

Mamdani ve Takagi-Sugeno Çıkarım Yöntemlerine Sahip Bulanık Mantık Denetleyicilerin Özgün Yazılım ve Araç Kutusu Performans Analizi

Performance Analysis of Fuzzy Logic Controllers Having Mamdani and Takagi-Sugeno Inference Methods By Using Unique Software and Toolbox

Sinan ÜNSAL¹, İbrahim ALIŞKAN²

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak

¹sinanunsal@beun.edu.tr, ²ialiskan@beun.edu.tr

Özet

Bulanık mantık denetleyiciler; yapısal olarak bulanıklaştırma, kural tabanlı çıkarım mekanizması ve durulaştırma birimlerinden oluşmaktadır. Bulanık mantık denetleyicide kullanılan üyelik fonksiyonları ve çıkarım yöntemleri denetleyicinin performansını doğrudan etkileyen önemli faktörlerdir. Literatürde farklı yapılarda birçok üyelik fonksiyonu ve çıkarım yöntemi bulunmaktadır. Bu çalışmada, Mamdani ve Takagi-Sugeno çıkarım yöntemlerine sahip bulanık mantık denetleyiciler kullanılarak kalıcı mıknatıslı senkron motorun hız denetimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda, hazır araç kutuları ve özgün yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilen bulanık mantık denetleyicilerin farklı çalışma koşulları altında performans analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, tasarlanan denetleyicilerin birbiriyle uyumlu sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür.

Abstract

Fuzzy logic controllers are structurally consisted of fuzzification, rule based inference mechanism and defuzzification units. Membership functions and inference methods are important factors that directly effect the performance of controller. In the literature, there are several membership functions and inference methods in different structures. In the performed study, speed control of permanent magnet synchronous motor has been made with fuzzy logic controllers having Mamdani and Takagi-Sugeno inference methods. In the studies, performances of the fuzzy logic controllers that are realized by using unique softwares and toolboxes have been analyzed under different operating conditions. When the obtained results have been evaluated, It has been seen that designed controllers provide consistent results with each other.

1. Giriş

Bulanık mantık denetleyiciler, matematiksel modeli tam olarak belirlenemeyen, zamanla değişen ve doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bulanık mantık denetleyici tasarımının temeli kontrol edilecek sistemle ilgili uzman kişilerin bilgilerine ve tecrübelerine dayanmaktadır. Denetim işlemi, yapısal olarak

uzman kişi veya kişilerce oluşturulan dilsel nicelikli bir işleyiş mekanizmasına dayanmaktadır.

Bu çalışmada, alternatif akım motorlarından birisi olan kalıcı mıknatıslı senkron motorun (KMSM) bulanık mantık denetleyici kullanılarak kontrolü yapılmıştır. KMSM fırçasız yapıda olması; yüksek güç yoğunluğuna, yüksek verimliliğe ve küçük boyutlara sahip olması ayrıca geniş hız aralığında çalışabilmesi nedeniyle endüstriyel uygulamalarda oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir [1-2]. KMSM'nin ve diğer alternatif akım motorlarının modellenmesi çoğunlukla sabit parametrelerle yapılmaktadır. Buna rağmen; motora ait parametreler çalışma esnasında değişkenlikler göstermektedir. Bunun yanı sıra motor yapısı içerisinde doğrusal olmayan ve modellenemeyen makine dinamikleri de bulunmaktadır [3]. Bahsedilen bu durumlar, denetlenmek istenen sistemde model belirsizliğinin oluşmasına sebep olmaktadır. Belirtilen bu probleme çözüm olarak çoğunlukla yapay zeka denetim yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden birisi olan bulanık mantık denetleyiciler, KMSM'nin kontrolünde birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. KMSM'nin alan yönlendirmeli kontrolü [4], farklı çalışma koşulları altındaki kontrolü [5], hız ve moment analizlerinin yapılması [6], vektörel kontrolünün yapılması [7], farklı yapıdaki üyelik fonksiyonlarına sahip bulanık mantık denetleyiciler ile kontrolü [8], farklı kural sayılarına sahip bulanık mantık denetleyiciler ile kontrolü [9] bu çalışmalardan bazılarıdır.

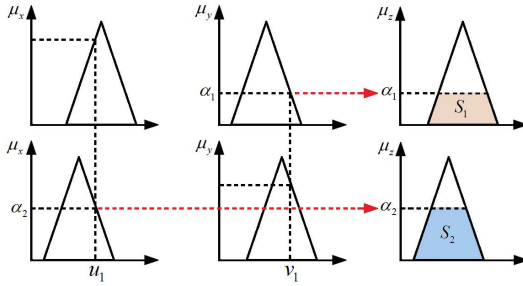
Ortaya konulan çalışmada farklı çıkarım yöntemlerinin kullanıldığı bulanık mantık denetleyiciler ile KMSM'nin hız denetimi yapılmıştır. Çalışmalarda, Mamdani ve Takagi-Sugeno çıkarım yöntemleri kullanılmıştır. Gerçekleştirilen denetleyiciler, özgün yazılım ve MATLAB hazır araç kutusu esas alınarak tasarlanmış ve buna bağlı olarak benzetim çalışmaları yapılmıştır.

2. Bulanık Mantık Denetleyici

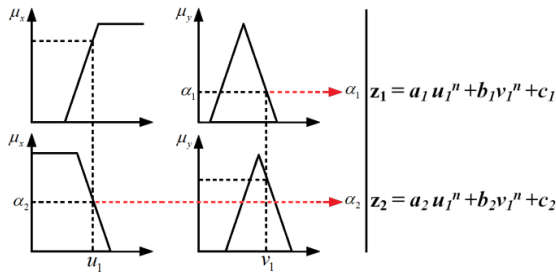
Bulanık mantık modelleme kavramı ilk olarak Lutfi A. Zadeh tarafından ortaya konulmuştur [10]. Klasik mantıkta, kavramlar arasındaki ilişkiler birbirine zıt yapıdaki sözel veya sayısal kesin ifadelerle gösterilmektedir. Bulanık mantıkta ise kavramlar arasındaki ilişkiler, sözel veya sayısal yapıdaki niceliksel ifadelerle gösterilirler [11]. Bulanık mantık denetleyici; bulanıklaştırma, kural tabanlı çıkarım

mekanizması ve durulaştırma olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır [12]. Bulanıklaştırma biriminde giriş değişkenlerinin değerine karşılık gelen üyelik fonksiyonlarının (0-1) aralığındaki üyelik dereceleri belirlenir. Kural tabanlı çıkarım mekanizması biriminde, bulanıklaştırma biriminden gelen üyelik dereceleri sözel kurallara 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 çıkarılmaktadır [11-12]. Durulaştırma biriminde kural tabanlı çıkarım mekanizmasından gelen bulanık ifadelerin toplamı sisteme uygulanabilecek sayısal ifadelere dönüştürülür.

Tasarlanan denetleyicilerde, hata ve hatadaki değişim bulanık mantık için giriş değişkenleri olarak kullanılmıştır. Denetleyici, sistemden alınan çıkış ile sisteme uygulanan referans giriş arasındaki hatayı kullanıcı tarafından belirlenmiş olan seviyeye ulaştıracaktır. Tasarlanan bulanık mantık denetleyicilerde hata ve hatadaki değişim için yediser adet, çıkış için de dört adet üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada çıkarım mekanizması için sırasıyla Mamdani ve Takagi-Sugeno yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlere ait çıkarım yapıları Şekil 1 ve 2'de gösterilmektedir.



Şekil 1: Mamdani bulanık çıkarım yönteminin yapısı.



Şekil 2: Takagi-Sugeno bulanık çıkarım yönteminin yapısı.

Şekil 1 ve 2'de 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. Takagi-Sugeno çıkarım yönteminde ise bulanıklaştırma biriminden gelen üyelik seviyeleri polinom

çıkış üyelik fonksiyonları ile ilişkilendirilmektedir. Mamdani ve Takagi-Sugeno çıkarım yöntemlerinde kullanılan bulanık ilişki operatörleri aşağıda sırasıyla (1) ve (2) denklemlerinde ifade edilmiştir [13].

$$Z_i = (\mu_{xi}(u) \cap \mu_{yi}(v)) \cap \mu_{zi}(w) \quad (1)$$

$$Z_i = f(\mu_{xi}(u), \mu_{yi}(v)) = f(x, y) = ax^n + by^n + c \quad (2)$$

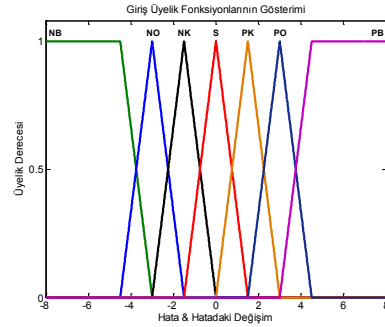
Burada, μ_x ve μ_y giriş üyelik fonksiyonlarını, μ_z çıkış üyelik fonksiyonlarını, Z çıkarım sonucunu, i kural sırasını ve n polinom derecesini ifade etmektedir. (2) denkleminde de görüldüğü gibi Takagi-Sugeno çıkarım yönteminde, Mamdani çıkarım yönteminden farklı olarak çıkış için polinom fonksiyonlar kullanılmaktadır [13]. Çıkarım mekanizmasında, k adet kural için elde edilecek toplam sonuç tüm çıkarım değerlerinin birleşimi olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Z = \bigcup_{i=1}^k Z_i \quad (3)$$

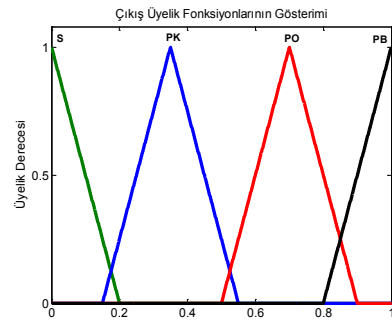
Denetleyicinin durulaştırma biriminde ağırlıklı ortalama yöntemi kullanılmıştır. Buradan elde edilecek sonuç sisteme uygulanacak olan sayısal kontrol sinyalidir. Durulaştırma işlemi için denklem (4)'te yer alan hesaplama yöntemi kullanılmıştır [13].

$$Z_{\text{çıkış}} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i Z_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (4)$$

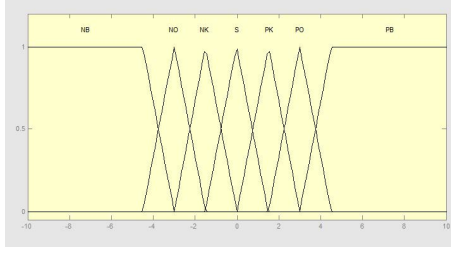
Şekil 3 ve 4'te yazılımsal olarak gerçekleştirilen bulanık mantık denetleyicilere ait üyelik fonksiyonları görülmektedir. Şekil 5 ve 6'da ise bulanık mantık (BM) araç kutusu kullanılarak tasarlanan bulanık mantık denetleyicilere ait üyelik fonksiyonları görülmektedir.



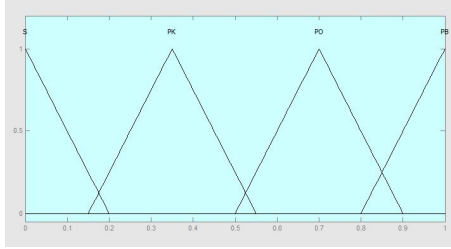
Şekil 3: Giriş üyelik fonksiyonlarının gösterimi (Yazılımsal).



Şekil 4: Çıkış üyelik fonksiyonlarının gösterimi (Yazılımsal).



Şekil 5: Giriş üyelik fonksiyonlarının gösterimi (BM Araç kutusu).



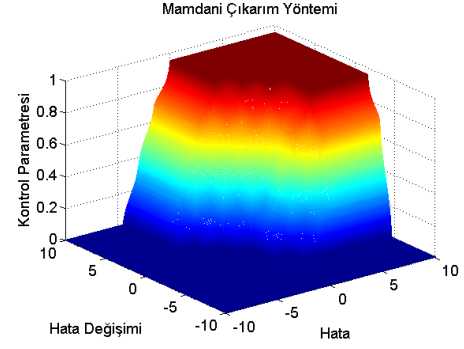
Şekil 6: Çıkış üyelik fonksiyonlarının gösterimi (BM Araç kutusu).

Şekil 3 ve 5'te görüldüğü gibi veri uzayında herhangi bir kayba uğramamak için giriş üyelik fonksiyonlarının dikey eksen boyunca her noktadaki değerlerinin toplamı 1'e eşit tutulmuştur. Çıkış üyelik fonksiyonlarında ise istenilen uzman kontrolün yapılabilmesi için belirlenen çıkış aralıkları dikkate alınmıştır. 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. Tasarlanan bulanık mantık denetleyiciler için kullanılan kurallar Tablo 1'de sunulmuştur. Hata ve hatadaki değişime karşılık gelen toplam 49 adet kural, Tablo 1'de gösterilmektedir.

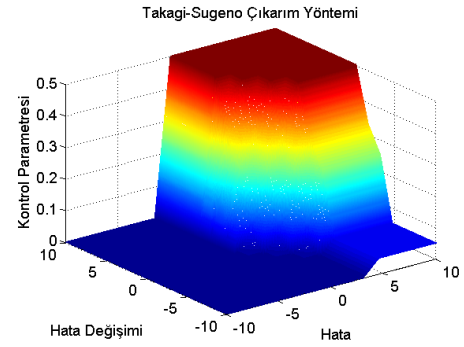
Tablo 1: Kullanılan bulanık mantık kural tablosu

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

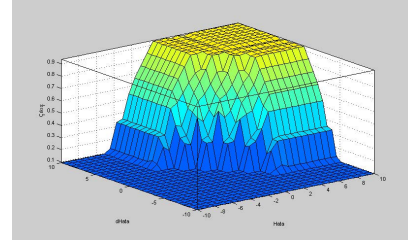
Denetleyicilerin tasarım aşamasında, hata ve hatadaki değişim değerleri öncelikle bulanıklaştırma birimlerinde ayrı ayrı işlenir. Buradan elde edilen 14 adet bulanık giriş seviyesi kural tabanlı çıkarım mekanizması ve durulaştırma işlemlerinin yapıldığı bloğa aktarılır. Bu blok içerisinde ilk olarak 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. Şekil 7 ve 8'de, yazılımsal olarak tasarlanan bulanık mantık denetleyicilerde hata ve hata değişimine bağlı olarak elde edilecek çıkış kontrol parametresinin değişimi 3 boyutlu grafiklerde gösterilmiştir. Şekil 9 ve 10'da ise araç kutusu kullanılarak tasarlanan bulanık mantık denetleyicilere ait çıkış kontrol parametresinin değişimi gösterilmiştir. Bu parametredaki değişimlerin çıkış üyelik fonksiyonlarının tanım değerlerine uygun olarak (0-1) aralığında gerçekleştiği görülmektedir.



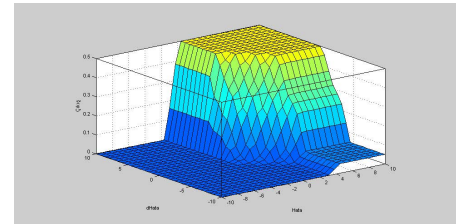
Şekil 7: Mamdani çıkarım yöntemi kural yüzeyi (Yazılımsal).



Şekil 8: Takagi-Sugeno çıkarım yöntemi kural yüzeyi (Yazılımsal).



Şekil 9: Mamdani çıkarım yöntemi kural yüzeyi (BM Araç kutusu).



Şekil 10: Takagi-Sugeno çıkarım yöntemi kural yüzeyi (BM Araç kutusu).

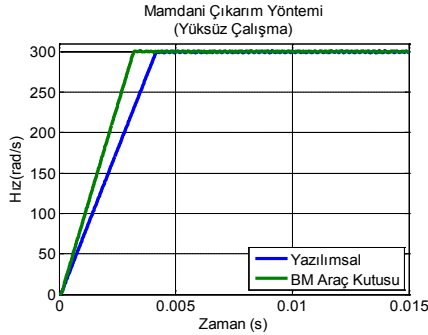
3. Benzetim

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 [14-15]. Yapılan analizlerde KMSM'nin iki boyutlu d-q rotor referans modeli kullanılmıştır. Bu model, stator büyüklüklerinin rotor düzlemine aktarılmasıyla elde edilmektedir [3]. Kullanılan KMSM'ye ait parametreler, Tablo 2'de yer almaktadır.

Tablo 2: Motor Parametreleri

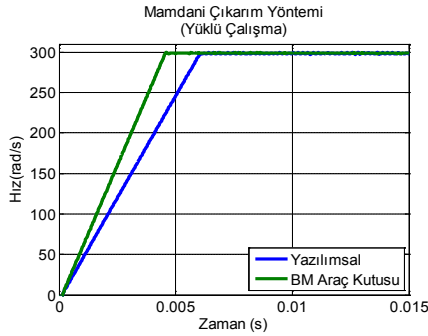
Parametre	Değeri
R_s	0.18Ω
$L_d=L_q$	$0.835 mH$
B	$0.000304 Nms$
J	$0.00062 kgm/s^2$
ψ_m	$0.0715 Wb$
p	4

Benzetim çalışmalarında kullanılan devre MATLAB/Simulink üzerinde kurulmuştur. Çalışmalarda yüksüz ve yüklü çalışma durumları için motorun hız denetimi yapılmıştır. Yazılım ve araç kutusu kullanılarak gerçekleştirilen Mamdani ve Takagi-Sugeno çıkarım yöntemlerinin motor hız denetimindeki performansları incelenmiştir.



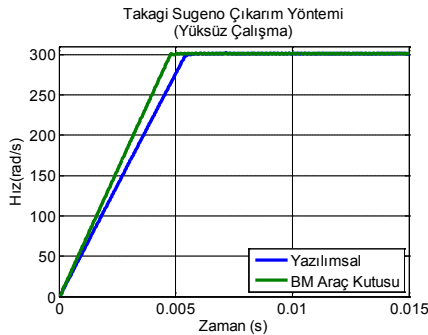
Şekil 11: Mamdani - Yüksüz çalışma durumu.

Şekil 11'de yüksüz çalışma koşulları için 300 rad/s referans hızda Mamdani bulanık çıkarım yöntemi kullanılarak tasarlanan denetleyicilerin hız denetim performansları görülmektedir.



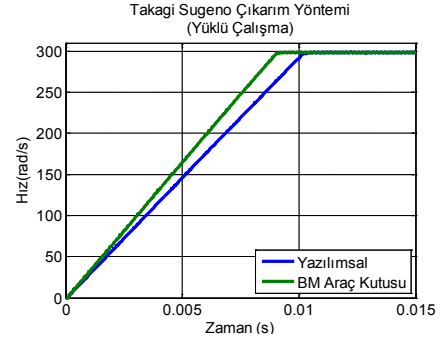
Şekil 12: Mamdani – Yüklü çalışma durumu.

Şekil 12'de 300 rad/s sabit hız ve 5 Nm sabit moment giriş referansları için Mamdani bulanık çıkarım yöntemi kullanılarak tasarlanan denetleyicilerin hız denetim performansları görülmektedir.



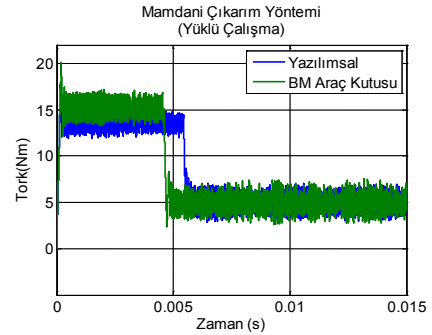
Şekil 13: Takagi-Sugeno - Yüksüz çalışma durumu.

Şekil 13'te yüksüz çalışma koşulları için 300 rad/s referans hızda Takagi-Sugeno bulanık çıkarım yöntemi kullanılarak tasarlanan denetleyicilerin hız denetim performansları görülmektedir.



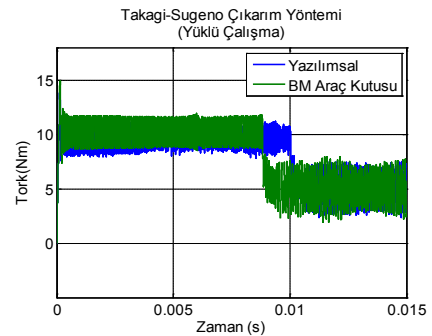
Şekil 14: Takagi-Sugeno – Yüklü çalışma durumu.

Şekil 14'te 300 rad/s sabit hız ve 5 Nm sabit moment giriş referansları için Takagi-Sugeno bulanık çıkarım yöntemi kullanılarak tasarlanan denetleyicilerin hız denetim performansları görülmektedir.



Şekil 15: Mamdani Yöntemi – Moment grafiği.

Şekil 15'te 300 rad/s sabit hız ve 5 Nm sabit moment giriş referansları için Mamdani bulanık çıkarım yöntemi kullanılarak tasarlanan denetleyicilerin moment grafikleri görülmektedir. Motorun ivmelenme sürecindeki eğimi sabit olduğundan, referans hıza ulaşıncaya kadar moment değerleri sabit bir aralıkta kalmaktadır. Motor referans hıza ulaştıktan sonra yüke eşit değerde moment üretmektedir.



Şekil 16: Takagi-Sugeno Yöntemi – Moment grafiği.

Şekil 16'da 300 rad/s sabit hız ve 5 Nm sabit moment giriş referansları için Takagi-Sugeno bulanık çıkarım yöntemi kullanılarak tasarlanan denetleyicilerin moment grafikleri görülmektedir. Moment grafiği, Mamdani yöntemindeki gibi motorun hız grafiği ile benzer bir değişim göstermektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, özgün yazılım ve MATLAB hazır araç kutusu kullanılarak Mamdani ve Takagi-Sugeno çıkarım yöntemlerine sahip bulanık mantık denetleyicilerin tasarımları gerçekleştirilmiştir. Denetleyicilerin yüksüz ve yüklü çalışma koşullarındaki performanslarının karşılaştırmaları yükselme zamanına, yerleşme zamanına, maksimum aşım ve sürekli durum hatası kriterlerine göre Tablo 3'te yapılmıştır. Yükselme zamanı ve yerleşme zamanı kriterleri açısından tüm çalışma koşullarında araç kutusu kullanılarak tasarlanan denetleyicilerin daha iyi performansa sahip olduğu görülmektedir. Maksimum aşım ve sürekli durum hatası kriterlerine göre değerlendirme yapıldığında, tasarlanan denetleyicilerin çoğunlukla benzer bir performans sergilediği görülmektedir. Şekil 11-14'teki hız grafikleri incelendiğinde; ortalama değerlere göre sonuçlardaki farklılık Takagi-Sugeno çıkarım yönteminde daha düşük seviyelerde kalmıştır.

Şekil 15-16'daki moment grafikleri incelendiğinde, yazılımsal olarak tasarlanan denetleyicilerin daha düşük moment dalgalanmasına sahip olduğu görülmektedir. Şekil 12 ve 15 incelendiğinde Mamdani yöntemi için sürekli hal bölgesindeki moment dalgalanması, yazılımsal tasarımda (3Nm – 7Nm) aralığında; araç kutusu tasarımında ise (2,3Nm – 7,6Nm) aralığında gerçekleşmiştir. Şekil 14 ve 16 incelendiğinde, Takagi-Sugeno yöntemi için sürekli hal bölgesindeki moment dalgalanması, yazılımsal tasarımda (2,4Nm – 7,4Nm) aralığında; araç kutusu tasarımında ise (2Nm – 7,8Nm) aralığında gerçekleşmiştir. Kalkışta gerekli hızlanmayı karşılayabilmek için motorun başlangıçta yüksek tork ürettiği, referans hıza ulaştıktan sonra ise yüke eşit bir torka sahip olduğu görülmektedir.

Yapılan çalışma ile tüm aşamaları özgün yazılımlar kullanılarak tasarlanan denetleyicilerin MATLAB hazır araç kutuları kullanılarak tasarlanan denetleyicilerle uyumlu sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür. Tasarımların yazılımsal olarak gerçekleştirilmesi, bulanık mantık denetleyici üzerindeki olası değişiklik veya optimizasyon işlemlerinin hızlı ve etkin bir şekilde yapılabilmesini sağlayacağı öngörülmektedir.

5. Kaynaklar

[1] Adam, A.A., "Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Moment Dalgalanması ve Gürültünün Azaltılması", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2007.

[2] Akar M., "Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Yapay Zeka Yöntemleri İle Mekanik Hataların Teşhisi", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2009.

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

[4] Adhavan B., Kuppuswamy A., Jayabaskaran G., Jagannathan V., "Field oriented control of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) using fuzzy logic controller", *Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS)*, 587-592, 2011.

[5] Mishra A., Makwana J., Agarwal P., Srivastava S.P., "Mathematical modeling and fuzzy based speed control of permanent magnet synchronous motor drive", *Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2034-2038, 2012.

[6] Maamoun A., Alsayed Y.M., Shaltout A., "Fuzzy logic based speed controller for permanent-magnet synchronous motor drive", *International Conference on Mechatronics and Automation*, 1518-1522, 2013.

[7] Na R., Wang X., "An Improved Vector-Control System of PMSM Based on Fuzzy Logic Controller", *Computer, Consumer and Control (IS3C)*, 326-331, 2014.

[8] Prasad K.M.A., 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)*, 1-6, 2015.

[9] Litcanu M., Andea P., Mihai F.I.F., "Fuzzy logic controller for permanent magnet synchronous machines", *IEEE 13th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics*, 261-265, 2015.

[10] Zadeh L.A., "Fuzzy Sets". *Elsevier Information and Control*, 8, 338-35, 1965.

[11] Şen Z., *Bulanık Mantık İlkeleri ve Modelleme*, Genişletilmiş 3. Baskı, Su Vakfı Yayınları, 2009.

[12] Anand M. S., Tyagi B., "Design and Implementation of Fuzzy Controller on FPGA", *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 4(10), 35-42, 2012.

[13] Jang J-S.R., Sun C-T., Mizutani E., *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, New Jersey, USA, Prentice Hall, 1997.

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

[15] Çelik H., Kürüm H., "Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Alan Yönlendirmeli Kontrolü", *NWSA-Technological Applied Sciences*, 8(1), 67-85, 2013.

Tablo 3: Tasarlanan Denetleyicilerin Farklı Çalışma Koşullarındaki Performansları

Performans Parametreleri		Çalışma Durumları		MAMDANI		TAKAGİ-SUGENO	
				Sabit Hız & Yüksüz Durum	Sabit Hız & Sabit Moment	Sabit Hız & Yüksüz Durum	Sabit Hız & Sabit Moment
Yükselme Zamanı	Yazılım			3,27 ms	4,75 ms	4,33 ms	8,18 ms
	Araç Kutusu			2,48 ms	3,56 ms	3,79 ms	7,25 ms
Yerleşme Zamanı	Yazılım			4,09 ms	5,93 ms	5,34 ms	10 ms
	Araç Kutusu			3,14 ms	4,47 ms	4,7 ms	8,86 ms
Maksimum Aşım	Yazılım			%0,4	%0,37	%0,39	%0,33
	Araç Kutusu			%0,27	%0,24	%0,43	%0,4
Sürekli Durum Hatası	Yazılım			1,2 rad/s	1,1 rad/s	1,2 rad/s	1 rad/s
	Araç Kutusu			0,8 rad/s	0,7 rad/s	1,3 rad/s	1,2 rad/s
Hız Cevabının Ortalama Değere Göre Farklılık Yüzdesi				%3,7	%3,76	%2,57	%2,69