

# SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN BULANIK MANTIK GÖZLEMLEYİCİLİ ALGILAYICISIZ VEKTÖR KONTROLÜ

Bilal GÜMÜŞ<sup>1</sup>

Mehmet ÖZDEMİR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Dicle Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi 21280, Diyarbakır

<sup>2</sup> Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elazığ

<sup>1</sup>e-posta: bilgumus@dicle.edu.tr

<sup>2</sup>e-posta: mozdemir@firat.edu.tr

Anahtar sözcükler: Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor, Algılayıcısız Kontrol, Bulanık Mantık Gözlemleyicisi

## ABSTRACT

Recently PMSM are used in industrial applications because of their superiorities. Position information of the machine has great importance in vector control systems. However, determining the position information with sensors, especially in (PMSM) causes some disadvantages. For this reason, sensorless control systems are quite important for these machines.

In this study, a new method based on fuzzy logic observer has been proposed for sensorless vector control of permanent magnet synchronous machine. Position and the velocity information of the machine can be determined with the help of back emf components. Matlab/Simulink model is used for implementing the fuzzy logic observer.

## 1. GİRİŞ

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM), endüstriyel uygulamalarda günümüzde sıklıkla kullanılmaktadırlar. Özellikle bütünleşik tasarıma sahip olmaları, yüksek verimleri, sağlamlıkları, iş makinalarına şekilsel uyumlulukları öne çıkan avantajları olarak gösterilebilir. Buna karşın sürekli mıknatıs malzemelerinin fiyatlarının yüksekliği ve manyetik karakteristiklerinin zamanla değişmesi de dezavantajları olarak gözükmektedir [1-7]. SMSM'lar mıknatıslarının yerleştiriliş biçimlerine göre temel olarak iki gruba ayrılabilirler. Mıknatısları rotor yüzeyine yerleştirilen tip, yüzeysel sürekli mıknatıslı senkron motor (YSMSM), mıknatısları rotor ekseninin içine doğru yerleştirilen tip ise içsel sürekli mıknatıslı senkron motor (İSMSM) olarak adlandırılabilir.

Akıllı denetim metodlarından biri olan bulanık mantık uygulamalarda kolaylıklar sağlamak ve klasik

kontrol yöntemleri ile zorlukla başarılan veya analitik olarak çözülemeyen sistemlerde başarılı sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada, konum algılayıcısız vektör kontrol yönteminde, konum bilgisinin tespitinde bulanık mantık gözlemleyicisi kullanılmıştır.

SMSM'un bulanık mantık gözlemleyicili algılayıcısız vektör kontrol sistemi için, makina ve kontrol modeli ile bulanık mantık gözlemleyicisinin sayısal benzetimi oluşturulmuştur.

## 2. SMSM MODELİ

Bir Faz için makinenin elektriksel bağıntısı aşağıdaki gibi yazılabilir [5].

$$v = Z * i = Ri + \frac{d\Psi}{dt} = Ri + \frac{d}{dt}(Li + \Psi_m(\theta)) \quad (1)$$

Bu bağıntıda  $\Psi_m$  sürekli mıknatısın doğal magnetik akısını gösterir.  $\frac{d}{dt}\Psi_m(\theta)$  terimi ise zıt emk'ni

gösterir. Bu terim  $\frac{d\Psi_m(\theta)}{d\theta} * \omega_e$  şeklinde yazılabilir.

Burada  $\omega_e$  elektriksel açısal hızı gösterir. Makina sinüzoidal gerilimlerle beslendiğinde indüklenen gerilim aşağıdaki gibidir:

$$\bar{E} = -\omega_e \cdot \Psi_m \begin{bmatrix} \sin \theta_e \\ \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} = \omega_e \cdot \Psi_m [K(\theta_e)] \quad (2)$$

Sürekli mıknatıslı senkron motorun moment eşitliği, aşağıdaki gibi verilebilir.

$$T_e = p * [I_s]^T * \Psi_m * [K[\theta_e]] \quad (3)$$

Bu denklemde  $I_s$  stator akımlarını belirten matristir. Moment ifadesi daha açık haliyle yazılırsa:

$$T_e = p \cdot \Psi_m (I_a \cdot K_a(\theta) + I_b \cdot K_b(\theta) + I_c \cdot K_c(\theta)) \quad (4)$$

Stator akımlarının ifadelerinin (4) bağıntısında yerine konması ile moment eşitliği için aşağıdaki ifade elde edilir.

$$T_e = \frac{3}{2} p \cdot \Psi_m \cdot I_s \quad (5)$$

Mekanik bağıntının yazılması durumunda aşağıdaki bağıntı yazılabilir.

$$j \frac{d\omega_m}{dt} + K_d \cdot \omega_m + T_l = T_e \quad (6)$$

Bu bağıntıda  $K_d$  sürtünme katsayısını,  $T_l$  yük momentini,  $T_e$  ise indüklenen momenti ifade etmektedir.

SMSM d-q dönen eksen takımına göre matematiksel modeli, makine tipine göre farklılıklar göstermektedir. Genel olarak SMSM için d-q eksen takımındaki devre bağıntıları şöyle ifade edilebilir [4]:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_E \omega_e \end{bmatrix} \quad (7)$$

Bu bağıntıda  $v_d$  ve  $v_q$  sırasıyla d ve q eksenlerinin gerilimlerini;  $i_d$  ve  $i_q$  d ve q eksenlerinin akımlarını belirtir.  $R_s$  stator direncini,  $\omega_e$  elektriksel açısal hızı,  $K_E$  emk sabitini belirtirken  $L_d$  ve  $L_q$  ise d ve q eksenlerinin indüktanslarını ifade eder. İfadede yer alan  $p$  ise diferansiyel operatörüdür. YSMSM'da

$$L_d = L_q = L \quad (8)$$

şeklinde dir. Burada  $L$  stator indüktansını belirtmektedir. Dolayısıyla denklem de  $L_d$  ve  $L_q$  yerine  $L$  yazılarak aynı bağıntı YSMSM için kullanılabilir. Genel olarak ifade edilen bağıntı ise İSMSM'un matematiksel modelini oluşturmaktadır.

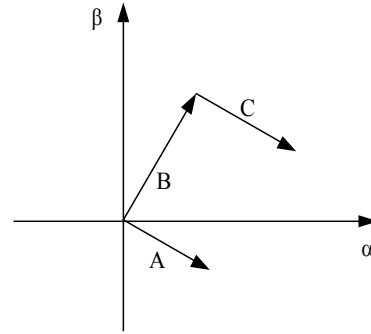
SMSM'un a,b,c faz modeli, gerekli dönüşümler kullanılarak,  $\alpha$ - $\beta$  duran eksen modeline dönüştürülebilir. YSMSM ile İSMSM'un yapısal farklılığı nedeniyle bu modelde de farklılıklar mevcuttur. YSMSM için  $\alpha$ - $\beta$  eksen takımında gerilim eşitliği :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL & 0 \\ 0 & R_s + pL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + K_E \omega_e \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (9)$$

şeklinde yazılabilir. Bu bağıntıda  $v_\alpha$  ve  $v_\beta$  sırasıyla  $\alpha$  ve  $\beta$  eksen gerilimlerini,  $i_\alpha$  ve  $i_\beta$   $\alpha$  ve  $\beta$  eksen akımlarını belirtir. Aynı bağıntı

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{R \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}}_A + \underbrace{pL \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}}_B + \underbrace{K_E \omega_e \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix}}_C \quad (10)$$

ile de ifade edilebilir. Bu bağıntıda C ile gösterilen kısım zıt emk' yı ifade eder[4]. Şekil 1'de YSMSM için fazör diyagramı gösterilmiştir.



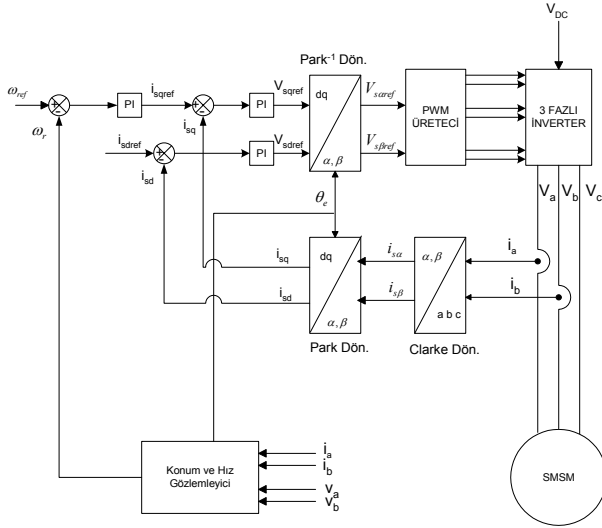
Şekil-1 Yüzeysel Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinenin Fazör diyagramı

### 3. SMSM'UN ALGILAYICISIZ VEKTÖR KONTROLÜ

SMSM'un vektör kontrol uygulamalarında hız algılayıcıları kullanmadan yapılan kontroller önem taşır. Vektör kontrol uygulamalarında, makinenin konum bilgisi, konum algılayıcıları (enkoderler) yardımıyla elde edilir. Ancak, bu algılayıcıların varlığı, sistem üzerinde birtakım olumsuzlukların oluşmasına neden olur. Bu olumsuzluklar makinenin boyutunun büyümesi, donanım yapısının karmaşıklaşması olarak sıralanabilir. Bu da, sürücü sisteminin sağlamlığını azaltan bir faktördür. Tüm bunların yanında algılayıcıların maliyeti de, sistem maliyetini arttırıcı bir unsurdur[1-4,6-7].

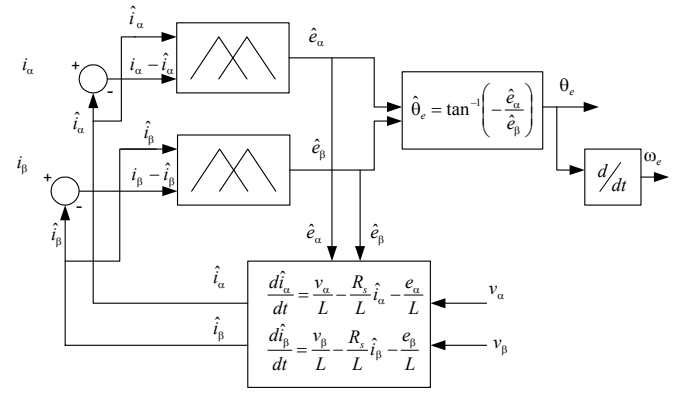
Algılayıcısız kontrolde temel amaç, makinenin konum ve dolayısıyla hız bilgisini mevcut veriler ışığında tahmin edebilmektir. Tahmin edilen konum ve hız bilgisi, kontrol uygulamasında kullanılmaktadır. Bunun için geliştirilmiş çeşitli tahmin yöntemleri vardır. Bunlar arasında, indüklenen zıt emk tespiti yardımıyla yapılan tahminler [1], kayan tipli tahminciler ile yapılanlar [2] ve makineye enjekte edilen gerilim yardımıyla yapılan tahminler[3,6] sayılabilir. Sistemin yüksek veya düşük hızlarda çalışması, kullanılan yöntemleri de belirlemektedir. Zira bazı yöntemler, yüksek hızlarda [1], bazıları da düşük hızlarda daha iyi sonuç vermektedir [2].

SMSM hız ve konum algılayıcısız vektör kontrol yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir. Kontrol yapısı incelendiğinde, konum algılayıcılı sistem (3.15) ile tek farkın, konum bilgisinin elde edilmesinde olduğu kolaylıkla görülebilmektedir. Bu sistemde konum, akım ve gerilimler yardımıyla hesap edilerek tahmin edilmektedir.



Şekil-2. Algılayıcısız Vektör Kontrol Yapısı

Konum tahmin yönteminin genel yapısı Şekil 4.'de gösterilmiştir.

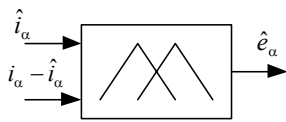


Şekil-4. Önerilen Konum Tahmin Mekanizmasının Genel Yapısı

#### 4. KONUM TAHMİNİ İÇİN ÖNERİLEN BULANIK MANTIK GÖZLEMLEYİCİSİNİN YAPISI

Konum tahmini zıt emk'nin  $\alpha$  ve  $\beta$  eksenlerindeki bileşenlerin tespitine dayanır. Bu bileşenler yardımıyla konum bilgisi tespit edilir. Hız ise, konumun türevi olduğundan, konum bilgisinin tespitinden sonra hesaplanır.

Bu işlem için iki adet bulanık mantık gözlemleyicisi önerilmiştir. Bunlardan her biri zıt emk bileşenlerinden birini tespit eder. Bulanık mantık gözlemleyicileri iki giriş ve bir çıkışa sahiptir. Girişlerden birincisi zıt emk'li hesaplanacak eksenin, tahmin edilen akımıdır. Diğer giriş ise, tahmin edilen akım ile akımın gerçek değeri arasındaki farktır. Çıkış fonksiyonu ise endüklenen zıt emk değeridir. Bulanık mantık gözlemleyicinin giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları için yedi etiket kullanılmıştır. Üyelik fonksiyonlarının sınır değerleri kullanılan SMSG'un parametreleri göz önüne alınarak belirlenmiştir. Bulanık mantık gözlemleyicisinin genel yapısı Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil-3. Önerilen Bulanık Denetleyicinin Giriş, Çıkış Fonksiyonları

Bulanık mantık gözlemleyicinin kuralları tahmin edilen akım ve akımın doğruluk derecesinin karşılaştırılması ile elde edilmiştir.

Konum tahmini, kayan kipli tahmin mekanizmaları ile benzerlik gösterir. Ancak bu yöntemde zıt emk, makine modeli yerine bulanık mantık gözlemleyiciden elde edilmektedir.

Bu yapıda SMS'un  $\alpha$ - $\beta$  eksen takımındaki akım ve gerilim bilgileri giriş değerleridir. Tahmin mekanizması sonucu elde edilen konum ve hız bilgisi, vektör kontrol mekanizmasındaki gerekli yerlere gönderilir.

Yöntemin genel yapısı şöyle açıklanabilir. Bulanık mantık gözlemleyicisi ile tespit edilen zıt emk değerleri;

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} &= \frac{v_\alpha}{L} - \frac{R_s}{L} \hat{i}_\alpha - \frac{e_\alpha}{L} \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} &= \frac{v_\beta}{L} - \frac{R_s}{L} \hat{i}_\beta - \frac{e_\beta}{L} \end{aligned} \quad (11)$$

bağıntilerinde kullanılarak, “ ^ ” üst indisi ile gösterilen, tahmin edilen akım değerleri bulunur. Bu değerler bulanık mantık gözlemleyicisinin giriş fonksiyonlarında kullanılmaktadır. Bulanık gözlemleyicinin çıkışında elde edilen zıt emk ifadeleri aynı zamanda;

$$\hat{\theta}_e = \tan^{-1} \left( -\frac{\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta} \right) \quad (12)$$

eşitliğinde yerine konularak, konum tespitinde kullanılır. Tespit edilen konumun yardımıyla, hız bilgisi tespit edilir.

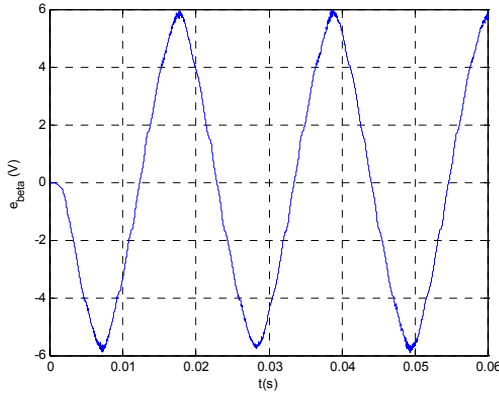
Böylelikle geri besleme sayesinde hatayı azaltacak yönde çalışan bulanık mantık gözlemleyicisi ile konum tespiti yapılmış olur. Önerilen sistem ile yüksek dereceden sistemin analitik çözümü, hata hesaplama ve düzeltme yöntemleri bertaraf edilmiş olur.

#### 5. BENZETİM SONUÇLARI

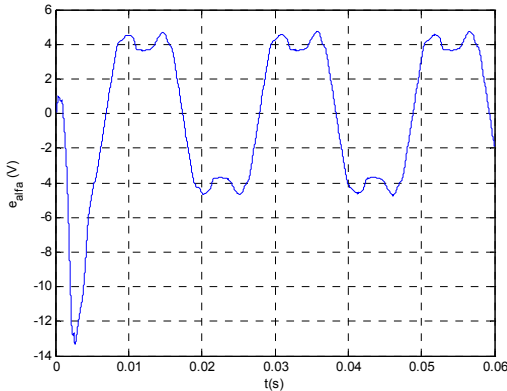
Önerilen tahmin yöntemiyle SMSG'un zıt emk'i bulanık mantık gözlemleyicisi ile tespit edilmiştir.

Algılayıcısız kontrolde, bulanık mantık gözlemleyicisinin kullanılması yeni bir yöntemdir. Yöntemin uygulanması için, MATLAB yazılım paketinin fuzzy araç kutusu kullanılmıştır. Bu araç kutusunda zıt emk'in  $\alpha$  ve  $\beta$  bileşenlerini hesaplayan bulanık mantık gözlemleyicileri hazırlanmıştır.

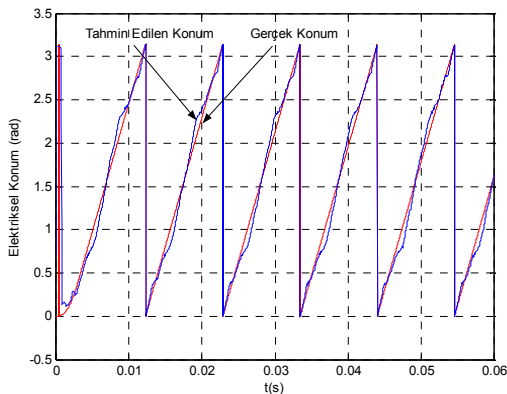
Bulanık mantık gözlemleyicinin tahmin ettiği zıt emk'in  $\alpha, \beta$  bileşenleri ve bu bileşenler yardımıyla tahmin edilen elektriksel konum bilgileri farklı referans hızlar için elde edilmiştir. (Şekil 5-13).



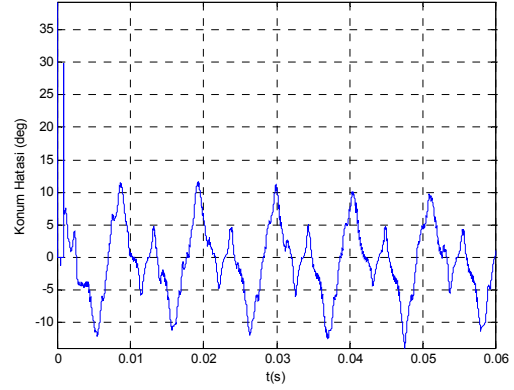
Şekil-5 300 rad/s için bulanık mantık gözlemleyicisi tarafından tahmin edilen zıt emk'in  $\beta$  bileşeni.



Şekil-6 300 rad/s için bulanık mantık gözlemleyicisi tarafından tahmin edilen zıt emk'in  $\alpha$  bileşeni.

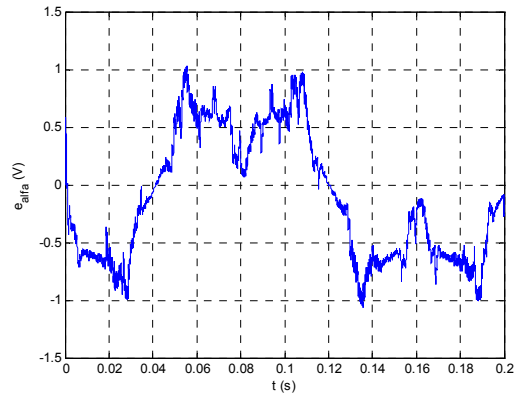


Şekil-7 300 rad/s için bulanık mantık gözlemleyicisi tarafından tahmin edilen elektriksel konum ve gerçek değeri.

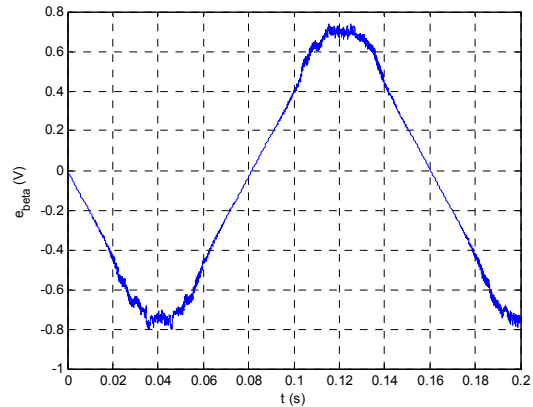


Şekil-8 300 rad/s için bulanık mantık gözlemleyicisi tarafından tahmin edilen elektriksel konumuna gerçek değere göre hatası.

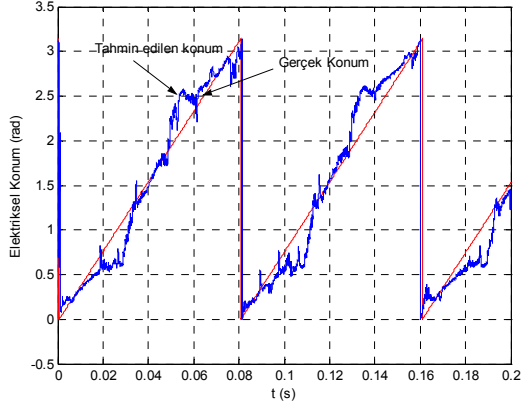
300 rad/s referans hız için elde edilen sonuçlarda elektriksel konum hatasının maksimum 10 derece olduğu gözlemlenmektedir (Şekil-8). Önerilen bulanık mantık gözlemleyicisi yüksek ve orta hızlarda yüksek doğrulukla tahmin yapabilmektedir.



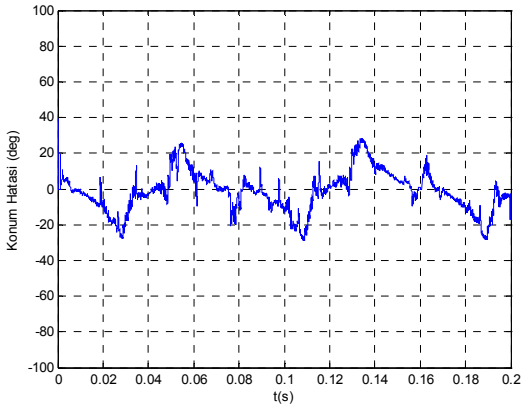
Şekil-9 40 rad/s için bulanık mantık gözlemleyicisi tarafından tahmin edilen zıt emk'in  $\alpha$  bileşeni.



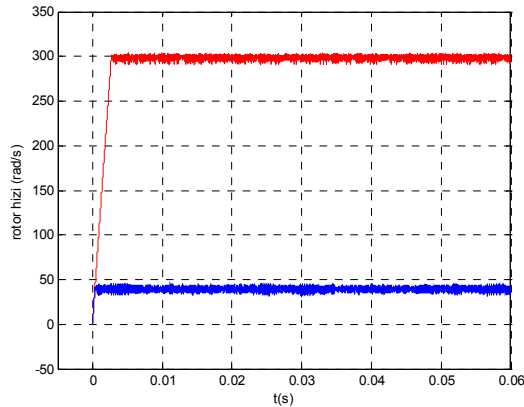
Şekil-10 40 rad/s için bulanık mantık gözlemleyicisi tarafından tahmin edilen zıt emk'in  $\beta$  bileşeni.



Şekil-11 40 rad/s için bulanık mantık gözlemleyicisi tarafından tahmin edilen elektriksel konum ve gerçek değeri.



Şekil-12 40 rad/s için bulanık mantık gözlemleyicisi tarafından tahmin edilen elektriksel konumuna gerçek değere göre hatası.



Şekil -13 300 ve 40 rad/s için rotor hızları

40 rad/s için alınan sonuçlar incelendiğinde gözlemleyicinin konum tahminindeki hatasının büyüdüğü ancak 20 derecesi aşmadığı gözlenmektedir (Şekil 12). Düşük hız sınıfında olan bu değerlerde bile gözlemleyicinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde tahmin yapabildiği görülmektedir. Bu durum önerilen yöntemin geniş hız aralığında kullanılabilirliğini göstermektedir.

## 6. SONUÇ

SMSM'un algılayıcısız kontrolü için çeşitli tahmin yöntemleri önerilmiştir. Bu çalışmada ise konum tahmininde bulanık mantık gözlemleyicisi önerilmiştir. Böylelikle diğer yöntemlerin getirdiği birçok hata hesabı algoritmalarının ve sabit değer atama işlemlerinin elimine edilebilmesi mümkün olmuştur. Önerilen yöntem 40 rad/s'lik hızlarda dahi yüksek doğrulukla konum tahmini yapabilmektedir. Dolayısıyla çok düşük hızlar haricinde gözlemleyicinin yüksek doğrulukla algılayıcısız kontrole hizmet edebileceği görülebilmektedir.

## EK

Tablo 1. Motor Parametreleri

| P<br>(W)                 | W<br>(rpm) | R <sub>S</sub><br>(Ω) | L <sub>d</sub><br>(H)   | L <sub>q</sub><br>(H)  |                        |
|--------------------------|------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| 75                       | 8000       | 5.25                  | 0,46 10 <sup>-3</sup>   | 0,46 10 <sup>-3</sup>  |                        |
| J<br>(kgm <sup>2</sup> ) | F<br>(Nms) | p                     | U <sub>n</sub><br>(220) | T <sub>m</sub><br>(Nm) | K <sub>e</sub><br>(Wb) |
| 9.9 10 <sup>-7</sup>     | 0          | 4                     | 19.1                    | 0.029                  | 0,0246                 |

## KAYNAKLAR

- [1] Batzel, T.D., Lee, K.Y., 2000, Slotless Permanent Magnet Synchronous Motor Operation without High Resolution Rotor Angle Sensor, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APP., Vol: 15 No: 4, December, pp: 366-6.
- [2] Consoli, A., Scarcella, G. and Testa, A., 2001, Industry Application of Zero-Speed Sensorless Control Techniques for PM Synchronous Motors, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APP., Vol: 37 No: 2, March/April, pp: 513-9.
- [3] Corley, M.J. and Lorenz, R.D., 1998, Rotor Position and Velocity Estimation for a Salient-Pole Permanent Magnet Synchronous Machine at Standstill and High Speeds, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APP., Vol: 37 No: 4, July/August, pp: 784-9.
- [4] Chen, Z., Tomita, M.D., Doki, S. and Okuma, S., 2003, An Extended Electromotive Force Model for Sensorless Control of Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APP., Vol: 50 No: 2, April, pp: 288-8.
- [5] Simon, T., 1999, Implementation Of A Speed Field Oriented Control Of 3-Phase PMSM Motor Using TMS320F240, TI APPLICATION REPORT SPRA588, Texas Instruments.
- [6] Tursini M, Petrella R., Parasitelli F, "Initial Rotor Position Estimation Method for PM Motors" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APP., Vol:39, No:6, Nov-Dec 2003, p 1630-1640.
- [7] Kojabadi H, M, Ahrabian G., Simulation and Analysis of the Interior Permanent Magnet Synchronous Motor as a Brushless AC Drive, SIMULATION PRACTICE AND THEORY 7, 2000, p. 691-707.