



Reactive Power Control of Thyristor Controlled Reactor using Neuro - Fuzzy Controller

Ö. Fatih KEÇEÇİOĞLU^{1,*}, Erdal KILIÇ¹

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Department of Electrical and Electronics Engineering, 46100, Onikişubat/KAHRAMANMARAŞ

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Received: 21/02/2019

Revision 16/04/2018

Accepted: 08/05/2019

Highlights

- Multi-source operation of NPC inverters.
- Voltage balancing of NPC inverters.
- Harmonic compensation of grid connected NPC inverters

Keywords

Reactive Power
Thyristor controlled reactor
Neuro-fuzzy controller

In this study, the reactive power of thyristor controlled reactor (TCR) that is fundamental element of flexible ac transmission system devices is controlled using neuro-fuzzy controller. Adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) is used as neuro-fuzzy control architecture. A simulation model was developed in MATLAB / Simulink environment to examine the performance of the proposed controller.

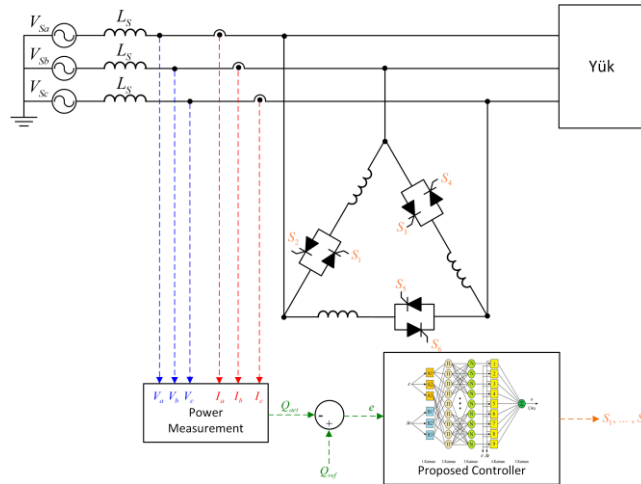


Figure A. Proposed Method for Reactive Power Control of Thyristor Controlled Reactor

Purpose: Conventional Proportional Integral (PI) controller is mostly used flexible AC transmission system (FACTS) devices. However, system parameter variations and non-linear system structures severely impair the performance of this controller. In this study, the neuro-fuzzy controller is used for overcome to these disadvantages.

Theory and Methods: The neuro-fuzzy controller is designed for reactive power control of TCR. Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) is used as neuro-fuzzy control architecture. In order to examine the performance of the proposed controller, two different cases are simulated in the studies. The reactive power control performance of the proposed controller is compared to two PI controllers.

Results: Simulation results show that the tracking of the reference reactive power of proposed controller is more successfully than to PI controllers. The results that are obtained under the voltage disturbance condition show that, the neuro-fuzzy controller is better disturbance rejection capability than PI controllers.

Conclusion: In this study, the neuro-fuzzy controller is used for reactive power control of TCR. The proposed controller for TCR is more superior than conventional PI controllers in terms of control performance parameters (rising time, settling time and overshoot) values. The proposed controller has improved the reactive power control capabilities of thyristor controlled reactor.



Tristör Kontrollü Reaktörün Sinirsel Bulanık Denetim Esaslı Reaktif Güç Kontrolü

Ö. Fatih KEÇEÇİOĞLU^{1,*} Erdal KILIÇ¹

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 46100, Onikişubat/KAHRAMANMARAŞ

Öz

Bu çalışmada, esnek AA iletim sistemi cihazlarının ana elemanlarından biri olan tristör kontrollü reaktörün (TKR) sinirsel bulanık denetim esaslı reaktif güç kontrolü yapılmıştır. Sinirsel bulanık denetim mimarisi olarak adaptif sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) kullanılmıştır. Önerilen denetleyicinin başarımını incelemek için MATLAB/Simulink ortamında benzetim modeli oluşturulmuştur. Bununla birlikte ANFIS denetim esaslı TKR'nin farklı çalışma durumlarındaki referans reaktif gücü takip etme başarımı klasik Oransal İntegral (PI) denetleyici ile karşılaştırılmıştır.

Makale Bilgisi

Başvuru: 21/02/2019

Düzeltilme: 16/04/2018

Kabul: 08/05/2019

Anahtar Kelimeler

Reaktif güç
Tristör kontrollü reaktör
Sinirsel bulanık
denetleyici

Keywords

Reactive Power
Thyristor controlled
reactor
Neuro-fuzzy controller

Reactive Power Control of Thyristor Controlled Reactor using Neuro - Fuzzy Controller

Abstract

In this study, the reactive power of thyristor controlled reactor (TCR) that is fundamental element of flexible ac transmission system devices is controlled using neuro-fuzzy controller. Adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) is used as neuro-fuzzy control architecture. A simulation model was developed in MATLAB / Simulink environment to examine the performance of the proposed controller. In addition to this, the tracking performance of the reference reactive power in different simulation cases of ANFIS controller based TCR is compared with the conventional Proportional Integral (PI) controller.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

AA iletim hatlarının elektrik enerjisi kalitesinin iyileştirilmesi için artan gereksinimler ve kısıtlamalarla birlikte yeni iletim hatları ve enerji üretim santrallerinin kurulmasında ortaya çıkan sorunlar mevcut enerji santrallerinin ve iletim hatlarının en etkin şekilde kullanımını gerektirmektedir [1]. Ayrıca geleneksel güç sistemlerinin düşük gerilim denetim performansı gibi sahip olduğu dezavantajlar yüzünden esnek AA iletim ve dağıtım sistemleri gittikçe önem kazanmıştır. Güç sistemlerinde esnek AA iletim sistemi cihazlarının kullanımının avantajları şu şekilde sıralanabilir: güç aktarım kapasitesinin artırılması ve performansının geliştirilmesi, gerilimin iyileştirilmesi, reaktif ve aktif güç kontrolü [2, 3]. Ayrıca bu cihazlar güç elektroniği tabanlı olduğundan geleneksel sistemlere göre daha hızlı tepki verme özelliğine sahiptirler. Yine bu cihazlar uygun bir şekilde ayarlandığı zaman için güç sistemlerinin kararlılığının iyileştirilmesine de katkı sağlarlar [2, 4]. Bu cihazlar, güç sisteminin seri empedansı, akımı, gerilimi, aktif ve reaktif gücü gibi şebeke parametrelerinin uygun kompanzasyonu yoluyla güç sisteminin denetimini sağlamaktadırlar. Esnek AA iletim sistemleri cihazları olarak statik VAR kompanzator (SVK) gibi tristör temelli cihazlar ve statik senkron kompanzator gibi dönüştürücü tabanlı cihazlar kullanılmaktadır.

SVK sistemleri, güç elektroniği ve gömülü sistemlere dayalı cihazlardır. Bu nedenle, şebekeden çekilen veya verilen reaktif gücü hızla kontrol edebilir ve müdahale edebilirler [4]. SVK sistemleri, TKR, tristör anahtarlamalı reaktör (TAR), Sabit kapasitör-tristör kontrollü reaktör (SK-TKR), tristör anahtarlamalı

kapasitör (TAK) veya TAK-TKR yapılarından oluşmaktadır. Bu yapılardan her biri tek başına kullanılabilirdiği gibi birlikte de kullanılabilirler.

TKR, esnek AA iletim sistemleri cihazlarının ana elemanlarından birisidir. Tristör kontrollü reaktörler, diğer esnek AA iletim sistemi cihazlarına göre daha basit yapısı ve kurulum maliyetinin ucuz olması nedeniyle günümüzde reaktif güç kompanzasyonu için sıklıkla kullanılır hale gelmiştir. TKR'lerde reaktif güç kontrolü, yapısında bulunan tristörlerin tetikleme açılarının denetimi ile bu tristörlere bağlı reaktörlerin süseptansının ayarlanması ile sağlanır [5].

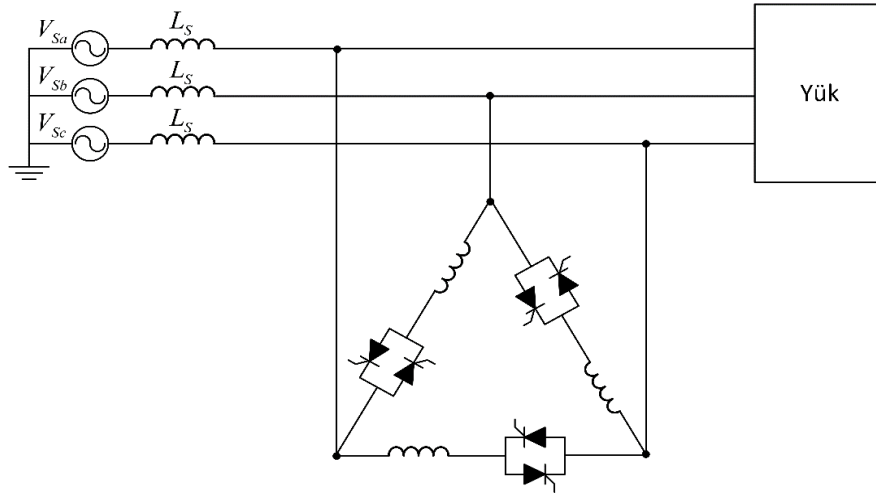
Geleneksel PID tipi denetleyiciler, basit ve hızlı olmasından dolayı endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak sistem parametre varyasyonları ve doğrusal olmayan sistem yapıları bu denetleyicilerin performansını ciddi şekilde bozmaktadır. TKR'lerde tetikleme açısına göre süseptansının değişimi doğrusal olmayan bir karaktere sahip olduğundan geleneksel denetleyiciler reaktif gücün anlık değişimi için yeterli ölçüde başarı gösterememektedir. TKR'nin yüksek performanslı reaktif güç denetimi için birçok araştırmacı, model öngörülü denetim, bulanık mantık, yapay sinir ağları (YSA), genetik algoritma, kayan kipli denetim gibi çeşitli denetim stratejilerini önermiştir [6-10]. Özellikle sistem belirsizlikleri ve zamanla değişen sistem parametreleri dikkate alındığında denetimde daha iyi bir performans elde etmek için uyarlamalı denetleyicilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bulanık denetleyicilerin çıkarım yapabilme özelliği [11] ile yapay sinir ağlarının öğrenme, genelleme ve uyarlama yeteneklerini [12] yapısında bulunduran sinirsel bulanık denetleyiciler doğrusal olmayan sistemlerin denetiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sinirsel bulanık denetleyici yapısı, bulanık kuralların ve denetim sisteminin özelliklerini ayarlayarak tüm farklı sistem koşullarına ve bozucu girişlere daha iyi uyum sağlamaktadır. Bu çalışmada TKR'lerdeki süseptans, sinirsel bulanık denetleyici ile ayarlanarak TKR'nin reaktif güç kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sinirsel bulanık denetleyici tipi olarak ise adaptif sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) mimarisi kullanılmıştır.

Bu makale şu şekilde düzenlenmiştir: TKR'nin yapısı ve analizi bölüm 2'de, TKR için tasarlanan ANFIS yapısı bölüm 3'te ve benzetim çalışmasının sonuçları ile önerilen denetleyicinin başarımı ise Bölüm 4'te verilmiştir.

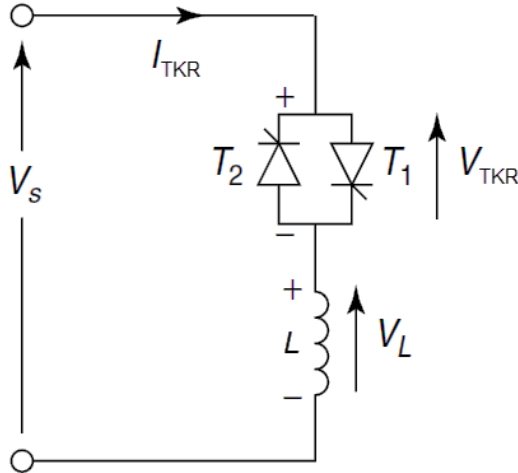
2. TRİSTÖR KONTROLLÜ REAKTÖR (THYRISTOR CONTROLLED REACTOR)1

TKR'ler SVK'ları oluşturan en önemli yapılardan birisidir. TKR'ler güç sistemi içerisinde tek başına kullanıldıkları gibi, endüktif veya kapasitif reaktif gücün hızlı ve sürekli kontrolünü sağlamak için sabit veya tristör anahtarlamalı kondansatörlerle birlikte de kullanılabilirler. Üç fazlı bir yükü ve sadece TKR yapısını içeren güç sistemi şekil 1'de gösterilmiştir. Buradaki yapı genellikle kapasitif karakterli yükler ile dengeli olmayan yüklerin kompanzasyonu için kullanılmaktadır [13].



Şekil 1. TKR yapısını içeren üç fazlı bir güç sistemi

TKR'nin tek faz eşdeğer devresi şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü üzere TKR yapısı bir tristör valfi ve reaktörün birbirine seri bağlanmasıyla oluşur. Yapıdaki tristör valfi reaktör üzerindeki sinüzoidal akımı sağlamak için çift yönlü bir anahtar gibi davranmaktadır [3, 5-7]. Böylece TKR için tetikleme açısı (α)'na bağlı ve kontrol edilebilir süseptans fonksiyonu elde edilir.



Şekil 2. TKR'nin tek faz eşdeğer devresi

Şekil 2'de verilen devrede kaynak gerilimi,

$$v_s(t) = V_m \cdot \sin(\omega t) \quad 1$$

olarak ifade edilirse reaktör gerilimi de,

$$v_L(t) = L \cdot \frac{di_{TKR}(t)}{dt} = v_s(t) \quad 2$$

diferansiyel eşitliğiyle gösterilir. Burada, L , TKR'nin endüktansıdır. TKR akımı ise,

$$i_{TKR}(t) = \frac{1}{L} \int v_s(t) \cdot dt \quad 3$$

olarak ifade edilir. Eşitlik 3'ün çözümü yapılırsa

$$i_{TKR}(t) = -\frac{V_s}{\omega L} \cos(\omega t) \quad 4$$

olarak bulunur. Bu eşitlikte $\alpha < \omega t < (\alpha + \sigma)$ sınır şartları kullanıldığında TKR akımı,

$$i_{TKR}(t) = -\frac{V_s}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad 5$$

eşitliği ile ifade edilir. TKR akımının temel bileşeni I_{TKR1} 'yi elde etmek için Fourier analizi kullanılırsa,

$$i_{TKR1}(\alpha) = \frac{V_s}{\omega L} \left(2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{1}{\pi} \sin(2\alpha) \right) \quad 6$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik,

$$i_{TKR1}(\alpha) = V_s \cdot B_{TKR} \quad 7$$

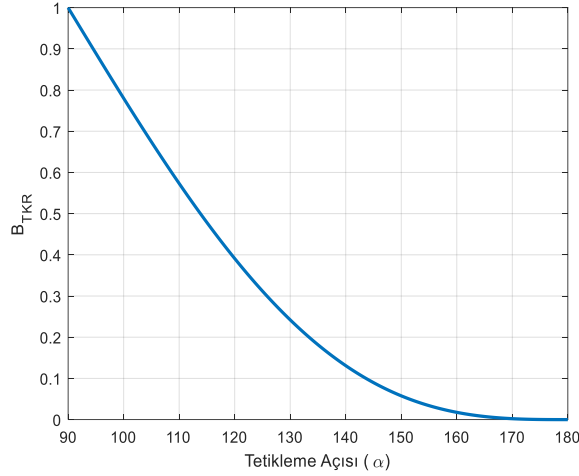
olarak da yazılabilir. Eşitlik 6 ve 7 kullanılarak reaktörün süseptansı,

$$B_{TKR} = B_{\max} \cdot \left(2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{1}{\pi} \sin(2\alpha) \right) \quad 8$$

elde edilir. Bu eşitlikte verilen B_{\max} ,

$$B_{\max} = B_L = \frac{1}{\omega L} \quad 9$$

olarak ifade edilir. Tristörlerin tetikleme açısının kontrol edilebilir aralığı 90° ile 180° arasındadır. Tetikleme açısının durumuna göre reaktör süseptansının değişimi Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 3’de görüldüğü üzere 90° ’lik bir tetikleme açısı, TKR’de sürekli bir sinüzoidal akım akışı ile tam tristör iletimi sağlar ve reaktörün reaktif gücü tam olarak güç sistemine aktarılır. Tetikleme açısı arttıkça TKR tarafından üretilen endüktif reaktif güçte sıfıra yaklaşır.



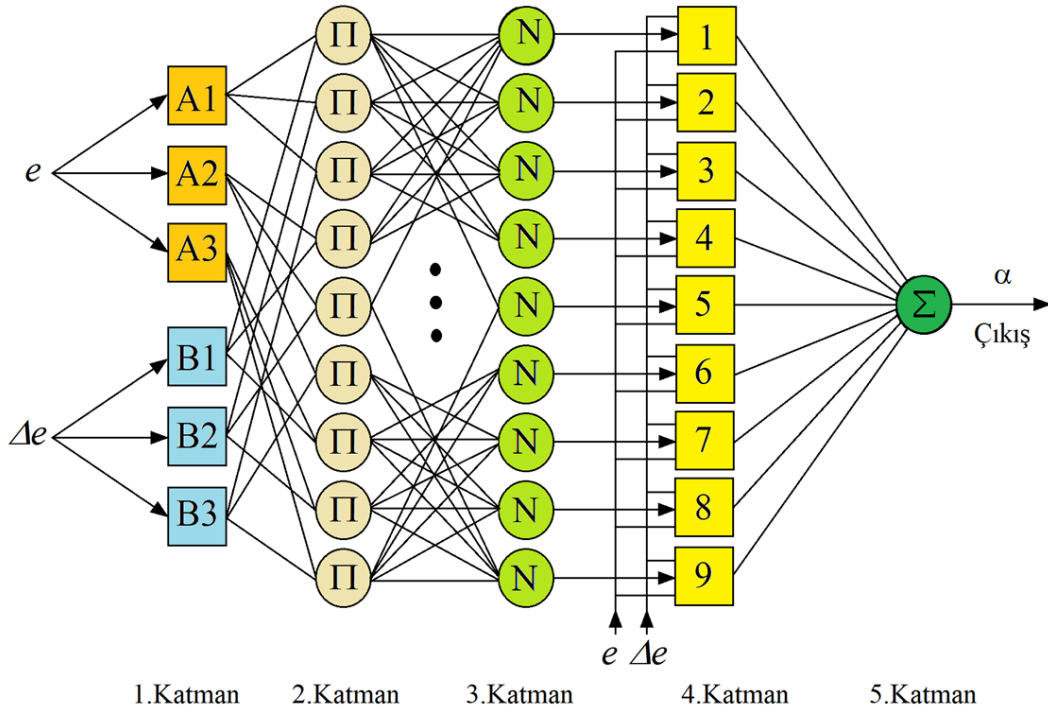
Şekil 3. Tetikleme açısına göre TKR süseptansının değişimi

3. TKR İÇİN ANFIS DENETLEYİCİ TASARIMI (ANFIS CONTROLLER DESIGN FOR TCR)

Karmaşık sistemlerin sınıflandırılması, modellenmesi ve denetimi gibi problemlerde etkili olan ANFIS mimarisi yapay sinir ağı ve bulanık çıkarımın uygun bir kombinasyonu ile oluşturulmuş J.S.R. Jang [14] tarafından Sugeno bulanık modeli esas alınarak geliştirilmiş sinirsel bulanık bir ağ yapısıdır. Bu yapının amacı, sistem performansını arttırmak için üyelik fonksiyon parametreleri ve dilsel kuralları ayarlayabilen bir sinir ağından türetilen öğrenme yeteneğine sahip bir sistem tasarlamaktır. ANFIS’in yapısında yapay sinir ağlarının öğrenme algoritmaları kullanarak uyarlanabilen parametreler bulunmaktadır. Birinci katmanda, üyelik fonksiyonları girişiyle ilgili üç değişken parametre $\{a_i, b_i, c_i\}$ vardır. Dördüncü katmanda ise birinci dereceden polinom ile ilgili değiştirilebilen üç parametre $\{p_j, q_j, r_j\}$ vardır. Referans reaktif güç (Q_{ref}) ile TKR’nin bağlı olduğu güç sisteminin anlık reaktif gücü ($Q_{anlık}$) arasındaki hata (e) öncül ve sonuç parametrelerini ayarlamak için kullanılır [15-19].

$$e = Q_{ref} - Q_{anlık} \quad 10$$

Her biri üç üyelik fonksiyonu ile bulanıklaştırılmış iki giriş ve bir çıkışa sahip beş katmanlı bir yapay sinir ağı yapısına sahip bulanık mantık algoritmasını içeren 9 kurallı olarak önerilen sinirsel bulanık denetleyici yapısı Şekil 4’te gösterilmektedir. Burada daire biçimde gösterilmiş olan düğüm noktaları sabit olup, kare biçiminde olan düğüm noktaları ise uyarlanabilirlerdir.



Şekil 4. İki girişli 9 kurallı ANFIS yapısı

1.Katman: Bu katman bulanıklaştırma katmanıdır. Her giriş değişkeni için üyelik dereceleri hesaplanır. ANFIS'in giriş değişkenleri hata (e) ve hatanın değişimi (Δe) olarak seçilmiş ve bu değerler (-1, +1) aralığına ölçeklenmiştir.

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(e) = \frac{1}{1 + \left[\frac{e - c_i}{a_i} \right]^{b_i}} \quad i = 1, 2, 3 \quad 11$$

$$O_{i+3}^1 = \mu_{B_i}(\Delta e) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\Delta e - c_{i+3}}{a_{i+3}} \right]^{b_{i+3}}} \quad i = 1, 2, 3 \quad 12$$

Burada A_i ve B_i bulanık kümeler, O_i^1 ise bu katmandaki kare düğüm çıkışlarıdır. Her düğüm için üyelik fonksiyonu olarak çan fonksiyonu seçilmiştir. Bu katmandaki $\{a_i, b_i, c_i\}$ parametrelerine genellikle öncül parametreler denilmektedir.

2.Katman: Bu katman kural çıkarım katmanıdır. Π ile etiketlenmiş olan bu katmandaki her düğüm, gelen sinyalleri çarpım operatörünü kullanarak elde ettiği w_j ateşleme kuvveti çıkışını bir sonraki katmana göndermektedir.

$$O_j^2 = w_j = \mu_{A_i}(e) \cdot \mu_{B_i}(\Delta e) \quad j = 1, 2, 3, \dots, 9 \quad 13$$

3.Katman: Bu katman normalizasyon katmanıdır. Bu katmandaki her düğüm N olarak etiketlenmiş bir daire düğümüdür. Her düğüm kuralının ateşleme kuvveti ile tüm kuralların ateşleme kuvvetlerinin toplamını oranlayarak normalize işlemi yapılır.

$$O_j^3 = \bar{w}_j = \frac{w_j}{\sum_j w_j} \quad j = 1, 2, 3, \dots, 9 \quad 14$$

4.Katman: Sonuç parametrelerine göre kural çıktılarının hesaplandığı katmandır.

$$O_j^4 = \overline{w_j} f_j = \overline{w_j} (p_j x + q_j y + r_j) \quad j=1,2,3,\dots,9 \quad 15$$

Burada $\{p_j, q_j, r_j\}$, bu düğümün parametre setidir. Bu katmandaki parametrelere genellikle sonuç parametreleri denir. Sonuç parametreleri, geri yayılım algoritması kullanılarak uyarlanır. Sonuç parametrelerinin kullanımı ise birinci derece Sugeno bulanık modelinin aşağıdaki kural ifadesindeki gibidir.

$$\text{Kural } j: \text{Eğer } e = A_i \text{ VE } \Delta e = B_i \text{ İSE } f_j = p_j e + q_j \Delta e + r_j$$

5.Katman: Bu katman ağın çıkış katmanıdır. Bu katmandaki tek düğüm, gelen tüm sinyallerin toplamını hesaplayan Σ etiketli sabit bir düğümdür. Çıkış, durulaştırılmış kesin değerdir.

$$\alpha = O_j^5 = \sum_j \overline{w_j} f_j \quad j=1,2,3,\dots,9 \quad 16$$

Denetleyicinin uyarlanabilir parametreleri, sistem çıkış hatasına bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanan uygunluk fonksiyonu geri yayılım algoritması ile minimize edilerek uyarlanır.

$$E = \frac{1}{2} (Q_{ref} - Q_{anlık})^2 = \frac{1}{2} e^2 \quad 17$$

Uygunluk fonksiyonu E'nin ANFIS çıkışı $\Delta \alpha$ 'ya göre hassasiyeti, aşağıda gösterilen delta uyarlama kuralı ile hata ve hata değişim oranının doğrusal bir kombinasyonu ile tahmin edilebilir [20-23].

$$\frac{\partial E}{\partial \Delta \alpha} = k_1 \cdot e + k_2 \cdot \Delta e \quad 18$$

Burada k_1 ve k_2 , deneme-yanılma ile ayarlanan parametreler olup bu çalışmada $k_1=0.5$ ve $k_2=0.35$ olarak ayarlanmıştır. ANFIS denetleyicinin sonuç parametreleri, uygunluk fonksiyon değerini sıfıra yaklaştıracak şekilde geri yayılım algoritması ile güncellenir.

$$(pqr)_{k+1} = (pqr)_k - \eta \frac{\partial E}{\partial (pqr)_k} \quad 19$$

Burada pqr güncellenecek (p, q ve r) sonuç parametrelerinden birini, η ise öğrenme katsayısını ifade etmektedir. Benzetim modelinde kullanılan sonuç parametrelerinin başlangıç değerleri $p_j=1$, $q_j=1$, $r_j=1$ ve $\eta = 0.25$ olarak belirlenmiştir.

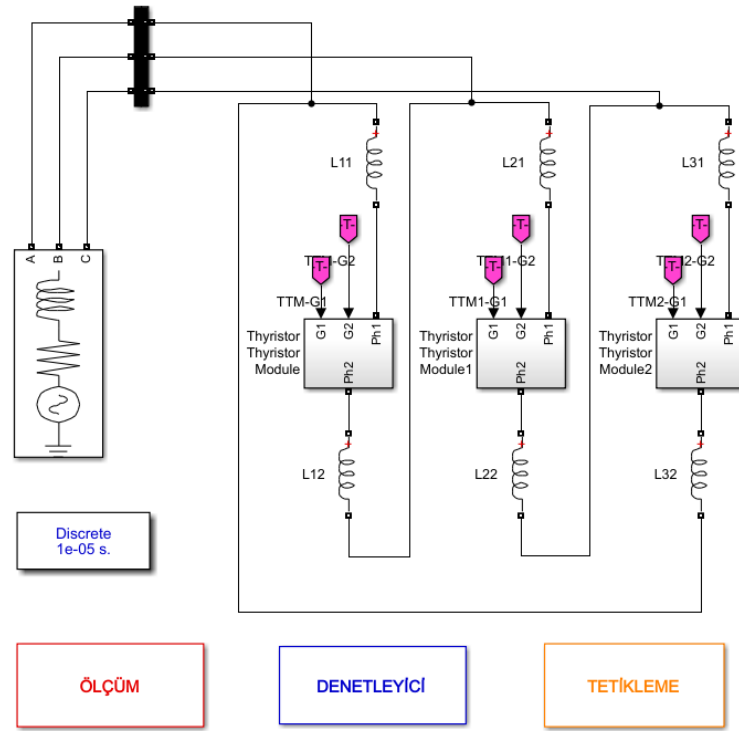
4. BENZETİM ÇALIŞMALARI (SIMULATION STUDIES)

Bu bölümde, TKR'nin reaktif güç kontrolü için önerilen ANFIS denetleyicisinin başarımını incelemek için MATLAB/Simulink programı ve "Sim Power System" araç kutusu kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Önerilen denetleyicinin başarımını belirlemek için elde edilen sonuçlar PI tipi denetleyici ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca klasik PI tipi denetleyicinin kazanç katsayılarının denetim başarısındaki etkisini incelemek amacıyla da çalışmada iki farklı PI tipi denetleyici kullanılmıştır. Sinirsel bulanık denetim esaslı tristör kontrollü reaktörün benzetim modeli Şekil 5'te gösterilmiştir. Benzetim modeli için kullanılan model parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

ANFIS esaslı tristör kontrollü reaktörün başarımını değerlendirmek amacıyla reaktif güç kontrolü için iki farklı çalışma koşulu oluşturulmuş ve benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma koşulları şu şekildedir:

Durum 1: Bu çalışma senaryosunda sabit giriş gerilimi altında TKR'nin reaktif gücünün benzetim çalışmasının belirli bir zamanında 15 kVAR'dan 7.5 kVAR'a düşmesi istenmiş ve böylece denetleyicinin giriş referansını takip edebilme başarısı incelenmiştir.

Durum 2: Bu çalışmada değişken giriş gerilimi altında TKR'nin reaktif gücünün 12 kVAR'da sabit kalması istenmiş ve denetleyicinin bozucu girişlere karşı başarımını incelenmiştir.



Şekil 5. Benzetim modeli

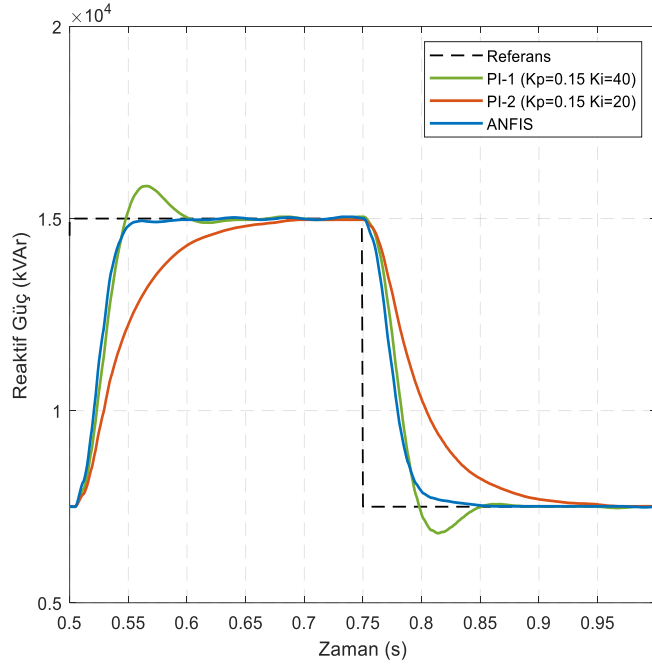
Tablo 1. Benzetim model parametreleri

Parametre	Değeri
Kaynak Gerilimi	400 V
Frekans	50 Hz
Reaktör Endüktansı	50.930 mH
Örnekleme Zamanı	10µs

4.1. Durum 1 (Case 1)

Bu benzetim çalışması durumunda, TKR'nin sabit hat gerilimi altında değişken referans reaktif gücü takip etme başarısı incelenmiştir. Denetlenen sistemin yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşım gibi denetim parametreleri dikkate alınarak önerilen denetleyici ile klasik PI tipi denetleyicilerin başarımları karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmasının süresi 1 sn olarak belirlenmiştir. TKR'nin referans reaktif gücü 0.75 saniyede 15kVAR'dan 7.5kVAR'a aniden düşürülmüştür. Referans reaktif gücün bu değişimini denetleyicilerin takip etme başarımı Şekil 6'te gösterilmiştir. Ayrıca her bir denetleyicinin başarımları ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tüm denetleyiciler için başarımları incelendiğinde; ANFIS tipi denetleyici 35.99 ms ile en kısa yükselme zamanına sahipken buna en yakın sonucu ise 39.89 ms ile PI-1 denetleyicisi sağlamıştır. Ancak yerleşme zamanı ve aşım kriterleri incelendiğinde PI-1 denetleyicisinin başarımları ANFIS tipi denetleyiciye göre çok düşük kalmıştır. Tablo 2'den ANFIS ile PI-2 denetleyicilerinin herhangi aşım oluşturmadığı açıkça görülmektedir. Burada PI-2 denetleyici yükselme zamanı ve yerleşme zamanı açısından ANFIS denetleyiciye göre daha az başarımları göstermiştir.



Şekil 6. Referans reaktif gücünün değişimini denetleyicilerin takip etme başarımı

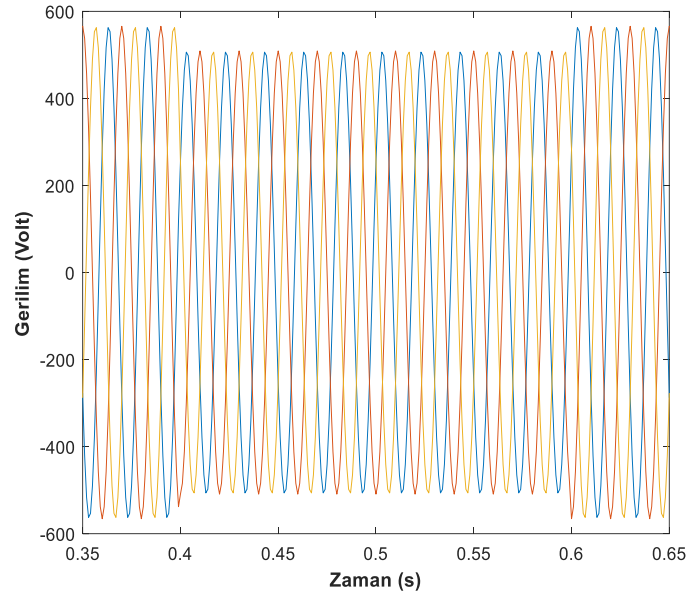
Tablo 2. Durum 1 için denetleyicilerin başarımları

Denetleyici	Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım
PI - 1	39.89 ms	95.03 ms	%4.98
PI - 2	87.32 ms	149.25 ms	%0.0
ANFIS	35.99 ms	49.87 ms	%0.0

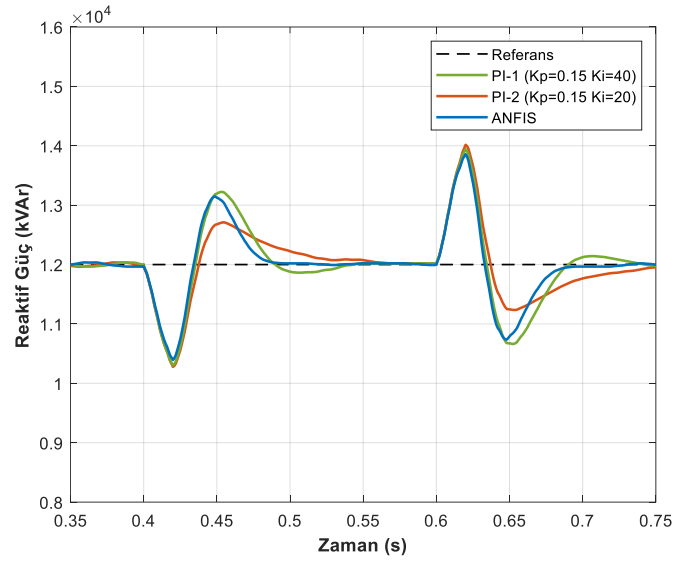
4.2. Durum 2 (Case 2)

Bu benzetim çalışması durumunda, TKR'nin değişken hat gerilimi altında sabit referans reaktif gücü takip etme başarısı incelenmiştir. Yine bir önceki durumda bahsedilen denetim parametreleri dikkate alınarak sonuçlar incelenmiştir. Bu benzetim çalışması süresince hat geriliminin değişimi Şekil 7'de gösterilmiştir. Benzetim çalışmasının süresi yine 1 saniye olarak belirlenmiştir. Şekil 7'de görüldüğü gibi benzetim süresinin 0.4. saniyesinde hat gerilimi %10 düşürülmüş ve 0.2 saniye boyunca bu gerilim düşümü devam etmiştir. Böylece önerilen denetleyicinin başarımı bozucu girişler açısından değerlendirilmiştir. Benzetim çalışmasının sonuçları Şekil 8'de gösterilmiştir.

Referans reaktif gücünün 12 kVAr olduğu durumda sistem kararlı haldeyken bozucu giriş uygulandığı anda TKR'nin reaktif gücünün PI-1 denetleyicide 10.30 kVAr'a, PI-2 denetleyicide 10.28 kVAr'a, ANFIS denetleyicide 10.40 kVAr'a düştüğü görülmüştür. PI-1, PI-2 ve ANFIS denetleyiciler sırasıyla bu bozucu etkiyi 135.02 ms, 154.76 ms ve 84.97 ms de ortadan kaldırmıştır. Sisteme uygulanan bozucu giriş kaldırıldığında ise PI-1, PI-2 ve ANFIS denetleyiciler sırasıyla bu etkiyi 129.78 ms, 150.13 ms ve 87.09 ms de düzeltmiştir.



Şekil 7. TKR hat geriliminin değişimi



Şekil 8. Bozucu girişler olması durumunda denetleyicilerin başarımları

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada esnek AA iletim sistemlerinde çok sık kullanılan TKR'nin reaktif güç kontrolü için bir benzetim modeli oluşturulmuştur. Bu modelde TKR'nin reaktif güç kontrolü klasik PI tipi denetleyiciler ve ANFIS tipi denetleyici kullanılarak yapılmıştır.

Önerilen denetleyicinin başarımını incelemek için benzetim modelinde iki ayrı çalışma durumu oluşturulmuştur. Birinci durumda denetleyicilerin referans reaktif gücü takip etme başarımı, ikinci durumda ise sisteme verilen bozucu giriş etkisinin sönümlenmesindeki başarımı detaylı olarak incelenmiştir. Her iki durum için yapılan benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre önerilen ANFIS tipi denetleyicinin referans reaktif gücü takip etmede yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşım kriterleri açısından PI tipi denetleyicilerden daha başarılı olduğu görülmüştür. Ayrıca önerilen denetleyici, sisteme verilen bozucu giriş etkisinin azaltılmasında klasik denetleyicilere göre daha hızlı tepki vermiştir. ANFIS denetleyicinin ayarlanabilen parametrelerine ait başlangıç değerlerinin yapay zekaya dayalı optimizasyon yöntemleriyle belirlenmesi denetleyicinin başarımını daha da artıracığı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] R. Agrawal, S. K. Bharadwaj, D. P. Kothari, Population based evolutionary optimization techniques for optimal allocation and sizing of Thyristor Controlled Series Capacitor, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 5 (2018) 484-501.
- [2] J. G. Jamnani, M. Pandya, Coordination of SVC and TCSC for Management of Power Flow by Particle Swarm Optimization, *Energy Procedia*, 156 (2019) 321-326.
- [3] B. Mahdad, Optimal reconfiguration and reactive power planning based fractal search algorithm: A case study of the Algerian distribution electrical system, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22 (2019) 78-101.
- [4] A. Pekdemir, A. B. Yildiz, Analysis and modelling of FC-TCR based on static VAR compensator, 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE), (2018) 115-118.
- [5] O. F. Kececioğlu, A. Gani, M. Sekkeli, A performance comparison of static VAR compensator based on Goertzel and FFT algorithm and experimental validation, *SpringerPlus*, 5(1) (2016) 391.
- [6] Y. Mi, C. Ma, S. Wang, C. Bi, Y. Zhu, H. Zhang, Reactive power control of an isolated wind-diesel hybrid power system based on SVC by using sliding mode control, 35th Chinese Control Conference (CCC), (2016) 9882-9887.
- [7] R. C. Bansal, Automatic Reactive-Power Control of Isolated Wind-Diesel Hybrid Power Systems, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 53(4) (2006) 1116-1126.
- [8] R.C. Bansal, T. S. Bhatti, D. P. Kothari, A novel mathematical modelling of induction generator for reactive power control of isolated hybrid power systems, *International journal of modelling & simulation*, 24(1) (2004) 1-7.
- [9] A. Banerjee, V. Mukherjee, S. P. Ghoshal, Intelligent fuzzy-based reactive power compensation of an isolated hybrid power system, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 57 (2014) 164-177.
- [10] S. Vachirasricirikul, I. Ngamroo, S. Kaitwanidvilai, Coordinated SVC and AVR for robust voltage control in a hybrid wind-diesel system, *Energy Conversion and Management*, 51(12) (2010) 2383-2393.
- [11] M. D. Tür, Z. Aydoğmuş, İletim Hatları için Bulanık Mantık Tabanlı Direk Tipi Seçimi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım ve Teknoloji*, 2(4) (2014) 299-308.
- [12] B. Dandıl, M. Gökbulut, Asenkron Motorların Sinirsel-Bulanık Denetleyici ile Uyarlamalı Denetimi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(2) (2005) 145-153.
- [13] W. Lee, T. Kim, Control of the Thyristor-controlled Reactor for Reactive Power Compensation and Load Balancing, 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, (2007) 201-206.
- [14] J. S. R. Jang, *Neuro-Fuzzy Modeling: Architectures, Analyses, and Applications*, Ph.D. Dissertation, Univ. of California at Berkeley, (1992).
- [15] E. Kılıç, Ş. Yılmaz, H. R. Özçalık, S. Şit, A comparative analysis of FLC and ANFIS controller for vector controlled induction motor drive, 2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), (2015) 102-106.
- [16] Y. Kang, Y. W. Chen, Y. P. Chang, M. H. Chu, The Direct Neural Control Applied to the Position Control in Hydraulic Servo System, *Advances in Neural Networks - ISSN 2008. vol 5264*. Springer, Berlin, Heidelberg. (2008).

- [17] J. S. R. Jang, ANFIS, Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems, IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, 23(5) (1993) 665-685.
- [18] J. S. R. Jang, C. T. Sun, Neuro-Fuzzy Modeling and Control, Proceeding of the IEEE Transactions, 83(3) (1995) 378-406.
- [19] S. Tuncer, B. Dandil, Adaptive neuro- fuzzy current control for multilevel inverter fed induction motor, COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 27(3) (2008) 668-681.
- [20] R. Coteli, H. Acikgoz, F. Ucar, B. Dandil, Design and implementation of Type-2 fuzzy neural system controller for PWM rectifiers, International Journal of Hydrogen Energy, 42(32) (2017) 20759-20771.
- [21] S. V. Üstün, A. Nur, M. Kaya, PI Katsayıları ve Sistem Performansı Arasındaki İlişkinin Çıkarılmasında ANFIS ve YSA Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(4) (2018) 322-328.
- [22] H. Acikgoz, O. F. Kececioğlu, I. Karadol, A. Gani, M. Sekkeli, Adaptive Control of Solid State Transformer Using Type-2 Fuzzy Neural System, Studies in Informatics and Control, 26(2) (2017) 171-181.
- [23] E. Kılıç, S. Şit, A. Gani, M. Şekkeli, H. R. Özçalık, Neuro-Fuzzy Based Model Reference Adaptive Control for Induction Motor Drive, Turkish Journal of Fuzzy Systems (TJFS), 8(2) (2017) 63-72.