

# Hız-Algılayıcı Doğrudan Vektör Kontrollü Asenkron Motor Sürücülerini İndirgenmiş Dereceli Genişletilmiş Kalman Filtresi Tabanlı Stator ve Rotor Direnci Kestiricisi

## Reduced Order Extended Kalman Filter based Stator and Rotor Resistance Estimator for Speed-Sensored Direct Vector Controlled Induction Motors Drives

Rıdvan Demir<sup>1</sup>, Murat Barut<sup>2</sup>, Recep Yıldız<sup>2</sup>, Emrah Zerdali<sup>2</sup>, Remzi İnan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mekatronik Mühendisliği Bölümü  
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde  
ridvandemir@ohu.edu.tr

<sup>2</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde  
mbarut@ohu.edu.tr, ryildiz@ohu.edu.tr, ezerdali@ohu.edu.tr, rinan@ohu.edu.tr

### Özet

Bu çalışmada, hız-algılayıcı doğrudan vektör kontrollü asenkron motor (ASM) sürücülerini indirgenmiş dereceli yeni genişletilmiş Kalman filtresi (İDGKF) tabanlı kestirici tasarlanarak benzetim temelli olarak gerçekleştirilmektedir. Önerilen İDGKF ile DVK tabanlı ASM sürücüsü için gerekli olan stator duran eksen takımındaki rotor akılarının  $\alpha\beta$  bileşenlerine ( $\varphi_{r\alpha}$  ve  $\varphi_{r\beta}$ 'ya) ilave olarak değeri sıcaklık ve frekansla değişen stator direnci ( $R_s$ ) ve rotor direnci ( $R_r$ ) anma hızı, orta hız ve düşük/sıfır hız bölgelerinde eş zamanlı olarak kestirilmektedir. Hız, yük momenti ( $t_L$ ),  $R_r$  ve  $R_s$ 'nin zorlayıcı değişimleri altında üretilen senaryolar ile test edilen İDGKF'ye ilişkin benzetim temelli kestirim sonuçları ve bu yüzden DVK'lı ASM sürücüsünün kontrol başarımı oldukça tatmin edicidir. Ayrıca İDGKF algoritmasının tam dereceli eşdeğerine göre daha az hesap yükü gerektirdiği bu çalışma kapsamında onaylanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Asenkron motor, doğrudan vektör kontrol, parametre kestirimi, genişletilmiş Kalman filtresi

### Abstract

In this study, speed-sensored direct vector control of induction motors (IMs) is implemented by proposing and using a novel reduced order extended Kalman filter (ROEKF). In addition to  $\alpha\beta$ -components of rotor fluxes in stator stationary axis ( $\varphi_{r\alpha}$  and  $\varphi_{r\beta}$ ), stator resistance ( $R_s$ ) and rotor resistance ( $R_r$ ) whose values vary according to temperature and frequency are simultaneously estimated by the proposed ROEKF in a wide speed range. Under challenging variations of rotor angular velocity, load torque ( $t_L$ ),  $R_r$ , and  $R_s$ , the obtained simulation based estimation results associated with the ROEKF and thus control performances of the designed direct vector controlled

IM drive are quite satisfactory and validate to require less computational load than its full-order counter part.

Keywords: Induction motor, Direct vector control, parameter estimation, extended Kalman filter

### 1. Giriş

Asenkron motorlar sağlam, verimli, güvenilir ve az bakım gerektirmelerinden dolayı değişken hız ve moment kontrolü gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, karmaşık yapıları ve doğrusal olmayan matematiksel modellerinden dolayı parametre değişimleri ve diğer çalışma şartlarına bağlı olarak, birçok kontrol problemine sahiptirler. ASM'lerin hız-algılayıcı doğrudan vektör kontrol sistemi  $\varphi_{r\alpha}$ ,  $\varphi_{r\beta}$  bilgilerini gerektirmektedir. Ancak, bu büyüklüklerinin doğru değerleri ASM parametrelerine karşı büyük oranda bağlıdır. Özellikle kontrol sistemi ve kestirim başarımlarında parametrelerden kaynaklı bozulmaların önlenmesi için motor parametrelerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Elektriksel parametreler d.a testi ve kilitli rotor/boşta çalışma deneyleri ile doğrudan belirlenebilir olsalar da değerleri sıcaklık ve frekansa bağlı olarak çalışma koşullarından etkilenmektedir. Bu yüzden yüksek başarılı kontrol için bu parametrelerin özellikle  $R_r$  ve  $R_s$ 'nin kestirilmesi gerekmektedir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde hız-algılayıcı olarak  $R_r$  ve/veya  $R_s$  kestirimine odaklanan bazı çalışmalar [1-11] bulunmaktadır. Bu çalışmalardan, Ref. [1]'de bir faz akım algılayıcı kullanan uyarlamalı gözlemleyici ile rotor akısına ilaveten  $R_r$  ve  $R_s$  kestirimi gerçekleştirilmektedir. Fakat düşük/sıfır hız bölgesinde her hangi bir sonuç sunulmamıştır. Ref. [2]'de aktif ve reaktif güç tabanlı kestirici ile sadece  $R_r$  ve  $R_s$  kestirimi yapılmakta olup, yük momentinin artması ile kestirimin yakınsama hızının iyileştiği ifade edilmektedir. Ref. [3]'te doğ-

rusal olmayan bulanık gözlemleyici ile kestirilen  $R_s$  ile birlikte ileri beslemeli yapay sinir ağları kullanılarak  $R_r$  kestirilmektedir. Kestirim sonuçları anma hızının %70'inde sunulmakta ve çok düşük/sıfır hız bölgelerini kapsamamaktadır. Ref. [4]'te rotor akılı modeli kullanan tam dereceli GKF (TDGKF) ile  $R_r$  ve  $R_s$  kestirilmekle birlikte ASM'nin çalıştığı hız aralığı ve ASM'ye uygulanan yük momenti bilgisi verilmemektedir. Ref. [5]'te doğrusal olmayan vektör kontrol başarımını arttırmak için  $R_r$  kestirimi hız algılayıcılı olarak gerçekleştirilmekte ama sıfır hız sonuçları sunulmamaktadır. Ref. [6]'da reaktif güç tabanlı MUS ile rotor direnci kestiricisi tasarlanmış ve dolaylı vektör kontrol sistemi ile test edilmiştir. Ancak önerilen kestiriciye ait çok düşük/sıfır hız sonuçları verilmemiştir. Ref. [7]'de reaktif güç tabanlı MUS ile rotor direnci kestiricisi tasarlanmış ve MUS'a ait uyarılma mekanizması olarak geleneksel PI kontrolör yerine parçacık sürü optimizasyon algoritması tabanlı katsayıları çevrimiçi ayarlanan adaptif PI kontrolör kullanılmıştır. Kestirim sonuçları ise sadece sabit yüksek hız bölgesinde ve değişken yük momenti değerleri altında sunulmuştur. Ref. [8]'de yapay sinir ağı (YSA) tabanlı rotor akılı MUS ile rotor direnci kestirimi gerçekleştirilmiştir. Ref. [9]'da ise aktif güç ve motor momenti tabanlı modele uyarlamalı sistem ile rotor direnci kestirilmektedir. Ref. [10]'da parametre kestirim tabanlı rotor akısı gözlemleyicisi ile  $R_r$  kestirilmektedir. Ref. [11]'de stator akılı ASM modeli kullanan TDGKF ile  $R_r$  ve  $R_s$ 'nin kestirimi geniş bir hız bölgesinde ve farklı yük momenti değerleri altında gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın temel katkısı ASM'nin yüksek başarımı DVK'si için, hız-algılayıcılı olarak  $\varphi_{r\alpha}$ ,  $\varphi_{r\beta}$ ,  $R_s$  ve  $R_r$ 'yi eş-zamanlı olarak kestiren İDGKF tasarlayarak sürekli sıfır hız dahil çok geniş bir hız aralığında çalışabilen ve [4]'deki eş değeri tam dereceli GKF temelli sürücünden daha az hesap yükü içeren DVK'lı ASM sürücüsünü literatüre tanıtmaktır. Hız,  $t_L$ ,  $R_r$  ve  $R_s$ 'nin zorlayıcı değişimlerini içeren senaryolar ile elde edilen benzetim sonuçları, önerilen İDGKF ve bu yüzden DVK'lı ASM sürücüsünün oldukça iyi bir başarıma sahip olduğunu göstermektedir. Bu yönleri ile [12]'deki çalışmanın genişletilmiş halidir.

Bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1'de literatürde mevcut olan çalışmalar, Bölüm 2'de ASM'nin genişletilmiş matematiksel modeli, Bölüm 3'te İDGKF algoritmasının tasarımı ve Bölüm 4'te İDGKF tabanlı kestiricinin benzetim sonuçları sunulmaktadır. Bölüm 5'te elde edilen sonuçlar ile birlikte gelecek çalışmalar açıklanmıştır.

## 2. ASM'nin genişletilmiş matematiksel modeli

ASM'nin genişletilmiş matematiksel modelinin genel ifadesi (1) ve (2)'deki gibidir:

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}}_e(t) &= \underline{f}_e(\underline{x}_e(t), \underline{u}_e(t)) + \underline{w}_1 \\ &= \underline{A}_e(\underline{x}_e(t))\underline{x}_e(t) + \underline{B}_e\underline{u}_e(t) + \underline{w}_{e1} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}(t) &= \underline{h}_e(\underline{x}_e(t)) + \underline{w}_2 \quad (\text{Ölçüm Eşitliği}) \\ &= \underline{H}_e\underline{x}_e(t) + \underline{w}_{e2} \end{aligned} \quad (2)$$

Burada,  $\underline{x}_e$  genişletilmiş durum vektörü,  $\underline{f}_e$  durum ve girişlerin

doğrusal olmayan fonksiyonu,  $\underline{A}_e$  sistem matrisi,  $\underline{u}_e$  kontrol giriş vektörü,  $\underline{B}_e$  giriş matrisi,  $\underline{w}_{e1}$  işlem gürültüsü,  $\underline{h}_e$  çıkışların fonksiyonu,  $\underline{H}_e$  ölçüm matrisi ve  $\underline{w}_{e2}$  ise ölçüm gürültüsüdür.

(1) ve (2)'deki genel ifadeye göre, genişletilmiş ASM modeline ait matris ve vektörler (3) ve (4)'de sunulmaktadır.

Burada,  $v_{s\alpha}$  ve  $v_{s\beta}$  stator gerilimlerinin stator duran eksen takımındaki bileşenlerini,  $i_{s\alpha}$  ve  $i_{s\beta}$  stator gerilimlerinin stator duran eksen takımındaki bileşenlerini,  $R_s$  ve  $R_r$  sırasıyla stator ve rotor dirençlerini,  $L_s$ ,  $L_r$  ve  $L_m$  sırasıyla stator, rotor ve mıknatıslama endüktanslarını,  $L_\sigma = \sigma L_s = L_s - L_m^2/L_r$  stator geçici endüktansını,  $\sigma$  kaçak fiktörünü,  $p_p$  kutup çifti sayısını ve  $T$  örnekleme zamanını ifade etmektedir.

## 3. Önerilen İDGKF algoritmasının tasarımı

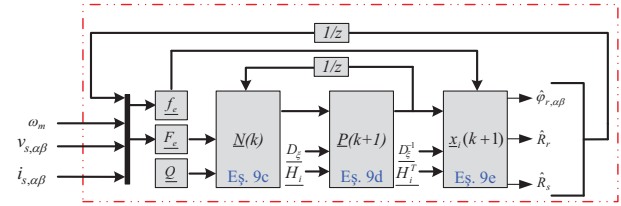
Tam dereceli (TDGKF) tabanlı kestirim algoritmasının hesaplamaya yükünü azaltmak için (1) ve (2) kullanılarak bu çalışma kapsamında önerilen ve yalnızca ölçülmeyen durum ve parametreleri kestiren indirgenmiş dereceli ASM modeline ait genel ifadeler (5) ve (6)'daki gibi elde edilebilir:

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}}_i(t) &= \underline{f}_i(\underline{x}_i(t), \underline{u}_i(t)) + \underline{w}_{i1} \\ &= \underline{A}_i(\underline{x}_i(t))\underline{x}_i(t) + \underline{B}_i\underline{u}_i(t) + \underline{w}_{i1} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}(t) &= \underline{h}_i(\underline{x}_i(t), \underline{u}_i(t)) + \underline{w}_{i2} \quad (\text{Ölçüm Eşitliği}) \\ &= \underline{H}_i\underline{x}_i(t) + \underline{w}_{i2} \end{aligned} \quad (6)$$

Eşitlik (5) ve (6)'ya göre önerilen indirgenmiş ASM modeline ait matris ve vektörler (7) ve (8)'deki gibi elde edilebilir.

$\varphi_{r\alpha}$ ,  $\varphi_{r\beta}$ ,  $R_r$  ve  $R_s$  değerlerinin eş-zamanlı kestirimini gerçekleştirmek için önerilen bu model kullanılarak, İDGKF algoritması eşitlikleri (9a-9e) ve akış şeması (Şekil 1) geliştirilmektedir.



Şekil 1: İDGKF'nin akış şeması.

$$\underline{F}_i(k) = \left. \frac{\partial \underline{f}_i(\underline{x}_i(k), \underline{u}_i(k))}{\partial \underline{x}_i(k)} \right|_{\hat{\underline{x}}_i(k), \underline{u}_i(k)} \quad (9a)$$

$$\underline{H}_i(k) = \left. \frac{\partial \underline{h}_i(\underline{x}_i(k), \underline{u}_i(k))}{\partial \underline{x}_i(k)} \right|_{\hat{\underline{x}}_i(k), \underline{u}_i(k)} \quad (9b)$$

$$\underline{N}(k) = \underline{F}_i(k)\underline{P}(k)\underline{F}_i^T(k) + \underline{Q} \quad (9c)$$

$$\underline{P}(k+1) = \underline{N}(k) - \quad (9d)$$

$$\begin{aligned} \underline{N}(k)\underline{H}_i^T(\underline{D}_\xi + \underline{H}_i\underline{N}(k)\underline{H}_i^T)^{-1}\underline{H}_i\underline{N}(k) \\ \hat{\underline{x}}_i(k+1) = \hat{\underline{f}}_i(\hat{\underline{x}}_i(k), \underline{u}_i(k)) + \end{aligned} \quad (9e)$$

$$\underline{P}(k+1)\underline{H}_i^T\underline{D}_\xi^{-1}(\underline{Z}(k+1) - \underline{H}_i\hat{\underline{x}}_i(k))$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{i}_{s\alpha} \\ \dot{i}_{s\beta} \\ \dot{\varphi}_{r\alpha} \\ \dot{\varphi}_{r\beta} \\ \dot{R}_r \\ \dot{R}_s \end{bmatrix}}_{\underline{\dot{x}}_e} = \underbrace{\begin{bmatrix} -(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2 L_\sigma}) & 0 & \frac{R_r L_m}{L_r^2 L_\sigma} & \frac{L_m}{L_\sigma L_r} p_p \omega_m & 0 & 0 \\ 0 & -(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2 L_\sigma}) & -\frac{L_m}{L_\sigma L_r} p_p \omega_m & \frac{R_r L_m}{L_r^2 L_\sigma} & 0 & 0 \\ \frac{R_r L_m}{L_r} & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & -p_p \omega_m & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_r L_m}{L_r} & p_p \omega_m & -\frac{R_r}{L_r} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\underline{A}_e} \underbrace{\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \varphi_{r\alpha} \\ \varphi_{r\beta} \\ R_r \\ R_s \end{bmatrix}}_{\underline{x}_e} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{L_\sigma} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_\sigma} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T}_{\underline{B}_e^T} \underbrace{\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix}}_{\underline{u}_e} + \underline{w}_{e1}(t) \quad (3)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{i}_{s\alpha} \\ \dot{i}_{s\beta} \end{bmatrix}}_{\underline{Z}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\underline{H}_e} \underline{x}_e + \underline{w}_{e2}(t) \quad (4)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{r\alpha} \\ \dot{\varphi}_{r\beta} \\ \dot{R}_r \\ \dot{R}_s \end{bmatrix}}_{\underline{\dot{x}}_i} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{R_r}{L_r} & -p_p \omega_m & \frac{L_m i_{s\alpha}}{L_r} & 0 \\ -p_p \omega_m & -\frac{R_r}{L_r} & \frac{L_m i_{s\beta}}{L_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\underline{A}_i} \underbrace{\begin{bmatrix} \varphi_{r\alpha} \\ \varphi_{r\beta} \\ R_r \\ R_s \end{bmatrix}}_{\underline{x}_i} + \underline{w}_{i1}(t) \quad (7)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{i}_{s\alpha} - \frac{v_{s\alpha}}{L_\sigma} \\ \dot{i}_{s\beta} - \frac{v_{s\beta}}{L_\sigma} \end{bmatrix}}_{\underline{Z}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{R_r L_m}{L_r^2 L_\sigma} & \frac{L_m p_p \omega_m}{L_\sigma L_r} & -\frac{L_m^2 i_{s\alpha}}{L_r^2 L_\sigma} & -\frac{i_{s\alpha}}{L_\sigma} \\ -\frac{L_m p_p \omega_m}{L_\sigma L_r} & \frac{R_r L_m}{L_r^2 L_\sigma} & -\frac{L_m^2 i_{s\beta}}{L_r^2 L_\sigma} & -\frac{i_{s\beta}}{L_\sigma} \end{bmatrix}}_{\underline{H}_i} \underbrace{\begin{bmatrix} \varphi_{r\alpha} \\ \varphi_{r\beta} \\ R_r \\ R_s \end{bmatrix}}_{\underline{x}_i} + \underline{w}_{i2}(t) \quad (8)$$

Burada,  $\underline{F}_i$  (5-6) ile verilen doğrusal olmayan modelin doğrusallaştırmada kullanılan fonksiyonunu,  $Q$  modelleme hatası olarak isimlendirilen sistem gürültü matrisinin kovaryansını,  $\underline{D}_\xi$  ölçüm hatası olarak isimlendirilen çıkış gürültü matrisinin kovaryansını,  $\underline{P}$  ve  $\underline{N}$  ise sırasıyla, durum kestirim hatası ve onun dış değerlemesinin (extrapolation) kovaryans matrislerini ifade etmektedir.

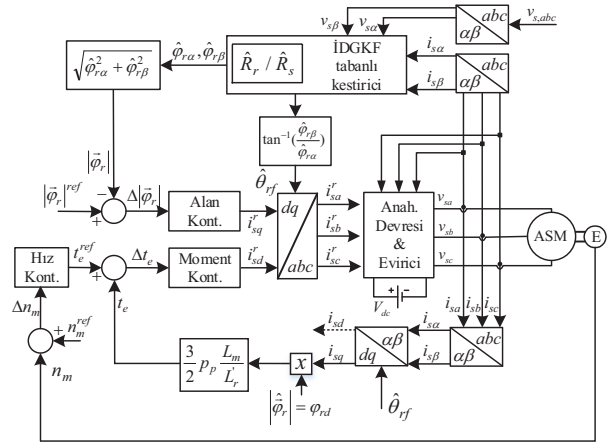
#### 4. Benzetim sonuçları ve gözlemler

Hız-algılayıcılı olarak  $R_r$  ve  $R_s$ 'nin eş-zamanlı kestirimi için tasarlanan İDGKF tabanlı kestiricinin başarımı Şekil 2'de verilen DVK'lı ASM sürücü sistemi kullanılarak benzetim ortamında test edilmektedir. Şekil 2'de verilen DVK'lı sürücü sisteminde,  $\hat{\theta}_{rf}$  stator duran eksen takımındaki  $\alpha$ -ekseni ile dönen eksen takımındaki  $d$ -ekseni arasında tanımlanan alan açısıdır. Sürücü sisteminde kullanılan bütün kontrolörler geleneksel oran + integral acılı (proportional +integral-PI) kontrolörlerdir. Önerilen kestirim algoritmasından yüksek kestirim başarımı elde etmek için kullanılan kovaryans matrisleri deneme-yanılma yöntemi ile aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$Q = \text{diag}\{1e-10, 1e-10, 1e-4, 1e-4\}$$

$$\underline{D}_\xi = \text{diag}\{1e-6, 1e-6\}$$

$$P = \text{diag}\{10, 10, 10, 10\}$$



Şekil 2: Önerilen İDGKF'yi kullanan hız-algılayıcılı doğrudan vektör kontrollü ASM sürücü sistemi.

Tablo 1: Benzetimde kullanılan ASM parametrelerinin anma değerleri [13].

$R_{sN}[\Omega]$	$R_{rN}[\Omega]$	$L_{ls}[H]$	$L_{lr}[H]$
2.283	2.133	0.0111	0.0111
$L_m[H]$	$t_L[N.m]$	$P_p$	$N_{mN}[rpm]$
0.22	20	2	1430
$B_T[Nm/(rad/s)]$	$J_{TN}[kg.m^2]$		
0.001	0.0183		

Önerilen İDGKF tabanlı kestirici ve DVK'lı ASM sürücüsü, anma değerleri Tablo 1'de verilen ASM parametreleri kullanılarak yüksek hız, orta hız ve düşük hız bölgeleri olmak üzere üç farklı senaryo ile test edilmektedir.

#### 4.1. Yüksek (anma) hız bölgesi çalışması

Önerilen İDGKF algoritması ve DVK'lı ASM sürücüsü Şekil 3'te verilen senaryolar ile anma hızı bölgesinde test edilmektedir. Şekil 3 ile verilen senaryolarda;

- ASM anma hızında ve her iki yönde çalıştırılmaktadır.
- ASM'ye uygulanan yük momenti 20  $N.m$  ile  $-20 N.m$  arasında doğrusal olarak değiştirilmektedir.
- $R_r$  ve  $R_s$  basamak ve doğrusal bir şekilde farklı hız bölgelerinde artırılıp azaltılmaktadır.

Şekil 3'te verilen senaryolar ile test edilen İDGKF tabanlı kestirici ve bu kestiriciyi kullanan DVK'lı ASM sürücüsüne ait benzetim sonuçları Şekil 4 ve 5'de verilmiştir. Önerilen İDGKF algoritmasından elde edilen kestirim sonuçlarında, " " kestirilen durumları/parametreleri ve  $e_{(\cdot)}$  ise kestirilen ile gerçek değer arasındaki fark olarak tanımlanan hatayı ifade etmektedir.

#### 4.2. Orta hız bölgesi çalışması

Önerilen İDGKF algoritması ve DVK'lı ASM sürücüsü Şekil 6'da verilen senaryolar ile orta hız bölgelerinde test edilmektedir. Şekil 6 ile verilen senaryolarda;

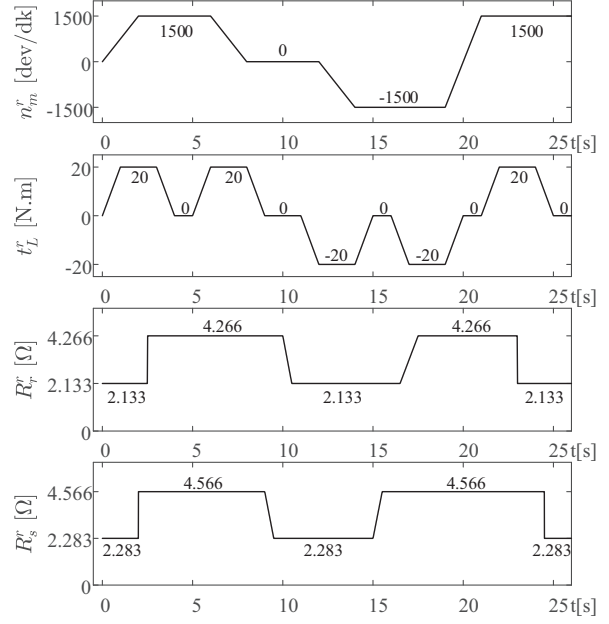
- ASM orta hızda ve her iki yönde çalıştırılmaktadır.
- ASM'ye uygulanan yük momenti 20  $N.m$  ile  $-20 N.m$  arasında doğrusal olarak değiştirilmektedir.
- $R_r$  ve  $R_s$  basamak ve doğrusal bir şekilde farklı hız bölgelerinde artırılıp azaltılmaktadır.

Şekil 6'da verilen senaryolar ile test edilen İDGKF tabanlı kestirici ve bu kestiriciyi kullanan DVK'lı ASM sürücüsüne ait benzetim sonuçları Şekil 7 ve 8'de verilmiştir.

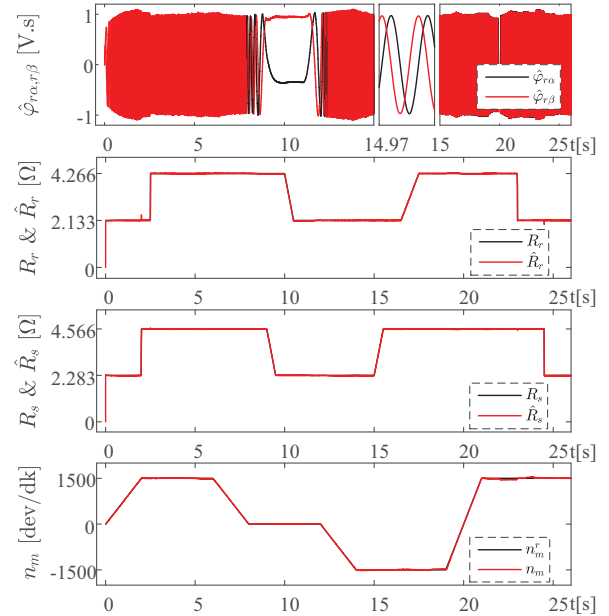
#### 4.3. Düşük/sıfır hız bölgesi çalışması

Önerilen İDGKF algoritması ve DVK'lı ASM sürücüsü Şekil 9'da verilen senaryolar ile düşük/sıfır bölgelerinde test edilmektedir. Şekil 9 ile verilen senaryolarda;

- ASM düşük/sıfır hız bölgelerinde çalıştırılmaktadır.
- ASM'ye uygulanan yük momenti 20  $N.m$  ile  $-10 N.m$  arasında basamak şeklinde değiştirilmektedir.



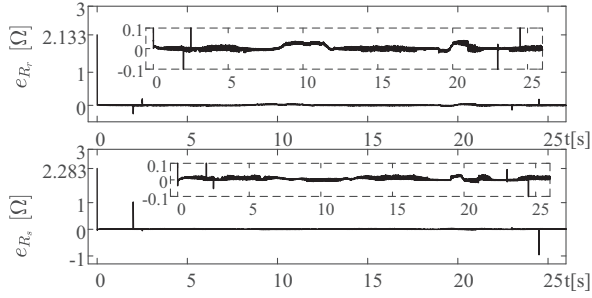
Şekil 3: Önerilen İDGKF tabanlı DVK'lı ASM sürücüsü sistemini yüksek hız bölgesinde test etmek için  $n_m^r$ ,  $t_L^r$ ,  $R_r^r$  and  $R_s^r$  değişimleri.



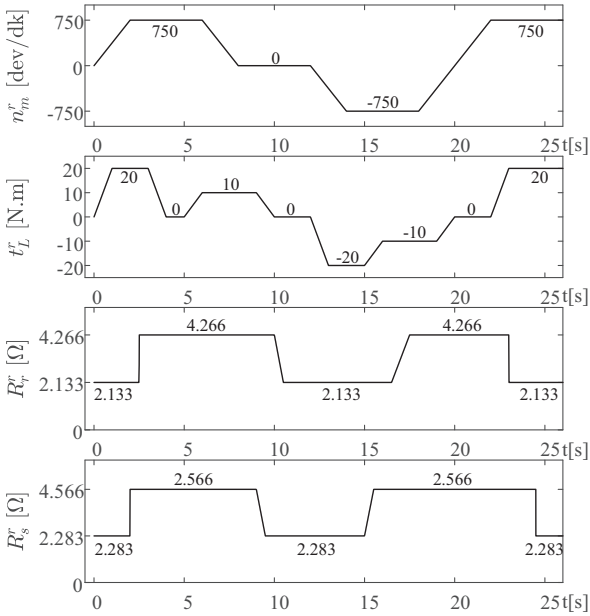
Şekil 4: DVK'lı ASM sürücüsü sistemi ve İDGKF temelli kestiricinin yüksek hızlardaki benzetim sonuçları.

- $R_r$  ve  $R_s$  basamak ve doğrusal bir şekilde farklı hız bölgelerinde artırılıp azaltılmaktadır.

Şekil 9'da verilen senaryolar ile test edilen İDGKF tabanlı kestirici ve bu kestiriciyi kullanan DVK'lı ASM sürücüsüne ait benzetim sonuçları Şekil 10 ve 11'de verilmiştir.



Şekil 5: Anma hızında DVK'lı ASM sürücüsü ve İDGKF temelli kestirim algoritmasına ilişkin izleme ve kestirim hataları.

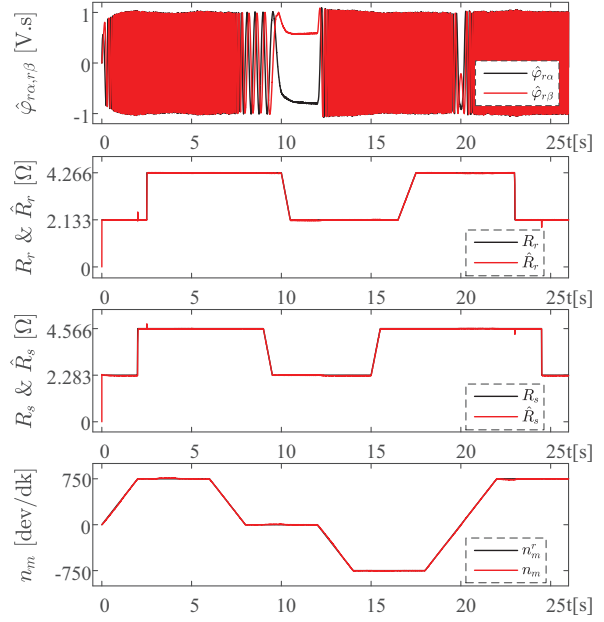


Şekil 6: Önerilen İDGKF tabanlı DVK'lı ASM sürücü sistemini orta hız bölgesinde test etmek için  $n_m^r$ ,  $t_L^r$ ,  $R_r^r$  and  $R_s^r$  değişimleri.

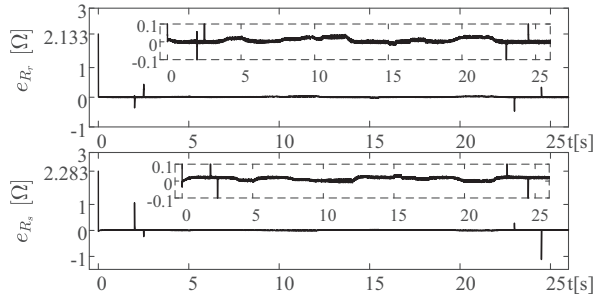
#### 4.4. Gözlemler

Önerilen İDGKF tabanlı kestiriciden farklı hız bölgelerinde elde edilen benzetim sonuçları incelendiğinde aşağıdaki gözlemler yapılabilir.

- Kestirilen durum ve parametrelerin başlangıç değerleri sıfır olarak seçilmesine rağmen bütün kestirimler ani olarak gerçek değerine yakınsamıştır.
- Sürekli sıfır/çok düşük ( $0 \text{ dev/dk}$ ,  $100 \text{ dev/dk}$ ), orta ( $750 \text{ dev/dk}$ ) ve anma ( $1500 \text{ dev/dk}$ ) hızlarında, farklı yük momenti değerleri ( $0 \text{ N.m}$ ,  $10 \text{ N.m}$ ,  $20 \text{ N.m}$ ,  $-20 \text{ N.m}$ ) altında,  $R_r$  ve  $R_s$ 'nin basamak ve/veya doğrusal değişimlerinden elde edilen kestirim sonuçları önerilen kestiricinin etkinliğini göstermektedir.
- Düşük orta ve yüksek hız senaryolarında ASM'ye uygulanan hız referansı sürekli sıfır hız da dahil olmak



Şekil 7: DVK'lı ASM sürücü sistemi ve İDGKF temelli kestiricinin orta hızlardaki benzetim sonuçları.

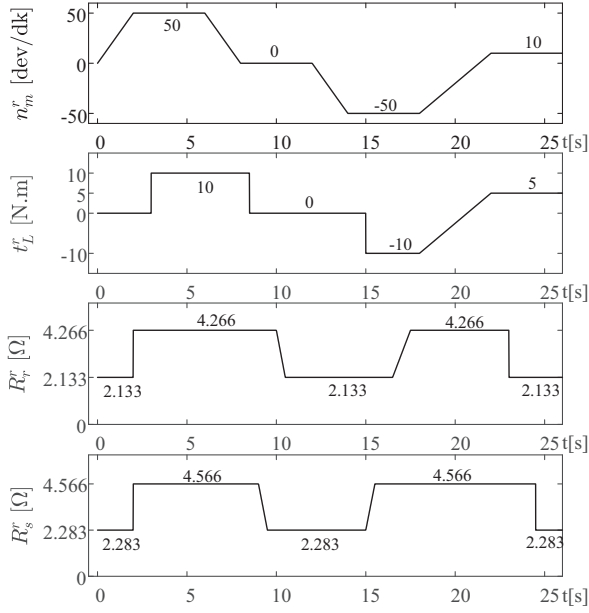


Şekil 8: Orta hız bölgesinde DVK'lı ASM sürücüsü ve İDGKF temelli kestirim algoritmasına ilişkin izleme ve kestirim hataları.

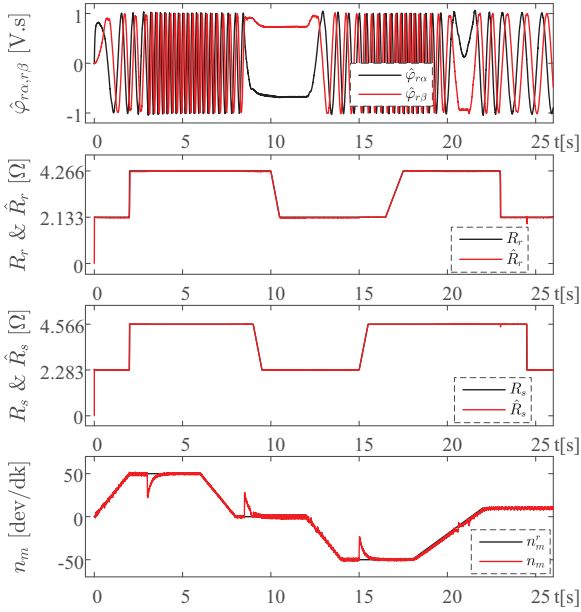
üzere dört bölgeyi kapsamaktadır. Böylece gerçekleştirilen kestirimler anma hızı ( $1500 \text{ dev/dk}$ ) ile anma hızının tersi ( $-1500 \text{ dev/dk}$ ) arasındaki tüm hız bölgelerinde gerçekleştirilmektedir.

- Benzetim sonuçları İDGKF algoritmasının dört bölgede de yüksek kestirim başarımına sahip olduğunu onaylanmaktadır.
- Özetle hız-algılayıcı DVK sistemi için gerekli olan bütün durumlar ( $\varphi_{r\alpha}$ ,  $\varphi_{r\beta}$ ) ile birlikte  $R_r$  ve  $R_s$ , önerilen İDGKF ile yüksek bir doğrulukla benzetim ortamında kestirilebilmektedir.

Başarım testlerine ilave olarak bu çalışmada, önerilen İDGKF algoritması ile aynı durum ve parametreleri kestiren [4]'deki TDGKF algoritmasının kullanıldığı DVK'lı sürücü sistemleri işlem süreleri bakımından da karşılaştırılmışlardır. Bu amaçla, her iki algoritmayı içeren sürücü sistemleri, Şekil 3'de verilen

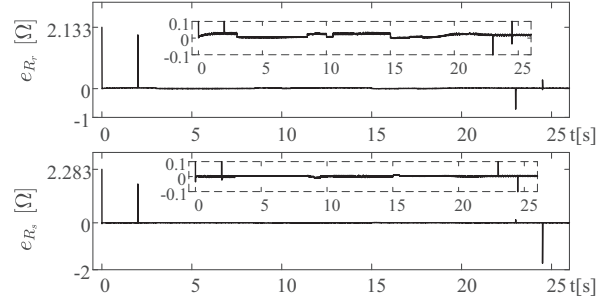


Şekil 9: Önerilen İDGKF tabanlı DVK'lı ASM sürücü sisteminin düşük hız bölgesinde test etmek için  $n_m^r$ ,  $t_L^r$ ,  $R_r^r$  ve  $R_s^r$  değişimleri.



Şekil 10: DVK'lı ASM sürücü sistemi ve İDGKF temelli kestiricinin düşük hızlardaki benzetim sonuçları.

senaryolar altında aynı bilgisayar ortamında 100 defa çalıştırılıp ortalama çalışma süreleri Matlab "tic, toc" komutu yardımı ile belirlenerek, elde edilen ortalama çalışma süreleri Tablo 2'de sunulmuştur. Sonuçlar, bu çalışmada önerilen İDGKF algoritmasının, [4]'deki TDGKF algoritmasına kıyasla daha az işlem yüküne sahip olduğunu onaylamaktadır.



Şekil 11: Düşük hız bölgesinde DVK'lı ASM sürücüsü ve İDGKF temelli kestirim algoritmasına ilişkin izleme ve kestirim hataları.

Tablo 2: Önerilen İDGKF ve TDGKF algoritmalarının çalışma süreleri.

Önerilen İDGKF	TDGKF
6.3022 s	7.2868 s

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, ASM'nin hız-algılayıcı yüksek başarımlı kontrolü için  $\varphi_{r\alpha}$  ve  $\varphi_{r\beta}$ 'ya ilave olarak değeri sıcaklık ve frekansla değişen  $R_s$  ve  $R_r$ 'yi eş-zamanlı olarak kestiren yeni bir İDGKF tabanlı kestirici tasarlanarak, DVK'lı sürücü sistemde kullanılıp başarımlı test edilmektedir. Sürekli sıfır, çok düşük, orta ve anma hız bölgelerinde yüklü/yüksüz durumları için  $R_r$  ve  $R_s$ 'nin basamak/doğrusal değişimlerini içeren senaryolardan elde edilen benzetim sonuçları,

- önerilen İDGKF tabanlı sürücünün oldukça iyi bir başarımlı
- eş değeri TDGKF'ye kıyasla daha az bir işlem yüküne

sahip olduğunu göstermektedir. Tasarlanan sürücüye alan-zayıflama bölgesinde çalışma özelliğinin kazandırılması, gelecek çalışma olarak planlanmaktadır.

## 6. Teşekkür

Bu çalışma, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi "FEB 2016/09 BA-GEP" nolu proje ile desteklenmektedir.

## 7. Kaynakça

- [1] Salmasi, F. R. and Najafabadi, T. A., "An Adaptive Observer With Online Rotor and Stator Resistance Estimation for Induction Motors With One Phase Current Sensor," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 46(8), 1209-1222, 2011.
- [2] Shinohara K, Nagano, T., Arima, H. and Mustafa, W. Z. W., "Online tuning method of stator and rotor resistances in both motoring and regenerating operations for vector-controlled induction machines," *Elect. Eng. Jpn.*, 135(1), 56-64, 2001

- [3] Karanayil, B., Rahman, M. F. and Grantham, C., "Stator and rotor resistance observers for induction motor drive using fuzzy logic and artificial neural networks," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 20(4), 771-780, 2005.
- [4] Talla, J., Peroutka, Z., Blahnik, V. and Streit, L., "Rotor and stator resistance estimation of induction motor based on augmented EKF," in *2015 International Conference on Applied Electronics (AE)*, 253-258, Sep. 2015.
- [5] Kan, J., Zhang, K. and Wang, Z. "Indirect vector control with simplified rotor resistance adaptation for induction machines," *IET Power Electron.*, 1284-1294, 2015.
- [6] Kanwal K. and Singh, M., "Rotor resistance estimation for induction motor using model reference adaptive controller," *2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON)*, Bikaner, India, 1-6, 25-27 Nov. 2016.
- [7] Chacko, S., Bhende, C. N., Jain, S. and Nema, R. K., "PSO based online tuning of PI controller for estimation of rotor resistance of indirect vector controlled induction motor drive," *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, Chennai, India, 4606-4611, 3-5 March 2016.
- [8] Arunachalam, V., Srinivasan, H. and Muthuramalingam, A., "A novel NN based rotor flux MRAS to overcome low speed problems for rotor resistance estimation in vector controlled IM drives," *Front. Energy*, 10(4), 382-392, 2016.
- [9] Mapelli, F. L., Tarsitano, D. and Cheli, F., "MRAS rotor resistance estimators for EV vector controlled induction motor traction drive: Analysis and experimental results," *Electric Power Systems Research*, 298-307, 2017.
- [10] Bazylev, D. N., Doria-Cerezo, A., Pyrkin, A. A., Bobtsov, A. A. and Ortega, R., "New Approach for Flux and Rotor Resistance Estimation of Induction Motors," *IFAC-Pap.*, 50(1), 1885-1890, 2017.
- [11] Demir, R., Barut, M., Yildiz, R., Inan, R. and Zerdali, E., "EKF based rotor and stator resistance estimations for direct torque control of Induction Motors," *2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)*, Brasov, Romania, 376-381, 25-27 May 2017.
- [12] Demir, R., Barut, M., Yildiz, R., Zerdali, E. and Inan, R. "Asenkron Motorların hız-algılayıcı Doğrudan Vektör Kontrolü için İndirgenmiş Dereceli Genişletilmiş Kalman Fitresi Tabanlı Stator ve Rotor Direnci Kestirimi," *1. Ulusal Elektrik Enerjisi Dönüşümü Kongresi*, Elazığ, Türkiye, 189-193, 21-22 Eylül 2017.
- [13] Barut, M. "Bi Input-extended Kalman filter based estimation technique for speed-sensorless control of induction motors", *Energy Conversion and Management*, pp. 2032-2040, 2010.