

# ASENKRON MOTORLARDA STATİK EKSANTRİKLİĞİN TESPİTİ

Hanifi Güldemir  
Fırat Üniversitesi  
Teknik Eğitim Fakültesi  
Elektronik-Bilgisayar Bölümü  
ELAZIĞ  
[hguldemir@firat.edu.tr](mailto:hguldemir@firat.edu.tr)

## ÖZET

İndüksiyon motorların uzun süre çalışmaları yada bir hata sonucunda rulmanlardaki aşınmalardan dolayı hava aralığında meydana gelebilecek eksenel kaçıklık, erken tedbir alınmadığı takdirde rotor stator sürtünmesine neden olmakta ve daha büyük arızalar oluşturabilmektedir. Motor hava aralığındaki eksenel kaçıklık dinamik ve statik olma durumuna göre ya hat akımında yeni harmonikler oluşturmakta yada mevcut harmoniklerin genliklerini değiştirmektedir. Bu arızaların tespiti çeşitli ölçmeler ve spektral analiz yöntemleriyle yapılabilmektedir. Bu çalışmada indüksiyon motorların hava aralığındaki eksenel kaçıklığın motor hat akımındaki harmonik bileşenler üzerine etkileri incelenmek üzere yapay olarak eksenel asimetri oluşturacak deney düzeneği tasarlanmış ve deneysel sonuçlarla benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda teorik ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Statik eksantriklik, hata tespiti

## 1. GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde elektrik makineleri oldukça büyük işlevler yapmaktadırlar. Özellikle büyük güçlü petrokimya veya petrol üretim ve işleme tesislerinde ve güç santrallerinde elektrik motorlarının arızalanması hem büyük bir üretim kaybına hem de milyonlarca lira para kaybına sebep olmaktadır. Bu tür işletmeler beklenmedik arızaların önlenmesi için çeşitli periyotlarla bakım ve revizyon işlemleri yapmakta böylece büyük kayıplara yol açabilecek hata ve arızaları önlemeye çalışmaktadırlar. Bu yöntemde bakım için motorlar yerlerinden sökülerek parçaları ayrıştırılıp hata yada arıza oluşabilecek yerler incelenmektedir. Böylece motor servis dışı kaldığından yine üretim kaybı olmakta ve sökme ve takma işlemleri uzun zamanlar aldığından zaman kaybı meydana gelmektedir. Buna karşın modern endüstriyel işletmeler yeni teknolojiler kullanarak elektrik motorlarının çalışma durumlarını gözleyip oluşabilecek arızaları anında tespit edip büyük hasarlara sebebiyet vermeden tedbirler alma yoluna gitmektedirler.

Endüstride kullanılan elektrik motorlarında oluşabilecek hataların tespit ve tayini uzun yıllardan

beri araştırmacıların çalışma konularını oluşturmuş, bu konuda birçok bilimsel çalışmalar ortaya konmuştur. Bu çalışmaların bir kısmı çeşitli spektral analiz yöntemleri kullanarak rotor çubuklarındaki kırılmaların tespiti üzerine [1], bir kısmı ise hava aralığının eksantrikliğinin belirlenmesi üzerine [2] yapılmıştır. Motor hava aralığının eksantrik olması dengesiz manyetik çekim kuvvetlerinin artması ve stator ile rotorun sürtünmesi gibi büyük hasarların meydana gelmesine sebep olabilmektedir. Motor hava aralığındaki eksenel kaçıklık dinamik ve statik olma durumuna göre ya hat akımında yeni harmonikler oluşturmakta yada mevcut harmoniklerin genliklerini değiştirmektedir [3]. Bu çalışmaların bir çoğu hata tespitinde çeşitli sinyal işleme teknikleri kullanarak indüksiyon motorun hat akımı spektrumundaki harmonik bileşenlerden faydalanmışlardır.

Bu çalışmada indüksiyon motorların hava aralığında yapay olarak ayarlanabilir statik eksantriklik oluşturmak üzere bir mekanizma tasarlanmış ve statik eksantrikliğinin motor hat akımındaki harmonik bileşenler üzerine etkileri incelenmiştir.

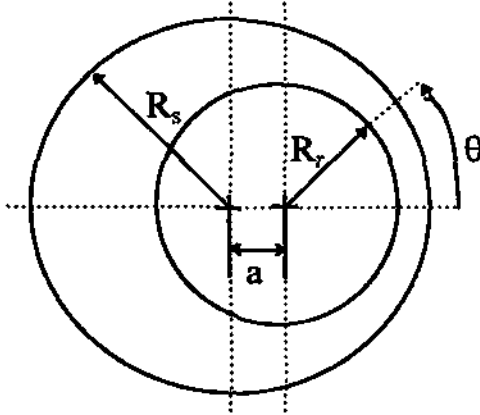
## 2. HAVA ARALIĞININ EKSANTRİKLİĞİ

Genel olarak herhangi bir elektrik makinasında rotorun geometrik merkezi statorun geometrik merkezi ile çakışmıyor ise bu makinada eksenel kaçıklık yada eksantriklik var demektir. Pratikte hem statik hem de dinamik eksantriklikle karşılaşılabilir. Bu çalışmada hem statik hem de dinamik eksantriklikten bahsedilecek ancak sadece statik eksantrikliğinin meydana getirdiği etkiler incelenecektir.

Elektrik makinalarında rotor eksantrikliği bir çok değişik sebeplerden kaynaklanabilmektedir. Çok hassas üretim toleranslarına rağmen yine de motor hava aralığında bir miktar düzensizlik bulunabilmektedir. Eksantrikliğinin indüksiyon makinada oluşturduğu etkiler üzerine yapılmış bir çok çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda bu tür asimetrilüğün oluşturduğu harmonikler incelenmiştir. Bu harmoniklerin belirlenmesinde ya sonlu elemanlar yöntemi [3,4], yada permean-mmk yaklaşımı [5,6] kullanılmıştır. Bu çalışmada ise basitliği ve kısa zamanda sonuç vermesi sebebiyle ikinci yaklaşım kullanılmıştır.

## 2.1 Statik Eksantriklik

Eğer rotor shaftı yeterince sert ve düzgün ve rotorun geometrik merkezi stator geometrik merkezi ile aynı değilse bu makinede statik eksantriklik var demektir. Böyle durumlarda Şekil 1 den de görüldüğü üzere rotor kendi ekseninde dönmekte ancak bu eksen stator eksenine göre eğilmiştir. Dolayısıyla motor çapı dikkate alındığında hava aralığı bir noktada fazla iken tam karşı noktada ise daha az olmaktadır. Yine statordaki ovallık da statik eksantrikliğe sebep olmaktadır [7].

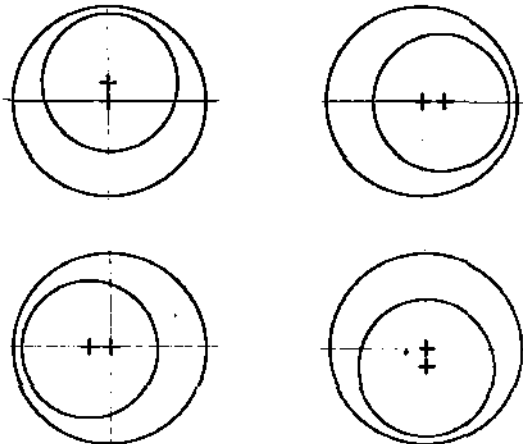


Şekil 1: Statik eksantrik rotor

Motordeki statik eksantriklik motor hat akımında ekstra harmonikler meydana getirmemekte ancak eksantrikliğin derecesine göre mevcut harmoniklerin genliklerini artırıcı yönde etkisi olmaktadır.

## 2.2 Dinamik Eksantriklik

Eğer elektrik makinasının rotoru shafta göre eksantrik fakat rulmanlar statora göre eşmerkezli ise rotor döndüğünde dönmenin merkezi de değişecektir. Bu durum dinamik yada dönen eksantriklik olarak bilinmekte olup Şekil 2 de gösterilmiştir. Dinamik eksantriklik shafttaki bükülme yada rulmanların aşınmasından kaynaklanabilmektedir.

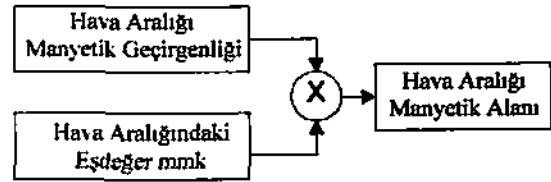


Şekil 2: Dinamik eksantrik rotor

Bu tip hatalar rotor ekseninin dönme eksenine göre eğilmesinde oluşur ve minimum ve maksimum hava aralığının pozisyonu sabit olmayıp rotor ile birlikte dönmektedir. Bu nedenle dinamik eksantriklik motor hava aralığında ekstra harmonik manyetik alanlar meydana getirmektedir.

## 3. MATEMATİKSEL YÖNTEM

Motor hava aralığındaki manyetik alan dağılımının bulunmasında Sonlu elemanlar yöntemi yada manyetik geçirgenlik-manyetomotor kuvvet yaklaşımları kullanılmaktadır. Basitliği ve sonuç alınması daha kolay olduğundan bu çalışmada ikinci yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde Hava aralığındaki manyetik alanı bulmak için, hava aralığı manyetik geçirgenliği (P) ile stator ve rotorun oluşturduğu mmk (F), Fourier serileri şeklinde elde edilmiş ve bunların çarpımından hava aralığındaki manyetik alan bulunmuştur.



Şekil 3: Manyetik alanın hesaplanması

Dönen manyetik alan teorisine göre statorun oluşturduğu manyetomotor kuvvet, kaynaktaki zaman harmonikleri ihmal edildiğinde

$$F_t(\theta, t) = \sum_n F_n \cos(np\theta \pm \omega t) \quad (1)$$

yazılabilir. Burada  $F_n$ , n.inci harmoniğin genliği,  $p$  çift kutup sayısı,  $\omega$  açısal hız  $t$  ise zamanı göstermektedir. İndüksiyon makina stator ve rotorundaki oyuklardan dolayı hava aralığı düzgün bir şekilde olmayıp, bu hava aralığının manyetik geçirgenliği rotor döndüğünde sürekli değişen bir yapıya sahiptir. Bu manyetik geçirgenlik yaklaşık olarak

$$P_{r,s}(\theta, t) = \sum_i \sum_j P_{r,s,i,j} [\cos(iR \pm jS)\theta - iR\omega_r t] \quad (2)$$

Hava aralığının eksantrik olma durumunda bu eksantrikliğin oluşturacağı manyetik geçirgenlik ise

$$P_{a,i} = \sum_k P_{a,i,k} \cos(k\theta) \quad (3)$$

olarak ifade edilip, buradaki eşdeğer manyetik geçirgenlik

$$P_t(\theta, t) = \sum_i \sum_j \sum_k P_{r,s,i,j,k} [\cos(iR \pm jS \pm k)\theta - iR\omega_r t] \quad (4)$$

olarak elde edilir.

Bu ifadelerden manyetik alan değişimi

$$B(\theta, t) = P_t(\theta, t) F_t(\theta, t) \quad (5)$$

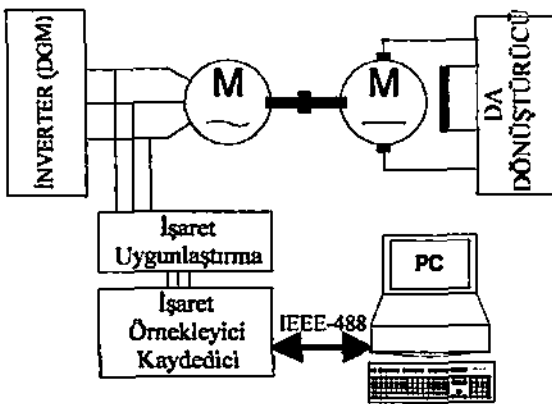
olarak yazılabileceğinden [8], yukarıdaki ifadeler bu denklemde yerine konulduğunda

$$B_T(\theta, t) = \sum_i \sum_j \sum_k B_{i,j,k} [\cos(iR \pm jS \pm k)\theta - iR\omega, t] \quad (6)$$

olarak elde edilir. Bu ifadede sadece stator ve rotor oyukları ile statik eksantriklikten kaynaklanan manyetik geçirgenlikler dikkate alınmış, doyum ve dinamik eksantriklikten etkileri hesaplamalara katılmamıştır. Bu ifadeden görüldüğü üzere statik eksantriklikten dolayı oluşan harmonikler oyuk harmoniği frekansı ile aynıdır. Dolayısıyla bu tür eksantriklikten dolayı yeni harmonikler oluşmamakta ancak mevcut harmoniklerin genlikleri değişmektedir. Motor hat akımındaki harmonikler ise indüksiyon motorun harmonik eşdeğer devresi kullanılarak elde edilmiştir.

#### 4. DENEY DÜZENEGİ

Elektrik makinelerindeki eksantriklikten tespiti için kullanılan deney düzeni Şekil 4 de gösterilmiştir. Bu düzenekte milleri birbirine bağlanmış bir doğru akım motoru ile 3 fazlı bir indüksiyon motor bulunmaktadır. Bir doğru akım dönüştürücü ve dalga genişlik modülasyonu bir inverterle bu makinelerin denetimi yapılmaktadır. Inverter, frekansı 0-100 Hz arasında ayarlanabilen sinüsoidal gerilim üretebilmektedir. Bu düzenekteki dc motor, indüksiyon makineyi değişik hız ve momentlerde yüklemek için kullanılmaktadır. Her iki makina da uzaktaki bir kontrol odasından kontrol edilebilmekte ve akım ve gerilim dalga şekilleri bu kontrol odasından bilgisayara aktarılabilir. Bu kontrol

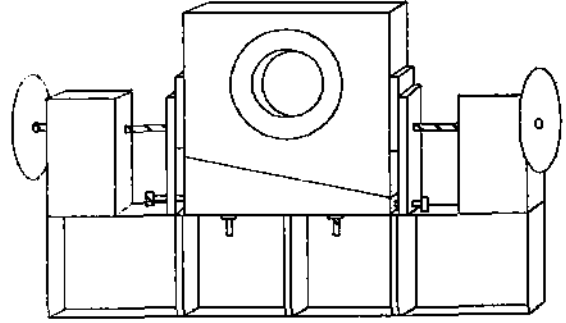


Şekil 4: Deney düzeni

Hava aralığının eksantrikliğinin indüksiyon makinadaki etkilerinin incelenebilmesi için özel bir mekanizma tasarlanmıştır, Şekil 5.

Motor kapakları sökülerek rotor mili, bu mekanizmadaki ayaklar üzerindeki yataklarda bulunan rulmanlara yerleştirilmiştir. Ayarlanabilir şekilde

tasarlanan bu mekanizma iki parçadan oluşup üzerinde yatak ve rulmanlar bulunmaktadır. Bu mekanizma yardımıyla rotor hem yatay hem de dikey olarak çok hassas ve kontrollü bir şekilde hareket ettirilebilmektedir.



Şekil 5: Statik eksantriklik mekanizması

İstenilen rotor pozisyonu ayarlandığında yatak destekleri altındaki vidalar yardımıyla pozisyon sabitleştirilmektedir. Böylece motor hava aralığında statik eksantriklik oluşturulmaktadır.

#### 5. TEORİK VE DENEYSEL SONUÇLAR

Motor hat akımındaki harmonikler stator ve rotor manyetik alanlarının birlikte oluşturduğu hava aralığındaki manyetik alandan oluşmaktadır. Hava aralığındaki manyetik alan harmonikleri rotorun eksantrikliğine bağlı olarak artmaktadır. Statik eksantriklikten kaynaklanan bu harmonikler aynı frekanslı olduklarından motor hat akımındaki harmonik bileşenlerin genliklerini artırmaktadır. Dolayısıyla statik eksantriklik motor hat akımında ilave harmonikler oluşturmamakta ancak var olan harmoniklerin genliklerini artırıcı yönde etki göstermektedir.

DeneySEL sonuçların alınması için 30 kW lık 3-fazlı asenkron motor %100 yüklü iken (52 A yük akımında) ve 1468 d/dak hızla dönerken statik eksantriklik %20-%40 arasında değiştirilerek bir dizi ölçümler yapılarak motor hat akımı dalga şekilleri bilgisayara kaydedilmiştir. Bu dalga şekillerinin Hızlı Fourier dönüşümü alınarak spektrumları elde edilmiş ve hat akımındaki harmonik bileşenlerin eksantrikliğe bağımlılığı tespit edilmeye çalışılmıştır.

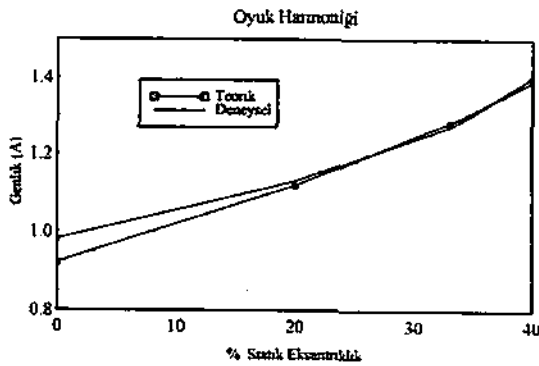
Güvenli bir çalışma için, bir diğer deyişle stator rotor sürtünmesi oluşmaması için eksantrikliğinin üst seviyesi % 40 olarak alınmıştır.

%20 ve % 40 statik eksantriklik oyuk harmoniklerinde sırasıyla % 15.3 ve % 42 lik artışlar meydana getirmiştir. Tablo 1 de farklı eksantriklik seviyeleri için deneysel ve teorik sonuçlar karşılaştırılmış ve oyuk harmoniği genliğinin eksantrikliğe bağımlılığını göstermek için oyuk harmoniği genliği eksantrikliğinin bir fonksiyonu olarak Şekil 6 da çizdirilmiştir. Bu

şekil göstermektedir ki motor hat akımındaki oyuk harmoniği kullanılarak motordaki eksantriklik hakkında bilgi edinilebilmektedir.

| % Statik Eksantriklik | Oyuk Harmoniği Genliği (A) |        |
|-----------------------|----------------------------|--------|
|                       | Deneyisel                  | Teorik |
| 0                     | 0.98                       | 0.92   |
| 20                    | 1.13                       | 1.12   |
| 33                    | 1.27                       | 1.28   |
| 40                    | 1.4                        | 1.39   |

Tablo 1: Deneyisel ve teorik sonuçlar



Şekil 6: Oyuk harmoniği genliğinin eksantrikliğe bağlı olarak değişimi

## 6. SONUÇ

Geliştirilen model ile stator hat akımı spektrumundaki harmonik bileşenler hem normal çalışma hem de eksantrik çalışma durumlarında elde edilmiştir. Modelden iyi sonuçlar elde edilmiş olup bu sonuçlar deneyisel sonuçlara yakın değerdedir. Aynı test motoru için teorik ve deneyisel sonuçlar alınmış ve her iki sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Bu çalışmada hem deneyisel hem de teorik sonuçlar motor hat akımındaki bazı harmoniklerin genliklerinin rotordaki eksantrikliğin bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir. Rotordaki eksantriklik arttıkça bu harmonik bileşenlerin genlikleri de artmaktadır. Dolayısıyla bu harmoniklerin genlikleri gözlenerek motordaki eksantrikliğin tespit edilebileceği hem teorik hem de deneyisel olarak ortaya konulmuştur.

## 7. KAYNAKLAR

- 1- Deng, X. and Ritchie, E., "Detection of broken rotor bars in induction motor rotors by investigating the flux linkages of the stator winding", International Conference on Electrical Machines, Adelaide, 1993, pp. 164-169.
- 2- Cameron, J.R., Thomson, W.T. and Dow, A.B., "Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction machines", IEE proceedings, 1986, Vol.133, Pt.B, No.3, pp. 155-163.
- 3- Barbour, A. and Thomson, W.T., "Finite element study of rotor slot designs with respect to current monitoring for detecting static airgap eccentricity in squirrel cage induction motors", IEEE Industrial Application Society Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, 1997, Vol.1, pp. 112-119.
- 4- Thomson, W.T., Barbour, A., Tassoni, C. and Filipetti, F., "An appraisal of the mmf permeance method and finite element models to study static airgap eccentricity and its diagnosis in induction Machines", International Conference on Induction Machines (ICEM'98), Istanbul, Turkey, 1998, pp. 2182-2187.
- 5- Ellison, A.J. and Yang, S.J., "Effects of rotor eccentricity on acoustic noise from induction machines", IEE proceedings, 1971, Vol.118, No.1, pp. 174-185.
- 6- Natarajan, R., "Modeling and measurement of airgap harmonics of single phase induction motors", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1987, Vol. IM-36, 824-829.
- 7- Salon, S., Burow, D., Slavik, C. and DeBortoli, M., "Effects of airgap ovality on induction machine behavior", International Conference on Electrical Machines (ICEM'96), Vigo, Spain, 1996, Vol.1, pp. 401-404.
- 8- Alger, P.L., "Induction machines: their behavior and uses", Gordon and Breach Science Publishers Inc., New York, 1970