

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİNDE GELENEKSEL
KONTROL TEORİSİ VE BULANIK MANTIK
KONTROL TEORİSİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yasin GENÇ

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU

Mayıs 2015

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİNDE GELENEKSEL
KONTROL TEORİSİ VE BULANIK MANTIK
KONTROL TEORİSİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yasin GENÇ

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK

Bu tez 03 / 06 / 2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU
Jüri Başkanı


Doç. Dr. Ahmet ÖZMEN
Üye


Doç. Dr. Ali ÖZTÜRK
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Yasin GENÇ

10.05.2015

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmam sűresince deęerli bilgilerini benimle paylaőan, beni sűrekli destekleyen ve yol gűsteren deęerli danıőman hocam Prof. Dr. Ertan YANIKOęLU'na, hayatım boyunca yanımda olan ve her zaman beni destekleyen sevgili aileme teőekkűr ederim. Ayrıca yűksek lisans űęrenim boyunca TŪBİTAK 2211 yurt içi lisansűstű burs programı kapsamında beni destekleyen TŪBİTAK'a teőekkűr ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvi

BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
1.1. Güç Kalitesinin Tanımı.....	1
1.2. Güç Kalitesinin Önemi.....	4
1.3. Güç Kalitesi Standartları.....	6
1.4. Güç Kalitesi Probleminin Değerlendirilmesi.....	6
1.5. Güç Kalitesi Problemi.....	7
1.5.1. Geçici olaylar.....	9
1.5.1.1. Darbeli geçici durum.....	10
1.5.1.2. Salınlı geçici durum.....	11
1.5.2. Uzun süreli değişimler.....	12
1.5.2.1. Aşırı gerilim.....	13
1.5.2.2. Düşük gerilim.....	13
1.5.2.3. Kalıcı gerilim kesintileri.....	14
1.5.3. Kısa süreli gerilim değişimleri.....	14
1.5.3.1. Kesinti.....	15
1.5.3.2. Gerilim düşmesi.....	16
1.5.3.3. Gerilim yükselmesi.....	18
1.5.4. Gerilim dengesizliği.....	19

1.5.5. Dalga şekli bozukluğu.....	20
1.5.5.1. Doğru akım bileşeni.....	20
1.5.5.2. Harmonikler.....	21
1.5.5.3. Ara harmonikler.....	22
1.5.5.4. Çentik.....	22
1.5.5.5. Gürültü.....	23
1.5.6. Gerilim dalgalanmaları.....	24
1.5.7. Güç frekansı değişimleri.....	25
1.6. Güç Kalitesi Problemlerinin Etkileri.....	26
1.7. Güç Kalitesi Problemlerinin Karakteristikleri.....	29

BÖLÜM 2.

HARMONİKLER.....	30
2.1. Harmoniklerin Tanımı.....	30
2.2. Harmoniklerin Tarihçesi.....	32
2.3. Harmoniklerin Matematiksel Analizi.....	33
2.4. Harmonik Kaynakları.....	34
2.5. Harmonikleri Meydana Getiren Doğrusal Olmayan Elemanlar.....	35
2.5.1. Transformatörler.....	35
2.5.2. Generatörler.....	37
2.5.3. Bilgisayarlar.....	38
2.5.4. Statik var kompanzatörler.....	38
2.5.5. Ark fırınları.....	38
2.5.6. Kesintisiz güç kaynakları.....	39
2.5.7. Fotovoltaik sistemler.....	39
2.5.8. Elektronik balastlar.....	39
2.5.9. Statik dönüştürücüler.....	40
2.5.10. Gaz deşarjlı aydınlatma.....	41
2.6. Harmonik Standartları.....	42
2.7. Toplam Harmonik Bozulumu (THD).....	42
2.8. Akım ve Gerilim Harmonikleri.....	43
2.9. Harmonik Etkileri.....	44

2.10. Harmoniklerin Giderilmesi.....	45
BÖLÜM 3.	
REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU.....	46
3.1. Reaktif Güç Kompanzasyonun Tanımı.....	46
3.2. Paralel Reaktörler.....	47
3.3. Paralel Kondansatör.....	47
3.4. Senkron Kompanzatörler.....	47
3.5. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS).....	48
3.6. FACTS Cihazları.....	49
3.6.1. Statik var kompanzatör (SVC).....	50
3.6.2. Tristör kontrollü seri kompanzatör (TCSC).....	52
3.6.3. Statik senkron seri kompanzatör (SSSC).....	53
3.6.4. Statik senkron kompanzatör (STATCOM).....	54
3.6.5. Birleşik güç akış denetleyicisi (UPFC).....	54
3.7. FACTS Cihazlarının Avantajları.....	55
3.8. FACTS Cihazlarının Dezavantajları.....	56
3.9. FACTS Cihazlarının Karşılaştırılması.....	56
BÖLÜM 4.	
BULANIK MANTIK.....	58
4.1. Bulanık Mantık Kavramı.....	58
4.2. Bulanık Mantığın Tarihçesi.....	59
4.3. Bulanık Kümeler.....	60
4.4. Temel Bulanık İşlemler.....	62
4.4.1. Birleşim (veya) işlemi.....	63
4.4.2. Kesişim (ve) işlemi.....	64
4.4.3. Tümleme (A) işlemi.....	64
4.5. Dilsel Değişkenler.....	65
4.6. Bulanık Sistem.....	67
4.6.1. Bulandırıcı.....	69
4.6.2. Çıkarım mekanizması.....	69
4.6.2.1. Max- Dot çıkarım.....	70
4.6.2.2. Min- Max çıkarım.....	70

4.6.2.3. Tsukamoto çıkarım.....	71
4.6.2.4. Takagi- Sugeno çıkarım.....	72
4.6.3. Bilgi tabanı.....	72
4.6.4. Kural tabanı.....	72
4.6.5. Durulayıcı.....	73
4.7. Bulanık Kontrol Tipleri.....	73
4.7.1. Durum değerlendiren bulanık kontrol kuralları.....	73
4.7.2. Amaç değerlendiren bulanık kontrol kuralları.....	74
4.8. Kural Tabanının Oluşturulması.....	74
4.8.1. Uzman tecrübesi ve kontrol mühendisliği bilgisi.....	75
4.8.2. Operatörün kontrol hareketlerini modellemesi.....	75
4.8.3. Sürecin bir bulanık modenini oluşturmak.....	75
4.8.4. Öğrenme.....	75
4.9. Bulanık Mantığın Avantajları.....	76
4.10. Bulanık Mantığın Dezavantajları.....	77
BÖLÜM 5.	
FİLTRELER.....	78
5.1. Pasif Filtreler.....	78
5.1.1. Seri pasif filtreler.....	78
5.1.2. Paralel pasif filtreler.....	80
5.1.3. Pasif filtrelerin dezavantajları.....	81
5.2. Aktif Filtreler.....	81
5.2.1. Paralel aktif filtreler.....	82
5.2.2. Seri aktif filtreler.....	83
5.3. Hibrit Güç Filtresi.....	84
5.4. Aktif Filtrelerin Güç Devresine Göre Sınıflandırılması.....	85
BÖLÜM 6.	
PARALEL AKTİF FİLTRE TASARIMI.....	87
6.1. Paralel Aktif Filtre.....	87
6.2. Anlık Reaktif Güç Teorisi.....	88
6.3. Üç Fazlı Üç Telli Sistemlerde Paralel Aktif Güç Filtresinin Tasarımı..	95

6.4. Geleneksel Kontrol Teorisi İle Tasarlanan PAGF.....	100
6.4.2. Simülasyon sonuçları.....	101
6.4.2.1. Sistemde PAGF bağlı olmadığı simülasyon sonuçları.	102
6.4.2.2. Sistemde PAGF bağlı durumda simülasyon sonuçları.....	104
6.5. Bulanık Mantık Teorisi ile Tasarlanan PAGF.....	109
6.5.1. Kural ifadelerinin ve kural tablosunun oluşturulması.....	111
6.5.2. Bulanık mantık temelli PAGF simülasyon sonuçları.....	113
6.6. Sonuçların Karşılaştırılması.....	117

BÖLÜM 7.

STATİK SENKRON KOMPANZATÖR.....	119
7.1. Statik Senkron Kompanzator (STATCOM).....	119
7.2. STATCOM'un Kontrolü.....	122
7.3. STATCOM'un Modeli.....	126
7.4. STATCOM Modelinin Doğrusallaştırılması.....	132

BÖLÜM 8.

STATCOM SİMÜLASYON ÇALIŞMASI.....	134
8.1. Sistemin Tasarlanması.....	134
8.2. Sistemde STATCOM'un Bağlı Olmadığı Durum.....	136
8.3. Sisteme STATCOM'un Bağlı Olduğu Durum.....	137
8.3.1. Geleneksel kontrol teorisi temelli STATCOM.....	138
8.3.1.1. P (Oransal) kontrolör.....	138
8.3.1.2. PI (Oransal- İntegratör) kontrolör.....	139
8.3.2. Bulanık mantık kontrol teorisi temelli STATCOM.....	141
8.3.2.1. Bulanık mantık kontrolör kurallarının oluşturulması.....	143
8.3.2.2. Bulanık mantık temelli STATCOM'un simülasyon sonuçları	
.....	144
8.4. Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	145
8.5. Test Devresi İle STATCOM'un İncelenmesi.....	145
8.5.1. Geleneksel kontrol teorisi temelli STATCOM.....	147
8.5.1.1. P (Oransal) kontrolör.....	147
8.5.1.2. PI (Oransal- İntegratör) kontrolör.....	147

8.5.2. Bulanık mantık teorisi temelli STATCOM.....	148
8.6. Sonuçların Karşılaştırılması.....	149
BÖLÜM 9.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	150
KAYNAKLAR.....	158
ÖZGEÇMİŞ.....	163

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

FACTS	: Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri
STATCOM	: Statik Senkron Kompanzatör
AB	: Avrupa Birliği
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
THD	: Toplam Harmonik Bozulması
TDD	: Toplam Talep Bozulması
DA	: Doğru Akım
AA	: Alternatif Akım
PAGF	: Paralel Aktif Güç Filtresi
P	: Oransal
PI	: Oransal-İntegratör
PID	: Oransal-İntegratör-Türev
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
Hz	: Hertz
PLL	: Faz Kilitlemeli Çevrim
SVC	: Statik Var Kompanzatör
TCSC	: Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör
SSSC	: Statik Senkron Seri Kompanzatör
UPFC	: Birleşik Güç Akış Denetleyicisi
THD _v	: Gerilim için Toplam Harmonik Bozulması
THD _i	: Akım için Toplam Harmonik Bozulması
TCR	: Tristör Kontrollü Reaktör
VSC	: Gerilim Kaynaklı Evirici

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. En çok karşılaşılan güç kalitesi problemleri.....	9
Şekil 1.2. Yıldırım düşmesi sonucu oluşmuş darbeli geçiş olayı.....	10
Şekil 1.3. Pozitif yönlü darbeli geçici durum.....	11
Şekil 1.4. Orta frekanslı salınımlı geçici durum.....	12
Şekil 1.5. Aşırı gerilim.....	13
Şekil 1.6. Düşük gerilim.....	13
Şekil 1.7. Kısa süreli gerilim değişimleri.....	14
Şekil 1.8. Kısa süreli gerilim kesintisi a) gerilim dalga şekli b) gerilim etkin değeri	15
Şekil 1.9. Kısa süreli gerilim kesintisi.....	16
Şekil 1.10. Kısa süreli gerilim düşmesi.....	16
Şekil 1.11. Simetrik bir arızanın sebep olduğu gerilim düşmesi a)gerilimin dalga şekli b)gerilimin etkin değeri.....	17
Şekil 1.12. Simetrik olmayan bir arızanın sebep olduğu gerilim düşmesi a) gerilim dalga şekli b) gerilimin etki.....	17
Şekil 1.13. Asenkron motorun sebep olduğu gerilim düşmesi.....	18
Şekil 1.14. Bir kısa devre arızası sonucunda orta gerilim hattında oluşan ani gerilim yükselmesi.....	19
Şekil 1.15. Gerilimde oluşan dengesizlik.....	20
Şekil 1.16. Harmonikli gerilim dalga şekli.....	21
Şekil 1.17. Gerilim çentiği olayının dalga şekli.....	23
Şekil 1.18. Bir gerilim dalgası üzerine binmiş gürültü.....	24
Şekil 1.19. Gerilim kırışma olayı.....	25
Şekil 1.20. Güç frekansı değişimi.....	26
Şekil 2.1. Temel bileşen ve harmonikler.....	31
Şekil 2.2. Temel ve harmonikli dalga.....	31
Şekil 2.3. Transformatörün mıknatıslanma akımı.....	37
Şekil 2.4. Transformatörün mıknatıslanma akımının harmonik spektrumu.....	37

Şekil 2.5. Kesintisiz güç kaynağı yapısı.....	39
Şekil 2.6. Fotovoltaik enerji üretim şeması.....	39
Şekil 2.7. Elektronik balast akımı.....	40
Şekil 2.8. Elektronik balast akımının spektrumu.....	40
Şekil 2.9. Gerilim kaynaklı evirici devre akımının dalga şekli.....	41
Şekil 2.10. Gerilim kaynaklı evirici devre akımının spektrumu.....	41
Şekil 3.1. SVC 'nin temel yapısı.....	51
Şekil 3.2. SVC'nin akım gerilim karakteristiği.....	51
Şekil 3.3. TCSC' nin temel yapısı.....	52
Şekil 3.4. TCSC çalışma modları.....	53
Şekil 3.5. SSSC'nin genel yapısı.....	53
Şekil 3.6. STATCOM 'un yapısı.....	54
Şekil 3.7. UPC' nin genel yapısı.....	55
Şekil 3.8. Seri FACTS cihazların karşılaştırılması.....	57
Şekil 3.9. Paralel FACTS cihazların karşılaştırılması.....	57
Şekil 4.1. Gaussian üyelik fonksiyonu.....	61
Şekil 4.2. Üçgen üyelik fonksiyonu.....	61
Şekil 4.3. A kümesinin üyelik fonksiyonu.....	62
Şekil 4.4. B kümesinin üyelik fonksiyonu.....	63
Şekil 4.5. Birleşim işlemi.....	63
Şekil 4.6. Kesişim İşlemi.....	64
Şekil 4.7. Tümleme işlemi.....	65
Şekil 4.8. Bir arabanın hız değişiminin dilsel değişimi.....	66
Şekil 4.9. Temiz bulanık sistemlerin temel şeması.....	67
Şekil 4.10. Bulandırıcı ve durulayıcı sistemin temel şeması.....	68
Şekil 4.11. Takagi-Sugeno-Kang (TSK) modelinin temel şeması.....	68
Şekil 4.12. Bulanık denetim sistemi.....	69
Şekil 4.13. Max- Dot çıkarım tekniği.....	70
Şekil 4.14. Min- Max çıkarım tekniği.....	71
Şekil 4.15. Tsukamoto çıkarım tekniği.....	71
Şekil 4.16. Takagi- Sugeno çıkarım tekniği.....	72
Şekil 5.1. a) Tek ayarlı filtre b) Çift ayarlı filtre.....	79
Şekil 5.2. Seri pasif filtre.....	80

Şekil 5.3. Paralel pasif filtre.....	81
Şekil 5.4. Paralel aktif güç filtresi modeli.....	83
Şekil 5.5. Seri aktif güç filtresi modeli.....	83
Şekil 5.6. Seri aktif filtre ve paralel pasif filtrelerin birleştirilmesi ile oluşan hibrit filtre.....	84
Şekil 5.7. Paralel aktif filtre ve seri pasif filtrelerin birleştirilmesi ile oluşan hibrit filtre.....	85
Şekil 5.8. Gerilim kaynaklı evirici modeli.....	85
Şekil 5.9. Akım kaynaklı evirici modeli.....	86
Şekil 6.1. Paralel aktif filtrenin genel yapısı.....	87
Şekil 6.2. Üç fazlı sistemin iki fazlı sisteme çevrilmesi.....	88
Şekil 6.3. Anlık güç teorisi ile referans akımların hesaplanması.....	94
Şekil 6.4. Kaynak gerilimlerinin üç fazlı a-b-c sisteminden iki fazlı α - β sistemine dönüştürülmesi.....	95
Şekil 6.5. Kaynak akımlarının üç fazlı a-b-c sisteminden iki fazlı α - β sistemine dönüştürülmesi.....	96
Şekil 6.6. Anlık gerçek ve sanal güçlerin hesaplanması.....	96
Şekil 6.7. PAGF tasarımında akımlarının ic_{α} ve ic_{β} hesaplanması.....	97
Şekil 6.8. İki fazlı ic_{α} ve ic_{β} akımların üç fazlı referans ic_{α} , ic_{β} ve ic_c akımlarına dönüştürülmesi.....	97
Şekil 6.9. Evirici için tetikleme sinyallerinin üretilmesi.....	98
Şekil 6.10. PAGF için kullanılan eviricinin genel yapısı.....	98
Şekil 6.11. PAGF Simulink blok diyagramı.....	99
Şekil 6.12. Tasarlanan sistemin Simulink blok diyagramı.....	99
Şekil 6.13. PAGF için geleneksel PI kontrolör.....	101
Şekil 6.14. Kaynak akımı.....	102
Şekil 6.15. Kaynak gerilimi.....	102
Şekil 6.16. Aktif güç.....	103
Şekil 6.17. Reaktif güç.....	103
Şekil 6.18. Yük akımı.....	103
Şekil 6.19. Yük gerilimi.....	104
Şekil 6.20. Kaynak akımının harmonik analizi.....	104
Şekil 6.21. Kaynak akımı.....	105

Şekil 6.22. Kaynak gerilimi.....	105
Şekil 6.23. Aktif güç.....	106
Şekil 6.24. Reaktif güç.....	106
Şekil 6.25. Filtre akımı.....	106
Şekil 6.26. Yük akımı.....	107
Şekil 6.27. Yük gerilimi.....	107
Şekil 6.28. Tetikleme sinyalleri (Sinyal 1, Sinyal 2).....	107
Şekil 6.29. Tetikleme sinyalleri (Sinyal 3, Sinyal 4).....	108
Şekil 6.30. Tetikleme sinyalleri (Sinyal 5, Sinyal 6).....	108
Şekil 6.31. Kaynak akımının harmonik analizi.....	108
Şekil 6.32. PAGF için bulanık mantık temelli kontrolör.....	109
Şekil 6.33. Hata sinyali (e) üyelik fonksiyonları.....	110
Şekil 6.34. Hata sinyalinin değişimi (Δe) üyelik fonksiyonları.....	110
Şekil 6.35. Çıkışın üyelik fonksiyonları.....	111
Şekil 6.36. Kuralların görünümü.....	112
Şekil 6.37. Kontrol yüzeyi.....	113
Şekil 6.38. Kaynak akımı.....	113
Şekil 6.39. Kaynak gerilimi.....	114
Şekil 6.40. Aktif güç.....	114
Şekil 6.41. Reaktif güç.....	114
Şekil 6.42. Filtre akımı.....	115
Şekil 6.43. Yük akımı.....	115
Şekil 6.44. Yük gerilimi.....	115
Şekil 6.45. Tetikleme sinyalleri (Sinyal 1, Sinyal 2).....	116
Şekil 6.46. Tetikleme sinyalleri (Sinyal 3, Sinyal 4).....	116
Şekil 6.47. Tetikleme sinyalleri (Sinyal 5, Sinyal 6).....	116
Şekil 6.48. Kaynak akımının harmonik analizi.....	117
Şekil 7.1. STATCOM'un genel gösterimi.....	120
Şekil 7.2. STATCOM tek hat modeli ve reaktif güç akışının vektörel gösterimi..	121
Şekil 7.3. STATCOM' un akım gerilim karakteristiği.....	122
Şekil 7.4. STATCOM' un iç denetim yapısı.....	124
Şekil 7.5. DGM kontrollü STATCOM blok diyagramı.....	125
Şekil 7.6. a)Eviricinin bir fazına ait devre şeması b) DGM dalgalarının üretilmesi	125

Şekil 7.7. STATCOM devre modeli.....	126
Şekil 8.1. MATLAB/ Simulink ortamında tasarlanan devre.....	134
Şekil 8.2. Kaynağın (B1) etkin gerilimi (pu).....	136
Şekil 8.3. Yükün (B3) etkin gerilimi (pu).....	136
Şekil 8.4. Yük (B3) gerilimi (pu).....	137
Şekil 8.5. STATCOM bağlı devre.....	137
Şekil 8.6. STATCOM için geleneksel kontrol teorisi temelli kontrolör kullanımı.	138
Şekil 8.7. Yükün (B3) etkin gerilimi (pu).....	139
Şekil 8.8. Yük (B3) gerilimi (pu).....	139
Şekil 8.9. Yükün (B3) etkin gerilimi (pu).....	140
Şekil 8.10. Yük (B3) gerilimi (pu).....	140
Şekil 8.11. STATCOM için bulanık mantık temelli kontrolör.....	141
Şekil 8.12. Giriş üyelik fonksiyonları.....	142
Şekil 8.13. Çıkış üyelik fonksiyonları.....	142
Şekil 8.14. Kuralların görünümü.....	143
Şekil 8.15. Yükün (B3) etkin gerilimi (pu).....	144
Şekil 8.16. Yük (B3) gerilimi (pu).....	144
Şekil 8.17. STATCOM' suz test devresi.....	146
Şekil 8.18. Yükün (B3) etkin gerilimi.....	146
Şekil 8.19. STATCOM' lu test devresi.....	146
Şekil 8.20. Yükün (B3) etkin gerilimi (pu).....	147
Şekil 8.21. Yükün (B3) etkin gerilimi (pu).....	148
Şekil 8.22. Yükün (B3) etkin gerilimi.....	148
Şekil 9.1. STATCOM 'suz devrede yükün etkin gerilimi (pu).....	156

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Güç kalitesi problemi sonucu meydana gelen finansal kayıplar.....	5
Tablo 1.2. Güç kalitesi problemlerinde belirlenen standartlar.....	6
Tablo 1.3. Güç kalitesi probleminin değerlendirilmesi.....	7
Tablo 1.4. Güç kalitesi bozulmalarının karaktersitikleri.....	29
Tablo 2.1. IEEE 519-1992 akım harmonik sınırları.....	43
Tablo 2.2. IEEE 519-1992 gerilim harmonik sınırları.....	43
Tablo 3.1. FACTS cihazlarının karşılaştırılması.....	56
Tablo 4.1. Bazı dilsel değişkenler ve bunların tipik değerleri.....	65
Tablo 6.1. Tasarlanan sistemin sahip olduğu parametre ve değerleri.....	100
Tablo 6.2. P-I-D parametrelerinin artırımıyla değişimi.....	101
Tablo 6.3. Kural tablosu.....	112
Tablo 6.4. Sonuçların karşılaştırılması.....	118
Tablo 8.1. Sistemin ve STATCOM'un parametreleri.....	135
Tablo 8.2. Geleneksel kontrol teorisi temelli kontrolörlerin karşılaştırılması.....	141
Tablo 8.3. Geleneksel ve bulanık mantık temelli kontrolörlerin karşılaştırılması..	145
Tablo 8.4. Geleneksel ve bulanık mantık temelli kontrolörlerin karşılaştırılması..	149
Tablo 9.1. Elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	155
Tablo 9.2. Geleneksel ve bulanık mantık temelli kontrolörlerin karşılaştırılması..	156
Tablo 9.3. Sonuçların karşılaştırılması.....	157

ÖZET

Anahtar kelimeler: Güç kalitesi, güç kalitesi problemleri, FACTS cihazları, filtreler, kompanzasyon, geleneksel kontrol sistemleri, bulanık mantık, STATCOM

Güç kalitesinin önemi son yıllarda artmaktadır. Bu önemin ortaya çıkmasında birçok faktör rol oynamaktadır. Özellikle enerji ihtiyacının artması ve yüklerin çeşitlenmesinden dolayı kaliteli enerji önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada, güç kalitesi problemleri ayrıntılı olarak tanımlanmış ve önemi anlatılmıştır. Güç kalitesi problemlerinin giderilmesinde son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS) ayrıntılı olarak incelenmiştir. FACTS cihazları sistemin kararlılığını artmasında ve güç kalitesi problemlerini giderilmesinde oldukça etkilidir.

Bulanık mantık kontrol teorisi ayrıntılı olarak incelenmiş ve güç sistemlerine uygulanmasının tasarım adımları verilmiştir.

Statik senkron kompanzatör (STATCOM) sisteme paralel bağlanan ve ikinci nesil bir FACTS cihazıdır. Gerilim sarkması ve kısa süreli gerilim yükselmesi problemlerinde yaygın olarak kullanılır. Ayrıca harmoniklerin giderilmesinde kullanılan aktif ve pasif filtreler ayrıntılı olarak incelenmiştir. STATCOM ve aktif filtre hem geleneksel kontrol teorisi temelli kontrolörler ile hem de bulanık mantık kontrol teorisi temelli kontrolör ile tasarlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

COMPARISON OF CONVENTIONAL CONTROL THEORY AND FUZZY LOGIC CONTROL THEORY IN POWER QUALITY PROBLEMS

SUMMARY

Keywords: Power quality, power quality problems, FACTS devices, filters, compensation, conventional control systems, fuzzy logic, STATCOM

The importance of power quality has been increasing in recent years. There are a variety of factors that play a role in power quality. Power quality gained importance due especially to increasing energy demands and load variation.

In this thesis power quality problems are defined in detail and the importance of power quality is explained. Flexible alternative current transmission systems (FACTS) that has become very widely used in recent years is analyzed in depth. FACT devices are very effective in increase the stability of system and eliminating power quality problems.

Fuzzy logic control theory is examined in detail and presented implementation steps of design process in power systems.

Static synchronous compensator (STATCOM) that is connected in parallel is a second generation FACTS device. These devices is used extensively in voltage sag and voltage swells. Besides, passive and active filters that are used in harmonic reduction, are examined in detail. STATCOM and active filters are designed according to both conventional control theory and fuzzy logic control theory and result of them are compared.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Güç Kalitesinin Tanımı

Güç kalitesi tanımı referans alınan noktaya göre tamamen değişmektedir. Örneğin; elektrik kuruluşları güç kalitesini, sistemin istatistiksel olarak %99,98 güvenliğe sahip olması olarak tanımlayabilir. Bu tanımı; üreticiler güç kalitesini araç ve gereçlerin performansına uygun çalışmasını sağlayan güç kaynağı karakteristikleri olarak tanımlayabilir. Bu karakteristikler çok farklı ölçütler ile tanımlanabilir. Güç kalitesi müşterinin referansını öncelikli olarak kabul eder. Gerilim, akım ve frekans sapmalarının hatayla veya kullanıcının cihazının çalışmaması ile sonuçlanması bir güç kalitesi sorunu olarak görülür [1].

Güç kalitesi, güç sisteminin incelenen herhangi bir noktasında ideal sinüzoidal şeklindeki gerilimin nominal genlik ve frekans değerlerini sürdürmesi olarak tanımlanabilir [2].

Vazgeçilmez bir enerji kaynağı olan elektrik enerjisini üreten, ileten ve dağıtan kuruluşların görevi; kesintisiz, ekonomik ve kaliteli bir hizmeti tüketicilerine sunmaktır. Elektrik enerji sistemlerinde kalite, sabit şebeke frekansında; sabit ve sinüzoidal biçimli uç geriliminin sağlanması anlaşılmaktadır. Ancak bu tür elektrik enerjisi pratikte bir takım zorluklarla sağlanabilir. Güç sistemine bağlanan bazı elemanlar ve bunların yol açtığı olaylar sebebiyle tam sinüzoidal değişiminden sapmalar olabilmektedir [3].

Dünyada kurulu güç sürekli artmaktadır. Enerji sistemine her gün yeni bir elektrik enerjisi tüketen cihaz ve makineler eklenmektedir. Enerji altında bulunan bu yüklerin karakteristikleri enerji iletim ve dağıtım hatlarında ilave yüklenmelere sebep olmaktadır. Bu yüklenmeler elektrik enerji sistemlerinde bulunan devre elemanları

ve elektrik makinalarına ciddi zararlar vermektedir. Aşırı yüklenmeler elektrik cihazlarının ömürlerinin kılmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra kullanıcının alacağı enerjinin istenildiği formda olmamasına, kalitesi düşük bir enerji kullanılmasına sebebiyet vermektedir [4].

Elektrik güç sistemlerinde generatörler, trafolar, iletim kabloları, yükler, koruma ve kontrol donanımları temel elemanlardır. Bu elemanlar kullanıcının taleplerini en iyi şekilde karşılamak için kullanılır [5].

Kaliteli elektrik enerjisi, şebekenin tanımlanan bir noktasında, gerilimin genlik ve frekansının anlık değerlerini koruması ve gerilim dalga şeklinin sinüs biçiminde bulunmasıdır [21]. Bu tanımın tersi olarak, gerilim genliğinin değişmesi, kesintiler, gerilim darbeleri, kırışma, geriliminin doğru bileşen içermesi, dalga şeklinin sinüsten uzaklaşması, frekans değişimleri, gerilim dengesizlikleri güç kalitesizliğidir [6].

Elektrik enerjisi kaynağının kalitesi aşağıdaki terimlerle ölçülebilir.

1. Sabit gerilim büyüklüğü
2. Sabit frekans
3. Sabit güç faktörü
4. Dengeli fazlar
5. Sinüzoidal dalga şekli
6. Kesintisizlik [5].

Bu terimlerden yola çıkılarak kaliteli elektrik enerjisi aşağıdaki ifadelerle tanımlanabilir:

1. Şebekenin tanımlanan bir noktasında, gerilimin genlik ve frekansının anlık değerlerini koruması ve gerilimin dalga şeklinin sinüs biçimde bulunmasıdır.
2. Bu tanımın tersi olarak, gerilimin genliğinin değişmesi, kesintiler, gerilim darbeleri, titreşim, dalga şeklinin sinüsten uzaklaşması, frekans değişimleri, üç faz dengesizlikleri enerji kalitesizliğidir [7].

Gerilim kalitesi ideal gerilimin bozulmayla ilgilenmektedir. İdeal gerilim sinüs dalgasının sabit frekansta ve sabit büyüklükte olmasıdır. Akım kalitesi ise ideal akımın bozulmasıyla ilgilenmektedir. İdeal akım sinüs dalgasının sabit frekansta ve sabit büyüklükte olmasıdır. Gerilim kalitesi ile akım kalitesi arasında yakın bir ilişki vardır. Eğer gerilim veya akımdan herhangi birinin bozulması durumunda diğerinin bozulmaması zordur [8].

Gerçekleştirilen tez çalışmasında bölüm 1’de güç kalitesinin önemi vurgulanmış ve güç kalitesi kapsamlı olarak incelenmiştir. Bu amaçla birçok güç kalitesi problemi ayrıntılı olarak yer verilmiştir. Ayrıca güç kalitesi problemlerinin neden olduğu sorunlar incelenmiştir.

Bölüm 2’de en önemli güç kalitesi problemlerinden olan harmonikler ayrıntılı olarak incelenmiştir. Harmoniklerin sebepleri ve kaynaklarına yer verilmiştir.

Bölüm 3’te reaktif güç kompanzasyonu ayrıntılı olarak incelenmiştir. Reaktif güç kompanzasyonunda kullanılan eski yöntemler ile yeni yöntemler açıklanmıştır. Özellikle yeni kullanılan esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS) tanıtılmış ve çalışma prensipleri verilmiştir. FACTS cihazlarının avantaj ve dezavantajları incelenmiştir.

Bölüm 4’te bulanık mantık kontrol teorisi tanıtılmıştır. Bulanık mantığın avantaj ve dezavantajı verilmiştir. Bulanık mantık temelli kontrolörün tasarımı için gerekli adımlar incelenmiştir.

Bölüm 5’te güç kalitesi problemlerinin giderilmesi için yaygın olarak kullanılan filtreler incelenmiştir. Pasif ve aktif filtre olarak ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Bölüm 6’da paralel aktif güç filtresi tasarımı yapılmıştır. Paralel aktif güç filtresi geleneksel kontrol teorisi ve bulanık mantık kontrol teorisi ile tasarımı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bölüm 7’de statik senkron kompanzator (STATCOM) tanıtılmış ve özellikleri incelenmiştir.

Bölüm 8’de tasarlanan bir sistem ile STATCOM’un etkinliği incelenmiştir. Geleneksel kontrol teorisi ve bulanık mantık kontrol teorisi temelli STATCOM’un simülasyon çalışmaları yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bölüm 9’da sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

1.2. Güç Kalitesinin Önemi

Güç kalitesinin önemi her geçen gün artmaktadır. Güç kalitesi problemi alternatif gerilim kaynağındaki sinüzoidal dalga bozulduğu zaman meydana gelir. Geçmişte çoğunlukla cihazlar böyle hatalardan çok fazla etkilenmezdi. Ancak bugün yüklerin çeşitlenmesi ve hassaslaşmasıyla cihazlar bu problemlerden yüksek oranda etkilenmeye başladılar [9].

Güç kalitesinin öneminin artmasında birçok sebep vardır. Ancak bunların en önemlileri olarak dört temel neden gösterilebilir [6, 10].

1. Yükler eskiye oranla güç kalitesine daha duyarlıdır. Birçok yeni yük birimi mikroişlemci kontrollü güç elektroniği elemanları içermektedir. Dolayısıyla bu elemanlar beslenme enerjisinde olabilecek güç kalitesi parametrelerinin bozulmasından etkilenebilir. Aynı zamanda bu tür güç elektroniği eviricilerinin bazıları da güç kalitesini bozabilmektedir.
2. Güç sistemlerinin daha verimli kullanılmasına verilen önem hız ayarlamalı motorlar gibi uygulamaların artmasını hızlandırmıştır. Bu da güç sistemlerindeki bir bozulma türü olan harmonik seviyesinin artmasına neden olmuştur.
3. Kullanıcıların güç kalitesi hakkında bilgi düzeylerinin artması üreticilerden daha kaliteli güç istemelerine neden olmuştur.
4. Elektrik şebekesine bağlı olan kullanıcıların sayısı ve çeşidi zamanla artmaktadır. Bundan dolayı bir bileşendeki bozulma diğer bileşenlere olan

etkilerinden dolayı önemlidir. Bu sebeplerin arkasında yatan temel neden olarak kullanıcıların daha hızlı ve daha verimli üretim yapmayı istemeleri ve üreticilerinde buna destek vermelerinin kendi yararına olduğunu bilmeleri gösterilebilir.

Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde, elektrik enerjisi kalite probleminin endüstride ve ticari alanlarda yarattığı maliyetin yılda 10 milyar Euro olduğu tahmin edilmektedir ve problemin ortadan kaldırılması için yapılan çalışmalar bu rakamın %5'i civarındadır. Dolayısıyla, “problem riskini en aza indirmek ve kontrol altında tutmak için yapılması gereken ne olmalıdır?” sorusunun cevabı yapılan işin özelliklerine göre değişecektir. İlk adım; problemlerin özelliklerini anlamak, her bir problemin yapılan iş ile ilgisini ve hangi kayıplara yol açabileceğini belirlemektir [6].

Tablo 1.1 2002 yılında Avrupa bakır enstitüsü tarafından yapılan araştırmaya göre, güç kalitesi olaylarından dolayı meydana gelen finansal kayıplar gösterilmiştir [11, 12].

Tablo 1.1. Güç kalitesi problemi sonucu meydana gelen finansal kayıplar

Sektör	Finansal kayıplar
Yarı iletken üretimi	3.800.000 Euro (yıllık)
Finans ticareti	6.000.000 Euro (saatlik)
Bilgi işlem merkezi	750.000 Euro (yıllık)
Telekomünikasyon	30.000 Euro (dakikalık)
Çelik tesisleri	350.000 Euro (yıllık)
Cam sanayi	250.000 Euro (yıllık)
Tatil köyleri	50.000- 250.000 Euro (günlük)

1.3. Güç Kalitesi Standartları

Güç kalitesi standartları çeşitli kurumlar tarafından belirlenmiştir. IEEE, IEC ve ANSI tarafından önerilen çeşitli güç kalitesi problemleri için tanımlanan güç kalitesi standartları Tablo 1.2’de gösterilmiştir [9].

Tablo 1.2. Güç kalitesi problemlerinde belirlenen standartlar

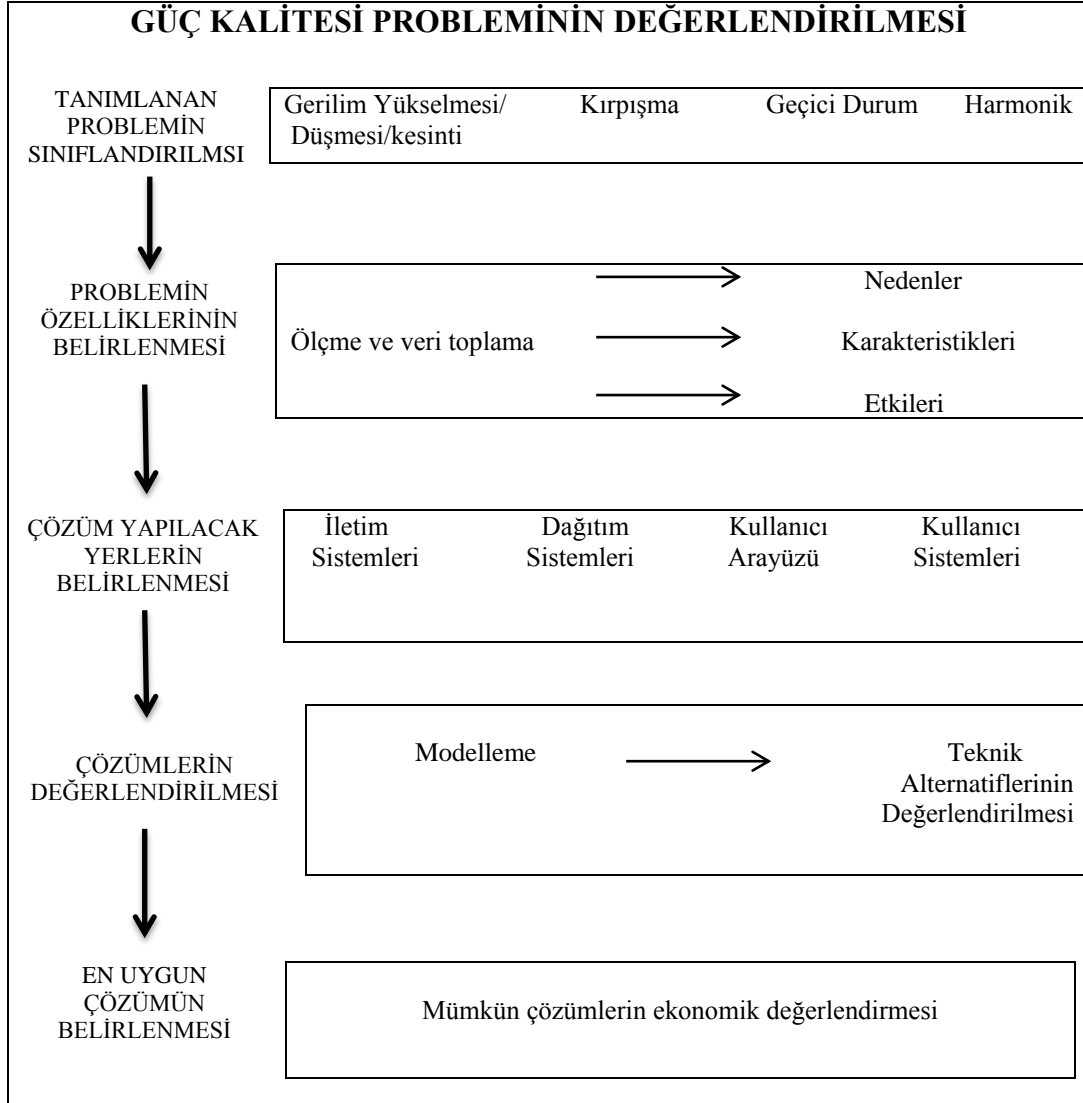
Problem	Standartlar
Güç kalitesinin sınıflandırılması	IEC 6100-4-8, IEEE 1159, IEEE 1409
Harmonikler	IEEE C57, 110, 519, P519a, 929, 1001 IEC 6100-4-7-2002, IEC 61000-3-14-2011, IEEE 519
Gürültü	IEEE 518, 1050
Sistem güvenilirliği	IEEE 493
Topraklama	IEEE 446, 141, 142, 1100; ANSI 70
Gerilim düşmesi/ yükselmesi	IEC 61009-1-2012, IEEE 1159-2009
Kırpışma	IEC 61000-3-3-2008

1.4. Güç Kalitesi Probleminin Değerlendirilmesi

Güç kalitesi problemleri geniş bir alanda farklı olayları kapsamaktadır. Bu olayların her birinde güç kalitesi problemi farklı nedenler ve farklı çözümler içerebilir.

Genel olarak güç kalitesi probleminin sistemde olup olmadığı değerlendirilir. Bu adımın sonucunda yeni bir sistemin tasarlanması veya mevcut sistemin değiştirilmesi önerilir. Tablo 1.3 güç kalitesi probleminin değerlendirilmesinde temel adımlar gösterilmiştir. Güç kalitesinin probleminin değerlendirilmesinde ölçümler önemli bir rol oynamaktadır [10].

Tablo 1.3. Güç kalitesi probleminin değerlendirilmesi



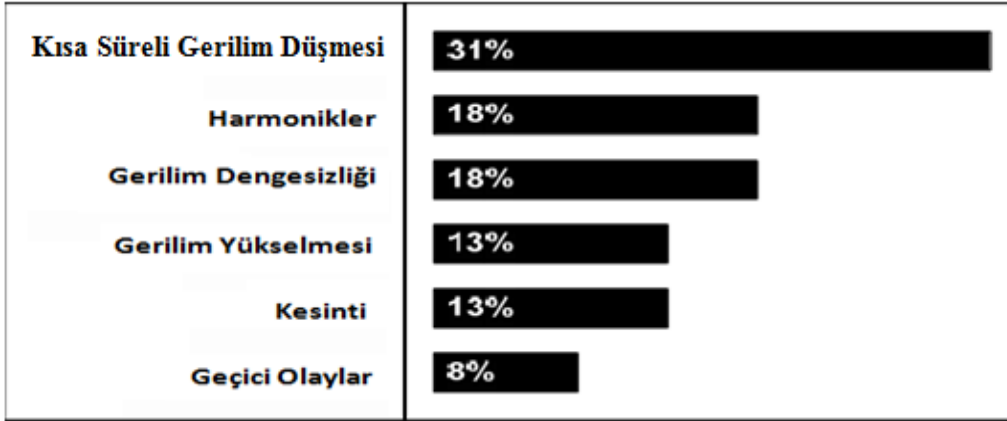
1.5. Güç Kalitesi Problemi

Endüstriyel ve ticari faaliyetlerin gerçekleştirilebilmesi için gerekli önemli girdilerin başında elektrik enerjisi gelmektedir. Elektrik enerjisi insanoğlu tarafında sürekli olarak kullanılan, istenildiği gibi depolanmayan, kullanım öncesinde kalitesi güvence altına alınamayan bir uygarlık aracıdır. Elektrik kaynağının güvenliğinin bilinmesi ve enerji kalitesinde meydana gelebilecek değişikliklerin uygulanmakta olan süreç ve süreçler üzerindeki etkilerinin tam olarak anlaşılması son derece önemlidir. Bu bakımdan; elektrik enerjisinin kullanım noktasında güvence altına alınması ve standart dışı elektriğin besleme sisteminden uzaklaştırılması veya tüketiciye kaliteli bir elektriğin sağlanması gerekir [6, 13].

Güç sisteminde aşağıdaki olaylar meydana gelerek bazı kalite sorunlarının çıkmasına neden olabilirler [14, 15].

1. Yıldırım düşmesi geçici durumlara sebep olabilir. Gerilim düşmesi veya olası kesintilere neden olabilecek bir arızaya yol açarlar.
2. Hat ve kondansatör anahtarlama geçici durumlara neden olabilir.
3. İletim hatları ve transformatörlerin simetrik olmayan yapısı gerilim dengesizliğine yol açabilir.
4. Müşteri üretim sahası veya yakın bir tesisten kaynaklanan problemler.
5. Büyük yüklerin, özellikle motorların aniden devreye alınması, gerilim düşmesine neden olabilir.
6. Tek fazlı yüklerin üç faza eşit olmayan dağıtımı gerilim dengesizliğine neden olabilir.
7. Periyodik yükler kırpışma olayına sebep olabilir.
8. Zayıf bir bağlantı veya yetersiz topraklama yüksek nötr-toprak gerilimine neden olabilir.
9. Bilgisayarlar gibi güç elektroniği yükleri, ofis araçları, yüksek verimli ışıklandırma cihazları, ayarlanabilir hız sürücüleri harmonik bozulmaya ve tek fazlı yük durumunda yüksek nötr akımlarına yol açabilir.
10. Kontaktörlerin veya rölelerin anahtarlama geçici durumlara sebep olabilir.
11. Kesintisiz güç kaynaklarının yanlış veya uygun olmayan çalışmaları, geçici durumlara, gerilim düşmesine veya kesintilere yol açabilmektedir.

Güç kalitesi problemlerinde çeşitli sınıflandırmalar yapılabilir. Şekil 1.1’de yapılan bir araştırma sonucu en yaygın olan güç kalitesi problemleri gösterilmiştir. Araştırma sonucunda görüldüğü gibi güç kalitesi problemlerinde birçok sınıflandırma yapılabilir [16].



Şekil 1.1. En çok karşılaşılan güç kalitesi problemleri

IEEE 1159:1995 standardına göre güç kalitesi problemini yedi başlık altında toplanabilir [17].

1. Geçici Olaylar
2. Uzun Süreli Değişimler
3. Kısa süreli Değişimler
4. Gerilim Dengesizliği
5. Dalga Formu Bozukluğu
6. Gerilim Dalgalanmaları
7. Güç Frekansı Değişimleri

1.5.1. Geçici olaylar

Geçici olaylar terimi, istenmeyen ancak kısa süreli gerçekleşen olaylar için kullanılır. İstenmeyen ve doğası gereği olan durumları ifade eder [1].

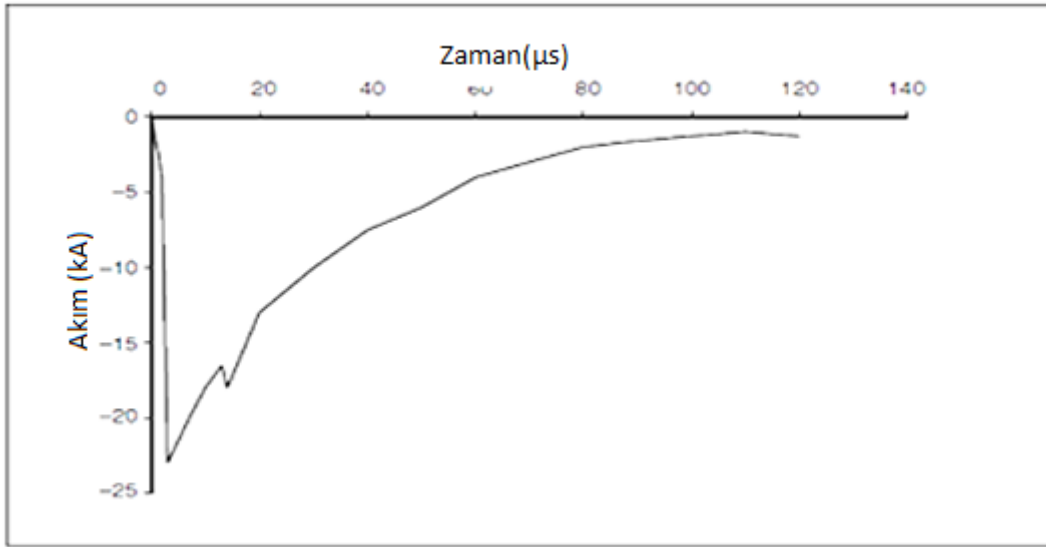
Geçici durumlar için yaygın kullanılan diğer bir tanım ise, bir sistemin sürekli durum şartından diğerine geçişi sırasında meydana gelen değişikliklerdir. Güç sisteminde, yük anahtarlamaları, ani yük değişimleri, yük ve şebeke arası açmalar, yıldırımlar, kontaklar arası arklar ve yalıtımda oluşan bozulmalar geçici olayların gelmesine sebep olurlar [14].

Darbeleri ve salınımlı geçici hal olmak üzere ikiye ayrılır. Bu terimler akım ve gerilim geçici olayının dalga şeklini yansıtır [10].

1.5.1.1. Darbeleri geçici durum

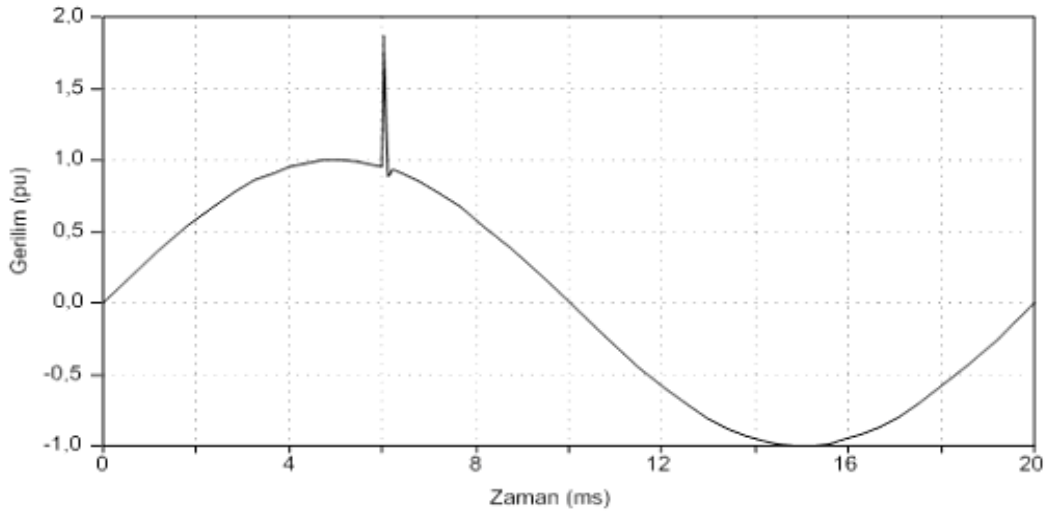
Darbeleri geçiş olayı; aniden oluşan, gerilim, akım veya her ikisinde sürekli halde meydana gelen tek yönlü (pozitif ya da negatif) ani değişimlerdir [1].

Darbeleri geçiş durumları genellikle yükselme veya alçalma zamanları ile karakterize edilir [1]. Örneğin $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ 2000 Volt denildiğinde; nominal olarak sıfır geriliminden 2000 V'a $1,2 \mu\text{s}$ içinde yükselen ve tepe değerinin yarısına $50 \mu\text{s}$ içinde ulaşan anlık darbe anlaşılır [1, 17]. Darbeleri geçici durumların en önemli nedeni yıldırım olaylarıdır. Şekil 1.2'de yıldırım düşmesi sonucu oluşmuş darbeleri geçiş olayı gösterilmiştir [18].



Şekil 1.2. Yıldırım düşmesi sonucu oluşmuş darbeleri geçiş olayı

Darbeleri geçici durumların şekli, oluşan yüksek frekanstan dolayı hızlı bir şekilde değişebilir ve güç sistemlerinin farklı bölümlerinden izlendiğinde çok ayrı özellikler gösterebilir. Genellikle güç sistemlerinde çok uzak mesafelere iletilmezler. Darbeleri geçici durumlar güç sisteminin normal frekansını aşmaları halinde akımlara ve salınımlı geçici olaylara sebep olurlar [1, 14]. Şekil 1.3'te gerilim dalga şeklinde oluşan durum gösterilmiştir [14].



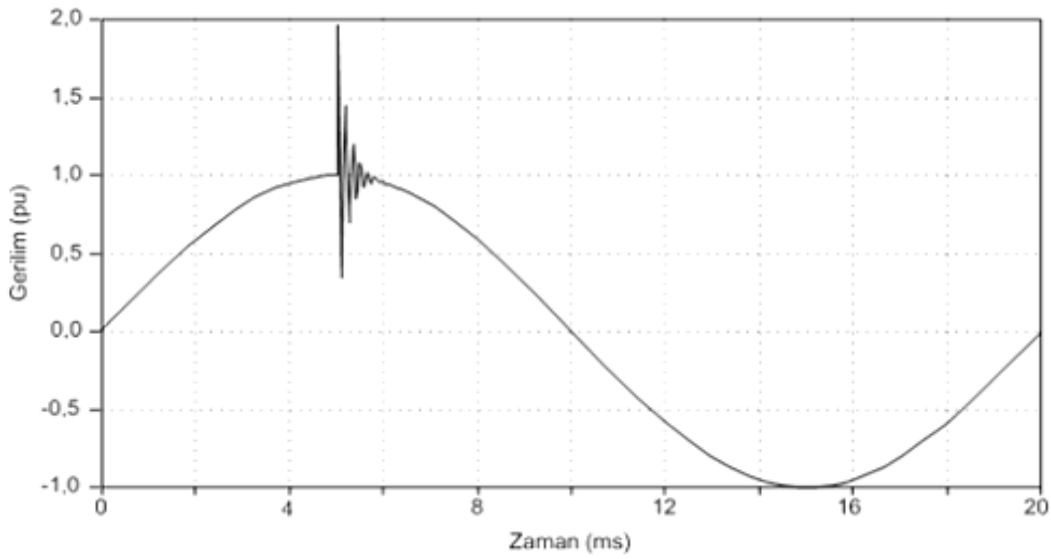
Şekil 1.3. Pozitif yönlü darbeleri geçici durum

1.5.1.2. Salımlı geçici durum

Sürekli hal çalışma frekansı dışında; gerilim, akım veya her ikisinin birden pozitif veya negatif olarak salınım yaptığı haldir. Salımlı geçici durumlar, anlık değerleri hızlı bir şekilde yön değiştiren akım ve gerilimden oluşur. Salımlı geçici durum frekans spektrumu, süresi ve büyüklükleriyle tanımlanır. Düşük, orta ve yüksek frekans olmak üzere üç çeşittir [1].

Temel frekansı 500 kHz'den büyük frekans bileşenine ve mikro saniye cinsinden devamlılık süresine sahip salımlı geçici durumlar yüksek frekanslı salımlı geçici durum olarak adlandırılır. Yüksek frekanslı salımlı geçici durum; sistemin anlık darbeye verdiği tepki sonucu oluşur [1].

Temel frekans değeri 5 ile 500 kHz arasında frekans bileşenine ve $10 \times \mu\text{s}$ 'ler cinsinden ifade edilen bir devamlılık süresine sahip salımlı geçici durumlar orta frekanslı salımlı geçici durumlar olarak adlandırılır. Orta frekanslı salımlı geçici durum; kapasitör anahtarlamaıyla ortaya çıkarlar [1, 14]. Şekil 1.4'te orta frekanslı salımlı geçici durum görülmektedir [14].



Şekil 1.4. Orta frekanslı salınımlı geçici durum

Temel frekans değeri 5 kHz'den küçük frekans bileşenine ve 0.3 ms ile 50 ms arasında bir devamlılık süresine sahip geçici olaylar düşük frekanslı salınımlı olaylar olarak adlandırılır. Düşük frekanslı salınımlı geçici durum ise birçok sebepten ortaya çıkabilirler. En yaygın görüleni, kondansatör gruplarının seri bir şekilde enerjilendirilmesi sonucu ortaya çıkar [17]. 300 Hz altı temel salınımlı geçici haller ise ferro rezonans ve transformatörlerin devreye alınmasıyla ortaya çıkar [1, 10, 17].

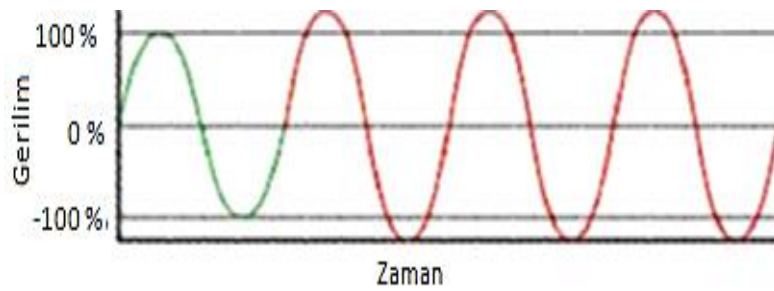
1.5.2. Uzun süreli değişimler

Uzun süreli değişimler temel frekansta bir dakikadan uzun süren etkin gerilimdeki değişimlerdir. ANSI C84.1 standartlarına göre bir gerilim değişiminin uzun süreli değişim sayılabilmesi için ANSI limitlerinin bir dakikadan uzun bir süre aşılması gerekir [1, 17].

Uzun süreli değişimler aşırı gerilim ve düşük gerilim olarak iki türde sınıflandırılabilir. Uzun süreli değişimler sistem hatasından oluşmaz, oluşma sebebi sistemdeki yük değişimleri ve anahtarlama olaylarıdır [1].

1.5.2.1. Aşırı gerilim

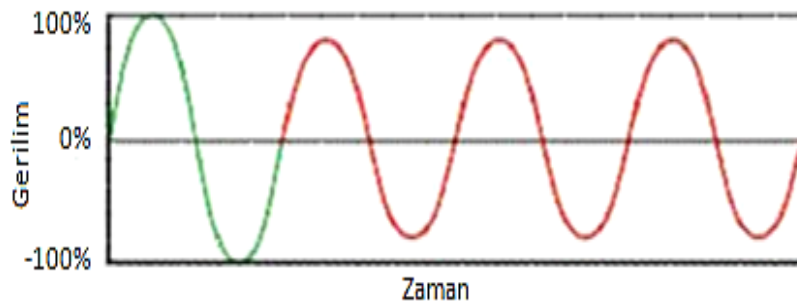
Aşırı gerilim; güç frekansında, gerilim etkin değerinin %110'un üzerine bir dakikadan uzun süre yükseldiği durumdur [1]. Aşırı gerilimler genellikle yüklerin anahtarlama sonucu ortaya çıkar. Aşırı gerilim durumunun sebebi; sistemin zayıf olması, gerilim ayarlamasının doğru yapılmaması ve transformatörlerinin kademesinin yanlış yapılması sonucu oluşur [1]. Şekil 1.5'te aşırı gerilim gösterilmiştir [17].



Şekil 1.5. Aşırı gerilim

1.5.2.2. Düşük gerilim

Düşük gerilim; güç frekansında gerilimin etkin değerinin % 90'ın altına bir dakikadan daha uzun süre düştüğü durumdur [1]. Bu durumun sebebi aşırı gerilime sebep olan durumun tersidir. Kapasitörlerin devreden çıkarılması ya da yüklerin devreye alınması düşük gerilimin sebebidir. Aşırı yüklenmiş sistemler de düşük gerilime neden olabilir. Şekil 1.6'da düşük gerilim gösterilmiştir [17].



Şekil 1.6. Düşük gerilim

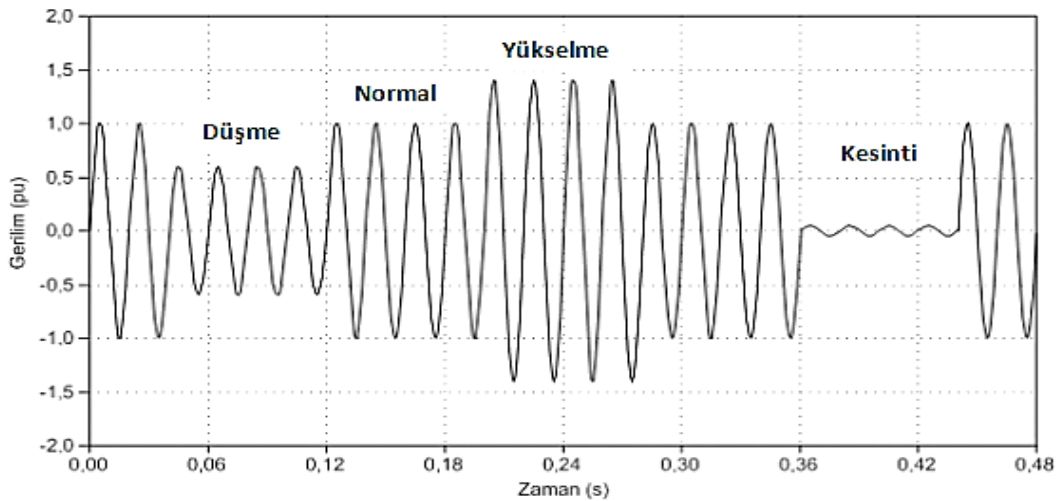
1.5.2.3. Kalıcı gerilim kesintileri

Kaynak gerilimi bir dakikadan daha uzun bir süre sıfır olarak kalması durumunda kalıcı gerilim kesinti oluşur. Kalıcı gerilim kesintileri bir dakikadan daha uzun sürdüğü için, sistemi onarıp eski durumuna getirebilmek için insan müdahalesi gerekir [10].

1.5.3. Kısa süreli gerilim değişimleri

Kısa süreli değişimleri IEC gerilim düşmesi ve kısa kesintiler olarak sınıflandırmaktadır. Gerilim düşmesi ve kısa kesintiler olarak sınıflandırılan her iki tür kısa süreli değişiminde süresine göre; ani, kısa süreli ve geçici olmak üzere üç sınıfa ayrılır [10].

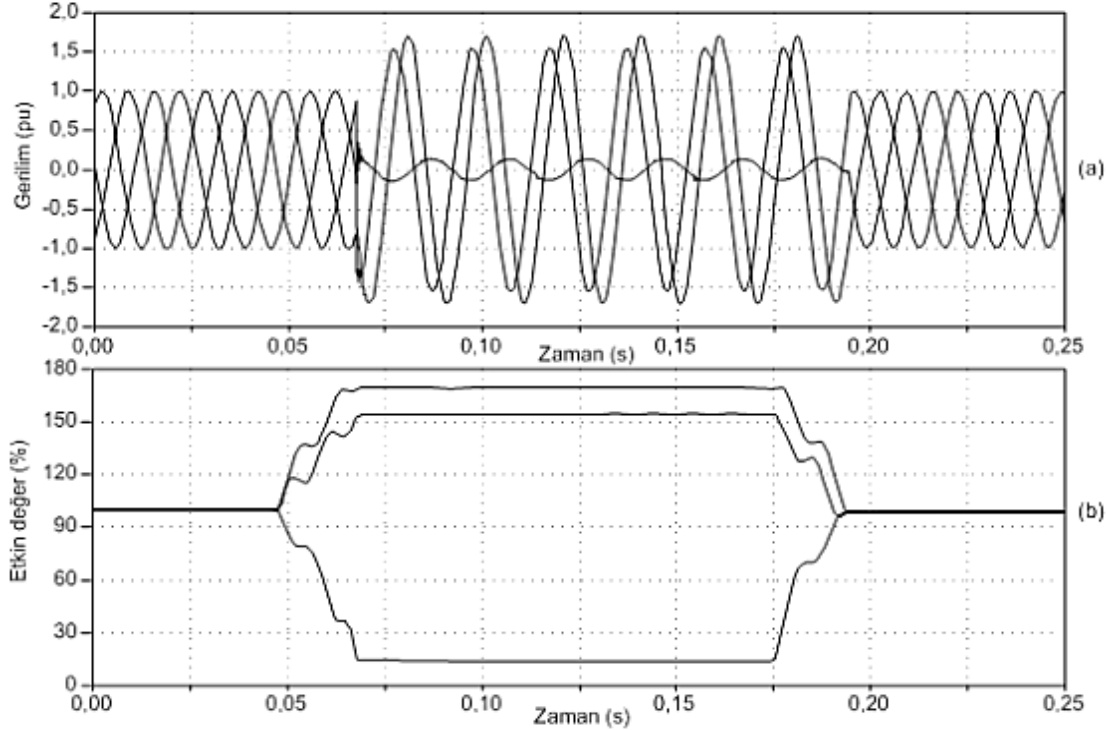
Kısa süreli gerilim değişimleri, yüksek değerde yol alma akımı çeken büyük yüklerin devreye alınması veya güç iletkenlerinde oluşan temassızlıklar nedeniyle oluşur. Arıza yeri ve sistem şartlarına bağlı olarak arıza, geçici gerilim düşmesine, geçici gerilim düşmesine ya da gerilimin tamamen kesilmesine neden olabilir [1]. Şekil 1.7' de kısa süreli gerilim değişimleri gösterilmiştir [14].



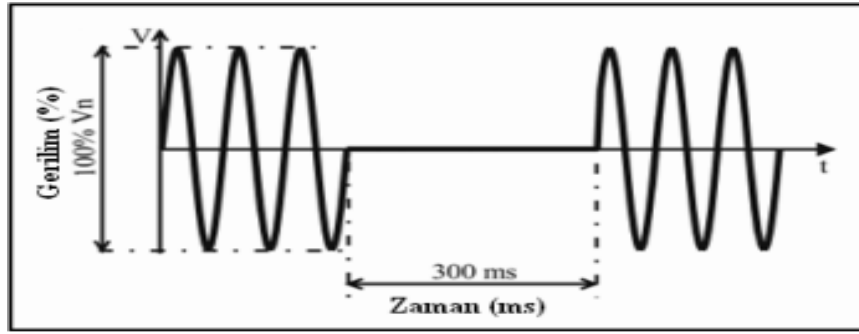
Şekil 1.7. Kısa süreli gerilim değişimleri

1.5.3.1. Kesinti

Kaynak geriliminin ya da yük akımının bir dakikadan daha kısa süre için 0.1 pu'nun altına düşmesi olayıdır. Kesintiler; güç sistemlerindeki arızalardan, devre elemanlarının arızalarından ve kontrol sistemleri arızalarından kaynaklanabilir. Bu kesintiler her zaman süreleri ile ifade edilebilirler çünkü; gerilim daima nominal gerilimin %10'unun altındadır. Kısa devre gibi bir hata sonucu ortaya çıkmış olan bir kesintinin süresi, bu hatayı temizleyecek olan koruma elemanının çalışma süresine bağlıdır [10, 17]. Koruma cihazının ani tekrar kapanması, genellikle 30 periyottan az süren ve kalıcı olmayan bir arızanın sebep olduğu kesintiyi sınırlayacaktır. Koruma cihazının gecikmeli tekrar kapaması ise, anlık ve geçici kesintiye sebep olabilir. Cihazların yanlış çalışması veya bağlantılarındaki temassızlıklardan kesintilerin süresi düzensiz olabilir [1, 14, 19]. Şekil 1.8'de tek faz torak kısa devre arızası sonucu oluşan bir gerilim kesintisi olayı göstermektedir [14, 19]. Şekil 1.9'da kısa süreli gerilim kesintisi gösterilmiştir [17].



Şekil 1.8. Kısa süreli gerilim kesintisi a) gerilim dalga şekli b) gerilim etkin değeri

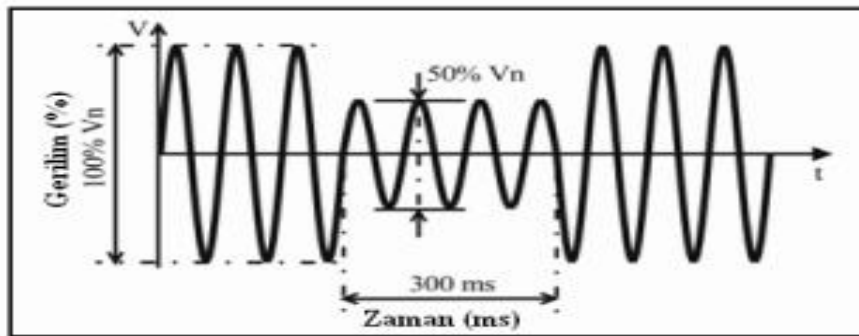


Şekil 1.9. Kısa süreli gerilim kesintisi

1.5.3.2. Gerilim düşmesi

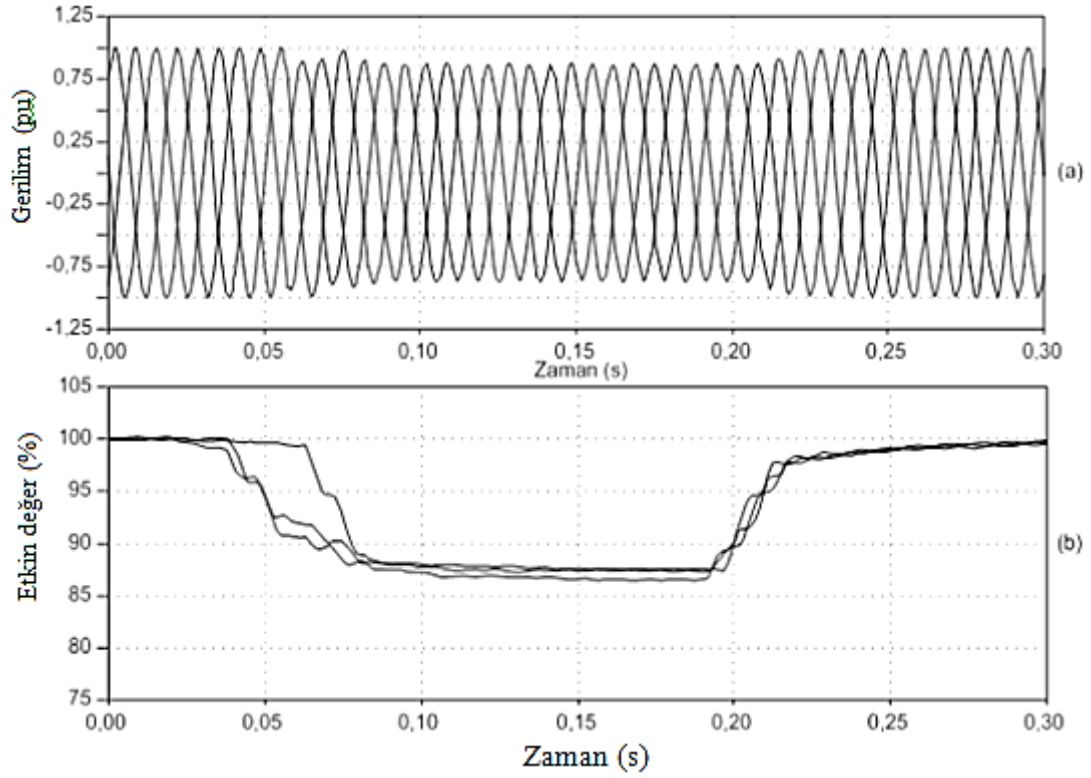
Gerilim düşmesi; güç frekansında gerilimin veya akımın etkin değerinin 0.5 periyot ile 1 dakikalık süre arasında nominal değerinin 0.1 pu ile 0.9 pu arasında azalmasıdır. Güç kalitesi komitesi gerilim düşmesi terimini kısa süreli gerilim azalması olarak tanımlamaktadır [1].

Gerilim düşmesine genel olarak sistem hataları, şebeke yetersizliği, aşırı yüklenme, büyük motorlara yol verme sırasında meydana gelir. Şekil 1.10'da gerilim düşmesi gösterilmiştir [17].

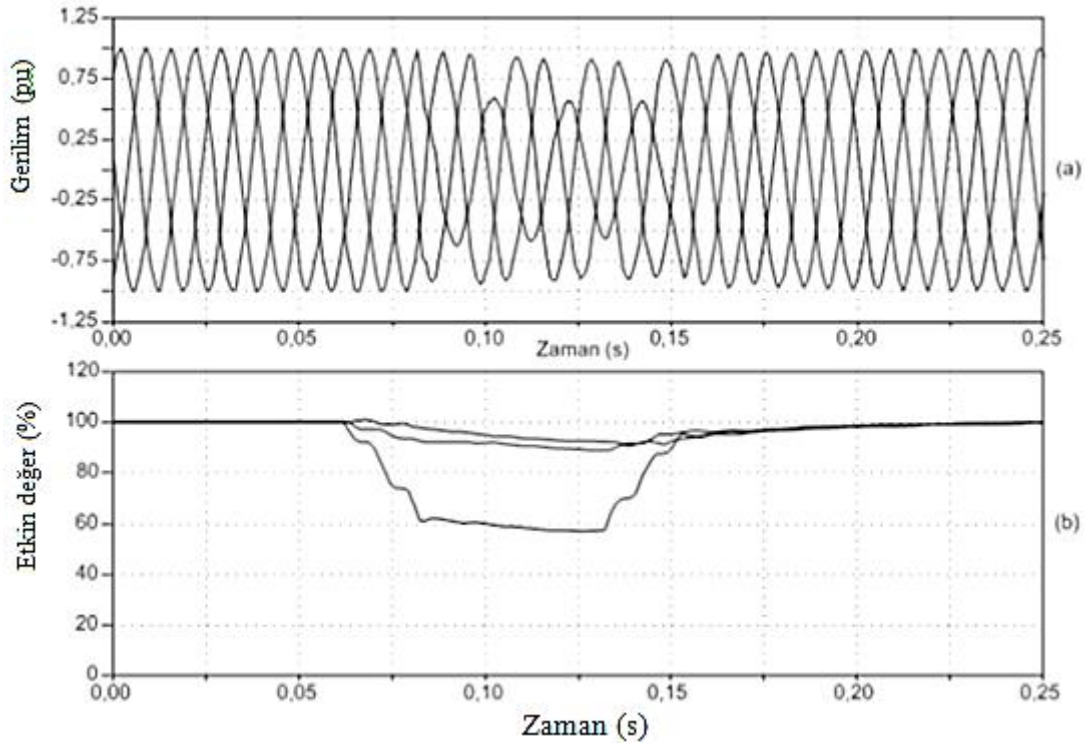


Şekil 1.10. Kısa süreli gerilim düşmesi

Şekil 1.11 ve Şekil 1.12'de simetrik (üç faz-toprak) ve simetrik olmayan (tek faz-toprak) arızalar sonucunda meydana gelen tipik gerilim düşmesi olayı gösterilmiştir [14].

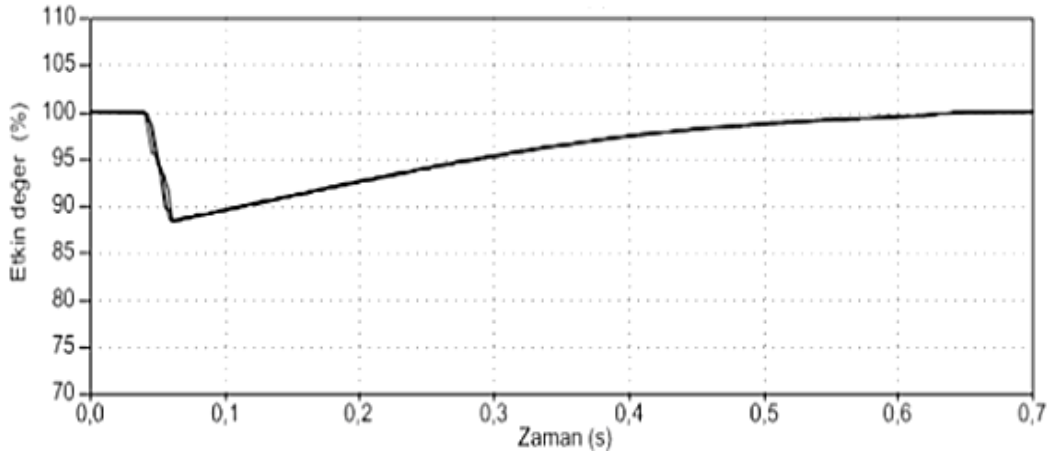


Şekil 1.11. Simetrik bir arızanın sebep olduğu gerilim düşmesi a) gerilimin dalga şekli b) gerilimin etkin değeri



Şekil 1.12. Simetrik olmayan bir arızanın sebep olduğu gerilim düşmesi a) gerilim dalga şekli b) gerilimin etki değeri

Bir asenkron motor yol alma anında, tam yük akımının 6-10 kat fazlasını çekebilmektedir. Eğer asenkron motorun çektiği akımın genliği, sisteme bağlı olduğu noktadaki olası arıza akımına göre yüksek ise, gerilim düşmesi büyük olabilir. Bu durumda, gerilim çok kısa sürede nominal gerilimin %70'ine düşebilir ve yaklaşık 3 s sonra da kademeli olarak nominal gerilimine dönebilir [14, 19]. Şekil 1.13'te, asenkron motorun sebep olduğu bir gerilim düşmesi olayı görülmektedir [14].

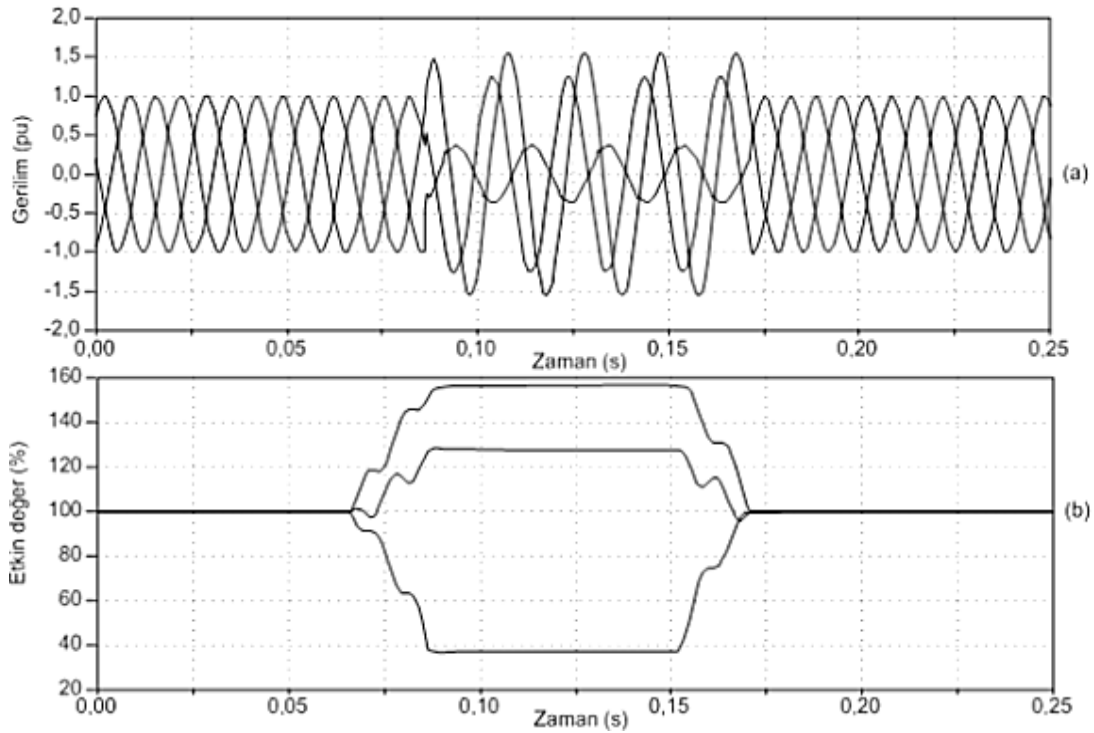


Şekil 1.13. Asenkron motorun sebep olduğu gerilim düşmesi

1.5.3.3. Gerilim yükselmesi

Gerilim yükselmesi; güç frekansında gerilimin veya akımın etkin değerinin 0.5 periyot ile 1 dakikalık süre arasında 1.1 pu ile 1.8 pu arasına yükselmesidir [1].

Gerilim yükselmesi genellikle sistem arızalarında kaynaklanır. Gerilim yükselmeleri gerilim düşmeleri kadar yaygın değildir. Şebekede bulunan büyük güçte ve yüksek akım çeken yüklerin aniden devreden çıkarılması, şebekedeki düzensizliklerden oluşan regülasyon zayıflıkları, üç veya daha çok fazlı devrelerde hatlar arası oluşan kısa devreler, tek faz-toprak kısa devre arızası sırasında, arıza olmayan fazda geçici bir gerilim artışı gibi arızalar, büyük yüklerin anahtarlamasında veya büyük kondansatörün devreye alınması da gerilim yükselmesine neden olabilir [10, 14]. Şekil 1.14'te, bir kısa devre arızası sonucunda orta gerilim hattında oluşan ani gerilim yükselmesi görülmektedir.

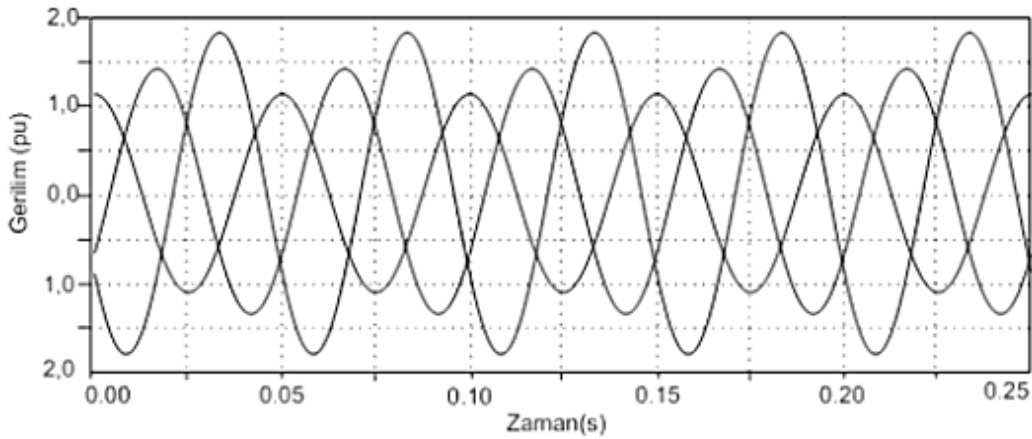


Şekil 1.14. Bir kısa devre arızası sonucunda orta gerilim hattında oluşan ani gerilim yükselmesi

1.5.4. Gerilim dengesizliği

Üç fazlı bir güç sistemi, her üç fazın akım ve gerilimleri aynı büyüklüğe sahipse ve faz açıları arasında 120 derecelik fark varsa, simetrik veya dengeli olarak adlandırılır. Bu şartlardan herhangi biri yoksa o sistem dengesiz veya simetrik olmayan bir sistem olarak nitelendirilir [20].

Gerilim dengesizliği, üç fazlı gerilim veya akımın ortalamasından elde edilen maksimum sapma veya üç fazlı gerilim veya akımın ortalamasına bölümü olarak tanımlanır. Yüzde olarak ifade edilir. Yüzde ikinin altındaki gerilim dengesizliklerinin başlıca nedeni; üç fazlı kaynaktan beslenen tek fazlı yüklerdir. Ayrıca tek faz sigortası atmış olan kompanzasyon kondansatörlerinden kaynaklanabilir. Yüzde beşin üzerindeki dengesizlikler; tek fazlı sistemlerden kaynaklanabilir [1, 17]. Şekil 1.15'te gerilimde oluşan dengesizlik gösterilmiştir [14].



Şekil 1.15. Gerilimde oluşan dengesizlik

1.5.5. Dalga şekli bozukluğu

Dalga şekli bozukluğu, sürekli durumda güç frekansının ideal sinüs dalgasından sapması olarak tanımlanır [1].

Dalga şekli bozukluğunun 5 temel türü vardır.

1. Doğru akım bileşeni
2. Harmonikler
3. Ara Harmonikler
4. Çentikler
5. Gürültü

1.5.5.1. Doğru akım bileşeni

Bir alternatif akım güç sisteminde doğru akım veya gerilimin bulunması, doğru akım bileşeni olarak adlandırılır. Bu bileşen, elektronik güç dönüştürücülerinin simetrik olmamasının bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Bir alternatif akım şebekesinde oluşan doğru akım, sistemde bulunan bir transformatörün normal çalışma şartlarında doyuma ulaşmasına neden olabilir. Bunun sonucu olarak transformatörde aşırı ısınma oluşarak, transformatörün ömrünün kılmasına neden olabilir [10, 14]. Başka bir etkisi de topraklama baralarının elektrolitik aşınmasıdır [10].

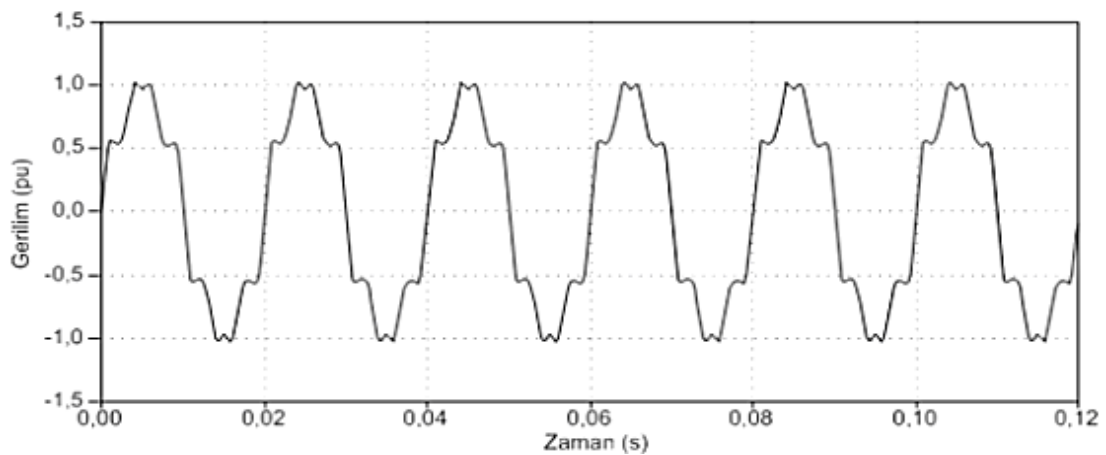
1.5.5.2. Harmonikler

Harmonikler; temel frekansın tam katlarındaki frekanslara sahip ve sinüzoidal şeklinde gerilim ve akımlardır [1].

Şebekedeki enerjinin temel çalışma frekansının tam katı frekanslardaki sinüzoidal akım ve gerilimler olarak tanımlanan harmonikler, enerji kalitesizliğine sebep olan en önemli etkenlerden biridir [4].

Harmonik bozulma, güç sistemindeki Tristör, IGBT, MOSFET gibi yüksek frekanslarda anahtarlama yapabilen cihazlar, ark fırınları, kaynak makineleri, frekans dönüştürücüler, doğrultucular, elektroliz üniteleri, endüksiyon ısıtması gibi doğrusal olmayan özellikteki cihaz ve yükler nedeniyle oluşabilir [14].

Harmonik bozulmalar her frekanstaki harmoniklerin genliği ve açılarıyla gösterilebilir. Harmonik bozulma aynı zamanda, tek bir büyüklük olarak toplam harmonik bozulma (THD) ile ifade edilebilir. THD değeri harmonik bozulmanın etkin değerinin ölçülmesi sonucu elde edilir [1]. Şekil 1.16'da harmonikler sonucu oluşmuş gerilim dalga şekli gösterilmiştir [14].



Şekil 1.16. Harmonikli gerilim dalga şekli

Akımdaki harmonik bozulma bir toplam harmonik bozulma (THD) değeri ile ifade edilebilir. Fakat bu değer çoğunlukla yanıltıcı olabilir. Örneğin; birçok ayarlanabilir hız kontrol sürücüsü düşük yüklerde çalıştıklarında giriş akımı için yüksek THD

değerleri ortaya çıkar. Harmoniğin genliği küçük olduğu için bu durum çok önemli değildir, fakat sebep olduğu bozulma yüksektir. Bu sorunu çözmek için IEEE 519-1992 standardı TDD (Toplam talep bozulması) adında yeni bir değer tanımlamıştır. THD'den farklı olarak ölçüm anındaki akımın büyüklüğü yerine yük akımları kullanılmıştır [1].

1.5.5.3. Ara harmonikler

Ara harmonikler; temel frekansın tam katı olmayan frekans bileşenlerine sahip akım ve gerilimler olarak tanımlanır. Ara harmonikler her gerilim seviyesindeki şebekelerde görülebilir. Ara harmoniklere; frekans eviricileri, indüksiyon fırınları ve ark cihazları sebep olabilir [1].

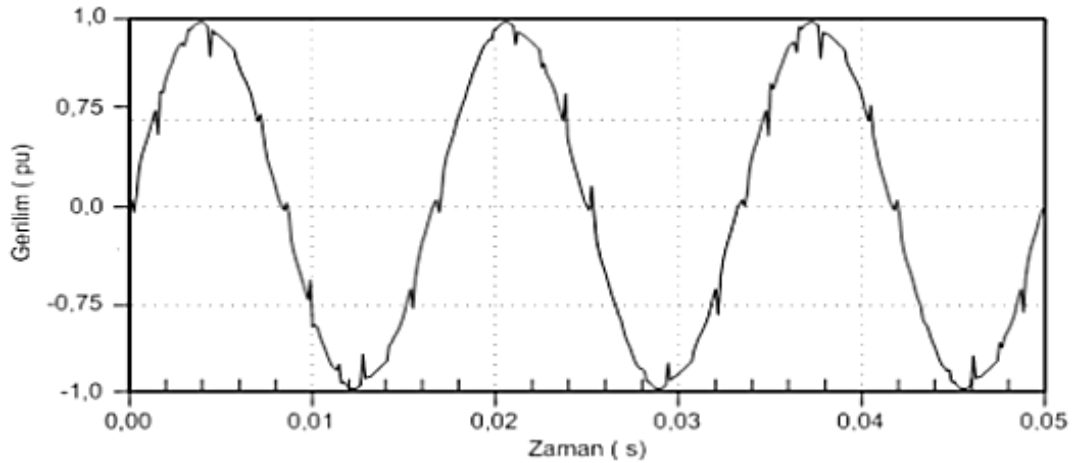
Ara harmonikler genellikle, frekans çeviricilerden kaynaklanır ve sabit değildir. Yüke göre değişir. Bazı ara harmonikler şebekede rezonans oluşumuna sebebiyet verdiklerinden çok tehlikeli olabilir [10, 17].

1.5.5.4. Çentik

Çentikler; normal çalışma durumunda güç elektroniği elemanların akımı bir fazdan başka faza dönüştürmesi sırasında oluşan periyodik gerilim bozulmasıdır [1]. Aynı zamanda; Şebeke geriliminin bir tam dalgasında doğrultucu darbe sayısı kadar tekrarlanan gerilim düşümleri olarak tanımlanabilir. Çentiklerin frekansı çok yüksek olduğundan harmonik ölçümü yapan cihazlarla ölçülmeyebilir [1, 17]. Genelde doğrultucuları besleyen transformatör ve hat endüktanslarının anahtar akımını geciktirmesiyle oluşur.

Çentikler, akımın bir fazından diğerine geçiş (komutasyon) yaptığı anlarda meydana gelir. Bu geçiş işlemi sırasında çok kısa süreli faz-faz arası kısa devreler meydana gelerek, yüksek frekanslı salınımlar ortaya çıkarılırlar. Gerilimde oluşan çentikler, çok hassas elektronik elemanlara zarar verirler [14].

Üç fazlı bir doğrultucuda bir diyot ya da bir tristörden diğerine doğru gerçekleşen geçiş 1 ms den daha kısa süreli bir kısa devre meydana getirir. Bu durum besleme geriliminde ani düşmelere neden olur. Çentik olayı, çok fazla göz önüne alınmayan yüksek dereceli harmoniklere sebebiyet verir [17, 20]. Şekil 1.17’de üç fazlı bir dönüştürücünün oluşturduğu gerilim çentiği görülmektedir [14].

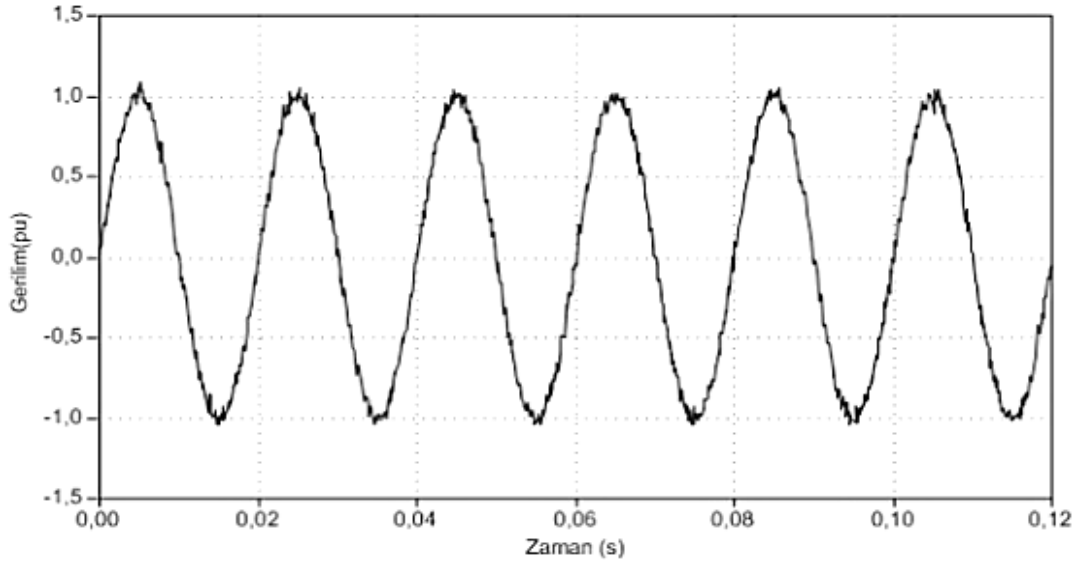


Şekil 1.17. Gerilim çentiği olayının dalga şekli

1.5.5.5. Gürültü

Gürültü, normal sinüs şeklindeki akım ve gerilim üzerine binen, 200 kHz’den küçük geniş bant frekans spektrumuna sahip, istenmeyen elektrik işareti olarak tanımlanır. Bu işaret hem faz iletkenleri hem de nötr iletkenleri üzerinde taşınabilir [14].

Güç sistemlerinde gürültü; güç elektroniği cihazları, kontrol devreleri, ark cihazları, yarıiletken doğrultuculu yükler ve güç kaynaklarının anahtarlama sebebiyle oluşur. Gürültü problemleri genelde yanlış topraklama yüzünden oluşur. Gürültü sorunu; filtrelerle ve izolasyon transformatörleriyle giderilebilir [1, 17]. Şekil 1.18’de bir gerilim dalgası üzerine binmiş gürültü görülmektedir [14].



Şekil 1.18. Bir gerilim dalgası üzerine binmiş gürültü

1.5.6. Gerilim dalgalanmaları

Gerilim dalgalanmaları; gerilim değerleri 0.9 pu ile 1.1 pu değerleri arasında olan sistematik ve seri bir şekilde rastgele tekrarlayan olaylardır [1].

IEC 61000-2-1 tarafından tanımlanan çok çeşitli gerilim dalgalanmaları tanımlanmıştır. Yük akımı çok hızlı değişen yükler; gerilim değişimlerine neden olurlar. Bu duruma kırpışma (flicker) adı verilir. Ark fırınları gerilim dalgalanmalarının en yaygın nedenidir.

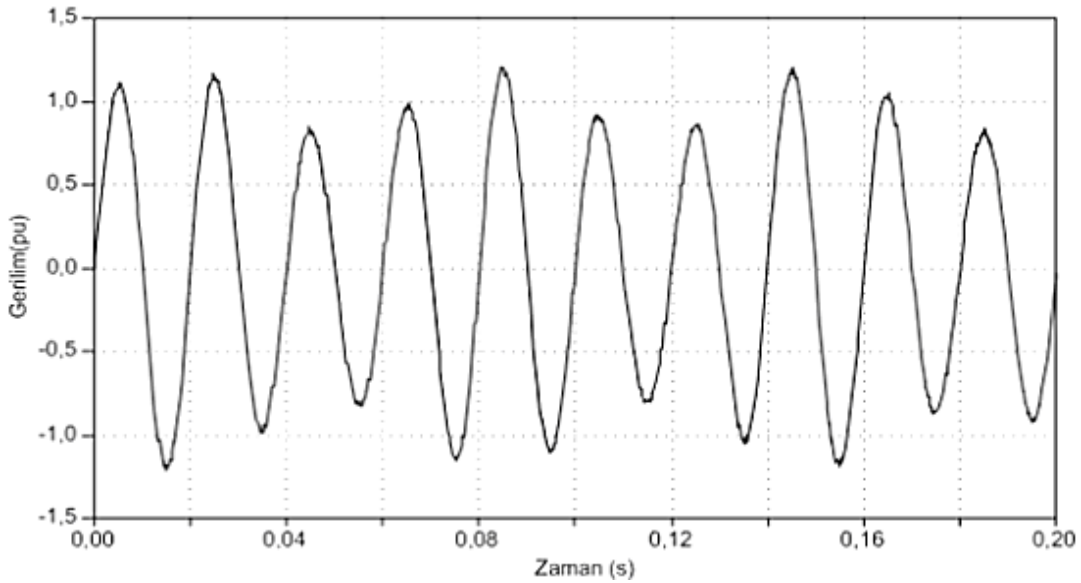
Gerilim salınımlarının oluşturduğu kırpışma, akkor flamanlı veya flüoresan lambaların hızlıca yanıp sönmeye sebep olmaktadır. Kırpışma, 6-8 Hz civarında ise, ışığın şiddetindeki değişim gözle görülebilir. Kırpışma, insanları hem bedensel hemde ruhsal olarak olumsuz bir şekilde etkileyebileceği gibi hassas cihazların çalışmasını da etkilemektedir [14].

Bir güç kalitesi problemi olan kırpışma, diğer güç kalitesi sorunlarından frekans, genlik gibi özellikleri ile ayrılabilir. Ancak kırpışmayı ilginç kılan insan ile bağlantılı olmasıdır. Bir enerji sisteminde kırpışmanın var olması durumunda o enerji sistemine bağlı aydınlatma aygıtlarının kullanıldığı ortamlarda bulunan insanlar etkilenir. Bu

etkileşme kırışmanın büyüklüğüne göre değişmektedir. Evlerde veya ofislerde kırışma sonucu performans düşüklüğü oluşurken tehlikeli işlerin yapıldığı sanayi kuruluşlarında önemli kazaların oluşmasına neden olacak dikkat dağınılımları gözlemlenebilir [6].

Kırışma olayları gerilimin ani olarak düşüp yükselmesi sonucu oluşur. Bu ani düşümler ve yükselmeler elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması sırasında meydana gelen bozulmalardan kaynaklanmaktadır. Bu ani yükselmelerin ve düşümlerin en önemli sebebi şebekeye, aktif ve reaktif güç talebi çok ani değişen yüklerin bağlanmasıdır.

Kırışma olayları sisteme filtre ilave edilmesiyle, statik var sistemleri ve statik dağıtım kompanzatorleri ile giderilebilir. Şekil 1.19'da gerilim kırışma olayı gösterilmiştir [14].



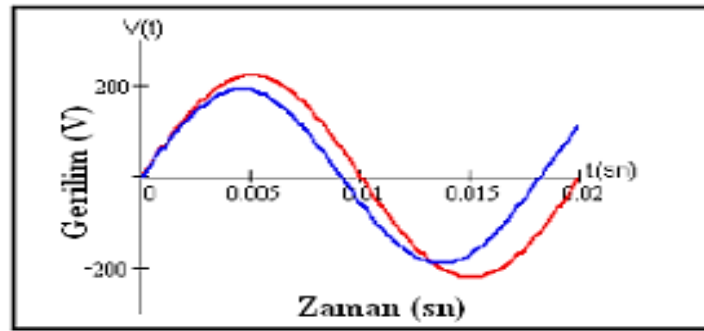
Şekil 1.19. Gerilim kırışma olayı

1.5.7. Güç frekansı değişimleri

Güç frekansı değişimi; güç sistemi frekansının temel frekansın nominal değerinden (50 Hz veya 60 Hz) sapmasıdır.

Güç sistemlerinin frekansını; sistemi besleyen generatörlerin dönme hızına bağlıdır. Yük ile üretim arasında dinamik bir denge vardır ve bu durum frekansta düşük değişikliklerin meydana gelmesine sebep olur. Frekans değişiminin boyutu ve süresi, yükün özelliklerine ve yük değişikliğine yol açan generatör kontrol sisteminin cevabına bağlıdır [17].

Frekans değişimi belli limitler arasında kalmazsa birçok yükün ve generatörün devreden çıkmasına neden olur. Günümüzdeki modern bağlı sistemde büyük frekans değişimleri çok nadir olmaktadır. Bu tip olaylar; şebekeden izole edilmiş generatörlerden beslenen yüklerde olabilmektedir [17]. Şekil 1.20’de güç frekansı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 1.20. Güç frekansı değişimi

1.6. Güç Kalitesi Problemlerinin Etkileri

Güç kalitesi problemleri kullanıcıların tamamını etkilediğinden dolayı çok önemli bir sorundur. Ancak bu etkilenmeler birbirinden farklıdır. Müşteri açısından güç kalitesi probleminin sebep olduğu maliyet düşük olabilir ancak endüstriyel üretici firmalar açısından ürün ve üretim kayıpları ile birlikte çok büyük olmaktadır.

Bazı kritik yükler içeren kullanıcılar güç kalitesi problemlerinde çok daha fazla etkilenirler. Örneğim, çok kısa süreli bir kesinti bile olsa, birbiriyle eş zamanlı çalışan makineler bundan etkilenip daha ürüne dönüşmemiş büyük miktardaki malzemenin kullanılmayacak duruma gelmesine neden olabilirler. Kağıt ve tekstil endüstrisinde bu tür durumlarla karşılaşılabilir. Birbirini zincirleme takip eden bant

tipi üretime ait süreçlerde, herhangi bir aşamada süreksizliğin olması, daha önceki işlemlerin boşa gitmesine neden olabilir [20].

Güç kalitesi problemlerinin oluşmasında birçok sebep sayılabilir. Son zamanlardaki güç elektroniği cihazlarının kullanımının artması bu sebeplerin başında gelmektedir.

Güç kalitesi problemine neden olan başlıca kaynaklar aşağıda verilmiştir.

1. Güç elektroniği cihazları
2. Gömülü sistemler
3. İzolasyon hatası
4. Anahtarlama
5. Aydınlatma
6. Ark ocakları
7. Elektromanyetik yayılım ve kablolama
8. Yıldırım ve çevresel sebepler
9. Büyük motor çalıştırılması
10. Bilgi teknolojileri ve ofis elemanları [22,23].

Geçici olaylar:

1. Elektronik devreleri etkiler ve yanlış sonuçlar vermesine
2. Motorların ısınmasına
3. Cihazların etkilerini ve ömürlerini azalmasına neden olur [24].

Gerilim düşmesi:

1. Kontrol sistemlerinin hatalı çalışmasına
2. Motor hızının değişmesine veya motorun durmasına
3. Kontaktörün kontaklarının açılmasına
4. Bilgisayar sistemlerinde arızalara
5. Anahtarlama arızalarına neden olur [20,24].

Gerilim yükselmesi:

1. Motor sürücülerini ve kontrol elemanlarını olumsuz yönde etkiler.
2. Ayarlanabilir hız sürücülerini koruma elemanlarından dolayı durdurabilir.
3. Bilgisayar donanımının ve akkor flemanlı lambanın ömrünü azaltır.
4. Aşırı ısınmaya neden olur.
5. İzolasyonun bozulmasına neden olur [24].

Kırpışma:

1. Motor sürücülerini ve kontrol elemanlarını olumsuz yönde etkiler.
2. Işığın dalgalanmasına neden olur.
3. Görme kararsızlığına neden olur [24].

Gerilim Dalgalanması:

1. Gerilim dalgalanmaları için öngörülen değer %10'dur. Bu değer çoğu cihazın tolerans sınırları içerisindedir. Bu değer aşıldığı takdirde, kondansatör kullanan cihazların performansında azalma, kontrol sistemlerinde bozulma ve elektronik cihazların iç akım ve gerilimlerinde kararsızlıklar oluşur.

Dengesizlik:

2. Artan dengesiz akımlardan dolayı elektrik makinelerinde ısı artışı oluşur.
3. Harmoniklerin oluşmasına
4. Sistemin etkisinin azalmasına
5. Cihazların etkilerini ve ömürlerini azalmasına neden olur [24].

Harmonikler:

1. Aşırı ısınmalara
2. Kapasitörlerin zarar görmesine
3. Elektrik cihazların ve kabloların aşırı yüklenmesine
4. Elektrik cihazlarının düzgün çalışmamasına neden olur [23].

1.7. Güç Kalitesi Problemlerinin Karakteristikleri

Güç kalitesi problemlerinin değerlendirilmesi belirli standartlara göre yapılmaktadır. IEEE 1159:1995 standardına göre güç kalitesi problemi ve karakteristikleri Tablo 1.4'de verilmiştir [21].

Tablo 1.4. Güç kalitesi bozulmalarının karakteristikleri

Sınıflandırma	Dalga şekli özelliği	Süre	Gerilim Genliği
1.0 Geçici Durum			
1.1 Darbeli			
1.1.1 Nanosaniye	5 ns yükselme	< 50 ns	
1.1.2. Mikrosaniye	1 µs yükselme	50 ns-1ms	
1.1.3. Milisaniye	0.1 ms yükselme	>1 ms	
1.2 Salımlı			
1.2.1 Düşük frekans	<5 kHz	0.3-50 ms	0-4 pu
1.2.2 Orta frekans	5-500 kHz	20 µs	0-8 pu
1.2.3 Yüksek Frekans	0.5-5 MHz	5 µs	0-4 pu
2.0 Kısa Süreli Değişimler			
2.1 Ani			
2.1.1 Kesinti		0.5-30 periyot	<0.1 pu
2.1.2 Düşme		0.5-30 periyot	0.1- 0.9 pu
2.1.3 Yükselme		0.5-30 periyot	1.1-1.8 pu
2.2 Kısa süreli			
2.2.1 Kesinti		30 periyot-3 s	<0.1 pu
2.2.2 Düşme		30 periyot-3 s	0.1-0.9 pu
2.2.3 Yükselme		30 periyot-3 s	1.1-1.4 pu
2.3 Geçici			
2.3.1 Kesinti		3 s- 1 dakika	<0.1 pu
2.3.2 Düşme		3 s- 1 dakika	0.1-0.9 pu
2.3.3 Yükselme		3 s- 1 dakika	1.1-1.2 pu
3.0 Uzun Süreli Değişimler			
3.1 Kalıcı Kesinti		>1 dakika	0.0 pu
3.2 Düşük gerilim		>1 dakika	0.8-0.9 pu
3.3 Yüksek gerilim		>1 dakika	1.1-1.2 pu
4.0 Gerilim Dengesizliği		Sürekli durum	%0.5-2
5.0 Dalga şekli Bozulmaları			
5.1 Doğru akım bileşeni		Sürekli durum	%0-0.1
5.2 Harmonikler	0-100. harmonik	Sürekli durum	%0-20
5.3 Ara harmonikler	0- 6 kHz	Sürekli durum	%0-2
5.4 Çentik		Sürekli durum	
5.5 Gürültü	Geniş bant	Sürekli durum	%0.1
6.0 Gerilim Dalgalanmaları	<25 Hz	Kesinti	%0.1-7
7.0 Güç Frekansı Değişimleri		<10 s	

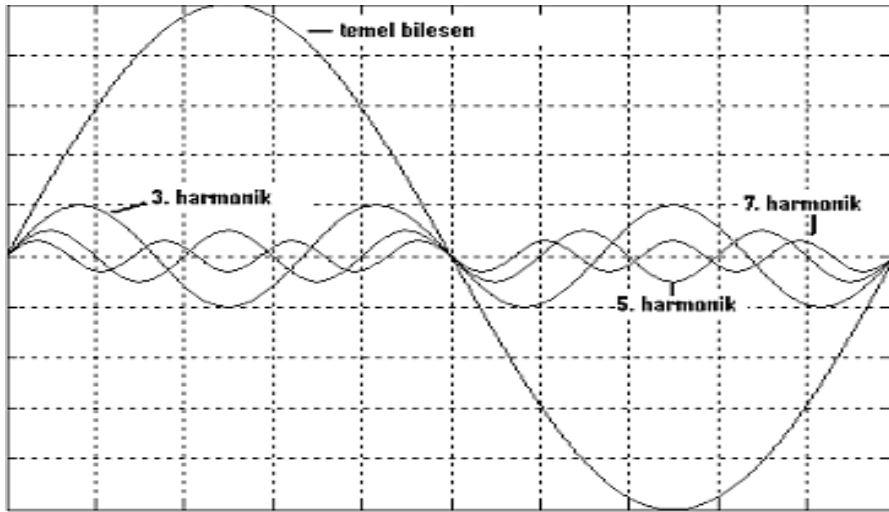
BÖLÜM 2. HARMONİKLER

2.1. Harmoniklerin Tanımı

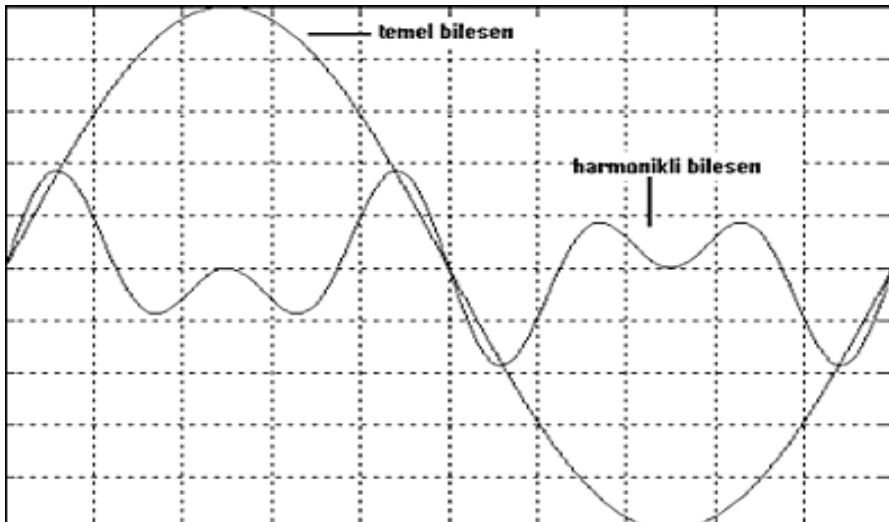
Elektrik sistemlerinde enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtımı sırasında, akım ve gerilimin 50 Hz frekansta salınan ve sinüs eğrisine çok benzer bir şekilde olması istenir. Bu koşul, elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen ana faktörden biridir. Ancak işletmelerden gelen bazı etkilerle akım ve gerilim sinüs formundan uzaklaşır. Bozulmaya neden olan etkiler başında cihazların elektrik ve manyetik devrelerinde bulunan doğrusal olmayan elemanlardır.

Harmonikler devrede doğrusal olmayan elemanlar veya sinüzoidal olmayan kaynaklar bulunursa veya bunların her ikisinin olması sonucudur. Sinüzoidal olmayan dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte sinüzoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüzoidal dalgaları toplamından oluşmaktadır. Temel dalga dışındaki sinüzoidal dalgalara “harmonik bileşen” denir. Güç sistemlerindeki sinüzoidal dalganın simetrisinden dolayı 3., 5., 7., 9., 11., ... gibi tek harmonik bileşenleri bulunur. Çift harmonikli bileşenler bulunmaz [25].

Şebekedeki enerjinin temel çalışma frekansının tam katı frekanslardaki sinüzoidal akım ve gerilimler olarak tanımlanan harmonikler, enerji kalitesizliğine neden olan en önemli etkenlerden biridir. Temel frekans dışında başka frekanslarda sinyalleri de barındırması, şebekedeki gerilim ve frekans değişimine neden olduğundan harmonikler, tesislerde istenmeyen bir durum olarak ortaya çıkmaktadır [4]. Şekil 2.1’de temel bileşen ve harmonikler gösterilmiştir. Şekil 2.2’de harmoniklerin oluşturduğu dalga şekli gösterilmiştir [4].



Şekil 2.1. Temel bileşen ve harmonikler



Şekil 2.2. Temel ve harmonikli dalga

Uygulamada en çok 3., 5., 7., 9., 11., ve 13. harmoniklerle karşılaşır. Ancak 11. ve 13. harmoniklerin genlikleri ana bileşene göre çok küçük olduğundan özel haller dışında önemsemezler. Daha çok 3., 5., 7. harmoniklere ilişkin önlemler alınmaya çalışılır. Elektrikli cihazlara en büyük zararı 5 kHz'den küçük olan harmoniklerin verdiği kabul edilmektedir [26].

Dengeli üç fazlı bir sistemde harmonikler faz akımlarının yönlerini değiştirirler, kimi harmonikler faz akımlarını aynı sırada tutabilir, kimi harmonikler akımların faz

sirasını değiştirebilir, kimi harmonikler de akımlarda faz çakışmasına sebep olabilir [4].

2.2. Harmoniklerin Tarihçesi

Güç sistemlerindeki harmoniklerin araştırılması alternatif akımın çıktığı ilk günden beri güç mühendislerini ilgilendirmiştir. Transformatörlerin doğrusal olmaması, üretilen harmonikler, yıldız üçgen bağlamadaki 3. Harmoniklerin oluşumu Clinker ve Curtis tarafından 1914'lü yıllarda araştırılmıştır. Bu adımdan sonra transformatörlere ilişkin dalga şekilleri Steinmetz tarafından (1916-1917) verilmiştir. Steinmetz harmonik bozulmayı azaltmak için filtrelerin kullanılmasını önermiştir.

İkinci dünya savaşı sonrası doğrultucuların kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Günümüzde güç sistem mühendisleri ve tasarımcılar tarafından yaygın bir şekilde kullanılmakta olan statik dönüştürücülerin harmonik üretimi konusunda Read 1945'li yıllarda çalışmalarda bulunmuştur.

Doğru akım iletim sistemlerinin detaylı incelenmesi ve bu sistemlerde kullanılan dönüştürücülerin her iki çalışma (evirici ve doğrultucu) için karakteriştiği ilk kez Kimbark tarafından 1971 yılında verilmiştir. Doğru akımla enerji iletiminde akü ve fotovoltaiik sistemlerde sık sık kullanılan dönüştürücüler bugün güç sistemlerinde harmoniklerin ana kaynağıdır.

Transformatörlerdeki 3 ve 3'ün katları harmoniklerin geniş araştırması ve 3 fazlı transformatörlerle ilişkisi Pender ve Delmar tarafından 1967 yılında ortaya atılmıştır. Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışmasının, nüveyi daha çok doymaya götürmesi ve harmonik akımların hızlı bir şekilde artmaya sebep olduğu ifade edilmiş, bu durum Mc Graw 1980, Szabados ve Lee tarafından da 1981 yılında deneysel olarak ispatlanmıştır.

Dengesiz temel güç analizi üzerindeki alışmalar El-Abiad ve Tarsi tarafından 1967 yılında ortaya konulmuştur. Modern güç sistem analizinde harmonik modellemenin 3

fazlı güç akışı analizi hakkında en önemli çalışmalar, Arrilage 1983 ve Xu'nun 1991 yılında yaptığı çalışmalar kabul edilir.

Harmonikli güç akışı çözüm tekniği ilk kez Xia ve Heydt tarafından 1982 yılında yapılmıştır. Daha sonraki farklı güç akışı çözüm tekniği yaklaşımları 1984 yılında Densem ve 1987 yılında Semlyen tarafından ortaya konulmuştur [26].

2.3. Harmoniklerin Matematiksel Analizi

Fransız matematikçi J. Fourier sinüzoidal olmayan dalgaların genlik ve frekansları farklı birçok sinüzoidal dalgaının toplamından oluştuğunu göstermiştir. Bütün dalgaların genlik ve frekansı farklı olan sinüzoidal dalgalara ayrılmasıyla elde edilen seriye “Fourier Serisi”, bu seri elemanlarına ise “Fourier Bileşenleri” denir [27].

Sinüzoidal olmayan bir dalga matematiksel olarak, (2.1) eşitliği ile ifade edilir.

$$V(wt) = V_0 + V_1 \sin(wt + \varphi_1) + V_2 \sin(2wt + \varphi_2) + V_3 \sin(3wt + \varphi_3) + \dots + V_n \sin(nwt + \varphi_n) \quad (2.1)$$

Sinüzoidal olmayan $V(wt)$ eğrisi, n tane sinüzoidal eğrinin toplamı olarak yazılabilir. (2.1) eşitliğinde verilen $V(wt)$ ifadesi açılarak $\sin wt$ ve $\cos wt$ ifadelerini içerecek şekilde (2.2) eşitliğinde ifade edilir.

$$V(wt) = V_0 + a_1 \sin wt + a_2 \sin 2wt + a_3 \sin 3wt + \dots + a_n \sin nwt + b_1 \cos wt + b_2 \cos 2wt + b_3 \cos 3wt + \dots + b_n \cos nwt \quad (2.2)$$

(2.2) eşitliğinde verilen ifade $V(wt)$ fonksiyonunun Fourier açılımı olarak bilinir.

$$V_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V(wt) dt \quad (2.3)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V(wt) \sin nwt dt \quad (2.4)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \quad (2.5)$$

(2.3) eşitliğinde verilen V_0 ; $V(\omega t)$ eğrisinin ortalamasına eşittir.

(2.4) ve (2.5) ifadelerinde kullanılan katsayılar arasında;

$$a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t) = V_n \sin(n\omega t + \varphi_n) = V_n \cos(n\omega t - \varphi_n) \quad (2.6)$$

$$V = (a_n^2 + b_n^2)^{1/2} \quad (2.7)$$

$$\varphi = \arctan \frac{b_n}{a_n} \quad (2.8)$$

eşitlikleri elde edilir.

$V(\omega t)$ fonksiyonunun alacağı özel durumlara göre (2.6), (2.7) ve (2.8) eşitliklerinden bazı kolaylıklar elde edilebilir.

1. $V(\omega t)$ fonksiyonu $V(-\omega t) = -V(\omega t)$ eşitliğini sağlıyor ise; $b_n = 0$ olur.
2. $V(\omega t)$ fonksiyonu $V(-\omega t) = V(\omega t)$ eşitliğini sağlıyor ise; $a_n = 0$ olur.
3. $V(\omega t)$ fonksiyonu $V(\omega t + \pi) = -V(\omega t)$ eşitliği sağlıyor ise; $a_{2n} = b_{2n} = 0$ ($n=1,2,3,4,\dots$) olur. Bu durumda çift dereceden harmonikler ortadan kalkar [27].

2.4. Harmonik Kaynakları

Harmonikler genel olarak doğrusal olmayan elemanlar ile sinüzoidal olmayan kaynaklardan herhangi biri veya ikisinin de aynı anda sistemde bulunmasından meydana gelirler. Harmonikli akım ve gerilimin, güç sistemlerinde bulunması sinüzoidal dalganın bozulması anlamına gelir. Harmonik kaynağı gibi çalışan elemanlar ve etkileri aşağıda incelenmiştir.

2.5. Harmonikleri Meydana Getiren Doğrusal Olmayan Elemanlar

1. Transformatörler
2. Generatörler
3. Demir çekirdekli bobinler
4. Motorlar
5. Elektronik balastları
6. Senkron makinelerin uyarılmasında kullanılan diyot, tristörlü dönüştürücüler
7. Televizyon ve bilgisayarlar
8. Statik Var Kompanzatörleri
9. Kontrollü motor hız ayar devreleri
10. Kesintisiz güç kaynakları
11. Frekans dönüştürücüler
12. Akü şarj devreleri
13. Fotovoltaik sistemler
14. Ark fırınları
15. Enerji tasarrufu amacı ile kullanılan aygıtlar ve uygulanan yöntemler
16. Gaz deşarj prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları
17. Anahtarlamalı güç kaynakları
18. Kaynak makinaları
19. Yüksek gerilim DA enerji iletimi
20. Elektrikli ulaşım sistemleri [4].

2.5.1. Transformatörler

Güç sistemlerinin en önemli elemanlarından olan transformatörlerin mıknatıslanma özelliğinden dolayı yük karakteristiği doğrusal değildir. Akım gerilim karakteristiği doğrusal olmadığı için veya transformatörün demir çekirdeğinin doymaya gitmesi sebebiyle harmonik bozulmasına neden olurlar [4].

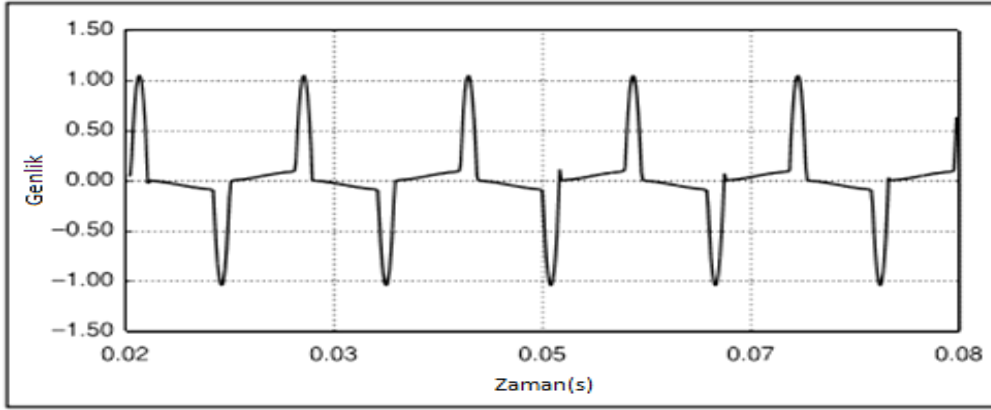
Mıknatıslanma akımı harmoniklerin yüklenmesinin az olduğu günün erken saatlerinde en yüksek seviyeye ulaşır. Çünkü sistem yükü az olup, gerilim yükselerek aşırı uyarma meydana gelir, aşırı uyarma ile oluşan akım harmoniklerinde 3., 5., 7.

harmonikler etkili olur. Bununla birlikte akım şiddeti bakımından en önemli harmonik üçüncü harmoniktir. Üç ve üçün katı harmonikler arasında 360 derecenin tam katları kadar faz farkları olduğundan hepsi aynı fazdadır. Harmonik akımları transformatör primer reaktansı, hattın reaktası ve generatör kaçak reaktansı üzerinden geçerek harmonik gerilim düşümü meydana getirilir. Generatör sinüs biçiminde dalga ürettiği halde çıkış uçlarındaki gerilim bozulabilir. Mıknatıslanma akımlarının şebekeye geçmemesi transformatör bağlantı grubuna, primerin yıldız bağlı olması halinde yıldız noktasının şebekenin nötrüne bağlı olup olmaması ve transformatördeki manyetik devrenin geometrik yapısına bağlı olarak değişmektedir.

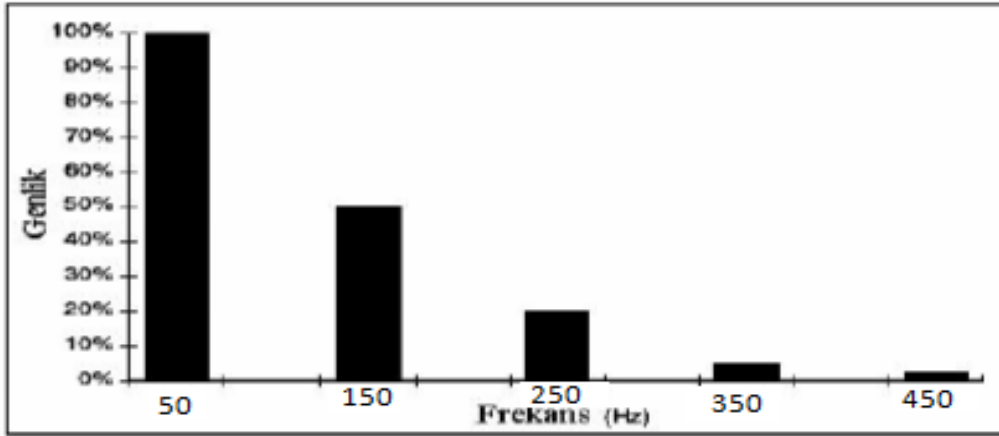
Üç fazlı transformatörlerde mıknatıslanma akımı transformatör bağlama şekline ve manyetik devrenin yapısına bağlı olarak değişmektedir. Üç ve üçün katı harmonikler çeşitli bağlantı grupları ile yok edilebilir. Üçüncü ve yedinci harmoniklerin etkileri soğukta haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş saçlar kullanılarak azaltılabilir. Transformatör devresinde demir çekirdekte bulunan elemanların akım ve gerilim ilişkisi doğrusal değildir. Transformatörlerde genellikle iki türlü harmonik üretilir. Bu harmonikler akım harmonikleri ve gerilim harmonikleri olarak sınıflandırılır [25].

Akım harmonikleri ilave ısı ($I^2 \cdot R$) kayıpları oluşturur, çekirdek demir kayıplarını artırır. Haberleşme devreleri üzerinde manyetik etkiler oluşturur. Gerilim harmonikleri ise transformatör endüktansı ile transformatöre bağlı tüketicilerin kapasiteleri arasında rezonansa girmesine neden olur. Dielektrik zorlanmayı artırır. Haberleşme devrelerinde elektrostatik etki meydana gelir [25].

Mıknatıslanma eğrisi sıfır noktasına göre simetrik olduğundan mıknatıslanma akımı $n=1, 3, 5, 7..$ dereceden sinüzoidal bileşenlerin toplamı şeklinde ifade edilir [4]. Şekil 2.3'te transformatörün mıknatıslanma akımı ve Şekil 2.4'te harmonik spektrumu gösterilmiştir [1].



Şekil 2.3. Transformatörün mıknatıslanma akımı



Şekil 2.4. Transformatörün mıknatıslanma akımının harmonik spektrumu

2.5.2. Generatörler

En doğal harmonik üreten sitemlerdir. Senkron generatörün harmonik üretme özelliği çıkık kutbun alan şeklinden, manyetik direncin oluklarına bağlı olmasından, ana devrenin doyuma ulaşmasından, kaçak akımlardan, sık aralıklarla ve simetrik olmayan boşluklarla yerleştirilen sönüm sargılarından kaynaklanmaktadır [28]. Generatörlerde bu sebepten dolayı oluşan harmonikleri önlemek için oluk şekli, sargı yapısı, uyarma sargısı ve kutuplar gibi kısımlarda uygun yapısal tedbirler alınarak ve generatörü amortisman sargısı ile donatarak gerilim eğrisinin sinüzoidal olması sağlanır [4].

Generatör gücünün 100 kVA'dan küçük olması durumunda oluşturduğu harmonikler dikkate alınmaz [28].

2.5.3. Bilgisayarlar

Bilgisayar sistemleri hassas yüklerdir. Bozucu etkilerden etkilendikleri gibi sistemide etkileyebilir. Sahip oldukları doğrusal olmayan karakteristikleri nedeniyle güç sistemlerde gerilim düşümlerine sebep olabilirler [28]. Bilgisayarların doğrusal bir yük olmayışı güç sistemlerinde gerilim düşümleri ile beraber, 3 ve 3'ün katları harmoniklerin üretiminden dolayı nötr iletkenlerin aşırı yüklenmesi ve hat gerilim bozulmaları gibi bozucu etkilere neden olabilmektedir. Bilgisayarların çok olduğu iş kulelerinde harmoniklerden dolayı nötr iletkeni çok yüklediği için nötr hattı için faz iletkeninin bir ya da iki üst kesitli iletken seçilmektedir [4].

2.5.4. Statik var kompanzatörler

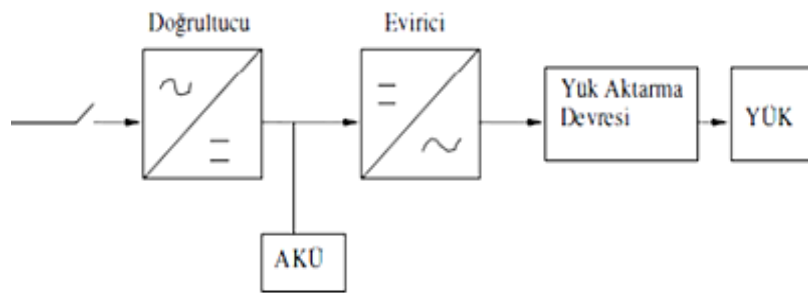
Reaktif güç kontrolü için kullanılan statik var kompanzatörleri, içerdikleri doğrusal olmayan elemanlar nedeniyle doğrusal olmayan uç karakteristiklere sahiptirler. Reaktif güç kompanzasyonunda değişken yüklerin olduğu ve bundan dolayı hızlı anahtarlama istendiği durumlarda statik anahtarlama kompanzasyon sistemleri kullanılır. Statik var kompanzatörleri genel itibari ile sinüzoidal dalgaının belirli aralıklarla kesilmesine neden olurlar. Bunun sonucunda dalga şekli sinüzoidal olmaktan çıkar. Statik var kompanzatörlerin çalışma mantığı; kesilen bu dalgalar ile L ve C elemanları üzerinden reaktif gücün ayarlanması prensibine dayanır [28].

2.5.5. Ark fırınları

Güçleri MW seviyesinde olan ve elektrik ark oluşum esasına dayanan ark fırınları, elektrik akımının akım-gerilim karakteristiğinin doğrusal olmaması nedeniyle harmonik üretirler. Harmoniklerin rastgele değişim göstermesi ark fırınlarının 2., 3., ...9., mertebede akım harmonikleri bulunmuştur. En büyük harmonik bileşeni temel bileşenin %30'u kadardır [28]. Ayrıca 2, 3, 4, 5 mertebesindeki akım harmoniklerin temel bileşen akımının yaklaşık %2'si ile %4'ü arasında ve 6,7,...10 mertebesindeki akım harmoniklerinin ise temel bileşen akımının yaklaşık %0.4 ile %1.3 arasında dağılım gösterdiği tespit edilmiştir [4].

2.5.6. Kesintisiz güç kaynakları

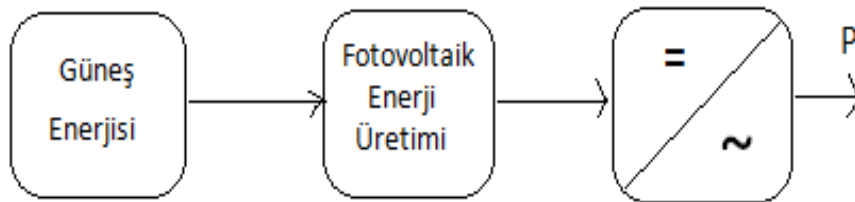
Kesintisiz güç kaynakları, güç elektroniği elemanları ile anahtarlama yaparak alternatif gerilimi doğru gerilime çevirerek, enerjinin depolanması ve sonra evirici yardımıyla alternatif akıma çevirerek elektrik kesintisi anında tüketiciye iletmesi prensibine göre çalışır. Hem doğrultucu hem de evirici tarafı harmonikleri oluşturur. Şekil 2.5'te kesintisiz güç kaynağının genel yapısı gösterilmiştir [29].



Şekil 2.5. Kesintisiz güç kaynağı yapısı

2.5.7. Fotovoltaik sistemler

Elektrik enerjisini fotovoltaik yoldan üreten sistemler olup, ürettikleri doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için evirici kullanırlar. Güç elektroniği elemanı kullanmasından dolayı harmoniklere yol açarlar. Şekil 2.6'da fotovoltaik enerji üretim şeması gösterilmiştir [30].

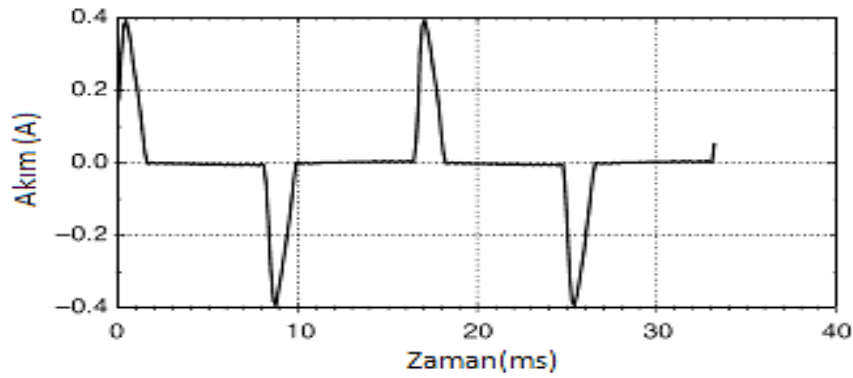


Şekil 2.6. Fotovoltaik enerji üretim şeması

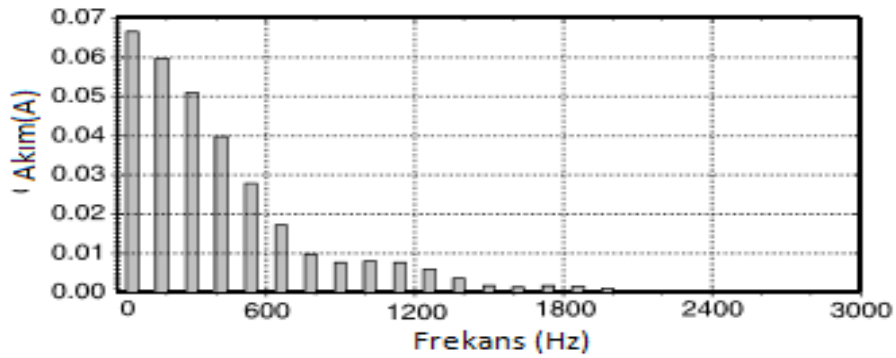
2.5.8. Elektronik balastlar

Gün geçtikçe hayatımızın her safhasında daha belirgin biçimde giren elektronik sanayi, şebekede harmonik etkinliğin artmasına sebep olmaktadır. Aydınlatmada

kullanılan elemanlardan elektronik balastlar harmonik üreticisidir. Filtreli ve filtresiz olarak imal edilen bu balastlar eğer filtreli ise harmonik etkinliği yok sayılır. Filtresiz olarak kullanılan yüksek frekanslı elektronik balastlarda en etkin harmonik bileşenler 3., 5., 7., ve 9. bileşenlerdir, 13. harmonikten sonra temel bileşenin 1/3'ünden daha küçük değerlerde harmonik bileşenlere sahiptir [26]. Şekil 2.7'de elektronik balast akımının dalga şekli ve Şekil 2.8'de elektronik balast akımının spektrumu gösterilmiştir [1].



Şekil 2.7. Elektronik balast akımı

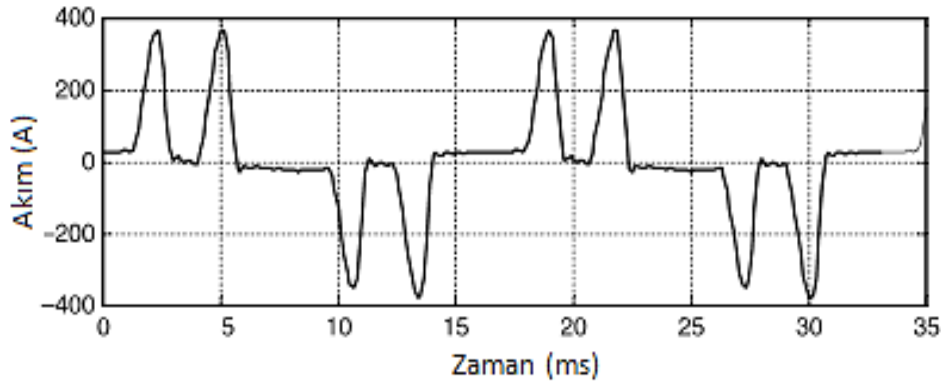


Şekil 2.8. Elektronik balast akımının spektrumu

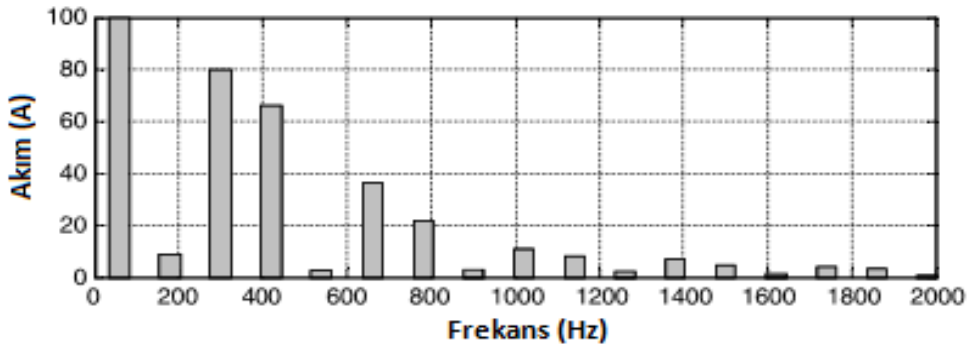
2.5.9. Statik dönüştürücüler

Eviriciler, doğrultucular, frekans çeviricileri ve kıyıcıları birer harmonik kaynağı olarak çalışırlar. Genel anlamda kontrol yapılan yerde harmonik olması doğaldır. Sonuçta bir dalgayı isteğimize göre kontrol etmek onun şeklinin bozulmasına neden olur. Bu nedenle güç elektroniği düzenekli donanımlar önemli birer harmonik kaynaklarıdır.

Üç fazlı çeviricinin bir fazlı çeviricinin üstünlüğü, üç ve üçün katı harmonikleri üretmemesidir. Gerilim kaynaklı evirici devreleri büyük oranda harmonik bozulmalarına sebep olabilir. Şekil 2.9'da gerilim kaynaklı evirici devre akımının dalga şekli ve Şekil 2.10'da evirici devre akımının spektrumu gösterilmiştir [1].



Şekil 2.9. Gerilim kaynaklı evirici devre akımının dalga şekli



Şekil 2.10. Gerilim kaynaklı evirici devre akımının spektrumu

2.5.10. Gaz deşarjlı aydınlatma

Gaz deşarjlı aydınlatma elemanları, örneğin flüoresan, cıva, ark v.b. ve yüksek basınçlı sodyum lambalar şebekeden harmonikler içeren akımların çekilmesine neden olurlar. Bu tür aydınlatma elemanları özellikle büyükşehir alanlarında daha çok hissedilen harmonikler meydana getirir. Bu tip lambaların elektriksel karakteristiği doğrusal olmayıp akım geçişi esnasında negatif geçiş karakteristiği gösterir. Ev ve işyerlerinde yaygın olarak kullanılan flüoresan lambalar balastlardan ve gaz deşarjlarından kaynaklanan harmonik bileşenlerin meydana gelmesine sebep olmaktadır.

Üç fazlı sistemde, faz nötr gerilimle beslenen aydınlatmada 3. harmonik akımı nötr iletkeninden toprağa geçer. Harmonik etkinliği açısından bakıldığında, Flüoresan aydınlatmada tek dereceli harmoniklerin büyüklüğü önemli oranda devreyi etkiler [26].

2.6. Harmonik Standartları

Teknolojik gelişmelerle birlikte, harmoniklerin elektrik enerji sistemlerindeki etkilerinin her geçen gün artması bu etkilerin tanımını, sınırlandırılmalarını ve yok edilmeleri için bazı büyüklüklerin tanımlanmasını zorunlu hale getirmiştir. Harmoniklerin genlik olarak belirli değerin üzerinde olması, güç sistemlerinin arızalanmasına neden olur. Harmonikler sistem içindeki negatif etkileri yanında diğer sistemleri de etkileyebilir. Bundan dolayı birçok kuruluş, bir yükün şebekeye verebileceği harmonik akım büyüklüğünü belirlenen limitler içinde tutmaya çalışmaktadır. Amerikan ordusu bu problemi fark eden ilk kuruluşlardan biri olmuş, çok sıkı bir biçimde uygulamıştır. Bu amaçla birçok standart ve ifade tanımlanmıştır.

2.7. Toplam Harmonik Bozulumu (THD)

Harmonik bileşenlerin temel bileşenlere göre seviyesini belirlemede toplam harmonik bozulumu (THD) dikkate alınır. Sinüzoidal formdan uzaklaşmayı, bozunumun derecesi belirtir. THD, harmonik bileşenlerin etkin değerlerinin, temel bileşenin etkin değerine oranıdır ve genellikle yüzde olarak ifade edilir. Bu değer, harmonikleri içeren periyodik dalga şeklinin, tam bir sinüs dalga şeklinden sapmasında kullanılır. Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüs dalga için THD sıfırdır [30].

Gerilimdeki harmonik bozulma (2.9) eşitliği ile ifade edilir.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (2.9)$$

Akımdaki harmonik bozulma (2.10) eşitliği ile ifade edilir.

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.10)$$

Tablo 2.1 ve Tablo 2.2’de IEEE 519-1992 standardı tarafından belirlenen akım ve gerilim harmonik sınırları sırasıyla verilmiştir.

Tablo 2.1. IEEE 519-1992 akım harmonik sınırları

I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD(%)
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0

Tablo 2.2. IEEE 519-1992 gerilim harmonik sınırları

Bara Gerilimi	Maksimum Bireysel Harmonik Bileşen(%)	Maksimum THD(%)
<69 kV	3.0	5.0
69-161 kV	1.5	2.5
≥ 161 kV	1.0	1.5

2.8. Akım ve Gerilim Harmonikleri

Harmonik akımları, harmonik kaynağından en düşük empedansa doğru akma eğilimindedirler. Harmonik akım kaynağı tarafından görülen empedans, sistem kaynak empedansı ile sisteme paralel bağlı yüklerin toplam empedanslarından çok daha düşüktür.

Akım harmonikleri doğrusal olmayan yüklerden ve kaynaklardan oluşurken, gerilim harmonikleri:

1. Bazı elemanların çıkış gerilimlerinin sinüsten sapması
2. Harmonikli akımların hat boyunca oluşturduğu harmonik frekanslı gerilim düşümleri
3. Seyrek de olsa orta gerilim şebekesinden kaynaklanan ve giriş transformatörüne yansıyan gerilim bozulumu, biçiminde ortaya çıkabilir [31].

Akım harmoniklerinin faz açısının da bilinmesi, harmonik analizi için gereklidir. Çünkü akım harmonikleri analiz için veri durumundadır. Gerilim harmoniklerinin faz açılarının bilinmesi çoğu kez gerekli değildir. Çünkü bu harmonikler simülasyon sonunda çıktı olarak belirlenmektedir. Zaten gerilim harmoniklerinin genlikleri oldukça küçük olduğu için, çok duyarlı ölçümler çok zordur. Fakat beslenme noktasının önemli ölçüde gerilim harmonikleri içermesi halinde, gerilim harmoniklerinin faz açıları da gerekli olabilmektedir [31].

2.9. Harmonik Etkileri

Enerji sistemlerinde harmonik oluşması sonucu gerilim ve akım dalga şeklinin bozulması birçok probleme sebep olmaktadır. Harmoniklerin sebep olduğu problemler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Transformatörlerin aşırı ısınması
2. Dönen makinalarda moment salınımlarının ve aşırı ısınmalarının oluşumu
3. Gerilim düşümlerinin artması
4. Generatör ve şebeke gerilimi dalga şeklinin bozulması
5. Kompanzasyon tesislerinde aşırı reaktif yüklenmesi
6. Sayaçlarda yanlış ölçmelerin yapılmasına
7. Şebekede rezonans olayları ve rezonansın neden olduğu aşırı gerilim ve akımlar
8. Kontrol devrelerinde çalışma bozukluğu
9. Korumada hatalı çalışma

10. Dielektrik malzemelerin delinmesi
11. Mikroişlemcilerin hatalı çalışması
12. Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit oluşturma
13. Güç faktörü değişimine sebep olurlar.

2.10. Harmoniklerin Giderilmesi

Sistem üzerinde olumsuz etkisini gösteren harmoniklerin yok edilmesi veya etkilerinin azaltılması gerekmektedir. Harmoniklerin giderilmesi için bazı önlemler aşağıda sıralanmıştır.

1. Zararlı büyüklüğe ulaşmış harmonikler kesinlikle filtreler vasıtasıyla giderilmelidir.
2. Elektrik enerjisinin üretimi sırasında harmonikli geriliminin oluşmasını önlemek için gerekli önlemler alınmalıdır (Generatör kutup tasarımının uygun yapılması).
3. Harmonik akımları üreten transformatör gibi elemanların demir çekirdek kesitlerinin yeterli büyüklükte seçilerek manyetik devresinde doyma meydana gelmesine engel olunmalıdır.
4. Transformatörlerde uygun bağlantı şekilleri kullanılarak en çok zararlı etkisi görülen 3., 5., 7. harmonikler sisteme verilmeyebilir.
5. Harmonik akımları talep eden çeviricilerin darbe sayılarını artırarak olumsuzlukları kısıtlanabilir.
6. En çok harmonikli akım çeken alıcıların bulunduğu sanayi bölgesinde yılın belirli zamanlarında periyodik olarak yapılacak harmonik ölçümlerle kontrol yapılmalıdır. İstenilen değerlerin dışına çıkan alıcılara müsaade edilmemelidir.
7. Elektrik dağıtım şirketi tarafından harmonikli akım talep eden alıcılara özel fiyat uygulaması getirilmelidir. Böylelikle alıcılar harmonikleri önleyici tedbirleri almaya zorlanacaktır.

BÖLÜM 3. REAKTİF GÜÇ KOMPAZASYONU

3.1. Reaktif Güç Kompanzasyonun Tanımı

Enerji sistemlerinin kontrolünde en önemli problemlerden biri reaktif güç kompanzasyonudur. Reaktif güç, iletim sistemlerinde kayıpların artmasına, iletim sisteminin güç iletim kapasitesinin azalmasına ve gerilim genliğinde büyük değişimlere neden olur. Bu yüzden alternatif güç sistemlerinde iletilebilir gücü artırmak ve kayıpları azaltmak için reaktif güç kompanizasyonunun yapılması gereklidir.

İletim sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu, iletebilen maksimum aktif gücü artırarak sistemin kararlılığını artırır. Güç iletiminin tüm seviyelerinde gerilim düzenlemesi yapar. Reaktif güç kompanizasyonu uygulamaları paralel ve seri olmak üzere ikiye ayrılır. Paralel bağlantılı sistemler genellikle reaktif güç kompanizasyonu ve akım harmoniklerinin filtrelenmesinde kullanılır. Seri bağlı sistemler ise gerilim harmoniklerinin filtrelenmesinde, gerilim ayarlanmasında kullanılabilir.

Reaktif güç kompanzasyonunda kullanılan klasik ve modern sistemler mevcuttur. Modern sistemler genel olarak esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS) kullanılır. Reaktif güç kompanzasyonunda kullanılan klasik yöntemler paralel reaktörler, paralel kondansatörler, senkron kompanzatörler örnek verilebilir. Reaktif güç kompanzasyonunda kullanılan FACT cihazlarına ise SVC ve STATCOM örnek verilebilir. FACTS cihazları, reaktif güç kompanzasyonunda reaktör ve kondansatör gruplarına ihtiyaç duymadan, kontrol sistemlerinin yardımıyla reaktif güç kompanzasyonu yapmaktadır. FACTS cihazları ayrıca çok hızlı tepki gösterme yeteneği vardır. FACTS cihazları ile mekanik kontrollerinin yerini güç elektroniği kontrol devreleri almış ve böylece çok hızlı cevap ve çok az kayıp sağlanabilir.

Endüstride kompanzasyonu gerektiren en önemli yükler şunlardır; düşük uyarmalı senkron makineler, transformatörler, bobinler, havai hatlar, senkron motorlar, redresörler, endüksiyon fırınları, elektrik ark ocakları, kaynak makineleri, endüksiyon kaynak makineleri, lamba balastları, haddehaneler, haddehanelerin elektrik tesisatı, asenkron motorlar, v.b.

3.2. Paralel Reaktörler

Paralel reaktörler; iletim hattının kapasitif etkisini kompanze etmek ve özellikle açık devre veya az yüklenme olması durumlarında meydana gelen gerilim yükselmelerini sınırlamak amacıyla kullanılırlar. Genellikle 200 km'den daha uzun hatlarda veya zayıf bir sistemden beslenen daha kısa hatlarda sürekli veya mekanik anahtarlama olarak sisteme bağlanır. Sistemden reaktif güç çekerek yükselen bara gerilimini uygun seviyeye getirir [32, 33].

3.3. Paralel Kondansatör

Yüklü bir durumdaki güç sistemi, çoğunlukla endüktif karakterli olduğundan belirli noktalarda gerilim düşümü meydana gelir. Paralel kondansatörler reaktif güç üretirler ve gerilim yükselmesini sağlar. Paralel kondansatörler ilk kez 1910'ların ortasında kullanılmaya başlandı. Ancak büyük büyük boyutları ve yüksek fiyatları nedeniyle kullanımı sınırlı olmuştur. 1930'larda yalıtkan malzemenin ucuzlaması ve diğer gelişmelerle, kondansatörlerin boyutları ve maliyetleri düşmüştür. Bunun sonucunda kullanımları yaygınlaşmıştır. Paralel kondansatör, günümüzde reaktif güç üretmek için çok ekonomik araçtır. Başlıca avantajı düşük maliyetleri ve kurulumu ile işletimindeki esnekliktir [32, 33].

3.4. Senkron Kompanzatörler

Mekanik yükü olmayan senkron bir makine olan senkron kompanzatörün uyartım akımı kontrol edilerek reaktif güç üretilebilir veya tüketilebilir. 1930 yılından itibaren gerilim ve reaktif güç kontrolü için kullanılan senkron kompanzatörlerin kontrol karakteristikleri çok üstündür. Kendi gerilim kaynağına sahip olmasında

dolayı senkron kompanzatorlerin reaktif güç üretimi sistem geriliminden etkilenmemektedir. Ancak satın alma ve işletme maliyetleri oldukça yüksektir [32, 33].

3.5. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS)

Esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS) 1980'lerin sonunda Amerika'daki Elektrik Gücü Araştırma Enstitüsü (EPRI) tarafından tanıtılmıştır. FACTS terimi 1988 yılında EPRI Elektriksel Sistemler Bölümü Başkan Yardımcısı Dr. Narain Hingorani tarafından ortaya atılmıştır. FACTS kavramının arkasındaki temel düşünce mekanik kontrolörlerin yerini güvenli ve hızlı olan güç elektroniği elemanlarının alması, böylece var olan güç sistemi kapasitesinin kullanımını optimize etmek ve denetimini artırmaktır. FACTS cihazlarında güç akış kontrolü ve gerilim kontrolü için kullanılan geleneksel donanımının yerini güç elektroniği tabanlı donanımla yapılmaktadır. FACTS kontrolörleri güç elektroniği tabanlı bir uygulama olduğu için geleneksel mekanik kontrolörlere (paralel kapasitör, seri kapasitör, faz kaydırıcı vb.) göre daha hızlıdır. Bu cihazlar uygun bir şekilde ayarlandığı zaman iletim sistemlerinin kararlı çalışma limitlerini artırır.

Son yıllarda güç elektroniği teknolojisindeki gelişmelerden dolayı FACTS cihazlarına olan ilgi artmıştır. Bu cihazlar, temel olarak gerilim regülasyonu, güç akış kontrolü ve iletim kapasitesi artırımı gibi çok çeşitli sürekli durum kontrol problemlerini çözmek amacıyla kullanılmaktadır [34].

FACTS, güç elektroniği anahtarlama elemanlarına ve kontrollerine dayalı bir kavramdır. İletim sistemlerinin kullanımını verim ve güç kapasitesinin yanı sıra kararlılık, güvenlik ve güç kalitesini artırmak için kullanılan bir kavramdır [34].

FACTS cihazlarını, geleneksel tristör tabanlı kontrolörler ve gelişmiş dönüştürücü tabanlı kontrolörler olarak iki şekilde incelemek mümkündür. Tristör tabanlı kontrolörler anahtarlama ve düzenleme cihazı olarak geleneksel tristörleri kullanmaktadırlar [35].

3.6. FACTS Cihazları

Güç kalitesi problemini son zamanlarda artması ile çok çeşitli FACTS cihazları kullanılmaya başlanmıştır. Bu cihazların en yaygın kullanılanları aşağıda verilmiştir.

1. SVC (Statik Var Kompanzatör)
2. STATCOM (Statik Senkron Kompanzatör)
3. TCSC (Tristör Kontrollü Seri Kapasitör)
4. SSSC (Statik Senkron Seri Kompanzatör)
5. TSC (Tristör Anahtarlama Kapasitör)
6. TCR (Tristör Kontrollü Reaktör)
7. TSR (Tristör Anahtarlama Reaktör)
8. TCPAR (Tristör Kontrollü Faz Açığı Regülatörü)
9. DVR (Dinamik Gerilim Regülatörü)
10. UPFC (Birleştirilmiş Güç Kontrolörü)
11. IPFC (Hat Arası Güç Akışı Denetleyicisi)

FACTS cihazlarını birçok grup altında sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalar kullanılan yarıiletken elemana, bağlantı şekline ve gelişim sürecine göre yapılmaktadır.

FACTS cihazlarını gelişim süreci bakımından üç bölüme ayrılabilir.

1. Birinci nesil FACTS cihazları: SVC, TCSC, TCPAR, TCR, TSR.
2. İkinci nesil FACTS cihazları: STATCOM, SSSC, UPFC, IPFC, DVR.
3. Üçüncü nesil FACTS cihazları: HPFC, GUPFC [36].

Kullanılan yarıiletken elemana ve devre topolojisine göre FACTS cihazları iki gruba ayrılır.

1. Tristör Tabanlı FACTS elemanları
2. Anahtarlama Dönüştürücü tipi (GTO tabanlı) FACTS elemanları

Bağlantı şekline göre FACTS cihazları dört bölüme ayrılır.

1. Seri bağlı FACTS cihazları: TCSC, TCPAR, TCPST ve SSSC.
2. Paralel bağlı FACTS cihazları: SVC, STATCOM.
3. Her iki seri bağlı FACTS cihazın birleştirilmesi: IPFC.
4. Seri ve paralel bağlı FACTS cihazın birleştirilmesi: UPFC[36].

3.6.1. Statik var kompanzatör (SVC)

Statik var kompanzatör (SVC) cihazları elektrik güç sistemine paralel bağlanan güç elektroniği tabanlı cihazlardır. Bağlantı yapılan ilgili bara gerilimi, gerekli reaktif gücü sağlayarak, limitleri içerisinde tutmaktadır. Kondansatörlere göre en büyük avantajı, hızlı tepkime süreleri ile ihtiyaç durumunda çok daha etkili olabilmektedir.

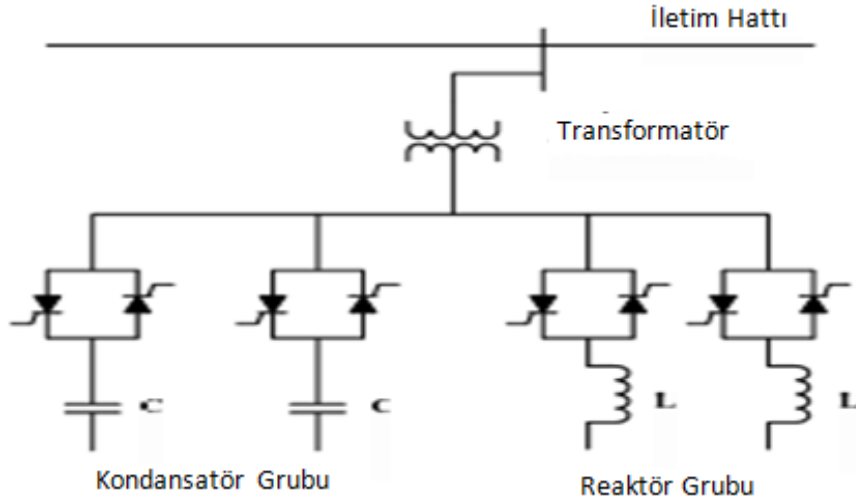
SVC'nin geliştirilmesinden önce iletim sistemlerinde gerilim ayarı, generatör ve senkron kompanzatörlerden başka sadece mekanik anahtarlı paralel reaktör ve kapasitörle yapılabiliyordu. Paralel reaktör ve kapasitörlerin anahtarlama ani gerilim değişimlerine neden olur. SVC, güç sistemlerinin işletilmesi ve kontrolü bakımından istenen, hızlı ve iyi bir gerilim ayarı sağlar. SVC, senkron kompanzatör gibi şebekeye reaktif güç verir veya şebekeden reaktif güç çeker. Ama dönen parçası yoktur. SVC kontrol edilebilen paralel kondansatör ve paralel reaktörlerden oluşmaktadır [37]. Şekil 3.1'de SVC'nin yapısı gösterilmiştir [37].

SVC'nin içerebileceği temel elemanlar aşağıda verilmiştir.

Sabit kapasitör: Sürekli olarak bağlı reaktif güç kaynağıdır. Ayrıca harmonik filtre gibi davranacak şekilde tasarlanabilir.

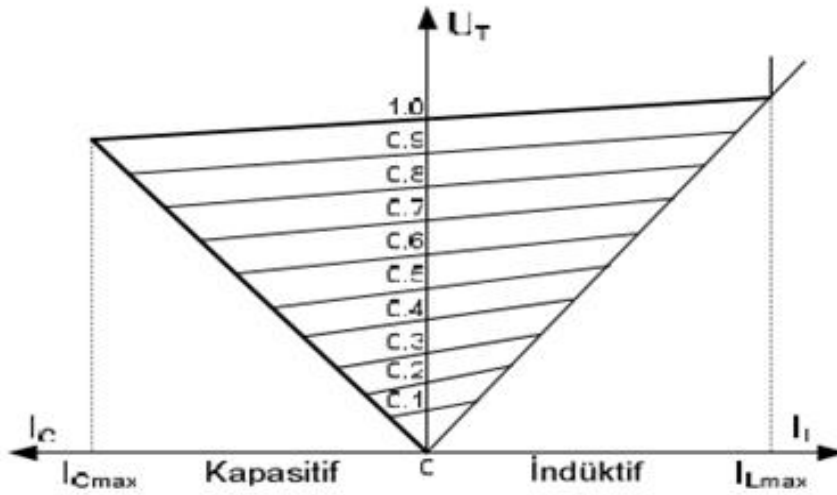
Tristör kontrollü reaktör: paralel reaktörlere seri bağlı iki yönlü tristörden oluşur. Bu tristörler reaktif güç azaltılmasını sağlamak için 90^0 - 180^0 arasındaki uygun herhangi bir değerde anahtarlanabilirler.

Tristör anahtarlama kapasitör: paralel kapasitörlere seri bağlı iki-yönlü tristörden oluşur. Tristör anahtarlama kapasitör anahtarlama ile reaktif güç üretimi tamamen devreye girer veya devreden çıkar [37].



Şekil 3.1. SVC'nin temel yapısı

Şekil 3.2'de SVC'nin akım gerilim karakteristiği gösterilmiştir.



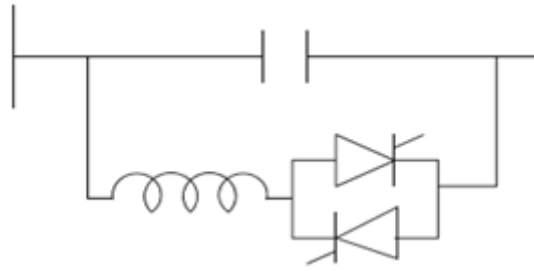
Şekil 3.2. SVC'nin akım gerilim karakteristiği

I_{Cmax} noktasında tüm tristör anahtarlama kapasitörleri devrededir ve SVC nominal kapasitif akımı verir. I_{Lmax} noktasında ise endüktif akımı vermek üzere tristör kontrollü reaktörler tamamen iletimdedir ve tüm tristör anahtarlama kapasitörleri devre dışıdır. Önemli bir generatör veya iletim hattının devre dışı kalmasıyla

oluşacak gerilim sorunları durumunda SVC derhal şebekeye reaktif güç desteği sağlayabilir [37].

3.6.2. Tristör kontrollü seri kompanzatör (TCSC)

Tristör kontrollü seri kompanzatör (TCSC) seri bağlı bir FACTS cihazıdır. İletim hattının taşıma kapasitesini artırmak için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri, seri kapasitör bağlamaktır. Bu şekilde hattın net seri empedansı azaltılarak daha fazla güç iletilmesi sağlanır. Mekanik anahtarlama elemanlarının yavaş anahtarlama hızı ve süreksiz olması bu yöntemin kullanımını sınırlamaktadır. Diğer taraftan, tristör kontrolörler hat kompanzasyonunu hızlı ve sürekli kontrol edebilme imkanı verir [37]. Şekil 3.3'te TCSC'nin temel yapısı gösterilmiştir.



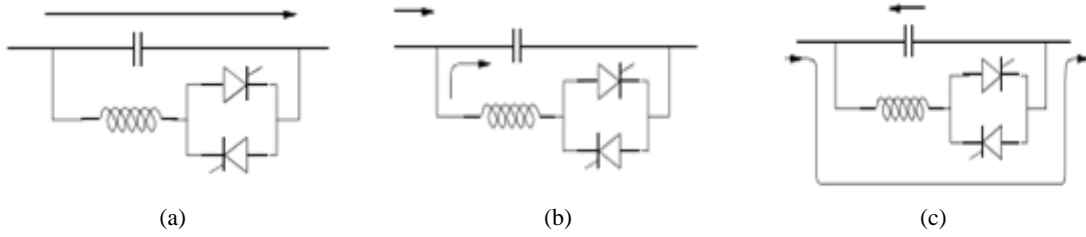
Şekil 3.3. TCSC'nin temel yapısı

Tristör kontrollü reaktörler (TCR) ve bunlara bağlı kondansatör (C) kullanılır. TCSC kullanılarak hattın doğal empedans değeri arttırılabilir.

TCSC üç temel çalışma moda sahiptir:

1. Tristörün tam iletimde olduğu durum (By-pass modu): Bu durumda hat akımının büyük bir kısmı TCR üzerinden akar [34]. Bu durum kapasitörü aşırı gerilime karşı korur [38]. Şekil 3.4 a'da by-pass modu gösterilmiştir.
2. Tristörün devre dışı olduğu durum: TCSC empedansı sadece kapasitör reaktansına eşit olmaktadır. Bu mod aynı zamanda bekleme modu olarak adlandırılır [38].
3. Tristörlerin kısmi olarak iletimde olduğu durum: Burada TCSC kapasitif veya indüktif bölgede çalışabilir. Bu mod tristör tetikleme açılarının sürekli

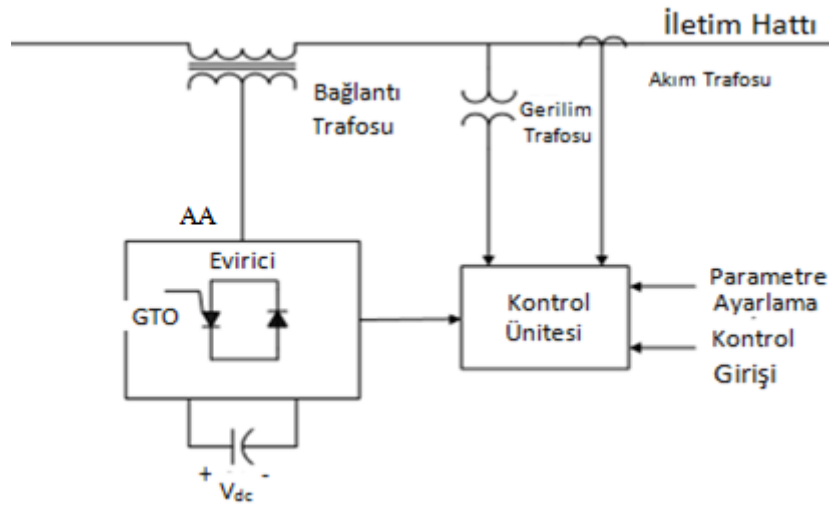
değişimi ile TCSC'nin dinamik çalışmasının sağladığı bir çalışma modudur [34].



Şekil 3.4. TCSC çalışma modları

3.6.3. Statik senkron seri kompanzatör (SSSC)

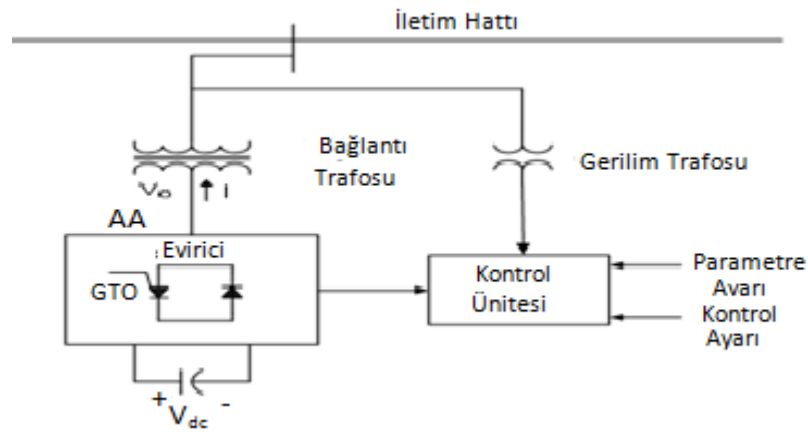
Statik senkron seri kompanzatör (SSSC) büyüklüğü ve faz açısı yarıiletken aygıtlar tarafından hızlı bir şekilde ayarlanabilen, dengeli üç fazlı gerilim üretir ve bunu hatta seri olarak enjekte eder. SSSC ile aktif ve reaktif güç kontrolü mümkündür. Sadece reaktif güç kontrolü için küçük bir DA kondansatör yeterlidir. Ancak aktif güç kontrolü için yeterince büyük bir kondansatör bağlanmalıdır. SSSC, iletim hattına eklendiği gerilimin etkisine göre seri kondansatör veya reaktör olarak görülebilir. Kapasitif çalışma durumlarında iletilen aktif güç artmaktadır. İndüktif çalışma durumlarında ise iletilen aktif güç aynı oranda azalmaktadır. Aynı görevi yapan TCSC'ye göre daha geniş bir kontrol aralığına sahiptir [34]. Şekil 3.5'te SSSC'nin genel yapısı gösterilmiştir [34].



Şekil 3.5. SSSC'nin genel yapısı

3.6.4. Statik senkron kompanzatör (STATCOM)

Statik senkron kompanzatör (STATCOM), iletim hattına paralel olarak bağlanan bir FACTS cihazıdır. Literatürde STATCON veya ASVC (Gelişmiş Statik Var Kompanzatör) olarak adlandırılır [34]. STATCOM en basit haliyle bağlantı transformatörü, gerilim kaynaklı evirici (VSC) ve DA kondansatörden oluşur [34].



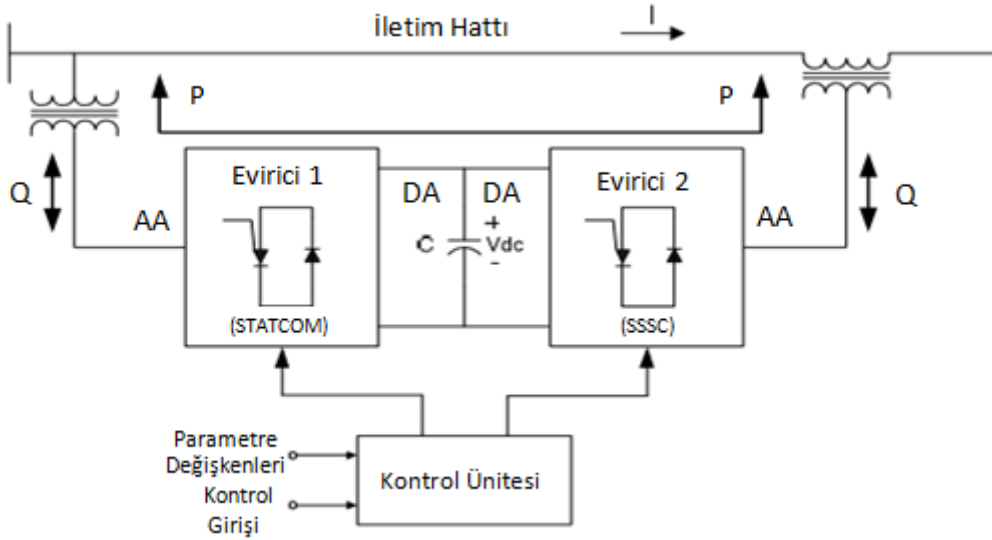
Şekil 3.6. STATCOM 'un yapısı

3.6.5. Birleşik güç akış denetleyicisi (UPFC)

1991'de Laszlo Gyugyi tarafından önerilen UPFC, çok yönlü ve etkili bir FACTS cihazıdır. UPFC alternatif akım (AA) iletim sistemlerinin gerçek-zamanlı kontrolü ve dinamik kompozasyonu için önerilmiştir. UPFC'nin aşırı yüklenmiş hatlar, paralel hatlar arasındaki yük paylaşımı, döngü akış denetimi sistemlerin dinamik ve geçici rejim koşullarında kararlılık denetimi gibi farklı problemlerin çözümünde kullanılması amaçlanmıştır. UPFC'de bir denetim modundan diğerine mekanik olarak geçiş söz konusu değildir. Bu avantaj güç sistemlerindeki değişen koşullara karşı oldukça esnek çalışma olanağı sunmaktadır [34].

UPFC, iletim hatlarına seri olarak bağlanan statik seri senkron kompanzatör (SSSC), paralel bağlanan statik senkron kampanzatör (STATCOM) birleşiminden oluşur. Harici bir elektrik enerjisine ihtiyaç duymadan eş zamanlı aktif ve reaktif güç kompozasyonu sağlar [36].

UPFC iletim hattı empedansını, gerilimi ve faz açısını kontrol edebilir. Aynı zamanda, kuruluşlara sistemdeki gerilimi ve güç akışını kontrol etme imkanı vermekte ve iletim hatlarının termal kapasiteleri ölçüsünde güvenli bir şekilde yüklenmelerini sağlamaktadır [33]. Şekil 3.7’de UPFC’nin genel yapısı verilmiştir [34].



Şekil 3.7. UPFC'nin genel yapısı

3.7. FACTS Cihazlarının Avantajları

1. Çok güvenli sistemler sunar.
2. İletim hatları sürekli hal, geçici hal ve dinamik sınır değerine kadar güvenli bir şekilde yüklenebilmektedir. Böylece sistemin iletim kapasitesi büyük ölçüde artırılabilir [33].
3. FACTS teknolojisi geçici hal kararlılık sınırlarını yükselterek, kısa devre akımlarını ve aşırı yüklenmeleri sınırlayarak, makinelerin ve sistemin elektromekanik salınımlarını sönmüleyerek, sistemin güvenliğini ve güvenilirliğini artırır.
4. Sistemin arıza bakım ve onarımı kolaydır.
5. Daha verimli enerji iletimi sağlar.
6. Mevcut sisteme uyumlu olarak çalışabilir.
7. Çok hızlı kontrol sağlar [39].

3.8. FACTS Cihazlarının Dezavantajları

1. Kullanılan elemanlar pahalı ve malzeme ihtiyacı ülkemiz için ancak ithalatla sağlanabilir.
2. Sistemlerin kuruluşu, dizaynı, bakım ve onarımı yapacak uzman sayısı çok sınırlıdır.
3. Yarı iletken elemanların bir sonucu olarak kontrol sistemlerinde kayıplar oluşur. Bu kayıplar elemanların ısınmasına neden olur.
4. FACTS cihazları yüksek gerilimlerinde kullanıldığında elemanların izolasyonu ve yarı iletken şalterlerin özelliğinden hat ve yük tam olarak birbirinden izole edilemez.
5. FACTS sistemlerin temelini oluşturan yarı iletken elemanların kontrolü için tetikleme işaretine ihtiyaç vardır. Bu tetikleme FACTS uygulamalarında gerekli elektronik devreler ile sağlanmalıdır [39].

3.9. FACTS Cihazlarının Karşılaştırılması

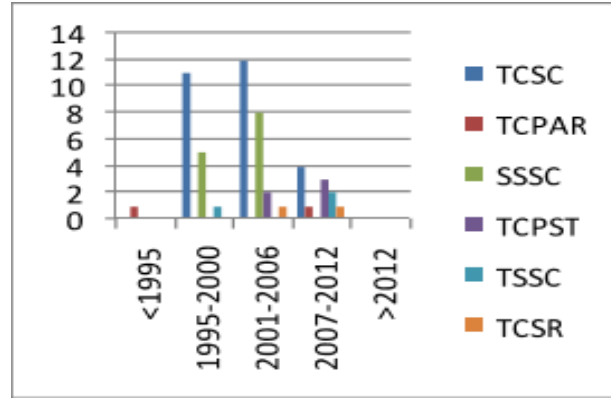
FACTS cihazları kullanıldığı yerlere göre farklılık gösterilir. Kullanılacak FACTS cihazının belirlenmesinde en önemli etken güç kalitesi probleminin belirlenmesidir. Güç kalitesi problemi belirlendikten sonra seçilecek cihazın özellikleri ve maliyeti en önemli sorundur. Problemlerin çözümünde genellikle en az maliyet ve mümkün olan en iyi çözüm belirlenir. Tablo 3.1’de FACTS cihazları teknik bakımından faydalarına göre karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.1. FACTS cihazlarının karşılaştırılması

	Yük Akışı	Gerilim Kontrolü	İletim Kararlılığı	Dinamik Kararlılık
SVC	Normal	Çok İyi	Normal	İyi
STATCOM	Normal	Çok iyi	İyi	İyi
TCSC	İyi	Normal	Çok iyi	İyi
UPFC	Çok iyi	Çok İyi	İyi	İyi

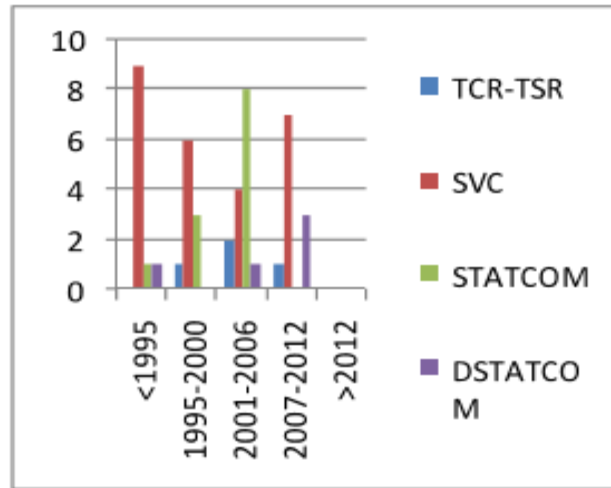
FACTS cihazların kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Cihazların çeşitliliğinin artması ile yıllara göre kullanım oranı değişmektedir. FACTS cihazlarının bağlantılarına göre karşılaştırılması aşağıda yapılmıştır [36].

Seri FACTS cihazlarının yıllara göre karşılaştırılması Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Seri FACTS cihazların karşılaştırılması

Paralel FACTS cihazlarının yıllara göre karşılaştırılması Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Paralel FACTS cihazların karşılaştırılması

BÖLÜM 4. BULANIK MANTIK

4.1. Bulanık Mantık Kavramı

Fiziksel sistemleri matematiksel olarak modellerken, transfer fonksiyonlarını çıkarken, sistemlerin doğrusal ve zamanla değişmeyen sistemler olduğunu kabul ederiz. Oysa doğada doğrusal sistem pek yoktur. Bu kabullenmeyi belirli çalışma bölgeleri etrafında kabul edebiliriz. Bunların dışında matematiksel modelinin çıkarılması oldukça karışık hatta imkânsız çok sayıda matematiksel işlemler ve kabullenmeler gerektirir [40].

Mühendislikte ve diğer bilim dallarında sistemler kesin matematik modelleri kullanarak modellenir. Geleneksel kontrol teorisinde oluşturulan bu modeller yardımıyla güçlü analiz ve iyi çözümler üretilebilir. Fakat sistemin kesin matematik modelinin bilinmediği durumlarda, klasik mantık ya hiç çözüm üretememekte yada istenilen performans sağlayamamaktadır. Klasik mantığın bu gibi durumlarda yetersiz gelmesi ve insan aklının işleyişini yeterince yansıtmaması bilim adamların bulanık mantığın üzerine eğilmesi neden olmuştur. Bulanık mantık ilk kez 1965 yılında Lotfi A. Zadeh tarafından yazılan bir makalede, matematiksel bir düşünce olarak ortaya atılmıştır [41].

Bulanık mantık, insan bilgi tecrübelerinden yararlanarak, bunların kural tabanları halinde işleyip her bir kural tabanının belirli bir matematik fonksiyona karşılık gelecek şekilde sonuç çıkarılmasıdır [40].

Bulanık mantık temel amacı, insanların tam ve kesin olmayan bilgiler ışığında, tutarlı ve doğru kararlar vermelerini sağlayan, düşünme ve karar verme mekanizmalarının modellenmesidir. Temel olarak çok değerli mantık, olasılık, yapay zeka, yapay sinir ağları alanları ile ilişkilidir [41].

4.2. Bulanık Mantığın Tarihçesi

Bulanık mantık 1965 yılında Azerbaycan asıllı bilim adamı Lotfi A. Zadeh tarafından matematiksel modelleme yaklaşımı olarak geliştirilmiştir. Önceleri batı kültüründe kabul görmemiştir. Çünkü “fuzzy” kelimesi belirsizliği ifade eden olumsuz bir anlama sahiptir [40].

Lotfi A. Zadeh 1965 yılına kadar sistem teorisi ve karar teorilerinin analizi üzerine yoğunlaşmıştır, ancak bu yıldan sonra bulanık mantık üzerinde çalışmalarını başlayıp bu mantığın yapay zeka, dil, mantık, karar teorileri, kontrol teorileri ve sinir sistemleri şebekeleri üzerinde olan etkilerini araştırmıştır [40].

1975 yılında Mandani ve Assilian, bir bulanık mantık kontrolünü bulanık mantık sistem modeli ile gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirilen sistem temeli şu ifadeye dayanmaktadır: “Eğer türbin hızı çok hızlı artıyorsa ve basınç da çok düşükse, buhar vanasını biraz aç” türünden kurallardan oluşan bir sistem geliştirilmişlerdir.

Ticari olarak ise ilk defa, 1980 yılında, Danimarka’daki bir çimento fabrikasının işletilmesi ve kontrolünde kullanılmıştır. Bu tarihten itibaren özellikle doğuda (Japonya, Singapur, Kore, Malezya) yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Elektrik süpürgeler, çamaşır makineleri, asansörler, metro ve şirket işletimi gibi konularda bulanık mantık uygulamaları sıklıkla görülmüştür [40].

1985 yılları sonrasında Japonya’da teknolojik ürünlerin geliştirilmesiyle dikkat çekip batı dünyasında önem kazanmıştır.

Hitachi firması tarafından 1987 yılında Sendai Metro’su bulanık mantık temeliyle gerçekleştirilmiştir. Bu sayede trenin istenen konumda durması üç kat daha iyileştirilmiş, kullanılan enerji ise %10 azaltılmıştır [40].

Yamaichi Securities’in geliştirdiği bulanık mantık temelli uzman sistem, 1988 yılının Ekim ayında kara Pazar adlı Tokyo Borsası’nda yaşanan krizin sinyallerini on sekiz gün öncesinden haber vermiştir [40].

Bu kadar başarı uygulamalardan sonra artık bulanık mantığa ilgi daha da artmıştır ve uluslararası bir çalışma ortamı oluşturabilmek amacıyla 1989 yılında aralarında SGS, Thomson, Omron, Hitachi, NCR, IBM, Toshiba ve Matsuhita gibi dünya devlerinde bulunduğu 51 firma tarafından LIFE (Laboratory for Interchange Fuzzy Engineering) laboratuvarları kurulmuştur [40].

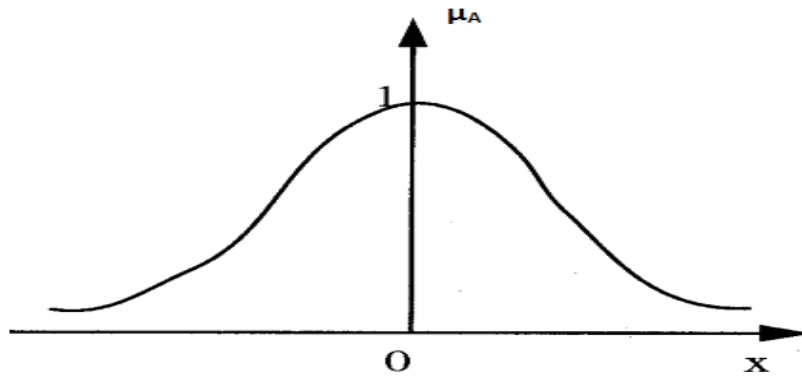
4.3. Bulanık Kümeler

Bulanık kümeler, kullandığımız sözel ifadeleri bilgisayara aktarabilmek için oluşturduğumuz matematiksel modellerdir. Bulanık mantık, bulanık küme teorisine dayanan bir matematiksel disiplindir. Bulanık mantık insan mantığında olduğu gibi, uzun-kısa, sıcak-soğuk, hızlı-yavaş, siyah- beyaz yerine çok uzun- uzun- orta- kısa- çok kısa, sıcak- az sıcak- soğuk- çok soğuk vb. ara değerlere göre çalışmaktadır [40].

Klasik küme teorisinde bir elemanı ele aldığımızda bu elemanı iki farklı kategoride değerlendirmeye alırız (örneğin; iyi-kötü, tek-çift, siyah-beyaz gibi). Ancak hayatta bu iki değerli mantık çoğu uygulamada yeterli değildir. Genellikle bu iki değer arasındaki kesin sınır belirgin değildir.

Klasik küme teorisinde üyelik dereceleri yalnızca 0 ve 1 değerlerini alabilirler. Bir kümenin elemanları o kümeye $[0,1]$ arasında değişen üyelik dereceleri ile o kümeye ait oluyorsa bu kümelere bulanık kümeler denir. Bulanık küme, $[0, 1]$ arasında değerler alan üyelik fonksiyonunu $\mu_A(x)$ tarafından tanımlanır [41].

Örnek; A, sifıra yakın sayılan kümesi olsun. A için mümkün olan üyelik fonksiyonu, $\mu_A(x)=e^{-x^2}$ ise, bu Gaussian fonksiyonunun sıfır değeri için, sifıra yakınlık üyelik fonksiyonu $\mu_A(x)=e^0=1$ 'dir. Gaussian üyelik fonksiyonu Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

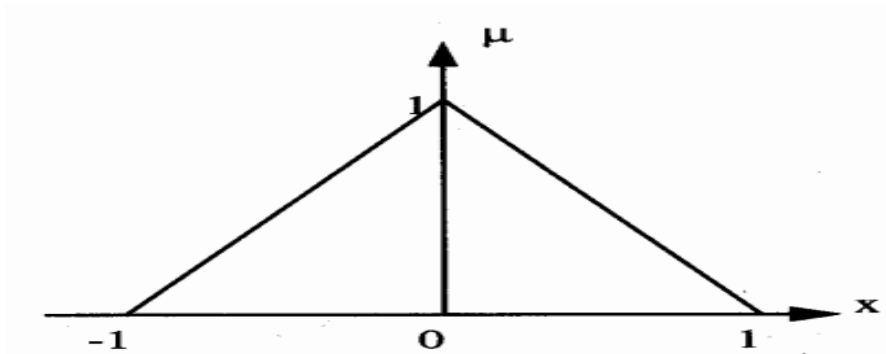


Şekil 4.1. Gaussian üyelik fonksiyonu

A için tanımlanan üyelik fonksiyonu (4.1) ifadesindeki gibi verilebilir.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & , & \text{eğer } x < -1 \\ x + 1 & , & \text{eğer } -1 \leq x < 0 \\ 1 - x & , & \text{eğer } 0 \leq x < 1 \\ 0 & , & \text{eğer } 1 \leq x \end{cases} \quad (4.1)$$

μ_A üyelik fonksiyonuna göre -1 ve 1 arasındaki sayılar 0 ve 1 arasında üyelik derecesine sahiptir. Şekil 4.2'de sıfıra yakın olan sayılar için üçgen üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır [42].



Şekil 4.2. Üçgen üyelik fonksiyonu

Örnekten çıkarılacak önemli sonuçlar aşağıda verilmiştir [42].

1. Örnekte sıfıra yakın sayıları tespit ederken kesin bir tanım yoktur. Bundan dolayı problemi çözerken farklı üyelik fonksiyonları tanımlanabilir. Bununla birlikte üyelik fonksiyonları tek başlarına kesin matematiksel fonksiyonlardır.

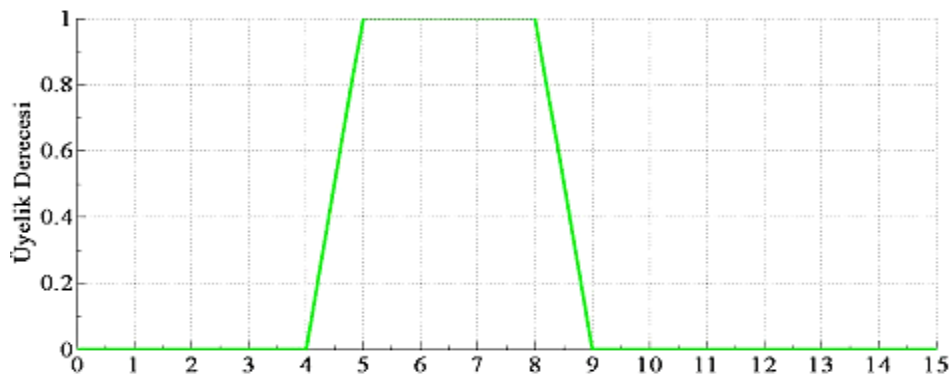
Bir bulanık problem için üyelik fonksiyonu belirlendiği zaman bulanıklık durumu ortadan kalkar.

2. Bulanık bir problemi çözerken üyelik fonksiyonunu tanımlarken iki yöntem vardır. Birinci yöntem; üyelik fonksiyonlarını belirlerken insan tecrübesi ve bilgisinden yararlanmaktadır. İkinci yöntem ise; çeşitli sensörler aracılığıyla toplanan bilgilerden yararlanarak üyelik fonksiyonlarını oluşturmaktır.
3. Bir bulanık küme üyelik fonksiyonu ile bire bir ilişkiye sahiptir. Yani bir bulanık kümeyle ilgili sadece bir üyelik fonksiyonu olmalıdır.

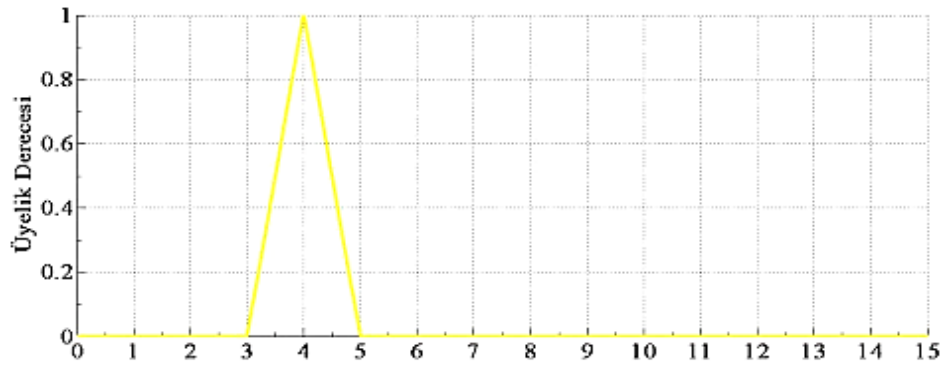
4.4. Temel Bulanık İşlemler

A ve B, üyelik fonksiyonları sırasıyla μ_A ve μ_B olan X evreninde tanımlanmış iki bulanık küme olmak üzere, klasik küme teorisinde tanımlanan işlemler onlar içinde tanımlanabilir. Buna göre $\mu \in X$ için, birleşme, kesişme ve tümlenme işlemi tanımlanabilir.

A ve B aynı tanım uzayında var olan ve üyelik işlevleri sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te olduğu gibi verilen iki bulanık küme olsun. Verilen her iki küme için birleşme, kesişme ve bütünleme işlemleri tanımlanabilir [43].



Şekil 4.3. A kümesinin üyelik fonksiyonu



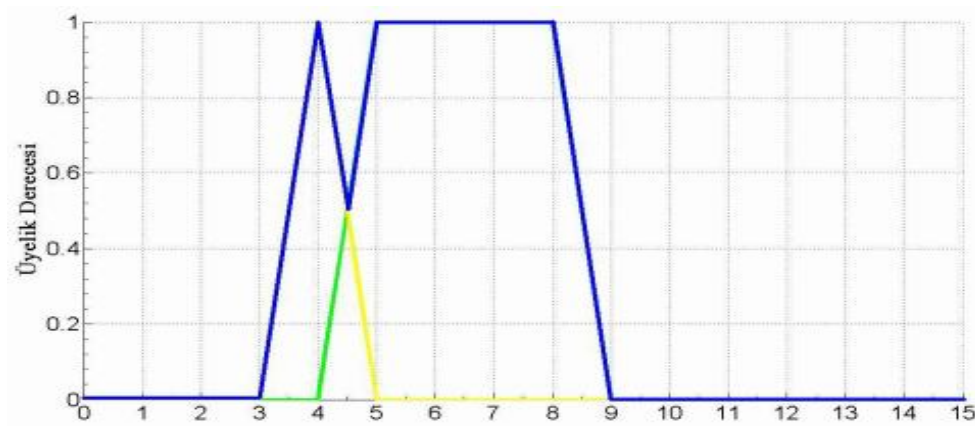
Şekil 4.4. B kümesinin üyelik fonksiyonu

4.4.1. Birleşim (veya) işlemi

Tanımlanan iki kümenin birleşimi her iki kümenin tüm elemanlarının oluşturduğu kümedir. Tanımlanan A ve B kümelerinin birleşimi Şekil 4.5'te mavi çizgiyle gösterilmiştir.

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \quad (4.2)$$

Burada tanımlanan min işlemi A ve B kümelerindeki elemanların birebir karşılaştırılması ve üyelik işlevinin değeri en büyük olanının değerinin kesişim kümesine atılmasıdır [43].

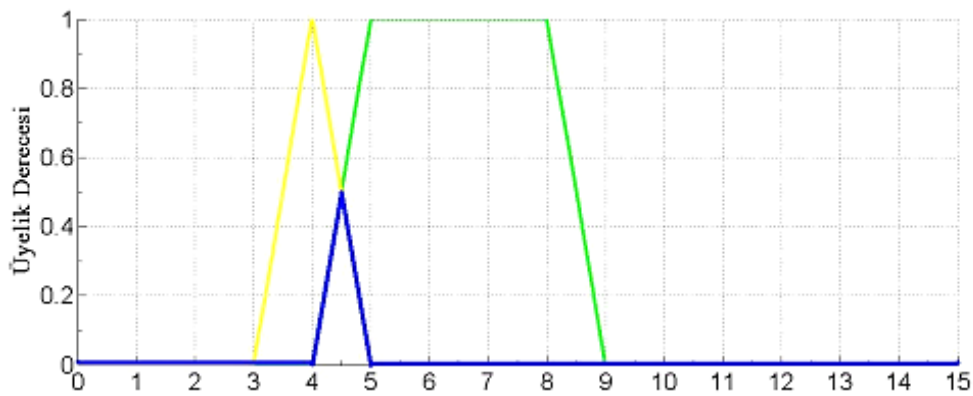


Şekil 4.5. Kesişim işlemi

4.4.2. Kesişim (ve) işlemi

Tanımlanan iki kümenin kesişimi her iki kümede de olan ortak elemanlarının oluşturduğu kümedir. Tanımlanan A ve B kümelerinin kesişimi Şekil 4.6'da mavi çizgiyle gösterilmiştir.

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \quad (4.3)$$



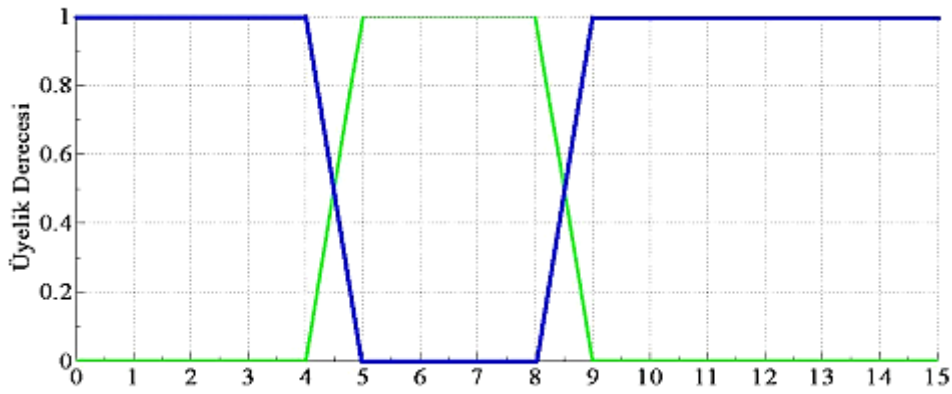
Şekil 4.6. Kesişim İşlemi

Burada tanımlanan min işlemi A ve B kümelerindeki elemanların birebir karşılaştırılması ve üyelik işlevinin değeri en az olanının değerinin kesişim kümesine atılmasıdır [43].

4.4.3. Tümleme (\bar{A}) işlemi

Tanımlanan bir A bulanık kümesinin tümlenyeni, o kümenin tüm elemanlarının sırasıyla 1'e tamamlamasıyla oluşturulan yeni kümedir. Yeni kümenin üyelik fonksiyonu A kümesinin üyelik fonksiyonunun 1'den çıkarılmasıyla elde edilir. A kümesinin tümlenyeni Şekil 4.7'de mavi renk ile gösterilmiştir.

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4.4)$$



Şekil 4.7. Tümlleme işlemi

4.5. Dilsel Değişkenler

Bulanık kümelerin yapay zeka alanında önemli uygulamalardan biri dilsel hesaplamalardır. Burada amaç kesin rakamların yerine günlük dildeki ifadeleri kullanarak hesaplamaların yapılabilmesidir. “Bu gün hava çok sıcaktır.” cümlesinde “Bugünün hava sıcaklığı” bir değişken ve “çok” onun değeri olarak ele alınır. “Hava sıcaklığı” değişkeni rakam olarak 25 °C, 30 °C vs. değerler aldığıında bu değişkeni matematiksel olarak işlemek için iyi yöntemler mevcuttur. Fakat değişken değerini rakam olarak değil de kelime (“çok”) olarak ele aldığımızda bu değişkeni işlemek klasik matematiksel mevcut değildir. Böyle bir ifadeden yararlanmak için dilsel değişkenler kavramından yararlanır. Tablo 4.1’de bazı dilsel değişkenler ve bunların tipik değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Bazı dilsel değişkenler ve bunların tipik değerleri

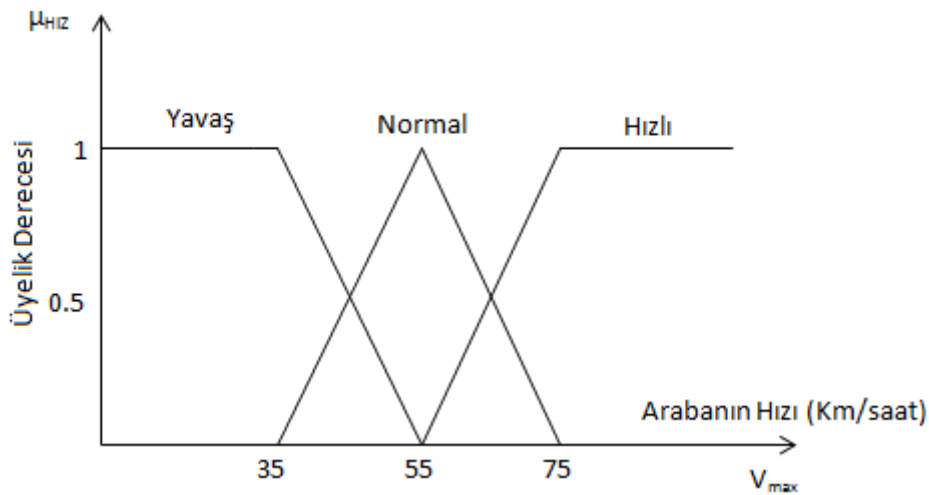
Dilsel Değişkenler	Tipik Değerler
Sıcaklık	Az, normal, çok
Sayı	Birkaç, az, çok
Yaş	Bebek, genç, yaşlı
Renk	Beyaz, siyah, kırmızı, mavi, yeşil
Hız	Yavaş, orta, hızlı

Dilsel bir değişken $(X, T(x), U, M)$ değerleriyle karakterize edilebilir [42].

1. X = Dilsel değişkenin ismini tanımlar.
2. $T(x)$ = x değişkeninin terim kümesidir. X değişkeninin alabileceği, dilsel değişkenlerin isimlerinden oluşan kümedir. Bu kümedeki her bir değer bulanık bir sayıdır. $T=\{yavaş, orta, hızlı\}$ olarak tanımlanabilir.
3. U = Dilsel değişken X 'in gerçek fiziksel olarak bulunduğu aralığı tanımlar. $U=[0, V_{max}]$ olarak tanımlanabilir.
4. M = Bulanık küme U ile dilsel değişken T 'yi birbirine bağlayan kurallardan oluşur.

Bu ifadelerin kullanıldığı bir örnek olarak bir arabanın hızının değişimini örnek alalım. Dilsel değişken olarak X 'i hız olarak adlandırırız. Dilsel değişkenin terim kümesi $T(Hız)=\{Yavaş, Normal, Hızlı\}$ olarak tanımlanabilir.

$T(Hız)$ 'daki her bir terim $U=[0,100]$ evreninde tanımlanmış bir bulanık küme ile karakterize edilebilir. “Yavaş” terimi 35 km/saat altını, “Normal” terimi 55 km/saat civarını, “Hızlı” terimi de 75 km/saat üstünü temsil etmek üzere bu terimleri bulanık küme olarak Şekil 4.8'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 4.8. Bir arabanın hız değişiminin dilsel değişimi

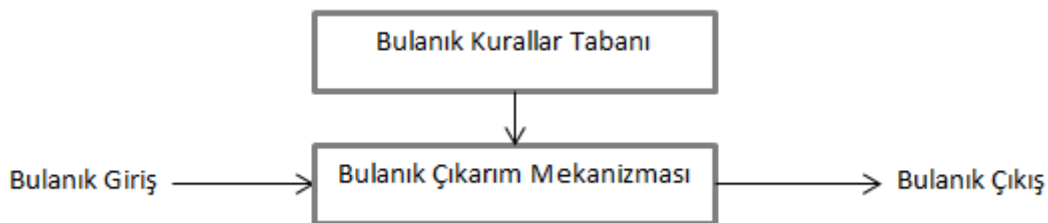
4.6. Bulanık Sistem

Bulanık kümeler ve bulanık mantık teorisinin en etkin uygulama alanı kontrol sistemleridir. Geleneksel kontrol sistemleri bulanık teorisinin yardımıyla bulanık kontrol sistemine dönüştürülebilir. Bulanık sistemler matematiksel modeli tam olarak elde edilemeyen, çok parametrelili ve doğrusal olmayan süreçlere uygulanmaktadır. Bulanık sistemler genelde bilgiye dayalı ve kurala dayalı sistemlerdir. Bulanık sistemlerde uzman bilgisine başvurulmaktadır. Uzman bilgisi dilsel “Eğer- O Halde” kuralları haline getirilir ve bulanık mantık algoritmasında kullanılır. Eğer uzman bilgisine ulaşamıyorsa bulanık kurallar tabanını oluşturmak için; varsa matematiksel model, simülasyonlar, sürecin bulanık modeli ve çeşitli öğrenme algoritmaları kullanılır [41].

Genelde üç tip bulanık sistemden söz edilmektedir.

1. Temiz bulanık sistemler
2. Bulandırıcı ve durulayıcı sistemler
3. Takagi-Sugeno-Kang (TSK) bulanık sistemler

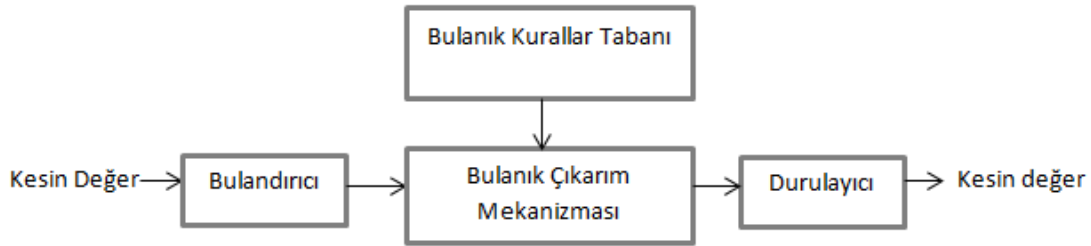
Temiz bulanık sistemlerde sistemin giriş ve çıkışları bulanıktır. Bulanık çıkarım mekanizması bulanık girişlere uygun kuralları bulanık kurallar tabanından alarak bulanık sonuçlar üretir. Temiz bulanık sistemlerin temel şeması Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Temiz bulanık sistemlerin temel şeması

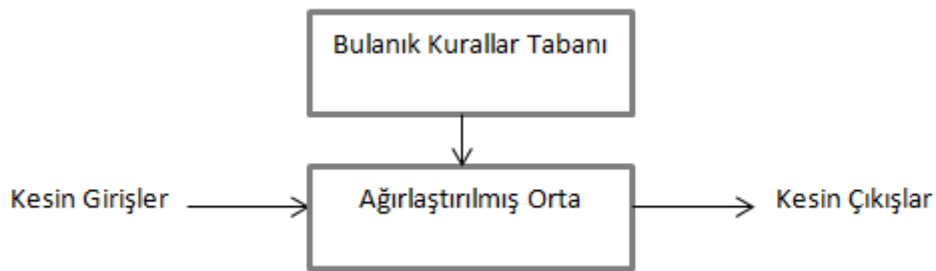
Temiz bulanık sistemlerde giriş ve çıkış değerleri dilsel olarak kullanılmaktadır, ancak gerçek sistemlerde bu değerler kesindir. Bu dezavantajı kaldırmak için sisteme

girişteki kesin değerleri bulanık değerlere dönüştüren bulandırıcı ve çıkıştaki bulanık değerleri kesin değerlere dönüştüren durulayıcı uygun olarak sistemin girişine ve çıkışına ilave edilir. Elde edilen sistem bulandırıcı ve durulayıcı sistem olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.10'da bulandırıcı ve durulayıcı sistemin temel şeması gösterilmiştir.



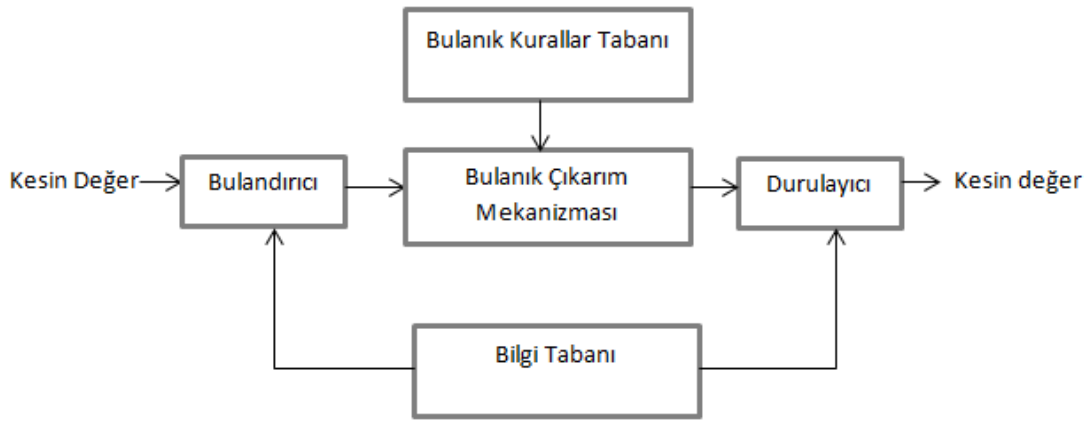
Şekil 4.10. Bulandırıcı ve durulayıcı sistemin temel şeması

Bulanık sistemlerin Takagi-Sugeno-Kang (TSK) modelinde giriş ve çıkış kesin değerlerdir. Bu modelde bulanık çıkarım mekanizması yerine ağırlaştırılmış orta kullanılır. Burada kullanılan ağırlaştırılmış orta eğer - o halde kuralının o halde kısmında çoğu zaman bir matematiksel formül kullanılır. Böyle bir kullanım ise bulanık mantığın çeşitli kurallarının uygulanmasını zorlaştırmıştır. Bu yüzden Takagi-Sugeno-Kang (TSK) modelinin uygulama alanı kısıtlıdır. Şekil 4.11'de TSK sisteminin temel şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Takagi-Sugeno-Kang (TSK) modelinin temel şeması

Tanımlanan sistemler içerisinde en yaygın kullanılan bulandırıcı ve durulayıcı sistemlerdir. Bu sistemde tanımlanan her bir bloğun ayrı ve özel görevi vardır. Şekil 4.12'de bir bulanık sistemin genel bir şeması verilmiştir.



Şekil 4.12. Bulanık denetim sistemi

4.6.1. Bulandırıcı

Bu bölüm giriş değişkenlerini ölçer, bulanık değişkenlere dönüştürülmesi işlemi yapar. Bu değişkenler bulanık denetleyicide bulanık kümeler tarafından tanımlanmaktadır. Bu aynı zamanda bulanıklaştırma giriş değişkenlerinin ve çıkış değişkenlerinin ilgili bulanık kümelere yerleştirme işlemidir. Bulanık mantıkta veri işleme işlemi bulanık kümeler üzerine kurulu olduğu için bulandırıcı kısmı başlangıç kısmında zorunludur. Girişte yapılan bulanıklaştırma işlemi evrensel kümenin birçok bulanık kümeyle incelenmesi sonucunu doğurur. Niceleme seviyesinin sayısı yeterli temsili sağlayacak kadar çok ve hafızadan tasarruf edecek kadar az olmalıdır. Çok sıcak, sıcak, az sıcak, normal, serin, soğuk gibi bir niceleme oranı yeterli bir oran olarak örnek verilebilir. Her bir bulanık alt küme için ayrı üyelik fonksiyonu atanmalıdır. Üyelik fonksiyonlarının türü yapılan uygulamaya göre değişiklik gösterilebilir. Üyelik işlevleri çok iç içe geçerse bulanıklık artacağından dolayı denetim zorlaşır diğer taraftan hiç birbirlerine geçmezler ise bu sefer iki değerli bir denetim söz konusu olacaktır [43].

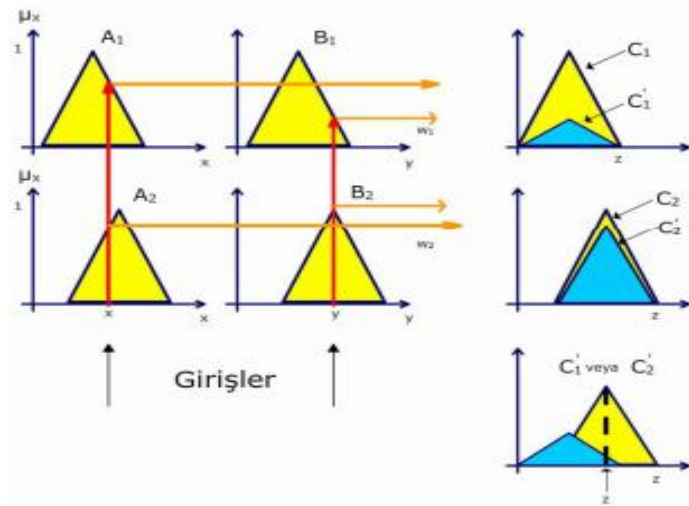
4.6.2. Çıkarım mekanizması

Çıkarım mekanizması bulandırıcıdan sonra gelen ikinci adımdır. Bu bölüm insanın çıkarım yapma ve karar verme yeteneğinin kullanıldığı kısımdır. Bulandırıcı adımında elde edilen üyelik fonksiyonları ile kural tabanında hangi kuralların kullanılacağı bulunur ve çıkarım işlemi yapılır. Çıkarım işleminde yaygın olarak 4

farklı çıkarım tekniği kullanılır. Bunlar; Max-Dot, Min-Max, Tsukamoto ve Takagi-Sugeno çıkarım teknikleridir [44].

4.6.2.1. Max-Dot çıkarım

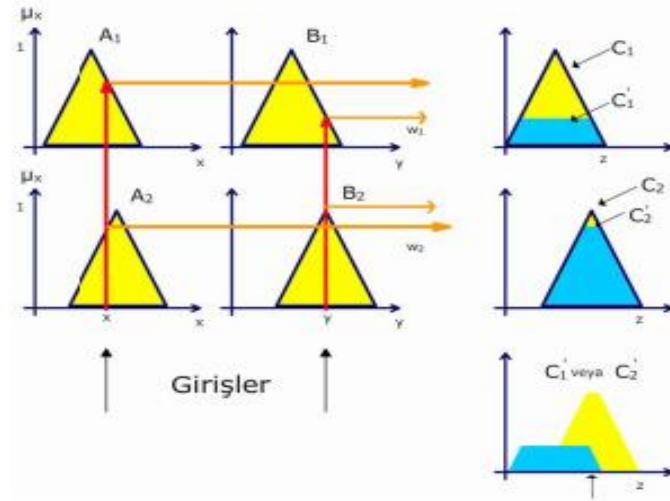
Her bir giriş değeri, ait olduğu üyelik fonksiyonundaki üyelik derecesine bağlı olarak ilgili bulanık kümeyi yeniden ölçeklendirir. Çıkış değeri, ölçeklenmiş bu kümeler içerisindeki maksimum değer alınarak bulunur. Şekil 4.13'te Max-Dot çıkarım tekniğine ait üyelik fonksiyon grafikleri verilmiştir [44].



Şekil 4.13. Max- Dot çıkarım tekniği

4.6.2.2. Min-Max çıkarım

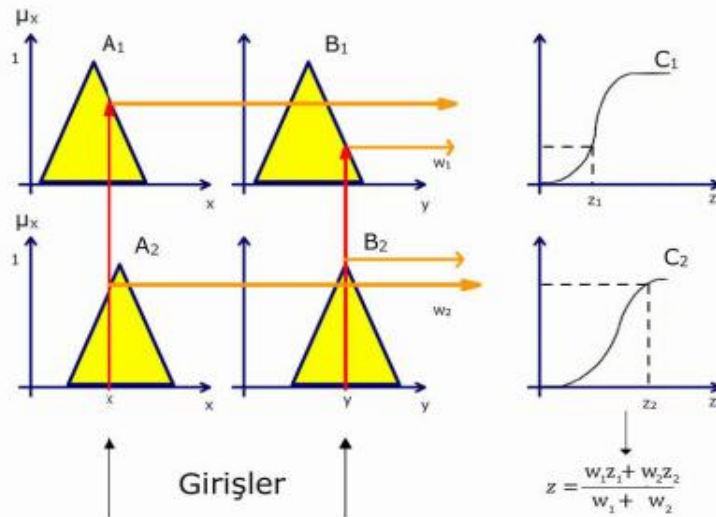
Her bir giriş değeri için ait olduğu üyelik fonksiyonundaki üyelik derecelerine bağlı olarak ilgili bulanık kümenin üyelik değerleri üstündeki kısmı kesilir. Bu metotta Mamdani'nin minimum operatörü kullanılır. Şekil 4.14'te Min-Max çıkarım tekniğine ait üyelik fonksiyon grafikleri verilmiştir [44].



Şekil 4.14. Min- Max çıkarım tekniği

4.6.2.3. Tsukamoto çıkarım

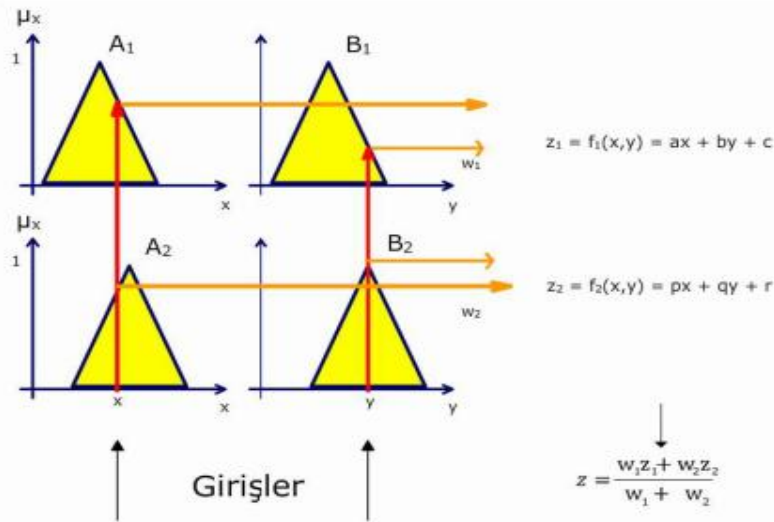
Bu çıkarım tekniğinde çıkış üyelik fonksiyonu tek yönlü artan bir fonksiyon olarak artan bir fonksiyon olarak seçilir. Çıkış değeri ise her bir kuralın kesin çıkış değerinin ağırlık ortalaması alınarak bulunur. Şekil 4.15'te Tsukamoto çıkarım tekniğine ait üyelik fonksiyon grafikleri verilmiştir [44].



Şekil 4.15. Tsukamoto çıkarım tekniği

4.6.2.4. Takagi-Sugeno çıkarım

Her bir kuralın çıkış giriş değerlerinin doğrusal birleşmesiyle bulunur. Keskin çıkış değeri ise ağırlık ortalaması alınarak bulunur. Takagi- Sugeno çıkarım Şekil 4.16'da gösterilmiştir [44].



Şekil 4.16. Takagi- Sugeno çıkarım tekniği

4.6.3. Bilgi tabanı

Sistemin bilgi tabanı, veri tabanı ve kural tabanını içerisinde barındırır. Buradaki veri tabanının görevi sistemin doğru çalışması için gerekli bilgileri sağlamaktır. Bu bilgiler giriş ve çıkış değişkenlerinin üyelik fonksiyonlarının sözel değerlerinin anlamları, ölçeklendirme ve bulanık kümelerin üyeli fonksiyonlarının tipleri gibi bilgilerdir. Çıkarım mekanizması burada bulunan üyelik işlevlerini kullanarak sonuca ulaşır [43].

4.6.4. Kural tabanı

Kontrol amacını gerçekleştirmek amacıyla kuralların oluşturulduğu bölümdür. Sözel yaklaşımda, denetlenen sistemin dinamik özelliklerinin sözel tanımı sistemin bulanık modeli olarak görülebilir. Bulanık modele göre, dinamik bir sistemin en iyi performansına ulaşması için bir grup bulanık denetim kuralları oluşturulabilir.

Bulanık denetim kurallarında oluşan grup, bulanık mantık denetiminin kural tabanını oluşturur. Kural tabanının temel amacı uzman bilgilerini sebep-sonuç ilişkisi içerisinde gösterebilmektir [43].

4.6.5. Durulayıcı

Bulanık çıkarım biriminin çıkışı bulanık bir kümedir. Bu sonucun tekrar sisteme uygulanması için sayısal bir değere dönüştürülmesi gerekir. Durulaştırma adımında karar verme adımından gelen bulanık bilgiden bulanık olmayan ve denetlenen sisteme uygulanacak gerçek değer elde edilir. Durulaştırma adımında sık kullanılan 4 teknik vardır. Bunlar; maksimum üyelik, ağırlık merkezi, ağırlık ortalaması ve maksimumların ortalaması tekniğidir [44].

4.7. Bulanık Kontrol Tipleri

Bulanık mantık kontrol kuralları durum değerlendiren ve amaç değerlendiren kontrol kuralları olmak üzere ikiye ayrılır.

4.7.1. Durum değerlendiren bulanık kontrol kuralları

Bulanık mantık kontrolü oluşturulurken genellikle durum değerlendirme kontrol kuralları ile oluşturulur. Çok girişli ve çok çıkışlı bir sistem için aşağıdaki şekilde ifade edilir [41].

R_1 : EĞER $x=A_1$ ve $y=B_1$ ise O HALDE $z=C_1$

R_2 : EĞER $x=A_2$ ve $y=B_2$ ise O HALDE $z=C_2$

.. .. .

R_n : EĞER $x=A_n$ ve $y=B_n$ ise O HALDE $z=C_n$

x,y : durum değişkenlerini ifade eden dilsel değişkenler

z : kontrol değişkenini ifade eden dilsel değişken,

A_i, B_i, C_i : x, y ve z değişkenlerinin dilsel değerleri ($i=1,2,3,\dots,n$)

Genel gösterimde sonuç, durum değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilir.

$$R_i : \text{EĞER } x=A_i \text{ ve } y=B_i \text{ ise O HALDE } z=f_i(x,\dots,y)$$

Bu tipe durum değerlendiren bulanık denetim kuralları denir.

4.7.2. Amaç değerlendiren bulanık kontrol kuralları

Kurallar deneyimli bir uzmanın tecrübesinden yararlanılarak oluşturulur. (4.5) ifadesinde gösterildiği gibi kurallar oluşturulur.

$$R_i : \text{EĞER } (V; C_i \rightarrow (x; A_i \text{ ve } y; B_i)) \text{ ise O HALDE } V=C_i \quad (4.5)$$

(4.5) ifadesi dilsel olarak; EĞER $x; A_i$ ve $y; B_i$ ise O HALDE kontrol komutu C_i seçilir. Bunun sonucunda C_i kontrol komutu bir kontrolörün çıkışı olarak alınır. Daha karmaşık olmasına rağmen bu yöntem trenlerin ve vinçlerin otomatik kontrolünde başarıyla uygulanmaktadır [41].

4.8. Kural Tabanının Oluşturulması

Bulanık mantık denetleyicisi tasarlanması aşamasında sistemin matematiksel modelinden ziyade o sistemi kullanan operatörün sistem davranışı konusundaki bilgisi daha önemlidir. Tasarım sırasında genellikle bu tür uzman bilgisinden yararlanılır. Böyle bir yaklaşım, uzun yıllar boyunca edinilmiş tecrübenin denetleyici içerisine kolayca yerleştirilmesini sağlar [43].

Bulanık kontrol kurallarının oluşturulmasında yaygın olarak kullanılan yöntemler aşağıda verilmiştir. Etkin bir yöntem oluşturmak için bu yöntemler birleştirilebilir.

1. Uzman tecrübesi ve kontrol mühendisliği bilgisinden yararlanmak.
2. Operatörün kontrol hareketlerinin modellenmesi.
3. Sürecin bir bulanık modelini oluşturmak.
4. Öğrenme.

4.8.1. Uzman tecrübesi ve kontrol mühendisliği bilgisi

Bulanık kontrol kuralları bulanık durum ifadeleri şeklindedir. Kuralların neden kısmı, durum değişkenlerinden; sonuç kısmı ise bulanık mantık kontrolörün kontrol çıkışında oluşur. Bulanık mantık kuralları, insan davranış ve karar analizinin karakterize edilmesi için doğal bir çalışma çerçevesi sağlar. Dolayısıyla bir süreçteki uzmanın veya operatörün bilgilerinden ve deneyimlerinden yararlanma açısından bulanık mantık kontrol yapısı çok uygundur [42].

4.8.2. Operatörün kontrol hareketlerini modellemesi

Yetenekli insan operatörleri herhangi bir matematiksel model olmadan başarılı bir şekilde karmaşık sistemleri kontrol edebilirler ve bunu yaparken bilinçsiz olarak birçok bulanık kontrol kuralından yararlanırlar. Bu açıdan bakıldığında operatörün uyguladığı kuralları, bulanık kontrol kuralları olarak oluşturmak faydalı olacaktır [42].

4.8.3. Sürecin bir bulanık modelini oluşturmak

Kontrol edilen sistemin dinamik özelliklerinin dilsel olarak tanımlanmasına dayanır. Böyle bir tanımlamaya sürecin bulanık mantık modeli oluşturulur. Elde edilen bulanık modele göre kontrol kuralları üretilir. Bu yöntem daha karmaşık olmasına rağmen iyi performans sağlamaktadır ama geliştirilmeye ihtiyacı vardır [42].

4.8.4. Öğrenme

Birçok bulanık mantık sistemi, insan karar verme davranışını taklit etmek için oluşturulmuştur. Fakat birkaçı insan öğrenmesi üzerine yoğunlaştı. Bu sistemlerde, bulanık kontrol kurallarını oluşturma yeteneği ve deneyimine dayalı olanları değiştirme yeteneği gibi kendi kendini organize eden kontrolör tanımlandı. Bu öğrenme modeline verilebilecek bir örnek; Sugeno'nun bulanık mantık kontrollü otomobilidir. Sugeno'nun tasarladığı bu otomobil kendi kendine park etmeyi öğrenebilmektedir [41, 42].

4.9. Bulanık Mantığın Avantajları

Gün geçtikçe uygulama alanı artan bulanık mantık teorisi birçok avantaja sahiptir. Bunlardan bazıları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

1. Sistemin matematik modelinin çıkarılması çok güç olduğu durumlarda en önemli bilgiler iki kaynaktan gelir. Bunların biri sensörler ki bunlar durum değişkenlerinin sayısal değerlerini gösterirler. Diğeri ise operatör deyimleridir ki bunlarda sistem hakkında operatörün dilsel tanımlamaları ve kontrol talimatlarını içerirler. Bulanık kontrol bu bilgilerden yararlanırken klasik kontrol bu bilgilerden faydalanmaz.
2. Bulanık kontrol, serbest model yaklaşımına dayanır. Kontrol edilecek sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duymaz. Günümüzde çok karmaşık sistemlerle karşı karşıya kalındığı düşünülürse, serbest model yaklaşımı da oldukça artan bir öneme sahiptir [41].
3. Anlaşılması kolaydır. Çünkü bulanık kontrol insanın kontrol stratejisini taklit eder.
4. Gerçekleştirilmesi basittir ve çok sayıda paralel işleme izin verir.
5. Diğer sistemlere göre yazılımları basit olduğundan, uygulamalar ucuza mal olmakta ve yapılan işler basitleşmektedir. Bu yüzden bulanık kontrol yüksek performans /maliyet oranına sahip bir yaklaşımdır [41].
6. Bulanık mantık anlaşılması kolay temellere sahiptir. Yaklaşımı karmaşık olmaktan ziyade daha doğal ve temelindeki matematik oldukça basittir.
7. Bulanık mantık esnek olmasından dolayı sisteme herhangi bir seviyede eklenebilir.
8. Sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duymadığından çok karmaşık, doğrusal olmayan sistemleri bile modelleyebilir.
9. Doğrudan kullanıcı girişlerine ve kullanıcının deneyimlerinden yararlanabilmesine imkân tanır.
10. Konuşma diline yakın olmasından dolayı anlaşılması kolay olan bir sistemdir.
11. Günlük hayatta olduğu gibi belirsiz, zamanla değişen, karmaşık, iyi tanımlanmamış sistemlerin denetimine basit çözümler getirir [43].

4.10. Bulanık Mantığın Dezavantajları

1. Kuralların uygun şekilde belirlenmesi için uzman deneyimine ihtiyaç duyar. Kuralları ve üyelikleri tanımlamak kolay olmayabilir.
2. Üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde kesin sonuç veren bir yöntem ve öğrenme yeteneği yoktur. En uygun yöntem deneme yanılmadır. Bu sebepten uzun zaman gerektirebilir.
3. Kararlılık, gözetlenebilme ve denetlenebilme analizinin yapılamaması bu yöntemin en temel sorunudur [40]. Günümüzde bu sadece pahalı deneyimlerle mümkün olmaktadır. Bulanık mantık yaklaşımında üyelik işlevlerinin değişkenleri incelenen sisteme özeldir, başka sistemlere uyarlanması çok zordur. Bunun yanı sıra en sık belirtilen dezavantajları ise üyelik işlemlerinin ayarlanmasının uzun zaman alması ve öğrenme yeteneğinin olmamasıdır.
4. Kararlılık analizinin yapılması zorlaşmaktadır.

BÖLÜM 5. FİLTRELER

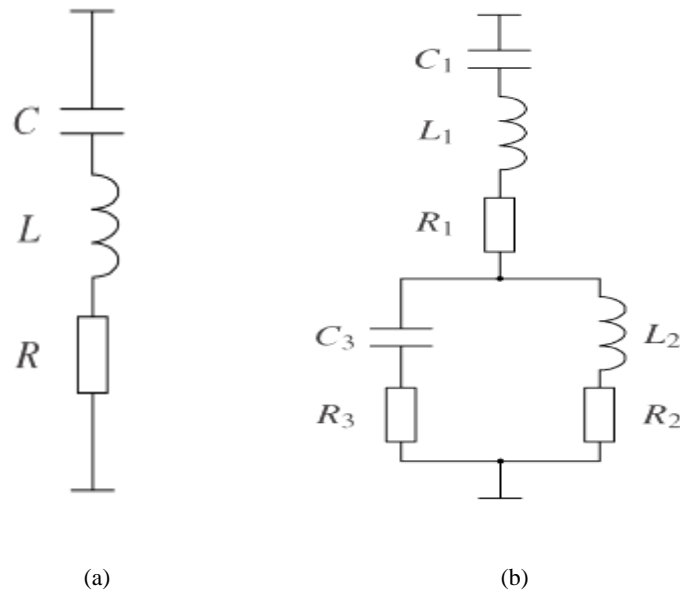
5.1. Pasif Filtreler

Pasif filtreler, harmonikleri gidermek için kullanılan geleneksel bir yöntemdir. Bir pasif filtre kondansatör, endüktans ve direnç kullanılarak elde edilebilir.

Pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa girecek kondansatör ve endüktans değerlerini belirlemektir. Her bir harmonik bileşen için onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre kolu gereklidir. Pasif filtreler, belirlenen harmonikler için düşük empedans yolu sağlar ve bunun sonucunda temel yük akımı dışındaki harmonikli akımları yok eder [45].

Pasif filtrelerin tasarlanmasında filtre kalite faktörü (Q) önemlidir. Filtre kalite faktörü pasif filtrenin keskinliğinin ayarlanmasına yardımcı olur. Q kalite faktörüne göre filtreler yüksek ve düşük kalite faktörüne sahip olması bakımından ikiye ayrılır. Genellikle yüksek filtre kalite faktörü değeri (Q) 20 ile 100 arasında bir değere sahiptir. Düşük filtre kalite faktörü değeri ise 0.5 ile 5 arasında bir değere sahiptir [45].

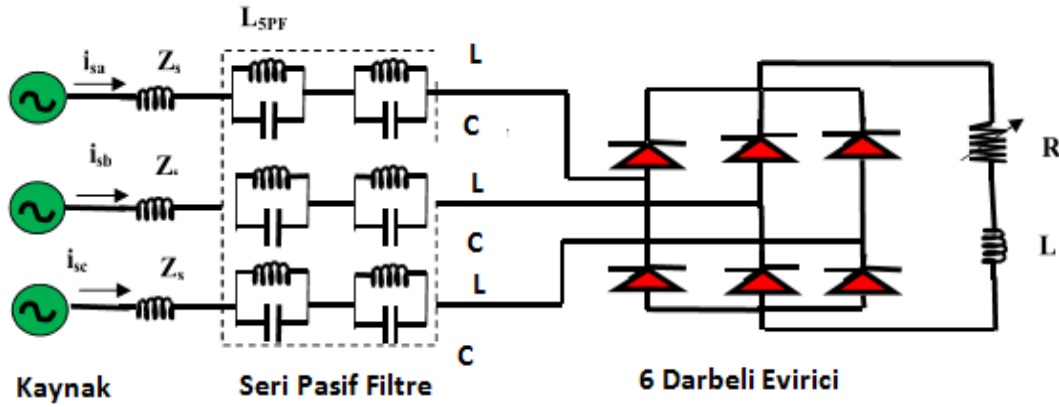
Yüksek Q kalite faktörüne sahip filtreler, düşük harmonik frekanslardan birine ayarlanır ve düşük dereceli harmonikleri (3., 5., 7., 9., 11., 13. harmonikler gibi) gidermek için kullanılır. Bu tür filtreler tek ayarlı filtre devresi olarak verilir. Düşük Q kalite faktörüne sahip filtreler ise geniş bir frekans aralığında düşük empedansa sahiptir ve yüksek derece harmonikleri gidermek için kullanılır. Bu filtreler için çift ayarlı filtre devresi olarak adlandırılır. Genellikle 17. ve sonraki harmonikler ikinci dereceden sönümlü filtreler ile giderilir. Şekil 5.1'de tek ayarlı filtre devresi ve çift ayarlı filtre devresi gösterilmiştir [45].



Şekil 5.1. a) Tek ayarlı filtre b) Çift ayarlı filtre

5.1.1. Seri pasif filtreler

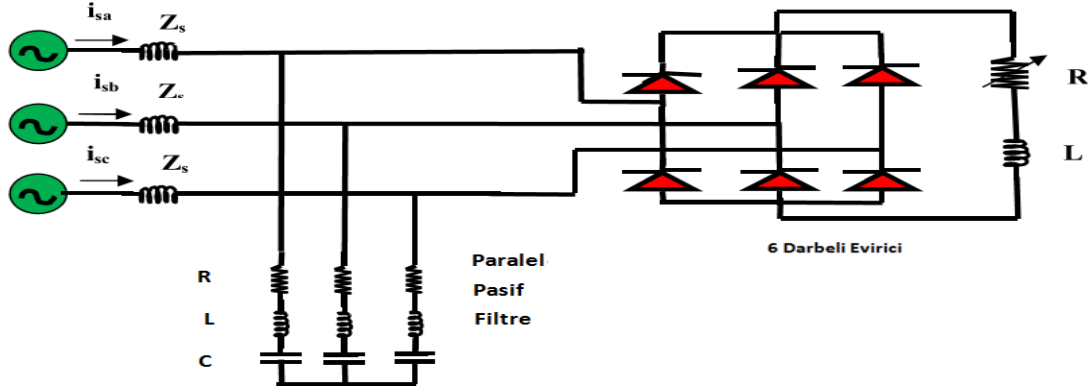
Sistemde istenmeyen harmonik bileşen akımları yok etmek için yüksek bir seri empedansın kullanımı ile sistemde harmonik akımların akması engellenir. Seri filtreler, harmonik kaynağıyla şebeke arasına seri olarak bağlanır ve harmonik akışına yüksek empedans gösterir. Bundan dolayı pasif filtrelerin ayarlanmış olduğu frekansta yüksek empedans vardır. Seri filtreler belirli frekansa ayarlandığı için, sadece o frekans bileşenine yüksek empedans, temel frekansa düşük empedans gösterirler. Seri pasif filtre için en önemli devre elemanı endüktanstır. Seri filtreler aynı zamanda yük akımının hepsini taşımak zorundadırlar ve bu yüzden yüksek gerilim hatlarında gerilim bozulmalarına ve harmonik gerilim düşümlerine sebep olurlar. Seri pasif filtreleri rezonansa neden olmamaları en büyük avantajıdır. Şekil 5.2’de harmonikleri gidermek için seri pasif filtre kullanımı gösterilmiştir [46].



Şekil 5.2. Seri pasif filtre

5.1.2. Paralel pasif filtreler

İstenmeyen harmonik bileşen akımları düşük empedanslı bir yol yardımıyla toprağa aktarılarak sistemde dolaşmaları engellenir. Harmonik kaynağıyla şebeke arasına paralel bağlanır. Bu tip filtrelerde amaç; düşük bir paralel empedans yoluyla istenmeyen harmonik akımların filtre üzerinden geçmesini sağlamaktır. Bu nedenle paralel filtreler harmonik akımlarına çok düşük bir empedans göstermek için tasarlanırlar. Ayrıca paralel filtreler, temel frekansta reaktif güç sağlayarak güç katsayısının düzeltilmesinde kullanılırlar. Paralel pasif filtrenin en büyük özellikleri tasarımları kolay ve maliyetlerinin düşük olmasıdır. Paralel pasif filtrelerin en büyük sorunu, güç sistemi ile rezonansa girmesidir. Filtre elemanları mevcut şebeke empedansı ile birbirini etkileyerek rezonans gerçekleşebilir. Bundan dolayı paralel pasif filtre tasarımında, uygulanacağı mevcut güç sistemi ayrıntılı olarak incelenmelidir. Paralel pasif filtrelerinin devrede yerleşimi çok önemlidir. Merkezi bir yerleşim, rezonans durumunda daha büyük bir zarara neden olur. Rezonans durumu dikkate alınarak paralel pasif filtrenin tasarımı yapılsa da, gelecekte elektrik şebekesinde olabilecek herhangi bir büyüme ve değişme sistemin değerlerini değiştirerek ve yeni bir yerleşim ve tasarım gerektirecektir. Paralel pasif filtrenin en önemli devresi kondansatördür. Paralel pasif filtreler seri pasif filtrelere göre daha uyumlu kullanılmaktadır. Şekil 5.3'te harmonikleri gidermek için paralel pasif filtre kullanımını gösterilmiştir [46].



Şekil 5.3. Paralel pasif filtre

5.1.3. Pasif filtrelerin dezavantajları

Pasif filtreler çok yaygın kullanılmasına ve ekonomik olmasına rağmen dezavantajları vardır. Bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır [47].

1. Filtre karakteristiği kaynak empedansında önemli derece etkilenir.
2. Harmonikli akım bileşenleri arttığı zaman pasif filtre aşırı yüklenebilir.
3. Pasif filtre elemanlarının ayarlanması çok hassas olduğundan hatalı ayarlama yapılabilir.
4. Pasif filtreler güç sistemi ile seri ve paralel rezonansa düşebilir.
5. Pasif filtreler sabittir ve kolay ayarlanamaz.

5.2. Aktif Filtreler

Aktif harmonik filtreler veya aktif filtreler, 1970 yılında temel prensiplerinin ortaya atılmasından beri, güç kalitesi problemleri ile ilgilenen mühendis ve araştırmacılar için gittikçe ilgi artmıştır [48].

Aktif güç filtreleri doğrusal olmayan yükün ürettiği akım veya kaynak geriliminin harmoniklerini yok etmek için güç elektroniği anahtarlama elemanlarını kullanarak yükün harmonik akım veya gerilimine ters fazda ve eşit büyüklükte harmonik akım ve gerilim üreterek sisteme veren filtrelerdir. Aktif filtreler geniş bir frekans aralığında filtreleme yapabildiklerinden mevcut güç sistemlerin de bir değişiklik yapıldığında bile etkili şekilde filtreleme işlemine devam eder. Hızlı değişen yüklerin

oluşturduğu harmoniklerinin filtrelenmesinde aktif filtrelerin kullanılması yaygınlaşmaktadır [30].

Modern aktif filtreler filtre performansı, boyutlarının küçük olması ve uygulamalarda esnek olarak kullanılması bakımından geleneksel pasif filtrelere göre üstündür. Fakat aktif filtreler maliyet ve işletim kayıplarından dolayı pasif filtreler göre geride kalmaktadır. Aktif harmonik filtreler genellikle aktif güç düzenleyicisi olarak kullanılır. Bunun nedeni ise; aktif harmonik filtre terimi yalnızca filtre için kullanılabilir ancak aktif güç düzenleyicisi terimi gerilim düzenleyicisi terimi, titreşim azaltıcı, reaktif güç kontrolü ve güç faktörü düzeltici gibi özellikleri kapsadığından yaygınlıkla kullanılmaktadır [45].

Aktif filtreler tek faz aktif filtreler ve üç faz aktif filtreler olarak ikiye ayrılabilir. Tek faz aktif filtreler, tek faz uygulama alanlarının kısıtlı olmasından dolayı üç faz aktif filtreler kadar yaygın değildir.

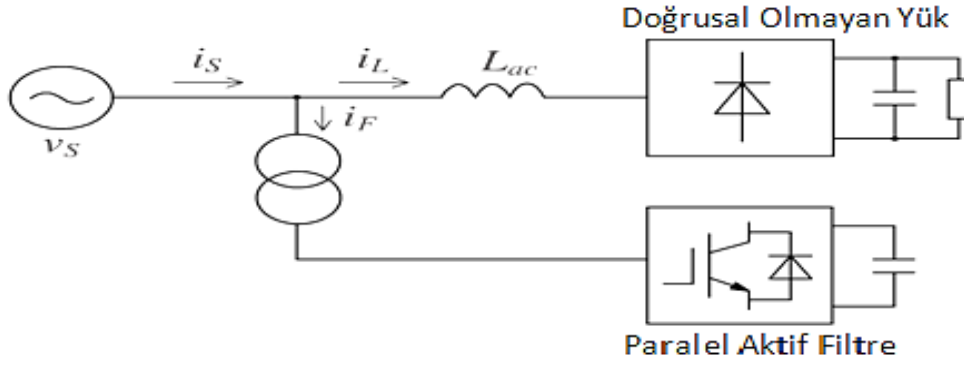
Aktif filtreler çoğunlukla ya bir kondansatörle oluşturulmuş gerilim kaynaklı ya da endüktansla oluşturulmuş akım kaynaklı güç devrelerinden oluşturulur. Günümüzde, gerilim kaynaklı eviriciler boyutu, etkinliği ve maliyeti bakımından akım kaynaklı eviricilere göre daha çok kullanılmaktadır.

Aktif filtreleri tek tip ve hibrit olarak modellenebilir. Hibrit filtreler hem çok yönlü ve ekonomik olmasından dolayı tek tip aktif filtrelere göre özellikle güç sistem uygulamalarında daha ilgi çekicidir. Tek tip aktif filtreler seri aktif filtre ve paralel aktif filtre olmak üzere ikiye ayrılır. Günümüzde, paralel aktif filtreler özelliklerinden dolayı seri aktif filtrelere göre daha çok tercih edilir. Seri harmonik güç filtreleri bazı özel durumlar için kullanılmaya uygundur [48].

5.2.1. Paralel aktif filtreler

Paralel aktif filtreler Şekil 5.4'te gösterildiği gibi sisteme paralel bağlanır [45]. Paralel aktif güç filtreleri yüke paralel bağlanarak yük akımının harmoniklerini yok etmek ve reaktif güç kompanzasyonu yapmak için sisteme ters fazda ve eşit büyüklükte

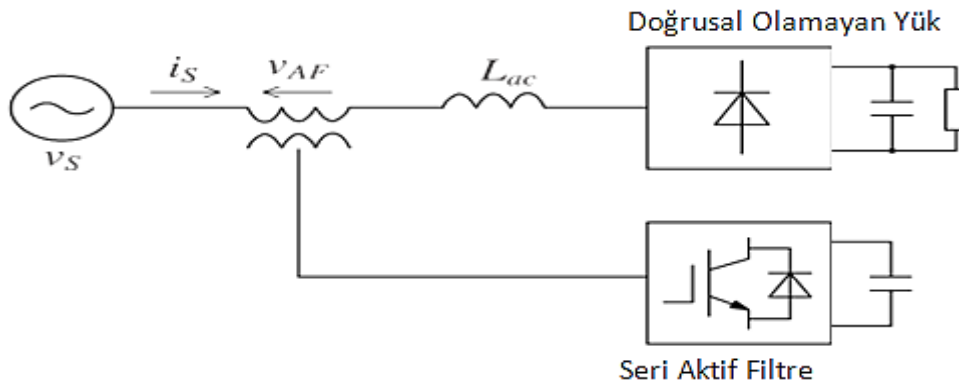
akımlar verir. Paralel aktif filtrede; kontrolör yük akımını (i_L) tespit eder. Dijital sinyal işlemci aracılığıyla yük akımındaki harmonikleri (i_L) belirler. Bu aşamadan sonra; paralel aktif filtre belirlenen akım yük akımı harmoniklerinin her fazında ve aynı büyüklükte akım üreterek akım harmoniklerini yok eder [45].



Şekil 5.4. Paralel aktif güç filtresi modeli

5.2.2. Seri aktif filtreler

Seri aktif filtreler Şekil 5.5'te gösterildiği gibi bir transformatör aracılığıyla seri bağlanır [45]. Harmonik gerilim kaynağı gibi davranan doğrusal olmayan yükler için seri aktif güç filtresi daha etkilidir. Seri aktif güç filtreleri gerilim harmoniklerini yok etmek için güç sistemine ters fazda ve eşit büyüklükte harmonik gerilimler verir [49]. Seri aktif güç filtreleri yük ile kaynak arasında seri bağlandığı için harmonik akımlarına karşı yüksek empedans gösterir. Bu nedenle kaynak ile yük arasında harmonik izolasyonu oluşturur [50].

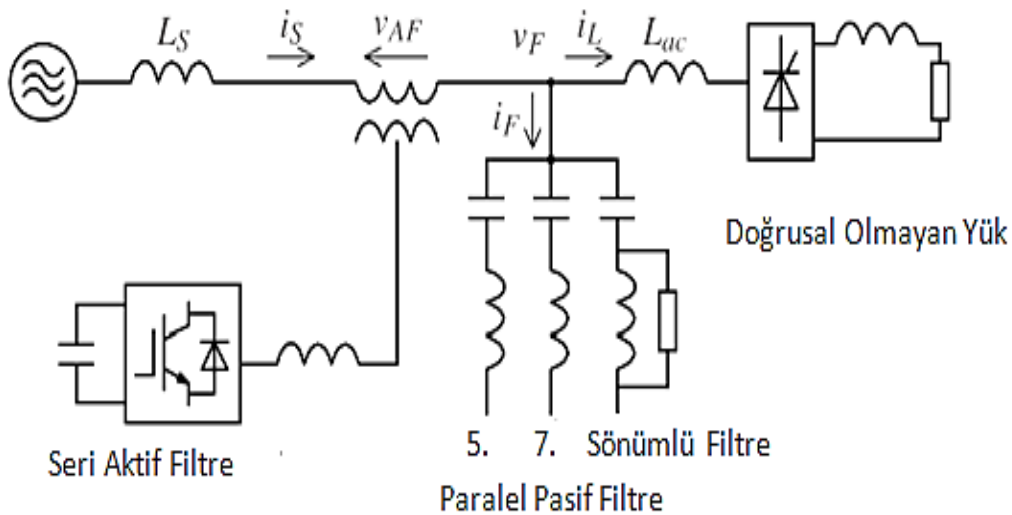


Şekil 5.5. Seri aktif güç filtresi modeli

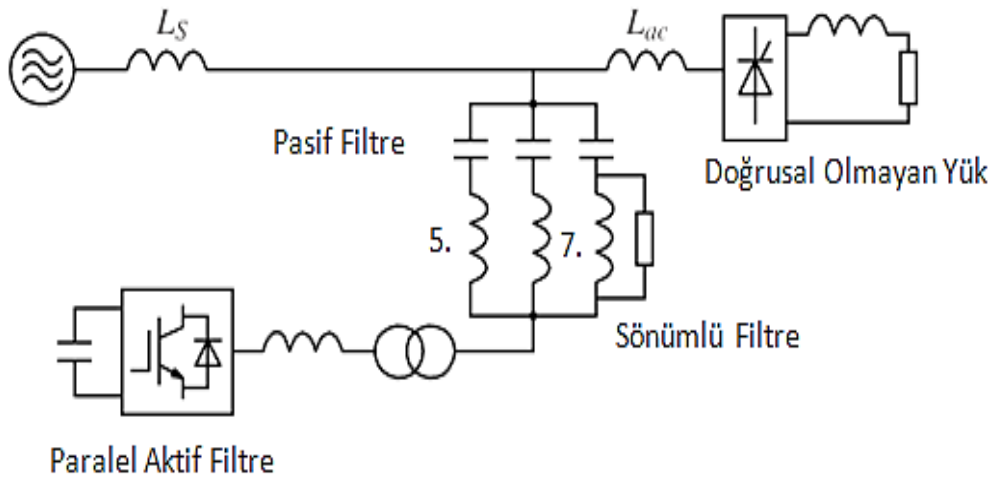
5.3. Hibrit Güç Filtresi

Doğrusal olmayan yüklerin filtrelenmesi için kullanılan iki tip filtre çeşidi sırasıyla 1988 ve 1990 yıllarında önerildi. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de hibrit aktif filtrelerin devre bağlantıları gösterilmiştir. Önerilen iki tip hibrit filtre mühendis ve araştırmacıları yakın gelecekteki çeşitli hibrit filtre modelleri ve onların pratik kullanımları için cesaretlendirmektedir [45].

Hibrit filtreler; aktif filtre ve bir pasif filtrenin birleştirilmesinden oluşur. Pasif filtre; 5. ,7. harmonikler için tek ayarlı için, 11. ve sonraki harmonikler için ikinci dereceden sönümlü filtre kullanılmaktadır. Hibrit filtrelerin devre bağlantı şekli biraz farklı olmasına rağmen, hibrit filtreler hemen hemen aynı temel ve filtre performansına sahiptir. Böyle bir kombinasyonda pasif filtre, aktif filtrenin harmonikleri giderme oranını önemli derecede azalmasını sağlar. Bu devrelerde sonuç olarak, harmonik rezonans oluşmaz ve kaynakta hiç harmonik akım akmaz [45].



Şekil 5.6. Seri aktif filtre ve paralel pasif filtrelerin birleştirilmesi ile oluşan hibrit filtre



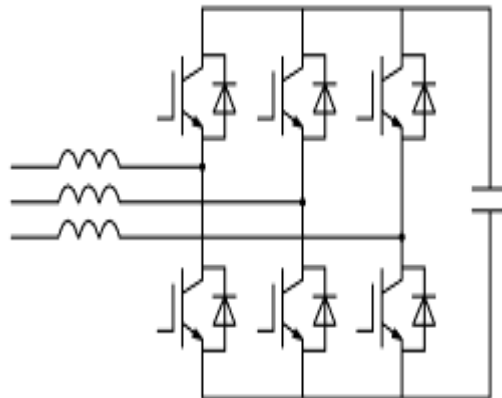
Şekil 5.7. Paralel aktif filtre ve seri pasif filtrelerin birleştirilmesi ile oluşan hibrit filtre

5.4. Aktif Filtrelerin Güç Devresine Göre Sınıflandırılması

Aktif harmonik filtreleri güç devresine göre ikiye ayrılır.

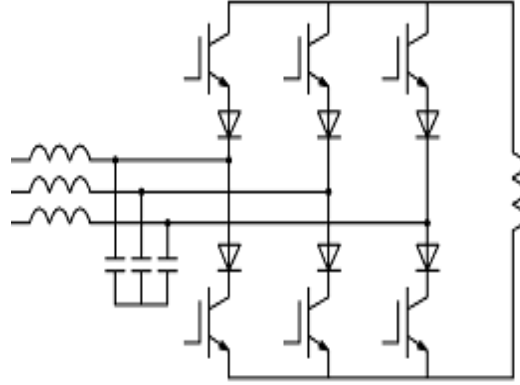
1. Gerilim kaynaklı evirici ile oluşturulan aktif filtre
2. Akım kaynaklı evirici ile oluşturulan aktif filtre

Gerilim kaynaklı evirici modeliyle oluşturulan aktif filtrelerde enerji depolama elemanı olarak kondansatör kullanılır. Gerilim kaynaklı evirici modeli aktif filtre tasarımı maliyeti ve veriminden dolayı en yaygın kullanılan modeldir. Şekil 5.8'de gerilim kaynaklı evirici modeli gösterilmiştir [45].



Şekil 5.8. Gerilim kaynaklı evirici modeli

Akım kaynaklı evirici modeliyle oluşturulan aktif filtrelerde enerji depolama elemanı olarak endüktans kullanılır. Şekil 5.9’da akım kaynaklı evirici modeli gösterilmiştir [45].



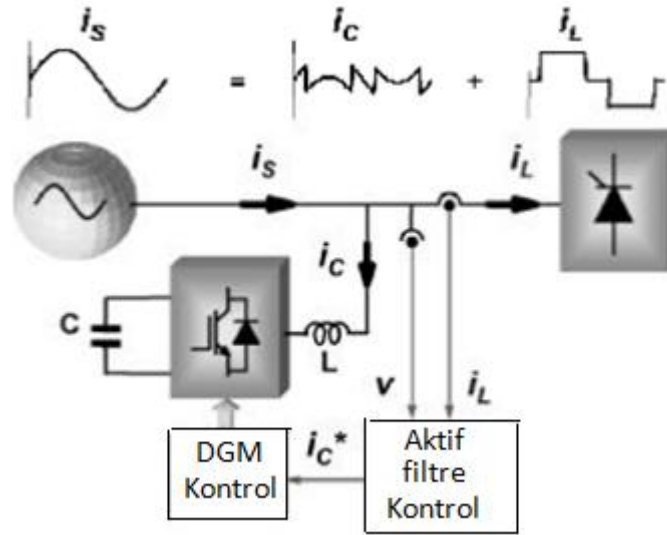
Şekil 5.9. Akım kaynaklı evirici modeli

BÖLÜM 6. PARALEL AKTİF FİLTRE TASARIMI

6.1. Paralel Aktif Filtre

Paralel aktif filtre tasarımı ilk kez 1976 yılında Gyugyi ve Strycula tarafından gerçekleştirildi. Paralel aktif filtreler en yaygın kullanılan filtre çeşididir. Paralel aktif filtrelerin temel avantajı referans akımlarının hızlı bulması ve eviricinin daha hızlı çalışmasını sağlar. Paralel aktif filtreler, doğrusal olmayan yüklerdeki harmonikler için etkili ve hızlı filtreleme sağlar [51].

Paralel aktif filtreler evirici ve kontrolör olmak üzere iki kısımdan oluşur. Şekil 6.1' de paralel aktif filtrenin genel yapısı gösterilmiştir [51].



Şekil 6.1. Paralel aktif filtrenin genel yapısı

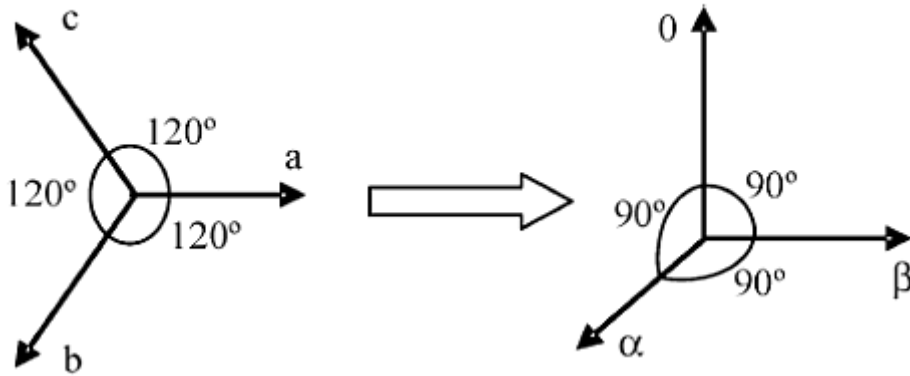
Paralel aktif filtrede kontrolör tasarımı en önemli bölümdür. Kontrolör tasarımı birçok kontrol algoritması kullanılabilir. Bu çalışmada geleneksel kontrol teorisi temelli PI kontrolör ile bulanık mantık teorisi temelli kontrolör tasarımı yapılmış ve

sonuçlar karşılaştırılmıştır. Filtre tasarımında anlık reaktif güç teorisi temel alınmıştır.

6.2. Anlık Reaktif Güç Teorisi

Anlık reaktif güç teorisi; p-q teorisi olarak da adlandırılır. Anlık reaktif güç teorisi ilk kez 1982 yılında Japonya’da bir konferans da ortaya atıldı. Anlık reaktif güç teorisi, üç fazlı sistemlerde akım ve gerilimleri üç fazlı a-b-c ekseninden iki fazlı α - β eksenine dönüştüren Clarke dönüşümünü temel alır. Anlık reaktif güç teorisi aktif güç filtre kontrolü için Akagi, Kanazawa, Nabae tarafından ortaya atılmış ve formüleleştirilmiştir [52].

Clarke dönüşümü üç fazlı sistemleri iki fazlı sisteme çevirir. Şekil 6.2 üç fazlı a-b-c eksenini iki fazlı α - β eksenine çevrilmesi gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Üç fazlı sistemin iki fazlı sisteme çevrilmesi

Üç fazlı gerilim ve akım için Clarke dönüşümü yapılarak üç fazlı sistem iki fazlı sisteme dönüştürülür.

$$\begin{matrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{matrix} = \begin{matrix} \frac{2}{3} & 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \end{matrix} \begin{matrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{matrix} \quad (6.1)$$

$$\begin{matrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{matrix} = \begin{matrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & -\frac{2}{\sqrt{3}} \end{matrix} \begin{matrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{matrix} \quad (6.2)$$

Akım ve gerilim ifadeleri Clarke dönüşümü ile α - β eksenine dönüştürülmesi ile elde edilen α - β eksenindeki ifadelerle anlık aktif güç (6.3) eşitliği ile ifade edilir.

$$p = V_{\alpha}i_{\alpha} + V_{\beta}i_{\beta} \quad (6.3)$$

Anlık reaktif güç ise (6.4) eşitliği ile ifade edilir.

$$q = V_{\alpha}i_{\beta} - V_{\beta}i_{\alpha} \quad (6.4)$$

(5.3) ve (5.4) eşitlikleri matris halinde yazılırsa (6.5) eşitliği elde edilir.

$$\begin{matrix} p \\ q \end{matrix} = \begin{matrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{matrix} \begin{matrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{matrix} \quad (6.5)$$

Anlık i_{α} ve i_{β} akımlarını elde etmek için (6.5) eşitliğinin tersi alınarak anlık i_{α} ve i_{β} akımlarını elde edilir.

$$\begin{matrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{matrix} = \begin{matrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{matrix}^{-1} \begin{matrix} p \\ q \end{matrix} \quad (6.6)$$

Elde edilen anlık i_{α} ve i_{β} akımları aktif ve reaktif bileşenler içerir. i_{α} ve i_{β} anlık akımlarının aktif ve reaktif bileşenleri (6.7) eşitliğinde ifade edilir.

$$\begin{matrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{matrix} = \begin{matrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{matrix} + \begin{matrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{matrix} \quad (6.7)$$

(6.6) eşitliğinde anlık akım ve gerilim değerleri α ve β olmak üzere her bir ekseninde anlık aktif akım ve anlık reaktif akım olmak üzere elde edilebilir.

α ekseninin anlık aktif akımı $i_{\alpha p}$ ve anlık reaktif akımı $i_{\alpha q}$ sırasıyla (6.8) ve (6.9) eşitliklerinde elde edilir.

$$i_{\alpha p} = \frac{V_{\alpha}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} p \quad (6.8)$$

$$i_{\alpha q} = \frac{-V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} q \quad (6.9)$$

β ekseninin anlık aktif akımı $i_{\beta p}$ ve anlık reaktif akımı $i_{\beta q}$ sırasıyla (6.10) ve (6.11) eşitliklerinde elde edilir.

$$i_{\beta p} = \frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} p \quad (6.10)$$

$$i_{\beta q} = \frac{-V_{\alpha}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} q \quad (6.11)$$

α ve β eksenlerindeki anlık güçler sırasıyla p_{α} ve p_{β} olarak tanımlanır ve α ve β eksenlerindeki anlık akım ve anlık gerilim ifadelerinden hesaplanır.

$$\begin{aligned} p_{\alpha} &= V_{\alpha} i_{\alpha} = V_{\alpha} i_{\alpha p} + V_{\alpha} i_{\alpha q} \\ p_{\beta} &= V_{\beta} i_{\beta} = V_{\beta} i_{\beta p} + V_{\beta} i_{\beta q} \end{aligned} \quad (6.12)$$

Üç fazlı devrede; anlık gerçek güç p ile ifade edilir. Bu ifade (6.12) eşitliğinde verilen α ve β eksenlerindeki anlık güçleri içerir.

Üç fazlı sistemlerde anlık gerçek güç (6.13) eşitliğinde elde edilir.

$$\begin{aligned} p &= V_{\alpha} i_{\alpha p} + V_{\beta} i_{\beta p} + V_{\alpha} i_{\alpha q} + V_{\beta} i_{\beta q} \\ &= \frac{V_{\alpha}^2}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} p + \frac{V_{\beta}^2}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} p + \frac{V_{\alpha} V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} q + \frac{-V_{\alpha} V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} q \end{aligned} \quad (6.13)$$

(6.13) eşitliğinde dikkat edilecek iki önemli kısım (6.14) ve (6.15) eşitliklerinde gösterilmiştir.

$$p = V_{\alpha} i_{\alpha p} + V_{\beta} i_{\beta p} = p_{\alpha p} + p_{\beta p} \quad (6.14)$$

$$0 = V_{\alpha} i_{\alpha q} + V_{\beta} i_{\beta q} = p_{\alpha q} + p_{\beta q} \quad (6.15)$$

α ekseninde anlık aktif güç (6.16) eşitliğinde ifade edilir.

$$p_{\alpha p} = V_{\alpha} i_{\alpha p} = \frac{V_{\alpha}^2}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} p \quad (6.16)$$

α ekseninde anlık reaktif güç (6.17) eşitliğinde ifade edilir.

$$p_{\alpha q} = V_{\alpha} i_{\alpha q} = \frac{V_{\alpha} V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} q \quad (6.17)$$

β ekseninde anlık aktif güç (6.18) eşitliğinde ifade edilir

$$p_{\beta p} = V_{\beta} i_{\beta p} = \frac{V_{\beta}^2}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} p \quad (6.18)$$

β ekseninde anlık reaktif güç (6.19) eşitliğinde ifade edilir.

$$p_{\beta q} = V_{\beta} i_{\beta q} = \frac{-V_{\alpha} V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} q \quad (6.19)$$

$$\begin{matrix} p \\ q \end{matrix} = \begin{matrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{matrix} \begin{matrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{matrix} \quad (6.20)$$

(6.20) eşitliğinde verilen p ve q değerleri dalgalı ve doğru olmak üzere iki bileşene sahiptir.

$$p = p + p \quad (6.21)$$

Anlık gerçek güç olarak ifade edilen p , (6.21) eşitliğinde görüldüğü gibi doğru (p) ve dalgalı (p) iki bileşenden oluşmaktadır.

$$q = q + q \quad (6.22)$$

Anlık sanal güç olarak ifade edilen q , (6.22) eşitliğinde görüldüğü gibi doğru (q) ve dalgalı (q) iki bileşenden oluşmaktadır.

Anlık gerçek gücün doğru bileşeni (p) ortalama gücü ifade etmektedir ve birim zamanda yalnızca bir yöne akan enerjiyi göstermektedir. Anlık gerçek gücün dalgalı bileşeni (p) akımda bulunan harmoniklerden dolayı oluşmaktadır ve birim zamanda kaynakla yük arasında alınıp verilen enerji göstermektedir.

Anlık sanal gücün doğru bileşeni (q) kaynak ile yük arasında enerji değişimi veya transferi gerçekleştirmez. Sistem fazları arasındaki istenemeyen akımlardan sorumludur. Dengeli sinüzoidal ve dengeli yük durumunda q geleneksel reaktif gücü temsil eder [53]. Anlık sanal gücün dalgalı bileşeni (q) akım harmoniklerinden dolayı oluşmaktadır ve her fazdaki reaktif gücü gösterir. q anlık olarak toplandığında değeri sıfırdır [51].

(6.5) ve (6.6) eşitlikleri (6.21) ve (6.22) eşitliklerine göre tekrar düzenlenirse, (6.23) ve (6.24) eşitlikleri elde edilir.

$$\begin{matrix} p & + & p \\ q & + & q \end{matrix} = \begin{matrix} V_\alpha & V_\beta & i_\alpha \\ -V_\beta & V_\alpha & i_\beta \end{matrix} \quad (6.23)$$

$$\begin{matrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{matrix} = \begin{matrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{matrix}^{-1} \begin{matrix} p & + & p \\ q & + & q \end{matrix} \quad (6.24)$$

Anlık reaktif güç teorisi birçok güç kalitesi problemlerinin giderilmesinde kullanılabilir. Tasarlanacak olan aktif filtre tasarımında giderilmesi istenilen probleme göre anlık sanal ve gerçek güçler düzenlenir. Bu tasarımda sadece reaktif güç giderilmesi isteniyorsa anlık sanal gücün doğru bileşeni (q), sadece harmonikler

giderilecekse gerçek ve sanal gücün dalgalı (p, q) bileşenleri veya hem reaktif güç kompanzasyonu hemde harmonik giderilmesi yapılacaksa gerçek gücün dalgalı (p) ve sanal gücün doğru ve dalgalı (q, q) bileşenler kullanılır. Bu bileşenler kullanılarak aktif filtre tasarımı için gerekli olan referans akımlar hesaplanır.

Anlık reaktif güç teorisi kullanılarak reaktif güç kompanzasyonu yapmak için sadece anlık sanal gücün doğrusal bileşeni (q) kullanılır. Bu durum için (6.25) eşitliği elde edilir.

$$\begin{aligned} i_{c\alpha} &= \begin{matrix} V_\alpha & V_\beta &^{-1} & 0 \\ -V_\beta & V_\alpha & & -q \end{matrix} \end{aligned} \quad (6.25)$$

Anlık reaktif güç teorisi kullanılarak harmoniklerin giderilmesi için hem anlık gerçek gücün hem de anlık sanal gücün dalgalı bileşenleri (p, q) kullanılır. Bu durum için (6.26) eşitliği elde edilir.

$$\begin{aligned} i_{c\alpha} &= \begin{matrix} V_\alpha & V_\beta &^{-1} & -p \\ -V_\beta & V_\alpha & & -q \end{matrix} \end{aligned} \quad (6.26)$$

Anlık reaktif güç kullanılarak hem harmoniklerin giderilmesi hem de reaktif güç kompanzasyonu yapmak için anlık sanal gücün hem doğru (q) hem de dalgalı (q) bileşenleri ve anlık gerçek gücün dalgalı bileşeni (p) kullanılır. Bu durum için (6.27) eşitliği elde edilir.

$$\begin{aligned} i_{c\alpha} &= \begin{matrix} V_\alpha & V_\beta &^{-1} & -p \\ -V_\beta & V_\alpha & & -q - q \end{matrix} \end{aligned} \quad (6.27)$$

(6.24) eşitliğinde ters matris işlemi gerçekleştirilerek (6.28) eşitliği elde edilir.

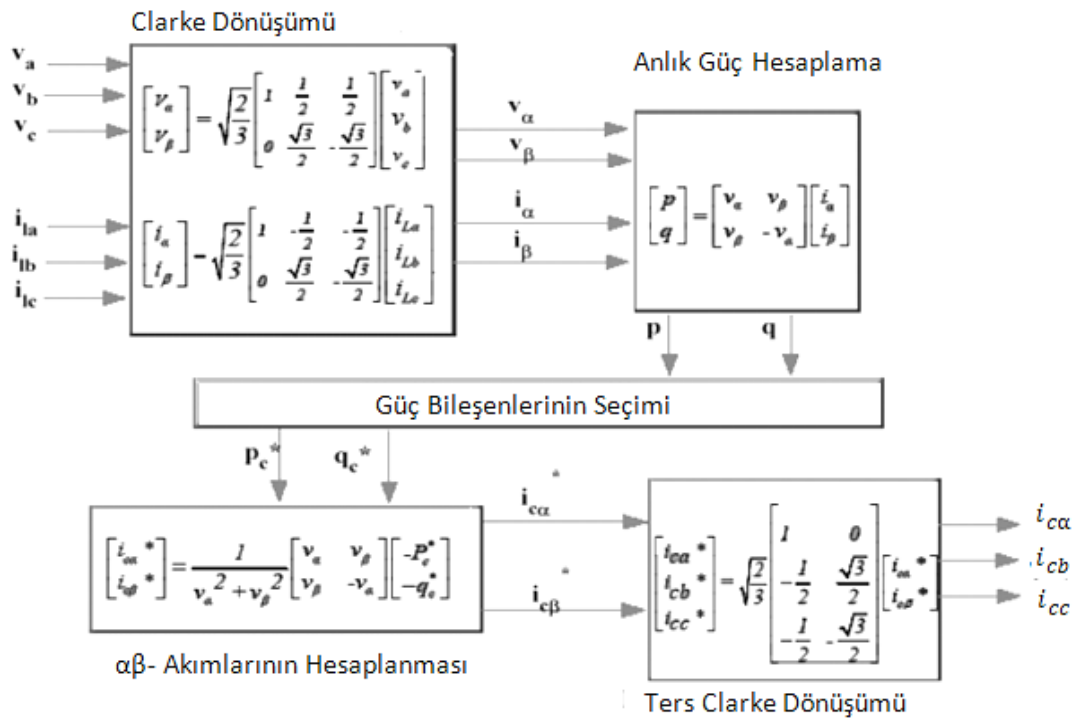
$$\begin{aligned} i_{c\alpha} &= \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{matrix} V_\alpha & V_\beta & p & + & p \\ V_\beta & -V_\alpha & q & + & q \end{matrix} \end{aligned} \quad (6.28)$$

Güç kalitesi probleminin giderilmesinde kullanılacak aktif filtrenin tasarımında doğrusal olmayan yükten dolayı oluşan reaktif ve harmonik akımları yok etmek için referans akımlar üretilmelidir. Anlık reaktif güç teorisi ile üretilen $i_{c\alpha}$ ve $i_{c\beta}$ akımları ters Clarke dönüşümü ile üç fazlı $i_{c\alpha}$, $i_{c\beta}$ ve $i_{c\gamma}$ referans akımlarına dönüştürülür.

Üç fazlı sistem için ters Clarke dönüşümü ile referans akımlar elde edilmesi (6.29) eşitliğinde gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \\ i_{c\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (6.29)$$

Üç fazlı bir sistem için anlık reaktif güç teorisi kullanılarak referans akımların elde edilmesi için kullanılan eşitliklerin genel yapısı Şekil 6.3’de gösterilmiştir.

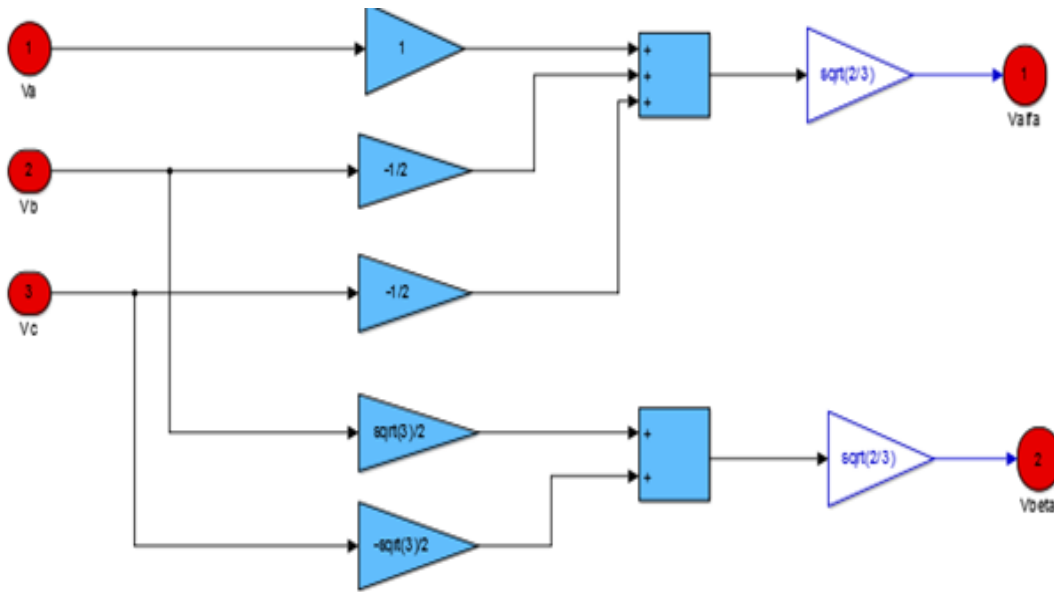


Şekil 6.3. Anlık güç teorisi ile referans akımların hesaplanması

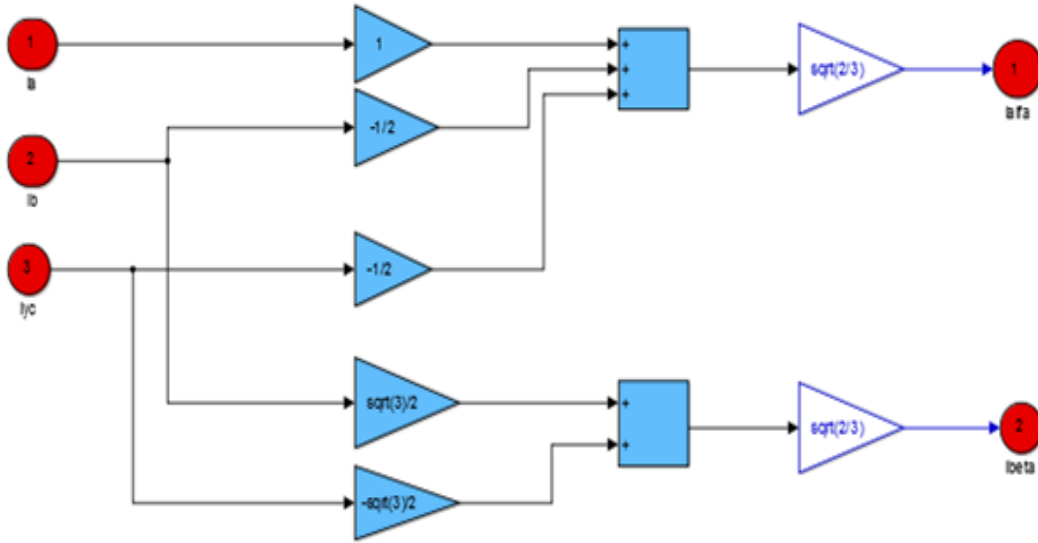
6.3. Üç Fazlı Üç Telli Sistemlerde Paralel Aktif Güç Filtresinin Tasarımı

Üç fazlı üç telli paralel aktif güç filtresi (PAGF) tasarımında kontrolör ve evirici kısımları sırasıyla oluşturulmuştur. Kontrolör kısmında geleneksel kontrol teorisi ve bulanık mantık kontrol teorisi ile tasarım yapılmıştır. Anlık güç teorisi kullanılarak tasarlanan üç fazlı üç telli paralel aktif güç filtresinin tasarım adımları sırasıyla verilmiştir.

Clarke dönüşümü kullanılarak üç fazlı sistemi iki fazlı α - β sistemine dönüştürülmesi (6.1) ve (6.2) eşitlikleri kullanılarak Simulink ortamında yapılmıştır. Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te sırasıyla kaynak gerilimlerinin ve kaynak akımlarının üç fazlı a-b-c sisteminden iki fazlı α - β sistemine dönüştürülmesi verilmiştir.

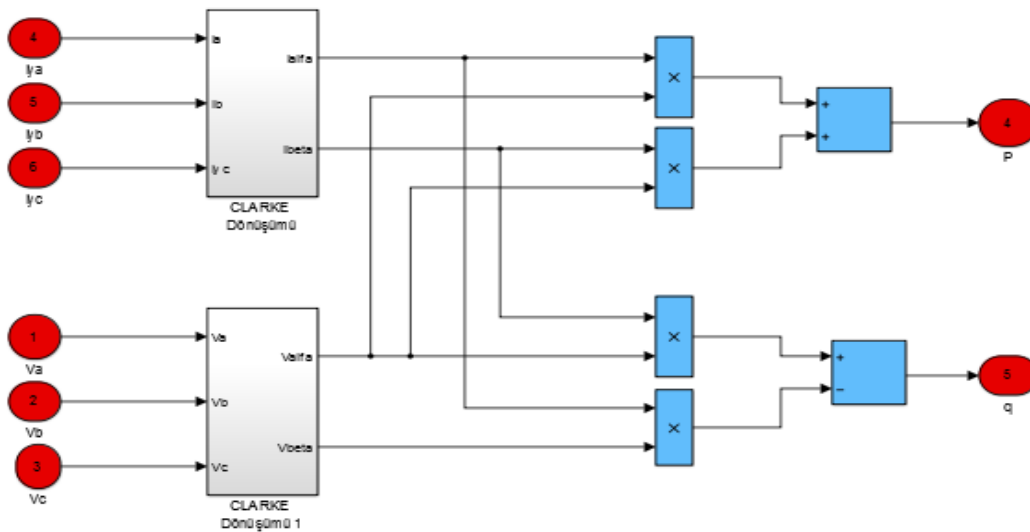


Şekil 6.4. Kaynak gerilimlerinin üç fazlı a-b-c sisteminden iki fazlı α - β sistemine dönüştürülmesi



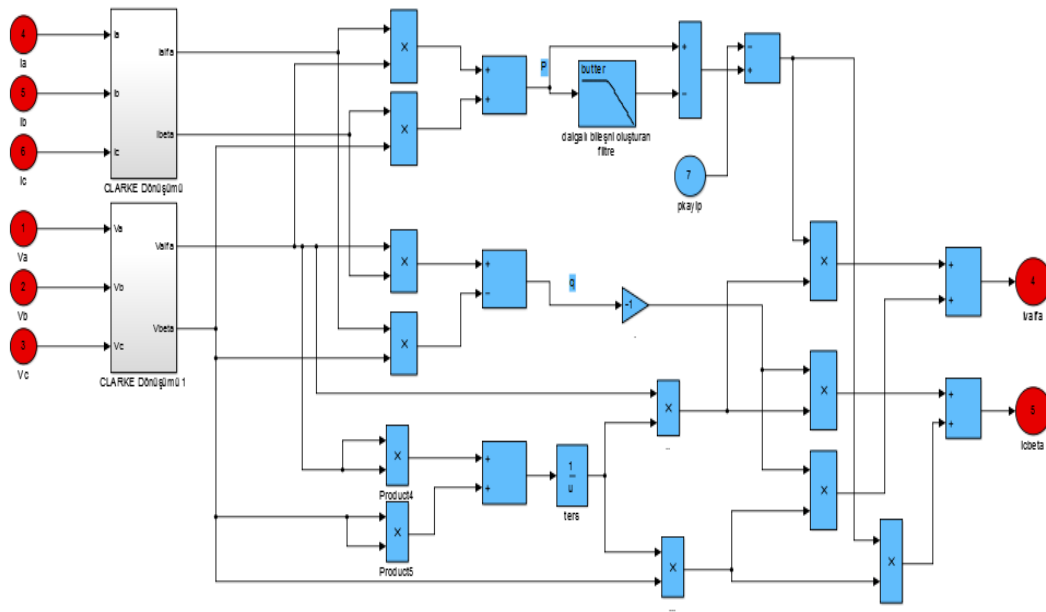
Şekil 6.5. Kaynak akımlarının üç fazlı a-b-c sisteminden iki fazlı α - β sistemine dönüştürülmesi

Anlık reaktif güç teorisi ile yükün gerçek ve sanal güçleri (6.15) eşitliğine göre hesaplanır. Şekil 6.6'da anlık gerçek ve sanal güçlerin hesaplanması gösterilmiştir.



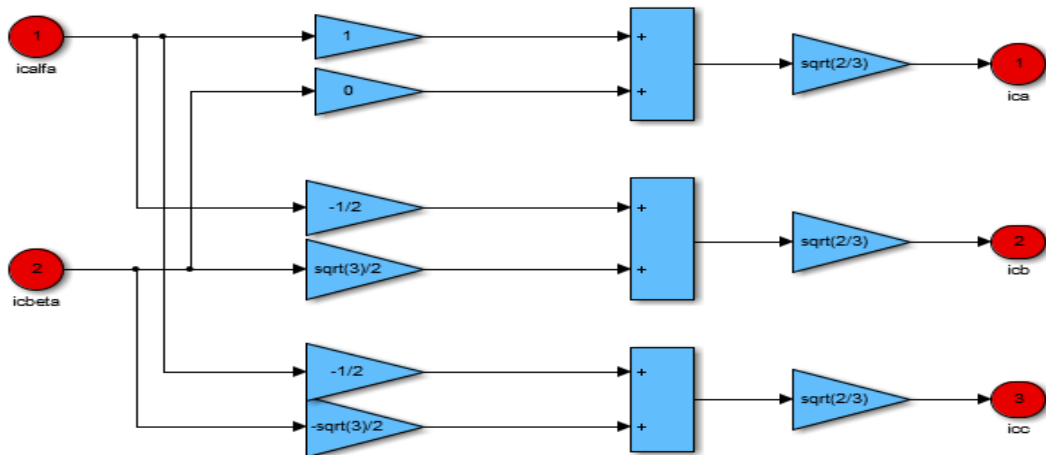
Şekil 6.6. Anlık gerçek ve sanal güçlerin hesaplanması

Anlık reaktif güç teorisine göre elde edilen gerçek ve sanal güçlerin, harmonik giderme ve reaktif güç kompanzasyonu yapmak için doğru ve dalgalı bileşenleri kullanılır. Anahtarlama kayıplarını gidermek için $P_{kayıp}$ değeri $i_{c\alpha}$ ve $i_{c\beta}$ akımlarını hesaplanırken hesaplama katılır. Şekil 6.7'de PAGF tasarımında kullanılan $i_{c\alpha}$ ve $i_{c\beta}$ akımlarının hesaplanması gösterilmektedir.



Şekil 6.7. PAGF tasarımında akımlarının $i_{c\alpha}$ ve $i_{c\beta}$ hesaplanması

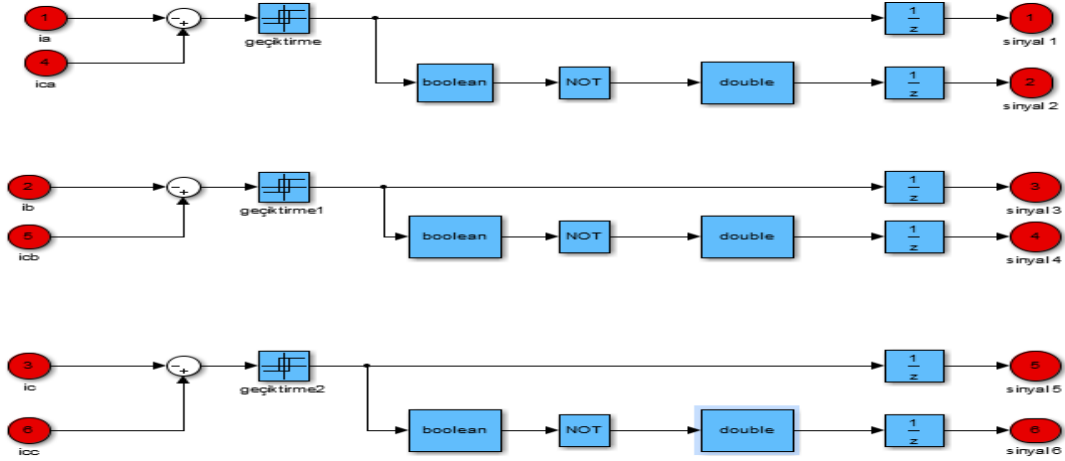
PAGF tasarımında $i_{c\alpha}$ ve $i_{c\beta}$ akımların hesaplanmasından sonraki adım iki fazlı α - β sisteminden üç fazlı a-b-c sistemindeki $i_{c\alpha}$, $i_{c\beta}$ ve $i_{c\gamma}$ akımları elde edilir. Şekil 6.8’de iki fazlı $i_{c\alpha}$ ve $i_{c\beta}$ akımları ters Clarke dönüşümü ile üç fazlı a-b-c sisteminde $i_{c\alpha}$, $i_{c\beta}$ ve $i_{c\gamma}$ referans akımlarına dönüştürülmesi gösterilmiştir.



Şekil 6.8. İki fazlı $i_{c\alpha}$ ve $i_{c\beta}$ akımların üç fazlı referans $i_{c\alpha}$, $i_{c\beta}$ ve $i_{c\gamma}$ akımlarına dönüştürülmesi

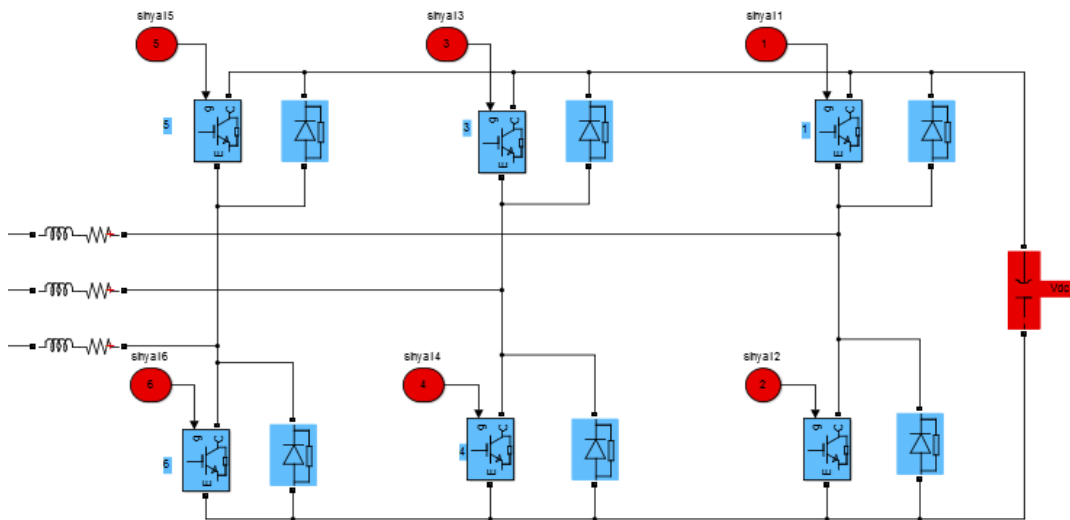
Üç fazlı sistem için ters Clarke dönüşümü ile hesaplanan üç fazlı referans $i_{c\alpha}$, $i_{c\beta}$ ve $i_{c\gamma}$ akımları gerçek filtre akımları karşılaştırılır. Gerçek filtre akımları ile referans filtre akımlarının karşılaştırılması sonucu evirici yapısı içinde bulunan güç

elektroniği temelli elemanların tetiklenmesinde kullanılır. Şekil 6.9’da eviricinin içinde bulunan güç elektroniği temelli elemanların tetiklenmesi için sinyal 1, sinyal 2, sinyal 3, sinyal 4, sinyal 5, sinyal 6 olmak üzere altı adet tetikleme sinyalinin üretilmesi gösterilmiştir.



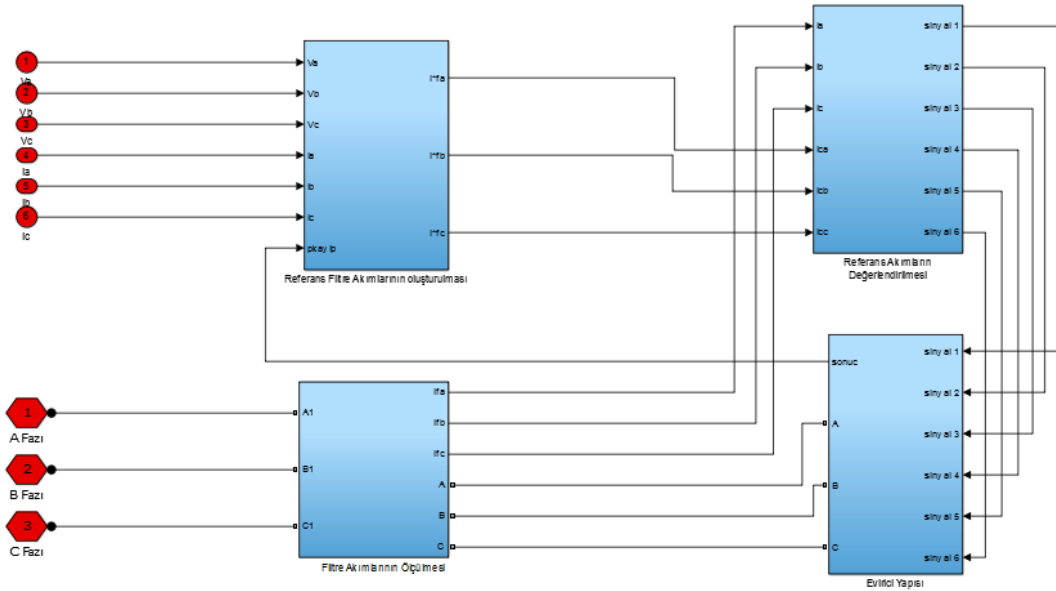
Şekil 6.9. Evirici için tetikleme sinyallerinin üretilmesi

PAGF tasarımında evirici yapısı için güç elektroniği temelli kontrollü elemanlar kullanılır. Kontrollü güç elektroniği elemanları istenilen işlemleri gerçekleştirmek için her bir elemanın girişinde tetikleme sinyali girişi bulunur. Evirici için gerekli tetikleme sinyalleri gerçek ve referans değerlerinin karşılaştırılması sonucu elde edilir. Şekil 6.10’da üç fazlı evirici yapısı gösterilmiştir.



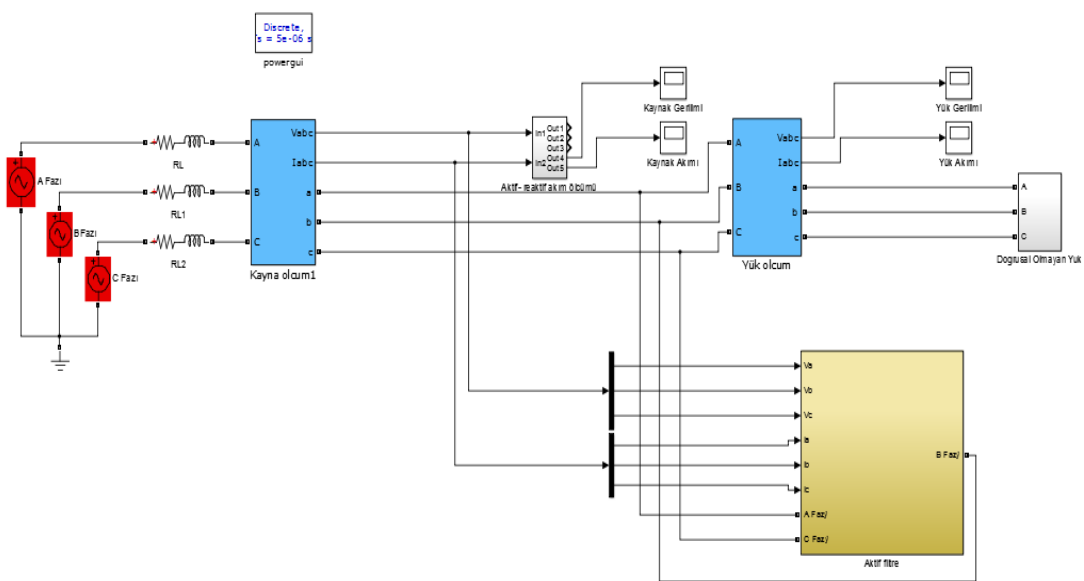
Şekil 6.10. PAGF için kullanılan eviricinin genel yapısı

PAGF tasarımı için gerçekleştirilen adımların Simulink blok diyagramları Şekil 6.11’de verilmiştir. Simulink ortamında oluşturulan PAGF dört bloktan oluşmaktadır.



Şekil 6.11. PAGF Simulink blok diyagramı

Şekil 6.12’de tasarlanan üç fazlı üç telli sistemin genel yapısı gösterilmiştir. Sistemde doğrusal olmayan yük kullanılması dolaylı güç kalitesi bozulmaktadır. Tasarlanan sistemde yük ve kaynağın gerilim ve akım değeri ölçülüyor. Ayrıca sistemin aktif ve reaktif güçleri ölçülmektedir.



Şekil 6.12. Tasarlanan sistemin Simulink blok diyagramı

Tasarlanan sistemde kullanılan PAGF, kaynak ve yükün sahip olduğu parametre ve değerler Tablo 6.1’de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Tasarlanan sistemin sahip olduğu parametre ve değerleri

Parametreler		Değer
Kaynak	Gerilim (V)	380 V/ Faz- faz arası
	Frekans (f)	50 Hz
	Empedans (R,L)	1e-7 ohms, 0.1e-4 H
PAGF	V _{dc} gerilimi (V)	1300 V
	Empedans (R,L)	1 ohms, 1e-3 H
Yük	Empedans(R,L)	30 ohms, 30e-3 H

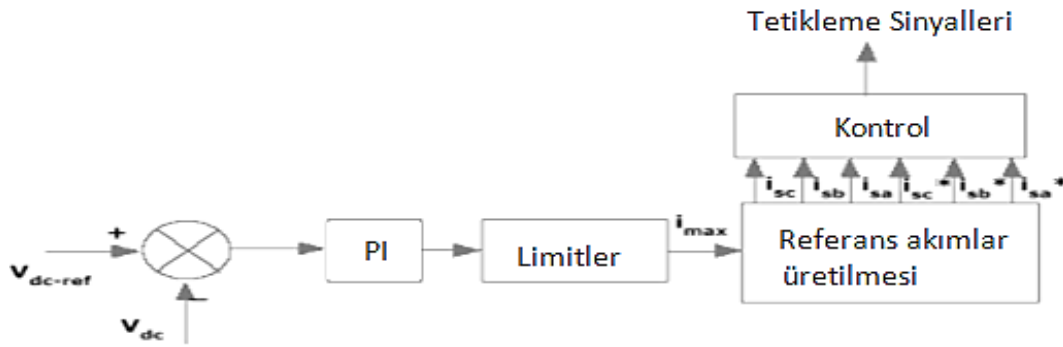
6.4. Geleneksel Kontrol Teorisi İle Tasarlanan PAGF

PAGF tasarımında gerilim kaynaklı evirici yapısı kullanılmıştır. Gerilim kaynaklı eviricide bulunan gerilim kaynağı değeri referans akımların oluşturulmasında önemli bir rol oynamaktadır. Evirici yapısında bulunan gerilim kaynağı, yükün ürettiği harmonik akımlara eşit büyüklükte ve ters fazda akımlar üretmek için kullanılır. Bu amaç PAGF’nin temel amacı olmasından dolayı gerilim kaynağının değeri dikkatle ayarlanmalıdır. Eviricide bulunan gerilim kaynağı değeri, önceden belirlenen referans değerle karşılaştırılarak elde edilen değer geleneksel kontrolör ile kontrol edilir. Elde edilen değerler belirli limitler içerisinde referans akımların üretilmesinde kullanılır. Kullanılan geleneksel kontrolörler P (Oransal), PI (Oransal-İntegratör) ve PID (Oransal- İntegratör- Türev) kullanılarak tasarlanır. Bu değerlerin her biri farklı amaç ve görevlerde kullanılır. Tablo 6.2’de P-I-D parametrelerinin seçiminde kullanılabilir.

Tablo 6.2. P-I-D parametrelerinin artırımıyla değişimi

	Yükselme Zamanı	Aşım	Yerleşme Zamanı	Kalıcı Hal Hatası
K_P	Kısalır	Artar	Kısalır	Küçülür
K_i	Kısalır	Artar	Artar	Sıfırlanır
K_D	Çok fazla değişmez	Azalır	Kısalır	Etkilenmez

PI ile tasarımı yapılan sistemin blok diyagramı Şekil 6.13'te gösterilmiştir. Eviricide bulunan gerilim kaynağı değeri ile referans DA gerilim kaynağı karşılaştırılmış ve sonuç PI kontrolör kullanılarak düzenlemiştir. Referans gerilim değeri (V_{dc-ref}) 1300 V olarak alınmıştır. P-I değerleri sırasıyla 0.88 ve 25 seçilmiştir.



Şekil 6.13. PAGF için geleneksel PI kontrolör

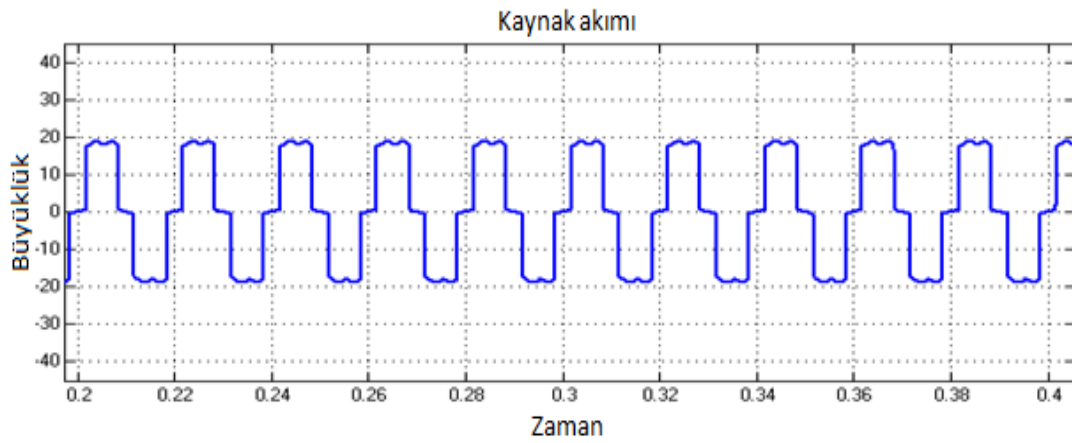
6.4.2. Simülasyon sonuçları

Tasarlanan sistemde PAGF'nin sisteme etkisi incelenecektir. İlk olarak PAGF sisteme bağlı olmadığı durumda simülasyon sonuçları verilmiştir. Daha sonra PAGF sisteme bağlanarak simülasyon sonuçları verilmiştir. Simülasyon sonuçları olarak yük akımı, yük gerilimi, kaynak akımı, kaynak gerilimi, toplam bozulma oranı, harmonikler ve reaktif güç kompanzasyonu incelenecektir.

6.4.2.1. Sistemde PAGF bağı olmadığında simülasyon sonuçları

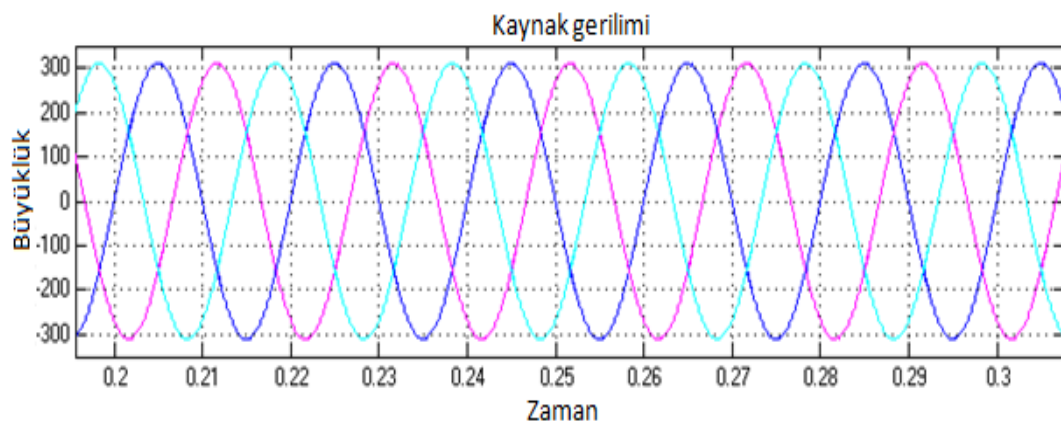
Sistemde PAGF bağı olmadığı durumda doğrusal olmayan yükten dolayı yük ve kaynakta meydana gelen değişimler sırasıyla incelenmiştir. Doğrusal olmayan yükten dolayı oluşan harmonikler kaynak akımının bozulmasına neden olmuştur.

Kaynak akımı:



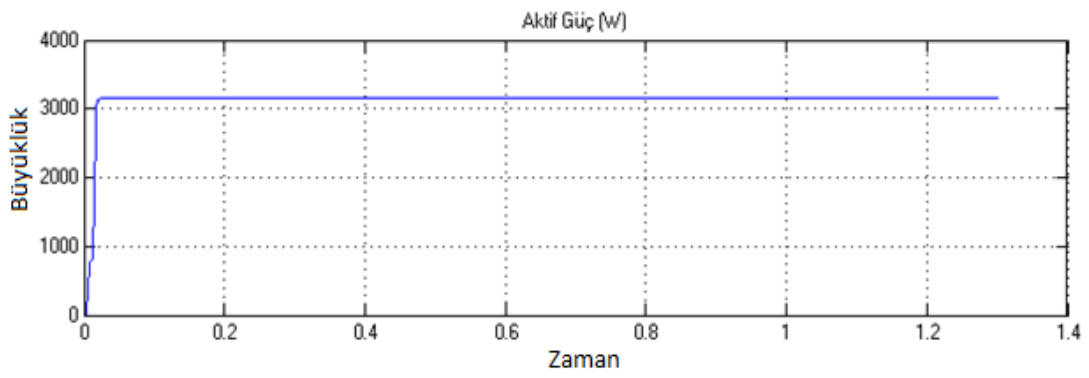
Şekil 6.14. Kaynak akımı

Kaynak gerilimi:



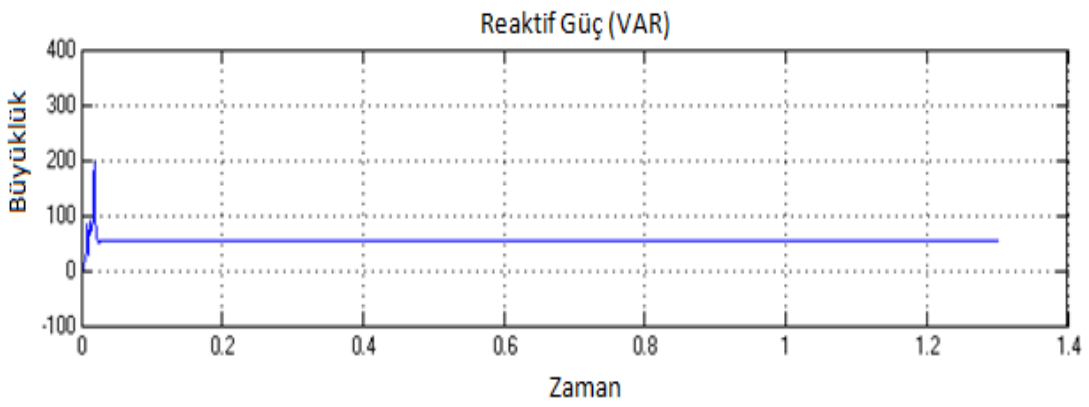
Şekil 6.15. Kaynak gerilimi

Aktif güç:



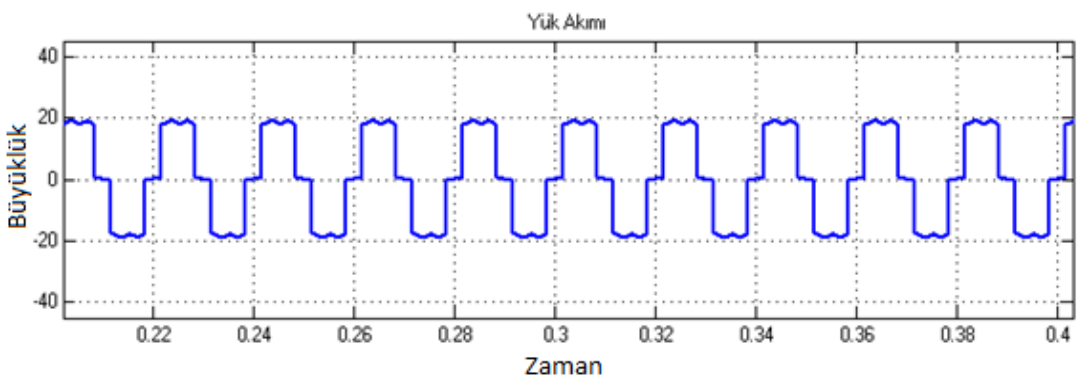
Şekil 6.16. Aktif güç

Reaktif güç:



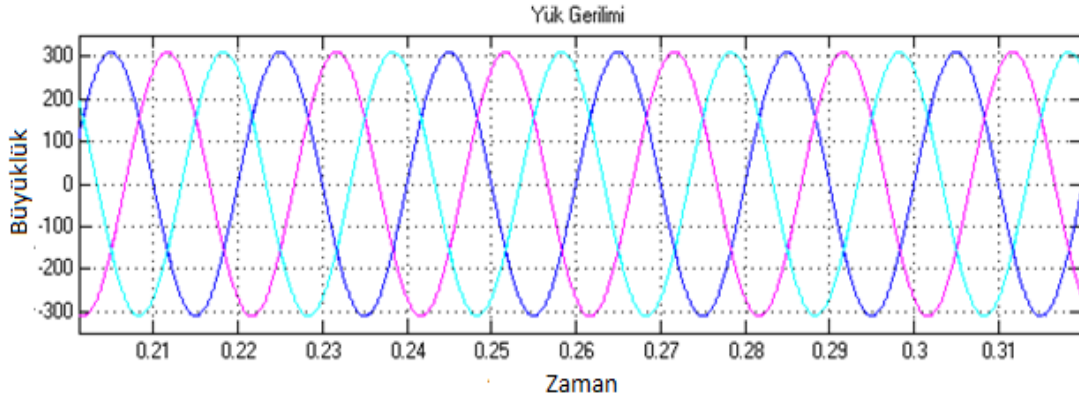
Şekil 6.17. Reaktif güç

Yük akımı:



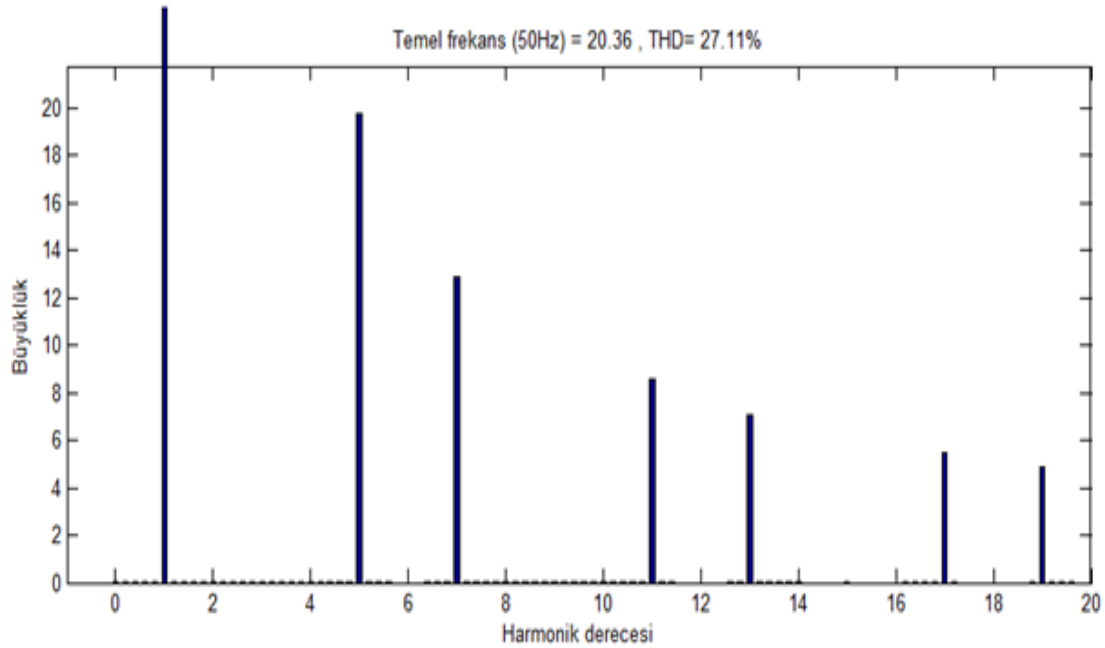
Şekil 6.18. Yük akımı

Yük gerilimi:



Şekil 6.19. Yük gerilimi

Kaynak akımının harmonik analizi:



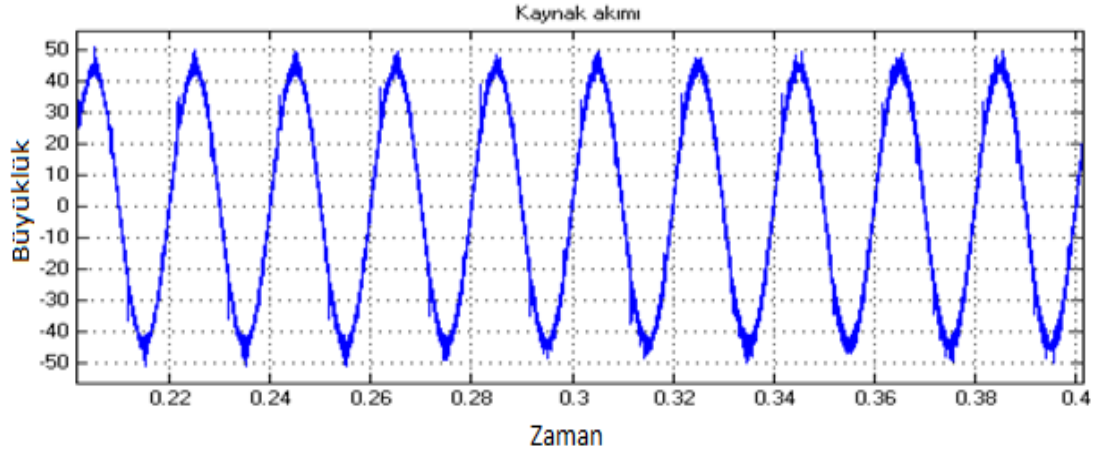
Şekil 6.20. Kaynak akımının harmonik analizi

6.4.2.2. Sistemde PAGF bağılı durumda simülasyon sonuçları

Sistemde PAGF bağılı olmadığı durumda doğrusal olmayan yükten dolayı kaynak akımında bozulma meydana geldiği Şekil 6.14'te gözlemlenmiştir. Kaynak akımının toplam harmonik bozulma (THD) oranı %27.11 olduğu Şekil 6.20'de görülmektedir.

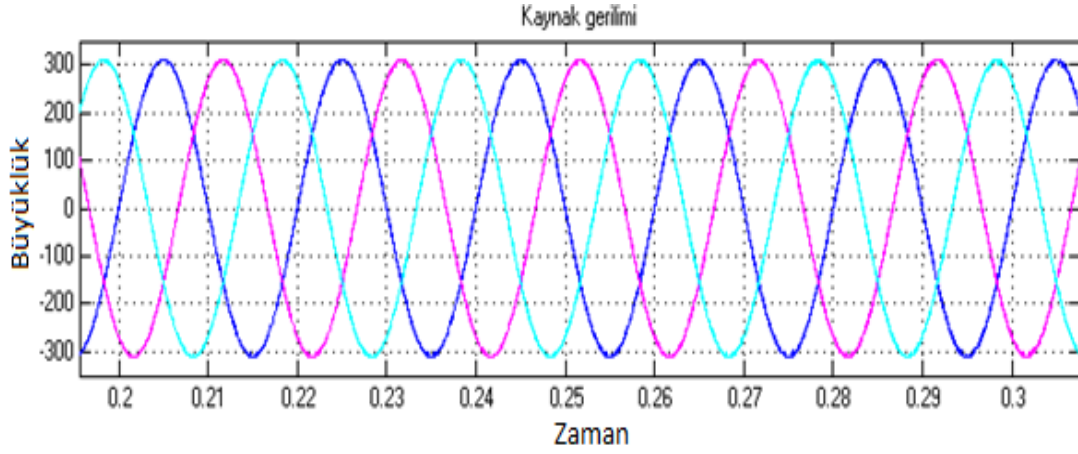
Tasarlanan PAGF sistemde bulunan harmoniklerin giderilmesini ve reaktif güç kompanzasyonu yapılmasını sağlıyor. Şekil 6.21’de kaynak akımı PAGF ile sinüzoidal dalga şekline gelmiştir.

Kaynak akımı:



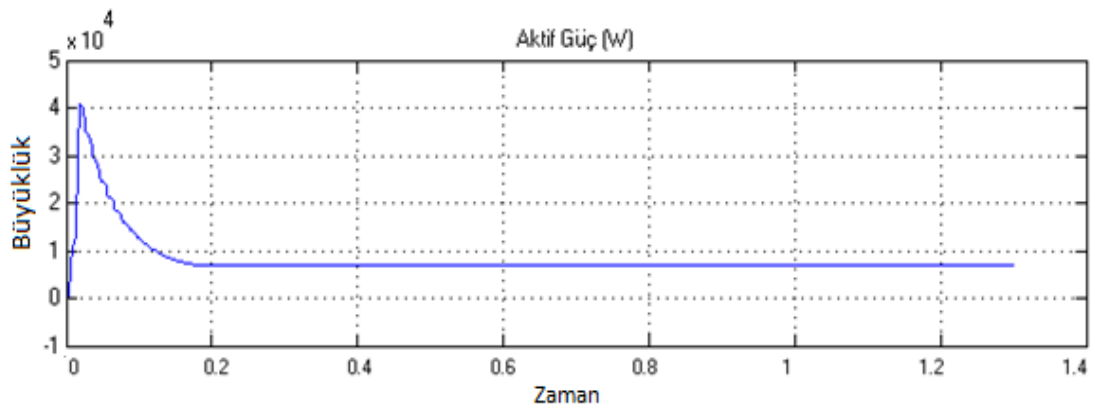
Şekil 6.21. Kaynak akımı

Kaynak gerilimi:



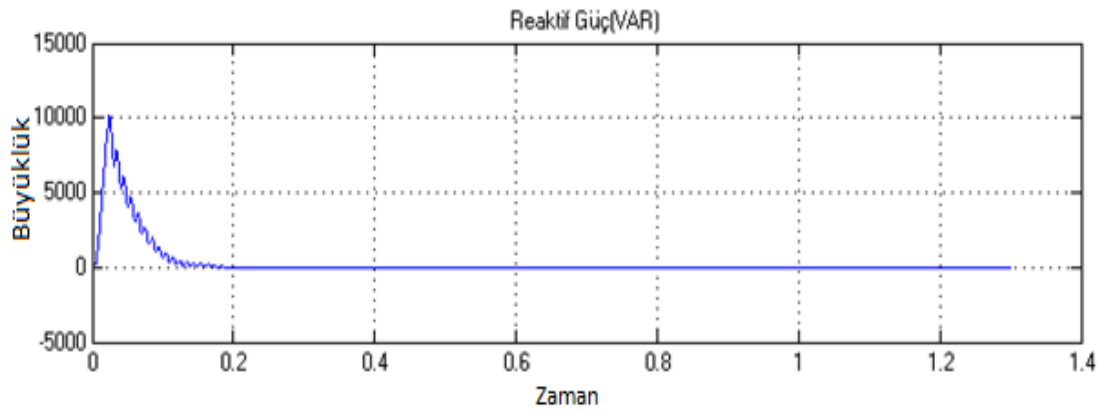
Şekil 6.22. Kaynak gerilimi

Aktif güç:



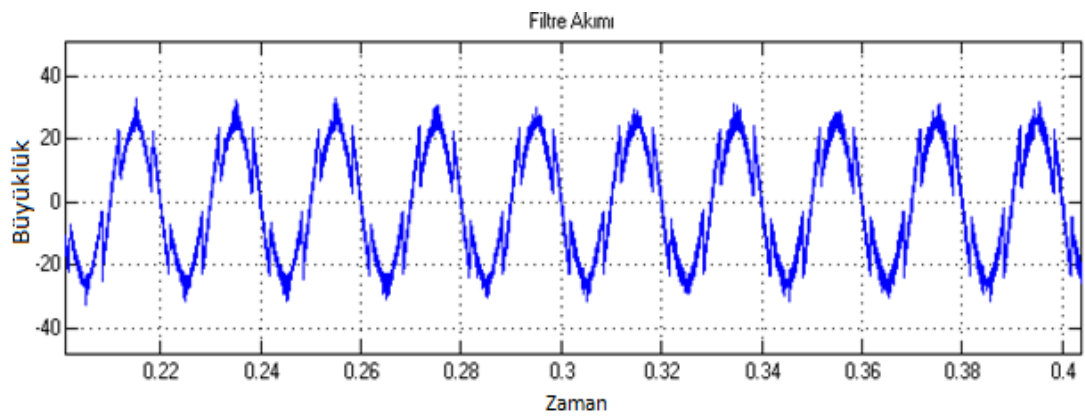
Şekil 6.23. Aktif güç

Reaktif güç:



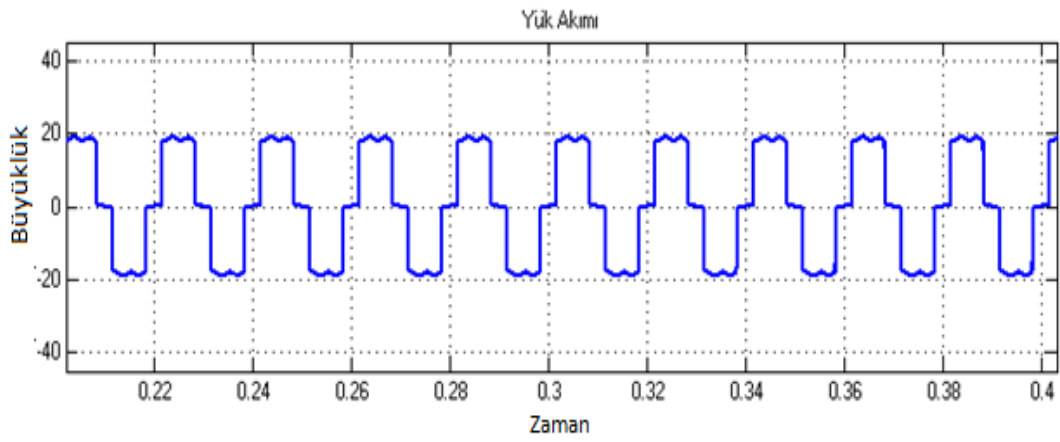
Şekil 6.24. Reaktif güç

Filtre akımı:



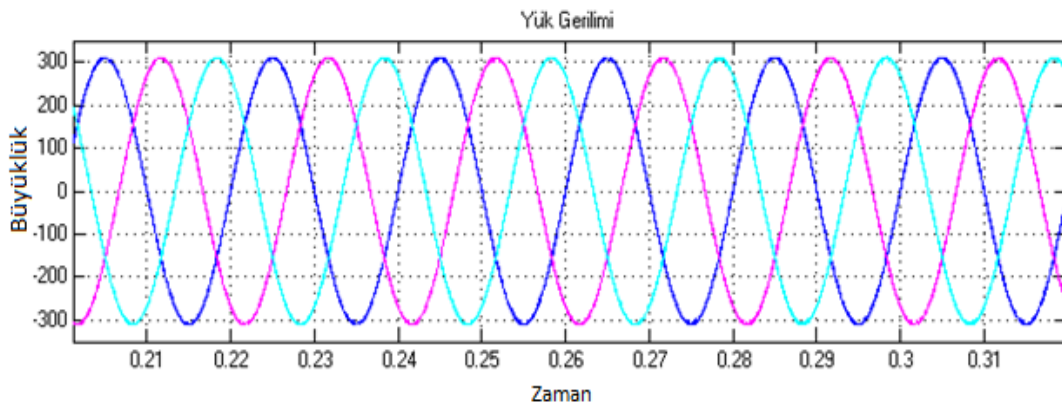
Şekil 6.25. Filtre akımı

Yük akımı:



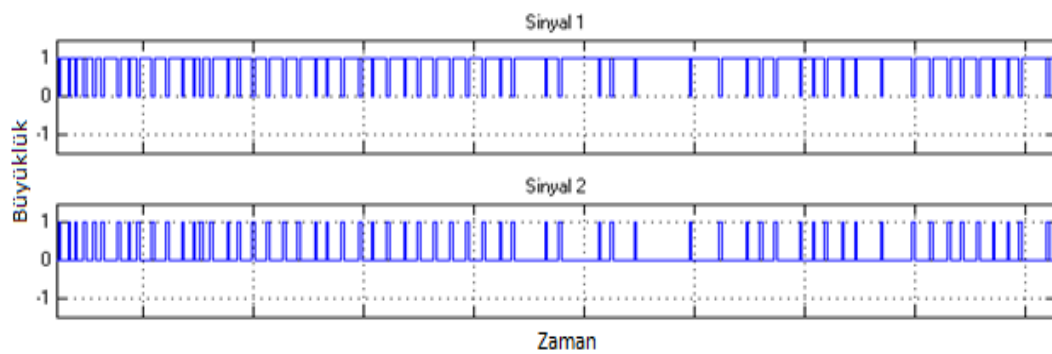
Şekil 6.26. Yük akımı

Yük gerilimi:



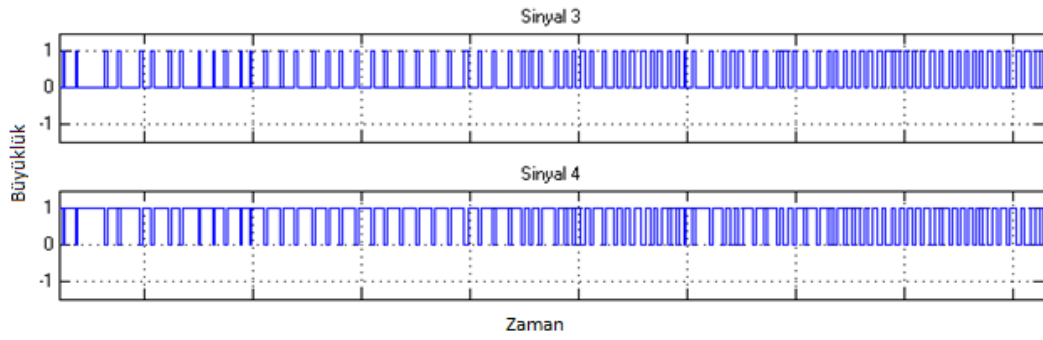
Şekil 6.27. Yük gerilimi

Evirici tetikleme sinyalleri (Sinyal 1, Sinyal 2):



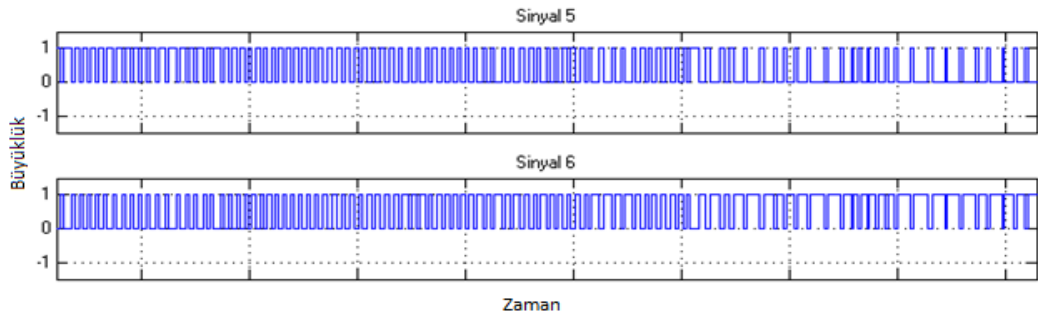
Şekil 6.28. Tetikleme sinyalleri (Sinyal 1, Sinyal 2)

Evirici tetikleme sinyalleri (Sinyal 3, Sinyal 4):



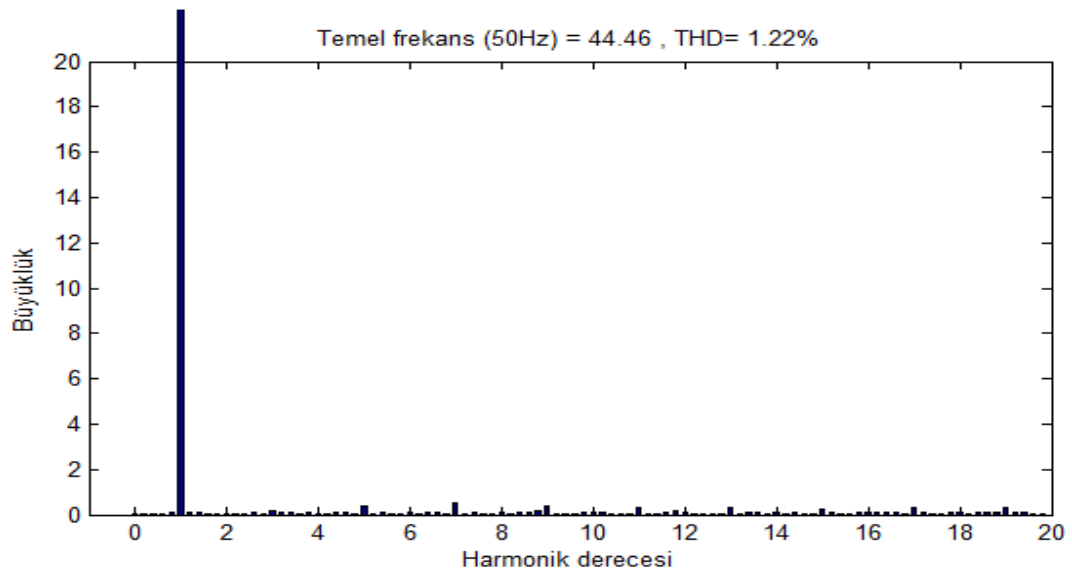
Şekil 6.29. Tetikleme sinyalleri (Sinyal 3, Sinyal 4)

Evirici tetikleme sinyalleri (Sinyal 5, Sinyal 6):



Şekil 6.30. Tetikleme sinyalleri (Sinyal 5, Sinyal 6)

Kaynak akımının harmonik analizi:

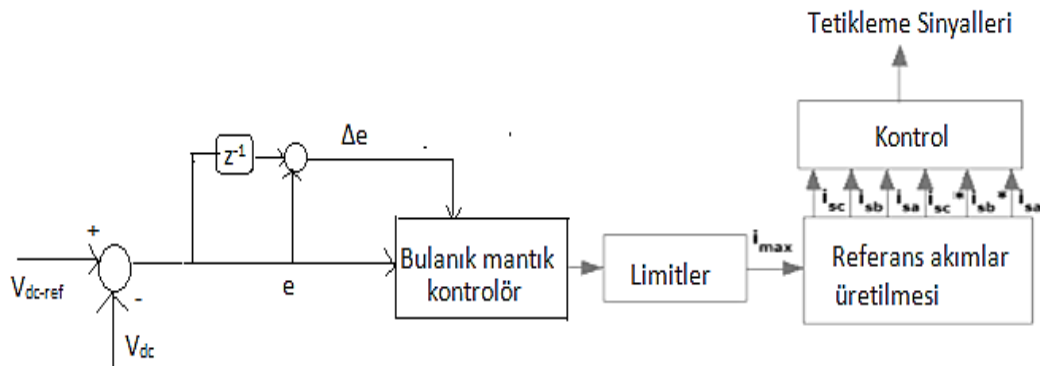


Şekil 6.31. Kaynak akımının harmonik analizi

PAGF sisteme bağlı iken 5., 7., 11., 13,... dereceli harmonikler giderilmiştir. Kaynak akımının THD oranı %1.22 olduğu Şekil 6.30'da görülmektedir. Reaktif güç kompanzasyonu olarak Şekil 6.23'te reaktif güç sıfıra çok yaklaşmıştır. Her iki sonuçta görüldüğü gibi PAGF güç kalitesi problemlerini gidermede başarı sağlamıştır. Geleneksel kontrol sistemi olan PI ile tasarlanan PAGF simülasyon sonuçları bir sonraki adımda tasarlanacak Bulanık mantık temelli kontrolörlü PAGF ile karşılaştırılacaktır.

6.5. Bulanık Mantık Teorisi ile Tasarlanan PAGF

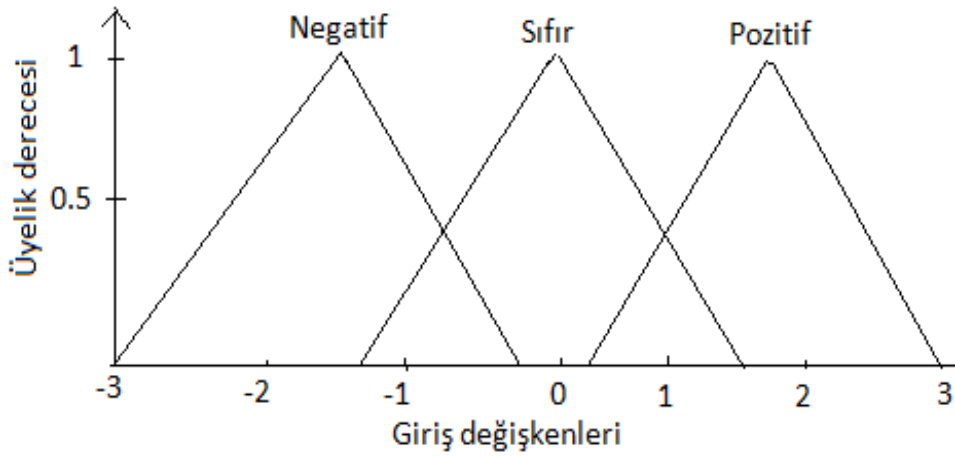
PAGF için tasarlanan bulanık mantık temelli kontrolör için MATLAB ortamında bulunan bulanık mantık arayüz sistemi (FIS) kullanılmıştır. Bulanık mantık kontrolör tasarımında kullanılacak üyelik fonksiyonların belirlenmesinde sistemin çalışması dikkate alınmıştır. Bulanık mantık tasarımında birçok çeşit üyelik fonksiyonu kullanılabilir ancak sistemimizde üçgen üyelik fonksiyonunun daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bulanık mantık kontrolör yapısı iki girişli tek çıkışlı bir sistem olarak tasarlanmıştır. Üyelik fonksiyonları üç değişkenden oluşmaktadır. Bundan dolayı dokuz kuraldan oluşan kural tablosu oluşturulmuştur. Durulaştırma yöntemi olarak ise ağırlık merkezi yöntemi seçilmiştir. Şekil 6.32'de tasarlanan bulanık kontrolörün referans akımların hesaplanması için kullanımı gösterilmiştir. Evirici yapısındaki gerilim kaynağı ile referans gerilim kaynağının karşılaştırılması ile elde edilen sonuç bulanık mantık kontrolör kullanılarak kontrol edilmiştir.



Şekil 6.32. PAGF için bulanık mantık temelli kontrolör

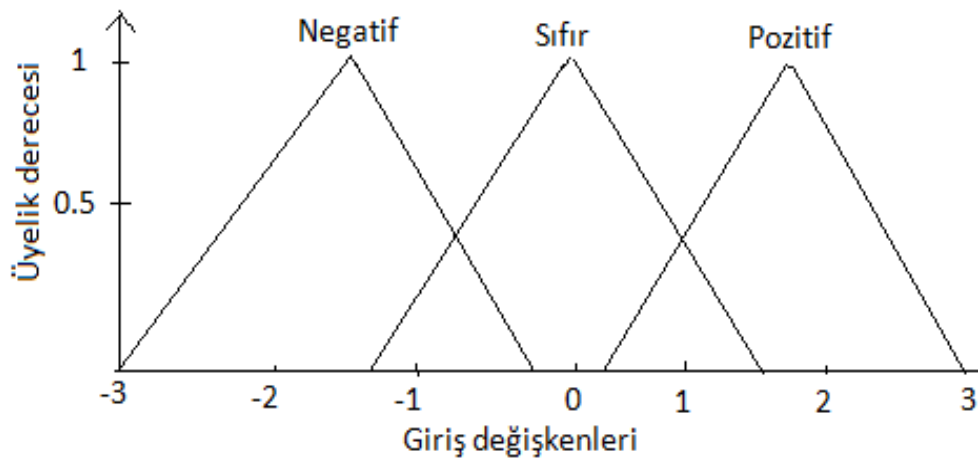
Üyelik fonksiyonlarını oluşturan iki giriş hata sinyali (e) ve hata sinyalinin değişimi (Δe) olarak adlandırılır. Giriş üyelik fonksiyonlarının değişim aralıkları $[-3, 3]$ aralığında belirlenmiştir. Çıkış üyelik fonksiyonunun değişim aralıkları ise $[0, 3]$ aralığında belirlenmiştir.

Hata sinyalinin (e) üyelik fonksiyonları:



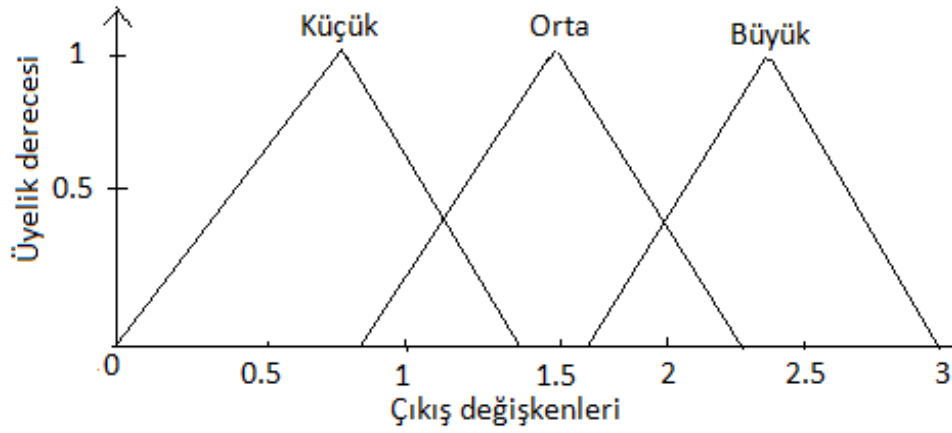
Şekil 6.33. Hata sinyali (e) üyelik fonksiyonları

Hata sinyalinin değişiminin (Δe) üyelik fonksiyonları:



Şekil 6.34. Hata sinyalinin değişimi (Δe) üyelik fonksiyonları

Çıkışın üyelik fonksiyonları:



Şekil 6.35. Çıkışın üyelik fonksiyonları

6.5.1. Kural ifadelerinin ve kural tablosunun oluşturulması

Kural ifadelerinin oluşturulmasında uzman deneyimi veya deneme yanılma yöntemi kullanılabilir. Sistemimiz iki girişli bir çıkışlı olduğundan kurallar iki giriş ve bir çıkış ifadesi üzerinde yazılır. Aşağıda sistem için oluşturulan kurallar verilmiştir.

1. Eğer e “Negatif” ve Δe “Negatif” ise çıkış “Küçük”
2. Eğer e “Negatif” ve Δe “Sıfır” ise çıkış “Büyük”
3. Eğer e “Negatif” ve Δe “Pozitif” ise çıkış “Orta”
4. Eğer e “Sıfır” ve Δe “Negatif” ise çıkış “Büyük”
5. Eğer e “Sıfır” ve Δe “Sıfır” ise çıkış “Orta”
6. Eğer e “Sıfır” ve Δe “Pozitif” ise çıkış “Küçük”
7. Eğer e “Pozitif” ve Δe “Negatif” ise çıkış “Orta”
8. Eğer e “Pozitif” ve Δe “Sıfır” ise çıkış “Büyük”
9. Eğer e “Pozitif” ve Δe “Pozitif” ise çıkış “Büyük”

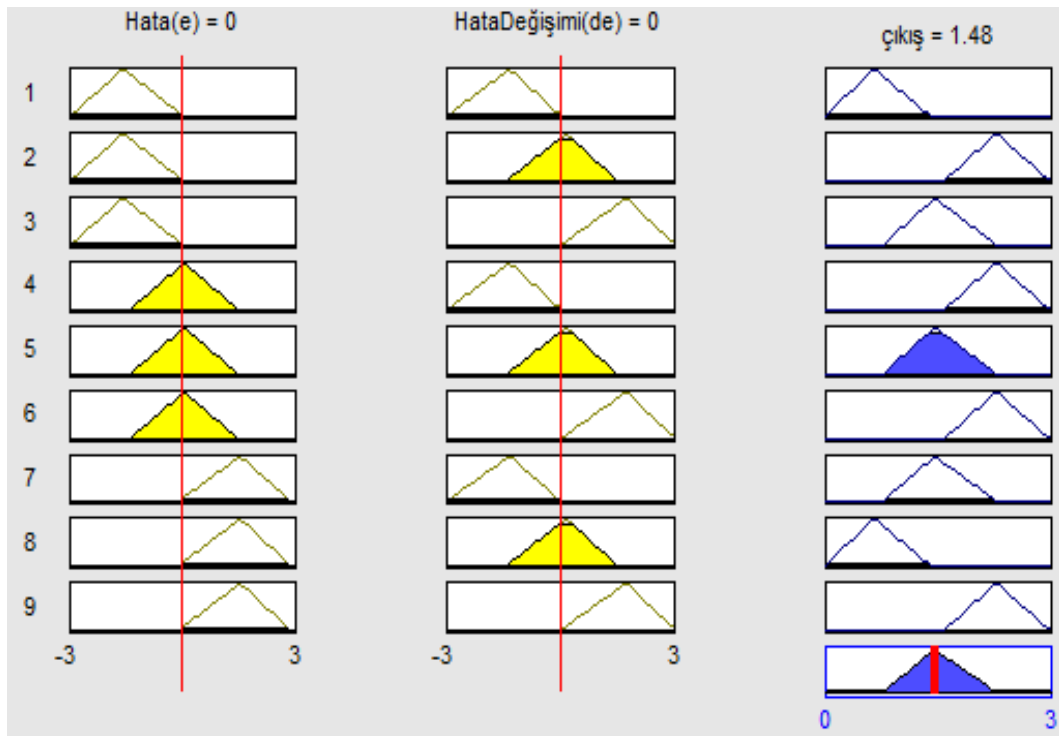
Oluşturulan kurallar tablo halinde oluşturulabilir. Tablo 6.3’te oluşturulan kurallar tablo halinde gösterilmiştir.

Tablo 6.3. Kural tablosu

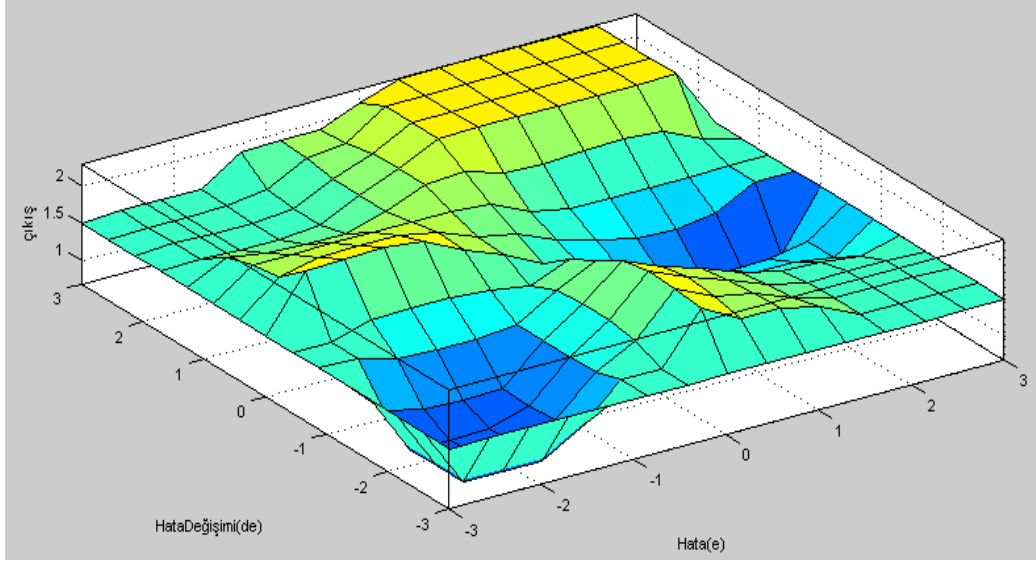
e Δe	Negatif	Sıfır	Pozitif
Negatif	Küçük	Büyük	Orta
Sıfır	Büyük	Orta	Büyük
Pozitif	Orta	Küçük	Büyük

Kuralların görünümü:

Tasarımın yapıldığı MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan kuralların görünümü ve kontrol yüzeyi elde edilebilir. Şekil 6.36'da kuralların görünümü ve Şekil 6.37'de kontrol yüzeyi verilmiştir.



Şekil 6.36. Kuralların görünümü

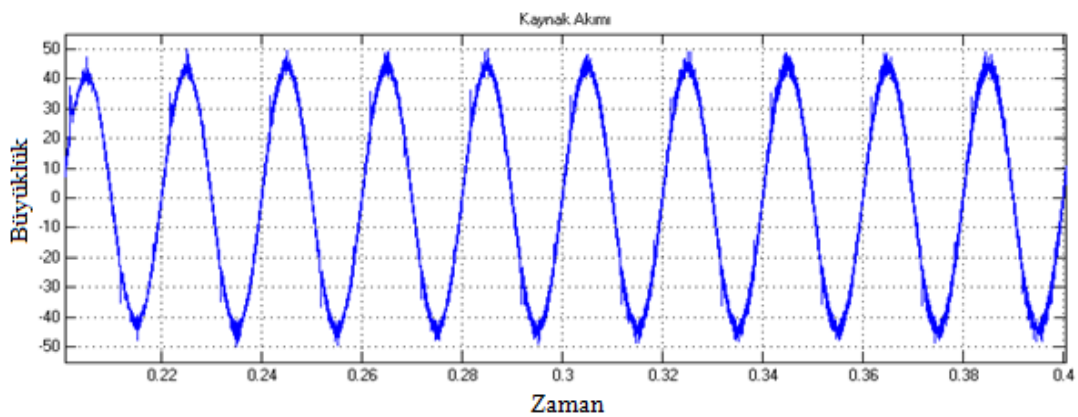


Şekil 6.37. Kontrol yüzeyi

6.5.2. Bulanık mantık temelli PAGF simülasyon sonuçları

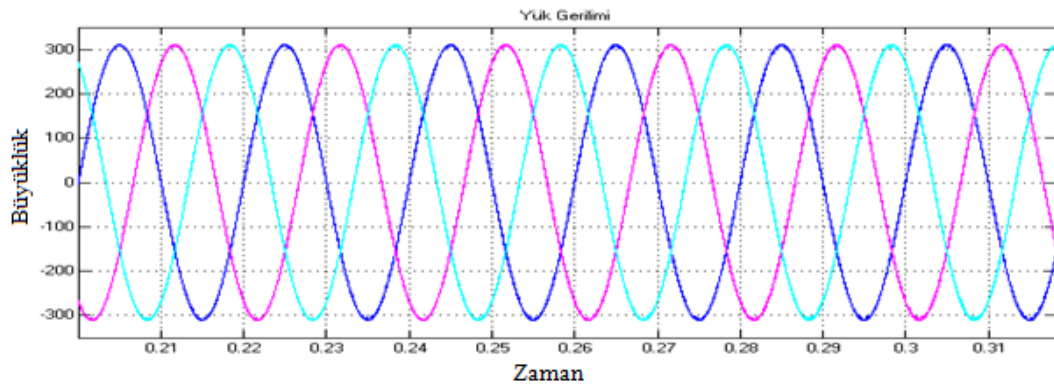
Bulanık mantık temelli kontrolör ile tasarlanan PAGF simülasyon sonuçları geleneksel kontrol teorisi temelli PI kontrolör ile tasarlanan PAGF ile karşılaştırılacaktır. Bulanık mantık temelli PAGF ile kaynak akımı sinüzoidal dalga şekline geldiği Şekil 6.38’de görülmektedir. Ayrıca kaynak akımının THD oranı %1.01 ve reaktif güç sıfıra çok yakın bulunmuştur. Bu sonuçlardan görüldüğü gibi bulanık mantık temelli kontrolör geleneksel kontrol teorisi temelli PI kontrolöre göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Kaynak akımı:



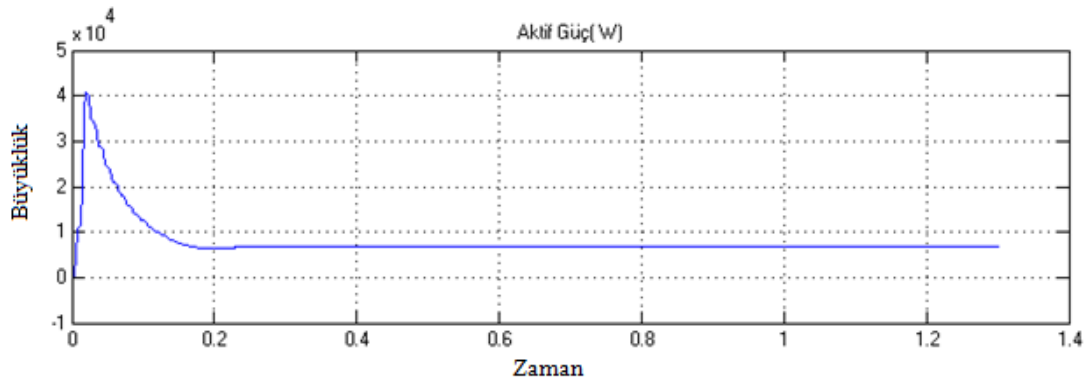
Şekil 6.38. Kaynak akımı

Kaynak gerilimi:



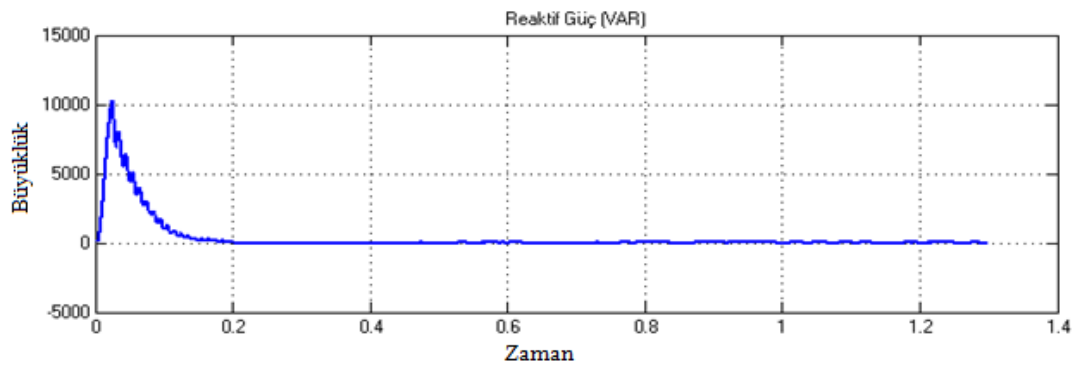
Şekil 6.39. Kaynak gerilimi

Aktif güç:



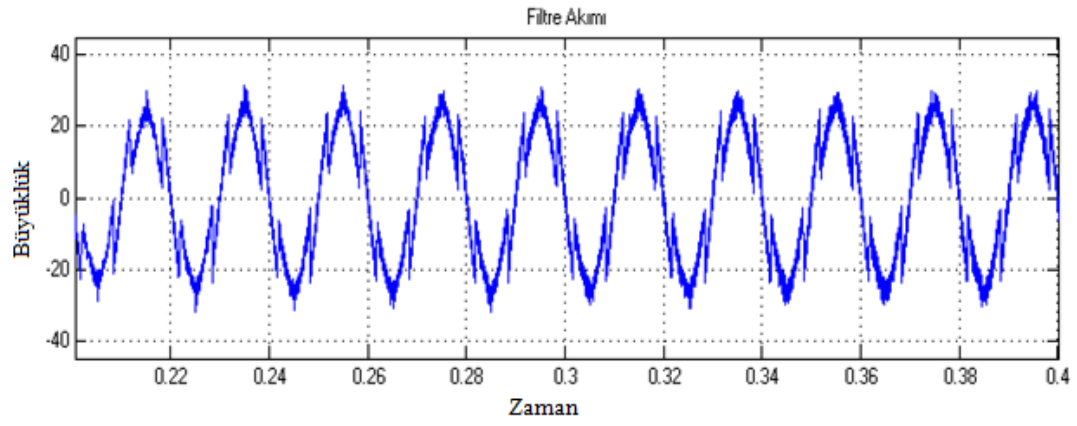
Şekil 6.40. Aktif güç

Reaktif güç:



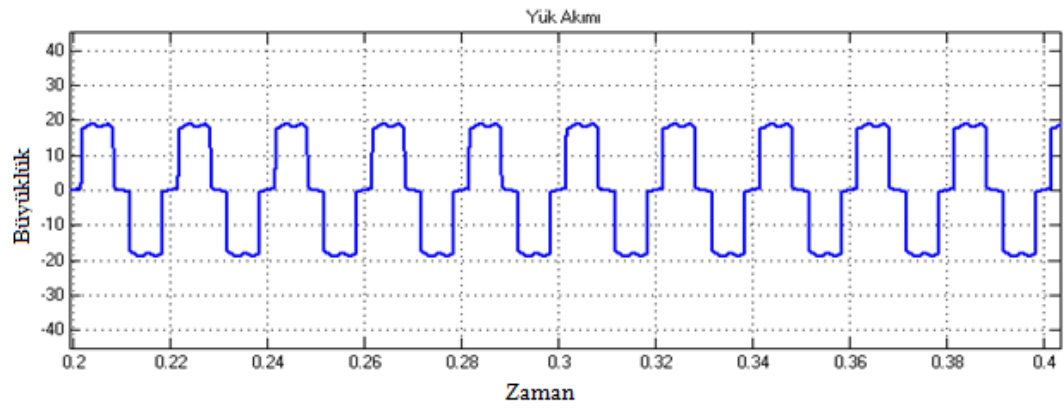
Şekil 6.41. Reaktif güç

Filtre akımı:



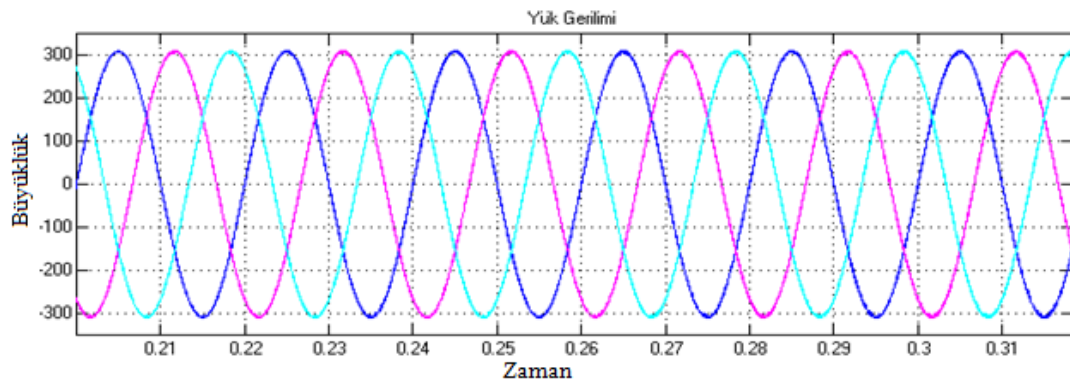
Şekil 6.42. Filtre akımı

Yük akımı:



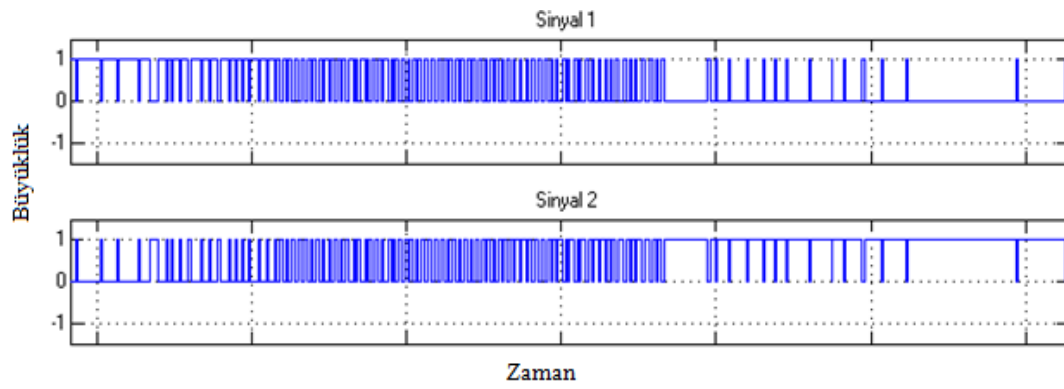
Şekil 6.43. Yük akımı

Yük gerilimi:



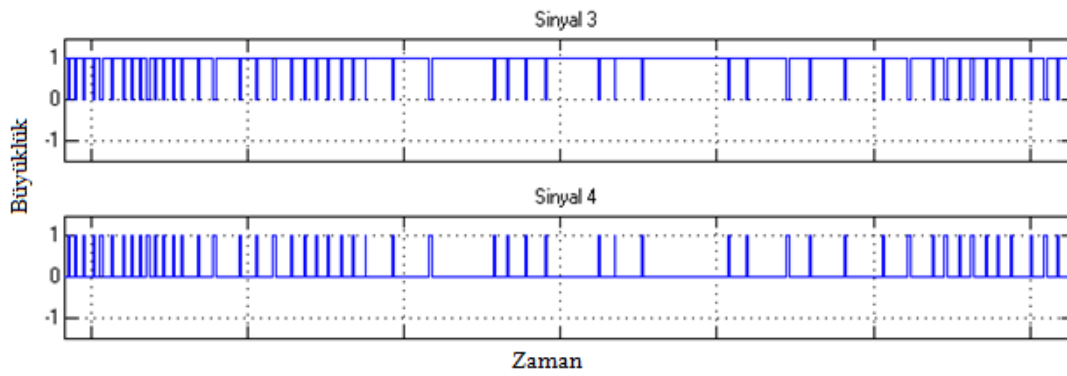
Şekil 6.44. Yük gerilimi

Evirici tetikleme sinyalleri (Sinyal 1, Sinyal 2):



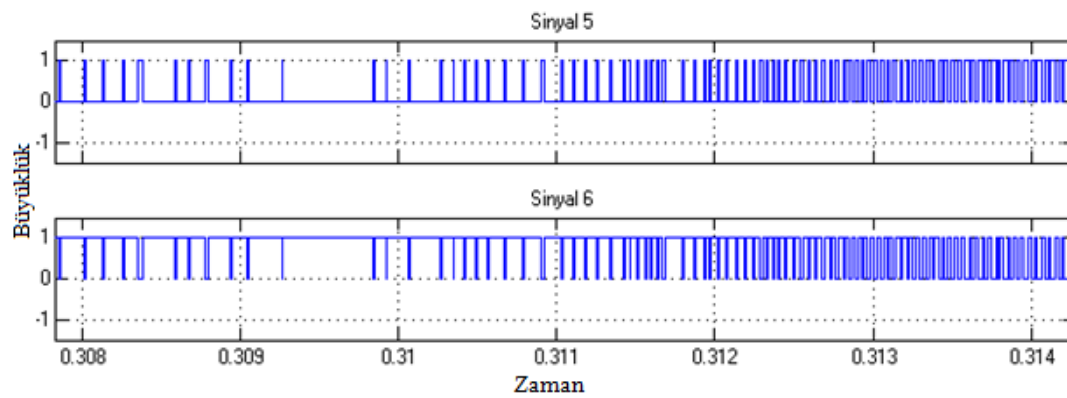
Şekil 6.45. Tetikleme sinyalleri (Sinyal 1, Sinyal 2)

Evirici tetikleme sinyalleri (Sinyal 3, Sinyal 4):



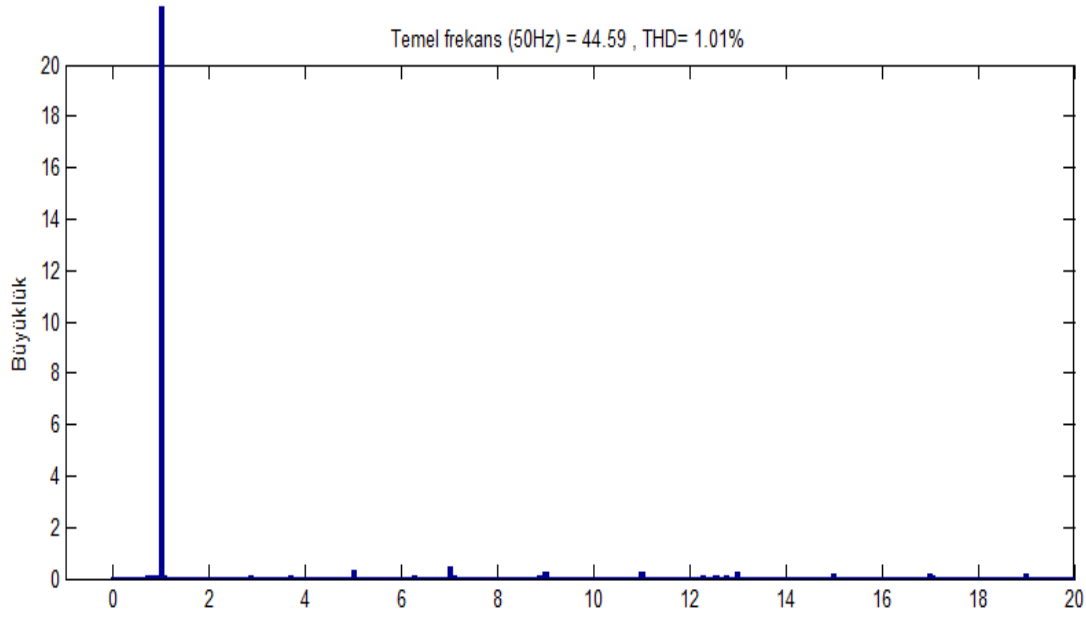
Şekil 6.46. Tetikleme sinyalleri (Sinyal 3, Sinyal 4)

Evirici tetikleme sinyalleri (Sinyal 5, Sinyal 6):



Şekil 6.47. Tetikleme sinyalleri (Sinyal 5, Sinyal 6)

Kaynak akımının harmonik analizi:



Şekil 6.48. Kaynak akımının harmonik analizi

6.6. Sonuçların Karşılaştırılması

Geleneksel kontrol teorisi temelli kontrolör ve bulanık mantık teorisi temelli kontrolör PAGF için tasarlandı ve her iki kontrolör için simülasyon sonuçları elde edilmiştir. PI kontrolör ile tasarlanan PAGF’de kaynak akımını sinüzoidal dalga şekline getirmiş ve kaynak akımının THD oranı %27.11’den %1.22 değerine getirmiştir. Bu değer harmonik standartlarına göre %3 değerinden düşük olduğu için başarılı olarak değerlendirilir. Reaktif güç değeri 52.03 Var değerinden 12.04 Var değerine düştüğü için tasarlanan PI kontrolör temelli PAGF reaktif güç kompanzasyonunu sağlamıştır. Bulanık mantık temelli kontrolör ile tasarlanan PAGF’de ise kaynak akımını yine sinüzoidal dalga şeklini getirmiş ancak THD oranını %27.11’den %1.01 değerine getirmiştir. Bu sonuca göre bulanık mantık temelli kontrolör geleneksel kontrolöre göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Reaktif güç değeri ise sıfıra çok daha iyi yaklaşmış ve geleneksel kontrolöre göre daha iyi sonuç vermiştir. Tablo 6.4’te simülasyon sonucu elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tablo 6.4. Sonuçların karşılaştırılması

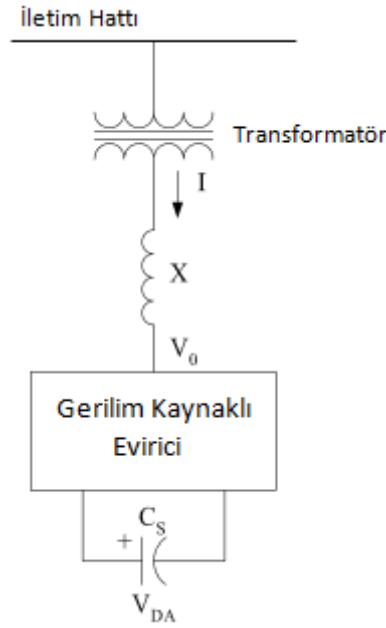
	PAGF' siz	Geleneksel kontrol teorisi temelli PI	Bulanık mantık temelli kontrolör
Kaynak akımı THD	%27.11	% 1.22	% 1.01
Reaktif güç (VAR)	52.03	12.04	-1.908

BÖLÜM 7. STATİK SENKRON KOMPANZATÖR

7.1. Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM)

Statik senkron kompanzatör (STATCOM) evirici tabanlı ikinci nesil paralel FACTS cihazıdır. Güç sistemlerine paralel bağlanarak reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim ayarlaması için kullanılır [54]. STATCOM'un reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim ayarlaması üzerindeki dikkat çekici başarısından dolayı, STATCOM üzerinde yapılan çalışmalar son yıllarda artmıştır.

STATCOM'un paralel reaktif güç kompanzatörü olarak çalışması ve performans karakteristiğinin ideal senkron hareketli kompanzatör ile benzer olması nedeniyle Statik senkron kompanzatör (STATCOM) olarak adlandırılmaktadır. STATCOM şebeke ile senkron olarak çalışan gerilim ve denetlenebilir reaktif güç kaynağı olarak adlandırılabilir [54]. STATCOM hem dağıtım hem de iletim sistemlerinde kullanılan evirici tabanlı bir FACTS cihazıdır. Bir STATCOM'un temel Şekil 7.1'de görüldüğü gibi bağlantı transformatörü, DA-AA dönüştürücü (gerilim kaynaklı evirici) ve enerji depolama elemanından oluşur [56]. Eviricinin doğru gerilim tarafında bulunan enerji depolama elemanı küçük bir kondansatör olduğunda STATCOM iletim sistemi ile sadece reaktif güç alış verişi yapabilir. Kondansatörün yerine bir akümülatör veya DC gerilim kaynağı kullanılırsa, STATCOM kontrolör çalışma bölgesi genişler ve iletim sistemi ile aktif ve reaktif güç alış verişi yapabilir. Eviricinin doğru gerilim tarafında bulunan enerji depolama elemanının değeri STATCOM'un fiziksel boyutu, performansı ve maliyeti açısından çok önemlidir. Bundan dolayı kondansatör değerinin uygun şekilde seçilmesi STATCOM'un maliyetinin azalmasını ve performansının artmasını sağlar [54, 55].



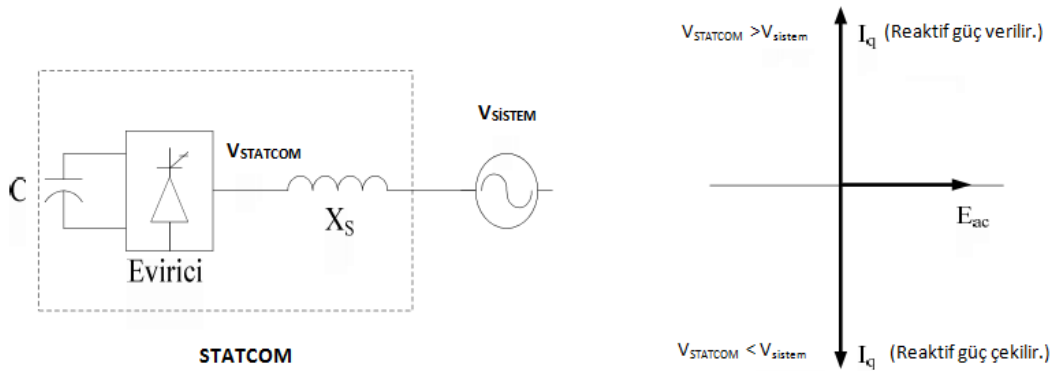
Şekil 7.1. STATCOM'un genel gösterimi

STATCOM'un esas fonksiyonu bağlantı noktasında iletim hattının gerilimini düzenlemektir. STATCOM bunu iletim hattından kontrollü reaktif akım çekerek sağlar [54]. STATCOM, büyük değerlerde dış reaktörlere veya kondansatör gruplarına ihtiyaç duymaksızın iletim sisteminde reaktif güç tüketerek veya üreterek gerilim desteği sağlar. Çıkış gerilimin frekansı sistemin temel frekansına eşit olmalıdır. Çıkış gerilimini ile sistem gerilimi arasındaki faz farkına göre sistemden aktif güç çekebilir yada sisteme aktif güç verebilir. STATCOM bağlı bulunduğu şebekede meydana gelen değişimlere hızlı cevap verme yeteneği ile dinamik kararlılığı sağlar.

Evirici tabanlı FACTS elemanı olan STATCOM, tristör tetiklemeli statik Var kompanzatör limitlerini aşmak amacıyla modellenmiş ve reaktif güç kompanzasyonu ile bağlı bulunduğu sistem gerilimini belirli limitlerde kontrolüne imkan sağlamaktadır [39].

Reaktif güç, STATCOM çıkış geriliminin değiştirilmesi ile kontrol edilmektedir. Eğer STATCOM çıkış gerilimi ($V_{STATCOM}$), sistem geriliminden (V_{sistem}) büyük ise reaktif akım STATCOM'dan sisteme doğru akmakta ve sisteme reaktif güç aktarılmaktadır. Bu durumda akım gerilimden yaklaşık olarak 90^0 ilerde olup aktarılan güç kapasitiftir. Eğer STATCOM çıkış gerilimi ($V_{STATCOM}$) sistem

geriliminden (V_{sistem}) küçük ise reaktif akım, sistemden STATCOM'a doğru akmakta ve sistemden reaktif güç çekilmektedir. Bu durumda akım gerilimden yaklaşık olarak 90° geride olup sistemden endüktif güç çekilmektedir. STATCOM çıkış geriliminin (V_{STATCOM}) sistem geriliminden (V_{sistem}) eşit olması durumunda reaktif akım ve reaktif güç alışverişi sıfır olmaktadır. Şekil 7.2'de STATCOM'un devre modeli ve reaktif güç akışının vektörel gösterimi verilmiştir [54].



Şekil 7.2. STATCOM tek hat modeli ve reaktif güç akışının vektörel gösterimi

Kondansatör, evirici için gerekli olan DC gerilimi sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Evirici çıkış gerilimi (V_{STATCOM}) ile sistem gerilimi (V_{sistem}) arasındaki faz farkına bağlı olarak kondansatör dolar veya boşalır. Transformatör direnci ihmal edilmesi durumunda sistemden STATCOM'a akan üç faz için aktif güç, (7.1) eşitliğine verilmiştir.

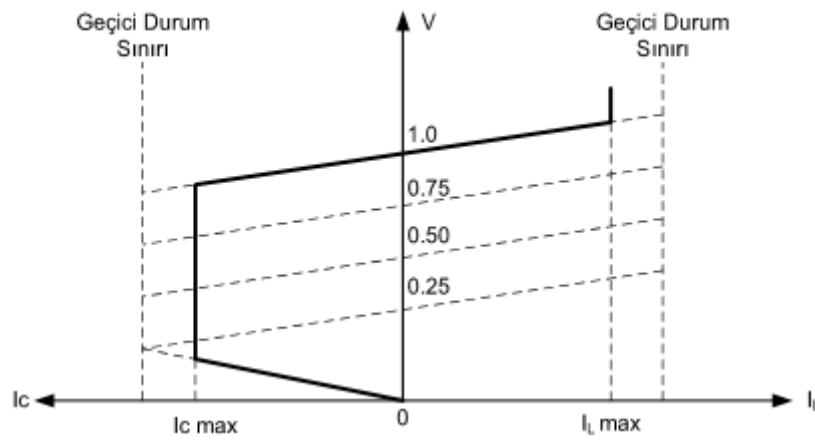
$$P = 3 \cdot \frac{V_{\text{sistem}} \cdot V_{\text{statcom}}}{X} \cdot \sin \alpha \quad (7.1)$$

(7.1) eşitliğinde V_{sistem} sistem gerilimi, V_{STATCOM} eviricinin çıkış gerilimin etkin değeri, X trafoların eşdeğer reaktansı ve α gerilimler arası faz farkıdır. Bu durumda $\alpha > 0$ ise evirici çıkış gerilimi (V_{STATCOM}), V_{sistem} geriliminden geri fazdadır. Çekilen aktif güç $P > 0$ olduğunda kondansatör dolar. $\alpha < 0$ durumunda ise çekilen aktif güç $P < 0$ olur ve kondansatör boşalır.

Sürekli halde STATCOM ve sistem arasındaki güç alışveriş çoğunlukla reaktiftir. Sürekli durumda evirici çıkış gerilimi (V_{STATCOM}), V_{sistem} geriliminden geri fazda

tutularak sistemden çekilen aktif güç transformatör ve evirici kayıplarını karşılamak için kullanılmaktadır.

Şekil 7.3'te STATCOM'un akım gerilim karakteristiği gösterilmiştir [54]. Akım gerilim karakteristiğinden görüldüğü gibi STATCOM kapasitif ve endüktif kompanzasyon sağlayabilir ve sistem geriliminden bağımsız olarak çıkış akımı kontrol edilebilir.



Şekil 7.3. STATCOM' un akım gerilim karakteristiği

STATACOM'un akım gerilim karakteristiği bağlantı transformatörünün kaçak reaktansına ve eviricinin çıkış gerilimine bağlıdır. Herhangi bir gerçek sistem gerilim değerinde tam kapasitif veya tam endüktif çıkış akımı sağlayabilmesi, STATACOM'un statik var kompanzatöre göre avantaj sağlar. Sürekli halde daha büyük yükleri beslemek için, STATCOM daha fazla reaktif güç sağlar. STATCOM yapısı gereği simetrik endüktif ve kapasitif güç değerlerine sahiptir. Bu nedenle anma güç değerleri 100 MVAR endüktif ve 100 MVAR kapasitif olabilir.

7.2. STATCOM'un Kontrolü

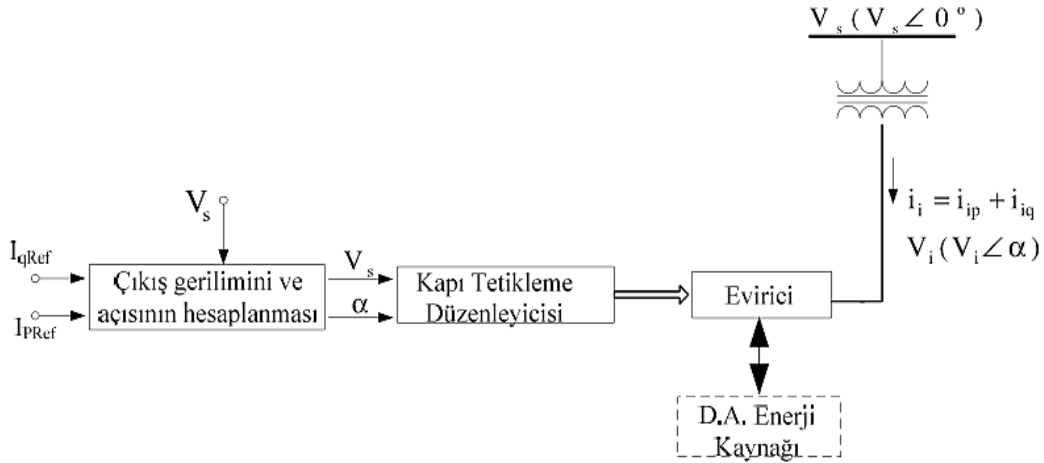
STATCOM'un kontrolünde iki teknik kullanılır. Bunlar darbe genişlik modülasyonu ile kontrol edilen STATCOM (DGM-STATCOM) ve geleneksel faz kontrol tekniği ile kontrol edilen STATCOM'dur. Her iki STATCOM'un temel modeli aynıdır. Bu iki STATCOM arasındaki temel fark kontrol yapılarıdır.

Geleneksel STATCOM'da kontrol eviricinin düşük anahtarlama frekansında yapılır. STATCOM'un kontrolü, eviricinin çıkış gerilimini şebeke gerilimine göre birkaç derece ileri ya da geri fazda tutulması için kontrollü anahtarların anahtarlama açılarının değiştirilmesi ile gerçekleştirir. Eviricinin çıkış gerilimi, kontrol edilmek istenen baranın gerilimine göre ileri ya da geri fazda tutulmasındaki amaç, aktif güç akışının şebekeden eviriciye ya da eviriciden şebekeye doğru olmasını sağlamaktır. Bu durumda kondansatörün dolup boşalması ile doğru gerilimin değeri bunun sonucunda eviricinin çıkış gerilimi değişir [56].

STATCOM çok sayıda denetlenebilen yarıiletken güç anahtarlarından oluşur. Kapı tetiklemeleri aktif/reaktif güç referans işaretleri ile evirici iç denetim devreleri tarafından üretilir. Dış referans işaretler ise STATCOM'un işlevsel çalışmasını belirler [54].

STATCOM'un iç denetim yapısının ana görevi eviricinin anahtarlama elemanlarının kendi maksimum akım ve gerilim sınırları içinde tutulması ile istenilen genlik ve faz açılı bir çıkış gerilimi üretecek şekilde eviricilerdeki anahtarlama elemanlarının çalışmasını sağlar. İç denetim, istenilen genlik ve faz açısındaki gerilimin dış denetim tarafından sağlanan referans işaretlerle güç sistemine bir reaktansla bağlanan sinüzoidal bir gerilim kaynağı olarak görülebilir.

İç denetim yapısı eviricideki anahtarlama elemanlarını amacına uygun olarak çalıştırmak için; dış denetim tarafından sağlanan I_{qref} ve I_{pref} değerlerinden hesaplanan gerekli çıkış gerilimin genliği ve faz açısını hesaplayarak gerçekleştirir. Bu şekilde bir denetim yaparak sistem gerilimine uygun bir gerilim üretir. Şekil 7.4'te eviricinin dalga şeklini belirleyen iç denetim yapısı gösterilmiştir [54].

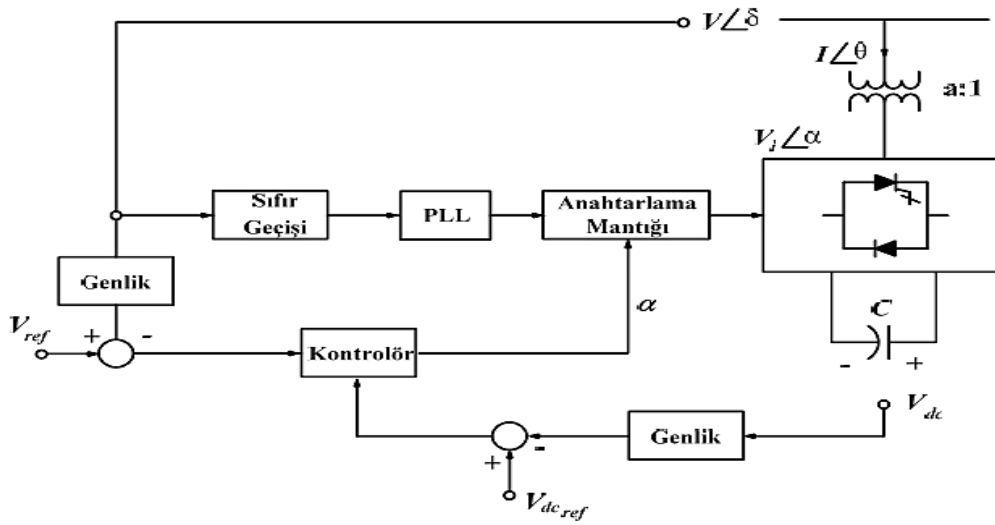


Şekil 7.4. STATCOM' un iç denetim yapısı

STATCOM'da harmonik içeriğinin azaltılması için faz kaydırma transformatörleri yardımı ile iki veya üç seviyeli geri beslemeli devreler kullanılmaktadır. Bu şekilde eviricinin 6 darbeli çalışması ile üretilen karakteristik harmonik dereceleri yok edilir. Ancak bu durum iletim sistemlerini kapsayan bu uygulamalarda faz kaydırma transformatörleri STATCOM'un boyutunu ve karmaşıklığını artırır.

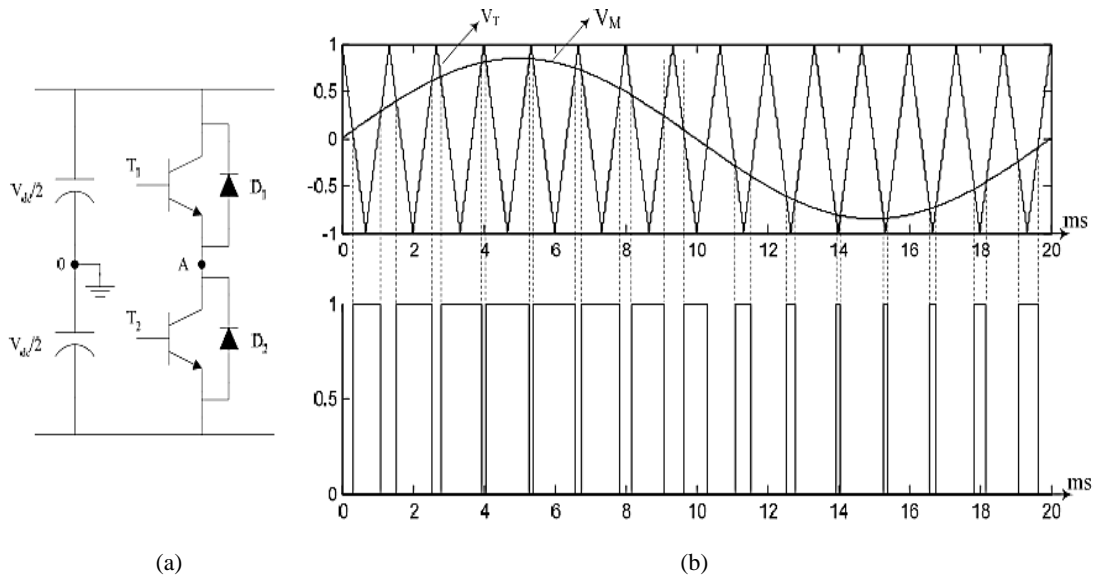
STATCOM'un darbe genişlik modülasyonu (DGM) teknikleri ile kontrolü, eviricilerin alternatif çıkış gerilimini değiştirmek için ayarlanabilir görev oranlı çok darbeli yapı temeline dayanır. Darbe sayısının artması düşük dereceli harmonik içeriğini azaltır, yüksek dereceli harmonik içeriğini artırır. Darbe sayısının artması anahtarlama kayıplarını yükseltir [56].

DGM ile STATCOM'un kontrolü, iletim sistemlerindeki gerilim kaynaklı kontrolörler için çok daha pratik olmaktadır. Son yıllarda güç elektroniği elemanlarındaki gelişmelerle anahtarlama kayıpları azaltılmıştır. DGM kontrolünde, elektronik devrelerin hızlı anahtarlamasından dolayı anahtarlama kayıpları ve sönümleyici devresi önem kazanmaktadır. Bu durumlar direkt olarak kapasitörün dolması ve boşalmasını etkiler. Şekil 7.5'te DGM kontrollü STATCOM blok diyagramı verilmiştir [57].



Şekil 7.5. DGM kontrollü STATCOM blok diyagramı

Eviricide kullanılan anahtarlara kapı darbelerinin üretilmesi için birçok DGM modeli vardır. Bunlardan en çok kullanılan DGM modeli Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonudur (SDGM). SDGM’de evirici kazancı ve buna bağlı olarak da eviricinin çıkış gerilimi denetlenir. Şekil 7.6’da sistem frekansı le aynı frekansta bir sinüs dalgası (modülasyon dalgası) ve testere dişli (taşıcı dalga) olmak üzere iki işaretin karşılaştırılması ile bir faz bacağına ait anahtarlar için gerekli darbeler, sinüs dalgası ile testere dişli dalganın geçiş dalgaları kullanılarak üretilir [54].



(a)

(b)

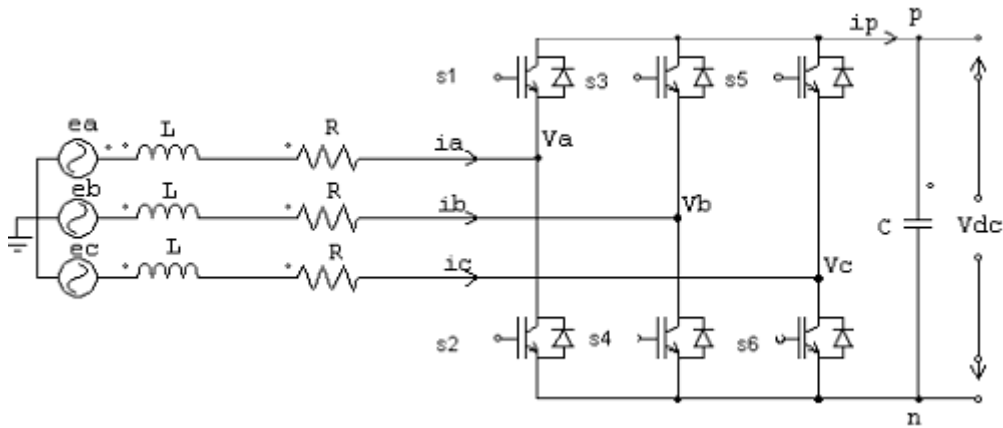
Şekil 7.6. a) Eviricinin bir fazına ait devre şeması b) DGM dalgalarının üretilmesi

Modülasyon dalgasının frekansı eviricinin çıkış gerilimin frekansı, taşıyıcı dalğanın frekansı ise anahtarlama frekansını belirler. Taşıyıcı dalğanın frekansının modülasyon dalgasının frekansına oranı (7.2) eşitliğinde verilmiştir. Bu oran frekans modülasyon oranıdır. f_T , taşıyıcı dalğanın frekansı ve f_m ise modülasyon dalgasının frekansıdır.

$$m_f = \frac{f_T}{f_m} \quad (7.2)$$

7.3. STATCOM'un Modeli

Genellikle gerilim kaynaklı evirici modeli STATCOM uygulamalarında yaygındır. Şekil 7.7'de STATCOM devre modeli gösterilmiştir [55].



Şekil 7.7. STATCOM devre modeli

Şekil 7.7'de verilen STATCOM devre modelinde; I_a , i_b , i_c akımları hat akımını, V_a , V_b , V_c evirici faz gerilimini, e_a , e_b , e_c kaynak gerilimini gösterir. STATCOM modelinde anahtar tetiklemeleri s_1 , s_2 , s_3 , s_4 , s_5 , s_6 olarak gösterilmiştir. Tetikleme değerleri uygun açılarda ayarlanması STATCOM'un daha verimli çalışmasını sağlar.

STATCOM'un matematiksel modelini STATCOM devre modeli temel alınarak türetilir [55]. Güç elektroniği temel alınarak STATCOM'un matematiksel ifadesi çıkartılır. İlk olarak devredeki DA tarafındaki i_p akımının eşitliği (7.3) ifadesinde verilmiştir.

$$\dot{I}_p = \begin{matrix} D_{ap} & - & D_{bp}^T & \dot{I}_{ab} \\ D_{bp} & - & D_{cp} & \dot{I}_{bc} \\ D_{cp} & - & D_{ap} & \dot{I}_{ca} \end{matrix} \quad (7.3)$$

(7.3) eşitliğinde bulunan ifadeler aşağıda verilmiştir.

D_{kp} anahtarlama fonksiyonu ve $k=a,b,c$

$$\dot{I}_{ab} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a - \dot{I}_b), \quad \dot{I}_{bc} = \frac{1}{3}(\dot{I}_b - \dot{I}_c), \quad \dot{I}_{ca} = \frac{1}{3}(\dot{I}_c - \dot{I}_a)$$

Eviricinin üreteceği gerilimler, (7.4) ifadesindeki gibi yazılır.

$$\begin{matrix} V_a & - & V_b & D_{ap} & - & D_{bp} \\ V_b & - & V_c & D_{bp} & - & D_{cp} \\ V_c & - & V_a & D_{cp} & - & D_{ap} \end{matrix} V_{dc} \quad (7.4)$$

STATCOM devre modeli dikkate alınarak;

$$Ri_a + L \frac{di_a}{dt} = e_a - V_a \quad (7.5)$$

$$Ri_b + L \frac{di_b}{dt} = e_b - V_b \quad (7.6)$$

$$Ri_c + L \frac{di_c}{dt} = e_c - V_c \quad (7.7)$$

$$L \frac{di_{ab}}{dt} = \frac{1}{3} L \left(\frac{di_a}{dt} - \frac{di_b}{dt} \right) \quad (7.8)$$

eşitlikleri yazılabilir.

(7.8) eşitliği genişletilerek, (7.9) eşitliği yazılabilir.

$$\begin{aligned}
L \frac{di_{ab}}{dt} &= \frac{1}{3} [e_a - V_a - (e_b - V_b)] - i_{ab}R \\
&= \frac{1}{3} [e_a - e_b - (V_a - V_b)] - i_{ab}R
\end{aligned} \tag{7.9}$$

Benzer şekilde diğer eşitlikler genişletilerek (7.10) ve (7.11) eşitlikleri yazılabilir.

$$L \frac{di_{bc}}{dt} = \frac{1}{3} [e_b - e_c - (V_b - V_c)] - i_{bc}R \tag{7.10}$$

$$L \frac{di_{ca}}{dt} = \frac{1}{3} [e_c - e_a - (V_c - V_a)] - i_{ca}R \tag{7.11}$$

(7.9), (7.10), (7.11) eşitlikleri birlikte (7.12) ifadesinde matris olarak yazılabilir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3L} \begin{bmatrix} e_a - e_b & - & V_a - V_b \\ e_b - e_c & - & V_b - V_c \\ e_c - e_a & - & V_c - V_a \end{bmatrix} - \frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} \tag{7.12}$$

(7.4) eşitliği (7.12) eşitliğinde yerine yazılırsa, (7.13) eşitliği elde edilir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3L} \begin{bmatrix} e_a - e_b & - & D_{ap} - D_{bp} \\ e_b - e_c & - & D_{bp} - D_{cp} \\ e_c - e_a & - & D_{cp} - D_{ap} \end{bmatrix} V_{dc} - \frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} \tag{7.13}$$

\dot{I}_p kondansatör akımı anahtarlama bağlı olarak değişmektedir. Bu durum (7.14) eşitliğinde ifade edilebilir.

$$C \frac{dV_{pn}}{dt} = \dot{I}_p = \begin{bmatrix} D_{ap} & - & D_{bp} \\ D_{bp} & - & D_{cp} \\ D_{cp} & - & D_{ap} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_{bc} \\ \dot{I}_{ca} \end{bmatrix} \tag{7.14}$$

Üç fazlı AA devresi modellemede kolaylık olması amacıyla yaygın olarak Park dönüşümü ile iki referanslı modele dönüştürülür. Bu iki bileşen aktif ve reaktif bileşen olarak tanımlanır.

Üç fazlı akımlar (7.15) ve (7.16) eşitliklerindeki Park dönüşümü ile aktif ve reaktif bileşenlerine ayrılır. Burada d; aktif bileşeni ve q; reaktif bileşeni temsil etmektedir.

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ 0 \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{pmatrix} \quad (7.15)$$

$$P = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 120) & \cos(\omega t + 120) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - 120) & -\sin(\omega t + 120) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (7.16)$$

Park dönüşümü ile akımlar aktif (d) ve reaktif (q) formunda yazılırsa, (7.17) eşitliği elde edilir.

$$\begin{pmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} i_a & - & i_b \\ i_b & - & i_c \\ i_c & - & i_a \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} i_a & i_b \\ i_b & i_c \\ i_c & i_a \end{pmatrix} = T^{-1} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7.17)$$

(7.17) eşitliğinden (7.18) eşitliği elde edilir.

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} -\sin(\omega t - \frac{1}{3}\pi) & \cos(\omega t - \frac{1}{3}\pi) & 1 \\ \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) & 1 \\ -\sin(\omega t + \frac{1}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{1}{3}\pi) & 1 \end{pmatrix} \quad (7.18)$$

(7.17) eşitliği düzenlenirse (7.19) eşitliği elde edilir.

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} \dot{i}_{ab} \\ \dot{i}_{bc} \\ \dot{i}_{ca} \end{pmatrix} \quad (7.19)$$

Benzer şekilde (7.20) ve (7.21) eşitlikleri elde edilir.

$$\begin{matrix} e_d \\ e_q \end{matrix} = T \begin{matrix} e_{ab} \\ e_{bc} \\ e_{ca} \end{matrix} \quad (7.20)$$

$$\begin{matrix} D_d \\ D_q \end{matrix} = T \begin{matrix} D_{ab} \\ D_{bc} \\ D_{ca} \end{matrix} \quad (7.21)$$

(7.20) eşitliği (7.14) eşitliğinin sol tarafına yazılırsa (7.22) eşitliği elde edilir.

$$\frac{d}{dt} \begin{matrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{matrix} = \frac{d(T^{-1} \begin{matrix} i_d \\ i_q \end{matrix})}{dt} = \frac{dT^{-1}}{dt} \begin{matrix} i_d \\ i_q \end{matrix} + T^{-1} \frac{di_d}{dt} \quad (7.22)$$

(7.20) ve (7.21) eşitlikleri (7.13) eşitliğine uygulanırsa (7.23) eşitliği elde edilir.

$$\frac{dT^{-1}}{dt} \begin{matrix} i_d \\ i_q \end{matrix} + T^{-1} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{3L} T^{-1} \begin{matrix} e_d \\ e_q \end{matrix} - \frac{1}{3L} T^{-1} \begin{matrix} D_d \\ D_q \end{matrix} \cdot V_{dc} - \frac{R}{L} T^{-1} \begin{matrix} i_d \\ i_q \end{matrix} \quad (7.23)$$

Güç sistem ilkesinden, (7.24) ve (7.25) eşitlikleri elde edilir.

$$e_d = V_m \text{ ve } e_q = 0 \quad (7.24)$$

$$T \frac{dT^{-1}}{dt} = \begin{matrix} 0 & -w \\ w & 0 \end{matrix} \quad (7.25)$$

(7.23) eşitliğinin her iki tarafı T ile çarpılırsa ve (7.25) eşitliği uygulanırsa (7.26) eşitliği elde edilir.

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \begin{matrix} -\frac{R}{L} & w & -\frac{Dd}{3L} \\ -w & -\frac{R}{L} & -\frac{Dq}{3L} \end{matrix} \begin{matrix} i_d \\ i_q \\ V_{dc} \end{matrix} + \begin{matrix} \frac{1}{3L} \\ 0 \\ 0 \end{matrix} V_m \end{aligned} \quad (7.26)$$

(7.19) ve (7.21) eşitlikleri (7.14) eşitliğine uygulanırsa (7.27) eşitliği elde edilir.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{c} i_p = \frac{1}{c} \begin{matrix} D_{ap} & - & D_{bp} \\ D_{bp} & - & D_{cp} \\ D_{cp} & - & D_{ap} \end{matrix} \begin{matrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{matrix} = \begin{matrix} D_d \\ D_q \end{matrix}^T T^{-T} T^{-1} \begin{matrix} i_d \\ i_q \end{matrix} = \frac{3}{2c} \begin{matrix} D_d \\ D_q \end{matrix}^T \begin{matrix} i_d \\ i_q \end{matrix} \quad (7.27)$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{dV_{pn}}{dt} = \frac{1}{c} i_p = \frac{3}{2c} \begin{matrix} D_d \\ D_q \end{matrix}^T \begin{matrix} i_d \\ i_q \end{matrix} \quad (7.28)$$

(7.26) ve (7.28) eşitlikleri tekrar düzenlenirse;

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{-R}{L} i_d + i_q w - \frac{V_{dc}}{3L} D_d + \frac{1}{3L} V_m \quad (7.29)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L} i_q - i_d w - \frac{V_{dc}}{3L} D_q \quad (7.30)$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2c} i_d D_d + \frac{3}{2c} i_q D_q \quad (7.31)$$

eşitlikleri elde edilir.

(7.26) ve (7.27) eşitlikleri durum uzay matrisi şeklinde yazılırsa (7.32) eşitliği elde edilir.

$$\frac{d}{dt} \begin{matrix} i_d \\ i_q \\ V_{dc} \end{matrix} = \begin{matrix} -R/L & w & -D_d/3L \\ -w & -R/L & -D_q/3L \\ (3/2C)D_d & (3/2C)D_q & 0 \end{matrix} \begin{matrix} i_d \\ i_q \\ V_{da} \end{matrix} + \begin{matrix} \frac{1}{3L} \\ 0 \\ 0 \end{matrix} V_m \quad (7.32)$$

(7.32) eşitliğinde STATCOM modelinin dinamik çevrim durumlarının i_d , i_q ve V_{da} ve denetim değişkenlerinin ise D_d ve D_q olarak tanımlanır. Bu eşitlik STATCOM modelinin doğrusal olmadığı görülür. STATCOM'un kontrollünde doğrusal olmayan

karakteristiğinin nasıl kontrol edileceği bir sorundur. Doğrusal olmayan bir sistemin kontrolünde birçok metot kullanılmaktadır. STATCOM'u çalışma noktası biliniyorsa, sistem çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılabilir.

7.4. STATCOM Modelinin Doğrusallaştırılması

STATCOM modelinin doğrusallaştırılmasında Jacobian metodu kullanılabilir. Jacobian matris metodu kullanılarak, (7.32) eşitliğini çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılacaktır.

Eğer $f(x)$ fonksiyonu doğrusallaştırmak için ve $f: \mathbb{R}^{3 \times 3} \rightarrow \mathbb{R}$ fonksiyon ise $f(x)$ fonksiyonun Jacobian matrisi, (7.33) ifadesi ile gösterilir.

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} \quad (7.33)$$

Doğrusal olmayan bir sistem için, sisteminin dinamiklerini $X = f(x, u)$ genel vektör fonksiyonu şeklinde ifade edilebilir. Durum denklemlerinde doğrusal olmayan ifadelerin var olması nedeniyle, x^0 ve u^0 çalışma noktaları etrafında A ve B jacobian matrisleri kullanılarak doğrusal olmayan vektör fonksiyonunu (7.34) eşitliğinde görüldüğü gibi doğrusallaştırılabilir.

$$\begin{aligned} x &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (7.34)$$

$$A = \frac{\partial f}{\partial x} \bigg|_{x^0, u^0} \quad (7.35)$$

$$B = \frac{\partial f}{\partial u} \bigg|_{x^0, u^0} \quad (7.36)$$

Eğer $x = x^0 + \delta x$ ve $u = u^0 + \delta u$ şeklinde tanımlanırsa, yeni sistem (7.37) eşitliğinde tanımlanır.

$$\delta x = A\delta x + B\delta u \quad (7.37)$$

(7.37) eşitliği doğrusal denklemdir. STATCOM'un modellenmesi için bu denklem kullanılabilir.

İlk olarak çalışma noktaları ayarlanarak;

$$X^0 = \begin{matrix} i_{d0} \\ i_{q0} \\ V_{dc0} \end{matrix} \quad U^0 = \begin{matrix} Dd_0 \\ Dq_0 \end{matrix} \quad (7.38)$$

Jacobian matrisleri hesaplanırsa;

$$A = \frac{\partial f}{\partial x} (x^0, u^0) = \begin{matrix} -R/L & w & -Dd_0/3L \\ -w & -R/L & -Dq_0/3L \\ 3Dd_0/2C & 3Dq_0/2C & 0 \end{matrix} \quad (7.39)$$

$$B = \frac{\partial f}{\partial u} (x^0, u^0) = \begin{matrix} -V_{dc0}/3L & 0 \\ 0 & -V_{dc0}/3L \\ 3i_{d0}/2C & 3i_{q0}/2C \end{matrix} \quad (7.40)$$

eşitlikleri elde edilir. C birim matris olarak tanımlanır ve göz ardı edilebilir.

Eğer $X = X - x^0$ ve $U = U - u^0$ olarak oluşturulursa, (7.40) eşitliğinde verilen STATCOM modeli için küçük işaret modeli elde edilir.

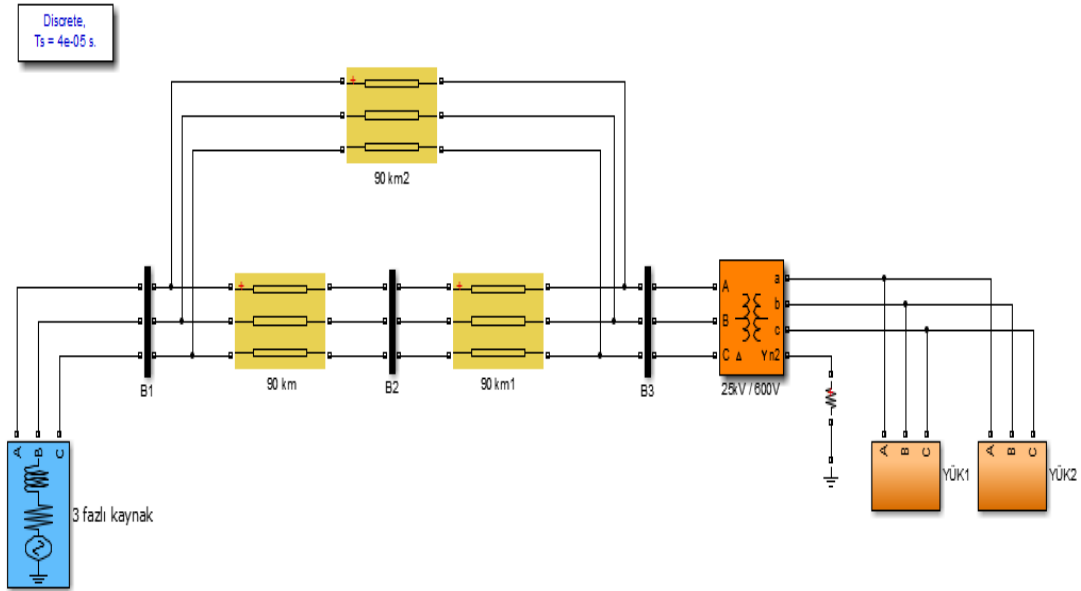
$$X = AX + BU \quad (7.41)$$

V_m değeri sabit olduğu için (7.41) eşitliğinde verilen STATCOM küçük işaret modelinde bulunmaz.

BÖLÜM 8. STATCOM SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

8.1. Sistemin Tasarlanması

STATCOM'un çalışma sonuçları gözlemlemek amacıyla üç fazlı bir sistem tasarlanmıştır. Üç fazlı bu sistemde kaynak ile yük arasında üç bara bağlanmıştır. Her bir bara arasına 90 km uzunluğunda bir hat bulunmaktadır. Ayrıca birinci bara ile üçüncü bara arasında 90 km uzunluğunda bir paralel hat bağlanmıştır. Üçüncü bara ile yük arasında gerilimi düşürmesi için bir transformatör bağlanmıştır. Sistemde iki adet yük bağlanmıştır. Üç fazlı sistemin tasarımı MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.1'de MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen devre gösterilmiştir.



Şekil 8.1. MATLAB/ Simulink ortamında tasarlanan devre

Yapılan çalışmada sistemin STATCOM'un devreye etkisi incelenecektir. Bunun için ilk önce STATCOM devreye bağlı olmadığı durum için yük geriliminin ve akımının değişimi incelenecektir. Kaynak ile yük arasında bulunan B1, B2, B3 baraları

arasında uzun bir mesafe olduğu için gerilim düşümü gerçekleşecektir. STATCOM güç kalitesi problemlerin giderilmesinde yaygın olarak kullanılan güç elektroniği temelli bir cihazdır. Bundan dolayı sisteme STATCOM bağlanarak güç kalitesi problemlerine STATCOM'un etkisi gözlemlendi. MATLAB/Simulink ortamında bulunan STATCOM modelinin kontrolü geleneksel kontrol teorisi ile tasarlanmıştır. Bu çalışmada geleneksel kontrol teorisine dayalı olarak tasarlanan STATCOM bulanık mantık kontrolör ile yeniden tasarlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca STATCOM modelinde bulunan PI kontrolör yapısı yanında P ile gerçekleştirimi de yapılmıştır. STATCOM B2 ve B3 baraları arasında bağlanmıştır. STATCOM yapısı 25 kV ve ± 3 Mvar özelliğinin sahiptir. ± 3 Mvar özelliği STATCOM'un hem reaktif hem de endüktif olarak çalıştığını gösterir.

Tasarlanan sistemin ve STATCOM'un parametreleri Tablo 8.1'de verilmiştir.

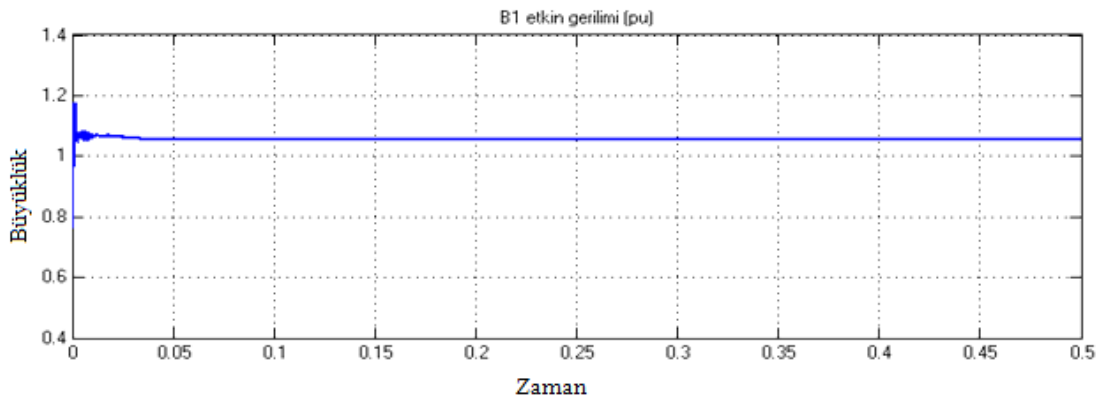
Tablo 8.1. Sistemin ve STATCOM'un parametreleri

Parametreler	Değer	
3 Fazlı Kaynak	Gerilim	25 kV /faz-faz arası
	Frekans	60 Hz
	Empedans(R,L)	0.625 ohms ,0.01657 H
Yük 1	Gerilim	600 V/faz –faz arası
	Aktif güç	1000 kW
Yük 2	Gerilim	600 V/ faz-faz arası
	Aktif güç	1000 kW
Transformatör	Gerilim	25 kV/600 V
B1-B2 iletim hattı	Uzunluk	90 km
	Empedans (R,L)	1.048e-3 H/km ,0.1163 ohms/km
B2-B3 iletim hattı	Uzunluk	90 km
	Empedans (R,L)	1.048e-3 H/km ,0.1163 ohms/km
D-STATCOM	Gerilim	25 kV
	Frekans	60 Hz
	Güç	± 3 M Var
	DA gerilimi	2400 V

8.2. Sistemde STATCOM'un Bağlı Olmadığı Durum

STATCOM sisteme bağlı olmadığı durumda kaynak ve yük gerilimleri incelenmiştir. Şekil 8.2'de kaynağın bağlı olduğu B1 barasının etkin gerilimi pu biriminde verilmiştir.

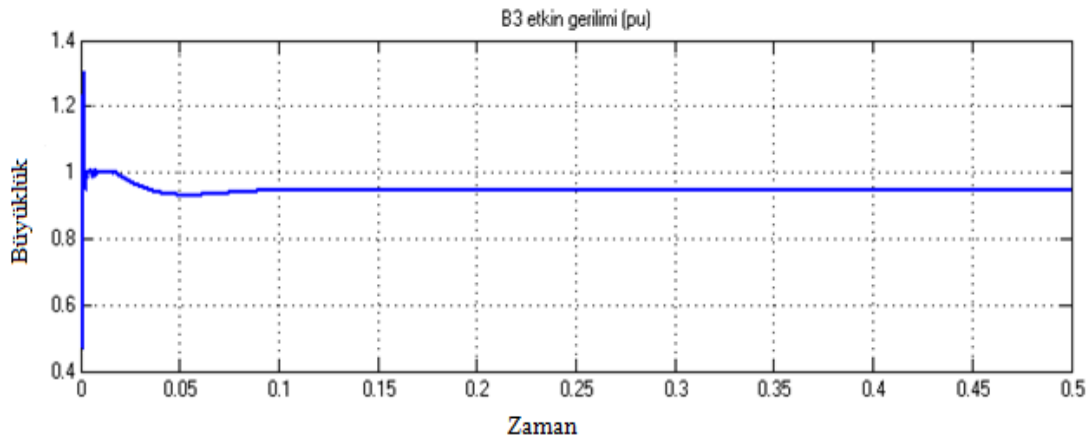
Kaynak gerilimi:



Şekil 8.2. Kaynağın (B1) etkin gerilimi (pu)

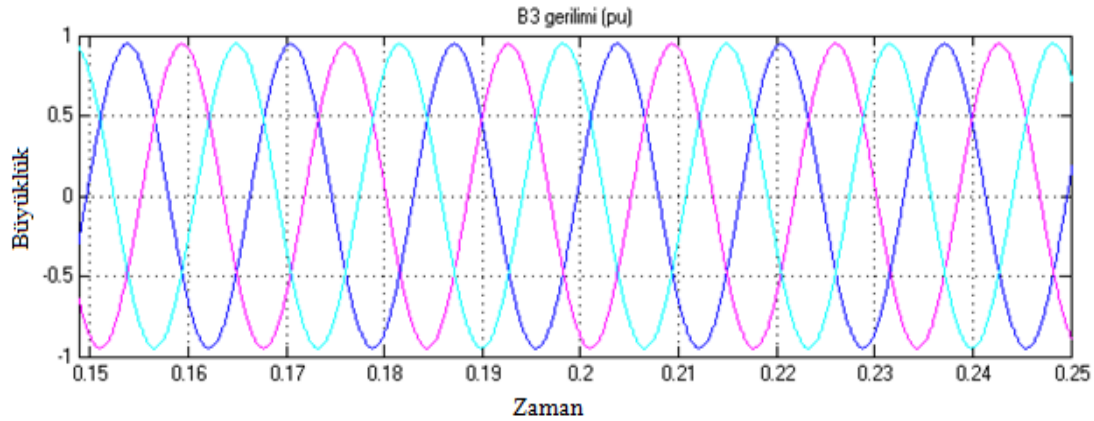
Şekil 8.3'te yükün bağlı olduğu B3 barasının etkin gerilimi pu biriminde verilmiştir. Kaynak ile yük arasında hattın uzunluğundan dolayı gerilim düşümü olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 8.4'te üç fazlı yük gerilimi gösterilmiştir. Gerilimin istenilen değeri 1 pu olmasına rağmen gerilim düşmesi görülmektedir.

Yükün etkin gerilimi:



Şekil 8.3. Yükün (B3) etkin gerilimi (pu)

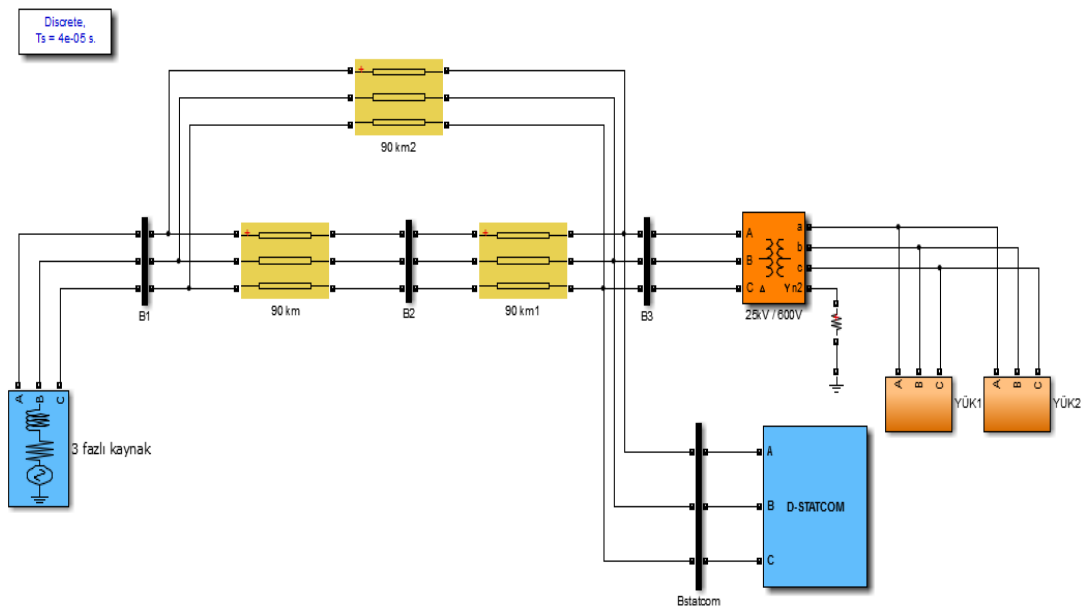
Yük gerilimi:



Şekil 8.4. Yük (B3) gerilimi (pu)

8.3. Sisteme STATCOM'un Bağlı Olduğu Durum

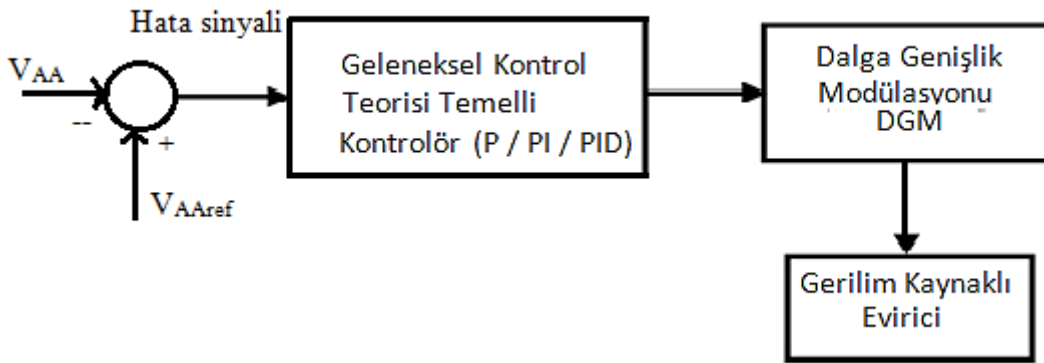
STATCOM'un bağlı olmadığı durumda kaynak ile yük arasında gerilim düşümü olduğu belirlenmiştir. STATCOM'un sisteme bağlanması ile yük gerilimindeki değişim ile STATCOM'un etkisi incelenecektir. İlk olarak geleneksel kontrol teorisinin temelini oluşturan P-PI kontrolör ile sonuçlar incelenmiştir. Daha sonraki adımda ise STATCOM için bulanık mantık temelli kontrolör tasarlanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Şekil 8.5'te STATCOM bağlı devre gösterilmiştir.



Şekil 8.5. STATCOM bağlı devre

8.3.1. Geleneksel kontrol teorisi temelli STATCOM

MATLAB/Simulink ortamında bulunan STATCOM modeli PI kontrolör ile gerçekleştirilmiştir. PI kontrolör yapısının etkinliğinin karşılaştırılması için P kontrolör ile tasarım tekrar yapılmıştır. P ve PI kontrolörlerinin yük geriliminin ayarlamadaki etkinlikleri incelenmiştir. Şekil 8.6'da STATCOM için kullanılan PI veya P kontrolörlerin kullanılması gösterilmiştir. Gerilim ayarlamasında elde edilen hata sinyalleri kontrolör ile değerlendirildikten sonra evirici yapısında bulunan anahtarların tetikleme sinyallerin elde edildiği dalga genişlik modülasyonu (DGM) yönteminde kullanılmaktadır.

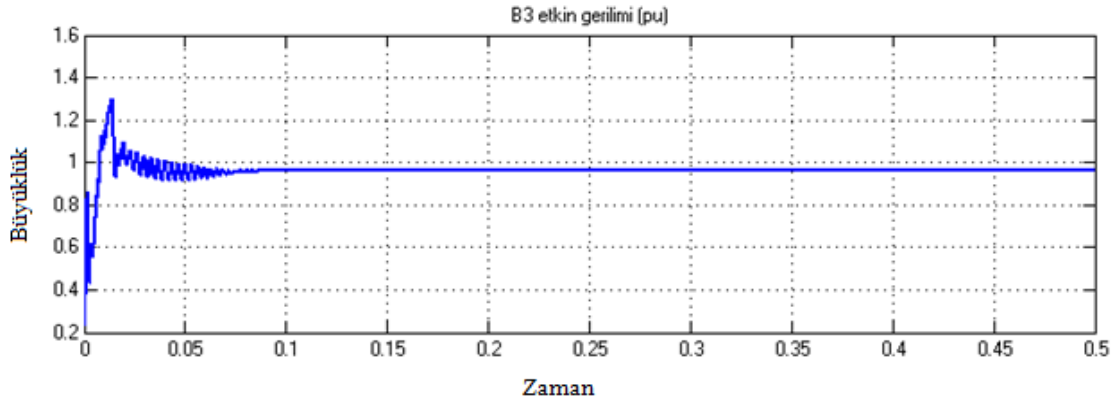


Şekil 8.6. STATCOM için geleneksel kontrol teorisi temelli kontrolör kullanımı

8.3.1.1. P (Oransal) kontrolör

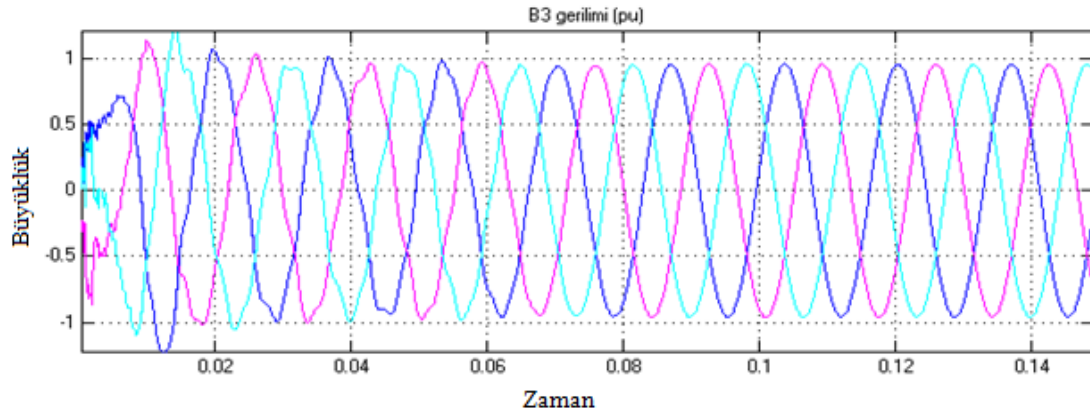
Geleneksel kontrol teorisi kullanılarak ilk olarak P (Oransal) kontrolör tasarlanmıştır. STATCOM'un etkinliğini görmek için yük gerilimindeki değişim incelenecektir. P kontrolör ile yük gerilimi istenen referans değer olan 1 pu değerine yaklaşmış ancak tam olarak 1 pu değerini sağlayamamıştır. Şekil 1.7'de yük gerilimin etkin değeri pu biriminde verilmiştir. STATCOM'un çalışmasından dolayı 0-0.0.8 saniyeleri arasında bir dalgalanma olmuştur. Şekil 8.8'de yük gerilimi gösterilmiştir.

Yükün etkin gerilimi:



Şekil 8.7. Yükün (B3) etkin gerilimi (pu)

Yük gerilimi:

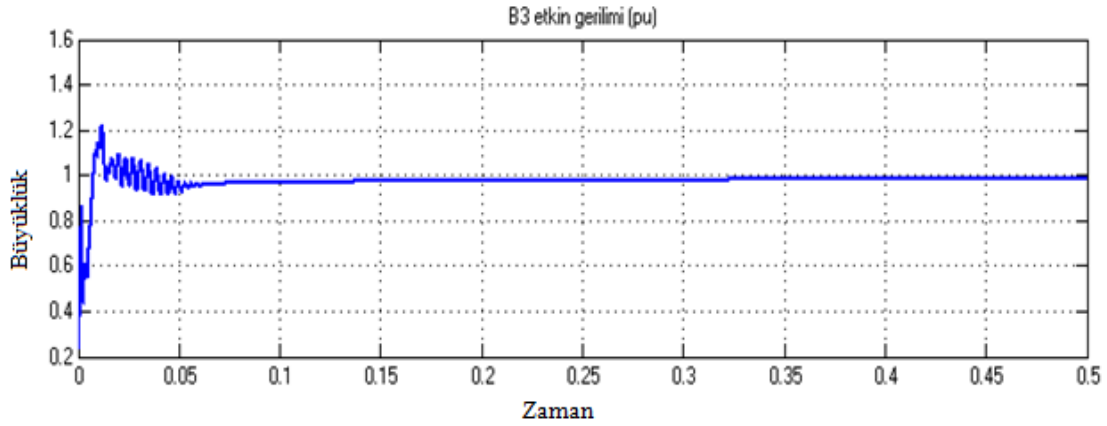


Şekil 8.8. Yük (B3) gerilimi (pu)

8.3.1.2. PI (Oransal- İntegratör) kontrolör

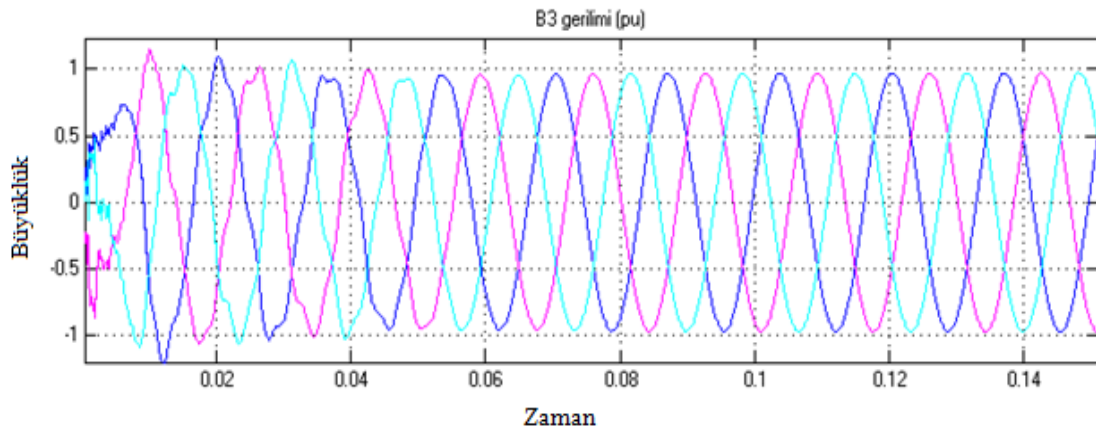
P (Oransal) kontrolör yük gerilimin istenilen referans gerilimi elde etmede istenilen başarıyı yakalayamamıştır. Bundan dolayı sistemin kararlılığı artırmak ve istenilen gerilimi elde etmek için PI (Oransal-İntegratör) kontrolör kullanılmıştır. Şekil 8.9’da PI kontrolör kullanılması ile elde edilen yük geriliminin etkin (pu) değeri gösterilmiştir. Yük gerilimin değeri istenilen referans değerler olan 1 pu değerine yaklaşmıştır. P (Oransal) kontrolöre göre dalgalanma ve aşım değerleri azalmıştır. Şekil 8.10’da yük gerilim gösterilmiştir.

Yükün etkin gerilimi:



Şekil 8.9. Yükün (B3) etkin gerilimi (pu)

Yükün gerilimi:



Şekil 8.10. Yük (B3) gerilimi (pu)

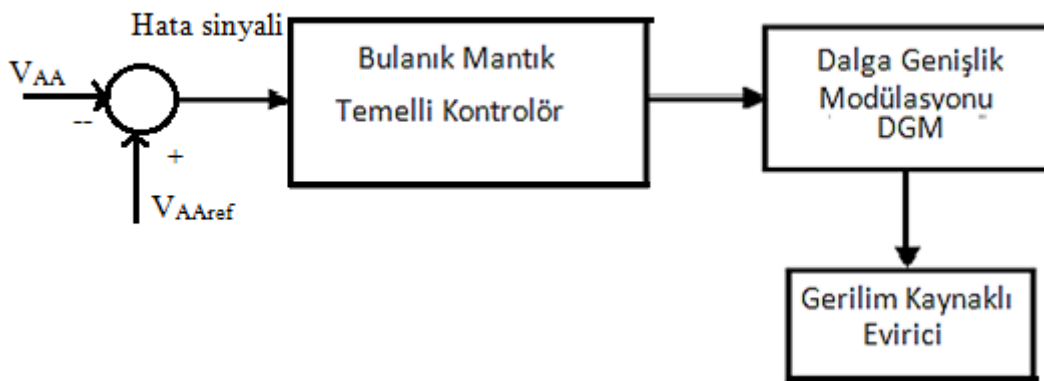
Geleneksel kontrol teorisi kullanılarak gerçekleştirilen STATCOM devresinde P (Oransal) kontrolör gerilim değerini yükseltmekte ancak istenen 1 pu değerine ulaşamadı. PI (Oransal-İntegratör) ise gerilim değerini P kontrolöre göre daha iyi ayarlamış ancak 1 pu değerine ulaşamamıştır. PI kontrolör dalgalanma ve aşım değeri açısından P kontrolöre göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Tablo 8.2'de her iki kontrolörün sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tablo 8.2. Geleneksel kontrol teorisi temelli kontrolörlerin karşılaştırılması

	STATCOM 'suz	P(Oransal) Kontrolör	PI(Oransal-İntegratör) Kontrolör
Yük Gerilimi (pu)	0.9474	0.9621	0.9861
Dalgalanma (s)	0.01	0.08	0.05

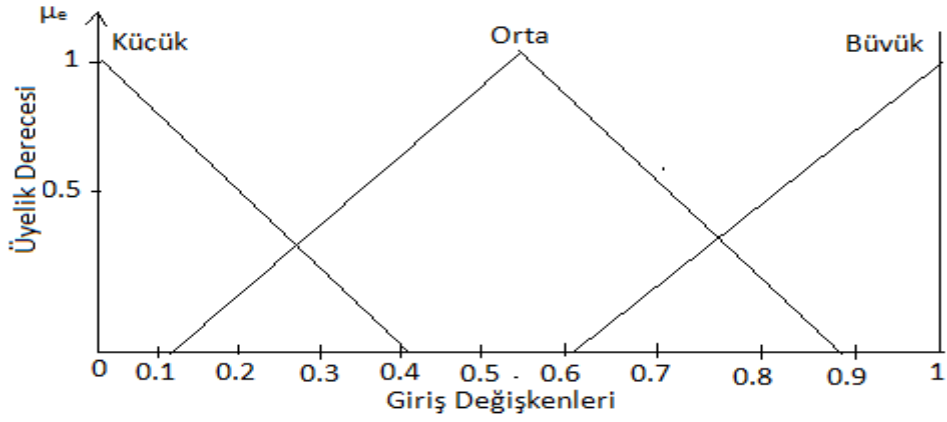
8.3.2. Bulanık mantık kontrol teorisi temelli STATCOM

Bulanık mantık temelli kontrolörler tasarımının kolay olması ve iyi sonuçlar vermesinden dolayı birçok alanda kullanılmaktadır. STATCOM için tasarlanan bulanık mantık temelli kontrolör için sistemin çalışması temel alınmıştır. Bulanık mantık temelli kontrolörler matematiksel ifadelerden ziyade uzman deneyimine dayanarak ya da deneme yanılma yöntemi ile tasarlanırlar. Kontrolör tasarımda üyelik fonksiyonları üçgen üyelik fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Durulaştırma yöntemi ise ağırlık merkezi yöntemi kullanılmıştır. Sistem bir giriş ve bir çıkıştan oluşmaktadır. Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonların değişimi [0 1] arasında gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.11'de bulanık mantık kontrolörün STATCOM içerisinde kullanımı gösterilmiştir.



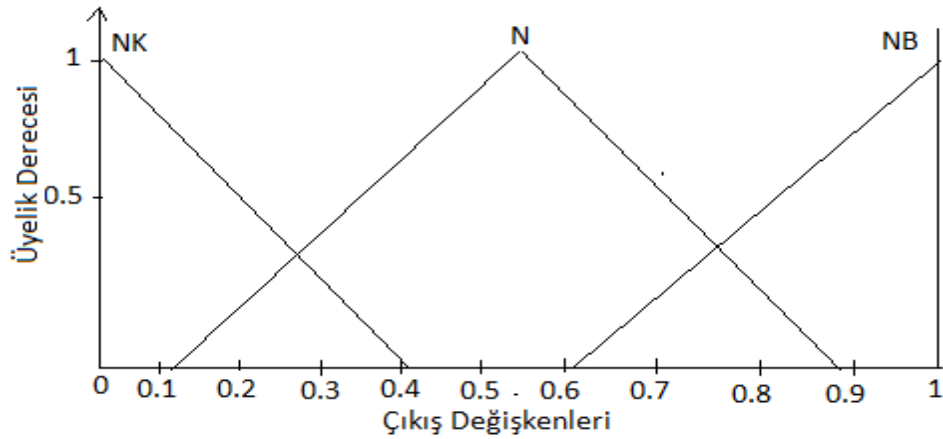
Şekil 8.11. STATCOM için bulanık mantık temelli kontrolör

Sistemin giriş üyelik fonksiyonları:



Şekil 8.12. Giriş üyelik fonksiyonları

Sistemin çıkış üyelik fonksiyonları:



Şekil 8.13. Çıkış üyelik fonksiyonları

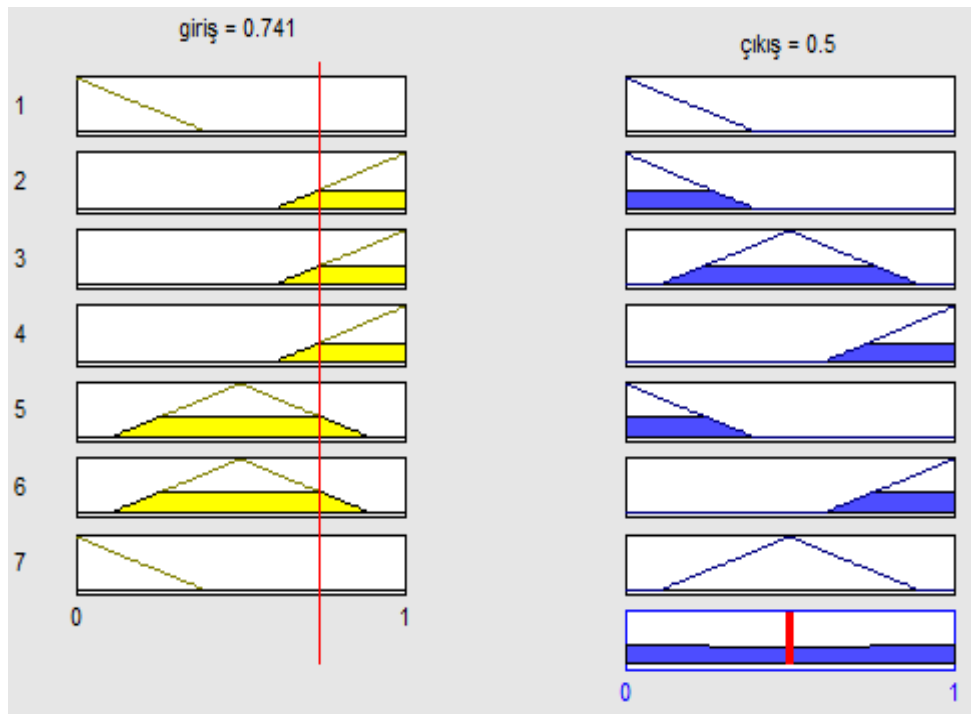
Şekil 8.13'te kısaltma ile tanımlanan çıkış üyelik fonksiyonları aşağıda verilmiştir.

1. NK: Normal Küçük
2. N: Normal
3. NB: Normal Büyük

8.3.2.1. Bulanık mantık kontrolör kurallarının oluşturulması

Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları belirlenmesinden sonra giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları karşılaştırılarak bulanık mantık kontrolör için kurallar oluşturulur. Oluşturulan kurallar aşağıda verilmiştir. Şekil 8.14'te oluşturulan kuralların görünümü verilmiştir.

1. Eğer giriş "Küçük" ise çıkış "NK"
2. Eğer giriş "Küçük" ise çıkış "N"
3. Eğer giriş "Büyük" ise çıkış "NK"
4. Eğer giriş "Büyük" ise çıkış "N"
5. Eğer giriş "Büyük" ise çıkış "NB"
6. Eğer giriş "Orta" ise çıkış "NK"
7. Eğer giriş "Orta" ise çıkış "NB"

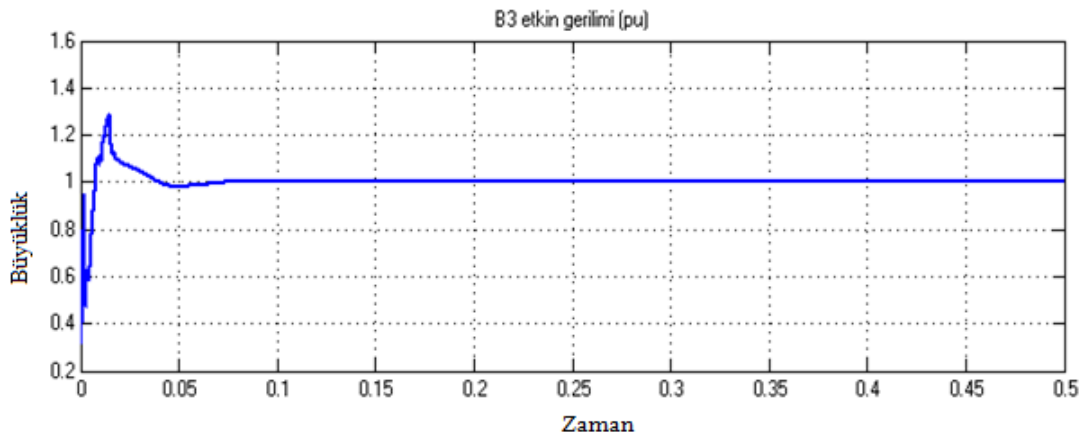


Şekil 8.14. Kuralların görünümü

8.3.2.2. Bulanık mantık temelli STATCOM'un simülasyon sonuçları

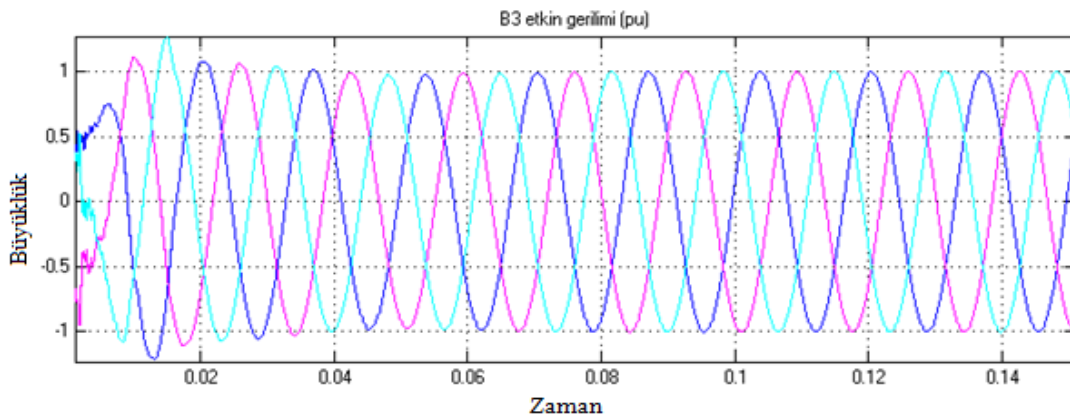
Bulanık mantık temelli kontrolör ile tasarlanan STATCOM sistemde kullanıldığında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. Şekil 8.15'te yük gerilimin etkin değeri (pu) gösterilmiştir. Yük gerilimin etkin değeri istenen referans gerilim olan 1 pu değerindedir. Sistemdeki salınım çok azalmakta ve sistem 0.035 saniyede oturmaktadır. Bulanık mantık temelli kontrolör; geleneksel kontrol teorisine göre daha hızlı cevap vermekte ve istenilen değerin elde edilmesinde daha başarılıdır. Şekil 8.16'da yük (B3) gerilimi (pu) gösterilmiştir.

Yükün etkin gerilimi:



Şekil 8.15. Yükün (B3) etkin gerilimi (pu)

Yük gerilimi:



Şekil 8.16. Yük (B3) gerilimi (pu)

8.4. Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

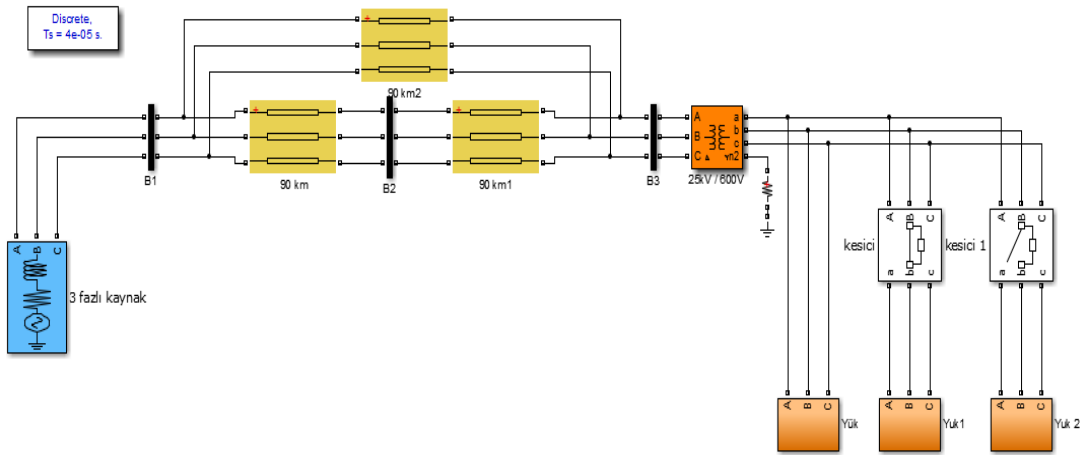
STATCOM cihazı hem geleneksel hem de bulanık mantık temelli kontrolörlerle gerçekleştirilmiş ve sistemde çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; geleneksel kontrol teorisi temelli P-PI kontrolörlerin etkinliği bulanık mantık temelli kontrolörün gerisinde kaldığı gözlemlenmiştir. Bulanık mantık temelli kontrolörler sistemde daha hızlı ve daha doğru sonuçlar vermiştir. Tablo 8.3'te P, PI ve bulanık mantık kontrolörlerin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 8.3. Geleneksel ve bulanık mantık temelli kontrolörlerin karşılaştırılması

	STATCOM'suz	P Kontrolör	PI Kontrolör	Bulanık Mantık Kontrolör
Yük Gerilimi (pu)	0.9474	0.9621	0.9861	1.004
Dalgalanma (saniye)	0.01	0.08	0.05	0.035

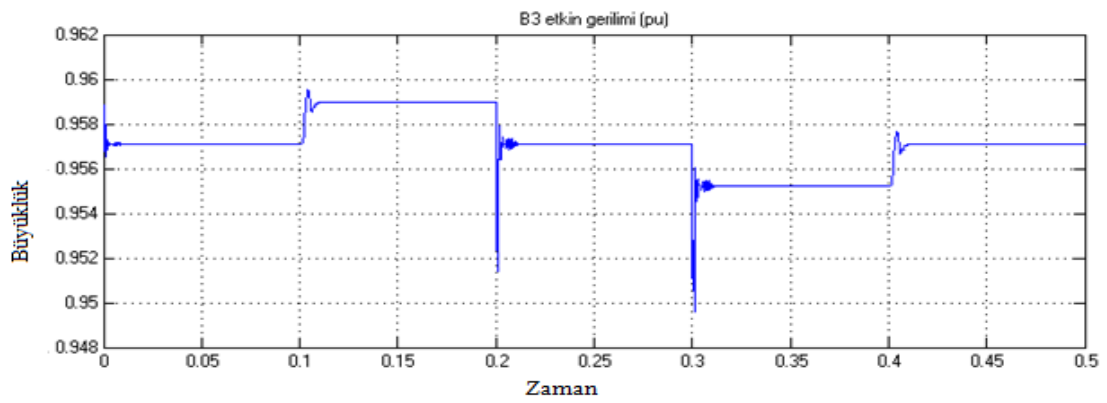
8.5. Test Devresi İle STATCOM'un İncelenmesi

STATCOM bir çok güç kalitesi problemini gidermede kullanılabilir. Üç farklı kontrolörler ile tasarlanan STATCOM'un gerilim ayarlama, gerilim düşümü ve gerilim yükselmelerine karşı etkisi Şekil 8.17'de kurulan test düzeneği ile kontrol edilecektir. Sistemde üç yük mevcuttur ancak iki yük belirli sürelerle açma kapama yapılarak sisteme etkisi incelenecektir. İlk durumda sistemde STATCOM bulunmadığı durum test edilecek ve yük gerilimi incelenecektir. Yük 1 sistemden 0.1 ve 0.2 saniye aralıklarında çıkarılacaktır. Yük 2 ise 0.3 ve 0.4 aralıklarında devreye girecektir. Yük 1 ve yük 2'nin sisteme alınması ve sistemden çıkarılması sonucunda gerilim yükselmesi ve gerilim düşmesi meydana gelmektedir. Yük 1'nin sistemden çıkarılması sonucu gerilim yükselmesi ve Yük 2'nin sisteme alınması sonucu gerilim düşümü gerçekleşiyor. Şekil 8.18'de yük gerilimdeki (pu) değişim gösterilmiştir. Şekil 8.19'da ise STATCOM'lu test devresi gösterilmiştir.

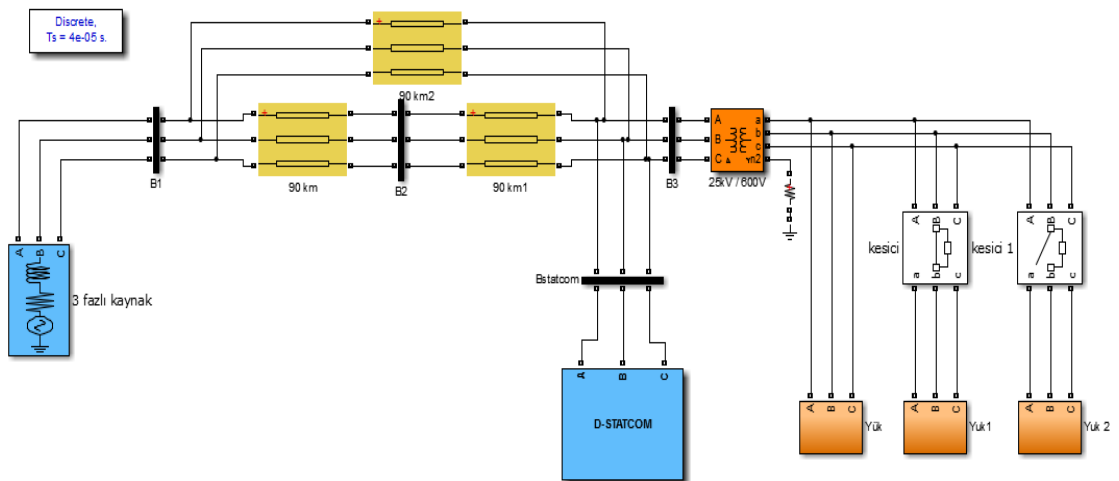


Şekil 8.17. STATCOM' suz test devresi

Yük gerilimi:



Şekil 8.18. Yükün (B3) etkin gerilimi



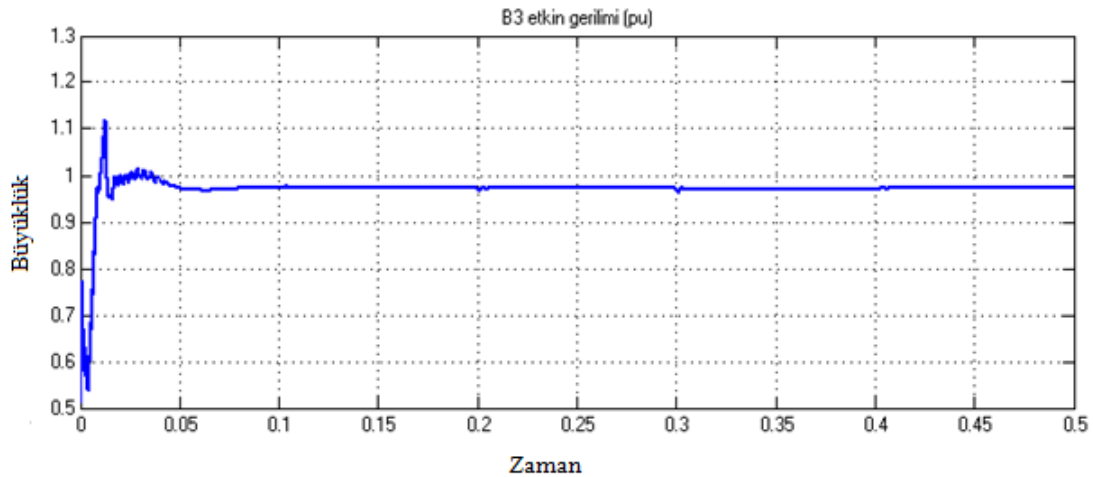
Şekil 8.19. STATCOM' lu test devresi

8.5.1. Geleneksel kontrol teorisi temelli STATCOM

Tasarlanan test sistemi ile STATCOM'un etkinliği incelenecektir. Geleneksel kontrol teorisi temelli P ve PI kontrolörler sırasıyla STATCOM modeline uygulanmış ve simülasyon sonuçları elde edilmiştir. PI kontrolör P kontrolöre göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

8.5.1.1. P (Oransal) kontrolör

P kontrolör ile tasarlanan STATCOM'un devreye bağlanması ile elde edilen yük gerilimin etkin (pu) değeri Şekil 8.20'de gösterilmiştir. P kontrolör ile yüklerin açılması ve kapatılması sonucu oluşan gerilim düşümü ve yükselmesi problemleri giderilmiştir. Ancak gerilim değeri istenen 1 pu referans gerilimine ulaşmadı.

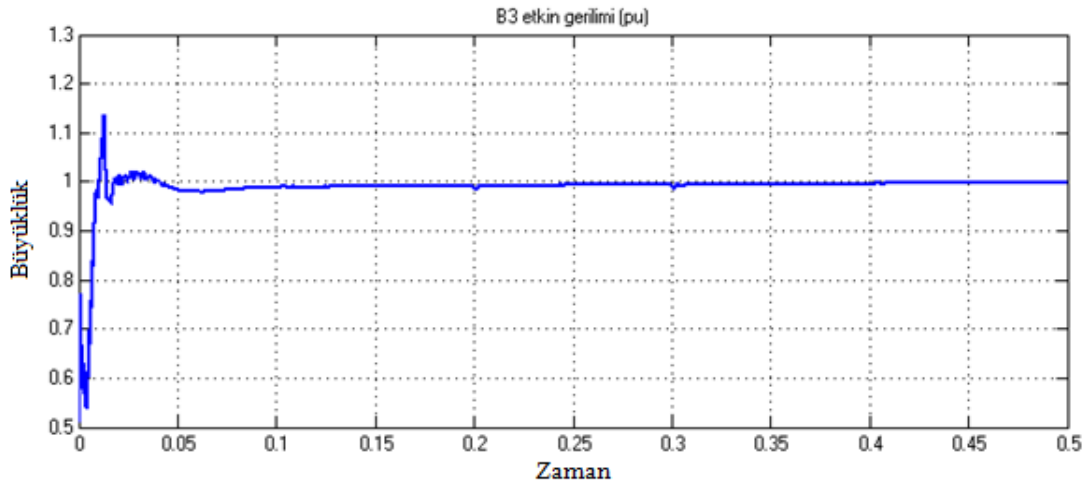


Şekil 8.20. Yükün (B3) etkin gerilimi (pu)

8.5.1.2. PI (Oransal-İntegratör) kontrolör

PI (Oransal-İntegratör) kontrolör ile tasarlanan STATCOM'un devreye bağlanması ile elde edilen yük gerilimin etkin (pu) değeri Şekil 8.21'de gösterilmiştir. PI kontrolör ile elde edilen elde edilen yük gerilimin etkin değeri referans gerilim olan 1 pu değerine çok yaklaşmaktadır. PI kontrolör, P kontrolöre göre daha iyi sonuç vermektedir.

Yükün etkin gerilimi:

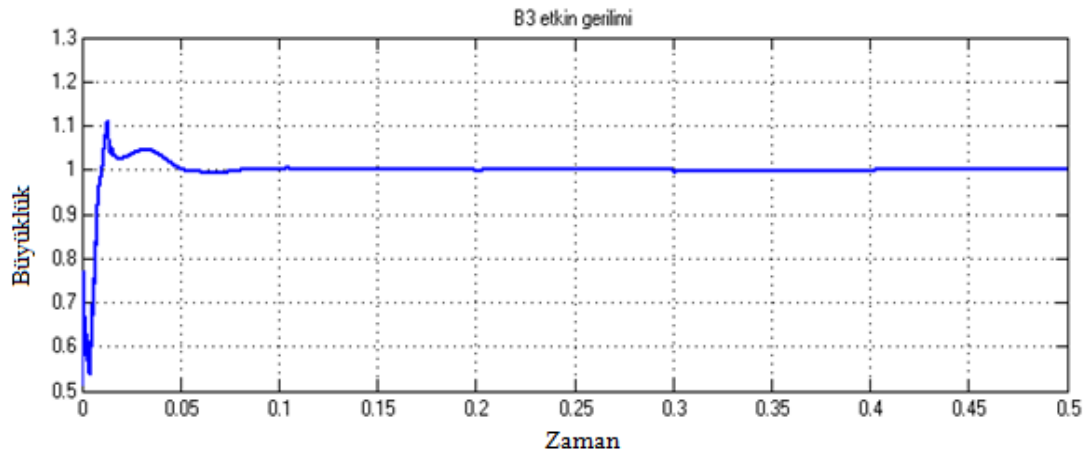


Şekil 8.21. Yükün (B3) etkin gerilimi (pu)

8.5.2. Bulanık mantık teorisi temelli STATCOM

Bulanık mantık temelli kontrolör ile tasarlanan STATCOM'un devreye bağlanması ile elde edilen yük gerilimin etkin değeri (pu) Şekil 8.22'de gösterilmiştir. Bulanık mantık temelli kontrolör, P ve PI kontrolörlere göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Yük gerilimin etkin değeri 1 pu değerindedir ve dalgalanma azalmıştır.

Yükün etkin gerilimi:



Şekil 8.22. Yükün (B3) etkin gerilimi

8.6. Sonuçların Karşılaştırılması

Kurulan test devresinde, her üç kontrolörden elde edilen sonuçlar Tablo 8.4'te verilmiştir. Yük geriliminin (pu) STATCOM'suz, P kontrolör, PI kontrolör ve bulanık mantık kontrolöre göre etkin değeri karşılaştırılmıştır. Bulanık mantık temelli kontrolör, geleneksel kontrol teorisi temelli kontrolörlere göre üstün olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 8.4. Geleneksel ve bulanık mantık temelli kontrolörlerin karşılaştırılması

	STATCOM'suz	P Kontrolör	PI Kontrolör	Bulanık Mantık Kontrolör
Yük Gerilimi (pu)	0.9571	0.9723	0.9878	1

BÖLÜM 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışması güç kalitesi problemini ayrıntılı olarak incelemeyi amaçlamıştır. Bu amaçla güç kalitesi problemiyle ilgili birçok konuya değinilmiş ve güç kalitesi problemlerinin giderilmesinde kullanılan özel güç cihazları tasarlanmıştır. Güç kalitesi problemlerinin giderilmesinde kullanılan özel güç cihazların gelişmesiyle güç kalitesi probleminin giderilmesinde geçmişe göre daha iyi sonuçlar elde edilmektedir. Özel güç cihazların geliştirilmesinde temel yapıyı kontrolör kısmı oluşturmaktadır. Bu amaçla tez çalışmasında geleneksel kontrol teorisi ile bulanık mantık kontrol teorisi karşılaştırılmıştır. Aktif filtre ve STATCOM tasarımları geleneksel kontrol teorisi ve bulanık mantık kontrol teorisi temelli kontrolörler ile tasarlanmıştır.

Güç kalitesi probleminin önemi her geçen güç artmaktadır. Güç kalitesi problemlerinde oluşan anlık kesintiler bile endüstri ve ticari alanlarda büyük maddi kayıplar oluşturmaktadır. Güç kalitesi probleminin öneminin artmasına birçok sebep sayılabilir ancak genel olarak dört temel neden gösterilebilir.

1. Yükler eskiye oranla güç kalitesine daha duyarlıdır. Birçok yeni yük birimi mikroişlemci kontrollü güç elektroniği elemanları içermektedir. Dolayısıyla bu elemanlar beslenme enerjisinde olabilecek güç kalitesi parametrelerinin bozulmasından etkilenebilir. Aynı zamanda bu tür güç elektroniği eviricilerinin bazıları da güç kalitesini bozabilmektedir.
2. Güç sistemlerinin daha verimli kullanılmasına verilen önem hız ayarlamalı motorlar gibi uygulamaların artmasını hızlandırmıştır. Bu da güç sistemlerindeki bir bozulma türü olan harmonik seviyesinin artmasına neden olmuştur.
3. Kullanıcıların güç kalitesi hakkında bilgi düzeylerinin artması üreticilerden daha kaliteli güç istemelerine neden olmuştur.

4. Elektrik şebekesine bağlı olan kullanıcıların sayısı ve çeşidi zamanla artmaktadır. Bundan dolayı bir bileşendeki bozulma diğer bileşenlere olan etkilerinden dolayı önemlidir. Bu sebeplerin arkasında yatan temel neden olarak kullanıcıların daha hızlı ve daha verimli üretim yapmayı istemeleri ve üreticilerinde buna destek vermelerinin kendi yararına olduğunu bilmeleri gösterilebilir.

Güç kalitesi problemleri evrensel bir sorun olduğundan birçok standart geliştirilmiştir. Bu standartlar sayesinde güç kalitesinin tanımlanması ve cihazların güvenliği için belirli aralıklarda tutulması amaçlanmıştır.

Güç kalitesi problemlerinin giderilmesinde en önemli konu problemin belirlenmesidir. Problemin belirlenmesi ile alınacak önlemler değerlendirilebilir.

Güç kalitesi probleminin değerlendirilmesi için belirli adımlar izlenebilir.

1. Güç kalitesi probleminin belirlenmesi ve sınıflandırılması
2. Belirlenen problemin özelliklerin belirlenmesi (Nedenleri, Karakteristikleri, Etkileri)
3. Problemin nereden ortaya çıktığının belirlenmesi(İletim sistemi, Dağıtım sistemi gibi)
4. Çözümlerin değerlendirilmesi (Modelleme ve teknik alternatiflerinin değerlendirilmesi)
5. Son adım olarak en uygun çözümün belirlenmesi (Uygun çözümün belirlenmesinde ekonomik maliyet önemli yer tutar)

Güç kalitesi probleminin oluşmasında birçok neden olabilir. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

1. Güç elektroniği cihazları
2. Gömülü sistemler
3. İzolasyon hatası
4. Anahtarlama

5. Aydınlatma
6. Ark ocakları
7. Elektromanyetik yayılım ve kablolama
8. Yıldırım ve çevresel sebepler
9. Büyük motor çalıştırılması
10. Bilgi teknolojileri ve ofis elemanları [22,23].

Gerilim düşmesi ve harmonikler en yaygın görülen güç kalitesi problemlerindedir. Harmonikler güç kalitesinde birçok bozulmalara neden olabilir. Harmonikleri gidermek için en yaygın kullanılan cihazlar filtrelerdir. Filtreler pasif filtre , aktif filtre ve hibrit filtre olmak üzere üçe ayrılır. Üç filtrenin birbirine avantaj ve dezavantajları vardır. Daha iyi sonuç ve değişebilir yükler için aktif filtreler daha başarılıdır. Hibrit filtre ise aktif filtre ile pasif filtrenin birleşmesi ile oluşturulmuştur. Yakın zamanda kullanımı artmakta ve sürekli bir gelişim halindedir. Pasif filtreler ise etkin bir çözüm sağlaması ve maliyetinin az olmasına rağmen yüklerin değişmesiyle zelliğini kaybeder ve durumda yeniden tasarım gerektirmektedir. Yüklerin değişmesi durumunda pasif filtre rezonans oluşturabilir bu ise sisteme büyük zarar verir.

Yapılan tez çalışmasında incelenen reaktif güç kompanzasyonu için bir çok yöntem mevcuttur. reaktörler ve kondansatörler, senkron kompanzatorlar ve FACTS cihazları kullanılabilir. Son zamanlarda FACTS cihazlarının kullanımı yaygınlaşmaktadır. FACTS cihazlarının yaygınlaşması güç kalitesi problemlerine etkin çözüm sağlamalarından dolayıdır. FACTS cihazları aralarında birçok sınıfa ayrılabilir. Bunlar gelişim sürecine göre, kullanılan yarıiletken elemana göre, bağlantı şekline göre ,sınıflandırmak mümkündür. Bu sınıflandırmalar bize belirlediğimiz güç kalitesi problemlerine daha alternatif çözümler sağlar. Kontrol sistemlerinin gelişmesiyle FACTS cihazlarının etkinlikleri artmaktadır.

Yapılan tez çalışmasında STATCOM ve aktif filtre ayrıntılı olarak incelenmiştir. Statik Senkron Kompanzator (STATCOM) evirici tabanlı ikinci nesil paralel FACTS cihazıdır. Güç sistemlerine paralel bağlanarak reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim ayarlaması için kullanılır. STATCOM'un reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim

ayarlaması üzerindeki dikkat çekici başarısından dolayı, STATCOM üzerinde yapılan çalışmalar son yıllarda artmıştır. Aktif güç filtreleri doğrusal olmayan yükün ürettiği akım veya kaynak geriliminin harmoniklerini yok etmek için güç elektroniği anahtarlama elemanlarını kullanarak yükün harmonik akım veya gerilimine ters fazda ve eşit büyüklükte harmonik akım ve gerilim üreterek sisteme veren filtrelerdir.

Yapılan tez çalışmasında geleneksel kontrol teorisi ile bulanık mantık kontrol teorisi karşılaştırılmıştır. Geleneksel kontrol teorisi günümüzde birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Son zamanlarda bulanık mantık, yapay sinir ağları temelli akıllı kontrol sistemlerinin yaygınlaşması ile bu iki kontrol teorisi karşılaştırılmaktadır. Bulanık mantık temelli kontrolörler kullanıcıya daha esnek ve daha iyi sonuçlar sunmaktadır. Geleneksel kontrol teorisi temelli P, PI, PID kontrolörlerde doğrusal olmayan sistemlerin matematiksel olarak modellenmesi için sistemin doğrusallaştırılması gerekmektedir. Bu durum tasarımda birçok soruna neden olmaktadır. Bulanık mantık temelli kontrolörler ise herhangi bir matematiksel ifade içermeyen sözel ifadelerle tasarım yapılmasına imkan sağlamaktadır. Bulanık mantık temelli kontrolör tasarlanırken deney sonuçları, uzman görüşleri ve operatör bilgisi kullanılabilir. Bundan dolayı sistemin tasarımda deneme yanılma yöntemi önemli bir yere sahiptir.

İlk olarak PAGF geleneksel kontrol teorisi temelli PI kontrolör ile tasarlanmıştır. Doğrusal olmayan bir yük sisteme bağlanarak kaynak akımlarının bozulması sağlandı. Bağlanan yük günlük hayatımızda sıklıkla kullandığımız cihazlarda bulunan güç elektroniği temellidir. Bozulma sonucu kaynak akımı sinüzoidal dalga şeklinde uzaklaşmıştır ve kaynak akımının THD oranı %27.11 olduğu belirlenmiştir. Bu değer standartlarda belirlenen %3 oranından oldukça yüksektir. Kaynak akımının bozulmasından dolayı paralel sistemler daha iyi sağlar. Bundan dolayı aktif filtre olarak paralel aktif güç filtresi kullanılmıştır. Sisteme geleneksel kontrol teorisi temelli PI kontrolör ile tasarlanmış PAGF bağlanması ile sistemde oluşan 5., 7., 11. gibi genliği büyük ve sisteme daha fazla zarar veren harmonikler giderilmiştir. Bunun sonucunda kaynak akımı sinüzoidal dalga şekline gelmiştir. Kaynak akımının

THD değeri ise %27.11 değerinden %1.22 değerine düşmüştür. Elde edilen THD değeri %3'ten düşük olduğundan dolayı PI kontrolör temelli PAGF başarılı olmuştur.

Bulanık mantık temelli kontrolör ile tasarlanan PAGF için iki giriş ve bir çıkış üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu üyelik fonksiyonlarına göre kurallar oluşturulmuştur. Kuralların oluşturulmasında uzman deneyimi, sistemin çalışmasının incelenmesi ve deneme yanılma yöntemleri kullanılmıştır. Doğrusal olmayan yükten dolayı bozulan kaynak akımı bulanık mantık kontrol teorisi temelli PAGF ile düzeltilmiş ve dalga şekli sinüzoidal olmuştur. Kaynak akımının THD oranı %27.11 değerinden %1.01 değerine düşmüştür. elde edilen THD değeri %3'ten küçük olduğundan Bulanık mantık kontrol teorisi temelli PAGF başarı olmuştur. Ayrıca %1.01 değeri PI kontrolör ile yapılan PAGF elde ettiği %1.22 değerinden daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir.

PAGF aynı zamanda reaktif güç kompanzasyonu yapabilir. Tasarım kısmında anlık aktif ve reaktif güçlerin doğru ve dalgalı bileşenlerinin seçimi PAGF'nin kullanılma amacını belirler. Harmonikler için, reaktif güç kompanzasyonu için veya her ikisini gerçekleştirmek için tasarlanabilir. Yapılan tasarımda her ikisini gidermek için gerçekleştirildiğinden reaktif güç kompanzasyonunda kontrol edilmiştir. İlk olarak PAGF bağlı olmadığı durumda reaktif güç değeri 52.03 Var olarak belirlenmiştir. Bu değer PI kontrolör ile tasarlanan PAGF sisteme bağlandığında 12.04 Var değerine düşmüştür. Bulanık mantık temelli kontrolör ile tasarlanan PAGF bağlandığında ise reaktif güç değeri -1.908 Var değerine düşmüş ve sifıra çok yaklaşmıştır. Reaktif güç kompanzasyonu sağlamada bulanık mantık temelli kontrolör ile tasarlanan PAGF daha iyi sonuç vermiştir. Tablo 9.1'de her üç durumda kaynak akımının THD değeri ve reaktif güç değeri karşılaştırılmıştır.

Tablo 9.1. Elde edilen sonuçların karşılaştırılması

	PAGF' siz	Geleneksel kontrol teorisi temelli PI kontrolör	Bulanık mantık temelli kontrolör
Kaynak akımı THD	%27.11	% 1.22	% 1.01
Reaktif güç (VAR)	52.03	12.04	-1.908

STATCOM güç kalitesi problemlerinin giderilmesinde yaygınlıkla kullanılan ikinci nesil FACTS cihazıdır. STATCOM'un etkinliğini denetlemek için 3 baralı bir devre tasarlanmıştır. Her bara arasında 90 km'lik uzunluk vardır. Bu mesafeden dolayı yük geriliminde gerilim düşümü meydana gelmektedir. Devrenin yük gerilim pu biriminden etkin gerilimi ölçülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. İlk olarak devrede STATCOM bağlı olmadığı durumda yükün etkin gerilimi 0.9474 pu ölçülmüştür. Daha sonra geleneksel kontrol teorisi temelli P ve PI kontrolör ile tasarlanan STATCOM sisteme bağlanmıştır. P kontrolör ile tasarlanan STATCOM bağlı iken yükün etkin gerilimi 0.9621 pu olmuştur. Yük gerilimi STATCOM bağlanılarak yükseltilmiş ancak istenen 1 pu değerine gelmemiştir. PI kontrolör ile tasarlanan STATCOM sisteme bağlandığında ise yükün etkin gerilimi 0.9861 pu değerine yükselmiştir. Bu değer P kontrolör ile tasarlanan STATCOM'a göre daha iyi olduğu ve 1 pu değerine daha çok yaklaştığı gözlemlenmiştir.

Bulanık mantık temelli kontrolör ile tasarlanan STATCOM devreye bağlandığında ise yükün etkin gerilimi 1.004 pu olmuştur. Bu değer hem STATCOM'suz hem de geleneksel kontrol teorisi ile tasarlanan STATCOM'a göre daha iyi bir sonuçtur.

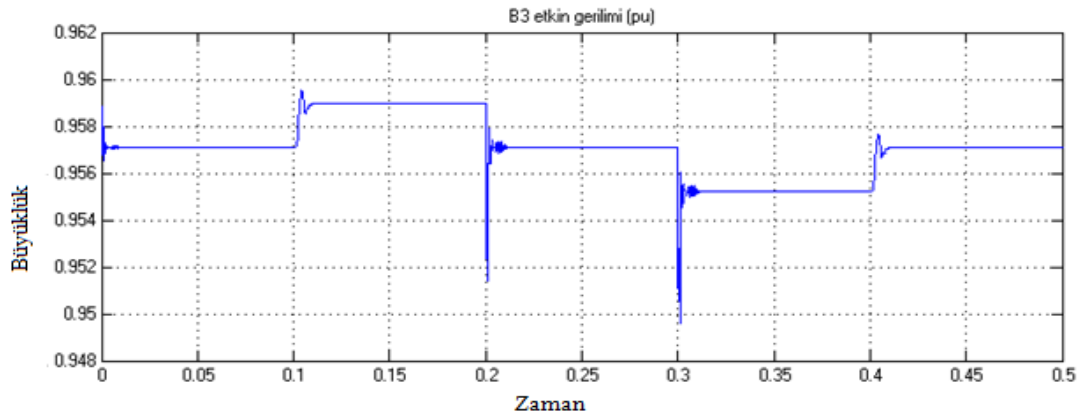
STATCOM devrede iken yük gerilimi ilk başta salınım yaptıktan sonra normal değerine gelmektedir. P kontrolör ile tasarlanan STATCOM devrede iken salınım süresi 0.08 saniye olarak ölçülmüştür. Bu değer PI kontrolör temelli STATCOM'da ise 0.05 saniye değerindedir. PI kontrolör P kontrolöre göre daha iyi sonuç vermiştir. En son olarak Bulanık mantık temelli kontrolör ile tasarlanan STATCOM devreye bağlanmış ve salınım süresi olarak 0.035 değeri bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre Bulanık mantık temelli kontrolör ile tasarlanan STATCOM,

geleneksel kontrol teorisi temelli P ve PI kontrolörlere göre daha iyi sonuç vermiştir. Tablo 9.2 elde edilen sonuçların karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 9.2. Geleneksel ve bulanık mantık temelli kontrolörlerin karşılaştırılması

	STATCOM'suz	P Kontrolör	PI Kontrolör	Bulanık Mantık Kontrolör
Yük Gerilimi (pu)	0.9474	0.9621	0.9861	1.004
Dalgalanma (saniye)	0.01	0.08	0.05	0.035

STATCOM'un gerilim ayarlamadaki başarısını gözlemlemek için sisteme kesici ile iki yük bağlanmıştır. Buradaki amaç kesicilerin anlık açılması ve kapanması ile yük geriliminde meydana gelen gerilim yükselmesi ve gerilim düşmesi durumunda STATCOM'un verdiği cevabı incelemektir. Yük 1 sistemden 0.1 ve 0.2 saniye aralıklarında çıkarılmıştır. Bu durumda yük geriliminde ani bir yükselme meydana gelmiştir. Yük 2 ise 0.3 ve 0.4 aralıklarında devreye alınmıştır. Bu durumda ise yük geriliminde ani bir düşme meydana gelmiştir. Şekil 9.1'de yükün etkin gerilimi gösterilmiştir.



Şekil 9.1. STATCOM 'suz devrede yükün etkin gerilimi (pu)

STATCOM'suz devrede yük geriliminin etkin değeri 0.9571 pu değerindedir. Daha sonra geleneksel kontrolör temelli STATCOM devreye bağlanmıştır. İlk olarak P kontrolörlü STATCOM'da yük gerilimi 0.9723 pu değerinde ölçülmüştür. Daha sonra

PI kontrolörlü STATCOM devreye bağlanmış ve yük gerilimi 0.9878 pu değerinde ölçülmüştür. PI kontrolör, P kontrolöre göre daha iyi sonuç vermiştir. Son olarak bulanık mantık temelli STATCOM sisteme bağlanmış ve yük gerilimi 1 pu ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre bulanık mantık kontrol teorisi, geleneksel kontrol teorisine göre daha iyi ve tam sonuç vermiştir. Tablo 9.3'te elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 9.3. Sonuçların karşılaştırılması

	STATCOM'suz	P Kontrolör	PI Kontrolör	Bulanık Mantık Kontrolör
Yük Gerilimi (pu)	0.9571	0.9723	0.9878	1

Yapılan tez çalışmasında bulanık mantık kontrol teorisi temelli kontrolör özel güç cihazlarına uygulanmış ve geleneksel kontrol teorisine göre başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bulanık mantık teorisi birçok alanda uygulanabilir ve daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Bulanık mantık temelli kontrolörleri güçlendirmek için geleneksel kontrol teorisi veya yapay sinir ağları gibi kontrol teorileri uygulanabilir. Bu durumda bulanık mantık temelli kontrolörler yaygınlaşabilir ve daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] DUGAN, R., McGranaghan, M., Santoso, S., and Beaty, W., Electrical Power System Quality, McGraw-Hill, New York, 1996.
- [2] BOLLEN, M.H.J., Gu,I., Signal Processing of Power Quality Disturbance IEEE Press Series on Power Engineering, Wiley Interscience, 2006.
- [3] SUCU, M., Elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmoniklerin filtrenmesinin bilgisayar destekli modellenmesi ve simülasyonu, Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
- [4] AKYEL, A., Elektrik enerji sistemlerinde güç kalitesinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
- [5] KUSKO, A. , THOMPSON, M.T., Power Quality in Electrical Systems, McGraw-Hill, New York, 2007.
- [6] YÖRÜR, K., Elektrik iletim hatlarının güç kalitesi parametrelerinin yazılımla hesaplanması ve değerlendirilmesi, Yüksek lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [7] İLASLANER, İ. Güç kalitesinde harmonikler ve filtrenmesi, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
- [8] KÖROĞLU, T. , Modelling and Analysis of Multiconverter Unified Power Quality Conditioner, Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2011.
- [9] KENNEDY, B., Power Quality Primer, McGraw-Hill, New York, 2000.
- [10] DUGAN, R., McGranaghan, M. F., Santoso, S., and Beaty, H. W., Electrical Power System Quality, McGraw-Hill, New York, 2003.
- [11] European Copper Institute, "European Power Quality Survey", 2002.

- [12] SCHIPMAN, K., Delince, F., The Importance of Good Power Quality, ABB Power Quality Products, Belgium.
- [13] BRADLEY, D., "Voltage dips, predictive maintenance- the key to power quality", Leonardo Power Quality Initiative Conference, Mart, 2001.
- [14] BERDİBEK, M., Güç Sistemlerinde Güç Kalitesinin Ayrık Dalgacık Dönüşümü Kullanılarak İncelenmesi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2009.
- [15] Günay, Ö. Güç Kalitesi Problemleri ve Elektrik Makineleri Üzerindeki Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
- [16] SENG L. Y., Probabilistic assessment of voltage-sag occurrence and the evaluation of the dynamic voltage restorer capability, Ph.D. thesis, University of Manchester Institute of Science and Tech, 2002.
- [17] AKSOY, S., Bir Endüstriyel Tesis Elektrik Dağıtım Sisteminin Gerilim Çökmeleri Bakımından İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
- [18] ACHA, E., AGELİDİS, V.G., ANAYA-LARA, O., MILLER, T.J.E., Power Electronic Control in Electrical Systems, Newnes, Oxford, 2002.
- [19] UYAR, M., Güç Kalitesi Bozulmalarının Akıllı Sistemler Kullanılarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [20] APAY, F. T., Güç Kalitesi Parametrelerinin Ölçülmesi ve Değerlendirilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi , Fen Bilimleri Endüstrisi, İstanbul.
- [21] SANKARAN, C., Power Quality, CRC PRESS, Boca Raton, 2002.
- [22] SINGH, M., VAİBHAV, T., Modelling analysis and solution of Power Quality Problems, BHILAI , INDIA.
- [23] KAUSHIK, N., Power Quality, Its Problem and Power Quality Monitoring, m. Tech Psed, Mruu, Farıdabad, India, IJEET,VOLUME 4,Issue 1, pp. 46-57, Junary-February 2013.

- [24] KUMAR N., S., Power Quality Issues and Its Mitigation Techniques, Msc. Thesis, Department of Electrical Engineering National Institute of Technology Rourkela, 2014.
- [25] BİLGE, M., Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Pasif Filtrelerle Eliminasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Endüstrisi, K.Maraş, 2008.
- [26] FİLİZ, C., Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Filtreleme Sistemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi , Fen Bilimleri Endüstrisi, Kırıkkale, 2006.
- [27] KOCATEPE, C., Sinüsoidal Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu, Y.T.Ü., Doktora Tezi, İstanbul, 1994.
- [28] EFE, S.B., Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Harmoniklerin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Endüstrisi, Malatya, 2006.
- [29] PALANI, K., Power Quality Analysis of a Three-Phase Cycloconverter Under Variable Operating Conditions, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2010.
- [30] MURAT, Y., Elektrik Sistem Tasarımında Harmoniklerin Giderilmesi İçin Bir Analiz, İ.T.Ü., Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Endüstrisi, İstanbul, 2006.
- [31] TOK, S., Enerji Sistemlerinde Meydana Gelen Harmoniklerin Analizi, Harmonik Standartları ve Ölçüm Teknikleri, Y.T.Ü., Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 1998.
- [32] KUNDUR, P., Power System Stability and Control, Mc Graw-Hill, New York, 1993.
- [33] BAYSAL ,M., Harmonik İçeren Güç Sistemlerin gerilim kararlılığının Yük Modellemeleri ve FACTS Elemanları Bakımından İncelenmesi, Y.T.Ü, Fen Bilimleri Endüstrisi, Doktora Tezi, 2008.
- [34] ERTAY, M.M., AYDOĞMUŞ, Z., Güç Sistemlerinde FACTS uygulamaları, SDU International Technologic Science, Vol. 4, No 2, pp 40-58, November 2012.

- [35] HİNGORANI, N.G., GYUGYI, L., Understanding FACTS: concepts and technology of flexible ac transmission systems, IEEE Pres., New York, 1999.
- [36] SINGH, B., SRIVASTAVA, A., MANISHA, Applications of FACTS Controllers, J. Automation and Systems Engineering 8-1, pp 1-24, 2014.
- [37] GÜLERYÜZ, M., FACTS Cihazları ve Rüzgar Enerji Santrallerinin Gerilim Kararlılığına Etkilerinin İncelenmesi, İ.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [38] PADIYAR, K.R., FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution, New Age International Publishers, India, 2007.
- [39] KARATAŞ, M., Statik Senkron Kompanzatorün PID Kontrolör ile Kontrolü, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [40] YILMAZ, S., Bulanık Mantık ve Mühendislik Uygulamaları Ders Notları, KOÜ, 2006.
- [41] PEHLİVAN, İ., Bulanık Mantık Kontrolörler ile Klasik PID Kontrolörlerin Karşılaştırılması ve Bir Bulanık Mantık Kontrolör Tasarımı, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2001.
- [42] WANG, Li-XIN, A Course in Fuzzy Systems and Control, Prentice- Hall International, 1997.
- [43] GÜL, G., Dinamik Sistemler İçin Gerçek Zamanda Bulanık Mantıkla Kontrolör Tasarımı, Hava Haro Okulu , Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2012.
- [44] PAÇACI, S., Yapay Sinir Ağları, Bulanık Mantık ve Sinirsel Bulanık Denetleyiciler ile Asenkron Motorların Hız Denetimi için Simülasyon Tasarımı, S.D.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [45] AKAGI, H., Modern Active Filters and Traditional Passive Filters, Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences, Vol. 54, No 3, 2006.
- [46] BADI, MANJULATA, Power Quality Improvement Using Passive Shunt Filter, TCR and TSC Combination, Master of Technology, India, 2012.

- [47] HOSSEİNİ, S., NOURİ, T., SABAHI, M., A Novel Hybrid Active Filter for Power Quality Improvement and Neutral Current Cancellation, Tabriz, Iran.
- [48] AKAGI, H., New Trends in Active Filters for Power Conditioning, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No 6, November/December, 1996.
- [49] PENG, F. Z., Harmonic Sources and Filtering Approaches , Industry Applications Magazine IEEE, Vol.7, pp 18-25, 2001.
- [50] PENG, F. Z., Application Issues of Active Power Filters, IEEE Industry Applications Magazine, pp 21-30, September 1998.
- [51] AKAGI, H., WATANABE, E., AREDES, M., Instantaneous Power Theory And Applications To Power Conditioning, IEEE Press, New Jersey, 2007.
- [52] CZARNECKI, L. S., Instantaneous Reactive Power p-q Theory and Power Properties of Three- Phase Systems, IEEE Transactions on Power Delivery , Vol. 21, No.1 , pp 362-367, Jan. 2006.
- [53] IQBAL, KHAN, SHAIKH, FURQAN, RAJPUT, Design and Simulation of Three Phase Shunt Active Power Filter Using The p-q Theory, N.E.D. University of Engineering and Technology, India.
- [54] KARA, Y., Statik Senkron Kompanzatorün Yapay Sinir Ağları İle Denetimi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- [55] XING, L., A Comparison Of Pole Assignment and LQR Design Methods For Multivariable Control For STATCOM, The Florida State University, Master of Science , 2003.
- [56] ÇÖTELİ, R., STATCOM İle Güç Akış Kontrolü, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [57] CANİZARES, C., POZZI, M., UZUNOVIĆ, E., STATCOM Modelling for Voltage and Angle Stability Studies, Electrical Power and Energy Systems , pp 1-20, 2003.

ÖZGEÇMİŞ

Yasin GENÇ, 30.05.1990 tarihinde K. Maraş'a bağlı Afşin ilçesinde doğdu. İlkokulu Afşin Yavuz Sultan Selim ilköğretim okulunda, Ortaokulu Elbistan İsmet Paşa ilköğretim okulunda ve lise eğitimini ise Elbistan Anadolu Lisesinde tamamladı. 2013 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik- Elektronik Mühendisliği ve Bilgisayar Mühendisliği bölümlerinde mezun oldu. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Elektrik- Elektronik Mühendisliği bölümü Elektrik anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı.