



BULANIK MANTIK DENETİMLİ ALÇAK GERİLİM STATİK VAR KOMPANZASYON
SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE PLC İLE GERÇEKLENMESİ

Yalçın DOĞRUL

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım – 2018

BULANIK MANTIK DENETİMLİ ALÇAK GERİLİM STATİK VAR KOMPANZASYON
SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE PLC İLE GERÇEKLENMESİ

Yalçın DOĞRUL

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca
Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman : Prof. Dr. Yılmaz ASLAN

Kasım– 2018

KABUL VE ONAY SAYFASI

Yalçın DOĞRUL tarafından hazırlanan “Bulanık Mantık Denetimli Alçak Gerilim Statik VAR Kompanzasyon Sisteminin Modellenmesi ve PLC ile Gerçeklenmesi” adlı tez çalışması, aşağıda belirtilen jüri tarafından Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek OY BİRLİĞİ ile Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında, YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

05/11/2018

Prof. Dr. Önder UYSAL
Enstitü Müdürü, Fen Bilimleri Enstitüsü

Prof. Dr. Mehmet Ali EBEOĞLU
Bölüm Başkanı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Prof. Dr. Yılmaz ASLAN
Danışman, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Sınav Komitesi Üyeleri

Prof. Dr. Yılmaz ASLAN
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Doç. Dr. Celal YAŞAR
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Doç. Dr. Eyyüp GÜLBANDILAR
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Kütahya Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının % 7 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.

Prof. Dr. Yılmaz ASLAN

Yalçın DOĞRUL

BULANIK MANTIK DENETİMLİ ALÇAK GERİLİM STATİK VAR KOMPANZASYON SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE PLC İLE GERÇEKLENMESİ

Yalçın DOĞRUL

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2018

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yılmaz ASLAN

ÖZET

Günümüzde elektrik enerjisi maliyetlerinin artması ile birlikte, tüketiciler için enerjinin verimli kullanımı çok önem kazanmıştır. Elektrik enerjisinin verimli kullanılmasının yöntemlerinden biri reaktif güç kontrolü ve kompanzasyonudur. Bir enerji kalitesi sorunu olan reaktif gücün azaltılması; bir başka deyişle kompanze edilmesi, kritik önem taşır. Enerjinin daha verimli kullanımı için yönetmeliklerde yapılan değişikliklerle beraber, reaktif enerji tüketiminde limitlerin düşürülmesi, reaktif güç kompanzasyonunun önemini arttırmıştır.

Gelişen teknolojiyle beraber mikroişlemcilerin güç elektroniği sistemlerinde kullanılmaya başlamasıyla birlikte, kontrol sistemleri ve güç katı maliyetlerinin düşmesi, tristörlü kompanzasyon sistemlerini, geleneksel elektromekanik kompanzasyon sistemleriyle rekabet edebilir hale getirmiştir. Özellikle dengesiz yüklenmelerin olduğu ve yükün hızlı değiştiği durumlarda, alçak gerilim reaktif güç kompanzasyonu istenilen güçlerde ekonomik bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır.

PLC kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada, harmonikler ihmal edilerek reaktif güç kompanzasyonu sabit kapasite ve tristör kontrollü reaktör (SK-TKR) ile tasarlanmıştır. Tasarlanan kompanzatör PID, bulanık mantıkla birlikte yapılan PID (BPID) ve uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) kontrol yöntemleri uygulanarak reaktif güç kompanzasyonu yapılmıştır. Uygulanan yöntemlerin sonuçları arasında kıyaslama yapılmıştır. Uygulanan kontrol yöntemleri ile PID performans verilerinden olan aşma, büyük ölçüde ortadan kaldırılmıştır. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID ile yerleşme zamanının azaltılması sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Statik VAR Kompanzasyon, Bulanık Mantık, PID, ANFIS, PLC.

FUZZY LOGIC CONTROLLED LOW VOLTAGE STATIC VAR COMPENSATION SYSTEM MODELING AND REALIZATION WITH PLC

Yalçın DOĞRUL

Electrical-Electronics Engineering, M.S. Thesis, 2018

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Yılmaz ASLAN

SUMMARY

With the increase in the cost of electrical energy, efficient use of energy is more important today for consumers. For the efficient use of electric energy reactive power control and compensation is very important. Reduction or compensation of reactive power, which is an issue of energy quality, is of critical importance. The changes in the regulations made for the efficient use of energy along with the reduction of limits in reactive energy consumption have increased the importance of reactive power compensation.

With improving technology, along with the introduction of the microprocessor control of power systems and power electronics system of strict cost reduction, thyristor compensation systems have become competitive with conventional electromechanical compensation systems. Especially in cases of unbalanced load and rapid changes in load, they emerge as an economic solution for desired power in the low-voltage reactive power compensation.

In the present study, a compensation system with a fixed capacitor and thyristor controlled reactor (FC-TCR) has been presented, which was conducted using PLC which can conduct reactive power compensation. Reactive compensation was conducted on the designed system by using PID, fuzzy logic and adaptive PID made with neuro-fuzzy inference system (ANFIS) control methods. The experimental results of the methods are compared. The PID control performance data, the overshoot, has been largely eliminated. Reduction of the settlement time with the triangular and trapezoidal membership function fuzzy PID (BPID) has been achieved.

Keywords: Static VAR Compensation, Fuzzy Logic, PID, ANFIS, PLC.

TEŞEKKÜR

Yaptığım çalışmalar süresince büyük yardım ve desteğini gördüğüm değerli danışman hocam Prof. Dr. Yılmaz ASLAN' a, değerli hocam Doç. Dr. Eyyüp GÜLBANDILAR' a ve yetişmemde emeği geçen tüm değerli hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Destekleri, gösterdiği sabır ve fedakârlık için eşim Nihan SEZGİN DOĞRUL' a, varlığı ile bana güç veren sevgili kızım Begüm DOĞRUL' a ve aileme çok teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
SUMMARY	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU	5
2.1. Görünür, Aktif, Reaktif ve Güç Faktörü Kavramları	5
2.2. Reaktif Güç Tüketen Yükler	5
2.3. Reaktif Gücün Ölçülmesi ile İlgili Standart ve Yöntemler	6
2.4. Reaktif Güç Kompanzasyon Yöntemleri	7
2.4.1. Dinamik yolla kompanzasyon, senkron reaktif güç üreticisi	7
2.4.2. Statik yolla kompanzasyon yöntemleri	8
3. KONTROL YÖNTEMLERİ.....	16
3.1. PID Kontrol.....	16
3.2. Bulanık Mantık	19
3.2.1. Bulanıklaştırma	21
3.2.2. Bilgi tabanı.....	21
3.2.3. Karar verme birimi.....	21
3.2.4. Durulama.....	22
3.2.5. Bulanık Modelleme Çeşitleri	23
3.3. Bulanık PID Kontrol	24
3.4. Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi ile Kontrol (ANFIS)	24
4. PLC ve SCADA	27

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.1. PLC Yapısı ve Fonksiyonları	27
4.2. SCADA	29
5. PLC ile SK-TKR KOMPANZATÖRÜN GERÇEKLENMESİ	30
5.1. PLC Denetimli Bir Fazlı SK-TKR Kompanzatörü	30
5.2. Bir Fazlı SK-TKR Kompanzatörün PID İle Denetlenmesi	35
5.3. Bir Fazlı SK-TKR Kompanzatörün Üçgen ve Yamuk Üyelik Fonksiyonlu BPID İle Denetimi	42
5.4. Bir Fazlı SK-TKR Kompanzatörün Gauss ve Sigmoid Üyelik Fonksiyonlu BPID İle Denetimi	52
5.5. Bir Fazlı SK-TKR Kompanzatörün ANFIS İle Denetimi	61
5.6. Karşılaştırma	71
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR DİZİNİ	82
EKLER.....	86
Ek 1. Ziegler-Nichols Frekans Cevabı Yöntemi PLC Programı	
Ek 2. Üçgen ve Yamuk Üyelik Fonksiyonlu BPID PLC Programı	
Ek 3. Gauss ve Sigmoid Üyelik Fonksiyonlu BPID PLC Programı	
Ek 4. ANFIS PLC Programı	
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Senkron reaktif güç üreticisi prensip şeması.....	8
2.2. Sabit kapasitör ve harmonik filtreli kapasitör grubu tek hat şeması.	9
2.3. Tristör kontrollü veya tristör anahtarlamalı reaktör tek hat şeması.....	10
2.4. Tristör anahtarlamalı kapasitör tek hat şeması.....	10
2.5. Tristör kontrollü seri kapasitör tek hat şeması.	11
2.6. STATCOM tek hat şeması.	12
2.7. SK-TKR temel yapısı.....	13
2.8. Gerilim ve Akımın Dalga Şekli, a) $\alpha=90^\circ$ $\sigma=180^\circ$ b) $\alpha=100^\circ$ $\sigma=160^\circ$	13
2.9. İletim Açısı ile Reaktif Güç ilişkisi.....	14
3.1. PID kontrol blok diyagramı	16
3.2. PID kontrol yanıtı değişimi ve zaman verileri	18
3.3. Değişik üyelik fonksiyonları	20
3.4. BMK sistemi prensip tasarımı (Karakuzu ve Öztürk, 2005).....	20
3.6. Örnek bir ANFIS modeli.....	25
4.1. PLC' nin içyapısı (Mirzaoglu ve Saritaş 2008).....	27
4.2. PLC giriş-çıkış elemanları (Dalmış, vd., 2018).	28
5.1. Tasarlanan bir fazlı SK-TKR kompanzatör.	30
5.2. İMA ekran görüntüsü	31
5.3. Quick Builder programı-Kanal (Channel) tanımlama ekranı.....	32
5.4. Quick Builder programı-Enerji analizörü (Controller) tanımlama ekranı.....	33
5.5. Kaydedici (Point) tanımlama ekranı	33
5.6. Reaktif gücün trend ekranı.....	34
5.7. PID kontrol programı	36
5.8. PID kontrol, 458 VAr kapasitif yük kompanzasyonu kutu grafiği	37
5.9. PID kontrol, 208 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyon kutu grafiği.....	38
5.10. PID kontrol, 208 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyon kutu grafiği ..	39
5.11. PID kontrol, 365 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyon kutu grafiği....	40
5.12. PID kontrol, 365 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyon kutu grafiği ..	41
5.13. BPID denetleyici prensip şeması	42
5.14. Üçgen ve yamuk üyelikli BPID hata fonksiyonu, $e(t)$	43
5.15. Üçgen ve yamuk üyelikli BPID hatanın zamana göre değişimi fonksiyonu, $de(t)/dt$	43

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.16. K_p parametresi için bulanık çıkış fonksiyonu.....	45
5.17. T_i parametresi için bulanık çıkış fonksiyonu.....	46
5.18. T_d parametresi için bulanık çıkış fonksiyonu	46
5.19. Üçgen ve Yamuk üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 458 VAr kapasitif yük kompanzasyonu kutu grafiği.....	47
5.20. Üçgen ve Yamuk üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 208 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyon kutu grafiği	48
5.21. Üçgen ve Yamuk üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 208 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyon kutu grafiği.....	49
5.22. Üçgen ve Yamuk üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 365 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyon kutu grafiği	50
5.23. Üçgen ve Yamuk üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 365 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyon kutu grafiği.....	51
5.24. Gauss, S ve Z sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID hata fonksiyonu, $e(t)$	52
5.25. Gauss, S ve Z Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID hatanın zamana göre değişimi fonksiyonu, $de(t)/dt$	53
5.26. K_p parametresi için gauss bulanık çıkış fonksiyonu.....	54
5.27. T_i parametresi için gauss bulanık çıkış fonksiyonu.....	54
5.28. T_d parametresi için gauss bulanık çıkış fonksiyonu	55
5.29. Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 458 VAr kapasitif yük kompanzasyonu kutu grafiği.....	56
5.30. Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 208 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyon kutu grafiği	57
5.31. Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 208 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyon kutu grafiği.....	58
5.32. Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 365 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyon kutu grafiği	59
5.33. Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 365 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyon kutu grafiği.....	60
5.34. Tek giriş ve tek çıkıtlı ANFIS modeli.....	61
5.35. Matlab ANFIS editörü	61
5.36. Eğitim dosyaları	62
5.37. ANFIS model yapısının genel görünümü	63
5.38. ANFIS üyelik editörü ve parametre değerleri penceresi.....	63
5.39. ANFIS'in oluşturduğu bulanık üyelik fonksiyonları	64

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.40. Sugeno model ANFIS BPID kontrol, 458 VAr kapasitif yük kompanzasyonu kutu grafiği.....	66
5.41. Sugeno model ANFIS BPID kontrol, 208 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyon kutu grafiği.....	67
5.42. Sugeno model ANFIS BPID kontrol, 208 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyon kutu grafiği.....	68
5.43. Sugeno model ANFIS BPID kontrol, 365 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyon kutu grafiği.....	69
5.44. Sugeno model ANFIS BPID kontrol, 365 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyon kutu grafiği.....	70
5.45. Denetim yöntemlerinin 458 VAr kapasitif yük kompanzasyonu için ortalama reaktif güç değişimleri	71
5.46. Denetim yöntemlerinin 208 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyonu için ortalama reaktif güç değişimleri	73
5.47. Denetim yöntemlerinin 208 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyonu için ortalama reaktif güç değişimleri	75
5.48. Denetim yöntemlerinin 365 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyonu için ortalama reaktif gücün değişimleri	77
5.49. Denetim yöntemlerinin 365 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyonu için ortalama reaktif gücün değişimleri	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Çeşitli elektriksel yüklerin güç faktörleri (Schneider Electric, 2016: 373).....	6
3.1. Kapalı çevrim cevabında K_p , K_i ve K_d kazançlarının etkisi.....	18
5.1. Kaydedici adresleri ve veri formatı tablosu (Klemsan, 2011).....	34
5.2. Ziegler-Nichols frekans yanıtı yöntemi ayar değerleri	35
5.3. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlarından oluşturulan modele ait kural tabanı	44
5.4. Gauss, S ve Z sigmoid üyelik fonksiyonlarından oluşturulan modele ait kural tabanı	53
5.5. Sugeno model ANFIS'nin oluşturduğu 1. dereceden polinomlar	65
5.6. Denetim yöntemlerinin 458 VAr kapasitif yük kompanzasyonu için ortalama reaktif gücün değişimi performans verileri	72
5.7. Denetim yöntemlerinin 208 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyonu için ortalama reaktif gücün değişimi performans verileri	74
5.8. Denetim yöntemlerinin 208 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyonu için ortalama reaktif gücün değişimi performans verileri	76
5.9. Denetim yöntemlerinin 365 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyonu için ortalama reaktif gücün değişimi performans verileri	78
5.10. Denetim yöntemlerinin 365 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyonu için ortalama reaktif gücün değişimi performans verileri	80

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

I	Akım
V	Gerilim
V_n	Nominal Tek Faz Gerilimi
P	Aktif Güç
Q	Reaktif Güç
S	Görünür Güç
I_p	Aktif Akım
I_q	Reaktif Akım
$\cos\varphi$	Güç katsayısı
φ	Akım ve Gerilim Arasındaki Açı
σ	Tetikleme Açısı
$p(t)$	Oransal Etki
$i(t)$	İntegral Etki
$d(t)$	Türev Etki
$m(t)$	Toplam Kontrol Etkisi
$e(t)$	Hata Etkisi
$G(s)$	Kazanç
K_p	Oransal Katsayı
K_i	İntegral Kazanç Sabiti
K_d	Türevsel kazanç sabiti
μ_A	Bulanık Küme
X	İletkenin ya da Transformatörün Reaktansı
$B_L(\sigma)$	Ayarlanabilir Temel Frekans Suseptansı
B_C	Kapasitör Bank Suseptansı
μ_F	Bulanık Çıkış Kümesi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
<i>AA</i>	Alternatif Akım
<i>ADC</i>	Analog Digital Converter (Analog Sayısal Çevirici)
<i>AG</i>	Alçak Gerilim
<i>ANFIS</i>	Artificial Neural Fuzzy Interference System (Uyarlamalı Bulanık Çıkarım sistemi)
<i>BM</i>	Bulanık Mantık
<i>BMK</i>	Bulanık Mantık Kontrol
<i>BPID</i>	Bulanık PID
<i>CPU</i>	Central Proccesing Unit (Merkezi İşlem Birimi)
<i>DAC</i>	Digital Analog Converter (Sayısal Analog Çevirici)
<i>DA</i>	Doğru Akım
<i>EPROM</i>	Elektriksel Programlanabilir ROM
<i>EPDK</i>	Enerji Piyasası düzenleme Kurulu
<i>FC-TCR</i>	Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor (Sabit Kapasite Tristör Kontrollü Reaktör)
<i>FIS</i>	Fuzzy Interface Structure (Bulanık Arayüz Yapısı)
<i>FBD</i>	Fonksiyon Blok Diagramı
<i>HMI</i>	Human Machine Interface
<i>İMA</i>	İnsan Makine Arayüzü
<i>IEEE</i>	The Instutite of Electrical and Electronics Engineers
<i>kVAr</i>	Kilo Volt Amper reaktif
<i>kVAh</i>	Kilo Volt Amper Saat
<i>MATLAB</i>	Matriks Laboratuvarı İsimli Paket Program
<i>MİB</i>	Merkezi İşlem Birimi
<i>MODBUS</i>	PLC İletişim Arabirimi
<i>OG</i>	Orta Gerilim
<i>PC</i>	Kişisel Bilgisayar
<i>PID</i>	Proportional, Integral, Derivative (Oransal, İntegral, Türev)
<i>PLC</i>	Programmable Logic Controller (Programlanabilir Mantık Denetleyici)
<i>SCADA</i>	Supervisory Control and Data Acquisition (Merkezi Denetim ve Veri Toplama)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**Kısaltmalar****Açıklama**

<i>SMPS</i>	Switching Mode Power Supply (Anahtarlama Kesintisiz Güç Kaynağı)
<i>SK-TKR</i>	Sabit Kapasite Tristör Kontrollü Reaktör
<i>SSR</i>	Solid State Relay (Katı Hal Röle)
<i>STATCOM</i>	Statik Senkron Kompanzatör
<i>STL</i>	Statement List (Deyim Listesi)
<i>SVK</i>	Statik VAR Kompanzatör
<i>TAR</i>	Tristör Anahtarlama Reaktör
<i>TKSK</i>	Tristör Kontrollü Seri Kapasitör
<i>TKR</i>	Tristör Kontrollü Reaktör
<i>VAR</i>	Volt Amper reaktif

1. GİRİŞ

Elektrik şebekelerinde çalışan birçok cihaz, çalışırken tükettikleri aktif güç ile birlikte reaktif güç de tüketirler. Aktif güç, yararlı işe dönüşürken, reaktif güç için bu durum söz konusu değildir. Ancak, manyetik alan oluşması için bu cihazlar çalışırken reaktif güce de ihtiyaç duyarlar. 10.11.2004 tarihli ve 25639 sayılı Resmi Gazete’ de yayınlanan ve 09.01.2007 tarihli ve 26398 sayılı Resmi Gazete ile değişiklik yapılan, Elektrik Piyasası Müşteri Hizmetleri Yönetmeliği’ne göre, reaktif enerji ölçüm sistemi, tüketiciler tarafından tesis edilmek zorundadır. Belirtilen tüketiciler, kurulu gücü 50 kVA’nın altında olanlar, çektikleri endüktif reaktif enerji miktarının, aktif enerji miktarına oranı %33 veya şebekeye verdikleri kapasitif reaktif enerji miktarının, aktif enerji miktarına oranı %20’yi aşması halinde; kurulu gücü 50 kVA ve üstünde olanlar ise, çektikleri endüktif-reaktif enerji miktarının, aktif enerji miktarına oranı %20 veya şebekeye verdikleri kapasitif-reaktif enerji miktarının, aktif enerji miktarına oranı %15’i aşması halinde; reaktif enerji tüketim bedeli ödemekle yükümlüdür. Reaktif gücün, elektrik şebekesinden tüketicilere iletilmesi sürecinde, iletim ve dağıtım hatlarında kayıplara sebebiyet vermekte, güç transferi kapasitesini azaltmakta ve elektrik üretiminde kullanılan kaynak sarfiyatının artmasına sebep olmaktadır. Bu etkenler dikkate alındığında, alıcıların ihtiyacı olan reaktif gücün tüketileceği noktada üretilmesi daha ekonomik olacaktır. Bu sebeple, reaktif güç kompanzasyon üniteleri imal edilmektedir.

Elektrik dağıtım şirketleri, tüketicinin elektrik dağıtım şebekesinden kullandığı aktif ve reaktif gücün büyüklüğüne göre maliyet belirlemekte ve önceden belirlenen sınırlar dışına çıkıldığında yüksek maliyetler ile ceza uygulanmaktadır. Bu sınırlar içerisinde bulunmak için kompanzasyon üniteleri kullanılmalıdır.

Birçok tüketici, kompanzasyonu elektromekanik yollarla kapasitör bloklarını anahtarlama işlemi ile yapmaktadır. Bu yöntemin maliyeti düşük olup, yanlış tasarlandığında veya elektromekanik yöntemlerde çok görülen kontağın ark yapması sonucu sistemin zarar gördüğü durumlarda, yüksek maliyet kaçınılmaz olmaktadır. Yükün hızlı değiştiği işletmelerde, elektromekanik sistemin tepkisi geç kalmakta, düşük ya da aşırı kompanzasyona sebep olmakta ve elektromekanik kompanzasyon sisteminin bekleneni karşılamadığı görülebilmektedir.

Mikrodenetleyici tabanlı sistemlerin kullanımının artmasıyla birlikte maliyetleri büyük oranda düşmüş ve yetenekleri geliştirilmiştir. Kompanzasyon sistemlerinin, güç elektroniği elemanlarının mikrodenetleyiciler ile kontrol edilerek kullanılmasına başlanmıştır. Elektromekanik yolla yapılan kompanzasyonda karşılaşılan problemlerin birçoğu mikrodenetleyicili sistemlerde karşımıza çıkmamaktadır. Yükün hızlı değiştiği işletmelerde, güç

elektroniği elemanları ve mikrodenetleyicili sistemler ile yapılan kompanzasyon daha kararlı ve üstün sonuçlar vermektedir.

Literatürde Bulanık Mantık (BM) kullanımı ile yapılan çalışmalar fazla olup, birçok farklı alanda çalışmalar bulunmaktadır. Bunun sebebi, modern bilgisayarların ikili mantığının dünyanın çeşitliliğini tanımlamada yetersiz kalmasıdır. Hayatımızdaki şeyleri sadece siyah ya da beyaz olarak ifade edemeyiz. İşte BM' da bize hayatın gri yönlerini teknolojik olarak ifade edebilmemizde yardımcı olan bir makine zekâsı biçimidir. Bu nedenle literatür çalışmalarını hem BM uygulamaları hem de statik VAR kompanzasyonunda (SVK) kullanımı şeklinde değerlendirebiliriz.

Karakuzu ve arkadaşları tarafından yapılan BM algoritmali çalışmada alternatif akım motorunun çok kısa sürede istenilen devir değerine ulaştığı ve bu değerinde kaldığı deneysel olarak gösterilmiştir. Yapılan çalışmada BM birimi olan OMRON marka PLC'nin C200HS-CPU21-E modeli kullanılmıştır (Karakuzu ve Öztürk, 2005).

Özdemir ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada prototipi olan bir mikro hidroelektrik santralin kontrolü, Siemens marka PLC'nin BM birimi olan S7-300 modeli ile gerçekleştirilmiştir (Özdemir ve Orhan, 2012).

Peri ve arkadaşları tarafından diferansiyel tahrik mobil robotların hareketini kontrol etmek için bir BM denetleyici yapılmıştır. Duvar izleyen bir bağımsız robotun programı daha öncesinde MATLAB'da (Matrix Laboratory) BM algoritması ile yazılmış ve optimize edilmiş, daha sonra 16F877 PIC ile C dilinde programlanmıştır. Önerilen bulanık kontrol performansını test etmek için bir mobil robot üzerinde benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu robotun giriş verileri ultrasonik sensörler ile sağlanıp bu veriler robot üzerindeki kartta işlenmiştir. Mobil robotun verimli bir şekilde pozisyonu aldığı ve x-y kartezyen düzlemde ilk konfigürasyona ulaştığı görülmüştür. BM denetleyicinin özerk bir mobil robotun hareketini kontrol etmek için gerçek zamanlı olarak uygulanabilir olduğu ve posta teslimi, afet bölgelerinde binaların aranması, özerk araba, vb. uygulamalarda kullanılabileceği belirtilmiştir (Peri ve Simon, 2005).

Gani ve arkadaşları tarafından, bulanık-PI (Proportional, Integral), denetim esaslı reaktif güç kompanzasyonu gerçekleştirilmiş, çalışmada dinamik kompanzatörün denetimi için uyarlamalı bulanık-PI denetim yöntemini önermişlerdir (Gani vd., 2015).

Literatürde, statik reaktif güç kompanzasyonu için de çeşitli yöntemlerle uygulama çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalardan biri; Udhayashankar ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen uygulamalarda klasik olarak kullanılan PI kontrolcülerin, güç sisteminde

kullanılan alıcı cihazların lineer olmayan davranışlarına karşı bazı yetersizlikleri sebebiyle PI kontrolü ve bulanık mantık kontrolünün beraber kullanıldığı bir simülasyondur. Gerçekleştirilen benzetim sonuçları, tasarlanan sistemin PI kontrol sistemine göre daha hızlı tepki verdiğini göstermiştir (Udhayashankar vd., 2014).

Wang ve arkadaşları tarafından anlık reaktif güç teorisi, PID (Proportional, Integral, Derivative) ve bulanık mantık kontrolü kullanan bir diğer çalışma olup, endüstride kullanım için tasarlanmıştır (Wang vd., 2008).

Bu uygulamaların yanı sıra Falehi ve arkadaşları tarafından PID ve genetik algoritmaların kullanıldığı kompanzatör çalışmaları da literatürde mevcuttur (Falehi vd., 2012).

Lak ve arkadaşları tarafından Matlab programı kullanılarak oluşturulan bir başka çalışmada bulanık mantık ve uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) birlikte kullanılmış ve benzetim ortamında oluşturulan test ortamında test edilmiştir. Sonuç olarak sadece bulanık mantık kullanılan sisteme göre bulanık mantık ve uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi daha başarılıdır (Lak vd., 2012).

Niang ve arkadaşları tarafından lineer olmayan PID kontrolü yardımıyla yapılan kompanzasyon örneği de literatürde mevcuttur (Niang vd., 2008).

Chandramohan, Demiroren ve Sinha ile arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bazı çalışmalarda, kompanzasyon optimizasyonu için genetik algoritmalar kullanılmıştır (Chandramohan vd., 2010).

Çolak ve arkadaşları yaptıkları çalışmada senkron motorun bulanık mantık denetimiyle gerçek zamanlı bir reaktif güç kompanzasyonu gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma, kapasitör grupları kullanılan uygulamalardan daha etkili, hızlı ve ekonomik bir yöntem olmasının yanında aşırı veya düşük kompanzasyon ihtimalini ve zaman gecikmelerini ortadan kaldırmaktadır. (Çolak vd., 2003).

Gerçekleştirilen bu çalışmada, harmonikler ihmal edilerek sabit kapasite ve tristör kontrollü reaktör (SK-TKR) programlanabilir lojik kontrolör (PLC) ile kontrol edilmiştir. Tasarlanan kompanzatöre PID, bulanık mantık denetimli PID (BPID) ve ANFIS ile yapılan BPID kontrol yöntemleri uygulanarak reaktif güç kompanzasyonu yapılmış, kullanılan yöntemlerin performansları ve uygulama sonuçları çalışmada verilmiştir.

Tez çalışmasının ilk bölümünde, çalışma konusu ile ilgili genel bilgiler ve literatür çalışması hakkında bilgiler verilmektedir. İkinci bölümde, kompanzasyonla ilgili temel bilgiler

verilmektedir. Üçüncü bölümde, çalışmada kullanılan denetim yöntemleri incelenmektedir. Dördüncü bölümde, PLC ve SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) hakkında genel bilgiler verilmektedir. Beşinci bölümde, yapılan çalışma detaylandırılarak anlatılmakta ve elde edilen veriler kıyaslanmaktadır. Sonuç kısmında ise ulaşılan sonuçlar değerlendirilmektedir.



2. REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU

2.1. Görünür, Aktif, Reaktif ve Güç Faktörü Kavramları

Şebekeden çekilen akım, matematiksel ve fiziksel bakımdan, aktif ve reaktif olarak iki bileşene ayrılır. Bu iki bileşenin bileşke akımına ise görünür akım (I), çekilen güce görünür güç (S) denir (Bayram, 2000:1-4).

Aktif akımdan (I_p) elde edilen aktif güç (P) bileşeni, işe dönüşen güç olup tüketicinin fayda sağladığı güçtür. Motorlarda mekanik güce, ısıtıcılarda termik güce, aydınlatmada ışık akısına dönüşür (Bayram, 2000:1-4).

Jeneratör, transformatör ve motor gibi elektrodinamik prensibine göre çalışan elektrik alıcılarının çalışması için gerekli manyetik alan eldesi için gerekli akıma reaktif akım (I_q), çekilen güce reaktif güç (Q) denir. Şebekeden çekilen reaktif akım, elektrik üretiminde ve iletiminde kullanılan jeneratörlerin, transformatörlerin ve enerji iletim hatlarının gereksiz yere yüklenmesine, ısı kayıplarına ve gerilim düşümlerine neden olur (Bayram, 2000:1-4).

Aktif güç, görünür gücün $\cos\varphi$ değeri ile çarpılması sonucu elde edilir. Buradaki φ açısı akım ile gerilim arasındaki açıyı ifade eder. Bu açının kosinüs değeri ise güç katsayısı olarak isimlendirilir. Endüktif karakterli bir sistemde akım gerilimden geri, kapasitif karakterli bir sistemde ise akım gerilimden ileri güç katsayısına sahiptir (Kıyan ve Aydemir, 2014).

2.2. Reaktif Güç Tüketen Yükler

Lamba balastları, ark fırınları, transformatörler, anahtarlamalı güç kaynakları, endüksiyon fırınları, kaynak makineleri, asenkron motorlar, havai hatlar v.b. en önemli reaktif güç tüketicileridir. Çizelge 2.1. 'de çeşitli elektriksel yüklerin güç faktörleri gösterilmiştir (Schneider Electric, 2016).

Çizelge 2.1. Çeşitli elektriksel yüklerin güç faktörleri (Schneider Electric, 2016: 373).

Yük	$\cos\varphi$	
Genel Asenkron Motorlar Yükleme:	% 0	0.17
	% 25	0.55
	%50	0.73
	% 75	0.80
	% 100	0.85
Asenkron Motorlar için Elektrik Hız Sürücüleri	≈ 0.85	
Kompanze Edilmemiş Florasan Lamba	≈ 0.5	
Kompanze Edilmiş Florasan Lamba	0.93	
Endüksiyon Ocakları	≈ 0.85	
Ark Ocakları	0.7 - 0.8	
Rezistans Kaynak Makineleri	0.3 - 0.8	
Tek Fazlı Ark Kaynak Makineleri	≈ 0.5	
Ark Kaynağı	0.7 - 0.9	

2.3. Reaktif Gücün Ölçülmesi ile İlgili Standart ve Yöntemler

Uluslararası IEC 1268 standardına göre, sadece temel bileşen dikkate alınarak reaktif güç hesaplanır ve harmonikler dikkate alınmaz. IEEE 100-1996 standardında ise reaktif güç, denklem (2.1)' e göre hesaplanır.

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \sin \varphi_n \quad (2.1)$$

Buna göre V_n , I_n gerilim ve akımın n. dereceden harmonik bileşenlerinin reaktif değerini ifade eder. Endüktif reaktif güç pozitif, kapasitif reaktif güç negatiftir (Stork ve Mayer, 2017).

Reaktif gücün hesaplanması ile ilgili yöntemler, güç üçgeni yöntemi, zaman gecikmesi yöntemi ve alçak geçiren filtre yöntemidir (Stork ve Mayer, 2017).

Güç üçgeni yönteminde reaktif güç, aktif ve görünür güçten faydalanılarak hesaplanır.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.2)$$

Reaktif güç, denklem (2.2)' ye göre hesaplanır. Reaktif güç, temel harmonik bileşen ile hesaplandığında iyi sonuç verirken, diğer harmoniklerin olduğu durumlarda ölçüm hatalı olarak gerçekleşmektedir (Kıyan ve Aydemir, 2014).

Zaman gecikmesi yönteminde ise, akım ya da gerilim parametrelerinden birinin 90° kaydırılıp diğeri ile çarpılması ile reaktif güç hesaplanabilir (Kıyan ve Aydemir, 2014). Denklem (2.3)' deki gibi ifade edilir.

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i \left(t + \frac{T}{4} \right) dt \quad (2.3)$$

Alçak geçiren filtre yönteminde ise, dalga formlarından bir tanesinin kesim frekansı, temel frekansın altında bir frekansta alçak geçiren bir filtre yardımı ile 90° kaydırılarak çarpma işlemi uygulanır (Stork ve Mayer, 2017).

2.4. Reaktif Güç Kompanzasyon Yöntemleri

Reaktif güç, bir çevrimin $\frac{1}{4}$ süresi içinde kapasitör veya reaktörde depolanır, çevrimden sonraki $\frac{1}{4}$ süresinde ise tekrar şebekeye gönderilir. Yani, reaktif güç, AA(Alternatif Akım) kaynak ile kapasitör veya reaktör arasında nominal frekansın iki katı bir frekansta salınır. Bu nedenle, reaktif akım, kaynakla yük arasında devresini tamamlamadan, reaktif güç üreticileri tarafından kompanze edilebilir. Reaktif güç kompanzasyonu paralel veya seri bağlanan reaktif güç üreticileri tarafından yapılır (Çöteli ve Dandil, 2016).

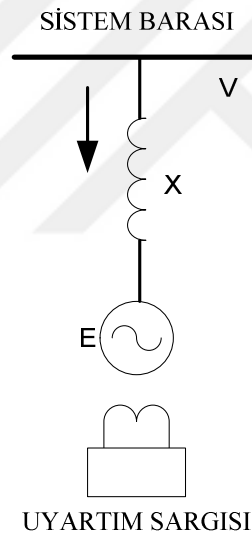
Reaktif güç kompanzasyonu dinamik ve statik olmak üzere iki şekilde yapılır. Dinamik kompanzasyonda döner senkron makineler kullanılmaktadır. Statik kompanzasyonda ise kapasitör grupları mevcuttur. Bu grupların reaktif güç ihtiyacına göre, elektro-mekanik yolla, kesici veya kontaktör kullanılarak anahtarlanabildiği gibi tristör v.b. gibi güç elemanları ile de devreye alınabilir (Kıyan ve Aydemir, 2014).

2.4.1. Dinamik yolla kompanzasyon, senkron reaktif güç üreticisi

Kompanzasyon için gerekli olan reaktif güç ihtiyacı, senkron makinelerin generatör modunda çalıştırılması ile elde edilebilir. Orta gerilimde kullanılan bu kompanzasyon

yönteminde ihtiyaç olan reaktif güç miktarı, senkron makinenin uyartım akımı ayarlanarak elde edilir. Bu yöntemin dezavantajı, hızlı yük değişimlerine tepkisinin yavaş kalmasıdır.

Şekil 2.1.' de senkron reaktif güç üreticisinin prensip şeması görülmektedir. Senkron reaktif güç üreticisinin geriliminin faz açısı ile şebeke geriliminin faz açısı senkronize edildikten sonra, generatör alan akımı, şebeke ile araya konulan bir seri reaktör üzerinden şebekeden endüktif-reaktif güç çekmek veya şebekeye kapasitif-reaktif güç vermek üzere ayarlanır. Senkron makineler, önemli kurulum, işletme ve koruma ekipmanı gerektirmektedir. Kayıpları ve maliyetleri statik yöntemlerle karşılaştırıldığında oldukça yüksek kalmaktadır. Elektromekanik yöntemlerden daha hızlı tepki vermesi, reaktif güçte kademeli değişimler olmaması, akım ve gerilim dalga formunda bozulmalar oluşmaması avantajlarındandır. (Gedikpınar ve Güngör, 2017).



Şekil 2.1. Senkron reaktif güç üreticisi prensip şeması.

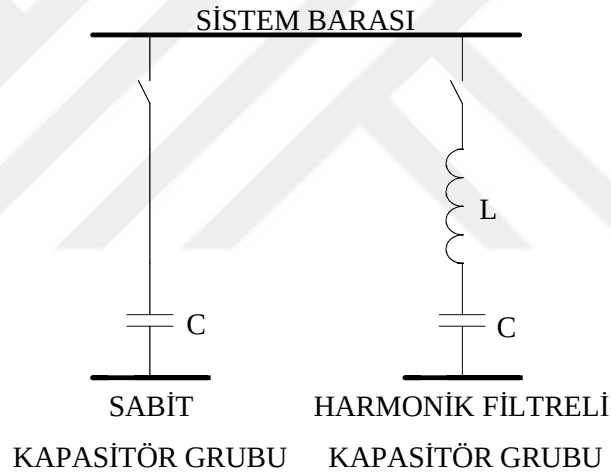
2.4.2. Statik yolla kompanzasyon yöntemleri

Sabit ve kademeli kapasitör grupları, harmonik filtre reaktörleri

Statik faz kaydırıcı olarak adlandırılan kapasiteler 1914 yılında, güç katsayısı düzeltme yöntemi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Kapasitörlerin, aktif kayıpları nominal gücünün %0.5'inin altındadır ve bakım masrafları oldukça düşüktür. Sabit veya kademeli kapasitör grupları bugün kullanılan en yaygın kompanzasyon yöntemidir (Gani, vd., 2015).

Orta gerilimde, kapasitör gruplarının anahtarlanması oldukça zordur. Elektromekanik kesicilerle kapasitörleri, değişen yüklerle göre hızlı bir biçimde devreye almak pratik değildir. Dolayısıyla ark ocakları, haddehaneler gibi reaktif gücün hızlı değiştiği işletmelerde sorun teşkil eder (Bayram, 2000:6-50).

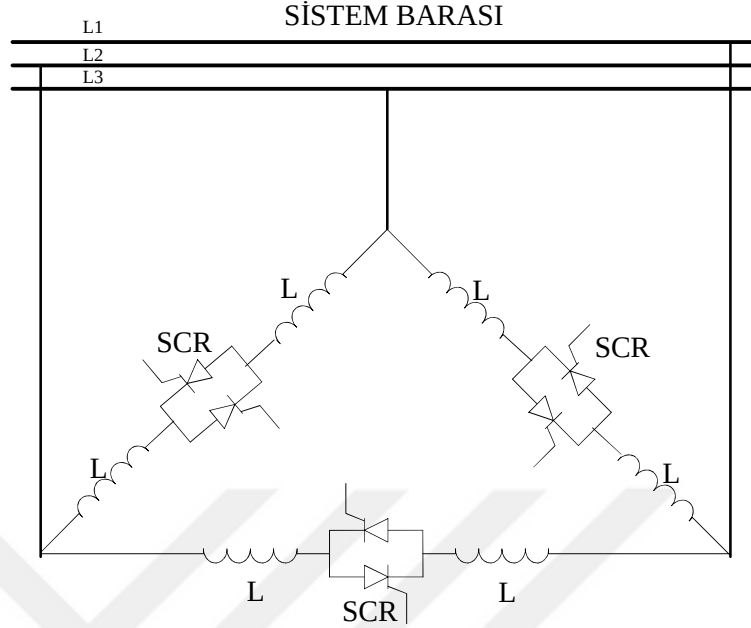
Şekil 2.2.' de sabit kapasitör ve harmonik filtreli kapasitör grubunun tek hat şeması görülmektedir. Kapasitör gruplarına seri olarak bağlanan harmonik filtre reaktörleri ile belirlenen frekanstaki harmonikleri filtrelemek mümkündür. Bu şekilde tasarlanan sistemler pasif harmonik filtre olarak adlandırılır. Kapasitörlerin devreye alındığı an kısa devreye benzediği için, devreye alınma anında, kapasitörün üzerinden nominal akımının 30 katına kadar çıkabilen akım darbeleri oluşabilir. Bununla birlikte filtre reaktörü, anahtarlama sırasında kapasitörün üzerinde oluşabilecek aşırı akımları sınırlar (Bayram, 2000:156).



Şekil 2.2. Sabit kapasitör ve harmonik filtreli kapasitör grubu tek hat şeması.

Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama reaktör

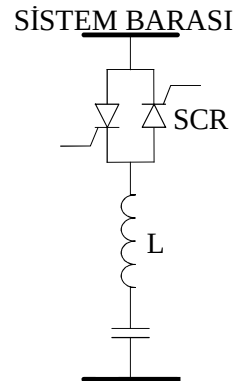
Şekil 2.3.' de tek hat şeması görülen tristörlerin iletim kontrolü ile reaktansı sürekli değiştirilebilen paralel bağlı tristör kontrollü reaktör (TKR) ya da tristör anahtarlama reaktör (TAR) gruplarıdır. TKR ve TAR üç fazlı sistemlerde üçgen bağlanır (Keskin, vd., 2015)



Şekil 2.3.Tristör kontrollü veya tristör anahtarlama reaktör tek hat şeması.

Tristör anahtarlama kapasitör

Şekil 2.4.' de tek hat şeması görülen tristör anahtarlama kapasitör (TAK) , tristör ile seri bağlı bir kapasitörden oluşmaktadır. Birden fazla TAK, aynı yük barasına paralel bağlanarak ihtiyaç duyulan reaktif güç talebine göre tristörler tetiklenerek devreye alınırlar.



Şekil 2.4.Tristör anahtarlama kapasitör tek hat şeması.

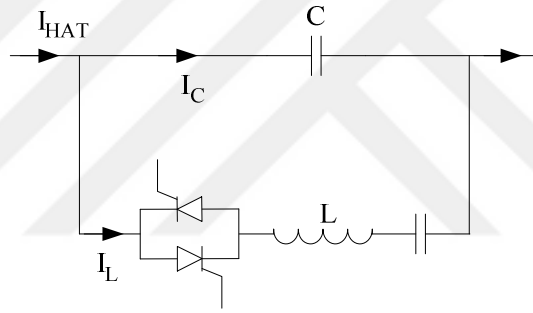
Kapasitörler; anahtarlama esnasında sistemde ani aşırı akım ve gerilimlere neden olabilirler. Bu nedenle, kapasitörlerin anahtarlama amacıyla tristör kullanıldığında dikkatli olunması gereklidir. Kapasitör gruplarını anahtarlama için tristörlerin tetiklenmeleri ancak kapasitör gerilimi ile şebeke gerilimi aynı polaritede iken yapılmalıdır. Böylece, tristörlerden

geçen akımın miktarı tristörleri yakacak seviyeye ulaşmaz. Kapasitör gruplarını devreden çıkarma işlemi ise akımın sıfırdan geçtiği anda yapılmalıdır (Çöteli ve Dandil, 2016).

Tristör kontrollü seri kapasitör

Şekil 2.5.' de tek hat şeması görülen Tristör Kontrollü seri kapasitörlü (TKSK) kompanzasyon sisteminin, güç transferi kapasitesini arttırma ve geçici durum kararlılığını iyileştirme faydaları vardır. TKSK ile sistem empedansı istenilen şekilde ayarlanabilir. TKSK, TKR ve buna paralel bağlı bir kondansatörden oluşur. TKSK'ün eşdeğer empedansı TKR'ün tetikleme açısının sürekli değiştirilmesiyle hattın kapasitif empedansını değiştirerek hattın güç taşıma kapasitesini kontrol edebilmektedir (Nalbantoğlu ve Güler, 2017).

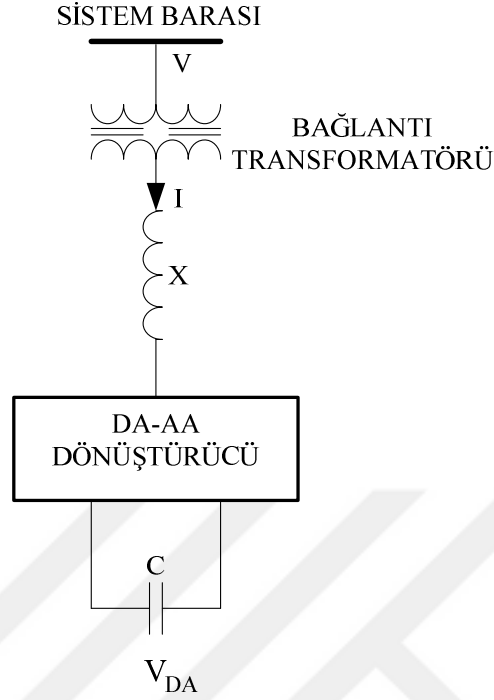
TKSK'ne ait tek hat şeması Şekil 2.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 2.5.Tristör kontrollü seri kapasitör tek hat şeması.

Statik senkron kompanzatör

Şekil 2.6.' da tek hat şeması görülen statik senkron kompanzatör (STATCOM), nominal frekansta, kontrol edilebilen genlikte ve faz açısında üç faz sinüzoidal gerilim üretir. STATCOM, kuplaj trafosu, giriş filtresi, gerilim kaynaklı çevirici ve denetleyiciden oluşur (Genç, 2016).



Şekil 2.6. STATCOM tek hat şeması.

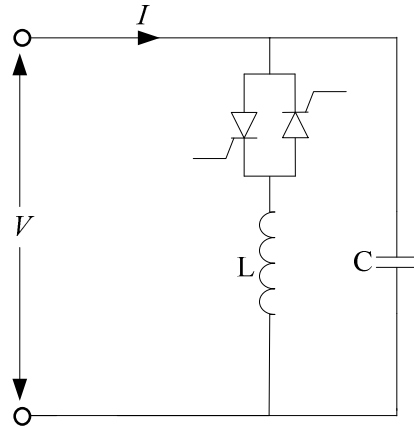
Çıkış gerilimi ile sistem gerilimi arasındaki faz farkına göre sistemden aktif güç çekilmekte veya sisteme aktif güç aktarılabilmektedir. STATCOM'un aktif ve reaktif gücü bağımsız olarak kontrol edebilmesi, güç sisteminin verimliliğini ve kararlılığını arttırmakta, kesintilere karşı koruma sağlamaktadır (Genç, 2016).

Sabit kapasite ve tristör kontrollü reaktör

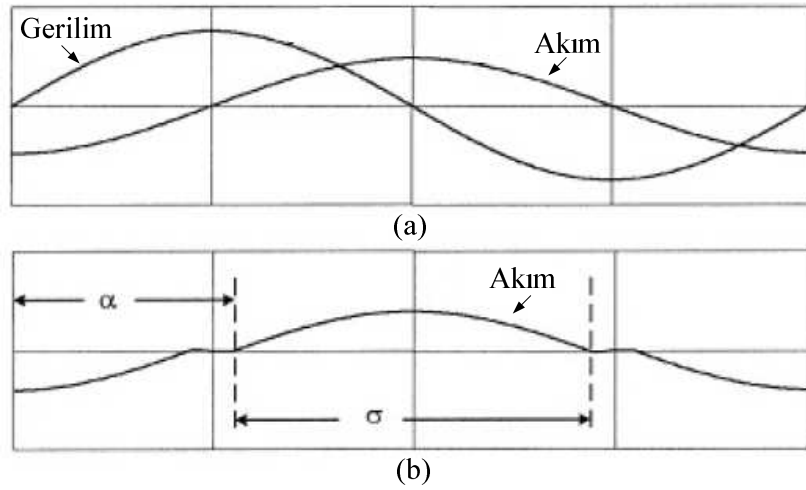
1999 yılında yapılan bir çalışmada, sabit kapasite tristör kontrollü reaktör (SK-TKR) tabanlı bir SVK sisteminin bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sistem geleneksel yöntemlerden daha hassas olduğu gözlenmiştir (Li ve Chen, 2008).

Reaktöre gerilim uygulandığında ve reaktörden akan akımın değiştirilmesi ile değişken endüktif reaktif güç sağlanabilir. Anahtarlanan tristörün ateşleme açısı (kapama gecikmesi) kontrol edilerek, reaktörün suseptans değeri ayarlanabilir. Ateşleme açısına, α denir. Böylece, ayarlanabilen reaktif güç kontaktörlü kompanzasyon sistemine göre hassasiyeti daha yüksek olacaktır (Kıyan, 2010).

SK-TKR eşdeğer devresi, tetikleme açısı α ile iletim açısı, σ ve akım, gerilim değişimi Şekil 2.7. ve Şekil 2.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. SK-TKR temel yapısı.



Şekil 2.8. Gerilim ve Akımın Dalga Şekli, a) $\alpha=90^\circ$ $\sigma=180^\circ$ b) $\alpha=100^\circ$ $\sigma=160^\circ$.

Reaktör üzerinden geçen ani akım ifadesi, denklem (2.4)' deki gibi fade edilir (Kıyan, 2010).

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}V}{X_L} (\cos \alpha - \cos \omega t) , & \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0, & \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \quad (2.4)$$

Burada V gerilim, $X_L = \omega L$ reaktörün temel frekanstaki reaktansı (Ω), $\omega = 2\pi f$ ve α , tetikleme gecikme açısıdır.

Burada iletim açısını (σ), tetikleme açısı (α) cinsinden yazarsak, denklem (2.5) elde edilir.

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (2.5)$$

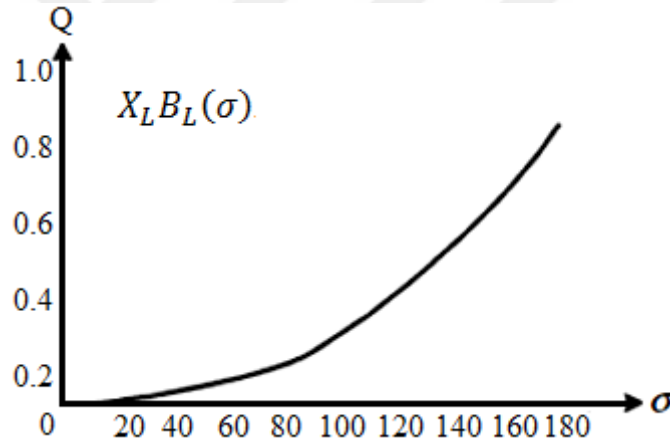
Akımın temel bileşeni olan I_1 akımı Fourier analizi ile bulunur. I_1 akımı denklem (2.6) ile ifade edilir.

$$I_1 = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} V = B_L(\sigma) \cdot V \quad A \text{ (rms)} \quad (2.6)$$

Burada, $B_L(\sigma)$ ayarlanabilir temel frekans suseptansıdır, iletim açısıyla kontrol edilir. B_L , denklem (2.7) ile ifade edilir (Bayram, 2000:209-237; Arifoğlu, 2002: 370-374).

$$B_L(\sigma) = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} \quad (2.7)$$

Şekil 2.9.' da reaktörden geçen akımı kontrol eden tristörlerin iletim açılarının üretilen reaktif güç ile olan ilişkisi görülmektedir.



Şekil 2.9. İletim Açısı ile Reaktif Güç ilişkisi.

Suseptansın maksimum değeri; tristörün tam iletimde olduğu $\sigma = \pi$ iken, minimum değeri ise $\sigma = 0$ iken elde edilir. Bu kontrol tipi faz açısı kontrol olarak adlandırılır (Bayram, 2000: 209-237; Arifoğlu, 2002: 370-374).

Reaktörden elde edilen reaktif güç, denklem (2.8) kullanılarak bulunur (Bayram, 2000: 209-237; Arifoğlu, 2002: 370-374).

$$Q = V \cdot I = V^2 \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} = 2 \frac{V^2}{\pi X_L} \left(-\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \quad (2.8)$$

TKR akımı, sıfır ile tam iletimdeki değer arasında değişken olarak ayarlanabilir. Akımın geride olduğu endüktif reaktif güç elde edilebilir. Kompanzasyon sistemi sabit kapasitör ile TKR akımı ayarlanarak kapasitif reaktif güç değişken olarak elde edilebilir (Kıyan, 2010).

TKR ile kapasitörlü kompanzasyon sistemi için suseptans değeri denklem (2.9)' daki gibi hesaplanabilir.

$$B(\alpha) = B_C - B_L(\sigma) \quad (2.9)$$

Burada, B_C değeri devrede olan şönt kapasitörün suseptansını göstermektedir. Bu durumda reaktif güç denklem (2.10) ile ifade edilir(Bayram, 2000: 209-237: Arifoğlu, 2002: 370-374).

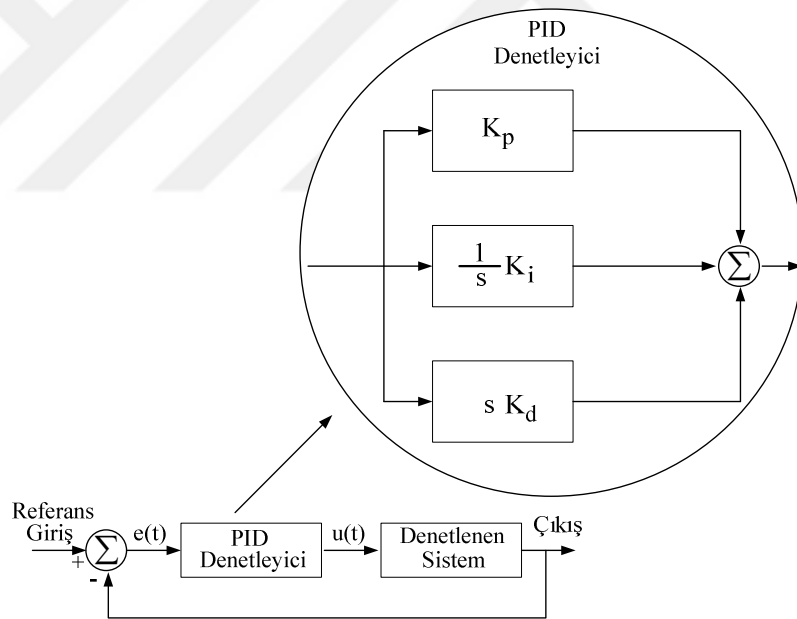
$$Q(\sigma) = -[B_C - B_L(\sigma)]V^2 \quad (2.10)$$

3. KONTROL YÖNTEMLERİ

SK-TKR, PID, üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu bulanık PID, Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu bulanık PID ve Sugeno model ANFIS bulanık PID kontrol yöntemleri ile reaktif güç denetimi yapılmış ve bu yöntemler açıklanmıştır.

3.1. PID Kontrol

Şekil 3.1.' de blok diyagramı görülen PID kontrol, en temel denetleyici olarak bilinmektedir ve birçok endüstriyel kontrol alanında yeterli ve uygun bir kontrol sağlamaktadır. Fakat PID kontrol günümüzde karmaşık yapıda her çeşit sisteme uygulanamamaktadır. PID kontrol doğrusal tek döngülü sistemlerde kullanıma uygunluğunun yanında doğrusal olmayan sistemlerde kullanışlı değildir. (Kayışlı ve Uğur, 2010).



Şekil 3.1. PID kontrol blok diyagramı.

PID kontrol etki sinyali üç bileşenden oluşur. Denklem (3.1) ile ifade edilen oransal etki, $p(t)$, o andaki giriş sinyalinin hataya orantılı olduğu durumdur.

$$p(t) = K_p e(t) \quad (3.1)$$

Oransal kontrol hatayı yok edici bir etki oluşturmaktadır. Oransal katsayı, K_p , denetleyicinin oransal kazancıdır. Kazanç arttıkça sistem tepkisi, değişen referans değere göre

daha hızlı hale gelmekte ve kalıcı durum hatası küçülmektedir. Fakat sistem kararlılığı azalmakta, aşma ve salınımlar oluşmaktadır (Nath, vd., 2017).

Denklem (3.2) ile ifade edilen integral etki, $i(t)$, o ana kadar ki giriş sinyalinin, hatanın değişen değerlerine orantılı olduğu durumudur.

$$i(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3.2)$$

Oransal etkinin hatayı azaltmasına rağmen, hatanın sıfır olmasını sağlayamamaktadır. Ancak hatanın sıfıra düşürülmesi kontrol sistemine integral etki ile sağlanabilmektedir. Uygun integral kazanç sabiti K_i ile hata sıfıra inerken, K_i arttıkça salınımlar ve kararsızlık oluşacaktır (Nath, vd., 2017).

Denklem (3.3) ile ifade edilen türev etki $d(t)$, o andaki hatanın değişim hızı ile orantılıdır (İbrahim, 2004: 72-73).

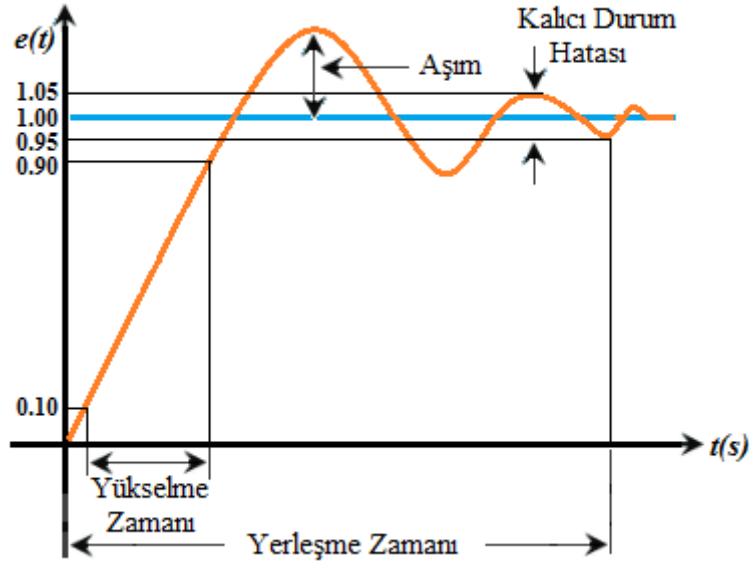
$$d(t) = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.3)$$

Türev parametresinin eklenmesiyle, kararlılık artmaktadır, yüksek kazançlı oransal veya integral etkileri sonucu oluşan aşmayı azaltmakta ve sistemin yanıt hızını arttırmaktadır. Türevsel kazanç sabiti veya sönüm sabiti K_d , küçük seçilmiş ise gidermesi gereken aşma devam edebilirken, yüksek seçilmesi sonucu sistem cevabının yavaş tepki vermesine neden olabilmektedir (Yüksel, 2001:209).

Toplam kontrol etkisi, $m(t)$, aşağıdaki denklem (3.4) ile ifade edilir (İbrahim, 2004:72-73):

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.4)$$

Şekil 3.2.' de örnek bir PID kontrol yanıtı ve buna ilişkin önemli performans verileri görülmektedir. Aşım, yanıtın ayar değerinden en büyük ayrılma veya yanıtın en büyük değeridir. Yerleşme zamanı, yanıtın %95' ine gelmesi ve o değer içinde kalması için geçen zamandır. Yükselme zamanı, yanıtın %10'undan %90' nına yükselmesi için geçen zamandır. Kalıcı durum hatası ise, yanıtın % 95' i ile %105' i arasındaki ayar değerine ulaşamayan kısımdır (Yüksel, 2001:207-211).



Şekil 3.2. PID kontrol yanıtı değişimi ve zaman verileri.

K_p , K_i ve K_d katsayılarının kapalı çevrim sistemindeki zaman verileri, artış süresi, aşım, oturma süresi ve kalıcı durum hatası Çizelge 3.1.' de özetlenmiştir (Yüksel, 2001:207-211).

Çizelge 3.1. Kapalı çevrim cevabında K_p , K_i ve K_d kazançlarının etkisi.

Kapalı Çevrim Cevabı	K_p	K_i	K_d
Yükselme zamanı	Azalı	Artar	Az Değişir
Aşım	Azalı	Artar	Artar
Yerleşme Zamanı	Az Değişir	Azalı	Azalı
Kalıcı Durum Hatası	Azalı	Elenir	Az Değişir

Standart bir PID denetleyici, transfer fonksiyonu genellikle paralel şekilde denklem (3.5) ve ideal şekli denklem (3.6) ile ifade edilen üç terimli denetleyici olarak da bilinmektedir.

$$G(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (3.5)$$

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)' da T_i integral zaman sabiti, T_d ise türev zaman sabitidir (Yüksel, 2001: 200).

3.2. Bulanık Mantık

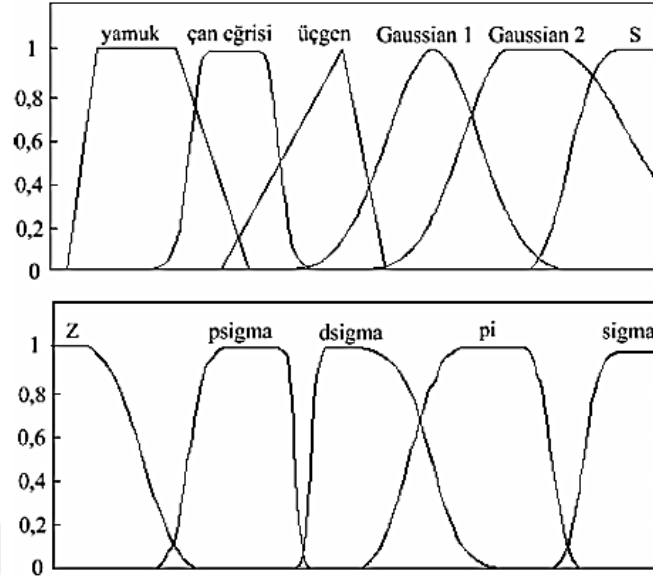
Bulanık Mantık (BM) A. Lotfi Zadeh tarafından 1965 yılında ortaya atılmıştır. BM'in temeli, bir önermenin, yanlış ile doğru arasındaki sonsuz sayıda doğruluk değeri içeren bir kümedeki sayısal bir ifade ile ilişkilendirilen bir fonksiyon olarak belirtilmesidir (Saad ve Arrofiq, 2012).

BM genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Kesin ve net bir ölçü yerine, değerlendirme yapılarak yorumlama ile kullanılmaktadır.
- Ölçülendirme $[0,1]$ aralığında bir değer ile ifade edilmektedir.
- Olgular; sıcak, soğuk, çok sıcak gibi ifadelerle yorumlanır.
- Bulanık çıkarım işleminde tanımlanan kurallar, dilsel ifadeler ile yapılmaktadır.
- Mantıksal her durum, bulanık ifade ile tanımlanabilir.
- Matematiksel ifadesi elde edilmesi zor sistemler için, elverişlidir (Elmas, 2003:29-40).

Bulanık kümeler teorisinin amacı, tanımlanması güç, belirsizlik ifade eden kavramlara üyelik derecesi tayin edilerek onlara bir anlam yüklemektir (Moradi ve Demirci, 2015).

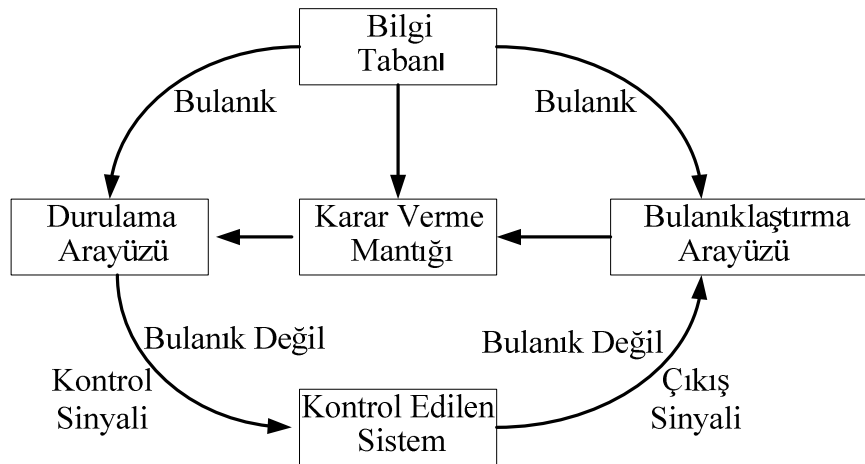
Bulanık küme kuramı içinde önemli bir yer tutan üyelik fonksiyonlarının geliştirilmesi üzerine birçok çalışmalar yapılmıştır. Uygulamada üyelik fonksiyonları denetlenecek sistemin koşullarına göre yamuk, üçgen, Gaussian, Sigmoid gibi değişik şekillerde seçilebilmektedir (Elmas, 2003:29-40). Uygulamalarda kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 3.3.' de gösterilmektedir (Elmas, 2003:37).



Şekil 3.3. Değişik üyelik fonksiyonları.

BM algoritması, sıcak-soğuk, büyük-küçük vb. gibi dilsel kavramları anlama ve buna yanıt imkânı tanımaktadır. BM tabanlı kontrol karmaşık, kararsız ve doğrusal olmayan sistemlerin parametre kestirimine ve matematiksel modellerine ihtiyaç duymadan kontrolü için oldukça elverişlidirler (Özdemir ve Tekin, 2016).

Şekil 3.4. bulanık mantıkla kontrol (BMK) sisteminin blok diyagramını göstermektedir. Genellikle dört temel bileşen içermektedir. Bunlar; bulanıklaştırma arayüzü, bilgi tabanı, karar verme mantığı ve durulama arayüzüdür (Karakuzu ve Öztürk, 2005).



Şekil 3.4. BMK sistemi prensip tasarımı (Karakuzu ve Öztürk, 2005).

3.2.1. Bulanıklaştırma

Denetlenecek sistemden gelen giriş verilerinin, dilsel ifadelere dönüştürme süreci bulanıklaştırma olarak tanımlanır (Elmas, 2003:91).

Sembolik ifade şekli ise denklem (3.7)' de gösterilmiştir.

$$x = \text{bulanıklaştırıcı}(x_0) \quad (3.7)$$

x_0 işlem sürecinden gelen kesin giriş değeri; x bulanık kümedir.

3.2.2. Bilgi tabanı

Sistemin girişi ile çıkışı arasındaki bağlantı, bulanık denetimin en önemli kısmıdır. Bu bağlantının BMK sisteminin performansı üzerinde etkiye sahip olması, doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bilgi tabanı birimi girişleri, çıkış değişkenlerine bağlantı oluşturan mantıksal EĞER-İSE şeklindeki kuralların tümüdür. Kural tabanı hangi durumda hangi kuralların uygulanacağını belirlemektedir. Denklem (3.8)' de ki gibi bir kural A ve B girişlerinin değerlerine göre, C çıkışının bulanık değerini tanımlamaktadır (Elmas, 2003: 91).

$$\text{EĞER } A = x \text{ ve } B = y \text{ ise O HALDE } C = z \quad (3.8)$$

3.2.3. Karar verme birimi

Karar verme birimi, insanın düşünerek karar verme ve sonuca ulaşma özelliğine benzeyen bir yol ile bulanık ifadeleri işleme almakta ve çıkarsama ile gerekli denetimi yapmaktadır. Bulanıklaştırıcı biriminde sayısal girişler bulanıklaştırılmakta, durulaştırma biriminde bulanık olan çıktılar sayısallaştırılmaktadır (Şen, 2004:108-126).

Mamdani'nin bulanık içermesi min-max yöntemi ile birleştirilerek, BMK sistemlerinde çok sık kullanılmaktadır. Takagi-Sugeno, Tsukamoto, Max-Dot ve Min-Max çıkarım yöntemleri en çok tercih edilen yöntemlerdir. Max-Dot yönteminde, çıkış değeri kümesindeki üyelik derecesine bağlı olarak, bulanık kümede tekrar ölçeklendirilmektedir. Çıkış değeri, giriş değerleri için tekrar ölçeklendirilmiş bulanık kümeler içerisindeki değerlerin maksimumu bulunarak hesaplanır. Min-Max yönteminde, giriş değeri için ait olduğu bulanık kümenin üyelik değerinin üstündeki kısmı kesilmektedir. Çıkış değeri, bulanık kümelere uygulanacak ağırlık ortalaması yöntemi ile bulunmaktadır. Tsukamoto yönteminde, çıkış üyelik işlevi tek yönlü artan bir işlev olarak seçilmektedir. Çıkış değeri ise tüm kuralların her bir keskin çıkış değerinin ağırlık ortalaması bulunarak ifade edilir. Takagi-Sugeno yönteminde, bir kuralın çıkışı giriş değerinin doğrusal birleşimiyle ifade edilir (Elmas, 2003:92).

3.2.4. Durulama

Bulanık çıkış, yine bulanık bir kümedir. Gerçek ortamdaki denetim süreçlerinde bulanık olmayan bir çıktı gerekmektedir. Bu yüzden, bu sonucun tekrar sürece uygulanması için sayısal bir ifadeye dönüştürülmesi gerekmektedir (Elmas, 2003:97). Bulanık küme işlemi sonucundaki bulanık kümenin sayısal değere dönüştürülmesi işlemine durulama denmektedir (Şen, 2004:93). Durulama yöntemleri aşağıda tanımlanmıştır.

Maksimum üyelik yöntemi; üyelik dereceleri içerisinde en büyüğüdür. En büyük üyelik ilkesi yönteminin kullanılabilmesi için tepeleri olan çıkarım bulanık kümeleri gerekmektedir. $\mu_F(x^*)$ çıkışı denklem (3.9) ile tanımlanmaktadır (İbrahim, 2004: 73-78).

$$\mu_F(x^*) \geq \mu_F(x), \text{ tüm } x \in X \text{ için} \quad (3.9)$$

Ağırlık merkezi yöntemi; en çok kullanılan yöntemdir (Elmas, 2003:97-99). Durulanmış çıkış x^* denklem (3.10) ile tanımlanmaktadır.

$$x^* = \frac{\int \mu_F(x)x dx}{\int \mu_F(x) dx} \quad (3.10)$$

Ağırlık ortalaması yöntemi; her üyelik fonksiyonunun bulanık değeri ile onun üyelik değeri kullanılarak durulama yapılmaktadır. Her üyelik fonksiyonu, onun maksimum değeriyle tartılır. x^* çıkışı denklem (3.11) ile tanımlanmaktadır (Elmas, 2003:97-99; İbrahim, 2004: 73-78).

$$x^* = \frac{\sum \mu_F(\bar{x}_i)\bar{x}_i}{\sum \mu_F(\bar{x}_i)} \quad (3.11)$$

Ortalama-maksimum üyelik yöntemi; maksimum üyelik derecesi tek bir nokta olmayıp, düz olabilen sistemler içinde kullanılabilir. (Elmas, 2003:97-99). x^* çıkışı denklem (3.12) ile tanımlanmaktadır.

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i}{n} \quad (3.12)$$

En büyük alanın merkezi yöntemi; çıkış bulanık kümesi en az iki dış bükey alt bulanık kümeyi içeriyorsa, en büyük alana sahip olan kümenin ağırlık merkezi durulama için

kullanılmaktadır. Sonuç üyelik fonksiyonu tarafına doğru eğimlidir. Bu yöntem en hızlı durulama yöntemidir (Şen, 2004: 93-97).

3.2.5. Bulanık Modelleme Çeşitleri

Bulanık mantık ile başlıca kullanılan modelleme çeşitleri; Sugeno ve Mamdani tipi modelleme çeşitleridir.

Sugeno bulanık mantık modellemesi ilk kez 1985 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Birçok yönden Mamdani yöntemiyle benzerdir. Mamdani ve Sugeno arasındaki temel fark Sugeno çıkış üyelik fonksiyonunun lineer ya da sabit olmasıdır (Elmas, 2003:191).

Sugeno tipi bulanık sistemde kural cümlesi Denklem (3.13)' teki gibidir.

$$\text{EĞER Giriş1} = x \text{ ve Giriş2} = y \text{ ise O HALDE } z = ax + by + c \quad (3.13)$$

Sugeno tipi bir bulanık modelin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Elmas, 2003:191).

- 1) Hesaplama için daha uygundur.
- 2) Lineer tekniklerle daha iyi çalışmaktadır.
- 3) Optimizasyon ve uyarlama teknikleri ile iyi çalışmaktadır.
- 4) Mamdani tipi bulanık modele göre matematiksel analiz için daha uygundur.

Mamdani bulanık modellemesi ise aşağıdaki 5 adımda oluşturulmaktadır (Zhang vd., 2012).

- 1) Bulanık ifadeler kullanılarak girdiye ait 0 ile 1 arasında değişen üyelik dereceleri belirlenerek bulanıklaştırma işlemi yapılır.
- 2) Kural tabanı belirlenir.
- 3) Mantık ifadeler ile işlem (ve, veya) uygulanır.
- 4) Kuralların çıktısını ifade eden bulanık kümeler birleştirilir.
- 5) Sayısal bir ifadeye dönüştürülen toplam bulanık küme sonuçları durulaştırılır.

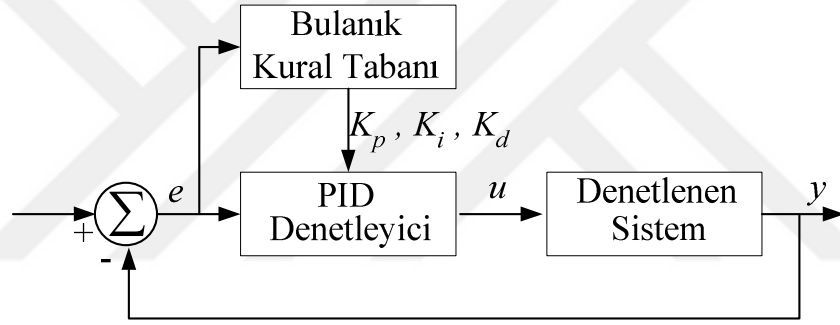
Mamdani yönteminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Zhang vd., 2012).

- 1) Sezgiseldir.
- 2) Geniş kabule sahiptir.
- 3) İnsan düşünme yapısına uygundur.

3.3. Bulanık PID Kontrol

Bulanık PID (BPID) denetleyici, kapalı döngü sisteminin kararlılığını çok üst hassasiyette sağlar. BPID denetleyici, PID denetleyiciye doğrusal olmayan bir alternatiftir. Genellikle daha fazla üyelik fonksiyonu ile daha fazla doğrusal olmayan ilişki kurulmasına imkân verir. BPID modeli PID denetleyici modeline bağımlıdır. Değişik durumlar için kullanılan PID kazançları, bulanık kural tabanına tanımlanmaktadır. Algoritmayı öğrenen denetleyici sistemin belirlenen ölçümlerine göre en uygun ayarları elde etmek için kural tabanını ayarlamak amacıyla geliştirilmektedir. Türetilen denetleyici en azından en uygun PID denetleyici kadar iyi bir kontrol sağlamaktadır (Karthikeyan ve Sreenivasan, 2017).

Şekil 3.5.' te görülen BPID denetleyici basit PID yapısına sahiptir, fakat PID parametreleri bulanık çıkarım ile üretilmektedir (Karthikeyan ve Sreenivasan, 2017).

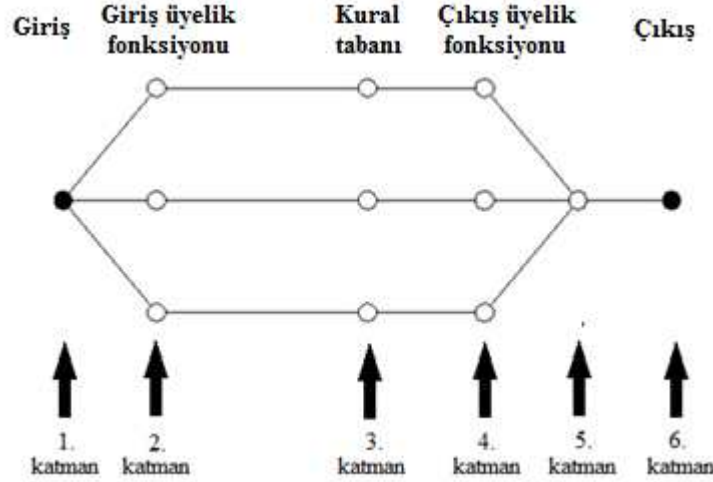


Şekil 3.5. BPID denetleyici modeli (Karthikeyan ve Sreenivasan, 2017).

3.4. Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi ile Kontrol (ANFIS)

ANFIS, Jang tarafından 1990'ların başlarında doğrusal olamayan fonksiyonların modellenmesi için geliştirilmiştir. ANFIS; yapay sinir ağlarının (YSA), eğitime, öğrenme ve tahmin yeteneği ile BM'ın uzman davranışı ve karar verme yeteneklerinin birleştirilmesi temeline dayanır. ANFIS, Sugeno modeli bulanık çıkarım sistemine temel oluşturan YSA algoritmasıdır (Minaz vd., 2013).

Örnek bir ANFIS modeli Şekil 3.6.' de görülmektedir. Giriş (Input) düğümünde bulanık üyelik fonksiyonu olarak Gauss üyelik fonksiyonları kullanılır (Gün A., 2007). Fonksiyondaki sabit parametreler, öncül parametreler olarak adlandırılmaktadır (Minaz vd., 2013).



Şekil 3.6. Örnek bir ANFIS modeli.

MATLAB programı ANFIS arayüzü, FIS (Fuzzy Inference System) yapısının oluşturulduğu ve FIS yapısının eğitildiği kısımlar olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. MATLAB, FIS bölümünde, bölümlere (Grid Partitioning) ve eksiltici (Subtractive Clustering) kümeleme olmak üzere iki çeşit kümeleme yöntemi sunar (Shree ve Kamaraj, 2016).

Yine MATLAB, FIS yapısının eğitimi için geri yayılım tabanlı (backpropagation) öğrenme ve geri yayılım ile en küçük kareler yöntemi birleşiminden meydana gelen melez (hybrid) öğrenme olmak üzere iki metod sunar (Shree ve Kamaraj, 2016).

ANFIS’ de Sugeno bulanık modelinde x giriş, y çıkış değeri olduğu ve bu değerler ile üç adet kural cümlesi;

Kural 1; Eğer x A_1 ise ve y B_1 ise, çıkış değeri $f_1 = p_1x + q_1$

Kural 2; Eğer x A_2 ise ve y B_2 ise, çıkış değeri $f_2 = p_2x + q_2$

Kural 3; Eğer x A_3 ise ve y B_3 ise, çıkış değeri $f_3 = p_3x + q_3$

şeklinde birinci dereceden polinom denklemler ile ifade edilebilir (Gün, 2007).

ANFIS katmanlar şeklinde ifade edildiğinde;

1. katman; düğüm girişin diğer katmanlara aktarıldığı düğümdür (Elmas, 2003:190).

2. katman; düğüm A_i gibi bir bulanık kümeyi ifade eder. Bu katmanın çıkışı giriş örneklerine ve üyelik işlevine bağlı olan üyelik derecesidir. Elde edilene üyelik dereceleri veya düğüm çıkışı denklem (3.14)’ deki gibidir.

$$O_i^2 = \mu_{A_i}(x) \quad (3.14)$$

3. katmanda üyelik fonksiyonları birbirleriyle çarpılır ve düğüm çıktısı olan çarpım işlemi kuralın ateşleme ağırlığı (firing strength of a rule) olarak adlandırılmaktadır. Denklem (3.15)' de ifade edilmektedir (Minaz vd., 2013; Elmas, 2003:191).

$$w_i = \mu_{A_i}(x), \quad i = 1, 2. \quad (3.15)$$

4. katmanda, normalize edilmiş kural ateşleme ağırlığı, bütün kuralların düğüm ateşleme ağırlık değerlerinin toplamına bölünerek denklem (3.16)' deki gibi hesaplanır.

$$O_i^4 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2. \quad (3.16)$$

5. katmanda, denklem (3.17)' deki gibi çıkış fonksiyonu ile ifade edilmektedir. Fonksiyondaki p_i ve q_i parametreleri, soncul (consequent) parametreler şeklinde ifade edilir (Yazar vd., 2014; Elmas, 2003:191).

$$O_i^5 = \bar{w}_i \cdot f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i) \quad (3.17)$$

6. katmanda sistem çıkışı denklem (3.18)'deki gibi bir önceki düğümden gelen çıktıların toplanması ile ifade edilir.

$$O_i^6 = \sum_i \bar{w}_i \cdot f_i = \frac{\sum_i w_i \cdot f_i}{\sum_i w_i} \quad (3.18)$$

Melez (hybrid) öğrenme ise, ileri geçiş ve geri geçiş olmak üzere iki prosedürden oluşur (Yazar vd., 2014). İleri geçiş prosedüründe, 3. katmana kadar anlatılan işlemlerden geçerek gelir ve en küçük kareler yöntemi uygulanarak soncul parametreler tahmin edilmeye çalışılır. Geri geçiş prosedüründe ise, gradyan azalma yöntemi ile çıkıştan girişe düğüm hata oranları toplanarak öncül parametrelerin değerleri tekrar güncellenir (Minaz vd., 2013).

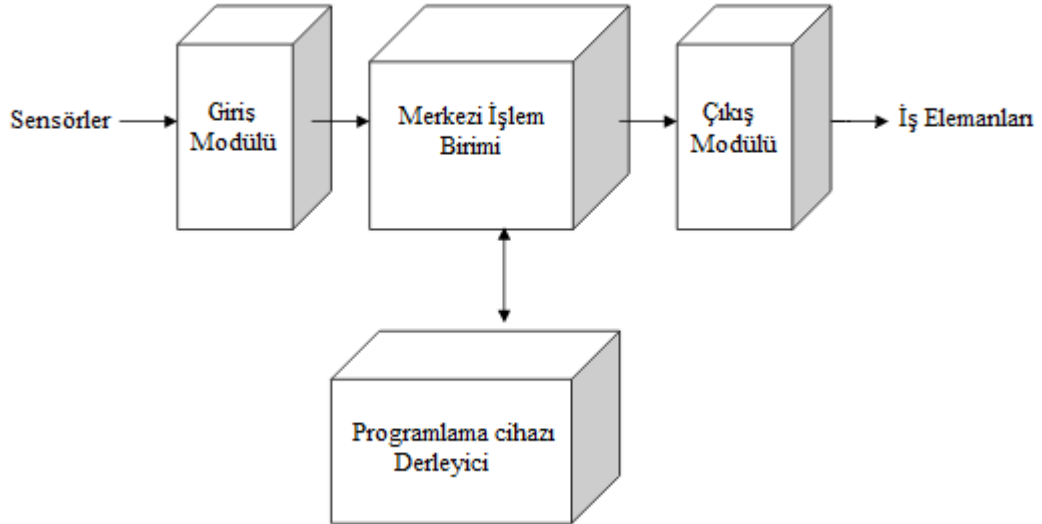
4. PLC ve SCADA

PLC, önceden belirlenmiş bir senaryoya göre, dış ortamdan algılayıcılar ile aldığı verileri, kıyaslama, veri işleme ve aritmetik işlemler v.b. ile değerlendirip çıkışları atayan, hafıza (memory), giriş-çıkış (input-output), Merkezi İşlem Birimi (MİB) ve programlayıcı (programmer) bölümlerinden oluşan, mikro işlemci tabanlı bir otomatik kumanda cihazıdır (Saad ve Arrofiq, 2012).

Güvenilir olmaları, az yer kaplamaları, daha az arıza yapmaları, yeni uygulamalara hızla dönüşebilmeleri, kötü çevre şartlarına dayanıklı olmaları, daha az kablo ve bağlantı sağlamaları, hazır fonksiyonlara sahip olmaları, bilgisayarlar ve diğer entegre cihazlarla haberleşebilmeleri ve arıza takibinin kolay olması, PLC'lerin avantajlarından (Mirzaoglu ve Saritaş, 2008).

4.1. PLC Yapısı ve Fonksiyonları

Şekil 4.1.'de iç yapısı görülen PLC, merkezi işlem birimi (MİB), hafıza, derleyici ve programlama cihazı, giriş-çıkış bölümlerinden oluşmaktadır. PLC' de ayrıca, analog giriş-çıkış birimleri, uyum devresi, genişleme birimleri ve bunların sabitlenip takıldığı raflardan oluşmaktadır (Mirzaoglu ve Saritaş, 2008).



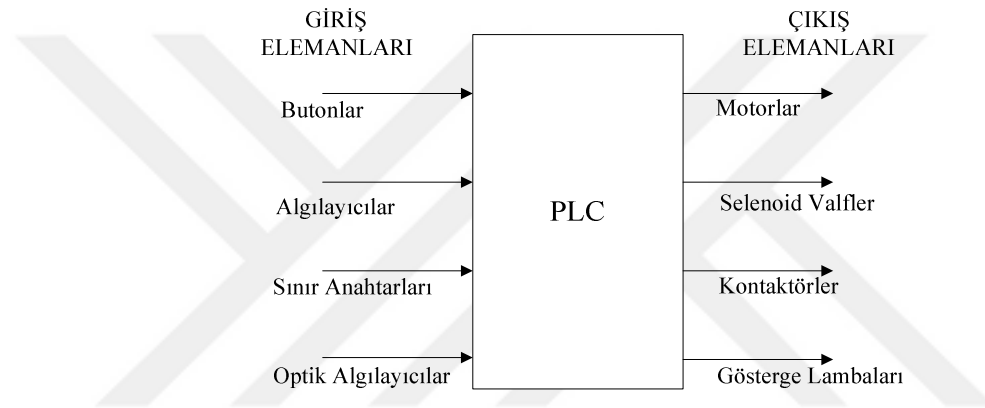
Şekil 4.1. PLC' nin içyapısı (Mirzaoglu ve Saritaş 2008).

MİB, işlemci olarak bilinir ve genel olarak “Central Processing Unit” (CPU) şeklinde de ifade edilmektedir. İşlemci, otomatik kumanda programının işletilmesini sağlar. Hafıza, mikro denetleyicideki işletilen programı muhafaza işlevini yerine getirir. PLC'de hafıza tipi,

EPROM (Erasable Programmable Read Only Memory) ile ifade edilen silinebilen, programlanabilen ve sadece okunabilen hafıza kullanılmaktadır (Karakuzu, ve Öztürk, 2005).

Programlayıcı, kullanıcı ile işlemci arasında, hazırlanmış olan programın PLC' ye gönderilmesi işlevini sağlar (Patel, vd., 2017).

Şekil 4.2.'de PLC'nin temel işlev şeması görülmektedir. Giriş modülü, dış ortamda bulunan bir anahtarlardan veya algılayıcılardan alınan bilginin yorumlanmasını üstlenir. Çıkış modülü, PLC'nin, çıkışlarında dış ortamda bulunan sistemlerin denetimi için 5 V_{DC}, 12 V_{DC}, 220 V_{AC} sayısal çıkış sinyallerini sağlar (ABB, 2017).



Şekil 4.2. PLC giriş-çıkış elemanları (Dalmış, vd., 2018).

Analog giriş modülü, dış ortamdan alınan analog akım ve gerilim sinyallerini, analog – sayısal dönüştürücü (ADC) sayesinde sayısal sinyale çevirirler. Sonrasında, işlemci tarafından kullanılabilmek için binary (ikili sayı sistemi, 0-1) olarak düzenlenir. Analog giriş, sıcaklık, devir, pozisyon v.b. algılayıcılar bağlanır (Dalmış, vd., 2018).

Analog çıkış modülü, sayısala çevrilmiş olan sinyali analog sinyale dönüştürür. Sayısal bilgiden analog bilgi elde etmek için sayısal-analog konvertör (DAC) kullanılarak analog çıkışa uyumlu cihazlar olan sürücü, aktüatör v.b. gibi elemanlar kumanda edilir (Patel, vd., 2017).

PLC programlama dilleri, temel olarak kontak plan (Ladder Plan), fonksiyon plan (FBD, Function Block Diagram) ve deyim listesi (STL, Standard Template Library) şeklindedir. Fakat günümüzde bunlara ek olarak, Basic, Pascal ve C benzeri diller ile benzerlik gösteren programlama dilleri de kullanıcı ara yüzlerine eklenmiştir (Mirzaoğlu ve Santaş, 2008). Ladder Plan; kontak ve röle yardımıyla yapılan, kumanda devresi tasarımlarına benzeyen programlama şeklidir. Fonksiyon Blok Diyagram (FBD); lojik kapıların kullanımına dayanan programlama

şeklidir. Deyim Listesi (STL); makine (Assembly) diline en yakın dil olan bir komut seti ile kullanılır. Rahat ve esnek programlama sunar (ABB, 2017).

4.2. SCADA

SCADA terimi, "Supervisory Control And Data Acquisition" kelimelerinin baş harflerinden oluşan "Uzaktan Kontrol ve Gözleme Sistemi" ya da "Gözetleyici Denetim ve Veri Toplama" olarak bilinir (Karakuzu ve Öztürk, 2005).

SCADA, endüstriyel bir kontrol ve gözetleme sisteminin tümünü temsil eden, endüstriyel üretim süreçlerinde, telekomünikasyonda, taşımacılıkta, enerji santrallerinde ve bilimsel deneylerin kontrolünde ve gözetiminde kullanılmaktadırlar. SCADA sistemleri yüzbinleri bulan giriş/çıkış sayılı üretim süreçlerini kontrol edebilmekte ve veri kaydı yapabilmektedirler (Mirzaoglu ve Saritaş, 2008).

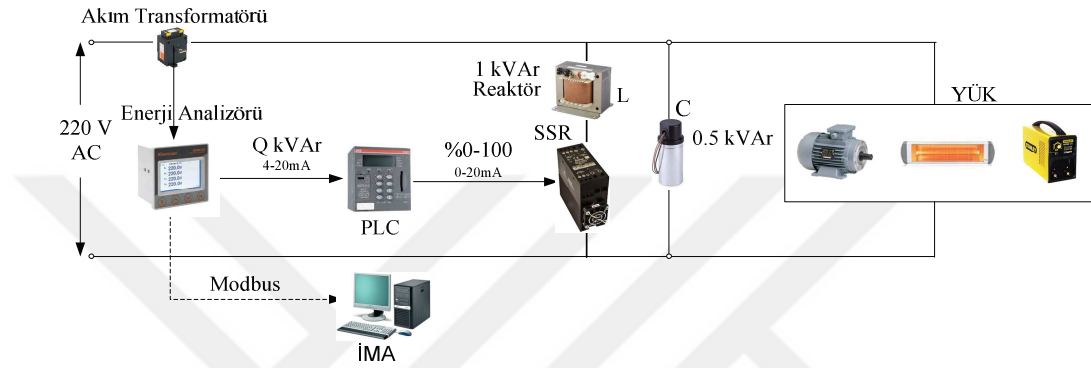
Endüstriyel üretim süreçlerinde kullanılan SCADA sistemleri, çeşitli cihazlarla (RTU, PLC vb.) birlikte üretim sürecinin kontrolü ve izlenmesine yönelik kumanda merkezi oluştururlar. SCADA, üretim kaynakları planlaması ve işletme kaynakları planlama sistemleriyle gerekli haberleşme ile kaliteli, düşük maliyetli ve verimli üretim için gerekli yapıyı kurar. SCADA yazılım paketleriyle üretim ya da hizmet süreci ile şirketin bütün katmanlarının uyum içerisinde çalışmasına yardımcı olur. SCADA, ayrıntılı, doğru ve gerçek zamanlı bilgi erişimi sağlar (Mirzaoglu ve Saritaş, 2008).

SCADA sisteminin kullanıcı ile iletişimini sağlayan "İnsan Makine Arayüzü" (İMA) kullanıcının isteklerine göre kolay konfigüre edilebilen yazılımdır. Kullanıcıya izleme, kontrol, raporlama ve süreç hakkında yorum ve planlama imkânı sağlar. "Human Machine Interface" (HMI) olarakta bilinir.

5. PLC ile SK-TKR KOMPANZATÖRÜN GERÇEKLENMESİ

5.1. PLC Denetimli Bir Fazlı SK-TKR Kompanzatörü

Çalışmada, 0.5 kVAr gücünde bir fazlı PLC denetimli SK-TKR kompanzatörün prensip şeması Şekil 5.1.' de görülmektedir.



Şekil 5.1. Tasarlanan bir fazlı SK-TKR kompanzatör.

Çalışmada, kompanzatör ve yükün elektriksel parametreleri enerji analizörü ile İMA' ya aktarılmıştır. Yükün reaktif gücü ise enerji analizörü analog çıkışı ile PLC' ye aktarılmış ve PLC programı ile reaktörün üzerinden geçen akım SSR (Solid State Relay) ile kontrol edilmiştir. Yükün çektiği reaktif güç kontrol altında tutulmuştur.

15/5 A bir akım transformatörü kullanılmıştır. Akım transformatörü, primer akımını bir dönüştürme oranı ile sekonder tarafına düşüren bir ölçü transformatörüdür. Cihazların, kumanda rölelerinin ve ölçü aletlerinin, yüksek gerilim tarafından izole olmasını sağlarlar.

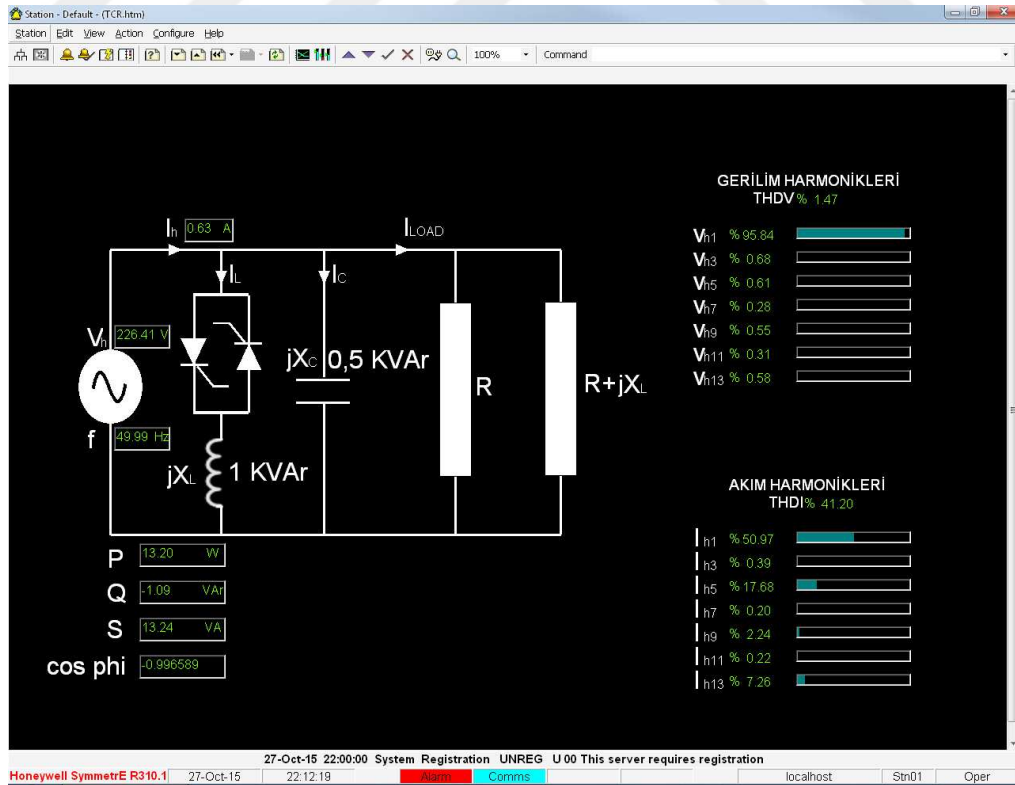
Kullanılan enerji analizörü, yüksek hassasiyete sahip, çok fonksiyonlu, elektrik şebekesine ait tüm parametrelerin ölçülmesi, tüketimlerinin hesaplanması ve kaydedilmesi için tasarlanmış bir cihazdır. 2 adet programlanabilir alarm çıkışı, 2 adet programlanabilir pals çıkışı, programlanabilir 2. tarife girişi, 1 adet izoleli RS485 iletişim portu (modbus), 2 adet ayarlanabilir gerilim ve akım çıkışlı analog çıkış (0-10 V, 4-20 mA, 0-20 mA) gibi özelliklere sahiptir (Klemsan, 2011). Reaktif güç bilgisi 0-20 mA olarak PLC'ye analog giriş modülü üzerinden alınmıştır.

ABB-PM571 PLC, AX522 8 AI/8 AO Analog giriş-çıkış modülü ve DC532 16DI/16DC dijital giriş-çıkış modülü kullanılmıştır. PLC, 24 VDC güç kaynağı ile beslenmektedir. 16 KB programlama hafızasına sahiptir. PLC programlanması için ortak

platformlar için geliştirilmiş olan “CODESYS” yazılımı kullanılmıştır. Kullanıcının IEC13131-3 standardındaki tüm dillerle (IL, FBD, LADDER, STL, SFC ve CFC) programlamasına imkân verme, C ve C++ dilleri ile de yazılmış fonksiyonları kullanabilme özelliklerine sahiptir (ABB, 2017).

Reaktör üzerinden geçen akımın kontrolü için SSR (Solid State Relay) kullanılmıştır. SSR, elektronik parçalardan oluşan yüksek hızlı anahtarlama düzenidir. Yapılarında yüksek akımı geçirebilen ve kontrol edebilen tristör veya triyak gibi yarı iletken anahtarlama elemanı içerirler. Aç-kapa veya oransal olarak imal edilirler. Çalışmada 0-10 V kontrollü SSR'nin tetikleme açısının kontrolü için PLC' den alınan 0-20 mA kontrol sinyali 500 ohm direnç ile 0-10 V' a dönüştürülmüştür (ENDA, 2016).

Çalışmanın anlık ve görsel olarak izlenmesi için, “SYMMETRE” İMA yazılımı kullanılmıştır. Kompanzatörün parametrelerinin izlemek için, enerji analizörünün RS-485 haberleşme özelliği ve İMA yazılımının modbus haberleşme özelliği kullanılarak R232/485 çevirici yardımı ile bilgiler grafik ekranda izlenmiştir. Kompanzatörün grafik arayüzü Şekil 5.2.' de görülmektedir (SYMMETRE, 2007).



Şekil 5.2. İMA ekran görüntüsü.

Modbus iletişim için İMA yazılımının içinde bulunan “QUICK BUILDER” modülü kullanılarak enerji analizöründeki istediğimiz modbus adreslerinden veriler elde edilmiştir. Adresler, enerji analizörünün kullanma kılavuzunda belirtilmektedir (SYMMETRE, 2007).

Şekil 5.3.’ de görüleceği üzere yazılımda bir haberleşme kanalı (channel) tanımlanır. Bu kısımda haberleşme standardı belirlenir. Bu çalışmada kullanılan analizör RS485 standardı ile haberleşmektedir. HMI yazılımı ise RS232 ile haberleşmektedir. RS485/RS232 çevirici kullanılmıştır. Programda RS232 haberleşme parametreleri;

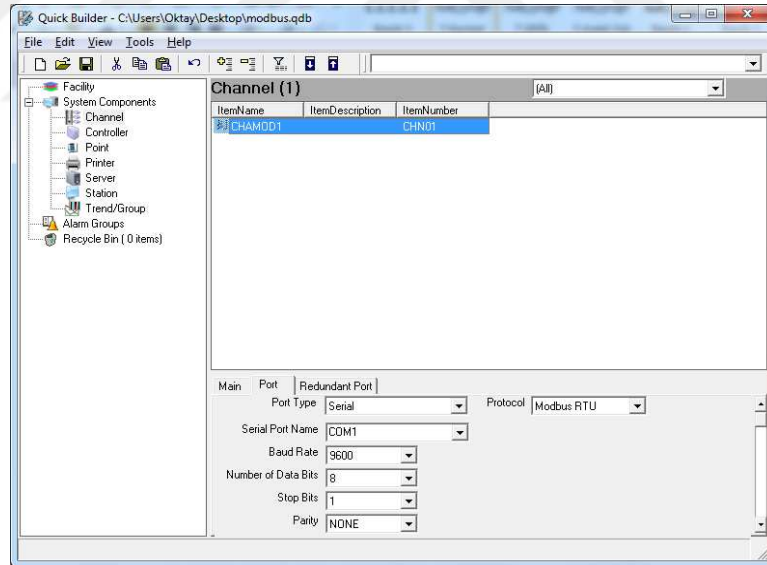
Haberleşme hızı: 9600 baud

Veri biti: 8 bit

Dur biti: 1 bit

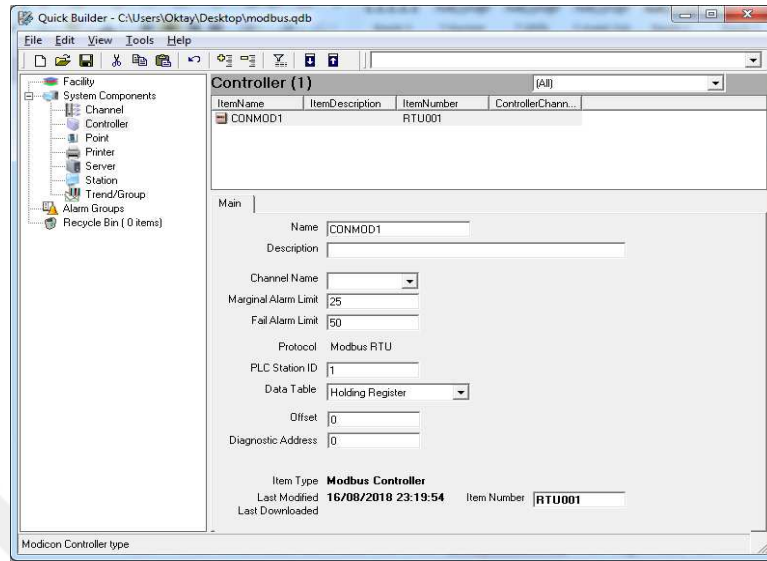
Parite: Yok

olarak belirlenmiştir (SymetrE, 2007).



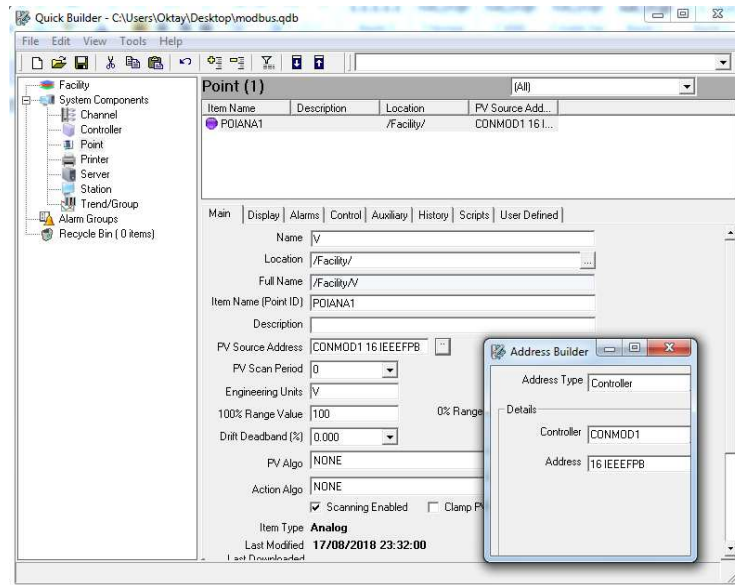
Şekil 5.3. Quick Builder programı-Kanal (Channel) tanımlama ekranı.

Şekil 5.4.’ de haberleşme kanalına bağlı olan kontrolör (controller) tanımlanması arayüzü görülmektedir. Burada kontrolör olarak adlandırılan enerji analizörünün modbus adresi “1” olarak yapılandırılmıştır (SYMMETRE, 2007).



Şekil 5.4. Quick Builder programı-Enerji analizörü (Controller) tanımlama ekranı.

Şekil 5.5.’ de haberleşme ile elde edilecek kaydedicilerin adres tanımlamaları ekranı görülmektedir. Kaydedici tanımlanırken, kaydedici adresi (16), formatı (FLOAT-IEEEFPB) ve kaydedicinin bulunduğu enerji analizörü (CONMOD1) belirtilir (SYMMETRE, 2007).



Şekil 5.5. Kaydedici (Point) tanımlama ekranı.

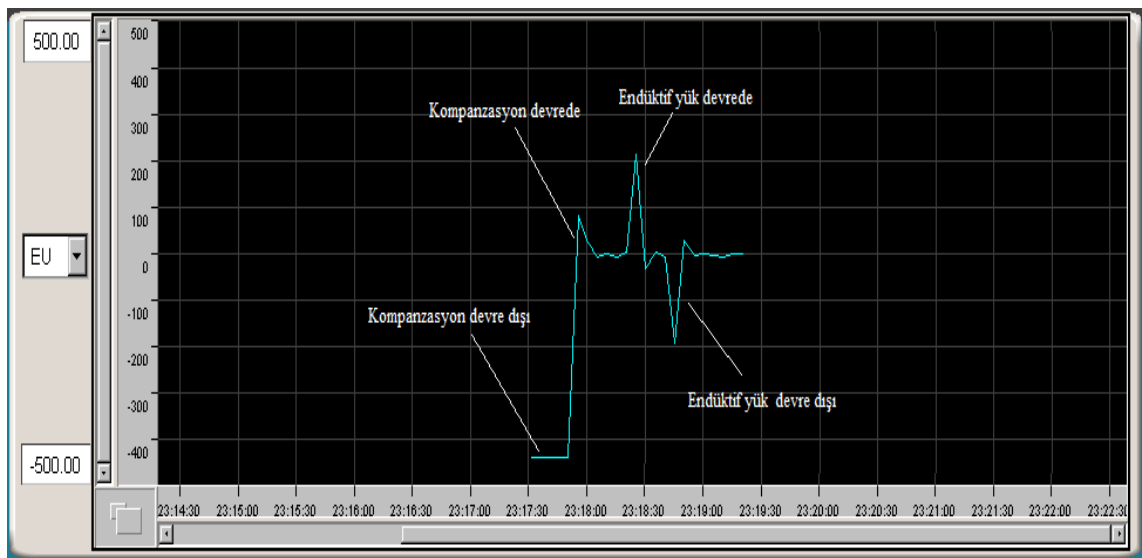
Çizelge 5.1.’ de kaydedici adresleri ve formatları belirtilmiştir. Enerji analizörü kaydedici adresleri veri formatı “FLOAT” dır (Klemsan, 2011).

Çizelge 5.1. Kaydedici adresleri ve veri formatı tablosu (Klemsan, 2011).

Veritabanı Değişkeni	Açıklama	Birim	Tür	Modbus adresleri
V ort.	Üç fazın ortalama gerilimi	V	float	40001
I top.	Üç fazın toplam akımı	A	float	40003
P top.	Üç faza ait aktif güçlerin toplamı	W	float	40005
Q top.	Üç faza ait reaktif güçlerin toplamı	VA _r	float	40007
S top.	Üç faza ait görünür güçlerin toplamı	VA	float	40009
CosØ ort.	Üç fazın ortalama CosØ değeri	-	float	40011
PF ort.	Üç fazın ortalama PF değeri	-	float	40013
VLL1	Gerilim V1-2	V	float	40015
VLL2	Gerilim V2-3	V	float	40017
VLL3	Gerilim V3-1	V	float	40019
VLL ort	Faz faz ortalama gerilimler	V	float	40021
IN	Nötr akımı	A	float	40023
THDV top.	Üç faza ait gerilimdeki toplam harmonik boz.	%	float	40025
THDI top.	Üç faza ait akımdaki toplam harmonik boz.	%	float	40027

Kaydedici adres tanımlamaları yapıp, “QUICKBUILDER” programı ana ekranından tanımlanan kaydediciler yüklenerek izleme ve kaydetme yapılmaya başlanır (SYMMETRE, 2007).

Şekil 5.6.’ da HMI bilgisayarının kaydetmiş olduğu bir “TREND” ekranı görülmektedir. Yapılan ölçümler uzun süreler hafızada bilgisayar tarafından tutulabilmektedir. Bu bilgiler kelime işlemci, veritabanı gibi başka yazılım ortamlarına aktarılabilir.



Şekil 5.6. Reaktif gücün trend ekranı.

Kompanzatör, yaklaşık besleme gerilimi 238 V iken, birinci test yükü 458 VAr kapasitif reaktif yük, ikinci test yükü 266 VA görünür, 208 VAr endüktif reaktif, 167 W aktif gücü olan ve güç katsayısı 0,62 geri olan endüktif yük ve üçüncü test yükü ise 1100 VA görünür, 365 VAr endüktif reaktif, 1040 W aktif gücü olan ve güç katsayısı 0,94 geri olan üç farklı test yükü ile otuz tekrar ile çalıştırılmıştır. Ölçüm sonuçlarının ortalama, en yüksek, en düşük ve alt-üst sınır değerleri kutu grafiği ile ifade edilerek reaktif güç değişiminin detaylı olarak incelenmesi sağlanmıştır. Karşılaştırma bölümünde reaktif güç değişiminin ortalama değerler ile yöntemler arasında performans verileri kıyaslanmıştır.

5.2. Bir Fazlı SK-TKR Kompanzatörün PID İle Denetlenmesi

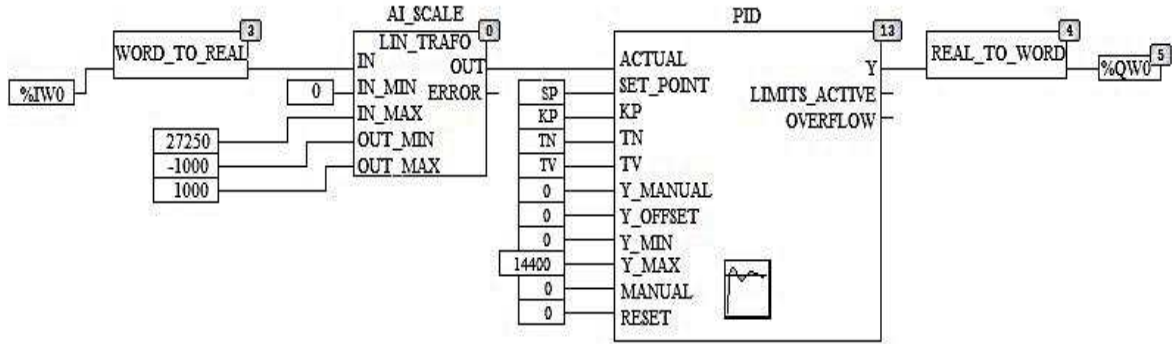
Bu çalışmada, PID denetleyici parametreleri, Ziegler-Nichols frekans yanıtı yöntemi kullanılarak ayarlanmıştır. Bu yöntemin işlem basamakları:

- 1) PID denetleyici, geri besleme hattına konumlandırılır. İntegral ve türev etki, etkisiz durumdadır.
- 2) Oransal kazanç, sistem salınımına girene kadar artırılır ve bu kazanç değeri K_u olarak isimlendirilir.
- 3) Salınımın iki tepe değeri arasındaki değer belirlenir. Bu değer P_u olarak adlandırılmaktadır.
- 4) Çizelge 5.2.' den denetleyici parametreleri belirlenir (Yüksel, 2001: 212).

Çizelge 5.2. Ziegler-Nichols frekans yanıtı yöntemi ayar değerleri.

<i>Denetleyici</i>	<i>P</i>	<i>PI</i>	<i>PID</i>
K_p	$0.5 K_u$	$0.45 K_u$	$0.6 K_u$
T_i	-	$0.825 P_u$	$0.5 P_u$
T_d	-	-	$0.125P_u$

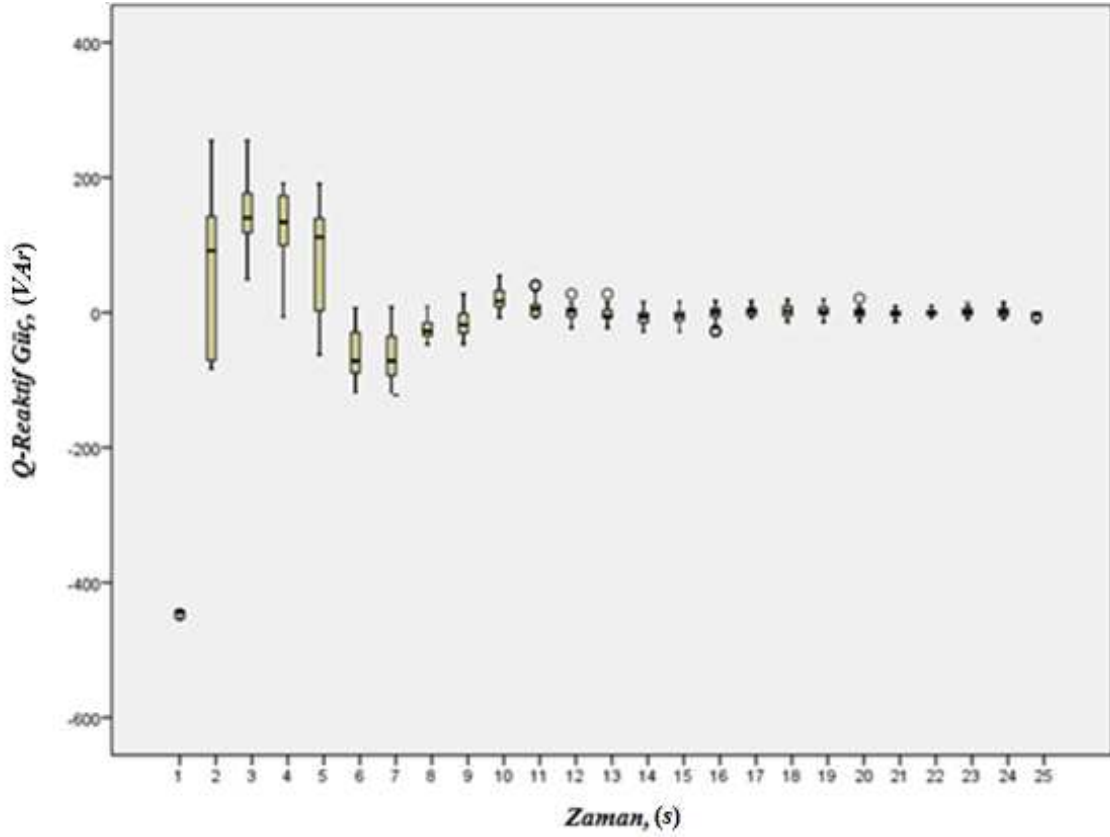
Açıklanan kurallar PLC programında uygulanır. Şekil 5.7.' te görülen PID bloğu kullanılmıştır.



Şekil 5.7. PID kontrol programı.

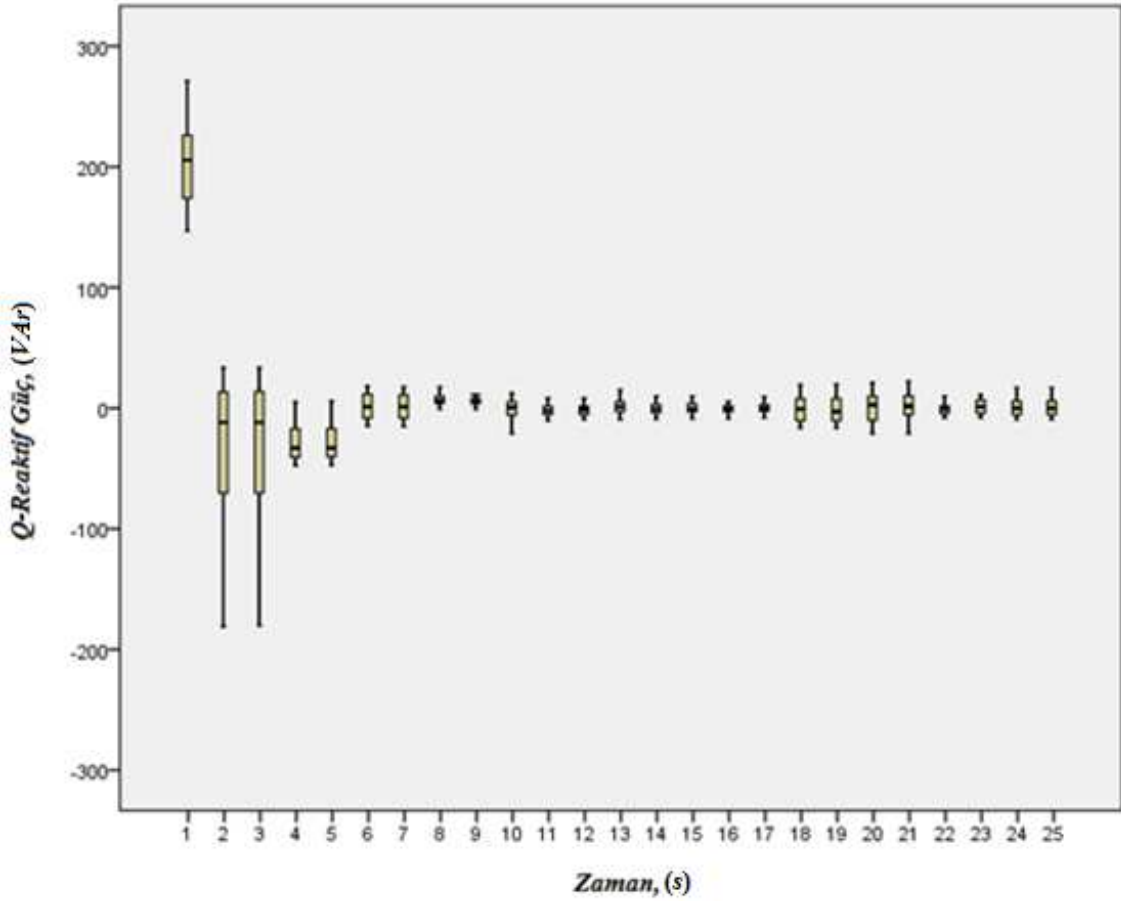
“LIN_TRAFO” bloğu ile enerji analizöründen gelen akım bilgisi -1000 VAr ve +1000 VAr aralığında “REAL” formatında PID bloğunda kullanılmıştır. Çıkış bilgisini ise analog çıkış modülünün kullanabilmesi 0-14400 aralığında ve “WORD” formatına dönüştürülerek ataması yapılmıştır. $K_p = 0.6$, $T_i = 0.5$ ve $T_d = 0.125$ “REAL” formatında atanmıştır.

Şekil 5.8.'te 458 VAr kapasitif reaktif yük için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi verilerine bakıldığında yükselme zamanı 1 s, aşma 161.50 VAr, yerleşme zamanı 8 s ve ortalama kalıcı durum hatası -2.26 VAr olarak gerçekleşmiştir.



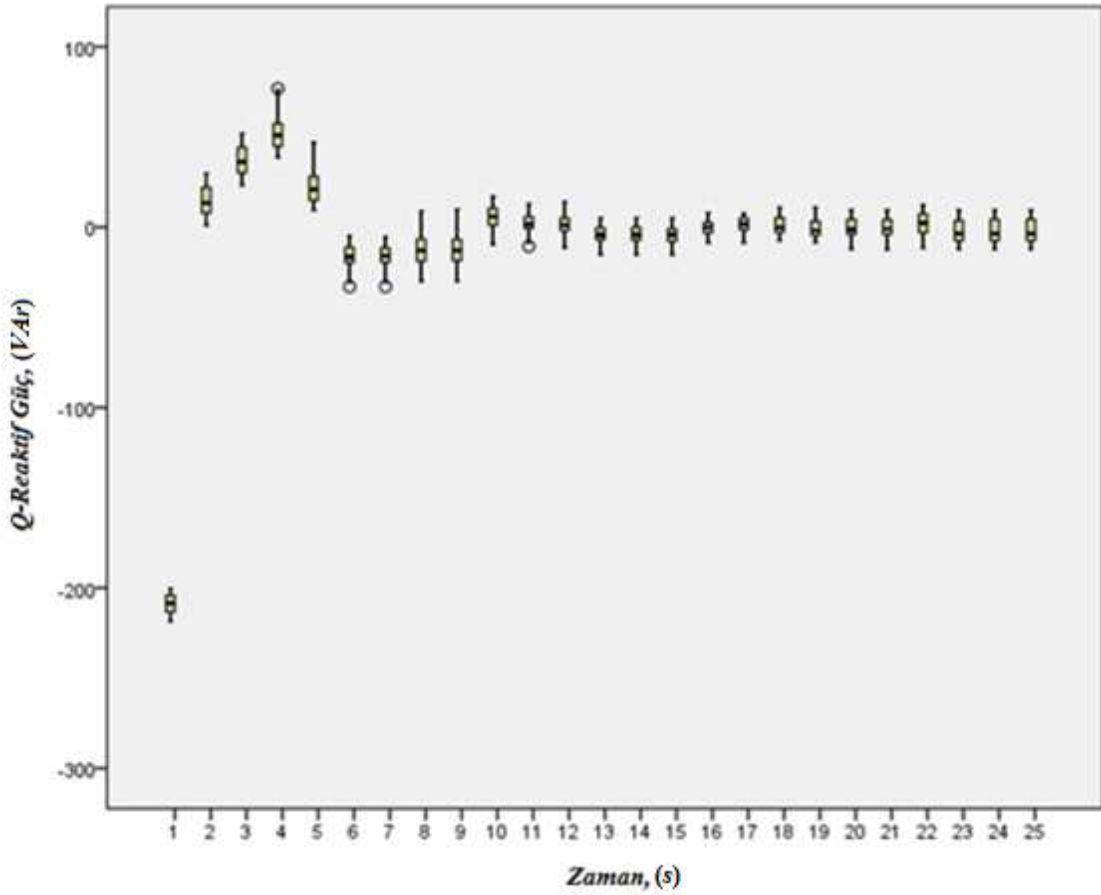
Şekil 5.8. PID kontrol, 458 VAr kapasitif yük kompanzasyonu kutu grafiği.

Şekil 5.9.' da 208 VAr endüktif reaktif yükün devreye girmesi anı için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 1 s, aşma -34.64 VAr, yerleşme zamanı 4 s ve ortalama kalıcı durum hatası 0.89 VAr olarak gerçekleşmiştir.



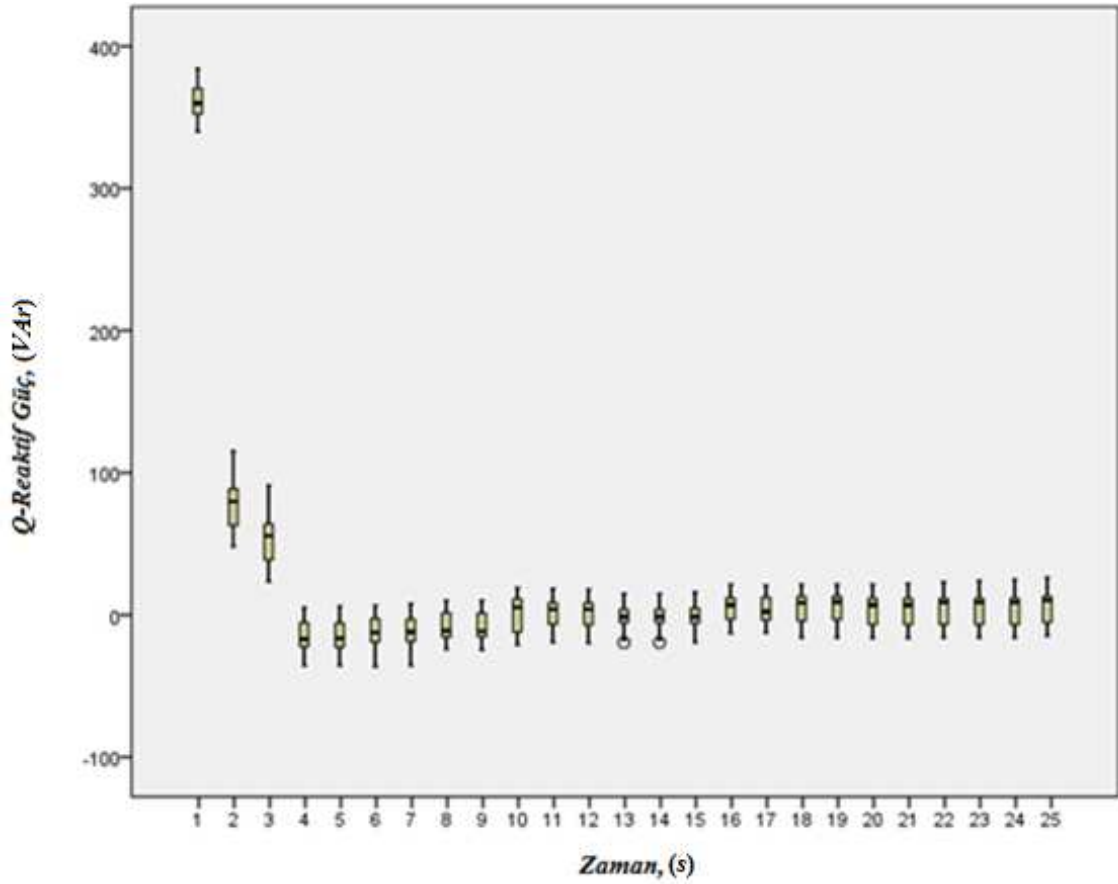
Şekil 5.9. PID kontrol, 208 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyon kutu grafiği.

Şekil 5.10.' da 208 VAr endüktif reaktif yükün devreden çıkması anı için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 1 s, aşma 53.56 VAr, yerleşme zamanı 7 s ve ortalama kalıcı durum hatası -0.57 VAr olarak gerçekleşmiştir.



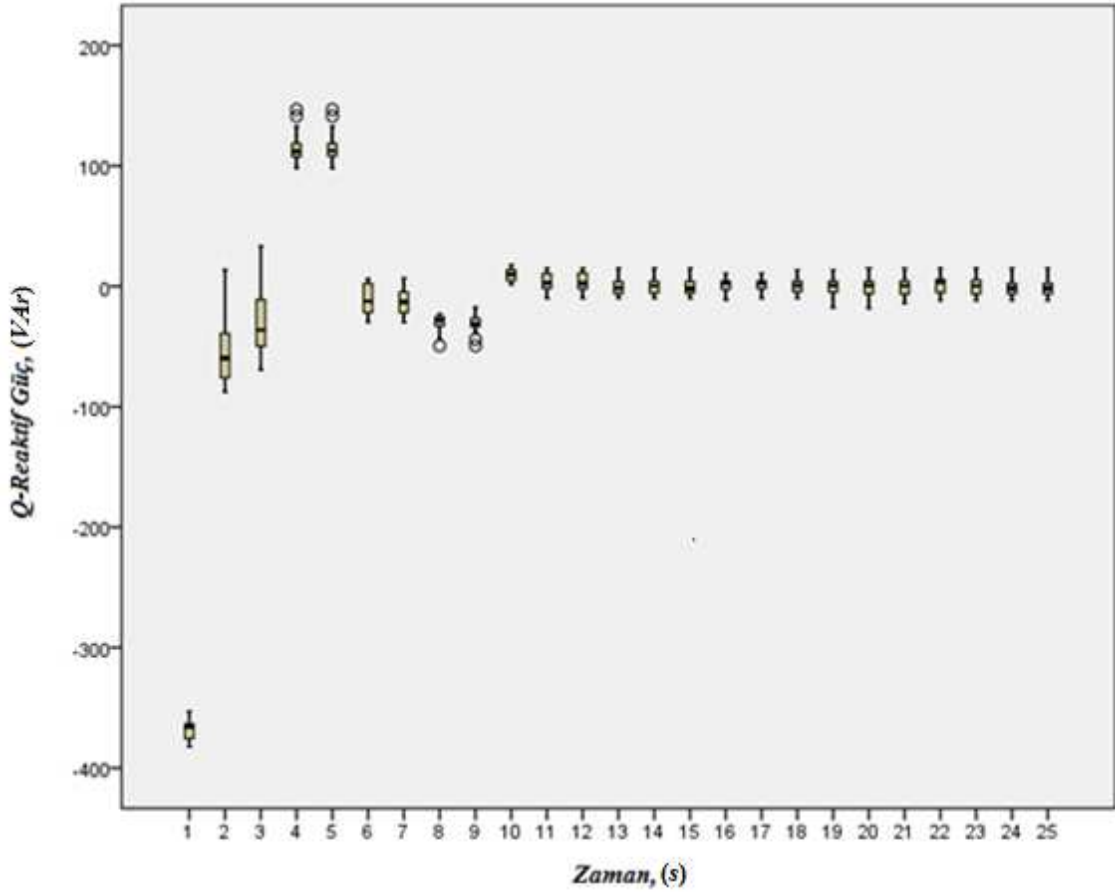
Şekil 5.10. PID kontrol, 208 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyon kutu grafiği.

Şekil 5.11.' de 365 VAr endüktif reaktif yükün devreye girmesi anı için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 1 s, aşma -36.38 VAr, yerleşme zamanı 5 s ve ortalama kalıcı durum hatası -0.77 VAr olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.11. PID kontrol, 365 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyon kutu grafiği.

Şekil 5.12.' de 365 VAr endüktif reaktif yükün devreden çıkması anı için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 2 s, aşma 115.2 VAr, yerleşme zamanı 8 s ve ortalama kalıcı durum hatası 1.18 VAr olarak gerçekleşmiştir.

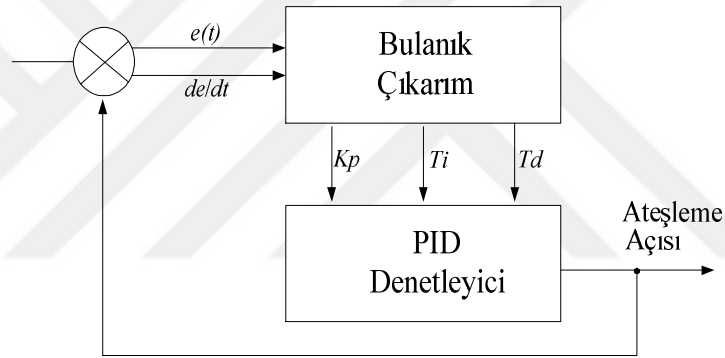


Şekil 5.12. PID kontrol, 365 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyon kutu grafiği.

5.3. Bir Fazlı SK-TKR Kompanzatörün Üçgen ve Yamuk Üyelik Fonksiyonlu BPID İle Denetimi

BPID modeli PID denetleyici modeline bağımlıdır. Değişik durumlar için kullanılan PID kazançları bulanık kural tabanında tanımlanmaktadır. Algoritmayı öğrenen denetleyici sistemin belirlenen ölçümlerine göre en uygun ayarları elde etmek için kural tabanını ayarlamak suretiyle geliştirilmektedir. Türetilen denetleyici en azından en uygun PID denetleyici kadar iyi bir kontrol sağlamaktadır (Chaiyatham ve Ngamroo, 2017).

Şekil 5.13.' de görüldüğü gibi klasik PID denetleyicinin oransal etki (K_p), integral zamanı (T_i) ve türev zamanı (T_d) parametreleri, bulanık mantık yardımı ile hata, $e(t)$ ve hatanın zamana göre değişimi $de(t)/dt$ girişleri kullanılarak öz ayarlamalı bir PID denetleyici elde edilmiştir.



Şekil 5.13. BPID denetleyici prensip şeması.

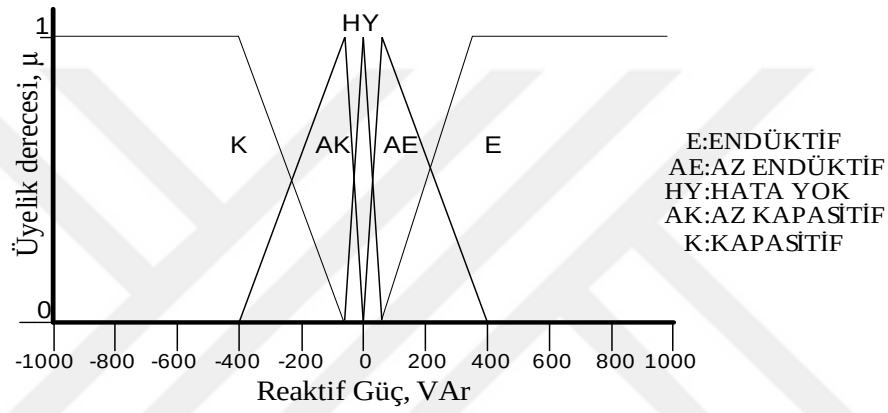
Çalışmada kontrol edilen reaktif gücün doğrusal olarak değişmesi durumunda, üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlarından oluşturulan algorithmada üçgen üyelik derecelerinin hesaplanması için denklem (5.1) kullanılmıştır.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \quad (5.1)$$

Yamuk üyelik derecelerinin hesaplaması için denklem (5.2) kullanılmıştır.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & x > d \end{cases} \quad (5.2)$$

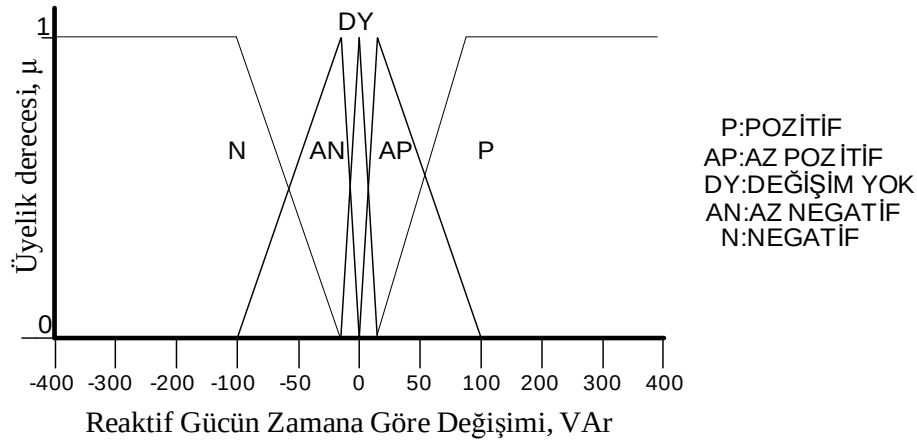
Şekil 5.14.' de üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlarından oluşturulan algoritmaya ait bulanık giriş hata fonksiyonu $e(t)$, kazanılan deneyimler sonrasında beş üyeli üçgen ve yamuk fonksiyonları ile tanımlanmıştır.



Şekil 5.14. Üçgen ve yamuk üyelikli BPID hata fonksiyonu, $e(t)$.

Şekil 5.14.'de tanımlanan giriş hata, $e(t)$ fonksiyonunun belirlenen aralıklarda kapasitif, az kapasitif, endüktif, az endüktif olduğuna karar verilmiştir.

Şekil 5.15.' de üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlarından oluşturulan algoritmaya ait bulanık giriş hatanın zamana göre değişimi fonksiyonu, $de(t)/dt$, ile tanımlanmıştır.



Şekil 5.15. Üçgen ve yamuk üyelikli BPID hatanın zamana göre değişimi fonksiyonu, $de(t)/dt$.

Şekil 5.15.'de tanımlanan hatanın zamana göre değişimi, $de(t)/dt$ fonksiyonunun belirlenen aralıklarda negatif, az negatif, değişim yok, pozitif, az pozitif olduğuna karar verilmiştir.

Çizelge 5.3.' de üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlarından oluşturulan modele ait giriş ile çıkış arasındaki ilişkiyi düzenlemek için, deneme yanılma ile edilen, reaktif gücün değişimi ve reaktif gücün değişim hızına göre oluşturulan kural tabanı ile PID parametrelerinin alacağı bulanık değerler “Büyük”, “Orta” ve “Küçük” olarak dilsel bir şekilde ifade edilmiştir.

Çizelge 5.3. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlarından oluşturulan modele ait kural tabanı.

		$de(t)/dt$				
		N	AN	DY	AP	P
$e(t)$	K	B	O	K	O	B
	AK	O	O	K	O	O
	HY	O	S	K	S	O
	AE	O	O	K	O	O
	E	B	O	K	O	B

Kural cümlelerinden bazıları;

- Eğer hata **Kapasitif (K)** ve hatanın değişimi **Negatif (N)** ise, o halde **Büyük**tür (**B**).
- Eğer hata **Yok (HY)** ve hatanın değişimi **Az Pozitif (AP)** ise, o halde **Küçük**tür (**K**).
- Eğer hata Endüktif (**E**) ve hatanın değişimi **Pozitif (P)** ise, o halde **Orta**dır (**O**)

şeklindedir.

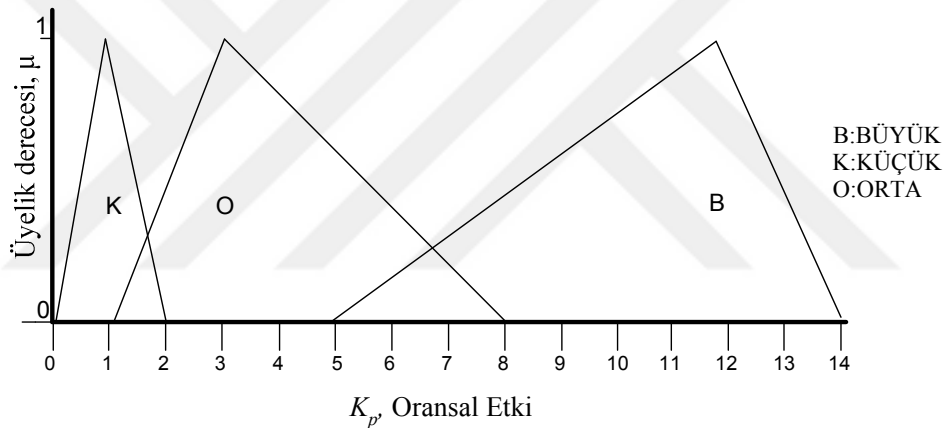
Oluşturulan kural tabanından 25 adet kural cümlesi oluşturulmuştur.

Berraklaştırma işleminde kullanılan yöntemler, maksimum üyelik yöntemi, ağırlık merkezi yöntemi, ağırlık ortalaması yöntemi ve maksimum noktaların ortalaması yöntemidir.

Bu çalışmada berraklaştırma işlemi için, berraklaştırma çıkışında bir kontrol sinyaline ihtiyacımız olduğu için denetim uygulamalarında en çok kullanılan yöntemlerden birisi olan ağırlık ortalaması yöntemi tercih edilmiştir. Bulanık çıkış, Z, denklem (5.3) ile ifade edilmiştir.

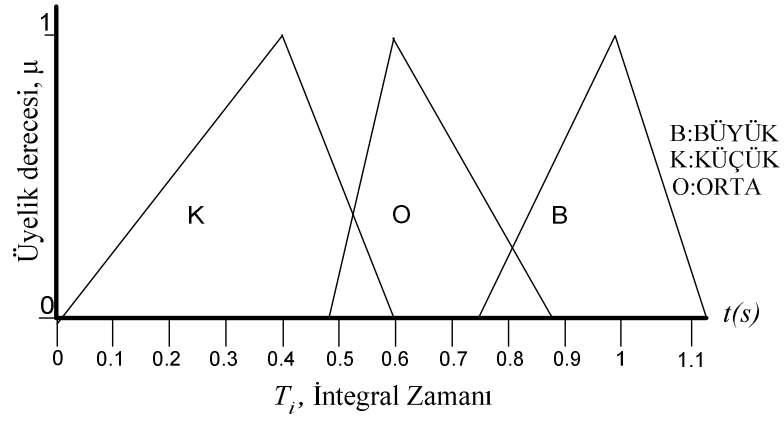
$$Z = \frac{\sum_{x=a}^b \mu_A(x) \cdot x}{\sum_{x=a}^b \mu_A(x)} \quad (5.3)$$

Şekil 5.16.' da üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlarından oluşturulan algoritmaya ait bulanık çıkış olan BPID denetleyicinin K_p parametresi 3 üyeli üçgen fonksiyonları ile tanımlanmıştır.



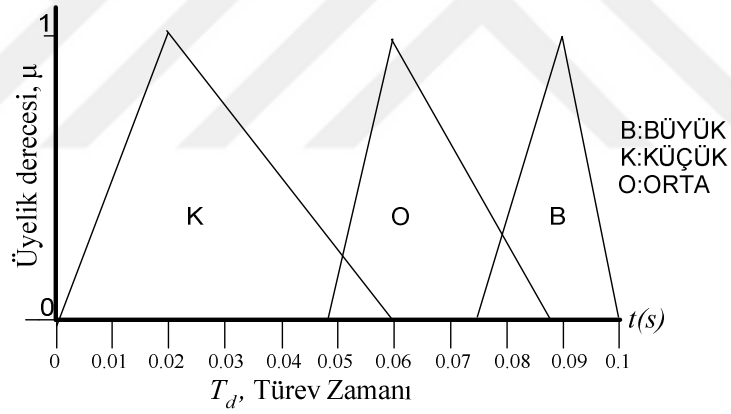
Şekil 5.16. K_p parametresi için bulanık çıkış fonksiyonu.

Şekil 5.17.' de üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlarından oluşturulan algoritmaya ait bulanık çıkış olan BPID denetleyicinin T_i parametresi 3 üyeli üçgen fonksiyonları ile tanımlanmıştır.



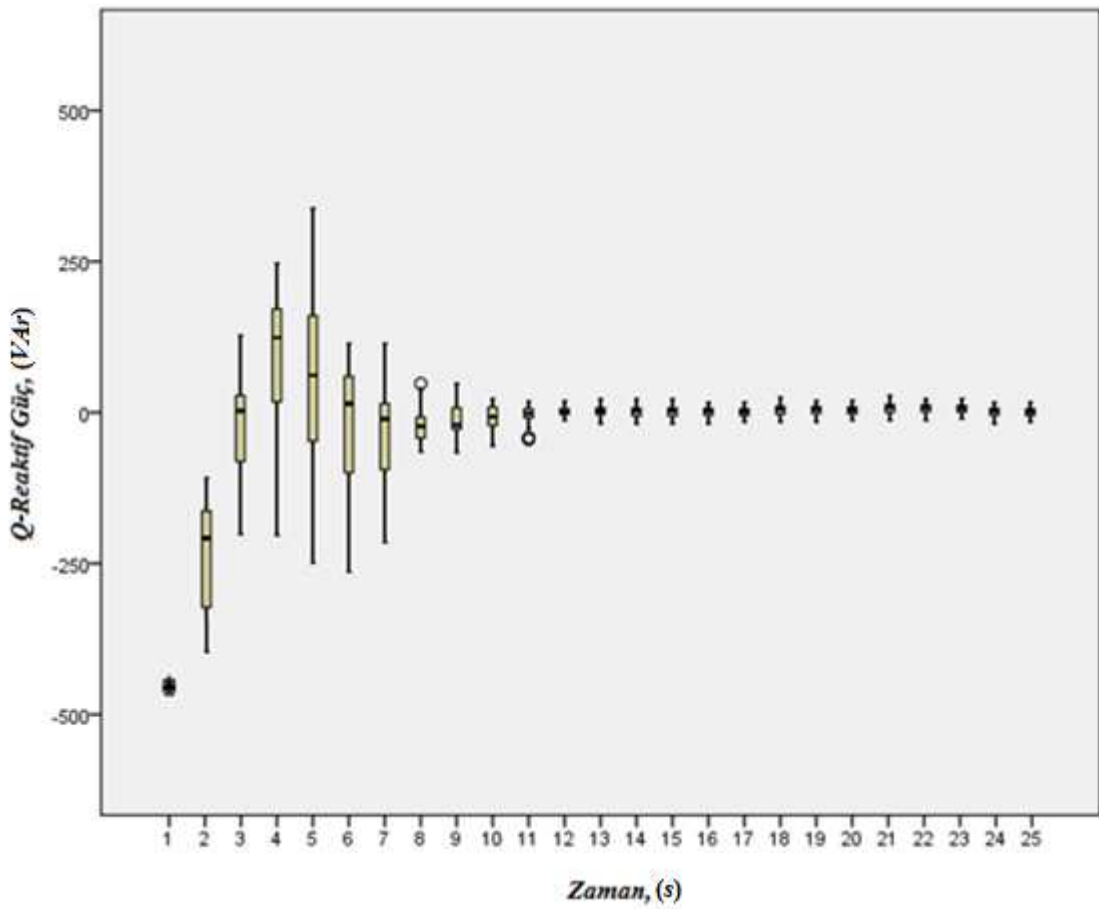
Şekil 5.17. T_i parametresi için bulanık çıkış fonksiyonu.

Şekil 5.18.' de üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlarından oluşturulan algoritmaya ait bulanık çıkış olan BPID denetleyicinin T_d parametresi 3 üyeli üçgen fonksiyonları ile tanımlanmıştır (Chaiyatham ve Ngamroo, 2016).



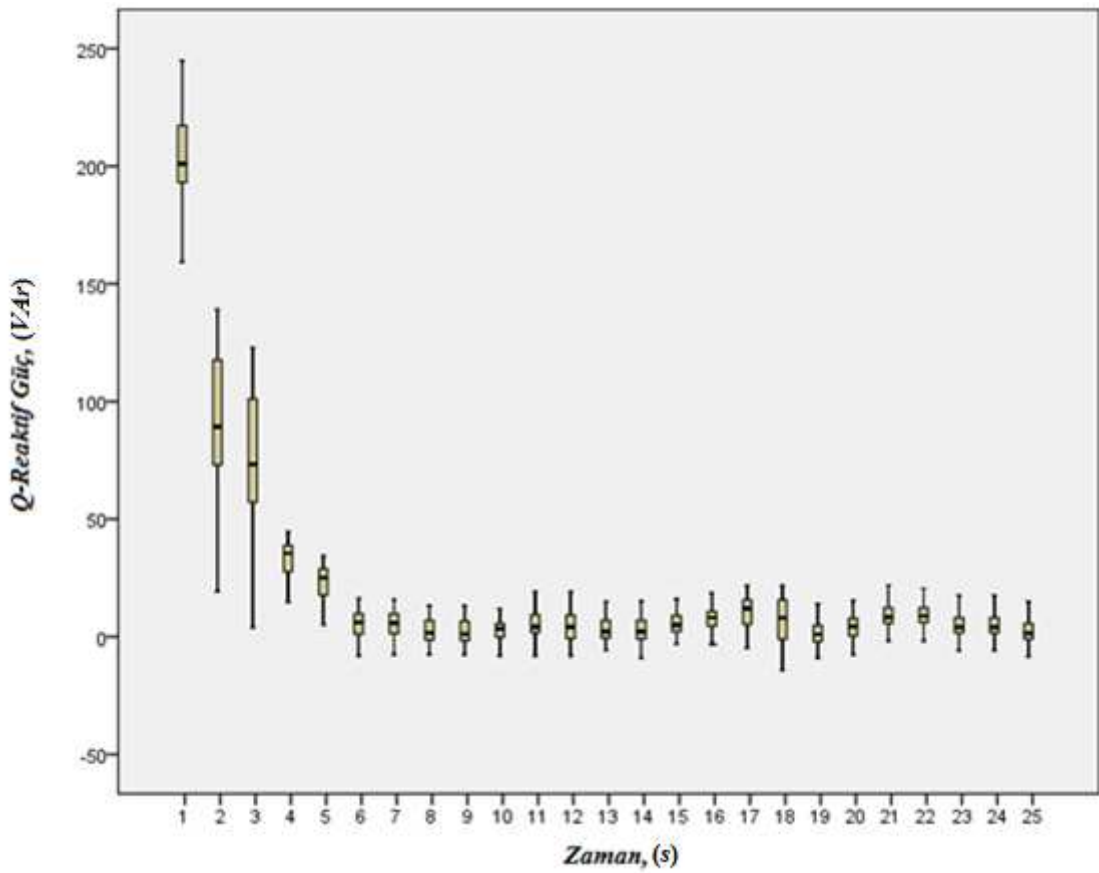
Şekil 5.18. T_d parametresi için bulanık çıkış fonksiyonu.

Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlarından oluşturulan BPID modeli, Ek-2' de verilen PLC programı ile kompanzator çalıştırıldığında Şekil 5.19.'da 458 VAr kapasitif reaktif yük için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 1 s, aşma 47.63 VAr, yerleşme zamanı 5 s ve ortalama kalıcı durum hatası -1.17 VAr olarak gerçekleşmiştir. Ziegler-Nichols PID yöntemine göre, yükselme zamanı değişmemiş, aşma 113.87 VAr, yerleşme zamanı 2 s azalmış ve ortalama kalıcı durum hatası 1.09 VAr azalmıştır.



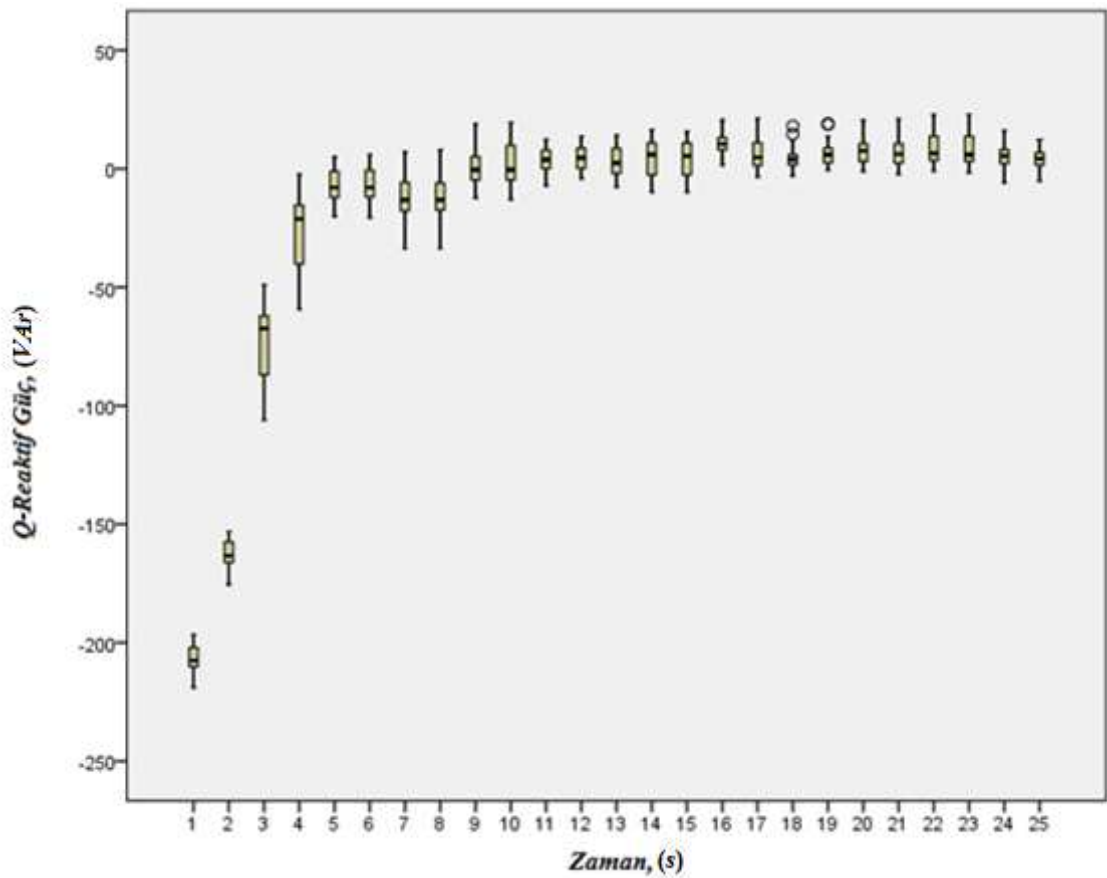
Şekil 5.19. Üçgen ve Yamuk üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 458 VAr kapasitif yük kompanzasyonu kutu grafiği.

Şekil 5.20.' de 208 VAr endüktif reaktif yükün devreye girmesi anı için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 3 s, aşma 0 VAr, yerleşme zamanı 4 s ve ortalama kalıcı durum hatası 5.48 VAr olarak gerçekleşmiştir. Ziegler-Nichols PID yöntemine göre, yükselme zamanı 2 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı değişmemiş ve ortalama kalıcı durum hatası 4.59 VAr artmıştır.



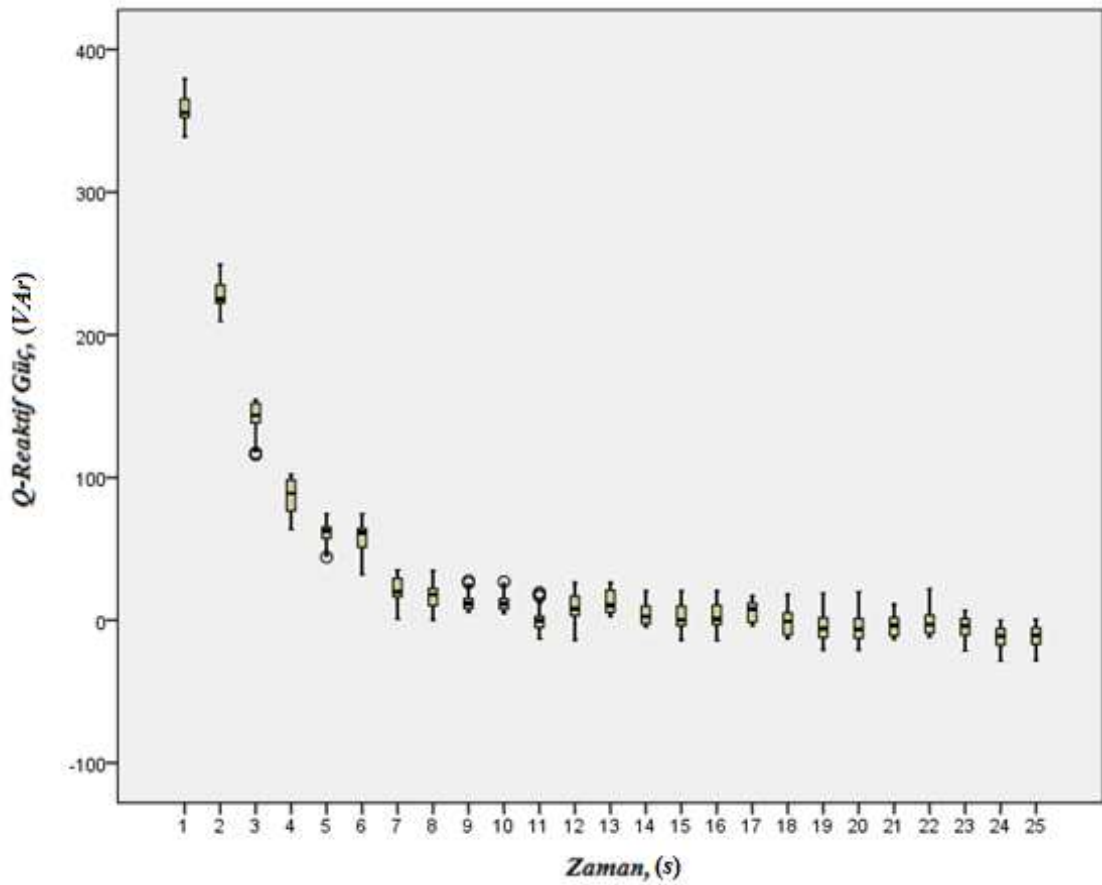
Şekil 5.20. Üçgen ve Yamuk üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 208 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyon kutu grafiği.

Şekil 5.21.' de 208 VAr endüktif reaktif yükün devreden çıkması anı için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 3 s, aşma 0 VAr, yerleşme zamanı 3 s ve ortalama kalıcı durum hatası 2.08 VAr olarak gerçekleşmiştir. Ziegler-Nichols PID yöntemine göre, yükselme zamanı 2 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 4 s azalmış ve ortalama kalıcı durum hatası 2.65 VAr artmıştır.



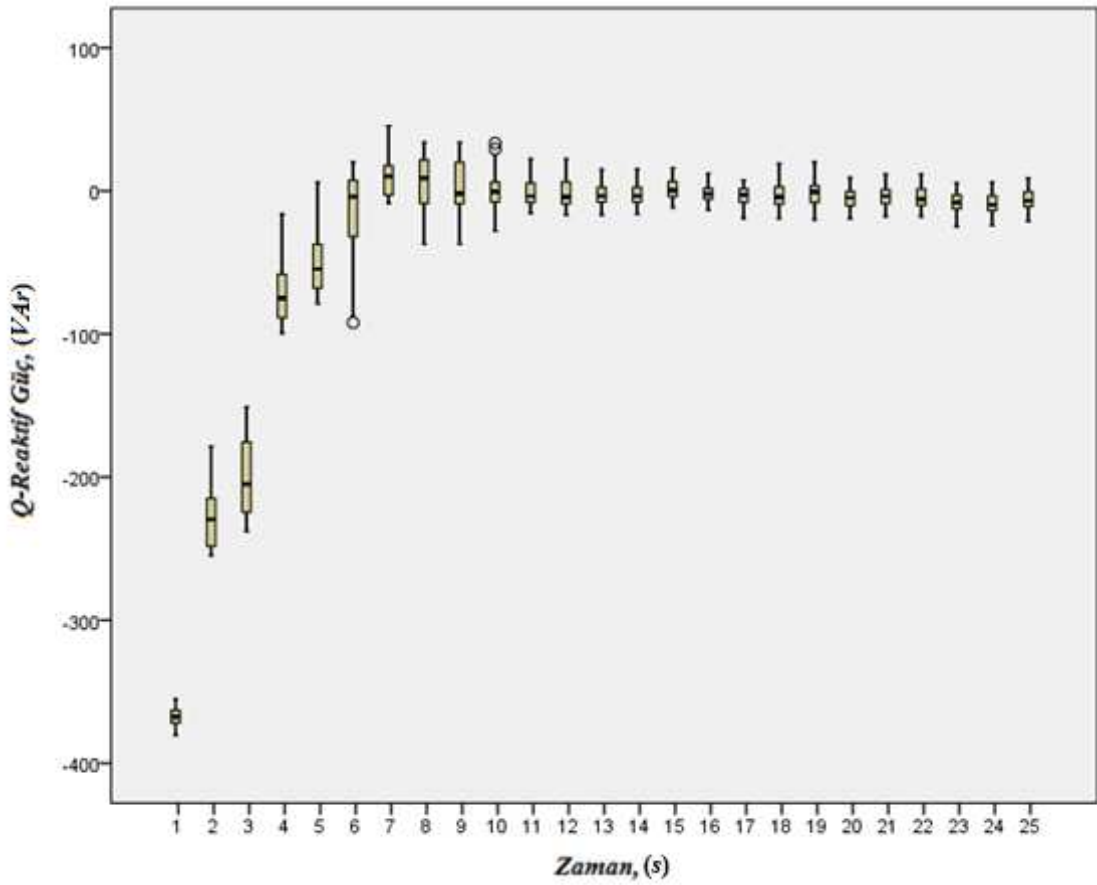
Şekil 5.21. Üçgen ve Yamuk üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 208 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyon kutu grafiği.

Şekil 5.22.' de 365 VAr endüktif reaktif yükün devreye girmesi anı için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 4 s, aşma 0 VAr, yerleşme zamanı 5 s ve ortalama kalıcı durum hatası 3.02 VAr olarak gerçekleşmiştir. Ziegler-Nichols PID yöntemine göre, yükselme zamanı 3 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı değişmemiş ve ortalama kalıcı durum hatası 3.79 VAr artmıştır.



Şekil 5.22. Üçgen ve Yamuk üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 365 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyon kutu grafiği.

Şekil 5.23.' de 365 VAr endüktif reaktif yükün devreden çıkması anı için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 3 s, aşma 0 VAr, yerleşme zamanı 5 s ve ortalama kalıcı durum hatası -2.72 VAr olarak gerçekleşmiştir. Ziegler-Nichols PID yöntemine göre, yükselme zamanı 1 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 3 s azalmış ve ortalama kalıcı durum hatası 3.90 VAr artmıştır.



Şekil 5.23. Üçgen ve Yamuk üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 365 VAr endüktif yükün devreden çıkması anı kompanzasyon kutu grafiği.

5.4. Bir Fazlı SK-TKR Kompanzatörün Gauss ve Sigmoid Üyelik Fonksiyonlu BPID İle Denetimi

Çalışmada kontrol edilen reaktif gücün doğrusal olarak değişmemesi durumunda, Gauss, S ve Z Sigmoid üyelik fonksiyonlarından oluşturulan BPID algoritmada ise, Gauss üyelik derecelerinin hesaplaması için standart Gauss fonksiyonu denklem (5.4)'de görülmektedir.

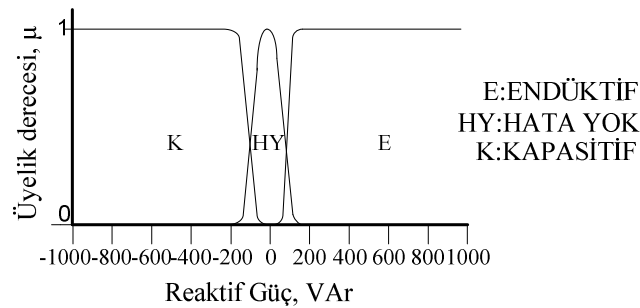
$$\mu(x) = e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (5.4)$$

S ve Z Sigmoid üyelik derecelerinin hesaplaması için Sigmoid fonksiyonu denklem (5.5)'de görülmektedir.

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + e^{-(x-m)\sigma}} \quad (5.5)$$

Denklemden, m grafiğin orta noktasını, σ ise üyeliğin S veya Z sigmoid olmasını sağlar.

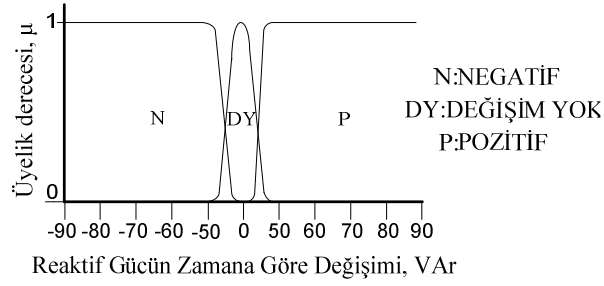
Şekil 5.24.' de Gauss, S ve Z Sigmoid üyelik fonksiyonlarından oluşturulan algoritmaya ait bulanık giriş hata fonksiyonu, $e(t)$ tanımlanmıştır (Tan, vd., 2017).



Şekil 5.24. Gauss, S ve Z sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID hata fonksiyonu, $e(t)$.

Şekil 5.24'de tanımlanan giriş hata, $e(t)$, belirlenen aralıklarda kapasitif, endüktif, olduğuna karar verilmiştir.

Şekil 5.25.' te Gauss, S ve Z Sigmoid üyelik fonksiyonlarından oluşturulan algoritmaya ait bulanık giriş hatanın zamana göre değişimi fonksiyonu, $de(t)/dt$ tanımlanmıştır (Chaiyatham ve Ngamroo, 2016).



Şekil 5.25. Gauss, S ve Z Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID hatanın zamana göre değişimi fonksiyonu, $de(t)/dt$.

Şekil 5.25.' te tanımlanan hatanın zamana göre değişimi, $de(t)/dt$ fonksiyonunun belirlenen aralıklarda negatif, sıfır, pozitif olduğuna karar verilmiştir.

Çizelge 5.4' de Gauss, S ve Z sigmoid üyelik fonksiyonlarından oluşturulan modele ait giriş ile çıkış arasındaki ilişkiyi düzenlemek için, reaktif gücün değişimi ve reaktif gücün değişim hızına göre oluşturulan kural tabanı ile PID parametrelerinin alacağı bulanık değerler “Büyük”, “Orta” ve “Küçük” olarak dilsel bir şekilde ifade edilmiştir.

Çizelge 5.4. Gauss, S ve Z sigmoid üyelik fonksiyonlarından oluşturulan modele ait kural tabanı.

		$de(t)/dt$		
		<i>N</i>	<i>SH</i>	<i>P</i>
<i>e(t)</i>	<i>K</i>	<i>B</i>	<i>O</i>	<i>B</i>
	<i>HY</i>	<i>K</i>	<i>K</i>	<i>K</i>
	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>O</i>	<i>B</i>

Kural cümleleri ise;

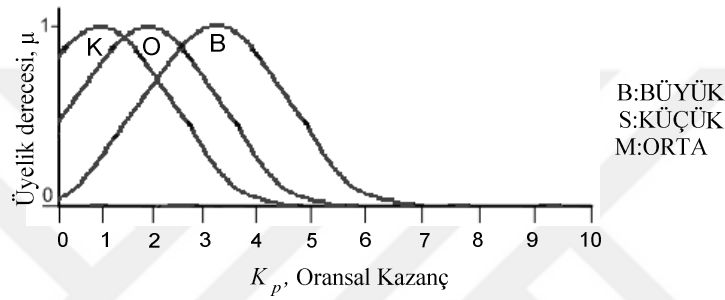
- Eğer hata **Kapasitif (K)** ve hatanın değişimi **Negatif (N)** yönde ise, o halde **Büyük** (B)
- Eğer hata **Yok (HY)** ve hatanın değişimi **Pozitif (P)** yönde ise, o halde **Küçük** (K)
- Eğer hata Endüktif (E) ve hatanın değişimi **Pozitif (P)** yönde ise, o halde **Büyük** (B)

şeklindedir.

Oluşturulan kural tabanı ile 9 adet kural cümlesi oluşturulmuştur.

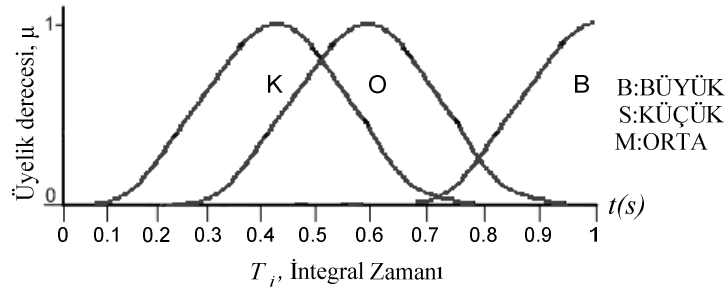
Berraklaştırma için ise, bir kontrol sinyaline ihtiyacımız olduğu için denetim uygulamalarında en çok kullanılan yöntemlerden birisi olan ağırlık ortalaması yöntemi tercih edilmiştir.

Şekil 5.26.' da Gauss üyelik fonksiyonlarından oluşturulan algoritmaya ait bulanık çıkış olan BPID denetleyicinin K_p parametresi 3 üyeli Gauss fonksiyonları ile tanımlanmıştır.



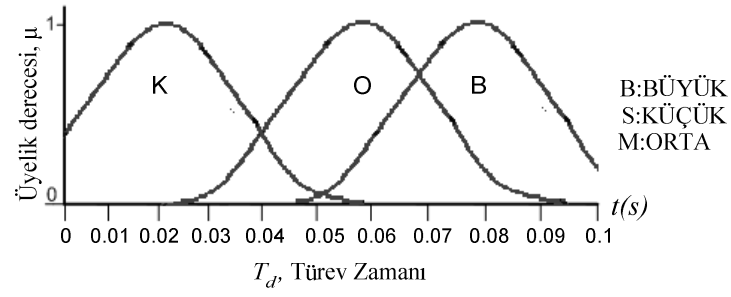
Şekil 5.26. K_p parametresi için gauss bulanık çıkış fonksiyonu.

Şekil 5.27.' de Gauss üyelik fonksiyonlarından oluşturulan algoritmaya ait bulanık çıkış olan BPID denetleyicinin T_i parametresi 3 üyeli Gauss fonksiyonları ile tanımlanmıştır.



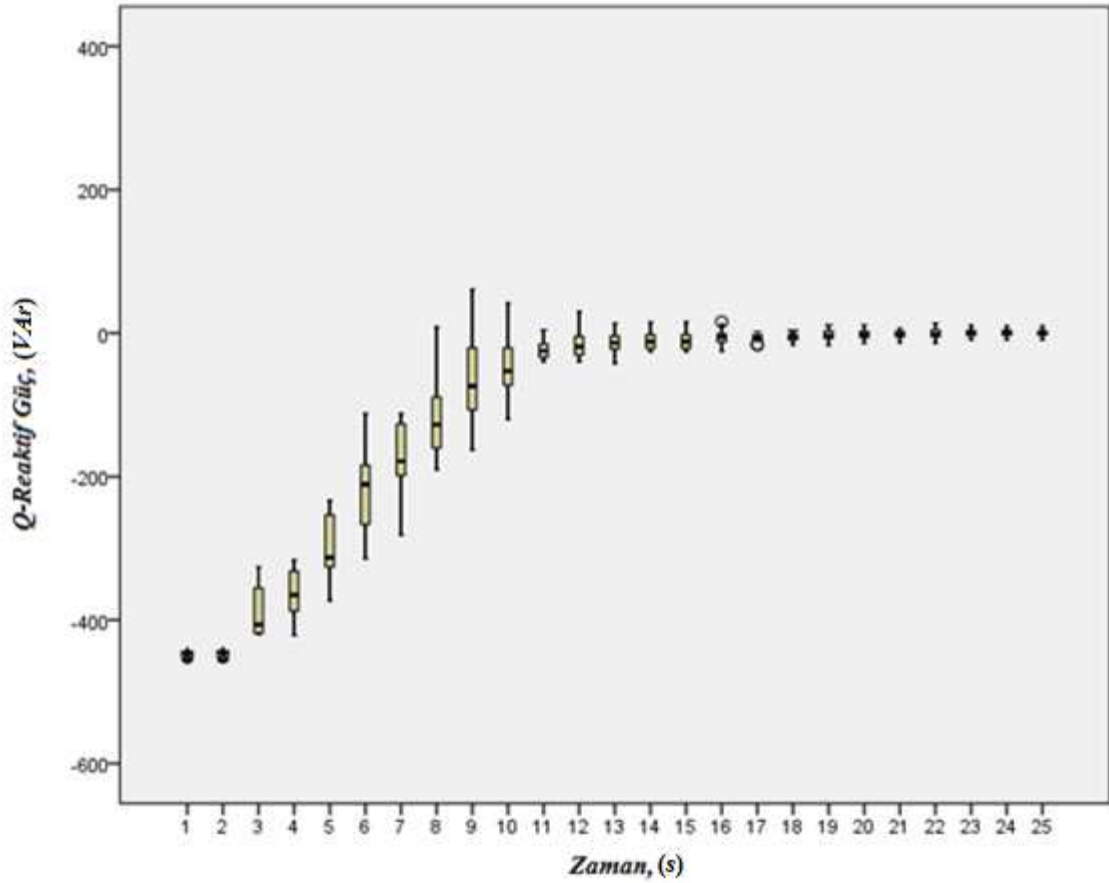
Şekil 5.27. T_i parametresi için gauss bulanık çıkış fonksiyonu.

Şekil 5.28.' de Gauss üyelik fonksiyonlarından oluşturulan algoritmaya ait bulanık çıkış olan BPID denetleyicinin T_d parametresi 3 üyeli Gauss fonksiyonları ile tanımlanmıştır.



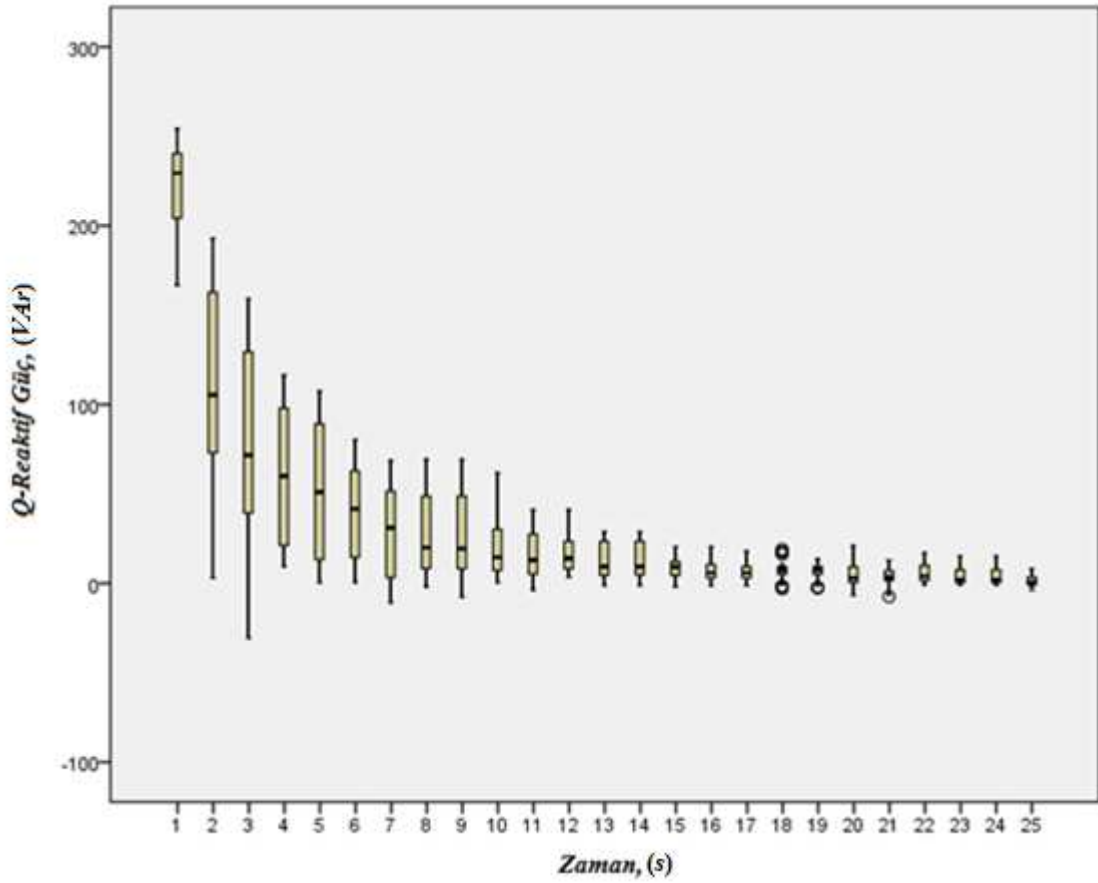
Şekil 5.28. T_d parametresi için gauss bulanık çıkış fonksiyonu.

Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlarından oluşturulan BPID model, Ek-3' de verilen PLC programı ile verilen PLC programı ile kompanzatör çalıştırıldığında Şekil 5.29.'da 458 VAr kapasitif reaktif yük için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 8 s, aşma 0 VAr, yerleşme zamanı 10 s ve ortalama kalıcı durum hatası -4.38 VAr olarak gerçekleşmiştir. Ziegler-Nichols PID yöntemine göre, yükselme zamanı 7 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 2 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 2.12 VAr artmıştır. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID yöntemine göre, yükselme zamanı 7 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 5 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 3.21 VAr artmıştır.



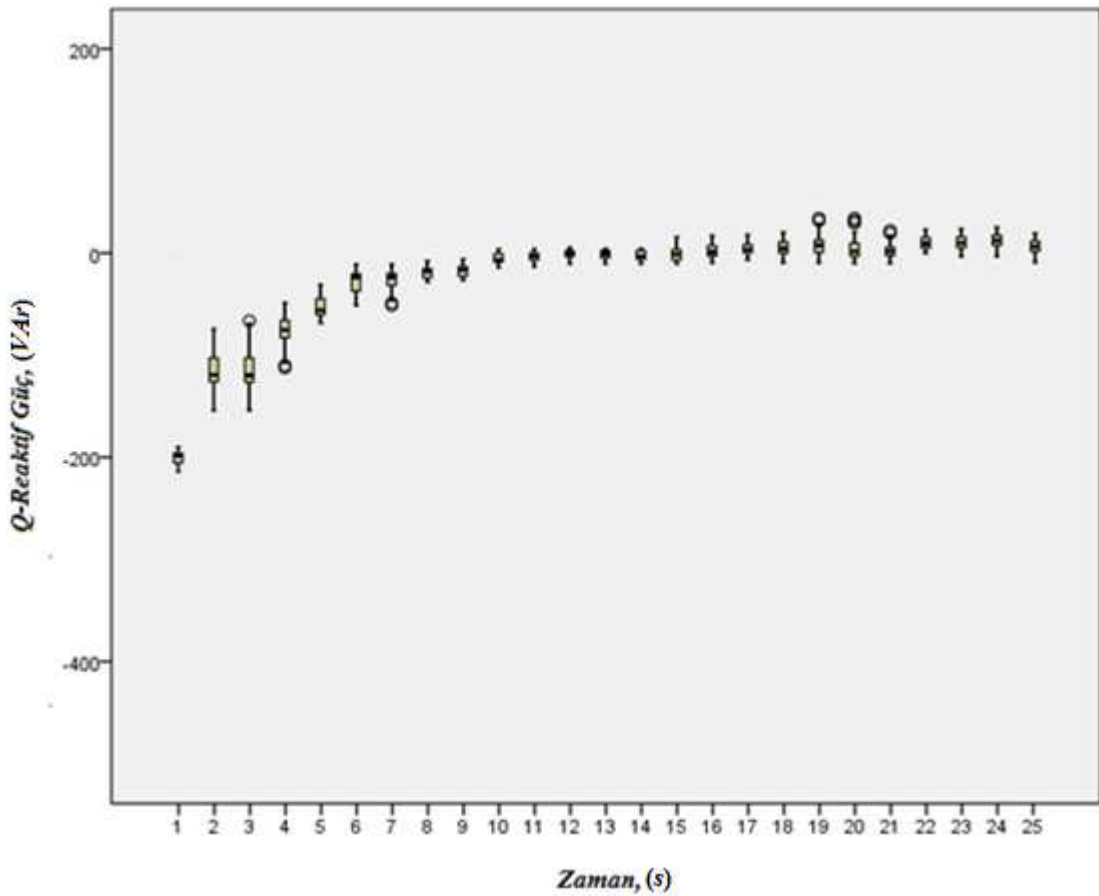
Şekil 5.29. Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 458 VAr kapasitif yük kompanzasyonu kutu grafiği.

Şekil 5.30.' da 208 VAr endüktif reaktif yükün devreye girmesi anı için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 7 s, aşma 0 VAr, yerleşme zamanı 10 s ve ortalama kalıcı durum hatası 6.56 VAr olarak gerçekleşmiştir. Ziegler-Nichols PID yöntemine göre, yükselme zamanı 6 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 6 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 5.67 VAr artmıştır. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID yöntemine göre, yükselme zamanı 4 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 6 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 1.08 VAr artmıştır.



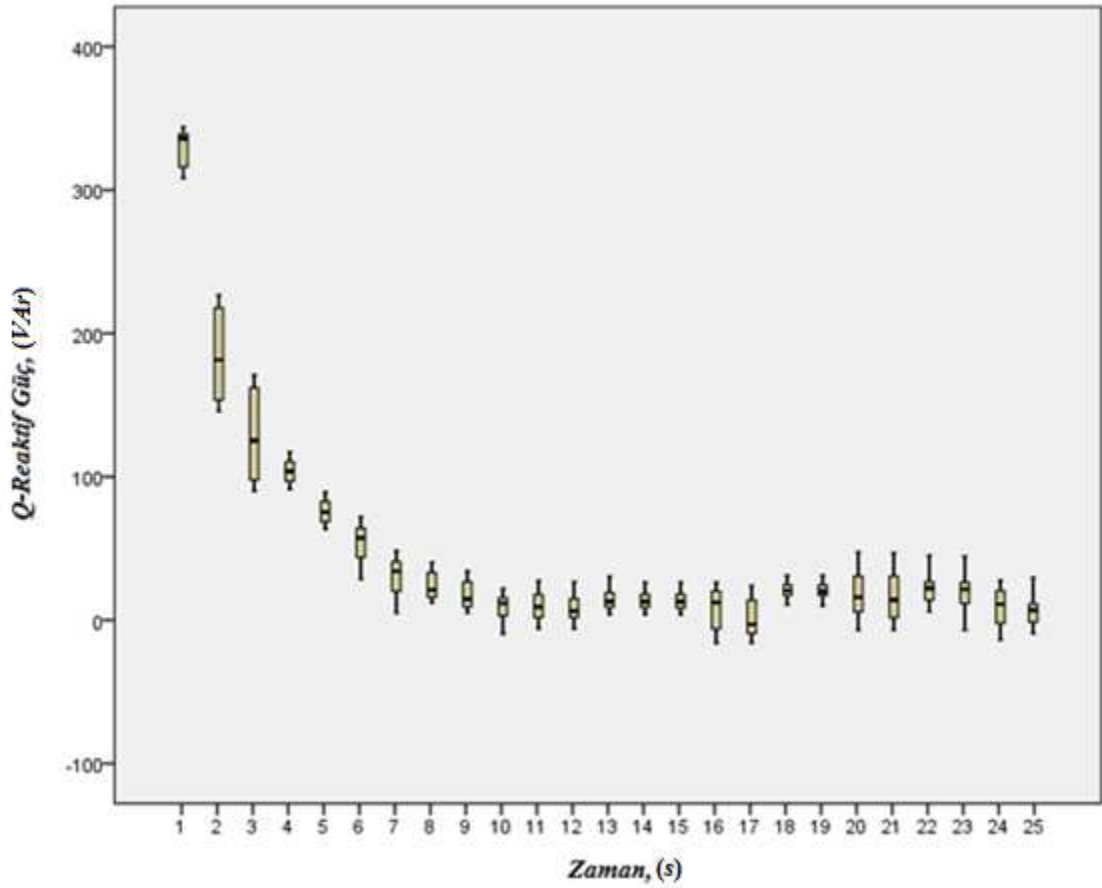
Şekil 5.30. Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 208 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyon kutu grafiği.

Şekil 5.31.' de 208 VAr endüktif reaktif yükün devreden çıkması anı için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 7 s, aşma 0 VAr, yerleşme zamanı 8 s ve ortalama kalıcı durum hatası 6.54 VAr olarak gerçekleşmiştir. Ziegler-Nichols PID yöntemine göre, yükselme zamanı 6 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 1 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 7.11 VAr artmıştır. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID yöntemine göre, yükselme zamanı 4 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 5 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 4.46 VAr artmıştır.



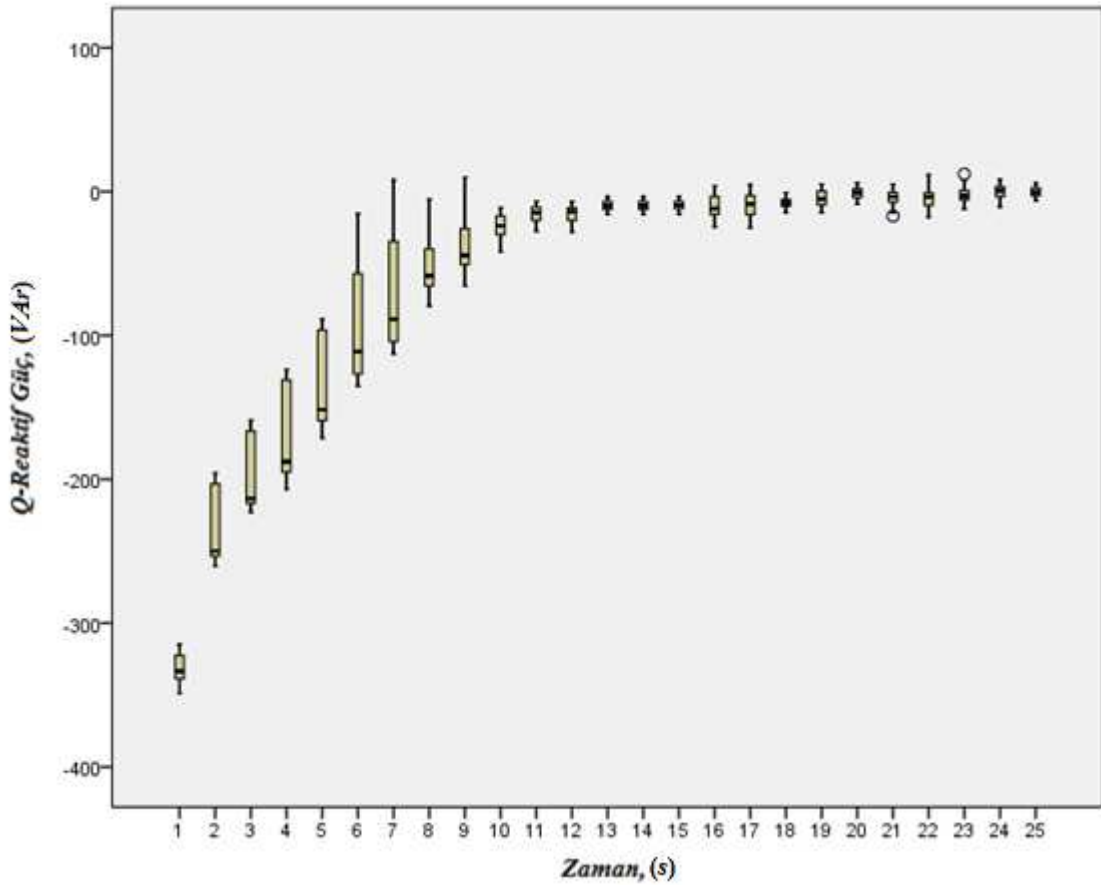
Şekil 5.31. Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 208 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyon kutu grafiği.

Şekil 5.32.' de 365 VAr endüktif reaktif yükün devreye girmesi anı için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 9 s, aşma 0 VAr, yerleşme zamanı 10 s ve ortalama kalıcı durum hatası 7.01 VAr olarak gerçekleşmiştir. Ziegler-Nichols PID yöntemine göre, yükselme zamanı 8 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 5 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 7.78 VAr artmıştır. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID yöntemine göre, yükselme zamanı 5 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 5 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 3.99 VAr artmıştır.



Şekil 5.32. Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 365 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyon kutu grafiği.

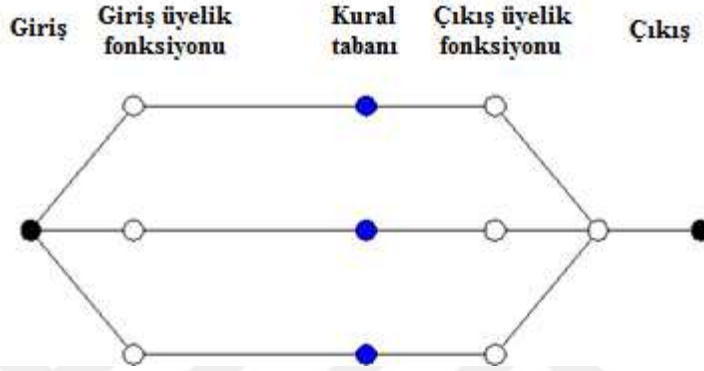
Şekil 5.33.' de 365 VAr endüktif reaktif yükün devreden çıkması anı için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 8 s, aşma 0 VAr, yerleşme zamanı 10 s ve ortalama kalıcı durum hatası -6.13 VAr olarak gerçekleşmiştir. Ziegler-Nichols PID yöntemine göre, yükselme zamanı 6 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 2 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 7.31 VAr artmıştır. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID yöntemine göre, yükselme zamanı 5 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 5 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 3.41 VAr artmıştır.



Şekil 5.33. Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID kontrol, 365 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyon kutu grafiği.

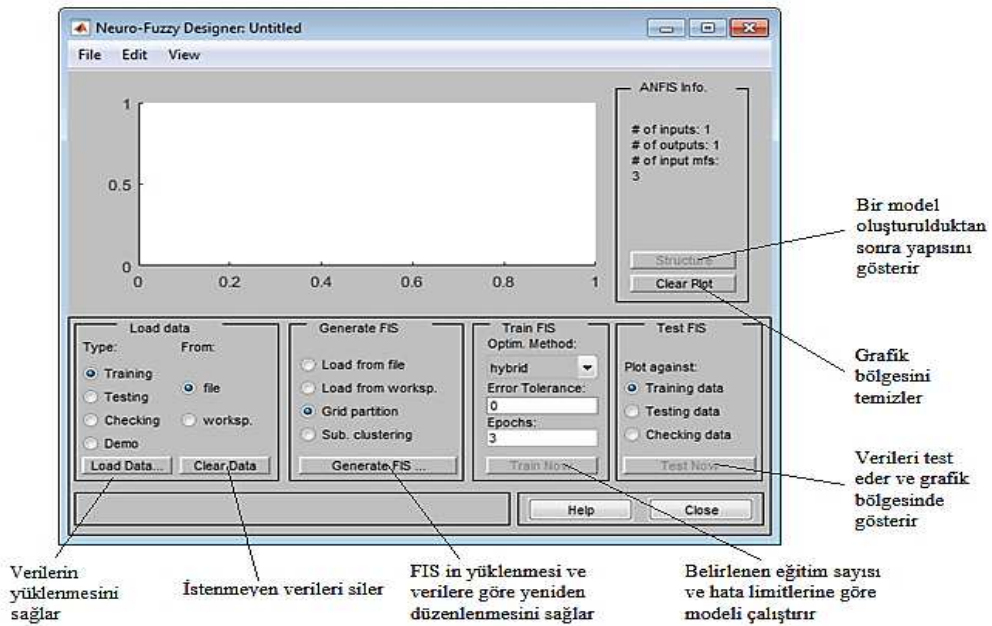
5.5. Bir Fazlı SK-TKR Kompanzatörün ANFIS İle Denetimi

Bu denetimde ise MATLAB programı ANFIS editörü aracılığı ile Şekil 5.34.' de görülen tek giriş ve tek çıktılı bir model oluşturulmuştur. Ziegler-Nichols metodu PID performansı SCADA sistemi ile kaydedilerek , bu veriler ile sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) eğitilmiştir (Gün, 2007).



Şekil 5.34. Tek giriş ve tek çıktılı ANFIS modeli.

ANFIS editörü Şekil 5.35' de görülmektedir. ANFIS editörü, veri yükle (Load data), bulanık çıkarım sistemi oluştur (Generate FIS), bulanık çıkarım sistemi eğit (Train FIS) ve bulanık çıkarım sistemi test et (Test FIS) kısımlarından oluşur (MATHWORKS, 2010; Çakıt, 2008).



Şekil 5.35. Matlab ANFIS editörü.

Veri yükleme bölümünde, eğitim (Training), test (Testing), kontrol (Checking) ve örnek (Demo) kısımları bulunmaktadır. ANFIS’e yüklenecek veriler windows notepad yardımı ile hazırlanmalıdır. Eğitim verileri Şekil 5.36.’da görülmektedir. Giriş verileri ilk, çıkış verileri en son sütunda hazırlanır. Verilerin yüklenmesi esnasında dosyanın konumu “disk” veya “workspace” olarak belirtilmelidir. (MATHWORKS, 2010; Çakıt, 2008).

anfis_kp.txt - Not Def...		anfis_td.txt - Not Def...		anfis_ti.txt - Not Def...	
Dosya	Düzen	Dosya	Düzen	Dosya	Düzen
-3.4	0.6	-28.6	0.125	-3.4	0.5
-7.2	0.6	-30.2	0.125	-7.2	0.5
-0.8	0.6	-0.2	0.125	-0.8	0.5
2.4	0.6	48.4	0.125	2.4	0.5
-1.4	0.6	81.2	0.125	-1.4	0.5
6.8	0.6	1.2	0.125	6.8	0.5
5.4	0.6	-389.2	0.125	5.4	0.5
0.4	0.6	-389.4	0.125	0.4	0.5
-15.2	0.6	-388.8	0.125	-15.2	0.5
-28.6	0.6	-388.8	0.125	-28.6	0.5
-30.2	0.6	-388.8	0.125	-30.2	0.5
-0.2	0.6	-4.4	0.125	-0.2	0.5
48.4	0.6	-4.4	0.125	48.4	0.5
81.2	0.6	-5.4	0.125	81.2	0.5
1.2	0.6	1	0.125	1.2	0.5
-389.2	0.6	3.2	0.125	-389.2	0.5
-389.4	0.6	3.4	0.125	-389.4	0.5
-388.8	0.6	-5.6	0.125	-388.8	0.5
-388.8	0.6	1.2	0.125	-388.8	0.5
-388.8	0.6	-4	0.125	-388.8	0.5
-4.4	0.6	21	0.125	-4.4	0.5
-4.4	0.6	31.8	0.125	-4.4	0.5
-5.4	0.6	34.2	0.125	-5.4	0.5

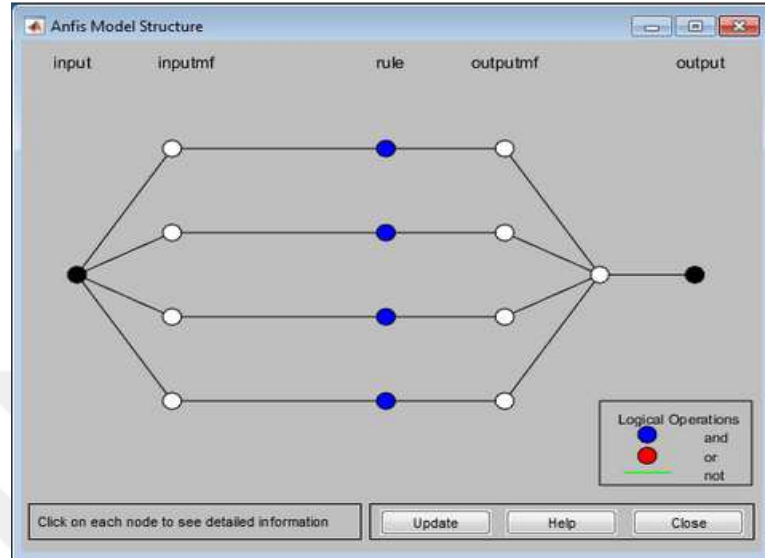
Şekil 5.36. Eğitim dosyaları.

Eğitim dosyaları yüklendikten sonra, bulanık çıkarım sistemi oluşturma (Generate FIS) işlemine devam edilir. Önceden hazırlanmış bir bulanık model, yükle düğmesine basılarak yüklenir. Daha sonra, “bulanık çıkarım sistemi oluştur düğmesine” basılarak açılan pencerede değişkenlere ait üyelik fonksiyonlarının şekli ve sayısı değiştirilebilir (MATHWORKS, 2010; Çakıt, 2008).

Eğitim aşamasında, model test edilmektedir. Test için, “backpropagation” olarak ifade edilen geriye besleme ve “hybrid” olarak ifade edilen geriye besleme yöntemi ile en küçük kareler yönteminin birlikte kullanıldığı yöntemleri kullanılabilir. Eğitim kısmında bulunan kabul edilebilir hata (Error Tolerance) kutucuğuna bir değer girilebilir. Değerin 0.01 ya da 0.05 olması yeterlidir (MATHWORKS, 2010; Çakıt, 2008).

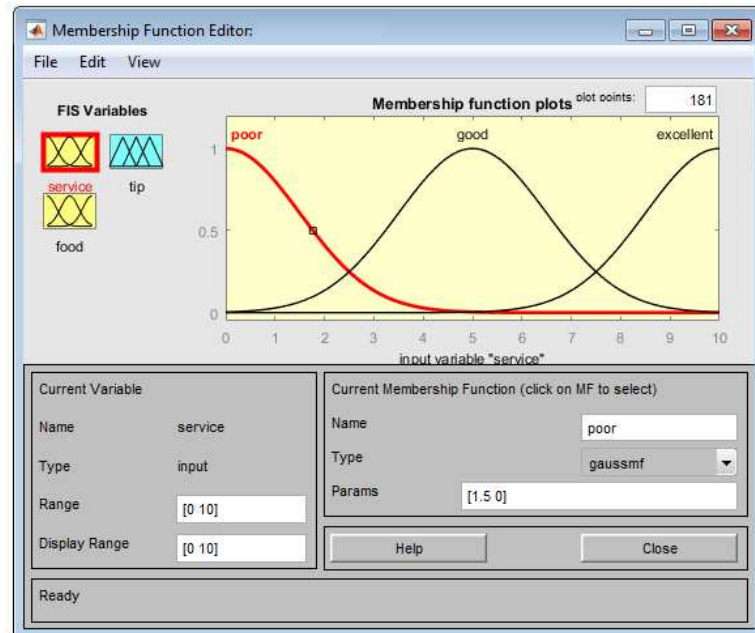
Eğitim aşamasında, test edilecek sistemde girdi ve çıktı değişkenleri arasında gidip gelme (eğitime) işleminin yapılacağını gösteren “epochs” sayısının belirlenmelidir. Bu değer 3 olarak alınması önerilir ve 100’ü geçmemesi istenir. Daha sonra eğit (Train now) işlemi ile oluşturulan model çalıştırılır ve test aşamasına geçilir (Mathworks, 2010; Çakıt, 2008).

“Structure” düğmesine basılması ile oluşturulan modelin yapısı şekil 5.37’ de görülmektedir.



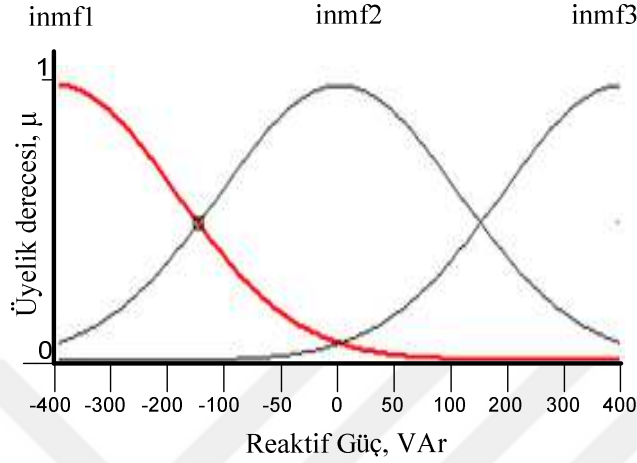
Şekil 5.37. ANFIS model yapısının genel görünümü.

Şekil 5.38’ da oluşturulan ANFIS modelde kullanılan üyelik fonksiyonları ve parametre değerleri görülmektedir.



Şekil 5.38. ANFIS üyelik editörü ve parametre değerleri penceresi.

ANFIS sisteminin hibrid metodu ve 100 iterasyon ile eğitilmesi sonucunda, elde edilen giriş üyelik fonksiyonları Şekil 5.39.'da görülmektedir.



Şekil 5.39. ANFIS'in oluşturduğu bulanık üyelik fonksiyonları.

Giriş üyelikleri gauss fonksiyonu ile tanımlanmıştır. Gauss üyelik fonksiyonu ise denklem (5.6) ile tanımlanmıştır.

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.6)$$

Burada x girdi değişkenini, c Gauss eğrisinin merkezini, σ ise eğrinin genişliğini ifade eder. (Tan, vd., 2017).

Sugeno model ANFIS'nin oluşturduğu kurallar ise;

- Eğer (input1 - in1mf1) ise, ohalde (output1 - out1mf1)
- Eğer (input1 - in1mf2) ise, ohalde (output1 - out1mf2)
- Eğer (input1 - in1mf3) ise, ohalde (output1 - out1mf3) şeklindedir.

Sugeno model ANFIS' in oluşturduğu 1. dereceden polinomlar ise Çizelge 5.5.' de görülmektedir.

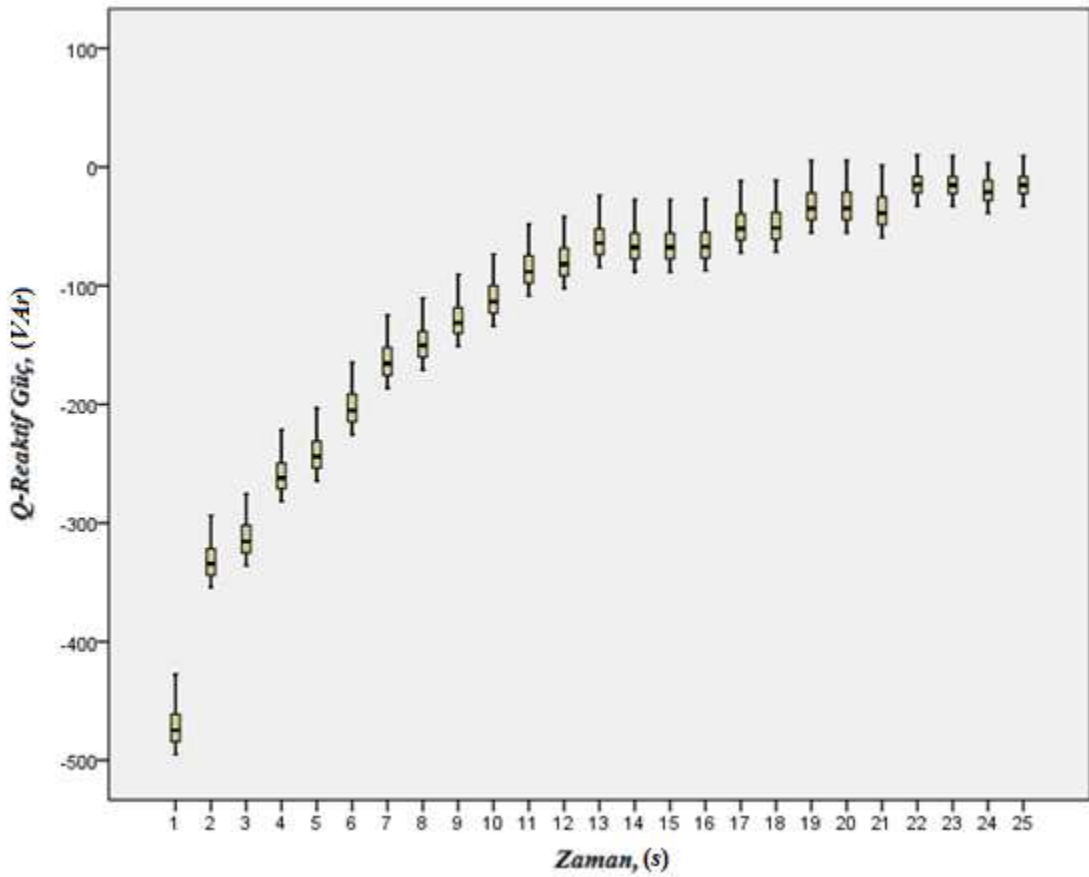
Çizelge 5.5. Sugeno model ANFIS'nin oluşturduğu 1. dereceden polinomlar.

<i>Giriş</i>	<i>Üyelik Fonksiyonu</i>	<i>Çıkış</i>	<i>1. Dereceden Çıkış Polinomları</i>		
			K_p	T_i	T_d
<i>in1mf1</i>	$e^{-\frac{(x+389.4)^2}{2 \times 128.5^2}}$	out1mf1	$y = -2,109.10^{-6} x + 0,62$	$y = -8,332.10^{-7} x + 0,4993$	$y = -4,394.10^{-7} x + 0,1248$
<i>in1mf2</i>	$e^{-\frac{(x+86.7)^2}{2 \times 128.5^2}}$	out1mf2	$y = -8,332.10^{-7} x + 0,6$	$y = -6,944.10^{-7} x + 0,5$	$y = -1,736.10^{-7} x + 0,125$
<i>in1mf3</i>	$e^{-\frac{(x-216)^2}{2 \times 128.5^2}}$	out1mf3	$y = -5,502.10^{-7} x + 0,601$	$y = -4,585.10^{-7} x + 0,5001$	$y = -1,146.10^{-7} x + 0,125$

K_p , T_i ve T_d PID parametreleri için ANFIS üç kez birbirinden bağımsız olarak aynı giriş farklı çıkışlara göre eğitilerek toplam 9 adet 1. dereceden polinom elde edilmiştir.

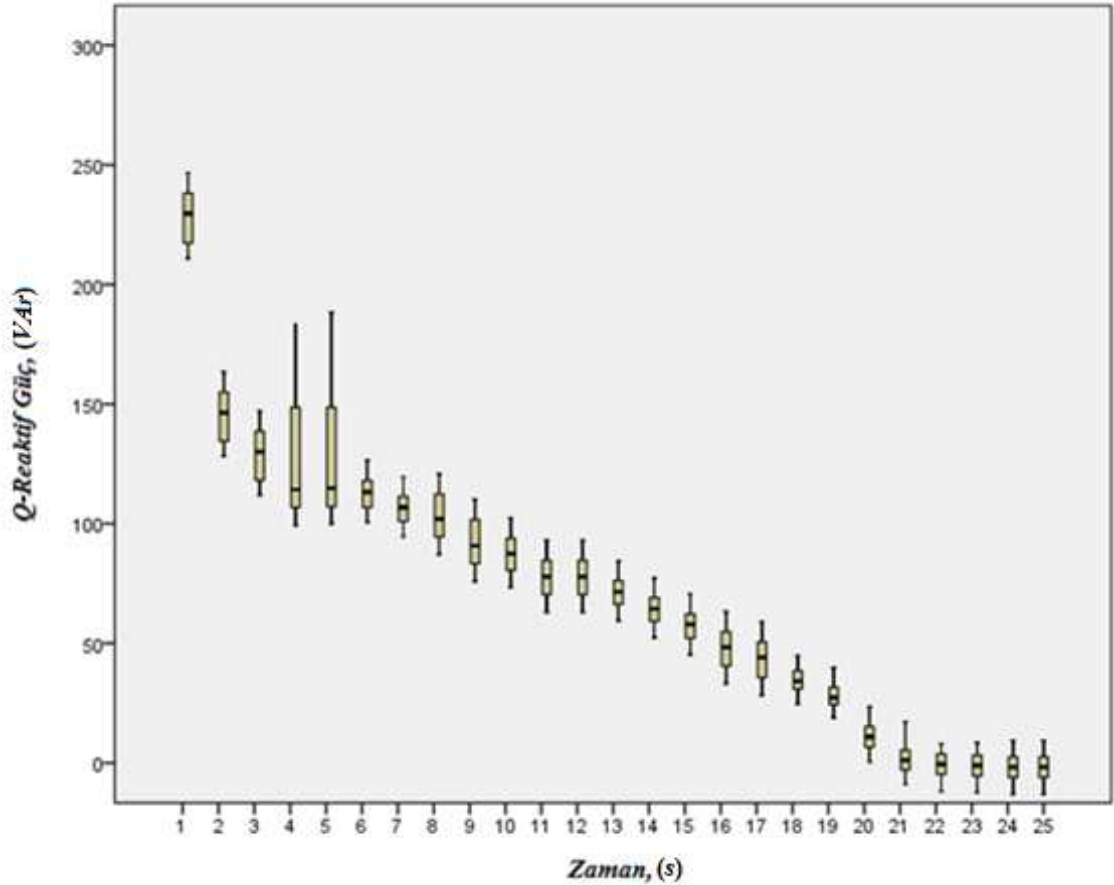
Berraklaştırma için ise ağırlık ortalaması yöntemi tercih edilmiştir.

Sugeno model ANFIS BPID ile, Ek-4' de verilen PLC programı ile kompanzatör çalıştırıldığında Şekil 5.40.'da 458 VAr kapasitif reaktif yük için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 18 s, aşma 0 VAr, yerleşme zamanı 21 s ve ortalama kalıcı durum hatası -13.97 VAr olarak gerçekleşmiştir. Ziegler-Nichols PID yöntemine göre, yükselme zamanı 16 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 13 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 11.71 VAr artmıştır. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID yöntemine göre, yükselme zamanı 17 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 16 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 12.08 VAr artmıştır. Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID yöntemine göre, yükselme zamanı 10 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 11 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 9.59 VAr artmıştır.



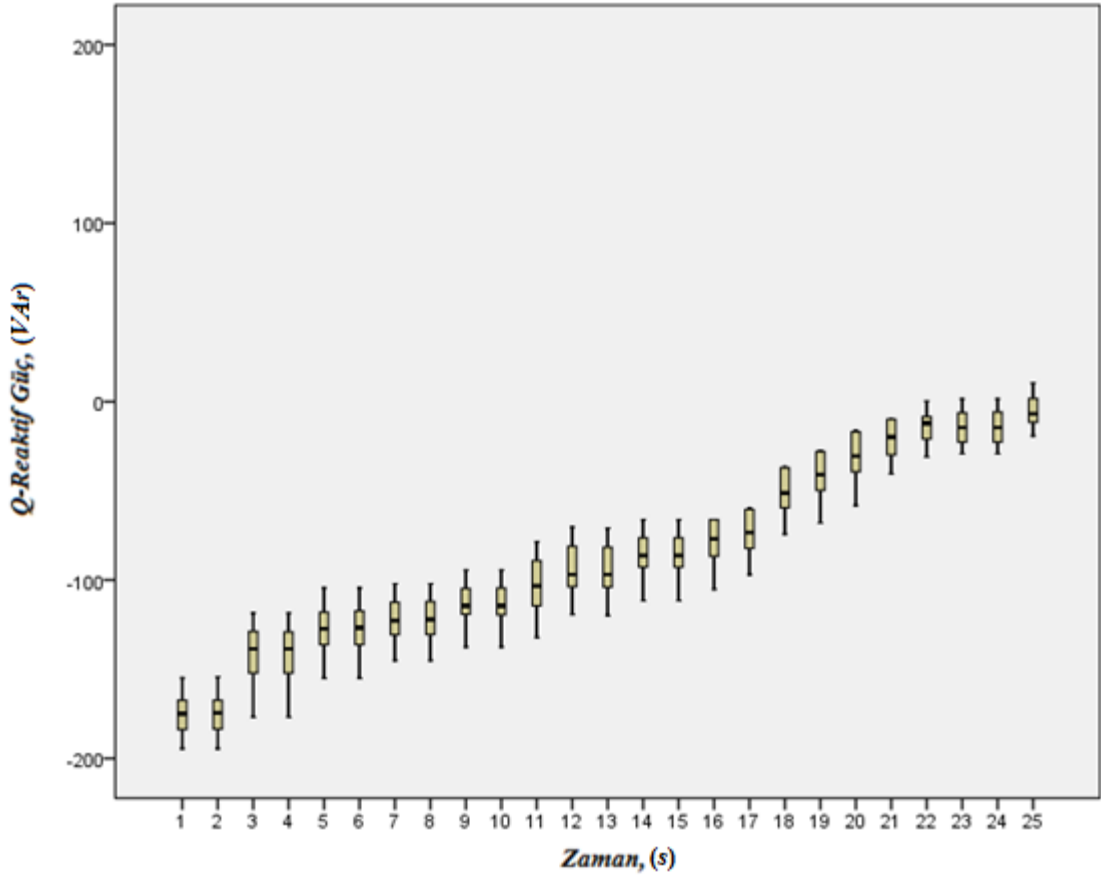
Şekil 5.40. Sugeno model ANFIS BPID kontrol, 458 VAr kapasitif yük kompanzasyonu kutu grafiği.

Şekil 5.41.' de 208 VAr endüktif reaktif yükün devreye girmesi anı için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 20 s, aşma 0 VAr, yerleşme zamanı 21 s ve ortalama kalıcı durum hatası 6.97 VAr olarak gerçekleşmiştir. Ziegler-Nichols PID yöntemine göre, yükselme zamanı 19 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 17 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 6.08 VAr artmıştır. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID yöntemine göre, yükselme zamanı 17 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 17 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 1.49 VAr artmıştır. Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID yöntemine göre, yükselme zamanı 13 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 11 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 0.41 VAr artmıştır.



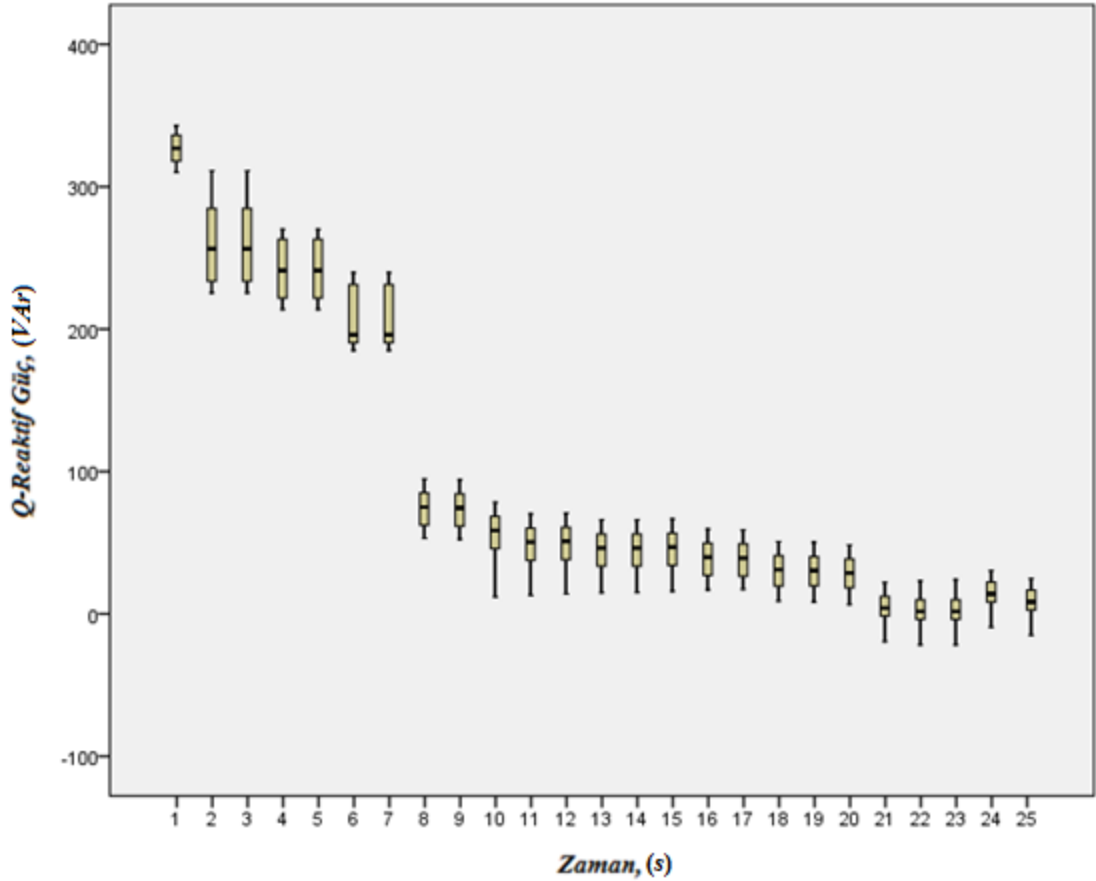
Şekil 5.41. Sugeno model ANFIS BPID kontrol, 208 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyon kutu grafiği.

Şekil 5.42.' de 208 VAr endüktif reaktif yükün devreden çıkması anı için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 14 s, aşma 0 VAr, yerleşme zamanı 16 s ve ortalama kalıcı durum hatası 4.85 VAr olarak gerçekleşmiştir. Ziegler-Nichols PID yöntemine göre, yükselme zamanı 13 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 9 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 5.42 VAr artmıştır. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID yöntemine göre, yükselme zamanı 11 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 13 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 2.77 VAr artmıştır. Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID yöntemine göre, yükselme zamanı 7 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 8 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 1.69 VAr azalmıştır.



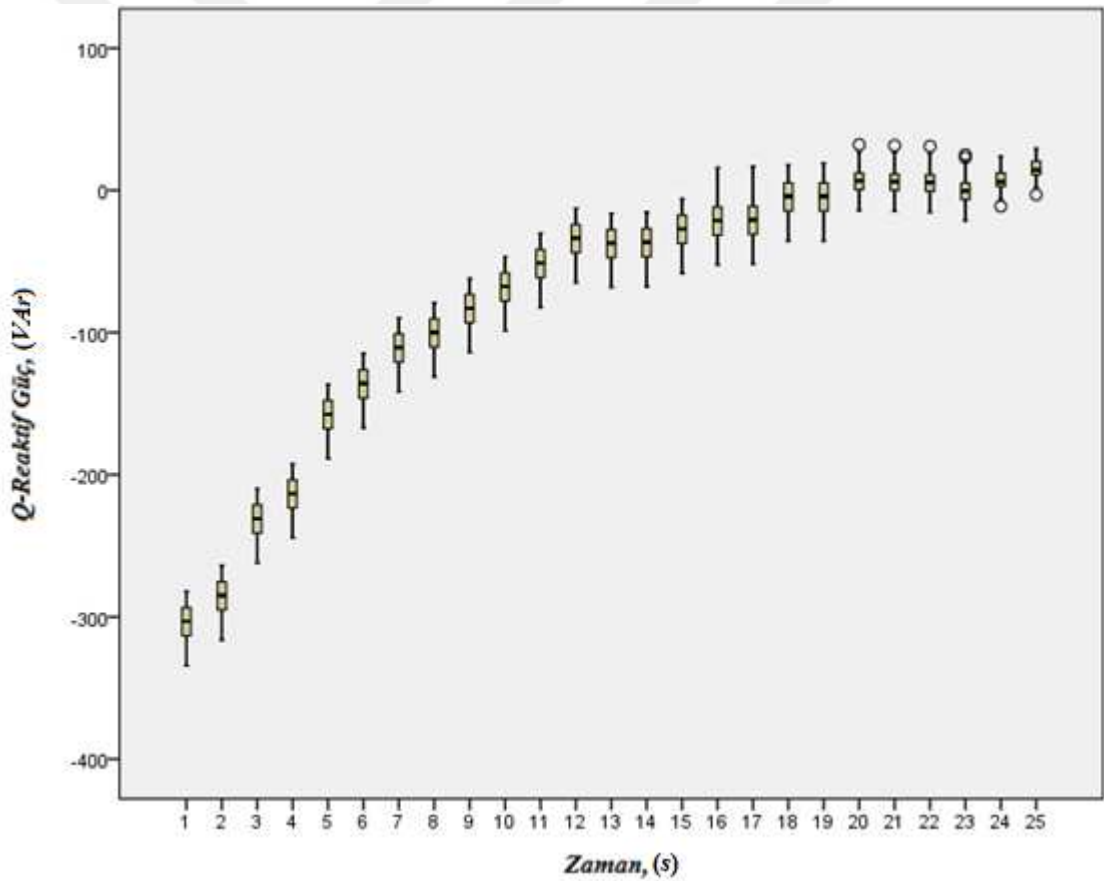
Şekil 5.42. Sugeno model ANFIS BPID kontrol, 208 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyon kutu grafiği.

Şekil 5.43.' de 365 VAr endüktif reaktif yükün devreye girmesi anı için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 18 s, aşma 0 VAr, yerleşme zamanı 20 s ve ortalama kalıcı durum hatası 4.85 VAr olarak gerçekleşmiştir. Ziegler-Nichols PID yöntemine göre, yükselme zamanı 17 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 15 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 5.62 VAr artmıştır. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID yöntemine göre, yükselme zamanı 14 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 15 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 1.83 VAr artmıştır. Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID yöntemine göre, yükselme zamanı 9 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 10 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 2.16 VAr azalmıştır.



Şekil 5.43. Sugeno model ANFIS BPID kontrol, 365 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyon kutu grafiği.

Şekil 5.44.' de 365 VAr endüktif reaktif yükün devreden çıkması anı için reaktif gücün değişimi kutu grafiği görülmektedir. Ortalama reaktif gücün değişimi performans verilerine bakıldığında yükselme zamanı 14 s, aşma 0 VAr, yerleşme zamanı 15 s ve ortalama kalıcı durum hatası 2.09 VAr olarak gerçekleşmiştir. Ziegler-Nichols PID yöntemine göre, yükselme zamanı 12 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 7 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 0.91 VAr artmıştır. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID yöntemine göre, yükselme zamanı 11 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 10 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 4.81 VAr artmıştır. Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID yöntemine göre, yükselme zamanı 6 s artmış, aşma gerçekleşmemiş, yerleşme zamanı 5 s artmış ve ortalama kalıcı durum hatası 8.22 VAr artmıştır.

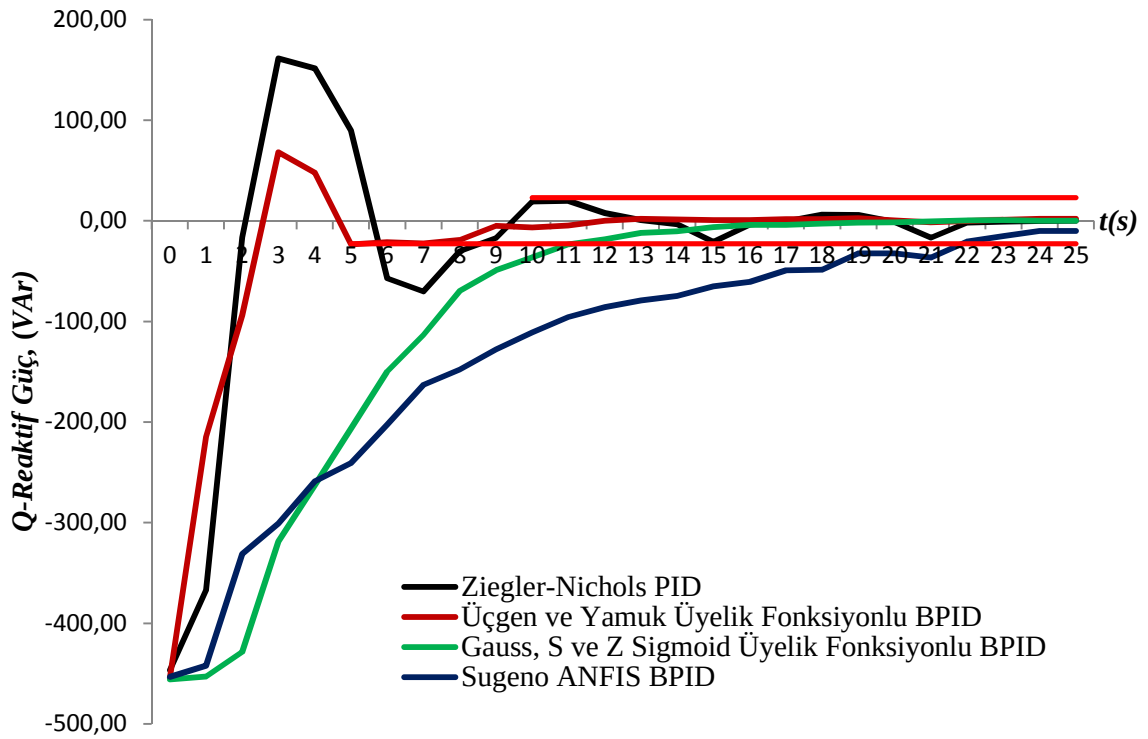


Şekil 5.44. Sugeno model ANFIS BPID kontrol, 365 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyon kutu grafiği.

5.6. Karşılaştırma

SK-TKR kompanzatörün denetimi için kullanılan yöntemlerin farklı test yükleri ile otuz kez tekrar edilmiş sonuçlarının ortalama değerleri grafiklerde karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.45.' de ve Çizelge 5.6.'da SK-TKR kompanzatörün 458 VAr kapasitif yükün kompanzasyonu ve yöntemlerin ortalama reaktif güç değişimi karşılaştırılmaları görülmektedir. En hızlı yükselme zamanı 1 s ile Ziegler-Nichols PID ve üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID kontrol ile gerçekleşmiştir. Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID ve Sugeno model ANFIS modelinde aşma gerçekleşmemiştir. En hızlı yerleşme zamanı 5 s ve en az kalıcı durum hatası -1,17 VAr olan üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID kontrol ile gerçekleşmiştir. En çok aşma 161.50 VAr ile Ziegler-Nichols PID kontrol ile gerçekleşmiştir.

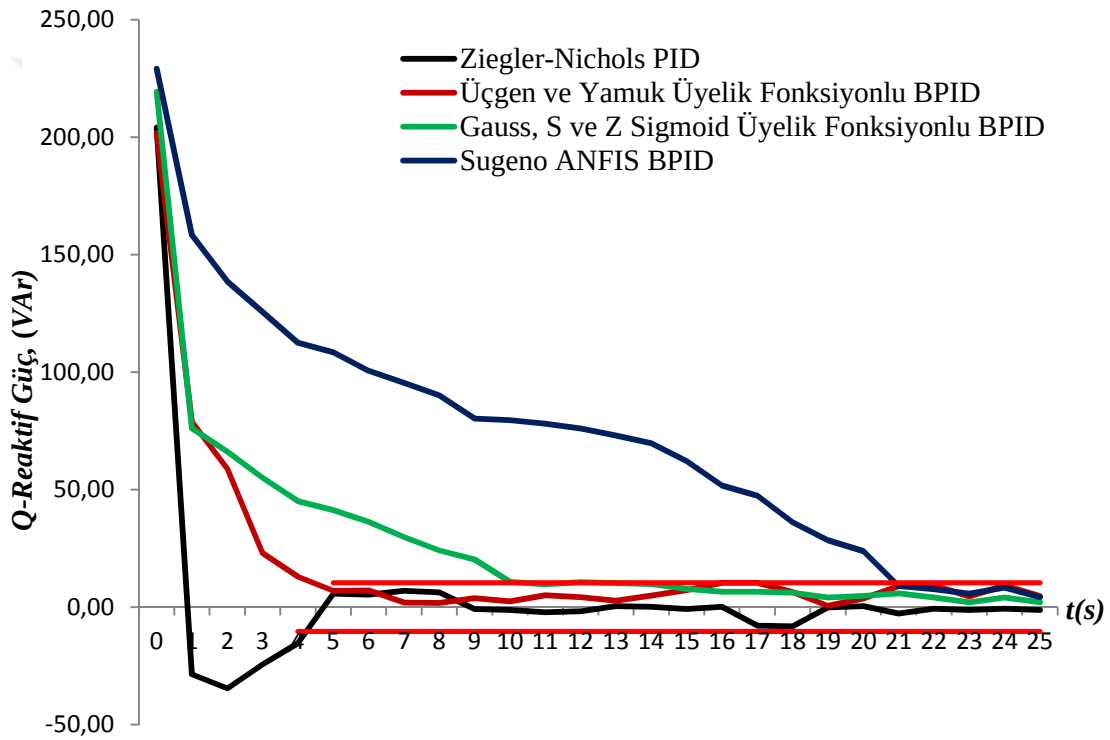


Şekil 5.45. Denetim yöntemlerinin 458 VAr kapasitif yük kompanzasyonu için ortalama reaktif güç değişimleri.

Çizelge 5.6. Denetim yöntemlerinin 458 VAr kapasitif yük kompanzasyonu için ortalama reaktif gücün değişimi performans verileri.

<i>PID Denetleyici</i>	<i>Ziegler-Nichols PID</i>	<i>Üçgen-Yamuk BPID</i>	<i>Gauss- Sigmoid BPID</i>	<i>Sugeno ANFIS BPID</i>
<i>Yükselme zamanı</i>	1 s	1 s	8 s	18 s
<i>Aşım</i>	161.50 VAr	47.63 VAr	0 VAr	0 VAr
<i>Yerleşme Zamanı</i>	8 s	5 s	10 s	21 s
<i>Ortalama Kalıcı Durum Hatası</i>	-2.26 VAr	-1.17 VAr	-4.38 VAr	-13.97 VAr

Şekil 5.46.' da ve Çizelge 5.7.'de SK-TKR kompanzatörün 208 VAr endüktif yükün kompanzasyonu ve yöntemlerin yükün devreye girdiği an ortalama reaktif güç değişimi karşılaştırılmaları görülmektedir. En hızlı yükselme zamanı 1 s ile Ziegler-Nichols PID kontrol ile gerçekleşmiştir. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID, Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID ve Sugeno model ANFIS modelinde aşma gerçekleşmemiştir. En hızlı yerleşme zamanı 4 s ile üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID ve Ziegler-Nichols PID kontrol ile gerçekleşmiştir. En az kalıcı durum hatası 0.89 VAr olan Ziegler-Nichols PID kontrol ile gerçekleşmiştir.

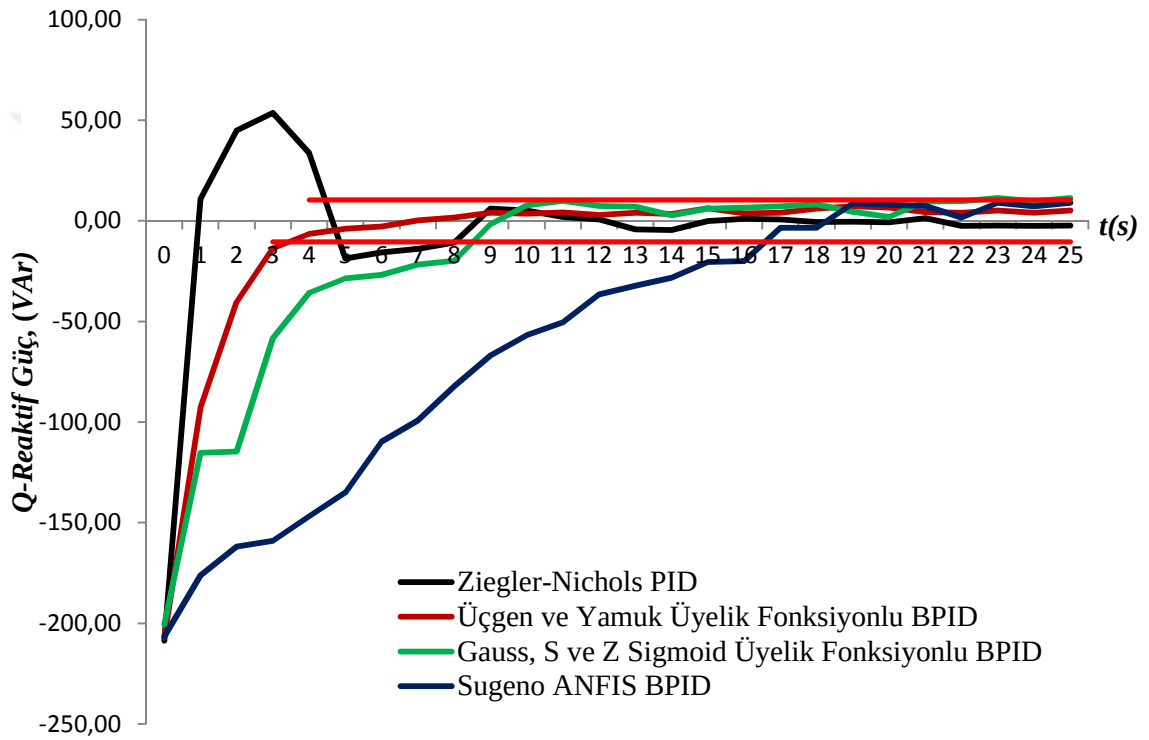


Şekil 5.46. Denetim yöntemlerinin 208 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyonu için ortalama reaktif güç değişimleri.

Çizelge 5.7. Denetim yöntemlerinin 208 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyonu için ortalama reaktif gücün değişimi performans verileri.

<i>PID Denetleyici</i>	<i>Ziegler-Nichols</i>	<i>Üçgen-Yamuk BPID</i>	<i>Gauss-S_Z Sigmoid BPID</i>	<i>Sugeno ANFIS BPID</i>
<i>Yükselme zamanı</i>	1 s	3 s	7 s	14 s
<i>Aşım</i>	-34.64 VAr	0 VAr	0 VAr	0 VAr
<i>Yerleşme Zamanı</i>	7 s	3 s	8 s	16 s
<i>Ortalama Kalıcı Durum Hatası</i>	0.89 VAr	5.48 VAr	6.56 VAr	6.97 VAr

Şekil 5.47.' de ve Çizelge 5.8.'de SK-TKR kompanzatörün 208 VAr endüktif yükün kompanzasyonu ve yöntemlerin yükün devreden çıktığı an ortalama reaktif güç değişimi karşılaştırılmaları görülmektedir. En hızlı yükselme zamanı 1 s ile Ziegler-Nichols PID kontrol ile gerçekleşmiştir. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID, Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID ve Sugeno model ANFIS modelinde aşma gerçekleşmemiştir. En hızlı yerleşme zamanı 3 s ile üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID kontrol ile gerçekleşmiştir. En az kalıcı durum hatası -0.57 VAr olan Ziegler-Nichols PID kontrol ile gerçekleşmiştir.

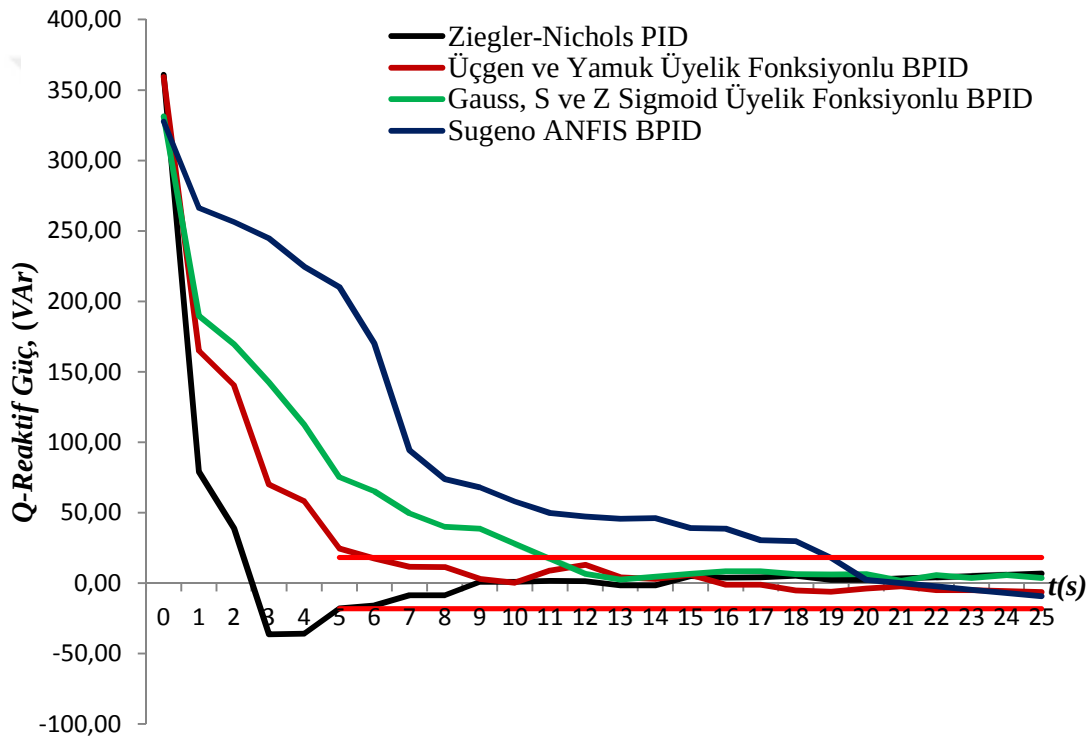


Şekil 5.47. Denetim yöntemlerinin 208 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyonu için ortalama reaktif güç değişimleri.

Çizelge 5.8. Denetim yöntemlerinin 208 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyonu için ortalama reaktif gücün değişimi performans verileri.

<i>PID Denetleyici</i>	<i>Ziegler-Nichols</i>	<i>Üçgen-Yamuk BPID</i>	<i>Gauss-S_Z Sigmoid BPID</i>	<i>Sugeno ANFIS BPID</i>
<i>Yükselme zamanı</i>	1 s	3 s	7 s	14 s
<i>Aşım</i>	53.56 VAr	0 VAr	0 VAr	0 VAr
<i>Yerleşme Zamanı</i>	7 s	3 s	8 s	16 s
<i>Ortalama Kalıcı Durum Hatası</i>	-0.57 VAr	2.08 VAr	6.54 VAr	4.85 VAr

Şekil 5.48.' de ve Çizelge 5.9.'da SK-TKR kompanzatörün 365 VAr endüktif yükün kompanzasyonu ve yöntemlerin yükün devreye girdiği an ortalama reaktif güç değişimi karşılaştırılmaları görülmektedir. En hızlı yükselme zamanı 1 s ile Ziegler-Nichols PID kontrol ile gerçekleşmiştir. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID, Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID ve Sugeno model ANFIS modelinde aşma gerçekleşmemiştir. En hızlı yerleşme zamanı 5 s ile Ziegler-Nichols PID ve üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID kontrol ile gerçekleşmiştir. En az kalıcı durum hatası -0.77 VAr olan Ziegler-Nichols PID kontrol ile gerçekleşmiştir.

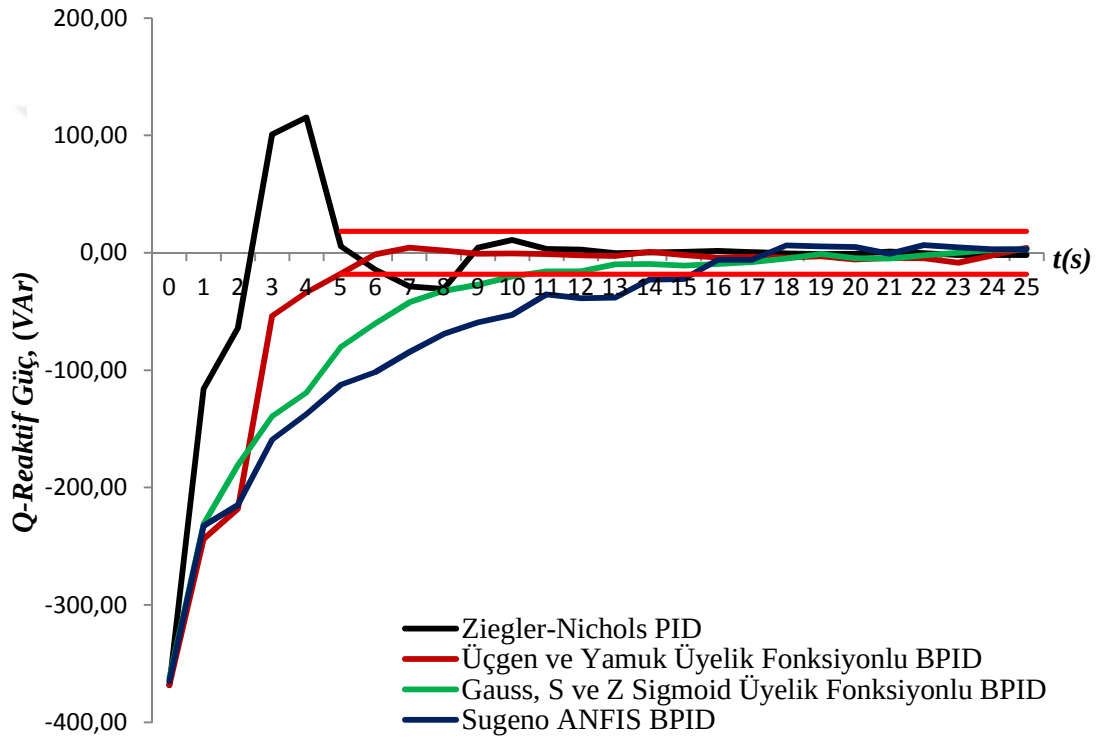


Şekil 5.48. Denetim yöntemlerinin 365 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyonu için ortalama reaktif gücün değişimleri.

Çizelge 5.9. Denetim yöntemlerinin 365 VAr endüktif yükün devreye girdiği an kompanzasyonu için ortalama reaktif gücün değişimi performans verileri.

<i>PID Denetleyici</i>	<i>Ziegler-Nichols</i>	<i>Üçgen-Yamuk BPID</i>	<i>Gauss-S_Z Sigmoid BPID</i>	<i>Sugeno ANFIS BPID</i>
<i>Yükselme zamanı</i>	1 s	4 s	9 s	18 s
<i>Aşım</i>	-36.38 VAr	0 VAr	0 VAr	0 VAr
<i>Yerleşme Zamanı</i>	5 s	5 s	10 s	20 s
<i>Ortalama Kalıcı Durum Hatası</i>	-0.77 VAr	3.02 VAr	7.01 VAr	4.85 VAr

Şekil 5.49.' da ve Çizelge 5.10.'da SK-TKR kompanzatörün 365 VAR endüktif yükün kompanzasyonu ve yöntemlerin yükün devreden çıktığı an ortalama reaktif güç değişimi karşılaştırılmaları görülmektedir. En hızlı yükselme zamanı 2 s ile Ziegler-Nichols PID kontrol ile gerçekleşmiştir. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID, Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID ve Sugeno model ANFIS modelinde aşma gerçekleşmemiştir. En hızlı yerleşme zamanı 5 s ile üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID kontrol ile gerçekleşmiştir. En az kalıcı durum hatası 1.18 VAR olan Ziegler-Nichols PID kontrol ile gerçekleşmiştir.



Şekil 5.49. Denetim yöntemlerinin 365 VAR endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyonu için ortalama reaktif gücün değişimleri.

Çizelge 5.10. Denetim yöntemlerinin 365 VAr endüktif yükün devreden çıktığı an kompanzasyonu için ortalama reaktif gücün değişimi performans verileri.

<i>PID Denetleyici</i>	<i>Ziegler-Nichols</i>	<i>Üçgen-Yamuk BPID</i>	<i>Gauss-S_Z Sigmoid BPID</i>	<i>Sugeno ANFIS BPID</i>
<i>Yükselme zamanı</i>	2 s	3 s	8 s	14 s
<i>Aşım</i>	115.2 VAr	0 VAr	0 VAr	0 VAr
<i>Yerleşme Zamanı</i>	8 s	5 s	10 s	15 s
<i>Ortalama Kalıcı Durum Hatası</i>	1.18 VAr	-2.72 VAr	-6.13 VAr	2.09 VAr

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

SK-TKR yöntemi kullanılarak yapılan bu çalışmada, denetim ve yazılım kolaylığı açısından PLC kullanılmış, bir çok çalışmada kabul görmüş olan uzman bulanık algoritmalar ile reaktif gücü istenilen seviyede tutacak bir kompanzatör gerçekleştirilmiştir.

SK-TKR kompanzatörü, klasik kompanzasyon sistemlerinin, kapasitif ve hızlı değişen endüktif reaktif karakteristikli yüklerin arttığı işletmelere tam bir çözüm üretememesi üzerine, iyi bir alternatif çözüm olmuştur. Sabit kapasite, şönt reaktör ve bu şönt reaktörün üzerinden geçen akımı kontrol eden tristörlü sürücünden oluşan SK-TKR, reaktif gücü istenen değerde tutabilmektedir. Bu sayede, klasik yöntemlerin yetersiz kaldığı işletmelerde reaktif güç kontrolü rahatlıkla yapılabilecektir.

Çalışmada, PID denetim parametreleri bulanık mantık metotları ile uyarlamalı olarak belirlenmiş sabit olmaktan çıkarılmıştır. PID parametrelerini belirlemede yaygın kullanıma sahip olan Ziegler-Nichols frekans cevabı yöntemine benzer kararlılıklar elde edilmiştir.

Bulanık metotlar ile performans verilerinden olan aşma, büyük ölçüde engellenmiş, üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID yöntemi ile yapılan reaktif güç kompanzasyonunda yerleşme zamanı büyük ölçüde daha kısa sürede gerçekleşmiştir. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID yöntemi verimli olmuştur. Gauss ve Sigmoid üyelik fonksiyonlu BPID ve Sugeno model ANFIS BPID ile kontrol yönteminde yerleşme zamanı ve kalıcı durum hatası artış göstermiştir. Fakat yükselme zamanı bulanık metodlar ile düşürülememiştir. Üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlu BPID yönteminde kalıcı durum hatası artış göstermiştir.

İleri çalışmalarda, farklı üyelik fonksiyonu kullanılarak ve üyelik sayıları artırılarak, PLC yerine sayısal sinyal işlemci kullanılarak, yükselme zamanı ve yerleşme zamanı verilerinde daha iyi performans elde edilebilir. Ayrıca, SK-TKR harmonik üreten bir reaktif güç kompanzatörüdür. Çalışmada, harmonik etkileri dikkate alınmamıştır. Toplam harmonik bozulmanın artışının engellenmesi için harmonik analizi yapılarak, SK-TKR uygun pasif filtrelerle birlikte kullanılmalıdır.

Çalışmada denetim ve izleme sistemi olarak tercih edilen SCADA sistemi sayesinde günümüzde çalışılan konular arasında olan akıllı şebekelere entegrasyon dikkate alınmıştır. Dolayısı ile tasarlanan kompanzatörün SCADA sistemi ile çalışmanın analizi ve performansının izlenmesi, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasına yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

ABB, (2017). User manual, <https://new.abb.com/plc/downloads>, 234 s.

Adak, S., Hasan C., Yılmaz A.S., (2018). Simulation and analysis harmonics in power system including nonlinear load, EJONS International Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences, ISSN 2602 -4136, 2, 139-151.

Arifoğlu, U. (2002). Güç sistemlerinin bilgisayar destekli analizi (Birinci baskı), Türkiye: Alfa Yayınları, 395 s.

Bayındır, R., Kaplan, O., Bayyigit, C., Sarıkaya, Y., Hallaçlıoğlu, M. (2011). Plc ve scada kullanılarak bir endüstriyel sistemin otomasyonu. Erciyes Üniversitesi FBE Dergisi, Sayı 27, 107-115.

Bayram, M. (2000). Kuvvetli akım tesislerinde reaktif güç kompanzasyonu, Türkiye:Birsen Yayınevi, 247.

Chaiyatham, T., Ngamroo, I., (2017). Improvement of power system transient stability by PV farm with fuzzy gain scheduling of PID controller. IEEE Systems Journal, 11.3, 1684-1691.

Chandramohan S., Atturulu N., Kumudini D. R., Venkatesh B., (2010). Operating cost minimization of a radial distribution system in a deregulated electricity market through reconfiguration using NSGA method, International Journal of Engineering Science and Technology, 32.2, 126-132.

Çakıt, E. (2008). El becerisine etki eden faktörlerin değerlendirilmesine yönelik bulanık mantık yaklaşımı, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 130 s.

Çolak, İ., Bayındır, R., Bay Ö.F., (2003). Reactive power compensation using a fuzzy logic controlled synchronous motor, Energy Conversion and Management 44.13, 2189-2204.

Çötel, R., Dandil, B., (2016). Dolaylı akım denetim yöntemi ile denetlenen D-STATCOM için oransal+ integral denetleyici tasarımı, Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences, 19.3, 42-52.

Dalmış, F., Tuğ, S., Dalmış, İ. S., Aktaş, T., Kayışoğlu, B., (2018). Laboratuvar tipi gazlaştırmacılar için PLC tabanlı prototip veri toplama ve kontrol sisteminin geliştirilmesi, JOTAF, Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 15.1, 143-156.

Elmas, Ç., (2003). Bulanık mantık denetleyiciler (Dördüncü baskı), Türkiye: Seçkin Yayıncılık, 230 s.

ENDA, (2016).Kullanma Klavuzu, https://enda.com/automation/ssr/phase_angle/rail/erva1/erva1.pdf, 1-2.

EPDK, (2007), Elektrik iletim sistemi arz güvenilirliği ve kalitesi yönetmeliği, Sayı:26398

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Falehi A. D., Rostami M., Doroudi A., Ashrafi A., (2012). Optimization and coordination of SVC-based supplementary controllers and PSSs to improve power system stability using a genetic algorithm, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Cilt 20, No.5, 639-654.

Gani, A., Keçecioğlu, Ö. F., Açıkgoz, H., Şekeli, M., (2015). Uyarlamalı bulanık-PI denetim esaslı dinamik senkron kompanzator ile reaktif güç kompanzasyonu benzetim çalışması. Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences, 18.2, 72-76.

Gedikpınar, M., Güngör, M., (2017). Bir-fazlı indüksiyon motorlar için paralel aktif güç filtresi tabanlı reaktif güç kompanzasyonu, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29.2, 185-193.

Genç, Y., (2016). Statik senkron kompanzatorün bulanık mantık temelli kontrolör ile tasarımı ve analizi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 20.1, 7-12.

Gün, A., (2007). Doğru akım makinalarının PID algoritması ile konum denetimi ve uyarların sınır bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) ile eğitimi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 014, 55-64.

İbrahim, A.M. (2004). Fuzzy logic for embedded systems applications, USA:Newnes, 293 s.

Karakuzu, C., Öztürk, S., (2005). PLC ile BM tabanlı hata düzeltmeli üç fazlı motor hız kontrolü, 11th National Conference on Electric-Electronic-Computer Engineering, İstanbul-Turkey, 78-81.

Karhikeyan, K., Sreenivasan, R., (2017). Analysis of power system stability using fuzzy-PID based STATCOM-controller, Electrical, Instrumentation and Communication Engineering (ICEICE), IEEE, 1-6.

Kayışlı, K., Uğur, M., (2017). Üç serbestlik dereceli bir robot kolun bulanık mantık ve PID ile kontrolü. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 5.4, 223-233.

Keskin, F., Köse, H., Gül, H., Aydemir, M.T., (2015). Faz kaydırmalı darbe genişlik modülasyonlu 20 kVA gücünde bir AA gerilim düzenleyici devrenin tasarımı ve gerçekleştirilmesi, EMO Bilimsel Dergi, 5.9, 6-17.

Kıyan, M. (2010). Implementation of low voltage thyristor controlled reactor VAR compensator, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 105 s.

Kıyan, M., Aydemir, M.T. (2014). Load balancing, reactive power compensation and neutral current elimination in three phase - Four wire systems. IEEE 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 1278-1282.

KLEMSAN, (2011). Remo-EA enerji analizörü kullanma klavuzu, 73-92

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Lak A., Nazarpour D., Ghahramani H.,(2012). Novel methods with fuzzy logic and ANFIS controller based SVC for damping sub-synchronous resonance and low-frequency power oscillation, 20th Iranian Conference on Electrical Engineering, IEEE, 450-455.

Li, H., Chen, Z.,(2008). Overview of different wind generator systems and their comparisons, Renewable Power Generation, Cilt 2, 123 -138.

MATHWORKS, (2010). Fuzzy logic toolbox user's guide, www.mathworks.com.

Minaz, M., Gün, A., Kurban, M., İmal, N. (2013). Bilecik ilinin farklı yöntemler kullanılarak basınç, sıcaklık ve rüzgâr hızı tahmini. Gazi Osman Paşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Sayı: 3, 100-111.

Mirzaoğlu, İ., Sarıtaş, M. (2008). Plc ve scada kullanarak bir ırmık üretim sisteminin otomasyonu, Elektrik – Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, 1-6.

Moradi, B., Demirci, R., (2015). Fuzzy logic and graph based segmentation, Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 23th. IEEE, 479-482.

Nalbantoğlu, M., Güler, Y., (2017). SSSC tabanlı kaskad kontrolör ile güç sistem kararlılığının iyileştirilmesi, DÜMF Mühendislik Dergisi, 8.1, 89-100.

Nath, U. M., Dey, C., Mudi, R. K., (2017). Fuzzy-based auto-tuned IMC-PID controller for level control process, International Conference on Computational Intelligence, Communications, and Business Analytics, Springer, Singapore, 372-381.

Niang T., Zhong C., Hui S. Y., (2008). Discussion on nonlinear PID based on nonlinear norm transformation controlling method applied to SVC, Proceedings of the 27th Chinese Control Conference, IEEE, 61-63.

Omid, M., Lashgari, M., Mobli, H., Alimardani, R., Mohtasebi, S., Hesamifard, R., (2010). Design of fuzzy logic control system incorporating human expert knowledge for combine harvester, Expert Systems with Applications, 37, 7080–7085.

Özdemir, M. T., Orhan, A., (2012). An experimental system for electrical and mechanical education: Micro hydro power plant prototype, Procedia - Social and Behavioral Sciences 47, 2114 – 2119.

Özdemir, O., Tekin, A., (2016). Evaluation of the presentation skills of the pre-service teachers via fuzzy logic, Computers in Human Behavior, 61, 288-299.

Patel, V. P., Mewada, H., Tilwalli, M. R., (2017). Designing communication techniques for PLC in automation with considering cleaning machine, Computing Methodologies and Communication (ICCMC), IEEE, 867-870.

Peri, V. M., Simon, D., (2005). Fuzzy logic control for an autonomous robot. In Fuzzy Information Processing Society, IEEE, NAFIPS. Annual Meeting of the North American, 337-342.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Rao C.S.,(2010). Adaptive neuro-fuzzy based inference system for load frequency control of hydrothermal system under deregulated environment, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2.12, 6954-6962.
- Saad, N., Arrofiq, M., (2012). A PLC-based modified-fuzzy controller for PWM driven induction motor drive with constant V/Hz Ratio control, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* , 28, 95–112.
- Schneider Electric, (2016), *Industrial electrical network design guide*, 580 s.
- Shree S.B., Kamaraj N., (2016). Hybrid neuro fuzzy approach for automatic generation control in restructured power system, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 74, 274-285.
- Stork, M., Mayer, D., (2017). Reactive power compensation in energy transmission systems with sinusoidal and nonsinusoidal currents, *Reactive Power Control in AC Power Systems*, Springer, 137-190.
- SYMMETRE, (2007), Honeywell SymetrE user guide.
- Şen, Z., (2004), *Mühendislikte bulanık mantık ile modelleme prensipleri (İkinci Baskı)*, Türkiye: Su Vakfı yayınları, 191s.
- Tan, Y., Shuai, C., Jiao, L., Shen, L. (2017). An adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) approach for measuring country sustainability performance. *Environmental Impact Assessment Review*, 65, 29-40.
- Tör, O. B., Cebeci, M. E., Koç, M., Güven, A. N., (2018). Primer elektrik dağıtım şebekelerinin uzun dönem kapasite artış yatırımlarının planlama metriklerine dayalı dinamik optimizasyonu, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33.1, 227-237.
- Udhayashankar C., Thottungal R., Yuvaraj M., (2014). Transient stability improvement in transmission system using SVC with fuzzy logic control, *International Conference of Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*,1-4.
- Wang J., Fu C., Zhang Y., (2008). SVC control system based on instantaneous reactive power theory and fuzzy PID, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 55. 4, 1658-1665.
- Yazar, I., Kıyak, E., Çalışkan, F., (2014). A new approach for compressor and turbine performance map modeling by using ANFIS structure, *Progress in Exergy, Energy, and the Environment*, Springer International Publishing, 541-551.
- Yılmaz, H., Sarıtaş, M., (2005). The use of PLC instrument at bread production Line, 11th National Conference on Electric-Electronic-Computer Engineering, İstanbul, Turkey, 5-9.
- Yüksel, İ., (2001). *Otomatik kontrol-Sistem dinamiği ve denetim sistemleri (4.baskı)*, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 357 s.
- Zhang, H., Davigny, A., Colas, F., Poste, Y., Robyns, B., (2012). Fuzzy logic based energy management strategy for commercial buildings integrating photovoltaic and storage systems, *Energy and Buildings* , 54, 196–206.

EKLER

Ek 1. Ziegler-Nichols Frekans Cevabı Yöntemi PLC Programı

```
PROGRAM PLC_PRG
VAR
    TCR: PID;
    AI_SCALE: LIN_TRAFO;
    SP: REAL := 0;
    KP: REAL := 0.6;
    I: REAL := 0.5;
    D: REAL := 0.125;
    Q: REAL;
    TON: TON;
    TON2: TON;
    TOF2: TOF;
    H: TIME;
    AO_SCALE: LIN_TRAFO;
END_VAR
```

Ek 2. Üçgen ve Yamuk Üyelik Fonksiyonlu BPID PLC Programı

```
VAR_GLOBAL
    Q: REAL;
    AI_SCALE: LIN_TRAFO;
    TON: TON;
    TOF: TOF;
    TON2: TON;
    TOF2: TOF;
    PULSE: BOOL;
    Q1: REAL;
    ERROR: REAL;
    C_1: REAL;
    C_2: REAL;
    LC_1: REAL;
    LC_2: REAL;
    OK_1: REAL;
    OK_2: REAL;
    LI_1: REAL;
    LI_2: REAL;
    I_1: REAL;
    I_2: REAL;
    N_1: REAL;
    N_2: REAL;
    NK_1: REAL;
    NK_2: REAL;
    Z_1: REAL;
    Z_2: REAL;
    PK_1: REAL;
    PK_2: REAL;
    P_1: REAL;
    P_2: REAL;
    C: REAL;
    LC: REAL;
    OK: REAL;
    LI: REAL;
    I: REAL;
    N: REAL;
    NK: REAL;
    Z: REAL;
    PK: REAL;
    P: REAL;
    B_1: REAL;
    B_2: REAL;
    B_3: REAL;
    B_4: REAL;
    B: REAL;
    M_1: REAL;
    M_2: REAL;
    M_3: REAL;
    M_4: REAL;
```

```

M_5: REAL;
M_6: REAL;
M_7: REAL;
M_8: REAL;
M_9: REAL;
M_10: REAL;
M_11: REAL;
M_12: REAL;
M: REAL;
S_1: REAL;
S_2: REAL;
S_3: REAL;
S_4: REAL;
S_5: REAL;
S_6: REAL;
S_7: REAL;
S_8: REAL;
S_9: REAL;
Sm: REAL;
PID: PID;
SP: REAL;
KP: REAL;
TN: REAL;
TV: REAL;
HIZ: TON;
H: TIME;
END_VAR
(* ERROR MEMBERSHIP FUNCTION *)
IF (-400>=Q ) THEN C_1 := 1;
ELSE;
END_IF;
IF (Q>-400 AND -50>=Q ) THEN C_2 := ((-50-Q)/350);
ELSE;
END_IF;
IF (Q>-400 AND -50>=Q ) THEN LC_1 := ((Q+400)/350);
ELSE;
END_IF;
IF (Q>-50 AND 0>=Q ) THEN LC_2 := ((-50-Q)/50);
ELSE;
END_IF;
IF (Q>-50 AND 0>=Q ) THEN OK_1 := ((Q+50)/50);
ELSE;
END_IF;
IF (Q>0 AND 50>=Q ) THEN OK_2 := ((Q)/50);
ELSE;
END_IF;
IF (Q>0 AND 50>=Q ) THEN LI_1 := ((50-Q)/50);
ELSE;
END_IF;
IF (Q>50 AND 400>=Q ) THEN LI_2 := ((Q-50)/350);
ELSE;

```



```

END_IF;
IF (Q>50 AND 400>=Q ) THEN I_1 := ((Q-50)/350);
ELSE;
END_IF;
IF (Q>400 ) THEN I_2 := 1;
ELSE;
END_IF;
C := MAX(C_1, C_2);
LC := MAX(LC_1, LC_2);
OK := MAX(OK_1, OK_2);
LI := MAX(LI_1, LI_2);
I := MAX(I_1, I_2);
(* RULE BASE *)
IF (C>0 AND N>0) THEN B_1:= MIN (C, N);
ELSE;
END_IF;
IF (C>0 AND NK>0) THEN M_1:= MIN (C, NK);
ELSE;
END_IF;
IF (C>0 AND Z>0) THEN S_1:= MIN (C, Z);
ELSE;
END_IF;
IF (C>0 AND PK>0) THEN M_2:= MIN (C, PK);
ELSE;
END_IF;
IF (C>0 AND P>0) THEN B_2:= MIN (C, P);
ELSE;
END_IF;
IF (LC>0 AND N>0) THEN M_3:= MIN (LC, N);
ELSE;
END_IF;
IF (LC>0 AND NK>0) THEN M_4:= MIN (LC, NK);
ELSE;
END_IF;
IF (LC>0 AND Z>0) THEN S_2:= MIN (LC, Z);
ELSE;
END_IF;
IF (LC>0 AND PK>0) THEN M_5:= MIN (LC, PK);
ELSE;
END_IF;
IF (LC>0 AND P>0) THEN M_6:= MIN (LC, P);
ELSE;
END_IF;
IF (OK>0 AND N>0) THEN S_3:= MIN (OK, N);
ELSE;
END_IF;
IF (OK>0 AND NK>0) THEN S_4:= MIN (OK, NK);
ELSE;
END_IF;
IF (OK>0 AND Z>0) THEN S_5:= MIN (OK, Z);
ELSE;

```

```

END_IF;
IF (OK>0 AND PK>0) THEN S_6:= MIN (OK, PK);
ELSE;
END_IF;
IF (OK>0 AND P>0) THEN S_7:= MIN (OK, P);
ELSE;
END_IF;
IF (LI>0 AND N>0) THEN M_7:= MIN (LI, N);
ELSE;
END_IF;
IF (LI>0 AND NK>0) THEN M_8:= MIN (LI, NK);
ELSE;
END_IF;
IF (LI>0 AND Z>0) THEN S_8:= MIN (LI, Z);
ELSE;
END_IF;
IF (LI>0 AND PK>0) THEN M_9:= MIN (LI, PK);
ELSE;
END_IF;
IF (LI>0 AND P>0) THEN M_10:= MIN (LI, P);
ELSE;
END_IF;
IF (I>0 AND N>0) THEN B_3:= MIN (I, N);
ELSE;
END_IF;
IF (I>0 AND NK>0) THEN M_11:= MIN (I, NK);
ELSE;
END_IF;
IF (I>0 AND Z>0) THEN S_9:= MIN (I, Z);
ELSE;
END_IF;
IF (I>0 AND PK>0) THEN M_12:= MIN (I, PK);
ELSE;
END_IF;
IF (I>0 AND P>0) THEN B_4:= MIN (I, P);
ELSE;
END_IF;
(* DEFUZZIFICATION *)
Sm := MAX(MAX(MAX(MAX(S_1, S_2), MAX(S_3, S_4)),MAX( MAX(S_5, S_6),
MAX(S_7, S_8))), S_9);
M :=MAX(MAX(MAX(MAX(M_1, M_2), MAX(M_3, M_4)),MAX( MAX(M_5, M_6),
MAX(M_7, M_8))), MAX(MAX(M_9, M_10), MAX(M_11, M_12)));
B := MAX(MAX(B_1,B_2), MAX(B_3, B_4));
KP := ((1 * Sm)+(3 * M)+(12 * B))/(Sm+M+B);
TN := ((0.4 * Sm)+(0.6 * M)+ (1 * B))/(Sm+M+B);
TV := ((0.02 * Sm)+(0.06 * M)+ (0.09 * B))/(Sm+M+B)

```

Ek 3. Gauss ve Sigmoid Üyelik Fonksiyonlu BPID PLC Programı

```
VAR_GLOBAL
    Q: REAL;
    AI_SCALE: LIN_TRAFO;
    TON: TON;
    TOF: TOF;
    PULSE: BOOL;
    Q1: REAL;
    PID: PID;
    SP: REAL;
    KP: REAL;
    TN: REAL;
    TV: REAL;
    HIZ: TON;
    H: TIME;
    ERROR: REAL;
    C1: REAL;
    C2: REAL;
    OK1 : REAL;
    OK2: REAL;
    I1: REAL;
    I2: REAL;
    C: REAL;
    OK: REAL;
    I: REAL;
    N1: REAL;
    N2: REAL;
    Z1: REAL;
    Z2: REAL;
    P1: REAL;
    P2: REAL;
    N: REAL;
    Z: REAL;
    P: REAL;
    B1: REAL;
    M1: REAL;
    M2: REAL;
    S1: REAL;
    S2: REAL;
    S3: REAL;
    M3: REAL;
    M4: REAL;
    B2: REAL;
    Sm: REAL;
    M: REAL;
    B: REAL;
END_VAR
(* ERROR MEMBERSHIP FUNCTION *)
IF ( -200 >= Q ) THEN C1 := 1 ;
```

```

ELSE;
END_IF;
IF ( Q > -200 AND 0 >= Q ) THEN C2 := (1/(1+EXP(Q-0.5)));
ELSE;
END_IF;
IF ( Q > -200 AND 0 >= Q ) THEN OK1 := EXP (-1)*(Q*Q/2) ;
ELSE;
END_IF;
IF ( Q > 0 AND 200 >= Q ) THEN OK2 := EXP (-1)*(Q*Q/2) ;
ELSE;
END_IF;
IF ( Q > 0 AND 200 >= Q ) THEN I1 := EXP (1/(1+EXP(-1)*(Q-0.5))) ;
ELSE;
END_IF;
IF ( Q >= 200 ) THEN I2 := 1 ;
ELSE;
END_IF;
C := MAX(C1,C2);
OK := MAX(OK1,OK2);
I := MAX(I1,I2);
(* ERROR DERIVATE MEMBERSHIP FUNCTION *)
IF ( -50 >= ERROR ) THEN N1 := 1 ;
ELSE;
END_IF;
IF ( ERROR > -50 AND 0 >= ERROR ) THEN N2 := (1/(1+EXP(ERROR-0.5)));
ELSE;
END_IF;
IF ( ERROR > -50 AND 0 >= ERROR ) THEN Z1 := EXP (-1)*(ERROR*ERROR/2) ;
ELSE;
END_IF;
IF ( ERROR > 0 AND 50 >= ERROR ) THEN Z2 := EXP (-1)*(ERROR*ERROR/2) ;
ELSE;
END_IF;
IF ( ERROR > 0 AND 50 >= ERROR ) THEN P1 := EXP (1/(1+EXP(-1)*(ERROR-0.5))) ;
ELSE;
END_IF;
IF ( ERROR >= 50 ) THEN P2 := 1 ;
ELSE;
END_IF;
N := MAX(N1,N2);
Z := MAX(Z1,Z2);
P := MAX(P1,P2);
(* RULE BASE *)
IF (C>0 AND N>0) THEN B1:= MIN (C, N);
ELSE;
END_IF;
IF (C>0 AND Z>0) THEN M1:= MIN (C, Z);
ELSE;
END_IF;
IF (C>0 AND P>0) THEN M2:= MIN (C, P);
ELSE;

```

```

END_IF;
IF (OK>0 AND N>0) THEN S1:= MIN (OK, N);
ELSE;
END_IF;
IF (OK>0 AND Z>0) THEN S2:= MIN (OK, Z);
ELSE;
END_IF;
IF (OK>0 AND P>0) THEN S3:= MIN (OK, P);
ELSE;
END_IF;
IF (I>0 AND N>0) THEN M3:= MIN (I, N);
ELSE;
END_IF;
IF (I>0 AND Z>0) THEN M4:= MIN (I, Z);
ELSE;
END_IF;
IF (I>0 AND P>0) THEN B2:= MIN (I, P);
ELSE;
END_IF;
(* DEFUZZIFICATION *)
Sm :=MAX(MAX(S1,S2),S3);
M :=MAX(MAX(M1,M2),MAX(M3,M4));
B :=MAX(B1,B2);
KP := ((1 * Sm)+(2 * M)+ (3.5 * B))/(Sm+M+B);
TN := ((0.4 * Sm)+(0.6 * M)+ (1 * B))/(Sm+M+B);
TV := ((0.02 * Sm)+(0.06 * M)+ (0.09 * B))/(Sm+M+B)

```

Ek 4. ANFIS PLC Programı

PROGRAM ANFIS_UNIT

VAR

IN_1_MF_1: REAL;
IN_1_MF_2: REAL;
IN_1_MF_3: REAL;
OUT_1_MF_1: REAL;
OUT_1_MF_2: REAL;
OUT_1_MF_3: REAL;
OUT_2_MF_2: REAL;
OUT_2_MF_1: REAL;
OUT_2_MF_3: REAL;
OUT_3_MF_1: REAL;
OUT_3_MF_2: REAL;
OUT_3_MF_3: REAL;
Q: REAL;
AI_SCALE: LIN_TRAFO;
TON: TON;
TOF: TOF;
TON2: TON;
TOF2: TOF;
PULSE: BOOL;
Q1: REAL;
PID: PID;
SP: REAL;
HIZ: TON;
H: TIME;
ERROR: REAL;
KP: REAL;
Td: REAL;
Ti: REAL;

END_VAR

IN_1_MF_1:= EXP((-Q+389.4)*(Q+389.4))/(2*128.5*128.5));

IN_1_MF_2:= EXP((-Q+86.7)*(Q+86.7))/(2*128.5*128.5));

IN_1_MF_3:= EXP((-Q-216)*(Q-216))/(2*128.5*128.5));

IF (IN_1_MF_1>0) THEN

OUT_1_MF_1 := Q*(-2.109E-006)+0.62;

OUT_2_MF_1:=Q*(-8.332E-007)+0.4993;

OUT_3_MF_1:=Q*(-4.394E-007)+0.1248;

ELSE;

END_IF;

IF (IN_1_MF_2>0) THEN

OUT_1_MF_2 := Q*(-8.332E-007)+0.6;

OUT_2_MF_2:=Q*(-6.944E-007)+0.5;

OUT_3_MF_2:=Q*(-1.736E-007)+0.125;

ELSE;

END_IF;

IF (IN_1_MF_3>0) THEN

```

OUT_1_MF_3 :=Q*(-5.502E-007)+0.601;
OUT_2_MF_3:=Q*(-4.585E-007)+0.5001;
OUT_3_MF_3:=Q*(-1.146E-007)+0.125;
ELSE;
END_IF;
KP:=(OUT_1_MF_1*IN_1_MF_1+OUT_1_MF_2*IN_1_MF_2+OUT_1_MF_3*IN_1_MF_3)
/(IN_1_MF_1+IN_1_MF_2+IN_1_MF_3);
Ti:=(OUT_2_MF_1*IN_1_MF_1+OUT_2_MF_2*IN_1_MF_2+OUT_2_MF_3*IN_1_M
IN_1_MF_1+IN_1_MF_2+IN_1_MF_3);
Td:=(OUT_3_MF_1*IN_1_MF_1+OUT_3_MF_2*IN_1_MF_2+OUT_3_MF_3*IN_1_M
(IN_1_MF_1+IN_1_MF_2+IN_1_MF_3);.

```



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Yalçın DOĞRUL
Doğum tarihi ve yeri : 1982-KÜTAHYA
e-mail : yalcindogrul@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Dumlupınar Üniversitesi/Elk.-Elkt. Müh.	2016
Lisans	Marmara Üniversitesi/Elk. Öğr.	2004
Lise	Kütahya Endüstri Meslek Lisesi/Elk. Böl.	1999

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2006	EMS Mühendislik-İSTANBUL	Otomasyon Proje Sorumlusu
2011	MARTUR-KÜTAHYA	Tesis Bakım Sorumlusu
2012	Hilton Garden Inn-KÜTAHYA	Teknik Müdür

Yayınlar

Y. Dogrul, Y. Aslan, Single Phase Static Reactive Power Compensation with Adaptive Fuzzy-PID By Using PLC, International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE) March 2016 Issue 26 Volume 8 Number 1 Pages 45-49.

Y. Doğrul , Y. Aslan “Comparison of Fuzzy-PID Controlled Single Phase Static Reactive Power Compensator with Different Membership Functions, International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering 2016, pp.1-5, June 30-July 2, 2016, Bucharest, Romania.

Y. Doğrul , Y. Aslan “Real Time PLC Control Of Single Phase Static VAR compensator With PID And Fuzzy-PID, 11th International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering”, pp.109-113, Sept 10-12, 2015, Bucharest, Romania.

Y. Doğrul, Y. Aslan: “PLC ile Farklı Algoritmalar Kullanılarak Statik Reaktif Güç Kompanzasyonu,” ELECO, Bursa, 2014.