

Farklı çıkarım yöntemlerine sahip bulanık mantık denetleyicileri kullanarak kalıcı mıknatıslı senkron motorun hız denetimi

Speed control of permanent magnet synchronous motor by using fuzzy logic controllers having different inference methods

İbrahim ALIŞKAN¹ , Sinan ÜNSAL^{2*} 

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, Türkiye.
ialiskan@beun.edu.tr

²Gençlik ve Spor Bakanlığı, Spor Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
sinanunsal@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 08.08.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 16.12.2016

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.43788

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bulanık mantık, model belirsizliğine sahip, zamanla değişen ve doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde kullanılan bir yapay zekâ kontrol yöntemidir. Alternatif akım motorlarının yapılarında matematiksel modeli tam olarak belirlenemeyen ve doğrusal olmayan sistem dinamikleri bulunmaktadır. Bundan dolayı, bu motorlarının kontrolünde bulanık mantık denetleyiciler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, alternatif akım motorlarından birisi olan kalıcı mıknatıslı senkron motorun bulanık mantık ile hız denetimi yapılmıştır. Tasarlanan bulanık mantık denetleyicilerin giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları, kural tabanlı çıkarım mekanizmaları ve durulaştırma işlemleri dahil tüm aşamaları yazılımsal olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda, Mamdani, Larsen ve Tsukamoto çıkarım yöntemlerinin kullanıldığı bulanık mantık denetleyicilerin farklı çalışma koşulları altındaki performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, Larsen ve Tsukamoto çıkarım yöntemlerinin daha iyi performans sergilediği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Bulanık mantık, Kalıcı mıknatıslı senkron motor, Hız denetimi

Abstract

Fuzzy logic is an artificial intelligence control method that is used for controlling time variant and nonlinear systems having model uncertainty. Alternative current motors contain unidentified and nonlinear system dynamics in their structures. Therefore, fuzzy logic controllers have been widely used in controlling of these motors. In this study, permanent magnet synchronous motor that is one of the alternative current motors has been controlled with fuzzy logic controllers. Input and output membership functions, rule based inference mechanisms and defuzzification processes have been realized in the designed controllers. Simulation results that are obtained under different load and speed operating conditions have been analyzed in the studies. Then performances of Mamdani, Larsen and Tsukamoto fuzzy inference methods have been compared. When the obtained results have been evaluated, It's been seen that Larsen and Tsukamoto fuzzy inference methods have better performance.

Keywords: Fuzzy logic, Permanent magnet synchronous motor, Speed control

1 Giriş

Günümüzde endüstriyel sistemlerin kontrolünde çoğunlukla klasik kontrol yöntemleri tercih edilmektedir. Basit yapıları sistemlerin kontrolünde bu yöntemler başarılı sonuçlar vermesine rağmen kontrol edilen sistemlerin yapısı karmaşıktıkça bu yöntemlerin başarımları azalmaktadır. Model belirsizliği ve doğrusal olmayan sistem dinamikleri, karmaşık sistemlerde karşılaşılan en önemli problemlerdir. Bahsedilen bu sorunlar klasik kontrol yöntemlerinin etkin olarak kullanımını güçleştirmektedir. Bu durum; araştırmacıları, sistemin matematiksel modelinden ziyade davranışını temel alan yöntemler kullanarak denetleyici tasarımı yapmaya yöneltmiştir. Bulanık mantık, yapay sinir ağları ve sezgisel algoritmalar bu amaçla yaygın olarak tercih edilen yöntemlerden bazılarıdır. Bulanık mantık denetleyiciler, bu yöntemler içerisinde kendisine geniş bir araştırma ve uygulama alanı bulmuştur.

Karmaşık sistem yapısı ve model belirsizliği, alternatif akım motorlarının kontrolünde de karşılaşılan bir problemdir. Alternatif akım motorlarının modellenmesi çoğunlukla sabit parametrelerle yapılmaktadır. Buna rağmen, motorun sargı dirençleri sıcaklığa, sargı endüktansları ise manyetik doyuma bağlı olarak çalışma esnasında değişkenlik göstermektedir.

Ayrıca motor yapısı içerisinde, doğrusal olmayan ve modellenemeyen makine dinamikleri de bulunmaktadır. Bahsedilen bu olumsuzluklarına çözüm olarak alternatif akım motorlarının matematiksel modele ihtiyaç duymayan bulanık mantık denetleyiciler ile kontrol edilebilmesi mümkündür.

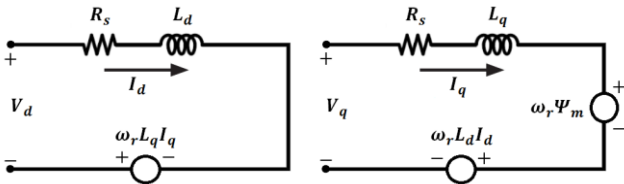
Bu çalışmada, alternatif akım motorlarından birisi olan kalıcı mıknatıslı senkron motorun (KMSM) bulanık mantıkla kontrolü yapılmıştır. Bu motorlar fırçasız yapıda olmaları; yüksek güç yoğunluğuna, yüksek verimliliğe ve küçük boyutlara sahip olmaları ayrıca geniş hız aralığında çalışabilmeleri nedeniyle endüstriyel uygulamalarda oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir [1]-[3]. Bulanık mantık denetleyiciler, KMSM'nin kontrolünde birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. KMSM'nin kalkış ve bozucu yük bölgelerindeki dinamik analizlerinin yapılması [4], alan yönlendirmeli kontrolü [5], farklı çalışma koşulları altındaki kontrolü [6], hız ve moment analizlerinin yapılması [7], vektörel kontrolünün yapılması [8], farklı yapıdaki üyelik fonksiyonlarına sahip bulanık mantık denetleyiciler ile kontrolü [9], farklı kural sayılarına sahip bulanık mantık denetleyiciler ile kontrolü [10] bu çalışmalardan bazılarıdır. Gerçekleştirilen bu çalışmada ise farklı çıkarım yöntemlerine sahip bulanık mantık denetleyiciler ile KMSM'nin hız denetimi yapılmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde, KMSM'nin matematiksel denklemleri verilmiştir. Daha sonra bulanık mantık ve bulanık mantık denetleyicilerin işleyiş yapısı ifade edilmiştir. Ardından, Mamdani, Larsen ve Tsukamoto bulanık çıkarım yöntemlerinin genel yapısı ve buna bağlı olarak tasarımı gerçekleştirilen bulanık mantık denetleyiciler detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Son bölümde ise yapılan benzetim çalışmaları ve bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Çalışmada temel olarak, bulanık mantık denetleyici tasarımının MATLAB hazır araç kutusunu kullanmadan kullanıcı tanımlı kodlarla gerçekleştirilmesi ve MATLAB hazır araç kutusunda yer almayan Larsen ve Tsukamoto çıkarım yöntemlerinin kullanılabilmesi hedeflenmiştir.

2 KMSM matematiksel modeli

KMSM'lerin modellenmesinde üç farklı matematiksel model kullanılmaktadır [11],[12]. Bunlar; üç faz abc stator referans modeli, iki faz d-q rotor referans modeli ve iki faz α - β referans modelidir. Bu referans modellerinin birbirleri arasındaki dönüşümleri Clarke ve Park dönüşümleri kullanılarak yapılabilir. Clarke dönüşümü kullanılarak üç fazlı stator referans çatısındaki büyüklükler, iki fazlı döner α - β referans çatısına dönüştürülür. Park dönüşümü kullanılarak ise iki fazlı döner α - β referans çatısındaki büyüklükler d-q rotor referans çatısına dönüştürülür. Bu dönüştürme işlemleri ile döner alan temelli elektrik makineleri doğru akım makinelerine benzetilerek analizleri ve denetimleri kolaylaştırılmış olur.

Yapılan analiz ve benzetim çalışmaları için KMSM'nin iki faz d-q rotor referans modeli kullanılmıştır. İki fazlı d-q rotor referans modeli, stator büyüklüklerinin rotor düzlemine aktarılmasıyla elde edilmektedir. Aktarım işlemi daha önce de bahsedildiği gibi Clarke ve Park dönüşümleri kullanılarak yapılmaktadır. Elde edilen bu model, yapısı itibarıyla serbest uyarımlı bir doğru akım motoruna benzemektedir. Şekil 1'de KMSM'nin rotor referans düzlemine aktarılmış eşdeğer devresi gösterilmektedir.



Şekil 1: KMSM için d-q rotor referans eşdeğer devresi [2].

Burada, V_d ve V_q stator geriliminin d-q eksen bileşenlerini, L_d ve L_q stator akımının d-q eksen bileşenlerini, L_d ve L_q d-q eksen senkron endüktanslarını, R_s motorun senkron direncini, ψ_m sabit mıknatısın manyetik akısını, ω_r rotorun açısal hızını ifade etmektedir. Eşdeğer devreye ait gerilim eşitlikleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir [1],[2].

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - \omega_r \Psi_q \quad (1)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + \omega_r \Psi_d \quad (2)$$

Denklem (1) ve (2)'de yer alan d-q eksen eşdeğer manyetik akıları Ψ_d ve Ψ_q aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Psi_d = L_d i_d + \Psi_m \quad (3)$$

$$\Psi_q = L_q i_q \quad (4)$$

(1)-(4) denklemleri birlikte düzenlendiğinde d-q eksen gerilim değerleri aşağıdaki gibi elde edilecektir.

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} (L_d i_d + \Psi_m) - \omega_r (L_q i_q) \quad (5)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} (L_q i_q) + \omega_r (L_d i_d) + \omega_r (\Psi_m) \quad (6)$$

Motora ait moment, d-q eksen akım bileşenlerine, eşdeğer manyetik akılarına ve motorun toplam kutup sayısına bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$T_e = \frac{3p}{2} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (7)$$

Denklem (7)'deki akım ve manyetik akı ifadeleri yeniden düzenlendiğinde motora ait moment ifadesi aşağıdaki gibi olacaktır.

$$T_e = \frac{3p}{4} ((L_d - L_q) i_d i_q + \Psi_m i_q) \quad (8)$$

Motorun moment denkleminin bağlı olarak dinamik denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$T_e = T_L + B \omega_r + J \frac{d}{dt} \omega_r \quad (9)$$

Burada, T_L yük momentini, B sürtünme katsayısını ve J atalet momentini ifade etmektedir. (1)-(9) denklemleri düzenlendiğinde motora ait durum uzay denklemleri aşağıdaki gibi elde edilecektir [2].

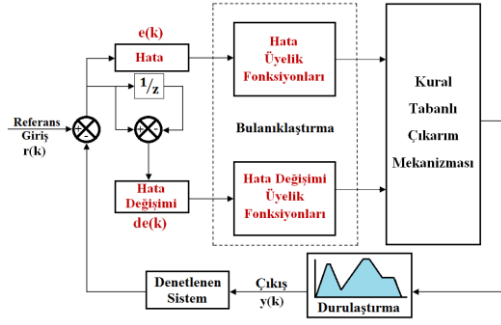
$$\dot{i}_d = \frac{1}{L_d} (V_d - R_s i_d + \omega_r L_q i_q) \quad (10)$$

$$\dot{i}_q = \frac{1}{L_q} (V_q - R_s i_q - \omega_r L_d i_d - \omega_r \Psi_m) \quad (11)$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{T_e - T_L - B \omega_r}{J} \quad (12)$$

3 Bulanık mantık denetleyici tasarımı

Bulanık mantık denetleyiciler genellikle matematiksel modeli tam olarak belirlenemeyen, zamanla değişen ve doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde kullanılmaktadır. Bulanık mantık modelleme kavramı ilk olarak Lütfi A. Zadeh tarafından öne sürülmüştür [13]. Klasik mantık yapısında, kavramlar arasındaki ilişkiler sözel veya sayısal birbirine zıt kesin ifadelerle gösterilmektedir. Bulanık mantık yapısında ise kavramlar arasındaki ilişkiler sözel veya sayısal niceliksel ifadelerle gösterilirler [14]. Bulanık mantık denetleyici tasarımının temeli kontrol edilecek sistemle ilgili uzman kişilerin bilgilerine ve tecrübelerine dayanmaktadır. Sistemin dinamik davranışı esas alınarak geliştirilen bu kontrol yöntemi, denetlenecek sisteme ait matematiksel model belirsizliklerinden ve doğrusal olmayan parametrelerden etkilenmez. Denetim işleminde, uzman kişi veya kişiler tarafından oluşturulan dilsel nicelikli bir kontrol yapısı kullanılmaktadır. Bulanık mantık denetleyici; bulanıklaştırma, kural tabanlı çıkarım mekanizması ve durulaştırma olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır [14]. Bulanık mantık denetleyicinin genel yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2: Bulanık mantık denetleyicinin genel yapısı.

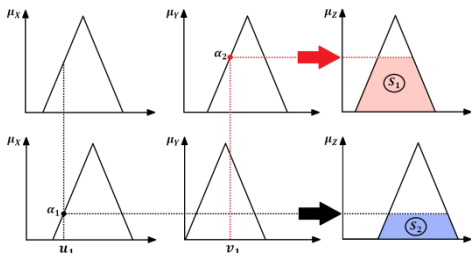
Bulanık mantık denetleyici içerisinde yer alan bulanıklaştırma biriminde, hata sinyalinin sayısal değerine karşılık gelen üyelik fonksiyonlarının (0-1) aralığındaki üyelik dereceleri belirlenir. Böylece her bir sayısal giriş üyelik dereceleri oranında sözel bir nicelik kazanır. Kural tabanlı çıkarım mekanizması biriminde, bulanıklaştırma biriminden gelen üyelik dereceleri sözel kural tabanına göre değerlendirilerek bulanık sonuçlar elde edilir. Uzman kişiler tarafından sözel kurallara bağlı olarak oluşturulan kural tabanlı çıkarım mekanizması bulanık mantık denetleyici tasarımının en önemli kısmını oluşturmaktadır. Bu yapı içerisindeki her bir kural, denetlenmek istenen sistemin belirli bir kısmına karşılık gelecek bir kontrol sağlamaktadır. Tüm kuralların birlikte kullanılmasıyla sistem modelinin tamamını ifade eden bir kural tabanı ortaya çıkarılır [14]. Durulaştırma biriminde kural tabanlı çıkarım mekanizmasından gelen bulanık ifadelerin toplamı sisteme uygulanabilecek sayısal ifadelere dönüştürülür.

Hız hatası ve hız hatasındaki değişim değerleri tasarlanan bulanık mantık denetleyiciler için giriş olarak kullanılmıştır. (13) denkleminde gösterilen hız hatası $e(k)$ ile (14) denkleminde gösterilen hız hatasının değişimi $de(k)$ bulanık mantık denetleyici bloğuna giriş olarak uygulanmıştır. Denetleyici, sistemden alınan hız çıkışı ile sisteme uygulanan referans hız girişi arasındaki hatayı kullanıcı tarafından belirlenmiş olan seviyeye ulaştırmaya çalışacaktır.

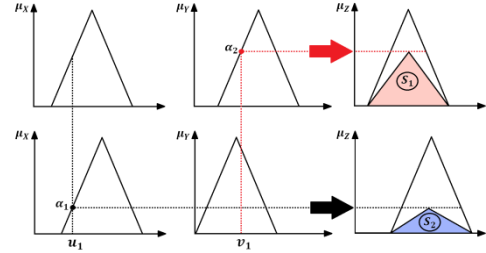
$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (13)$$

$$de(k) = e(k) - e(k-1) \quad (14)$$

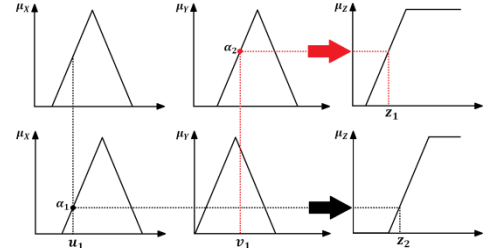
Tasarlanan bulanık mantık denetleyicilerde hata ve hatadaki değişim için yedişer adet, çıkış için de dört adet üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Hata ve hatadaki değişim için mümkün olan toplam 49 adet kural vasıtasıyla çıkarım mekanizmasının çalıştırılması ve böylece motor hızının istenilen referans hıza ulaştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada çıkarım mekanizması için sırasıyla Mamdani, Larsen ve Tsukamoto yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlere ait çıkarım yapıları Şekil 3, 4 ve 5'te gösterilmektedir.



Şekil 3: Mamdani bulanık çıkarım yönteminin yapısı.



Şekil 4: Larsen bulanık çıkarım yönteminin yapısı.



Şekil 5: Tsukamoto bulanık çıkarım yönteminin yapısı.

Şekil 3, 4 ve 5'te yapıları gösterilen çıkarım yöntemlerinde, bulanıklaştırma biriminden gelen sözel nicelikli bulanık ifadeler farklı bulanık ilişki işlemleri kullanılarak uygun çıkış üyelik fonksiyonuna aktarılmaktadır. Mamdani çıkarım yönteminde bulanıklaştırma biriminden gelen üyelik seviyeleri minimum ilişki operatörü kullanılarak çıkış üyelik fonksiyonu ile ilişkilendirilmektedir. Larsen çıkarım yönteminde bulanıklaştırma biriminden gelen üyelik seviyeleri cebirsel çarpım operatörü kullanılarak çıkış üyelik fonksiyonu ile ilişkilendirilmektedir. Tsukamoto çıkarım yönteminde ise bulanıklaştırma biriminden gelen üyelik seviyeleri çıkış üyelik fonksiyonun tersi ile ilişkilendirilmektedir. Mamdani, Larsen ve Tsukamoto çıkarım yöntemlerinde kullanılan bulanık ilişki operatörleri aşağıda sırasıyla (15)-(17) denklemlerinde ifade edilmiştir [15].

$$Z_i = (\mu_{xi}(u) \cap \mu_{yi}(v)) \cap \mu_{zi}(w) \quad (15)$$

$$Z_i = (\mu_{xi}(u) \cap \mu_{yi}(v)) \times \mu_{zi}(w) \quad (16)$$

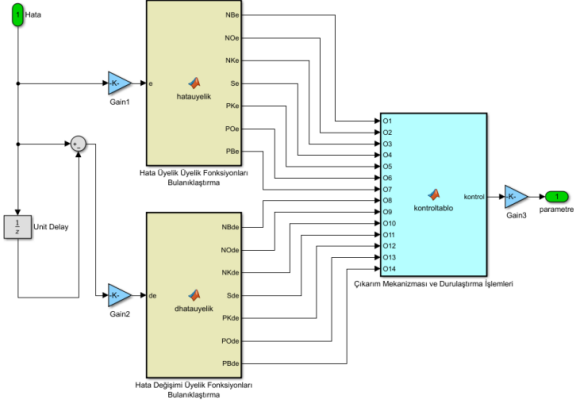
$$Z_i = f^{-1}\mu_{zi}(\alpha_i) = f^{-1}\mu_{zi}(\mu_{xi}(u) \cap \mu_{yi}(v)) \quad (17)$$

Burada, μ_x ve μ_y giriş üyelik fonksiyonlarını, μ_z çıkış üyelik fonksiyonlarını, Z çıkarım sonucunu ve i kural sırasını ifade etmektedir. n adet kural için elde edilecek toplam çıkarım sonucu tüm çıkarım değerlerinin birleşimi olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Z = \bigcup_{i=1}^n Z_i \quad (18)$$

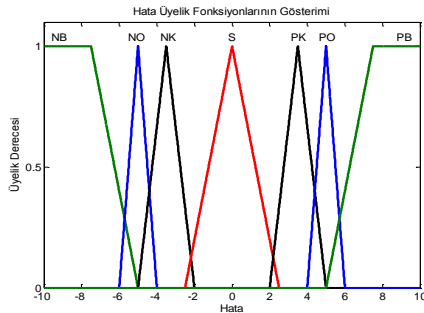
Denetleyicinin durulaştırma biriminde alanların ağırlık merkezi yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemde çıkarım mekanizması sonucunda elde edilen bulanık ifadelerin karşılık geldiği çıkış üyelik fonksiyonlarının toplam alanlarına ait ağırlık merkezi hesaplanır. Buradan elde edilecek sonuç sisteme uygulanacak olan sayısal kontrol sinyalidir. Çalışmada, giriş-çıkış üyelik fonksiyonları, kural tabanlı çıkarım mekanizması ve durulaştırma işlemleri için MATLAB'da yer alan hazır araç kutusunu kullanmak yerine bulanık mantık denetleyiciler için ayrı ayrı kontrol yazılımları geliştirilmiştir.

MATLAB/Simulink ortamında tasarlanan denetleyicinin genel yapısı Şekil 6'da gösterilmektedir. Bu yapı, her üç çıkarım yönteminin yazılımlarına uygun olarak uyarlanarak benzetim çalışmalarında kullanılmıştır.

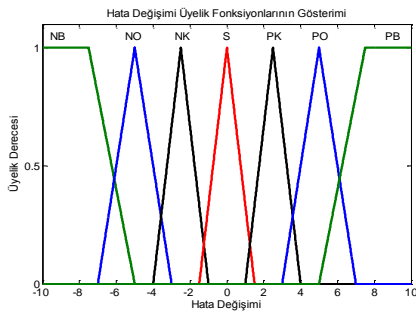


Şekil 6: Tasarlanan bulanık mantık denetleyicinin MATLAB/Simulink yapısı.

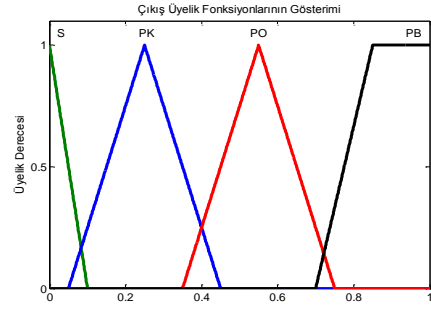
Şekil 6'da yer alan denetleyicinin yapısı incelendiğinde, hız hatası ve hız hatasındaki değişim değerleri öncelikle bulanıklaştırma birimlerinde ayrı ayrı işlenir. Buradan elde edilen 14 adet bulanık giriş seviyesi kural tabanlı çıkarım mekanizması ve durulaştırma işlemlerinin yapıldığı bloğa aktarılır. Bu blok içerisinde öncelikle bulanıklaştırma biriminden gelen değerler çıkış üyelik fonksiyonlarına aktararak bulanık çıkış sinyalleri elde edilir. Ardından bu sinyaller üzerinde durulaştırma işlemi gerçekleştirilerek denetlenecek sistem için gerekli sayısal çıkış kontrol sinyali elde edilmiş olur. Hata, hatadaki değişim ve çıkış için oluşturulan üyelik fonksiyonları Şekil 7, 8 ve 9'da görülmektedir. Üyelik fonksiyonları için NB(Negatif Büyük), NO(Negatif Orta), NK(Negatif Küçük), S(Sıfır), PK(Pozitif Küçük), PO(Pozitif Orta), PB(Pozitif Büyük) olmak üzere toplam yedi farklı sözel değişken kullanılmıştır.



Şekil 7: Hata giriş üyelik fonksiyonlarının gösterimi.

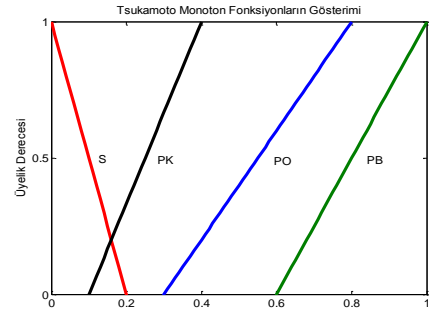


Şekil 8: Hata değişimi giriş üyelik fonksiyonlarının gösterimi.



Şekil 9: Çıkış üyelik fonksiyonlarının gösterimi.

Tsukamoto çıkarım yönteminde, Mamdani ve Larsen çıkarım yöntemlerinden farklı olarak çıkış için sadece monoton artan veya azalan fonksiyonlar kullanılabilir [15]. Bundan dolayı Mamdani ve Larsen çıkarım yöntemleri için kullanılan Şekil 9'daki çıkış üyelik fonksiyonları Tsukamoto yöntemi için kullanılamamıştır. Bu çıkarım yöntemi için Şekil 10'da yer alan monoton fonksiyonlar kullanılmıştır. Burada bir tanesi azalan, üç tanesi ise artan olmak üzere toplam dört adet monoton çıkış fonksiyonu kullanılmıştır.



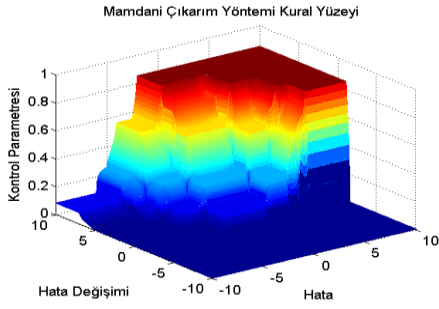
Şekil 10: Tsukamoto çıkarım yöntemi için kullanılan monoton fonksiyonların gösterimi.

Tasarlanan bulanık mantık denetleyiciler için kullanılan kural tablosu Tablo 1'de sunulmuştur. Hata ve hatadaki değişime karşılık gelen toplam 49 adet kural, tabloda gösterilmektedir.

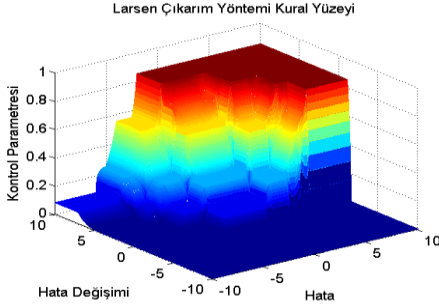
Tablo 1: Kullanılan bulanık mantık kural tablosu.

e \ de	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
NB	S	S	S	S	S	S	S
NO	S	S	S	S	S	S	PK
NK	S	S	S	S	S	PK	PO
S	S	S	S	S	PK	PO	PB
PK	S	S	S	PK	PO	PB	PB
PO	S	S	PK	PO	PB	PB	PB
PB	S	PK	PO	PB	PB	PB	PB

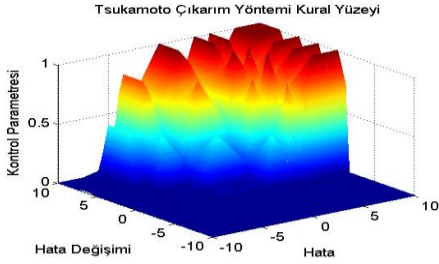
Şekil 11, 12 ve 13'te, farklı çıkarım yöntemleri kullanılarak tasarlanan bulanık mantık denetleyicilerde hata ve hata değişimine bağlı olarak elde edilecek çıkış kontrol parametresinin değişimi 3 boyutlu grafiklerde gösterilmiştir. Bu parametredeki değişimlerin çıkış üyelik fonksiyonlarının tanım değerlerine uygun olarak [0-1] aralığında gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 11: Mamdani çıkarım yöntemi kural yüzeyi.



Şekil 12: Larsen çıkarım yöntemi kural yüzeyi.



Şekil 13: Tsukamoto çıkarım yöntemi kural yüzeyi.

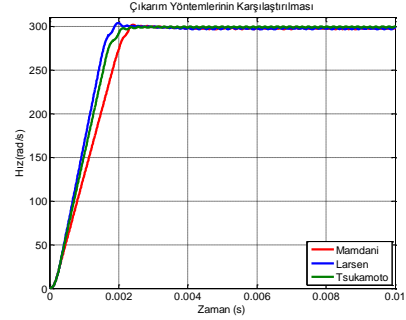
4 Benzetim çalışmaları

Yapılan benzetim çalışmalarında KMSM için alan yönlendirmeli vektörel kontrol yöntemi uygulanmıştır. Alan yönlendirmeli kontrol, yapısal olarak stator akımının moment ve manyetik akı bileşenlerine ayrılması ve bu bileşenlerin ayrı ayrı kontrol edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntemde asıl denetlenen stator akımına ait moment bileşenidir. Stator akımının manyetik akı bileşeninin moment üzerinde bir etkisi olmadığından referans akımı sıfır değerinde tutulmuştur [16],[17]. Benzetim çalışmalarında kullanılan devre MATLAB/Simulink üzerinde kurulmuştur. Kullanılan KMSM'ye ait parametreler Tablo 2'de sunulmuştur. Çalışmalarda sırasıyla yüksüz çalışma, yüklü çalışma, değişken hız-sabit yük ve sabit hız-anlık yük çalışma durumları için motorun hız denetimi yapılmıştır. Yazılımsal olarak gerçekleştirilen Mamdani, Larsen ve Tsukamoto çıkarım yöntemlerinin motor hız denetimindeki performansları incelenmiştir.

Tablo 2: Kullanılan motora ait parametreler.

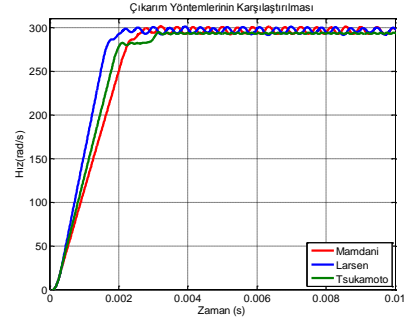
Motor Parametresi	Değeri
R_s	4.7 Ω
$L_d=L_q$	8.721 mH
B	0.0001 Nms
J	0.0031 kgm/s^2
ψ_m	0.385 Wb
p	4
n_r	3000 d/dk.

Şekil 14'te yüksüz çalışma durumu için 300 rad/s referans hızda bulanık çıkarım yöntemlerinin hız denetim performansları görülmektedir. Larsen çıkarım yöntemine sahip bulanık mantık denetleyici, yükselme zamanı ve sürekli durum hatası bakımından daha iyi bir performans sergilemiştir.



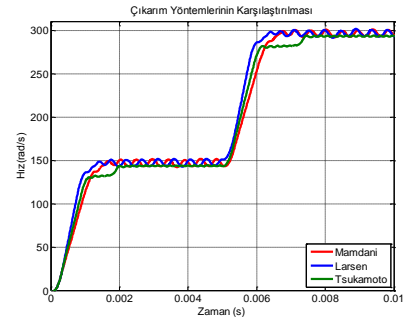
Şekil 14: Yüksüz çalışma durumu.

Şekil 15'te 300 rad/s sabit hız ve 10 Nm sabit moment giriş referansları için bulanık çıkarım yöntemlerinin hız denetim performansları görülmektedir. Yüklü çalışma durumunda sürekli hal bölgesindeki hız dalgalanmalarının arttığı görülmektedir. Burada yüksüz çalışma durumunda olduğu gibi Larsen çıkarım yöntemine sahip bulanık mantık denetleyici daha başarılı bir performans sergilemiştir.



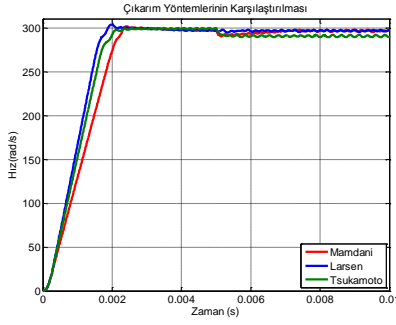
Şekil 15: Sabit referans hız ve sabit yük durumu.

Şekil 16'da 150-300 rad/s değişken hız ve 5 Nm sabit moment giriş referansları için bulanık çıkarım yöntemlerinin hız denetim performansları görülmektedir. Hız referansı $t=5ms$ anında 150 rad/s'den 300 rad/s'ye çıkarılmıştır.



Şekil 16: Değişken referans hız ve sabit yük durumu.

Şekil 17'de 300 rad/s sabit referans hız ve $t=5ms$ 'de anlık uygulanan 10 Nm yük girişi için bulanık çıkarım yöntemlerinin hız denetim performansları görülmektedir. Burada, anlık yük değişimine karşı Larsen çıkarım yöntemine sahip bulanık mantık denetleyici daha başarılı bir kontrol sağlamıştır.



Şekil 17: Sabit referans hız ve anlık yük durumu.

Tablo 3'teki performans kriterleri değerlendirildiğinde, tüm çalışma koşullarında yükselme zamanı ve sürekli durum hatası bakımından Larsen çıkarım yöntemi, maksimum aşım açısından ise Tsukamoto çıkarım yöntemi en başarılı sonuçları sağlamıştır. Yerleşme zamanı kriteri bakımından yüksüz çalışma koşullarında Larsen yönteminin, yüklü çalışma koşullarında ise Mamdani çıkarım yönteminin daha iyi bir performansa sahip olduğu görülmektedir.

5 Sonuçlar

Gerçekleştirilen çalışmada, kalıcı mıknatıslı senkron motorun hız kontrolünde Mamdani, Larsen ve Tsukamoto çıkarım yöntemlerinin kullanıldığı bulanık mantık denetleyicilerin performansları incelenmiştir. Tasarlanan denetleyicilerin farklı hız ve yük referanslarındaki performansları yükselme zamanına, yerleşme zamanına, maksimum aşım ve sürekli durum hatası kriterlerine göre karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, Larsen ve Tsukamoto çıkarım yöntemlerinin kullanıldığı bulanık mantık denetleyicilerle daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bunun yanı sıra MATLAB araç kutularında yer almayan Larsen ve Tsukamoto çıkarım yöntemleri, kullanıcı tanımlı kodlarla yazılımsal olarak gerçekleştirilmiş ve bu tasarımların çalışmalarda kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Mevcut çalışmanın farklı yapıdaki üyelik fonksiyonları ve çıkarım yöntemleri kullanılarak genişletilebilmesi mümkündür. Literatürde yer alan Takagi-Sugeno çıkarım yöntemi ve farklı yapıdaki üyelik fonksiyonları çalışmaya dahil edilebilir. Böylece kullanılan yeni üyelik fonksiyonlarının ve çıkarım yöntemlerinin denetim performansına olan etkisi incelenebilecektir.

6 Teşekkür

Bu çalışma, Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

7 Kaynaklar

[1] Krishnan R. *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis and Control*. New Jersey, USA, Prentice Hall, 2001.

- [2] Adam AA. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Moment Dalgalanması ve Gürültünün Azaltılması. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [3] Akar M. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Yapay Zeka Yöntemleri İle Mekanik Hataların Teşhisi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2009.
- [4] Kamel HM, Hasanien HM, Ibrahim HEA. "Speed control of permanent magnet synchronous motor using fuzzy logic controller". *Electric Machines and Drives Conference*, Miami, USA, 3-6 May 2009.
- [5] Adhavan B, Kuppaswamy A, Jayabaskaran G, Jagannathan V. "Field oriented control of Permanent magnet synchronous motor (PMSM) using fuzzy logic controller". *Recent Advances in Intelligent Computational Systems*, Trivandrum, India, 22-24 September 2011.
- [6] Mishra A, Makwana J, Agarwal P, Srivastava SP. "Mathematical modeling and fuzzy based speed control of permanent magnet synchronous motor drive". *Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Singapore, 18-20 July 2012.
- [7] Maamoun A, Alsayed YM, Shaltout A. "Fuzzy logic based speed controller for permanent-magnet synchronous motor drive". *International Conference on Mechatronics and Automation*, Takamatsu, Japan, 4-7 August 2013.
- [8] Na R, Wang X. "An improved vector-control system of pmsm based on fuzzy logic controller". *Computer, Consumer and Control (IS3C)*, Taichung, Taiwan, 10-12 June 2014.
- [9] Prasad KMA, Nair U, Unnikrishnan A. "Fuzzy sliding mode control of a permanent magnet synchronous motor with two different fuzzy membership functions". *International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, Thrissur, India, 9-11 December 2015.
- [10] Litcanu M, Andea P, Mihai FIF. "Fuzzy logic controller for permanent magnet synchronous machines". *13th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics*, Herl'any, Slovakia, 22-24 January 2015.
- [11] Üstün O. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Hızının Bulanık Sinirsel ve Kayma Kipli Denetleyicilerle Dönüşümlü Denetimi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2004.
- [12] Pillay P, Krishnan R. "Modelling, simulation and analysis of permanent magnet motor drives II: The brushless DC motor drive". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 25(2), 274-279, 1996.
- [13] Zadeh LA. "Fuzzy Sets". *Elsevier Information and Control*, 8, 338-353, 1965.
- [14] Şen Z. *Bulanık Mantık İlkeleri ve Modelleme*. 3. Baskı. İstanbul, Türkiye, Su Vakfı Yayınları, 2009.
- [15] Jang JSR, Sun CT, Mizutani E. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. New Jersey, USA, Prentice Hall, 1997.

Tablo 3: Mamdani, Larsen ve Tsukamoto çıkarım yöntemlerinin farklı çalışma koşullarındaki performanslarının kıyaslanması.

Çalışma Durumları	MAMDANI		LARSEN		TSUKAMOTO	
	Sabit Hız & Yüksüz Durum	Sabit Hız & Sabit Moment	Sabit Hız & Yüksüz Durum	Sabit Hız & Sabit Moment	Sabit Hız & Yüksüz Durum	Sabit Hız & Sabit Moment
Yükselme Zamanı	1.628 ms	1.739 ms	1.202 ms	1.206 ms	1.343 ms	1.503 ms
Yerleşme Zamanı	2.08 ms	1.698 ms	1.62 ms	2.27 ms	1.85 ms	2.01 ms
Maksimum Aşım	%1.342	%0.875	%2.116	%1.026	%0.267	%0.511
Sürekli Durum Hatası	2 rad/s	3 rad/s	0.3 rad/s	2.5 rad/s	0.5 rad/s	6.5 rad/s

[16] Blaschke F. "Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die Transvektor-Regelung von Diehfeldmaschinen". *Siemens Zeitschrift*, 45(10), 757-760, 1971.

[17] Çelik H, Kürüm H. "Sabit mıknatıslı senkron motorun alan yönlendirmeli kontrolü". *NWSA-Technological Applied Sciences*, 8(1), 67-85, 2013.