



Diagnosis of simultaneous broken rotor bars and static eccentricity faults of induction motors by analyzing stator current and vibration signals

Ahmet Kabul^{1*}, Abdurrahman Ünsal²

¹Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, Burdur, 15030, Turkey

²Kütahya Dumlupınar University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Kütahya, 43100, Turkey

Highlights:

- An appropriate method of the analysis of stator current and vibration signals.
- Good performance under various loading conditions and at low loading conditions.
- Detection of characteristic harmonic components of stator current and vibration signals.

Keywords:

- Induction motor faults
- Simultaneous faults
- Broken rotor bars
- Static eccentricity fault
- Hilbert envelope analysis

Article Info:

Research Article
Received: 04.03.2020
Accepted: 05.04.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.697785

Acknowledgement:

This study was supported by TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) with a grant number of 116E302.

Correspondence:

Author: Ahmet Kabul
e-mail:
ahmetkabul@mehmetakif.edu.tr
phone: +90 248 213 27 61

Graphical/Tabular Abstract

It is important to detect the faults of induction motors in an accurate manner due to their widespread use in industrial production processes. Broken rotor bars and eccentricity faults are the common faults of induction motor. The simultaneous occurrence of these two types of faults is often encountered in industrial facilities. Therefore, it is important to properly detect characteristic harmonic components of these types of faults. In this paper, a Normalized Least Mean Square (NLMS) adaptive filter is employed to remove noise. Then, Hilbert transform is applied for the demodulation of envelope signal. Finally, Fast Fourier Transform (FFT) is used to detect the characteristic harmonic components of vibration/current signals. The block diagram of the proposed method is shown in Figure A.

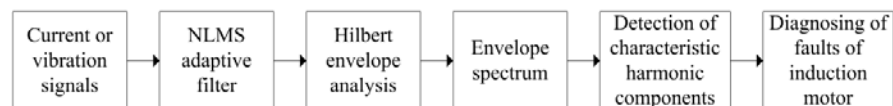


Figure A. Block diagram of the proposed method

Purpose: The purpose of this paper is to detect characteristic harmonic component frequencies of simultaneous multiple faults of induction motors (broken rotor bars and static eccentricity) by applying Hilbert envelope analysis to current and vibration signals.

Theory and Methods:

It is difficult to detect low amplitude harmonic components when multiple faults exist in an induction motor due to the dominant harmonic components. To overcome this challenge, Hilbert envelope analysis has been used in this study. The broken rotor bars have been created by drilling three holes to the rotor bars. The rotor has been operated with a 0.20mm eccentricity from the stator axis to create static eccentricity fault. The stator current and vibration signals have been recorded with a sampling frequency of 25 kHz.

Results:

Hilbert envelope analysis was applied to stator current and vibration signals to detect characteristic harmonic component frequencies, respectively. The proposed method is verified under 25%, 50%, 75% and 100% loading levels of induction motor. The obtained results have been compared with the theoretical results of characteristic harmonic component frequencies of both stator current and vibration signals.

Conclusion:

Experimental results show that the proposed method successfully detects characteristic harmonic component frequencies of stator current and vibration signals when the broken rotor bars and static eccentricity faults occur simultaneously under four different loading levels of an induction motor.



Asenkron motorlarda eşzamanlı kırık rotor çubukları ve statik eksenel kaçıklık arızalarının stator akımı ve titreşim sinyalleri analizi ile tespiti

Ahmet Kabul^{1*}, Abdurrahman Ünsal²

¹Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 15030, Merkez, Burdur, Türkiye
²Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 43100, Merkez, Kütahya, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Stator akımı ve titreşim sinyalleri analizine uygun bir yöntem
- Düşük ve değişken yük koşulları altında kullanılabilir olma
- Stator akım ve titreşim sinyallerinin karakteristik harmonik bileşenlerinin tespiti

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 04.03.2020
Kabul: 05.04.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.697785

Anahtar Kelimeler:

Asenkron motor arızaları,
eşzamanlı arızalar,
kırık rotor çubukları,
statik eksenel kaçıklık
arızası,
Hilbert zarf analizi

ÖZ

Asenkron motorların endüstriyel üretim süreçlerinde yaygın olarak kullanılması, bu motorların arıza tespitlerinin doğru ve eksiksiz olarak yapılmasını gerekli kılmıştır. Kırık rotor çubukları ve eksenel kaçıklık arızaları asenkron motorlarda karşılaşılan yaygın arıza tiplerindedir. Bu iki arızanın aynı anda oluşması işletme ortamlarında sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Bu arızalara ait karakteristik harmonik bileşenlerin net bir şekilde tespit edilebilmesi işletmeler açısından önemlidir. Bu bileşenler çoğu zaman düşük genlikli olup sistemde gürültü olması bu bileşenlerin tespitini zor hale getirmektedir. Bu çalışmada, eşzamanlı kırık rotor çubukları ve statik eksenel kaçıklık arızaları stator akım ve titreşim sinyalleri ile incelenmiştir. Akım ve titreşim sinyalleri asenkron motorun dört farklı yük seviyesinde (%25, %50, %75 ve %100) Hilbert zarf analizi yöntemi ile incelenmiştir. Analiz sonucunda akım ve titreşim sinyallerinin karakteristik harmonik bileşen frekansları ve genlikleri zarf spektrumunda başarılı bir şekilde tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar önerilen yöntemin eşzamanlı kırık rotor çubukları ve statik eksenel kaçıklık arızalarının tespitinde kullanılabileceğini göstermektedir.

Diagnosis of simultaneous broken rotor bars and static eccentricity faults of induction motors by analyzing stator current and vibration signals

H I G H L I G H T S

- An appropriate method of the analysis of stator current and vibration signals
- Good performance under various loading conditions and at low loading conditions
- Detection of characteristic harmonic components of stator current and vibration signals

Article Info

Research Article
Received: 04.03.2020
Accepted: 05.04.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.697785

Keywords:

Induction motor faults,
simultaneous faults,
broken rotor bars,
static eccentricity fault,
Hilbert envelope analysis

ABSTRACT

It is important to detect the faults of induction motors in an accurate manner due to their widespread use in industrial production processes. Broken rotor bars and eccentricity faults are the common faults of induction motor. The simultaneous occurrence of these two types of faults is often encountered in industrial facilities. Therefore, it is important to properly detect characteristic harmonic components of these types of faults. It is difficult to detect these components at low loading and noisy conditions. In this paper, the simultaneous broken rotor bars and static eccentricity faults are investigated based on the stator current and vibration signals. Hilbert envelope analysis was applied to the stator current and vibration signals under four different loading levels (25%, 50%, 75% and 100%) of induction motor. The frequencies and amplitudes of characteristic harmonic components have been successfully detected in envelope spectrum. The results show that the proposed method can be used to diagnose the simultaneous broken rotor bars and eccentricity faults of induction motors.

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Üç fazlı asenkron motorlar, bakımlarının kolay, fiyatlarının ucuz, yapılarının dayanıklı olmalarından dolayı endüstriyel uygulamalarda (pompa, fan, konveyör vb.) yaygın olarak kullanılmaktadır. İşletmelerde planlanan üretim süreçlerinin aksamaması için bu motorların izlenmesi ve minimum duruşla çalışmalarına devam etmeleri oldukça önemlidir [1, 2].

Asenkron motor arızalarının dağılımı %40 rulman, %35 stator, %10 rotor ve %15 diğer arızalar şeklinde verilmektedir [3]. Arıza dağılımı bu şekilde yapılsa da ortaya çıkan bazı arızaların temelinde başka arıza tipleri de yatabilmektedir. Örneğin bir asenkron motorda ortaya çıkan rulman arızasının sebebi kırık rotor çubukları veya eksenel kaçıklık arızaları olabilmektedir. Bu yüzden araştırmacılar üç fazlı asenkron motorlarda tekli arıza tespitinin yanında eşzamanlı çoklu arıza tespitine yönelik çalışmalara ağırlık vermeye başlamışlardır [4].

Kırık rotor çubukları ve eksenel kaçıklık arızaları birlikte incelenen yaygın arıza tiplerindedir [5]. Üretici kaynaklı olmayan statik eksenel kaçıklık arızasının önemli nedenlerinden bir tanesi de motor-yük arasında oluşan hizalama problemleridir. Hizalama problemi eksenel kaçıklık, kırık rotor çubukları ve rulman arızalarına sebep olabilmektedir [6, 7]. Eksenel kaçıklık arızalarının karakteristik harmonik bileşenleriyle tespit edildiği durumlarda kırık rotor çubukları ve rulman arızalarına ait karakteristik harmonik bileşenlerinin de incelenmesi gerekir. Eksenel kaçıklık arızası dinamik, statik ve hibrit olmak üzere üç farklı şekilde oluşmaktadır. Bu çalışmada statik eksenel kaçıklık arızası kırık rotor çubuklarıyla birlikte incelenmiştir.

Kırık rotor çubukları ve statik eksenel kaçıklık arızalarının tespitine yönelik yapılan çalışmalarda akım ve titreşim sinyallerinin analizine dayalı yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin temel amacı karakteristik harmonik bileşenlerin frekanslarını ve genliklerini tespit edebilmeleridir. Bu noktada karşılaşılan en büyük problem arıza kaynaklı harmonik bileşenlerin temel frekans bileşeni (f_s) tarafından gölgelenebilmesidir. Harmonik bileşenlerin temel frekans harmonik bileşenine çok yakın frekanslarda oluşması veya genliklerinin temel bileşenin genliğine göre çok düşük olması söz konusu gölgelenme problemlerine yol açabilmektedir. Bu çalışmanın ana motivasyonu temel frekans harmonik bileşeni tarafından gölgelenen düşük genlikli karakteristik harmonik bileşenlerin başarılı bir şekilde tespit edilebilmesidir.

Stator akımına yansıyan statik eksenel kaçıklık arızası karakteristik harmonik bileşenleri (f_{ecc}) Eş. 1'de verilmektedir [8, 9].

$$f_{ecc} = f_s \pm kf_r \quad (1)$$

Bu eşitlikte k : 1,2,3, ... ve f_r : rotor (şaft) mekanik dönüş frekansını ifade etmektedir.

Titreşim sinyallerinde ortaya çıkan statik eksenel kaçıklık arızası karakteristik harmonik bileşenleri (f_{ecc}) Eş. 2'de verilmektedir [10, 11].

$$f_{ecc} = kf_r \quad (2)$$

Kırık rotor çubukları stator akımına yan-band (f_{sb}) harmonik bileşenleri olarak yansır. Bu bileşenler Eş. 3'teki gibi hesaplanır [12, 13].

$$f_{sb} = (1 \pm 2ks)f_s \quad (3)$$

Bu eşitlikte s , asenkron motorun kayma değeridir.

Kırık rotor çubukları motorda aynı zamanda titreşime de sebep olmaktadır. Titreşim sinyalleri yan-band harmonik bileşenleri Eş. 4'teki ifade kullanılarak hesaplanabilir [14, 15].

$$f_{sb} = f_r \pm 2ksf_s \quad (4)$$

Literatürde kırık rotor çubukları [16-19] ve statik eksenel kaçıklık [20-22] arızalarının ayrı ayrı incelendiği çalışmalara sıklıkla rastlanırken, bu arızaların eş zamanlı olarak tespit edildiği çalışmaların da güncel araştırma konuları arasında yer aldığı görülmektedir. Sobra vd. tarafından yapılan çalışmada [23], kırık rotor çubukları ve statik eksenel kaçıklık arızaları iki bölümde ele alınmıştır. İlk bölümde asenkron motor sadece statik eksenel kaçıklıkla, ikinci bölümde ise hem statik eksenel kaçıklık hem de kırık rotor çubukları ile birlikte çalıştırılarak hava boşluğunda oluşan kuvvetler karşılaştırılmalı olarak analiz edilmiştir. Ishkova vd. [5], kırık rotor çubukları ve eksenel kaçıklık arızalarının akım sinyallerini FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) ile analiz ederek akım sinyallerinin karakteristik frekanslarını tespit etmişlerdir. Önerdikleri yöntemi, ANSYS/Maxwell ortamında sabit yük değeri altında test etmişlerdir. Seghiour vd. [24], farklı arıza derecelerindeki dinamik eksenel kaçıklık ve kırık rotor çubukları arızalarını FEM (Sonlu Elemanlar Yöntemi) ile hava boşluğu manyetik akı yoğunluğunu kullanarak analiz etmişlerdir. Çalışmada sinyal analiz yöntemi olarak FFT kullanılmıştır. Mirzaeva vd. [25], eksenel kaçıklık ve kırık rotor çubukları arızalarını birlikte incelenmişlerdir. Bu çalışmada, Hall Etkili Akı Sensörleri (HEFS) yardımıyla, hava boşluğu manyetik akı sinyallerinin detaylı modeli çıkartılmıştır. Önerilen yöntemin geçerliliği farklı yük koşulları altında test edilmiştir. Minaz vd. [26], asenkron motor kırık rotor çubukları ve eksenel kaçıklık arızalarını sonlu elemanlar yöntemi ile modelleyerek simülasyon ortamında harmonik bileşenlerin tespitini yapmışlardır. Asenkron motor sabit yük altında çalıştırılmıştır. Arızalar farklı derecelerde oluşturulmuş ve makine öğrenme metotları kullanılarak arıza sınıflandırması yapmışlardır.

Literatür incelendiğinde, eşzamanlı kırık rotor çubukları ve eksenel kaçıklık arızalarının analizine yönelik yapılan çalışmalarda, arızaların genellikle simülasyon ortamında oluşturulduğu görülmektedir. Bu çalışmada ise statik eksenel kaçıklık arızası ve kırık rotor çubukları laboratuvar ortamında ve bir asenkron motor üzerinde oluşturulmuştur.

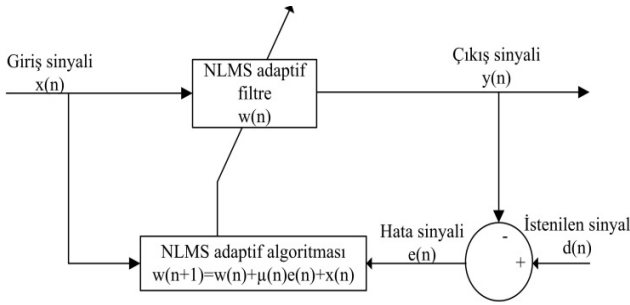
Bu çalışmanın literatüre sunduğu katkılar:

- Çalışmada gerçek zamanlı veriler analiz edilmektedir.
- Önerilen yöntem hem akım hem de titreşim sinyallerinin karakteristik harmonik frekanslarını tespit edebilmektedir.
- Sinyal analizleri Hilbert zarf analizi ile yapılmaktadır.
- Önerilen yöntem hem düşük yük durumu hem de değişken yük koşulları altında da çalışabilmektedir.

Makalenin geri kalan bölümlerinin organizasyonu şu şekildedir: 2. Bölümünde arıza tespiti için geliştirilen yöntem sunulmaktadır. Bölüm 3'te önerilen yöntemin analizleri ve geleneksel analiz yöntemlerine göre avantajları ortaya konulmaktadır. Çalışmada kullanılan test düzeneği Bölüm 4'te sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların yorumlamaları Bölüm 5'te verilmektedir. Bölüm 6'da makalede kullanılan simgelerin ve sembollerin açıklamalarına yer verilmektedir. Makale Bölüm 7'deki değerlendirmeler ile sonuçlandırılmaktadır.

2. ARIZA TESPİT YÖNTEMİ (FAULT DETECTION METHOD)

Analiz için kullanılan akım ve titreşim sinyalleri National Instruments (NI) c-DAQ 9174 veri toplama kartı ile kaydedilmiştir. Akım ve titreşim sinyalleri (gürültü sinyallerini elimine etmek için) önce Normalize Edilmiş En Küçük Kareler (NLMS) adaptif filtresinden geçirilmektedir. Kullanılan NLMS filtrenin blok diyagramı Şekil 1'de sunulmaktadır [27].



Şekil 1. NLMS adaptif filtre (NLMS adaptive filter)

NLMS adaptif filtre, hata sinyalinin karesinin beklenen değerini Eş. 5'te sunulan denklemi kullanarak minimum yapacak şekilde iteratif olarak çalışmaktadır. Bu çalışmada en iyi sonucu elde etmek için, tasarlanan NLMS adaptif

filtrenin derecesi 64, öğrenme sabiti ($\mu(n)$) 0,2 olarak belirlendi.

$$w_{n+1} = w_n + \mu(n)e_n + x_n \quad (5)$$

Zarf analizi yöntemi asenkron motor rulman arızalarının tespitinde sıkça başvurulan bir yöntemdir [28]. Zarf analizi yöntemi band-geçiren filtreleme, yarım dalga doğrultma ve alçak-geçiren filtreleme olmak üzere üç ana aşamadan oluşmaktadır [29]. Bu aşamalar demodülasyon olarak adlandırılmakta olup bu süreç bu çalışmada Hilbert dönüşümü ile gerçekleştirilmektedir [30].

Hilbert dönüşümü asenkron motorların farklı arızalarının tespitinde kullanılan bir sinyal işleme yöntemidir [31-33]. Hilbert dönüşümünün en önemli avantajlarından bir tanesi düşük genliğe sahip harmonik bileşenleri tespit ederek arıza tespitini daha kolay yapılabilmesidir. Adaptif filtre çıkışından elde edilen filtrelenmiş $x(t)$ sinyali, Hilbert dönüşümü ile negatif frekans bileşenlerinden arındırılmakta ve $z(t)$ analitik çıkış sinyali elde edilmektedir. $x(t)$ sinyalinin Hilbert dönüşümü Eş. 6'da verilmektedir [34-36].

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (6)$$

Eşitlikte sunulan P ifadesi Cauchy temel değerini ifade etmektedir. $t = \tau$ değerinde bu ifade matematiksel olarak Eş. 7'deki gibi ifade edilir.

$$H[x(t)] = x(t) * \left(\frac{1}{\pi t}\right) \quad (7)$$

Konvolüsyon işlemi sonucunda yeni bir analitik sinyal $z(t)$ elde edilir. $z(t)$ analitik sinyali kompleks düzlemde $\alpha(t)$ uzunluğuna ve $\theta(t)$ açısına sahiptir ve Eş. 8'deki gibi yazılabilir.

$$z(t) = \alpha(t)e^{j\theta(t)} \quad (8)$$

Verilen analitik sinyalin genliği ($\alpha(t)$), faz açısı ($\theta(t)$) ve açısal frekans ($\omega(t)$) hesapları için Eş. 9'daki ifadeler kullanılabilir. Bu ifadelerden $\alpha(t)$ karakteristik frekansların genlik tespiti, $\omega(t)$ harmonik bileşenlerin frekans tespiti için kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= \sqrt{x^2(t) + \{H[x(t)]\}^2}, \\ \theta(t) &= \tan^{-1}\left(\frac{H[x(t)]}{x(t)}\right) \\ \omega(t) &= \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \quad (9)$$

Geliştirilen arıza tespit yönteminin blok diyagramı Şekil 2'de sunulmaktadır. Bu yöntemin karar süreci son kullanıcı



Şekil 2. Önerilen yöntemin blok diyagramı (Block diagram of the proposed method)

tarafından manuel olarak yürütülmekte ve arıza tespiti yapılabilmektedir.

3. ÖNERİLEN YÖNTEMİN AVANTAJLARI (ADVANTAGES OF THE PROPOSED METHOD)

3.1. Stator Akım Sinyalleri (Stator Current Signals)

Hilbert zarf analizi yöntemi kırık rotor çubuklarını geleneksel Motor Akım İmza Analizi (MCSA) yöntemlerinden farklı olarak tespit etmektedir. Geleneksel MCSA yöntemlerinde karakteristik harmonik bileşenler, temel frekansın yan-band harmonik bileşenleri olarak ortaya çıkar. Bu harmonik bileşenler Hilbert zarf analizinde tek bir harmonik bileşen olarak ve artırılmış genlik değerleriyle tespit edilir (Şekil 3).

Hilbert zarf analizi yöntemi statik eksenel kaçıklık arızasını da alternatif bir yöntemle tespit etmektedir. Klasik MCSA yaklaşımlarında arızaya bağlı harmonik bileşenler tıpkı kırık rotor çubuklarında olduğu gibi yan-band harmonik bileşenleri şeklinde tespit edilirken ($f_s \pm kf_r$), önerilen yöntem arızayı öncelikli olarak $2f_s$, $4f_s$ ve $6f_s$ harmonik bileşenlerinin varlığına bakarak tespit etmektedir. Statik eksenel kaçıklık arızasının varlığında belirtilen frekans değerlerinde yüksek genlikli harmonik üretilmesi beklenen bir durumdur. Ancak bu durum tek başına statik eksenel kaçıklık arızasının tespiti için yeterli değildir. Bu yöntemde, statik eksenel kaçıklık arızası karakteristik harmonik bileşenleri $f_s + f_r$, $f_s + 3f_r$ ve $f_s + 5f_r$ frekanslarında tespit edilir. Geleneksel MCSA yöntemleri ile kıyaslandığında bu yöntemin önemli avantajlarından bir tanesi de temel frekans (50 Hz) harmonik bileşenin tespitine ihtiyaç duyulmamasıdır. Karakteristik harmonik bileşenlerin genlikleri temel frekans harmonik bileşenin genliği ile kıyaslandığında çok düşük kaldığı için geleneksel yöntemlerle tespitleri oldukça zor olmaktadır. Hilbert zarf analizinde ise hem artırılmış genlik hem de band-geçiren filtre kullanıldığı için sadece motor arızaları sonucu ortaya çıkan harmonik bileşenler görüntülenebilmektedir.

3.2. Titreşim Sinyalleri (Vibration Signals)

Asenkron motor kırık rotor çubukları titreşim sinyallerinde, motorun kayma değerine, rotor mekanik dönüş frekansına ve temel frekansa bağlı olarak harmonik bileşenler üretmektedir (Eş. 4). Titreşim sinyallerinde ortaya çıkan $2sf_s$ harmonik bileşeninin varlığı, kırık rotor çubuklarının tespitinde önemli

bir faktör olarak kullanılmaktadır [14]. Hilbert zarf analizi yöntemi, kırık rotor çubukları sonucu titreşim sinyallerinde ortaya çıkan $2sf_s$ harmonik bileşenini tespit etmeye odaklanmaktadır.

Titreşim sinyallerinde, eksenel kaçıklık arızalarına ait karakteristik harmonik bileşenler kf_r frekanslarında tespit edilmektedir. Önerilen yöntem, arıza tespitini iki aşamalı olarak gerçekleştirmektedir. İlk aşamada titreşim sinyallerine ait ilk üç karakteristik harmonik bileşen tespit edilmekte, f_r , $2f_r$ ve $3f_r$ harmonik bileşenlerinin genlikleri ile eksenel kaçıklık arızasının varlığı değerlendirilmektedir. $2f_r$ harmonik bileşenin genliği f_r harmonik bileşenin genliğinin 1,5 katı veya daha yüksek bir değerde ise, asenkron motorda statik eksenel kaçıklık arızasının olduğu değerlendirilmektedir [11, 22].

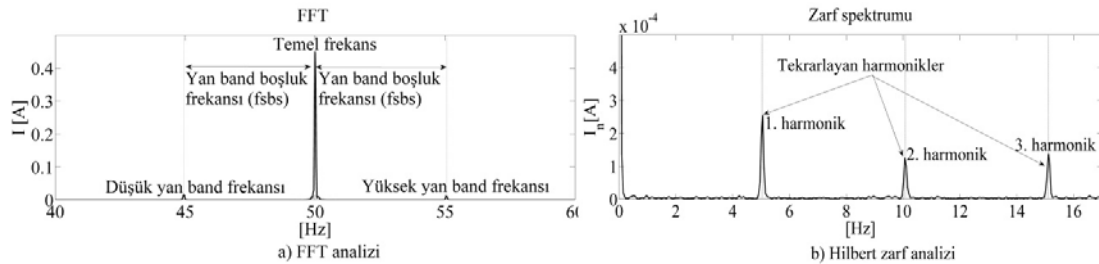
4. TEST DÜZENİĞİ (EXPERIMENTAL SETUP)

Geliştirilen yöntemin performansını doğrulamak için deneysel veriler kullanılmıştır. Deneysel veriler Şekil 4'te blok diyagramı verilen deney düzeneğinden elde edilmiştir. Deney düzeneğinde, Tablo 1'de özellikleri sunulan asenkron motor kullanılmıştır. Asenkron motoru yüklemek için bir adet 5 kVA gücünde ve kendinden uyarımlı senkron generatör 5kW'lık ayarlanabilir bir rezistif yük seti ile birlikte kullanılmıştır. Deneysel verilerin elde edilmesinde kullanılan cihazlar Şekil 5'te sunulmuştur.

Tablo 1. Motor etiket bilgileri (Nameplate of induction motor)

Marka	GAMAK
Model	AGM2E 100L 2
Faz	3
Bağlantı Tipi	Y-bağlı
Gerilim (V)	380
Frekans (Hz)	50
Akım (A)	5,9
Güç (W)	3000
Güç katsayısı	0,87
Hız (d/dk)	2850

Üç-faz stator akımı ve üç-eksen titreşim sinyalleri veri toplama kartına (NI c-DAQ 9174) entegre edilen NI-9225 gerilim modülü yardımıyla kaydedilmiştir. Akım ve titreşim sinyalleri asenkron motorun %25, %50, %75 ve %100 yük seviyelerinde ve 25 kHz örnekleme frekansıyla kaydedilmiştir. Sinyal analizleri MATLAB ortamında



Şekil 3. Geleneksel MCSA yöntemi ve Hilbert zarf analizi (Conventional MCSA and Hilbert envelope analysis)

gerçekleştirilmiştir. Kırık rotor çubukları matkapla rotor çubuklarına üç adet delik açılarak oluşturuldu (Şekil 6a). Statik eksenel kaçıklık arızası için motor kapağındaki rulman yuvası genişletildi. Polylactic Acid (PLA) filamentinden 3D yazıcı ile üretilen burç, genişletilen rulman yuvasına yerleştirildi. Bu şekilde rotorun stator ekseninden 0,20 mm eksenel kaçıklıkla çalışması sağlandı (Şekil 6b).

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

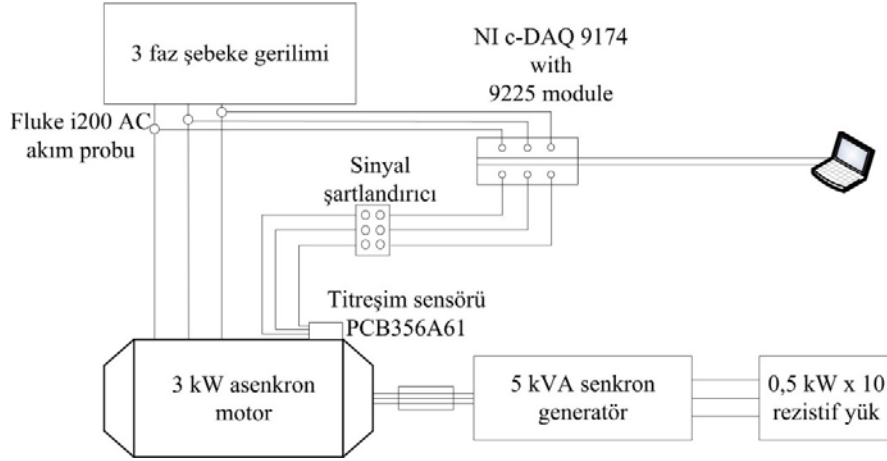
5.1. Stator Akım Verileri Analizi (Analysis of Stator Current Signals)

Sağlam motor stator akım sinyalleri (%100 yük altında) Hilbert zarf analizi Şekil 7’de gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere çoklu arıza karakteristik harmonik bileşenlerine zarf spektrumunda rastlanmamaktadır. Eşzamanlı kırık rotor çubukları ve statik eksenel kaçıklık arızalı asenkron motora ait stator akım sinyalleri Hilbert zarf analizi sonuçları Şekil 8-Şekil 15’te sunulmaktadır. Her bir yük kademesinde elde edilen sonuçlar, karakteristik

harmonik bileşenlerin daha belirgin bir şekilde tespit edilmesi için iki farklı spektrumda sunulmaktadır. İlk spektrumda (Şekil 8, Şekil 10, Şekil 12, Şekil 14) kırık rotor çubukları kaynaklı ilk üç harmonik bileşen ile statik eksenel kaçıklık arızası kaynaklı harmonik bileşen (0-125 Hz arası) görülmektedir. İkinci spektrumda (Şekil 9, Şekil 11, Şekil 13, Şekil 15) çoklu arıza sonucu oluşan harmonik bileşenlerin tümü (0-325 Hz arası) görülmektedir.

Tablo 2’de asenkron motorun yük kademelerine göre kayma değerleri ve rotor mekanik frekansları verilmektedir. Bu değerler karakteristik harmonik bileşenlerin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

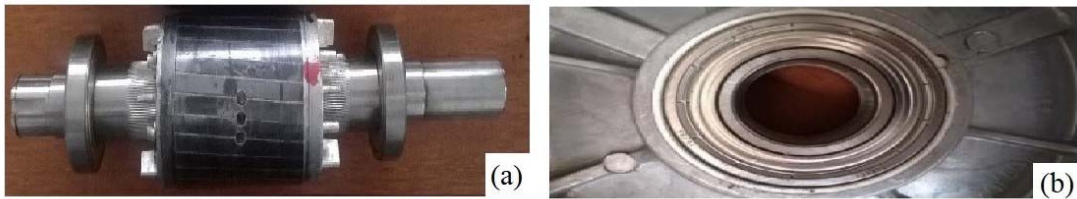
Kırık rotor çubukları karakteristik harmonik bileşenleri Şekil 8, Şekil 10, Şekil 12 ve Şekil 14’te sunulmaktadır. Tablo 3’te birinci harmonik bileşenin frekans ve normalize edilmiş genlik değerleri sunulmaktadır. Bu değerlere göre kırık rotor çubukları sonucunda oluşan yan-band frekanslarının (Şekil 3) teorik değerleri ($f_{sbs}(Teorik)$) ile Hilbert zarf analizi tarafından tespit edilen değerler (f_{sbs}) birbirlerine oldukça



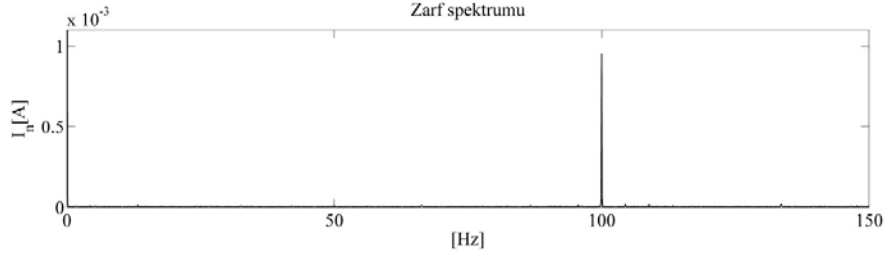
Şekil 4. Test düzeneği (Experimental test-bed)



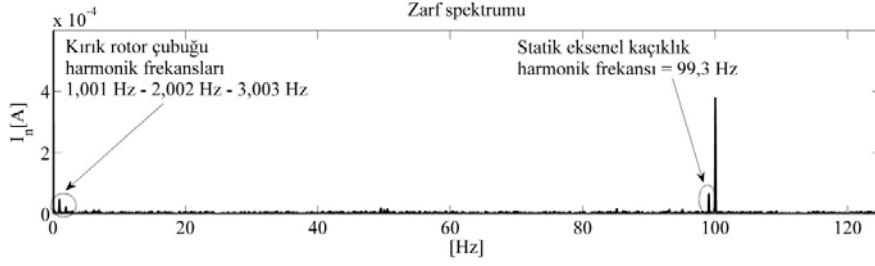
Şekil 5. Ölçüm cihazları (The measurement devices)



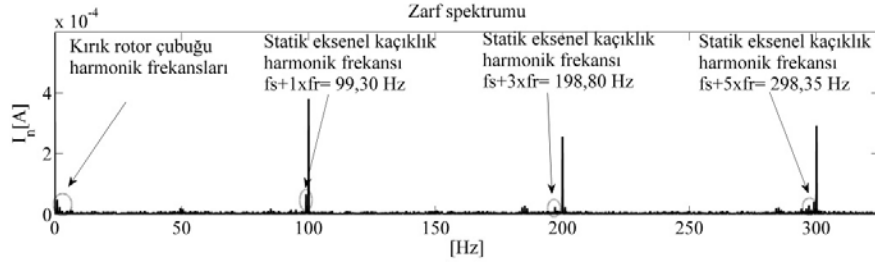
Şekil 6. (a) Kırık rotor çubukları (Broken rotor bars), (b) Statik eksenel kaçıklık (Static eccentricity)



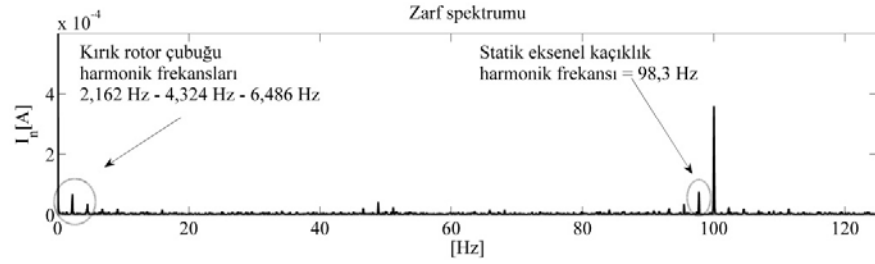
Şekil 7. Sağlam motor akım sinyali analizi (%100 yükleme) (Current signal analysis of healthy motor (%100 loading))



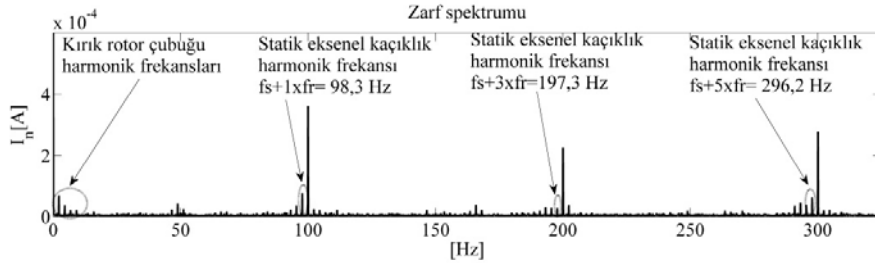
Şekil 8. Akım sinyali analizi (%25 yükleme) (Current signal analysis (25% loading))



Şekil 9. Akım sinyali analizi (%25 yükleme) (Current signal analysis (25% loading))



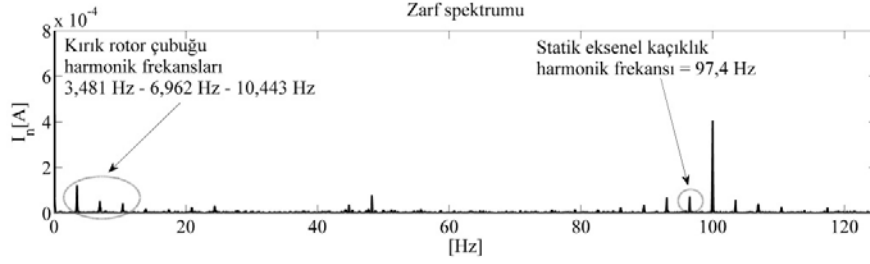
Şekil 10. Akım sinyali analizi (%50 yükleme) (Current signal analysis (50% loading))



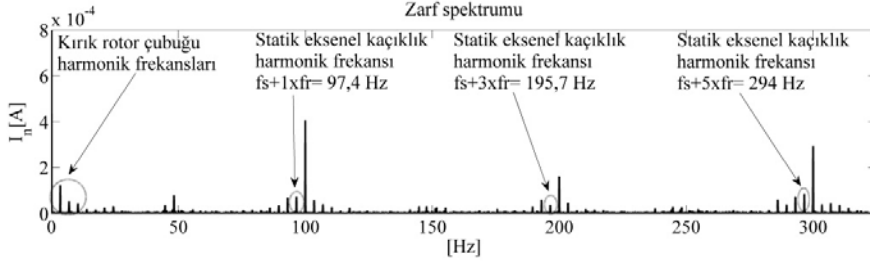
Şekil 11. Akım sinyali analizi (%50 yükleme) (Current signal analysis (50% loading))

yakın çıkmaktadır. Ayrıca, motor yüklendikçe birinci harmonik genlik değerinde artış meydana gelmektedir. Statik

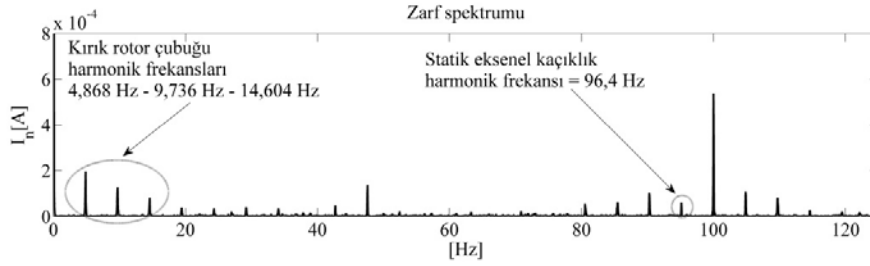
eksenel kaçıklık arızası karakteristik harmonik bileşenleri Şekil 9, Şekil 11, Şekil 13 ve Şekil 15'te sunulmaktadır.



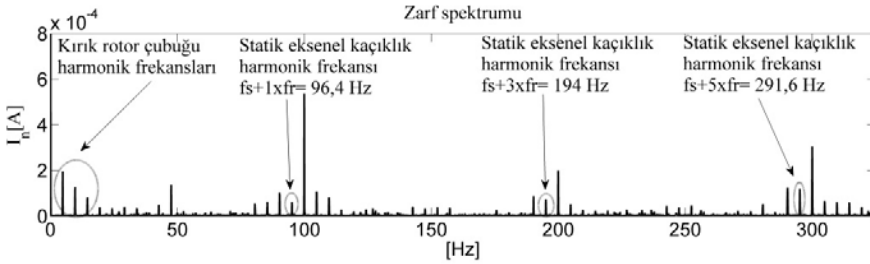
Şekil 12. Akım sinyali analizi (%75 yükleme) (Current signal analysis (75% loading))



Şekil 13. Akım sinyali analizi (%75 yükleme) (Current signal analysis (75% loading))



Şekil 14. Akım sinyali analizi (%100 yükleme) (Current signal analysis (100% loading))



Şekil 15. Akım sinyali analizi (%100 yükleme) (Current signal analysis (100% loading))

Tablo 2. Kayma ve rotor frekansları (Slip and rotor frequencies)

Yük Kademesi (%)	n_s (rpm)	n_r (rpm)	s	f_r (Hz)
25		2970	0,010	49,5
50	3000	2934	0,022	48,9
75		2898	0,035	48,3
100		2856	0,049	47,6

Tablo 4'te statik eksenel kaçıklık karakteristik harmonik bileşenleri (ilk üç bileşen) ve genlik (birinci harmonik bileşeni) değerleri verilmektedir. Bu değerlere göre, teorik olarak hesaplanan harmonik frekans değerleri ile tespit edilen harmonik frekans değerleri arasında düşük değerde bir fark olmakla birlikte elde edilen sonuçlar beklenen değerlerle uyumludur.

5.2 Titreşim Sinyalleri Analizi (Analysis of Vibration Signals)

Sağlam motor titreşim sinyalleri Hilbert zarf analizi (%100 yük altında) Şekil 16'da verilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere rotor frekansı (47,87 Hz) ve katlarında harmonik bileşenler oluşmaktadır. İkinci harmonik bileşenin ($2f_r$) genliği, f_r temel harmonik bileşenin genliğinden daha

düşük olduğu için bu harmonikler statik eksenel kaçıklık arıza harmonikleri olarak değerlendirilmemektedir. Ayrıca kırık rotor çubuklarından kaynaklanan harmonik bileşenlerine de bu spektrumda rastlanılmamaktadır. Eşzamanlı kırık rotor çubukları ve statik eksenel kaçıklık arızalı asenkron motora ait titreşim sinyalleri Hilbert zarf analizi sonuçları Şekil 17-Şekil 24'de sunulmaktadır. Her bir

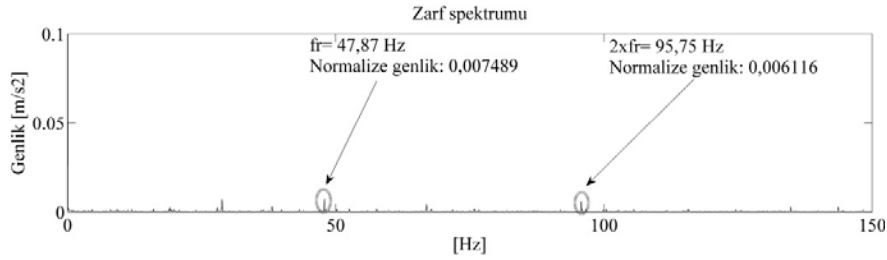
yük kademesinde elde edilen sonuçlar iki farklı spektrumda sunulmaktadır. Bunun temel nedeni, eksenel kaçıklık arızası sonucu oluşan karakteristik harmonik bileşenlerin genliğinin kırık rotor çubukları sonucu ortaya çıkan karakteristik harmonik bileşenin genliğine göre oldukça baskın olmasıdır. Bu nedenle Hilbert zarf analizi yöntemi kullanılarak yapılan arıza tespitinde, statik eksenel kaçıklık arızası tespit edilen

Tablo 3. Kırık rotor çubukları karakteristik harmonik bileşen frekansları
(Characteristic harmonic component frequencies of broken rotor bars)

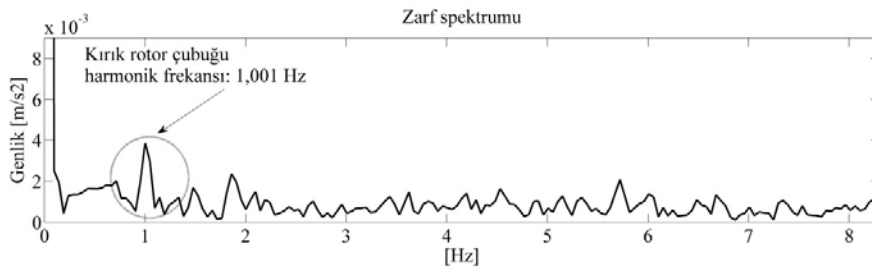
Yük Kademesi (%)	f_{sbs} (Teorik) (Hz)	f_{sbs} (Hz)	1. Harmonik Genlik Değeri ($I_n(A)$)
25	1,0	1,001	$4,914 \times 10^{-5}$
50	2,2	2,162	$6,806 \times 10^{-5}$
75	3,5	3,481	$1,224 \times 10^{-4}$
100	4,9	4,868	$1,967 \times 10^{-4}$

Tablo 4. Statik eksenel kaçıklık karakteristik harmonik bileşenleri (Characteristic harmonic components of static eccentricity)

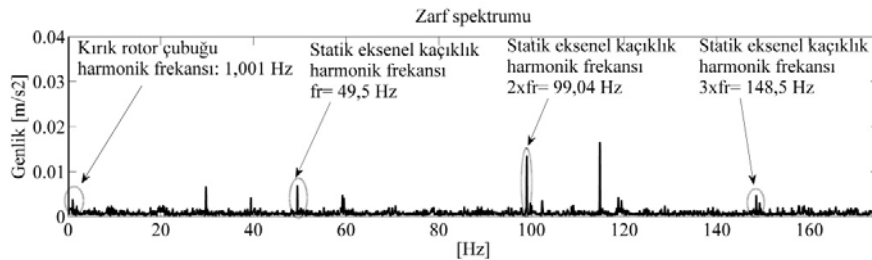
Yük Kademesi	$f_s + 1x f_r$ (Teorik) (Hz)	$f_s + 1x f_r$ (Hz)	$f_s + 1x f_r$ Genlik ($I_n(A)$)	$f_s + 3x f_r$ (Hz)	$f_s + 5x f_r$ (Hz)
25	99,5	99,3	$6,656 \times 10^{-5}$	198,8	298,4
50	98,9	98,3	$7,585 \times 10^{-5}$	197,3	296,2
75	98,3	97,4	$7,888 \times 10^{-5}$	195,7	294,0
100	97,6	96,4	$1,023 \times 10^{-4}$	194,0	291,6



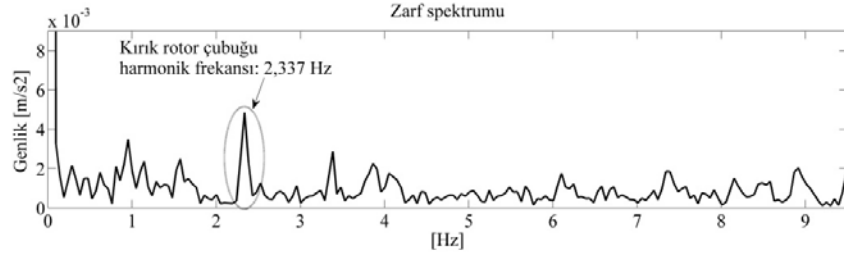
Şekil 16. Sağlam motor titreşim sinyali analizi (%100 yükleme) (Vibration signal analysis of healthy motor (100% loading))



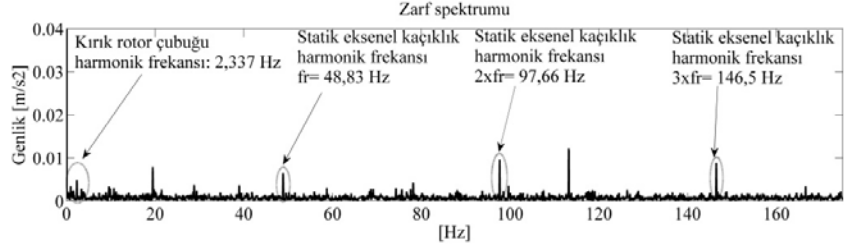
Şekil 17. Titreşim sinyali analizi (%25 yükleme) (Vibration signal analysis (25% loading))



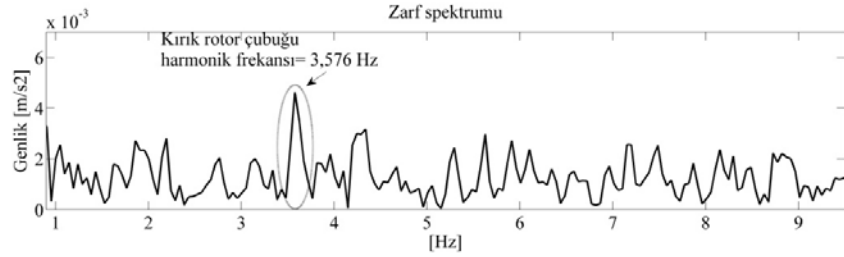
Şekil 18. Titreşim sinyali analizi (%25 yükleme) (Vibration signal analysis (25% loading))



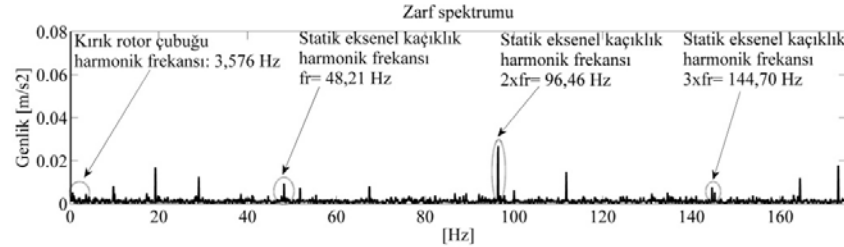
Şekil 19. Titreşim sinyali analizi (%50 yükleme) (Vibration signal analysis (50% loading))



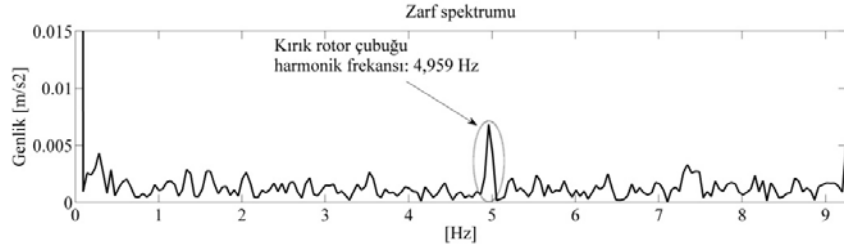
Şekil 20. Titreşim sinyali analizi (%50 yükleme) (Vibration signal analysis (50% loading))



Şekil 21. Titreşim sinyali analizi (%75 yükleme) (Vibration signal analysis (75% loading))



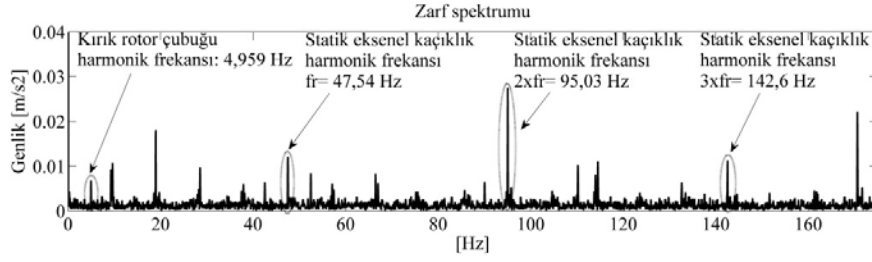
Şekil 22. Titreşim sinyali analizi (%75 yükleme) (Vibration signal analysis (75% loading))



Şekil 23. Titreşim sinyali analizi (%100 yükleme) (Vibration signal analysis (100% loading))

motora mutlaka 0-10 Hz frekans bandında kırık rotor çubukları harmonik bileşeni taraması da yapılmalıdır. Harmonik bileşenler ilk spektrumda 0-10 Hz bandında (Şekil 17, Şekil 19, Şekil 21, Şekil 23), ikinci spektrumda da 0-175 Hz bandında (Şekil 18, Şekil 20, Şekil 22, Şekil 24)

verilmektedir. Kırık rotor çubukları titreşim sinyalleri karakteristik harmonik ($2sf_s$) bileşenine ait teorik ve tespit edilen değerlerin karşılaştırması Tablo 5'te sunulmaktadır. Analiz sonucunda elde edilen değerlerle teorik değerler birbirleriyle uyumludur. Motorun yükü arttıkça harmonik



Şekil 24. Titreşim sinyali analizi (%100 yükleme) (Vibration signal analysis (100% loading))

Tablo 5. Kırık rotor çubukları karakteristik harmonik bileşenleri
(Characteristic harmonic components of broken rotor bars)

Yük Durumu (%)	$2sf_s$ (Teorik) (Hz)	$2sf_s$ (Hz)	Normalize Genlik Değer
25	1,0	1,001	0,003871
50	2,2	2,337	0,004553
75	3,5	3,576	0,004830
100	4,9	4,959	0,004457

Tablo 6. Statik eksenel kaçıklık karakteristik harmonik bileşenleri
(Characteristic harmonic components of static eccentricity)

Yük Durumu (%)	f_r (Hz)	$2f_r$ (Hz)	$3f_r$ (Hz)	Normalize Genlik f_r	Normalize Genlik $2f_r$	Genlik Değerleri $2f_r/f_r$
25	49,5	99,04	148,5	0,007048	0,01352	1,92
50	48,83	97,66	146,5	0,006445	0,009599	1,50
75	48,21	96,46	144,70	0,009492	0,02683	2,83
100	47,54	95,03	142,6	0,0121	0,02741	2,27

bileşenlerin genlik değerlerinde belirgin bir değişiklik olmamaktadır.

Statik eksenel kaçıklık arızası sonucu titreşim sinyallerinde oluşan karakteristik harmonik bileşenlerin frekans ve genlik değerleri Tablo 6'da verilmektedir. Tüm yük kademeleri için yapılan hesaplamalarda, $2f_r$ harmonik bileşenin genliği, f_r harmonik bileşenin genliğinin 1,5 katında ve daha yüksek değerlerde çıkmaktadır.

6. SİMGELER (SYMBOLS)

FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
FEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
HEFS	: Hall Etkili Akı Sensörleri
MCSA	: Motor Akım İmza Analizi
MVSA	: Motor Titreşim Sinyalleri Analizi
NI	: National Instruments
NLMS	: Normalize Edilmiş En Küçük Kareler
PLA	: Polilaktik Asit
f_{ecc}	: Statik eksenel kaçıklık karakteristik frekans (Hz)
f_s	: Temel frekans (Hz)
k	: Sabit değer (1, 2, 3, vb.)
f_r	: Rotor (şaft) mekanik frekansı (Hz)
f_{sb}	: Yan-band harmonik bileşenleri (Hz)
s	: Asenkron motor kayma değeri
f_{sbs}	: Yan-band harmonik bileşenleri boşluk frekansları (Hz)

n_s : Döner alan manyetik hızı (d/dk)

n_r : Rotor (şaft) hızı (d/dk)

I_n : Normalize edilmiş akım (A)

7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Asenkron motorların endüstriyel uygulamalarda yoğun olarak kullanılması bu motorları arızaya açık hale getirmektedir. Bu motorlarda meydana gelen belirgin bir arıza başka arızaları da tetikleyebilmekte ve çoklu eşzamanlı arızalara yol açabilmektedir. Bu çalışmada özellikle pompa, fan gibi uygulamalarda kullanılan üç fazlı asenkron motorlarda meydana gelebilecek eşzamanlı kırık rotor çubukları ve statik eksenel kaçıklık arızalarının karakteristik harmonik bileşenlerinin tespitine yönelik bir arıza tespit yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntem, asenkron motor arıza tespit çalışmalarında sıklıkla kullanılan akım ve titreşim sinyallerini analiz edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Asenkron motor kırık rotor çubukları ve statik eksenel kaçıklık arızalarına bağlı olarak stator akımı ve titreşim sinyallerinde ortaya çıkan karakteristik harmonik bileşenler önerilen Hilbert zarf analizi yöntemi ile, MATLAB ortamında elde edilerek teorik değerle karşılaştırıldı. Karşılaştırma sonucunda önerilen yöntemin başarılı bir şekilde karakteristik harmonik bileşen frekanslarını başarılı bir şekilde tespit ettiği görülmektedir.

Hilbert zarf analizi yan-band harmonik frekanslarını tespit etmeye odaklanmadığı için karakteristik harmonik bileşenlerin frekans tespitleri daha net bir şekilde yapılabilmektedir. Dolayısıyla önerilen yöntem geleneksel MCSA ve Motor Titreşim Sinyalleri Analizi (MVSA) yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

Önerilen yöntemin performansı farklı yük koşulları altında da test edilmiştir. Bu amaçla asenkron motor dört farklı yük kademesinde çalıştırılmıştır. Asenkron motorun düşük yük (%25 yükleme) seviyesinde çalışma durumunda dahi Hilbert zarf analizi ile akım sinyalleri karakteristik harmonik bileşenler başarılı bir şekilde tespit edebilmektedir. Önerilen yöntem, titreşim sinyallerinin analizinde statik eksenel kaçıklık karakteristik harmonik bileşenlerinin yanında daha düşük genliğe sahip olan kırık rotor çubukları karakteristik harmonik bileşenlerini de başarılı bir şekilde yakalayabilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından 116E302 nolu proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Irmak E., Vadi S., Computer based implementation of speed control experiment depending on frequency variation for induction motors, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26 (1), 57-62, 2011.
2. Choudhary A., Goyal D., Shimi S.L., Akula A., Condition monitoring and fault diagnosis of induction motors: A review, *Arch. Comput. Methods Eng.*, 26, 1221-1238, 2019.
3. Aydın İ., Karaköse M., Akın E., Negative selection based fuzzy fault diagnosis method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 24 (4), 745-753, 2009.
4. Maruthi G.S., Hegde V., Application of MEMS accelometer for detection and diagnosis of multiple faults in the roller element bearings of three phase induction motor, *IEEE Sens. J.*, 16 (1), 145-152, 2016.
5. Ishkova I., Vitek O., Diagnosis of eccentricity and broken rotor bar related faults of induction motor by means of motor current signature analysis, 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic, 682-686, 20-22 May 2015.
6. Ünsal A., Asenkron motorlarda paralel hizalama hatalarının entropi analizi ile incelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 23 (4), 1037-1050, 2020.
7. Culbert I., Letal J., Signature analysis for online motor diagnostics: Early detection of rotating machine problems prior to failure, *IEEE Ind. Appl. Mag.*, 23 (4), 76-81, 2017.
8. Martinez-Morales J.D., Palacios-Hernandez E.R., Campos-Delgado D.U., Multiple-fault diagnosis in induction motors through support vector machine classification at variable operating conditions, *Electrical Engineering*, 100, 59-73, 2018.
9. Gyftakis K.N., Panagiotou P.A., Spyarakis D., Detection of simultaneous mechanical faults in 6-kV pumping
10. induction motors using combined MCSA and stray flux methods, *IET Electr. Power Appl.*, 15 (5), 643-652, 2021.
11. Gangsar P., Tiwari R., Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review, *Mech. Syst. Sig. Process.*, 144, 106908-106944, 2020.
12. Hujare D.P., Karnik M. G., Vibration responses of parallel misalignment in Al shaft rotor bearing system with rigid coupling, *Mater. Today: Proc.*, 5 (11-3), 23863-23871, 2018.
13. Bayrak M., Küçükler A., A power based algorithm design for detection of broken rotor bars faults in three phase induction motors, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (2), 303-311, 2016.
14. Rangel-Magdaleno J., Peregrina-Barreto H., Ramirez-Cortes J., Cruz-Vega I., Hilbert spectrum analysis of induction motors for the detection of incipient broken rotor bars, *Measurement*, 109, 247-255, 2017.
15. Morales-Perez C., Rangel-Magdaleno J., Peregrina-Barreto H., Amezcua-Sanchez J. P., Valtierra-Rodriguez M., Incipient broken rotor bar detection in induction motors using vibration signals and the orthogonal matching pursuit algorithm, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 67 (9), 2058-2068, 2018.
16. Wang Z., Yang J., Li H., Zhen D., Xu Y., Gu F., Fault identification of broken rotor bars in induction motors using an improved cyclic modulation spectral analysis, *Energies*, 12 (17), 3279, 2019.
17. Lizarraga-Morales R.A., Rodriguez-Donate C., Cabal-Yepepe E., Lopez-Ramirez M., Ledesma-Carrillo L.M., Ferrucho-Alvarez E., Novel FPGA-based methodology for early broken rotor detection and classification through homogeneity estimation, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 66 (7), 1760-1769, 2017.
18. Gu F., Wang T., Alwodai A., Tian X., Shao Y., Ball A.D., A new method for accurate broken rotor bar diagnosis based on modulation signal bispectrum analysis of motor current signals, *Mech. Syst. Sig. Process.*, 50-51, 400-413, 2015.
19. Ünsal A., Kabul A., Asenkron motor rotor arızalarının istatistiksel analiz yöntemi ile değerlendirilmesi, *Politeknik Dergisi*, 20 (2), 283-289, 2017.
20. Unsal A., Kabul A., Detection of the broken rotor bars of squirrel-cage induction motors based on normalized least mean square filter and Hilbert envelope analysis, *Electr. Eng.*, 98, 245-256, 2016.
21. Verucchi C., Bossio J., Bossio G., Acosta G., Misalignment detection in induction motors with flexible coupling by means of estimated torque analysis and MCSA, *Mech. Syst. Sig. Process.*, 80, 570-581, 2016.

22. Afrizal N., Ferrero R., Leakage error compensation in motor current signature analysis for shaft misalignment detection in submersible pumps, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 69 (11), 8821-8830, 2020.
23. Ünsal A., Güçlü S., Asenkron motor eksenel kaçıklık arızalarının Shannon entropisi ile analizi, *Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering*, 24 (3), 199-210, 2019.
24. Sobra J., Kindl V., Skala B., Determination of the force caused by broken rotor bar and static eccentricity in an induction machine, *ELEKTRO*, Rajecke Teplice, Slovakia, 375-378, 19-20 May 2014.
25. Seghiour A., Seghier T., Zegnini B., Diagnostic of the simultaneous of dynamic eccentricity and broken rotor bars using the magnetic field spectrum of the air-gap for an induction machine, *3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT)*, Tlemcen, Algeria, 1-6, 25-27 May 2015.
26. Mirzaeva G., Saad K.I., Advanced diagnosis of rotor faults and eccentricity in induction motors based on internal flux measurement, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 54 (3), 2981-2991, 2018.
27. Minaz M.R., Yıldız K., İndiksiyon motorun mekanik arıza teşhisinde makine öğrenme tekniklerinin kullanılması, *European Journal of Science and Technology*, 16, 881-904, 2019.
28. Tian S., Quian Z., Planetary gearbox fault feature enhancement based on combined adaptive filter method, *Adv. Mech. Eng.*, 7 (12), 1-12, 2015.
29. Jiang R., Liu S., Tang Y., Liu Y., A novel method of fault diagnosis for rolling element bearings based on the accumulated envelope spectrum of the wavelet packet, *J. Vib. Control*, 21 (8), 1580-1593, 2013.
30. Axelberg P.G.V., Bollen M., Gu I.Y.H., Trace of flicker sources by using the quantity of flicker power, *IEEE Trans. Power Delivery*, 23 (1), 465-471, 2008.
31. Bessam B., Menacer A., Boumehras A., Cherif H., Detection of broken rotor bar faults in induction motor at low load using neural network, *ISA Trans.*, 64, 241-246, 2016.
32. Elbouchikhi E., Choqueuse V., Amirat Y., Bembouزيد M.E.H., Turri S., An efficient Hilbert-Huang transform-based bearing faults detection in induction machines, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 32 (2), 401-413, 2017.
33. Ghanbari T., Autocorrelation function-based technique for stator turn-fault detection of induction motor, *IET Science, Measurement & Technology*, 10 (2), 100-110, 2016.
34. Kabul A., Ünsal A., Detection of broken rotor bars of induction motors based on the combination of Hilbert envelope analysis and Shannon entropy, *tm - Technisches Messen*, 88 (1), 45-58, 2021.
35. Talhaoui H., Menacer A., Kessal A., Tarek A., Experimental diagnosis of broken rotor bars fault in induction machine based on Hilbert and discrete wavelet transforms, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95, 1399-1480, 2018.
37. Wang J., Fu P., Zhang L., Gao R. X., Zhao R., Multi-level information fusion for induction motor fault diagnosis, *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, 24 (5), 2139-2150, 2019.
38. Abd-el-Malek M., Abdelsalam A.K., Hassan O.E., Induction motor broken rotor bar fault location detection through envelope analysis of start-up current using Hilbert transform, *Mech. Syst. Sig. Process.*, 93, 332-350, 2017.

