

ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARIN HALKALANMA AKISI DEĞERLERİNİN YAPAY SİNİR AĞLARI VE BULANIK SİNİR AĞLARI İLE KESTİRİMİ

Ferhat DALDABAN¹

Nurettin ÜSTKOYUNCU²

^{1,2} Elektrik–Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi,
Erciyes Üniversitesi, 38039, Melikgazi, KAYSERİ

¹ e-mail: daldaban@erciyes.edu.tr

² e-mail: nurettinu@erciyes.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Anahtarlama Relüktans Motor, Yapay Sinir Ağları, Bulanık Sinir Ağları, Otomatik Kontrol.

ABSTRACT

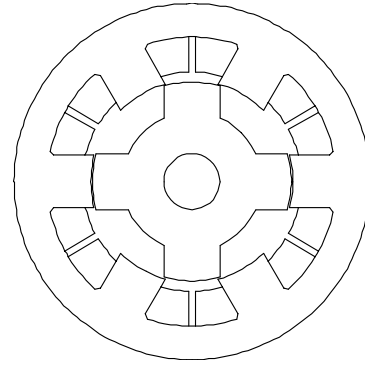
The paper presents predicting flux-linkages of the switched reluctance motors (SRMs) which are widely used in recent years with the use of artificial neural networks (ANNs) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). Required data sets to train the ANN and ANFIS are obtained by using an analytical model. The ANN training data sets are comprised of magnetization data for the SRM with current and rotor position as inputs and the corresponding flux linkage as output in these sets. Given a sufficiently large training data set, the ANN and ANFIS can build up correlation among current, rotor position and flux-linkage for appropriate architectures. The realized models have an ability of predicting flux-linkage values of the three phase SRM with the phase current and rotor position.

1. GİRİŞ

Anahtarlama relüktans motorlar (ARM), diğer elektrik makineleri ile karşılaştırıldığında oldukça basit yapıya sahip olan bir elektrik makinasıdır. Rotorunda herhangi bir sargı yada mıknatıs içermeyen ARM'ler daha önceleri değişken relüktanslı motor olarak da isimlendirilmiştir. Bu bağlamda literatürde ilk değişken relüktanslı motor 1969 yılında önerilmiştir [1]. Gerçekte bir senkron makinanın yapısına sahip olan ARM'ler, hem stator hem de rotorlarında herhangi bir sargı bulunmaması gibi bir takım özelliklere sahip olmaları yönünden diğer elektrik makinelerinden ayrılmakta ve çalışma prensipleri de bu açıdan diğer makinelerle karşılaştırılabilir. Dolayısıyla bir

Genelde sahip oldukları stator ve rotor kutup sayılarına göre adlandırılan ARM'lerin en temel karakteristiklerinden birisi, magnetik devrelerinin sahip olduğu indüktans değerlerinin, motorun rotor pozisyonu ve faz akımı ile doğrusal olmayan bir şekilde değişmesidir [2-3]. Ayrıca stator akısının sabit olmaması sebebiyle de direkt olarak dc yada ac akım uygulanarak değil, stator fazlarına uygun akım darbeleri uygulanarak çalıştırılırlar. Dolayısıyla bir

güç ve kontrol ünitesine ihtiyaç duyarlar. Bununla birlikte akım darbelerinin uygulanabilmesi için rotor pozisyonu bilgisinin bilinmesi gerekmektedir. Rotor pozisyonunun literatürde sensörlü yada sensörsüz teknikler kullanılarak elde edilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [4-8]. Şekil 1'de, çift çıkıntılı yapıya sahip olan bir 6/4 ARM'nin kesit şekli gösterilmiştir.



Şekil 1. Çift çıkıntılı yapıya sahip olan bir 6/4 ARM'nin kesit şekli.

Gelişen teknoloji ile birlikte yapay zeka teknikleri otomatik kontrol alanlarında da oldukça yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle öğrenme, genelleme yapabilmek, matematiksel bir modele ihtiyaç duymama ve doğrusal olmayan sistemleri başarıyla modelleyebilme kapasitesine sahip ve hızlı olmaları sebebiyle yapay sinir ağları (YSA) ile bulanık sistemler ve bu iki tekniğin avantajlarını üzerlerinde barındıran bulanık sinir ağları (BSA) oldukça popüler hale gelmiştir.

Sunulan çalışmada, ARM'lerin en önemli parametreleri arasında yer alan, halkalanma akısı değerlerinin YSA ve BSA sistemleri ile kestirimine çalışılmıştır. Gerçekleştirilen uygulamada YSA ve BSA sistemlerinin girişlerine, 8/6 ve 6/4 ARM'ye ait normalize edilmiş akım ve rotor konum bilgileri verilmiş ve sistemlerin çıkışında o andaki halkalanma akısı değerlerinin kestirimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan 8/6 ve 6/4 motora ait veriler, [9]'da önerilen analitiksel model ile üretilmiştir.

Sunulan çalışmada gerçekleştirilen YSA, Çok Katmanlı Perseptron (ÇKP) yapısında olup beş eğitim algoritması kullanılarak eğitilmiştir. BSA ise, Sugeno tipinde iç yapısı eğitimle uyarlanır bir ağ yapısındadır. BSA'nın eğitimi için en küçük kareler ve geri yayılım algoritmalarının hibrid karışımı kullanılmıştır.

2.ARM TEMEL PRENSİPLERİ VE ARM'YE AİT VERİLERİN ELDE EDİLMESİ

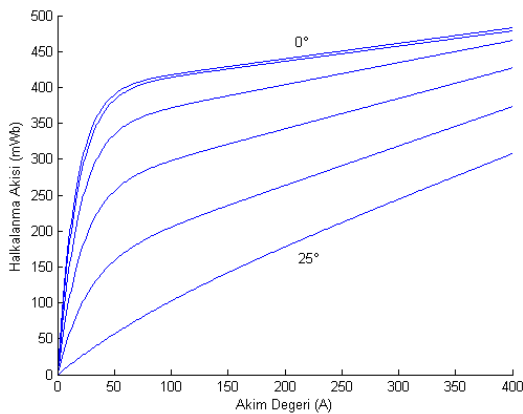
ARM'ler çift çıkıntılı kutup yapısına sahip olan ve rotorlarında her hangi bir sargı ve mıknatıs bulunmayan bir elektrik makinası çeşididir. Dolayısıyla klasik motorlara göre farklı olarak ARM'nin çalışma prensibi relüktans kuvvetine dayanmakta ve serbest hareketli, çıkık yapılı rotorun, bulunduğu magnetik devre içerisindeki akımın, en kolay yol bulabileceği en küçük relüktans konumuna kadar kuvvet uygulanarak çekilmesi şeklinde gerçekleşmektedir.

ARM'ler için eğitim verilerinin elde edilmesinde genelde kullanılmakta olan iki metod vardır: Bunlardan ilki deneysel tabanlı, diğeri ise model tabanlıdır [4]. Sunulan çalışmada 6/4 ve 8/6 ARM için kullanılan eğitim ve test verileri model tabanlı olup, [9]'da verilen ve Eşitlik 1 ile ifade edilen model ile üretilmişlerdir.

$$\lambda(i, \theta) = a_1(\theta)[1 - \exp(a_2(\theta)i)] + a_3(\theta)i \quad (1)$$

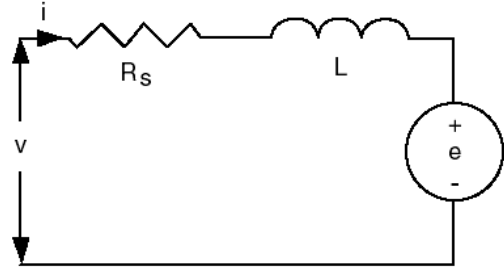
ARM'nin doğal karakteristiği, Eşitlik 1'de yer alan a_1 , a_2 ve a_3 katsayılarının değişimi ile verilmekte ve bu katsayılar Fourier serileri ile ifade edilmektedir.

Şekil 2'de çeşitli rotor konumlarına ait, Eşitlik 1 ile verilen modelle elde edilen 8/6 motora ait akım-halkalanma akısı grafiği gösterilmiştir.



Şekil 2. $\theta=0, 5, 10, 15, 20, 25$ ve 25° için 8/6 ARM'ye ait akım-halkalanma akısı grafiği.

ARM'ler yapıları gereğince genelde doyum bölgesinde çalıştırıldıklarından, doğrusal olmayan durum söz konusu olmakta ve dolayısıyla da Şekil 2'de de görüleceği üzere halkalanma akısı ve akım arasında doğrusal olmayan bir ilişki oluşmaktadır. Şekil 3'de ARM'nin tek fazına ait eşdeğer devre gösterilmiştir.



Şekil 3. ARM'nin tek fazına ait elektriksel eşdeğer devre.

Şekil 3'de verilen devrede R_s , Her bir faz için stator sargılarına ait direnci, L indüktans değerini temsil etmektedir. Burada her bir faza uygulanmakta olan gerilim değeri, Eşitlik 2'deki gibi verilebilir.

$$V = R_s i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (2)$$

Burada λ , her faz için halkalanma akısı değeri olup

$$\lambda = L(\theta, i)i \quad (3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Giriş gücü ise Eşitlik 4'de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$p_i = vi = R_s i^2 + i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} + L(\theta, i)i \frac{di}{dt} \quad (4)$$

Burada,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) = L(\theta, i) i \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (5)$$

eşitliği yazılabilir ve dolayısıyla da giriş gücü,

$$p_i = R_s i^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (6)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Eşitlik 6'dan da açıkça görüleceği üzere giriş gücü, $R_s i^2$ ifadesi ile verilen sargı kaybı gücü, $p[L(\theta, i) i^2 / 2]$ ifadesi ile verilen alan enerjisinin

değişim oranı ve $[i^2 pL(\theta, i)]/2$ ifadesi ile verilen hava aralığı gücünün toplamından oluşmaktadır

Hava aralığı gücü için zaman ifadesinde rotor pozisyonu ve hız terimleri yerine konulacak olursa,

$$t = \frac{\theta}{w_m} \quad (6)$$

ve dolayısıyla da,

$$p_{ag} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (7)$$

$$p_{ag} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} w_m$$

ifadesi elde edilir.

Hava aralığı gücü elektromagnetik torkun ve hızın bir sonucu olduğundan,

$$p_{ag} = T w_m \quad (8)$$

şeklinde ve dolayısıyla da motora ait tork,

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (9)$$

şeklinde elde edilir [2]. Burada dikkat edilmesi gereken husus motora ait torkun, rotorun konumu ve o andaki faz akımına bağlı olarak değiştiğidir.

3. YÖNTEM

3.1. YSA MODELİ

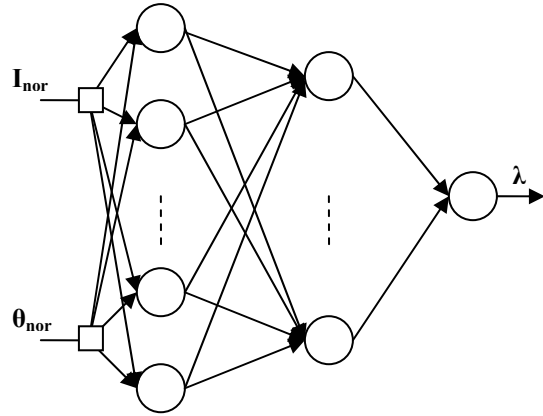
YSA'lar, insan beyninin temel prensipleri kullanılarak yapılandırılmış olan sistemler olup, özellikle bilgisayar teknolojisindeki ilerlemelerin ardından bir çok mühendislik alanında kullanılmaya başlamıştır. Özellikle örneklerden öğrenebilme ve genelleme yapabilmeleri ile lineer olmayan sistemleri başarıyla modelleyebilmeleri YSA'ların birçok araştırma alanında kullanılmasını sağlamıştır [3-8].

ARM parametreleri arasındaki doğrusal olmayan ilişki sebebiyle ARM'lerin temel karakteristiklerinin elde edilebilmesi ve analizinin gerçekleştirilebilmesi çok zordur. Dolayısıyla motor davranışının doğru bir şekilde analiz edilebilmesi için ya deneysel çalışma yapılmalı yada uygun diğer teknikler kullanılmalıdır. Bu amaçla kullanılan teknikler arasında yer alan yapay zeka tekniklerinden YSA ve bulanık tabanlı sistemler önemli bir yere sahiptir.

Gerçekleştirilen çalışmada ARM'lerin önemli parametrelerinden birisi olan halkalanma akısı değerlerinin kestiriminin yapılabilmesi amacıyla

önerilen YSA, bir giriş, iki ara ve bir de çıkış katmanından oluşan ÇKP yapısındadır ve ara katmanlarda sırasıyla on ve beş adet nöron kullanılmıştır. YSA'nın eğitimi esnasında Levenberg-Marquardt (LM), Broyden, Fletcher, Goldfarb, and Shanno (BFGS), Conjugate Gradient with Fletcher (CGF), Back Propagation (BP) ve Scaled Conjugate Gradient (SCG) eğitim algoritmaları kullanılmıştır. Ara ve çıkış katmanlarında yer alan nöronların transfer fonksiyonları ise sırasıyla tanjant sigmoid - logaritmik sigmoid ve purelin fonksiyonlarıdır.

Gerçekleştirilen YSA'nın blok şekli Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Gerçekleştirilen ÇKP yapısındaki YSA'nın blok şekli.

3.2. BSA MODELİ

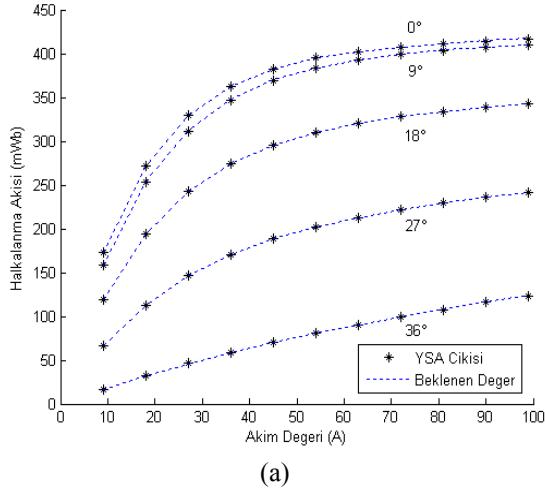
Sunulan çalışmada ele alınan BSA yapısı, Sugeno tipinde olup iç yapısı eğitimle uyarlanabilir şekildedir. BSA'nın eğitimi için en küçük kareler ve geri yayılım algoritmalarının hibrid bir karışımı kullanılmıştır. Her bir giriş değeri için on adet üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada, BSA için bir takım üyelik fonksiyonları denenmiş ve en iyi sonucu vermesi sebebiyle genelleştirilmiş çan tipi üyelik fonksiyonu tercih edilmiştir.

4. UYGULAMA

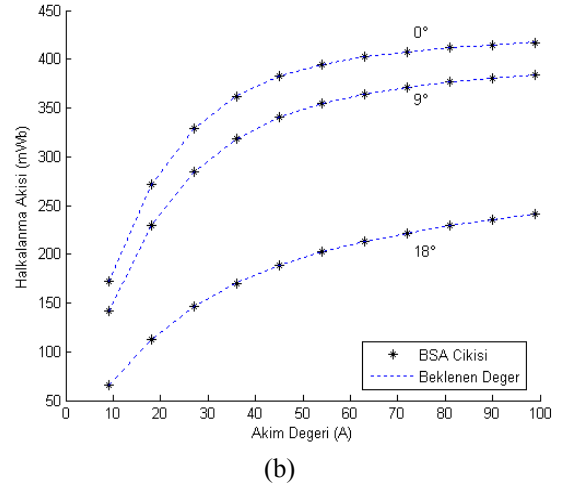
Gerçekleştirilen çalışmada, öncelikle Eşitlik 1 kullanılarak 6/4 ve 8/6 ARM'ler için eğitim ve test aşamasında kullanılacak veri setleri üretilmiştir. Her bir değişken için 6/4 ARM'ye ait toplam 4100 veri üretilirken 8/6 ARM için bu değer 3400'dür.

Eğitim esnasında YSA ve BSA'ya giriş olarak normalize edilmiş akım ve rotor konumu verileri, çıkışta ise bu değerlere karşılık gelen halkalanma akısı değerleri uygulanmıştır.

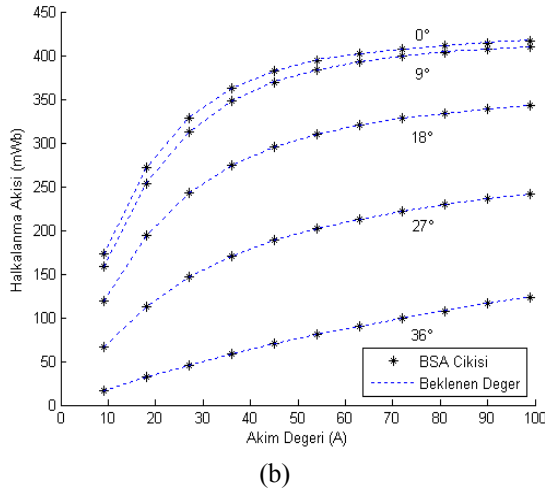
Eğitim aşamasının ardından her iki sistem de test verileriyle test işlemine tabi tutulmuşlardır. Test işlemi sonunda gerçekleştirilen yapılar ait çeşitli rotor konumu değerleri için elde edilen çıkış grafikleri Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir.



(a)

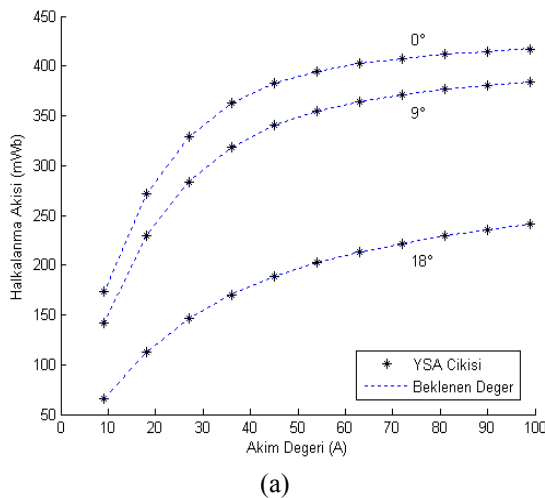


(b)



(b)

Şekil 5. 6/4 ARM için test işlemi sonunda önerilen yapıların verdiği sonuçlar ile beklenen değerlerin karşılaştırılması. (a) YSA (LM) için (b) BSA için



(a)

Şekil 6. 8/6 ARM için test işlemi sonunda önerilen yapıların verdiği sonuçlar ile beklenen değerlerin karşılaştırılması. (a) YSA (LM) için (b) BSA için

Tablo 1'de ise gerçekleştirilen YSA ve BSA tabanlı sistemlerin performans değerlendirilmelerinin daha iyi yapılabilmesi için korelasyon ve MSE (Mean-Squared-Error) değerleri verilmiştir.

Tablo 1. 6/4 ve 8/6 ARM için YSA ile BSA sistemlerinin verdiği çıkışa göre elde edilen korelasyon ve MSE değerleri.

Sistem	6/4 ARM	6/4 ARM
	Korelasyon	MSE
LM	0,9999994	$2,692.10^{-7}$
BFGS	0,9999815	$4,156.10^{-6}$
CGF	0,9998621	$3,006.10^{-5}$
BP	0,9967292	$7,062.10^{-4}$
SCG	0,9998138	$4,035.10^{-5}$
BSA	0,9999998	$1,960.10^{-7}$
Sistem	8/6 ARM	8/6 ARM
	Korelasyon	MSE
LM	0,9999996	$2,287.10^{-7}$
BFGS	0,9999914	$2,007.10^{-6}$
CGF	0,9996297	$8,082.10^{-5}$
BP	0,9892488	$2,330.10^{-3}$
SCG	0,9999378	$1,372.10^{-5}$
BSA	0,9999997	$2,168.10^{-7}$

Elde edilen sonuçlara bakıldığında en iyi kestirimin BSA tarafından gerçekleştirildiği görülmektedir. YSA eğitim algoritmaları göz önüne alındığında ise LM algoritmasının performansının diğer eğitim algoritmalarına göre daha iyi olduğu açıktır ve bu nedenle Şekil 5 ve Şekil 6 'da YSA çıkışı olarak LM algoritması ile elde edilen değerlere yer verilmiştir.

5. SONUÇ

Anahtarlamalı relüktans motorlar yüksek moment üretme yeterlilikleri, hata toleranslarının yüksek olması, yüksek hızlara ulaşabilmeleri gibi birçok avantaja sahip olmalarına karşın kontrol tekniklerindeki zorluklardan dolayı geçmişte yeterince uygulama alanı bulamamışlardır. Günümüz yarıiletken ve kontrol teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte bu güçlükler büyük oranda aşılmış ve bu tip motorlar sıkça uygulama alanlarında görülür olmuştur. Sunulan çalışmada gerçekleştirilen iki yapı ile motorun kontrolü ve parametrelerinin belirlenmesinde önemli değerlerden birisi olan halkalanma akısı değerlerinin kestirimi sağlanmıştır. Gerçekleştirilen YSA ve BSA yapıları, verilen veriler ışığında o andaki halkalanma akısı değerini çok büyük bir doğrulukla kestirebilmiştir. Elde edilen sonuçlar hem eğitim hem de test için oldukça tatmin edicidir.

KAYNAKLAR

- [1] Nasar S.A., Ofsenani R, D.C. Switched Reluctance Motor, IN PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION ELECTRICAL ENGINEERS, Vol. 116, No. 6, pp. 1048-1049, 1969.
- [2] Krishnan R., Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications, CRC PRESS, 2001.
- [3] Elmas Ç., Sağiroğlu Ş., Çolak İ., Bal G., Modeling of a Nonlinear Switched Reluctance Drive Based on Artificial Neural Networks, PROCEEDINGS OF FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND VARIABLE-SPEED DRIVES, pp. 7-12, 1994.
- [4] Meşe E., Torrey D.A., An Approach for Sensorless Position Estimation for Switched Reluctance Motors Using Artificial Neural Networks, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, Vol. 17, No. 1, pp. 66-75, 2002.
- [5] Meşe E., A Rotor Position Estimator for Switched Reluctance Motors Using CMAC, ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT, Vol. 44, pp. 1229-1245, 2003.
- [6] Ertuğrul N., Cheok A.D., High Robustness of An SR Motor Angle Estimation Algorithm Using Fuzzy Predictive Filters Realization of Current-Mode Universal Filter and Heuristic Knowledge-Based Rules, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, Vol. 46, No. 5, pp. 904-916, 1999.
- [7] Cheok A.D., Ertuğrul N., High Robustness and Reliability of Fuzzy Logic Based Position Estimation for Switched Reluctance Motor Drives, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, Vol. 15, No. 2, pp. 319-334, 2000.
- [8] Wolff J., Rahner R., Spath H., Sensorless Speed Control of a Switched Reluctance Motor for Industrial Applications, OPTIMIZATIONS OF

ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENTS, Vol. 2, pp. 457-462, 1998.

- [9] Torrey D.A., Lang J.H., Modeling a Nonlinear Variable-Reluctance Motor Drive, IEE PROCEEDINGS, Vol. 137, No. 5, pp. 314-326, 1990.