



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Bulanık ters model kullanılarak doğru akım motor sürücüsü için referans model temelli uyarlanabilir bulanık denetleyici

Reference model based adaptive fuzzy controller for direct current motor drive using fuzzy inverse model

Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet BULUT¹

ORCID¹: 0000-0003-3998-1785

To cite to this article: Bulut M., “Bulanık ters model kullanılarak doğru akım motor sürücüsü için referans model temelli uyarlanabilir bulanık denetleyici”, *Journal of Polytechnic*, 26(2): 593-602, (2023).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Bulut M., “Bulanık ters model kullanılarak doğru akım motor sürücüsü için referans model temelli uyarlanabilir bulanık denetleyici”, *Politeknik Dergisi*, 26(2): 593-602, (2023).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.877909

Bulanık Ters Model Kullanılarak Doğru Akım Motor Sürücüsü için Referans Model Temelli Uyarlanabilir Bulanık Denetleyici

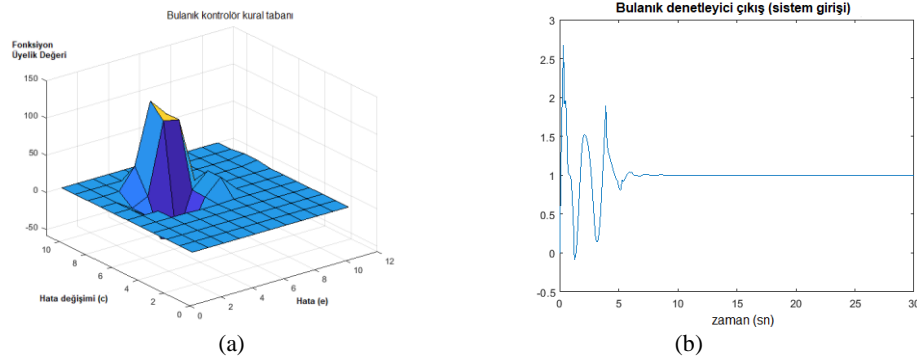
Reference Model Based Adaptive Fuzzy Controller for Direct Current Motor Drive Using Fuzzy Inverse Model

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ *Bulanık model referans tabanlı öğrenme yaklaşımı / Fuzzy model reference based learning approach.*
- ❖ *Sistem modeli davranışlarından bulanık denetleyici kuralı tabanı elde edilmesi / Obtaining the fuzzy controller rule base from system model behaviors.*
- ❖ *DC motor hız kontrolü için uygulanabilirlik / Applicability for dc motor speed control*
- ❖ *Bulanık ters modeli kullanarak bulanık denetleyicinin ayarlanması / Adjustment fuzzy controller using fuzzy inverse model.*

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, doğru akım motor kontrolü için bulanık ters model öğrenmeye dayalı bir uyarlamalı bulanık kontrol tasarımı kullanılmıştır; Bir dc motor için uygulanabilirliği ve sonuçları Şekil A'da gösterilmiştir./ In this study, an adaptive fuzzy controls design was used for direct current motor control based on fuzzy inverse model learning; Its applicability and results for a dc motor are shown in Figure A.



Şekil.A Öğrenme aşamasında a) öğrenilen kural tabanı b) Bulanık denetleyici çıkışı / Figure A. During the learning phase a) learned rule base b) Fuzzy controller output

Amaç (Aim)

Doğru akım motor kontrolünde düşük kararlı durum hatası ve düşük yerleşme süreli uyarlanabilir bulanık denetleyici tasarımı./ Adaptive fuzzy controller design with low steady state error and low settling time in direct current motor control.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Bulanık ters model öğrenme ile model referans bulanık kontrol kural tabanını uyarlama / Adapting the model reference fuzzy control rule base with fuzzy inverse model learning.

Özgünlük (Originality)

Bulanık ters model öğrenmeye dayalı bir uyarlamalı bulanık denetleyici ile doğru akım motoru sürülmesi / Driving a direct current motor with an adaptive fuzzy controller based on fuzzy inverse model learning.

Bulgular (Findings)

Bu yöntem kullanılarak tasarlanan kural tabanlı bulanık kontrol ile sistem çıkışı yaklaşık 3-4 saniyede referans hızı ulaştı. / System output reached the reference speed in approximately 3-4 seconds with the fuzzy control with rule base designed using this method.

Sonuç (Conclusion)

Bulanık ters model öğrenme metodu ile doğru akım motoru sürmek için başarılı uyarlanabilir bulanık denetleyici kural tabanının belirlendiği görülmüştür./ It was seen that the successful adaptive fuzzy controller rule base was determined to drive a direct current motor with the fuzzy inverse model learning method.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Bulanık Ters Model Kullanılarak Doğru Akım Motor Sürücüsü için Referans Model Temelli Uyarlanabilir Bulanık Denetleyici

Araştırma Makalesi / Research Article

Mehmet BULUT*

Elektrik Üretim A.Ş Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 10.02.2021 ; Kabul/Accepted : 10.12.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 20.12.2021)

ÖZ

Sistemdeki parametre değişimlerine göre denetleyici katsayılarını ayarlayan uyarlama mekanizması, denetleyicinin uyarlanabilir olmasını sağlamaktadır. Uyarlama mekanizması için geleneksel bir algoritma yerine uyarlanabilir bulanık metodu kullanılarak, sistemdeki denetleyicinin kazanç katsayılarının hesaplanması için bulanık mantık kullanılabilir. Normalde bir bulanık denetleyici sistemine ait kurallar, sistemi deneyimlemiş olan uzman bilgisi kullanılarak sistemin iç yapısından ve sistem davranışlarından çıkarılmaktadır. Ancak tüm sistemler için bu şekilde uzman insan bilgisine dayanan bulanık kuralların çıkarılması mümkün değildir. Çok değişken davranış gösteren ve doğrusal olmayan sistemlerde bulanık kurallarının çıkarılması için farklı yöntemlerin kullanılması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, bulanık ters model kullanılarak öğrenmeye dayalı referans model öğrenme algoritması kullanılarak dc motor için uyarlanabilir bulanık denetleyici tasarımı yapılmış; elde edilen sonuçlar ile dc motor için uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Tasarlanan sistemin benzetimi Matlab programı kullanılarak gerçekleştirilmiş, sabit ve değişken yükler kullanılarak sistemin davranışı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistem kararlılığı açısından uyarlanabilir bulanık denetleyici ile dc motoru sürmek için tatmin edici olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Bulanık denetleyici, kural taban, referans model, DA motoru, uyarlanabilir denetleyici.

Reference Model Based Adaptive Fuzzy Controller for Direct Current Motor Drive Using Fuzzy Inverse Model

ABSTRACT

The adaptation mechanism, which adjusts the controller coefficients according to the parameter changes in the system, ensures that the controller is adaptable. Fuzzy logic can be used to calculate the gain coefficients of the controller in the system by using the adaptive fuzzy method instead of a traditional algorithm for the adaptation mechanism. Normally, the rules of a fuzzy controller system are derived from the system's internal structure and system behavior using expert knowledge that has experienced the system. However, it is not possible to derive fuzzy rules based on expert human knowledge for all systems in this way. It is necessary to use different methods to derive fuzzy rules in highly variable behavior and nonlinear systems. In this study, an adaptive fuzzy controller design for dc motor was made using a learning-based reference model learning algorithm using fuzzy inverse model; It has been shown that it is applicable for dc motors with the results obtained. Simulation of the designed system was carried out using the Matlab program, and the behavior of the system was investigated by using constant and variable loads. The results showed that it is satisfactory to drive a dc motor with adaptive fuzzy controller in terms of system stability.

Keywords: Fuzzy control, rule base, reference model, DC Motor, adaptive controller

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğru akım (DA) motorları günümüzde birçok endüstriyel alanda, çok çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak doğru akım motoru geçmişi uzun yıllar öncesine dayanmasına rağmen, uygulamaları son yıllarda daha önemli hale gelmiştir. DA motorların hız kontrolü için kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Armatür voltaj kontrolü, armatür direnç

kontrolü ve sabit akıllı motorlar şönt ve seri alan ile alan uyarma kontrolüne dayalı olarak bir DC motorun hız kontrolü kullanılan yeni yöntemler arasındadır [1]. Hız kontrolü, değişken çalışma koşullarının yani yük bozulması, parametre belirsizliği, ölçüm gürültüsü vb. varlığında endüstriyel sürücülerde ortak bir gereklilik olmaktadır. Motorlardaki ani büyük yük değişimi ve atalet değişimlerinde olduğu gibi, sabit parametrelili denetleyiciler birçok sistemin kontrolünde yeterli gelmemektedir [2-4]. Model referans uyarlamalı denetleyici yaklaşımı, kendini düzenleyen (self-tuning) ve diğer uyarlamalı denetleyici teknikleri ile karşılaştırıldığında daha az hesaplama süresi

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mehmetbulut06@gmail.com

gerektirmekte ve genel olarak performans, karmaşıklık anlamında daha iyi bir uyum gösterirler [5].

Bulanık kontrol ise, modern kontrol teorisinde bulanık kümeler üzerine kurulmuş, dilsel kurallara ve bulanık muhakemeye dayalı bir kontrol teorisidir. Akıllı kontrolün önemli bir dalıdır. Bulanık kümeler kavramı ilk kez 1965 yılında Amerikalı bilim adamı Zadeh tarafından önerilmiş ve günümüze kadar kontrol alanında birçok uygulama yapılmıştır [6]. Shahgholian ve diğerleri, çalışmalarında, geleneksel model referans uyarlamalı denetleyici ile model referans bulanık uyarlamalı denetleyicinin performansını karşılaştırmışlardır [7]. Layne ve Passino, süreç aksaklıkları veya varyasyonları olduğunda bir kargo gemisi oto pilotunun yeterli performansını sürdürmek için bulanık mantık temelli uyarlamalı bir denetleyici öğrenme sisteminin kullanılmasını incelemiştir [8]. Sheel ve arkadaşları ise, geleneksel model referans uyarlamalı denetleyici kullanılarak dc sürücünün hız kontrolündeki performansını ortaya koymuşlardır. Yükteki dalgalanmanın proseste kademeli bozukluğa yol açtığı ve bunun da istenen hızdan sapmaya neden olduğunu görmüşlerdir [9]. Farahani ve Rahmani ise, ayrı olarak uyarılan bir DA motorun hızını kontrol için yeni bir bulanık sinir denetleyicisi önermişlerdir [10]. Genelde, bir "bulanık denetleyici" için, bilgisayar algoritmasında kullanmak üzere bir uzman insanın prosesi nasıl kontrol ettiği hakkındaki bilgisini kullanmak için bulanık sistem kullanılır. Uzmanın sistem hakkındaki bilgi ve tecrübesi bir bulanık kontroller için bir ön bilgi olarak kullanılır. Normal bulanık denetleyicide kullanılacak kuralların belirlenmesi için uzman bilgisi gerekmektedir. Uyarlamalı bulanık denetleyicide ise gerekli bulanık kurallarını otomatik olarak sistem verilerinden üretmek için sinir ağları, evrimsel algoritma gibi yapay zeka yöntemlerin bir veya birkaçının beraber kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır [11,12]. Bulanık mantık ve bulanık kurallara dayanan bulanık denetleyiciler günümüzde birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır [13-15]. Bulanık mantık temelli denetleyicilerin bilinen avantajlarına rağmen bir analitik tasarım yönteminin eksikliği yüzünden bunların belli bir sistem geliştirilmesi halen deneme ve yanılma yoluyla olmaktadır. Bununla birlikte yapay sinir ağları ve benzeri yöntemler ile kendinden öğrenen prosedürler mevcut olup böyle bir engelin üstesinden gelmek mümkün olmaktadır. Ayrıca bulanık kurallarını otomatik olarak düzenlemek için literatürde kullanılan farklı yöntemler bulunmaktadır [16, 17]. DA Motorun açılma hız kontrolü için ve sinirsel uyarlanabilir yaklaşımları içeren çalışmalar da yapılmıştır [18].

Ayrıklı uyarımlı DA motor, hassasiyeti, basitliği, sürekli kontrol özelliği ve geniş hız aralığı nedeniyle robotik, çalıştırma, kontrol ve kılavuzlu manipülasyon gibi endüstriyel uygulamalar için hayati önem taşıyan yüksek performanslı değişken hız ihtiyacını karşılamaktadırlar. Bu nedenle, motoru istenen hızda doğru bir şekilde düzenlemeye ve sürmeye ihtiyaç vardır. Armatür gerilimi

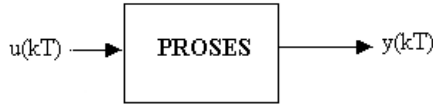
ve alan akımı yöntemleri, motor hızını daha geniş bir aralıkta kontrol edememeleri nedeniyle eksik kalması sebebiyle, DA motor hızı için hızlı ve salınımlı olmayan bir yanıt olan referans hız takibini sağlayacak yöntem arayışı literatürde her zaman yer bulmaktadır. Bunlar arasında DA motorun armatürünün dinamik etkilerini ve alan uyarımının görevini modeler öne çıkıştır. Okoro ve Enwerem referans hız takibini sağlayacak bir model geri besleme kontrol şemasını kullanan bir model önermiş ve motor hızını kontrol edecek bir PID denetleyici için en uygun ayarları elde etmek için kullanmışlardır [19, 21]. Uyarlamalı denetleyicileri, bunlar sistemde parametre değişimi olduğunda, sistemin istenen dinamik davranışını sürdürmek için kendi özelliklerini değiştirebilme özelliğine de sahiptirler. Proses çalışma koşullarındaki sapmalar nedeniyle gerçek zamanlı uygulamalarda uyarlamalı denetleyici teknikleri daha uygun olmaktadır. Farklı uyarlamalı denetleyici algoritması teorik olarak geliştirilmiş ve bazı uygulamalarda denenmiştir. Çeşitli sistemlerin kontrolü için kullanılan bulanık mantık temelli model referans uyarlamalı denetleyicinin algoritması ise uzman insan bilgisi yerine sistemin nasıl davrandığını gösteren bir referans model kullanır bu da bulanık denetleyiciün temel bilgisini sağlar ve bu da temel bilgi değişimlerini sağlayan kapalı döngü geri besleme performansını artırır. Sonuç olarak, bu algoritma bir bulanık model referans denetleyici olarak adlandırılmaktadır. Algoritma, davranışı hakkında yeterince bilgi sahibi olunmayan veya çok değişiklik gösteren sistemlerde kullanılabilir [22-23].

Doğrudan bulanık denetleyici, kural tablosunun kullanımı yoluyla buluşsal yöntemleri (sürecin insan kontrolünü modelleyen) kullanımına izin vermektedir. Halbuki, uyarlanabilir bir bulanık denetleyici üreten indükleyici bir uyarlama yöntemi sağlayarak kontroller tasarımını daha işlevsel hale getirmiştir. Bulanık model referans öğrenme kontrolü yönteminde, geleneksel adaptif kontrol yapısından farklı olarak "uyarlanabilir" yerine "öğrenme" terimi kullanılmaktadır. Özellikle, doğrudan model referanslı uyarlamalı denetleyici olan bu yöntemde bulanık kural tabanı model referansa göre yeniden öğrenilmektedir [24, 25]. Bu makale kapsamında yapılan çalışmada ise geleneksel uyarlamalı ve doğrudan kontrol yöntemleri yerine öğrenmeye dayalı bir bulanık model referans öğrenme algoritması kullanılarak doğru akım motorunun hız kontrolünü gerçekleştiren uyarlamalı bulanık denetleyici tasarımı yapılmıştır. Bu çalışmada öğrenme kontrol algoritması direk olarak bir bulanık denetleyici üzerine dayandırılmıştır. Çalışmada bulanık model referans öğrenen denetleyici hakkında genel bilgi verilmiş, uygulamanın sonuçlarının DA motor hız kontrolünde başarılı olduğu ortaya konulmuştur. Sistemi meydana getiren kısımlar ayrı ayrı incelenmiş ve kural taban öğrenme mekanizması detaylı incelenmiştir. Bu çalışmada seçilen dc motorun modeli kullanılarak uyarlamalı bulanık denetiminde: a) sistemin tanımlanmış referans model hızı ile motor hızının karşılıklı olarak artması, b) yük değişiklikleri ve kesintiler altında sistem

anlamda gu kontroller çıkışı $u(kT)$ yı proseste kullanılmak üzere alabileceği aralığa taşımak için kullanılmaktadır.

2.3 Bulanık Denetleyici (Fuzzy Controller)

Prosesin r-boyutlu vektör ile gösterilen $u(kT)=[u_1(kT),\dots,u_r(kT)]^T$ girişlerine ve s-boyutlu vektör ile gösterilen $y(kT)=[y_1(kT),\dots,y_s(kT)]^T$ çıkışlarına sahip olduğu kabul edilmiştir. Bu çalışmada ise proses girişi $u(kT)$ ve çıkışı da $y(kT)$ ile gösterilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Tek giriş ve tek çıkışlı proses blok diyagramı

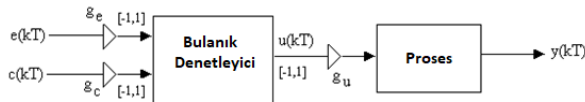
Bulanık denetleyicinin girişi, proses olarak kullanılan dc motor hız bilgisi $y(kT)$ ve istenen hızı gösteren referans giriş değeri $y_r(kT)$ 'nin fonksiyonu olarak olarak tanımlanmaktadır.

Bulanık denetleyici girişleri hata sinyali $e(kT)=[e_1(kT),\dots,e_s(kT)]^T$ ve hatadaki sinyalindeki değişim $c(kT)=[c_1(kT),\dots,c_s(kT)]^T$ olarak denk(1) ve denk(2) deki gibi tanımlanır.

$$e(kT) = y_r(kT) - y(kT) \quad (1)$$

$$c(kT) = \frac{e(kT) - e(kT - T)}{T} \quad (2)$$

Burada $y_r(kT) = [y_{r1}(kT),\dots,y_{rs}(kT)]^T$ istenen s tane proses çıkışını gösterir. Bu yapıyla denetleyici PD-tip bir bulanık denetleyiciyi temsil etmektedir.



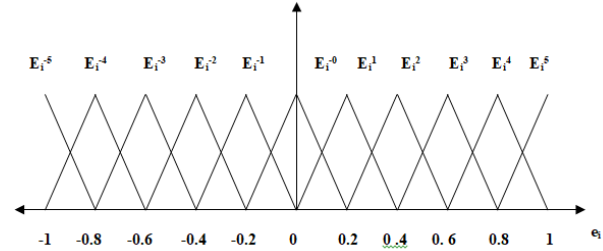
Şekil 4. Bulanık denetleyici giriş ve çıkışlarında kullanılan parametre aralıkları.

Bulanık denetleyici sistemlerinde, denetleyicinin giriş ve çıkış parametrelerinin alabileceği değerler aralığı, parametrenin "tanım uzayı" olarak tanımlanmaktadır. Proseste sistem parametre değişikliklerine karşı istenen düzeyde kararlı cevap veren denetleyici gerçekleştirmek için her bir proses girişi sabit ölçekleme katsayıları kullanılarak, [-1,1] tanım uzayına kaydırılıp normalize edilmiştir. Şekil 4.'de görülen sistemim blok diyagramdaki bulanık denetleyici sistemi tasarımında g_e ve g_c ölçeklendirme katsayılarını göstermekte olup bunlar $e(kT)$ hata değeri, $c(kT)$ hata değişimi ve $u(kT)$ proses çıkışının çalışma aralığına taşınması için kullanılmıştır. Şekil 2'de bu katsayıların blok şema üzerindeki yerleri gösterilmektedir. Burada öğrenme algoritmasında çok girişli - tek çıkışlı (MISO) denetleyici kullanılmıştır. Bulanık denetleyici için bilgi

tabanı (knowledge base) aşağıdaki gibi mantıksal kurallardan türetilmektedir.

IF hata pozitif-büyük **AND** hata değişimi negatif-küçük ise **THEN** proses girişi pozitif-büyükür (4)

Burada e_1 = hata ve E_1^4 = "pozitif-büyük" ilişkilendirilir, hatanın bu küme değerleri içinde olma durumunu ifade eder. Bu şekildeki kurallar kümesi, bir dinamik sistemin nasıl kontrol edildiğini karakterize eden "kural tabanı" oluşturur.



Şekil 5. Bulanık kontroller değişkenleri için tanım uzayı üzerindeki bulanık kümeler

Yukarıdaki örnek kural için Şekil 5'deki tanım uzayındaki üyelik fonksiyonları $e(t)$ için kullanılabilir. Aynı bulanık kümelerinin normalize edilmiş $c(t)$ için de kullanıldığı kabul edilsin. Bulanık denetleyici çıkışı $u(t)$ için tanım uzayı üzerindeki çıkış üyelik fonksiyonları bilinmediği kabul edilmektedir; bu üyelik fonksiyonlarının nasıl olunması gerektiği öğrenme mekanizması tarafından otomatik olarak belirlenmektedir. Böylece sistemi kontrol eden bulanık denetleyici, sistem davranışlarından öğrenilmiş olacaktır. Başlangıçta bulanık denetleyici prosesi nasıl kontrol edeceği hakkında birşey bilmemektedir, yani kural tabanı temsil eden matris boştur. Örnek olarak eğer çıkış sayısı $s=1$ alınırsa bulanık kontrollerin bütün kuralları aşağıdaki formda olacaktır.

$$\text{IF } E_i^j \text{ and } C_l^j \text{ THEN } U_n^{j,l} \quad (3)$$

Burada E_i^j ve C_l^j üçgen tip giriş üyelik fonksiyonlarıdır. E_s^j ve C_s^j bulanık denetleyicinin giriş parametreleri, $U_n^{j,l}$ ise denetleyici çıkışını tanımlar.

Denetleyici giriş ve çıkış parametrelerinin kuralda denk geldikleri bulanık kümelerdeki üyelik derecesi hesaplanmasında üyelik fonksiyonu kullanılmaktadır.

$$\mu_{E_i}(x) = \begin{cases} \max \left[0, 1 + \frac{x - c_{E_i}}{w} \right], & x \leq c_{E_i} \quad i=1...11 \\ \max \left[0, 1 + \frac{c_{E_i} - x}{w} \right], & x > c_{E_i} \quad i=1...11 \end{cases} \quad (4)$$

Burada; c_{E_i} , üçgen tip E_i üyelik fonksiyonun merkezi ve w ise üyelik fonksiyonun taban genişliğinin yarısını göstermektedir.

Doğrudan tasarlanan geleneksel bulanık denetleyicilerde, kontrol kuralları başlangıçta belirtilir. Bu kurallar, süreci bilen bir uzman tarafından sağlanan ön bilgiler olarak ifade edilir. Ancak, bu metotta, sistem bu bilgileri proses referans modelinden otomatik olarak öğrenir ve performansını korumak veya iyileştirmek için gerektiğinde bulanık kümelerini değiştirir. Bunun için, bulanık mantık setlerinde yaygın olarak kullanılan, durulama işleminde standart ağırlık merkezi yöntemi (COG-ağırlık merkezi) kullanılır.

2.4 Referans Model (Reference Model)

Bir sistemin davranışını incelemek için en basit ve yararlı metod, sistemin matematiksel modelinin çıkarılmasıdır. Referans model, kontroller için gerekli performansı sağlamak için kullanılır. Genelde referans model herhangi bir dinamik sistem tipinde olmaktadır (Lineer veya nonlineer, zamanla değişen veya zamanla değişmeyen, kesikli veya sürekli v.s). Tüm sistemin performansı referans modele göre üretilen hata sinyali ile hesaplanır.

$$y_e(kT) = [y_{e1}, \dots, y_{es}]^T \quad (5)$$

Burada $y_e(kT) = y_m(kT) - y(kT)$ dir. Verilen referans model, rise time ve overshoot gibi dizayn kriterlerinin karakteristiklerini ifade eder ve referans modelin girişi, $y_e(kT)$ referans girişidir. Eğer öğrenme mekanizması, hata değeri $y_e(kT)$ 'yi her zaman küçük olmaya zorlarsa kontrol edilen prosesin istenen performansı sağlanır. Eğer istenen performans sağlanırsa (yani $y_e(kT) \approx 0$) o zaman öğrenme mekanizması istenen kural tabanı elde etmiş olur ve bulanık denetleyicide önemli değişiklikler yaptırmayacaktır. Algoritmanın amacı ele alınan kapalı çevrim kontrol sisteminin davranışını verilen referans modele benzetmektir. Burada referans model olarak sistemin nasıl davranmasını gösteren birinci mertebeden bir sistem alınmıştır.

3. TERS BULANIK MODEL BAZLI ÖĞRENME MEKANİZMASI (INVERSE REVERSE FUZZY MODEL BASED LEARNING MECHANISM)

Öğrenme mekanizması, kapalı döngü sistemin referans model gibi davranması için bulanık denetleyicinin bilgi tabanını değiştirme işlevini yerine getirir. Bu temel bilgi değişimi, kontrol edilen proses, referans model ve bulanık kontrollerden gelen verileri gözlenmesiyle gerçekleştirilir. Öğrenme mekanizması iki bölümden oluşur: bulanık ters model ve bilgi tabanı değiştiricisi.

3.1 Bulanık Ters Model (Fuzzy Inverse Model)

Bulanık ters model, altta yatan bulanık denetleyiciyi değiştirerek kapalı döngü sistem davranışındaki istenen davranıştan sapmayı azaltmaya çalışmak için uyarlama döngüsünde bir denetleyici görevi görür. Esasen, bulanık ters model, referans modelde belirtilen davranışa ulaşılabilmesi için kapalı döngü sisteminden gelen çevrimiçi verileri kullanarak bilgi tabanı değiştiricisi bulanık denetleyiciyi oluşturur. Bulanık ters

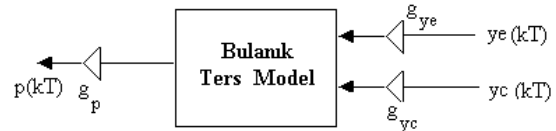
model, istenen süreç davranışından sapmayı gösteren $y_e(kT)$ 'nin haritalama fonksiyonunu düzenler. Bu fonksiyon ile $y_e(kT)$ 'yi sıfırlamaya zorlamak için gerekli olan $p=[p1...pr]t$ proses girişlerindeki değişiklikler sağlanır.

Bulanık ters model, bilgi tabanı düzenleyici proses girişlerinde ihtiyaç duyulan değişiklikleri etkilemek için bulanık kontrollerin temel bilgi değişim fonksiyonunu düzenler. Yapısında bulanık kontrollerde olduğu gibi bir kural tabanı bulunmakta ve giriş-çıkış değerlerini normalize etmek için g_{ye} , g_{yc} ve g_p katsayılarını içermektedir.

Bilgi tabanı düzenleyici, proses girişinde ihtiyaç duyulan değişiklikleri sağlamak için bulanık kontrollerin kural-tabanını düzenleme fonksiyonu olarak çalışır. Bulanık denetleyiciün daha iyi performansa ulaşmasını sağlar. $y_e \approx 0$ yapmak için ihtiyaç duyulan girişteki gerekli değişiklikler hakkında bilgi (ters modelden) sağlar. Temel bilgi düzenleyici bulanık denetleyiciün bilgi tabanını, önceden uygulanan kontrol hareketinin ters model çıkışları $p(kT)$ ile belirtilen miktar kadar düzenlenmesini sağlayacak şekilde değiştirir. Bulanık ters model girişleri $g_{ye} * y_e$ ve $g_{yc} * y_c$ dir (Şekil 5.6). Bulanık ters modelin kural tabanı süreç girişi ile ilişkilendirildiğinde şekilsel olarak,

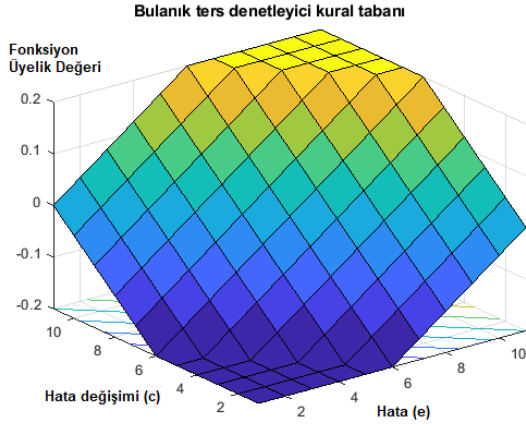
If Y_{e1}^j and...and Y_{es}^k and Y_{c1}^l and...and Y_{cs}^m Then $P_{ij...klm}$ (6)

Burada Y_a^b ve Y_c^b , sırasıyla hata y_e ve hata değişimi y_c için b.ci bulanık kümeleri göstermektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Bulanık ters model blok yapısı

Bulanık ters model de 11x11'lik kural tabanı kullanılmaktadır. Giriş çıkış değişkenleri için de üçgen tip üyelik fonksiyonları ve durulama işleminde ağırlık merkezi yöntemi kullanılmaktadır. Giriş değerindeki gerekli değişiklikleri belirten bilgi $p(kT)$ vektörü tarafından ifade edilmektedir. Bilgi tabanı düzenleyici, (kT-T) anında uygulanan kontrol işaretini $p(kT)$ miktarı kadar değiştirecektir.



Şekil 7. Bulanık ters denetleyici için kullanılan 3-D kural tabanı

Bilgi Tabanı Düzenleyici, daha iyi performans elde edilecek şekilde bulanık denetleyicinin kural tabanını değiştirme işlevini yerine getirir. Sapma miktarı olan $ye(kT)$ yı sıfır olmaya zorlamak için proses girişi p 'de değişiklikler yapmak gerekmektedir. Bilgi Tabanı düzenleyici bir önceki kontrol işareti $u(kT-T)$ iyileştirmek için bulanık çıkarımda ilgili $U_n^{j,...k,l,...m}$ bulanık kümelerinin üyelik fonksiyonlarının merkezlerini kaydırarak düzenler. Bu düzenleme $p(kT)$ ile belirtilen miktar kadar üyelik fonksiyonlarının merkezleri kaydırılarak yapılır. Buradaki kural taban düzenleme prosedürü yerel öğrenme şeklinde çalışır ve bir hafıza kullanır. Yani, kural tabanın farklı bölümleri, sistem için farklı çalışma şartlarına bağlı olarak doldurulur ve kural taban güncellenirken diğer kurallara etkilenmez.

Örneğin, direkt bulanık kontroller ve bulanık ters modelin her ikisi için normalizasyon katsayılarının 1 olduğunu kabul edelim. Bulanık ters model bir $p_n(kT) = 0.5$ çıkışı üretmiş olsun. Bu sistemin $(kT-T)$ anında prosesin çıkış değerinin, performansını geliştirmek yani hata girişini $ye \approx 0$ olmaya zorlamak için $u(kT-T) + 0.5$ olması gerektiğini göstermektedir. Bu anda $e_1(kT-T)=0.75$ ve $c_1(kT-T)=-0.2$ olsun. O zaman yalnız

$$\text{If } E_1^3 \text{ and } C_1^{-1} \text{ Then } U_n^{3,-} \quad (7)$$

$$\text{If } E_1^4 \text{ and } C_1^{-1} \text{ Then } U_n^{4,-1} \quad (8)$$

kurallarının aktivasyon değeri sıfırdan büyük olur ($\delta_n^{3,-1} = 0.25$ ve $\delta_n^{4,-1} = 0.75$). Böylece yalnız kuralların sonuç bulanık kümeleri olan $U_n^{3,-1}$, $U_n^{4,-1}$ düzenlenir. Bu bulanık kümeleri düzenlemek için $p(kT)=0.5$ olduğundan merkezleri bu değer kadar 1'e doğru kaydırılır. Bulanık Model Referans öğrenme sistemi, geleneksel sabit direkt bulanık denetleyicinin off-line dizayn işleminde kullanılan bulanık kontrolün nasıl davranacağına karar veren ön bilgi ile aynı türden bir bilgi kullanır. Bulanık ters modelde kullanılan 3D kural-tabanı Şekil 7.'de gösterilmiştir.

4. BULANIK UYARLAMALI ÖĞRENEN DENETLEYİCİ SONUÇLARI (FUZZY ADAPTED LEARNING CONTROLLER RESULTS)

Bu çalışmada yukarıda ayrıntılıyla anlatılan kontrol sistemi, bulanık model referans öğrenme algoritması öğrenmeye dayalı olduğundan DA motorun hız denetimini sağlayacak PD-tip Bulanık denetleyicinin kural-tabanı, insan tecrübesine gereksinim duyulmaksızın öğretilemiştir. Çalışmada, gerçek bir dc motorun parametreleri kullanılarak denklemleri çıkartılmış ve sistem transfer fonksiyonu oluşturulmuştur. Bir doğru akım motorunun iki temel bileşeni bulunmaktadır, alan sargıları ve rotor üzerine monte edilen armatür sargıları. Bu iki dizi sargı, eksenlerine monte edilmiş elektrik alanını karesine sahiptir ve her ikisi de doğru akım elektrik kaynaklarından güç alır. DA motor sürücüler, robotik manipülatörler, konum kontrolü, çelik, madencilik, kağıt ve tekstil endüstrileri gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Kontrol edilecek DA motorun elektriksel devre denklemleri;

$$V_a = i_a \cdot R_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + E_c \quad (9)$$

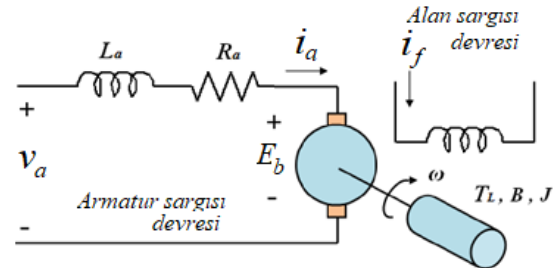
$$T_e - T_l = j \cdot \frac{dw}{dt} + B \cdot w(t) \quad (10)$$

$$E_c = K_b \omega_m \quad (11)$$

$$T_e = K_b i_a \quad (12)$$

$$T_a = T_e - T_L \quad (13)$$

Burada, w_m motor çıkış hızı (rad/s), I_a armatür akımı (A), v_a dc motor besleme gerilimi (sabit), L_a armatür induktansı, R_a armatür direnci, E_c geri emf, T_L yük torku, T_e elektromekaniktork (air gap), T_a hızlanma torku, J atalet torku, B sürtünme katsayısını göstermektedir (Şekil 8). DA motorun elektriksel değişkeni armatür akımı (I_a), mekanik değişken ise hızdır (w_m). Geri emf (E_c) hız ile orantılıdır, üretilen tork (T_e) armatür akımı ile orantılıdır. Burada, K_b , ayrı olarak uyarılmış bir DC motorda hem tork sabiti hem de geri emf sabiti için eşittir.

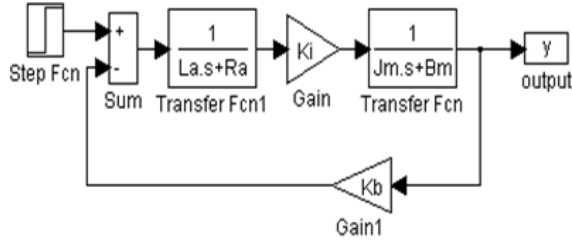


Şekil 8. Doğru akım motorun elektriksel şematik gösterimi

DA motor sisteminde, yük torkunun (T_L) sıfıra eşit olması durumunda, v_a (s) besleme gerilimi girdi ve ω motor hızı çıktı olarak alındığında, motor transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$G(s) = \frac{w_m(s)}{v_a(s)} = \frac{K_i}{s^2 J \cdot L_a + s(B \cdot L_a + J \cdot R_a) + B \cdot R_a + K_b \cdot K_i} \quad (14)$$

Bu denklemler altında DA motor, giriş basamak fonksiyonu için Şekil 9'teki gibi düzenlenir.



Şekil 9. Yük torku sıfır iken dc motor için giriş basamak transfer fonksiyonu şeması

Eğer motora bağlı yük torku varsa (TL) mevcut ise, motor çıkış hızı $\omega_m(s)$ değerine eşit olur. Bu durumda motor transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi olacaktır;

$$w_m(s) = \frac{K_i}{s^2 J \cdot L_a + s(B \cdot L_a + J \cdot R_a) + B \cdot R_a + K_b \cdot K_i} v_a(s) + \frac{R_a + sL_a}{(R_a + sL_a) \cdot (J + sB) + K_b \cdot K_i} T_L \quad (15)$$

Doğru akım (DC) motoru iki temel bileşene sahiptir; alan sargıları ve rotor üzerinde yerleştirilmiş değişmeyen armatür sargıları. Doğru akımın alan sargıları arasından geçirilmesi motor hava aralığı akısının alanını ayarlayan bir uyarım akımı doğurur. Motor üzerindeki yük torku (TL) sıfır olması durumunda kontrol edilecek sistem olan motorun transfer fonksiyonu, $v_a(s)$ giriş ve $w(s)$ çıkış olmak üzere aşağıda çıkarılmıştır [5].

$$G(s) = \frac{w_m(s)}{v_a(s)} = \frac{K_i}{s^2 J \cdot L_a + s(B \cdot L_a + J \cdot R_a) + B \cdot R_a + K_b \cdot K_i} \quad (16)$$

Bu çalışmada, önerilen bulanık ters model kullanan referans model tabanlı uyarlanabilir bulanık denetleyicinin performansını göstermek için aşağıdaki parametrelere sahip ayrık uyarımlı bir DA motor seçilmiştir.

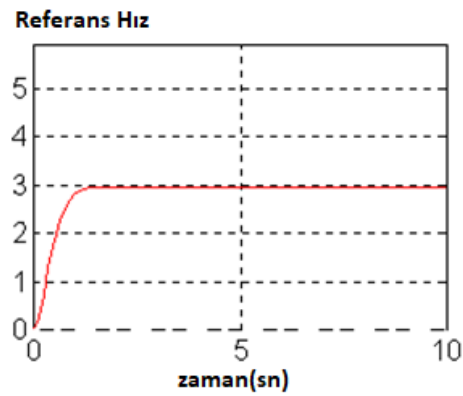
Atalet Torku (J)	: 0.117 kg-m ²
Sürtünme katsayısı (B)	: 1.75 N.ms
Armatür direnci (Ra)	: 2 ohm
Armatür Endüktansı (La)	: 16.2 mH
Tork sabiti (Ki)	: 1.4 Kg-cm/A
Geri besleme sabiti (Kb)	: 0.069 mV/rpm

Bir model, sistemin temel parçalarının uygun bir biçimde temsili olarak düşünülebilir. Bir sistemin davranışını temsil etmenin en basit ve en kullanışlı yöntemi matematiksel bir modeldir. Bulanık model referans öğrenen denetleyici mekanizmasının amacı, kapalı döngü sisteminin belirli bir referans model gibi

davranmasını sağlamaktır. Burada referans modelimiz, sistemi nasıl istediğimizi temsil eden birinci dereceden bir sistemdir. Bu deneyim sayesinde, DC motor için referans model için iyi bir seçim belirleme için sistem referans modeli, motor modellemenin birinci dereceden sistem tanımlaması kullanılarak yapılan bir zaman parametresi yaklaşımı kullanılarak tasarlanmıştır. Motor modellemenin yaklaşım modeli veya sistem indirgenmiş modeli denklem (17)'de verilmiştir.

$$G_m(s) = \frac{1}{s + I} \quad (17)$$

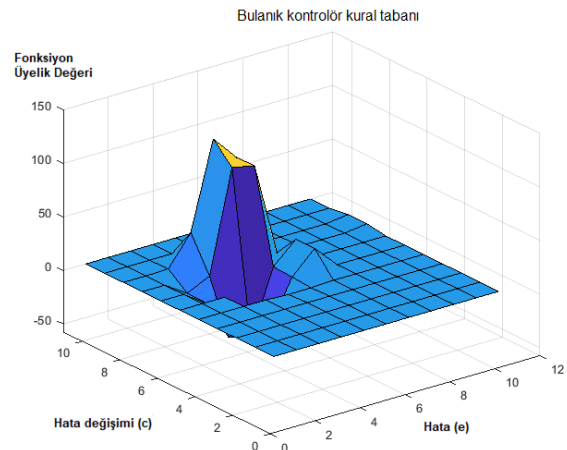
Bulanık model referans öğrenen denetleyici olarak kullanılan sistemin transfer fonksiyonunun birim basamak cevabı Şekil 10.'de verilmektedir.



Şekil 10. Doğru akım motoru için kullanılan modelin yüksüz sistem cevabı.

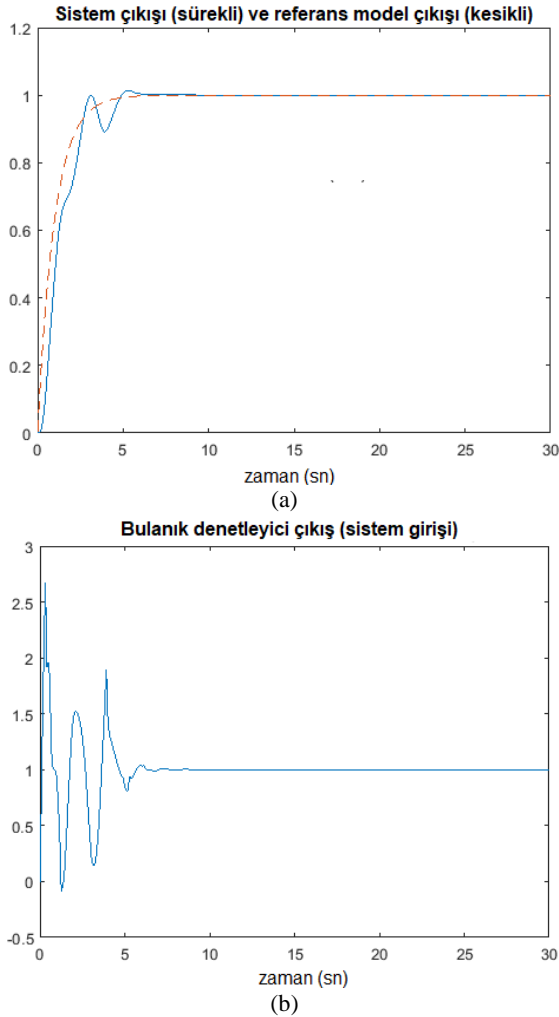
5.2 Simülasyon Sonuçları (Simulation Results)

Bulanık model referans öğrenen denetleyici ile tasarlanan oransal türevsel denetleyici bulanık denetleyiciün performans testi için dijital simülasyon çalışmaları üzerinde model temelli yapı düzenlenmiştir. Motor, birim referans hızında yüksüz olarak start almaktadır. Öğrenme işlemi, bir fonksiyonun bilinmeyen büyüklüğünün ardışıl yaklaşımı ve tahmin etme olarak görülebilir. Algoritma çalışırken, bulanık çıkış kümeleri öğrenme mekanizması tarafından doldurulmaktadır.

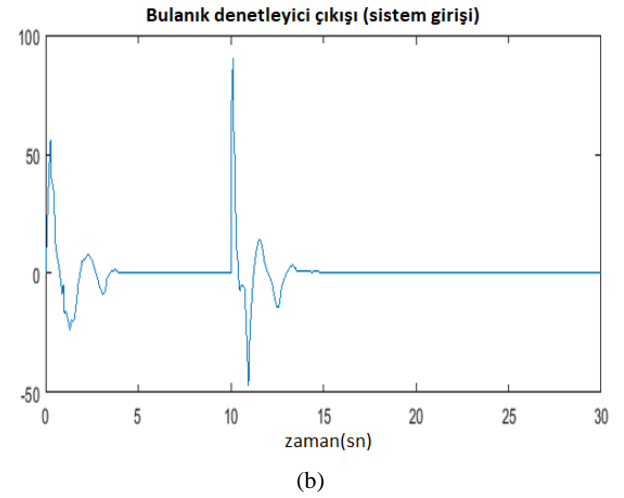
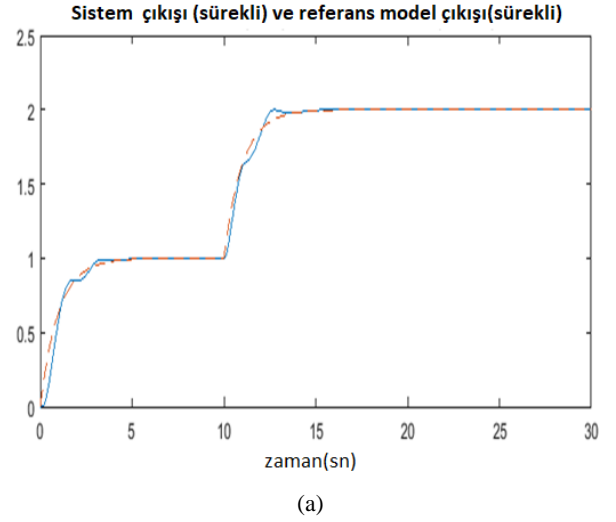


Şekil 11. Öğrenme sonrası yapılandırılan bulanık denetleyici kural tabanı

Öğrenme işleminden sonra, bulanık denetleyici üyelik fonksiyonlarının taban merkezini gösteren değerler ile doldurulur. Bu değerler her bir kural için üyelik fonksiyonunu göstermektedir. Sistemde kullanılan referans modelden, dc motorun hız kontrolünde kullanılacak bulanık-PD tip denetleyicinin kural taban matrisi öğrenilmiş yani elde edilmiştir. Sistem parametrelerinde değişimler olması durumunda, öğrenme işlemi bitirip uyuma moduna geçen sistem tekrar bu yeni durumu öğrenmeye başlar ve kural tabanda gerekli kuralları güncelleyerek yeni bir kural taban oluşturur. Böylece sistemdeki değişiklikleri gözleyerek yeni duruma uygun kural taban oluşturmakta ve bununla sistemi kontrol etmektedir. Öğrenmeden sonra Bulanık denetleyici kural tabanın 3 boyutlu haritası da Şekil 11’de gösterilmiştir. Doğru akım motoru için model sistem yoluyla öğrenme boyunca, model çıkışı ve yapılandırılan bulanık denetleyici çıkışı Şekil 12(a,b)’de gösterilmektedir. Şekil 13(a,b)’de ise öğrenme aşaması süresince, motor devirde iken referans hızın değişimine karşı a) sistem ve model çıkışı ve bulanık denetleyici çıkışı b) Motorun yeni referans hızı için sistem cevabı bulanık denetleyici çıkışı verilmiştir.



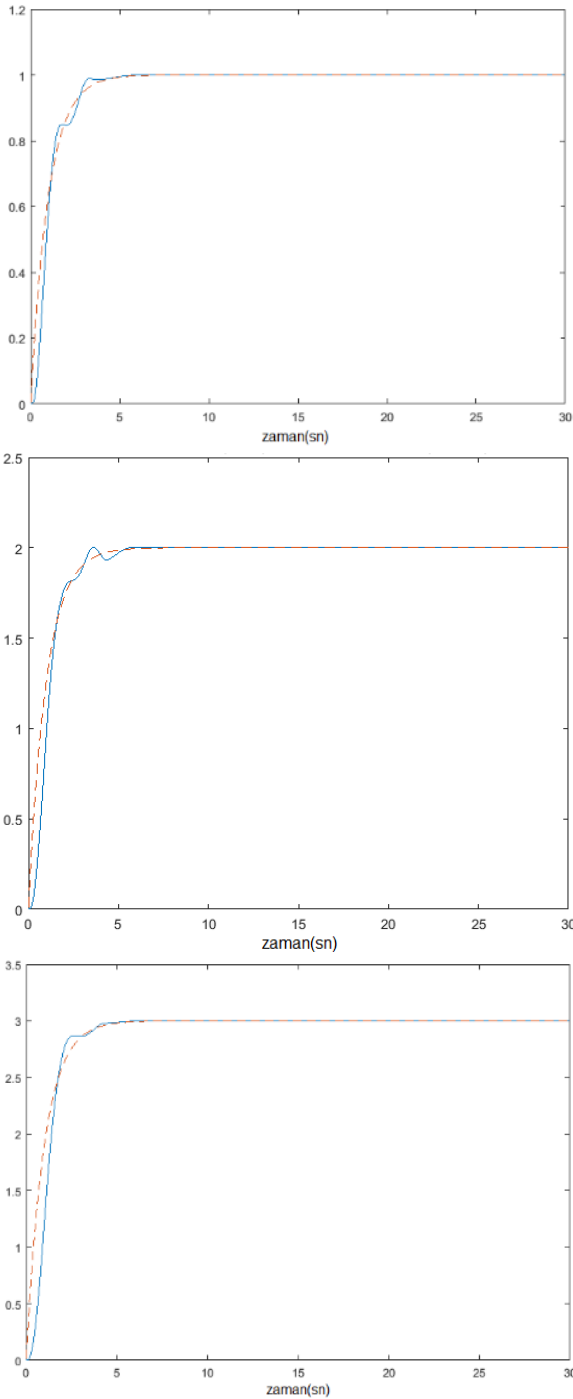
Şekil 12. Öğrenme aşaması süresince a) sistem ve model çıkışı ve bulanık denetleyici çıkışı b) Motorun yeni referans hızı için sistem cevabı bulanık denetleyici çıkışı



Şekil 13. Öğrenme aşaması süresince, motor devirde iken referans hızın değişimine karşı a) sistem ve model çıkışı ve bulanık denetleyici çıkışı b) Motorun yeni referans hızı için sistem cevabı bulanık denetleyici çıkışı

Burada bulanık mantık temelli doğru akım motor kontrolü için PD-tip bulanık kontrolcuya kural tabanın otomatik olarak öğrenilmesi ile üzerine çalışılmıştır. Bu nedenle bu amaç için öğrenme algoritması DC motor kontrol sistemi için analiz edilmiş ve kullanılmıştır. Şekil 12 ve 13.’teki sonuçlardan da görüleceği şekilde bu metod kullanılarak tasarlanan kural tabana sahip bulanık kontrol ile sistem çıkışı yaklaşık 3-4 sn’de referans hıza ulaşmıştır. Model temelli bulanık öğrenme algoritması ile öğrenme aşamasından sonra elde edilen PD-tip bulanık denetleyiciün çeşitli referans değerlerinde DC motora uygulanması ile edilen sonuçlar Şekil 14.’de verilmektedir.

Referans hızlarda, kontrol yöntemlerine kıyasla önerilen öğrenme tabanlı kontrol yönteminin performans değerlendirmesi Çizelge 1’de verilmiştir; Burada saniye biriminde T_s yerleşme zamanı, T_r yükselme zamanı, M_p aşma yüzdesi olarak alınmıştır.



Şekil 14. DA motora uygulanan PD-tip bulanık kontrolcunun çeşitli referans değerlerinde DA motoruna uygulanması ile sistemden alınan cevaplar.

Çizelge 1. Önerilen öğrenme tabanlı kontrol yönteminin farklı referans hızlarda performans sonuçları.

Parametre	Referans Hız #1	Referans Hız #2	Referans Hız #3
Yükselme Süresi (Tr)	2.1784	1.6969	1.4990
Yerleşme Süresi (Ts)	3.0767	4.8345	3.8564
Yerleşim Min	0.9011	1.8004	2.7033
Yerleşim Maks	1.0004	2.0030	3.0011
Aşma Yüzdesi (Mp)	0.0439	0.1488	0.0359

Elde edilen sonuçlardan DA motorunun hız kontrolü için önerilen bulanık model referans öğrenen denetleyici algoritmasının (FMRLC) verilen referans hızlarda iyi performans gösterdiği görülüyor. Üstün bir tepki süresine ve daha hızlı öğrenme/uyum sağlama kapasitesine sahip olan FMRLC, parametrelerini değiştirmeye gerek kalmadan DA motorunun farklı hızlardaki çalışma koşullarına, pratik olarak önemsiz salınımlarla uyum sağlayabildiğini göstermektedir. Simülasyon ve analiz sonuçlarına dayanarak, şu sonuca varılabilir: DA motorların dönüş hızını kontrol etmek için FMRLC algoritmaları uyarlanabilir bulanık kontrol sistemi, FMRLC çıktısının referans model çıktısını çok iyi takip edebildiği Çizelge 1’de verilen değerler ile gösterilmiştir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, bir uyarlamalı bulanık denetleyici, bir model referans algoritması üzerinden dc motorun hız kontrol sisteminde geleneksel algoritmaların yerine kullanılmaktadır. Bulanık model referans öğrenen denetleyici algoritması doğrudan bulanık denetleyici bilgi tabanını tasarlamak ve yeni durumlara karşı düzenlemek için otomatik öğrenmeye bağlı bir yöntem sağlamaktadır. Bulanık denetleyici herhangi bir sistemin kontrolünde iyi bir performans gösterebilir, fakat tahmin edilmeyen sistem parametre değişimleri veya herhangi yük değişimleri durumunda yeterli olmamaktadır. Çünkü tasarlanan kural tabanın başarılı olabilmesi için tüm olası durumları içermesi gerekmektedir. Bu çalışmada bunun üstesinden gelmek için ters bulanık bir denetleyici içeren bir bulanık uyarlamalı denetleyici öğrenme algoritması kullanılarak bir dc motorun hız kontrolü yapılmıştır. Buna göre uyarlamalı süreç için bulanık küme kanunlarının kullanılmasına dayanan, dc motor için uyarlamalı bulanık hız kontrolü yapılacaktır. Bir dc motorun kontrollünde bulanık mantık kullanmak için öğrenme algoritması ile parametreleri belirlenen ve sistem değişikliklerine karşı kendini uyarlayabilen bir bulanık sistem geliştirilmelidir ki yüksüz veya yüklü durumlarda dc motor hızını istenen referans değerine hızlı ve kararlı bir şekilde oturtabilmesinin sağlanması hedeflenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar, DA motor hız kontrolü için geliştirilen uyarlanabilir bulanık model referans öğrenme sisteminin uygulanabilir, referans değere oturma hızı yüksek yapıda olduğunu göstermektedir. Tasarlanan uyarlanabilir bulanık denetleyici, DA motor hız kontrolünün sistem cevabı düşük kalıcı hal hatasına sahip, düşük yerleşme zamanına sahiptir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, Bulanık model referans öğrenen denetleyici algoritması motor kontrol uygulamaları için başarılı bir şekilde kullanılabilir. Burada önemli olan bulanık kuralları elde edilmek istenen sistemin referans modelinin sistemi en iyi temsil edebilecek bir şekilde elde edilmesidir. Çünkü modelin kontrolünden yola çıkılarak sistemin bulanık denetleyici için kural taban tablosu elde edilmektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZAR KATKISI (AUTHOR'S CONTRIBUTION)

Mehmet BULUT: Sistemin modelini tasarlamış ve sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Frayyeh, H. F., Mukhlif, M. A., Abbood, A. M., Keream, S. S., "Speed Control of Direct Current Motor Using Mechanical Characteristics", *Journal of Southwest Jiaotong University*, 54:4, (2019).
- [2] Yulan, Q., "Separately Excited DC Motor for Electric Vehicle Controller Design", *Proceedings of the 2016 Int. Conf. on Sensor Network and Computer Engineering*, 332-336, (2016).
- [3] Illiano, E., "Design of a Brushless Separately Excited Synchronous Motor", *ETH – Swiss Federal Institute of Technology*, www.brusa.biz [Erişim tarihi: 09.10.2021]
- [4] Özgür, D.R., Zuglem, I., "Bozucu Torklar Altında İzdüğümsel Doğru Akım Motoru Kontrolü", *Journal of Engineering & Architecture Faculty of Gazi University*, Special Issue, P1-30, (2018).
- [5] Oltean, S.E., Abrudean, M. and Gligor, A., "MRAC and FMRLC for a plant with time varying parameters", *Int. Conf. on Automation, Quality and Testing, Robotics*, 1:62-67, (2006).
- [6] Yin, H., Wenjun, Y., Wang, K., Guan, J., Wu, J., "Research on brushless DC motor control system based on fuzzy parameter adaptive PI algorithm", *AIP Advances*, 10(10):105208, (2020).
- [7] Shahgholian, G., Maghsoodi, M., Mahdavian, M., Janghorbani, M., Azadeh, M. and Farazpey, S., "Analysis of speed control in DC motor drive by using fuzzy control based on model reference adaptive control", *13th Int. Conf. on Elec. Eng./Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 1-6. (2016).
- [8] Layne J.R., Passino K.M., "Fuzzy Model Reference Learning Control for Cargo Ship Steering", *IEEE Control Systems Magazine*, 13(6):23-34, (1993).
- [9] Sheel, S. R., Chandkishor, R. and O. Gupta, O., "Speed control of DC drives using MRAC technique", *2010 Int. Conf. on Mechanical and Electrical Technology*, Singapore, 135-139, (2010).
- [10] Farahani, G., Rahmani, K., "Speed Control of a Separately Excited DC Motor Using New Proposed Fuzzy Neural Algorithm Based on FOPID Controller", *Journal of Control Autom Elect Syst*, 30:728–740, (2019).
- [11] Moore, C.G., "Indirect Adaptive Fuzzy Controllers", *University of Southampton*, Phd Thesis, (1992).
- [12] Kruse, R., Nauck, D., "Learning Methods For Fuzzy Systems", *Proc. 3rd German GI-Workshop Neuro-Fuzzy Systems*, Germany, (1995).
- [13] Delice, E.K., "A Fuzzy Multicriteria Model For Airline Companies Selection", *J. of Eng. & Architecture Faculty of Gazi University*, 31(2):263-276, (2016).
- [14] Asan, U., Kadaifçi, Ç., "Bulanık bilişsel haritalara dayalı yeni bir ürün konumlandırma yaklaşımı", *Journal of Eng. & Arch. Faculty of Gazi University*, 35(2):1047-1062, (2019).
- [15] Kocakulak, T., Solmaz, H., "Ön ve son iletimli paralel hibrit araçların bulanık mantık yöntemi ile kontrolü ve diğer güç sistemleri ile karşılaştırılması", *Journal of Engineering & Architecture Faculty of Gazi University*, 35(4):2269-2286, (2020).
- [16] Layne J.R., Passino, K.M., Yurkovich S., "Fuzzy Learning Control for Anti-Skid Braking Systems", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 1(2):122-129, (1993).
- [17] Açıkgöz, H., Şekkel, M., "Tip-2 Sinirsel Bulanık Denetleyici Kullanarak DSP Tabanlı Bir Elektronik Güç Transformatörünün Deneysel Kurulumu", *Journal of Engineering & Architecture Faculty of Gazi University*, 35(4):2147-2160, (2020).
- [18] Anwari, S., "Design of PI Controller for Angular Velocity Control of Brushed DC Motor plus Neuro Adaptive Control", *Prosiding Seminar Nasional ReTII*, (2015). At //journal.itny.ac.id/index.php/ReTII/article/view/58
- [19] Okoro, I., Enwerem, C., "Model-based Speed Control of a DC Motor Using a Combined Control Scheme," *2019 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, 1-6, (2019).
- [20] Saleem, O., Rizwan, M., Mahmood-ul-Hasan, K., Muaaz A.M., "Performance enhancement of multivariable model reference optimal adaptive motor speed controller using error-dependent hyperbolic gain functions", *Automatika*, 61(1):117-131, (2020).
- [21] Li, X., Li, S., "Control for a PMSM Servo System Using Model Reference Adaptive Control and an Extended State Observer", *Journal of Power Electronics*, 14(3):549-563, (2014).
- [22] Layne, J. R., Passino, K.M., "Fuzzy model reference learning control for cargo ship steering", *Proceedings of 8th IEEE International Symposium on Intelligent Control*, 457-462,(1993).
- [23] Bulut, M., Cansever, G., and Ustun, S.V., Fuzzy Model-Based Learning for a DC Motor Controller, *ICSPAT (Int. Conf. on Signal Processing Applications & Technology) DSP World Conference*, USA.16-19, (2000).
- [24] Masjudin, A. M., Aisah, S. N. and Wiryadinata R., "DC Motor Speed Control Based on Fuzzy Adaptive with Fuzzy Model Reference Learning Control (FMRLC) Algorithm", *2nd International Conference on Industrial Electrical and Electronics (ICIEE)*, 79-83, (2020).
- [25] Oltean, S.E., Abrudean, M. and Gligor, A., "MRAC and FMRLC for a plant with time varying parameters", *Int. Conf. on Automation, Quality and Testing, Robotics*, 1:62-67, (2006).