

# Anahtarlamalı Bir Relüktans Motorun Konum Algılayıcısız Hibrid Gözlemci Modeli

Aydın ÇETİN  
Muğla Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi  
Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü  
48000 Kötekli, MUĞLA

## ÖZET

Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM) hız ve konum denetimi için hassas rotor konum bilgisine gereksinim duyarlar. Ancak, ARM'lerde konum algılayıcı kullanımı hem motor sürme devresinin boyutlarını ve maliyetini arttırmakta hem de sistemin zor çalışma ortamlarında kullanımını sınırlandırmaktadır. Bu makalede, ARM'lerin konum algılayıcısız çalıştırılması için yeni bir hibrid gözlemci yaklaşımı sunulmaktadır. ARM modeli elektromekanik ve elektromanyetik olmak üzere iki modele ayrıştırılmıştır. Ayrıştırılan motor modeline uygulanan hibrid gözlemci modeli Luenberger ve kayma kipli gözlemci kuramlarından elde edilmiştir. Geliştirilen gözlemci ile kayma kipli gözlemciye titreşim sebebiyle (chattering) meydana gelen sorunlar ve Luenberger gözlemcinin parametre hassasiyeti sorunu ortadan kaldırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler :** ARM, Hibrid Gözlemci, Algılayıcısız Çalışma, Kayma Kipli Gözlemci, Luenberger Gözlemci

## Sensorless Hybrid Observer Model of a Switched Reluctance Motor

### ABSTRACT

Switched reluctance motor (SRM) drive generally requires rotor position information for speed and position control. However, position sensor use in SRM drives increases the cost and size of the motor drive and limits its operating environment. In this paper, a new observer approach for indirect position sensing of an SRM drive system is presented. SRM is decomposed of two, electromechanical and electromagnetic, models. Hybrid observer has been developed in conjunction with sliding mode and extended Luenberger observer theories. Hybrid observer removes chattering problem occurred in sliding mode observer, and has the robustness for parameter variations.

**Key Words :** SRM, Hybrid Observer, Sensorless Operation, Sliding Mode Observer, Luenberger Observer

### 1. GİRİŞ

Anahtarlamalı relüktans motorlar (ARM) yarıiletken teknolojisinin gelişmesiyle birlikte araştırma konusu olmuş ve süregelen çalışmalar sonucu değişken hız uygulamalarında endüstride kendine pay bulmaya başlamıştır. Bunun başlıca nedenlerinden bazıları olarak düşük maliyetleri, yüksek hızlarda, zor çalışma şartları altında çalışabilmeleri, dayanıklı yapıda olmaları ve yüksek verimli olmaları sayılabilir. Bu özelliklerinden dolayı ARM'ler büyük güçlü endüstriyel uygulamalardan küçük güçlü ev cihazlarına kadar birçok alanda uygulanabilirler.

ARM'lerin çalışabilmesi için rotor konum bilgisine gereksinim duyulmaktadır. Rotor konum bilgisi aynı zamanda etkin bir hız ve moment denetimi için de gereklidir. Rotor konum bilgisi genellikle statora yerleştirilen veya rotor miline bağlanan algılayıcılarla elde edilmektedir. Bu algılayıcılar ise motora ilave bir maliyet getirmekte ve zor çalışma ortamlarında motorun çalışmasını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle motorun çalışma alanlarının genişletilmesi ve maliyetin düşürülmesi için motorun konum algılayıcısız bir şekilde çalışabilmesi gerekmektedir.

Literatürde ARM'lerin konum algılayıcısız çalışmalarına ilişkin çok sayıda yayın bulmak mümkündür. Bu yayınlarda kullanılan konum algılayıcısız çalışma yöntemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

#### A. Aktif ölçüm yöntemleri [1-4]

1. Dalga şekli algılama [1]
2. Manyetik akı algılama [2]
3. Modülasyon tabanlı yöntemler[3,4]
  - i. Frekans modülasyonu
  - ii. Genlik modülasyonu
  - iii. Genlik/faz modülasyonu

#### B. Motor karakteristiklerine dayalı yöntemler [5-15]

1. Açık döngü denetim [5]
2. Manyetik akı/Akım yöntemi[6]
3. Ortak gerilim yöntemi[7]
4. Bulanık mantık ve yapay zeka yöntemleri [8-10]
5. Model tabanlı (gözlemci) yöntemler
  - i. Durum gözlemci [11]
  - ii. Kalman filtre[12]
  - iii. Luenberger gözlemci [13]
  - iv. Kayma kipli gözlemci [14,15]

olmak üzere gruplandırılabilir.

Önerilen konum algılayıcısız çalışma yöntemlerinin her birinin kendine has üstünlükleri veya sakıncaları bulunmaktadır. Önerilen yöntemlerden bazıları donanım yoğunluklu, bazıları veri yoğunluklu bazıları ise işlem yoğunlukludur. Örneğin önerilen yöntemlerden modülasyon tabanlı yöntemler donanım yoğunluklu olup ek ölçüm devrelerine gereksinim duyarlar. Manyetik akı ve akım yöntemleri yoğun veri işlenmesine ve dolayısıyla ek bellek birimlerine gereksinim duyarlar. Model tabanlı yöntemler ise yoğun işleme dayalı yöntemlerdir. Motora ait bilgiler ve ölçümlerin kullanılarak motora ait durum değişkenlerinin tahminine dayanır. Bu amaçla fiziki sisteme paralel bağlı olarak sistemi temsil eden bir benzetici (simülasyon) diğer adı ile gözlemci kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin başarımlarının yüksek olması için ise hızlı mikroişlemciler veya sayısal işaret işlemciye gereksinim duyulmaktadır. Tüm konum algılayıcısız çalışma yöntemlerinde asıl amaç konum bilgisinin yüksek hassasiyetle elde edilmesi ve dolayısıyla motorun çalışma başarımının artırılmasıdır. Bu makalede şimdiye kadar önerilen model tabanlı yöntemlerden kayma kipli gözlemciye titreşim sebebiyle (chattering) meydana gelen sorunlar ve Luenberger gözlemcinin parametre hassasiyeti sorunu ortadan kaldırılması için her iki gözlemci kuramını kullanarak bir hibrid gözlemci yapısı geliştirilmiştir.

## 2. HİBRİD GÖZLEMCİ MODELİ

ARM'nin modellemesini basitleştirmek amacıyla burada manyetik devre doğrusal kabul edilmiş ve ortak endüktans ihmal edilmiştir. Sistemin modellenmesinde tüm fazlar dikkate alınmıştır. ARM'nin eşdeğer devre modelinden, motor uçlarındaki gerilim faz akımları ve manyetik akı herhangi bir faz için Eş. (1) ile ifade edilmektedir.

$$v = Ri + \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

Manyetik devrenin doğrusal olduğu varsayılarak manyetik akı ve faz akımları arasındaki ilişki,

$$\psi = L(\theta) i \quad (2)$$

dir. Eş. (2)'de  $L(\theta)$  endüktans matrisi ve  $\theta$  ise rotor konumudur. Enerjinin korunumu kanunundan ve manyetik

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_a} \left( R_a + \frac{dL_a}{dt} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_b} \left( R_b + \frac{dL_b}{dt} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_c} \left( R_c + \frac{dL_c}{dt} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_d} \left( R_d + \frac{dL_d}{dt} \right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{2J} \frac{dL_a}{d\theta} i_a & \frac{1}{2J} \frac{dL_b}{d\theta} i_b & \frac{1}{2J} \frac{dL_c}{d\theta} i_c & \frac{1}{2J} \frac{dL_d}{d\theta} i_d & 0 & -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

devrenin doğrusal olduğu varsayımından, makinarya ait mekaniksel eşitlikler,

$$J \frac{d\omega}{dt} = T - T_L - B\omega \quad (3)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (4)$$

$$T = \frac{1}{2} \left( \sum_{n=1}^4 i_n^2 \frac{\partial L_n(\theta)}{\partial \theta} \right) \quad (5)$$

olarak elde edilir. Eşitliklerde;  $\omega$  rotor açısal hızı,  $B$  sürtünme katsayısı,  $J$  rotor ve yük ataleti,  $T_L$  yük momenti,  $T$  üretilen elektromanyetik momenttir.

Eş. (1-5) kullanılarak motora ait eşitlikler, durum uzayı formunu elde etmek amacıyla,

$$\frac{d}{dt} i_n = -\frac{R_n}{L_n} i_n - \frac{1}{L_n} \frac{d}{dt} i_n + \frac{1}{L_n} V_n \quad (6)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{J} B\omega + \frac{1}{J} T - \frac{1}{J} T_L \quad (7)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (8)$$

yazılabilir. Durum uzay formu elde edilirken, yük momentinin bilinmediği gerçeğinden hareketle, yük momenti de durum değişkeni olarak tanımlanacaktır. Durum uzay formunda dört fazlı ARM modeli Eş. (9) ve (10) ile yazılabilir.

$$\dot{x} = Ax + B.v \quad (9)$$

$$y = C.x \quad (10)$$

Eş. (5.9) ve (5.10)'da,

$$x = [i_a \ i_b \ i_c \ i_d \ \theta \ \omega \ T_L]^T \quad (11)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_b} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_c} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_d} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

D=0, ve

$$v = [V_a \ V_b \ V_c \ V_d \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (14)$$

dir.

A matrisi, Eş. (15)'te olduğu gibi de yazılabilir.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_a} \frac{dL_a}{d\theta} i_a & 0 \\ 0 & -\frac{R_b}{L_b} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_b} \frac{dL_b}{d\theta} i_b & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_c}{L_c} & 0 & 0 & -\frac{1}{L_c} \frac{dL_c}{d\theta} i_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{R_d}{L_d} & 0 & -\frac{1}{L_d} \frac{dL_d}{d\theta} i_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{2J} \frac{dL_a}{d\theta} i_a & \frac{1}{2J} \frac{dL_b}{d\theta} i_b & \frac{1}{2J} \frac{dL_c}{d\theta} i_c & \frac{1}{2J} \frac{dL_d}{d\theta} i_d & 0 & -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Eş. (12) ve (15) aynı modele ait durum matrisleridir. Bu eşitliklerde verilen durum matrisleri Eş. (16)'da olduğu gibi ayrıştırılabilir.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Bu durumda Eş. (16) da  $A_{11}$  ve  $A_{12}$ , Eş. (15) için;

$$A_{11}^* = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_b}{L_b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_c}{L_c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{R_d}{L_d} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$A_{12}^* = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_a} \frac{dL_a}{d\theta} i_a & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_b} \frac{dL_b}{d\theta} i_b & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_c} \frac{dL_c}{d\theta} i_c & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_d} \frac{dL_d}{d\theta} i_d & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Eş. (12) için ise;

$$A_{11} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \left( R_a + \frac{dL_a}{dt} \right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_b} \left( R_b + \frac{dL_b}{dt} \right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_c} \left( R_c + \frac{dL_c}{dt} \right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_d} \left( R_d + \frac{dL_d}{dt} \right) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$A_{12} = 0$  dir.

Eş. (12) ve (15) için, Eş. (16)'daki  $A_{21}$  ve  $A_{22}$  matrisleri ise,

$$A_{21} = \frac{1}{2J} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{dL_a}{d\theta} i_a & \frac{dL_b}{d\theta} i_b & \frac{dL_c}{d\theta} i_c & \frac{dL_d}{d\theta} i_d \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$A_{22} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 & J & 0 \\ 0 & -B & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

dir.

Eş. (12) ve (15) teki durum matrisleri aynı modele ait olmalarına rağmen bu matrislerin ayrıştırılması sonucu ortaya çıkan alt matrisler  $A_{11}$  ve  $A_{12}$ , birbirinden

farklıdır. Bu farklılığı vurgulamak amacıyla " \* " indisi kullanılmıştır.

Gözlemci tasarımında konum algılayıcısız çalışma için asıl tahmin edilecek durum değişkenleri hız, konum ve yük momentidir. Bu durum değişkenleri ayrıştırma sonucu elde edilen  $A_{12^*}$  alt durum matrisinde durum değişkenine göre türev ifadesi yer almaktadır.  $A_{12}$  alt matrisi ise 0 dir ve durum değişkenlerinden hiçbirisi bu durum matrisinde yer almamaktadır. Böylece gözlemci tasarımında kullanılacak motor modeli Eş. (22)'de olduğu gibi elektromanyetik kısım ve elektromekanik kısım olmak üzere iki kısma ayrılabilir. Elektro-manyetik kısma ait durum matrisinde tahmin edilecek durum değişkenleri hız, konum ve moment yer almamaktadır. Elektromekanik kısma ait durum matrisinde ise tüm durum değişkenleri bulunmaktadır.

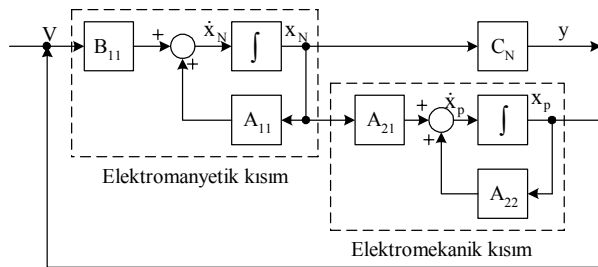
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_N \\ \dot{x}_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_N \\ x_P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Eş. (22) de;  $B_{12}$ ,  $B_{21}$  ve  $B_{22}$  matrisleri sıfır değerlidir.  $B_{11}$  matrisi ise,

$$B_{11} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_d} \end{bmatrix} \quad (23)$$

dir. Böylece, ARM'nin ayrıştırılmış modeli durum uzay formunda Şekil 1'de olduğu gibi temsil edilebilir. Modelde, akımlar ölçülebildiği için,  $C = C_N$  olarak yazılabilir.

$$C_N = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_d} \end{bmatrix} \quad (24)$$



Şekil 1. Durum uzayı formunda ARM'nin ayrıştırılmış modeli

Aslında, elektromanyetik kısımda sadece akımlar durum değişkeni olarak yer aldığından ve akımlar ölçüldüğünden indirgenmiş dereceli bir gözlemci yapısı elde etmek mümkündür. Ancak, daha önce Elmas (13) tarafından yapılan çalışmalardan bildirildiği şekliyle, indirgenmiş dereceli genişletilmiş Luenberger gözlemci tüm durum değişkenlerini kapsamadığından, parametre değişmelerinden ve gürültüden önemli ölçüde etkilenmektedir. Uygulamada ölçmedeki gürültüyü azaltmak için filtre kullanılsa da, ölçme hataları ve gözlemcide kullanılan sayısal yöntem dikkate alındığında bu durum etkili olacak ve gözlemcinin başarımı düşecektir. Bu nedenle tam dereceli gözlemci kullanmak daha yerinde olacaktır. Tam dereceli genişletilmiş Luenberger gözlemci kullanılsa da, deterministik yapısı nedeniyle Luenberger gözlemcide aynı sorunlarla karşılaşmak mümkündür. Diğer yandan, Şekil 1'de verilen model, aslında doğrusal bir modeldir ve ARM'nin doğrusal olmayan yapısını tam olarak temsil etmemektedir. Her ne kadar ayırık zaman aralığında Taylor serileri kullanılarak doğrusal çözüm mümkün olsa da bu yapı parametre değişimlerinden ve belirsizliklerden etkilenbilir. Bu nedenle gözlemci tasarımında elektromanyetik kısım için parametre değişimlerinden etkilenmeyen kayma kipli gözlemci kullanılmıştır.

Kayma kipli gözlemci yapısı itibarı ile süresiz giriş ifadesine (k) sahip olduğundan hız, konum ve moment tahminlerinde titreşim (chattering) sorunları ortaya çıkmaktadır. Tahmin edilen değerlerdeki bu titreşim bilhassa hız denetiminde kararsızlıklara neden olabilir. Bu nedenle elektromekanik kısmı için Luenberger gözlemci yapısı kullanılacaktır. ARM için kullanılan bu gözlemci yapısı, iki farklı tip gözlemciden oluştuğu için hibrid gözlemci olarak adlandırılmıştır.

Böylece, ARM için hibrid gözlemci modelinde elektromanyetik kısım için kayma kipli gözlemci,

$$\dot{\hat{x}}_N = A_{11} \hat{x}_N + B_{11} V - K \cdot \text{sgn}(\sigma) \quad (25)$$

olarak tanımlanabilir. Eş. (24)'de

$$\sigma = x_N - \hat{x}_N \quad (26)$$

ve kayma şartı için,  $\dot{\sigma} < 0$  dir.

ARM için hibrid gözlemci modelinde elektromekanik kısım için Luenberger gözlemci,

$$\dot{\hat{x}}_P = A_{22} \hat{x}_P + L_P y_P + z_P \quad (27)$$

olarak tanımlanabilir. Eş. (27)'de,

$$y_P = \dot{x}_N - A_{11} x_N - B_{11} V \quad (28)$$

$$z_P = A_{21} x_N \quad (29)$$

dir.

Elektromekanik kısım için gözlemci kazanç matrisi,  $L_P$ ,

$$\left[ \lambda I - A_{11}^T \mid C_N^T \right] \xi = 0 \quad (30)$$

eşitliği kullanılarak veya durum geri besleme kullanarak kutup yerleştirme yöntemiyle bulunabilir. Diğer yandan, akımlar kayma kipli gözlemci tarafından tahmin edildiğinden, elektromekanik kısımda tahmin edilecek olan hız, konum ve moment değerleri için indirgenmiş dereceli Luenberger gözlemci yapısı kayma kipli gözlemci yapısı ile birlikte kullanılabilir.

Kayma kipli gözlemci akım tahmini gerçekleştireceğinden, akımlar için hata eşitliği,

$$\dot{e}_N = F_{11} e_N + k_N v_N \quad (31)$$

olarak yazılabilir. Hatanın sıfıra Şekil 2’de olduğu gibi yakınsaması ve kayma kipli gözlemcide titreşimin engellenmesi için giriş sürekli olacak şekilde yapılarak, Eş. (31) için,

$$v_N = \mu_N |\sigma_N| \quad (32)$$

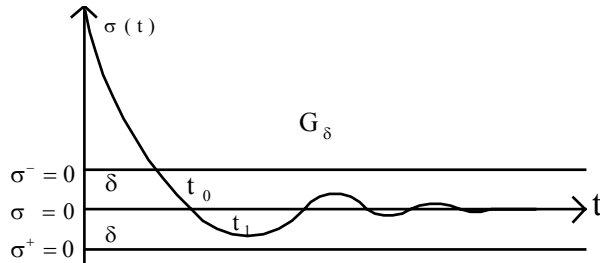
$$\dot{\mu}_N = -\alpha_N (\mu_N - \text{sgn}(\sigma_N)) \quad (33)$$

$$G_\sigma = x_N : \sigma^+ \cdot \sigma^- < 0 \quad (34)$$

$$-\mu_N(t_1) \text{sgn}(\sigma_N(t_1)) \geq 1 - h \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \sigma^+ &= \sigma + \delta & \sigma^- &= \sigma - \delta \\ 0 \leq \delta < 1 & & 0 < h < 1 \end{aligned} \quad (36)$$

olur.



Şekil 2. Elektromanyetik kısım için kayma kipli gözlemci karakteristiği

Akımlardaki ölçme hatasının sıfıra yakınsaması için akım kazancı  $k_N$ ,

$$\left. \begin{aligned} F_{11} e_N + k_N \mu_N |\sigma_N| > 0 \\ \mu_N(t_1) \leq h - 1 \end{aligned} \right\} \sigma_N > 0, \quad (37)$$

$$k_N > \frac{1}{(h-1)\delta} [F_{11}\delta], \quad \sigma_N > 0, \quad (38)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{11} e_N + k_N \mu_N |\sigma_N| > 0 \\ \mu_N(t_1) \geq 1 - h \end{aligned} \right\} \sigma_N < 0, \quad (39)$$

$$k_N > \frac{1}{(1-h)\delta} [F_{11}\delta], \quad \sigma_N < 0, \quad (40)$$

olur. Kararlılık için, akım kazancı Eş. (41)’i sağlamalıdır.

$$k_N > \max \left\{ \begin{aligned} \sup & \left| \frac{1}{(h-1)\delta} F_{11}\delta \right| \\ \sup & \left| \frac{1}{(1-h)\delta} F_{11}\delta \right| \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

### 3. HİBRİD GÖZLEMCI AYRIK ZAMANLI MODELİ

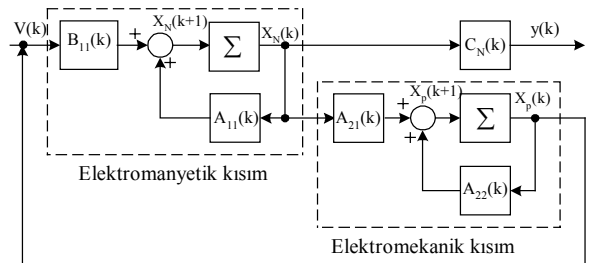
Hibrid gözlemcinin bir mikroişlemci veya sayısal işaret işlemci ile kullanılabilmesi için gözlemcinin ayrık zamanlı modelinin çıkarılması gerekmektedir. İleri yaklaşım yöntemi ile sistem,

$$x(k+1) = x(k) + ts.f(x(k), \theta(k), \omega(k), T_L(k)) + B.v(k) \quad (42)$$

olarak temsil edilebilir. Eş.(42)’de  $x(k)$  mevcut durum,  $x(k+1)$  tahmin edilecek bir sonraki durum ve  $ts$ , örnekleme aralığıdır. Hibrid gözlemci için motorun genel ayrık zamanlı modeli,

$$\begin{bmatrix} x_N(k+1) \\ x_p(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(k) & A_{12}(k) \\ A_{21}(k) & A_{22}(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_N(k) \\ x_p(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11}(k) & B_{12}(k) \\ B_{21}(k) & B_{22}(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(k) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (43)$$

olarak elde edilir. Şekil 3’de ARM’nin ayrık zamanlı model blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 3. ARM ayrık zamanlı model blok diyagramı

Eş(19-25)’ kullanılarak,

$$A_{11}(k) = \begin{bmatrix} 1 - ts \frac{R_a}{L_a} + \alpha_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - ts \frac{R_b}{L_b} + \alpha_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - ts \frac{R_c}{L_c} + \alpha_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - ts \frac{R_d}{L_d} + \alpha_d \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$A_{21}(k) = \frac{1}{2J} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{da}(k) & \alpha_{db}(k) & \alpha_{dc}(k) & \alpha_{dd}(k) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$x_N(k) = [i_a(k) \ i_b(k) \ i_c(k) \ i_d(k)]^T \quad (46)$$

$$D=0,$$

$$v(k) = [V_a \ V_b \ V_c \ V_d \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (47)$$

$$A_{22}(k) = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 & t_s * J & 0 \\ 0 & 1 - t_s * B & 1 - t_s \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (48)$$

ve

$$B_{11} = \begin{bmatrix} \frac{1}{t_s L_a} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{t_s L_b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{t_s L_c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{t_s L_d} \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$C_N(k) = \begin{bmatrix} \frac{1}{t_s L_a} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{t_s L_b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{t_s L_c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{t_s L_d} \end{bmatrix} \quad (50)$$

olacak şekilde yazılabilir.

#### 4. HİBRİD GÖZLEMCİ BENZETİM SONUÇLARI

Geliştirilen gözlemcinin ARM üzerindeki başarımını test etmek amacıyla benzetimi gerçekleştirilmiştir. Benzetimde kullanılan ARM'nin parametreleri aşağıdaki değerlerde seçilmişlerdir.

motor gücü=5.5 Hp

$V_K = 400$  volt,  $L_{\max} = 120$  mH,  $L_{\min} = 14$  mH (1A. için)

$I_n = 8$  Amper  $R_f = 0.96 \ \Omega$   $J = 0.053 \text{ kg.m}^2$

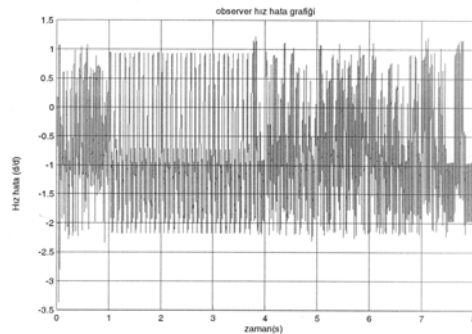
$n_{\max} = 1500$  d/d  $N_s/N_r = 8/6$   $B = 0.008 \text{ N.m.s.rad}^{-1}$

Benzetimde sayısal integrasyon için Euler yöntemi kullanılmıştır. Euler yöntemi doğrusal bir yöntem olduğundan benzetim sayısal hatalar içerebilir. Ancak, Euler yönteminden kaynaklanan sayısal hatalar adım aralığı daraltılarak azaltılabilir. Bu durumda gözlemcinin, sayısal işaret işlemcisinde yapacağı işlem sayısı artacağından uygulamada elde edilecek tahmin, benzetim sonuçlarından farklılık gösterebilir. Akımların 20MHz'lik (örneğin TMS320F240) Sİİ'de dönüştürülmesi ve dönüştürülen değerlerin alt programda işlenmesi için gereken süre 25µs dir. Gerek benzetimde

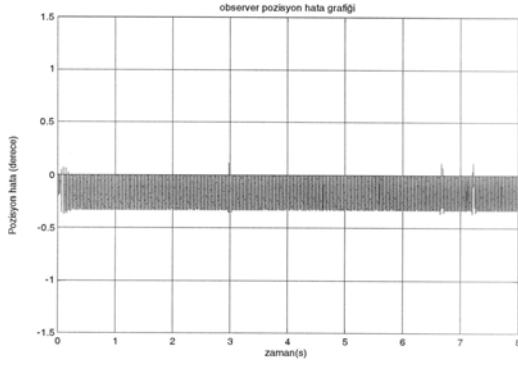
kararlılığı sağlamak, gerekse ayrılan zaman içerisinde hatayı mümkün olan en küçük seviyeye düşürmek ve gözlemcinin kararlılığını desteklemek için benzetimde adım aralığı 0.0001s. olarak alınmıştır. Bu değer sistem özdeşliğinin en küçük değerinin tersinden daha da küçük bir değerdir.

Gözlemcinin benzetimi yüksüz ve farklı yükler altında çalışmalar için gerçekleştirilmiştir. Gözlemcinin başlangıç durum ve model hatalarından etkilenip etkilenmediğini araştırmak amacıyla yüksüz çalışma ve farklı yükler altındaki başarımı aynı zamanda başlangıç değer ve model hataları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Konum ve hız tahmini için Luenberger gözlemci kutupları [-0.0015 -0.015] olarak alınmıştır. Kayma kipli gözlemcide K değeri, gözlemcinin kararlılığı açısından oldukça önemlidir. Bu değer Eş. (40)'ı sağlayacak şekilde 0.015 olarak alınmıştır. K değeri kayma kipli gözlemcinin yapısı gereği motorun zıt emk'si ile ilişkilidir. Zıt emk ise motor hızıyla ilişkilidir. Bu nedenle K değerinin aynı zamanda zıt emk'nin bir işlevi olması sebebiyle, uygun olmayan K değeri sonucu hız değişimleri sebebiyle titreşimler (chattering) meydana gelebilir. Bu durum K değerinin zıt emk'nin bir işlevi olacak şekilde adaptif özellikte seçilmesi sonucu giderilebilir. Gözlemcinin genel başarımında K değerinin yanı sıra fazların iletim ve kesme açısı değerlerinin de etkisi vardır. İletim ve kesme açılarının etkili bir şekilde denetlenmesi sonucu hem motorun genel başarımı hem de gözlemcinin genel başarımı artırılabilir. Bu nedenle benzetim çalışmalarında iletim ve kesme açılarının gözlemci başarımına olan etkisi de irdelenmiştir.

Benzetimde ilk olarak başlangıç hatası olmadan gözlemcinin motorun yüksüz çalışması altındaki tahmin hatası incelenmiştir. Şekil.4'de gözlemcinin hız hata grafiği ve Şekil 5'te gözlemcinin konum hata grafiği görülmektedir. Şekil 4'de görüldüğü gibi, başlangıçta çok kısa bir süre için hız hatası yaklaşık 3.5 d/d civarında olup bu değer daha sonra en fazla 2.5 d/d değerine çıkmaktadır. Buna karşılık Şekil 5'te verilen hata grafiğinde konum hata değeri başlangıçta en fazla 0.4 derece civarında olup daha sonra aynı değerler aralığında devam etmektedir. Luenberger gözlemci yapısının bu şekilde hızdaki hatayı kısmen filtre ettiği gözlemlenmektedir.

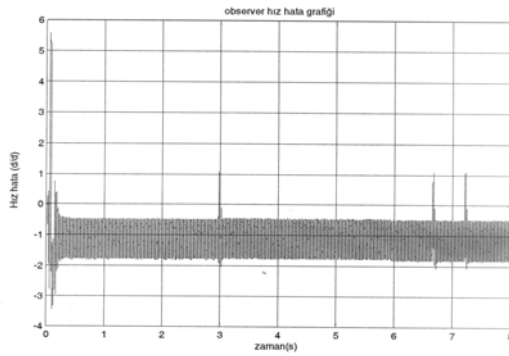


Şekil 4. Yüksüz çalışma altında gözlemci hız hata grafiği

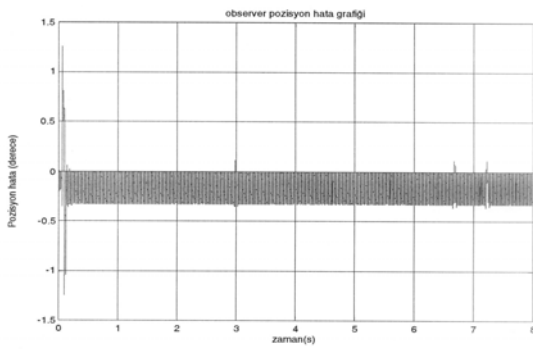


Şekil 5. Yüksüz çalışma altında gözlemci konum hata grafiği

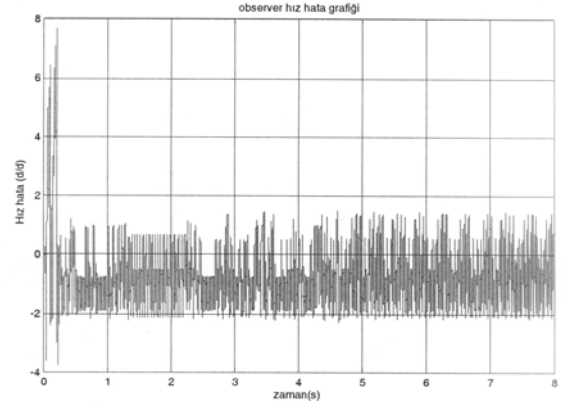
Gözlemcinin benzetimdeki başarımı aynı şekilde sırasıyla 2, 4 ve 6 Nm'lik yükler ile test edilmiştir. Benzetim sonucu elde edilen hız ve konum hata grafikleri Şekil 6 – 11' de verilmiştir.



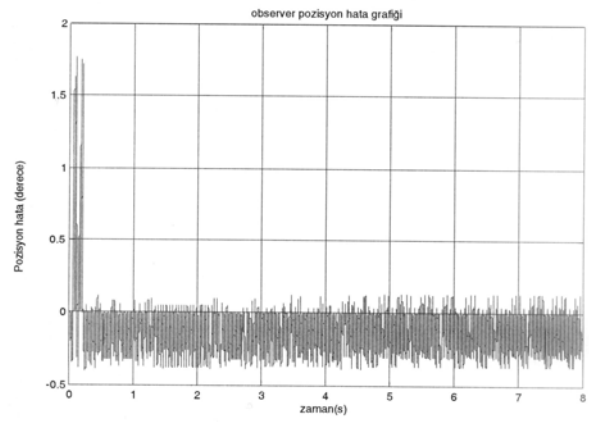
Şekil 6. 2 Nm yüklü çalışma altında gözlemci hız hata grafiği



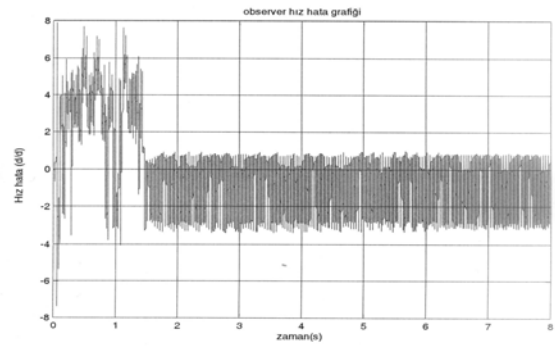
Şekil 7. 2 Nm yüklü çalışma altında gözlemci konum hata grafiği



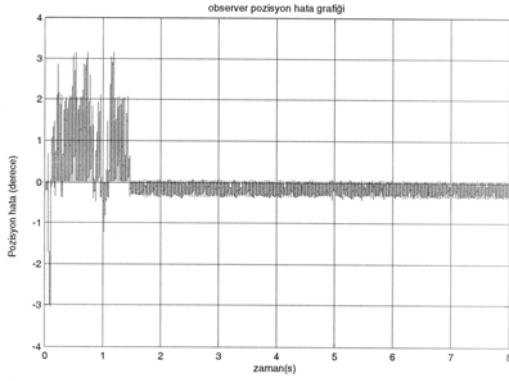
Şekil 8. 4 Nm yüklü çalışma altında gözlemci hız hata grafiği



Şekil 9. 4 Nm yüklü çalışma altında gözlemci konum hata grafiği

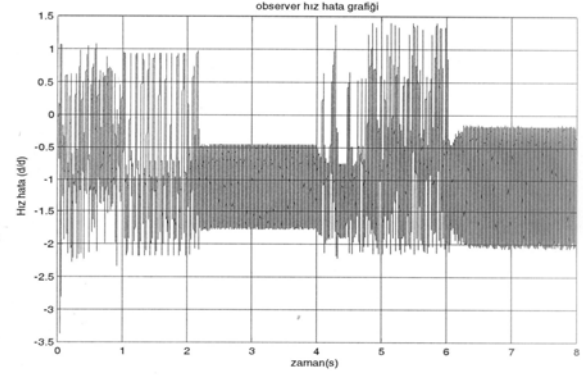


Şekil 10. 6 Nm yüklü çalışma altında gözlemci hız hata grafiği

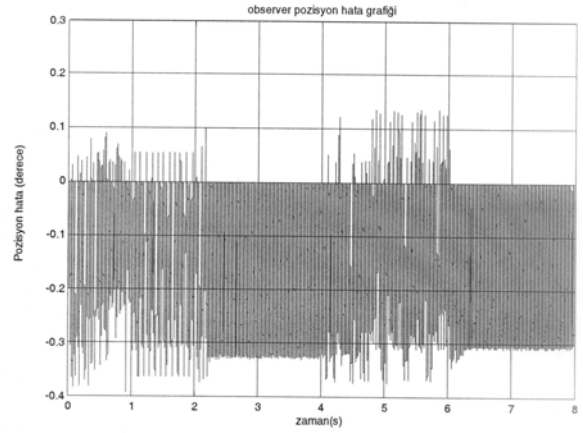


Şekil 11. 6 Nm yüklü çalışma altında gözlemci konum hata grafiği

Şekil 6–11.'den görüldüğü gibi motorun kalkınması anındaki hız ve hata değerlerinde artış gözlemlenmektedir. Ancak motor yol aldıktan sonra bu değerler boş çalışma anındaki değerlere yakınsamaktadır. Bu da gözlemcinin kararlı duruma geçişinden dolayıdır. Gözlemcinin kalkınma anında daha yüksek hata değeri vermesinin sebebi kalkınma anında seçilen kayma kipli gözlemci akım kazancının kayma şartını sağlayamamasıdır. Akım kazancının kayma şartını sağlayamamasının nedeni düşük devirlerde zıt emk değerinin düşük olmasıdır. Bu durum kazancın artırılması yoluyla azaltılabilir. Ancak kazancın çok büyük olması durumunda da da titreşim meydana gelebilir ve tahmin hatasında artış gözlemlenebilir. Bu nedenle akım kazancının adaptif özellikte seçilmesi ile bu sakınca ortadan kaldırılabilir. Bu durumun değişken yük altında gözlemcinin başarımını nasıl etkilediğini gözlemek amacıyla motor önce 4 Nm. lik bir yük ile çalıştırılmış ve 2s. sonra yük 2 Nm. değerine indirilmiş ve 4s. sonra ise 5 Nm.'lik bir yük ile yüklenmiştir. Ancak bu durumda akım kazancı zıt emk ile değişecek şekilde ayarlanmıştır. Değişken yük durumundaki hız ve konum hata grafikleri Şekil 12. ve 13'te verilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere yük altında kalkınırken akım kazancının kalkınma anında kayma şartını sağlamak için yeterli büyüklükte olması sebebiyle hızdaki hata değeri en fazla 2 d/d civarında kalmıştır. Konumdaki hata ise kalkınma anında ve yük değişimleri anında bir süre için küçük bir artış kaydetse de tüm zaman aralığı süresince en fazla 0.4 dereceye çıkabilmiştir.



Şekil 12. 4-2-5 Nm değişken yüklü çalışma altında gözlemci hız hata grafiği



Şekil 13. 4-2-5 Nm değişken yük altında gözlemci konum hata grafiği

## 5. SONUÇ

Hibrid gözlemci başlangıç değerlerindeki hatalardan etkilenmemekte ve geçici durumlarda başlangıç değerlerindeki hatalar yüksek olsa dahi hata kısa sürede sifıra yakınsamaktadır. Hibrid gözlemcide kararlı çalışma, belirlenen kutuplar ile ilişkilidir. Sabit kutup seçiminde eğer kutuplar sınır değerlerde seçilmiş ise, ani yük değişikliklerinde gözlemci kararsız hale gelebilir. Bu sakıncayı gidermek amacıyla bilhassa kayma kipli gözlemciyi kayma yüzeyinde tutmak ve titreşimi kaldırmak amacıyla ARM'nin zıt emk değeri ile akım kazancı adaptif hale getirilmiştir. Uygulamada gözlemci algoritmalarının uygulanabilmesi için gerçekleştirilecek hesaplamaların yüksek olması sebebiyle hızlı mikroişlemciler gereklidir. Mevcut sayısal işaret işlemcileri bu sakıncayı gidermektedir.



**6. KAYNAKLAR**

1. W. Harris ve J.H. Lang, A Simple Motion Estimator for Variable-Reluctance Motors, IEEE Trans. On Ind. Ap. Vol. 26, No. 2, March/April 1990, pp 237-243
2. N.H. Mvungi, M. Lahoud ve J.M. Stephenson, A New Sensorless Position Detector for SR Drives, IEE Intl. Conf. on Power Electronics and Variable Speed Drives., 1990, p. 249-252
3. M. Ehsani et al., New Modulation Encoding Techniques for Indirect Rotor Position Sensing in Switched Reluctance Motors, IEEE Trans. on Ind. Appl., January/February 1994, Vol. 30, No. 1, p. 85-91
4. G. Suresh, B. Fahimi ve M. Ehsani, Improvement of the Accuracy and Speed Range in Sensorless Control of Switched Reluctance Motors, APEC'98, 1998, p.771-777
5. J.T. Bass, M. Ehsani ve T.J.E. Miller, Simplified Electronics for Torque Control of Sensorless Switched-Reluctance Motor, IEEE Trans. on Ind. Electronics., May 1987, Vol. IE34, No. 2, p. 234-239
6. M.T. DiRenzo ve W. Khan, Self-Trained Commutation Algorithm for an SR Motor Drive System without Position Sensing, IEEE IAS'97, October 1997, p. 341-348
7. I. Husain ve M. Ehsani, Rotor Position Sensing in Switched Reluctance Motor Drives by Measuring Mutually Induced Voltages, IEEE Trans on Ind. Appl. May/June 1994, Vol.30, No.3, p.665-671
8. A.D. Cheok ve N. Ertuğrul, High Robustness of an SR Motor Angle Estimation Algorithm using Fuzzy Predictive Filters and Heuristic Knowledge Based Rules, IEEE Trans. on Ind. Elect., October 1999, Vol. 46, No. 5, p. 904-916
9. D.S. Reay ve B.W. Williams, Sensorless Position Detection Using Neural Networks For The Control Of Switched Reluctance Motors, IEEE Intl. Conf. on Control Appl., 1999, Vol. 2, p. 1073-1077
10. C. Eyguesier et al., A Basic Algorithm Of Sensorless Rotor Position Detection Using Fuzzy Logic For The Switched Reluctance Motor Drives, IEEE ISIE'99, 1999, Vol. 2, p. 684-688
11. A. Lumsdaine ve J.H. Lang, State Observers for Variable-Reluctance Motors, IEEE Trans. on Ind. Elec., April 1990, Vol. 37, No. 2, p. 133-142
12. A. Brösse ve G. Henneberger, Different Models for the SRM in State Space Format For the Sensorless Control Using Kalman Filter, IEE conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, September 1998, p. 269-274
13. Ç.Elmas ve H. Z. De La Parra, Application of A Full Order Extended Luenberger Observer for a Position Sensorless Operation of A Switched Reluctance Motor Drive, IEE Proc. Cont. Theory Appl., September 1996, Vol. 5, p.401-408
14. R.A. McCann ve I. Husain, Application of a Sliding Mode Observer for Switched Reluctance Motor Drives, IEEE IAS'97, 1997, Vol. 1, p. 525-532
15. Y.J. Zhan, C.C. Chan ve K.T. Chau, A Novel Sliding-Mode Observer for Indirect Position Sensing of Switched Reluctance Motor Drives, IEEE Trans. on Ind. Elect., April 1999, Vol. 46, p. 390-397