

FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTOR SİSTEMİNİN DENEYSEL OLARAK GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE SİMÜLASYONU

Esra KANDEMİR¹ H.Tarık DURU² Sabri ÇAMUR³

Birol ARİFOĞLU⁴ Ersoy BEŞER⁵

Elektrik Mühendisliği Bölümü
Mühendislik Fakültesi

Kocaeli Üniversitesi, Veziroğlu Kampüsü, 41100, Kocaeli

¹e-posta: esrakandemir@kou.edu.tr ²e-posta: tduru@kou.edu.tr ³e-posta: scamur@kou.edu.tr
⁴e-posta: barif@kou.edu.tr ⁵e-posta: ebeser@kou.edu.tr

Keywords: Brushless DC Motor, Permanent Magnet Synchronous Machine, Modelling and Simulation

ABSTRACT

In this paper, a brushless dc motor system is practically implemented by using a permanent magnet motor, a computer controlled inverter and position sensors. A mathematical model of the brushless dc motor in terms of a,b,c natural phase variables is given. Rotor position dependent parameters, i.e. inductances and flux linkages, of this model are experimentally determined and used in the model. In addition, practically realized system is analysed by computer simulations. Results of experimental and simulation studies are given and discussed.

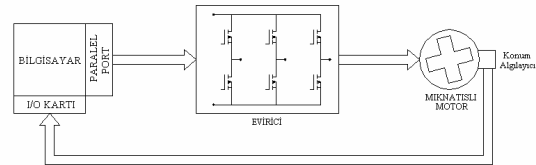
1. GİRİŞ

Son yıllarda, yarıiletken teknolojinin ve mikrodeneleyicilerin gelişmesi ile denetim sistemlerinin iyileşmesi ve malzeme bazında yapılan araştırmalar sonucu mıknatıs malzemelerin gelişmesi ile fırçasız doğru akım motorları endüstride önem kazanmıştır [1],[2].

Bu çalışmada bir fırçasız doğru akım motor sistemi uygulaması yapılmıştır. Yapılan bu uygulamada, daha önceden tasarlanmış olan, mıknatıslı bir senkron motor, konum algılayıcılar ile senkronize çalışan bir evirici üzerinden beslenerek mıknatıslı motorun fırçasız doğru akım motoru olarak çalıştırılması sağlanmıştır. Deneysel olarak gerçekleştirilen sistemde elde edilen sonuçların simülasyon ile bağdaştırılması da çalışmanın amacı dahilindedir.

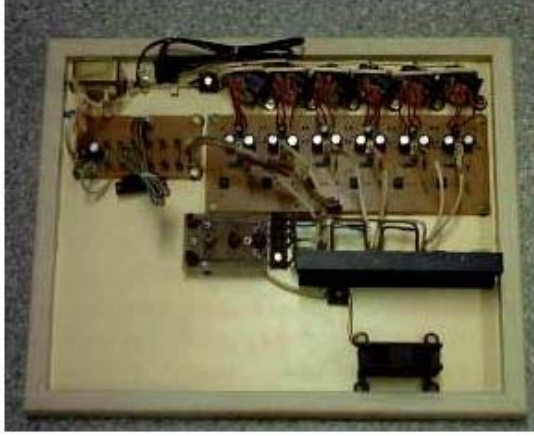
2. TASARLANAN FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTOR SİSTEMİ

Gerçekleştirilen sistemin prensip şeması Şekil 1.'de görülmektedir. Görüldüğü gibi tasarlanan sistem, bilgisayar veya mikrodeneleyici üzerinden denetlenebilen bir evirici, mıknatıslı bir motor ve konum algılayıcı olarak optik algılayıcıların kullanıldığı algılama devresinden oluşmaktadır.



Şekil 1. Tasarlanan Sistemin Prensip Şeması

Sistemde kullanılmak üzere tasarlanan evirici temel olarak, güç katı ve sürücü devresinden oluşmaktadır. (Şekil 2.) Eviricinin güç devresinde yarıiletken eleman olarak N-kanal, nominal değerleri 500V, 14A olan altı adet IRFP 450 mosfetleri kullanılmıştır. Her mosfetin kendine ait birbirinden bağımsız bir sürücü devresi bulunmaktadır. Tasarlanan eviricinin denetimi bilgisayar üzerinden yapılmaktadır.



Şekil 2. Tasarlanan eviricinin görünüşü

Konum algılayıcı olarak gerek yapısının basit olması gerekse maliyetinin düşük olması nedeniyle optoelektronik algılayıcılar tercih edilmiştir.

Tasarlanan fırçasız doğru akım motor sisteminde kullanılan mıknatıslı motorun statoru olarak etiket değerleri 550W, 1.6A, 380V, 1390d/dak olan 24 oluklu, 4 kutuplu, yıldız bağlı standart asenkron makina statoru kullanılmıştır.(Şekil 3.)



Şekil 3. Mıknatıslı motorun stator ve rotorunun görünüşü

Makinada rotor olarak, Şekil 3.'de görülen mıknatıslı bir rotor kullanılmıştır. Rotorda mıknatıs malzeme olarak yüksek enerjili NdFeB mıknatıslar bulunmaktadır.

Evirici, konum algılayıcı ve mıknatıslı motorun bir arada senkron çalışması sağlanarak fırçasız doğru akım motor sistemi elde edilmiştir. Konum algılayıcıların rotora yerleştirilmesi ve rotor konumunun tespit edilmesi ile başlayan bu süreç, evirici için tetikleme sinyallerinin elde edilmesi, tetikleme sinyalleri doğrultusunda uygun faz sargılarının enerjilendirilmesi ve nihayetinde mıknatıslı motorun dönüş hareketini gerçekleştirmesi ile son bulmaktadır.

Fırçasız doğru akım motorlarında hareket gerilimi trapezoidal değiştiğinden sabit moment üretimi için faz sargılarına uygulanması gereken akım dalga şekli 120°'lik çift yönlü kare dalga blokları şeklindedir. Üç fazın durumu göz önüne alındığında her durumda iki fazın iletimde olduğu ve elektriksel olarak her 60°'de bir iletim durumunun değiştiği görülür. Kullanılan mıknatıslı motor 4 kutuplu bir yapıda olduğu için

rotorun bir mekanik turu iki elektriksel tura eşittir. Tüm bunlar göz önüne alınarak; mekanik olarak her 30°'de, rotor konumunun tespit edilmesi gerekmektedir. Üç adet optoelektronik algılayıcı aralarında 60°'lik açı bulunacak şekilde stator kapağı üzerine sabitlenmiştir.

90°'lik iki yaydan oluşan ve saydam olmayan bir parça tasarlanarak rotor mili üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 4.). Rotorla birlikte dönebilen bu parça, algılayıcıların içinden geçebilmektedir. Bu sayede her 30°'de rotor konumu algılanır.



Şekil 4. Algılayıcılar ve yayın görünüşü

Yay parçasının, algılayıcıların içinden geçtiği durumlarda algılayıcı çıkışında 5V'luk bir gerilim oluşur (lojik'1'). Bu gerilim değerleri yapılan çalışmada bir I/O kartının portu üzerinden üç giriş bilgisi olarak okutulmuştur. Turbo Pascal programlama dilinde yazılan bir program vasıtasıyla, her 30°'de farklı algılayıcıların iletime veya kesime girmesiyle değişen giriş bilgileri değerlendirilmiştir. Değerlendirilen bu veriler yardımıyla, program içerisinde yer alan koşullara göre tetikleme sinyalleri oluşturulmuş ve bu sinyaller bilgisayarın paralel portu üzerinden, tasarlanan eviricideki her mosfetin kapı sürücü devresindeki tetikleme ucuna gönderilmiştir. Uygun sıra ile gelen tetikleme sinyalleri doğrultusunda mosfetler, iletim veya kesim durumuna geçerek yıldız bağlı motorun faz sargılarında yaklaşık 120°'lik akım blokları oluşturmuştur. Sonuç olarak mıknatıslı motorun, konum algılayıcılar ve evirici devresi ile birlikte bir fırçasız doğru akım motoru olarak çalışması sağlanmıştır.

3. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNUN MATEMATİKSEL MODELİ ve SİMÜLASYONU

Deneysel olarak elde edilen sonuçları simülasyon yöntemiyle karşılaştırmak, sonuç olarak simülasyonda geline noktaları tayin edebilmek açısından uygulamada kullanılan sisteme ait bir de simülasyon çalışması yapılmıştır. Bunun için önce mıknatıslı senkron motora ait matematiksel model oluşturulmuştur.

Mıknatıslı bir senkron motora ait a,b,c faz sistemindeki matematiksel modeli oluşturan aşağıdaki denklemler elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{ma} \\ \lambda_{mb} \\ \lambda_{mc} \end{bmatrix} \right\} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{ma} \\ \lambda_{mb} \\ \lambda_{mc} \end{bmatrix} \right\} \quad (2)$$

V_a, V_b, V_c : Faz-nötr gerilimleri,
 $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$: Faz sargılarının toplam akıları,
 R_a, R_b, R_c : Stator sargı direncidir.

Makinanın mekanik büyüklüklerini içeren mekanik denklemler ayrıca yazılırsa elektromagnetik moment,

$$T_e = p \left\{ \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial L_{aa}}{\partial \theta_r} & \frac{\partial L_{ab}}{\partial \theta_r} & \frac{\partial L_{ac}}{\partial \theta_r} \\ \frac{\partial L_{ba}}{\partial \theta_r} & \frac{\partial L_{bb}}{\partial \theta_r} & \frac{\partial L_{bc}}{\partial \theta_r} \\ \frac{\partial L_{ca}}{\partial \theta_r} & \frac{\partial L_{cb}}{\partial \theta_r} & \frac{\partial L_{cc}}{\partial \theta_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial \lambda_{ma}}{\partial \theta_r} \\ \frac{\partial \lambda_{mb}}{\partial \theta_r} \\ \frac{\partial \lambda_{mc}}{\partial \theta_r} \end{bmatrix} \right\} \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir.

$$T_e - T_y = \frac{d\omega_r}{dt} \frac{J}{p} \quad (4)$$

mekanik denkleminde ise rotor hızı elde edilebilir.

Burada,

ω_r : Rotor açısal hızı (Elk. Açı rad/s),

p : Kutup çifti sayısı,

J :Makinanın miline indirgenmiş eylemsizlik momenti,

T_y : Yük momentidir.

Bu şekilde yukarıdaki denklemler ile makinanın modeli elde edilmiş olur. Fakat gerçek anlamda

modeli tamamlayabilmek için $\frac{\partial L_{ii}}{\partial \theta_r}$, $\frac{\partial L_{ij}}{\partial \theta_r}$, L_{ii} , L_{ij}

, $\frac{\partial \lambda_{mi}}{\partial \theta_r}$ terimlerinin bulunması gerekmektedir.

Bu nedenle ilk olarak indüktans matrisini elde edebilmek için alternatif akım ölçüm yöntemiyle öz ve karşılıklı indüktanslar rotor konumuna bağlı olarak elde edilmiştir. Makina modelindeki $\frac{\partial \lambda_{mi}}{\partial \theta_r}$ teriminin

rotor konumuna bağlı değişimini belirlemek için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Farklı devirlerdeki hareket gerilimleri, elde edildikleri rotor açısal hızına

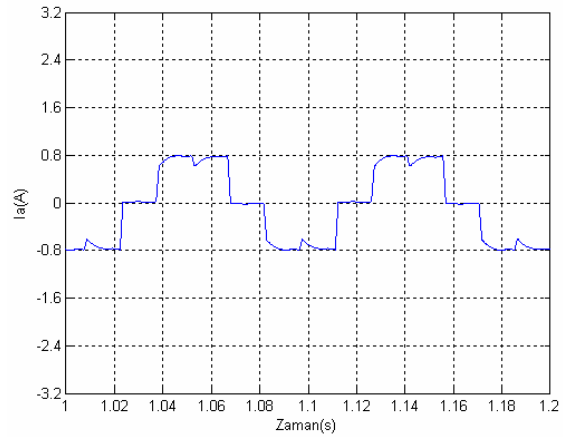
bölünerek, $\frac{\partial \lambda_{mi}}{\partial \theta_r}$ bulunmuştur. Elde edilen diziler

Fourier dönüşümü ile periyodik fonksiyonlar haline getirilmiştir.

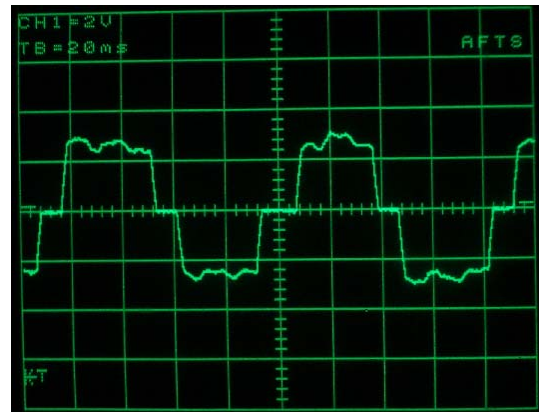
Bulunan parametreler doğrultusunda matematiksel model eksiksiz olarak oluşturulmuş ve herhangi bir nümerik analiz yardımıyla çözülebilecek hale getirilmiş ve simülasyonu yapılmıştır.

4. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTOR SİSTEMİNİN DENEYSEL SONUÇLARI İLE SİMÜLASYON SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

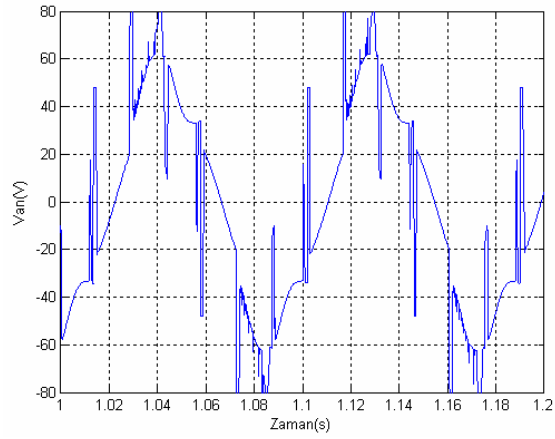
Gerçekleştirilen fırçasız doğru akım motor sistemi, yüklenerek 1Nm, 1.5Nm ve 2Nm yük durumları için faz gerilimleri ve faz akımları osiloskoptan gözlenmiştir. Daha sonra aynı yük durumları için simülasyonu yapılarak , 1Nm ve 1.5Nm yük durumları için deneysel sonuçlar ve simülasyon sonuçları birlikte verilmiştir.



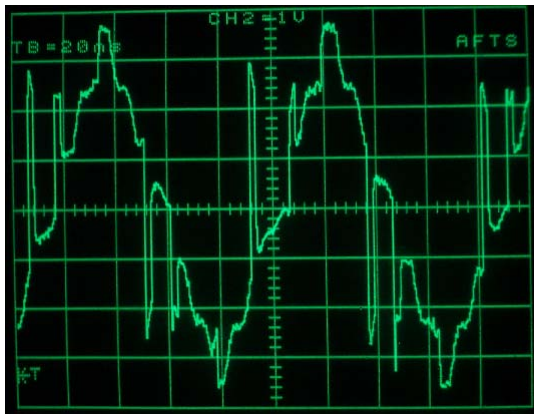
Şekil 5. 1Nm yüklü durumda faz akımının zamana bağlı değişimi



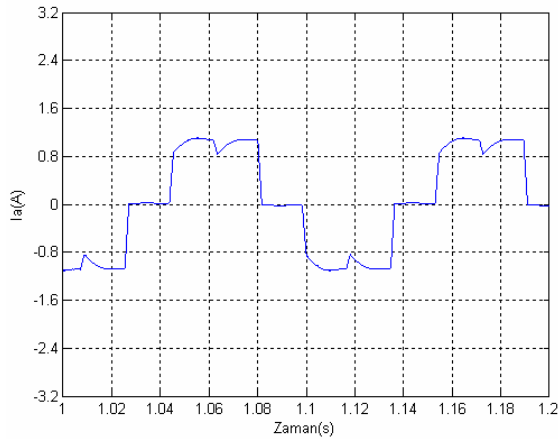
Şekil 6. 1Nm yüklü durumda faz akımının zamana bağlı değişiminin osiloskop görüntüsü (0.8A/kare)



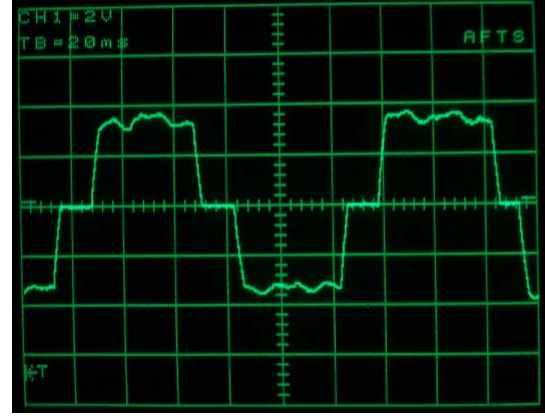
Şekil 7. 1Nm yüklü durumda faz geriliminin zamana bağlı değişimi



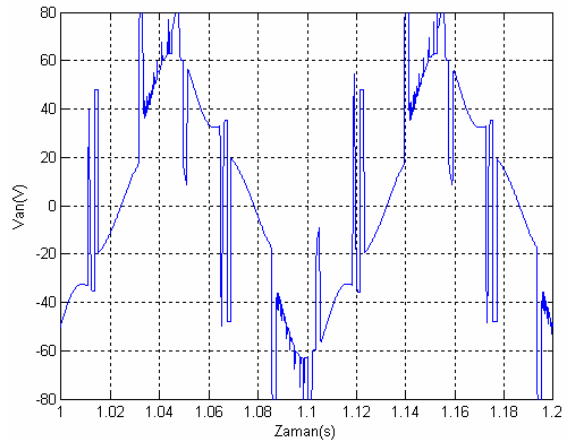
Şekil 8. 1Nm yüklü durumda faz geriliminin zamana bağlı değişiminin osiloskop görüntüsü (20V/kare)



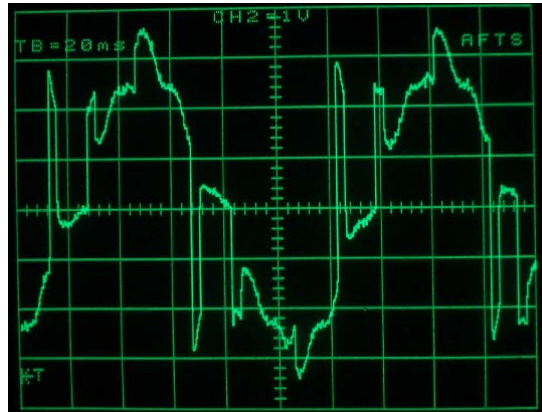
Şekil 9. 1.5Nm yüklü durumda faz akımının zamana bağlı değişimi



Şekil 10. 1.5Nm yüklü durumda faz akımının zamana bağlı değişiminin osiloskop görüntüsü (0.8A/kare)



Şekil 11. 1.5Nm yüklü durumda faz geriliminin zamana bağlı değişimi



Şekil 12. 1.5Nm yüklü durumda faz geriliminin zamana bağlı değişiminin osiloskop görüntüsü (20V/kare)

5. SONUÇLAR

Sonuç olarak çalışma amacına ulaşmış ve mıknatıslı senkron motor, fırçasız doğru akım motoru olarak çalıştırılmıştır. Evirici ve konum algılayıcılar amacına uygun olarak tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Matematiksel modelin parametreleri için deneysel ölçümler yapılmıştır. Uygulamada kullanılan motorun

genelleştirilmiş makina kuramına uygun olarak, harmonikleri de içeren Matlab simülasyonu yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçların benzer olduğu görülmüştür. Bu şekilde henüz ülkemizde imalatı yapılmayan fırçasız doğru akım motor sistemi için örnek olabilecek bir çalışma yapılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] MILLER, T. J. E., Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives. Oxford University Press, 1989.
- [2] GIERAS, F. J., WING, M., Permanent Magnet Motor Technology Design and Applications. University of Cape Town Rondebosch, 1997.
- [3] DURU, H.T., Mıknatıslı Senkron Makinanın Magnetik Analizi ve Modellenmesi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 1997.
- [4] GÜRDAL, O., Algılayıcılar ve Dönüştürücüler. Nobel Yayın Dağıtım Ltd.Şti., 2000.
- [5] ÇINAR, M.A., SM Fırçasız Doğru Akım Motorunun Modellenmesi ve Bilgisayar Destekli Simülasyonu. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2002.
- [6] SHAO, J., Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, Master of Science, 2003.