

Asenkron makinelerde stator yalıtım arızasının koherens analizi ile belirlenmesi

Hasan Murat UÇAR*, Emine AYAZ, Serhat ŞEKER

İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Asenkron motorlar bütün endüstriyel süreçler içinde en sık kullanılan elemanlardır. Endüstriyel sistemlerin ekonomik ve daha güvenli çalışabilmeleri için arızaların erken tespit edilmesi ve izole edilmesi çok önemlidir. Bu nedenle, endüstrinin birçok alanında kritik sistemlerde öngörülü bakım amaçlı olarak durum izleme çalışmaları yapılmaktadır. Durum izleme sayesinde elde edilen verilerin kullanılması ile aniden ve plansız olarak meydana gelen kesintiler önlenmektedir. Bu çalışmada, asenkron motorlarda stator sargısı yalıtım arızası göz önünde tutulmuş, stator yalıtımında arıza özellikleri suni olarak yaşlandırma işlemi uygulanarak oluşturulmuş ve veriler spektral analiz yöntemi ile analiz edilmiştir. Stator yalıtım arızasının temel spektral özellikleri 5 BG gücünde bir asenkron motora hızlandırılmış yaşlandırma uygulanması ile elde edilmiştir. Hedefe ulaşmak üzere, tek başına akım ve titreşim işaretlerine ait verilerle yapılan spektral analizlerle sargı yalıtım arıza tanısına ait belirgin sonuçlar elde edilememiştir. Stator akımı ve titreşim işaretlerinin arasındaki koherens yaklaşımı ile ise çift harmonik değerlerinde kuvvetlenmeler olduğu belirlenmiş ve bunların stator yalıtım arızasının göstergesi olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Bir motora ait akım ve titreşim verileri ile elde edilen çıkarımlar, aynı deneye tabi tutulan iki eşdeğer motora ait verilerle yapılan analizlerle de doğrulanmıştır. Moment bilgisinin stator akımı ve dolayısıyla magneto-motor kuvvet (mmk) ile olan ilişkisine dayalı olarak titreşim işaretlerine yansımaları dolayısıyla, akım-titreşim ilişkisinin daha belirleyici olacağı kararına varılmıştır. Bu çalışma, bu uygulamada 4. ve 16. harmonikler arasındaki çift harmoniklerin yalıtım arızasının en önemli imzası olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Asenkron motorlar, yaşlandırma işlemi, koherens, çift harmonikler, stator yalıtım arızası.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Hasan Murat UÇAR ucarm@yaho.com; Tel: (212) 285 67 56.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Asenkron motorlarda işaret tabanlı stator yalıtım arıza tanısı" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 09.01.2008 tarihinde dergiye ulaşmış, 14.03.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.01.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Fault detection based on coherence analysis for stator insulation in induction motors

Extended abstract

Induction motors are the most frequently used components in almost every type of industrial processes. Early detection and isolation of faults that cause catastrophic system failure are crucial for more reliable and economic operation of industrial processes. For this reason, condition monitoring studies are performed for predictive maintenance purposes of the critical systems in most areas of the industry. Hence, sudden and unscheduled downtimes can be prevented by performing correct and timely maintenance activities using the information provided by condition monitoring studies.

Through the statistical studies on induction motor failure distribution, it is reported that 40 % of all induction motor failures are caused by stator related faults such as insulation faults (Bonnett and Soukup, 1992). In the last two decades, the wide use of the motor drives based on the power electronics devices, caused current harmonics to occur and resulted in stator and bearing related problems. Hence, the use of motor drives creates some undesirable effects with the eventual failure of motors.

In the related literature, there are several studies based on the stator degradation using the signal analysis methods for rotating machineries in recent years. Some of these investigators have reported the role of pulse-width modulated (PWM) devices on the stator winding insulation. They also indicate the effect of the even harmonics in the stator current of induction machines by using the spectral analysis approaches (Kueck, 2002; Filippetti, 2000).

In this research, stator-winding insulation damage in induction motors is considered and fault features developed during the artificial aging process of the stator insulation are extracted from the collected data by the spectral analysis methods. Even harmonic effects are determined as a common feature between the phase currents and vibration signals using the coherence analysis and this feature indicates the stator insulation fault. This research is aimed to extract certain spectral features of the stator insulation damage based on an experimental study in the laboratory environment. This was determined by a signal processing application using the collected data. In order to get a database for

induction motor failures from the experimental study, 5-HP, three phases, four poles induction motors are artificially aged by electrical methods. Several aging processes are performed. After each cycle of accelerated aging, the test motor was put on a motor performance test platform. From the experimental setup, high frequency data with a sampling frequency of 12 kHz were acquired and include 3-phase motor currents and voltages, rotor speed, torque, and six vibration measurements.

The spectral analysis on the current signals is not so much informative. As an alternative approach, to determine the insulation failure, the cross approach which is defined between the current and vibration signals, is used. This new approach is the calculation of coherence function between the motor current and vibration signals regarding to the initial and aged cases. Hence the following functional relationship is calculated and it shows the effective harmonics with the huge amplitudes to extract the failure information related to motor insulation. Through the coherence analysis between the current signal and torque measurements for the initial and aged cases, the existence of all the harmonic components like the even and odd harmonics of the fundamental frequency at 60 Hz was clearly observed. Thereupon, the coherence application was used to reveal the relationship between motor current and vibration and then, as a result of this application, some special frequency values represented by the even harmonics of the line frequency at 60 Hz are determined at 240, 360, 480, 600, 720, 840 and 960 Hz. These even harmonics can be interpreted as the characteristic property of the insulation aging. These harmonics are present as a result of the stator current imbalances based upon the stator insulation damage occurring after the aging processes. These current imbalances act on the stator magneto motor force (mmf) and cause motor vibrations. Hence high correlated amplitudes in coherence variations as appeared in the figure 7(a) can be interpreted as indicators of the stator insulation damage.

Results obtained by using time information of one of three motors have been analysed for remaining motors and similar results have also obtained for them. At the final part of the study, extracted failure features have been monitored by Artificial Neural Networks (ANN) method.

Keywords: *Induction motors, aging process, coherence, even harmonics, stator insulation faults.*

Giriş

Modern endüstrideki süreçlerin ekonomik ve güvenilir işletimi için arıza tespiti ve öngörülmesi bakım teknolojilerine yönelik çalışmalar giderek önem kazanmaktadır. Endüstriyel süreçlerde en çok kullanılan elemanlardan birisi ise elektrik motorlarıdır. Öngörülme bir arızanın gerek donanım, gerekse üretim açısından sebep olacağı kayıplar nedeniyle, süreç içerisindeki bu tip elektrik motorlarının öngörülmesi bakımı tüm endüstri alanları için gerekli bir hal almaktadır.

Kafesli asenkron motorlarda meydana gelen hatalar % 40 oranında stator sargısı yalıtım arızasından kaynaklanmaktadır (Bonnett ve Soukup, 1992; O’Kane M ve Sander M J 2000; Costello,1993; Filippetti vd., 2000; Şeker vd., 2000). Özellikle küçük güçlü motorlarda ısı aşırı yüklenme yalıtım bozulmasının en büyük sebebi olarak ortaya çıkmaktadır. Bundan dolayı yalıtım ömrünü uzatmak için stator sargı sıcaklığının izlenmesi ve motorun durma, sıkışma, aşırı yüklenme, dengesiz çalışma ve soğutma kabiliyetinin istemeyerek azaldığı haller gibi termal aşırı yüklenme koşulları altında motorun korunması çok önemlidir.

Motor sargılarının yalıtımında bir problem olduğunda, koruma türüne bağlı olarak motor çalışmaya devam edebilir. Kısadevre olmuş sargıların ısınması sonucu, faz arası veya faz toprak arızası meydana gelebilir. Böyle bir durumda sonuçları pahalıya mal olacak bir arızaya sebep olmadan arızanın tespit edilmesine yönelik bir çözüm önerilmesi bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Günümüze kadar stator sargı yalıtım arızasının belirlenmesine yönelik farklı veriler kullanılarak çeşitli yöntemler önerilmiştir. Özellikle 4 kV ve üzerindeki büyük güçlü generatörler ve motor stator sargıları için çevrim içi (on-line) kısmi boşalma (PD) test yöntemleri oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte düşük güçlü motorlar için, stator yalıtım arızasını ortaya çıkarma yöntemleri henüz standartlaşma aşamasındadır (Costello, 1993; Şeker vd., 2000; Kueck vd., 2002).

Literatürde işaret analizi tabanlı yöntemlerle stator yalıtım bozulmasının tespit edilmesine

yönelik birkaç çalışma bulunmaktadır (Smiley, 1992; Siddique vd., 2005; Stone ve Kapler, 1998; Pereira vd., 2005). Ancak bu çalışmalarının büyük çoğunluğu darbe-genişlik-modülasyona dayanan sürücü sistemlerin etkileri ile ilgilidir. Başka iki çalışmada ise, stator sargısı yalıtım arızası olduğu durumda senkron makinenin uyarma alanının incelenmesi sonucunda çift harmoniklerin kuvvetlendiği belirtilmiştir (Nandi, 2006; Netti ve Nandi, 2006).

Yalıtım bozulması ve deney düzeneği

Stator sargısı yalıtım arızasına ait veri elde etmek üzere 5 BG gücünde, 4 kutuplu 3 adet asenkron motor, elektriksel ve ısıl yöntemlerle yaşlandırılma sürecine tabi tutulmuştur. Her bir süreç sonunda titreşim, akım, gerilim, hız, moment ve sıcaklık vb. bilgiler farklı yüklenme koşulları için elde edilmiş ve veri toplama sistemine kaydedilmiştir. Şekil 1’de stator sargısı yalıtım yaşlandırma işlemlerine ait deney düzeneğinin fotoğrafı gösterilmektedir (Erbay ve Upadhyaya 1999).



Şekil 1. Yaşlandırma işlemine ait deney düzeneğinin fotoğrafı

Elektrik motorlarında stator sargı yalıtımının yaşlandırılması işleminin iki önemli yönü bulunmaktadır: Bu yönler sırasıyla ısı ve elektriksel yaşlandırmadır. Tablo 1’de sargı yalıtımının ömrüne etki eden faktörler ve etki dereceleri sunulmaktadır.

Tablo 1. Sargı yalıtım ömrüne etki eden faktörler ve etki dereceleri

Etken	Etki derecesi (%)
Sargı Sıcaklığı	25
Yol alma Sayısı	12.5
Temizlik	12.5
Nem	6.25
Çalışma Süresi	12.5
Yalıtım Direnci	6.25
Polarizasyon İndeksi	12.5
Titreşim Seviyesi	12.5

Deneyde kullanılmış olan F sınıfı yalıtıma sahip motorlar için öngörülen ömür süreleri Tablo 2’de verilmektedir.

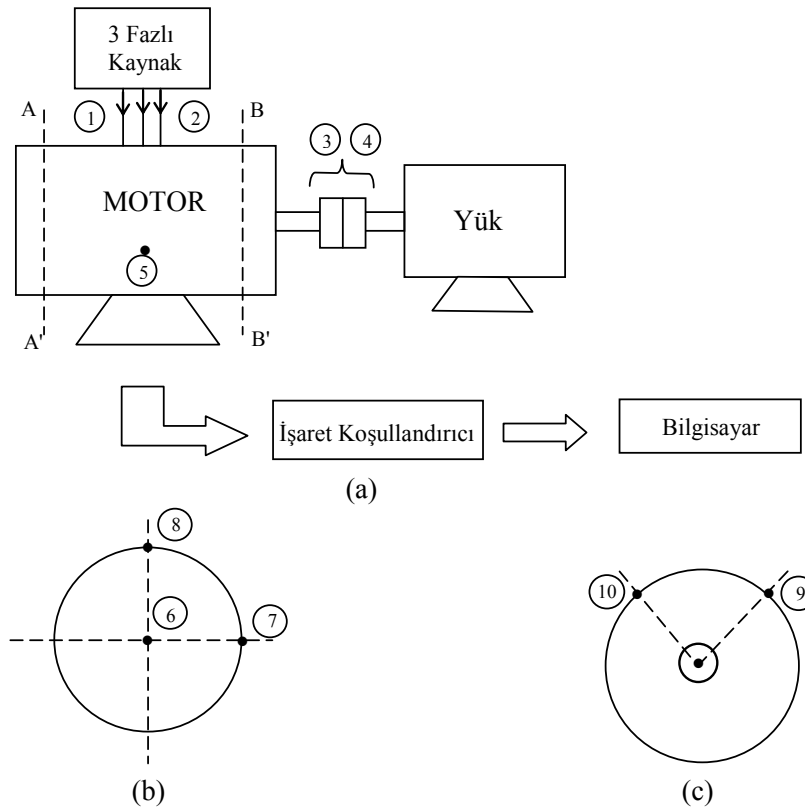
Elektrik motorları yol alma anında bir kaç saniye boyunca anma akımlarının 5-10 katı arasında akım çekerler. Yaşlandırma işleminde akımın karesiyle orantılı olarak sargı sıcaklığı da artmaktadır. Yalıtımın yaşlandırma sürecini hızlandırmak için, motor ayarlanabilir bir röle üzerinden otomatik olarak, her bir yaşlandırma pe-

riyodunda, ayarlanabilir bekleme süreleri sonunda devreye sokulup çıkarılmaktadır. Röle üzerinden ayarlanabilen gecikme süresinin dolması ile röle kontakları kapanır ve bu işlem rölenin enerjisi kesilene kadar devam eder.

Tablo 2. Stator sargı sıcaklığı ile motor ömrü arasındaki ilişki

Sıcaklık (°C)	Motor Ömrü (saat)
155	20000
165	10000
175	5000
185	2500
195	1250
205	625

Her bir yaşlandırma sürecinin sonunda motor performans test platformuna konulan motorlardan, 12 kHz’lik örnekleme frekansı ile motor stator akımı, gerilimi, hızı, moment ve titreşim bilgileri toplanmaktadır.



Şekil 2. Motor yükleme ve veri toplama düzeneği a) Deneysel bağlantı şeması; b) A-A' kesiti; c) B-B' kesiti

Şekil 2’de motordan elektriksel ve titreşim verisini elde etmek ve bilgisayara kaydetmek üzere oluşturulmuş düzeneğin prensip şeması verilmektedir. Titreşim bilgilerini almak üzere 6 adet titreşim-ölçer motorun farklı yerlerine yerleştirilmiştir. Resimde belirtilen 1 ve 2 numaralı sensörler elektriksel işaretlerin alındığı gerilim ve akım algılayıcılarıdır. 3 ve 4 numaralı algılayıcılar sırasıyla hız ve moment ölçümlerine ilişkin olup, geri kalan 5-6-7-8-9-10 numaralı algılayıcılar ivmeölçerleri göstermektedir. Buna göre 5 numaralı ivmeölçer motor gövdesinde yer alıp, 6-7-8 numaralı sensörler yukarıda belirtildiği gibi birbirine dik iki algılayıcı ve eksenel yöndeki bir algılayıcıdan oluşmaktadır. Bunlar motorun yüke bağlı olmayan tarafında yer almaktadır. 9 ve 10 numaralı ivmeölçerler ise konstrüksiyon açısından birbirine dik konumda yerleştirilememesinden ötürü saatin 02:00 ve 10:00 gibi bir konumuna yerleştirilmişlerdir.

Spektral analiz

İşaretlerin spektral özelliklerini çıkartmak bakımından en bilinen yöntemlerden biri güç spektrumu yoğunluğudur. Ayrıca farklı işaretler arasındaki ilişkiyi yine frekans tanım bölgesinde ifade eden diğer bir spektral analiz tekniği ise Koherens analizidir. Bunlara ilişkin tanımlar aşağıda verilmiştir.

Bir raslantı işaretine ait frekans bilgisini elde etmek amacıyla N noktada ayrık Fourier dönüşümü hesaplanarak o işaretin frekans domenine dönüşümü yapılır. N örnekli bir veri bloğu için frekans çözünürlüğü Δf ve örnekleme zamanı Δt olmak üzere, $m\Delta f$ frekansındaki dönüşüm

$$X(m\Delta f) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta t) \exp[-j2\pi km / N] \quad (1)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Burada m herhangi bir tam sayıdır. Ayrıca, $x(t)$ işaretinin öz güç spektral yoğunluğu (ÖGSY) da

$$S_{xx}(f) = \frac{1}{N} |X(m\Delta f)|^2, f = m\Delta f \quad (2)$$

bağıntısıyla hesaplanır (Maseghi, 1996). Bu anlamda $x(t)$ ve $y(t)$ gibi herhangi iki işaret arasındaki çapraz güç spektral yoğunluğu (ÇGSY) da benzer şekilde hesaplanır. Bunun için önce $y(t)$ işaretinin N noktada ayrık Fourier dönüşümü hesaplanır ve daha sonra S_{xy} şeklinde ÇGSY fonksiyonu hesaplanır.

$$Y(m\Delta f) = \sum_{k=0}^{N-1} y(k\Delta t) \exp[-j2\pi km / N] \quad (3)$$

$$S_{xy}(f) = \frac{1}{N^2} X(m\Delta f) Y^*(m\Delta f) \quad (4)$$

Bir ölçme sisteminden alınan iki ya da daha fazla işaret arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek için koherens fonksiyonu kullanılır. Zaman domeninde iki işaret arasındaki normalize edilmiş çapraz korelasyonun karşılığı frekans domeninde koherenstir. Koherens fonksiyonu $x(t)$ ve $y(t)$ gibi herhangi iki işaret arasındaki benzerliği frekans domeninde veren bir “ilinti fonksiyonu” şeklinde, denklem (2) ve (4) de verilen ÖGSY ve ÇGSY büyüklükleri ile aşağıdaki gibi tanımlanır (Maseghi, 1996).

$$\gamma_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|}{\sqrt{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}}, \quad 0 < \gamma_{xy} < 1 \quad (5)$$

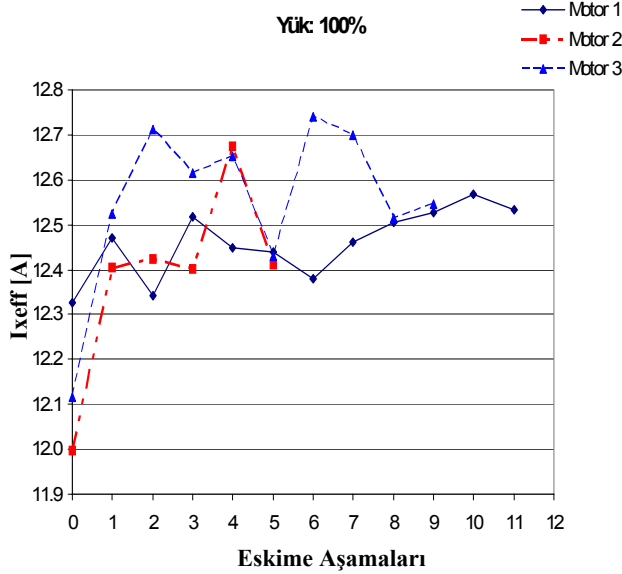
DeneySEL çalışmanın sonuçları

Üç adet motor % 100 yüklenme durumunda test edilmiş ve performans testlerine ilişkin veriler elde edilmiştir. Her motorun bir fazına ait akım ölçümleri elde edilmiş, akım işaretlerinin etkin değerlerinin eskitme aşamalarına göre değişimleri Şekil 3’de sunulmaktadır.

Şekil 3’ten görüleceği üzere, üç adet motor içerisinde, motor 1, I_x faz akımına göre yaşlanma trendi, yalıtımın bozulması ile direncin azalacağı dolayısıyla akımın artacağı düşüncesinden hareketle en güvenilir değişim olarak seçilmiştir.

I_x faz akımı işaretleri ve frekans dağılımları arasında yapılan karşılaştırma sonucunda, iki durum arasında bir fark görülmemiştir. Karşılaş-

tırmayı daha dar bir frekans aralığında yapmak üzere, 40–80 Hz aralığında 60 Hz şebeke frekansı civarında yapılmış ve Şekil 4'teki grafik elde edilmiştir. Bu durumda sistemin enerjisinde bozulmayla birlikte bir artış gözlenir. Ancak bu enerji artışı özellik çıkartımı bakımından yeterince bilgi içermemektedir.

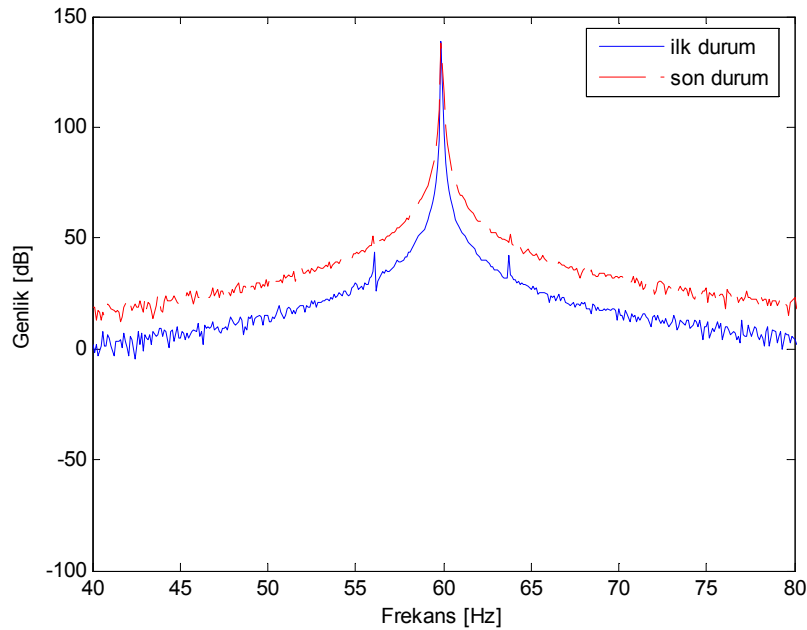


Şekil 3. % 100 yüklenme durumu için üç motora ilişkin I_x akımlarının etkin değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri

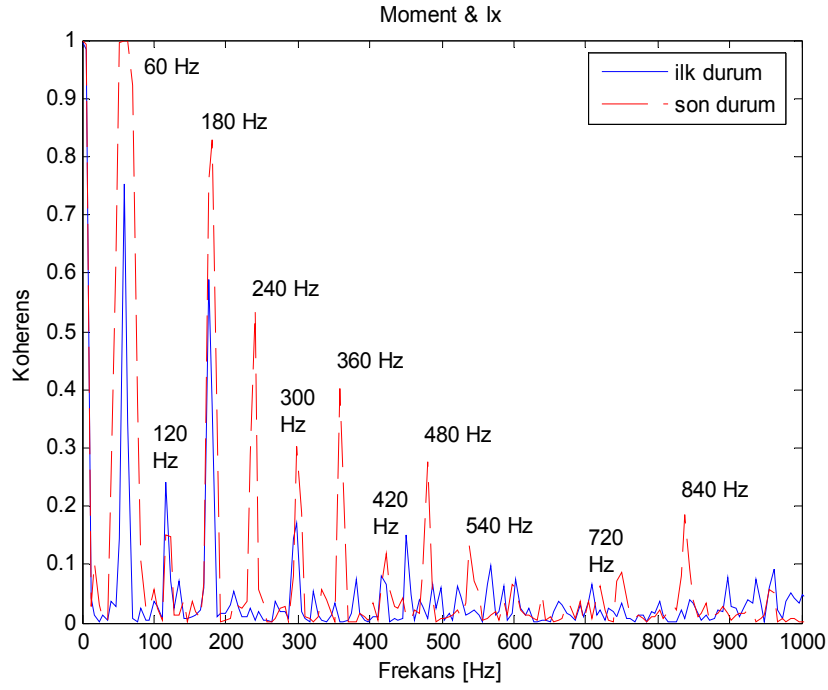
Akım işaretinden yeterli bilgi alınamayacağını belirlenmesinden sonra, ilk ve eskimiş durumlar için I_x akımı ile moment verilerine koherens tekniği uygulanmıştır. Bu uygulama sonucunda Şekil 5'te görüldüğü üzere, ilk ve eskimiş durumlara ilişkin karakteristik frekans değerleri elde edilmiştir. Burada 120, 240, 360, 480, 720, 840 Hz'de çift harmonikler ve 180, 300, 420, 540 Hz'de ise enerji kaynağından kaynaklanan tek harmonikler gözlenmiştir.

Akım işaretinin moment verisi ile olan koherensinde, temel frekans 60 Hz'in tek ve çift harmoniklerinin (120, 180, 240, 300, 480 Hz) varlığı gözlemlenmiştir. Moment bilgisinin stator akımı ve dolayısıyla magneto-motor kuvvet (mmk) ile olan ilişkisine dayalı olarak titreşim işaretlerine yansması dolayısıyla, akım-titreşim ilişkisinin daha belirleyici olacağı kararlaştırılmıştır. Bu bağlamda, örneğin stator yalıtımındaki bozulmaların akım dengesizliklerine ve sonuçta da magneto-motor kuvvetteki değişimler yoluyla titreşimlere yansıtacağı bilgisi çıkarılmıştır.

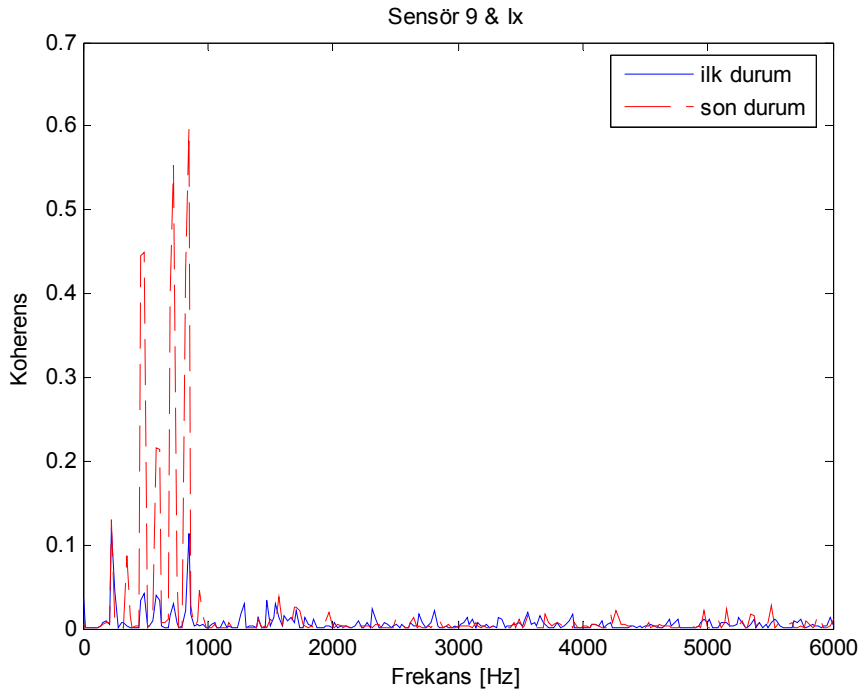
Bu irdeleme sonucunda Şekil 6 ve bunun daha dar bir frekans aralığındaki değişimi olan Şekil 7'den de görüleceği gibi, temel frekans olan 60 Hz'in



Şekil 4. Motor 1'in % 100 yüklenme durumunda ilk ve eskimiş durumlarına ilişkin I_x akımı genliğinin 60 Hz civarındaki frekans aralığında değişimi



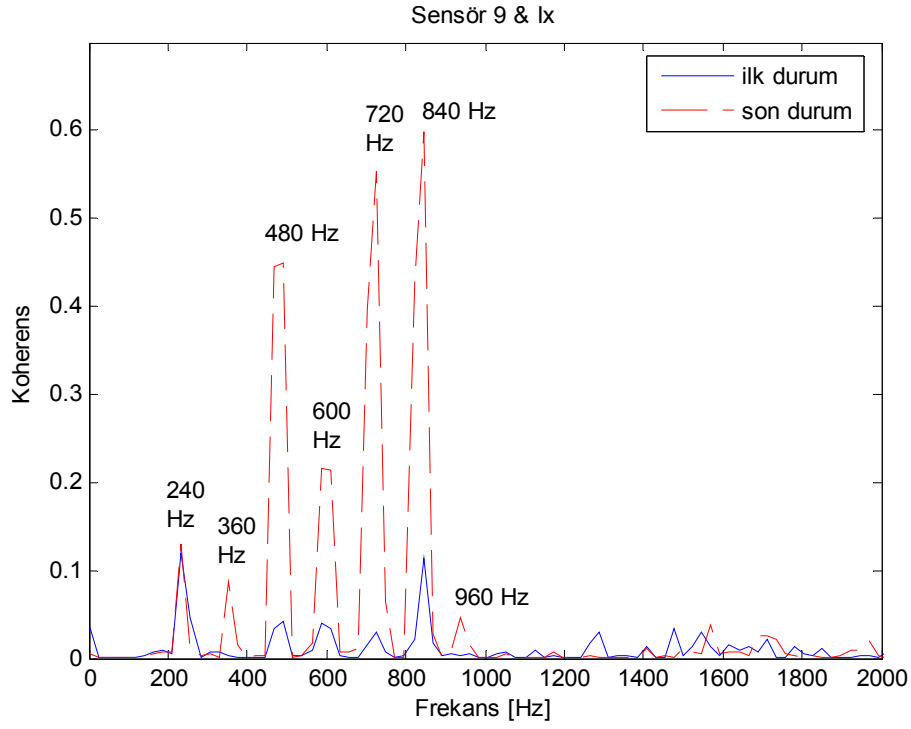
Şekil 5. İlk ve eskimiş (son durum) durumlar arasındaki akım-moment değişiminin koherensi



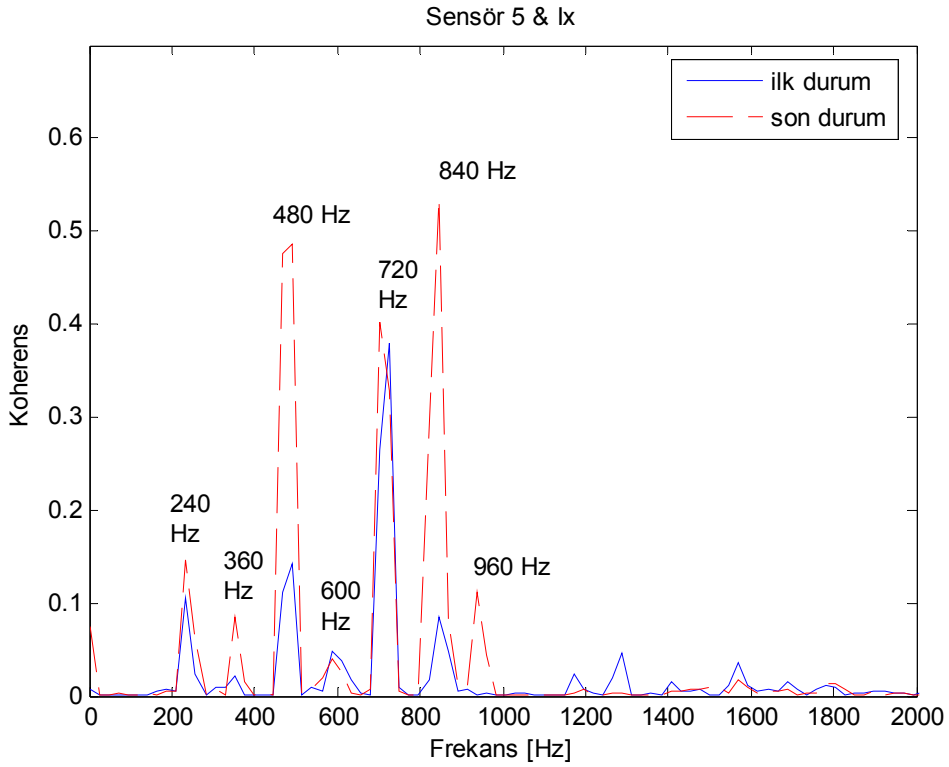
Şekil 6. Sağlam (ilk durum) ve eskimiş (son durum) yalıtım durumları için akım ve titreşim işaretleri arasındaki koherens

çift harmonikleri olan bazı karakteristik frekans değerleri, 240, 360, 480, 600, 720, 840 ve 960 Hz olarak ortaya çıkmıştır. Bu frekanslardaki bu genlik değişimi stator yaşlanma deneyinin fiziksel bir göstergesi olarak faz akımı I_x ile motorun

yük tarafındaki 9 numaralı sensör, gövde üzerindeki sensör ve mil tarafında eksenel yöndeki sensörden alınan titreşim işaretleri arasındaki koherens fonksiyonları 0–2000 Hz için Şekil 7’de verilmiştir.

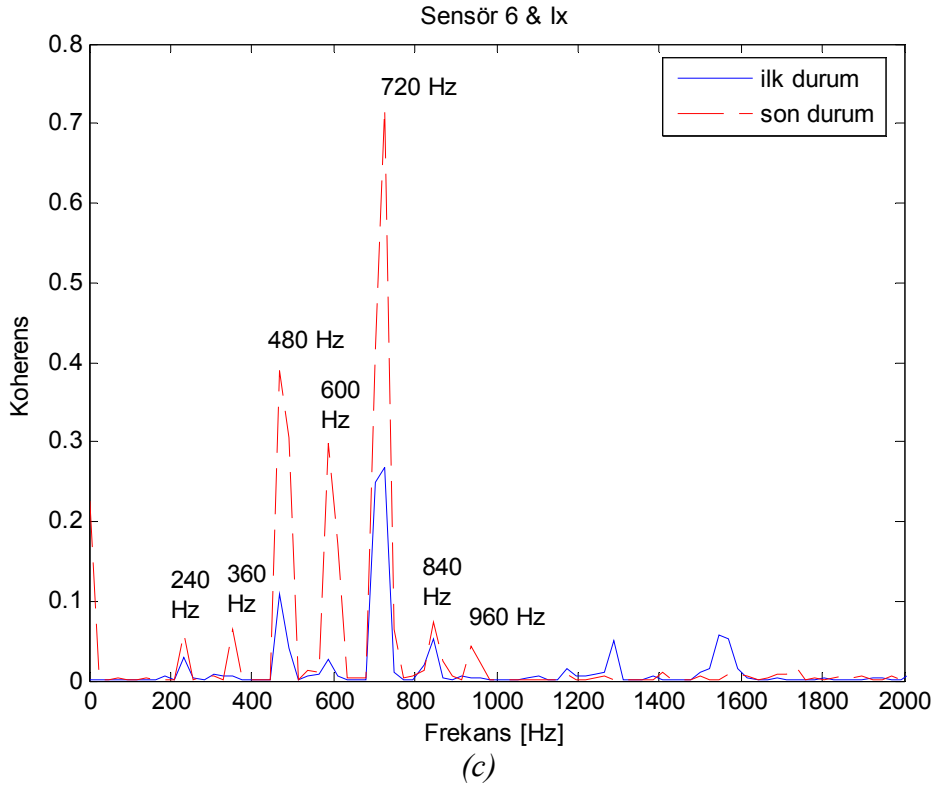


(a)



(b)

Şekil 7. Sağlıklı ve yaşlandırılmış yalıtım durumları için 0-2000 Hz aralığında gelişen Ix akımı ve titreşim işaretleri arasındaki koherens. a) sensör 9, b) sensör 5, c) sensör 6



Şekil 7.(Devam) Sağlıklı ve yaşlandırılmış yalıtım durumları için 0-2000 Hz aralığında gelişen I_x akımı ve titreşim işaretleri arasındaki koherens. a) sensor 9, b) sensor 5, c) sensor 6

Şekil 7'den görüldüğü şekilde, ilk ve eskimiş durumların karşılaştırılması sonucunda 0-1000 Hz aralığında 4., 6., 8., 10., 12., 14., 16. harmonikler olmak üzere çift harmonikler gözlenmektedir. Stator yalıtımı bozulma etkisi 240, 360, 480, 600, 720, 840 ve 960 Hz frekanslarındaki değişimle karakterize edilebilir. Şekil 7 (a)'dan görüleceği üzere bu karşılaştırmada en iyi sonuç I_x akımı ile Sensör 9 arasındaki koherens değişiminden elde edilmiştir.

Şekil 8'de ise I_y ve I_z akımları ile sensör 9 arasındaki koherens analizi sonuçları görülmektedir. Burada da 4. harmonik dışındaki diğer çift harmoniklerde benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuç olarak koherens analizi yolu ile temel frekansın 4. ve 16. harmonikleri arasındaki çift harmonikler stator yalıtım bozulmasının göstergesi olarak ortaya çıkmıştır.

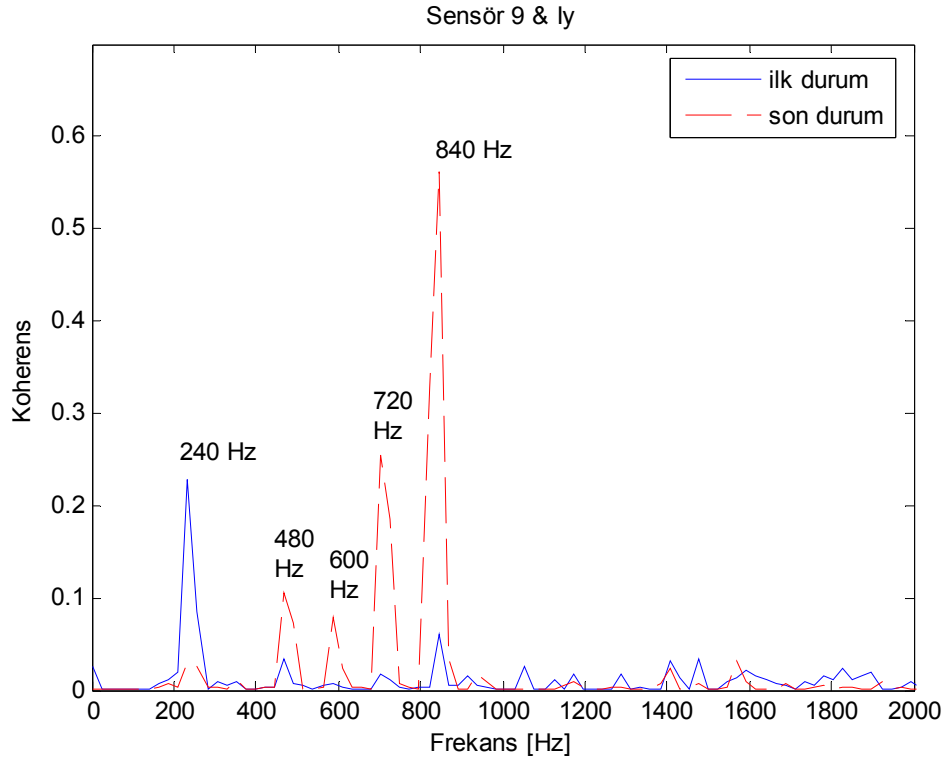
Sonuçlar ve yorumlar

Bu çalışmada elde edilen bulgular aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

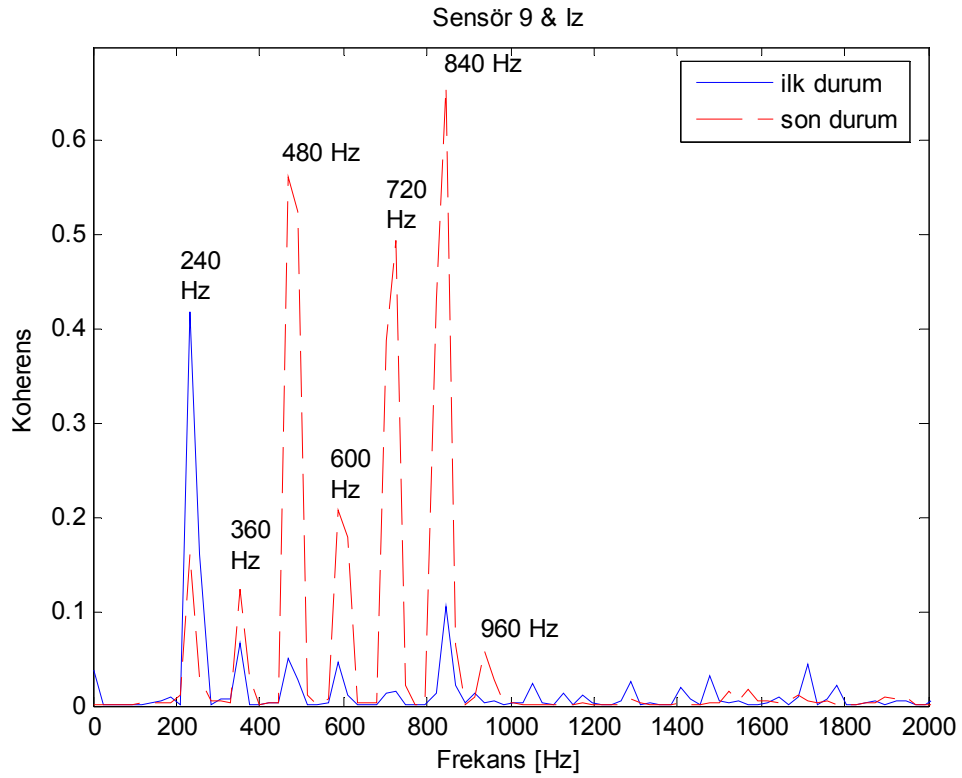
Akım işaretlerine ait verilerle yapılan spektral analiz kısmi bilgi vermektedir.

Bu konuda belirgin sonuçlar elde edilememiştir. Akım işaretinin moment verisi ile olan koherensinde, temel frekans 60 Hz'in tek ve çift harmoniklerinin (120, 180, 240, 300, 480 Hz) varlığı gözlemlenmiştir.

Moment bilgisinin stator akımı ve dolayısıyla magneto-motor kuvvet (mmk) ile olan ilişkisine dayalı olarak titreşim işaretlerine yansması dolayısıyla, akım-titreşim ilişkisinin daha belirleyici olacağı kararına varılmıştır. Bu bağlamda, örneğin stator yalıtımındaki bozulmaların akım dengesizliklerine ve sonuçta da magneto-motor kuvvetteki değişimler yoluyla titreşimlere yansacağı bilgisi çıkartılmıştır. Bunun sonucunda da akım-titreşim işaretleri arasındaki koherens sonuçları irdelenmiş ve bunun sonucunda temel frekans olan 60 Hz'in çift harmonikleri olan bazı karakteristik frekans değerleri, 240, 360, 480, 600, 720, 840 ve 960 Hz olarak ortaya çıkmıştır. Yapılan analizlerin sonucunda özellikle 6., 8., 10.,



(a)



(b)

Şekil 8. Sağlıklı ve yaşlandırılmış yalıtım durumları için 0-2000 Hz aralığında gelişen akım ve titreşim işaretleri arasındaki koherens a) I_y ve sensör 9, b) I_z ve sensör 9

12., 14. ve 16. harmoniklerde oldukça büyük kuvvetlenmeler gözlemlenmiştir bu harmonikler yalıtım bozulmasının karakteristik özelliği olarak yorumlanmıştır.

Sonuç olarak, stator sargı yalıtımındaki arızaların makinenin empedansında simetrisizliğe neden olduğu ve bunun sonucunda dengesiz akımlar çekildiği görülmektedir. Bu dengesiz akımlar dengesiz momentlerin oluşmasına da sebep olmaktadır. Bunun sonucunda tek başına akım işaretinin analizi ile yeterli bilgi elde edilemezken, akım ve titreşim verilerinin koherenslerinin ilk ve eskimiş durumlar için incelenmesi sonucu karakteristik değerler elde edilmiştir.

Kaynaklar

- Bonnett, A., ve Soukup G., (1992). Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **28**, 4, 921-37.
- Costello, M. J., (1993). Shaft voltages and rotating machinery, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **29**, 2, 419-25.
- Erbay, A. S., ve Upadhyaya, B. R., (1999). *Multi-Sensor Fusion for Induction Motor Aging Analysis and Fault Diagnosis*, The University of Tennessee: UTNE/BRU/99-01.
- Filippetti, F., Franceschini, G., Tassoni C ve Vas, P., (2000). Recent developments of induction motor drives fault diagnosis using ai techniques, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **47**, 5, 994-1004.
- Kueck, J. D., Haynes, H. D., ve Staunton, R. H., (2002). Stator insulation degradation test uses ASD switching frequency *IEEE Power Engineering Review*, January, 1-11.
- Maseghi, V. S., (1996). *Advanced Signal Processing and Digital Noise Reduction*, John Wiley, New York.
- Nandi, S., (2006). Detection of stator faults in induction machines using residual saturation harmonics, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **42**, 5, 1201-8.
- Neti, P., ve Nandi, S., (2006). Stator Inter-turn Fault Detection of Synchronous Machines Using Field Current Signature Analysis, *Conference record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, 2360-7, Tampa, FL.
- O’Kane, M., ve Sander, M. J., (2000). Intelligent motors move to the forefront of predictive maintenance, *IEEE Industry Applications Magazine*, September/October, 47-51.
- Pereira, L. A., Gazzana, D. S, Caspary, O., ve Pereira, L. F. A., (2005). Motor current signature analysis and fuzzy logic applied to the diagnosis of short-circuit faults in induction motors, *Industrial Electronics Society, IECON 2005, 31st Annual Conference of IEEE*. 275-280, North Carolina, USA.
- Smiley, R. G., (1992). Using line current to diagnose faults in induction motors, *Iron and Steel Engineer* September, 23-5.
- Siddique, A., Yadava, G. S., ve Singh, B., (2005). A review of stator fault monitoring techniques of induction motors, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **20**, 1, 106-14, USA.
- Stone, G., ve Kapler, J., (1998). Stator winding monitoring, *IEEE Industry Applications Magazine*, **4**, 5 15–20.
- Şeker, S., Ayaz, E., Upadhyaya, B. R., ve Erbay, A. S., (2000). Analysis of motor current and vibration signals for detecting bearing damage in electric motors, *MARCON 2000 Maintenance and Reliability Conference*, Knoxville, May 8-10, USA.