

PAPER DETAILS

TITLE: Asenkron Motor Arıza Tespitinde Akım Uzay Örüntü Tanıma Sisteminin Kullanılması

AUTHORS: Ferhat ÇIRA

PAGES: 88-94

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/991872>



Asenkron motor arıza tespitinde akım uzay örüntü tanıma sisteminin kullanılması

Induction motor fault detection using current space pattern recognition

Ferhat ÇIRA¹

¹Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır

MAKALE BİLGİSİ

Geliş Tarihi: 02.05.2018
Revizyon Tarihi: 12.06.2018
Kabul Tarihi: 21.06.2018
Elektronik Yayın Tarihi: 30.08.2018
Basım: 15.09.2018

ÖZET

Son on yılda, karmaşık dinamik sistemlerin sürekli olarak izlenmesi, çeşitli mühendislik alanlarında giderek daha önemli bir konu haline gelmiştir. Bu çalışmada, asenkron motorların sürekli izlenmesi için görsel tabanlı verimli invariantlar kullanan bir model tanıma tabanlı sistem sunulmaktadır. Bu makalede anlatılan aşamalar, farklı arıza tiplerinin tanımlanmasına ve ayrıca bunlara karşılık gelen arıza şiddetinin belirlenmesine izin veren 3-boyutlu durum uzay örüntülerinin görüntü kompozisyonuna dayanmaktadır. Bu otomatik arıza tespit sistemi, zamanla değişen motor akımları ile ilgilenir ve belirtilen üç-fazlı stator akımlarının tanımlanmasına dayanır. Önerilen metodun etkinliğini doğrulamak amacıyla benzetim sonuçları da sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Asenkron Motor, Arıza Tespiti, Akım Durum Uzay Örüntü Tanıma

ABSTRACT

Over the last decade, continuous monitoring of complex dynamic systems has become an increasingly important issue in various engineering disciplines. In this study, a model recognition based system using visual based efficient invariants is presented for continuous monitoring of induction motors. The steps described in this article are based on the image description of the 3-dimensional state space patterns, which allows identification of different types of faults and also their corresponding fault severity. This automatic fault detection system deals with time-varying motor currents and is based on the identification of the specified three-phase stator currents. Various simulations results are also presented to confirm the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Induction Motor, Fault Diagnosis, Current State Space Pattern Recognition

1. Giriş

Arıza tespit işlemi Sistem sağlıklı çalışmaktadır veya sistemde bir şeyler ters gitti gibi basit bir ikili karar sistemine indirgenebilir Bu şekilde ifade etmek okuyucuda bunun önemsiz bir konu olduğu düşünmesine yol açabilir. Ancak gerçek şu ki, faydalı ve etkin bir çalışma için arıza hızlı bir biçimde tespit edilmeli ve arızanın şiddeti sınıflandırılmalıdır. Hatalı ve kesin olmayan ölçümler ve belirsizlikler gibi bazı dezavantajlar hepsi birlikte, arıza tespitini çok zor bir hale getirmeye katkıda bulunur. Spesifik bir yapının, örüntü tanımadaki temel konusu; tanımlama, tarif ve analiz olarak ayrıştırılabilir. Belirli bir kaynağın bilgisi, kavramsal düzlemde usulüne uygun olarak analiz edilmesi gereken soyut bir açıklamaya dönüştürülmelidir.

Asenkron motorlar endüstride en yaygın kullanılan elektrik makinalarından biri olması sebebiyle çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, bu motorlar için sürekli ve emniyetli bir çalışmayı sağlama ihtiyacı, arıza tespit teknikleri ile koruyucu bakım gerektirir. Genel olarak, durum izleme şemaları belirli arıza tespitine odaklanılmıştır. Sargı ve rotor arızaları gibi elektriksel arızalar, toplam motor arızalarının önemli bir yüzdesinden sorumludur. Üç fazlı asenkron motorların koruyucu bakımı da endüstriyel yaşamda çok önemli bir rol oynamaktadır[1]. Bu prosedür, sistem arızasını gösteren veya bu durumun ortaya çıkmasına neden olabilecek anormal elektriksel ve mekanik durumların tespiti için motor çalışmasını sürekli izlemeyi gerektirir.

Son yıllarda, asenkron motorların durum izlemesi, bakım maliyetlerini azaltmak ve planlanmamış arıza sürelerini önlemek için çok önemli hale gelmiştir. Bu nedenle, bir sonraki bölümde açıklanan asenkron motorlar için yeni durum izleme teknikleri geliştirmek için önemli araştırmalar yapılmıştır. Alışılmış tekniklerdeki yaygın bir gerçek, kullanıcının normal çalışma koşulunu potansiyel bir arıza modundan ayırt etmek için bir dereceye kadar uzmanlığa sahip olması gerektiğidir. Bu nedenle, asenkron motor arıza tespitinde tam otomatik örüntü tanıma yöntemlerini tanımlamak gereklidir.

Bu bağlamda, bu çalışmada üç fazlı asenkron motor stator sargısını ve rotor hatalarını tespit etmek için yeni prosedürler önerilmektedir. Bu prosedürler, 3-boyutlu akım durum uzay modellerinin görüntü kompozisyonuna dayanır ve hem stator sargısında hem de rotorda çubuğu kırığı arızalarının ve arıza şiddetinin belirlenmesini sağlamaktadır. Stator sargısındaki arızalı fazın belirlenmesi, bu çalışmada önerilen algoritmanın bir başka önemli özelliğidir.

Asenkron motor arıza tespiti ve teşhisi için birkaç durum izleme tekniği vardır. Bunlardan başlıca olanlar ısı, titreşim ve elektriksel izlemedir[2]. Bunların arasında, motorun stator akımını izlemeye imkan veren elektriksel izleme, araştırmacıların en önemli ve özel ilgi alanlarından biri olmuştur [3]. Bu teknikte, zaman domeninde ki akım sinyallerini toplamak için sensörler kullanılır[4], [5]. Arıza tespiti için en yaygın kullanılan şemalardan biri motor akımının izlenmesine ve mevcut spektrumun frekans bileşenlerinin yorumlanmasına dayanır. Bu teknik yaygın

olarak motor akımı imza analizi (MCSA) olarak bilinir. Bu tekniğe dayanan birçok çalışma geliştirilmiştir[6], [7]. Bu analiz özellikle kullanılan sinyaller sürekli olduğunda oldukça kullanışlıdır. Ancak, bazı uygulamalarda mevcut sinyalin geçici durum (değişken) özellikleri vardır [8]. Bu nedenle, bu uygulamalar için dalgacık analizi yöntemi kullanılmıştır[9]. Yine de, mevcut spektrum, arıza tespiti ve teşhisinde arızalara yol açabilecek çeşitli faktörlerden etkilenir. Bu sorunun üstesinden gelmek için, asenkron makinalarda durum izleme ve arıza tespiti için yapay zeka teknikleri kullanılmış ve bunların arasında yapay sinir ağları (YSA), asenkron motor arızası tespitinde başarısını kanıtlamıştır[10], [11]. Sıklıkla kullanılan başka bir teknik, özellikle sık rastlanamayan ölçüm verilerini yorumlamak için kullanılan bulanık mantıktır. Son yıllarda çeşitli bulanık mantık temelli arıza tespit yaklaşımları önerilmiştir [12]. Ancak, bu yöntemlerin birçoğunda sistemin önceden tanımlanmasını gerektirir ve ancak o zaman herhangi bir arızalı durum tespit edilebilir. Öte yandan, makinanın doğrusal olmayan davranışı ile birlikte gürültünün varlığı da, bu görevi zorlaştırabilmektedir.

Bu makalede önerilen yöntem Bölüm 1 ve 2'de detaylandırılmıştır, Benzetim sonuçları ve tartışma ise Bölüm 3'de verilmiştir

2. Örüntü Tanıma Yaklaşımı

Arızalı bir asenkron motoru tanımlamak ve sınıflandırmak için kullanılan yaygın yöntemlerin çoğu, stator akımlarının analizine dayanmaktadır. Bu çalışmada önerilen yaklaşım stator akımlarının analizini de kullanır, ancak bu metodolojide bu problem bir örüntü tanıma analizine dönüştürülür. Böylece, nötr bağlantısı olmayan üç fazlı bir asenkron motor, motor için ideal koşullar ve dengesiz bir gerilim kaynağı göz önünde bulundurulduğunda, denklem (1) 'de verilen stator akımları oluşur. Burada i_a , i_b ve i_c üç fazlı stator akımlarını, I_m , onların maksimum değerini, f , onların frekansı, ϕ onların faz açısını ve t zamanı göstermektedir.

$$i_a = I_m \sin(2\pi ft - \phi)$$

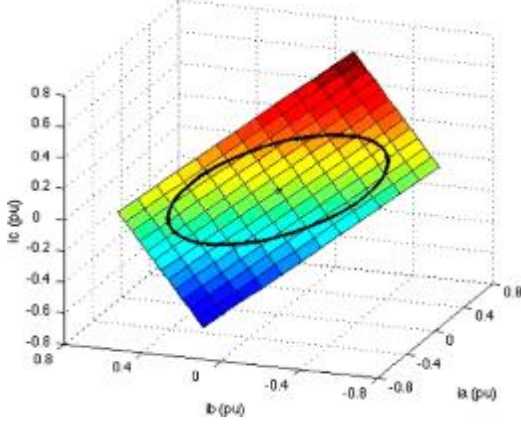
$$i_b = I_m \sin(2\pi ft - 2\pi / 3 - \phi) \quad (1)$$

$$i_c = I_m \sin(2\pi ft - 4\pi / 3 - \phi)$$

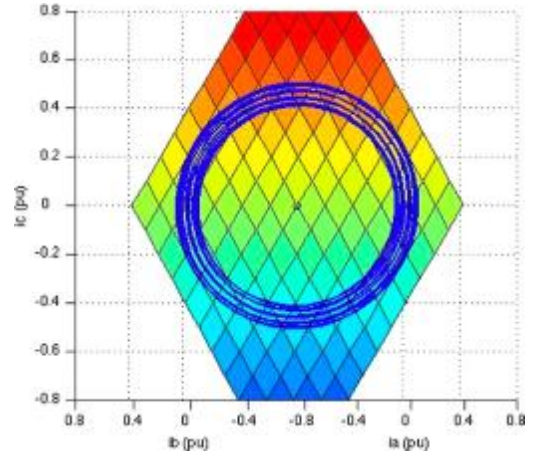
Önerilen yaklaşımda akımlar, her bir arızalı mod için tipik örüntüler olarak tanımlanır. Bu, 3 boyutlu bir durum uzayında analiz edilerek gerçekleştirilir. Sağlıklı bir motor için, Şekil 1a'da gösterildiği gibi, koordinatların ortasındaki bir daire (denklem 2), akım örüntüsüne karşılık gelmektedir. Burada R yarıçapını göstermektedir. Şekil 1b'de ise dairenin tasvir edildiği düzlemin ortogonal görünümünden bu dairenin bir görünümü gösterilmektedir.

$$i_a^2 + i_b^2 + i_c^2 = R^2 \quad (2)$$

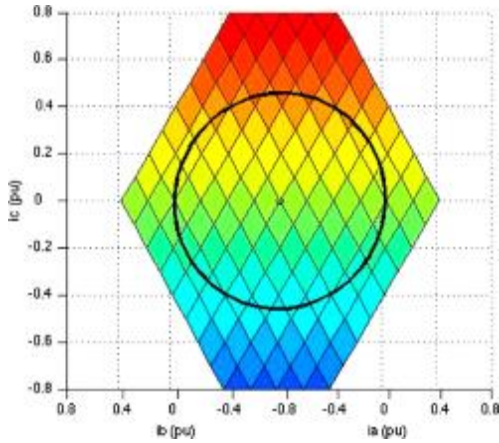
Arızalı durumda çalışan bir asenkron motor için, önceki model artık geçerli değildir.



Şekil-1a. Sağlıklı motorun stator akım örüntüsünün 3 boyutlu görüntüsü

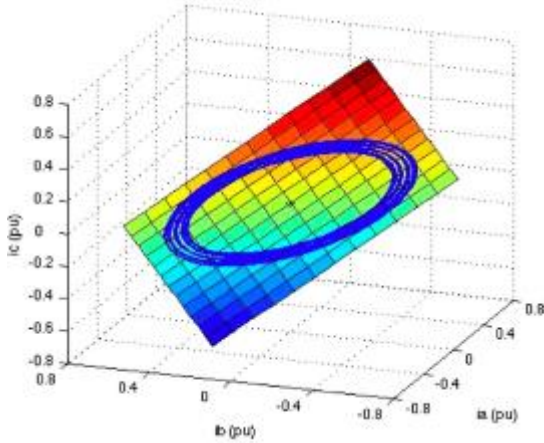


Şekil-2b Rotor çubuk kırığı arızalı motorun stator akım örüntüsünün ortogonal görüntüsü

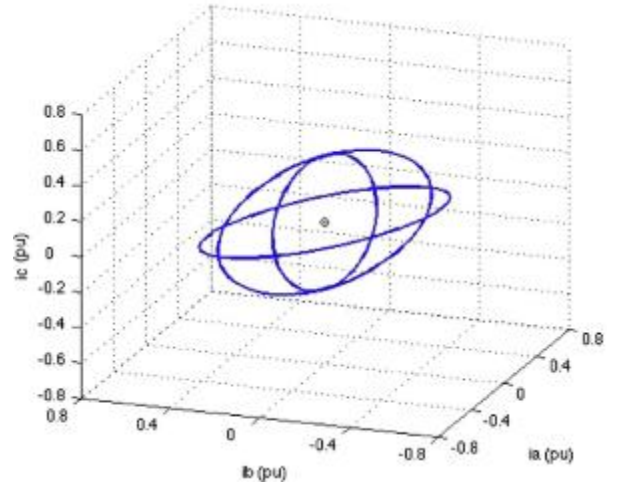


Şekil-1b. Sağlıklı motorun stator akım örüntüsünün ortogonal görüntüsü

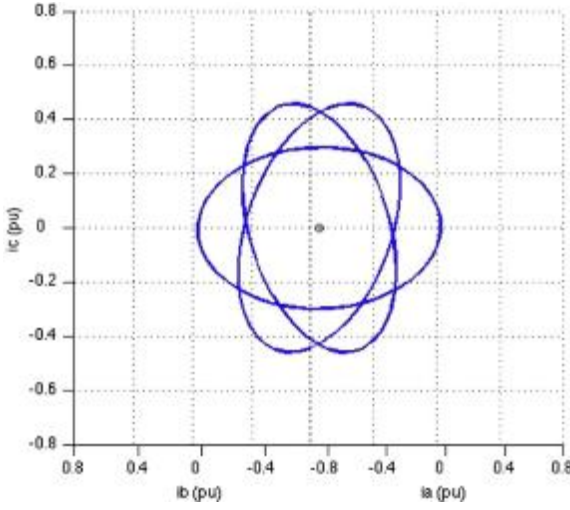
Böylece, rotor çubuğu kırık arızalı motorun, akım örüntüsü artık bir çember değildir, Şekil 2a'da görüldüğü gibi bir çörek örüntüsü elde edilir. Yine, Şekil 2b, çörek örüntüsünün tasvir edildiği düzlemin ortogonal görünümünü sunmaktadır.



Stator sargı kısa devre arızalı çalışan bir asenkron motor için, akım örüntüsü, ana eksen yönelimi arızalı faz ile ilgili olan bir elips şeklini alır. Şekil 3, her bir arızalı faz ile ilgili üç elips içerir. Şekil 3a, 3-boyutlu görünümünü ve Şekil 3b düzlemin ortogonal görünümünü sunmaktadır. Stator akımları birbirinden elektriksel olarak 120° farklılık gösterdiğinden, üç elipsin ana ekseninin birbirinden uzaysal olarak 120° farklılık gösterdiğinin dikkate alınması önemlidir. Önerilen prosedür, akım durum uzayındaki stator akımlarını analiz ederek bir asenkron motorun arıza tespitini ve teşhisini bir model tanıma problemine dönüştürecektir.



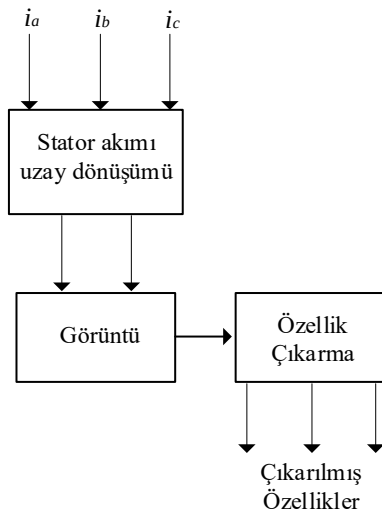
Şekil 3a. Stator kısa devre arızalı motorun stator akım örüntüsünün 3 boyutlu görüntüsü



Şekil 3b. Stator kısa devre arızalı motorun stator akım örüntüsünün ortogonal görüntüsü

3. Görüntü İşleme Tabanlı Sistem

Önerilen görüntü tanıma tabanlı arıza tespiti algoritmasını gerçekleştirmek için, stator akım örüntüsünün, şekil, boyut ve yöneliminden bağımsız olarak özellik tabanlı tanıma prosedürü elde edilmelidir. Bu sorunu çözmenin anahtarı, etkili değişmez özelliklerini bulmaktır. Görüntü işleme sisteminde elde edilen görsel tabanlı özelliklere dikkat edilir. Önerilen görüntü işleme algoritması üç aşamaya ayrılmıştır: stator akımı durum uzay dönüşümü, görüntü kompozisyonu ve özellik çıkarımı (Şekil 4). Görüntü işleme tabanlı sistemin girişleri üç fazlı stator akımlarıdır ve çıkış motor çalışma durumunun tanımlanmasıdır. Görüntü kompozisyon aşamasında, üç fazlı stator akım vektörü bir ikili görüntü konturuna dönüştürülür. Özellik çıkarma adımı, arıza türünü ve onun şiddetinin seviyesini belirleyecektir. Sağlıklı ve arızalı motorlar için elde edilen görüntüler farklıdır ve bu farklılıklar öznelite çıkarma adımında tespit edilir ve analiz edilir.



Şekil 4. Görüntü işleme tabanlı sistemin yapısı

3.1. Stator Akımı Durum Uzay Dönüşümü

Bu ilk adımda üç fazlı stator akımları üç ortogonal düzlemde yansıtılır. Bu düzlemlerin ikisi akımlara diktir ve üçüncü düzlem, desen tanıma yönteminde bir görüntü olarak kullanılacaktır. Bunu sağlamak için, z-ekseni etrafında ilk dönüş gerçekleştirilir. Aşağıdaki ifadeyi kullanarak $i_c = 0$ için aşağıda tanımlanan bir dönüş açısı elde edilir:

$$\alpha = \arctan(i_a / i_b) \quad (3)$$

Daha sonra y- eksenini etrafında ikinci bir dönüş gerçekleştirilir. Dönüş açısı (β) elde etmek için herhangi bir i_a ve i_c (denklem 4) çifti kullanılabilir.

$$\beta = \arctan(i_a / i_c) \quad (4)$$

Stator akımı durum uzayının ortogonal olarak, (3) ve (4) numaralı denklemlerden edilen α ve β dönüş açıları 45° olarak ölçülür. Tüm referans noktalarının aynı referans çerçevesinin eksenleri etrafında meydana geldiği düşünüldüğünde, denklem (6)'da verilen dönüş matrislerine bağlı olarak yeni bir akım vektörü [i_{a_yeni} , i_{b_yeni} , i_{c_yeni}] elde etmek için denklem (5)'de verilen eşdeğer rotasyon matrisi kullanılır.

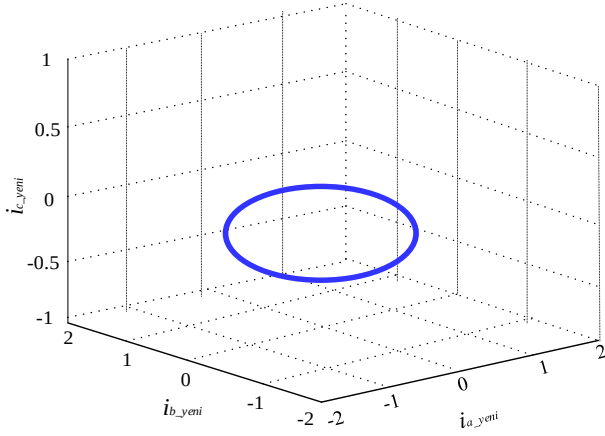
$$\begin{bmatrix} i_{a_yeni} \\ i_{b_yeni} \\ i_{c_yeni} \end{bmatrix} = R_y(\beta) R_z(\alpha) \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R_z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

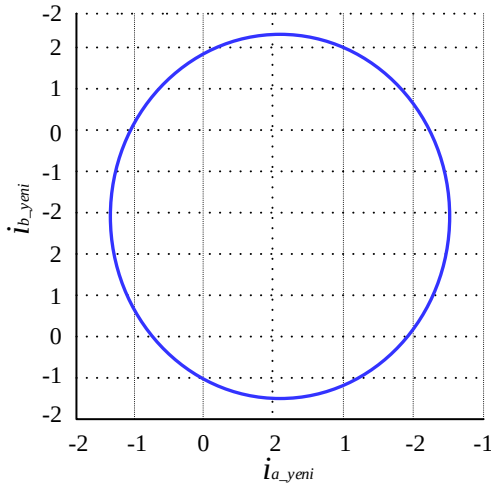
(6)

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$$

Önceki iki dönüşten sonra, elde edilen üç fazlı stator akım modeli Şekil 5a'da gösterilmektedir. Görüntü kompozisyonu adımı girdi olarak kullanılacak olan vektör örüntüsünün 2-boyutlu düzlemi Şekil 5b'de gösterilmektedir.



Şekil 5a. Dönüştürülmüş stator akım örüntüsünün 3 boyutlu görünümü.



Şekil 5b. Dönüştürülmüş stator akım örüntüsünün 2 boyutlu görünümü.

3.2. Görüntü Kompozisyonu

Görüntü analizi ve tanıma adımında, genellikle yararlı bir bilgi elde etmek için ön planın bir görüntünün arka planından çıkarılması gereklidir. Görüntü bölütleme, otomatik görüntü analizinde en kritik görevlerden biridir. Bir görüntüyü kendi ana bölümlerine ayırmak ve ilgili alanlarını (nesneler veya desenler) çıkarmaktan oluşur. Segmentasyon tipik olarak, ya ayrı bölgelerin sınırlarını bulmak ya da benzer alt bölgeleri daha büyük bölgelere birleştirmek üzerine kuruludur. Son yıllarda çok çeşitli segmentasyon algoritmaları geliştirilmiştir ve sayıları her yıl sürekli artmaktadır [13], [14]. Görüntü eşleştirmesi, görüntü analizi uygulamalarında yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Gri seviyesi belirtilen bir eşikten daha büyükse, bir sınıfa bir piksel atar, aksi halde onu diğer farklı sınıfa atar. İki tip eşikleme yöntemi vardır: küresel eşik ve yerel eşik[15]. Bir eşikleme algoritması, bir görüntünün alt bölgelerine uygulanan tüm görüntü veya yerel eşikler için tek bir global

eşiği hesaplayabilir ve bu da yerel görüntü özelliklerine uyarlanabilir.

Önerilen yaklaşımda, üç fazlı stator akım vektör örüntüsünün her bir örneği, (7) ve (8) numaralı denklemler ile verilen koordinatlarla (i_x , i_y) nesne konturuna ait bir ikili piksel olarak kabul edilecektir.

$$\begin{cases} i_x = \text{round}((i_{a_yeni} - \text{offset_x}) / k), \\ i_y = \text{round}((i_{b_yeni} - \text{offset_y}) / k), \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \text{offset_x} = \min(i_{a_yeni}) - 1, \\ \text{offset_y} = \min(i_{b_yeni}) - 1. \end{cases} \quad (8)$$

Her bir pikselin (i_x , i_y) gri bir seviye $I(x, y)$ olduğu bir nesneyi düşünün. İkili bir görüntü, bir nesneye (önelen) ait pikseller için $I(x, y) = 1$ ve arka plana ait pikseller için $I(x, y) = 0$ olan gri görüntünün belirli bir durumu olarak düşünülebilir. Örüntü tanıma yöntemini uygulamak için bölgenin sınırını belirlemek gerekir. Bölge konturu, birbirini izleyen iki vektör örneğini birbirine bağlayan segmente ait her noktanın koordinatlarının hesaplanmasıyla verimli bir şekilde elde edilir.

3.3. Özellik Çıkarma

Görüntü işleme algoritmasının son adımı, özellik çıkarmadır. Dijital bir görüntü parçalandıktan sonra, o görüntüdeki uzaysal örüntünün şeklini ve boyutunu araştırmak için ölçümler yapılabilir. Çok sayıda görüntü analizi uygulamasında yaygın olarak geometrik özellikler kullanılır [16]. Önerilen metodolojide, asenkron motor arıza tespiti için görsel özelliklere dayanan etkili bir algoritma kullanılmaktadır. Öznitelik çıkarma adımında, arıza teşhisi için kullanılan temel özellikler şunlardır: nesnenin çevre bölümü, bölge yönelimi ve arıza şiddet seviyesi endeksi. Dijital görüntüdeki piksellerin sabit parçalı olduğunu ve her nesne için sınırlanmış bölge görüntüsünün boyutunun, sırasıyla M ve N'nin sırasıyla satır ve sütun sayısını ifade ettiği $M \times N$ ile gösterildiği varsayılırsa, Bu koşullarda, kontur bölümü aşağıdaki algoritma kullanılarak elde edilir:

1. Dijital görüntünün en yakın $(M/2)$ satırında, 1. kolondan ara bölgeye ait ilk nokta bulunana kadar aramayı başlat.
2. İlk noktanın koordinatları $(x_1, y_1) = (M/2, y_{\min})$. Son noktanın koordinatları $(x_2, y_2) = (M/2, y_{\min})$ olacak şekilde alınsın.
3. $(N/2)$.sütuna ulaşana kadar kontur noktalarının aramasına devam edin.
4. Son kontur noktası $(x_2, y_2) = (M/2, y_{\max})$ koordinatlarına sahip olacaktır.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Önerilen akım durum uzay örüntü tanıma asenkron motor arıza tespiti ve tanı yöntemini doğrulamayı amaçlayan benzetim sonuçları alınmıştır.

Asenkron motorun arızalı ve arızasız benzetim sonuçları Matlab/Simulink ortamında elde edilmiştir. Asenkron motor modelinden stator akımları elde edilmiş ve görüntü işleme tabanlı sisteme uygulanmıştır. Herhangi bir arıza olmaksızın (sağlıklı durum) ve rotor arızasının iki farklı şiddet seviyesindeki arızalı durumu için asenkron motordan elde edilen sonuçlar Tablo 1’de gösterilmektedir. Sağlıklı ve her fazında bir stator arızası mevcut olan asenkron motordan elde edilen sonuçlar ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Benzetim Sonuçları

Arıza tipi	Rotor arıza şiddeti endeksi	Kontur bölümü
Sağlıklı	0,001	1
Küçük rotor arızalı	0,098	6
Büyük rotor arızalı	0,393	25

Tablo 2. Benzetim Sonuçları

Arıza tipi	Stator arıza şiddeti endeksi	Kontur yönelimi
Sağlıklı	0,001	-
Stator arızası-a fazı	0,389	326,1
Stator arızası-b fazı	0,389	207,6
Stator arızası-c fazı	0,389	89,8

Sonuçlar, daha önce tanımlanmış olan arıza şiddeti indekslerinin kullanımının motor çalışma koşullarının tanımlanmasına mükemmel bir şekilde izin verdiğini doğrulamaktadır. Ayrıca, arızalı çalışan motorda, bu parametreler arıza tipinin tanımlanmasını sağlamaktadır (stator veya rotor).

Her iki şiddet endeksi sıfır ise, motor sağlıklı çalışmaktadır. Bu durumda, kontur kesiti birdir ve kontur bölgesinin yönelimi, örüntüsü bir daire olduğu için anlamsızdır.

Rotor arıza şiddeti endeksi sıfırdan büyükse, motor bir rotor arızasına sahiptir, bu da bir kontur kesitinden daha büyüktür (Tablo 1). Arıza daha şiddetli hale geldiği sürece rotor arıza şiddeti endeksi de artar. Bu artış artan kontur bölümünün doğrudan bir sonucudur.

Stator arıza şiddeti endeksi sıfırdan büyükse, motor stator arızasına sahiptir (Tablo 2). Örüntünün yöneliminin analizi, hangi stator sargısının sarım arızası verdiğini tanımlar.

Bu makalede, asenkron motorların sürekli durum izlemesi için görsel tabanlı etkinin variant özelliklerini kullanan yeni bir örüntü tanıma tabanlı bir sistem önerilmektedir. Sunulan sistem, 3 boyutlu stator akım durum uzay örüntülerinin görüntü kompozisyonuna dayanmaktadır. Bu yaklaşımı kullanarak, her çalışma koşulu için ayrı örüntüleri kolayca tanımlamak mümkün olabilir. Bu şekilde, farklı tipte arızaların tanımlanmasına ve ayrıca bunların şiddetinin seviyesinin belirlenmesine imkan veren bir özellik kümesi elde edilir.

Bu çalışmanın ana katkıları şunlardır:

- (1) stator akımı tabanlı uzman arıza algılama sistemi;
- (2) arıza tipi tanımlama; ve
- (3) arıza şiddet endeksi belirleme. stator akımlarının ölçülmesine dayanır ve teşhisi gerçekleştirmek için önceden her hangi bir uzman bilgisine sahip olmak zorunda değildir. Mevcut uzay örüntüsünün tanınmasına dayanarak stator ve rotor arızaları arasında ayırım yapılabilmektedir.

5. Kaynaklar

- [1] O. V. Thorsen and M. Dalva, “A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals and oil refineries,” in *Proceedings of IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC '94)*, pp. 1–9.
- [2] P. . J. Tavner, “Review of condition monitoring of rotating electrical machines,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 2, no. 4, pp. 215–247, 2008.
- [3] W. T. Thomson and M. Fenger, “Current signature analysis to detect induction motor faults,” *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 7, no. 4, pp. 26–34, 2001.
- [4] G. B. Kliman, R. A. Koegl, J. Stein, R. D. Endicott, and M. W. Madden, “Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 3, no. 4, pp. 873–879, 1988.
- [5] Ye Zhongming and Wu Bin, “A review on induction motor online fault diagnosis,” in *Proceedings IPEMC 2000. Third International Power Electronics and Motion Control Conference (IEEE Cat. No.00EX435)*, 2000, vol. 3, pp. 1353–1358.
- [6] W. T. Thomson and I. Culbert, *Current Signature Analysis for Condition Monitoring of Cage Induction Motors: Industrial Application and Case Histories*.
- [7] M. El Hachemi Benbouzid, “A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 5, pp. 984–993, 2000.
- [8] H. A. Toliyat, S. P. Waikar, and T. A. Lipo, “Analysis and simulation of five-phase synchronous reluctance machines including third harmonic of airgap MMF,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 34, no. 2, pp. 332–339, 1998.
- [9] M. Wolkiewicz and C. T. Kowalski, “On-line neural network-based stator fault diagnosis system of the converter-fed induction motor drive,” in *IECON Proceedings (Industrial*

Electronics Conference), 2013, pp. 5561–5566.

[10] R. M. Tallam *et al.*, “A Survey of Methods for Detection of Stator-Related Faults in Induction Machines,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 4, pp. 920–933, 2007.

[11] Q. Wu and S. Nandi, “Fast single-turn sensitive stator interturn fault detection of induction machines based on positive- and negative-sequence third harmonic components of line currents,” in *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, vol. 46, no. 3, pp. 974–983.

[12] A. M. Trzynadlowski and E. Ritchie, “Comparative investigation of diagnostic media for induction motors: a case of rotor cage faults,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 5, pp. 1092–1099, 2000.

[13] P. Carbonetto, G. Dorkó, C. Schmid, H. Kück, and N. De Freitas, “Learning to recognize objects with little supervision,” *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 77, no. 1–3, pp. 219–237, 2008.

[14] O. Gloger, M. Ehrhardt, T. Dietrich, O. Hellwich, K. Graf, and E. Nagel, “A threestepped coordinated level set segmentation method for identifying atherosclerotic plaques on MR-images,” *Commun. Numer. Methods Eng.*, vol. 25, no. 6, pp. 615–638, 2009.

[15] S. Wang, F. lai Chung, and F. Xiong, “A novel image thresholding method based on Parzen window estimate,” *Pattern Recognit.*, vol. 41, no. 1, pp. 117–129, 2008.

[16] Y. J. Zhang, “Influence of segmentation over feature measurement,” *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 16, no. 2, pp. 201–206, 1995.