

## Kapalı Çevrim Kontrollü Bir Asenkron Motorda Simetrik Bileşenler Kullanılarak Yük Momenti Salınımının Tespiti

Ferhat ÇIRA

<sup>1</sup> Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 21280 Diyarbakır. (ORCID: 0000-0001-6729-1736)

(Alınış / Received: 01.02.2018, Kabul / Accepted: 09.04.2018,  
Online Yayınlanma / Published Online: 15.09.2018)

### Anahtar Kelimeler

Asenkron motor,  
Simetrik  
bileşenler, Yük  
moment salınımı  
tespiti

**Özet:** Bu çalışmada, kapalı çevrim hız kontrollü evirici beslemeli asenkron motorlarda mekanik arıza tespiti için anlık simetrik bileşenlerin (ASB) kullanımı incelenmiştir. Önerilen arıza tespit yöntemi, stator akımlarının ASB'lerinin hesaplanmasına dayanmaktadır. Pozitif güç bileşeninin spektral yoğunluğu (PSD), Rotasyonel İnvaryans Yöntemi Yoluyla İşaret Parametrelerinin Kestirimi (ESPRIT) ve en küçük kareler yöntemi (EKY) kullanılarak tahmin edilmektedir. Daha sonra, mekanik arıza tespiti ikili hipotez testi olarak kabul edilen genelleştirilmiş olasılık oranı testi (GLRT) kullanılarak yapılmıştır. Her iki stator akım ve kontrol döngülerinden çıkan modüle edilmiş sinyallerin, arıza tespitinde başarılı bir sonuç verdiği gösterilmiştir. Evirici beslemeli bir asenkron motorun analitik modelinden elde edilen benzetim sonuçları da, önerilen bu yaklaşımın etkinliğini göstermektedir. Bu da evirici beslemeli kapalı çevrim hız kontrollü bir asenkron motorda yük momenti salınımı için etkin bir arıza tespit yöntemi olduğu sonucunu vermektedir.

## Detection of Load Torque Oscillation Using Symmetrical Components in a Closed Loop Controlled Inverter-fed Induction Motor

### Keywords

Induction motor,  
Symmetrical  
components, Load  
torque oscillation  
Detection

**Abstract:** In this study, the use of instantaneous symmetrical components (ASB) for mechanical fault detection in induction motors with closed-loop controlled inverter supply has been investigated. The proposed fault detection method is based on the calculation of the ASBs of the stator currents. The spectral density (PSD) of the positive sequence power component is estimated using the least squares method (EKY). Then, mechanical fault detection is performed using the generalized likelihood ratio test (GLRT). Modulated signals from both stator currents and closed-loop have been shown to be successful in detecting faults. The simulation results in the analytical model of an induction motor

with an inverter supply give the effectiveness of this proposed approach. This results in an effective fault detection method for an induction motor load torque oscillation controlled by a closed-loop control with an inverter supply.

\*Sorumlu yazar: fcira@dicle.edu.tr

## 1. Giriş

Üç fazlı asenkron motorlar (ASM), sağlam, güvenilir ve ekonomik oldukları için endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle sabit hız gerektiren uygulamalarda kullanılan ASM'ler günümüzde değişken hız gereksinimi duyulan uygulamalarda da besleme frekansı ayarlanabilen sürücüler ile giderek daha fazla kullanılmaktadır. Ne yazık ki, ASM'ler rulman arızaları, stator arızaları, rotor arızaları, eksantriklik ve yük momenti salınımı gibi çeşitli arızalar nedeniyle çalışamaz hale gelebilmektedir. [1], [2]. Zaman ve uzay harmoniklerine neden olan moment salınımları motorun doğal yapısından dolayı sağlıklı motorlarda da bulunur. Bununla birlikte, arıza, mekanik motor hızı ile orantılı belirli bazı frekansları ortaya çıkarır [3]. ASM'lerdeki arıza ile ilgili yapılan çeşitli araştırmalarda, ASM'leri etkileyebilecek birçok arızanın, yük momenti salınımına neden olabileceği ortaya konmuştur. Bu arızalardan bazıları mekanik dengesizlik, shaft arızası, dişli arızaları, yatak ve arızalarıdır. Bu arızalar, motorun ve bağlantı ekipmanlarının tamamen tahrip olmasına varabilecek felaket durumlarına neden olabilmektedir. Sonuç olarak, güvenilirliği artırmak, kullanılabilirliği sağlamak ve felaket arızalarının önlenmesi için, evirici beslemeli ASM'lerde yük salınımının tespit edilmesi zorunludur.

Genel olarak, asenkron motorlarda durum izleme, gürültü, titreşim ve sıcaklık gibi bazı fiziksel büyüklüklerin izlenmesiyle gerçekleştirilir [4]. Bu büyüklüklerin izlenmesi kritik uygulamalardaki büyük motorlar için

ekonomik olarak uygundur, ancak küçük ve orta büyüklükte sürücüler ve motorlar için uygun maliyetli değildir. Bu kısıtlılığın üstesinden gelmek amacıyla, genellikle kontrol veya koruma amaçları için ölçülen stator akımları kullanılmaktadır. Bu nedenle, araştırmacılar ve mühendisler, stator akımlarını arıza tespitinde bir araç olarak kullanan Motor Akım İmza Analizi (MCSA) yöntemleri üzerine odaklanmıştır.

MCSA'nın, ASM'lerdeki mekanik ve elektriksel arızaların tespitinde kullanımı geniş çapta araştırılmaktadır. Bu arızaların tespiti genel olarak tek fazlı akımın güç spektrum yoğunluğu (PSD) tahmini, demodülasyon teknikleri ve zaman-frekans analizi tekniklerine dayanarak incelenmiştir [5], [6], [7]. Özellikle, stator akımlarının analizi ile asenkron makinaların mekanik arızalarının tespiti önemli derecede ilgi çekmiştir. Stator sargı arızalarının ve mekanik arızaların tespitinde üç fazlı akımlar kullanılmıştır [8], [9]. Yukarıda belirtilen çalışmalarda önerilen yaklaşımlar, belirli bir arızanın stator akımları üzerindeki etkisini anlamak için yararlıdır ancak otomatik bir arıza tespitinin geliştirilmesine izin vermemektedir. İlaveten bu yaklaşımlar, şebekeye doğrudan bağlı ASM'ler veya açık çevrim kontrollü ASM'ler için doğrulanmıştır.

Bu çalışmada, kapalı çevrim hız kontrollü asenkron motorlarda mekanik yük salınımını tespit etmek için üç fazlı akımların kullanılması önerilmektedir. Üç fazlı akımlar, tek fazlı akımla karşılaştırıldığında avantajlı olan anlık

simetrik bileşenleri (ASB) hesaplamada kullanılmaktadır [9]. Önerilen bu yaklaşım ile, arızadan etkilenen ASB'ler ortaya konmakta ve stator sargı arızasının güvenilir bir imzasının çıkarılması sağlanmaktadır. Bu çalışmada önerilen yaklaşımda, pozitif akım bileşeninin hesaplanması için üç faz akımları kullanılmaktadır. Daha sonra temel frekans ve arıza karakteristik frekansı ESPRIT ile tahmin edilmektedir. Genlikler ise En Küçük Kareler Yöntemi (EKY) ile hesaplanmaktadır. Son olarak, yük momenti salınımının saptanması için geliştirilmiş olasılık oranı testi (GLRT), gerçekleştirilmektedir. Önerilen yaklaşımın performansı, hem üç fazlı stator akımları hem de kontrol döngüsünden çıkan modüle edilmiş sinyal üzerinde araştırılmıştır. Bu karşılaştırma, kapalı çevrim kontrollü bir asenkron motorun mekanik yük momenti salınımını tespit etmeye olanak tanımaktadır.

## 2. Asenkron motor kontrol sistemi

Matlab / Simulink®'de, evirici beslemeli asenkron motorun ve kontrol sisteminin analitik üç fazlı benzetim modeli uygulanmıştır. Asenkron motor, üç fazlı bir sinüzoidal akım kaynağı olarak çalışan akım kontrollü PWM dönüştürücü ile beslenmektedir ve alan yönlendirmeli kontrol (FOC) stratejisi uygulanmıştır. FOC stratejisinde Clarke / Park dönüşümü ile motorun üç fazlı stator akımlarından türetilen d ve q akımlarını kontrol etmek için yine d ve q gerilim bileşenlerinden türetilmiş üç fazlı PWM besleme gerilimi elde edilmektedir. İki oransal-integral (PI) kontrol bloğuna dayanan iki kademeli kontrol döngüsünden oluşan tüm kontrol sistemi, Şekil 1'de gösterilmektedir. Dış döngüler asenkron motorun hızını ve rotor akısının, iç döngüler ise stator

akımlarının d ve q bileşenlerinin kontrol edilmesini sağlar. Benzetim modelinde Darbe genişlik modülasyonlu bir frekans çeviriciye bağlanmış 4 kW gücündeki 220/380 V, 50-Hz ve 4 kutuplu bir asenkron motor kullanılmaktadır. Asenkron motorun tüm parametreleri Tablo 1.'de verilmiştir

Mekanik arızalarla ilgili yapılan birçok makalede, yük momenti salınımlarının, motor stator akımlarını modüle eden hız salınımlarına neden olduğu gösterilmiş olup, bu durum mevcut spektrumda bazı ek frekansların oluşmasına yol açmaktadır. Bu ek frekanslar denklem (1)'de gösterilmektedir [3].

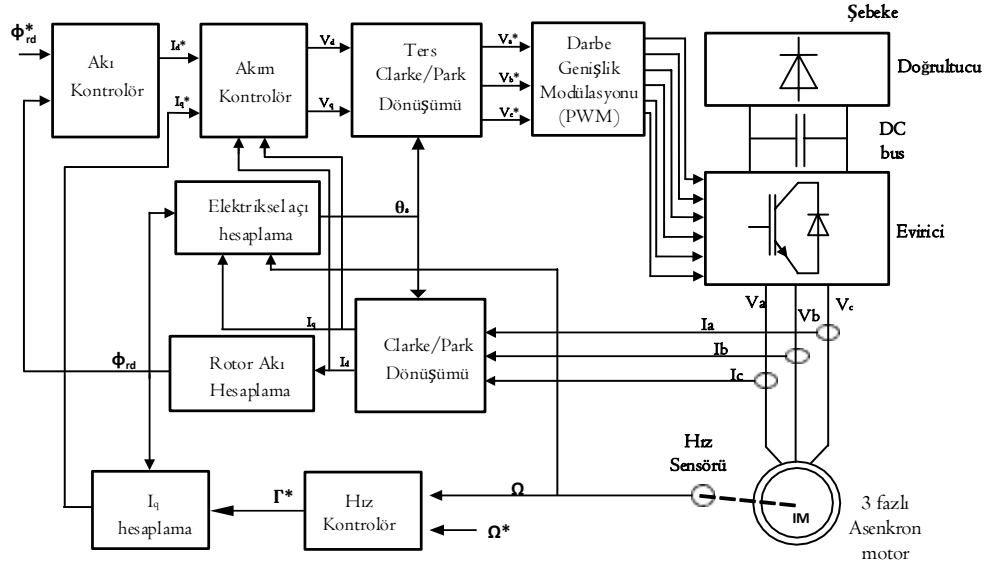
$$f_i = f_b \pm n f_r \quad (1)$$

Burada  $f_b$ , besleme gerilimi frekansını,  $f_r = (1-s) f_b/p$ , rotor frekansını, s kayma miktarını, p kutup çifti sayısını, n=1,2,3,... gibi herhangi bir tam sayısını ifade etmektedir.

Sonuç olarak, yük momenti salınımlarında, yük momenti ortalama bir  $\Gamma_a$  değeri ve  $f_i$  karakteristik frekansında değişen ek bir bileşen olarak modellenilebilir [3]. Dolayısıyla, yük momenti aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\Gamma = \Gamma_a + \sum_{k=1}^K \Gamma_{d_k} \cos(k \omega_d t) \quad (2)$$

Daha açık ifadesiyle, sadece temel terim düşünülmektedir. Bu durumda,  $\Gamma_{d1}$  yük momenti salınımının genliği ve  $\omega_d = 2\pi f_i$ 'dir. Asenkron motor nominal koşullar altında (nominal hız ve moment) çalıştırılmaktadır. Yük momenti salınımı, t = 0.5 saniyede başlatılmıştır. Tüm parametreler,  $f_s = 10$  kHz'lik bir örnekleme frekansında örneklenmiştir. Simülasyon sonuçları Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 1. ASM kontrol sisteminin blok şema gösterimi.

PWM eviricinin sahip olduğu yüksek anahtarlama frekansı sayesinde besleme kaynağından çekilen akımların, tam sinüzoidal olduğu görülmektedir. Ayrıca kararlı durum koşullarında hız sabit kabul edilebilirken, moment üzerinde, akım harmoniklerinden kaynaklı bazı dalgalanmalar görülmektedir. Bu şekil aynı zamanda yük moment salınımının, sinyalin dalga formuna dayalı olarak tespit edilmesinin zor olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, bu makalenin geri kalanında otomatik bir yük salınım tespit yaklaşımı sunulmaktadır.

### 3. Sinyal işleme yöntemleri

#### 3.1. Anlık simetrik bileşen hesabı

Dengesiz bir sistemin analizi için simetrik bileşenler yaklaşımına göre, herhangi bir dengesiz akım seti simetrik dengelenmiş fazların üç setine dönüştürülebilir [10], [11]. Pozitif  $x_+$ , negatif  $x_-$  ve sıfır bileşenleri  $x_0$  olarak bilinen simetrik bileşenler, ters

Fortescue dönüşümü kullanılarak hesaplanabilir;

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_+ \\ x_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{2j\pi/3} & e^{-2j\pi/3} \\ 1 & e^{-2j\pi/3} & e^{2j\pi/3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

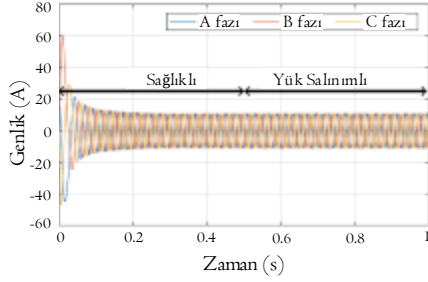
Üç fazlı asenkron motorlarda, genellikle güç kaynağına bağlantılı bir nötr kullanılmamaktadır. Bu nedenle, üç fazlı akımların tek kutuplu bir bileşeni yoktur. Dolayısıyla, hem dengeli hem de dengesiz sistemlerde sıfır bileşenin bir sayısal değeri yoktur, yani  $x_0 = 0$ 'dır. Dahası, üç fazlı sistemler genellikle dengeli olduğundan, pozitif bileşen, asenkron motorun çalışma koşullarıyla ilgili bilgileri içerir [9]. Bunun sonucu olarak, mekanik arıza tespiti için sadece  $x_+$  pozitif bileşeni kullanılacaktır.

#### 3.2. Stator akım hesabı

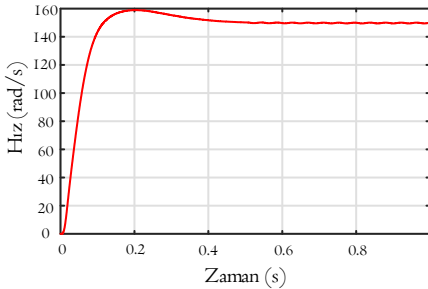
PWM eviricinin sahip olduğu oldukça yüksek anahtarlama frekansı nedeniyle stator sargılarında akan akımların sinüzoidal olduğu varsayılabilir. Yük moment salınımlarında,  $x_+$  pozitif

bileşeni şu şekilde tanımlanabilir:

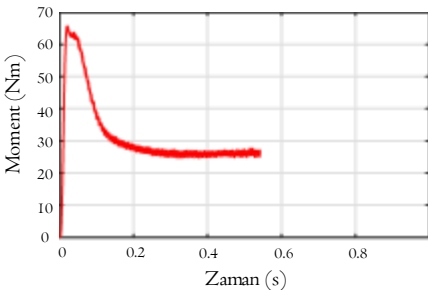
$$x_+[n] = \sum_{k=-L}^L a_k \exp\left(2\pi f_k \frac{n}{f_s} + \phi_k\right) + b[n] \quad (4)$$



(a) Stator faz akımları



(b) Motor hızı



(c) Moment

Şekil 2. Evirici beslemeli asenkron motor için benzetim sonuçları.

Burada  $x_+[n]$  stator akımlarının pozitif bileşeni temsil eder,  $b[n]$  ise varyansı  $\sigma^2$  olan ve ortalaması sıfır olan bir beyaz Gauss gürültüsünü gösterir.

$k \neq 0$  durumunda  $f_k = f_b \pm kf_l$  frekans kümesi arızanın frekans imza içeriğidir.  $a_k$  ve  $\phi_k$  parametreleri sırasıyla  $k$ . nıncı bileşenin genliği ve başlangıç fazını

göstermektedir.  $f_s$  ise örnekleme frekansını ifade etmektedir. Üç fazlı akımların  $N$  adet örneğinin ölçüldüğünü varsayalım.

Hesaplanan pozitif akım bileşeni  $x_+$ , şu şekilde tanımlanır:

$$x_+ = [x_+[0] \dots x_+[N-1]]^T \quad (5)$$

### 3.3. ESPRIT ve EKY dayalı parametre tahmini

Altuzay boşluk teknikleri,  $x_+$  kovaryans matrisinin öz ayrışmasına dayanır. Gözlemlenen uzunluğun  $N$  pozitif dizisinin  $M$  ardışık örneklerinin % 50 çakışmasını içeren  $M \times 1$  sütun  $x_+[m]$  alt vektörlerini oluşturalım. Kovaryans matrisi tahmini;

$$\hat{R}_{x_+} = \frac{1}{N-M+1} \sum_{m=0}^{N-M} x_+[m]x_+[m]^H \quad (6)$$

Burada  $(\cdot)^H$  ile gösterilen Hermitian tranzpozudur.  $\hat{R}_{x_+}$  un özdeğer ayrışımı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\hat{R}_{x_+} = [S \ N] \begin{bmatrix} \Lambda_s & 0 \\ 0 & \Lambda_n \end{bmatrix} [S \ N]^H \quad (7)$$

Burada;

- $\Lambda_s$  ve  $\Lambda_n$  içerisinde sinyal ve gürültü alt uzaylarını barındıran ve özdeğerleri sırasıyla azalan diyagonal matrislerdir.
- $S$  ve  $N$  sırasıyla orthonormal özvektörler ile ilişkili matrislerdir.

PSD tahmini için kullanılan ESPRIT teknikleri, sinyal altuzay dönme değişmezliğine dayanmaktadır [12]. Bu teknikler iki uzantıya sahiptir: En Küçük Kareler ESPRIT (EK-ESPRIT) ve Toplam En Küçük Kareler (TEK-ESPRIT). TEK-ESPRIT'in daha yüksek bir hesaplama maliyeti pahasına EK-ESPRIT'den daha yüksek doğruluklu hesaplamalar yaptığı gösterilmiştir [13].

Sinyal altuzayını,  $S_1$  ve  $S_2$  olarak tanımlanan kademesiz ve kademeli

sinyal altuzaylarına karşılık gelen iki altuzayına bölelim.

$$S_1 = [I_{M-1} \ 0]S, \quad S_2 = [0 \ I_{M-1}]S \quad (8)$$

PSD tahmini için TEK-ESPRIT aşağıda gösterilen ve olan  $\hat{S} = [S_1 \ S_2]$  Tekil Değer Ayrışımı (TDA)'na dayanmaktadır.

$$\hat{S} = L \sum V^H \quad (9)$$

Burada;

- L, sol tekil vektörlerin bir matrisidir.

- $\Sigma$ , ana diyagonal üzerinde, azalan büyüklükte sıralı tekil değerlerin bir matrisidir.

- V, aşağıdaki gibi (2Lx2L) kadrantlarına bölünebilen, tekil vektörlerin bir (4Lx4L) birim matrisidir.

$$V = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} \\ V_{21} & V_{22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$\Phi$  olarak gösterilen matrisi tanımlarsak;

$$\Phi = -V_{12} V_{22}^{-1} \quad (11)$$

Frekans tahmini,  $\Phi$ 'nin TDA'sına dayanılarak hesaplanır ve bunlar,

$$\hat{f}_k = \frac{\arg(\Phi_k)}{2\pi} x_{f_s} \quad (12)$$

Burada  $\Phi_k$ ,  $\Phi$ 'nin özdeğeridir.

Son olarak,  $\theta$  parametresi aşağıdaki şekilde EKY kullanılarak hesaplanır:

$$\hat{\theta} = \left( G^T \begin{pmatrix} \hat{f}_k \\ \hat{f}_k \end{pmatrix} G \begin{pmatrix} \hat{f}_k \\ \hat{f}_k \end{pmatrix} \right)^{-1} G^T \begin{pmatrix} \hat{f}_k \\ \hat{f}_k \end{pmatrix} x_+ \quad (13)$$

#### 4.Genelleştirilmiş olasılık oranı testi (GLRT)

##### 4.1.Hipotez testi

Asenkron motor arıza tespiti bir hipotez testi olarak düşünülebilir. Gerçekte, arıza tespiti ile uğraşırken, ikili hipotez testi aşağıdaki gibi formüle edilebilir [14]:

- $H_0$  : Sağlıklı durumdaki motor
- $H_1$  : Arızalı durumdaki motor (mekaniksel arızalı)

$\theta$ , arızanın bilgisini taşıyan karmaşık değerli vektördür. Aslında, yukarıda

belirtilen hipotez testiyle uğraşırken asıl konu, arıza ile ilgili  $f_k$  frekanslarının genliğinin,  $k \neq 0$  olmak üzere, sıfır mı ( $H_0$ ) ya da sıfır değil mi ( $H_1$ ) ne olursa olsun belirlemektir. Karmaşık nicelikleri kullanmak yerine aşağıdaki gibi ifade edilebilen vektör  $\theta$ 'nın gerçek ve sanal kısımlarını içeren yeni bir  $\hat{\theta}$  vektörü tanımlanırsa;

$$\hat{\theta} = \begin{bmatrix} Re(\theta) \\ Im(\theta) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Bu gösterim kullanılarak, ikili hipotez testi matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$\begin{aligned} H_0 : \quad & A \hat{\theta} = 0, \quad \sigma^2 > 0 \\ H_1 : \quad & A \hat{\theta} \neq 0, \quad \sigma^2 > 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Burada A,  $r=4L$  rankının bir (rxp) matrisidir ( $r \leq p=2x(2L+1)$ ). Bu matris, temel frekansla ilişkili satırları silinen bir ( $p \times p$ ) özdeşlik matrisidir.

##### 4.2. GLRT dedektörü

Doğru hipotezi belirlemek için GLRT önerilir. GLRT için, incelenen hipotez testi olarak  $H_1$  seçilirse;

$$T_{(x_+)} = \frac{N-p \left( A \hat{\theta} \right) \left[ A \left( \check{G}^T \check{G} \right)^{-1} A^T \right]^{-1}}{x_+^H \left( I - \check{G} \left( \check{G}^T \check{G} \right)^{-1} \check{G}^T \right) x_+} > \gamma \quad (16)$$

Bilinmeyen parametreler tahminleri ile değiştirilir, örneğin

$$\check{G} = \begin{bmatrix} Re \left( G \left( \hat{f}_k \right) \right) & Im \left( G \left( \hat{f}_k \right) \right) \end{bmatrix}. \quad \text{Eşik}$$

değer istenen yanlış alarm olasılığından hesaplanır [14]. GLRT dedektörü için test eşiği, aşağıda eşitliği verilen  $P_{Fa}$  yanlış alarm olasılığına dayanarak hesaplanmaktadır.

$$P_{Fa} = Q_{Fr, N-p}(\gamma) \quad (17)$$

Burada  $Q_F(\zeta)$ ,  $\zeta$  ile gösterilen rastlantısal bir değişkenli tamamlayıcı kümülatif bir dağılım fonksiyonudur.  $F_{r, N-p}$ ,  $N-p$

serbestlik dereceli bir paydalı ve  $r$  serbestlik dereceli bir paylı  $F$  dağılımını ifade etmektedir.

## 5. Benzetim sonuçları

### 5.1. Önerilen Yaklaşım Sonuçları

Benzetim modelleri sabit referans çatı ve standart uzay fazör modeli kullanılarak Tablo 1'de verilen benzetim motor parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Asenkron motor 27 Nm'lik ortalama yük (nominal moment) ve  $\Gamma_d = 0.5$  Nm genlikli ve  $f_d \approx 23.83$  Hz frekanslı bir moment salınımla  $t = 3$ . saniyeden itibaren verilmiştir. Arıza göstergesi periyodik olarak, her  $\delta_t$  zaman aralığında hesaplanmıştır. Benzetim sırasında, arıza imzasının iki ardışık hesaplama arasındaki zaman aralığı  $\delta t = 100$  ms'ye eşittir. Ayrıca,  $\gamma$  arıza tespit eşiğinin hesaplanmasına izin veren yanlış alarm olasılığı,  $P_{Fa} = 10^{-4}$  değerine sabitlenmiştir. GLRT tabanlı  $T_{(x^*)}$  arıza kriterinin açılımı Şekil 3'te verilmiştir.

**Tablo 1.** Benzetimde kullanılan asenkron motor parametreleri

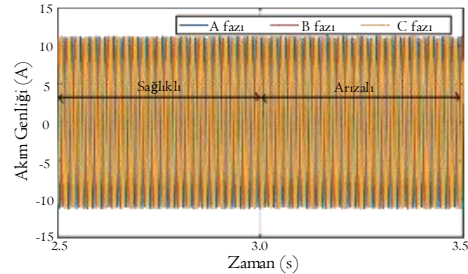
Nominal güç, $P_n$	4 kW
Besleme kaynağı frekansı, $f_b$	50 Hz
Besleme kaynağı gerilimi, $V_n/U_n$	220/280 V
Nominal akım, $I_n/I_n$	14.4/8.3 A
Nominal motor hızı, $n$	1430 dev/dk
Kutup çifti sayısı, $p$	2
Eylemsizlik, $J$	0.0225 kg.m <sup>2</sup>
Sürtünme katsayısı, $f_t$	0.0131 N.m.s
Stator sargı direnci, $R_s$	1.6 $\Omega$
Rotor sargı direnci, $R_r$	1.15 $\Omega$
Stator faz endüktansı, $L_s$	182 mH
Rotor faz endüktansı, $L_r$	182 mH

Bu sonuçlar, önerilen yaklaşımın kararlı çalışma durumunda yük moment salınımının saptanmasına olanak verdiğini açıkça göstermektedir. Ancak

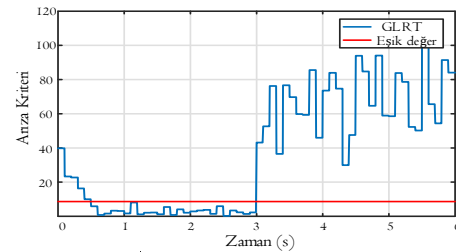
geçici yanlışlık sapnabilir. Gerçekte, motor hızı sürekli duruma geldiğinde, stator akımlarının temel frekansı buna göre oluşur yani stator akımlarının temel frekansı doğrudan motor hızı ile ilişkilidir. Dolayısıyla, frekans tahmin aşaması sinyallerin durağan olmadığı durum için geçerli değildir.

### 5.2. Yük Salınımı Tespiti İçin Sinyal Modülasyonu

Temel amaç, önerilen yaklaşımın kullanılması ile kontrol sinyallerinin ( $V_a$ ,  $V_b$  ve  $V_c$ ) kullanılabilirlik olasılığını ispatlamaktır. Benzetim sonuçları Şekil 4'te verilmiştir. Bu şekilden anlaşıldığı kadarıyla önerilen yaklaşım, arızalı bir motoru modüle edilen sinyallere dayalı olarak sağlıklı bir motordan ayırt etmeyi mümkün kıldığı görülmektedir. Gerçekte kapalı çevrim kontrolde herhangi bir arıza, stator akımlarını doğrudan etkiler, bu etki kontrol çevrimi boyunca yayılır ve güç anahtarlarının, anahtarlama sırasını tanımlamak için kullanılan modülasyon sinyalleri üzerinde etkili olur.



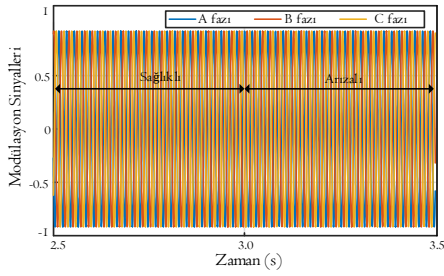
(a) Stator akımları



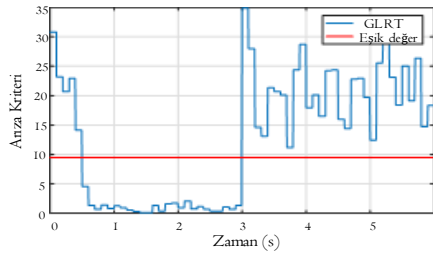
(b) Zamana göre GLRT

**Şekil 3.** Pozitif ASB'ler kullanılarak arızalı (yük salınımlı) asenkron motor benzetim sonuçları.

Modülasyon sinyalleri kontrol çevrimi tarafından işlendiğinden çizelgelerle desteklenmelidir. Bu sonuç oldukça ilginçtir. Kontrol stratejisi genellikle modern asenkron motor sürücülerinde DSP kartları kullanılarak yapıldığından, bu sinyaller, arıza tespiti için önerilen yaklaşımı kullanarak kolayca hafızaya kayıt edilip işlenebilir.



(a) Modülasyon sinyalleri



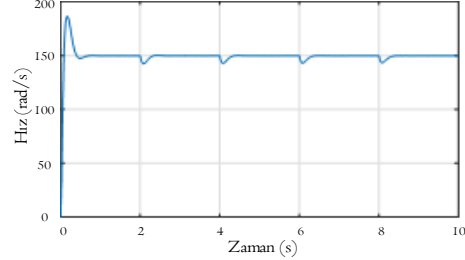
(b) Zamana göre GLRT

**Şekil 4.** Modülasyon sinyalleri kullanılarak arızalı (yük salınımlı) asenkron motor benzetim sonuçları.

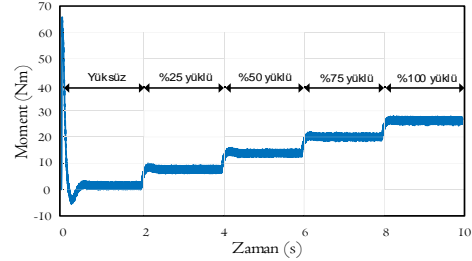
### 5.3. Yük Büyüklüğünün Etkisi

Önerilen yaklaşımın performansı, nominal hızdaki çeşitli yük koşulları için değerlendirilmiştir. Benzetim sonuçları, önerilen yaklaşımın değişken yük durumlarında arızayı tespit yeteneğini gösteren grafikler Şekil 5'te gösterilmiştir. Geçici hız rejimi dışındaki durumlarda sistem doğru bir tahmin sonucu vermektedir ancak geçici rejim durumundaki hatalı sonuç, motorun dönme hızının stator akımlarının temel frekansıyla bağlantılı olmasından kaynaklıdır. Sonuç olarak, geçici hız

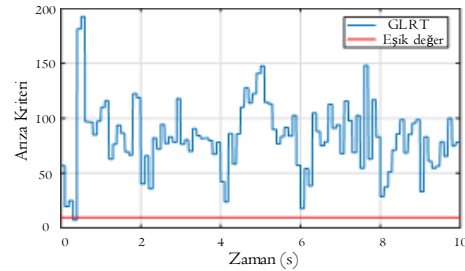
rejimi nedeniyle oluşan frekans, besleme kaynağının frekansını ve arıza ile ilişkili olan frekansların tahmininde hatalı sonuçlara yol açmaktadır.



(a) Motor hızı



(b) Moment



(c) Stator akımına dayalı GLRT-Zaman grafiği

**Şekil 5.** Değişken yük koşullarındaki arızalı (yük salınımlı) asenkron motor benzetim sonuçları

## 6. SONUÇ

Sunulan bu çalışmada, asenkron motorlardaki mekanik arıza ile ilişkili olan yük momenti salınımının saptanmasını incelemiştir. Geliştirilen yöntem, güvenilir bir arıza tespit belirteci hesaplamak için TEK-ESPRIT ve EKY ve GLRT kullanılarak simetrik PSD bileşenlerinin tahminine dayanmaktadır. Önerilen bu özgün yaklaşım kapalı çevrim hız kontrollü evirici beslemeli asenkron motorun analitik



modellerinden elde edilen benzetim çalışmasından alınan sinyaller kullanılarak doğrulanmıştır. Önerilen yaklaşımın, sabit akımlar veya

modülasyon sinyalleri kullanılarak yük momentinin salınımının saptanmasında yararlı bir yöntem olduğu gösterilmiştir.

#### Kaynakça

- [1] P. J. Tavner, "Published in IET Electric Power Applications Review of condition monitoring of rotating electrical machines," *IET Electr. Power Appl*, vol. 2, no. 4, pp. 215-247, 2008.
- [2] A. K. S. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 7, pp. 1483-1510, 2006.
- [3] M. Blodt, M. Chabert, J. Regnier, and J. Faucher, "Mechanical Load Fault Detection in Induction Motors by Stator Current Time-Frequency Analysis," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 6, pp. 1454-1463, 2006.
- [4] Z. Gao, C. Cecati, and S. X. Ding, "A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques-part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 6, pp. 3757-3767, 2015.
- [5] B. Trajin, M. Chabert, J. Regnier, and J. Faucher, "Hilbert versus Concordia transform for three-phase machine stator current time-frequency monitoring," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 23, no. 8, pp. 2648-2657, 2009.
- [6] S. Rajagopalan, J. A. Restrepo, J. M. Aller, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Nonstationary motor fault detection using recent quadratic time-frequency representations," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 3, pp. 735-744, 2008.
- [7] F. Çıra, "Asenkron Motorlarda Gerçek Zamanlı Durum İzleme ve Arıza Tespiti" *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, vol. 7 issue 1, pp. 12-24, 2018
- [8] M. B. K. Bouzid and G. Champenois, "New expressions of symmetrical components of the induction motor under stator faults," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4093-4102, 2013.
- [9] G. Cablea, P. Granjon, and C. Bérenguer, "Three-phase electrical signals analysis for mechanical faults monitoring in rotating machine systems," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 92, pp. 278-292, 2017.
- [10] C. L. Fortescue, "Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. XXXVII, no. 2, pp. 1027-1140, 1918.
- [11] G. C. Paap, "Symmetrical components in the time domain and their application to power network calculations," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 2, pp. 522-528, 2000.
- [12] R. Roy and T. Kailath, "ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques," *Acoust. Speech, Signal Process. [see also IEEE Trans. Signal Process. IEEE Trans.*, vol. 37, no. 7, pp. 984-995, 1989.
- [13] M. H. J. Gruber and M. H. Hayes,

“Statistical Digital Signal Processing and Modeling,” *Technometrics*, vol. 39, no. 3, p. 335, 1997.

- [14] S. M. Kay, “Fundamentals of statistical signal processing: estimation theory,” *Prentice-Hall Signal Processing Series*. p. 595, 1993.