

BAYES-KARAR VERME KURAMININ MOTOR ARIZA TANISINDA KULLANILMASI

Erinç Karatoprak

Serhat Şeker

Zehra Çataltepe^(*)

Tayfun Şengüler

Istanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34469 Maslak, İstanbul

^(*)Istanbul Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Müh. Bölümü, 34469 Maslak, İstanbul

Özet

Bu çalışma, IEEE test standartlarına göre hızlandırılmış yaşlandırma süreçlerini kullanarak, 5 HP lık asenkron elektrik motorunun titreşim sinyalleri üzerine Bayes-Karar verme kuramının bir uygulamasıdır. Bu anlamda algoritma, işaretlerin standard sapma değerlerini ve önsel olasılık değerlerini kullanarak sinyalleri sınıflandırmakta ve bozuk durumu belirleyebilmektedir. Uygulama arıza tanısı için uyarlanabilir bir hata toleransını da beraberinde getirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrik Motoru, Titreşim, Bayesçi Karar verme, Standard sapma.

1. Giriş

Endüstriyel süreçlerde kullanılan elektrik motorlarının elektriksel ve mekanik kısımlarındaki arızaların erken belirlenmesi, süreç güvenliği ve ekonomikliği açısından son derece önemlidir. Bu nedenle, öngörülü bakım (Predictive Maintenance) amaçlı durum izleme (condition monitoring) çalışmaları, makina durum bilgisinin ortaya çıkartılmasının temelini oluşturur. Bu anlamda, en fazla kullanılan yöntemlerden biri ise spektral analiz yöntemi olup bu yolla makina durum bilgisi frekans tanım bölgesinde kolayca ifade edilebilir. Ayrıca durum bilgisi, zaman serisi şeklindeki verilerin istatistik analizi yoluyla da elde edilebilir. Literatürde ise endüstriyel uygulamalarda kullanılan asenkron motorların arıza belirleme çalışmalarında kullanılmış birçok durum izleme çalışması gerçekleştirilmiştir [1-5]. Bu çalışmalardan ortaya çıkartılan sonuçlara göre arızaların %50 sinden fazlasının ise rulman bozukluğu ve shaft dengesizlikleri gibi mekanik nedenlerden kaynaklandığı görülmüştür.

Bu çalışmada ise, makinanın rulman bölgesine yakın noktasındaki ivme ölçerden alınan, rulmanın sağlam ve bozuk durumuna ilişkin titreşim sinyallerinin istatistiksel durumu incelenerek, Bayes-Karar verme algoritması, arızalı durumun belirlenmesinde başarıyla kullanılmıştır.

2. İstatistiksel Parametrelerin Hesaplanması

Genel anlamda gözönüne alınan bir sistemden alınan işaretleri istatistiksel olarak inceleyerek sistem

durumuna ilişkin bilgi çıkartmak stokastik tabanlı durum izleme çalışmasının temel yapısını oluşturur. Bu anlamda sistemden alınan süreç işaretlerine $\{x_i\}$ ilişkin bazı istatistiksel parametrelerin değişimlerinin gözlemlenmesi zaman içinde sistemin genel eğilimini belirler. Söz konusu bu istatistiksel parametrelerden bazıları sırasıyla, ortalama (μ), standard sapma (σ), çarpıklık (c) ve basıklık (k) dir. Ortalama değer, işaretin genliklerinin aritmetik ortalaması şeklinde hesaplanıp aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Benzer şekilde, standard sapma da

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (2)$$

biçimindedir. $\{x_i\}$ dizisinin dağılımının simetrik durumdan sapmasının ölçüsünü veren çarpıklık (skewness) ise

$$c = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^3 \right]}{\sigma^3} \quad (3)$$

olup, dağılımın dikliğinin ölçüsünü gösteren basıklık (kurtosis) da aşağıdaki eşitlik ile verilebilir.

$$k = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^4 \right]}{\sigma^4} \quad (4)$$

Hesaplanan bu parametrelerin normal-simetrik bir dağılım durumunda $c = 0$ ve $k = 3$ değerlerini alması beklenir.

3. Bayes-Karar Verme Algoritması

Bayes Karar Kuramı, istatistiksel örüntü tanımda temel bir yaklaşımdır. İstenilen sonsal olasılığa ulaşmak için, önsel olasılık değerleri kullanılır[6]. Burada, sınıflar C_i , $i=1, 2, \dots$ olup, x de ölçülen

değerler ise; x 'in hangi sınıfa girdiğine dair olabirliğin ölçüsü Bayes Teoremine göre;

$$P(C_i|x) = \frac{P(x|C_i)P(C_i)}{P(x)} \quad (5)$$

şeklinde hesaplanır. Burada,

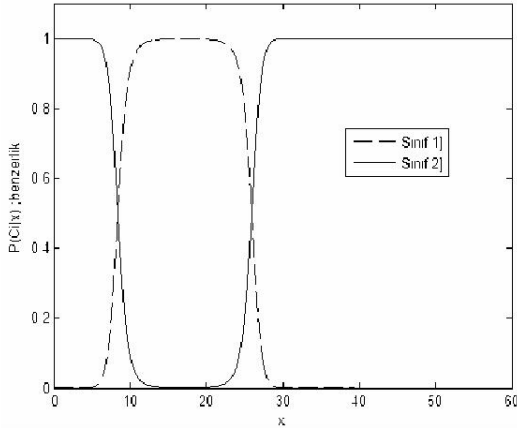
$$P(x|C_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (6)$$

ve

$$P(x) = \sum_{i=1}^n P(x|C_i)P(C_i) \quad (7)$$

dir. Denklem (6), x bağımsız değişkenlerinin Gauss dağılımında olması durumunda geçerlidir.

Denklem (7) de n , sınıf sayısını gösterir. İki sınıflı bir durumda, $P(C_1)$ ve $P(C_2)$ sisteme göre karar verilen önsel olasılıklardır. $P(C_1|x)$ ve $P(C_2|x)$ değerleri ise, Denklem (5) 'e göre aşağıdaki gibi gösterilebilir;



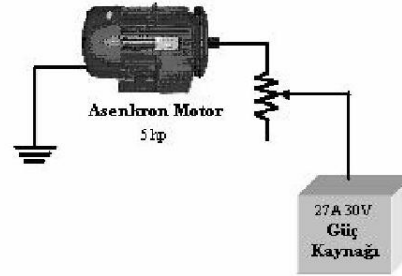
Şekil 1. Sınıflara ait olasılık değerlerinin değişimi.

Böylece Şekil 1. vasıtasıyla, iki sınıfa ait benzerlik fonksiyonlarının kesişim noktaları kolayca bulunur. Bu noktalar karar değişim noktaları olarak isimlendirilir. Buna göre, olasılığı $P(C_1|x)$ olan $x_1 < x < x_2$ aralığında ki x değerleri, C_1 sınıfına; $P(C_2|x)$ olan $x < x_1$ ve $x > x_2$ aralığında ki x değerleri ise C_2 sınıfına girer.

4. Hızlandırılmış Yapay Eskitme Süreçleri ile Arıza Oluşturulması

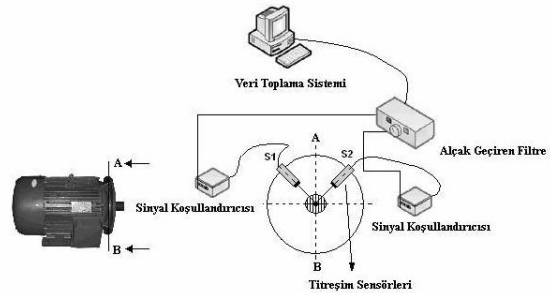
Elektrik motorlarının hareketli kısımlarını oluşturan rotor, iletken olmayan bir gres yağ tabakası ile yalıtılmış bir şekilde, rulman vasıtasıyla tutulur. Rotorun yüksek hızlarında bile bu yağ tabakası

varlığını korur ve rotoru, rulmanın dış bileziği ile temas ettirmez. Ancak rotor gerilimi toprağa göre artabilir ve bu durumda yağ tabakasının yalıtkanlığı delinerek kıvılcım şeklinde elektriksel atlamalar sözkonusu olabilir. Böylece boşalma modunda rulman içinden bir akım akar. Alçak hızlarda ise, yağ tabakası çok ince hale gelerek rulman bilyeleri bilezik ile daha iyi temas eder. Bu durumda, boşalma modundaki gibi gerilim yükselmesi oluşmaz ancak, rulman içinden iletim modu şeklinde bir akım akmaya başlar. Böylece rulman akımları boşalma ve iletim şeklinde iki modda ortaya çıkar. İletim modu rulman üzerinde sürekli bir akım oluşturur, ancak erken bir arızaya sebebiyet vermez. Boşalma modu ise ark oluşumları ile rastlantısal akımları oluşturur ve yağ tabakasını bozar ve aynı zamanda noktasal rulman yüzey bozukluklarına neden olur. Bu çalışmada rulman şaftında oluşan elektriksel boşalmanın benzetimi için aşağıdaki gibi bir deney düzeneği oluşturulmuştur [7].



Şekil 2. Elektriksel olarak rulman eskitmesi.

Şekil 2' den de görüldüğü gibi şafta dışarıdan 27 A lik bir akım uygulanmıştır. Bu şekildeki eskitmenin yanı sıra ayrıca yedi aşamada uygulanan termal ve kimyasal eskitme süreçleri de gerçekleştirilmiştir. Her süreçten sonra eskime hızlanmış ve motor bir test platformu üzerinden performans testinden geçirilmiştir. % 0-115 lik yük altında gerçekleştirilen performans testinde rulman arızasının analizinde kullanılacak olan titreşim işareti Şekil 3' deki A-B kesitine göre S2 numaralı konumdaki titreşim algılayıcısından alınmıştır. Burada S1 ve S2 özdeş algılayıcıdır.

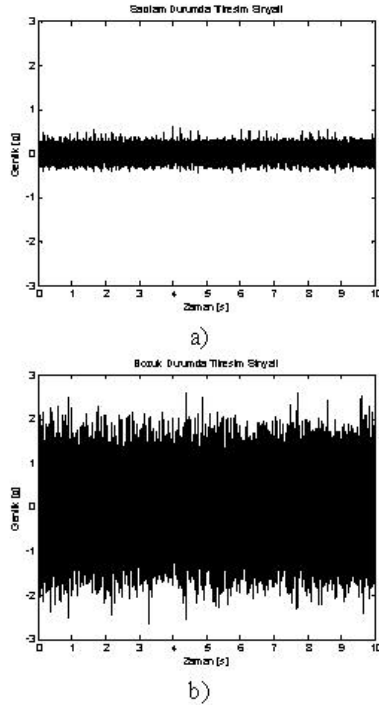


Şekil 2. Algılayıcılar ve veri toplama sistemi.

5. Uygulama

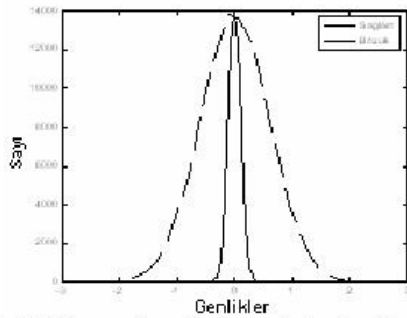
5.1. İstatistiksel Analiz

5 HP lik 3 faz 4 kutuplu endüksiyon motorunun yedi eskime süreci sonrasında motor performans testi yapılarak %100 yük altında her bir eskime süreci ile birlikte sağlam durumu da içerecek şekilde toplam 8 aşamadan oluşan, 12 kHz lik örnekleme frekansına sahip titreşim işaretleri alınmıştır. 10 s lik ölçme sonunda elde edilen bu titreşim işaretleri bu çalışmanın istatistiksel analizleri için kullanılmıştır. Bu anlamda, söz konusu titreşim işaretinin sağlam ve yedinci eskime aşamasına ilişkin bozuk durum zaman serileri aşağıdaki şekillerle verilmiştir.



Şekil 3. Titreşim işaretleri. a) Sağam, b) bozuk durum.

Yukarıdaki zaman tanım bölgesi titreşim işaretlerinin olasılık dağılım fonksiyonları ise benzer şekilde aşağıdaki gibi normal dağılım şeklinde Şekil 4 ile verilebilir



Şekil 4. Sağam ve bozuk durum için olasılık dağılım fonksiyonları: Sağam(-); Bozuk (--).

Her bir aşamaya ilişkin hesaplanmış istatistiksel büyüklükler ise Tablo 1 deki gibi verilmiştir. Bu durumda Tablo 1 deki değerlerden standart sapmanın en baskın parametre olduğu gözlenmiştir.

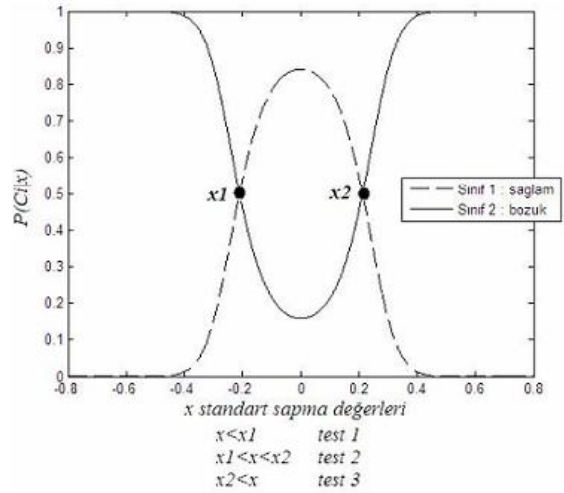
Tablo1. Sağam ve bozuk durum için hesaplanmış istatistiksel büyüklükler.

Titreşim Sinyalleri	Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	Çarpıklık	Basıklık
Sağam	1,23E-03	0,11	0,044	3,02E+00
Bozuk	1,13E-02	0,63	-0,070	2,99E+00

Böylece hesaplanan bu büyüklükler vasıtasıyla makina durum farklılıklarının istatistiksel parametrelerden sadece standart sapma değerlerindeki değişikliklere bağlı olduğu kolaylıkla gösterilebilir. Çünkü Tablo 1'e göre her bir durum için ortalama değer yaklaşık olarak sıfırdır. Ayrıca, çarpıklık ve basıklık parametrelerinin her iki durum için yaklaşık olarak $c = 0$ ve $k = 3$ değerlerini almasından dolayı olasılık yoğunluk fonksiyonlarının da normal dağılımlı kaldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle en önemli istatistiksel değişiklik standart sapma üzerindedir.

5.2. Bayes-Karar Algoritması sonuçları

Çalışmanın önceki bölümlerinde, motor titreşim verilerinin sağlam ve bozuk durumlarının istatistiksel analizi sonucunda her iki sinyalin de normal dağılımlı olduğu hesaplanmıştı, bundan sonra Bayes yaklaşımının uygulaması olarak önce sağlam ve bozuk durumlara ilişkin olarak önsel olasılık değerleri $P(C_1)$ ve $P(C_2)$ atanmıştır. Bu iki değer başlangıçta 0.5 olarak seçilmiştir. Bundan sonra Denklem (5) kullanılarak, $P(C_1|x) = P(C_2|x)$ olan kesişim noktaları bulunup, buna ilişkin grafik, Şekil 5 de gösterilmiştir.



Şekil 5. İki sınıfa ait olasılık değerlerinin değişimi.

x_1 öncesi test1, x_1-x_2 arası test2 ve x_2 sonrası da test3 bölgesi olarak; grafik üç bölgeye ayrılmıştır. x_1 in

öncesinde ε aralığı kadar bir yerde $P(C_s|x)$ ve $P(C_b|x)$ karşılaştırılmış ve test1 büyük olan sınıfın değerini almıştır (Sağlam =1 , Bozuk=0). Test 2 ve test 3 aralıkları da bu şekilde sağlam ve bozuk olarak sınıflandırılmıştır. Bu şekildeki öğrenme sürecinden sonra uygulanan x girişine karşı (standard sapma) bunun hangi test aralığına karşı geldiği bulunmakta ve bu aralığın değeri de öğrenme aşamasında sağlam (1) veya bozuk (0) olarak belirlendiğinden, böylece girilen her x değeri için motorun sağlam veya bozuk olup olmadığına karar verilebilir.

Bu uygulamada kullanılan motor titreşim verileri 10 s lik ölçme süreleri boyunca toplanmıştır. Ancak Bayes-Karar algoritmasının eğitim sürecinde sağlam (0.aşama-“yaşlanmadan önceki sağlam durum”) ve bozuk (7. aşama-“en son yaşlandırma durumu”) durumun 10 s lik verilerinin 7 saniyesi eğitim için kullanılmış olup, son 3 saniyesi test amaçlı kullanılmıştır. Bu iki aşamanın arasındaki diğer yaşlanma süreçlerinde ise, yani 1., 2., 3., 4., 5. ve 6. aşamalarda, tüm ölçüm süreleri test amaçlı olarak kullanılmıştır. Test süreci ise 40 ms lik bloklar halinde gerçek zamanlı bir uygulama gibi gerçekleştirilmiş olup standard sapmanın bu kısa sürede hesaplanmasından sonra Bayes-Karar verme algoritması çalıştırılmış olup motorun sağlam ya da bozuk olma durumu saptanmıştır. Buna göre anızalı durum, 40 ms lik titreşim işaretinin durağan kabul edilebileceği küçük pencereler içersinde saptanmıştır.

Ayrıca sınıflandırma bakımından da 3. aşamadaki titreşim işareti % 54 sağlam ve % 46 bozuk olma olasılık değerleri kritik geçiş seviyesini belirler ve bu anlamda, bir uyarı seviyesi olarak da kullanılabilir. Yani 4. aşama bu test sonuçlarına göre artık % 25 sağlam ve %75 bozuk olma olasılıkları ile bozulmanın tam anlamıyla ortaya çıktığı ilk aşama olarak belirlenmiştir. Ancak buradaki önsel olasılık değerleri $P(C_s)$ ve $P(C_b)$ nin ilk değerlerinin seçimi oldukça önemlidir. Bu uygulamada $P(C_s)=P(C_b)=0.5$ olarak atanan bu değerler sağlam durum lehine artırılarak kritik geçiş noktası daha bozuk duruma doğru kaydırılabilir. Bu ise hata toleransının önceden belirlenmesine karşı düşer, bu uygulamadaki değerler ise maksimum entropi bakımından en olası değerlerdir. Ancak bazı kritik sistemlerde sağlam durumun önsel değeri daha düşük tutulur.

6. Sonuçlar ve Yorumlar

Yapılan bu çalışmada asenkron makinalarda rulman eskimesine ait bilgiler, yapay olarak laboratuvar ortamında üretilmiş olup, makinanın rulman bölgesine yakın bir noktadan alınan titreşim işaretlerinin sağlam ve bozuk durumlarına ilişkin istatistiksel analizler yapılmıştır. Buna göre yaşlanma sürecinin istatistiksel anlamda normal dağılımlı kaldığı gözlenmiştir. Ayrıca tanımlanan Bayes-Karar verme algoritması ile uygulanan titreşim işaretlerinin sınıflara ayrılması

gerçekleştirilmiş olup, buna ilişkin fiziksel durumlar sağlam veya bozuk durum olarak belirlenmiştir ve ara değerler de ayrıca test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar endüstriyel süreçlerde durum izleme bakımından son derece önemli olup, kritik sistemlerde durum izleme ve güvenilirlik çalışmaları bakımından bir temel oluşturmaktadır. Literatüre bakıldığında ise bu alanda, yeni ve farklı bir uygulama gerçekleştirildiği görülebilir [8]. Bu anlamda ele alınan çalışma son derece günceldir. Gelecekteki uygulamalar bakımından ise kullanılan sinyallere ilişkin diğer özellikler de (akım, gerilim, frekans.v.s.) gözönünde bulundurularak çalışma daha da genişletilebilir.

Kaynakça

- [1] Bowers S.V. ve Piety K.R., “Proactive Motor Monitoring Through Temperature Shaft Current and Magnetic Flux Measurements”, *CSI 1993 Users Conference*, Eylül 20-24, 1993.
- [2] Cho K.R., Lang J.H. ve Umas S.D., “Detection of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using State and Parameter Estimation”, *IEEE Transaction on Industry Applications*, Cilt 28, No. 3, s. 702-709, Mayıs/Haziran 1992.
- [3] Nicholas J.R., “Predictive Condition Monitoring of Electric Motors”, *P/PM Technology*, s. 28-32, Ağustos 1993.
- [4] Schoen R., Habetler T.G., Kamran F. ve Bartheld R.G., “Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring”, *Proceedings of IEEE Industrial Application Meeting*, Cilt 1, s. 110-116, 1994.
- [5] Tandon, N.; Yadava, G.S.; Ramakrishna, K.M., “A comparison of some condition monitoring techniques for the detection of defect in induction motor ball bearing”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Cilt 21, sayı 1, 1 Ocak 2007, s. 244-256.
- [6] Alpaydın E. “*Introduction to Machine Learning*”, pp. 69-73, The MIT Press, ISBN: 0-256-01211-1(hc), Cambiridge MA, 2004
- [7] IEEE Std 117-1974. IEEE Standard Test Procedure for Evaluation of Systems of Insulation Materials for Random-wound AC Electric Machinery,1974.
- [8] Sugumaran, V.; Muralidharan, V.; Ramachandran, K.I. “Feature selection using Decision Tree and classification through Proximal Support Vector Machine for fault diagnostics of roller bearing” , *Mechanical Systems and Signal Processing*, Cilt 21, Sayı 2, 1 Şubat 2007, s. 930-942.