

# Motor Akım İmza Analizinde Park Dönüşümüyle Temel Harmonik Bastırımı Fundamental Harmonic Suppression in MCSA by Park Transformation

Ferzan GÜRAN<sup>1</sup>, Levent EREN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Çekmeköy Belediyesi  
[ferzan\\_g@yahoo.com](mailto:ferzan_g@yahoo.com)

<sup>2</sup>Enerji Sistemleri Mühendisliği  
Bahçeşehir Üniversitesi  
[Levent.Eren@bahcesehir.edu.tr](mailto:Levent.Eren@bahcesehir.edu.tr)

## Özet

Asenkron motorlarda kırık rotor çubuğu arızalarının stator akımları incelenerek tespiti için uygulanan işaret işleme yöntemlerinde, şebeke temel frekansının arıza frekansına oranla çok büyük ve frekansların birbirine yakın olması hatanın tespitinde büyük zorluk oluşturmaktadır. Bu zorluğu aşmak için, şebeke temel frekansını bastırmada çentik süzgeçleri (notch filters) yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu şekilde yapılan süzgeçleme hem daha fazla hesap gerektirmekte hem de bazı durumlarda şebeke temel frekansına yakın olan arıza frekans değerlerini de bastırmaktadır. Bu çalışmada stator d-ekseni bileşenini elde etmek için faz akımlarına uygulanan Park dönüşümüyle temel frekans bastırılmaktadır. Asenkron motorlarda oluşan kırık rotor çubuğu arızalarının tespiti için stator akımının d-ekseni bileşeni üzerinde dalgacık paketi ve Fourier analizleri yapılması önerilmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Asenkron Motorlar, Kırık Rotor Çubuğu ve Park Dönüşümü

## Abstract

Broken rotor bar detection via analysis of line currents is very difficult since frequency of faulty component is very close to system fundamental frequency and the magnitudes of fault signals are very small compared to the dominant magnitude of fundamental frequency. To overcome this difficulty, notch filters are used in general to suppress the fundamental. This type of filtering requires more computation and it also affects the magnitudes of fault related frequency components since they are very close to the fundamental. In this study, the Park's transformation is applied to the phase currents in obtaining stator d-axis component to block out the fundamental frequency. Wavelet packet and Fourier analyses of d-axis component of motor stator current is proposed for broken rotor bar detection.

**Keywords:** Induction Motors, Broken Rotor Bars, Park Transformation

## 1. Giriş

Asenkron motorlar, modern endüstrinin en yoğun iş yüküne sahip elektrik ekipmanlarından biridir. Bu motorlarda oluşan arızalar endüstriyel tesislerde üretimi aksatmakta ve telafisi zor kayıplara sebebiyet vermektedir. Mühendisler, bu

kayıpları minimize etmek için çeşitli arıza tespit yöntemleri geliştirmişlerdir. Bu alanda motor titreşim [1-4] ve akım analizleri [5-8] yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bunlardan akım analizi, MCSA (Motor Current Signature Analysis), Oak Ridge Laboratuvarlarında geliştirilmiştir [5]. Bu metod, genel olarak stator akımlarından alınan verilere çeşitli işaret işleme yöntemleri uygulanarak arıza analizinin yapılması olarak tanımlanabilir. İşaret işlemede Fourier dönüşümü [6-8] ve dalgacık dönüşümü [9-13] yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanılan tekniklerin performansını artırmak için istatistiksel yöntemler ve algoritmalar geliştirilmektedir [14-19].

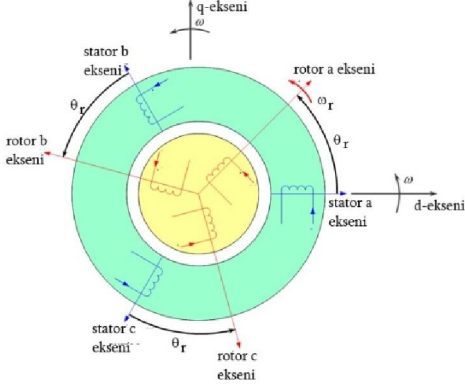
Sinyal işleme ile yapılan analizlerde, şebeke temel frekansının arıza frekansına oranla çok büyük ve arızalı işaretin büyüklüğünün temel harmoniğe çok yakın olması sağlıklı bir sonuç almayı zorlaştırır. Şebeke temel frekansını bastırmak için önışlemede çentik süzgeçleri yaygın şekilde kullanılmaktadır [9]. Park dönüşümü kullanarak şebeke temel frekansını bastırıp gerek süzgeçlerin tasarımından kaynaklanan sorunlardan, gerekse ilave hesap yükünden kurtulmak mümkündür [20-21]. Çalışmamızda; Park dönüşümüne tabi tutulan a, b ve c stator faz akımları  $i_d$  (d-eksen akımı) ve  $i_q$  (q-eksen akımı) büyüklüklerine dönüştürüldükten sonra d-ekseni akımına dalgacık paketi dönüşümü uygulanmıştır. Dalgacık paketi dönüşümünde frekans çözünürlüğü düşük olduğundan, hata frekansını içeren banttaki dalgacık paketi katsayılarına Fourier dönüşümü uygulanarak çözünürlük artırılmıştır. En son seviyedeki bantlarda dalgacık paket katsayısı az olduğundan bu işlem çok az ek hesap maliyeti getirmektedir [22]. Yapılan deneylerde d-ekseni akım spektrumundan kırık rotor çubuklarının net şekilde tespit edilebileceği gösterilmiştir [23].

## 2. Temel Kavramlar

### 2.1. Park Dönüşümü

Park dönüşümü, bilindiği gibi elektrik makinalarının analizini kolaylaştırmak üzere ilk defa 1929 da R.H. Park tarafından sunulmuş ve onun adıyla anılan bir matematiksel modelledir. D-q dönüşümü olarak da bilinen dönüşüm rotor direk eksenini ile stator ilk fazı arasındaki  $\theta$  açısı cinsinden ifade edilip matematiksel olarak modellenir. Stator, rotor ve d-q eksenlerinin gösterimi şekil 1'de verilmiştir.

Üç fazlı sistemlerde, özellikle zamana bağlı olarak değişen büyüklüklerden kurtulmak için üç faz alternatif akım değerlerini iki doğru akım büyüklüğüne indirgeyen bu metod, elektrik makinalarının kontrolünde ve analizinde büyük kolaylıklar sağlamaktadır.



Şekil-1. Eksenlerin şekilsel gösterimi

$i_a$ ,  $i_b$  ve  $i_c$  dönüşüme tabi tutulan akım büyüklüklerini ve  $\theta$  rotor direk eksenini ile stator ilk fazı arasındaki açı olmak üzere dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120) & \cos(\theta+120) \\ \sin\theta & \sin(\theta-120) & \sin(\theta+120) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

ve ters dönüşüm de:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos(\theta-120) & \sin(\theta-120) & 1 \\ \cos(\theta+120) & \sin(\theta+120) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada sıfır bileşeni üç fazlı stator dönüşümü için gereklidir ve hava boşluğunda net akı oluşturmayan armatür akımını temsil eder. Bu yüzden rotor devresini kesen bir akı oluşturmaz. Dengeli üç fazlı bir sistemde sıfır bileşenin değeri sıfıra eşittir.

$$i_d = \frac{2}{3} [i_a \cos(2\pi f_e t) + i_b \cos(2\pi f_e t - 2\pi/3) + i_c \cos(2\pi f_e t + 2\pi/3)] \quad (3)$$

$$i_q = \frac{2}{3} [i_a \sin(2\pi f_e t) + i_b \sin(2\pi f_e t - 2\pi/3) + i_c \sin(2\pi f_e t + 2\pi/3)] \quad (4)$$

$$i_0 = 0 \quad (5)$$

Burada  $i_d$ ,  $i_q$ ,  $i_0$  ve  $f_e$  sırasıyla d-ekseni, q-ekseni, 0-ekseni akımlarını ve şebeke frekansını göstermekte olup, rotoru hatalı olan faz akımları aşağıdaki gibi modellenebilir:

$$i_a = A \cos(2\pi f_e t) + A_L \cos(2\pi f_e t - 2\pi f_b t) + A_R \cos(2\pi f_e t + 2\pi f_b t) \quad (6)$$

$$i_b = A \cos(2\pi f_e t - 2\pi/3) + A_L \cos(2\pi f_e t - 2\pi f_b t - 2\pi/3) + A_R \cos(2\pi f_e t + 2\pi f_b t - 2\pi/3) \quad (7)$$

$$i_c = A \cos(2\pi f_e t + 2\pi/3) + A_L \cos(2\pi f_e t - 2\pi f_b t + 2\pi/3) + A_R \cos(2\pi f_e t + 2\pi f_b t + 2\pi/3) \quad (8)$$

$A_L$ ,  $A_R$ ,  $f_e$  ve  $f_b$  sırasıyla sol ve sağ yan bant büyüklükleri, şebeke frekansı ve rotor hata frekanslarını ifade etmektedir. Daha önce verilen 6, 7 ve 8 nolu eşitlikler 3 nolu eşitlikte yerine konup sadeleştirme yapıldığında d-ekseni akımı ( $i_d$ ) elde edilir.

$$i_d = A_L \cos(2\pi f_b t) + A_R \cos(2\pi f_b t) \quad (9)$$

Aynı şekilde 6, 7 ve 8 nolu eşitlikler 4 nolu eşitlikte yerine konulup sadeleştirme yapıldığında q-ekseni akımı ( $i_q$ ) elde edilir.

$$i_q = A_L \sin(2\pi f_b t) - A_R \sin(2\pi f_b t) \quad (10)$$

Eşitliklerden anlaşılacağı üzere, matematiksel sadeleştirme sonucu şebeke temel frekansı elimine edilmiş olup işarette sadece hata frekansı kalmıştır.  $A_L$  ve  $A_R$  birbirine eşit olduğundan q-ekseni akımı sıfır değerini almaktadır. D-ekseni akımında ise  $A_L$  ve  $A_R$  toplamı hata frekansında görülecektir. Bu da herhangi bir çentik süzgeci kullanmadan şebeke temel frekansının d-ekseni akımında bastırılabilirliğini gösterir.

## 2.2. Asenkron Motorlarda Arıza Nedenleri

Rulman arızaları, çatlak veya kırık rotor çubukları ve yalıtım problemleri asenkron motorlarda görülen arızalarının başlıca nedenlerindedir. Rulman ve çatlak veya kırık rotor çubuğu arızaları motor akım imza analizi yöntemiyle tespit edilebilmektedir. Motor anma değerlere yakın hızlarda dönerken (düşük kayma değerleri), kırık veya çatlak rotor çubuklarının akım spektrumunda oluşturduğu hata frekansları genlik olarak baskın olan şebeke temel frekansına çok yakındır. Genelde arıza frekanslarındaki genliğin daha doğru tespit edilebilmesi için önışleme olarak çentik süzgeçleri (notch filter) kullanılmakta [9] veya analiz kalkış ve frenleme gibi değişken hız ortamlarında yapılmaktadır [24]. Anma değerlere yakın hızlarda kırık veya çatlak rotor çubuğu tespiti daha güç olduğundan, bu çalışmada Park dönüşümü kullanılarak stator akımının d-ekseni bileşeninde şebeke frekansının bastırılması önerilmektedir [20-21]. Daha sonra d-ekseni akım bileşenine sırasıyla dalgacık paketi dönüşümü ve hızlı Fourier dönüşümü uygulanarak elde edilen frekans spektrumunda kırık rotor çubuklarının etkisi daha net şekilde görülmektedir.

### 2.2.1. Kırık veya Çatlak Rotor Çubuğu Frekansı

Kırık veya çatlak rotor çubukları motor hatalarının %10'unu oluşturmaktadır [7]. Eğer sistemde kırık rotor çubuğu mevcut ise, kırık rotor çubuğundan akım geçmez. Kırık veya çatlak rotor çubukları, stator akımının spektrumunda bu hataların oluşturduğu frekans bileşenleri incelenerek tespit edilebilir. Hava boşluğundaki frekanslar aşağıdaki denklem ile belirlenebilir.

$$f_k = f_e \left[ \frac{k}{p} (1-s) \pm s \right] \quad (11)$$

$k$  = Harmonik endeksi ( $k=1,2,3,\dots$ )

$s$  = Birim başına düşen kayma

$p$  = Çift kutup sayısı

$f_e$  = Şebeke frekansı

Eğer  $k/p$  bire eşit alınırsa,

$$f_b = f_e(1 \pm 2s) \quad (12)$$

Burada  $f_e$  şebeke frekansını,  $f_b$  kırık rotor çubuğu ile ilgili yan bant frekanslarını ve  $s$  ise motor kaymasını gösterir. Bu yan bant bileşenlerinin genliği iki özelliğe bağlıdır. Düşük yan bant bileşeninin genliği  $f_b$ ,  $(1-2s)f_e$  kırık rotor çubuklarının sayısına göre değişirken, yüksek yan bantın genliği  $f_b$ ,  $(1+2s)f_e$  hız salınımlarına bağlıdır [19]. Park dönüşümünün demodülasyon etkisi olduğundan kırık rotor bar etkisi  $s f_e$  frekansında görülür [21].

### 3. Kırık Rotor Çubuğu Tespiti

Bu çalışmada kullanılan motor 0.75 kW'lık, 60 Hz, 3 fazlı, 4 kutuplu sincap kafesli asenkron motordur. Motor faz akımlarının ölçümü bir SquareD CM4000 enerji kalitesi ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Motora yük olarak Magtrol (HD-805) marka histerisis dinamometre bağlanmıştır. Enerji kalitesi ölçüm cihazıyla toplanan faz akım verileri önce cihazın hafızasında kaydedilmekte ve daha sonra seri port kanalıyla bilgisayara transfer edilmektedir. Test düzeneği şekil 2'de verilmiştir.



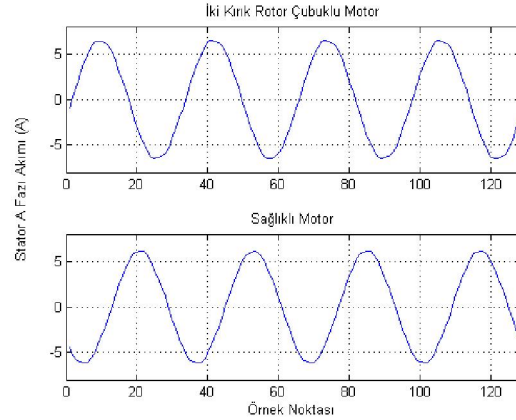
Şekil-2. Test düzeneği

İlk olarak rotor çubukları sağlam durumdayken stator akımı ölçülmüştür. Sonra rotor çubuklarından biri matkap yardımı ile iki ucundan delinerek stator akımı yeniden ölçülmüştür. Şekil 3'de tek çubuğu kırık olan rotor gösterilmiştir.



Şekil-3. Tek kırık rotor çubuğu

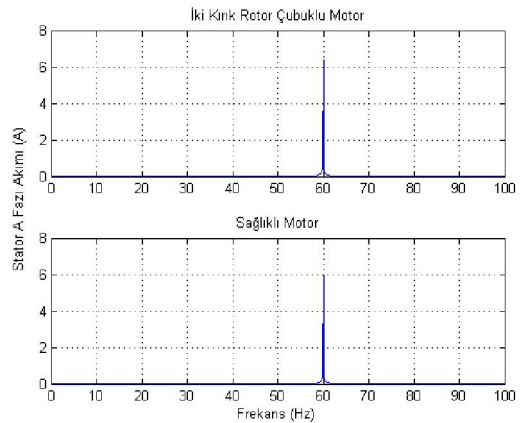
Bu durumda da motor anma yük değerinde çalıştırılarak stator akımı örneklenmiştir. Daha sonra bu işlem iki çubuğu kırık rotor için tekrarlanmıştır. Her bir veri 8192 örnekten oluşmak üzere her arıza durumu için onar tane örnek alınmıştır. İki kırık rotor çubuklu ve sağlam rotorlu durumlar için toplanan akım verileri şekil 4'de verilmektedir.



Şekil-4. Sağlam ve arızalı motorun stator akımları

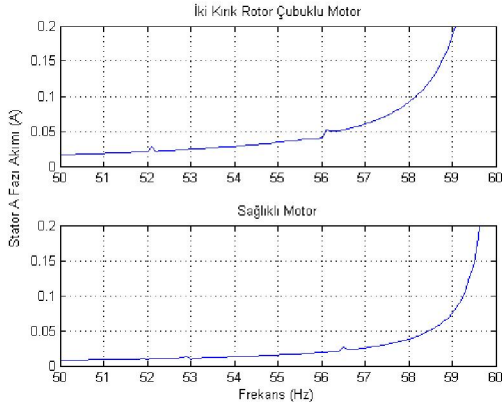
Şekil 4'de gösterilen akımlara herhangi bir önışleme yapılmadan Fourier analizi uygulandığında, şekil 5'de görülen frekans spektrumu elde edilir. Örnekler her iki durumda da asenkron motor anma yük değerinde çalışırken alınmıştır.

Kırık rotor frekansı anma hız (1740 dev/dak) değerinde yaklaşık 4Hz civarındadır. Bu durumda, kırık rotor çubuğu frekansının modülasyon etkisinden dolayı stator faz akımı spektrumunda 56 ve 64 Hz civarında görülmesi gerekmektedir.



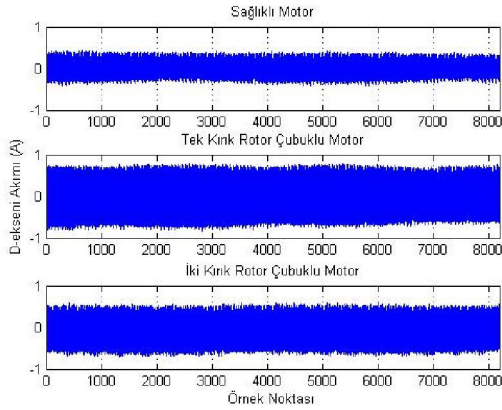
Şekil-5. Sağlam ve arızalı motorun akım spektrumu

Şekil 5 incelendiğinde şebeke frekansının genliği çok yüksek olduğundan önışleme yapılmadan hata frekanslarını şebeke temel frekansından ayırt etmenin mümkün olmadığı gözlemlenmektedir. Aynı spektrum analizinde frekans için 50-60Hz akım için 0-0.2A aralığına bakıldığında şekil 6 elde edilir. Bu şekilden de net bir sonuç çıkarılamamaktadır.



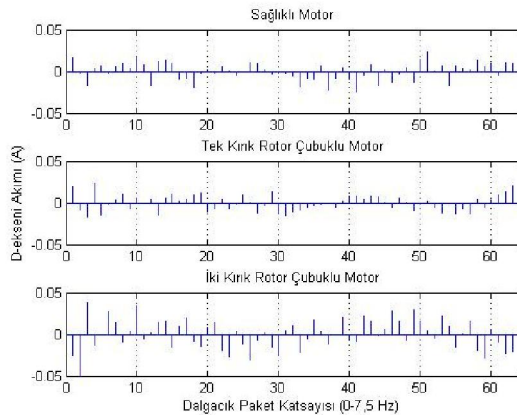
Şekil-6. Sağlam ve arızalı motorun akım spektrumu (50-60Hz)

Park dönüşümü kullanılarak stator faz akımlarından d-ekseni akım bileşeni hesaplandığında, şebeke temel frekansı büyük ölçüde bastırılmıştır [20-21]. Sağlıklı, tek kırık rotor çubuklu ve iki kırık rotor çubuklu motorlar için d-ekseni akımı şekil 7'de verilmiştir.



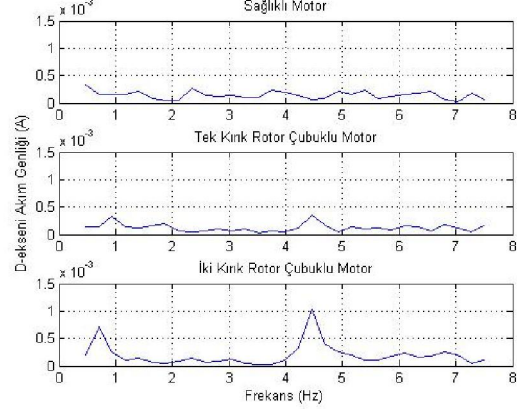
Şekil-7. Sağlam ve arızalı motorun d-ekseni akımı

D-ekseni akımının dalgacık paket dönüşümü analizi yapıldığında şekil 8'deki sonuçlar elde edilir. Park dönüşümünün demodülasyon etkisi olduğundan kırık rotor bar etkisi  $s_f e$  frekansında görülür [21]. Bu frekans deneylerde 4 Hz civarında olduğundan şekil 8'de 0-7,5 Hz bandındaki dalgacık paketi katsayıları gösterilmiştir.



Şekil-8. D- eksen akımının spektrum analizi

Her bir bant için 64 tane dalgacık paketi katsayısı elde edilmektedir. Bu katsayılara Fourier analizi uygulandığında şekil 9'daki sonuçlar elde edilir.



Şekil-9. D- eksen akımının spektrum analizi (0-7,5Hz)

Burada 4 Hz civarında görünen değerler karşılaştırıldığında sağlıklı motor ile rotor çubukları kırık olan motorun çok rahat ayırt edilebileceği ve kırık çubuk sayısının artmasıyla hata frekansının genliğinin arttığı görülmektedir.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada kırık rotor çubuklarının akım harmoniklerine olan etkisini tespit etmek için öncelikle rotor çubukları sağlam olan bir motorun stator akımı ölçülmüştür. Sonra aynı motorun rotor çubukları bir matkap yardımı ile iki ucundan delinerek stator akımı yeniden ölçülmüştür. Analizde stator faz akımlarına Park dönüşümü uygulanarak d-ekseni akımı bulunmuş. Daha sonra d-ekseni akımına dalgacık paketi dönüşümü uygulanmıştır. Son olarak frekans çözünürlüğünü artırmak için dalgacık paketi katsayılarına hızlı Fourier dönüşümü yapılmıştır. Spektrum analizi sonucunda sağlıklı motorun tek ve iki kırık rotor çubuklu motordan rahatlıkla ayırt edilebileceği ve kırık rotor çubuğu sayısının artmasıyla  $s_f e$  frekansındaki genliğin arttığı gösterilmiştir.

#### 5. Kaynaklar

- [1] Rao B.K.N., Handbook of Condition Monitoring, Elsevier Advanced Technology, Oxford, UK, 1996.
- [2] Finley W.R., "An Analytical approach to solving motor vibration problems," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 36, no 5, pp.1467-80, Sep./Oct. 2000.
- [3] Collacott R.A., Vibration Monitoring and Diagnosis, New York: Wiley, 1979.
- [4] Yen G.G. ve Lin K.C., "Wavelet packet feature extraction for vibration monitoring," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 47, no. 3, pp. 650-667, June 2000.
- [5] Kryter R.C. ve Haynes H.D., "Condition monitoring of machinery using motor current signature analysis" Sound and Vibration, 14-21, 1989.
- [6] Riley C.M., Lin B.K., Habetler T.G. ve Kliman G.B., "Stator current harmonics and their causal vibrations: a preliminary investigation of sensorless vibration monitoring applications," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 35, no 1, pp. 94-9, Jan/Feb 1999.

- [7] Kliman G.B., Premerlani W.J, Yazici B., Koegl R.A. ve Mazereeuw J., "Sensorless online motor diagnostics," IEEE Comput. Appl. Power, vol. 10, no.2, pp. 39-43, 1997.
- [8] Benbouzid M.E., "A review of induction motor signature analysis as a medium for faults detection," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 47, no. 5, pp. 984-993 Oct. 2000.
- [9] Eren L. ve Devaney M.J., "Bearing damage detection via wavelet packet decomposition of the stator current," IEEE Trans. Instrum. Meas., 53, 431- 436, 2004.
- [10] Şeker S. ve Ayaz E., "Feature extraction related to bearing damage in electric motors by wavelet analysis", Journal of the Franklin Institute, 340(2), 125-134, 2003.
- [11] Liu J., Wang W., Golnaraghi F. ve Liu K., "Wavelet spectrum analysis for bearing fault diagnostics," Measurement Science and Technology, vol. 19, no. 1, pp. 1-10, 2008.
- [12] Giaouris D., Finch J.W., Ferreira O.C., Kennel R.M. ve El-Murr G.M., "Wavelet denoising for electric drives," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 2, pp. 543-550, 2008.
- [13] Chow T.W.S. ve Hai S., "Induction Machine Fault Diagnostic Analysis with Wavelet Technique," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 51, no. 3, pp. 558-565, 2004.
- [14] Filippetti F., Franceschini G. ve Tassoni C., "Neural network aided online diagnostics of induction motor rotor faults," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 31, no. 4, pp. 892-899, Jul.-Aug. 1995.
- [15] Ballal M.S., Khan Z.J., Suryawanshi H.M. ve Sonolihar R.L., "Adaptive neural fuzzy inference system for the detection of inter-turn insulation and bearing wear faults in induction motor," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 1, pp. 250-258, 2007.
- [16] Haji M. ve Toliyat H.A., "Pattern Recognition-A Technique for Induction Machines Rotor Broken Bar Detection," IEEE Trans. Ener Conver, vol. 16, no. 4, pp. 312-317, 2001.
- [17] Ayhan B., Chow M. ve Song M., "Multiple Discriminant Analysis and Neural Network Based Monolith and Partition Fault Detection Schemes for Broken Rotor bar in Induction Motors," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 53, no. 4, pp. 1298-1308, 2006
- [18] Onel I.Y. ve Benbouzid M.E.H., Induction Motors Bearing Failures Detection and Diagnosis Using a RBF ANN Park Pattern Based Method, International Review of Electrical Engineering (IREE), vol. 3 n. 1, pp. 159 - 165, Feb. 2008.
- [19] Aydın İ., Karaköse M. ve Akın E., "Kırık rotor çubuğu ve stator arızalarının teşhisinde yapay sinir ağı yaklaşımı", Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 1-2, 134-149, 2009.
- [20] Onel I.Y. ve Benbouzid M.E.H., "Induction motor bearing failure detection and diagnosis: Park and concordia transform approaches comparative study," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 13, no. 2, pp. 257-262, 2008.
- [21] Cruz S.M.A ve Cardoso A.J.M., "Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach," in Proc. 1998 Int. Conf. Electrical Machines, vol. 3, Istanbul, Turkey, pp. 1844-1848.
- [22] Eren L., "Enhanced feature detection in bearing health diagnosis with spectral post processing," International Review of Electrical Engineering (IREE), vol. 4 no. 2, pp. 260-268, Apr. 2009.
- [23] Güran F., "Use of Park transformation in harmonic suppression for wavelet packet based broken rotor bar detection," Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, 2011.
- [24] Toliyat H.A. ve Lipo T.A., "Transient analysis of cage induction machine under stator, rotor bar and end ring faults," IEEE Trans. Energy Conv., 10(2), 241-247, 1995.