

ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUN TMS320LF2407A SAYISAL SİNYAL İŞLEMCİSİ İLE PWM AKIM KONTROLÜ

Zeki OMAÇ¹

Hasan KÜRÜM²

¹Fırat Üniversitesi Bingöl Meslek Yüksekokulu Bingöl

²Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü Elazığ

¹e-posta: zekiomac@yahoo.com

²e-posta: hkurum@firat.edu.tr

Anahtar kelimeler: Anahtarlı relüktans motor, Sayısal Sinyal İşlemci, PWM Akım Kontrol.

ÖZET

Basit yapı, düşük maliyet, az bakım üstünlüğü ve değişken hız elde etme kolaylığından dolayı anahtarlı relüktans motorlara (ARM) ilgi artmıştır. Bu çalışmada, tarafımızdan tasarlanan ve imal edilen $N_s/N_r=18/12$ kutuplu, üç fazlı bir ARM'nin lineer modeli Matlab/Simulink ortamında oluşturuldu. ARM'nin kapalı çevrim PI hız kontrolü ve kapalı çevrim PI akım kontrolü simülasyon sonuçları farklı hız ve yükler için elde edildi. ARM'nin PWM akım kontrolü pratik uygulaması ise TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisi ile gerçekleştirildi.

1. GİRİŞ

Tabiatındaki basitlik, sağlamlık ve düşük maliyet ARM'yi değişik genel amaçlı hızı ayarlanabilir uygulamalar için uygun bir seçenek yapmaktadır. ARM, yüksek derecede güvenilirlik gerektiren uygulamalarda basit güç elektroniği sürücü devresi ihtiyacı ve arızasız konverter üstünlüklerini sunar [1].

Klasik makinalarla karşılaştırıldığında bir ARM'nin birinci dezavantajı akustik gürültü ve titreşime katkıda bulunan oldukça yüksek moment dalgalanmasıdır [3], [4], [6]. ARM'de moment dalgalanmalarının kaynağı moment üretim mekanizmasının ayrık tabiatı ve yüksek nonlineerliktir. ARM 'de toplam moment bağımsız kontrol edilen her bir fazın ürettiği momentlerin toplamına eşittir. Moment üretiminde akımın bir fazdan diğerine geçtiği komütasyon anı, momentte dalgalanmanın en çok olduğu andır.

Anahtarlı relüktans motor gerek bir fazının eşdeğer devresi ve gerekse akımın karesine bağlı olarak büyük momentler üretme yönü ile doğru akım seri uyarmalı motora benzer. Bu benzerlikten hareketle doğru akım seri uyarmalı motorun kontrolüne benzer bir kontrolü ARM'ye uygulamak mümkün değildir. Çünkü ARM'de indüktans hem rotor konumuna ve hem de faz akımına bağlı değişmektedir. Bundan dolayı Bir ARM sürücü

sistemi için bir kontrol stratejisi geliştirmek karışık olmaktadır. Tam aksine, diğer tüm elektrik makinelerinde kontrol stratejisi değişik uyarmalarda sabit makine parametrelerine dayalı çıkarılır.

ARM'de düzgün bir momentin üretilmesi için her bir fazın iletimi süresince akımın dalga şeklinin sürekli kontrol edilmesi gereklidir. Bu çalışmada, $N_s/N_r=18/12$ kutuplu, üç fazlı bir ARM'nin faz indüktansları deneysel olarak ölçüldü. ARM'nin modeli bilgisayar ortamında Matlab/Simulink programında oluşturuldu. Kapalı çevrim hız kontrol ve kapalı çevrim akım kontrol simülasyon sonuçları PI hız kontrolör ve PI akım kontrolör ile elde edildi. Pratik uygulama ise TMS320LF2407A EVM kiti kullanarak gerçekleştirildi. ARM'nin hızı enkoder darbelerinden hesaplandı. Ayrıca faz akımları Hall etkili akım sensörleri ile algılandı. Sayısal sinyal işlemcide kapalı çevrim PI hız kontrolü ve PI akım kontrolü gerçekleştirildi.

2. ARM'NİN LİNEER MODELİ

Lineer analizde indüktansın akımla değişmediği ve magnetik doyumun olmadığı varsayılır [2]. Fazlar arasındaki ortak indüktans çok küçük olduğu için ihmal edilir. Anahtarlı relüktans motorun bir fazına ilişkin gerilim denklemi,

$$V = Ri + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada V şebeke gerilimi, i faz akımı, R faz direnci ve $L(\theta, i)$ faz indüktansıdır. (1) bağıntısı konuma göre düzenlenirse,

$$V = Ri + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \quad (2)$$

elde edilir. Burada θ konumu ve ω açısal hızı ifade etmektedir. Konum ile açısal hız arasında

$$d\theta = \omega dt \quad (3)$$

bağıntısı vardır. Üç fazlı $N_s/N_r=18/12$ kutuplu bir ARM için (2) eşitliği fazlara göre şöyle yazılabilir:

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dL_a}{d\theta} \omega \quad (4)$$

$$V_b = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + i_b \frac{dL_b}{d\theta} \omega \quad (5)$$

$$V_c = R_c i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + i_c \frac{dL_c}{d\theta} \omega \quad (6)$$

Lineer şartlarda indüktans konuma göre türevi sabit alınabilir. Bu durumda

$$K_b = \frac{dL_a}{d\theta} = \frac{dL_b}{d\theta} = \frac{dL_c}{d\theta} \quad (7)$$

olarak tanımlanabilir. Burada K_b indüktansın konuma bağlı türevidir. ARM'de bir fazın ürettiği moment,

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (8)$$

dir. Burada T bir fazın ürettiği momenttir. ARM'nin ürettiği toplam moment fazların ürettiği momentlerin toplamına eşittir. Üç fazlı bir ARM için toplam moment,

$$T_e = T_a + T_b + T_c \quad (9)$$

$$T_e = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_c}{d\theta} \quad (10)$$

Burada T_e ARM'nin ürettiği toplam momenttir. ARM'nin hareket denklemi için

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (11)$$

yazılabilir. Burada T_l yük momenti, J eylemsizlik momenti ve B sürtünme katsayısıdır. (10)'daki T_e moment ifadesi (11)'de yerine yazılır ve açısal hız durum değişkeni çekilirse,

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left(\frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_c}{d\theta} - T_l - B\omega \right) \quad (12)$$

elde edilir. (4), (5) ve (6) nolu gerilim denklemlerinden akım durum değişkenleri elde edilir.

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a} (V_a - R_a i_a - i_b K_b \omega) \quad (13)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{L_b} (V_b - R_b i_b - i_c K_b \omega) \quad (14)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{L_c} (V_c - R_c i_c - i_a K_b \omega) \quad (15)$$

ARM'nin kaplı çevrim hız kontrolü düşük ve orta hızlarda PWM akım kontrolü ile gerçekleştirilir [5], [8]. Faz sargılarına uygulanan gerilimin darbe süresi PWM darbe süresiyle belirlenir. Dolayısıyla bu hızlarda iletim ve kesim açıları sabit tutulur. Nominal hızın üstündeki hızlarda hız kontrolü iletim ve kesim açıları ile kontrol edilir. Hıza göre fazların iletim ve kesim açıları belirlenir [7]. Bu çalışmada rotor konum bilgisi ARM miline bağlı 360 darbe/devirli bir artımlı enkoderden tespit edildi.

ARM'nin faz indüktansları için aşağıdaki kosinüs bağıntıları kullanıldı:

$$L_a = L_1 + L_2 \cos N_r \theta$$

(16)

$$L_b = L_1 + L_2 \cos(N_r \theta - 2\pi/3) \quad (17)$$

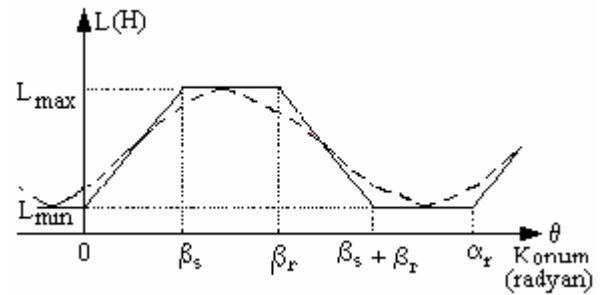
$$L_c = L_1 + L_2 \cos(N_r \theta + 2\pi/3) \quad (18)$$

$$L_1 = (L_{\max} + L_{\min})/2$$

(19)

$$L_2 = (L_{\max} - L_{\min})/2 \quad (20)$$

Burada $L_{\max}$ çakışık konum indüktansı ve $L_{\min}$ ise çakışık olmayan konum indüktansıdır. Lineer şartlarda indüktansın değişimi şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. İndüktansın konuma bağlı değişim grafiği.

Şekil 1'de kullanılan sembollerin anlamı:

β_s = stator kutup yayı,

β_r = rotor kutup yayı ($\beta_s < \beta_r$),

α_r = rotor kutup adımı ($\beta_s + \beta_r < \alpha_r$),

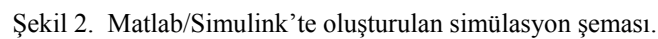
$L_{\max}$ = çakışık konum faz indüktansı ve

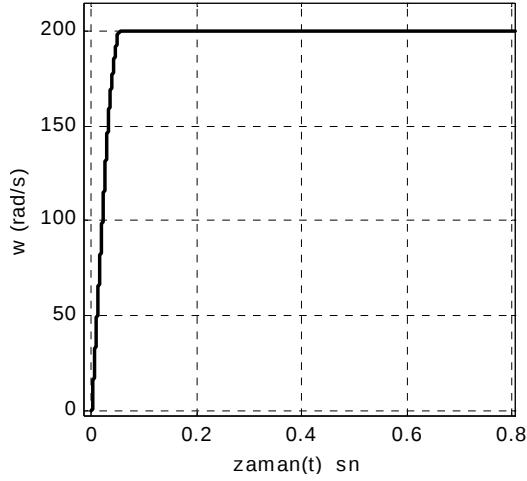
$L_{\min}$ = çakışık olmayan konum faz indüktansıdır.

3. BİLGİSAYAR SİMÜLASYON SONUÇLARI VE DENEYSEL SONUÇLAR

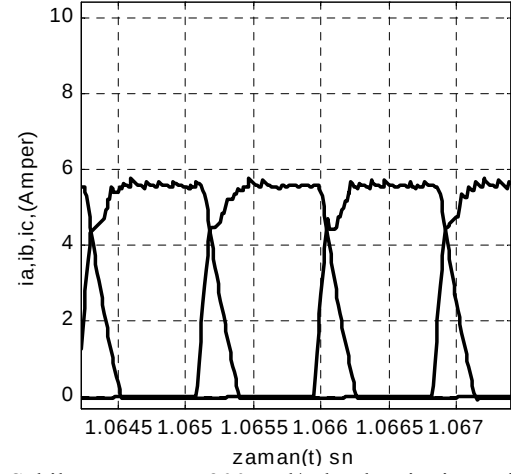
Anahtarlı relüktans motorun bilgisayar ortamında MATLAB/SIMULINK paket programı kullanarak PWM akım kontrolü simülasyonu yapıldı. ARM'nin simülasyonunda eklerde verilen motor parametreleri kullanıldı. Motorun yüklü ve yüksüz durumu için 100 rad/s ve 200 rad/s olmak üzere iki farklı referans hız için bilgisayar simülasyon sonuçları elde edildi. PI kontrolör kullanarak ARM'nin kapalı çevrim hız ve akım kontrolü gerçekleştirildi. PWM akım kontrolörle ARM'nin momentindeki dalgalanma azaldı. Ancak komütasyon aralığında momentte yine küçük bir dalgalanma gözlemlendi.

Yol almada motorun yol alma akımını küçültmek için soft start işlemi uygulandı. Soft start işleminde referans hız ilk 0.05 saniye içerisinde 0 rad/s'den lineer artarak 200 rad/s'e çıkması sağlandı. Bunun sonucu olarak yol alma akımı iki kat ve yol alma momenti dört kat düşürüldü.

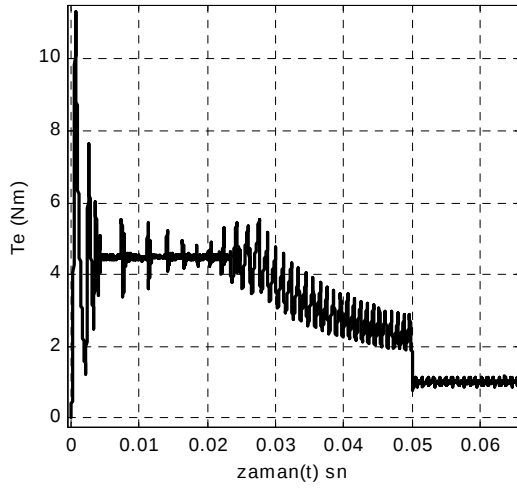




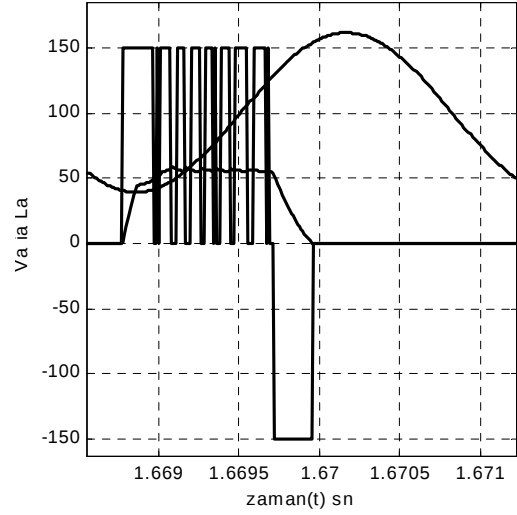
Şekil 4. $\omega_{ref} = 200$ rad/s için açısal hızın zamana bağlı değişim grafiği ($T_v = 1$ Nm).



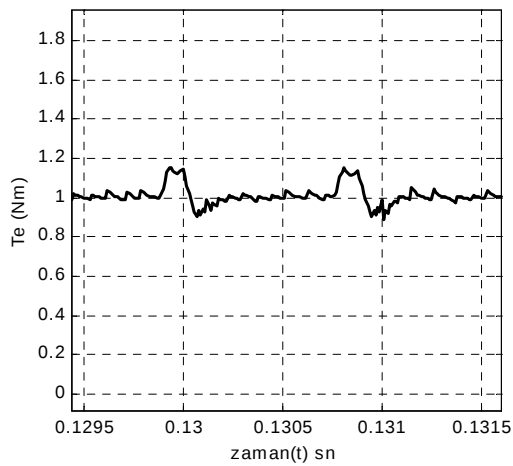
Şekil 7. $\omega_{ref} = 200$ rad/s hızdan i_a , i_b ve i_c faz akımlarının değişim grafiği ($T_v = 1$ Nm).



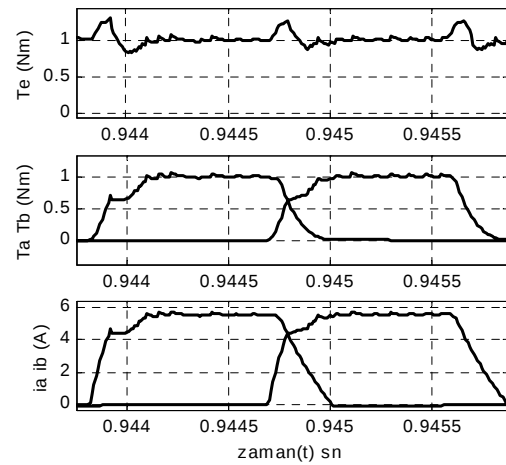
Şekil 5. $\omega_{ref} = 200$ rad/s için momentin zamana bağlı değişim grafiği ($T_v = 1$ Nm).



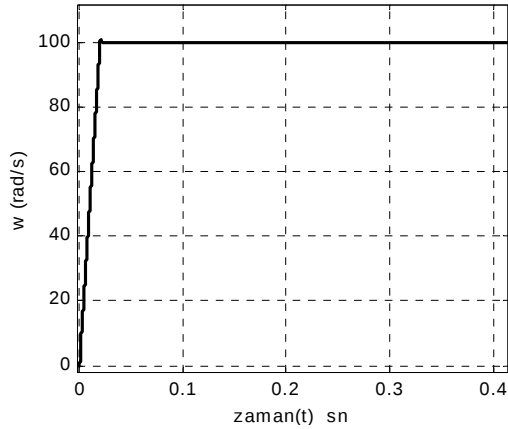
Şekil 8. $\omega_{ref} = 200$ rad/s için A fazına ilişkin V_a faz gerilimi, i_a faz akımı ve L_a faz indüktansının zamana bağlı değişim grafiği ($T_y = 1$ Nm). Burada i_a akımı $k_1=10$ ve L_a indüktansı $k_2= 17000$ katsayıları ile çarpılmıştır.



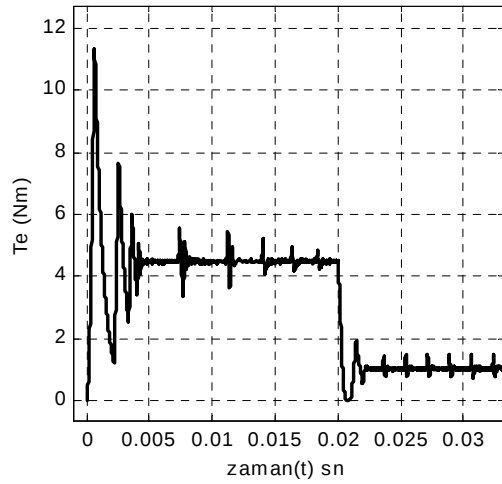
Şekil 6. $\omega_{ref} = 200$ rad/s için momentin zamana bağlı değişim grafiği büyütülmüş hali ($T_y = 1$ Nm).



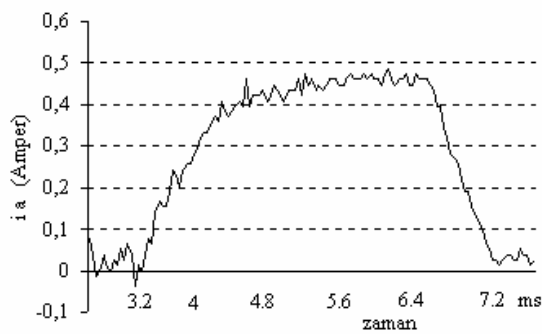
Şekil 9. $\omega_{ref} = 200$ rad/s için A ve B faz akımları, momentleri ve toplam momentin zamana bağlı değişim grafiği.



Şekil 10. $\omega_{ref} = 100$ rad/s için açısal hızın zamana bağlı değişim grafiği ($T_v = 1$ Nm).



Şekil 11. $\omega_{ref} = 100$ rad/s için momentin zamana bağlı değişim grafiği ($T_v = 1$ Nm).



Şekil 12. TMS320LF2407A SSİ ile PI akım kontrolü uygulandığında ARM'nin $\omega_{ref} = 200$ rad/s hızda $V=17.4$ Volt gerilimde dijital osilokopta ölçülen A fazı akımının zamana bağlı değişim grafiği ($T_v = 0$ Nm).

4. EKLER

ARM motor büyüklükleri:

Stator kutup sayısı (N_s)	18
Rotor kutup sayısı (N_r)	12
Stator kutup yayı uzunluğu (β_s)	0.1115 radyan
Rotor kutup yayı uzunluğu (β_r)	0.1366 radyan
Nominal akım (I_n)	6.5 A
Bir faz direnci (R)	2.6 Ω
Çakışık konum indüktansı (L_{max})	9.5 mH
Çakışık olmayan konum indüktansı (L_{min})	2.31 mH
Eylemsizlik momenti (J)	0.000695 Kgm^2
Sürtünme katsayısı (B)	0.00002 Nm/rad/s
Nominal gerilim (V)	150 V

5. KAYNAKLAR

- [1] B.K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szczesny, W. H. Bicknell, "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-22, No. 4, pp. 708– 715, July/August 1986.
- [2] G. S. Buja, R. Menis, M. I. Valla "Variable Structure Control of An SRM Drive", IEEE Transaction on Industrial electronics, Vol. 40, No. 1, pp. 56– 63, February 1993.
- [3] Iqbal, H., Ehsani, M., 1996, Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control, IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 11, No. 1, 83– 88, January.
- [4] N.C. Sahoo, S.K. Panda, P.K. Dash, "A Fuzzy Logic Based Current Modulator for Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motors", Electric Machines and Power Systems, pp. 181-194, 1999.
- [5] H. Henao, G.A. Capolino, E. Bassily, "Current Control Algorithms for switched Reluctance Machine Servo Drive", Electric Machines and Power Systems, pp. 1019-1033, 1998.
- [6] M. Şayeed, E. E. Malik, H. Iqbal, "Torque – Ripple Minimization in Switched Reluctance Motors Using Adaptive Fuzzy Control", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 35, No. 2, pp. 461– 468, March/April 1999.
- [7] Krishnan, R., 2001, Switched Reluctance Motor Drives Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications, CRC Press.
- [8] Miller, T. J. E., 2001, Electronic Control of Switched Reluctance Machines, Newnes Power Engineering Series.