

Anahtarlamalı Relüktans Motorun Doğrudan Moment Denetimi

Uğur GÜVENÇ, Yusuf SÖNMEZ, Cemal YILMAZ, H. Hüseyin SAYAN

ÖZET

Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM) maliyetlerinin düşük ve denetiminin kolay olması sebebiyle motor sürücü endüstrisinde artan bir ilgiye sahiptirler. Ancak ARM' nin doğrusal olmayan yapısından dolayı üretilen momentte yüksek dalgalanmalar meydana gelmektedir. Bu makalede, ARM' deki moment dalgalanmalarının azaltılması için doğrudan moment denetimi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan yöntemde motor temel hızında çalışırken klasik PI denetleyiciye göre daha düzgün moment üretmektedir.

Anahtar Kelimeler: Doğrudan moment denetimi, Yapay sinir ağları, Anahtarlamalı relüktans motor

Direct Torque Control of Switched Reluctance Motor

ABSTRACT

The switched reluctance motors (SRM) is getting increasing attention in the motor drive industry because of its simple control and low cost. But the non-linearity of the SRM drives makes high ripple in the produced torque. In this paper, a direct torque control proposed for decreasing the torque ripples in SRM. In the proposed method, more smooth torque produced than classical PI control while motor working basic speed.

Keywords: Direct torque control, Neural networks, Switched reluctance motor

1. GİRİŞ

Günümüzde otomasyon sistemlerinden uzay teknolojileri gibi pek çok alanda elektrik motorları kullanılmaktadır. ARM' nin basit yapısı, düşük maliyeti ve denetiminin kolay olmasından dolayı uygulamalarda yoğun bir ilgi görmektedir (1,2). Ayrıca ARM' nin ilk kalkınma anında fazla akım çekmeden yüksek moment üretebilmesi ve çok yüksek hızlarda çalışabilmesi diğer elektrik motorlarına göre üstünlükleri arasındadır. Ayrıca, Elmas ve De La Para (3), ARM' nin çok geniş hız aralığında etkili bir şekilde çalışabildiğini göstermiştir.

ARM' nin denetimi ilk olarak Bose (4) tarafından yapılmıştır. Araştırmacılar daha sonra klasik denetimde meydana gelen sorunları yok etmek için değişik algoritmalar kullanmışlardır. Özellikle yapay zekânın denetim sistemlerinde kullanılmaya başlandıktan sonra motor denetiminde olumlu sonuçlar alınmaya başlanmıştır. Ancak, ARM' nin bütün bu üstünlüklerinin yanında en önemli dezavantajı doğrusal olmayan manyetik akı değişiminden dolayı diğer motorlara göre üretilen momentte meydana gelen yüksek dalgalanmalardır(5,6). Meydana gelen bu yüksek dalgalanmalar özellikle düşük hızlarda önemli problemler yaratmaktadır (7,8). ARM' nin yüksek moment dalgalanmalarının azaltılmasına için birçok teknik geliştirilmiştir. Yapılan araştır-

Makale 15.05.2009 tarihinde gelmiş,07.08.2009 tarihinde yayınlanmak üzere kabul edilmiştir.

U.GÜVENÇ, Düzce Üni. Tek. Eğt. Fak. Elektrik Eğt. Böl. DÜZCE

e-posta : ugurguven@duzce.edu.tr

Y. SÖNMEZ,Gazi Meslek Yüksekokulu

e-posta : ysonmez@gazi.edu.tr

C. YILMAZ, H. H. SAYAN, G.Ü. Teknoloji Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü

e-posta : cemal@gazi.edu.tr, hsayan@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier 10.2339/2009.12.4. 221-224

malardan bazıları akım denetimi, doğrusallaştırılmış geribildirim denetimi ve yapay zeka tabanlı denetimleridir(9-13). Ancak bu çalışmaların bazıları sistemin dinamik karakteristiklerini doğrusal kabul etmiştir. Bir kısmı motorun çalışma esnasında parametre değişimlerini yok kabul etmişlerdir. Dolayısıyla yüksek performans elde edememişlerdir.

Bu makalede, ARM' deki moment dalgalanmalarının azaltılması için doğrudan moment denetimi gerçekleştirilmiştir. Denetleme esnasında moment tahmininde bilinmesi gereken, akım ve pozisyona göre doğrusal olmayan şekilde değişen manyetik akı değerleri yapay sinir ağları ile hesaplanmıştır. Tasarlanan yöntemin performansını test etmek için klasik PI denetleyici tabanlı motor denetiminden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan benzetim çalışmaları sonucu tasarlanan yöntemin motor temel hızında çalışırken diğer denetleyici sisteme göre daha düzgün moment üretmekte olduğu görülmüştür.

2. ARM' DE MOMENT ÜRETİMİ VE TAHMİNİ

ARM' de üretilen ani moment, Eş. 1. de gösterildiği gibi rotorun bir konumundan diğer bir konumuna geçtiği andaki koenerjinin değişim oranına bağlıdır (8).

$$T = \left[\frac{\partial W^*(\theta, i_{a,b,c,d})}{\partial \theta} \right] \quad (1)$$

Burada; T moment, θ rotor konum açısı, W^*

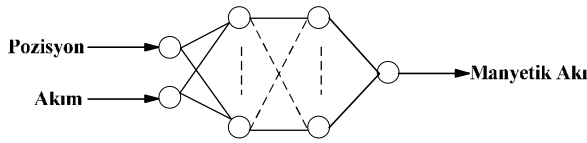
koenerji ve $i_{a,b,c,d}$ ise faz akımlarını ifade etmektedir.

Manyetik doyma olmayan bir motorda herhangi bir rotor konumu için koenerji motorun manyetik akısına

bağlı olarak değişme olup aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$W^*(\theta, i) = \int_0^i \psi(\theta, i) \cdot di \quad (2)$$

Bundan dolayı ARM' deki moment tahmini yapabilmek için manyetik akı değerlerinin motor pozisyonu ve faz akımına bağlı olarak bilinmesi gerekmektedir. Ancak motorun rotor pozisyonu ve faz akıma göre doğrusal olmayan manyetik akı değerlerini matematiksel olarak modellemek mümkün değildir. Bundan dolayı benzetimi yaptığımız motor için deneysel düzenden alınan sonuçlar (14) yapay sinir ağı (YSA) ile eğitilmiştir. Şekil 1' de ARM manyetik akısının modellenmesi için kullanılan YSA modeli verilmiştir (15).



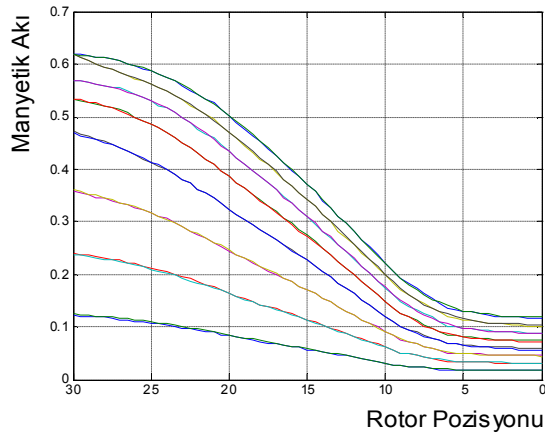
Şekil 1. Manyetik akının YSA ile modellenmesi

Yapılan uygulamada kullanılan değişkenler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Öğrenmede kullanılan değişkenler

Çıkış	Girişler	Ağ Yapısı
Manyetik Akı (ψ)	Rotor Pozisyonu (θ) Faz Akımı (i)	2 x 6 x 6 x 1

YSA tabanlı manyetik akı modelinin başarımını görmek için deneysel düzenden alınan veri eğrileri ile YSA eğitim sonrası elde edilen eğriler karşılaştırılması Şekil 2'de gösterilmiştir. YSA ile yapılan modellemenin gerçeğe çok yakın bir sonuç ortaya çıktığı görülmüştür.



Şekil 2. YSA ile modellemeyen ve deney sonuçlarından elde edilen manyetik akı değerlerinin karşılaştırılması

3. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN DENETİMİ

ARM'nin kapalı döngü DMD blok denetim sistemi Şekil 3'te gösterilmiştir. Sistem hız denetimi, moment tahmini ve moment denetiminden oluşmaktadır.

ARM'nin hız denetimi için PI denetleyicisi kullanılmıştır. Denetleyiciden elde edilecek referans moment için Eş. 4'te gösterilen ARM'nin dinamik denkleminde faydalanılır.

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega = T_{ref} - T_L \quad (3)$$

Bu denklemden hız denetimi yapılırken elde edilecek T_{ref} referans moment için;

$$T_{ref} = T_l + J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (4)$$

olur. Buradan referans moment değere PI katsayılarına bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$T_{ref} = K_p (\omega_r - \omega) + K_i \int (\omega_r - \omega) dt \quad (5)$$

olur. Bu denkleme göre motorun hız hatası ve hız hata değişim değerleri denetleyicinin girişi, referans moment değeri ise çıkışı olacaktır. Ancak motor manyetik akısı doğru bir şekilde modellenirse bu eşitliliğin doğruluğu kabul edilebilir (7). Daha sonra ani moment değeri ile PI hız denetiminden elde edilen referans moment değeri arasındaki hata ve hata değişimi hesaplanır. Bu değişkenler moment denetiminin girişleridir. Moment denetiminden elde edilen değer ise anahtarlama sinyallerin üretilmesinde kullanılacak olan referans akım değeridir. Referans akımın elde edileceği denklem aşağıdaki olacaktır.

$$e(t) = T_{ref}(t) - T(t) \quad (6)$$

$$i_{ref}(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) \cdot dt$$

4. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu çalışmada kullanılan 4 fazlı 8/6 kutuplu ARM'ye ait değerler Çizelge 2'de verilmiştir. Benzetim çalışmasında C++ Builder programlama dili kullanılmıştır. Hazırlanan simülör ile doğrudan moment denetimi ve klasik PI denetimi için benzetim aşamasında motor 1500 d/d hız referansında yüklü durumda çalıştırılmıştır. Bu çalışmalarda motor hızı ve çıkış momenti, geçici ve kararlı durumdaki grafikleri elde edilmiştir.

Çizelge 2. 4 fazlı 8/6 kutuplu ARM değişken değerleri

Değişken	Değer
Güç (P)	5,5 HP
Maksimum hız	1500 d/d
Maksimum akım (I_{max})	9 A
Maksimum kaynak gerilimi (V_{dc})	400 V
Faz direnci (R)	0,96 Ω
Maksimum endüktans (L_{max})	120 mH
Minimum endüktans (L_{min})	14 mH
Motor sürtünme katsayısı (B)	0,008 Nm.sn.rad ⁻¹
Atalet momenti (J)	0,053 kgm ²

ARM, 2'deki değişken değerlerinde ve motor 1500 d/d referans hız ve 4 N.m yüklü durumda çalıştırılmış, klasik PI denetiminden ve doğrudan

6. Elmas, C., Sagirolu, Ş., Çolak, I. and Bal, G., "Nonlinear Modelling of a Switched Reluctance Drive Based on Neural Networks", IEEE MELECON, pp. 809-812, 1994.
7. Elmas, Ç., Bay, Ö.F., 1995, Modelling and Operation of A Nonlinear Switched Reluctance Drive Based on Fuzzy Logic, EPE'95 Sevilla, Spain, September, Vol.3 p. 592-597
8. Yiğit, T., "Genetik Uyarlamalı Denetleyici İle Anahtarlama Reluktans Motorun Hız Denetiminin Gerçekleştirilmesi", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-100 (2005).
9. Mir, S., Elbuluk, M.E., Husain I., "Torque-ripple minimization in switched reluctance motors using adaptive fuzzy control", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 35(2): 461-468, (1999)
10. Stephenson, J.M., Hughes, A., Mann, R., "Torque ripple minimisation in a switched reluctance motor by optimum harmonic current injection", *IEE Proceedings Electrical Power Applications*, 148(4):322-328, (2001)
11. Rodrigues, M., Branco, P.J.C., Suemitsu, W., "Fuzzy Logic Torque Ripple Reduction by Turn-Off Angle Compensation for Switched Reluctance Motors", *IEEE Transactions of Industrial Electronics*, USA, 711-714, (2001).
12. I. Husain, M. Ehsani, "Torque ripple minimization in switched reluctance motor drives by PWM current control," in *Conf. Rec. IEEEIAS Annu. Meeting*, 1994, pp. 72-77.
13. J. G. J. O'Donovan, P. J. Roche, R. C. Kavanagh, M. G. Egan, J. M. D. Murphy, "Neural network based torque ripple minimization in a switched reluctance motor," in *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting*, 1994, pp. 1226-1231.
14. Bay, Ö.F., 1996, Anahtarlama Reluktans Motorun Bulanık Mantık Tabanlı Modellenmesi ve Kontrolü, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
15. Güvenç, U., 2005, Anahtarlama Reluktans Motorun Denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara