

ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN ENDÜKTANS DEĞİŞİMİNİN SİNİRSEL-BULANIK MODELLENMESİ

M. Ali AKCAYOL
Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü,
06570 Maltepe, ANKARA

ÖZET

Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM) yapılarının basit olması sebebiyle endüstriyel uygulamalarda yoğun bir şekilde kullanılmaktadırlar. Güç elektroniği ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler neticesinde ARM denetimi alanında başarılı çalışmalar yapılmaktadır. ARM' ların dinamik karakteristikleri, çalışma şartlarına bağlı olarak değişmektedir. ARM' ların manyetik devresi analitik olarak modellenmiş ancak doğrusal olmayan yapısından dolayı farklı çalışma şartlarında tam doğru sonuçlar elde edilememiştir.

Bu çalışmada ARM' ların endüktans değişimi sinirsel-bulanık modellenmiştir. Bulanık denetleyici üyelik fonksiyonları Yapay Sinir Ağı (YSA) kullanılarak en iyileştirilmiştir. YSA' nın eğitim kümesi olarak deneysel olarak ölçülen değerler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, oluşturulan modelin doğrusal olmayan endüktans değişimini ifade etmek için uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Sinirsel-Bulanık Mantık, Anahtarlamalı Relüktans Motorlar.

NEURO-FUZZY MODELLING OF INDUCTANCE VARIATION OF THE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

ABSTRACT

Switched Reluctance Motors have been used in industrial applications increasingly, because of simple structure. ARMs have been controlled successfully depend on development of power electronic and computer technology. Dynamic characteristics of ARMs has been changing with different working conditions. ARMs magnetic circuit has been modeled by analytical methods but good performance was not obtained in different conditions because of nonlinear structure.

In this study, a neuro-fuzzy model have been developed for ARMs inductance variation. Fuzzy logic membership functions and rule base have been optimized using by artificial neural networks. Measurement values of inductance variation was used for training set of neural network. Experimental results have validated the applicability of the proposed method.

Keywords: Neuro-Fuzzy, Switched Reluctance Motors.

1.GİRİŞ

Anahtarlamalı relüktans motorların manyetik devre endüktansı, pozisyon ve faz akımına bağlı olarak doğrusal olmayan bir değişim göstermektedir. Manyetik devre doğrusal olmayan özelliğinden dolayı farklı çalışma şartlarında değişim gösterebilmektedir (1). Bu yüzden manyetik devrenin çok iyi modellenmesi gerekmektedir. Stephenson ve Corda manyetik devre modellemesi için başarılı bir metot öne sürmüşlerdir (2), ve daha sonra başka araştırmacılar bu metodu geliştirmişlerdir. Bu metot uygulanırken akı, aç ve akım değerleri bir veritabanında saklanmaktadır. Daha sonra Elmas ve Zelaya De La Parra manyetik devreyi ifade etmek için en küçük kareler yöntemine göre eğri oluşturma metodunu kullanarak fonksiyon serileri oluşturmuşlardır (3). Miller ve McGilp ise Stephenson ve Corda' nın ortaya koyduğu metodu geliştirmişlerdir. Bu araştırmacılar,

akı değerini rotor pozisyonuna bağlı bir fonksiyon tanımlayarak elde etmişler ve akım değerini ele almamışlardır (4). Torrey ve Lang ise analitik bir çözüm sunarak her rotor pozisyonuna göre basit bir eşitlik tanımlamışlardır (5). Bay ve Elmas tarafından ilk defa farklı bir metot önerilmiş ve bulanık mantık ile manyetik devrenin modellenmesi gerçekleştirilmiştir (6). Akcayol, yeni bir bulanık mantık modeli oluşturmuş ve Bay' ın çalışmasında kullandığı modele göre daha az sayıda üyelik fonksiyonu ve daha az sayıda kural kullanmıştır (7).

Bulanık mantık denetleyici ile doğrusal olmayan sistemlerde çok başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Bulanık mantık son yıllarda her alanda uygulanmış ve özellikle doğrusal olmayan karmaşık sistemlerde başarılı çalışmalar yapılmıştır. Ancak bulanık mantık modellemede üyelik fonksiyonları ve kural tabanı deneme yanılma metoduyla bulunmakta veya uzman kişiden elde edilmektedir.

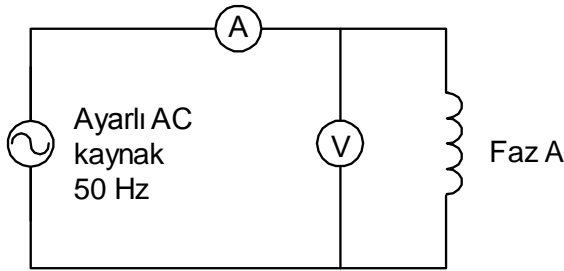
Genellikle en iyi değerler bulunamamakta sadece kabul edilebilir değerler elde edilmektedir.

Bu çalışmada bulanık mantık denetleyici ARM' ların endüktans değişiminin modellenmesi için kullanılmıştır. Yapılan çalışmada bulanık mantık denetleyicinin üyelik fonksiyonu ve kural tabanı değerleri YSA kullanılarak elde edilmiştir. Başlangıçta kullanılan kural sayısı ve üyelik fonksiyonu sayısı YSA kullanılarak en iyileştirilmiştir. Gerçekleştirilen modelden elde edilen değerler ile ölçüm değerleri karşılaştırılmış ve önerilen metodun uygulanabilir olduğu görülmüştür.

2. FAZ ENDÜKTANSININ ÖLÇÜMÜ

ARM' larda sabit kaynak gerilimi için sargı akımının ani değeri ani faz endüktansına bağlıdır (8). Faz endüktans ölçümü için farklı araştırmacılar tarafından farklı metotlar önerilmiştir (9,10,11). Her metodun diğerlerine göre elde edilen sonucun doğruluğu ve ölçme işleminin gerçekleştirilme zorluğu dikkate alındığında bazı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Bu çalışmada faz endüktansının belirlenmesinde faz empedansının ölçümüne dayalı bir ölçme metodu kullanılmıştır (12). Bütün ölçümler 8 stator kutbu ve 6 rotor kutbuna sahip olan deney motoru (OULTON 4 KW) üzerinde yapılmıştır. Her 3 derecelik rotor pozisyonu için bir faz sargısının üzerine düşen gerilim değeri elde edilmiş ve faz endüktansı hesaplanmıştır. Sargı akımını sabit tutmak için ayarlı bir AC kaynak kullanılmıştır. Ölçümler 50 Hz kaynak kullanılarak alınmıştır. Test devresi Şekil 1' de görülmektedir



Şekil 1. Faz endüktansını ölçmek için kullanılan devre.

Dört faz simetrik olduğundan ölçümler sadece bir faz için alınmıştır. Deneyde ölçülen değerler Çizelge 1' de, hesaplanan endüktans değerleri ise Çizelge 2' de verilmiştir.

Çizelge 1. Bir fazın endüktans değişimi için deneyden alınan gerilim değerleri (V).

Akım Açı	1 A	2 A	3 A	4 A	5 A	6 A	7 A	8 A
0°	38,2	75,78	112,47	148,6	168	179,4	187,7	195
3°	35,9	71,17	106,05	139,2	162	174,7	184,1	191,3
6°	32,37	64,6	96	125,7	148,5	162,7	173,1	181,5
9°	27,85	55,1	82,12	108,5	129	144,4	156	166
12°	22,45	44,88	67,2	89,5	107,7	121,8	132,5	142,8
15°	18,01	35,92	53,67	71,2	84,6	97,5	107,8	116,9
18°	12,94	25,79	35,58	51,4	62,8	72,1	80,5	89,1
21°	7,88	15,73	23,6	31,3	39,1	46,4	53,7	60,7
24°	5,45	10,89	16,3	21,72	27,15	32,55	37,9	43,32
27°	4,85	9,69	14,54	19,38	24,2	29	33,8	38,4
30°	4,64	9,28	13,92	18,55	23,16	27,78	32,4	37

Çizelge 2. Deneyde ölçülen değerlerden hesaplanan endüktans değerleri (mH).

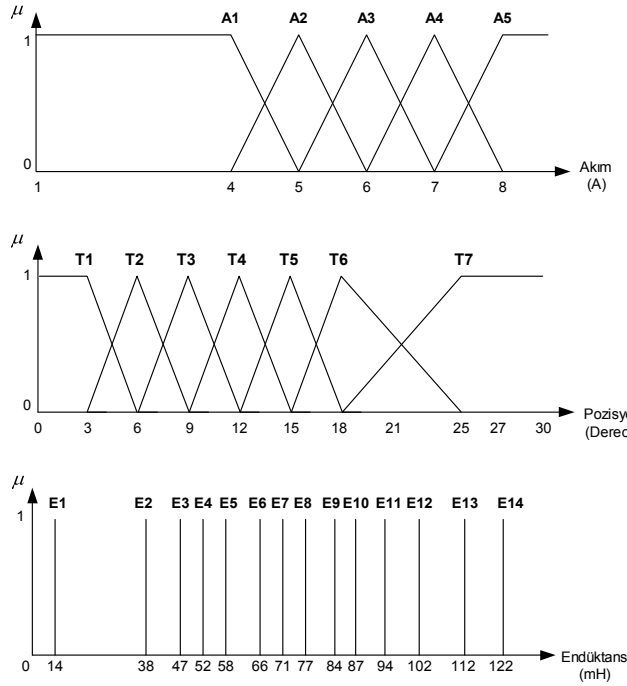
Akım Açı	1 A	2 A	3 A	4 A	5 A	6 A	7 A	8 A
0°	121,87	120,57	119,29	118,21	106,90	95,12	85,29	77,52
3°	114,23	113,22	112,48	110,73	103,08	92,62	83,65	76,04
6°	103,01	102,76	101,80	99,98	94,48	86,25	78,65	72,14
9°	88,61	87,63	87,07	86,28	82,06	76,57	70,87	65,97
12°	71,41	71,37	71,23	71,15	68,49	64,53	60,16	56,72
15°	57,27	57,09	56,06	56,57	54,91	51,62	48,91	46,40
18°	41,08	40,93	40,81	40,78	39,85	38,11	36,47	35,30
21°	24,91	24,84	24,83	24,70	24,68	24,40	24,21	23,94
24°	17,08	17,05	17,00	16,99	16,98	16,97	16,95	16,94
27°	15,10	15,10	15,09	15,09	15,08	15,05	15,04	14,94
30°	14,43	14,43	14,43	14,42	14,40	14,39	14,38	14,37

3. FAZ ENDÜKTANSININ SİNİRSEL-BULANIK MODELLENMESİ

Elde edilen endüktans değerlerini simülasyonda kullanabilmek için matematiksel olarak ifade edilmesi gerekmektedir. Bunun için birçok yöntem vardır ve en yaygın kullanılanı ise kosinüs metodudur. Ancak kosinüs metodunda akım değişimi dikkate alınmadığından tam olarak doğru sonuçlar alınmamaktadır. Bu yüzden ilk defa Bay tarafından endüktans değişimi bulanık mantıkla modellenmiş (12) ve başarılı sonuçlar alınmıştır. Ancak Bay bu çalışmasında kural tablosunu ve üyelik fonksiyonlarını kendisi belirlemiş ve açı değişimi için 7 tane, akım değişimi için 9 tane üyelik fonksiyonu ile toplam 63 tane kural tanımlamıştır.

Öncelikle kurallar ve üyelik fonksiyonları aynı ve yaklaşık olan değerler gözönüne alınarak yeniden oluşturulmuş ve daha aza sayıda kural ve üyelik fonksiyonu kullanılmıştır.

Bulanık modelleme için giriş değişkenleri olarak açı ve akım, çıkış değişkeni olarak endüktans alınmıştır. Öncelikle giriş değişkenleri açı ve akım ile çıkış değişkeni endüktans için minimum ve maksimum değerler belirlenmiştir. Açı için 0° - 30° , akım için 1A-8A ve endüktans için 14mH-122mH değer aralıkları alınmıştır. Çizelge 2’deki endüktans değerleriyle akım değerleri aynı veya yaklaşık değerler gözönüne alınarak yeniden düzenlenmiştir. Akım için (4, 5, 6, 7, 8) olmak üzere 5 farklı değer, endüktans için (14, 38, 47, 52, 58, 66, 71, 77, 84, 87, 94, 102, 112, 122) olmak üzere 14 farklı değer ve açı için (0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30) olmak üzere farklı 11 değer tespit edilmiştir. Giriş ve çıkış değişkenleri için düzenlenen üyelik fonksiyonları Şekil 2’de görülmektedir



Şekil 2. Akım, pozisyon ve endüktans üyelik fonksiyonları

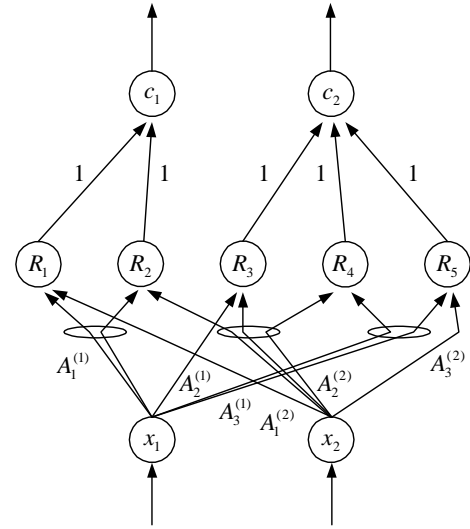
Çizelge 3’de ise oluşturulan kural tablosu görülmektedir.

Çizelge 3. Akım ve pozisyona bağlı kural tablosu

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
A1	E14	E12	E10	E7	E5	E2	E1
A2	E13	E11	E9	E6	E4	E2	E1
A3	E11	E10	E8	E6	E4	E2	E1
A4	E9	E8	E7	E5	E3	E2	E1
A5	E8	E7	E6	E5	E3	E2	E1

Oluşturulan kural tablosu ve üyelik fonksiyonlarının öğretilmesi ve en iyi değerlerin elde edilmesi için NEuro Fuzzy CLASSification (NEFCLASS) modeli kullanılmıştır.

NEFCLASS ileri beslemeli ve üç katmanlı bir sinirsel bulanık sistem olarak düşünülebilir (13). Şekil 3’de NEFCLASS modelin yapısı görülmektedir.



Şekil 3. NEFCLASS modelin yapısı

Birinci katman giriş değişkenlerini, ikinci katman bulanık kuralları temsil etmekte ve üçüncü katman ise çıkış olup her bir sınıf için bir çıkış elemanı içerir. R_k kuralları ve A_j^i ise i . girişin j . bulanık kümesini ifade eder. Her bir giriş için $X_1 = \text{çok küçük}$ gibi bir dilsel ifade elde edebilmek için ortak kullanılan ağırlıklar elips şeklinde gösterilmiştir. Her kural bir çıkışa bağlıdır (13). Çıkış değeri en büyük operatörü kullanılarak elde edilir.

Başlangıçta her bir giriş için gerekli olan bulanık küme sayısı belirlenmelidir. Ayrıca her sınıf için en az bir tane olacak şekilde toplam kural sayısı k_{\max} tanımlanmalıdır. Eğer kural sayısı başlangıçta verilmezse NEFCLASS kendisi muhtemel kural sayısını belirleyebilir (13). NEFCLASS modeli şu şekilde oluşturulur;

n tane giriş x_1, \dots, x_n

$k \leq k_{\max}$ olmak üzere k tane başlangıç kuralı. Eğer $k = 0$ ise başlangıç kuralı girilmemiş anlamına gelir ve NEFCLASS muhtemel kuralları kendisi oluşturur.

m tane çıkış c_1, \dots, c_m

Her birisi giriş işareti p ve çıkış işareti t 'den oluşan eğitim kümesi

Kural tabanı her bir giriş bilgisi p için en yüksek üyelik değerini veren bulanık kümelerin birleşimiyle oluşur. Burada bir kuralın EĞER x_1 BÜYÜK ve x_2 KÜÇÜK ÖYLE İSE kısmındaki parametreler belirlenir. Bu şekilde bir kural, kural tabanında tanımlı değilse eklenir. Bulanık kuralın ÖYLE İSE x_1, x_2 BÜYÜK sınıfa aittir, kısmı ise en büyük değere sahip çıkış seçilerek elde edilir. Eğitim işleminden sonra en iyi kurallar en büyük değere sahip ilk k_{\max} kural seçilerek bulunur. Her sınıf için en iyi kural ise k_{\max} / m sayısındaki en büyük değere sahip kurallar seçilerek elde edilir. Diğer kurallar kural tabanından silinir. En iyi kurallar her bir kuralın performansı ile bulunur. Bir kural girişteki bilgileri doğru bir şekilde sınıflandırır ise kendisine ait çıkış değeri performans değerine eklenir.

NEFCLASS modeliyle üyelik fonksiyonlarının en iyileştirilmesinde öncelikle her bir eğitim bilgisi sonucunda her çıkış birimi için hata değeri belirlenir. Belirlenen bu değere göre aktif kural için başarıyla uygulanma seviyesi artırılır veya azaltılır. Uygulama seviyesine ait bu değerlerin değişimi üyelik fonksiyonlarının değiştirilmesiyle sağlanmaktadır. Bunun içinde sadece küme parametreleri değiştirilir. Üyelik fonksiyonları değişimlerine, istenen kısıtlamalar konularak sistem çalışması etkilenmektedir. Burada oluşturulabilecek kısıtlamalar şunlardır;

Bulanık kümeler arasında kesişim istenmeyebilir

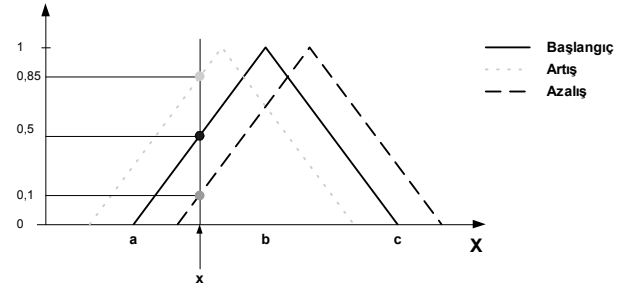
Bulanık kümeler simetrik yapıda olabilir

Üyelik değeri $[0,1]$ aralığında veya daha farklı değerler alabilir

Sistem özelliklerine göre değişen bu kısıtlamalar kural tabanının anlaşılabilirliğini artırmasına karşılık sınıflandırmada bilgi kaybına neden olabilmektedir (14).

Öğrenme işlemi üyelik fonksiyonlarını kaydırarak ve genişliklerini ayarlayarak gerçekleştirilir. Üyelik fonksiyonundaki bu değişime göre bulanık küme iyileştirilmiş olmaktadır. Şekil 4' de

bulanık kümelerin ayarlanması işlemi görülmektedir.



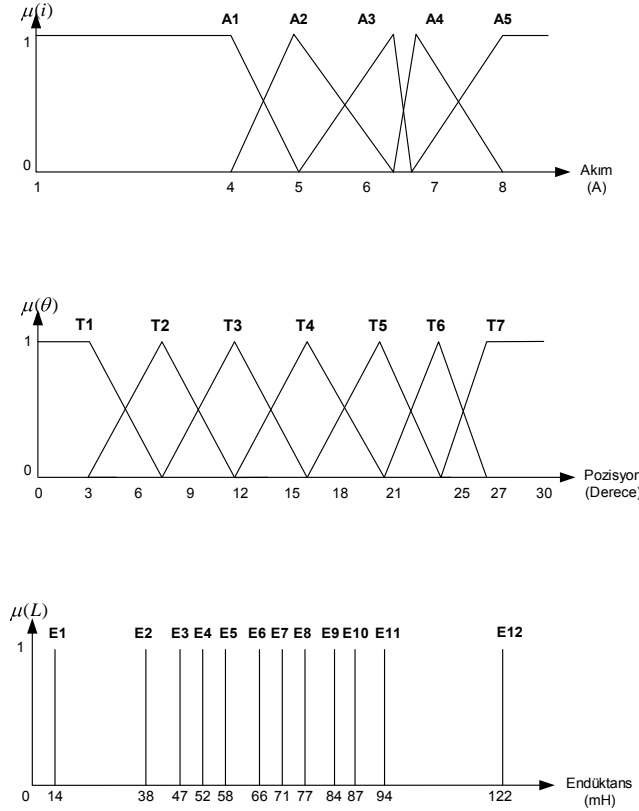
Şekil 4. Bulanık küme parametrelerinin değişimi

Bu çalışmada, oluşturulan kurallar NEFCLASS modeliyle öğretilerek toplam 12 kural elde edilmiştir. NEFCLASS ile kullanılan eğitim kümesi Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. NEFCLASS eğitim kümesi

Açı	Poz	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
4	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
4	12	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
4	15	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	18	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
5	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
5	9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	15	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	18	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
6	9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
6	12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	15	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	18	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
7	6	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
7	9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
7	12	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	15	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	18	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
8	6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
8	9	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	12	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	15	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	18	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Hazırlanan eğitim kümesinde ilk sütun akım giriş değerini, ikinci sütun pozisyon giriş değerini ve diğer sütunlar ise çıkış değerlerini göstermektedir. Çıkış değerlerinde 1 olanlar en yüksek değere sahip olan çıkışları 0 olanlar ise küçük değerli çıkışları ifade etmektedir. Giriş ve çıkış değişkenlerinin NEFCLASS ile elde edilen üyelik fonksiyonları Şekil 5' te verilmiştir.



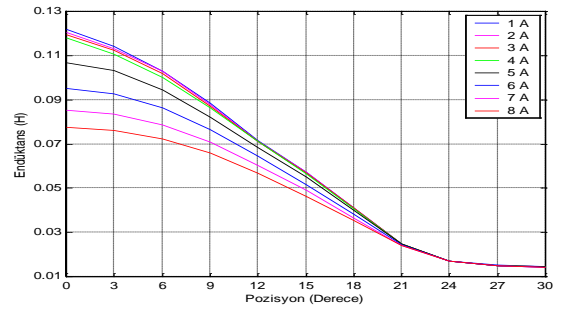
Şekil 5. NEFCLASS ile elde edilen giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları

Çizelge 5'te akım ve pozisyon değerlerine göre elde edilen kural tablosu verilmiştir.

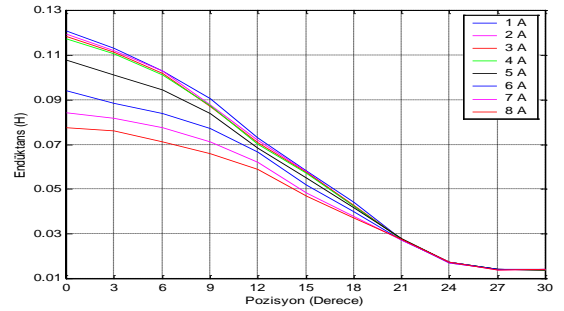
Çizelge 5. NEFCLASS ile elde edilen kural tablosu

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
A1	E14	E10	E7				
A2		E9					
A3	E11	E8	E6	E4			
A4							
A5			E5	E3	E2		E1

Çizelgede içi boş olan kısımlar kullanılmayan kuralları göstermektedir. Çizelgede görüldüğü gibi toplam 12 tane kural kullanılmaktadır. Deney sonuçlarından elde edilen değerler kullanılarak çizilen endüktansın pozisyona göre değişim eğrileri Şekil 6'da ve bulanık mantık modelden elde edilen eğriler Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 6. Deney sonuçlarına göre faz endüktansının değişim eğrileri



Şekil 7. Bulanık modelden elde edilen faz endüktansının değişim eğrileri

Elde edilen eğriler, oluşturulan bulanık modelin endüktans değişimini ifade etmek için uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

4.SONUÇ

Bu çalışmada ARM' ların endüktans değişimi için bir bulanık model geliştirilmiştir. Bulanık modelin üyelik fonksiyonları ve kural tabanı YSA kullanılarak elde edilmiştir. Az sayıda üyelik fonksiyonu ve kural ile oluşturulan bulanık modelden elde edilen sonuçlar ile ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Bulanık modelden elde edilen sonuçlar önerilen metodun uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Geliştirilen bulanık modelin az sayıda kuraldan oluşması sebebiyle daha hızlı çalışması sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

1. Miller, T.J.M., Converter Volt-Amper Requirements of the Switched Reluctance Drive, IEEE Trans. On Ind. App., Vol. IA-21, No. 5, September, 1985.
2. Stephenson, M. and El-Khazendar, M.A., Saturation in Doubly Salient Reluctance Motors, Proc. IEE, Vol.136, Pt.B, No.1, January, 1989.

3. Elmas, Ç. and Zelaya De La Parra, H., A DSP Controlled Switched Reluctance Drive System for Wide Range of Operating Speeds, PESC'92, Vol.2, pp.844-849, June, Toledo, Spain, 1992.
4. Miller, T.J.E. and McGilp, M., Nonlinear Theory of the Switched Reluctance Motor for Rapid Computer Aided Design, Proc. IEE, Vol.137, Pt. B, No.6, 1990.
5. Torrey, D.A. and Lang, J.H., Modelling a Nonlinear Variable Reluctance Motor Drive, Proc IEE, Vol.137, Pt.B, No.5, 1990.
6. Bay, O.F. and Elmas, C., Fuzzy Logic Based Modelling of Inductance Variation of the Switched Reluctance Motor, Journal of Polytechnic, Vol.2, No.3, pp.1-6, Ankara, Turkey, 1999.
7. Akçayol, M.A., Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Sinirsel-Bulanık Denetimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, Aralık, 2001.
8. Elmas, C., Sagirolu, S., Colak, I., Bal, G., Nonlinear Modelling of A Switched Reluctance Drive Based on Neural Networks, IEEE MELECON, p. 809-812, April, 1994.
9. Krishnan, R., Materu, P., 1989, Measurement and Instrumentation of Switched Reluctance Motor Drive, IEEE Annual Meeting, San Diego, October.
10. Al-Bahadly, I.H., 1991, A Simple Inductance Measurement Technique for Variable Reluctance Motors, UPEC, September, Brighton.
11. Ferrero, A., Raciti, A., 1990, A Digital Method for the Determination of the Magnetic Characteristic of Variable Reluctance Motors, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol.39, No.4, August.
12. Bay, Ö.F., 1996, Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Bulanık Mantık Tabanlı Modellenmesi ve Kontrolu, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
13. Nauck, D., Kruse, R., 1998, NEFCLASS-X- A Soft Computing Tool to Build Readable Fuzzy Classifiers, BT Technology Journal, 16(3):180-190.
14. Nauck, D., Kruse, R., NEFCLASS A Neuro-Fuzzy Approach For The Classification Of Data, ACM Symposium on Applied Computing, Nashville, February 26-28, 1995.