

# ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUN SAYISAL HIZ KONTROLÜ

Zeki OMAÇ<sup>1</sup>

Hasan KÜRÜM<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fırat Üniversitesi Bingöl Meslek Yüksekokulu Bingöl

<sup>2</sup>Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü Elazığ

<sup>1</sup>e-posta: [zomac@firat.edu.tr](mailto:zomac@firat.edu.tr)

<sup>2</sup>e-posta: [hkurum@firat.edu.tr](mailto:hkurum@firat.edu.tr)

Anahtar kelimeler: Anahtarlı relüktans motor, Sayısal Sinyal İşlemci

## ÖZET

Bu çalışmada statorunda 18 kutup ve rotorunda 12 kutup bulunan yeni bir Anahtarlı Relüktans Motor (ARM) tasarlanıp imal edilmiştir. İncelenen ARM'nin faz indüktansları deneysel tespit edilmiştir. Bilgisayar ortamında incelenen ARM'nin açık çevrim ve kapalı çevrim hız kontrolüne ilişkin benzetim şeması oluşturulmuştur. TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisi kullanarak incelenen ARM'nin açık çevrim ve kapalı çevrim hız kontrolü uygulaması gerçekleştirilmiştir. TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisi ile ARM'nin açık çevrim ve kapalı çevrim hız kontrolü için Assembly dilinde bir program hazırlanmıştır. ARM'nin kapalı çevrim hız kontrolünde oransal+integral (PI) denetleyici kullanılarak darbe genişlik modülasyon işaretleri üretilmiştir. Açık çevrim ve kapalı çevrim hız kontrolüne ilişkin benzetim sonuçlarının doğruluğu, deneysel elde edilen sonuçlar ile ispatlanmıştır.

## 1. GİRİŞ

Anahtarlı relüktans motorun dayanıklı yapısı, yapısında sabit mıknatıs, fırça ve kolektör düzeneği içermemesi, ucuz üretim maliyeti ve kolay hız ayarı gibi üstünlükler araştırmacıları bu makineyi incelemeye iten nedenler olmuştur.

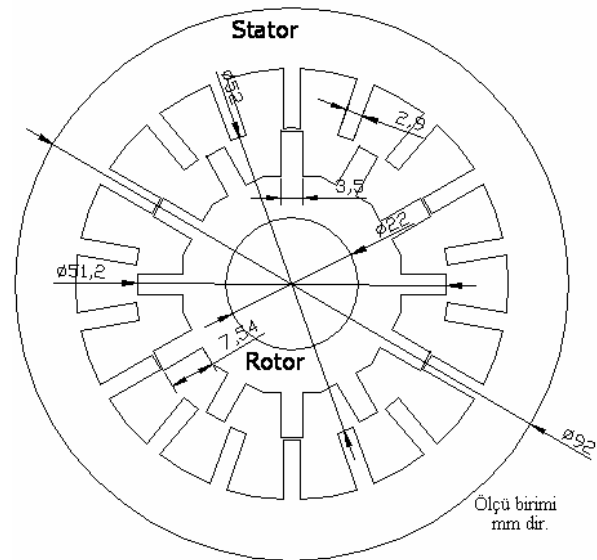
Anahtarlı relüktans motorun denetiminde geçmişten günümüze kadar analog ve ayrık sayısal tümleşik devreler, mikro denetleyici ve sayısal sinyal işlemci olmak üzere üç farklı teknoloji kullanılmıştır:

1970 yıllarının başında anahtarlı relüktans motorların kontrolünde TTL teknolojisinden yapılmış işlemsel yükseltici, karşılaştırıcı ve 74xx serisinden oluşan mantık devreleri kullanımı tasarımcılar için tek çözüm olmuştur [1].

1970'li yılların sonunda ve 1980'li yılların başında piyasaya çıkan 8 bitlik mikroişlemci ve mikro denetleyiciler gerçek zamanda kontrol uygulamalarında yeni bir çağı başlatmıştır ve bunlar anahtarlı relüktans motorların kontrolünde kullanılmıştır [2,3]. Kontrol stratejilerindeki ilerlemelerden dolayı hızı yeterli olmadığından mikro denetleyicilerin kullanılması azalmaya başlamıştır [4].

En son geliştirilen denetleyici teknolojisi sayısal sinyal işlemciler olmuştur. Sayısal sinyal işlemciler, sayısal işlem kapasitelerinden dolayı tüm motor kontrollerinde kullanılmaya başlanmıştır. Sayısal sinyal işlemciler kontrol işlemi için doğrudan uygulanabilen donanım optimizasyonlarına sahiptir. Bu özelliklerinden bazıları, komut işleme zamanının kısa olması, her saykılada bir komut işlemesi ve bir saykılada bir çarpma işlemini gerçekleştirebilmesi olarak sayılabilir. Benzer özelliklere sahip farklı firmaların ürettikleri sayısal sinyal işlemciler mevcuttur. Bu çalışmada, Texas Instruments firmasının TMS320C2000 serisinin motor kontrolü için geliştirilmiş olan en gelişmiş sayısal sinyal işlemcisi TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisi seçilmiştir [5].

İncelenen ARM'nin ön görünüşü geometrik ölçüleri ile birlikte şekil 1'de gösterilmiştir. Kullanılacak yarı iletken anahtar sayısını azaltmak ve üretilen momentin değerini büyük yapmak için karşılıklı altı kutup üzerindeki sargılar seri bağlanmak suretiyle fazlar oluşturulmuştur.



Şekil 1 İncelenen ARM'nin ön görünüşü.

## 2. ARM'İN DOĞRUSAL MODELİ

Anahtarlı relüktans motorun bir fazına ilişkin gerilim denklemi,

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

şeklinde yazılabilir. Burada V şebeke gerilimi, i faz akımı, R faz direnci ve L faz indüktansdır. 1 nolu bağıntı konuma göre düzenlenirse,

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

elde edilir. Burada  $\theta$  konumu ve  $\omega$  açısal hızı ifade etmektedir. Konum ile açısal hız arasında

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

bağıntısı vardır. ARM'de bir fazın ürettiği moment,

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (4)$$

dir. Burada T bir fazın ürettiği momenttir. ARM'nin ürettiği toplam moment fazların ürettiği momentlerin toplamına eşittir.  $T_e$  ARM'nin ürettiği toplam moment olarak ifade edilirse ARM'nin hareket denklemi için

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (5)$$

yazılabilir. Burada  $T_l$  yük momentini, J eylemsizlik momentini ve B sürtünme katsayısıdır.

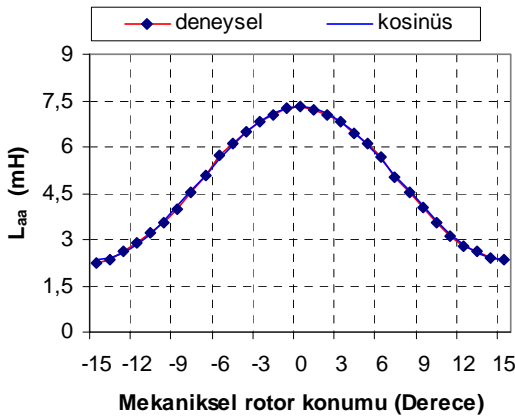
A, B ve C fazları sargı endüktansları matematiksel olarak,

$$L_{aa} = 4,829569 + 2,46649 \cos(12\theta) \quad (6)$$

$$L_{bb} = 4,829569 + 2,46649 \cos(12\theta + \frac{2\pi}{3}) \quad (7)$$

$$L_{cc} = 4,829569 + 2,46649 \cos(12\theta - \frac{2\pi}{3}) \quad (8)$$

şeklindeki bağıntılar ile ifade edilmiştir.



Şekil 2 Deneyel ölçülen A fazı idüktansının konuma bağlı değişim grafiği.

İncelenen  $N_s/N_r=18/12$  kutuplu anahtarlı relüktans motorun benzetim sonuçlarının elde edilmesinde MATLAB/SIMULINK programı kullanılmıştır.

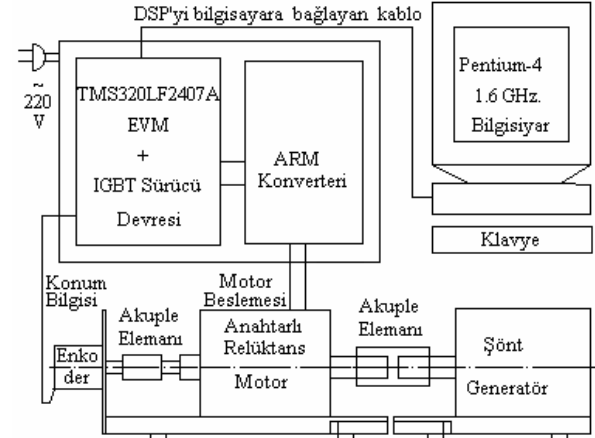
Kapalı çevrim hız kontrolünde denetleyici olarak oransal-integral (PI) denetleyici kullanılmıştır. Yüklü

çalışmada yükün eylemsizlik momentini ve sürtünme katsayısı tespit edilerek benzetimde kullanılmıştır. Benzetimde şekil 2'de gösterilen nonlineer indüktans değişimi kullanılmıştır. Bir faz direnci  $R=2.6 \Omega$ , eylemsizlik momentini  $J=0.000695 \text{ Kg m}^2$ , sürtünme katsayısı  $B=0.00018 \text{ Nm/rad/s}$  alınmıştır.

## 3. TMS320LF2407A EVM

TMS320LF2407A evaluation module (EVM) temelde TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisi ve çevre birimleri içeren bir karttır. TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisinin özellikleri şunlardır:

- 1- Komut periyodu 25 ns, çalışma frekansı 40 MHz'dir ve 3.3 V gerilimle çalışır.
- 2- İşlemci üzerinde 16 bit 32K Flash ROM belleği,
- 3- 16 bitlik dört adet genel amaçlı timer,
- 4- 12 adet karşılaştırmalı olmak üzere toplam 16 adet PWM çıkışı,
- 5- Programlanabilir ölü bandı (deadband),
- 6- 6 adet capture ve 4 adet QEP ünitesi,
- 7- Watchdog timer,
- 8- 10 bitlik 375 ns çevrim hızlı analogdan dijitale çevirici 16 kanalı vardır.
- 9- 64K program, 64K data ve 64K I/O için olmak üzere toplam 192K harici belleğe sahiptir.
- 10- Seri iletişim (SCI), CAN, JTAG ve 16 bit SPI iletişim yapılabilir.
- 11- Ayrıca EVM kartı üzerinde 4 kanallı dijitalden analoga dönüştürücü vardır.

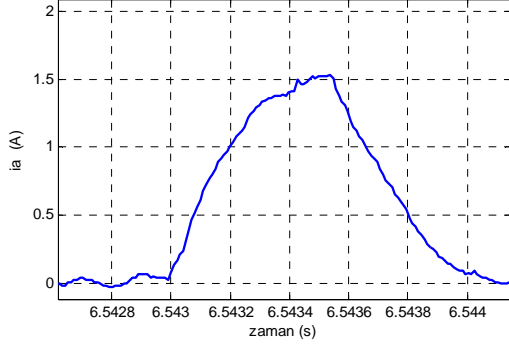


Şekil 3 ARM'nin deney bağlantı şeması.

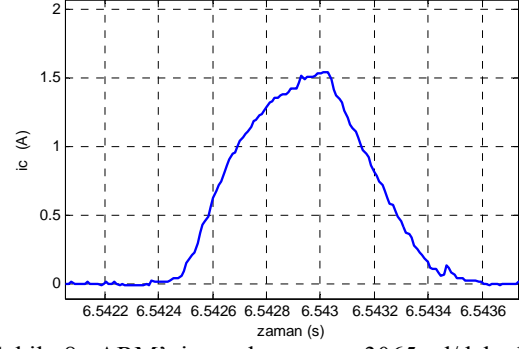
## 4. AÇIK ÇEVİRİM HIZ KONTROL SONUÇLARI

Yüksüz açık çevrim hız kontrol ait deneysel sonuçlar ve benzetim sonuçları 34 V besleme geriliminde alınmıştır. Yüksüz açık çevrim hız kontrol yapıldığında  $n=3065 \text{ d/dak}$  hızda deneysel ölçülen A, B ve C faz akımlarının grafikleri sırayla şekil 4, şekil 6, şekil 8 ve benzetim sonuçları ise şekil 5, şekil 7, şekil 9'da verilmiştir.

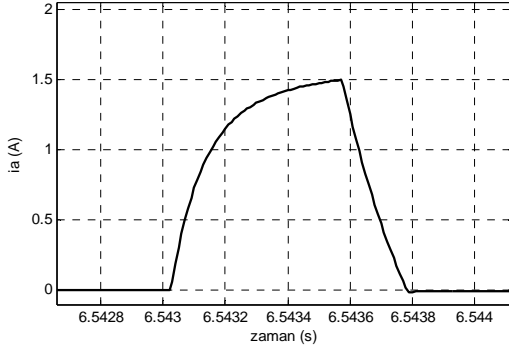
ARM sürücünün yüksüz açık çevrim hız kontrolü yapıldığında motorun hızlanmasına ilişkin deneysel ölçülen hız grafiği şekil 10 ve benzetim sonucu elde edilen hız grafiği şekil 11'de gösterilmiştir



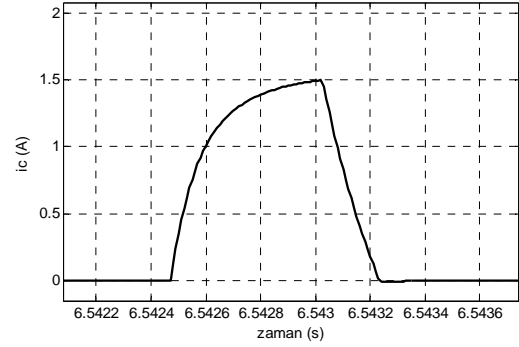
Şekil 4 ARM sürücünün yüksüz  $n=3065$  d/dak hızda deneysel ölçülen A fazı akımının değişim grafiği.



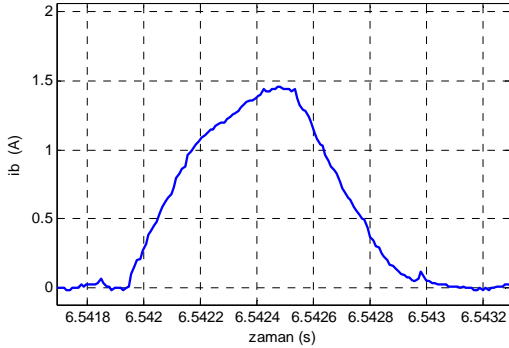
Şekil 8 ARM'nin yüksüz  $n=3065$  d/dak hızda deneysel ölçülen C fazı akımının değişim grafiği.



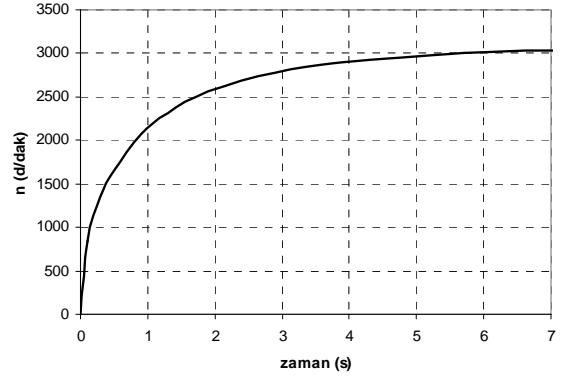
Şekil 5 ARM sürücünün yüksüz  $n=3065$  d/dak hızda benzetim sonucunda elde edilen A fazı akımının değişim grafiği.



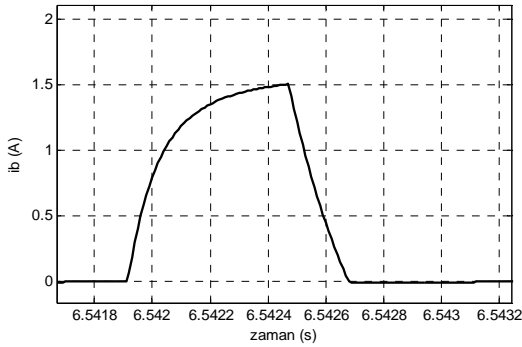
Şekil 9 ARM'nin yüksüz  $n=3065$  d/dak hızda benzetim sonucunda elde edilen C fazı akımının değişim grafiği.



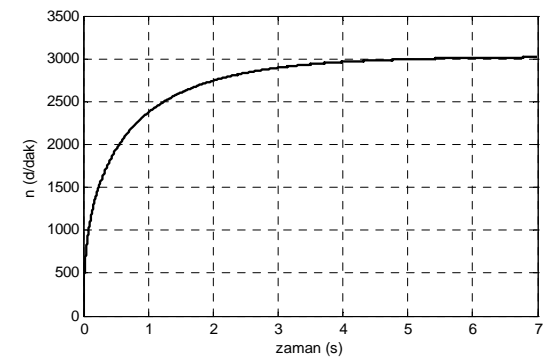
Şekil 6 ARM sürücünün yüksüz  $n=3065$  d/dak hızda deneysel ölçülen B fazı akımının değişim grafiği.



Şekil 10 ARM sürücünün yüksüz durumda deneysel ölçülen hız grafiği.



Şekil 7 ARM sürücünün yüksüz  $n=3065$  d/dak hızda benzetim sonucunda elde edilen B fazı akımının değişim grafiği.

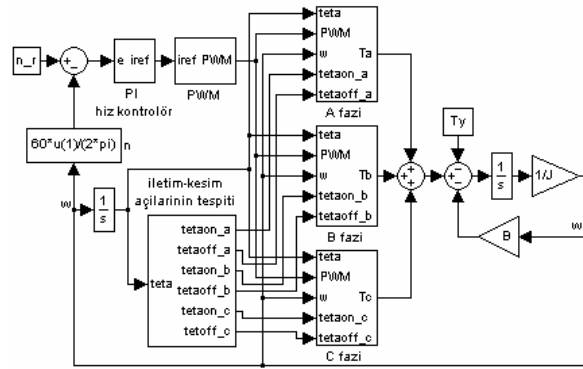


Şekil 11 ARM sürücünün yüksüz durumda benzetim sonucunda elde edilen hız grafiği.

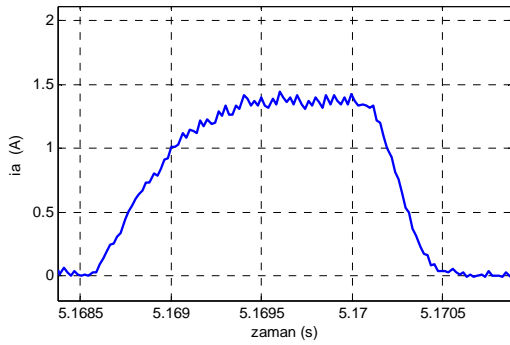
## 5. KAPALI ÇEVİRİM HIZ KONTROL SONUÇLARI

Yüksüz kapalı çevrim hız kontrolünde deneysel sonuçlar ve benzetim sonuçları 34 V besleme geriliminde ve  $f_s=15$  kHz anahtarlama frekansında alınmıştır. Anahtarlama frekansı  $f_s$ , faz akımı anahtarlama frekansının yaklaşık 20 katı alınmıştır. Benzetim sonucu kapalı çevrim hız kontrolünde PI kontrolörün oransal katsayısı  $K_p=0.020$ , integral katsayısı  $K_i=0.5$  ve integral başlangıç değeri  $K_c=0.08$  olarak ayarlanmıştır.

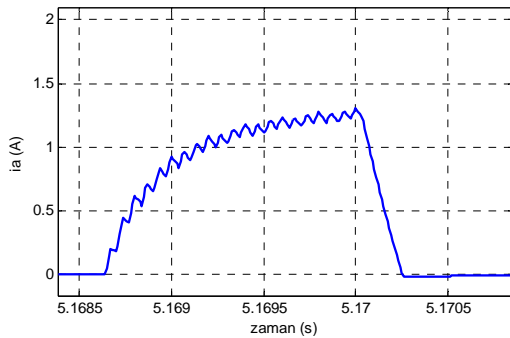
Yüksüz kapalı çevrim hız kontrol yapıldığında  $n=1200$  d/dak referans hızda deneysel ölçülen A, B ve C faz akımlarının grafikleri sırayla şekil 13, şekil 15, şekil 17 ve benzetim sonucunda elde edilen A, B ve C faz akımlarının grafikleri şekil 14, şekil 16, ve şekil 18'de gösterilmiştir.



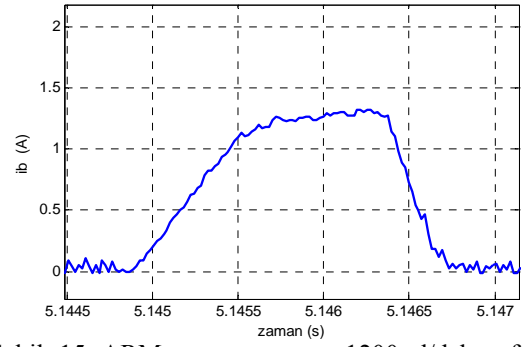
Şekil 12 Kapalı çevrim hız kontrol benzetim şeması.



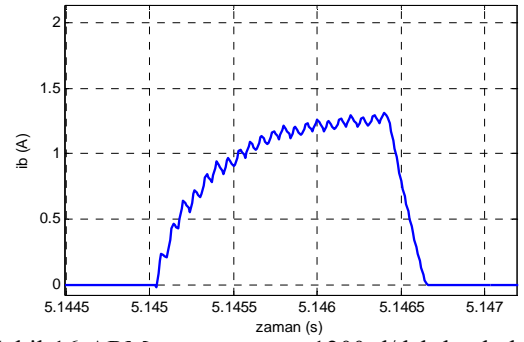
Şekil 13 ARM sürücünün  $n=1200$  d/dak hızda yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde ölçülen  $i_a$ , faz akımının değişim grafiği.



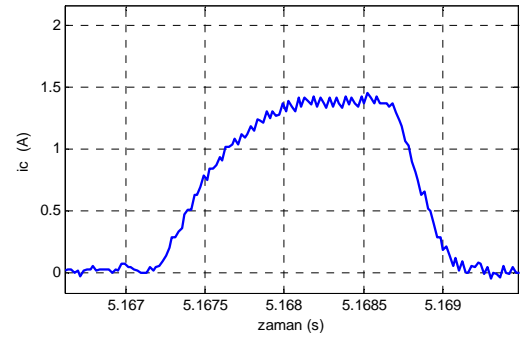
Şekil 14 ARM sürücünün  $n=1200$  d/dak hızda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen  $i_a$ , faz akımının değişim grafiği.



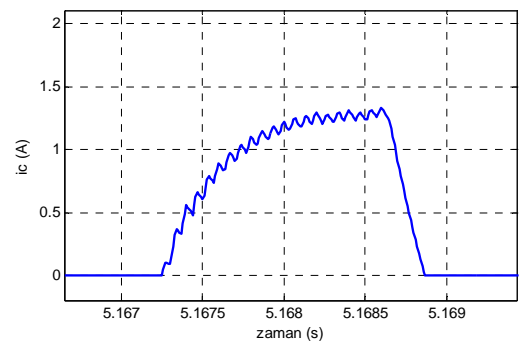
Şekil 15 ARM sürücünün  $n=1200$  d/dak referans hızda kapalı çevrim hız kontrolünde ölçülen  $i_b$ , faz akımının değişim grafiği.



Şekil 16 ARM sürücünün  $n=1200$  d/dak hızda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen  $i_b$ , faz akımının değişim grafiği.



Şekil 17 ARM sürücünün  $n=1200$  d/dak referans hızda kapalı çevrim hız kontrolünde ölçülen  $i_c$ , faz akımının değişim grafiği.

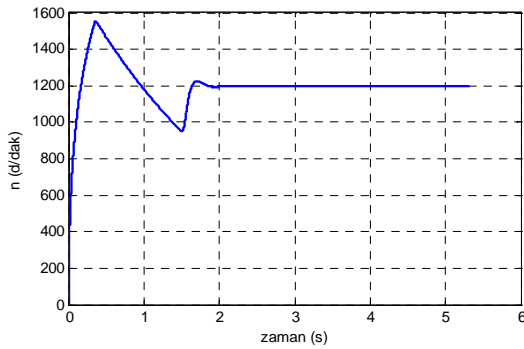


Şekil 18 ARM sürücünün  $n=1200$  d/dak hızda  $i_c$ , faz akımının değişim grafiği.

ARM sürücünün yüksüz kapalı çevrim hız kontrolü yapıldığında motorun hızlanmasına ilişkin deneysel ölçülen hız grafiği şekil 19'da ve benzetim sonucu elde edilen hız grafiği şekil 20'de gösterilmiştir.

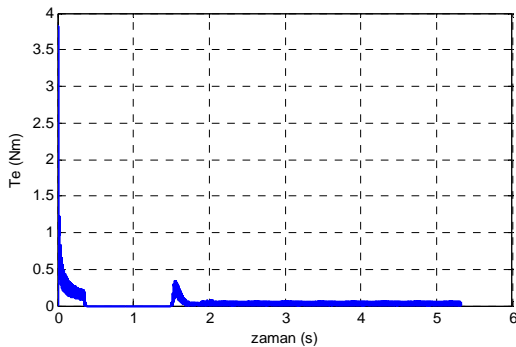


Şekil 19 ARM sürücünün  $n=1200$  d/dak referans hız yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde ölçülen hızın değişim grafiği.



Şekil 20 ARM sürücünün  $n=1200$  d/dak referans hızda yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen hızın değişim grafiği.

ARM sürücünün yüksüz kapalı çevrim hız kontrolüne ait benzetim sonucunda elde edilen moment değişim grafiği şekil 21'de gösterilmiştir.



Şekil 21 ARM sürücünün  $n=1200$  d/dak hızda yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde motor tarafından üretilen toplam momentin  $T_e$  değişim grafiği.

## 6. SONUÇLAR

Deneyisel olarak elde edilen endüktans değerleri kullanarak Matlab/Simulink programında üretilen ARM sürücünün kapalı çevrim hız kontrolünü içeren doğrusal çalışma modeli oluşturulmuştur. Bu modelden incelenen ARM sürücü için açık çevrim hız kontrol ve kapalı çevrim hız kontrolüne ait benzetim sonuçları alınmıştır. Benzetim sonucu elde edilen sonuçların doğruluğunu belirlemek için TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisini kullanarak incelenen ARM sürücünün deneysel olarak açık çevrim ve kapalı çevrim hız kontrolü yapmak amacıyla Texas Instruments CCS 2.20 yazılımı kullanarak Assembly dilinde bir programı hazırlanmıştır. TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisini kullanarak incelenen ARM sürücünün deneysel olarak açık çevrim ve kapalı çevrim hız kontrolü yapılmıştır. Benzetim sonucu elde edilen hız ve faz akımları sonuçları, deneysel elde edilen hız ve faz akımları sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları ile deneysel sonuçların uyumluluğu ortaya konmuştur.

## KAYNAKLAR

- [1] Ray W. F., Davis R. M., Inverter Drive for Doubly Salient Switched Reluctance Motor: Its Fundamental Behavior, Linear Analysis and Cost Implications, Electric Power Applications, Vol. 2, No. 6, 185-193, December, 1979.
- [2] Krishnan R., Mang X., Bharadwaj A. S., Design and Performance of Microcontroller Based Switched Reluctance Motor Drive System, Electric Machines and Power Systems, 359-373, 1990.
- [3] Bose B. K., Miller T. J. E., Szczesny P. M., Bicknell, W. H., Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-22, No. 4, pp. 708-715, July/August, 1986.
- [4] Miller T. J. E., Electronic Control of Switched Reluctance Machines, Newnes Power Engineering Series, 2001.
- [5] OMAÇ Z., "Yeni Bir Anahtarlı Relüktans Motorun Tasarımı ve Akım Kontrolü", Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ, 2006.