

# Sürekli Mıknatıslı Doğru Akım Motorları İçin Akım Gözetleyici ve Hız Kestirimi

Kamil Orman<sup>1</sup> Adnan Derdiyok<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>M.Y.O.,Elektronik Programı  
Erzincan Üniversitesi  
[korman@erzincan.edu.tr](mailto:korman@erzincan.edu.tr)

<sup>2</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Atatürk Üniversitesi  
[derdiyok@atauni.edu.tr](mailto:derdiyok@atauni.edu.tr)

## Özet

Bu çalışmada, sürekli mıknatıslı doğru akım motorlarının (PMDC) hız kestirimi için bir yaklaşım sunulmuştur. Önerilen algoritma akım tahmin hatalarına dayanmakta ve bu yüzden akım ve gerilim ölçümlerine ihtiyaç duymaktadır. Önerilen yapı simülasyon ortamında test edilmiş ve PMDC motor için yüklü ve yük­süz çalışmaya ilişkin başarılı elde edildiği gösterilmiştir.

## Abstract

An approach for speed estimation of PMDC motors is presented. Proposed algorithm is based on the currents observation errors, so that it needs measured currents and voltages. Successive simulation results are obtained and it is shown that the proposed algorithm is working well for the motor with/without load.

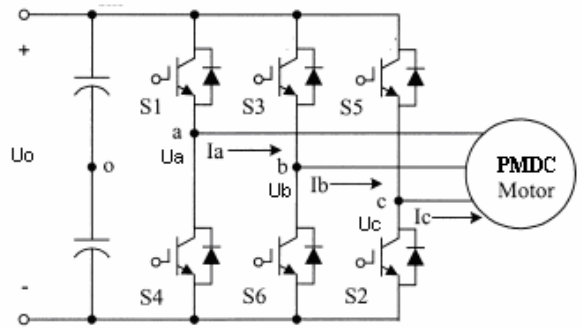
## 1. Giriş

Fırçasız doğru akım motorları bilgisayarlar, otomatik büro makineleri, imalat robotları, hassas makineler ve birçok elektronik sürücülerde kullanılmıştır. Fırçasız doğru akım motorları diğer doğru akım motorlarına göre daha basit kontrol edilebilir, yüksek tork, yüksek verim, küçük boyut gibi avantajlara sahiptir. Ayrıca doğru akım motorundaki rotor ve statorun pozisyon değişimiyle fırçalar ve komütatörlerde mekanik yıpranma gibi problemler oluşur ve fırça bakımı uzun zaman gerektirir. Sürekli mıknatıslı eşzaman motorunu kontrol etmek için motorun pozisyonunu bilmek gereklidir. Değişken-hız sürücü sistemlerinin çoğunda rotor pozisyon açısı bir shaft pozisyon duyuru tarafından optik olarak ölçülür. Bununla birlikte bir duyurun kullanımı sürücünün fiyatı, güçlük ve güvenilirlik bakımından dezavantaj oluşturur. Son yıllarda pozisyon duyurusuz fırçasız motorların performansını geliştirmek için birçok duyursuz sürücü metotları önerilmiştir. [1],[2],[3],[4]

Sinyal enjeksiyon metodunda rotor pozisyonunu kestirmek için rotor pozisyonuna bağlı olarak değişen endüktans kullanılır ve bu yöntemde motor parametrelerine ihtiyaç duyulmaz. Endüktans değişimini algılamak için dönüştürücüden aktarılan yüksek frekanslı gerilim veya akım işareti kullanılır. Diğer taraftan model tabanlı yöntem ilave bir sinyale ihtiyaç duymaksızın akı ve zıt elektromotor kuvvetinin temel bileşeni olan stator akım ve gerilimlerinden faydalanarak rotorun hız ve pozisyonunu kestirir.[2],[5],[6],[7]

Bu çalışmada bir akım gözlemci modeli ve bu modele dayalı bir hız kestirim yaklaşımı önerildi ve simülasyon sonuçları ile önerilen algoritmanın başarısı tartışıldı.

## 2. Sürekli mıknatıslı doğru akım motorun matematiksel modeli



Şekil 1: PMDC sürme devresi

Sürme devresi Şekil 1'de verilen bir PMDC motorun matematiksel modeli aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

Burada  $V_A, V_B, V_C$  ; faz gerilimlerini,  $e_A, e_B, e_C$  ; zıt-emk'ları,  $i_A, i_B, i_C$  ; faz akımlarını göstermektedir. Fırçasız DC motorların zıt emk dalga şekilleri, rotor pozisyonuna ( $\theta$ ) bağlı trapezoidal bir yapıdadır. Matematiksel olarak zıt emk değerleri;

$$\begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} f_A(\theta) \\ f_B(\theta) \\ f_C(\theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$E = K_e \omega_e \quad (3)$$

Burada  $K_e$ , zıt emk sabiti,  $\omega_e$  açılma hızı,  $E$  hızı bağlı emk genliği,  $f_A(\theta)$ ,  $f_B(\theta)$  ve  $f_C(\theta)$  ise sırasıyla A, B ve C fazlarına ait zıt emk dalga şeklinin motor konumuna bağlı değişimini tanımlayan şekil fonksiyonlarıdır.

Ayrıca hareket denklemi ve rotor pozisyon ifadesi;

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \left( \frac{p}{2} (T_e - T_L) - B \omega_r \right) / J$$

$$\left( \frac{d}{dt} \theta = \omega_r \right) \quad (4)$$

### 3. Gözlemci Modeli ve Hız Kestirimi

#### 3.1. Anahtarlama Fonksiyonu

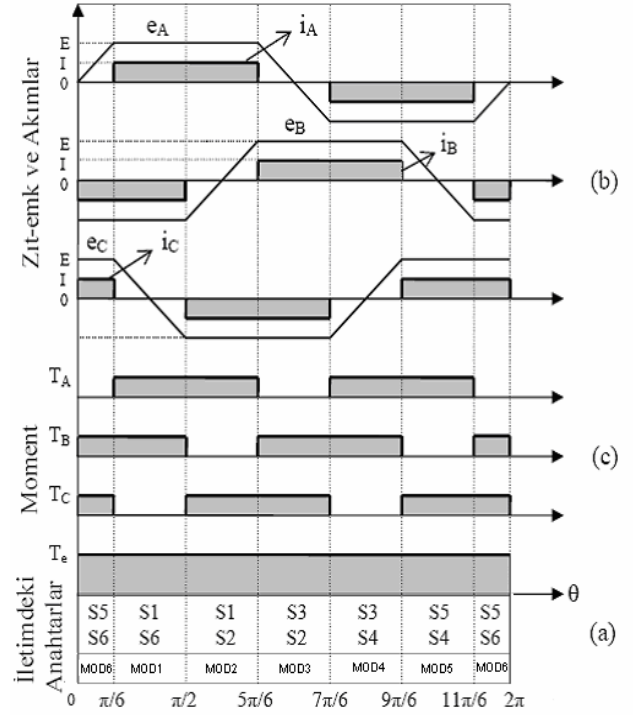
Fırçasız DC motorlarda üretilen momentin bulunması için motor zıt emk gerilimlerinin hesaplanması gerekmektedir. Şekil 2'de, fırçasız DC motorların anahtarlama durumları, ideal zıt-emk faz gerilimleri, faz akımları ve moment dalga şekilleri görülmektedir.

Şekil 2 a'da verilen inverter anahtarlama durumları için bir anahtarlama fonksiyonundan bahsedecek olursak bu fonksiyonun zıt emklara göre değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Anahtarlama fonksiyonu aşağıdaki gibidir. Burada Mod 1 ve Mod 4 işaret olarak farklılık gösterirler ve benzer şekilde Mod 2 – Mod 5 ve Mod 3 – Mod 6 arasında da aynı ilişki bulunmaktadır.

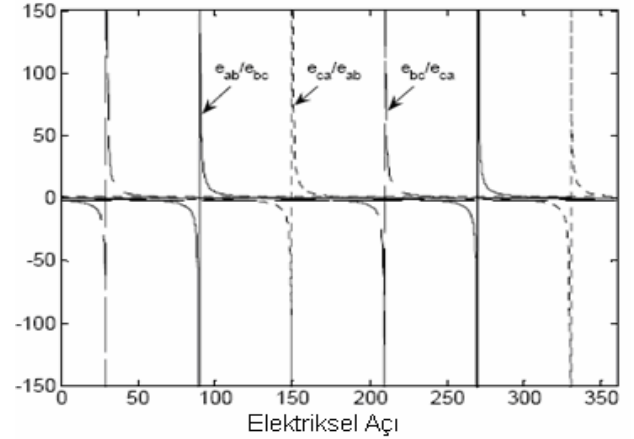
$$\text{Mod 1 ve 4: } CF(\theta)_2 = \frac{e_{bc}}{e_{ca}}$$

$$\text{Mod 2 ve 5: } CF(\theta)_3 = \frac{e_{ab}}{e_{bc}}$$

$$\text{Mod 3 ve 6: } CF(\theta)_1 = \frac{e_{ca}}{e_{ab}} \quad (5)$$



Şekil 2: (a) İverter anahtarlama durumları (b) üç faz zıt emk gerilim ve akımları (c) faz momentleri ve toplam moment



Şekil 3: Anahtarlama Fonksiyonu

Fırçasız doğru akım motorunda zıt emk denklem (3) ifade edildiği gibi açılma hızı ( $\omega_e$ ) bağlıdır. Dolayısıyla hız zıt emk kullanılarak tahmin edilebilir.

$$\hat{\omega}_e = \frac{\hat{E}}{K_e}$$

$$\hat{\omega}_m = \frac{2}{P} \hat{\omega}_e \quad (6)$$

Burada  $\hat{\omega}_m$  tahmin edilen mekanik hızı ve P ise kutup sayısını gösterir.

### 3.2. Akım Gözlemci

Denklem 1 ve 2 den akım gözlemci denklemlerini oluşturursak;

$$\begin{aligned}\hat{i}_a &= \frac{1}{LM} \left( V_{as} - R\hat{i}_{as} - x_a \right) \\ \hat{i}_b &= \frac{1}{LM} \left( V_{bs} - R\hat{i}_{bs} - x_b \right) \\ \hat{i}_c &= \frac{1}{LM} \left( V_{cs} - R\hat{i}_{cs} - x_c \right)\end{aligned}\quad (7)$$

$$x_{a,b,c} = K \text{sign}(\varepsilon_{a,b,c}) \quad (8)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_a &= \hat{i}_a - i_a \\ \varepsilon_b &= \hat{i}_b - i_b \\ \varepsilon_c &= \hat{i}_c - i_c\end{aligned}\quad (9)$$

### 3.3. Hız kestirim Algoritması

Gözlemlenen akımın gerçek akıma yakınsaması durumunda aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$x_a = e_b, \quad x_b = e_c \quad \text{ve} \quad x_c = e_a$$

$$x_a = \hat{i}_a - i_a, \quad x_b = \hat{i}_b - i_b \quad \text{ve} \quad x_c = \hat{i}_c - i_c \quad (10)$$

Anahtarlama fonksiyonu kullanılarak zıt emk tahmini yapılabileceğinden bahsetmiştik, denklem 2 ve 3 kullanılarak;

$$\begin{aligned}x_{at} &= x_a \frac{K_e}{E} \\ x_{bt} &= x_b \frac{K_e}{E} \\ x_{ct} &= x_c \frac{K_e}{E}\end{aligned}\quad (11)$$

Hız kestirimi için denklem 2, 6 ve 7 yeniden düzenlenirse;

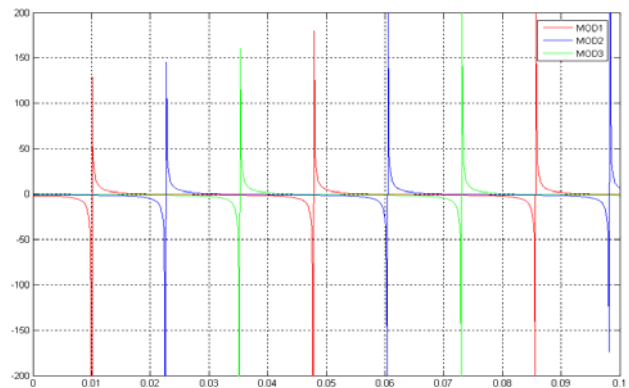
$$\hat{\omega}_e = \frac{2}{P} \sqrt{\frac{x_a^2 + x_b^2}{x_{at}^2 + x_{bt}^2}} \quad (12)$$

İfadesi elde edilir.

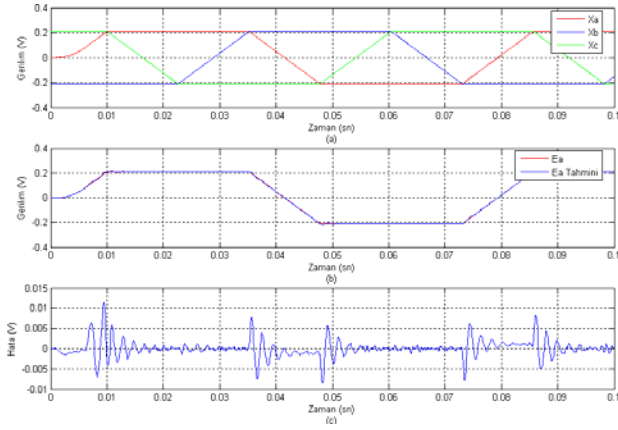
## 4. Sonuçlar

Aşağıda Şekil 4-7'de anahtarlama fonksiyonu, gerçek akım, zıt emk ve hız değişimleri ile bu durumlara ait kestirim sonuçları verilmiştir. Şekil 5'te verilen yüksüz çalışmadaki zıt emk kestirim hatasının yaklaşık % 0.1'in altında olduğu ve buna bağlı olarak akım ve hız kestirimlerinin de kabul edilebilir düzeylerde olduğu yine Şekil 6-7'den görülmektedir. Bu değerler akım gözetleyicinin ve hız kestirimin iyi sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Motor çalışmaya başladıktan 1 milisaniye sonra hata kabul edilebilir değerlere düşmektedir (%0.10'un altında) ve giderek azalmaktadır.

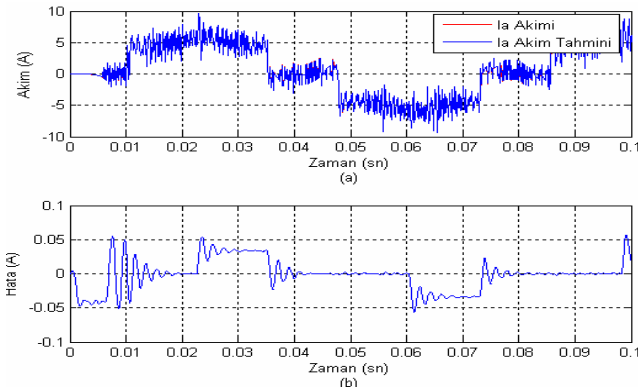
Sürekli mıknatıslı doğru akım motorları için önerilen akım gözlemci tabanlı hız kestirimi denklemleri benzetim sonuçları açıkça göstermiştir ki hız kestirim hatası oldukça düşüktür ve gözlemci gayet gürbüz çalışmaktadır. Bu sonuçlar önerilen algoritmanın hız kestiriminde gayet başarılı olduğunu göstermektedir.



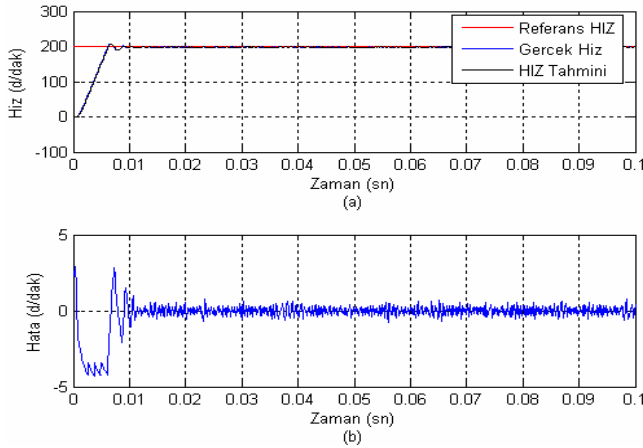
Şekil 4: Anahtarlama Fonksiyonu



Şekil 5: (a) Zıt emk tahminleri, (b)  $E_a$  ve  $\hat{E}_a$ , (c)  $\hat{E}_a$ 'nin tahmin hatası



Şekil 6: (a)  $i_a$  akımı ve tahmini, (b)  $i_a$  akım tahmin hatası



Şekil 7: (a) Referans, gerçek ve tahmin edilen hızlar, (b) Hız tahmin hatası

## 5. Kaynaklar

- [1] Park, B., Kim, T., Ryu, J., and Hyun, D., "Fuzzy Back-EMF Observer for Improving Performance of Sensorless Brushless DC Motor Drive", APEC'06 21st Annual Conf. 19 March 2006.
- [2] J.P.Johnson and M. Ehsani, "Review of sensorless methods for brushless DC," Proc. of the IEEE Industry Application Society Annual Meeting IAS'99, pp. 143-150, 1999.
- [3] B. K. Lee and M. Ehsani, "Advanced simulation model for BLDC motor Drives," Journal of Electric Power Components and Systems, vol. 31, no. 9, pp. 841-869, September 2003.
- [4] Kang, K., Kim, J., Hwang, K., and Kim, K., "Sensorless Control of PMSM in High Speed Range with Iterative Sliding Mode Observer", APEC'04 19<sup>th</sup> Annual Meeting, 2004.
- [5] Morimoto, S., Sanada, M., Takeda, Y., "Mechanical Sensorless Drives of IPMSM with Online Parameter Identification", IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 42, No. 5, September/October 2006
- [6] Ogasawara, S., and Akagi, H., "An Approach to Real-Time Position Estimation at Zero and Low Speed for a PM Motor Based on Saliency", IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 34, No. 1, January/February 1998.
- [7] Chen, Z., Tomita, M., Doki, S., and Okuma, S., "New Adaptive Sliding Observers for Position and Velocity-Sensorless Controls of Brushless DC Motors", IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 47, No. 3, June 2000