

57726

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE REAKTİF GÜCÜN BULANIK MANTIK
DENETİMLİ STATİK VAR SİSTEMLERİNDEN KARŞILANMASI

Elektrik Müh. Ersan GÜLAY

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

“Elektrik Yüksek Mühendisi”

Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07.10.1996
Tezin Savunma Tarihi : 04.11.1996

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. İsmail H. ALTAŞ

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Sefa AKPINAR

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Zakir ALLAHVERDİEV

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Yaşar GÖK

Ekim 1996

TRABZON

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı çerçevesinde, reaktif gücün bulanık mantık denetimli statik VAR sistemlerinden karşılanması üzerine gerçekleştirilmiştir.

Statik VAR kompanzasyon sisteminin denetiminin bulanık mantıkla gerçekleştirilmesinin sistem performansını arttıracakı düşünülmektedir. Gerek reaktif güç değişiminin çok hızlı olduğu işletmelerde statik VAR sistemlerinin denetiminin oldukça önem kazanması, gerekse bulanık mantık konusunun kontroldeki etkinliği çalışma konusunu güncel ve faydalı kılmaktadır.

Çalışma, sistem kontrolü alanında önemli olabilecek gelişmeler önermiş ve uygulamıştır. Statik VAR sistemlerinin denetimi ve bulanık mantık ile ilgilenen araştırmacılar için bu çalışma, faydalı bir kaynak niteliği taşımaktadır.

Çalışmalarım sırasında benden sevgi ve sabrını esirgemeyen eşim Züleyha'ya ve beni daima destekleyerek bugünlere gelmemi sağlayan aileme teşekkür ederim.

Ayrıca, danışmanlığımı üstlenerek çalışmalarımı yönlendiren Sayın Yrd. Doç. Dr. İsmail H. ALTAŞ'a ve çalışmalarımda bana yardımcı olan tüm akademik ve idari personele teşekkür ederim.

Trabzon, Ekim 1996

Ersan GÜLAY

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİL LİSTESİ.....	VII
TABLO LİSTESİ.....	IX
SEMBOL LİSTESİ.....	X
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1 Giriş.....	1
1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı.....	3
1.3 Bulanık Mantık Denetimin Diğer Denetim Sistemleri ile Kıyaslanması... ..	5
1.3.1 Bulanık Denetim ve Klasik Denetim.....	5
1.3.2 Bulanık Denetim ve Kural Tabanlı Denetim.....	6
1.3.3 Bulanık Denetim ve Adaptif Denetim.....	7
1.3.4 Bulanık Denetim ve Yapay Sinir Ağları.....	8
1.4 Bulanık Denetimin Geleceği.....	8
1.5 Literatür Araştırması.....	9
1.6 Statik Reaktif Güç Kompanzasyonu Yöntemleri.....	13
1.6.1 Doymuş Reaktör ile Dengelenen Sabit Kondansatör ile Kompanzasyon.....	13
1.6.2 Tristör Anahtarlama Kapasitörlerden Oluşan Kompanzasyon Sistemi.....	15
1.6.3 Tristör Anahtarlama Reaktörlerden Oluşan Kompanzasyon Sistemi.....	18
1.6.4 Sabit Kapasitör ve Tristör Denetimli Reaktörle Kompanzasyon Sistemi.....	20
1.6.5 Tristör Anahtarlama Kapasitörler, Tristör Anahtarlama Reaktörler ve Tristör Denetimli Reaktörden Oluşan Kompanzasyon Sistemi.....	22
1.7 Üç Fazlı Dengesiz Bir Yükün Kompanzasyonunun Simetrik Bileşenler Yöntemi ile İncelenmesi.....	23
1.8 Statik VAR Kompanzasyon Modeli ve Analizi.....	25
1.9 Tristör Kontrollü Reaktörün Harmonik Analizi.....	28
1.10 Harmoniklerle Kondansatörlerin Yüklenmesi.....	30
1.11 Harmoniklerin Süzülmesi.....	32
1.12 Filtre Devrelerinin Hesabı.....	32
1.13 Orantı-İntegral Etki ve Denetim Organı (PI Denetim).....	33

1.14	Bulanık Küme.....	35
1.14.1	Klasik Küme ve Bulanık Küme.....	35
1.14.2	Bulanık Küme Teorisi.....	36
1.14.3	Bulanık Kümelerin Temel Şartları.....	37
1.14.4	Bulanık Kümelerin Özellikleri.....	41
1.14.4.1	Sayısal Büyüklük.....	41
1.14.4.2	Alt Küme.....	41
1.14.4.3	Eşit Küme.....	42
1.14.4.4	Uygun Alt Küme.....	42
1.14.4.5	Bileşim Özelliği.....	42
1.14.4.6	Kesişim Özelliği.....	43
1.14.4.7	Tümleyen Özelliği.....	43
1.14.4.8	Yayma (Extension) İlkesi.....	44
1.14.5	Zadeh'e Göre Bazı Bulanık Özellikler.....	46
1.14.6	Bulanık Sistem Yapısı.....	48
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	53
2.1	Bulanık Mantık.....	53
2.2	Yükün Çektiği Reaktif Gücün Bulanık Mantık Denetimli Statik VAR Sistemlerinden Karşılanması.....	57
2.2.1	Matematiksel Yapı.....	59
2.2.2	Program Algoritması.....	61
2.3	Reaktif Güç Denetiminin PI Denetleyici ile Gerçekleştirilmesi.....	62
3.	BULGULAR.....	63
4.	İRDELEME.....	68
5.	SONUÇLAR.....	70
6.	ÖNERİLER.....	71
7.	KAYNAKLAR.....	72
8.	EKLER.....	75
9.	ÖZGEÇMİŞ.....	86

ÖZET

Elektrik güç sistemlerinde tüketici yükler genellikle motor türünde ve endüktif karakterde olduklarından şebekeden yararlı aktif gücün yanında reaktif güç de çekerler. Motorlarda döner alanın, transformatörlerde magnetik alanın oluşturulabilmesi için her ne kadar bir miktar reaktif güç gerekiyorsa de, iletim ve dağıtım sistemlerinden daha fazla aktif güç iletebilmek için reaktif güç miktarını en az düzeyde tutmak gerekmektedir. Bu nedenle, büyük güç harcayan işletmelerde, reaktif güç ihtiyacı giriş terminallerine bağlanan kompanzator sistemlerinden sağlanır.

Enerji sistemlerinde güvenilirliği, verimliliği ve değişik çalışma koşullarında sistemin kararlılığını sağlayabilmek için sürekli olarak yeni kontrol teknikleri geliştirilmektedir. Bu çalışmada reaktif güç kompanzasyonu, bulanık mantık denetimli Sabit Kapasitör ve Tristör Kontrollü Reaktör tipi kompanzatorle yapılmıştır. Böylece güç faktörü düzeltimi, dinamik gerilim kontrolü sağlanmakta, iletim hatlarının güç taşıma kapasitelerinin yükseltilmesi ve reaktif güç akışının neden olduğu kayıplar en alt düzeye indirilmektedir.

Sabit Kapasitör (SK) ve Tristör Kontrollü Reaktör (TKR) tipi kompanzatorde kompanzasyon işlemi, reaktörü sisteme bağlayan tristörlerin tetikleme açılarının kontrolü ile sağlanmaktadır. Bununla birlikte bu kompanzator sisteminin lineer olmaması, matematiksel olarak modellenmelerini güçleştirdiğinden sistem gerektiği gibi tanımlanamamaktadır. Bulanık mantık teorisine dayalı kontrol sistemlerinin kullanılması ile klasik kontrol sistemleriyle denetimin güçleştiği, matematiksel modelleri oluşturulamayan sistemlerde denetimde büyük kolaylıklar sağlanmıştır. Bu çalışmada sistemin matematiksel bir modeline gerek duymadan, sistem çıkışı ile girişi arasındaki etkin ilişkiyi kullanarak sonuca giden bulanık mantık esaslarına dayalı bir kontrol işlemi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Reaktif güç kompanzasyonu, bulanık mantık, sabit kapasitörler ,
tristör kontrollü reaktörler, kontrol sistemleri.

SUMMARY

Fuzzy Logic Controlled Static VAR Compensation in Electric Power Systems

Since most of the load types in power systems are motor and inductive, they require reactive power as well as active power. Although the reactive power is needed to generate rotating field in motors and magnetizing current in transformers, the amount of the reactive power in transmission and distribution systems should be kept at minimum level in order to deliver more active power to loads. Therefore, the reactive power requirement supplied from compensating systems that installed at the input terminals of the large loads.

In order to have secure, efficient and stable operation of power systems, new control strategies and methods have been developed continuously. In this study, a reactive power compensator that consist of Static Capacitors and Thyristor Controlled Reactors is studied. Thus, dynamic voltage and power factor control are obtained resulting in an increment in the power transmission capacity of transmission systems due to decreased reactive power losses.

The compensation with Static Capacitors (SC) and Thyristor Controlled Reactors (TCR) is done by controlling the firing instants of the thyristor groups. However, the operating characteristic of SC+TCR systems are not linear and they can not be modelled efficiently by classical methods. With the application of fuzzy logic based controllers, it has become easier to control the systems that are too difficult to be modelled mathematically for the classical control systems. In this study, the relationship between system output and input is used by a fuzzy logic based controller to obtain the required system operation without a mathematical model.

Key Words: Reactive power compensation, fuzzy logic, static capacitors, thyristor controlled reactors, control systems.

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Doymuş bir reaktörün akım ve gerilim karakteristiği.....	14
Şekil 2. Doymuş reaktör ile kompanzasyon ayarı prensip bağlama şeması.....	15
Şekil 3. Tristör anahtarlama kapasitörlerle statik VAR kompanzasyonu	15
Şekil 4. Tristör anahtarlama kondansatör devresi ile akım ve gerilimin zamanla değişimi. (a) Bağlantı şeması. (b) Gerilim ve akım eğrileri.....	16
Şekil 5. Tristör anahtarlama reaktörlerle kompanzasyonun prensip bağlama şeması.....	18
Şekil 6. Tristör anahtarlama reaktör devresi ile akım ve gerilimin zamanla değişimi. (a) Prensip bağlantı şeması. (b) Gerilim ve akım eğrileri.....	19
Şekil 7. Sabit kapasitör ve tristör kontrollü reaktörle kompanzasyonun prensip bağlama şeması.....	21
Şekil 8. Tristör denetimli reaktörün $\alpha=135^\circ$ için geriliminin ve akımının değişimi.....	22
Şekil 9. TAK, TAR ve TDR'den oluşan kompanzasyon sistemi ile kompanzasyonun prensip bağlama şeması.....	23
Şekil 10. Dengesiz Δ bağlı 3 - fazlı yük ve Δ bağlı kompanzasyon.....	24
Şekil 11. Statik VAR kompanzasyonun şematik gösterimi.....	26
Şekil 12. Statik VAR kompanzasyonun sürekli halde gerilim-reaktif güç bağıntısı.....	27
Şekil 13. Bir güç sisteminin statik VAR kompanzasyonunun blok gösterimi.....	27
Şekil 14. TKR akımının bazı tetikleme açılarındaki harmonik dağılımı. (a) $\alpha=120^\circ$. (b) $\alpha=135^\circ$. (c) $\alpha=90^\circ$ açı değerleri için.....	30
Şekil 15. Orantı-İntegral (PI) denetleyici modeli.....	33
Şekil 16. Bulanık küme ile klasik kümenin karşılaştırılması.....	35
Şekil 17. Sıfıra yakın gerçel sayıların bulanık kümesinin bir olası üyelik fonksiyonu.....	37

Şekil 18. Doğal bir bulanık küme ve üyelik fonksiyonları.....	38
Şekil 19. Normalize edilmemiş bir bulanık küme.....	39
Şekil 20. R^{2s} de tanımlı bir konveks bulanık kümenin α kesimleri.....	40
Şekil 21. Konveks olmayan bir bulanık küme.....	41
Şekil 22. OR, AND, NOT A işlevlerinin grafikte gösterimi.....	44
Şekil 23. Bulanık bir sistemin ana blokları.....	48
Şekil 24. Üç ayrı tip için bulanık sistemin grafiksel gösterimi.....	50
Şekil 25. Hata ve hatadaki değişimin üyelik derecelerinin bulunması.....	53
Şekil 26. Bir bulanık kontrol sisteminin işlem adımları.....	56
Şekil 27. Kontrol işleminin blok diyagramı.....	57
Şekil 28. İlk üyelik fonksiyonu.....	58
Şekil 29. İkinci üyelik fonksiyonu.....	59
Şekil 30. Bulanık mantık denetimli sistemin kontrol programı algoritması.....	61
Şekil 31. PI denetimli kompanzasyon sisteminin blok diyagramı.....	62
Şekil 32. Yükün çekebileceği maksimum reaktif gücü çektiği durumda şebekeden çekilen reaktif gücün değişimi.....	63
Şekil 33. Yükün çekebileceği maksimum reaktif gücün yarısını çektiği durumda şebekeden çekilen reaktif gücün değişimi.....	64
Şekil 34. Yükün çekebileceği maksimum reaktif gücü çektiği durumda şebekenin güç katsayısının değişimi.....	65
Şekil 35. Yükün çekebileceği maksimum reaktif gücün yarısını çekmesi durumunda şebeknin güç katsayısının değişimi.....	66

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. α tetikleme açısına bağı olarak m , θ_l , θ_h ve k değerleri.....	29
Tablo 2. Atanan üyelik dereceleri tablosu.....	38
Tablo 3. Isı kaynağı kontrol kuralları.....	51
Tablo 4. Örnek bir kontrol sistemi için kural tablosu.....	54
Tablo 5. Kural tablosundaki dört bölge.....	55
Tablo 6. Sistemin kontrol kuralları tablosu.....	59



SEMBOL LİSTESİ

- Φ : Magnetik akı, [wb]
U : Gerilim, [V]
N : Sarım sayısı
I : Akım, [A]
f : Frekans, [Hz]
 ω : Açısal frekans, [rad/s]
C : Kapasitans, [F]
L : Öz endüktans, [H]
 α : Tetikleme açısı, [derece]
Y : Admitans, [S]
B : Suseptans, [S]
X : Reaktans, [Ω]
Q : Reaktif güç, [VAR]
n : Harmonik akım bileşenleri
 σ : İletim süresi, [ms]
 μ : Üyelik fonksiyonu
 R^n : n-boyutlu Euclidian vektör uzayı
 $P_r(c)$: c kümesinin olasılığı
e : Hata
de : Hatanın değişimi
du : Kontrol çıkış işareti

1. GENEL BİLGİLER

1.1 Giriş

Denetim sistemleri çağımızda hemen hemen her alanda kullanılmaktadır. Tüm mühendislik alanlarında sistemlerin denetimi önemli bir konudur. Bu nedenle denetim sistemleri, farklı alanlarda çalışan ve üretimin kalitesini yükseltmek amacıyla olan bütün mühendislerin ilgi alanına girmektedir. Bununla birlikte denetim organları donanımlarında kullanılan teknikler ve bunların tasarımı daha çok elektrik, elektronik, makine ve bilgisayar mühendisliğini doğrudan ilgilendirmektedir. Denetim organlarının sistemlerde kullanımı ve değerlendirilmesi ise tüm mühendislik dallarını ilgilendirir. Günümüzde çok amaçlı otomatik denetim ile ilgili pek çok çalışma yapılmakta ve bu konu hızlı bir şekilde geliştirilmektedir. Bunun bir sonucu olarak adaptif denetim, optimal denetim, kural tabanlı denetim gibi çeşitli denetim tipleri geliştirilmiştir. Bunlara ilaveten bulanık mantık ve yapay sinir ağlarına dayalı denetim de son yıllarda geniş uygulama alanları bulmuştur. Bu tezde bulanık mantık esaslarına dayalı bir denetleyici geliştirilmiştir. Denetim çevrimi içinde bilgisayarların kullanımı bu konuyu daha da geniş kapsamlı hale getirmiştir.

Denetim sistemleri, denetlenen niceliklerin değerlerinin, önceden belirlenmiş biçimde değişimini sağlar. Denetim sistemleri, denetim etkisi açısından, açık-çevrimli ve kapalı-çevrimli olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar. Açık-çevrimli denetimde sistem çıkışından sistem girişine geri besleme yoktur. Sistem girişine etki edilerek sistem çıkışı denetlenir. Kapalı-çevrimli yani geri beslemeli denetim sisteminde, denetim etkisi sistem çıkışına bağlıdır. Geri beslemeli sistemlerde sistem çıkışı, istenilen bir referans giriş işaretiyle karşılaştırılır ve aradaki fark minimum olacak şekilde denetim organı sistem çıkışını ayarlar.

Denetim organları; oransal denetim, integral denetim ve türev denetim elemanlarının bir veya birkaçının birlikte uygun biçimde kullanılmasıyla oluşturulabilir.

Klasik mantık temelde *her önerme doğru veya yanlıştır* varsayımına dayanır. Bu varsayım Aristo'dan beri tartışma konusu olmuştur. Aristo *temel varsayım* adlı tezinde gelecek şartlara bağlı olarak olayların şüpheli doğruluk durumlarından bahsetmektedir. Bahsettiği gelecek olaylar hakkındaki önermeler aslında ne doğru ne de yanlıştır. Fakat iki durumun da olması imkan dahilindedir. Bundan dolayı bu önermelerin doğruluk değerleri belirsiz olup en azından olaylara bağlıdır. Günümüzde iyice anlaşılmıştır ki doğruluk değerleri şüpheli olan

durumlar sadece gelecek olaylar tarafından belirlenmiştir. Ayrıca bazı önermelerin doğruluk değerlerinin, doğal olarak yapılan ölçümlerin temel sınırlamaları yüzünden belirsiz olduğu bilinmektedir. Bu tür durum ve önermelerden bahsetmek için *belirsiz* olarak adlandırılan bir üçüncü doğruluk değerine izin vererek, klasik iki değerli mantığın doğru veya yanlış olan doğruluk değerleri daha esnek hale getirilmelidir. Fiziksel ya da sosyal olaylarda pek çok ifade tam doğru ya da tam yanlış olarak tanımlanamaz. Örneğin 100 derecedeki suyun sıcaklığı *sıcak* olarak tanımlandığında 90, 80, 70, 60 derecelerdeki su için *su sıcak* ifadesi bu anlamda tam doğru olmadığı gibi yanlış da değildir. Bunun sonucunda da önermelerin doğruluk derecesine 1 ve 0 dışında ara değerler verilerek bulanık mantık kavramı ortaya konmuştur. Bulanık küme konusu, ilk defa Lotfi A. Zadeh tarafından 1965 yılında ortaya atılmıştır [1]. Zadeh'in bu çalışması, insanların bazı sistemleri makinelerden daha iyi kontrol edebilmelerinin bir sebebi olarak insanların belirsiz yani kesinlik ifade etmeyen bir takım bilgileri kullanarak karar verebilme özelliğine sahip olmalarına dayanmaktadır.

Zadeh'in bu çalışmasını takip eden temel kavramların oluşturulduğu yayınlar [2-4] bulanık kümelerin hem matematik yapılarını hem de mantıksal özelliklerini bilimsel çevrelere tanıtmış, bunu takiben bu konuya çok büyük bir bilimsel ilgi oluşmuştur. 1972'de Mamdani ve arkadaşları [4] tarafından bulanık mantığın kural tabanlı kontrol sistemlerine uygulanması ile başlayan *bulanık denetim uygulamaları* ise, bulanık mantığın endüstriyel uygulamalarında patlamaya yol açmıştır.

Bulanık mantık teorisi kısmi üyeliğe izin veren bir mantık sistemidir. Yani bir kümenin tam üyeliği ile o kümenin üyesi olmama durumları arasında, derece derece geçişe izin verir. Verilen bir elamanın bir kümede kısmi üyeliğinin bulunması demek, bu elemanın o kümeye ait olmadığı anlamına gelmez.

Bulanık mantık işlemleri, bir problemin analiz edilmesi ve tanımlanmasını, değişken kümelerinin ve mantıksal ilişkilerin geliştirilip bulunan bilgilerin bulanık kümelere dönüştürülmesini ve modelin yorumlanmasını kapsayan aşamaları içerir. Hesaplamaları yapmadan ve model oluşturmadan önce, bulanık mantığın mevcut problemin çözümü için iyi bir yöntem olmasından emin olmak gerekir. Eğer başka bir model daha uygunsa, bulanık mantık kullanmak istenen sonucu vermeyebilir [5, 6]. Zamanla değişen denetim parametrelerine ve karmaşık matematiksel modellere sahip olan, veya matematiksel modeli bulunmayan sistemler için bulanık mantık esaslarına dayalı denetim uygulanabilir.

Bulanık mantık kullanılarak yapılan *eğer-ise* işlemleri ile, *çıkış değeri biraz büyük ise girişi biraz azalt, çok büyük ise çok azalt* gibi insan dilinde ifade edilebilen ve anlam taşıyan sözlerin formülleştirilebilmeleri ve giriş-çıkış ilişkilerinin bilgisayara veya mikroişlemcilere tanımlanmaları mümkün olmaktadır.

Bulanık kümelerin, bulanık mantık tabanlı denetleyicilerde pratik olarak uygulanmaya başlaması 1970'li yıllarda gerçekleşmiştir. Bu ilk uygulamalar küçük çaplı endüstriyel uygulamalardı. Özellikle Japonya'da 1990'lı yıllarda bulanık denetleyicilerin kullanıldığı tüketici ürünleri pazarda sıkça görülmeye başlamıştır. Örnek olarak; çamaşır makineleri, elektrik süpürgeleri, klimalar, fanlar, ısıtıcılar, mikrodalga fırınları, çamaşır kurutucuları v.b. gibi malzemeler sayılabilir. Bunun yanında birçok endüstriyel uygulamalarda da bulanık denetleyiciler başarıyla kullanılmıştır. Dünyaya tanıtılmasında önemli olaylardan biri 1987'de Sendai (Japonya) metrosunun otomatik kontrolünde kullanılmasıdır. Bu uygulamada bulanık denetleyicilerin birçok parametre açısından geleneksel bir denetleyiciden daha uygun olduğu gösterilmiştir. Bu uygulamanın başarısı sebebiyle bu sistem, yeni Tokyo metrosunda da kullanılmaktadır [4].

1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı

Son yıllarda bulanık denetimli kontrol uygulamaları çok geniş alanlarda kullanılmaktadır. Bulanık denetleyicilerin, doğrusal olmayan, modellenmesi zor olan süreçleri denetlemede oldukça başarılı oldukları yine son yıllarda yapılan uygulamalarla gösterilmiştir. Bu çalışmadaki esas amaç güç sistemlerinde gerekli reaktif gücün statik Volt Amper Reaktif (VAR) sistemlerinden sağlanabilmesi amacıyla, sistemde kullanılan kompanzatorün bulanık denetleyicilerle gerçekleştirilmesi ve klasik denetleyicilere göre performansının nasıl olacağını araştırılmasıdır.

Enerji sistemlerinde, değişik çalışma koşullarında, ekonomik, güvenilir ve verimli bir şekilde sistemin kararlılığını sağlayabilmek için sürekli olarak yeni kontrol teknikleri geliştirilmektedir. Bu amaçla, bu çalışmada herhangi bir güç sistemi barasının gerilimini ve güç akışını istenilen düzeyde kararlı olarak sağlayabilmek amacıyla bulanık mantık denetimli statik VAR uygulaması yapılmaktadır. Böylece, güç faktörü düzeltilerek, dinamik gerilim kontrolü sağlanmakta, iletim hatlarının güç taşıma kapasiteleri yükseltilmekte ve reaktif güç akışının neden olduğu kayıplar en alt düzeye indirilmektedir.

Tüketiciler, şebekeden aktif ve reaktif güç çekerler. Aktif güç; motorlarda mekanik güce, ısı tüketicilerinde termik güce ve aydınlatma tüketicilerinde ışık gücüne dönüşür. Reaktif güç, sadece alternatif akıma bağlı bir özellik olup, elektrik tesislerinde, generatörlerin, transformatörlerin ve enerji nakil hatlarının yüklenmesine neden olur. Ancak endüksiyon ilkesine göre çalışan generatör, transformatör, bobin ve motor gibi işletme araçlarının çalışmaları için gerekli olan magnetik alanın oluşabilmesi amacıyla, şebekeden gerekli mıknatıslanma akımı çekilmelidir. Şebekeden çekilen bu mıknatıslanma akımı ise reaktif akımdır. Onun için endüksiyon ilkesine bağlı olarak çalışan yüklerin kullanıldığı tüketici tesislerinde faydalı aktif gücün yanında bir miktar reaktif güce de ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada gerekli reaktif gücün sağlanması amacıyla kullanılan sabit kapasitör ve tristör kontrollü reaktör tipi kompanzatorlerde, kompanzasyon işlemini gerçekleştiren reaktör grubunun devreye alınması, klasik yöntemlerle kontrol edilebilen tristörlerin belli sürelerle tetiklenmesi ile mümkün olmaktadır. Ancak bu sistemlerin doğrusal olmamaları, matematiksel olarak modellenmelerini güçleştirdiğinden tasarım aşamasında sistem gerektiği gibi tanımlanamamaktadır. Bu çalışmada sistemin matematiksel modeline gerek duymadan, sistem çıkışı ile girişi arasındaki etkin ilişkiyi kullanarak sonuca giden bulanık mantık esasına dayalı bir kontrol işlemi gerçekleştirilmektedir. Bulanık mantık ile kontrol işlemi gerçekleştirilirken yapılan işlem, şebekeden alınan reaktif güç belirli bir değerin altında kalacak şekilde, reaktör grubunu devreye sokan tristörlerin tetikleme anlarını saptamak ve bir tetikleme devresi ile tristörleri tetiklemektir. Böylece sabit kapasitör grubunun sürekli olarak baraya verdiği kapasitif reaktif güçle yükün çektiği endüktif reaktif güç farkı tristör kontrollü reaktör grubu tarafından karşılanacaktır.

Bulanık mantık tabanlı bu kontrol işleminde tetiklenme açılarının ayarlanması, bir insanın düşünme biçimine benzemektedir. Şöyle ki; klasik kontrol sistemlerinde giriş ile çıkış arasındaki hatanın integrali ya da türevi alınarak gerekli regülasyon yapılırken, bulanık mantıkla yapılan kontrol işlemlerinde sözkonusu hata ve hatadaki değişime bakılarak,

EĞER hata pozitif küçük ise VE hatadaki değişme negatif normal ise,

BÖYLECE kontrol işaretindeki değişim pozitif büyük olsun

AKSİ HALDE....

....

OLSUN.

biçimine sahip bir algoritma ile sonuca varılır. Yapılan çalışmada güç sistemine ait şebekeden çekilen reaktif gücün değerine bakılmakta, eğer bu değer arzu edilenin altında yada üstünde ise, tetikleme açıları biraz daha arttırılmakta ya da azaltılmaktadır.

1.3 Bulanık Mantık Denetimin Diğer Denetim Sistemleri İle Kıyaslanması

Bugün kullanılan geleneksel denetim sistemlerinin çoğu geri besleme (feedback) üzerine kurulmuştur. Uygulamada tamamıyla otomatik bir denetim sisteminin geri beslemeli olarak tasarlanması zordur. Bunun en büyük sebebi ise kontrol mekanizmalarındaki zaman gecikmeleridir. Bu gecikmeler nedeniyle sistem aslında o andaki durumu değil, o andan bir miktar önceki durumu düzeltmeye çalışır.

Geri beslemeli bir otomatik denetim sisteminde, etkin bir denetim için, bir çok sistem parametresinin bilinmesi gereklidir. Eğer sistemde, dışarıdan gelen olağandışı bir gürültü yüzünden ani bir değişiklik olursa denetim sistemi, çıkışları mümkün olduğu kadar çabuk düzeltmeye çalışacaktır. Fakat sistem çok kuvvetli olarak bu değişikliğe cevap verirse, sistem davranışının kararsız olma ihtimali yükselir. Yani, sistem hataları çok kuvvetli cevaplarla düzeltmeye çalışırsa, neticede istenen çıkış seviyesinin altında ve üstünde salınım yapan bir çıkış elde edilebilir. Bu gibi problemler yüzünden sadece basit bir geri besleme ile etkin bir tam otomatik denetim sistemini gerçekleştirmek mümkün olmayabilir.

1.3.1 Bulanık Denetim ve Klasik Denetim

Bulanık denetime bakıldığı zaman tamamına yakın örneklerde geri besleme yapısı üzerine kurulduğu görülmektedir. Ayrıca, bulanık denetimde klasik denetim kuramındaki orantı-integral-türevsel (PID) geribeslemeli denetim organı etkisi de elde edilebilir. Bu özellikler, bulanık denetim teorisine klasik denetimin bazı güzel ve gelişmiş taraflarını alma imkanı vermektedir. klasik denetim ile bulanık denetim arasındaki önemli bir fark da klasik denetim kuramını öğrenmenin basit doğrusal sistemlerde bile zor bir iş olmasından kaynaklanmaktadır. Bulanık denetim kuramı ile dizayn ve uygulama, daha kolay olmakta ve bu sistemlerin geliştirilmesi daha az insan gücü ve para gerektirmektedir [7].

Bulanık denetleyiciler ilgili sensör verilerinin zayıflamasına ve bozunumuna karşı daha kuvvetlidir ve sistem parametrelerinin değişmesine karşı tekrar dizayn edilmesini

gerektirmezler. Doğrusal olmayan kontrolde de normal PID'ye göre performansları daha yüksektir. Dizaynları PID denetleyicilere göre daha kolaydır ve daha az elektronik eleman gerektirir. Bundan dolayı maliyetleri de düşüktür. Bu sebepten dolayı PID denetleyicilerin rahatça kullanıldığı yerlerde bile bulanık denetleyicilerin kullanımı yaygınlaşmıştır [8].

1.3.2 Bulanık Denetim ve Kural Tabanlı Denetim

Bulanık mantık kullanılarak geliştirilen bulanık mantık denetim devreleri (fuzzy logic controllers), kural tabanlı sistemlerin daha ileri bir aşamasıdır. Bilgi tabanlı sistemler (knowledge based systems), sistem hakkındaki kullanıcı bilgisinin mikroişlemciye öğretilerek, mikroişlemcinin operator yerine ve ondan daha hatasız olarak sistemi kumanda etmesi prensibine dayalı bir kontrol sistemidir.

Bu kontrol sisteminin bir üst basamağı ise bu sisteme kendini yenileme özelliği vererek *adaptif* hale getirmektir. Kural tabanında kullanılan basamak değerleri bir veri tabanında (data base) tutulur. Kontrol mekanizması kural tabanından kullanacağı kuralları, veri tabanından bu kuralları uygularken kullanacağı veri değerlerini alır. Sistem programı, başlangıçta tanımlanan alt-üst sınırların ve ara basamakların yükteki duruma göre yeterince uygun olmadığını tesbit ederse bu değerlerde değişiklik yapılabilir.

Bilgi tabanlı sistemlerin analog kontrol sistemlerine göre önemli bir zayıf tarafı, *kesikli* komut adımlarından oluşmasıdır. Bilgisayar, verilebilen sonlu sayıda eğer-ise komutları ile sonlu sayıda basamakla kontrol yapabilmekte, basamaklar arası ara değerlerde en yakın değeri ya da programına göre verilen bir enterpolasyonla bulacağı değeri kullanabilmektedir.

Bulanık kontrol sistemleri, bilgi tabanlı sistemlerin bir üst aşaması olup, kontrol kriterlerinin tam doğru ya da tam yanlış olmayıp *kısmen doğru olması* durumunda da hedef talimatın *kısmen yerine getirilmesini* sağlamakta, böylece daha az sayıda eğer-ise talimat grubu (kural tabanı) ile daha gerçekçi denetim sağlanmaktadır.

Bilgi tabanlı sistemlerde bulanık mantık kullanıldığında aşağıdaki avantajlar elde edilmektedir [12]:

1. Sınırlı sayıda kural kullanılarak kesikli değil analog denetim sağlanmaktadır.
2. Daha az sayıda kural kullanılabilen, eğer-ise komutlarının (kural tabanının) daha az sayıda kuraldan oluşması mümkün olmaktadır.

3. Kural sayısı azaldığı için daha karmaşık sistemler daha kolayca programlanabilmektedir.
4. Kural sayısı azaldığı için öğrenen (adaptif, uyarlamalı, kendini yenileyen) sistemlerin gerçekleştirilmesi daha kolaylaşmaktadır.
5. İnsan düşüncesindeki *hız biraz düşük ise gerilimi biraz yükselt* gibi kesin olmayan kavramlar programlanabilmektedir.

1.3.3 Bulanık Denetim ve Adaptif Denetim

Klasik denetleyiciler, sabit parametrelili transfer fonksiyonlarına sahiptir. Sistemin çalışma koşullarındaki değişimlere dayanılarak denetleyici parametrelerini değiştirme özelliğine sahip adaptif kontrol tekniği ise, çalışma koşullarındaki farklılıklara uygun olarak sistemin cevabını etkin biçimde değiştirebileceği için ilgi çekmektedir. Klasik denetleyici parametreleri, çalışma koşullarından biri için optimum olsa bile, diğer çalışma koşulları için optimum olmayabilir. Sabit parametrelili klasik denetleyicilerde, kazançlar ve diğer parametreler deneme yanılma yöntemi ile seçilebilir, ancak bu durum, ideal olarak çalışma bölgesinin bütününe uymayabilir [9-11]. Çalışma koşullarının izlenmesi ve kontrolün optimum davranışı sağlanması için adaptif denetleyiciler, klasik denetleyicilere göre daha olumlu sonuçlar verir. Bunun nedeni, adaptif tekniğin denetleyici parametrelerinin çalışma koşulları için optimal olduğunu varsayması ve sistem kararlılığını artırmasıdır. Adaptif denetleyicilerin temel fonksiyonları aşağıdaki şekilde geliştirilebilir:

1. Bilinmeyen parametreler tanımlanır ya da davranış kriteri ölçülür.
2. Kontrol stratejisine karar verilir.
3. Kontrol parametreleri her örnekleme anında düzeltilir.

Bu fonksiyonların birleştirilme şekline bağlı olarak, adaptif denetleyiciler için farklı algoritmalar elde edilir. Adaptif denetleyicilerin tasarımında sistemin çok iyi bir biçimde tanınması gerekmektedir. Geliştirilen algoritmaların sistemde olası bütün sorunlara cevap verebilmesi ise hemen hemen mümkün olmamaktadır. Adaptif denetleyicilerden minimum değişim denetleyicisi, sadece küçük hata durumları için kullanılabilir. Kutup atlayan denetleyicinin büyük bozucuları etkin şekilde söndürmesine rağmen sistemin iyi bilindiği durumda kullanılabileceği, optimal lineer karesel ve kutup kaydıran denetleyicilerin ise sistem

iyi bilinmediği, fakat kararlı açık çevrim kutuplarına sahip olduğu durumda en faydalı yöntemler oluşu söylenebilir. Bulanık mantık çok karmaşık, lineer olmayan, belirsizlikler içeren sistemlerin girişleri ile çıkışları arasında ilişki kurulabilmesini sağlar. Bu üstünlüğünden dolayı adaptif denetleyicilerden daha olumlu sonuçlar vermektedir. Ayrıca bulanık denetim, matematiksel modeli oluşturulamayan sistemler için iyi bir çözümdür.

1.3.4 Bulanık Denetim ve Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (Neural Network, NN) ise birbirine belirli ağırlık değerleri üzerinden bağlanmış birçok elemanın oluşturduğu bütünsel paralel bir yapıdır [12, 13]. Bu NN'ler, biyolojik sinir sisteminin anlaşılmasından sonra oluşturulmuştur. Bir NN, örnekleri dağıtılmış kodlama ile saklar ve eğitilebilir lineer olmayan dinamik bir sistem oluşturur. NN'ler, ardışıl sayısal bir bilgisayardan insan beyninin kabiliyetine benzemeye çalışmasıyla daha hızlı bir cevap ve daha yüksek performansa sahiptir. Son zamanlarda NN'ler örnek tanıma problemlerinde özellikle skalanın değiştiği ve girilen örneğin pozisyonunun kaydırıldığı durumlarda kullanılmaktadır.

Sinir ağları, tasarımcıya bulanık kuralların belirlenmesi ve üyelik fonksiyonlarının tayin edilmesinde yardımcı olur. Bunu gerçekleştirmek için klasik bulanık yaklaşımını kullanmak gerekir. Sinir ağı ile üretilecek üyelik fonksiyonlarında, en yüksek üyelik derecesi olan 1'in alınması gerekmez. Ayrıca sinir ağları ile çok farklı üyelik fonksiyonları tesbit edilir. Bulanık mantıkta üçgen, yamuk gibi lineer şekiller kullanılır. Buna karışık sinir ağları ile lineer olmayan üyelik fonksiyonları da tayin edilebilir. Ayrıca bulanık mantık ile sinir ağları arasında diğer bir fark bulanık kurallarının kendisidir. Sinir ağlarında varsayımları birbirinden ayırmak için sadece *and* işlemi kullanılır ve ağ çıkışında ise her zaman bir üyelik fonksiyonu atanmadan kesin bir değer alınır.

1.4 Bulanık Denetimin Geleceği

Yakın tarihlerde çok daha karmaşık bulanık denetleyiciler gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Bunların içinde en ilginçlerinden biri, hiç kuşkusuz Tokyo Teknoloji Enstitüsünde M. Sugeno tarafından gerçekleştirilen ses kontrollü helikopterdir. Bu helikopter sesle verilen bazı komutları (ileri, sağa, sola, yukarı, in gibi) tam otomatik olarak bulanık denetleyicilerle

uygulayabilmektedir. Bugüne kadar bir çok önemli uygulamaların Japonya'da geliştirilmesine karşın ABD'de de bulanık denetime artan bir ilgi vardır. Örneğin Togai Infralogic, Motorola firması ile birlikte bulanık mantık entegrelerinin, kartlarının ve diğer donanım aksamının en büyük üreticilerinden biridir. M. Togai ve H. Watanabe ilk bulanık çıkarsama (inference) entegresini geliştiren kişilerdir. Bir başka ABD şirketi olan Apronix ise 1992 yılında ikili ters sarkaç stabilizasyonunu sağlayan bir bulanık sistem tasarımını geliştirmiştir. Teorik olarak, simülasyon yoluyla üçlü bir ters sarkacın stabilizasyonunun mümkün olabileceğini göstermiştir. Klasik PID kontrolü ile teorik olarak ikili ters sarkaç probleminde stabilizasyonun mümkün olmadığı bugün bile kabul edilmektedir. Bu da bulanık denetimin otomatik kontroldeki başarısının bir göstergesidir. Bunlar gibi pek çok şirket değişik ülkelerde bulanık denetim uygulamaları gerçekleştirmektedirler.

1.5 Literatür Araştırması

Üretilen enerjinin kayıpsız bir şekilde iletilmesi ve verimli bir şekilde tüketilmesi için pek çok çalışma yapılmaktadır. Elektrik tesislerindeki işletme araçlarını gereksiz bir şekilde yüklememek, dolayısıyla enerji iletim hatlarında reaktif akımın meydana getirdiği kayıpları en aza indirmek, ülkemizde %20'nin üzerinde olan enerji kayıplarını gelişmiş ülkelerin seviyelerine indirmek, enerji sorununun yaşandığı ülkemiz açısından son derece önemlidir. Böylece büyüyen ve karmaşıklaşan elektrik sistemlerinin üretim, iletim ve dağıtım kapasitelerinin artırılması, iletim hattının geçici durum kararlılığının iyileştirilmesi, değişken yük, hattın devreye alınması gibi çalışma koşullarında gerilim düzenlenmesi sağlanması, sistem kayıplarının azaltılması ve kullanıma sunulan elektrik enerjisinin daha nitelikli hale getirilmesi mümkün olmaktadır.

Tüketici sistemlerin şebekeden çektikleri reaktif gücün bir bölümünü başka bir kaynaktan temin ederek şebekeden çekilen reaktif gücün azaltılması işlemine kompanzasyon adı verilir. Kompanzasyon olayını gerçekleştiren kompanzatörlerden reaktif gücü yük gereksinimlerine göre gecikmesiz bir şekilde kontrol edebilmesi istenir.

Reaktif güç kompanzasyonu teknik ve ekonomik bir zorunluluktur. Stasyonier işletmelerde bunun nasıl yapılacağı bugün artık bilinen bir konudur. Buna karşı bazı sanayi dallarında modern teknolojinin uygulanması ile yeni sorunlar ortaya çıkmış ve özellikle hızlı değişen olaylarda reaktif güç kompanzasyonu söz konusu olmaktadır. Hızlı değişen olayların

söz konusu olduğu işletmeler, haddehaneler, çeşitli tahrik sistemleri, kaldırma makineleri, elektrikli ark fırınları ve elektrikli kaynak makineleridir. Bu işletmelerin şebekede meydana getirdikleri harmonikler, elektrik tesisindeki işletme araçlarını ve diğer işletmeleri olumsuz bir şekilde etkiler. Bu durumu ortadan kaldırmak için hızlı değişen olayların var olduğu işletmelerde reaktif güç kompanzasyonunun etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir [14].

Statik faz kaydırıcıların kullanımından önce dinamik (senkron) faz kaydırıcılar kompanzasyon amacıyla kullanılmaktaydı. Genellikle işletmelerin girişlerine senkron makine bağlanarak, işletmelerin reaktif güç ihtiyacı, motor olarak ve aşırı uyarılarak çalıştırılan bu makine tarafından sağlanmaktaydı [15]. Bu makine boşta çalıştırıldığı için, şebekeden boşta çalışma kayıplarını karşılayacak aktif güç çeker ve şebekeye reaktif güç verir. Bu makinelerin kayıpları kondansatörlere göre daha yüksektir ve sürekli bir bakım gerektirirler. Sağlanması gereken reaktif güç ihtiyacı çok büyüdüğünde bunların kullanılması ekonomik olarak zorlaşır.

Dinamik faz kaydırıcılara göre oldukça ekonomik ve elverişli olan kondansatörlerin kullanımı, reaktif güç kompanzasyonu için büyük bir gelişme olmuştur. Reaktif güç üretiminde statik faz kaydırıcı adı verilen kondansatörlerin üstünlükleri sayılamayacak kadar çoktur. Kayıpları az, bakım masrafları yok denecek kadar azdır. Ayrıca birçok kondansatörün paralel bağlanması ile istenilen miktarda bir reaktif güç kaynağı oluşturulabildiği gibi, bir veya birkaç kondansatör veya kondansatör grubunun arızalanması halinde, işletmeye ara vermeden, bunların kısa zamanda yenileri ile değiştirilmesi imkanı vardır. Kondansatör aracılığı ile yapılan kompanzasyonda her faz ayrı ayrı kompanze edilebildiğinden, aynı zamanda dengeleme sorunu da çözülmüş olur.

Tristör teknolojisindeki gelişmeler, tristörleri açma-kapama yöntemlerinin geliştirilmesi, geniş bir aralıkta kaynak akımının kontrol edilmesi tristörlü düzeneklerle reaktif güç kontrolünü gündeme getirmiştir [16].

Sabit bir kapasite gurubu veya reaktör gurubu ile kompanzasyon yapılması durumunda reaktif güç değişiminin ve gerilimin istenilen sınırlar içinde kalmasını sağlamak mümkün değildir. Ancak kondansatörler ile reaktörlerin kombine edilmesi ve bunlardan ya birinin ya da her ikisinin güçlerinin ihtiyaca göre ayar edilmesi ile ideal bir kompanzasyon sağlanabilir [15].

Radyal iletim hatlarının alıcı ucundaki gerilimin stabilitesi, bu uca bağlanacak yükün karakter ve miktarı üzerine bir sınır koyar. Statik VAR kompanzatör, yük ucundaki gerilimi destekler ve bu nedenle hatların yüklenebilirlikleri artar. Statik VAR kompanzatörler, hızlı cevap, yüksek güvenilirlik, düşük çalışma maliyeti ve işletme esneklikleri ile karakterize

edilirler. Fonksiyonel olarak iki sınıfa ayrılabilirler: Birincisi; çok özel yük bozukluklarını kompanse etmek, ikincisi; iletim hattı uç gerilimini regüle etmektir. Birinci sınıftaki genel amaçlar, dinamik yük dengelenmesi ve güç faktörü düzeltimi; ikinci sınıftaki amaçlar ise uç gerilim dengelemesi ve regülasyondur. Yeni kontrol algoritmalarının oluşturulmasıyla güç sistemi çalışmalarında geniş uygulama alanları doğmuştur. Bunlar, dinamik aşırı gerilimlerin kontrolü, sistem stabilitesinin iyileştirilmesi ve iletim hatlarının güç taşıma kapasitelerinin artırılması olarak özetlenebilir [17].

Statik VAR kompanzatorları (SVK), kapasitör, reaktör, transformatör ve statik anahtarlar gibi elmanların hızlı, sürekli ve denetlenebilir bir reaktif güç kompanzasyonu sağlamak amacıyla bir araya getirilmesinden oluşan bir sistemdir. Ayrıca bu sistem, harmonik filtrelerini ve kontrol kısmını da ihtiva eder. Çok çeşitli statik VAR kompanzatoru olmasına karşın bunların en yaygın olarak kullanılanları şöyle sıralanabilir [18]:

1. Tristör anahtarlama kapasitörler (TAK)
2. Tristör anahtarlama reaktörler (TAR)
3. Tristör kontrollü reaktör (TKR)
4. Sabit kapasitör ve tristör kontrollü reaktör (SK+TKR)
5. Tristör anahtarlama kapasitörler ve tristör denetimli reaktör (TAK+TKR)
6. Tristör anahtarlama kapasitörler, tristör anahtarlama reaktörler ve tristör denetimli reaktör (TAK+TAR+TKR)

Hangi uygulamanın yapılacağı çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörler; reaktif güç ihtiyaçları, kontrol sistemi geçici ve sürekli hal karakteristikleri, kayıp karakteristikleri, harmonik üretimi ve ekonomik durumdur [19].

Şimdiye kadar güç sistemlerinde statik VAR kompanzatorlarla kompanzasyona ait pek çok simülasyon yöntemi sunulmuştur [20-24]. TKR'nin modeli ve kontrol sisteminin buna etkisi simülasyonda en önemli problemlerden biridir. Küçük sistem ile modelleme yöntemi Gavriloviç [23] tarafından kullanılmıştır. Buradaki en önemli zorluk güç sistem parçalarının modellenmesidir. Sayısal simülasyon Taylor [24] tarafından uygulamaya konmuştur.

Statik VAR sistemin geçici hal analizi (transient network analyzer) yapılarak, bu sistemin modelinin kontrol algoritması [25] ve simülasyonu yapılan çalışmalarla gösterilmiştir [26]. Lineer Programlamayla (linear programming, LP) reaktif güç planlaması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [27]. Bununla birlikte güç kayıplarını minimize etmek ve gerilimin

kararlılığını sağlayabilmek için J. Qui ve S.M. Shahidehpour 1987 yılında yaptıkları çalışmada yeni bir metod kullanmışlardır [28]. Bu metoda göre sistemde baralar arasına giriş sargı kademeleri değişebilen transformatörlerin konulmasıyla, baralar arasındaki gerilim farklılıklarını ortadan kaldırmak amacıyla kademe ayarı yapılabilmektedir.

Tristörlerle kontrol edilen reaktörden oluşan kompanzasyon sistemi analizini, akım ve gerilimin teorik ve pratik olarak değişimini ve sistem harmoniklerinin dağılımını J.K. Chatterjee, B.M. Doshi ve K.K. Ray 1989 yılında incelemişlerdir [29]. R.M. Hilloowala ve A.M. Sharaf enterkonnekte şebekelerde statik faz kaydırıcı ile (static phase shifter) gerilim regülasyonunu teorik olarak gerçekleştirmişlerdir [30]. Bunun için öncelikle statik faz kaydırıcının modelini oluşturmuşlar ve PID kontrolörle statik faz kaydırıcıya kumanda eden tristörlerin tetiklemelerini ayarlayarak gerilim regülasyonunu gerçekleştirmişlerdir.

P.K. Dash, A.M. Sharaf ve E.F. Hill güç sistemlerinde tristör denetimli statik VAR kompanzatorların modelini oluşturarak, bir güç sistemi üzerinde tristör denetimli statik VAR uygulaması yapmışlardır. Tristörlerin denetimini orantı-integral etki ve denetim organı (PI) kontrolörlerle gerçekleştirmişlerdir. Geçici ve sürekli durumda simülasyon sonuçlarını da vermişlerdir [19].

T. Niimura, R. Yokoyama ve B.J. Cory'nin 1993 yılında enterkonnekte şebekelerde gerilimin stabilizasyonu ve reaktif güç planlaması için fuzzy yaklaşımı adlı çalışmalarında, öncelikle fuzzy yaklaşımının nasıl olması gerektiğini belirledikten sonra, çözüm için gerekli algoritmayı oluşturmuşlardır. Daha sonra 14 baralı bir model üzerinde çalışma yaparak sonuçları vermişlerdir [31]. Bu sonuçlara dayanılarak reaktif güç planlaması için fuzzy yaklaşımın olumlu sonuçlar verdiği söylenebilir.

K.H. Abdul-Rahman ve S.M. Shahidehpour 1993 yılında yaptıkları çalışmada fuzzy temelli optimal reaktif güç kontrolünü gerçekleştirmişlerdir [32]. Bu çalışmalarında, çok baralı güç sistemleri hesaplarında sürekli değişen matris değerlerini kullanmadan, zaman alan matris tersi hesaplarını yapmadan ve bellek alanı kullanımını en aza indirmek için sistem girişi ile çıkışı arasındaki ilişkiyi kullanarak, bulanık mantık temeline dayanan bir çözüm yapılmıştır.

Kevin Tomsoviç, reaktif güç ve gerilim kontrolü için fuzzy lineer programlama tekniği geliştirerek, bu yaklaşımın standart lineer programlama tekniği ile yapılan çözümden daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir [33]. Tomsoviç'e göre karmaşık güç sistemlerinde basit lineer programlar gerçek sistemi tam olarak çözemezler. Bu nedenle karmaşık sistemlerin kontrolü fuzzy yaklaşımını ile yapılmalıdır. Bu amaçla Tomsoviç, önce sisteme uygun fuzzy üyelik

fonksiyonları tanımladıktan sonra çeşitli deneyimlerle oluşturduğu karar tablosu ve uygun programlama tekniği ile çözüm yapmıştır.

V. Miranda ve J.T. Saraiva yaptıkları çalışmada, güç sistemlerinde optimal yük akışı için fuzzy modeli oluşturmuşlardır. Bu çalışmada sistem modeli oluşturulduktan sonra uygun programlama tekniği ve fuzzy yaklaşımıyla çözüme gidilmiş ve uygun sonuçlar alınmıştır [34].

1.6 Statik Reaktif Güç Kompanzasyonu Yöntemleri

1.6.1 Doymuş Reaktör İle Dengelenen Sabit Kondansatör ile Kompanzasyon

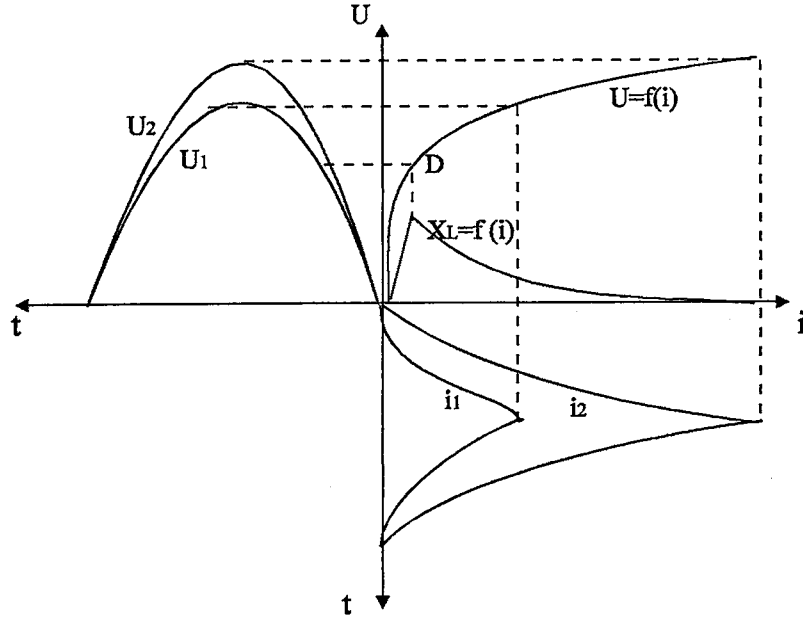
Sabit kondansatör tesisi ile yapılan kompanzasyonda, değişen yükün reaktif gücü, kompanze edildikten sonra geri kalan kondansatör gücünün şebekeye iade edilmesi gerekir, bu da gerilimin yükselmesine sebep olur. Buna engel olmak için doymuş reaktörden yararlanır. Bunun için yük barasına sabit kondansatör ile birlikte bir de doymuş reaktör paralel bağlanır. Yükün değişken reaktif güç ihtiyacı kondansatör tarafından karşılandıktan sonra, ΔQ_C kadar kapasitif güç artar ve bu yüzden şebeke gerilimi biraz yükselir. Bunun üzerine, reaktörün doymalı karakteristiği sebebi ile reaktör büyük bir akım çekmeye başlar ve, ΔQ_C 'ye eşit endüktif bir yük vererek bunu engeller.

Görülüyor ki, reaktörün demir çekirdeği, otomatik bir ölçme ve ayar görevi yapmaktadır.

Bilindiği gibi, demir çekirdekteki magnetik akı, endüksiyon yasasına göre,

$$\Phi = -\int \frac{U}{N} dt \quad (1)$$

olarak ifade edilir. Burada Φ ; demir çekirdekteki magnetik akı, U ; reaktörün sargı uçlarına uygulanan gerilim ve N ; sarım sayısıdır. Eğer akı yoğunluğu, yani magnetik endüksiyon (B), bir yarı periyot esnasında doyma değerine çıkarsa, bobinin reaktansı ani olarak çok düşer ve hatta sıfır olur. Bu durumda reaktör şebekeden büyük bir endüktif akım çeker. Prensip itibariyle reaktör, bir yarı periyot esnasında doymanın başlangıcında akım çekmeye başlar ve doyma sona erdiğinde de tekrar akım sıfıra iner. Reaktöre ait doyma karakteristiği ve bir yarı periyot esnasında sinüzoidal gerilimin değişimine göre reaktörün çektiği akım, Şekil 1' de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Doymuş bir reaktörün akım ve gerilim karakteristiği.

$U = f(i)$: Doymuş reaktörün mıknatıslanma karakteristiği,

$X_L = f(i)$: Reaktörün reaktans karakteristiği,

D : Doymanın başladığı nokta,

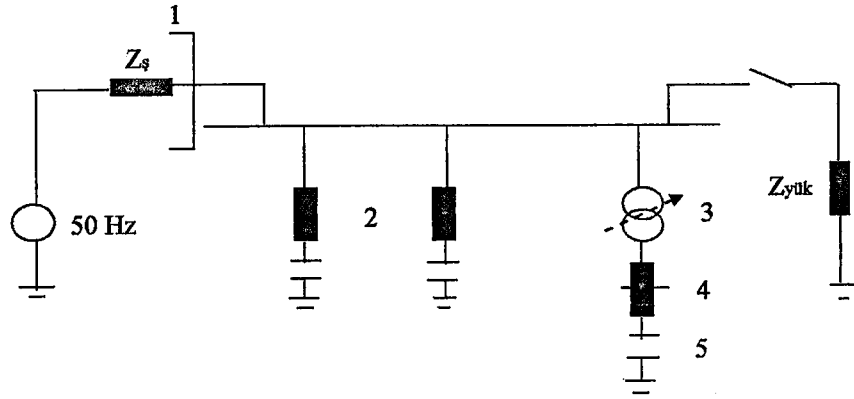
U_1, U_2 : Reaktöre uygulanan gerilim,

i_1, i_2 : Reaktörün çektiği akım.

Eğer gerilimde bir artma olursa, bir yarı periyot içinde doyma daha erken meydana gelir ve buna göre daha büyük bir akım çekilir, yani daha büyük bir reaktif güç üretilir. Diğer taraftan, daha büyük bir reaktif güç de gerilimin artmasını önler. Böylece kendiliğinden bir gerilim ayarı yapılmış olur.

Doymuş reaktör yardımı ile yapılan kompanzasyonda ayrı bir ölçme ve ayar cihazına gerek yoktur ve reaksiyon zamanı 1-2 periyot kadardır.

Doymuş reaktörün kayıpları büyük olduğu gibi bu kompanzasyon düzeninden ilave olarak akım harmonikleri meydana gelir. Doymuş reaktörler gerilim değişmelerine karşı hassas olduklarından, yük barasına bir ayar transformatörü üzerinden bağlanmalıdırlar. Doymuş reaktörün en büyük sakıncası, çok gürültülü olarak çalışmasıdır. Şekil 2'de doymuş reaktör yardımı ile yapılan kompanzasyon ayarına ait prensip bağlama şeması verilmiştir.



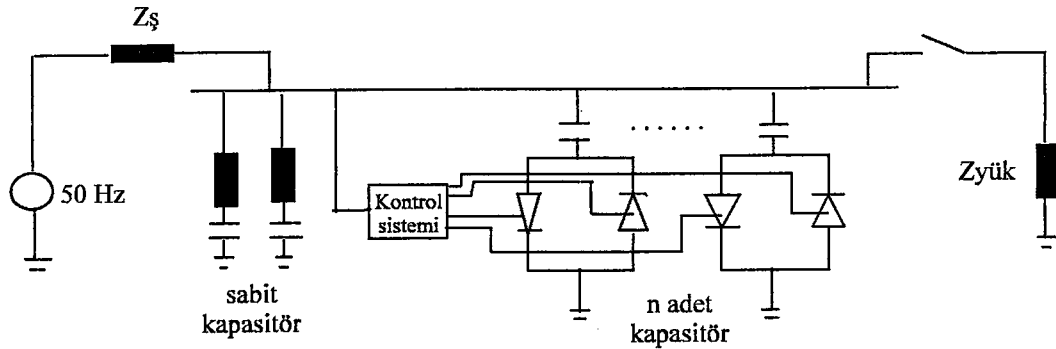
Şekil 2. Doymuş reaktör ile kompanzasyon ayarı prensip bağlama şeması.

- 1 : Şebeke,
- 2 : Sabit kondansatör,
- 3 : Ayar transformatörü,
- 4 : Doymuş reaktör,
- 5 : Reaktör eğimini ayarlayan kondansatör.

1.6.2 Tristör Anahtarlama Kapasitörlerden Oluşan Kompanzasyon Sistemi

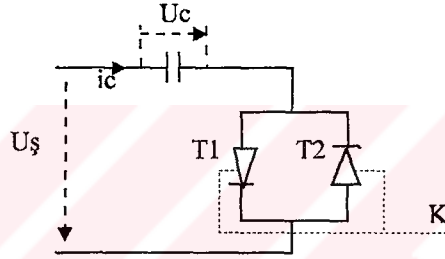
Bu kompanzasyon sisteminde her bir faza karşılık gelen toplam kondansatör, birbirine eşit birçok ünitelere ayrılmıştır. Her bir fazda yükün çektiği değişken endüktif gücün değerine göre, kondansatör üniteleri tristörler aracılığı ile kademeli olarak devreye sokulup çıkarılırlar.

Burada her bir kondansatör kademesinin değeri o şekilde tesbit edilir ki, her bir kademenin devreye sokulup çıkarılması esnasında, bağlantı noktasındaki gerilim değişmesi, belirli bir sınıırın altında, yaklaşık olarak %0.25 mertebesinde kalması sağlanmalıdır.

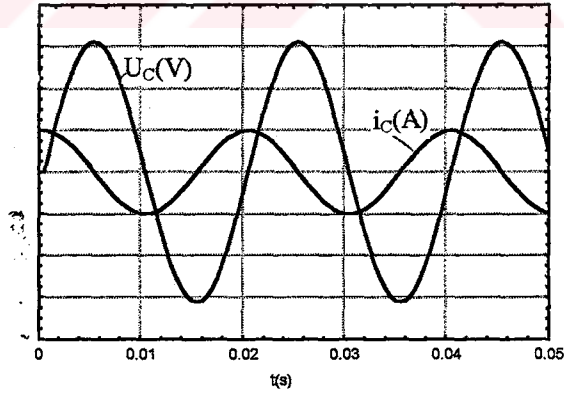


Şekil 3. Tristör anahtarlama kapasitörlerle statik VAR kompanzasyonu.

Kondansatörler devreye sokulurken de bağlama olayı sebebi ile aşırı gerilimlerin meydana gelmemesi için gerekli tedbirler alınmalıdır. Bu amaçla hazır bekleyen kondansatörler, alternatif şebeke geriliminin tepe değerine eşit bir doğru gerilimle doldurulurlar. Tristörler ile kondansatörler, gerilimin tepe değerinde devreye sokulurlar. Böylece kondansatör, akımın doğal sıfırdan geçtiği andan itibaren akım geçirmeye başlar. Aynı şekilde tristörler kondansatör yine, akımın doğal sıfırdan geçtiği anda devreden çıkarılır. Bu sayede geçici olaylar ve aşırı gerilimler önlenmiş olur. Tristörler ile devreye sokulup çıkarılan kondansatörün gerilimi ve akımı Şekil 4’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4. Tristör anahtarlama kondansatör devresi ile akım ve gerilimin zamanla değişimi. (a) Bağlantı şeması. (b) Gerilim ve akım eğrileri.

Kondansatör devresine ,

$$U=U_m \sin\omega t \quad (2)$$

gibi sinüzoidal bir gerilim uygulandığında, kondansatör uçlarındaki gerilim,

$$U_C = \frac{1}{C} \int i_C dt \quad (3)$$

olarak yazılabilir.

Gerilim tepe değerinde iken tristöre tetikleme işareti verilirse, tristör iletme geçer ve devreden i_C akımı geçer. Kumanda işareti kaldığı sürece, akım sinüzoidal olarak geçmeye devam eder. Gerilim tepe değerinde iken işaret kaldırılırsa, akım sıfırdan geçerken sıfır değerinde kalır.

Reaktif güç değişimi karşısında kondansatör gurubunun reaksiyon zamanı, ölçme ve faaliyete geçme zamanlarının toplamına eşittir. Reaktif gücün tesbiti için ölçme süresi prensip olarak yarım periyottur. Gerilimin her bir pozitif ve negatif tepe değerinden ikinci tepe değerine kadar reaktif enerji entegre edilir ve yarım periyot süresine bölünür. Gerilimin her bir tepe değerinde bulunan ölçü değerine göre kondansatör gurubunun reaktif gücünün yükseltilmesi gerekiyorsa, ölçü değerinin alındığı gerilim tepe noktasında kondansatör devreye sokulur; fakat bu esnada uygun polariteye göre doldurulmuş kondansatör elemanlarının hazır bulunması gerekir. Eğer bu mümkün değilse, kondansatör elemanı yarım periyot daha sonra devreye sokulur ki, bu da bir gecikme anlamına gelir. Bu nedenle reaksiyon zamanını kısaltmak için hazır bulundurulan kondansatör elemanlarının bir kısmı pozitif ve bir kısmı negatif polariteye göre doldurulmuş olarak bekletilir. Kondansatörlerin devreden çıkartılması ise daima ölçmenin yapıldığı anda gerçekleşir.

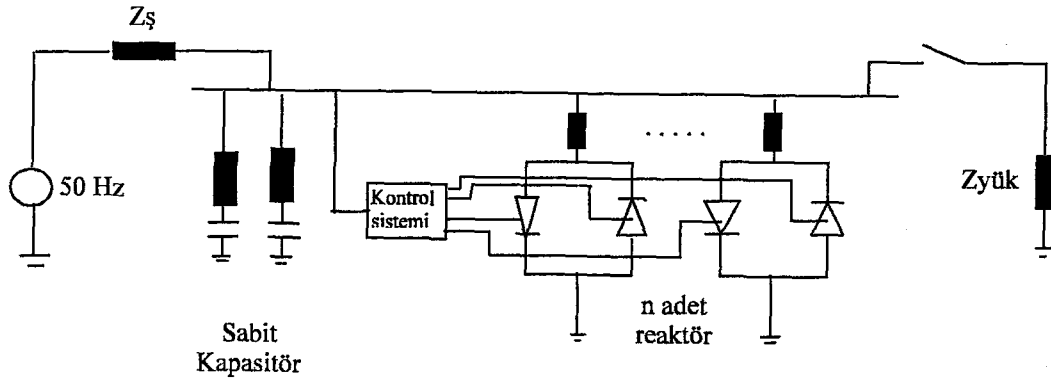
Kondansatör elemanlarının devreye sokulup çıkarılması ile yapılan kompanzasyon sisteminde kayıplar çok azdır ve harmonik üretilmez. Ayrıca, bu sistemde her faz ayrı ayrı kompanze edilirse yük dengesizlikleri ortadan kaldırılır. Kondansatör gurubunun bir avantajı, bunun tamir ve bakımının kolay olması, arızalı elemanın kolayca değiştirilebilmesi ve gerektiğinde kondansatör gücünün istendiği gibi yükseltilebilmesidir.

Böyle bir sistem otomatik olarak çalışacak ve geri besleme mekanizması için gereken işaret yükün terminal geriliminden, reaktif gücünden veya güç faktöründen alınabilecektir. Ortaya çıkabilecek geçici akımı yok etmek için devre dışında olan kondansatör üniteleri zaman zaman kısa süreler için tetiklenerek, gerilimin tepe değerine kadar doldurulmaları ve bu değerde kalmaları sağlanmalıdır. Bu kompanzasyon sistemi sadece kapasitif, reaktif güç üretebilir.

1.6.3 Tristör Anahtarlamalı Reaktörlerden Oluşan Kompanzasyon Sistemi

Tristör anahtarlamalı reaktörden oluşan kompanzasyon sistemi, reaktif güç ayarı için uygun bir çözümdür. Bu kompanzasyon işleminde amaç, yükün reaktif gücünün ani değerlerini ölçerek gerekli endüktif gücü, yeterli sayıda reaktörü devreye sokup çıkarmakla sağlamaktır. Bu suretle her an yükün reaktif gücü ile reaktör reaktif gücünün toplamı sabit tutulur ve sabit kondansatör tarafından kompanze edilir. Burada sabit kondansatör, çeşitli harmoniklere göre ayarlanmış çok sayıda filtre devreleri şeklinde düzenlenmiştir. Yükün çektiği reaktif gücün değişimi çok hızlı olduğundan, normal mekanik bağlama cihazları ile reaktör gücünün ayar hızını sağlamaya imkan yoktur. Fakat yarı iletkenlerin sağladığı imkanlar sayesinde reaktör elemanlarını yükün çalışmasının gerektirdiği hızda devreye sokup çıkarmak mümkün olmaktadır. Bunun için tristörlerden yararlanır. Tristörler, bir senkron anahtar gibi çalışırlar; bunların kumanda devresine uygun işaret verilerek devreye uygulanan alternatif gerilimin etkin değeri ve buna bağlı olarak da devreden geçen akım kayıpsız olarak istendiği gibi ayarlanabilir.

Şekil 5’de tristörle devreye sokulup çıkarılan reaktör ile yapılan kompanzasyona ait bir kutuplu prensip bağlama şeması verilmiştir.



Şekil 5. Tristör anahtarlamalı reaktörlerle kompanzasyonun prensip bağlama şeması.

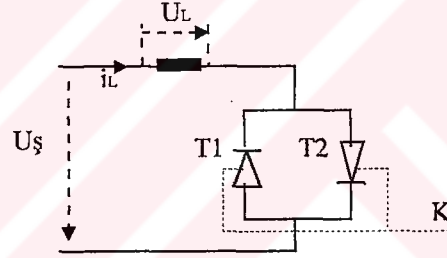
Bağlama aşırı gerilimlerine yol açmamak için reaktör elemanları, gerilimin pozitif veya negatif tepe değerlerinde devreye sokulup çıkarılırlar.

Bir reaktör elemanının devreye sokulması için gerilim tepe değerinde iken, tristörün kumanda devresine bir darbe işareti verilirse tristör iletime geçer ve devreden i_L gibi bir akım geçer. Eğer kumanda devresindeki işaret kaldırılırsa, tristör bloke olur; yine gerilimin tepe değerinde akım sıfırdan geçerken sıfır değerinde kalır. Şekil 6'da tristör tarafından açılıp kapanan reaktör devresiyle, akım ve gerilimin zamanla değişimi verilmiştir.

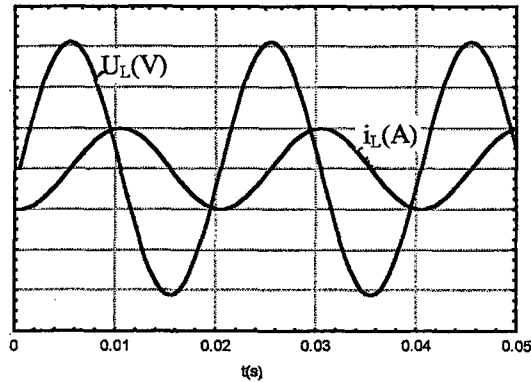
Reaktör devresine Eşitlik 2'de ifade edildiği gibi sinüzoidal bir gerilim uygulandığında reaktör uçlarındaki gerilim,

$$U_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (4)$$

olarak ifade edilir ve reaktör iletimde bulunduğu sürece $U_L = U'$ dur.



(a)



(b)

Şekil 6. Tristör anahtarlamalı reaktör devresi ile akım ve gerilimin zamanla değişimi.

(a) Prensip bağlantı şeması. (b) Gerilim ve akım eğrileri.

Devreden geçen akım,

$$i_L = \frac{1}{\omega L} \int_{\alpha}^{\omega t} U_m \sin \omega t d(\omega t) \quad (5)$$

$$i_L = \frac{U_m}{\omega L} (-\cos \omega t + \cos \alpha) \quad (6)$$

gibi bir değer alır. Burada L, reaktörün özendüktansı ve α kumanda açısıdır. $\alpha = 90^\circ$ kabul edildiğinden,

$$i_L = -\frac{U_m}{\omega L} \cos \omega t \quad (7)$$

elde edilir.

Bu kompanzasyon sisteminde ihtiyaca göre bir veya daha fazla reaktör devreye sokulup çıkarılmaktadır. Yukarıda gösterildiği gibi, her bir reaktörün akımı gücüne göre sabit bir değerdedir.

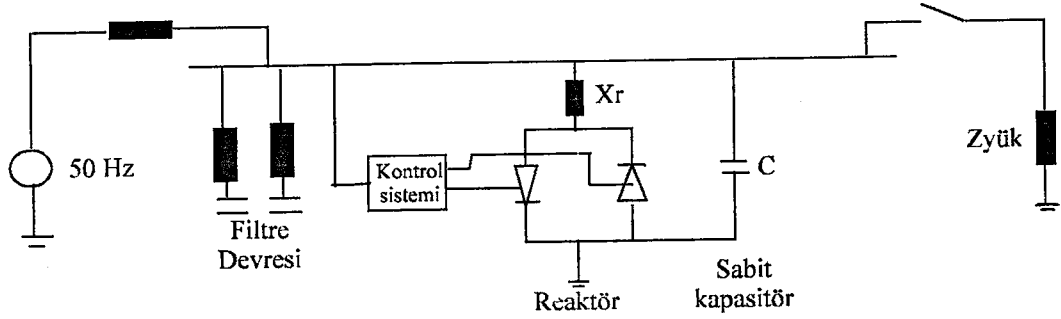
Bu kompanzasyon düzeni sayesinde her bir faz ayrı ayrı kompanse edilebildiğinden doğru ve ters bileşen sistemlerinin büyüklükleri ayrı ayrı kontrol edilerek yük dengesizliği giderilir.

Tristörle açılıp kapanan reaktörlerle yapılan kompanzasyonda reaksiyon zamanı sadece yarım periyottur. Bunun bir başka avantajı da burada harmoniklerin meydana gelmemesidir. Buna karşılık bu kompanzasyon sisteminde reaktörlerin kayıpları önemli bir değere ulaşır.

1.6.4 Sabit Kapasitör ve Tristör Denetimli Reaktörle Kompanzasyon Sistemi

Bu kompanzasyon yönteminin prensipleri, tristörle açılıp kapanan reaktör sisteminin aynısıdır. Ancak birincisinde reaktör kademeli olarak devreye sokulup çıkarıldığı halde, burada reaktör devresine uygulanan gerilimin etkin değeri ve buna bağlı olarak reaktör akımı ihtiyaca göre sürekli olarak ayarlanabilir. Onun için bu sistem oldukça hassastır. Bu sistemin bağlama şeması Şekil 7'de verilmiştir. Bu uygulamada, $Q_C - Q_L$ farkı kademesiz olarak karşılanmaktadır. Bu sonuç reaksiyon zamanının kısaltılması ile sağlanmıştır. Nitekim tristörle anahtarlanan reaktörde tristör, sadece geçici olayların olmadığı gerilim değerinde, yani

gerilimin tepe değerinde bulunduğu anda iletme geçirilmeyip herhangi bir anda da devreye sokulur. Her ne kadar reaktif gücün ölçülmesi için en az yarım periyotluk bir süreye ihtiyaç varsa da ölçü o şekilde yapılabilir ki, ölçü değerleri sürekli olarak ve istendiği kadar kısa zaman aralıkları ile alınır.



Şekil 7. Sabit kapasitör ve tristör kontrollü reaktörle kompanzasyonun prensip bağlama şeması.

Herhangi bir kumanda açısı için devreden geçen akım Eşitlik 6'da verilmiştir. Şekil 6'da tetikleme açısının özel bir hali, yani $\alpha=90^\circ$ için akımın değişimi gösterilmiştir. Bu akım tam bir sinüs şeklinde olduğu halde α açısının farklı değerleri için akım eğrisi, aşağıda açıklandığı gibi değişik şekiller alır.

$\omega t = \alpha$ değerinde T1'den akımın geçmeye başladığı kabul edilsin. Akım Eşitlik 6'yı takip eder ve $\cos\alpha = \cos\omega t$, yani $\omega t = 2\pi - \alpha$ değerinde yeniden sıfır olur. Bundan sonra $\omega t = \pi + \alpha$ değerinde, yani gerilimin negatif yarı periyodunda T2 ateşlenir ve akımın negatif yarı periyodu geçmeye başlar. Buna göre tetikleme açısı için,

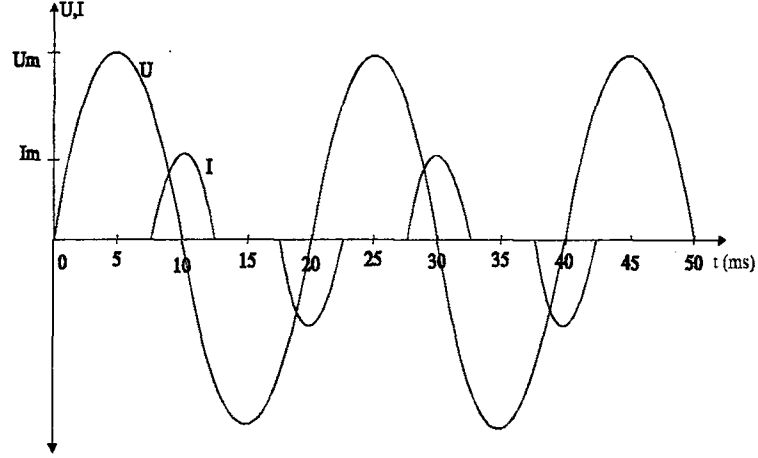
$$2\pi - \alpha \leq \pi + \alpha \text{ veya,}$$

$$\alpha \geq \pi / 2$$

şartı yazılabilir. Şekil 8'de gerilimin ve $\alpha=135^\circ$ için akımın zamana göre değişimi gösterilmiştir.

Burada gösteriliyor ki, α kumanda açısını değiştirmekle, reaktör akımını sıfır ile en büyük değeri arasında sürekli olarak değiştirmek mümkündür. $\alpha=90^\circ$ için akım en büyük değerini alır ve $\alpha=180^\circ$ için sıfır olur.

Şekil 8'deki akım şeklinin incelenmesinden görülür ki, akım tam bir sinüs değildir. Harmonikler içermektedir.



Şekil 8. Tristör denetimli reaktörün $\alpha=135^\circ$ için geriliminin ve akımının değişimi.

Her bir ölçü değeri için ölçü ve kontrol düzeni uygun bir α kumanda açısı seçer ve bunu takip eden anda reaktör devreye sokulur.

Bu kompanzasyon sisteminde kayıplar oldukça fazladır ve harmonik ihtiva etmektedir. Yapılan analizlere göre 5. harmonik %5, 7. harmonik %2.55 mertebesindedir. Kumanda açısına bağlı olarak harmonikler de sıfır ile en büyük değerleri arasında değişir.

1.6.5 Tristör Anahtarlama Kapasitörler, Tristör Anahtarlama Reaktörler ve Tristör Denetimli Reaktörden Oluşan Kompanzasyon Sistemi

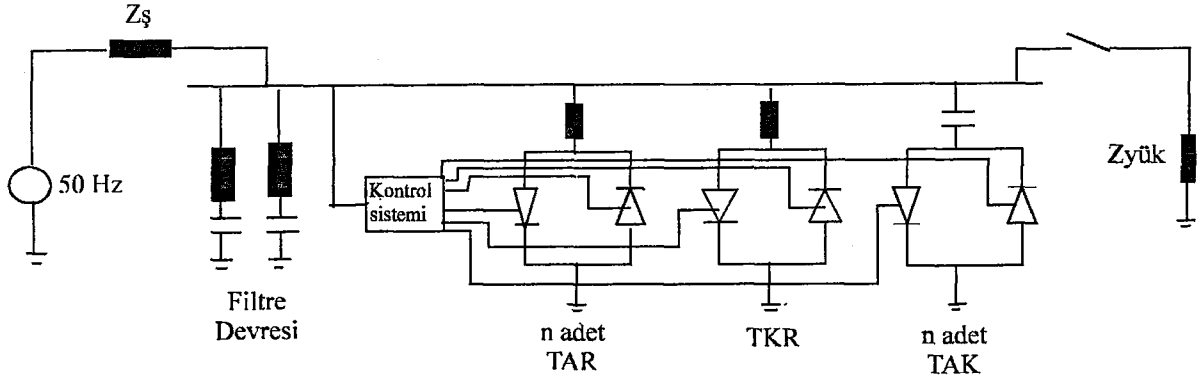
Tristörle devreye sokulup çıkarılan kondansatörlerle yapılan kompanzasyonda, toplam reaktif güç uygun sayıda kademelere bölünür ve bu yüzden de ayar, kademeli olur. Bu kondansatörlerin tristör kontrollü bir reaktör ile kombine edilmesi, reaktif güç kompanzasyonu bakımından en uygun çözüm olur.

Böyle bir kompanzasyon sisteminde, tam endüktif bir yükten tam kapasitif bir yüke kademesiz olarak ayar yapılabilir.

Bu sistemde reaktör, kontrol edilebilen toplam gücün küçük bir kısmını teşkil ettiğinden, üretilen harmonikler de toplam akımın temel harmoniğine oranla küçük olurlar. Bu

sistemde tristör, her iki reaktif kısmın kontrollü bir şekilde süratle devreye sokulup çıkarılmasını mümkün kılar.

Kısacası, bu kompanzator sistemiyle kademesiz ve sürekli kontrol yapılır, hemen hemen hiç geçici durum söz konusu olmaz, üretilen harmonikler çok küçüktür, kayıplar düşüktür, kontrol ve işletme kolaydır. Şekil 9'da böyle bir sistemin bağlantı şeması verilmiştir.



Şekil 9. TAK, TAR ve TDR'den oluşan kompanzator sistemi ile kompanzasyonun prensip bağlama şeması.

1.7 Üç Fazlı Dengesiz Bir Yükün Kompanzasyonunun Simetrik Bileşenler Yöntemi ile İncelenmesi

Herhangi üç fazlı bir sisteme bağlanan yük yıldız (Y) veya üçgen (Δ) bağlanmış olabilir. İncelememize kolaylık sağlayacağı için yükün üçgen bağlı olduğunu kabul edelim. Bu durumda,

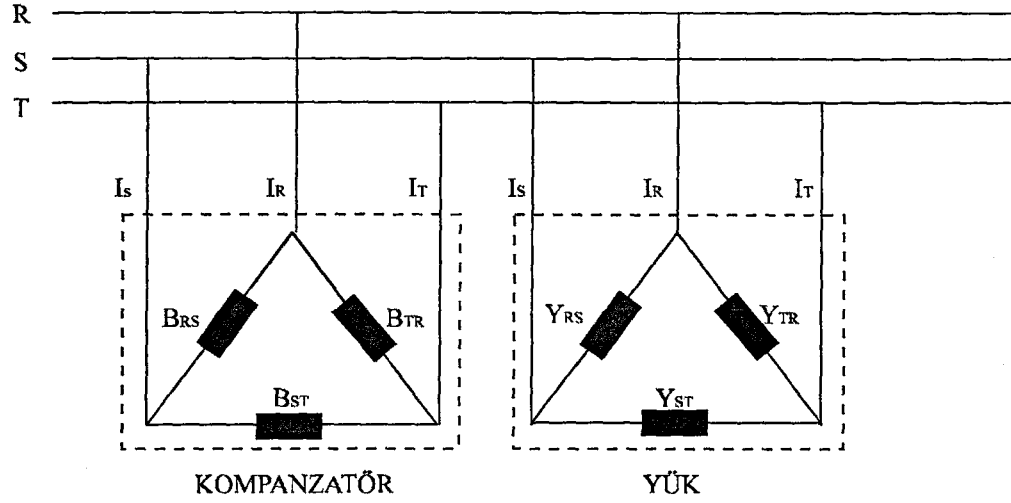
$$Y_{RS} = G_{RS} - jB_{RS} \quad (8)$$

$$Y_{ST} = G_{ST} - jB_{ST} \quad (9)$$

$$Y_{TR} = G_{TR} - jB_{TR} \quad (10)$$

şeklinde yazılabilir. Böyle bir yük için reaktif güç kompanzasyonu Y_{RS} , Y_{ST} , Y_{TR} , admitanslarının sanal kısımlarını oluşturan B_{RS} , B_{ST} , B_{TR} , suseptanslarının yok edilmesiyle gerçekleştirilebilir.

Şekil 10'da Δ bağlı bir yük ve yine Δ bağlı bir kompanzator gözönüne alınmıştır.



Şekil 10. Dengesiz Δ bağlı 3-fazlı yük ve Δ bağlı kompanzator.

Giriş geriliminin dengeli olduğu varsayılırsa, U faz gerilimi olmak üzere, $U_R=U$, $U_S=a^2U$, $U_T=aU$ eşitlikleri yazılabilir. Burada $a=e^{-j2\pi/3}$ dir. Yük tarafından çekilen akımlar ve simetrik bileşenler fazörel olarak aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$I_R=(Y_{RS}(1-a^2)-Y_{TR}(a-1))U \quad (11)$$

$$I_S=(Y_{ST}(a^2-a)-Y_{RS}(1-a^2))U \quad (12)$$

$$I_T=(Y_{TR}(a-1)-Y_{ST}(a^2-a))U \quad (13)$$

I_R akımının sıfır (I_{R0}), doğru (I_{R1}) ve ters (I_{R2}) bileşenleri aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$I_{R0}=0 \quad (14)$$

$$I_{R1}=(Y_{RS}-Y_{TR})U \quad (15)$$

$$I_{R2}=-(a^2Y_{RS}-Y_{ST}-Y_{TR})U \quad (16)$$

Burada amaç, I_{R1} 'in sanal kısmı ile I_{R2} 'nin tümünün yok edilmesi olduğunu söyleyebiliriz. Kompanzatoré ait akımların simetrik bileşenleri de aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$I_{R0}^k=0 \quad (17)$$

$$I_{R1}^k = j(B_{RS}^k - B_{ST}^k - B_{TR}^k)U \quad (18)$$

$$I_{R2}^k = -j(a^2 B_{RS}^k - B_{ST}^k - aB_{TR}^k)U \quad (19)$$

Bu durumda kompanzasyonu sağlayacak koşullar aşağıdaki biçimde belirlenir.

$$I_{R2} - I_{R2}^k = 0 \quad (20)$$

$$\text{Im}(I_{R1} - I_{R1}^k) = 0 \quad (21)$$

Yukarıdaki Eşitlik 20 ve Eşitlik 21 yardımıyla kompanzasyon için gerekli suseptanslar aşağıdaki gibi elde edilir.

$$B_{RS}^k = -1/3U(\text{Im}(I_{R1}) + \text{Im}(I_{R2})) - \text{Re}(I_{R2}) \quad (22)$$

$$B_{ST}^k = -1/3U(\text{Im}(I_{R1}) + 2\text{Im}(I_{R2})) \quad (23)$$

$$B_{TR}^k = -1/3U(\text{Im}(I_{R1}) + \text{Im}(I_{R2})) - \text{Re}(I_{R2}) \quad (24)$$

Böylece kompanzasyon için gerekli suseptanslar yük akımının simetrik bileşenleri cinsinden belirlenmişlerdir. Bu yaklaşım uygulamada gerekli denetim düzeninin oluşturulmasında bize ışık tutmaktadır. Suseptansın değiştirilmesi için genellikle tristörlü sistemler kullanılmaktadır.

1.8 Statik VAR Kompanzatorün Modeli ve Analizi

Kontrol edilebilen statik var kompanzatorün şematik diyagramı Şekil 11'de, gerilim reaktif güç karakteristiği ise Şekil 12'de verilmiştir. Eğim tipik olarak %1-5'dir. Kapasitif limitte, statik VAR kompanzator bir şönt kapasite gibi davranır. Endüktif limitte ise bir şönt reaktör gibi davranır.

Tristörlerin tetikleme açısı α 'ya bağlı suseptans bağıntısı,

$$B(\alpha) = B_C - B_L(\alpha) \quad (25)$$

dir. Reaktif gücün α ile değişimi ise,

$$Q(\alpha) = -[B_C - B_L(\alpha)]. U^2 \quad (26)$$

şeklindedir. $B_L(\alpha)$ ise aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilir.

$$B_L(\alpha) = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi X_L} \quad (27)$$

Reaktörün reaktansı da aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır.

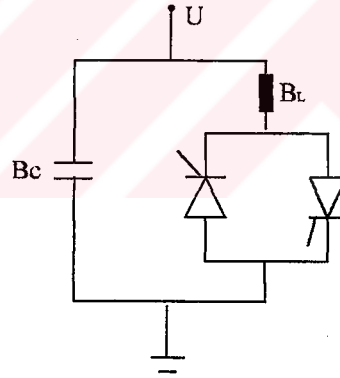
$$X_L = U^2 / Q_L \quad (28)$$

Burada,

B_C : Sabit kondansatörün suseptans değeri,

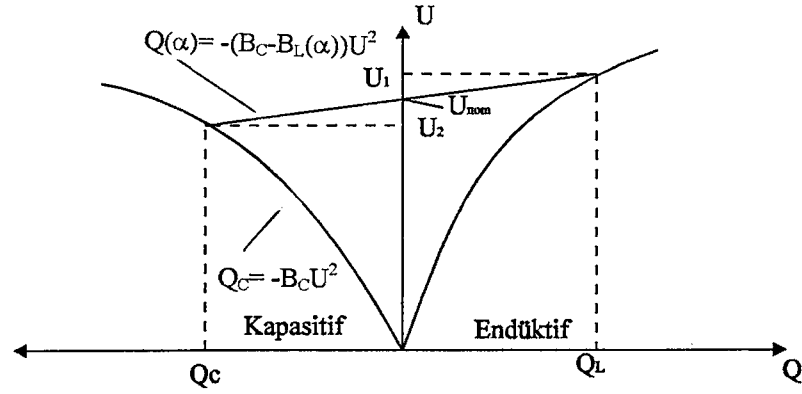
$B_L(\alpha)$: Tristör kontrollü reaktörün α ile değişen süseptans değeri

U : Uç gerilimidir.



Şekil 11. Statik VAR kompanzatorün şematik gösterimi.

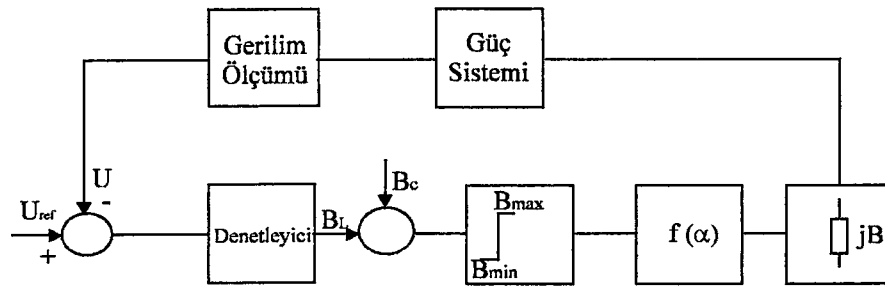
U ç gerilimi, nominal gerilimin üzerinde ise ($V > V_{nom}$) kompanzator endüktif karakterde olacak ve şebekeden endüktif reaktif güç alacaktır. $[Q(\alpha) > 0]$. $V_{nom} > V$ ise kompanzator kapasitif karakterde olacak ve sisteme kapasitif reaktif güç verecektir $[Q(\alpha) < 0]$.



Şekil 12. Statik VAR kompanzatorünün sürekli halde gerilim-reaktif güç bağıntısı.

Şekil 13'de yukarıda formüle edilen bağıntıları gerçekleştirecek bir kontrol modeli verilmiştir. Bu kontrol modelinde süseptans, lineer ve sürekli olarak kontrol edilebilir. Burada güç sistemi, kompanzator kontrol modelinin geri besleme hattını oluşturur. Bu geri besleme hattı, bağlı bulunan süseptanstaki değişikliklere karşılık olarak hatsonu gerilimini verir. Yüklü durumda hatsonu gerilimi aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanır.

$$|U_r| = \frac{2.45}{\sqrt{1 - (2.45 - B)^2}} \quad (29)$$



Şekil 13. Bir güç sisteminin statik VAR kompanzasyonunun blok gösterimi.

1.9 Tristör Kontrollü Reaktörün Harmonik Analizi

Tristör kontrollü reaktöre Eşitlik 2'deki gerilim uygulanırsa reaktörden geçen akımın anlık değeri aşağıdaki şekilde yazılabilir [35].

$$i_L = \begin{cases} U_m B_L (\cos \alpha - \cos \omega t), & \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0, & \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \quad (30)$$

Tristör kontrollü reaktörün harmonik analizinin yapılabilmesi için bazı kabullerin yapılması gerekir. Bunlar; reaktör ve transformatör sargılarının omik dirençlerinin, sızıntı reaktansının ihmal edilmesi ve tristörlerin ideal anahtarlama elemanı olarak kabul edilmesidir.

Tristör kontrollü reaktörden geçen akım, Fourier analizi yöntemi ile bulunur [29].

Akımın esas bileşeni I_1 'in aktif bileşeni;

$$(-0.5)X_L \sum_m [\cos(\theta_{hm} + \theta_{lm} + k_m) - 0.5 \cos(2\theta_{hm} + k_m) + \cos(\theta_{hm} - \theta_{lm} - k_m) - 0.5 \cos(2\theta_{lm} + k_m) - \cos k_m - (\theta_{hm} - \theta_{lm}) - \sin k_m] \quad (31)$$

I_1 akımının reaktif bileşeni;

$$0.5 X_L \sum_m [\sin(\theta_{hm} + \theta_{lm} + k_m) - 0.5 \sin(2\theta_{hm} + k_m) + \sin(\theta_{hm} - \theta_{lm} - k_m) - 0.5 \sin(2\theta_{lm} + k_m) - \sin k_m - (\theta_{hm} - \theta_{lm}) + \cos k_m] \quad (32)$$

Akımın aktif bileşeninin n. harmoniği, I_n ;

$$(-0.5)X_L \sum_m [\cos(n\theta_{hm} + \theta_{lm} + k_m) - 0.5 \cos(n\theta_{hm} - \theta_{lm} - k_m) - 1/(n+1) \cos((n+1)\theta_{hm} + k_m) - 1/(n-1) \cos((n-1)\theta_{hm} - k_m) - 1/n(n+1) \cos((n+1)\theta_{lm} + k_m) + 1/n(n-1) \cos((n-1)\theta_{lm} + k_m)] \quad (33)$$

Akımın reaktif bileşeninin n. harmoniği, I_n ;

$$0.5 X_L \sum_m [\sin(n\theta_{hm} + \theta_{lm} + k_m) + \sin(n\theta_{hm} - \theta_{lm} - k_m)]$$

$$[-1/(n+1)]\sin((n+1)\theta_{lm} + k_m) - [1/(n-1)]\sin((n-1)\theta_{lm} - k_m)$$

$$[-1/n(n+1)]\sin((n-1)\theta_{lm} + k_m) + [1/n(n-1)]\sin((n+1)\theta_{lm} + k_m] \quad (34)$$

Burada;

X_L : $\sqrt{3}U / \omega L$ (Ω)

U : Faz gerilimi (V)

ω : Açısal frekans (rad/s)

L : Reaktör indüktansı (Henry)

θ_1 ve θ_h : Akımın başlangıç ve bitiş açı değerleri (derece)

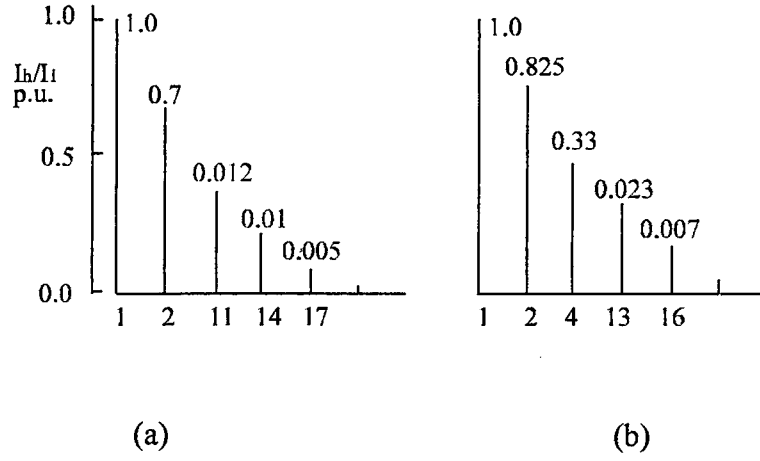
k : Faz geriliminin açısı (derece)

olarak alınmıştır.

Tablo 1. α tetikleme açısına bağlı olarak m, θ_1 , θ_h ve k değerleri.

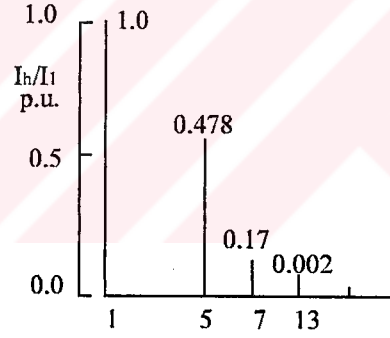
α	m	θ_1	θ_h	k
$0 < \alpha \leq 60$	1	$150 - \alpha$	$150 + \alpha$	-30
	4	$390 - \alpha$	$390 + \alpha$	210
$60 < \alpha \leq 120$	3	$390 - \alpha$	$270 + \alpha$	150
	4	$270 + \alpha$	$510 - \alpha$	210
$120 < \alpha < 180$	2	$30 + \alpha$	$390 - \alpha$	30
	3	$150 + \alpha$	$510 - \alpha$	50

Yukarıdaki denklemlerin çözülmesi sonucu bazı tetikleme açılarındaki harmoniklerin dağılımı Şekil 14’de verildiği gibi elde edilir.



(a)

(b)



(c)

Şekil 14. TKR akımının bazı tetikleme açılarındaki harmonik dağılımı.

(a) $\alpha = 120^\circ$, (b) $\alpha = 135^\circ$, (c) $\alpha = 90^\circ$ açılı değerleri için.

1.10 Harmoniklerle Kondansatörlerin Yüklenmesi

Bir şebekeye bağlı kondansatörün gücü, bilindiği gibi şebeke geriliminin ve frekansının yükselmesiyle aşağıdaki formüle bağlı olarak bir büyüklük kazanacaktır.

$$Q_2 = Q_1 \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \cdot \frac{f_2}{f_1} \quad (35)$$

Q_1 : Nominal f_1 frekansında ve U_1 gerilimindeki kondansatör gücü.

Q_2 : Değişen f_2 frekansındaki ve U_2 gerilimindeki kondansatör gücü.

U_1, f_1 : Kondansatör gücü Q_1 'in imalat değerleri.

Bir kondansatörün gücü sadece gerilimin ve akımın etkin değerlerinin çarpımıyla hesaplanamaz.. Gücün tam olarak hesabında temel frekansın yanında harmoniklerin de analizi gerekir ve çeşitli harmoniklerdeki güçlerin tek tek toplamı kondansatörün gerçek gücünü verir.

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} U_n^2 \cdot n \cdot \omega_1 \cdot C \quad n=(1, 3, 5, 7, \dots) \quad (36)$$

ω_1 : temel frekansın açısal frekansı.

n : harmonik.

U_n : n . harmonikteki gerilimin etkin değeri.

Hesaplama kolaylığı açısından temel frekansın yanında sadece bir harmonik alınırsa

$$Q = U_1^2 \cdot \omega_1 \cdot C + U_n^2 \cdot n \cdot \omega_1 \cdot C \quad (37)$$

olarak ifade edilir. Akımlar cinsinden ise,

$$Q = \frac{I_1^2}{\omega_1 \cdot C} + \frac{I_n^2}{n \cdot \omega_1 \cdot C} \quad (38)$$

olarak ifade edilebilir. Gerilimin etkin değeri U ve akımın etkin değeri I , temel ve harmonik gerilim ve akımların geometrik toplamına eşittir.

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_n^2} \quad (39)$$

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_n^2} \quad (40)$$

olarak ifade edilebilir. Burada $I_1 = U_1 \cdot \omega_1 \cdot C$ 'dir.

1.11 Harmoniklerin Süzülmesi

Güç elektroniğindeki gelişmeler tristörlü düzeneklerin hemen her yerde kullanılmasına neden olmuştur. Devrelerde kullanılan tristörler harmonik akımları üretirler. Bu harmonik akımlar şebekenin empedansı ile gerilim düşümü meydana getirir ve böylelikle şebeke gerilimi bu harmonik gerilimlerin etkisiyle sinüs şeklini kaybetmeye, bozulmaya başlar.

Alçak gerilim şebekesine bağlı filtre devreleri ile bu harmonikler süzülebilirler. Filtre devreleri kondansatör önüne konulan bobinlerle seri bir rezonans devresi meydana getirilmek suretiyle yapılmaktadır ve belli harmonik akımı için bobin ve kondansatörün ortak direncinin yaklaşık sıfır olması sağlanmalıdır. Böylelikle harmonik akımın büyük bir kısmı bu devrede süzülmüş çok az bir kısmı da şebekeye akmış olacak ki, bu da şebeke geriliminin bozulmasını etkileyecek büyüklükte gerilim düşümü meydana getirmeyecektir. Filtre devreleri şebekenin temel frekansındaki akımlar için daima kapasitif görünümdeydir. Böylelikle reaktif güç kompanzasyonu da yapmış olmaktadır.

1.12 Filtre Devrelerinin Hesabı

Filtre devreleri daima küçük harmoniklerden başlanarak kurulmalıdır. 5, 7, 9, 11 ve 13. harmonikler için konulan tüm kondansatör gücünün %50'si beşinci, %25'i yedinci, %25'i de onbir ve onüçüncü harmonikler için kullanılır. Birçok hallerde sadece beşinci harmonik için filtre devresi yeterli olacaktır.

Kondansatörler önüne konulacak bobinlerin endüktif reaktansları X_L ; kondansatör kapasitif reaktansına bağlı olarak

$$X_L(\%) = (100 / n^2) X_C \quad (41)$$

formülü yardımıyla hesaplanır. Buradan;

$$5. \text{ harmonik için } X_L : \%4X_C$$

$$7. \text{ harmonik için } X_L : \%2.041X_C$$

$$9. \text{ harmonik için } X_L : \%0.826X_C$$

$$11. \text{ harmonik için } X_L : \%0.592X_C$$

olarak bulunur.

1.13. Orantı-İntegral Etki ve Denetim Organı (PI Denetim)

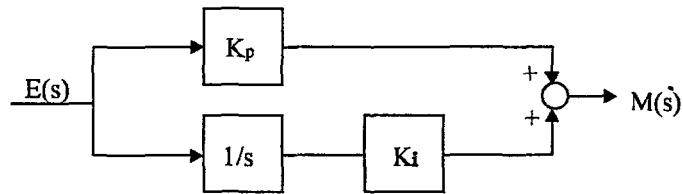
Orantı ve integral denetim elemanının çıkışından elde edilen işaret $m(t)$, Şekil 15’de görüldüğü gibi kontrol girişine uygulanan $e(t)$ işaretin integralinin alınması ve kuvvetlendirilmesi sonucu elde edilmektedir. Matematiksel olarak kontrol organı yani PI denetleyici çıkışı:

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (42)$$

şeklinde ifade edilir. PI denetimin transfer fonksiyonu,

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (43)$$

olarak yazılabilir. Burada $T_i = K_p / K_i$ ’dir.



Şekil 15. Orantı-İntegral (PI) denetleyici modeli.

Kararlı bir sistemde $t \rightarrow \infty$ için sürekli halde, sürekli hal hatası $e(\infty) = 0$ olduğunda bunun integrali alındığından integral ve orantı kontrol elemanlarının çıkışında bir işlenmiş kontrol işareti vardır ve dinamik olarak bu işaret hatayı sıfır yapmaya çalışır. Yalnız orantı kontrol elemanının çıkışında bir işaret olabilmesi için $e(\infty)$, sıfırdan farklı olmalıdır. Ancak bu durumda

sistem bir işlenmiş kontrol işareti üretebilir ve sıfır hata halinde orantı çıkışı sıfır olduğundan sistem sükunette olur. Buradan şu sonuç çıkar ki, integral ve orantı kontrol elemanı olan bir kontrol sisteminin birim basamak girişine ilişkin çıkışının hatası sürekli halde sıfır olur.

Orantı etkiye integral etki ilavesi, orantı etkinin tek başına kullanılması halinde sistemde ortaya çıkan kalıcı durum hatasını ortadan kaldırır. İntegrasyon işlemi, kalıcı durum hatasını ortadan kaldırmakla beraber aynı bağıl kararlılık koşullarında verilen sistemin yanıt hızı düşer. İntegral etki kazancını (K_i) yükseltmekle cevap hızı artsa da kazanç değerinin çok fazla yükseltilmesi sistemi kararsızlığa götürebilir.

Burada orantı çıkış işareti $U_1(t)$ ve integral çıkış işareti $U_2(t)$ aşağıdaki şekilde ifade edilebilirler:

$$U_1(t) = K_p e(t) \quad (44)$$

$$U_2(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (45)$$

Toplam çıkış işareti $U(t)$ ise; orantı çıkış işareti ve integral çıkış işaretinin toplamına eşittir.

Euler metodu kullanarak yukarıdaki denklemler şu şekilde çözülebilir.

$$U_1(k) = K_p E(k) \quad (46)$$

$$U_2(k) = U_2(k-1) + K_i TE(k) \quad (47)$$

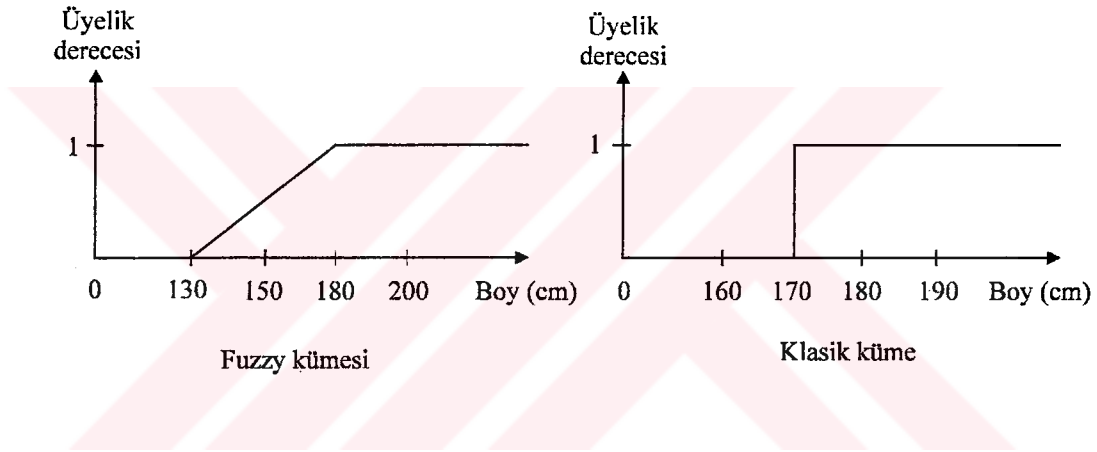
$$U(k) = U_1(k) + U_2(k) \quad (48)$$

Burada T ; örnekleme zamanı, $U(k)$ ise PI denetleyici çıkışıdır.

1.14 Bulanık Küme

1.14.1 Klasik Küme ve Bulanık Küme

Bulanık küme mantığı, klasik mantıktan gelmektedir. Kesin kümeler, ihtiyaçları karşılasa veya karşılayamasa da kesin üyeliklere sahiptir. Sadece doğru ve yanlış bulunduğu kesin bir kümede sadece 0 veya 1 bulunabilir. Oysa bulanık mantıkta 0 ile 1 arasında değişen birçok değer alınabilir. Yani bulanık mantıkta birşeyin ne tam doğru ve ne de tam yanlış olma durumu da mümkündür. Bulanık sistemler ile gerçekleştirilen sistemlerde kullanılan kümelere kısmi üyeliğe geçiş bölgesi oluşturulmaktadır.



Şekil 16. Bulanık küme ile klasik kümenin karşılaştırılması.

Uzun boylu insan kime denir? sorusunun cevabını her iki mantığa göre değerlendirelim. Şekil 16'da görüldüğü gibi klasik küme mantığına göre 160 cm boyundaki bir kişi *uzun boylu insanlar* kümesi içinde değildir. Hatta 169 cm boyundaki bir insan bile bu kümede yer alamamaktadır. Oysa bulanık mantığa göre 160 cm boyundaki kişiye kısa denilmez. Çünkü kısmen de olsa uzun boylu insanlar kümesi içindedir. Hatta bulanık küme içinde tam üyelikten hiç üye olmamaya kadar uzanan bölgede kısmi üyeliğe izin verdiği için 150 cm boyunda olan bir insana uzun boylu insanlar kümesinde değil denilemez. Bunun gibi bir insanın uzun boylu olması, bulanık küme mantığında derecelerine ayrılabilir. Uzundan kısaya giden yol kısmen yanlış ve kısmen doğru olacağı için bu geçişi sağlayacak bir istek kümesine ihtiyaç olacaktır.

Bulanık küme, üye olanlar ile olmayanlar arasındaki kesin geçiş yerine dereceli geçişe olanak verir. Bulanık küme, evrende olası her bireye, bu bireyin bulanık küme içerisindeki üyelik derecesi değerini atayarak matematiksel olarak tanımlanır. Bu derece, bulanık küme tarafından verilen kavram ile uyumludur ve benzer bir bireyin derecesine uyar. Böylece bireyler, bulanık küme içinde daha büyük ve daha küçük değerlere ait olabilirler.

1.14.2 Bulanık Küme Teorisi

U evrensel kümesinin her bir elemanın bir A kümesinin üyesi olup olmadığı, bu kümenin karakteristik fonksiyonu tarafından saptanır. Bir A kümesi için bu fonksiyon, her $x \in U$ için $\mu_A(x)$ değerini aşağıdaki gibi belirlenir:

$$\mu_A = \{ 1 \text{ eğer ve sadece } x \in A, 0 \text{ eğer ve sadece } x \notin A \}$$

Böylece bu fonksiyon, evrensel kümenin elemanlarını 0 ve 1'den oluşan bir kümeye çerçeveler.

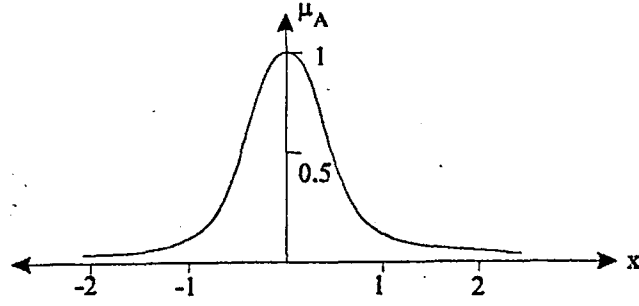
$$\mu_A : U \rightarrow \{ 0, 1 \}$$

Bu fonksiyon, elemanın küme içindeki üyelik derecesini veren ve özel bir aralıkta evrensel kümenin elemanlarına değer atayan bir fonksiyon gibi genelleştirilebilir. Daha büyük değerler, daha yüksek dereceli üyeliği tanımlarken, daha düşük değerler ise üyelik derecesinin küçük olduğu anlamındadır. Bu fonksiyona *üyelik fonksiyonu* (membership function), kümeye de *bulanık küme* (fuzzy set) denir.

U bir evrensel küme ise, A bulanık kümesinin üyelik fonksiyonu μ_A genellikle

$$\mu_A : X \rightarrow [0, 1] \text{ biçiminde ifade edilir.}$$

$[0, 1]$, 0 ve 1 reel sayı aralığıdır. Örneğin dereceleri sıfıra yakın olası bir üyelik fonksiyonu (bir gerçel sayılar bulanık kümesi için) Şekil 17'deki gibi gösterilebilir. Bu fonksiyonu kullanarak bulanık kümedeki her gerçel sayının üyelik fonksiyonu belirlenebilir. Burada 3 sayısı 0.01 değerine, 1 sayısı 0.09 değerine, 0.25 sayısı 0.65 değerine ve 0 sayısı da 1 değerine karşılık düşer. Sıfıra çok yakın sayılar kümesinin üyelik fonksiyonu Eşitlik 49'daki gibi elde edilebilir:



Şekil 17. Sıfıra yakın gerçel sayıların bulanık kümesinin bir olası üyelik fonksiyonu.

$$\mu_A = \left(\frac{1}{1+10x^2} \right)^2 \quad (49)$$

a gibi bir sayıya yakın olan bulanık kümenin üyelik fonksiyonu da Eşitlik 50'deki gibi ifade edilebilir:

$$\mu_A = \left(\frac{1}{1+10(x-a)^2} \right)^2 \quad (50)$$

1.14.3 Bulanık Kümelerin Temel Şartları

x_i 'nin, A bulanık kümesinin bir elemanı olduğunu ve μ_i 'nin ise, x_i 'nin A'daki üyelik derecesi olduğunu varsayalım. A için (A kümesinin desteği);

$$A = \mu_1 / x_1 + \mu_2 / x_2 + \dots + \mu_n / x_n \quad (51)$$

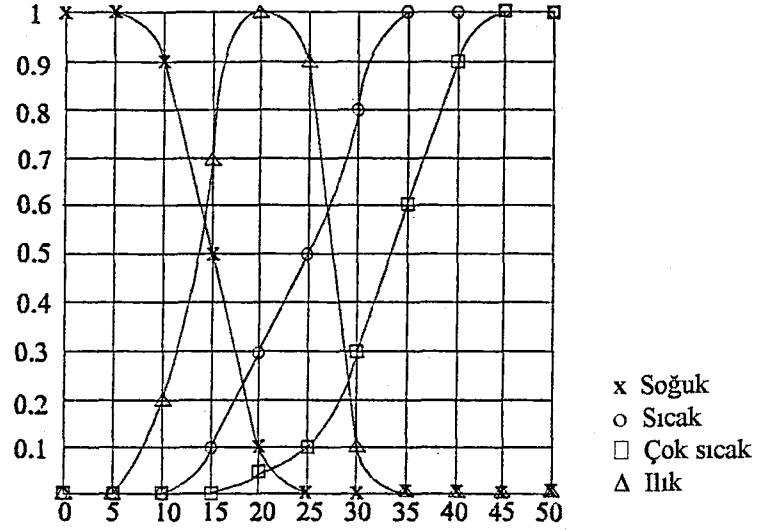
yazılabilir. Bölü işareti, U evrensel kümesinde A bulanık kümesinin sıfır olmayan üyelik derecelerine sahip olan tüm elemanlarını (support), yine bunların A'daki üyelik dereceleri ile birleştirir. Toplam işareti ise cebirsel bir toplam ifade etmekten çok, A kümesinin tanımında eleman çiftlerinin ve üyelik derecelerinin topluca ifade edilmeleri amacı ile kullanılır.

A'nın evrensel bir kümede tanımlı, sonlu ve sayılabilir olduğu kabul edildiğinde

$$A = \sum_i \mu_i / x_i \quad (i=1,2,3,\dots,n) \text{ yazabiliriz.} \quad (52)$$

Benzer olarak x, reel sayıların bir aralığı olmak üzere;

$$A = \int_x \mu_A(x) / x \text{ yazılabilir.} \quad (53)$$

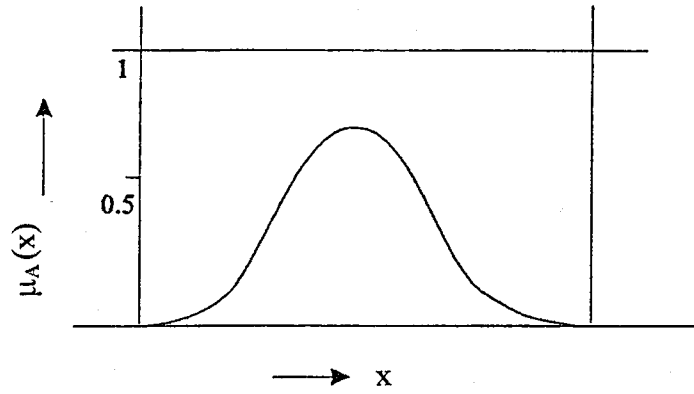


Şekil 18. Doğal bir bulanık küme ve üyelik fonksiyonları.

Tablo2. Atanan üyelik dereceleri tablosu.

Eleman (C°)	Soğuk	Ilık	Sıcak	Çok sıcak
0	1	0	0	0
5	1	0	0	0
10	0.9	0.2	0	0
15	0.5	0.7	0.1	0
20	0.1	1	0.3	0.05
25	0	0.9	0.5	0.1
30	0	0.1	0.8	0.3
35	0	0	1	0.6
40	0	0	1	0.9
45	0	0	1	1
50	0	0	1	1

Bulanık kümenin yüksekliği, bu kümedeki elemanlardan en büyük dereceye sahip olanı tarafından belirlenir. Eğer üyelik derecesi 0-1 kapalı aralığında ise ve en az bir elemanın üyelik derecesi 1 ise bu bulanık küme, *normalizedir* (seviyelidir) denir. Şekil 19'da normalize edilmemiş bir bulanık küme görülmektedir.



Şekil 19. Normalize edilmemiş bir bulanık küme.

A bulanık kümesinin bir α -kesimi, A_α klasik kümesidir ve A 'da bir üyelik derecesine sahip olan U evrensel kümesinin, belirli bir α değerine eşit ya da ondan büyük olan bütün elemanlarını kapsar. Bu ifade şu şekilde özetlenebilir.

$$A_\alpha = \{x \in U \mid \mu_A(x) \leq \alpha\} \quad (54)$$

α değeri rastgele seçilebilir fakat genellikle, bulanık kümenin belirli üyelik dereceleri tarafından belirlenirler. Örneğin, $\alpha=0.1$ için soğuk bulanık kümesinin α -kesimi,

$\text{soğuk}_{0.1} = \{0, 5, 10, 15, 20\}$ biçimindedir. Aynı şekilde:

$\text{soğuk}_{0.5} = \{0, 5, 10, 15, \}$,

$\text{soğuk}_{0.9} = \{0, 5, 10\}$ değerlerini alır.

Buradan görüldüğü üzere, U üzerindeki her bulanık kümenin bütün α -kesimlerinin kümesi, U 'nun içerdiği klasik altkümelerin bir ailesidir.

Verilen A bulanık kümesinin farklı α -kesimlerini gösteren bütün $\alpha \in [0,1]$ seviyeleri kümesine, A 'nın seviye kümesi denir ve aşağıdaki gibi gösterilir:

$$A_A = \{\alpha \mid \mu_A(x) = \alpha \text{ bazı } x \in U \text{ için}\}$$

A_A , U üzerinde tanımlı A bulanık kümesinin seviye kümesidir.

Önemli ve sık sık kullanılan evrensel küme, n -boyutlu Euclidian vektör uzayı R^n 'deki bütün noktalar kümesidir. R^n olarak tanımlanan bu küme, konvekslik şartını sağlamalıdır. R^n 'deki bir A kümesi, her nokta çifti için aşağıdaki şartlarda *konveks*'tir:

r ve s , A 'daki bir nokta çifti olmak üzere eğer;

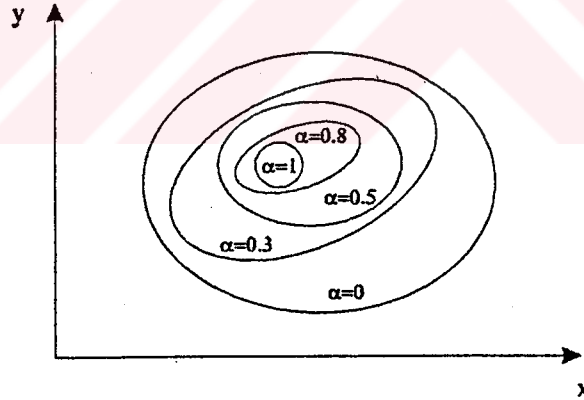
$$r = (r_i | i \in N_n) \text{ ve } s = (s_i | i \in N_n) \text{ ise} \quad (55)$$

ve her reel λ sayısı $0-1$ kapalı aralığında olmak üzere A 'daki t noktası:

$$t = (\lambda r_i + (1-\lambda) s_i | i \in N_n) \text{ ise.} \quad (56)$$

Diğer bir deyişle, A 'daki her r ve s nokta çifti için r ve s 'yi birleştiren bütün noktalar yine A 'nın içinde kalıyorsa, R^n 'deki A kümesi konvektir. Şekil 20'de bir konveks bulanık kümenin α kesimleri verilmiştir.

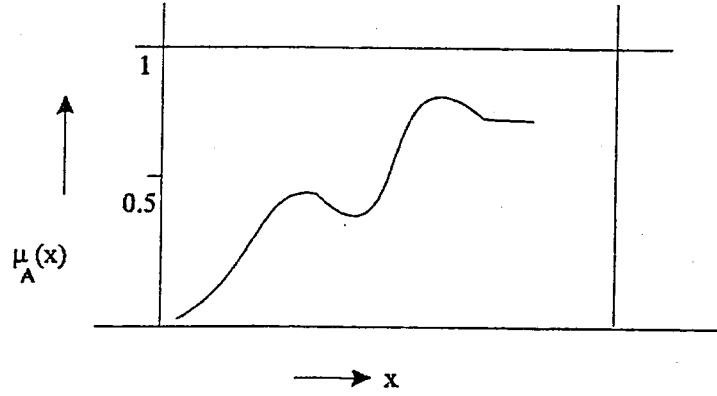
Konveks olmayan yapı ise yine Şekil 21'de verilmiştir.



Şekil 20. R^2 'de tanımlı bir konveks bulanık kümenin α kesimleri.

Bulanık kümeler için konveksliğin tanımı, aynı zamanda bir konveks bulanık kümenin üyelik fonksiyonunun da konveks fonksiyon olması anlamına gelmez.

R üzerinde tanımlı, üyelik fonksiyonu parça parça sürekli olan konveks ve normalizeli bulanık küme, bulanık sayı denir. Böylece bir bulanık sayının, değişen derecelerde bazı aralıklar içindeki gerçel sayıları içerdiği düşünülebilir. Örneğin Şekil 17'deki üyelik fonksiyonu, bir bulanık sayının gösterimi gibi düşünülebilir.



Şekil 21. Konveks olmayan bir bulanık küme.

1.14.4 Bulanık Kümelerin Özellikleri

1.14.4.1 Sayısal Büyüklük

Sonlu bir U evrensel kümesi üzerinde tanımlı bir A bulanık kümesinin sayısal büyüklüğü, A içindeki U 'nun bütün elemanlarının üyelik derecelerinin toplamıdır.

Böylece:

$$|A| = \sum_{x \in U} \mu_A(x) \quad (I=1, 2, \dots, n) \quad (57)$$

çok sıcak için bulanık kümenin sayısal büyüklüğü:

$$|\text{çok sıcak}| = 0 + 0 + 0 + 0 + 0.05 + 0.1 + 0.3 + 0.6 + 0.9 + 1 + 1 = 3.95 \text{ tir.}$$

1.14.4.2 Alt Küme

A bulanık kümesindeki, U evrensel kümesinin her bir elemanının üyelik derecesi, B bulanık kümesindeki üyelik derecesine eşit veya ondan küçük ise A , B 'nin altkümesidir denir .

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x) \text{ biçiminde gösterilir. (Her } x \in U \text{ için, } A \subseteq B)$$

Evrensel kümemizdeki her eleman için *çok sıcak* bulanık kümesinin, *sıcak* bulanık kümesinin bir alt kümesi olduğu kolayca görülebilir.

$$\mu_{\text{çok sıcak}}(x) \leq \mu_{\text{sıcak}}(x)$$

1.14.4.3 Eşit Küme

Her $x \in U$ için eğer $\mu_A(x) = \mu_B(x)$ ise A, B 'ye eşittir denir. $A=B$ olarak gösterilir. $A=B$ ise, $A \subseteq B$ ve $B \subseteq A$ 'dır.

Eğer A ve B bulanık kümeleri, eşit değil ise (en azından bir $x \in U$ için); $\mu_A(x) \neq \mu_B(x)$ ise $A \neq B$ 'dir. Örneğimizde 4 bulanık kümeden hiçbiri birbirine eşit değildir.

1.14.4 Uygun Alt Küme

A, B 'nin altkümesi, fakat B 'ye eşit değilse, A 'ya, B 'nin uygun altkümesidir. Bu durumda:

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (\text{Her } x \in U \text{ için}) \text{ ve}$$

$$\mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (\text{En az bir } x \in U \text{ için}) \text{ ise bunu şu şekilde ifade etmek mümkündür:}$$

$A \subset B$ 'dir. Eğer ve sadece $A \subseteq B$ ve $A \neq B$ ise.

Daha önce bahsedildiği gibi örnek üzerinde; çok sıcak, sıcak'ın altkümesidir ve bu iki bulanık küme, eşit değildir. Öyleyse çok sıcak, sıcak'ın uygun altkümesidir denebilir.

1.14.4.5 Bileşim özelliği

U 'da A ve B gibi iki bulanık altküme verilsin. $A \cup B$ bileşim değeri;

$\mu_{A \cup B}(x) = \max [\mu_A(x), \mu_B(x)]$ biçiminde verilen üyelik fonksiyonu ile, U 'nun bir bulanık kümesidir. Bunu şu şekilde de yazabiliriz:

$$\forall x \in U \Rightarrow \mu_{A \cup B}(x) = \max [\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (58)$$

Bu boolean mantığında OR işlemine karşılık düşer.

Bu tanılamadan görüldüğü gibi, A ve B bulanık kümeleri, $A \cup B$ bulanık kümesinin bir alt kümesidir. Soğuk ve çok sıcak kümelerinin bileşimini aldığımızda, şu kümeyi elde ederiz:

$$\begin{aligned} \text{soğuk} \cup \text{çok sıcak} &= 1/0 + 1/5 + 0.9/10 + 0.5/15 + 0.3/20 + 0.5/25 + 0.8/30 + 1/35 \\ &+ 1/40 + 1/45 + 1/50 \end{aligned}$$

1.14.4.6 Kesişim Özelliği

U 'da A ve B gibi iki bulanık altküme verilsin. $A \cap B$ kesişim değeri;

$\mu_{A \cap B}(x) = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)]$ biçiminde verilen üyelik fonksiyonu ile, U 'nun bir bulanık kümesidir. Yani:

$$\forall x \in U \Rightarrow \mu_{A \cap B}(x) = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (59)$$

Bu, boolean mantığında AND işlemine karşılık gelmektedir.

$A \cap B$ bulanık kümesindeki bir x elemanın üyelik derecesi, A ve B bulanık kümelerindeki üyelik derecelerinden daha küçük olanıdır. Kesişme operatörü gereği, $A \cap B$ bulanık kümesi, A 'nın ve B 'nin altkümesidir.

soğuk ve sıcak'ın kesişimleri şöyle gösterilebilir:

$$\text{soğuk} \cap \text{sıcak} = 0.1/15 + 0.1/20$$

Bulanık tümleyen için kesişim ve bileşim operatörleri, geçerli klasik küme operatörlerine özdeştir.

1.14.4.7 Tümleyen Özelliği

Üyelik dereceleri $[0,1]$ kapalı aralığında olduğunda, A ile, U evrensel kümesinde bulanık kümenin tümleyenini gösterebiliriz ve;

$$\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (60)$$

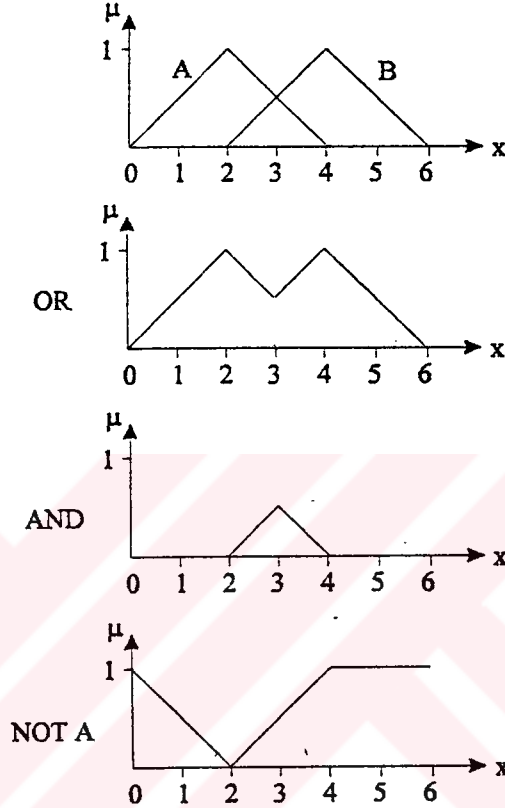
olarak tanımlarız. (Her $x \in U$ için)

Bu boolean NOT mantığına eşittir.

Böylece, eğer bir A bulanık kümesinde 0.8 üyelik derecesine sahip bir eleman varsa, A 'nın tümleyeninde bunun üyelik derecesi 0.2 olacaktır. Örneğin, çok sıcak bulanık kümesinin tümleyeni olarak, *çok sıcak değil* dersek, bu değer:

çok sıcak değil= $1/0 + 1/5 + 1/10 + 1/15 + 1/15 + 0.95/20 + 0.9/25 + 0.7/30 + 0.4/35 + 0.1/40 + 0/45 + 0/50$ olacaktır.

Bu tanımlama, çok sıcak değil bulanık kümesinin, soğuk bulanık kümesine eş olduğu anlamına gelmez.



Şekil 22. OR, AND, NOT A işlevlerinin grafikte gösterimi.

1.14.4.8 Yayma (Extension) İlkesi

Klasik matematiksel ifadelerin, bulanık teoriye genelleştirilmesine izin veren temel ilke, yayma ilkesidir.

A bulanık kümesi ($A \in P(x)$):

$A = \mu_1 / x_1 + \mu_2 / x_2 + \dots + \mu_n / x_n$ olduğunda ve f , U kümesindeki noktaları V kümesine izdüşüren bir fonksiyon olduğunda, yayma ilkesi Eşitlik 61'i sağlar.

$$f(A) = f(\mu_1 / x_1 + \mu_2 / x_2 + \dots + \mu_n / x_n) = \mu_1 / f(x_1) + \mu_2 / f(x_2) + \dots + \mu_n / f(x_n) \quad (61)$$

Eğer U 'nun elemanlarının 1'den fazlası, f tarafından aynı $y \in V$ elemanına izdüştürülürse, A bulanık kümesindeki bu elemanların üyelik derecelerinden en büyük olanı, $f(A)$ 'daki y için üyelik derecesi olarak seçilir. Eğer y 'ye hiçbir $x \in U$ atanmamışsa, $f(A)$ 'da y 'nin üyelik derecesi 0'dır.

f fonksiyonu genellikle, çeşitli farklı x_1, x_2, \dots, x_n kümelerinin elemanların düzenli olarak izdüştürür.

$$(f(x_1, x_2, \dots, x_n) = y, y \in V \text{ gibi})$$

Bu durumda her x_1, x_2, \dots, x_n üzerinde tanımlı ayrık A_1, A_2, \dots, A_n bulanık kümeleri için, $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 'deki y elemanlarının üyelik derecesi, A_1, A_2, \dots, A_n 'deki x_1, x_2, \dots, x_n 'in üyelik derecelerinin en küçüğüne eşittir.

Basit bir örnek verirsek, f 'in, $x_1 = \{a, b, c\}$ ve $x_2 = \{x, y\}$ 'den, $V = \{s, t, z\}$ 'ye değer çifti atadığını düşünelim. f , aşağıdaki gibi olabilecektir:

	x	y
a	s	s
b	t	z
c	z	s

A_1 'in, U_1 'de tanımlı bir bulanık küme olduğunu, ve A_2 'nin de U_2 'de tanımlı bir bulanık küme olduğunu varsayalım. Örnek olarak:

$$A_1 = 0.3 / a + 0.9 / b + 0.5 / c$$

$$A_2 = 0.5 / x + 1 / y$$

$B = f(A_1, A_2) \in P(V)$ bulanık kümesindeki s, t, z üyelik dereceleri, yayma ilkesi yardımı ile, aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\mu_B(s) = \max [\min (0.3, 0.5), \min (0.3, 1), \min (0.5, 1)] = 0.5;$$

$$\mu_B(t) = \max [\min (0.9, 0.5)] = 0.5;$$

$$\mu_B(z) = \max [\min (0.5, 0.5), \min (0.9, 1)] = 0.9.$$

Böylece, yayma ilkesi gereği;

$f(A_1, A_2) = 0.5 / s + 0.5 / t + 0.9 / z$ olarak elde edilir.

Bulanık kontrol, uzman sistem temeline dayalı kootrol sistemine benzer olarak, if-then kurallarınca tanımlanmıştır. Genel bir kural yapısı, aşağıdaki gibidir:

Eğer, $x \rightarrow A$ ve $y \rightarrow B$ ise, $z \rightarrow C$ 'dir.

$x, y, z \rightarrow$ Bulanık değişkenler,

$A, B, C \rightarrow U, V, W$ evrenlerindeki bulanık altkümeleridir.

Ayrıca bulanık mantığa sık sık, *bulanık uzman sistem* de denir. Bununla birlikte bulanık mantık, daha az kurala sahiptir.

1.14.5 Zadeh'e Göre Bazı Bulanık Özellikler

Olasılığın bazı kümelerinin gösteriminde, bulanık kümeler sık sık yanlış varsayılır. Benzer değerler alabiliyor olmalarına rağmen üyelik dereceleri olasılık değerleri değildirler. Sonlu bir evrensel kümede olasılıklar toplamı 1'e eşit olmasına rağmen, üyelik derecelerinde böyle bir durum sözkonusu değildir [1].

Bulanık küme teorisine ait iki temel nokta şunlardır:

1. Üyelik derecesi öznel ve koşula bağlıdır. Çoğu uygulamada örneğin 0.8 gibi bir bulanık sayı, üyelik derecesini vermeye yeterlidir. Üyelik derecesi de bulanık değerler alabilen bir bulanık kümeyle ultrafuzzy (alanlıbulanık) denir.

2. Üyelik derecesi ve olasılığı arasındaki ilişki kesin değildir. Örneğin bir bireyin bir kümeyle 0.8 üyelik derecesi ile bağlı olduğunu varsayalım. 0.8 değeri, hangi bireyin kümenin bir üyesi olduğu hakkında bir bilgi vermez. Fakat koşul bağımlı üyeliğin bulanık bir gösterimini yapar. Bununla birlikte olasılık, bu konu dahilinde kesin bir ölçümdür. Klasik olasılık hesapları, bireylerin tamamının temeline dayalıdır. Bulanık küme teorisinde ise bireyin üyelik derecesi, diğer bireylerin tamamına ilişkin değildir. Bununla birlikte bulanık kümede, üyelikler bakımından fark bulunmaktadır. Olasılık şartları ve bulanık küme arasında anlamlı bir fark olmasına rağmen, en azından teorik açıdan bu iki yapı arasında kesin bir ilişki vardır. Zadeh'e göre, c kümesinin olasılığı $P_c(c)$, Eşitlik 62'de ifade edilmiştir:

$$P_r(c) = \int_{\Omega} f_{z_c}(X) dP_r(X) \quad (62)$$

Bu ifadenin anlamı şudur: $X \in \Omega$ bulanık olayının olasılığı, c kümesinde bu olayın $f_{z_c}(X)$ üyelik fonksiyonunun bir beklentisidir.

Bununla birlikte pratik olarak bu denklem, üyelik fonksiyonunun çıkarımında direkt olarak kullanılmaz. Bazen üyelik fonksiyonu, bir bulanık sınıftaki bireyin kendi değerini verebilir. Bu durumda üyelik fonksiyonunun saptanmasında uygun bir yöntem, öznel olasılığın belirlenmesinde kullanılan yaklaşıma benzer olacaktır. Diğer durumlarda üyelik fonksiyonu, istatistiksel verilerden elde edilebilir. Örneğin sınıf 1'de X 'in üyeliğinin saptanması için, X 'in 100 defa gözlemlenmesi sonucu, bu gözlemlerin kaçında sınıf 1 içine düştüğü tesbit edilebilir. Bununla birlikte, üyelik fonksiyonunun saptanması için genelleştirilmiş bir yöntem yoktur.

Zadeh, bulanık kümelerin, klasik küme operatörleri ile nasıl ifade edilecekleri konusunda bazı tanımlar verilmiştir. Zadeh'e göre bulanık kümenin bileşim ve kesişim işlemleri, klasik küme operatörleri tarafından Eşitlik 63 ve 64'de olduğu gibi formüle edilebilir.

$X \in \Omega$ olmak üzere;

$$f_{z_{c_1 \text{ OR } c_2}}(X) = \max [f_{z_{c_1}}(X), f_{z_{c_2}}(X)] \quad (63)$$

$$f_{z_{c_1 \text{ AND } c_2}}(X) = \min [f_{z_{c_1}}(X), f_{z_{c_2}}(X)] \quad (64)$$

Üyelik fonksiyonu tarafından c kümesinin tümleyeni, Eşitlik 65'deki gibi ifade edilebilir.

$$f_{z_c}(X) = 1 - f_{z_c}(X) \quad (65)$$

Ama c 'nin tümleyeninin bu şekilde tanımı, c değil ifadesinin doğal değerinin matematiksel sezgilerden ortaya çıkamaması yüzünden tam doğru değildir. Bu konuda daha yetenekli bir tümleyen olan λ -tümleyen tanımı Eşitlik 66'da verilebilir. (Sugeno tarafından önerilmiştir)

λ , bir parametre olmak üzere;

$$f_{z_c}(X) = [1 - f_{z_c}(X)] / [1 + f_{z_c}(X)], \lambda > -1 \quad (66)$$

$\lambda=0$ olduğunda, bulanık λ -tümleyen tanımı Zadeh'in tümleme tanımına uyar. Bulanık küme teorisinin, belirsizliğin diğer gösterimlerine olan bir başka üstünlüğü de, bulanık

ölçümdür. Bulanık küme ile bulanık ölçüm arasındaki fark, kısaca şu örnekle gösterilebilir. Bir grup insanı yaşlarına göre gruplandırabiliriz. (20'li, 40'lı, 60'lı gibi.) Bu kümeler klasiktir. Bu sınırlarda bulanıklık yoktur. Öznel bulanık ölçümdeki en yüksek değere atanmış küme, kişilerin yaşlarının en iyi tahminini sağlar. Kesinliğin derecesini gösteren bir sonraki en yüksek değer, ikinci en iyi tahmin için bir kaynak olacaktır.

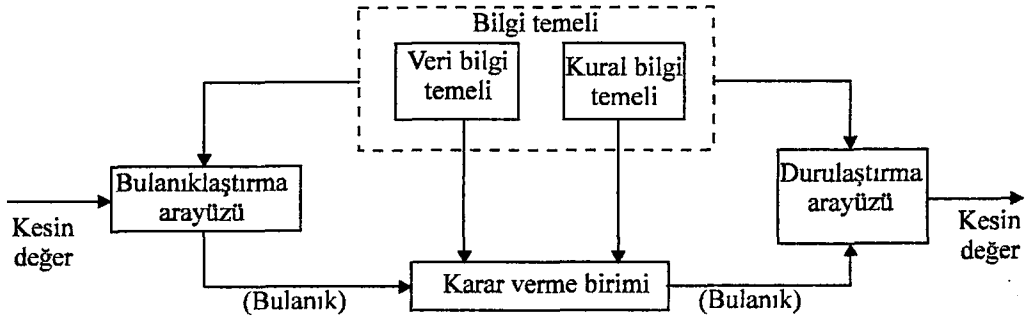
Özetle, bulanık kümenin modellemedeki kullanışlılığı, üyelik fonksiyonunun uygunluğuna bağlıdır. Böylece, fonksiyonun uygulamada doğru ve güvenilir tesbiti, konunun özünü oluşturur.

1.14.6 Bulanık Sistem Yapısı

Bir bulanık sistemin veri temeline dayalı ve kural yapıları içerisinde mevcut insan bilgi ve tecrübesini yerleştirecek standart bir yöntem yoktur. Ayrıca, çıkış hata ölçüsünü küçültecek veya verimliliği yükseltecek olan üyelik fonksiyonunun ayarlanması da gerekir.

Eğer basınç yüksek ise, yüzey düşüktür önermesinde *basınç* ve *yüzey* dilbilimsel etiketler, *yüksek* ve *düşük* ise, üyelik fonksiyonları tarafından karakterize edilen dilbilimsel değerlerdir.

Eğer V yüksek ise, $güç=kV^2$ 'dir. Bu önermenin ilk kısmındaki *yüksek* terimi, uygun bir üyelik fonksiyonu tarafından karakterize edilmiş bir dilbilimsel terim olmasına rağmen, ikinci kısım, V giriş değerine bağlı bulanık olmayan bir denklem tarafından tanımlanmıştır. Bir bulanık sistem Şekil 23'de görüldüğü gibi beş bloktan oluşur [36].



Şekil 23. Bulanık bir sistemin ana blokları.

1. Kesin değerli girişleri, dilbilimsel değerler ile karşılaştırabilme derecesine dönüştüren bulanıklaştırma arayüzü.
2. Bulanık kurallarda kullanılmış bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarını tanımlayan bir veri bilgisi temeli.
3. Bulanık eğer-ise kurallarını içeren kural bilgisi temeli.
4. Kurallar için geçerli olan bir karar verme birimi.
5. Sistemin bulanık sonuçlarını kesin bir çıkışa izdüştüren, durulaştırma arayüzü.

Bulanıklaştırma birimi; aşağıdaki işlevleri kapsamaktadır:

1. Giriş değişkenlerinin değerlerinin ölçümü.
2. Giriş değişkenlerinin değer aralığının evrensel küme ile uygun olacak şekilde ölçeklendirilmesi.
3. Veri girişlerinin bulanık uygun dilbilimsel değerlere çevrilmesi.

Bulanıklaştırma biriminde kesin değerli girişler, dilbilimsel değerler ile karşılaştırılabilme derecesine dönüştürülürler.

Bilgi temeli; uygulamada bölümüne ait ve kontrol amaçlarını sağlayacak bilgileri kapsamaktadır. İki bölümden oluşur:

1. *Veri bilgi temeli*: Bulanık mantık denetleyici içerisindeki bulanık verinin dilbilimsel kontrol kurallarının başarıyla kullanılmasına yönelik gerekli belirlemeler yapılır.
2. *Kural bilgi temeli*: Dilbilimsel kontrol kurallarının bir kümesi olarak kontrol amaçları ve kontrol yöntemi karakterize edilir.

Karar verme birimi; bulanık mantık denetleyicinin karar mekanizmasıdır. Bulanık mantık karar tabloları yardımıyla belirlenen kuralların sisteme uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Karar verme işleminde çeşitli yöntemler kullanılabilir.

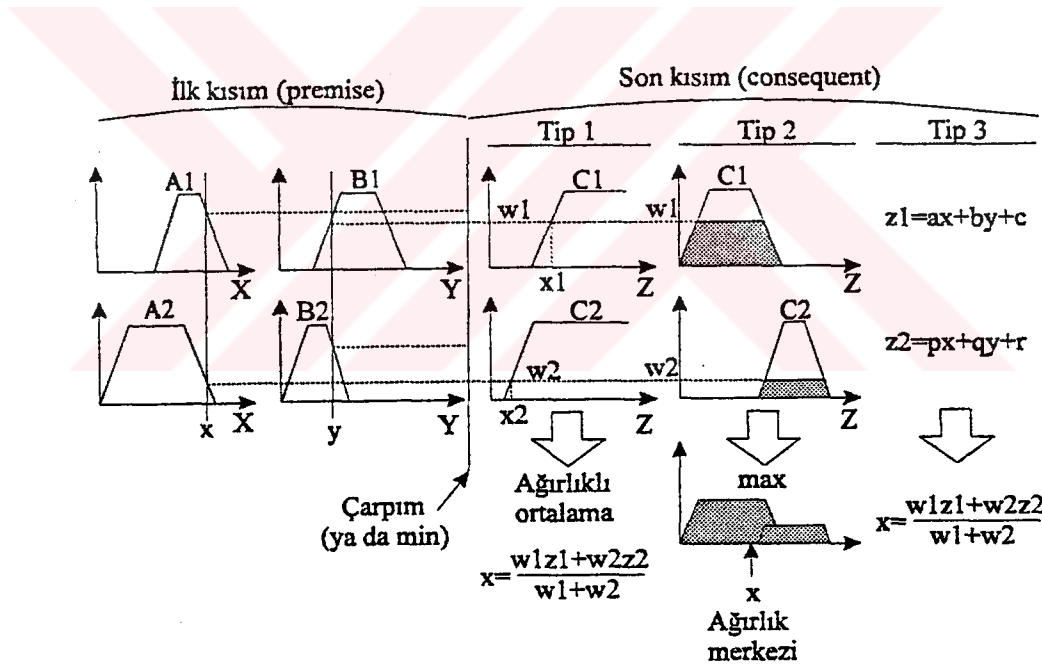
Durulaştırma birimi; sistemin bulanık sonuçlarını evrensel küme ile uygun değer aralığına taşır ve bulanık kontrol işlevini, bulanık olmayan kontrol işlevi olarak sonuçlandırır.

Literatürde bulanık düşüncenin farklı tipleri vardır ve genel olarak üçe ayrılırlar [37].

Tip 1: Çıkış değeri, her kuralın kesin değerli çıkışının ağırlıklı ortalamasıdır. Her kuralın çıkışına da, çıkış üyelik fonksiyonu ve kuralın ateşleme ağırlığı etki eder. Buradaki çıkış üyelik fonksiyonu, sıradan artan (monotonic) olmalıdır.

Tip 2: Bulanık çıkış, sınırlı bulanık çıkışlara, max operatörü uygulanarak elde edilir. Bu sınırlı bulanık çıkışlardan her biri, her kuralın ateşleme gücünün ve çıkış üyelik fonksiyonunun minimumuna eşittir. Çıkışı elde etmek için ağırlık merkezi, bisector of area, mean of maxima gibi yöntemler kullanılabilir.

Tip 3: Takagi ve Sugeno'nun eğer-ise kuralları temeline dayalıdır. Her kuralın çıkışı, giriş değişkenlerinin ve sabit terimin doğrusal kombinasyonudur. Sonuç değer, her kuralın çıkışının ağırlıklı ortalamasıdır. Örneğin bir hata geribeslemeli bulanık kontrol sistemi için ağırlıklı ortalama yöntemini kullanarak çıkış değerinin nasıl bulunduğunu grafiksel olarak inceleyelim.



Şekil 24. Üç ayrı tip için bulanık sistemin grafiksel gösterimi.

Bulanık denetime bir giriş olması açısından Mamdani ve Assilian tarafından geliştirilen buhar türbini (steam engine) denetleyicisi önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmalarıyla Mamdani ve Assilian bugün bulanık denetime Mamdani yaklaşımı olarak adlandırılan ve bugün kullanılan birçok pratik yaklaşımın temeli olan yöntemi ortaya koymuşlardır. Bu denetleyici,

sensörlerden alınan kazan basıncı ve türbin hızı verilerine göre kazan ısı kaynağı ile buhar kısma valfinda ayarlamalar yapar. Eğer bu kontrolör, PID yapısında temellendirmek istenirse basınç ve hız değişkenlerinden herbiri için ikişer değişken düşünmek zorunludur. Bunlar basınç için basınç hatası (istenen seviyenin altındaki ve üstündeki miktar) ve basınç değişimi (en son ölçümden beri basınçtaki değişikliğin derece ve yönü), hız için ise aynı şekilde hız hatası ve hız değişimidir. Mamdani ve Assilian'ın [4] bu uygulama için geliştirdikleri denetleyici, aşağıdakine benzer bir şekilde 24 kural içermektedir. Örnek olarak:

EĞER Basınç Hatası Negatif Büyük bir değer,
veya Negatif Orta bir değer,
veya Negatif Küçük bir değer;

ve

Basınç Değişikliği Pozitif Büyük bir değer Değil;

ve

Hız Hatası Negatif Büyük bir değer;

ve

Hız Değişikliği Pozitif Büyük bir değer değil

İSE Isı ayarlaması Pozitif Orta bir değer olmalı.

Bütün kuralları bir tabloda toplamak görünüş ve algılama açısından faydalı olabilir. Verilen örnekte ısıtıcı ayarlaması sadece basınç hatası (e) ve basınç değişikliğine (de) göre olsaydı, bu durumda ısı kaynağı kontrol kurallarını Tablo 3'deki gibi oluşturabiliriz.

Tablo 3. Isı kaynağı kontrol kuralları.

de	NL	NM	NS	^e ZZ	PS	PM	PO
NL	PL	PL	PL	PM	PM	PS	ZZ
NM	PL	PL	PM	PM	PS	ZZ	NS
NS	PL	PM	PM	PS	ZZ	NS	NM
ZZ	PM	PM	PS	ZZ	NS	NM	NM
PS	PM	PS	ZZ	NS	NM	NM	NL
PM	PS	ZZ	NS	NM	NM	NL	NL
PL	ZZ	NS	NM	NM	NL	NL	NL

Burada önemli olan şey *Basınç Hatası Negatif Büyük bir değerdir* gibi bir cümle ile ne anlatılmak istendiğidir. Bu cümledeki Basınç Hatası ve Negatif Büyük terimlerinin hepsi dile ait birer ifadedir. Burada üzerinde durulması gereken nokta, bir buhar türbini kontrolünü bir çok defalar tecrübe etmiş bir insanın türbin kontrolü hakkındaki bilgisini bu tip cümlelerle ifade edebilmesidir. Bu tip cümle dizileri kural temelli bilgiye dayalı uzman (expert) sistemlere de benzemektedir. Yani, bir insan denetleyicinin yaptığı gibi bu bilgileri otomatik kontrolde makinalara kullanılabılırsa, inceden inceye bir matematiksel modelleme yapılmasına gerek kalmayacaktır. Ayrıca bu bilgilerin tamamen tecrübeye dayanması da gerekmemektedir [6].

Bu problemlere çözüm sunulabilecek iyi yöntem bu aşamada bulanık küme teorisinin kullanılması görülmektedir. Bu da sezgisel bilgiye dayalı kontrol sistemlerinin neden bizi bulanık kontrol denilen bir çözüme götürdüğünün açıklığa kavuşması demektir. Burada Negatif büyük (NL), Negatif Orta (NM), Negatif Küçük (NS), Sıfır (ZZ), Pozitif Küçük (PS), Pozitif Orta (PM) ve Pozitif Büyük (PL) gibi Basınç Hatası (BH) değerleri bulanık kümeler olarak tanımlanabilir. Bu bulanık kümelerine üyelik fonksiyonları tayin edilir. BH değişkeni, bulanık kümeler veya bulanık sayılar ile gösterilen değerler aldığı için bu değişken, bulanık değişken veya dile ait değişken olarak tanımlanabilmektedir.

Dolayısıyla, pratikte değişkenlerin değerlerinin tanımlanması kuralların ortaya konulmasından önce gelir. Üyelik fonksiyonları, bazen lineer olmayan şekiller de alabilir, fakat genellikle üçgen ve yamuk gibi şekiller kullanılmaktadır. Bundan sonra dile ait değişkenlerle temellendirilmiş kurallardan bulanık sonuçların (fuzzy inference) nasıl yapılacağı konusu önemlidir.

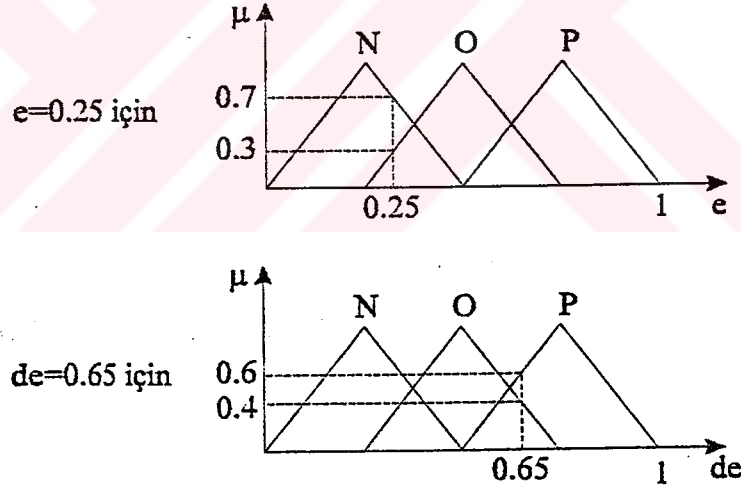
Öncelikle giriş değerleri (basınç hatası, basınç değişikliği, hız hatası, hız değişikliği) fuzzifike edilecektir. Kullanılacak üyelik fonksiyonları ve bulanık mantık işlemcileri yardımıyla her bir çıkış için üyelik değerleri bulunabilir. Toplam çıkışı elde etmek amacıyla her bir kural için ayrı ayrı çıkış değeri hesaplanır ve çıkışlar çeşitli yöntemler yardımıyla birleştirilerek bir tek çıkış işareti üretilir. Daha sonra bu çıkış değeri defuzzifike edilir. Çünkü son çıkış değeri halen bulanık bir değerdir. Bu değerle kontrol sisteminde geri besleme yapmak mümkün değildir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1 Bulanık Mantık

Bulanık mantık teorisinin uygulanmasında bir ciddi problem, karmaşık yapılı ya da tam varsayımli teknikler olmadan bu teorisinin yürütülmesidir. Çünkü bulanık üyelik fonksiyonlarının tamamı, öznel yargıların temeline dayalıdır.

Önce bulanık mantık konusu teorik olarak ve sayısal değerlerle aşağıda açıklanmıştır. Bir kontrol sistemi olarak bulanık mantığı kullandığımızı ve bu sisteme giriş olarak, hata ve hatanın değişiminin (e ve de) uygulandığı varsayalım. Bu işaretler, bulanık kontrol sistemine girmeden önce $[0, 1]$ kapalı aralığına normalizelenmelidir. Bu giriş değerleri ilk olarak bulanıklaştırılacaktır. Bundan sonra hedef sistemin giriş ve çıkışlarına üyelik fonksiyonları tayin edilir. Üyelik fonksiyonları yüksek, orta, düşük gibi nicel tanımlamalardır. Bunlar giriş ve çıkış değişkenlerinin değer aralıkları olarak kabul edilir. Tipik olarak bir üyelik fonksiyonu, x - y düzleminde bir eğri olarak gösterilir. Bu düzlemde x eksenini, giriş ve çıkış değişkenlerinin değer aralıklarını gösterirken, y eksenini ise değişkenin üyelik derecesini verir.



Şekil 25. Hata ve hatanın değişiminin üyelik derecelerinin bulunması.

N: Negatif değeri,

O: Orta değeri ve

P: Pozitif değeri simgeleri.

Bir bulanık kontrol sisteminin üyelik derecelerinin bulunması için yapılan işlem işlem, yukarıdaki gibidir. Şimdi bu üyelik dereceleri için bir kural tablosu belirlenmek istenirse, bu tablo aşağıdaki gibi olabilecektir.

Tablo 4. Örnek bulanık kontrol sistemi için kural tablosu.

de

	N	O	P
e	P	P	O
	O	O	N
	P	N	N

Bu tabloya göre kurallar dilbilimsel olarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

Eğer hata \rightarrow N ve hatanın değişimi \rightarrow N ise $u_1 = P$

Eğer hata \rightarrow N ve hatanın değişimi \rightarrow O ise $u_1 = P$

Eğer hata \rightarrow N ve hatanın değişimi \rightarrow P ise $u_1 = O$

Eğer hata \rightarrow O ve hatanın değişimi \rightarrow N ise $u_1 = P$

Eğer hata \rightarrow O ve hatanın değişimi \rightarrow O ise $u_1 = O$

Eğer hata \rightarrow O ve hatanın değişimi \rightarrow P ise $u_1 = N$

Eğer hata \rightarrow P ve hatanın değişimi \rightarrow N ise $u_1 = O$

Eğer hata \rightarrow P ve hatanın değişimi \rightarrow O ise $u_1 = N$

Eğer hata \rightarrow P ve hatanın değişimi \rightarrow P ise $u_1 = N$

Şekil 25'de görüldüğü gibi, e hata değeri için bulanık üyelik değerleri;

O üyelik fonksiyonu için $\rightarrow \mu_e = 0.3$,

N üyelik fonksiyonu için $\rightarrow \mu_e = 0.7$ 'dir.

Ayrıca hatanın değişimi için bulunan üyelik değerleri de şu şekildedir:

O üyelik fonksiyonu için $\rightarrow \mu_e = 0.4$,

N üyelik fonksiyonu için $\rightarrow \mu_e = 0.6$.

Buradan görüldüğü gibi, hatanın alacağı herhangi bir değer için, hatanın değişiminin üyelik derecesinin iki farklı değeri ortaya çıkabilir. Yine hatanın değişiminin üyelik derecesinin alacağı herhangi tek değer için, hata değerinin üyelik derecesi, iki farklı değerde olabilir. Bu durumda, e hata ve de hatanın değişimi değerlerinin üyelik derecelerinin dört farklı kombinasyonu ortaya çıkar:

Tablo 5. Kural tablosundaki dört bölge.

		de		
		N	O	P
e	N		1	2
	O		3	4
	P			

Burada hata negatif ve hatanın değişimi sıfır ise, uygulanacak kontrol işaretinin pozitif olmasının istendiği anlatılır. Yine bu tabloya göre, hata sıfır ve hatanın değişimi sıfır ise kontrol işareti sıfır, hata negatif ve hatanın değişimi pozitif ise (yani son hata değeri, bir önceki hata değerine göre artıyorsa) kontrol işareti sıfır, hata sıfır ve hatanın değişimi pozitif ise kontrol işareti negatif olarak, uzman kişi tarafından saptanmıştır. Herbir andaki hata ve hatanın değişimine karşılık gelen kontrol çıkışı üyelik fonksiyonu, kontrol kuralından belirlendikten sonra, bu çıkışa ait üyelik derecesi ise sistemin özelliğine göre;

$$\mu(u) = \min [\mu(e), \mu(de)] \quad (67)$$

$$\mu(u) = \max [\mu(e), \mu(de)] \quad (68)$$

fonksiyonlarından biri kullanılarak belirlenir.

Kural tablosundan da görüleceği gibi e ve de'nin alacağı değerlere karşılık, belirlenen sayıdaki kontrol kuralı yardımıyla, her bir andaki kontrol kurallarının toplam çıkış değeri, *ağırlık merkezi yöntemi* olarak bilinen aşağıdaki ifadede bulunur:

$$u = (\sum_i \mu_{ui} u_i) / \sum_i \mu_{ui} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (69)$$

Burada u_i , her bir i. durumdaki kontrol kuralı sonucundaki çıkış üyelik fonksiyonunun merkezidir. μ_{ui} , ise her bir i. durumdaki kontrol kuralı sonucundaki çıkış üyelik fonksiyonundan bulunan üyelik değeridir.

Örnek bulanık kontrol sisteminin çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezleri:

N üyelik fonksiyonu için 0.25,

O üyelik fonksiyonu için 0.5,

P üyelik fonksiyonu için 0.75

olarak belirlenmiştir. Bulanık mantık aritmetiği gereği, dört kombinasyon için ortaya çıkan üyelik değerleri, min operatörüne uygulanırsa;

e de

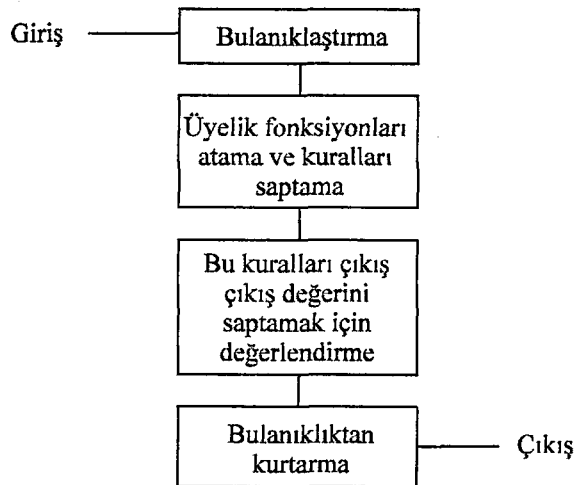
$$O \quad O \quad \text{için} \rightarrow \mu_{u1} = \min (0.3, 0.4) = 0.3$$

$$O \quad P \quad \text{için} \rightarrow \mu_{u2} = \min (0.3, 0.6) = 0.3$$

$$P \quad O \quad \text{için} \rightarrow \mu_{u3} = \min (0.7, 0.4) = 0.4$$

$$P \quad P \quad \text{için} \rightarrow \mu_{u4} = \min (0.7, 0.6) = 0.6$$

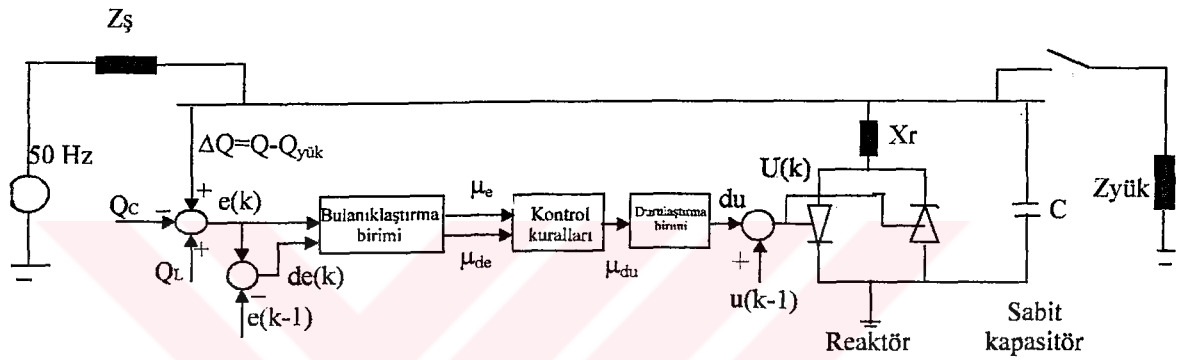
Bulanık mantık aritmetiğinin son işlemi ise, uygulanacak olan kontrol işaretinin normalizeli değerinin saptanmasıdır. Bu saptama işlemi, yukarıda da bahsedildiği gibi, *ağırlık merkezi yöntemi* olarak bilinen ifadeden elde edilir. Yukarıda verilen değerlere göre sisteme uygulanacak kontrol işaretinin normalizeli değeri $u = 0.453$ olarak bulunur.



Şekil 26. Bir bulanık kontrol sisteminin işlem adımları.

2.2 Yükün Çektiği Reaktif Gücün Bulanık Mantık Denetimli Statik VAR Sistemlerinden Karşılanması

Bu çalışmada yükün şebekeden çektiği reaktif gücü minimize etmek amacıyla, statik VAR kompanzatorle gerçekleştirilen kompanzasyon işleminin denetimi bulanık mantıkla yapılmaktadır. Bu amaçla sabit kapasitör ve tristör kontrollü reaktörden (TKR) oluşan kompanzatorde, reaktörü devreye alan tristörlerin tetikleme açıları bulanık denetleyici ile ayarlanmaktadır.



Şekil 27. Kontrol işleminin blok diyagramı.

Öncelikle kompanzasyonunu gerçekleştireceğimiz sistemin şebekeden çekebileceği maksimum endüktif reaktif gücü karşılayabilecek sabit kondansatör, sistem barasına paralel bağlanır. Ayrıca bu kondansatörün kapasitif reaktif gücünü kompanze edebilecek (yükün reaktif güç çekmemesi durumunda) tristör denetimli reaktör de yine aynı biçimde sistem barasına paralel bağlanır. Yükün ve kompanzatorün çektikleri toplam reaktif gücü ölçmek amacıyla bir varmetre sistem barasına bağlanır.

Burada şebekeden çekilen reaktif güç optimizasyonunu sağlayabilmek ve istenilen güç katsayısıyla çalışabilmek amacıyla reaktörün verdiği endüktif reaktif güç ayarlanır. Böylece hem güç faktörü düzeltilir hem de gerilimin stabil olarak nominal gerilim değerinde kalması sağlanır. Bununla birlikte şebeke ile olan reaktif güç alışverişi en aza indirilmeye çalışılır.

Yükü baraya bağlayan anahtar kapatıldığı anda hem sabit kapasitör hem de reaktör devreye girer ve reaktörü baraya bağlayan tristörler 90° ve 270° 'de tetiklenerek tüm reaktör

gücü baraya verilir. Aynı zamanda sabit kapasitör de baraya doğrudan bağlı olduğundan kapasitif reaktif gücünün tamamını baraya verir.

Yani başlangıçta hata (e) ve hatanın değişimi (de) için 1 değeri alınarak tristörlerin 90° ve 270° 'de tetiklenmesi sağlanır. Sonraki aşamalarda $\Delta Q + Q_L - Q_C$, hata değeri olarak alınır.

Burada;

ΔQ : Şebekeden çekilen reaktif güç ile yükün çektiği reaktif güç farkı.

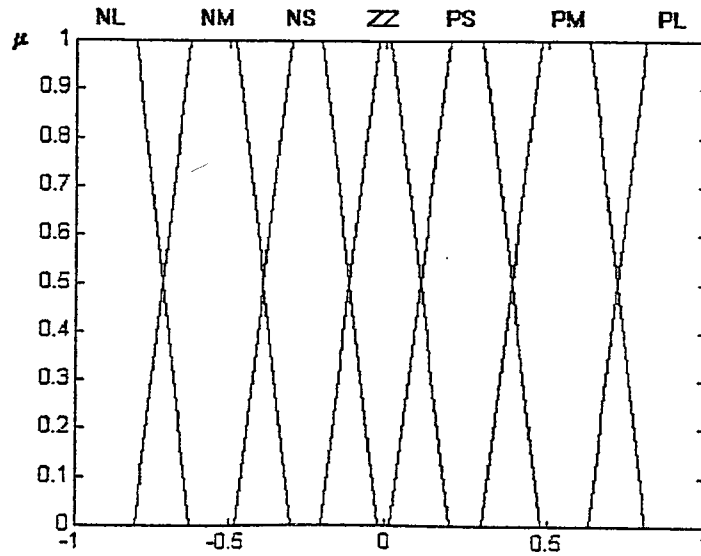
Q : Şebekeden çekilen reaktif güç.

$Q_{yük}$: Yükün çektiği reaktif güç.

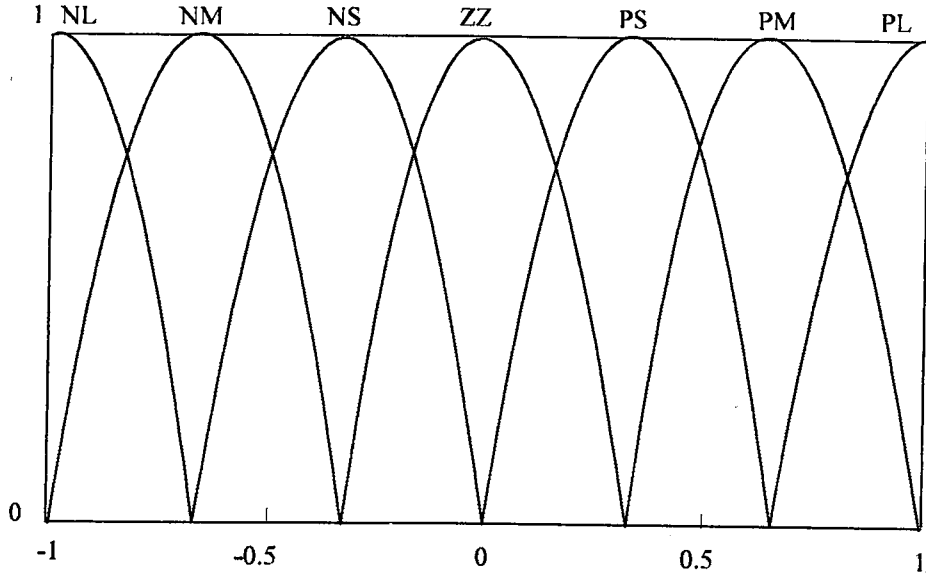
Q_L : Reaktörün baraya verdiği endüktif reaktif güç.

Q_C : Kapasitörün baraya verdiği kapasitif reaktif güç.

Hatanın değişimi $de(k)$ için de hata değeri $e(k)$ ve bir önceki hata değeri $e(k-1)$ arasındaki fark alınır. Bulanıklaştırma biriminde bu değerler Q_C değerine bölünerek bulanıklaştırılarak bulanık denetime uygun hale getirilirler. Elde edilen $e(k)$ ve $de(k)$ değeri için daha önce tayin edilen üyelik fonksiyonlarındaki üyelik değerleri elde edilir. Bu çalışmada yamuk ve sinüs biçimli olmak üzere iki ayrı üyelik fonksiyonu alınmıştır.



Şekil 28. İlk üyelik fonksiyonu.



Şekil 29. İkinci üyelik fonksiyonu.

Bazı tecrübeler ve deneme-yanılma yöntemiyle elde edilen karar tablosu yardımıyla, bir $du(k)$ çıkış işareti üretilir. Bu sistem için kontrol kuralları tablosu tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Sistemin kontrol kuralları tablosu.

de	e						
	NL	NM	NS	ZZ	PS	PM	PL
NL	PL	PL	PL	PM	PS	PS	ZZ
NM	PL	PM	PM	PS	ZZ	ZZ	NS
NS	PL	PM	PM	PS	ZZ	NS	NM
ZZ	PM	PS	ZZ	ZZ	NS	NM	NM
PS	PM	PS	ZZ	NS	NM	NM	NL
PM	PS	ZZ	NS	NS	NM	NM	NL
PL	ZZ	NS	NS	NM	NM	NL	NL

Bu çıkış işareti normalize edildikten sonra, tristörlerin tetiklenmesi için bir darbe işaretine dönüştürülür.

2.2.1 Matematiksel Yapı

TKR'nin baraya verdiği endüktif reaktif güç, her faz için reaktör akımı ile reaktör geriliminin çarpımına eşittir.

σ , iletim açısı ve α tetikleme açısı olmak üzere;

$$\alpha = \pi - (\sigma/2) \quad (70)$$

olarak yazılabilir.

Reaktör akımını bulabilmek için önce akımın harmonik bileşen ifadesini yazalım [35]:

$$I_L(n) = \sqrt{2} \frac{U}{\pi X_L} \left[2 \cos(\alpha) \sin(n\alpha) / n - \sin((n+1)\alpha) / (n+1) - \sin((n-1)\alpha) / (n-1) \right] \quad (71)$$

n=3, 5, 7, 9, 11.

Toplam akım değeri:

$$i_L(t) = \sqrt{2} U B_L(\sigma) \sin(\omega t - 90) + \sqrt{2} \sum_{n=3}^{11} I_L(n) \sin(n\omega t - 90) \quad (72)$$

Burada;

$$B_L(\sigma) = \frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi X_L} \quad (73)$$

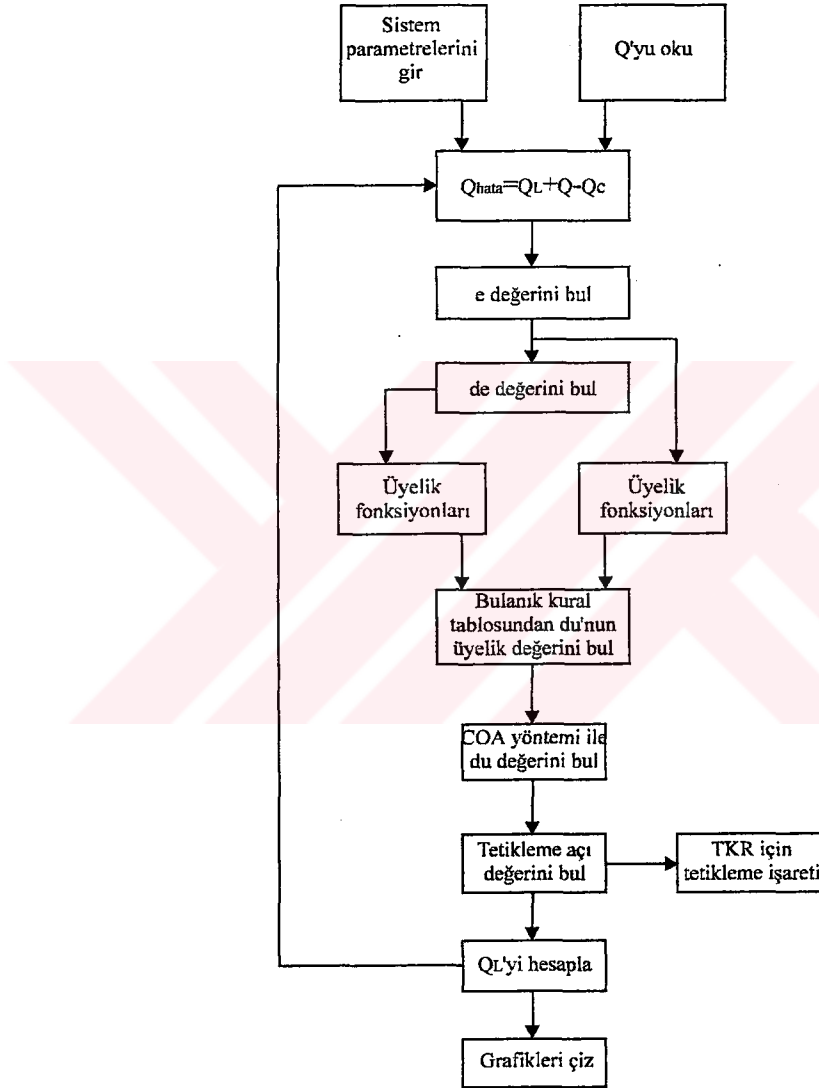
olarak hesaplanır.

Giriş verileri ise şu şekildedir:

$$U_m = 312 \text{ V}, f = 50 \text{ Hz}, C = 10 \text{ mF}, L = 1 \text{ mH}.$$

e ve de'nin üyelik fonksiyonlarını oluşturmak önemli bir sorun dur. Bunlar sistem tepkisini uygun şekilde temsil edecek biçimde oluşturulmalıdır. Değişik üyelik fonksiyonlarının deneme-yanılma yoluyla kullanılmasıyla sistem için en ideal üyelik fonksiyonu bulunmaya çalışılır. Bulanık kontrol kuralları da geçici sistem tepkelerinin ve reaktif güç değişiminin sistemin çalışması esnasında gözlenmesi ile oluşturulur.

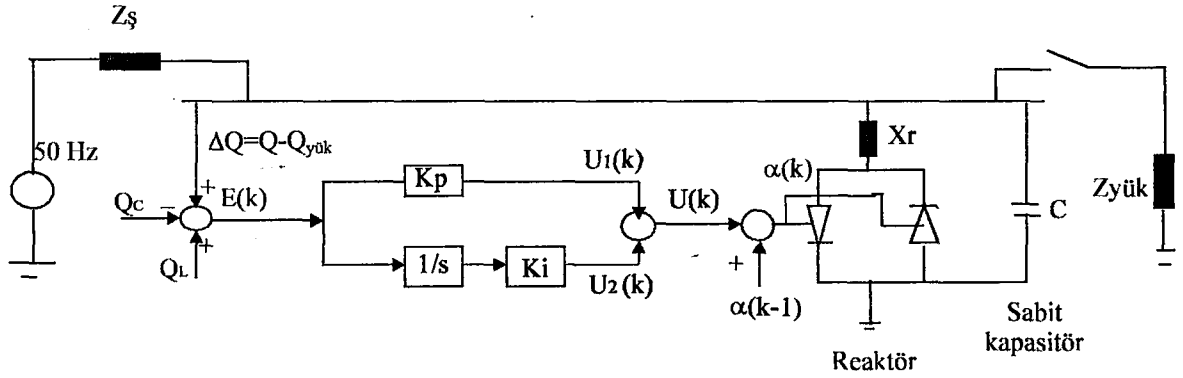
2.2.2 Program Algoritması



Şekil 30. Bulanık mantık denetimli sistemin kontrol programı algoritması.

2.3 Reaktif Güç Denetiminin PI Denetleyici ile Gerçekleştirilmesi

Aynı kontrol işlemi PI denetleyici ile gerçekleştirilmek istenirse, bu kez bulanık denetleyici yerine PI denetleyici kullanılacaktır. Sistemin modeli Şekil 31'deki gibidir.



Şekil 31. PI denetimli kompanzasyon sistemin blok diyagramı.

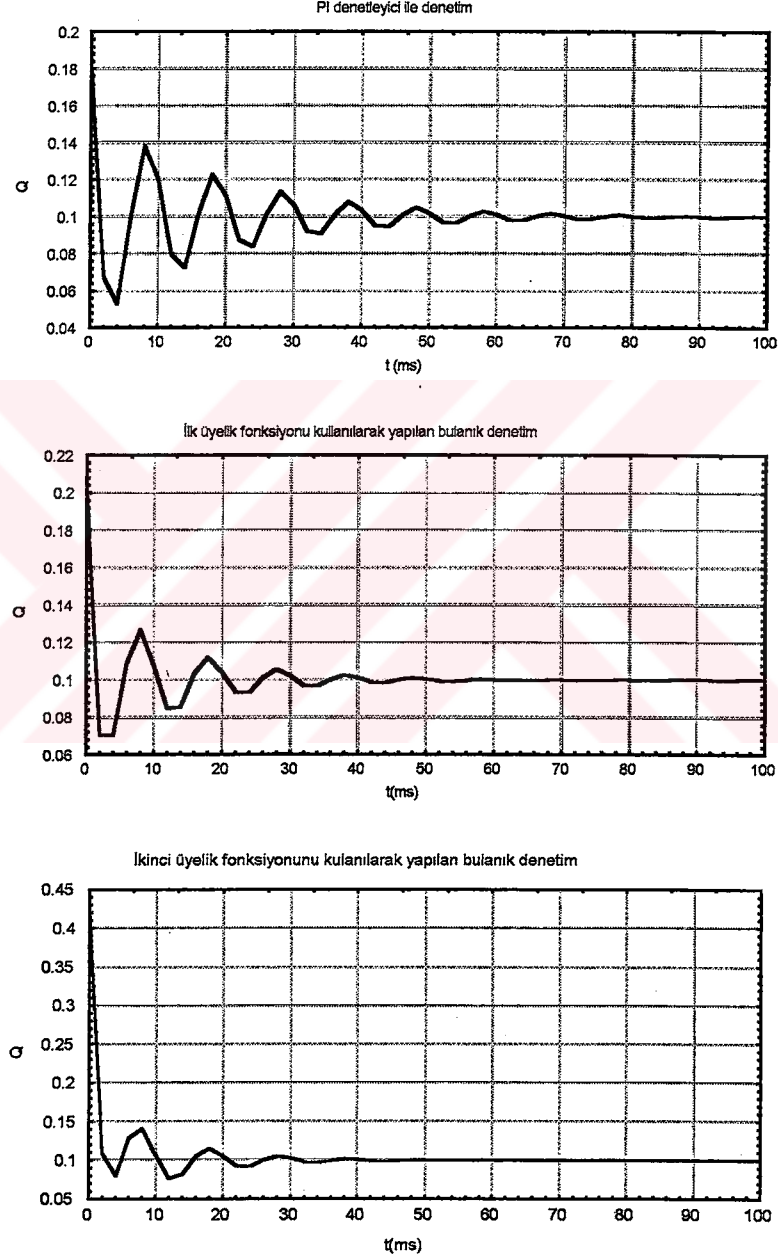
Sistemin PI denetleyici ile denetlenmesi durumundaki kontrol işleminde $\Delta Q + Q_L - Q_C$ değeri denetleyici girişi olarak alınır. Bu giriş değeri $E(k)$, denetleyici girişine verilerek, Eşitlik 46, 47 ve 48 yardımıyla toplam denetleyici çıkış değeri $U(k)$ bulunabilir. Tristör kontrol işareti ise şu şekilde yazılabilir.

$$\alpha(k) = U(k) + \alpha(k-1) \quad (74)$$

Elde edilen bu $\alpha(k)$ işareti yardımıyla tristörler tetiklenerek reaktif güç optimizasyonu yapılmaktadır.

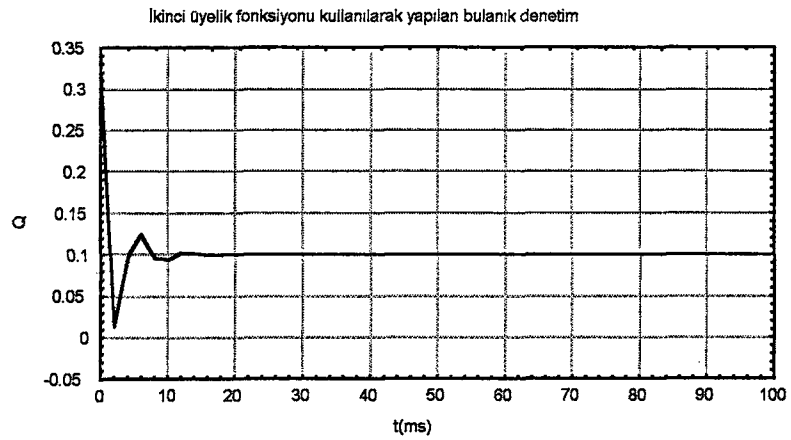
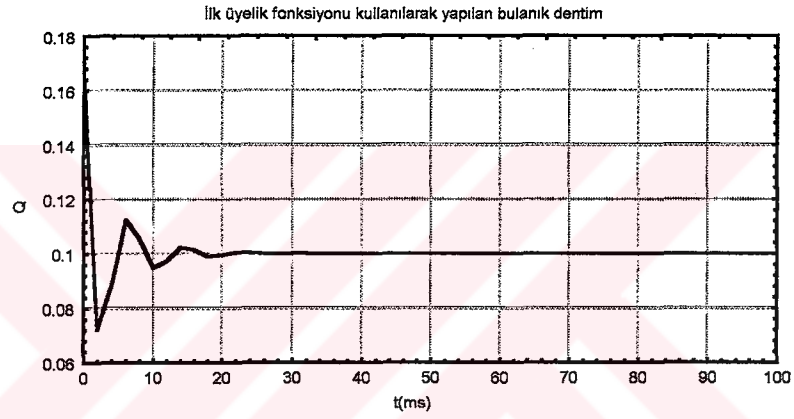
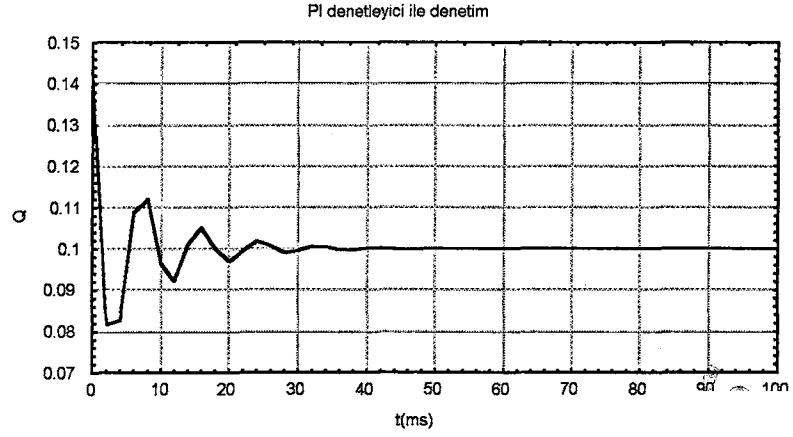
3. BULGULAR

Reaktif güç kompanzasyonunun bulanık ve PI denetimli, SK ve TKR'den oluşan statik VAR sistemlerinden karşılanması amacıyla yapılan çalışmanın sonuçları aşağıda verilmiştir. Sonuçlar birim değer olarak ifade edilmiştir. Birim değer olarak; şebekeden çekilen reaktif gücün, yükün çektiği reaktif güce oranı alınmıştır.



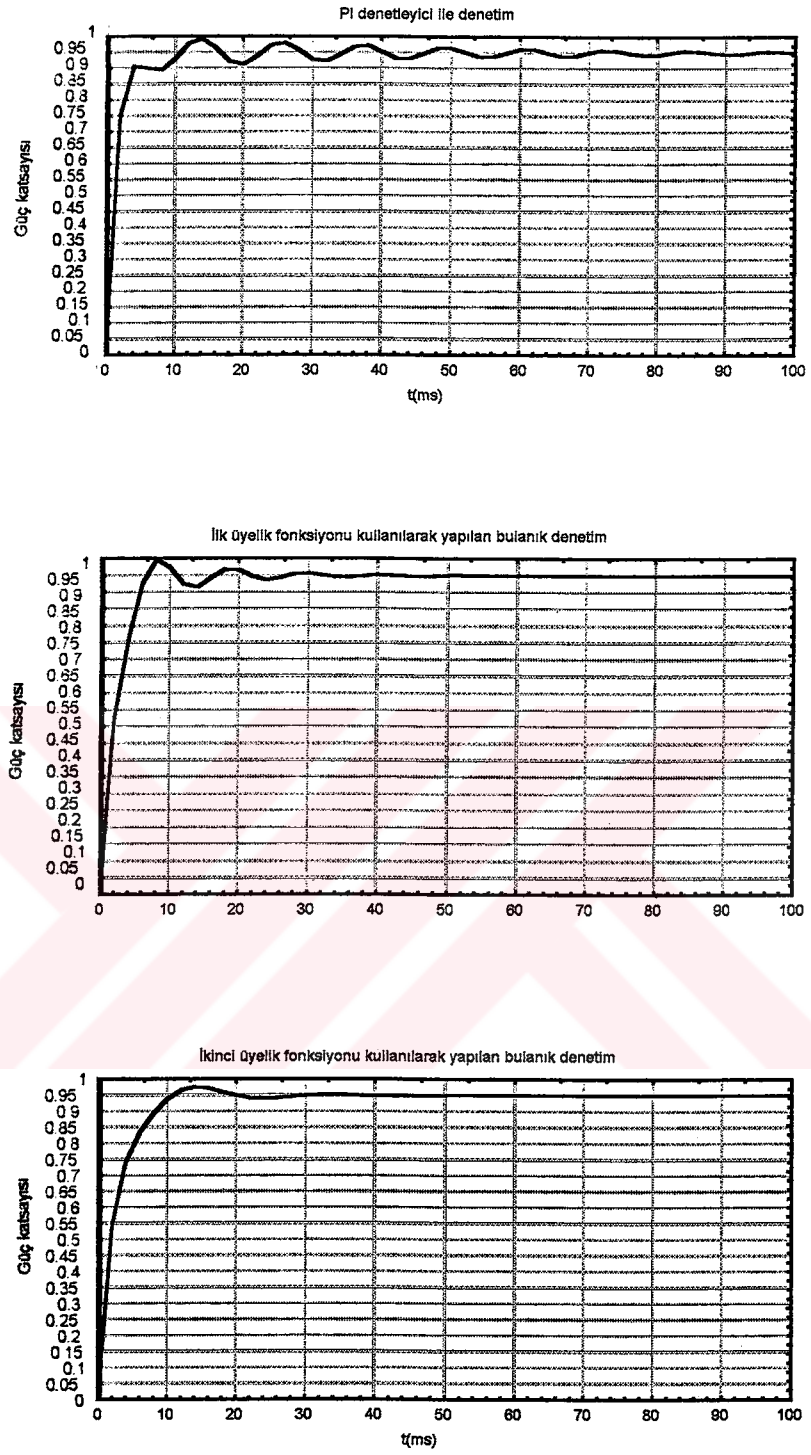
Şekil 32. Yükün çekebileceği maksimum reaktif gücü çektiği durumda şebekeden çekilen reaktif gücün değişimi.

Q: Şebekeden çekilen reaktif güç (pu).

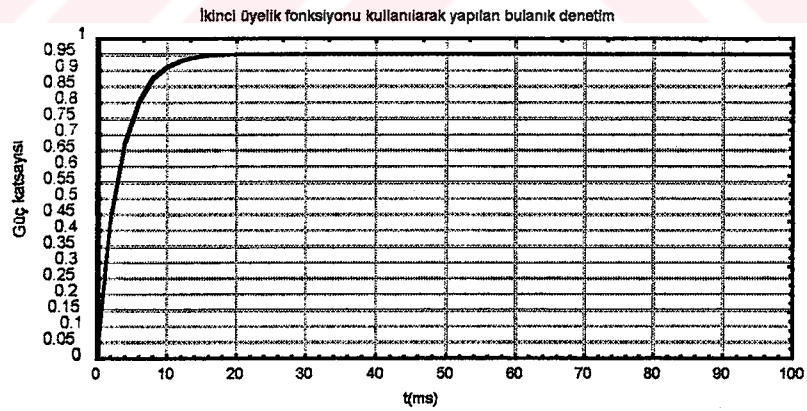
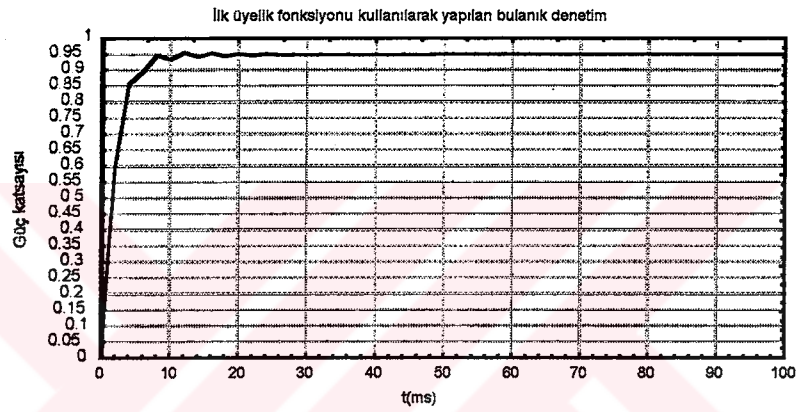
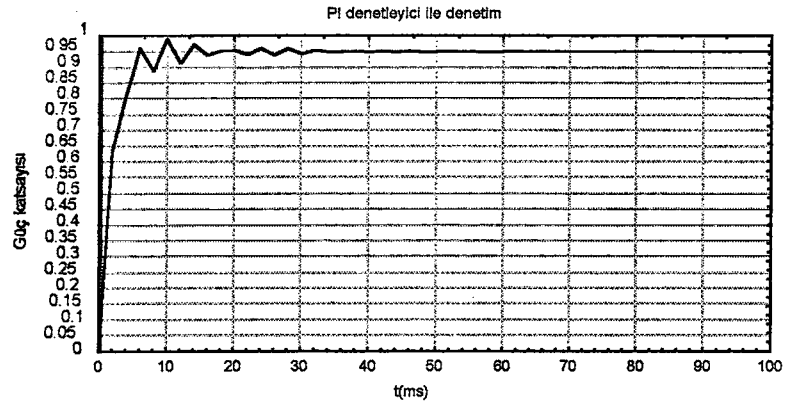


Şekil 33. Yükün çekebileceği maksimum reaktif gücün yarısını çektiği durumda şebekeden çekilen reaktif gücün değişimi.

Q: Şebekeden çekilen reaktif güç (p.u).



Şekil 34. Yükün çekebileceği maksimum reaktif gücü çektiği durumda şebekenin güç katsayısının değişimi.



Şekil 35. Yükün çekebileceği maksimum reaktif gücün yarısını çekmesi durumunda şebekenin güç katsayısının değişimi.

Bu tezde statik VAR kompanzasyonu kontrolünü gerçekleştirmek için bulanık mantık tabanlı bir denetleyici tasarlanmış, ayrıca bu denetleyicinin performansının klasik denetleyicilerle karşılaştırılması amacıyla PI denetleyici ile de sistemin denetimi yapılmıştır.

Şekil 32’de görüldüğü gibi, $t=0$ anında, sistemin şebekeden çekebileceği maksimum reaktif gücü çekmesi durumunda, PI denetleyicilerle gerçekleştirilen kontrolde, sistem referans değere yaklaşık 100 ms’de oturmaktadır. Ancak bulanık denetimle yapılan yapılan kontrol işleminde, yamuk biçimli üyelik fonksiyonu seçilmesi durumunda sistem 60 ms’de referans değere oturmaktadır. Sinüs biçimli üyelik fonksiyonu seçilmesi durumunda da sistem 40 ms’de referans değere oturmaktadır.

Sistemin şebekeden çekebileceği maksimum reaktif gücün yarısını çekmesi durumunda ise, Şekil 33’de görüldüğü gibi sistem kararlılığının sağlanması daha kısa sürelerde gerçekleştirilmektedir.

Son olarak sistemin reaktif güç değişimlerine bağlı olarak güç katsayısının değişimi de Şekil 34 ve Şekil 35’de verilmiştir.

4. İRDELEME

Bilimsel çalışmalar, yeni kontrol tekniklerini ortaya çıkarmıştır. Bulanık mantık tabanlı denetleyiciler de yeni gelişen kontrol tekniklerinden birisidir. Bulanık mantık tabanlı denetleyiciler klasik denetleyicilerden farklı olarak sistemlere daha esnek çözümler getirmektedir. Ayrıca matematiksel modellerini oluşturmanın oldukça zor olduğu sistemlerde kolaylıkla uygulanabilmektedir. Esnek kuralları sayesinde birçok denetleyicinin yaptığı işi de rahatlıkla yapabilmektedir. Bulanık mantık tabanlı denetim birçok alanda kullanılmakla birlikte, bu çalışmada kullanılan simülasyon örnekleri sabit kapasitör ve tristör kontrollü reaktör ile reaktif güç kompanzasyonuna yöneliktir.

Bulanık mantık tabanlı denetleyicilerin tasarımında öncelikle kontrol edilecek sistemin davranışı, çok iyi bir şekilde gözlenmelidir. Daha sonra kontrol edilmek istenen sistem büyüklüğü istenen referans değerle karşılaştırılarak hata ve hatadaki değişim değerleri elde edilir. Hata ve hatadaki değişim için üyelik fonksiyonları oluşturularak, bunlara ilişkin kontrol kuralları belirlenir. Bu kurallar yardımıyla denetlenen sistem için bir kontrol işareti elde edilir. Bulanık mantığın çok karmaşık, lineer olmayan, belirsizlikler içeren, klasik yöntemlerle gerçekleştirilemeyen sistemlere uygulanabilir olması, matematiksel modele ihtiyaç duymaması, bu teoremin uygulama alanını genişletmekte ve bu özellikleri nedeniyle de klasik kontrol tekniklerinden daha iyi sonuçlar ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada reaktif güç kompanzasyonu bulanık denetimli sabit kapasitör ve tristör kontrollü reaktör tipi kompanzatör ile gerçekleştirilmiştir. Bulanık mantık ile kontrol işlemi gerçekleştirilirken yapılan işlem, şebekeden çekilen reaktif güç belirli bir değer altında kalacak şekilde reaktörü devreye alan tristörlerin tetikleme açılarını ayarlamaktır. Böylece sabit kapasitörün sürekli olarak baraya verdiği kapasitif reaktif güçle yükün çektiği endüktif reaktif güç farkı, tristör kontrollü reaktör tarafından karşılanmaktadır.

Gerçekte yapılan işlem klasik kontrol işleminin benzeridir. Aradaki tek fark bulanık mantık tabanlı bir kontrol işleminde tetikleme açılarının ayarlanmasının bir insanın düşünme biçimine benzemesidir. Klasik kontrol sistemlerinde, giriş ile çıkış arasındaki hatanın integrali veya türevi alınarak gerekli regülasyon yapılırken, bulanık mantıkla yapılan kontrol işleminde sözkonusu hata ve hatadaki değişime bakılarak ve bir kontrol algoritması oluşturularak sonuca varılır. Yapılan çalışmada, güç sistemine ait şebekeden çekilen reaktif gücün değerine bakılmakta, eğer bu değer istenen değer altında veya üstünde ise, tristör tetikleme açıları biraz daha arttırılmakta veya azaltılmaktadır.

Uygulamada, iki ayrı bulanık mantık kontrol sistemi gerçekleştirilmiş ve bu kontrol işlemi, bir kompanzasyon sistemine uygulanmıştır. Bu kompanzasyon sisteminin kontrolünden alınan sonuçlar, üyelik fonksiyonu yapılarının, sistemin kararlılığına yaptığı etkileri gözlemek açısından oldukça yeterlidir. Çünkü bulgular kısmında verildiği gibi, iki ayrı üyelik fonksiyonunun kullanılması ile alınan sonuçlar, oldukça farklıdır. O halde, üyelik fonksiyonlarının yapılarının uygun seçilmesi, bulanık mantık kontrol sistemlerinde esas amaçlardan birisidir.

Yükün şebekeden çekebileceği maksimum reaktif gücün tamamını veya yarısını çekmesi durumunda, bulanık mantık tabanlı denetleyici sisteme, PI denetleyiciye göre daha iyi müdahale edebilmektedir. Yapılan bu çalışmalar, bulanık mantık tabanlı denetim ile kompanzasyon işlemi konusundaki yaklaşımlara olumlu ve yeterli sonuçları sağlamaktadır.



5. SONUÇLAR

Bu çalışmada özellikle rektif güç değişimlerinin çok hızlı olduğu işletmelerde reaktif gücün, bulanık dentimli sabit kapasitör ve tristör kontrollü reaktör tipi kompanzatörden sağlanması amacıyla bir kontrol işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu kontrol işlemi PI denetleyici ile de gerçekleştirerek, bulanık denetimin PI denetime göre daha iyi bir performans gösterdiği görülmüştür. Ayrıca sabit kapasitör ve tristör kontrollü reaktörün karakteristik yapısı verilmiştir. Bu kompanzasyon işlemi sonucunda sistemin şebekeden çektiği reaktif güç belli bir seviyede tutularak, şebekedeki reaktif güç kayıpları minimize edilir. Böylece şebekeden daha fazla aktif güç çekilmesi sağlanıp, kompanzasyon sistemlerinin şebekede meydana getirdikleri olumsuzluklar giderilir.

Bu çalışmada; bulanık mantık tabanlı denetimin karmaşık, lineer olmayan sistemleri denetlemede oldukça başarılı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca bulanık mantığın, klasik kontrol mantığından daha esnek olduğu ve insan düşünüş biçimine uygun kurallar içerdiği ortaya konulmuştur.

Bulanık mantık teorisi ayrıntılı bir biçimde ele alınarak, kompanzasyon sisteminin iki ayrı üyelik fonksiyonu kullanılarak bulanık ve klasik PI denetleyici ile kontrolü yapılarak elde edilen sonuçlar verilmiş ve tartışılmıştır. Üyelik fonksiyonlarının seçiminin önemi de uygulamada gösterilmiştir. Bulanık denetimde, farklı üyelik fonksiyonlarının oldukça farklı sonuçlar verdiği görülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda bulanık denetimin, PI denetime göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Bulanık mantık teorisi kullanılarak statik VAR kompanzasyon denetimini gerçekleştirmek amacıyla tasarlanan denetleyici, sistemin denetimini iyi bir kararlılıkla gerçekleştirdiğinden, statik VAR kompanzasyon işlemine yeni bir kontrol tekniği kazandırmıştır.

6. ÖNERİLER

Reaktif güç değişiminin çok hızlı olduğu işletmelerde reaktif gücü, bulanık denetimli sabit kapasitör ve tristör kontrollü reaktörden oluşan kompanzatörden sağlamak, klasik denetleyicilerle gerçekleştirilen denetime göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Ayrıca bu sistemlerin şebekede meydana getirdikleri olumsuz etkiler de bulanık kontrol uygulamasıyla en aza indirilmektedir. Sistem güvenilirliği ve sistemin ilave güç çekmesi durumunda da yeniden tasarım gereksinimi ortadan kalkmaktadır.

Uygun üyelik fonksiyonun belirlenmesi, kontrol performansını oldukça etkilemektedir. Bu nedenle en uygun üyelik fonksiyonları, sistemin geçici hal tepkeleri incelenerek, gözlem ve uzman deneyimlerine bağlı olarak bulunmalıdır.

Bulanık mantık tabanlı denetimde her fazın ayrı ayrı kontrol edilmesiyle, fazlardaki dengesiz yüklenmeler önleneceği gibi, üç fazın birlikte kontrolü de yapılabilir. Yükün kapasitif karakterde olması durumunda ise, sabit kapasite baraya ters paralel bağlı tristörler yardımıyla bağlanarak, kapasitenin devre dıőı bırakılması sağlanabilir ve yükün çektiği kapasitif reaktif güç, reaktörün verdiği endüktif reaktif güç ayarlanarak kompanze edilebilir.

7. KAYNAKLAR

1. Zadeh, L. A. , Fuzzy Sets, Information and Control , 8 , (1965) 338-353.
2. Chang, S.S.L. , On Fuzzy Mapping and Control, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics , SMC-2 , (1972) 30-34.
3. Zadeh, L. A. , Outline of New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics , SMC-3 , (1973) 28-44.
4. Mamdani, E.H. , Asilian S. , An Experiment in Linguistic Synthesis with Fuzzy Logic Controller, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics , 7 , (1974) 1-13.
5. Earl Cox Metus Systems Group, Fuzzy Fundamentals, IEEE Spectrum , 10, (1992) 58-61.
6. Schwartz, D.G. , Klir, G.J. , Lewis, H.W. , Ezawa, Y. , Applications of Fuzzy Sets and Approximate Reasoning, Proceedings of the IEEE , 82 , (1994) 482-497.
7. Pedrycz, W. , Fuzzy Modelling: Fundamentals, Construction and Evaluation, Fuzzy Set and Systems , 41 , (1991) 1-15.
8. Sugeno, M., An Introductory Survey of Fuzzy Control, Information Sciences , 36, (1995) 59-83.
9. Pierre, D.A. , A Perspective on Adaptive Control of Power Systems, IEEE PWRS-2, 5, (1987) 171-176.
10. Ghost, A. , Ledwich, G. , Malik, O. , Power System Stabilizer Based on Adaptive Control Techniques, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics , 4 , (1984) 12-19.
11. Clarke, D.W. , Self Tuning and Adaptive Control Microprocessor Based Control Systems, Ed. N. K. Sinha, 1986.
12. Lippmann, R. P. , An Introduction to Computing with Neural Networks, IEEE Transactions on Computers , ASSP, (1987) 4-22.
13. Simpson. P.K. , Min-Max Neural Networks-Part 2, IEEE Transactions on Fuzzy Systems , 1, (1993) 102-107.
14. Olwegard, A. , Ahlgren, L. , Frank, H. , Thyristor Controlled Shunt Capacitors for Improving System Stability, CIGRE , 2, (1976) 245-252.
15. Endberg, K. , Frank, H. , Torseng, S. , Reactors and Capacitors Controlled by Thyristors for Optimum Power System VAR Control, APRIL Seminar on Transmission Static VAR Systems , Minoseta, 9, (1978) 10-24.

16. Gyugyi, L. , Otto, R. A. , Putman, T. H. , Principles and Applications of Static Thyristor-Controlled Shunt Compensators, IEEE Proceedings , 10, (1978) 39-48.
17. Kundur, P. , Power System Stability and Control , McGraw-Hill Book Co., New York, 1994.
18. Wirth, B. , Roesle, K. , Use of Static Reactive Power Compensators in Power Systems, Brown Boveri Review, 69, (1982) 77-92.
19. Dash, P.K. , Sharaf, A.M. , Adaptive Controller for Static Reactive Power Compensators in Power Systems, IEEE Proceedings , 132, (1987) 256-264.
20. Bornhold, L.O. , Static Shunt Devices for Reactive Power Control, CIGRE Working Group , 4, (1982) 43-52.
21. Brucoli, M. , Torelli, F. , Trovota, M. , A Decentralized Control Strategy For Dynamic Shunt VAR Compensator in Interconnected Systems, IEEE Proceedings ,132, (1985) 23-34.
22. Dommel, H.W. , Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems , PAS-88 , (1969) 161-169.
23. Gavrilovic, M.M. , Sybille, E. , Controlled Reactive Compensation Modelling on the IREQ Power System Simulator, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems ,10, (1980) 98-106.
24. Taylor, F. R. , Gyugiyi, I. , Operating and Performance Characteristics of Static, Thyristor-Controlled Shunt Compensators, International Symposium on Controlled Reactive Compensation , IREQ, Varennes, (1978) 121-128.
25. McGranaghan, M. F. , Rocamora, R. N. , Design of A generalized Static VAR System Model for TNA Simulation, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems ,10, (1982) 56-62.
26. Koepfinger, J. G. , Simulation of Static VAR System Performance on A Transient Network Analyzer, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems , 9 , (1982) 124-129.
27. Iba, K. , Suzuki, H. , Suzuki, K. , Practical Reactive Power Allocation Planning Using Successive Linear Programming, IEEE Transactions on Power Systems , 3 , (1988) 154-160.
28. Qiu, J. , Shahidehpour S.M. , A New Approach for Minimizing Power Losses and Improving Voltage Profile, IEEE Transactions on Power Systems , 2 , (1987) 101-106.
29. Chatterjee, J. K. , Doshi, B. M. , Ray, K. K. , A New Method For Thyristor Phase Controlled VAR Compensator, IEEE PWRS , 89 WM 133-0 , (1989) 56-62.

30. Hillowala, R. M. , Sharaf, A. M. , Bus Voltage Regulation of Interconnected Power System Using Static Phase Shifter, North American Power Symposium, University of Missouri USA, (1989) 1-6.
31. Niimura, T. , Yokoyama, R. , Corry, J. B. , A Fuzzy Coordination Approach for Multi-Objective Voltage and Reactive Power Scheduling of An Electric Power Systems, IEEE Transactions on Power Systems , 2 , (1993) 267-272.
32. Abdul-Rahman, K. H. , Shahidehpour, S. M. , A Fuzzy-Based Optimal Reactive Power Control, IEEE Transactions on Power Systems , 8 , (1993) 662-670.
33. Tamsović, K. , A Fuzzy Linear Programming Approach to the Reactive Power Control Problem, IEEE Transactions on Power Systems , 7 , (1992) 287-293.
34. Miranda, V. , Saraiva, J. T. , Fuzzy Modelling of Power System Optimal Load Flow, IEEE Transactions on Power Systems , 7 , (1992) 832-841.
35. Miller T. J. E. , Reactive Power Control in Electric Power Systems, John Willey, New York, 1982.
36. Bose, B. K. , Expert System: Fuzzy Logic and Neural Network Applications in Power Electronics and Motion Control, Proceedings of the IEEE , 82 , (1994) 665-668.
37. Shing, J. , Jang, R. , Adaptive - Network - Based Fuzzy Inference System, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 23 , (1993) 665-685.

8. EKLER

% BULANIK MANTIK DENETİM SİMÜLASYON PROGRAMI

clear

% ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE REAKTİF GÜCÜN BULANIK MANTIK
% DENETİMLİ STATİK VAR SİSTEMLERİNDEN KARŞILANMASI

% Sistem Parametreleri

U=220; % faz gerilimi (V).
Um=312; % faz geriliminin tepe değeri (V).
f=50; % şebeke frekansı (Hz).
C=10; % Kapasite değeri (mF).
L=1; % Öz endüktans (Henry).
w=2*pi*f; % Açısal frekans (rad/s).
T=1/f; % Periyot (ms)

% Başlangıç Değerleri

u0=0;
t0=0;
h=0.001;
t=t0;
e0=0;
e=1;
de=1;
for k=1:1:100,
t=t+h;
e0=e;

```
NLe=0;NMe=0;NSe=0;ZZe=0;PSe=0;PMe=0;PLe=0;
```

```
NLde=0;NMde=0;NSde=0;ZZde=0;PSde=0;PMde=0;PLde=0;
```

```
% Hata ve Hatanın Değişimi değerleri için, üyelik fonksiyonları yardımıyla üyelik
% değerlerinin hesabı:
```

```
if e>=-1, if e<=-0.5, NLe=abs(cos(pi*(e+1)));end
end
```

```
if e>=-0.75, if e<=-0.25, NMe=abs(sin(pi*2*(e+0.75))); end
end
```

```
if e>=-0.6, if e<=0, NSe=abs(sin(pi*1.65*(e+0.6))); end
end
```

```
if e>=-0.4, if e<=0.4, ZZe=abs(sin(pi*1.2*(e+.4))); end
end
```

```
if e>=0, if e<=0.6, PSe=sin(pi*1.65*e);end
end
```

```
if e>=0.25, if e<=0.75, PMe=abs(sin(pi*2*(e+0.25))); end
end
```

```
if e>=0.5, if e<=1, PLe=abs(sin(pi*(e+0.5))); end
end
```

```
if de>=-1, if de<=-0.5, NLde=abs(cos(pi*(de+1)));end
end
```

```
if de>=-0.75, if de<=-0.25, NMde=abs(sin(pi*2*(de+0.75))); end
```

end

if de>=-0.6, if de<=0, NSde=abs(sin(pi*1.65*(de+0.6))); end

end

if de>=-0.4, if de<=0.4, ZZde=abs(sin(pi*1.2*(de+.4))); end

end

if de>=0, if de<=0.6, PSde=sin(pi*1.65*de);end

end

if de>=0.25, if de<=0.75, PMde=abs(sin(pi*2*(de+0.25))); end

end

if de>=0.5, if de<=1, PLde=abs(sin(pi*(de+0.5))); end

end

% Çıkış tablosundaki elemanların mininum değerlerinin hesabı:

MU(1)=min(NLe,NLde);

MU(2)=min(NLe,NMde);

MU(3)=min(NLe,NSde);

MU(4)=min(NLe,ZZde);

MU(5)=min(NLe,PSde);

MU(6)=max(NLe,PMde);

MU(7)=min(NLe,PLde);

MU(8)=min(NMe,NLde);

MU(9)=min(NMe,NMde);

MU(10)=min(NMe,NSde);

MU(11)=min(NMe,ZZde);

MU(12)=min(NMe,PSde);

MU(13)=min(NMe,PMde);

MU(14)=min(NMe,PLde);
MU(15)=min(NSe,NLde);
MU(16)=min(NSe,NMde);
MU(17)=min(NSe,NSde);
MU(18)=min(NSe,ZZde);
MU(19)=min(NSe,PSde);
MU(20)=min(NSe,PMde);
MU(21)=min(NSe,PLde);
MU(22)=min(ZZe,NLde);
MU(23)=min(ZZe,NMde);
MU(24)=min(ZZe,NSde);
MU(25)=min(ZZe,ZZde);
MU(26)=min(ZZe,PSde);
MU(27)=min(ZZe,PMde);
MU(28)=min(ZZe,PLde);
MU(29)=min(PSe,NLde);
MU(30)=min(PSe,NMde);
MU(31)=min(PSe,NSde);
MU(32)=min(PSe,ZZde);
MU(33)=min(PSe,PSde);
MU(34)=min(PSe,PMde);
MU(35)=min(PSe,PLde);
MU(36)=min(PMe,NLde);
MU(37)=min(PMe,NMde);
MU(38)=min(PMe,NSde);
MU(39)=min(PMe,ZZde);
MU(40)=min(PMe,PSde);
MU(41)=min(PMe,PMde);
MU(42)=min(PMe,PLde);
MU(43)=min(PLe,NLde);
MU(44)=min(PLe,NMde);
MU(45)=min(PLe,NSde);


```

MU(46)=min(PLe,ZZde);
MU(47)=min(PLe,PSde);
MU(48)=min(PLe,PMde);
MU(49)=min(PLe,PLde);

```

```

% Çıkış tablosundaki çiftlerin minimumu sıfırdan farklı ise çıkış üyelik fonksiyonunun
% merkezleri:

```

```

if MU(1)~=0, DU(1)=-1; else DU(1)=0; end
if MU(2)~=0, DU(2)=-1; else DU(2)=0; end
if MU(3)~=0, DU(3)=-1; else DU(3)=0; end
if MU(4)~=0, DU(4)=-0.5; else DU(4)=0; end
if MU(5)~=0, DU(5)=-0.5; else DU(5)=0; end
if MU(6)~=0, DU(6)=-0.3; else DU(6)=0; end
if MU(7)~=0, DU(7)=0; else DU(7)=0; end
if MU(8)~=0, DU(8)=-1; else DU(8)=0; end
if MU(9)~=0, DU(9)=-0.5; else DU(9)=0; end
if MU(10)~=0, DU(10)=-0.5; else DU(10)=0; end
if MU(11)~=0, DU(11)=-0.3; else DU(11)=0; end
if MU(12)~=0, DU(12)=-0.3; else DU(12)=0; end
if MU(13)~=0, DU(13)=0; else DU(13)=0; end
if MU(14)~=0, DU(14)=0.3; else DU(14)=0; end
if MU(15)~=0, DU(15)=-0.5; else DU(15)=0; end
if MU(16)~=0, DU(16)=-0.5; else DU(16)=0; end
if MU(17)~=0, DU(17)=-0.3; else DU(17)=0; end
if MU(18)~=0, DU(18)=-0.3; else DU(18)=0; end
if MU(19)~=0, DU(19)=0; else DU(19)=0; end
if MU(20)~=0, DU(20)=0.3; else DU(20)=0; end
if MU(21)~=0, DU(21)=0.3; else DU(21)=0; end
if MU(22)~=0, DU(22)=-0.5; else DU(22)=0; end
if MU(23)~=0, DU(23)=-0.3; else DU(23)=0; end
if MU(24)~=0, DU(24)=-0.3; else DU(24)=0; end

```

```

if MU(25)~=0, DU(25)=0; else DU(25)=0; end
if MU(26)~=0, DU(26)=0.3; else DU(26)=0; end
if MU(27)~=0, DU(27)=0.3; else DU(27)=0; end
if MU(28)~=0, DU(28)=0.5; else DU(28)=0; end
if MU(29)~=0, DU(29)=-0.3; else DU(29)=0; end
if MU(30)~=0, DU(30)=-0.3; else DU(30)=0; end
if MU(31)~=0, DU(31)=0; else DU(31)=0; end
if MU(32)~=0, DU(32)=0.3; else DU(32)=0; end
if MU(33)~=0, DU(33)=0.3; else DU(33)=0; end
if MU(34)~=0, DU(34)=0.5; else DU(34)=0; end
if MU(35)~=0, DU(35)=0.5; else DU(35)=0; end
if MU(36)~=0, DU(36)=-0.3; else DU(36)=0; end
if MU(37)~=0, DU(37)=0; else DU(37)=0; end
if MU(38)~=0, DU(38)=0.3; else DU(38)=0; end
if MU(39)~=0, DU(39)=0.3; else DU(39)=0; end
if MU(40)~=0, DU(40)=0.5; else DU(40)=0; end
if MU(41)~=0, DU(41)=0.5; else DU(41)=0; end
if MU(42)~=0, DU(42)=1; else DU(42)=0; end
if MU(43)~=0, DU(43)=0; else DU(43)=0; end
if MU(44)~=0, DU(44)=0.3; else DU(44)=0; end
if MU(45)~=0, DU(45)=0.5; else DU(45)=0; end
if MU(46)~=0, DU(46)=0.5; else DU(46)=0; end
if MU(47)~=0, DU(47)=1; else DU(47)=0; end
if MU(48)~=0, DU(48)=1; else DU(48)=0; end
if MU(49)~=0, DU(49)=1; else DU(49)=0; end

```

% Center of Area yöntemi ile çıkış büyüklüğünün hesabı:

```

T=0;
TT=0;
for I=1:1:49, T=T+MU(I)*DU(I);end
for I=1:1:49, TT=TT+MU(I);end
du=T/TT; % Bulanık denetleyici çıkışı

```

```

Du=du+u0;
u0=Du;
Alfa=Du*pi/2; %Tetikleme açısı
Uet1=Um*Um*((pi-Alfa)-(sin(4*pi-2*Alfa)/4)+(sin(2*Alfa)/4));
Uet2=Uet1/pi;
Uet=sqrt(Uet2); % Reaktöre uygulanan gerilim.
A=Alfa;
i=2*(pi-A); % İletim açısı değeri.
X=w*L; % Reaktör reaktansı.
B(i)=(i-sin(i))/(pi*X); %Reaktör suseptansı
i0=0;
I0=0;
for n=3:2:11,

% Reaktör akımının harmonik bileşenleri

i(n)=i0+sqrt(2)*U*[2cos(A)*sin(n*A)/n-sin((n+1)*A)/(n+1)-sin((n-1)*A)/(n-1)]/(pi*X);
i0=i(n);
I(n)=I0+sqrt(2)*i(n)*sin(n*w*t-90);
I0=I(n)
end

% Toplam akım değeri:
Iet= sqrt(2)*U*B(i)*sin(w*t-90)+I(n);
% Reaktörün verdiği reaktif güç:
Qr=Uet*Iet;
% Kapasitörün verdiği reaktif güç:
Qc=U*U*w*C;
% Yükün çektiği reaktif güç:
Qy=Qc;
% Şebekeden çekilen reaktif güç:
Q=Qy+Qr-Qc;

```

```

Q(pu)=Q/Qy; %Birim değer
%Şebekeden çekilen aktif güç
P=2*Qy;
P(pu)=2; % Birim değer
% Şebekeden çekilen reaktif güç:
S(pu)=sqrt(P(pu)*P(pu)+Q(pu)*Q(pu));
GK=P(pu)/S(pu); %Şebekenin güç katsayısı.
e=Q/Qc;
de=e-e0;
e0=e;
end
clg

```

```

% İlgili Eğrilerin Çizimi

```

```

subplot(211)
plot(t,Q)
title('Şebekeden Çekilen Reaktif Gücünün Değişimi');
xlabel('t [s]');
ylabel('Qş [pu]')
subplot(211)
plot(t,GK)
title('Şebekenin Güç Katsayısının Değişimi')
xlabel('t [s]');
ylabel('Güç Katsayısı')

```

% PI DENETİM SİMÜLASYON PROGRAMI

clear

% ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE REAKTİF GÜCÜN PI
% DENETİMLİ STATİK VAR SİSTEMLERİNDEN KARŞILANMASI

% Sistem Parametreleri

U=220; % faz gerilimi (V).
Um=312; % faz geriliminin tepe değeri (V).
f=50; % şebeke frekansı (Hz).
C=10; % Kapasite değeri (mF).
L=1; % Öz endüktans (Henry).
w=2*pi*f; % Açısal frekans (rad/s).
T=1/f; % Periyot (ms)
Kp=90; % Orantı etki kazancı.
Ki=1/10; % İntegral etki kazancı.
T=1/1000; % Örnekleme zamanı (s).

% Başlangıç Değerleri

u0=0;
t0=0;
h=0.001;
t=t0;
e=1;
Alfa0=0;
for k=1:1:100,
t=t+h;
U1(k)=Kp*e;
U2(k)=u0+Ki*T*e;

```

u0=U2(k);
U(k)=U1(k)+U2(k); % Denetleyici çıkışı.
Alfa=U(k)+Alfa0; % Tetikleme açısı değeri.
Alfa0=Alfa;
Uet1=Um*Um*((pi-Alfa)-(sin(4*pi-2*Alfa)/4)+(sin(2*Alfa)/4));
Uet2=Uet1/pi;
Uet=sqrt(Uet2); % Reaktöre uygulanan gerilim.
A=Alfa;
i=2*(pi-A); % İletim açısı değeri.
X=w*L; % Reaktör reaktansı.
B(i)=(i-sin(i))/(pi*X); % Reaktör suseptansı
i0=0;
I0=0;
for n=3:2:11,

% Reaktör akımının harmonik bileşenleri

i(n)=i0+sqrt(2)*U*[2cos(A)*sin(n*A)/n-sin((n+1)*A)/(n+1)-sin((n-1)*A)/(n-1)]/(pi*X);
i0=i(n);
I(n)=I0+sqrt(2)*i(n)*sin(n*w*t-90);
I0=I(n)
end

% Toplam akım değeri:
Iet= sqrt(2)*U*B(i)*sin(w*t-90)+I(n);

% Reaktörün verdiği reaktif güç:
Qr=Uet*Iet;

% Kapasitörün verdiği reaktif güç:
Qc=U*U*w*C;

% Yükün çektiği reaktif güç:
Qy=Qc;

% Şebekeden çekilen reaktif güç:

```

```

Q=Qy+Qr-Qc;
Q(pu)=Q/Qy; %Birim değer
%Şebekeden çekilen aktif güç
P=2*Qy;
P(pu)=2; % Birim değer
% Şebekeden çekilen reaktif güç:
S(pu)=sqrt(P(pu)*P(pu)+Q(pu)*Q(pu));
GK=P(pu)/S(pu); % Şebekenin güç katsayısı.
e=Q/Qc;
end
clg

```

```
% İlgili Eğrilerin Çizimi
```

```

subplot(211)
plot(t,Q)
title('Şebekeden Çekilen Reaktif Gücünün Değişimi');
xlabel('t [s]');
ylabel('Qş [pu]')
subplot(211)
plot(t,GK)
title('Şebekenin Güç Katsayısının Değişimi')
xlabel('t [s]');
ylabel('Güç Katsayısı')

```

9. ÖZGEÇMİŞ

Ersan GÜLAY; 1971 yılında Trabzon'un Şalpazarı ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini aynı yerde tamamladı. Lise öğrenimine, TÜBİTAK burslusu olarak İstanbul Kabataş Erkek Lisesinde devam etti ve 1989 yılında bu liseden mezun oldu. Aynı yıl KTÜ Elektrik - Elektronik mühendisliğinde başladığı üniversite öğrenimini, 2. sınıftan itibaren İTÜ Elektrik Mühendisliğinde sürdürdü. 1994 yılı Temmuz ayında İTÜ Elektrik Mühendisliği bölümünden Elektrik Mühendisi olarak *birincilikle* mezun oldu. İTÜ Elektrik Mühendisliği bölümündeki öğrenimi sırasında Vehbi Koç Vakfı'ndan burs aldı. Ekim 1994'de KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Ocak 1995'de Fen Bilimleri Enstitüsüne Araştırma Görevlisi olarak atandı. Aynı zamanda Şubat 1996'dan itibaren EMO Trabzon Şubesi yönetim kurulu yazman üyeliği görevini yürütmektedir. Evli ve İngilizce bilmektedir.

