaran, C. (2001). Power quality. CRC press, Boca Raton.
- Singh, B. and Arya, S. R. (2012). Design and control of a DSTATCOM for power quality improvement using cross correlation function approach. *International Journal of Engineering Science and Technology*, **4(1)**: 74-86.
- Sirisukprasert, S. (2004). The modeling and control of a cascaded-multilevel converter-based STATCOM. Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.

- Şafak, C. (2005). Pnomatik motorun hız kontrolü için genetik-bulanık kontrolör tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Tareila, C. P. (2011). A single-phase D-STATCOM invertör for distributed energy sources. Doctoral dissertation, Kansas State University.
- Tarı, E. (2010). Ölü zamanlı sistemlerde üyelik fonksiyonlarının taban aralığının ayarlanmasına dayalı bulanık kontrolör tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Topuz, V. (2002). Bulanık Genetik Proses Kontrolü. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Tuncer, S. (2004). Çok seviyeli invertörler ve DGM teknikleri, *Fırat Üniversitesi Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, **2(3)**: 56–61.
- Tuncer, S. (2009). Çok seviyeli eviricilerde taşıyıcı dalga şekli değişimlerinin çıkış gerilimi üzerine etkilerinin İncelenmesi. *Gazi üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **24(4)**: 613–628.
- Uçak, O. (2009). Gerilim kaynaklı çevirgeç tabanlı melez aktif güç filtresi tasarımı ve uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- Vishnoi, T. (2011). Managing Reactive Power Using Cascaded Multilevel D-STATCOM in Sub-Transmission/11kV Distribution System. Doctoral dissertation, Delhi College of Engineering.
- Yılmaz, S. Bulanık Mantık ve Mühendislik Uygulamaları (SDIV) ders notları.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and control*, **8**: 338-353.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mehmet GÖRES
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya Bozkır – 01.11.1980
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0505 266 20 04 / mehmetgores42@hotmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Meram Endüstri Meslek Lisesi 2001-2005
Lisans : 1997–2002 Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim
Fakültesi (Elektrik Öğretmenliği)
Yüksek Lisans : A.K.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Ana Bilim Dalı
2009-2014

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :

- ✓ Akdeniz Üniversitesi Akseki Meslek Yüksek Okulu, Öğretim Görevlisi / 2004-2010
- ✓ Güngören Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi, Elektrik Öğretmeni / 2010-2012
- ✓ Selçuklu Türk Telekom Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi, Elektrik Öğretmeni / 2012