

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ASENKRON MOTORLARDA İŞARET TABANLI STATOR YALITIM
ARIZA TANISI**

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Hasan Murat UÇAR

Anabilim Dalı: ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı: ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2008

**ASENKRON MOTORLARDA İŞARET TABANLI STATOR
YALITIM ARIZA TANISI**

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Hasan Murat UÇAR
504962010

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 17 Eylül 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Ocak 2008

Tez Danışmanı :	Prof.Dr. Serhat ŞEKER
İkinci Tez Danışmanı:	Yrd.Doç.Dr. Emine AYAZ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri	Prof.Dr. Celal KOCATEPE (YTÜ)
	Prof.Dr. Osman Nuri UÇAN (İÜ)
	Doç.Dr. Özcan KALENDERLİ (İTÜ)
	Yrd.Doç.Dr. Özgür ÜSTÜN (İTÜ)
	Yrd.Doç.Dr. Metin AYDIN (KÜ)

OCAK 2008

ÖNSÖZ

Bu doktora tez çalışması sırasında her türlü bilgi ve desteği veren, özverili çalışmalarıyla tezin tamamlanmasını sağlayan değerli hocalarım sayın Prof. Dr. Serhat Şeker ve sayın Yrd. Doç. Dr. Emine Ayaz'a, İTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü'ndeki bana emeği geçen tüm hocalarıma, araştırma görevlisi arkadaşlarıma ve doktora çalışmam boyunca manevi destek gösteren aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2008

Hasan Murat UÇAR

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. DURUM İZLEME YÖNTEMLERİ	5
2.1. Manyetik Akı	5
2.2. Titreşim	6
2.3. Gürültü/Akustik Gürültü	6
2.4. Ani Açısal Hız	6
2.5. Sıcaklık	6
2.6. Hava Aralığı Momenti	7
2.7. Endüklenen Gerilim	7
2.8. Güç	7
2.9. Kısmi Boşalma	8
2.10. Gaz Analizi	8
2.11. Darbe Deneyi	8
2.12. Motor Devresinin Analizi	9
2.13. Akım Analizi	9
3. MATEMATİKSEL YÖNTEMLER	11
3.1. Spektral Analiz	11
3.2. Koherens Analizi	12
3.3. Dalgacık Dönüşümü	13
3.4. Levenberg-Marquardt Algoritması Tabanlı Yapay Sinir Ağları	14
3.5. Matematiksel Yöntemlerin Genel Değerlendirmesi	18
4. ASENKRON MOTORLARDA STATOR YALITIMI BOZULMA DENEYLERİ	19
4.1. Yaşlandırma Düzeneği ve Veri Toplama Sistemi	19
4.2. Deneyin Yapılışı	20
4.3. Yaşlandırma Süreçlerinin Oluşturulması	21
5. DENEYSEL VERİLERİN SEÇİLMESİ VE ÖN ANALİZİ	25
6. SPEKTRAL VE DALGACIK ANALİZİ İLE MOTOR STATOR YALITIMI BOZULMA ÖZELLİKLERİNİN ÇIKARTILMASI	33
6.1. Akım İşaretlerinin Analizi	33
6.2. Akım-Moment ve Akım-Titreşim İşaretlerinin Analizi	35

6.3. Stator Yalıtım Bozulmasına İlişkin Olarak Yaşlanma Süreçleri ile Çift Harmonik Değerlerinin Değişimi	41
6.4. Yalıtım Bozulmasının Dalgacık Analizi Yaklaşımı ile Doğrulanması	47
7. YAPAY SİNİR AĞLARI İLE DURUM İZLEME	50
7.1. YSA Modelinin Oluşturulması	50
7.2 .YSA Modelinin Farklı Motorlardaki Başarımı	54
8. SONUÇLAR VE YORUMLAR	57
KAYNAKLAR	61
EKLER	67
ÖZGEÇMİŞ	73

KISALTMALAR

ÇGSY : Çapraz Güç Spektral Yoğunluğu
dB : Desibel
GSY : Güç Spektrumu Yoğunluğu
HP : Beygir Gücü (Horse Power)
Hz : Hertz
ÖGSY : Öz Güç Spektral Yoğunluğu
PE : Süreç Sonu
RMS : Etkin Değer (Root Mean Square)
RPM : Dakikadaki devir sayısı (Revolution Per Minute)
SE : Motor Arkası
YSA : Yapay Sinir Ağı
GSY : Güç Spektrum Yoğunluğu
APDD : Ayrık Parametrelili Dalgacık Dönüşümü
SDD : Sürekli Dalgacık Dönüşümü
MCSA : Motor Akımı İz Analizi
TSM : Isıl adım yöntemi (Thermal Step Method)
TSDC : Isıl olarak uyarılmış boşalma akımı (Thermally Stimulated Discharge Current)

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1: Stator sargı yalıtım ömrüne etki eden faktörlere etki dereceleri	21
Tablo 4.2: Stator sargı sıcaklığı ile motor ömrü arasındaki ilişki	21

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1	: $c_0(n)$ 'nin 2 ölçeğe ayrıştırılması tanımı	14
Şekil 4.1	: Motor deney düzeneği ve algılayıcı yerleri	20
Şekil 4.2	: Motor sargı yaşlandırma düzeneğine ait fotoğraf	23
Şekil 4.3	: Motor yükleme ve veri toplama düzeneği	24
Şekil 5.1	: % 100 yüklenme durumu için I_x akımının etkin değerinin eskitme aşamalarındaki değişimi	25
Şekil 5.2	: % 100 yüklenme durumu için I_y etkin akımının eskitme aşamalarındaki değişimi	26
Şekil 5.3	: % 100 yüklenme durumu için I_z akımının etkin değerinin eskitme aşamalarındaki değişimi	26
Şekil 5.4	: Boşta çalışma durumu için Sensör 9 titreşim değerinin eskitme aşamalarındaki değişimi	27
Şekil 5.5	: % 50 yüklenme durumu için Sensör 9 titreşim değerinin eskitme aşamalarındaki değişimi	28
Şekil 5.6	: % 100 yüklenme durumu için Sensör 9 titreşim değerinin eskitme aşamalarındaki değişimi	28
Şekil 5.7	: % Boşta çalışma durumu için Sensör 5 titreşim değerinin eskitme aşamalarındaki değişimi	29
Şekil 5.8	: % 50 yüklenme durumu için Sensör 5 titreşim değerinin eskitme aşamalarındaki değişimi	29
Şekil 5.9	: % 100 yüklenme durumu için Sensör 5 titreşim değerinin eskitme aşamalarındaki değişimi	30
Şekil 5.10	: Boşta çalışma durumu için Sensör 6 titreşim değerinin eskitme aşamalarındaki değişimi	31
Şekil 5.11	: % 50 yüklenme durumu için Sensör 6 titreşim değerinin eskitme aşamalarındaki değişimi	31
Şekil 5.12	: % 100 yüklenme durumu için Sensör 6 titreşim değerinin eskitme aşamalarındaki değişimi	32
Şekil 6.1	: Motor 1'in % 100 yüklenme durumunda ilk ve eskimiş durumlarına ilişkin I_x akımı dalga şekilleri ve bunların frekans dağılımları	33
Şekil 6.2	: Motor 1'in % 100 yüklenme durumunda ilk ve eskimiş durumlarına ilişkin I_x akımı genliğinin 60 Hz civarındaki frekans aralığında değişimi	34
Şekil 6.3	: İlk ve eskimiş (son durum) durumlar arasındaki akım-moment değişiminin koherensi	35
Şekil 6.4	: İlk ve eskimiş yalıtım durumları için 0-2000 Hz aralığında akım ve titreşim işaretleri arasındaki koherens a) I_x ve Sensör 9; b) I_y ve Sensör 9; c) I_z ve Sensör 9	33
Şekil 6.5	: Motor 1'e ilişkin % 100 yüklenme durumu için ilk ve eskimiş durumlar arasındaki akım-titreşim işaretlerinin koherensi. a) I_x ve Sensör 5; b) I_x ve Sensör 6	34
Şekil 6.6	: İlk ve eskimiş yalıtım durumları için 0-2000 Hz aralığında akım ve titreşim işaretleri arasındaki koherens. a) Motor 2; b) Motor 3	34

Şekil 6.7	: Motor 1'in % 50 yüklenme durumu için ilk ve eskimiş durumlar arasındaki I_x akımı ile Sensör 9'dan alınan titreşim işaretleri arasındaki koherens	35
Şekil 6.8	: Motor 1'in % 115 yüklenme durumu için ilk ve eskimiş durumlar arasındaki I_x akımı ile Sensör 9'dan alınan titreşim işaretleri arasındaki koherens	35
Şekil 6.9	: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 120 Hz'lik bileşenin 60 Hz'e göre bağıl değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri	36
Şekil 6.10	: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 240 Hz'lik bileşenin 60 Hz'e göre bağıl değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri	36
Şekil 6.11	: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 360 Hz'lik bileşenin 60 Hz'e göre bağıl değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri	37
Şekil 6.12	: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 480 Hz'lik bileşenin 60 Hz'e göre bağıl değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri	37
Şekil 6.13	: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 600 Hz'lik bileşenin 60 Hz'e göre bağıl değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri	38
Şekil 6.14	: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 720 Hz'lik bileşenin 60 Hz'e göre bağıl değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri	38
Şekil 6.15	: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 840 Hz'lik bileşenin 60 Hz'e göre bağıl değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri	40
Şekil 6.16	: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 960 Hz'lik bileşenin 60 Hz'e göre bağıl değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri	41
Şekil 6.17	: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 300 Hz lik bileşenin 60 Hz'e göre bağıl değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri	40
Şekil 6.18	: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 420 Hz lik bileşenin 60 Hz'e göre bağıl değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri	41
Şekil 6.19	: SDD uygulaması sonucu elde edilen 5. ölçekteki işaretin GSY (kırmızı) ve akım GSY (mavi) frekansla değişiminin karşılaştırılması	40
Şekil 6.20	: SDD-uygulamasının 200–1000 Hz arasındaki değişimi	41
Şekil 7.1	: İleri beslemeli kendinden birleşmeli YSA topolojisi	42
Şekil 7.2	: YSA'nın eğitim ve sorgulama süreçleri akış diyagramı	43
Şekil 7.3	: YSA'nın eğitim sürecindeki toplam karesel hatanın iterasyon sayısı ile değişimi	44
Şekil 7.4	: Motor sargı yalıtımının sağlam durumuna ilişkin YSA'nın eğitim sonucu	45
Şekil 7.5	: Motor 1'in son eskime aşamasına ilişkin YSA'nın sinama sonucu	45
Şekil 7.6	: Motor 2'nin son eskime aşamasına ait YSA'nın sinama sonucu	45
Şekil 7.7	: Motor 3'ün son eskime aşamasına ait YSA'nın sinama sonucu	45
Şekil 8.1	: Sağlam (ilk durum) ve eskimiş (son durum) yalıtım durumları için akım ve titreşim işaretleri arasındaki koherens	48

SEMBOL LİSTESİ

$\psi(t)$	: Ana dalgacık fonksiyonu
$\phi(t)$	: Ölçekleme fonksiyonu
$\psi_{a,b}(t)$	: Dalgacık ailesi
a	: Ölçek veya yayılma değişkeni
b	: Öteleme değişkeni
$c_{m,n}$	: Ölçekleme katsayıları
$d_{m,n}$	: Dalgacık katsayıları
f	: Şebeke frekansı
N	: Dizi uzunluğu
p	: Çift kutup sayısı
$W(a,b)$	: Sürekli dalgacık dönüşümü

ASENKRON MOTORLARDA İŞARET TABANLI STATOR YALITIM ARIZA TANISI

ÖZET

Asenkron motorlar bütün endüstriyel süreçler içinde en sık kullanılan elemanlardır. 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 önlenebilmektedir.

Bu çalışmada, asenkron motorun stator sargı yalıtımının arızası tanısına ilişkin karakteristik özellikler, motora ait akım ve titreşim bilgilerine çeşitli analiz teknikleri uygulanarak çıkarılmaya çalışılmıştır. 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 HP gücünde bir asenkron motora hızlandırılmış yaşlandırma uygulanması ile elde edilmiştir. Deneysel çalışma aynı özellikteki üç motor için yapılmış olup, motor çalışırken ölçülen büyüklüklerin çevrimiçi analizi ile stator sargı yalıtımı arıza tanısı yapılmasını mümkün kılan karakteristikler ortaya çıkarılmıştır. Yapılan ön analizler sonucunda bir motor için seçilmiş veriler üzerinde spektral ve dalgacık analizi yöntemleri ile özellik çıkarımına ilişkin analizler yapıp, yalıtım bozulmasını karakterize eden frekans bileşenleri belirlenmiştir. Faz akımı ve titreşim işaretlerinin arasındaki koherens yaklaşımı ile elde edilen çift harmonik değerleri stator yalıtımı arızasının göstergesi olarak belirlenmiştir. Bir motora ait verilerden elde edilen çıkarımlar, diğer motorlar için de analiz edilmiş ve benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise belirlenmiş olan arıza özelliklerinin, Yapay Sinir Ağları (YSA) yaklaşımı ile izlenmesi ve belirlenmesi sağlanmıştır.

SIGNAL BASED FAULT DETECTION OF STATOR INSULATION FAILURE FOR INDUCTION MOTORS

SUMMARY

Induction motors are the most frequently used components in almost every type of industrial processes. Therefore, condition monitoring studies are performed for predictive maintenance purposes of the critical systems in most areas of the industry. Early detection and isolation of faults that cause catastrophic system failure are crucial for more reliable and economic operation of industrial processes.

In this thesis, characteristics features of stator winding insulation fault detection for induction motors have been tried to accomplish by applying various signal analysis methods to current and vibration signals. 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. Fundamental spectral features of stator winding insulation failure have been obtained by applying accelerated aging process for a 5 HP induction motor. Experimental study has been carried out for three identical induction motors and characteristics which made possible online monitoring of stator winding insulation fault detection by measuring signals. Analysis related to feature extraction have been carried out by using spectral and wavelet techniques for datum obtained after the initial analysis and frequency components have been defined of characteristics for stator insulation fault. 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. 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 and defined by Artificial Neural Networks method.

1. GİRİŞ

Modern endüstrideki süreçlerin ekonomik ve güvenilir işletimi için arıza tespiti ve öngörülü bakım teknolojisine 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 elektrik motorlarının öngörülü bakımı tüm endüstri alanları için gerekli bir hal almaktadır.

Özellikle kafesli yapıdaki asenkron motorlar, basit mekanik yapıları, çok değişik koşullarda çalışabilme özellikleri ve kolay kontrol özellikleri ile endüstride en yaygın olarak kullanılan motorlardır. Kafesli asenkron motorlarda en sık rastlanan arızalar; rulman, mil dengesizliği gibi mekanik tabanlı arızalardır [1-3]. Mekanik tabanlı arızalar toplam arızaların yaklaşık % 50'sini oluşturmaktadır. Arızaların yaklaşık % 40'ı ise stator kaynaklı olup, geri kalan % 10'u rotor kaynaklıdır [3, 4]. Bu anlamda stator arızalarının önemli bir kısmı yalıtım arızaları olarak gözönünde bulundurulabilir. 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 yeteneğinin istemeyerek azaldığı durumlar gibi ısı aşırı yüklenme koşulları altında motorun korunması çok önemlidir.

Küçük motorlarda, stator sargılarının ısı kapasitesi motor korumasındaki sınırlayıcı faktördür. Bundan dolayı stator sıcaklığının ölçülmesi veya tahmin edilmesi istenir. Stator sıcaklığını belirleyen büyüklüklerden olan stator sargı direncinin doğru akımla ölçülmesinin en iyi sonuç veren yöntem olduğu birçok çalışmada belirtilmiştir [1, 2, 3, 6].

Motor sargılarının yalıtımında bir problem oluştuğunda, koruma türüne bağlı olarak motor çalışmaya devam edebilir. Kısadevre olmuş sargıların ısınması sonucu, fazlar 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 tez çalışmasının temelini oluşturmaktadır.

Günümüze kadar stator sargı yalıtım arızasının belirlenmesine yönelik farklı veriler kullanılarak çeşitli yöntemler önerilmiştir. Özellikle 4 kV ve üstündeki büyük güçlü generatörler ve motor stator sargıları için çevrim içi (on-line) kısmi boşalma (PD) ölçme yöntemleri oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte düşük güçlü motorlar için, stator yalıtım arızasını ortaya çıkarma yöntemleri henüz standartlaşma aşamasındadır [3, 5, 6].

Asenkron makinelerin normal dışı koşullardaki davranışı ve bu koşulların belirlenmesi, yıllardır araştırmacıların ilgilendiği bir konu olmuştur ve yalıtım arızasının belirlenmesi ile ilgili değişik yöntemler geliştirilmiştir. Araştırma konuları, makinenin sağlık durumunu belirlemek üzere parametre tahmini; spektrum analizi; yapay sinir ağları ve simetrik bileşenler üzerinde yoğunlaşmıştır [7, 8].

Literatürde asenkron motor arızalarının akım işaretlerinin analiz edilmesi yolu ile belirlenmesi yönünde de çalışmalar bulunmaktadır [3, 5, 7, 8]. Bu çalışmalar makinelerdeki rulman arızaları, rotor arızaları gibi mekanik durumlar üzerine yoğunlaşmıştır.

Stator sargı yalıtımındaki arızaların, sargı empedansında simetrisizliğe neden olduğu ve bunun sonucunda motor besleme devresinden dengesiz akımlar çekildiği benzetim ve deneysel yöntemlerle gösterilmiştir [7]. Bu dengesizliğin de akımda negatif bileşene sebep olacağı bilinmektedir. Dolayısıyla stator akımının negatif bileşenine bakarak sargı yalıtım arıza tanısının yapılması önerilmektedir [11, 12]. Ayrıca, literatürde sarım kısadevresinin belirlenmesi için akım işaretinin spektrumundaki kayma frekansı bileşenine bakılması bir yöntem olarak önerilmiştir [1]. Bu çalışmanın sonuçları, stator sargısındaki sarım kısadevresinin belirlenmesi için, bir akım bileşenindeki rotor kayma frekansının kullanılabileceğini göstermiştir. Başka bir çalışmada ise stator sarım kısadevresinin sebep olduğu ters kaçak akı arıza tespiti için kullanılmıştır [9]. Ters akı tabanlı tanı yöntemleri, gerilim ara devreli çeviricilerden beslenen asenkron makinelerde olduğu gibi, besleme kaynağında harmoniklerin olduğu durumda bile başarılı sonuç verebilmektedir. Faz - nötr

gerilimlerinin analizi de stator yalıtım arızasının tespiti için önerilen başka bir yöntemdir [10].

Bu çalışmada asenkron motorun stator sargı yalıtım arızası tanısına ilişkin karakteristik özellikler, motora ait akım, moment ve titreşim bilgilerine çeşitli analiz teknikleri uygulanarak çıkarılmaya çalışılmıştır. Bu amaçla, 3,6 kW'lık (5 HP) asenkron motorlarda stator arızalarını oluşturmak için hızlandırılmış yaşlandırma deneyleri yapılmıştır. Sözü edilen deneysel çalışmalar Amerika Birleşik Devletleri'nde *The University of Tennessee-Knoxville* (UTK)'deki *Maintenance and Reliability Center*'da bulunan laboratuarlarda gerçekleştirilmiş olup, UTK ve İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) arasındaki ortak çalışmalar kapsamında elde edilen stator yalıtım bozulmasına ilişkin akım, titreşim ve moment verileri kullanılmıştır [5, 8]. Deneysel çalışmalar aynı özellikteki üç motor için yapılmış olup, her bir motor için çalışırken ölçülen büyüklüklerin çevrimiçi analizi ile stator sargı yalıtımı arızası tanısı yapılmasını mümkün kılan fiziksel büyüklüklerin karakteristikleri ortaya çıkarılmıştır. Bir motora ilişkin verilerden elde edilen çıkarımlar, diğer motorlar için de incelenmiş ve benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

Bu tez çalışması içerik ve bulgular bakımından aşağıdaki gibi düzenlenmiştir:

1. Çalışmanın giriş bölümünde, genel olarak asenkron motorlarda arıza türlerinden ve stator yalıtım arızalarının literatür içerisindeki yerinden söz edilmektedir. Ayrıca bu bölümde tez konusu ve amacı tanımlanmakta, tezin getirdiği bilimsel katkılar vurgulanmaktadır.
2. İkinci bölüm, daha ayrıntılı olarak stator sargı yalıtımı arıza tanısına ilişkin kullanılan yöntemleri içermektedir. Ayrıca bu bölümde literatürdeki mevcut yöntemlerin bir birleşimi şeklinde mekanik ve elektriksel büyüklüklerin birlikte kullanımı ile tanımlanmış koherens yaklaşımı, yeni bir uygulama olarak önerilmiş ve bunun stator yalıtım arızasını karakterize eden frekans bileşenlerini ortaya çıkartma etkisinden söz edilmiştir.
3. Üçüncü bölümde, asenkron motor stator sargı yalıtımı arıza tanısına ilişkin karakteristik özelliği çıkarmak için kullanılan matematiksel yöntemler hakkında bilgiler verilmektedir. Bu bölümün tezdeki yorumu bakımından ele alınan

matematiksel yöntemlerin özellik çıkartmadaki üstün ve üstün olmayan yanları karşılaştırmalı olarak belirtilmiştir.

4. Dördüncü bölüm, verilerinden yararlanılan deneysel çalışmada kullanılan ölçme sisteminin tanıtımına ve denenen asenkron motorlarda stator yalıtımı bozulma deneylerinin yapılışının açıklanmasına ilişkindir. Bu bölüm ayrıca deneyde kullanılan ölçme aletlerinin genel özelliklerinin de verildiği bir bölümdür. Ölçme elemanlarının ayrıntılı teknik özellikleri bu tez çalışmasının ekler bölümünde verilmiştir.

5. Beşinci bölümde, deneysel çalışmalardan elde edilen deneysel veriler üzerinde ön analizler yapılarak kullanılacak verilerin seçimi açıklanmıştır.

6. Altıncı bölümde, seçilen deneysel veriler üzerinde spektral ve dalgacık analizi yöntemleri ile özellik çıkarımına ilişkin analizler yapıp, stator yalıtım bozulmasını karakterize eden frekans bileşenleri belirlenmiştir.

7. Çalışmanın ana bölümlerinin sonuncusu olan, yedinci bölümde ise daha önceki bölümlerde farklı yollardan belirlenmiş olan arıza özelliklerinin, Yapay Sinir Ağları (YSA) yaklaşımı ile izlenmesi ve belirlenmesi gösterilmiştir.

8. “Sonuçlar ve Yorumlar” bölümünde ise çalışmanın kısa bir özeti ile birlikte, varılan sonuçların literatürdeki yeri bakımından yorumları yapılarak, gelecekteki çalışmalar bakımından olası durumları tartışılmıştır.

Yukarıda ana hatları belirtilen bu çalışma, bilimsel katkı bakımından, literatürde mevcut olan yöntemlerden daha farklı bir bakış açısını kullanarak, belirgin bir şekilde stator yalıtımı arıza tanısına yönelik büyüklüklerin karakteristik özelliklerini ortaya koymuştur. Veri analizi yaklaşımıyla stator sargı yalıtım arıza tanısına yönelik olarak gerçekleştirilen yöntem, işaretlerin çapraz işlenmesi kavramına dayalı “Koherens” fonksiyonunu kullanmaktadır. Bu alanda ilk defa uyguladığımız yöntem ile daha önce elektriksel ve mekanik titreşim işaretlerinin tek başına analizleri ile elde edilemeyen sonuçlar, belirgin olarak ortaya çıkartılmıştır. Ayrıca kullanılan bu yöntem, var olan yöntemlere alternatif olarak daha kolay uygulanabilir olması ve etkin sonuçlar vermesi açısından da yarar sağlamaktadır.

2. DURUM İZLEME YÖNTEMLERİ

Elektrik makinalarında stator sargıları, aşırı ısı yüklenme, mekanik titreşimler ve hız kontrol cihazlarının yolaçtığı gerilim sıçramaları gibi çeşitli faktörler nedeniyle zorlanmaktadır. Stator sargı yalıtımında bozulma genellikle bir kaç sarım arasında sargı içi arızası şeklinde başlar. Sargı ile toprak arasındaki arızalarda da büyük toprak akımları ortaya çıkar ve bu akımlar motorda onarılamaz hasarlara sebep olabilir. Eğer statordaki bir arıza başlangıç aşamalarında tespit edilebilirse, stator sargısında onarım yapılarak veya tekrar sarılarak motorun uzun ömürlü çalışması sağlanabilir. Öte yandan motorun sağlam bir motorla değiştirilmesi işlemi, bir çok uygulamada motorların özel tasarım mil ve kuplaja gereksinim duyması nedeniyle daha uzun zaman alabilir.

Asenkron makinelerde statorun sağlık durumu için çeşitli izleme yöntemleri kullanılmaktadır [11, 12, 17, 28]. Bu izleme yöntemleri farklı parametrelere göre 13 farklı başlık altında aşağıdaki gibi toplanabilir [6].

2.1 Manyetik Akı

Stator yalıtım arızası nedeniyle hava aralığı akısında meydana gelen bir bozulma, milde de akı oluşmasına neden olacaktır. Mil üzerine yerleştirilen bir bobin yardımıyla milde oluşan akıdan yararlanarak stator yalıtım arızasının tespit edilmesi mümkün olmaktadır.

Hava aralığı akısı, motor sargılarından uygun iki noktadan alınan gerilimlerle de algılanabilir. Bu gerilimlerden çıkarılacak bir işaret, stator dirençsel gerilim düşümünden ve motor kaçak reaktans gerilim düşümünden hemen hemen bağımsızdır. Asimetrik olarak mile yerleştirilen en az dört adet bobin yardımıyla stator sargısındaki kısadevrenin yeri belirlenebilir [6, 20, 24].

2.2 Titreşim

Stator gövde titreşimi, sarım kısıdevresinin, tek faza kalmanın ve kaynak gerilimi dengesizliğinin bir sonucudur [65]. Motor içinde oluşan elektromanyetik kuvvetler ve statordaki titreşim elektrik makinelerinde üretilen gürültünün temel sebeplerindendir [3, 5].

2.3 Gürültü/Akustik Gürültü

Asenkron motorun gürültü spektrumunda elektromanyetik kuvvet, havalandırma ve akustik gürültü etkindir. Hava akımı ile ilişkili olan havalandırma gürültüsü, dönen parçalar nedeniyle hava basıncında oluşan periyodik bozulmalar sonucu oluşmaktadır. Literatürde yeralan bir çalışmada aerodinamik ve mekanik gürültü nedeniyle oluşan ses düzeyinin motor hızının iki katına çıkmasıyla yaklaşık 12 dB arttığı rapor edilmiştir [3]. Yine aynı çalışmada motor hızının artmasının ayrıca elektromanyetik gürültünün artmasına da neden olduğu bildirilmektedir.

2.4 Ani Açısal Hız

Asenkron makinelerdeki birçok asimetrik arıza stator çekirdeğindeki titreşimin izlenmesi ile saptanır. Stator sargı arızası veya dengesiz besleme gerilimi durumunda titreşim işareti kaynak frekansının iki katı frekansında bir bileşen içermektedir. Faz dengesizliği için arıza bulgusu, kaynak gerilimi frekansının iki katı frekanstaki artıştır [6].

2.5 Sıcaklık

Doğru bir sıcaklık bilgisi almak için sıcaklık sensörü sargılara monte edilebilir veya yalıtımın içine gömülebilir. Sıcaklık tahmini statorun ısıl modeline veya stator direnç modeline dayanarak yapılabilir. Stator yalıtımındaki yaşlanma için ısıl adım yönteminden (thermal step method) (TSM) yararlanılır. TSM ve ısıl olarak uyarılmış boşalma akımlarının ölçülmesi (TSDC: thermally stimulated discharge currents) yöntemlerinin birlikte kullanılarak yapılan bir çalışma ile stator yalıtım ömrü tahmin edilebilir. Düşük gerilimli asenkron motorlarda stator yalıtımının yaşlanması plastik

fiber optik sensörler kullanılarak geliştirilen tanı sistemi ile kestirilebilir. Bu yöntemde iki farklı dalga uzunluğunda yansıtma ve emilme oranlarındaki değişim ölçülmektedir.

2.6 Hava Aralığı Momenti

Hava aralığı momentini dönen makinenin akı ve akımları tarafından oluşturulur. Bu da hem yalıtım bozulmasından oluşan akı ve akım dengesizliklerine hem de gerilim dengesizliklerine duyarlıdır. Geri yöndeki stator alanı rotor alanıyla etkileşimli olarak harmonikli bir moment üretirken ileri yöndeki stator döner alanı sabit bir moment üretir. Bu da demektir ki temel frekansın iki katı frekanslı momentin olması stator sargılarında ve/veya geriliminde bir dengesizliği göstermektedir.

2.7 Endüklenen Gerilim

Generatör milinde endüklenen gerilim stator sargılarındaki bozulmanın bir göstergesidir. Mil geriliminin güvenilir bir şekilde ölçümünün zorluğu sebebiyle sürekli denetim için mil geriliminin yararlı bir parametre olup olmadığı henüz tam olarak kanıtlanmamıştır. Bundan başka mil geriliminde değişim oluşmadan önce stator ve rotor sargılarının sağlam olması gerekir. Gerilimin etkin değerinde olan bir değişiklik sargı kısadevresi tanısının (faz gerilimlerinin anlık değerlerinin toplamı olduğu yerde) varlığını ve şiddetini göstermektedir. Maksimum sargı arızası duyarlılığı temel frekans civarında band geçiren filtreleme uygulanarak, bu bantta yapılan inceleme ile elde edilmiştir [6].

2.8 Güç

Ani elektriksel güç, akıma kıyasla motorlarda arıza belirleme parametresi olarak belirli bir üstünlüğe sahiptir. Motorun senkron hızından bağımsız olarak bozucunun frekansı ani gücün karakteristik spektral bileşeninde doğrudan gözükmemektedir. Ani güçten yararlanmak güvenilir motor arıza tespit yöntemlerinden biridir [6].

2.9 Kısmi Boşalma

Elektriksel boşalmalar, motor yalıtımındaki kusurlardan dolayı ortaya çıkmaktadır. Yalıtımı bozulmaya başlayan bir sargıda kısmi boşalma, sağlam durumdakine oranla yaklaşık olarak 30 kat fazla meydana gelmektedir [6, 48]. Bu nedenle stator yalıtımının durumu çevrimiçi kısmi boşalma ölçmeleri ile kolayca izlenebilir [3, 4, 6, 7].

2.10 Gaz Analizi

Motor stator sargı yalıtımı bozulurken karbon monoksit gazı üretir ve hava soğutma devresi içinden geçen bu gaz emilme tekniği ile ortaya çıkarılabilir.

Yüksek frekanslı darbe genişlik modülasyonu darbeleri, motorlarda yalıtım arızasına yol açacak aşırı yüksek gerilimlere neden olur. Yalıtım bozulması, hava aralığında iyonlaşmaya yol açan ters yönde kutuplanmış iletkenler çevresinde oluşan yüksek elektrostatik alanlar sonucunda oluşur. Hava aralığındaki iyonlaşma sırasında oluşan pozitif elektrik yüklü ozon molekülleri havadaki nem (H_2O) ve azotla (N_2) birleşerek nitrik asit (HNO_3) oluştururlar. Oluşan nitrik asit, yalıtımı eriterek veya aşındırarak yalıtıma zarar verir. Ozon algılama teknikleri, motor içindeki elektriksel boşalmalar sırasında oluşan ozonun dolayısıyla da motordaki arızanın tespit edilmesi için kullanılmaktadır [6].

2.11 Darbe Deneyi

Darbe deneyi, sargı arızasının tespiti için geliştirilmiş bir yöntemdir. Darbe karşılaştırma deneyinde, üç fazlı bir motorun bir faz sargısı topraklanmış durumda iken diğer iki faz sargısına yüksek frekanslı darbe gerilimi eşzamanlı olarak uygulanır. Sarım, sargı ve sargı grupları arasındaki yalıtım arızasını gösteren yansıyan darbe gerilimlerini karşılaştırmak için osiloskop kullanılır. Darbe gerilimi deneyi, motorlarda sarım kısadevresi oluşmaması için sarım-sarım yalıtım dayanımını doğrulamak ve göstermek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem için geliştirilmiş olan darbe deneyi cihazları, yalıtım arızasının ve sargı simetrisizliğinin tespiti için kullanılır.

2.12 Motor Devre Analizi

Elektrik motorlarının direnç, endüktans, kapasite gibi elektriksel özellikleri ölçülerek ve motorun devre analizi sonuçlarıyla karşılaştırarak motordaki sargı yalıtımı arızasının motor değişkenleri ile ilişkisinden arızalar ortaya çıkarılabilir [3, 4, 6].

2.13 Akım Analizi

Motorun çektiği akımın analizi, rotor kafes arızaları, rotor çubuklarının kırılması, kısadevre olmuş stator sargıları ve rulman arızaları gibi değişik hata ve arızaların belirlenmesi için kullanılabilir. “Motor Akımı İz Analizi - *Motor Current Signature Analysis* (MCSA)” adı verilen bu yöntemle bir asenkron motor veya sürücü sisteminde var olan veya yeni başlayan bir arızanın yerinin tespiti için bu asenkron motorun stator akımının spektral analiz sonuçlarından yararlanılmaktadır. Motor akımı kullanılarak arıza tanısı, akımın negatif bileşenlerinin hesaplanması, nötr akımı ve mil akımının radyo frekanslı bileşenlerin kullanılması şeklinde çeşitli araştırmacılar tarafından önerilmiştir [21].

Stator akımını izleyip analiz ederek bir makinenin durumu ile ilgili bilgi almak mümkündür. Bu yöntemin en önemli üstünlüğü makine çalışırken alınan akım bilgisinin örneklenmesi ile çalışılması, dolayısıyla arıza tespitinin ve öngörüsünün makineyi şebekeden ayırmadan çevrimiçi olarak yapılabilmesidir [6, 38, 43].

Stator yalıtım arızası tanısının ele alındığı bu tez çalışmasında, literatürde kullanılan yöntemlerden farklı olarak özellikle motor akım, titreşim ve moment ilişkilerine dayalı, alternatif bir durum izleme ve tanı yöntemi geliştirilmiştir. Tezde kullanılan yöntem, literatürde olmayan ve ilk kez uygulanmış bir yöntem olup motor akım ve titreşim işaretlerinin birlikte değerlendirildiği, koherens yaklaşımını kullanarak, arıza özelliklerinin ortaya çıkartıldığı bir yöntemdir. Bu bölümde verilen durum izleme yöntemlerinde kullanılan parametreler incelendiğinde bu tez çalışmasında ele alınan büyüklükler sadece akım, titreşim ve moment büyüklükleridir. Bu konuyla ilgili olarak belirtilen diğer izleme yöntemleri ise gözönünde bulundurulan çalışma kapsamı dışında kalacağından ele alınmamıştır. Tezde önerilen yöntem mekanik titreşim ve elektriksel sinyaller (akım/gerilim) üzerine kurulmuştur. Bu bağlamda

yöntem hem güncel işaret işleme yöntemlerini kullanarak değerlendirme yapmada, hem de özellik çıkarımında kolaylık sağlamaktadır.

Genel olarak yöntem, farklı iki işaret arasındaki ilişkinin bir sonucu olarak koherens değişimi üzerine kurulmuş olup, bunun bir yapay sinir ağı üzerinde değerlendirilerek yapay sinir ağının çıkışında üretilen mutlak hata değişiminin gözlemlenmesi ile stator yalıtım durumu hakkında bilgi vermektedir. Böylece literatürdeki yöntemlerden farklı bir yöntemle arıza özelliğinin çıkartılması ve belirlenmesini (izlenmesini) sağlayan tümleşik bir yapı oluşturulmuştur.

3. MATEMATİKSEL YÖNTEMLER

Bu tez çalışmasında ele alınan stator arıza tanısı için kullanılan matematiksel yöntemler birbirinden bağımsız yöntemler olmasına rağmen tezin bütünlüğü içersinde ardışık olarak kullanılmışlardır. Bu anlamda, spektral analiz ve koherens analizi yöntemleri, motorlar üzerinde yapılan deneylerden elde edilen deneysel verilere uygulanarak özellik çıkarımı amacıyla kullanılmıştır. Burada sürekli dalgacık analizi yöntemi, sinyalleri farklı ölçeklerde değerlendirerek arıza ile ilgili çok küçük belirtileri belirlemek amacıyla ve daha çok spektral analiz yaklaşımını desteklemek amacıyla kullanılmıştır. Yapay sinir ağları ise, özellik çıkarımı üzerine kurularak stator yalıtım arıza tanısını gerçekleyen, öğrenen algoritma tabanlı sanal bir detektör oluşturmak için kullanılmıştır.

Özet olarak bu tez çalışmasında kullanılan matematiksel yöntemlerin sonuçları bakımından çalışma iki bölümde göz önüne alınabilir. Bunlar sırasıyla;

- 1) “Spektral Analiz” ve “Sürekli Dalgacık Analizi” yaklaşımlarının kullanıldığı arıza tanısı,
- 2) “Yapay Sinir Ağları” ile durum izlemedir.

Uygulamaya ilişkin yukarıda sözü geçen bu yöntemler aşağıda özetlenmiştir.

3.1 Spektral Analiz

İşaretlerin spektral özelliklerini çıkartmak bakımından en bilinen yöntemlerden biri güç spektrumu yoğunluğunun incelenmesidir. Ayrıca farklı işaretler arasındaki ilişkiyi yine frekans tanım bölgesinde ifade eden diğer bir spektral analiz tekniği ise koherens analizidir. Bu tekniklere ilişkin tanımlar aşağıda verilmiştir [5, 8].

Zaman domenindeki bir $x(t)$ raslantı işaretine ilişkin frekans bilgisini elde etmek amacıyla N noktada ayrık Fourier dönüşümü hesaplanarak o işaretin frekans

domenine dönüşümü yapılır. N adet örnek içeren bir veri kümesi için frekans çözünürlüğü Δf ve örnekleme zamanı Δt olmak üzere, $m\Delta f$ frekansındaki dönüşüm

$$X(m\Delta f) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta t) \exp[-j2\pi km / N] \quad (3.1)$$

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

$$S_{xx}(f) = \frac{1}{N} |X(m\Delta f)|^2, f = m\Delta f \quad (3.2)$$

bağıntısıyla hesaplanır [13]. 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

$$Y(m\Delta f) = \sum_{k=0}^{N-1} y(k\Delta t) \exp[-j2\pi km / N] \quad (3.3)$$

ile hesaplanır. Daha sonra S_{xy} şeklinde ÇGSY fonksiyonu,

$$S_{xy}(f) = \frac{1}{N^2} X(m\Delta f) Y^*(m\Delta f). \quad (3.4)$$

bağıntısından bulunur.

3.2 Koherens Analizi

Bir ölçme sisteminden alınan iki ya da daha fazla işaret arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek için koherens analizinden yararlanılabilir. 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 (3.2) ve (3.4)’de verilen ÖGSY ve ÇGSY büyüklükleri ile

$$\gamma_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|}{\sqrt{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}}, \quad 0 < \gamma_{xy} < 1 \quad (3.5)$$

şeklinde tanımlanır [5, 13].

3.3 Dalgacık Dönüşümü

$L^2(R)$ sonlu enerjili işaretler için bir vektör uzayını göstermek üzere, $x(t)$, $L^2(R)$ uzayında tanımlı bir işaret olsun. Burada R gerçel sayılar kümesini göstermektedir. Bu durumda sonlu enerjili işaretler,

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (3.6)$$

bağıntısını sağlarlar ve $x(t)$ 'nin sürekli dalgacık dönüşümü (SDD) de,

$$SDD_{\psi} x(a,b) = W_x(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (3.7)$$

olarak tanımlanır. İntegral içindeki $\psi_{a,b}(t)$ fonksiyonu ise, normalize edilmiş olarak

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.8)$$

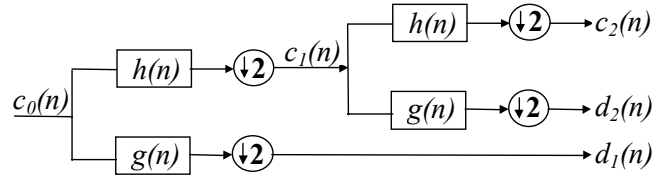
şeklinde verilebilir. Burada $\psi(t)$ baz fonksiyonu ya da ana dalgacığı, $*$ sembolü kompleks eşleniği ve a, b parametreleri ise $a, b \in \mathbb{R}$, $a \neq 0$ olmak üzere sırasıyla genişleme ve öteleme parametrelerini gösterir. Sürekli genişleme a ve öteleme b parametreleri yerine, $a = a_0^m$, $b = nb_0 a_0^m$ şeklindeki ayrık parametreleri tanımlamak mümkündür. Burada a_0, b_0 sabit sayılar olup, $a_0 > 1$, $b_0 > 0$ koşullarını sağlar. Ayrıca m, n sayıları da, $\mathbb{Z}$ tam sayılar kümesinin elemanlarıdır. Bu durumda ayrıklaştırılmış ana dalgacık

$$\psi_{m,n}(t) = a_0^{-m/2} \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (3.9)$$

haline gelir ve ayrık parametrelili dalgacık dönüşümü

$$APDD_{\psi} x(m,n) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m,n}^*(t) dt \quad (3.10)$$

ile verilir. a_0 ve b_0 'ın uygun seçimiyle ana dalgacık ailesi $L^2(R)$ 'nin ortonormal bazını oluşturur. a_0 ve b_0 'ın uygun seçimleri $a_0 = 2$ ve $b_0 = 1$ değerleri için dalgacık dönüşümü, diadik-ortonormal dalgacık dönüşümü adını alır. Bu durumdaki ortonormal bazın önemli özelliklerinden birisi ise a_0 ve b_0 'ın yukarıdaki gibi seçimiyle, işareti farklı zaman ve frekans çözünürlüklü ölçeklere ayırtırmayı sağlayan ve *Çok Çözünürlüklü Dalgacık Analizi (ÇÇDA)* denilen algoritmanın kullanılabilmesidir. Bu çalışmadaki uygulamanın ana konusunu oluşturan *Çok Çözünürlüklü İşaret Ayırtırması* ise aşağıdaki gibi şu şekilde verilir: $c_0(n)$, fiziksel bir ölçü aletinden kaydedilen bir ayrık zaman işareti olsun. Bu işaret, yaklaşım ve detay gösterimi denilen iki ayrı frekans aralığına ayırıştırılabilir. Bu anlamda çok çözünürlü işaret ayırtırma tekniği kullanılarak ölçek 1'de ayırıştırılmış işaretler $c_1(n)$ ve $d_1(n)$ olur. Bu durumda $c_1(n)$ ve $d_1(n)$, sırasıyla orijinal işaretin dalgacık dönüşümü biçimindeki yaklaşım ve detay gösterimini oluşturur.



Şekil 3.1: $c_0(n)$ 'nin iki ölçeğe ayırıştırılması.

3.4 Levenberg-Marquardt Algoritması Tabanlı Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (YSA), insan beynindeki sinir ağlarını taklit eden matematiksel modellerden oluşmuş yapay işlemcilerin (yapay hücrelerin), birden fazlasının biraraya getirilmesiyle, tabakalı bir ağ oluşturacak şekilde düzenlenmiş ve bilgiyi paralel olarak alıp işleyen, öğrenme yeteneği olan özel algoritmalarlardır. Bu anlamda bir YSA algoritması, paralel dağıtılmış masif bir yapıdır ve bu bakımdan yüksek toleranslıdır. Çünkü paralel bir topoloji sergilediklerinden dolayı herhangi bir yapay işlemcisinin ortadan kalkması, ağın başarımını çok etkilemeyecektir. Genel olarak kendi içersinde iki süreci içerir. Bunlardan biri öğrenme sürecidir. Diğeri ise sorgulamadır. YSA öğrenme algoritmaları bakımından da iki sınıfta ele alınabilirler, bunlardan biri denetimli öğrenme olarak tanımlanırken, bir diğeri denetimsiz öğrenmedir. Denetimli öğrenmede genellikle giriş-çıkış çiftleri tanımlanarak YSA'nın belli girişlere belli çıkışları hedef alması istenir ve ağ içindeki yapay hücreler, matematiksel yapıları içinde tanımlanmış ağırlık katsayılarını ayarlayarak

bunu başarabilirler. Bu ayarlama işlemi, hedef ve ağ çıkışındaki hatayı en küçük değere düşüren uyarlamalı (adaptif) bir algoritma ile sağlanır. YSA öğrenme sürecinden sonra bir sına (test) sürecine sokularak, eğitiminde kullanılan giriş-çıkış verilerinin eğitiminde kullanılmayan kısmı için, sadece giriş bilgileri girilerek sorgulanır ve çıkışta uygun değerler üretip üretmediği kontrol edilir. Uygun değerlerde yanıt üreten YSA'nın öğrenme sürecini tamamladıktan sonra, yanıtı önceden bilinmeyen girdilere öğrendiği türden yanıtlar vermesi beklenir. YSA'nın yanıt üretmedeki yaklaşımı fiziksel sisteme ilişkin modelden bağımsızdır. Böylece çeşitli giriş-çıkış verileri ile fiziksel sisteme ilişkin davranışı öğrenmiş bir sistem, gerçek zamanlı bir çalışmada önceden öğrendiği türden uygun yanıtları en hızlı bir şekilde üretebilecektir. Bu bakımdan YSA'lar, öğrenebilme yeteneği olan ve modelden bağımsız sistemlerdir [16, 44].

Geriye yayılım algoritması, yapay sinir ağlarında giriş ile çıkış arasındaki ilişkiyi kurmada en çok kullanılan algoritmadır. Geriye yayılım öğrenmesi sırasında ağ, her giriş örüntüsünü, çıkış nöronlarında sonuç üretmek üzere gizli katmanlardaki nöronlardan geçirir. Daha sonra çıkış katmanındaki hataları bulabilmek için, beklenen sonuçla, elde edilen sonuç karşılaştırılır. Bundan sonra, çıkış hatalarının türevi çıkış katmanından geriye doğru gizli katmanlara geçirilir. Hata değerleri bulunduktan sonra, nöronlar kendi hatalarını azaltmak için ağırlıklarını ayarlar. Ağırlık değiştirme denklemleri, ağdaki performans fonksiyonunu en küçük yapacak şekilde düzenlenir.

İleri beslemeli ağlarda kullanılan öğrenme algoritmaları, performans fonksiyonunu en küçük yapacak ağırlıkları ayarlayabilmek için, performans fonksiyonunun türevini (gradyenini) kullanırlar. Geriye yayılım algoritması da, ağ boyunca gradyen hesaplamalarını geriye doğru yapar. En basit geriye yayılım öğrenme algoritması gradyen azalması algoritmasıdır. Bu algoritmada ağırlıklar, performans fonksiyonunun azalması yönünde ayarlanır. Fakat bu yöntem, pekçok problem için çok yavaş kalmaktadır. Bu algoritmadan daha hızlı, daha yüksek performanslı algoritmalar da vardır. Hızlı algoritmalar genel olarak iki guruba ayrılabilir. İlk guruptaki algoritmalar, deneme yanılma tekniklerini kullanarak, standart gradyen azalması (dik iniş) yönteminden daha iyi sonuçlar verebilir. Deneme-yanılma işlemlerini kullanan geriye yayılım algoritmaları; momentum terimli geriye yayılım, öğrenme hızı değişen geriye yayılım ve esnek geriye yayılım algoritmalarıdır. Hızlı

algoritmaların ikinci gruptaki algoritmalar, standart sayısal optimizasyon yöntemlerini kullanır. Bu algoritmalar; eşlenik gradyen öğrenme algoritması, Newton öğrenme algoritmaları ve Levenberg – Marquardt öğrenme algoritmasıdır.

Öğrenme algoritmaları, kendisinden önce geliştirilen algoritmalara alternatif olarak ortaya çıkmıştır ve önceki algoritmaların iyi yönlerini geliştirip, kötü yönlerini azaltmaya yönelmiştir. Levenberg – Marquardt algoritması da, Newton ve Gradyen Azalması algoritmalarının en iyi özelliklerinden oluşur ve kısıtlamalarını ortadan kaldırır. Eşlenik gradyen öğrenme algoritmasına alternatif olarak sunulan Newton yöntemlerinde, temel adım Hessian matrisini elde etmektir. Hessian matrisi, performans fonksiyonunun ağırlıklara göre ikinci dereceden türevlerinden oluşan bir matristir. Hessian matrisi, ağırlık uzayının farklı doğrultularındaki gradyen değişimini gösterir.

$$H(n) = \frac{\partial^2 E(n)}{\partial w^2(n-1)} \quad (3.11)$$

Burada H Hessian matrisi, E performans fonksiyonu, w ağırlık sinaptik ağırlığıdır. Performans fonksiyonu, duruma göre toplam ani hata veya ortalama karesel hata olarak alınabilir. Bu çalışmada, ileri beslemeli ağların çoğunda olduğu gibi, performans fonksiyonu olarak, ortalama karesel hata kullanılmıştır.

$$E(n) = E_{ort}(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} \sum e_j^2(n) \quad (3.12)$$

Burada N eğitim kümesindeki toplam örüntü sayısını, e_j hata işaretini, C ağırlık çıkış katmanındaki bütün nöronları içeren kümeyi göstermektedir. d_j istenen değer, y_j ağırlık çıkışı olmak üzere hata işareti,

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad (3.13)$$

olarak bulunabilir. Hessian matrisi hesaplandıktan sonra, tersi bulunarak ağırlıklar yenilenebilir. Ancak Hessian matrisi çok karmaşık ve ileri beslemeli bir yapay sinir ağı için hesaplanması zor bir matristir. Newton yöntemlerinin içinde, ikinci dereceden türevlerin hesaplanmadan işlem yapılan bir sınıf vardır. Bu sınıftaki yöntemler, quasi –Newton yöntemleri olarak adlandırılırlar. Quasi – Newton

yöntemleri, algoritmanın her iterasyonunda, Hessian matrisinin yaklaşık bir şeklini kullanır. Levenberg – Marquardt algoritması da quasi – Newton yöntemleri gibi, Hessian matrisinin yaklaşık değerini kullanır. Levenberg – Marquardt algoritması için Hessian matrisinin yaklaşık değeri şu şekilde bulunabilir:

$$H(n) = J^T(n)J(n) + \mu.I \quad (3.14)$$

(3.14) denklemindeki μ Marquardt parametresi, I ise birim matristir. Burada J matrisi, Jakobien matrisi olarak adlandırılır ve ağ hatalarının ağırlıklara göre birinci türevlerinden oluşur:

$$J(n) = \frac{\partial e(n)}{\partial w(n-1)} \quad (3.15)$$

(3.15) denkleminde e , ağ hataları vektörüdür. Jakobien matrisi, hesaplamada Hessian matrisinden daha kolay hesaplanabildiği için tercih edilir. Ağın gradyeni,

$$g(n) = J^T(n)e(n) \quad (3.16)$$

olarak hesaplanır ve ağırlıklar (3.17) denkleminde göre değiştirilir:

$$w(n+1) = w(n) - [H(n)]^{-1} g(n) \quad (3.17)$$

Marquardt parametresi, μ , skaler bir sayıdır. Eğer μ sıfırsa, bu yöntem yaklaşık Hessian matrisini kullanan Newton algoritması; eğer μ büyük bir sayı ise, küçük adımlı gradyen azalması yöntemi haline gelir. Newton yöntemleri, en küçük hata yakınlarında daha hızlı ve kesindir. Her başarılı adımdan sonra, yani performans fonksiyonunun azalmasında μ azaltılır ve sadece deneme niteliğindeki bir adım performans fonksiyonunu yükseltecekse μ arttırılır. Bu yöntemle, algoritmanın her iterasyonunda, performans fonksiyonu daima azaltılır.

Genel olarak Levenberg – Marquardt algoritması yavaş yakınsama probleminden etkilenmez. Burada hedef, performans fonksiyonunu en küçük yapacak ağırlık değerini bulmaktır [44].

3.5 Matematiksel Yöntemlerin Genel Değerlendirilmesi

Bu bölümde arıza tanısında kullanılacak olan dört farklı yöntem ele alınmış olup, bunlardan spektral analiz yaklaşımı kullanılan verilerin güç spektrumu yoğunluklarını (GSY) hesaplama üzerinedir. Ancak bu yöntem tek başına işaretler içerisindeki saklı bilgiyi çıkartmak bakımından etkin değildir. Buna alternatif olarak sunulan koherens analizi ise çapraz güç spektrumu yoğunluğu ve öz güç spektrumu yoğunluğu tanımlamalarını kullanarak yeni bir büyüklük olarak tanımlanmış olup, farklı iki işaret arasındaki ilişkiyi frekans domeninde tanımlayabilmektedir. Bu bağlamda bu çalışmada kullanılan akım ve titreşim işaretleri arasındaki ilinti fonksiyonu bu koherens yaklaşımı ile sunulmuştur. Böylece iki farklı işaret arasındaki benzer özellikler kuvvetlenerek birer frekans bileşeni olarak arızanın özellikleri olarak ortaya çıkmıştır.

Spektral analiz yaklaşımının yetersizliği karşısında ham verinin sürekli dalgacık dönüşümü ile farklı bir ölçekte yeniden değerlendirilmesi ve bundan sonra spektral analiz yönteminin kullanılması ise yalıtım yaşanmasıyla orantılı olarak ortaya çıkan işaret enerjisindeki artışı ve tek ve çift harmonikleri içeren frekans bilgisini ortaya çıkartmada daha etkin olduğu belirlenmiştir. Sürekli dalgacık dönüşümü (SDD) bu tez çalışmasında koherens yaklaşımının farklı bir domendeki doğrulayıcı bir uygulaması olarak kullanılmıştır. Ancak özellik çıkaran yöntem olarak doğrudan bir etkisi görülmemiştir.

Son olarak, koherens yaklaşımı ile çıkartılan özellikler bir yapay sinir ağı (YSA) üzerinde kullanılarak yalıtım eskime süreçlerinin normal durumla olan farkı gözlemlenmiş olup, YSA çıkışındaki hata değişiminin gözlemlenmesiyle de bir “Sanal Detektör” (sanal arıza bulucu) gibi davranması sağlanmıştır. Burada koherens değişiminin her bir frekans bileşenine ait genlikler bir örüntü (pattern) kümesi olarak YSA’na uygulanışı Fourier Dönüşümü’nde kullanılan pencere fonksiyonunun genişliğine bağlı olarak çok sayıda giriş-çıkış çiftini içermesinden dolayı hızlı bir optimizasyon algoritması olan Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır.

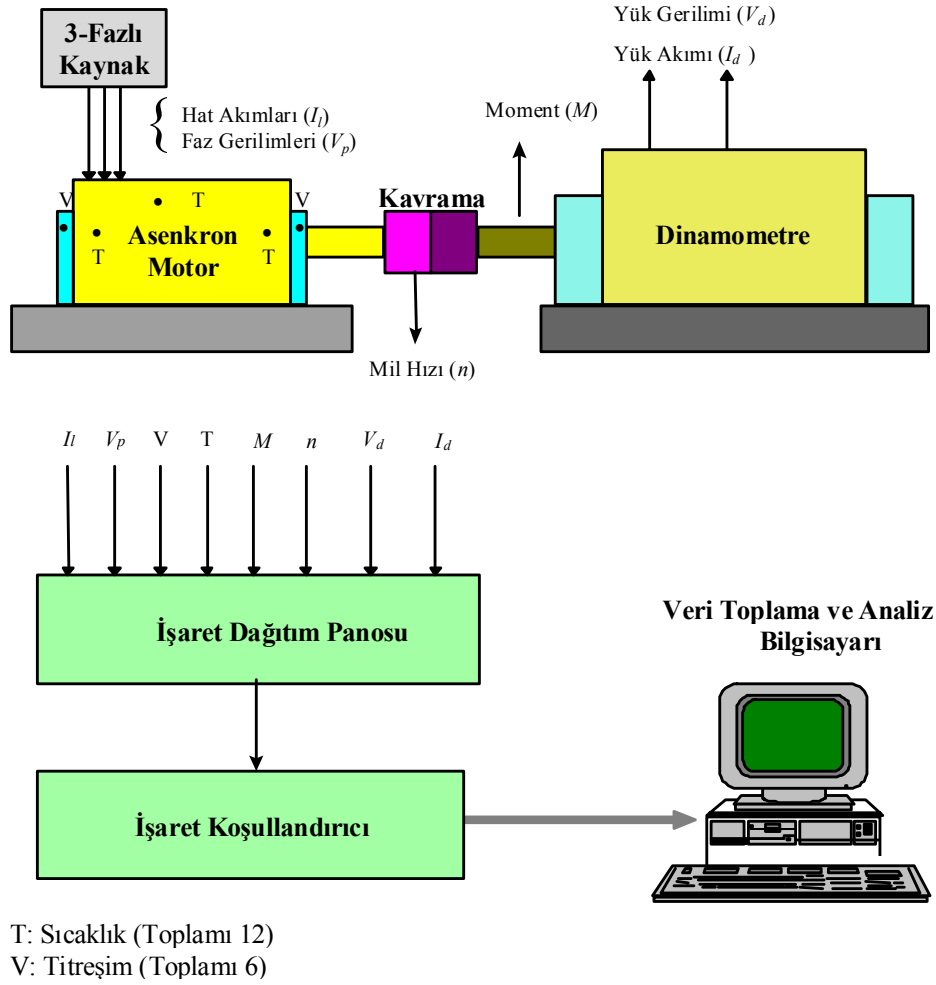
4. ASENKRON MOTORLARDA STATOR YALITIMI BOZULMA DENEYLERİ

4.1 Yaşlandırma Düzeneği ve Veri Toplama Sistemi

Bu çalışmada birbirine eşdeğer üç adet 5 HP gücündeki kafesli asenkron motor, sıcaklık ve tekrarlamalı elektriksel zorlamaların etkisi altında toplam bir yaşlandırmaya tabi tutulmuştur.

Deneyin gerçekleştirilmesinde kullanılan tüm donanımın teknik özellikleri Ek A'da sunulmuştur. Bu bağlamda Şekil 4.1. deneyde kullanılan ölçme ve veri toplama sisteminin genel yapısını göstermektedir.

Burada işaret koşullandırma bloğu *National Instruments*'ın SCXI-1120 model 8 kanallı izolasyon kuvvetlendiricisini içermektedir. Bu kuvvetlendirici J-tipi ısı çiftlerini kullanarak biri ortam sıcaklığı olmak üzere oniki motor sıcaklığını ölçmek için SCXI-1328 terminal bloğunu kullanır. Bu birim, kesim frekansı 4 kHz ve kazancı 200 olan RC alçak geçiren filtresini kullanır. SCXI-1141 model 8 kanallı eliptik alçak geçiren filtre modülü ivmeölçerden gelen ölçmeleri filtrelemek ve kuvvetlendirmek için kullanılır. Her bir kanal 8. mertebeden eliptik filtreleri içerir. Bu filtreler sayısallaştırılmış verideki örtüşmeyi önlemek için yazılım desteği ile programlanabilen sürekli zamanlı filtreler tipindedir. Buradaki örnekleme frekansı 12 kHz'dir. Ayrıca SCXI-1100 model, 32 kanallı çoğullaştırıcı (multiplexer) kuvvetlendirici kullanılmıştır.



Şekil 4.1: Ölçme ve Veri Toplama Sisteminin Genel Yapısı

4.2 Deneyin Yapılışı

Yaşlandırma deneyi için “ IEEE Standard Test Procedure for Evaluation of Systems of Insulation Materials for Random-wound AC Electric Machinery” [49] standartında belirtilen yönergeler uygulanmıştır.

Üç adet 5 HP, 4 kutuplu asenkron motorda stator sargısı yalıtım arızası, yüksek sıcaklık ve elektriksel zorlanmalar sonucunda ortaya çıkarılmıştır. Titreşim, akım, gerilim, hız, moment ve sıcaklık vb bilgiler, her bir yaşlandırma sürecine ilişkin, farklı motor yüklenme koşulları için elde edilmiş ve veri toplama sistemine kaydedilmiştir.

Elektrik motorlarında stator sargı yalıtımının yaşlandırılması işleminin iki önemli yönü bulunmaktadır. Bu yönler sırasıyla ısı ve elektriksel yaşlandırmadır. Tablo 4.1’de stator sargı yalıtımının ömrüne etki eden faktörler ve etki dereceleri sunulmaktadır [5].

Tablo 4.1: Stator sargı yalıtımının ömrüne etki eden etkenler ve etki dereceleri [5]

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 indeksi	12,5
Titreşim seviyesi	12,5

Deneyde kullanılan, F sınıfı yalıtıma sahip motorlar için öngörülen ömür süreleri Tablo 4.2’de verilmektedir [5, 48].

Tablo 4.2: Stator sargı sıcaklığı ile motor ömrü arasındaki ilişki [5, 8]

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

4.3 Yaşlandırma Süreçlerinin Oluşturulması

Kafesli asenkron motorlar, yol alma anında bir kaç saniye boyunca anma akımlarının 5...10 katı arasında akım çekerler. Yaşlandırma sürecinde akımın karesiyle orantılı olarak sargı sıcaklığı da artmaktadır. Yalıtımın yaşlandırma sürecini hızlandırmak için, motor ayarlanabilir bir röle üzerinden otomatik olarak, her bir yaşlandırma periyodunda, ayarlanabilir bekleme süreleri sonunda devreye sokulup çıkarılmaktadır. Röle üzerinden ayarlanabilen gecikme süresinin dolması ile röle

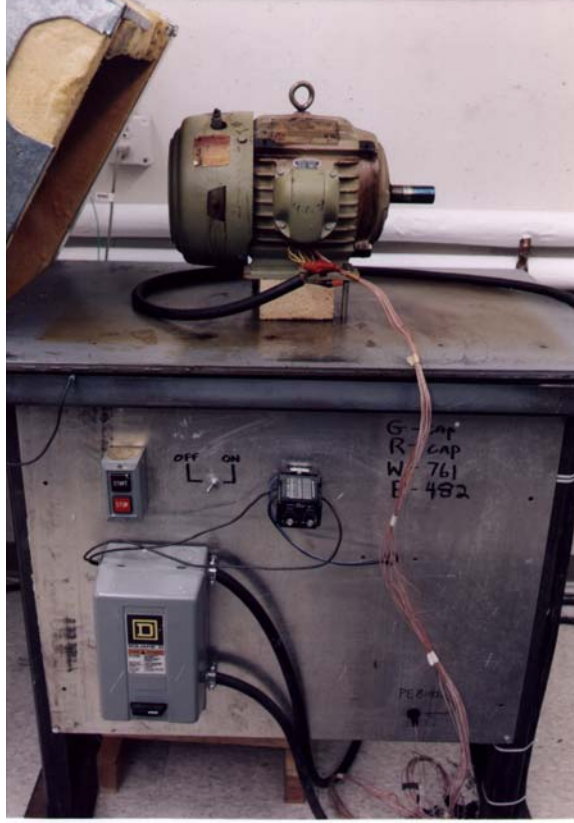
kontakları kapanır ve bu işlem rölenin enerjisi kesilene kadar devam eder. Buna ilişkin rölenin ayar değerleri tez ekinde Tablo A.7’de verilmiştir.

Sargı sıcaklığının 205 °C’ye çıkmasını sağlayacak, motor sargı yalıtımı yaşlandırma düzeneğine ilişkin fotoğraf Şekil 4.2’de sunulmaktadır.

Bu düzende yüksek sıcaklık nedeniyle rulman arızalarının oluşmasının engellenmesi amacıyla her yaşlandırma (eskime) periyodunun sonunda rulmanlar yağlanmış ve plastik fanlar yenisi ile değiştirilmiştir.

Her bir yaşlanma periyodunun sonunda, üç fazlı bir güç kaynağından beslenen motorun performansı değişik yüklenme oranları için test edilmiştir. Yüklenme oranları boşa çalışma ile % 115 yüklenme arasında değiştirilmiştir. Bu deney düzeneğinde aşağıdaki ölçümler kaydedilmiştir:

- 12 noktadan alınan sıcaklık bilgisi,
- Motor 3 faz gerilimi,
- Motora ilişkin 3 faz akımı
- Yük akımı,
- Motor hızı,
- Yük momenti,
- 6 farklı noktaya yerleştirilmiş algılayıcılardan alınan titreşim bilgisi.

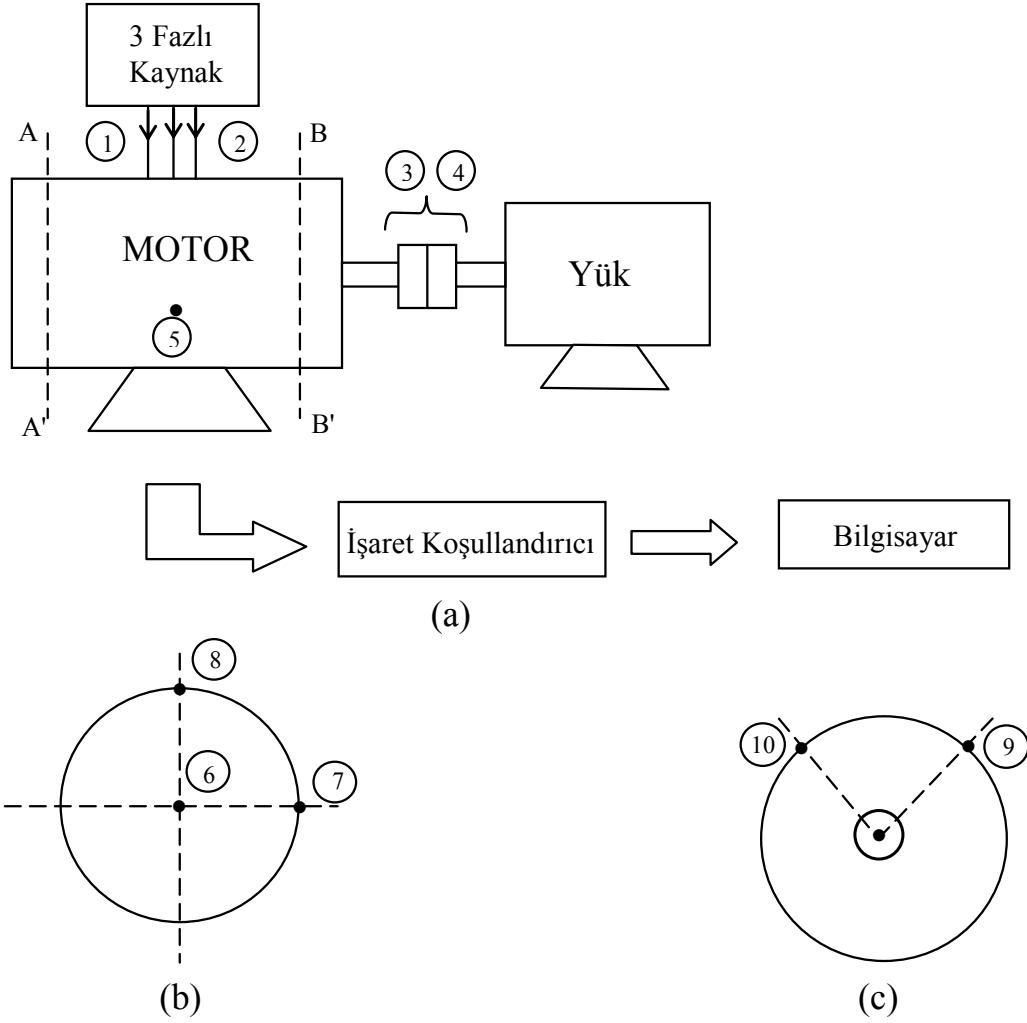


Şekil 4.2: Motor sargı yaşlandırma (eskime) düzeneğine ilişkin fotoğraf

Şekil 4.2, röle üzerinden kontrol edilen motor sargı yaşlandırma düzeneğine ilişkin açma-kapama ünitesinin genel görüntüsünü yansıtmaktadır.

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

Şekil 4.3’te motordan elektriksel ve titreşim verisini elde etmek ve bilgisayara kaydetmek üzere oluşturulmuş düzeneğin algılayıcı konumlarına göre prensip şeması verilmektedir. Titreşim bilgilerini almak üzere 6 adet titreşim-ölçer motorun farklı yerlerine yerleştirilmiştir.

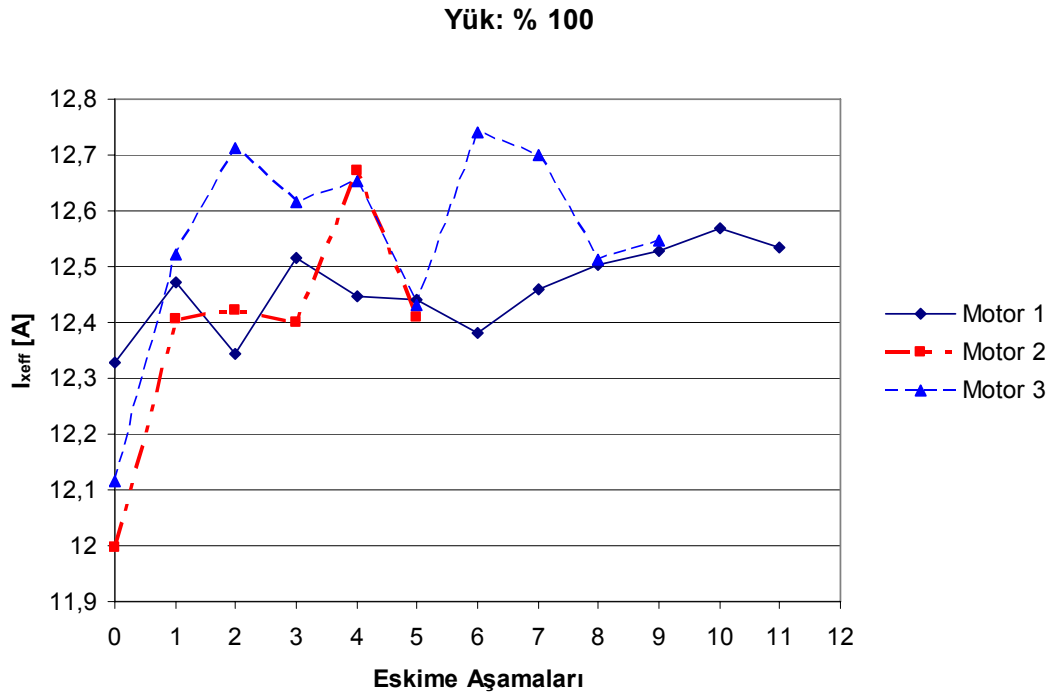


Şekil 4.3: Motor yükleme ve veri toplama düzeneği a) Algılayıcı Konumları b) (A-A') kesiti; c) (B-B') kesiti.

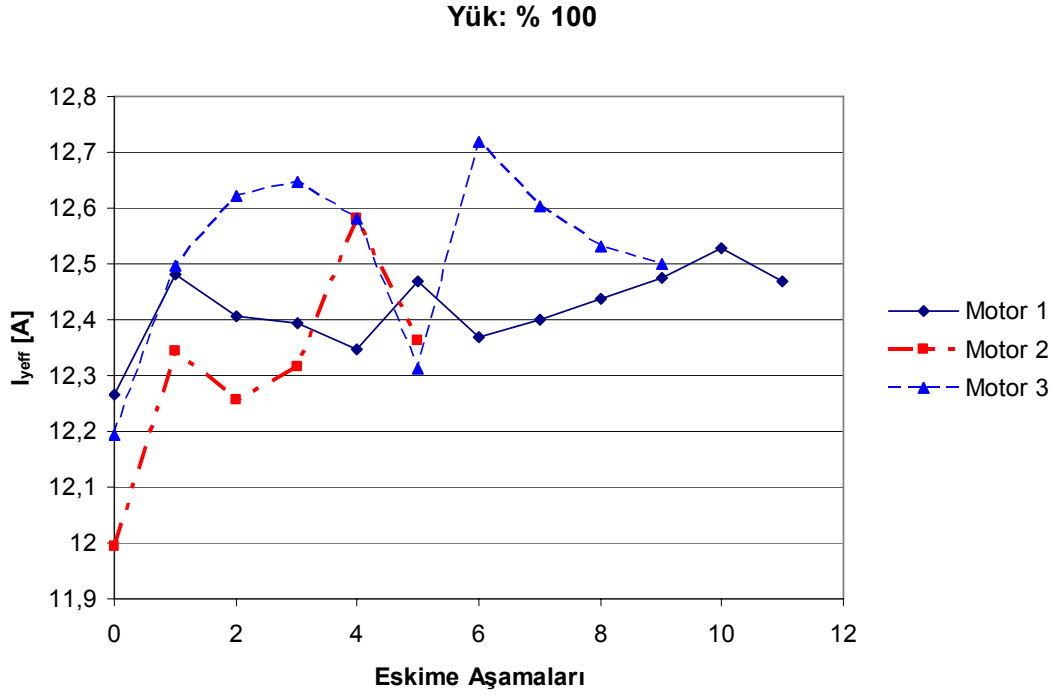
Şekil 4.3'te bu deneyde kullanılan algılayıcı konumları işaretlenmiştir. Burada 1 ve 2 numaralı algılayıcılar (sensörler), elektriksel işaretlerin alındığı gerilim ve akım algılayıcılarıdır. 3 ve 4 numaralı algılayıcılar sırasıyla hız ve moment ölçümlerine ilişkin olup, geri kalan 5-6-7-8-9-10 numaralı 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 yapısal olarak birbirine dik konumda yerleştirilememesinden ötürü saatin akrep ve yelkovanının 02:00 ve 10:00 konumlarında olması gibi bir konumda yerleştirilmişlerdir. Bütün bu algılayıcılara ilişkin teknik özellikler Ek A'da verilmiştir.

5. DENEYSEL VERİLERİN SEÇİLMESİ VE ÖN ANALİZİ

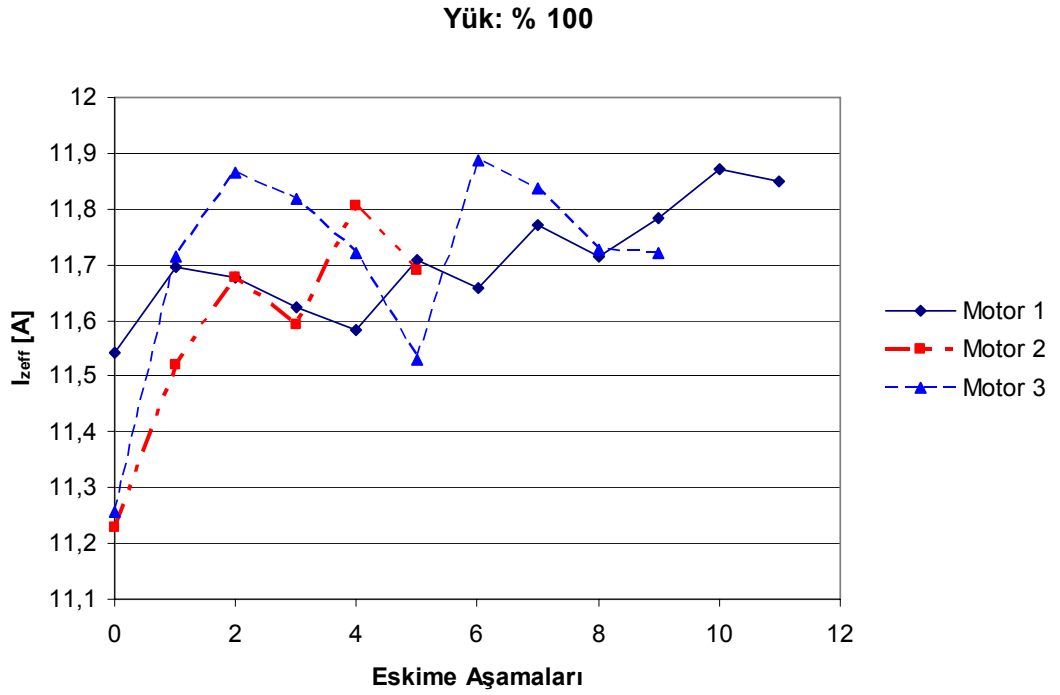
Amerika Birleşik Devletleri'nde *The University of Tennessee-Knoxville* (UTK)'deki *Maintenance and Reliability Center*'da bulunan laboratuarlarda UTK ile İTÜ arasındaki ortak çalışmalar kapsamında, 5 HP'lik 3 faz 4 kutuplu eşdeğer özellikli 3 adet asenkron motorun eskime süreci sonrasında motor performans deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde motorlar, boşta çalışma ile % 115 arasında değişen yüklenme koşulları altında çalıştırılmıştır. Her bir eskime süreci ile birlikte sağlam durumu da içerecek şekilde her motor için farklı sayıda aşamadan oluşan bu deneylerde, motor titreşim ve akım işaretleri analog-sayısal çeviriciler aracılığıyla, 12 kHz'lik frekansta örneklenerek bilgisayara kaydedilmiştir.. Bu işaretler üzerinde ortalama değer ve etkin (rms) değer hesaplamaları yapılarak Şekil 5.1'den Şekil 5.12'ye kadar olan şekillerde verilen değişimler elde edilmiştir.



Şekil 5.1: % 100 yüklenme durumu için üç motora ilişkin I_x akımlarının etkin değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri

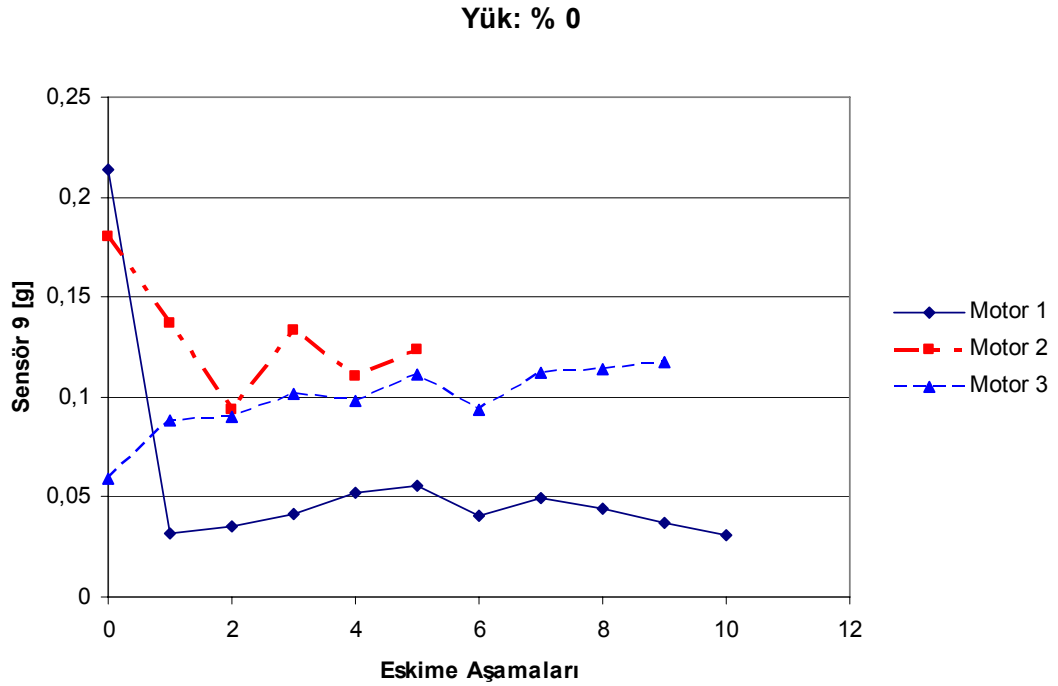


Şekil 5.2: % 100 yüklenme durumu için üç motora ilişkin I_y akımlarının etkin değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri



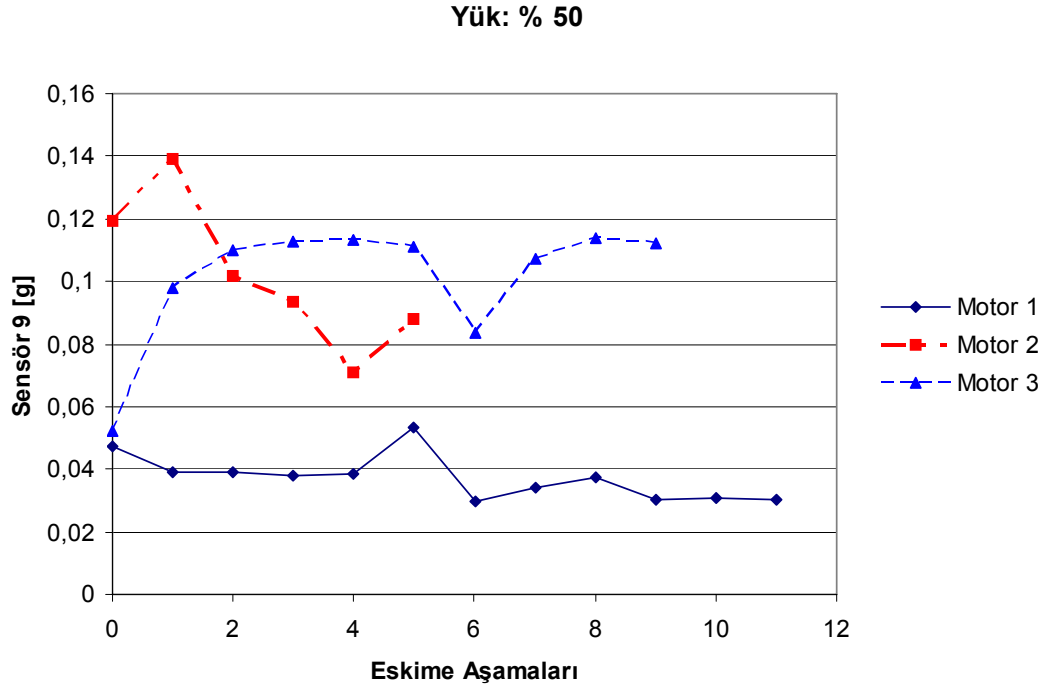
Şekil 5.3: % 100 yüklenme durumu için üç motora ilişkin I_z akımlarının etkin değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri

Farklı yüklenme koşulları için denenen üç motor arasından Şekil 5.1’de verilen, % 100 yüklenme durumu için motor 1’e ilişkin I_x akımının etkin değerinin yaşlanma aşamaları boyunca değişimi, eskime boyunca stator yalıtım direncinin azalması sonucu akımın artışıdaki izlediği değişim de dikkate alınarak en güvenilir değişim olarak seçilmiştir.

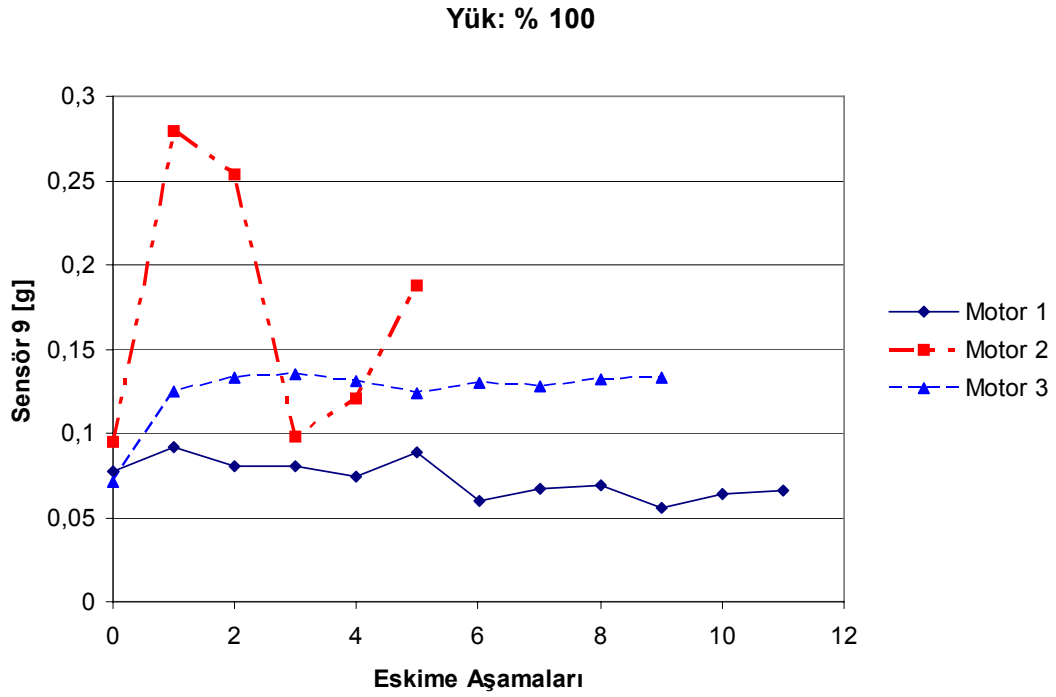


Şekil 5.4: Boşta çalışma durumu için üç motora ilişkin Sensör 9’den alınan titreşim değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri

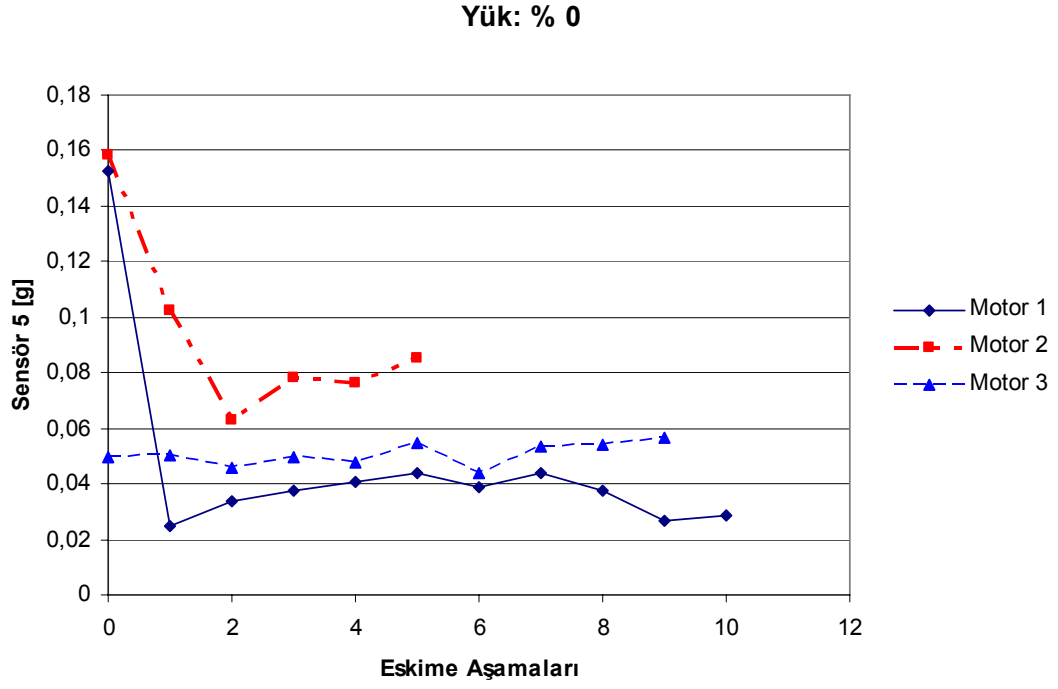
Ayrıca bu çalışmada motor titreşim işaretleri de motorların farklı yüklenme koşulları için motor üzerindeki değişik ivmeölçerlerden alınmıştır. Şekil 5.4’den Şekil 5.6’ya kadar olan şekillerde motorların boşta, % 50 ve % 100 yüklenme durumları için, motorların yüke bağlandığı taraftaki 9 numaralı titreşim sensöründen alınan titreşim işaretlerinin her bir eskime süreci sonunda aldığı değerlerin değişimleri sunulmaktadır.



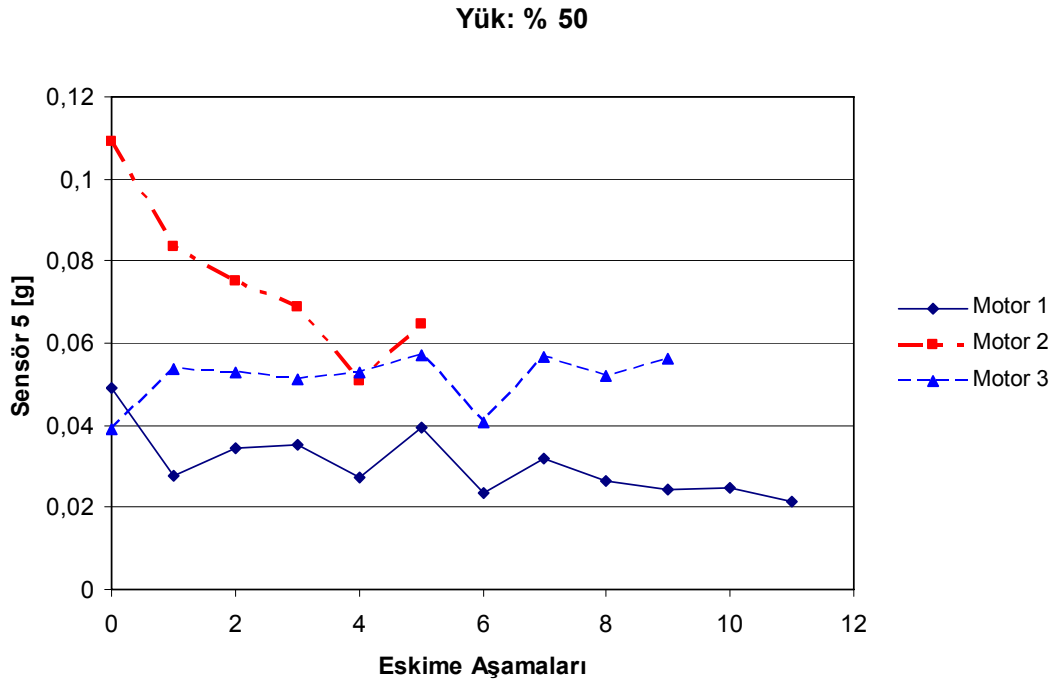
Şekil 5.5: % 50 yüklenme durumu için üç motora ilişkin Sensör 9’den alınan titreşim değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri



Şekil 5.6: % 100 yüklenme durumu için üç motora ilişkin Sensör 9’den alınan titreşim değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri

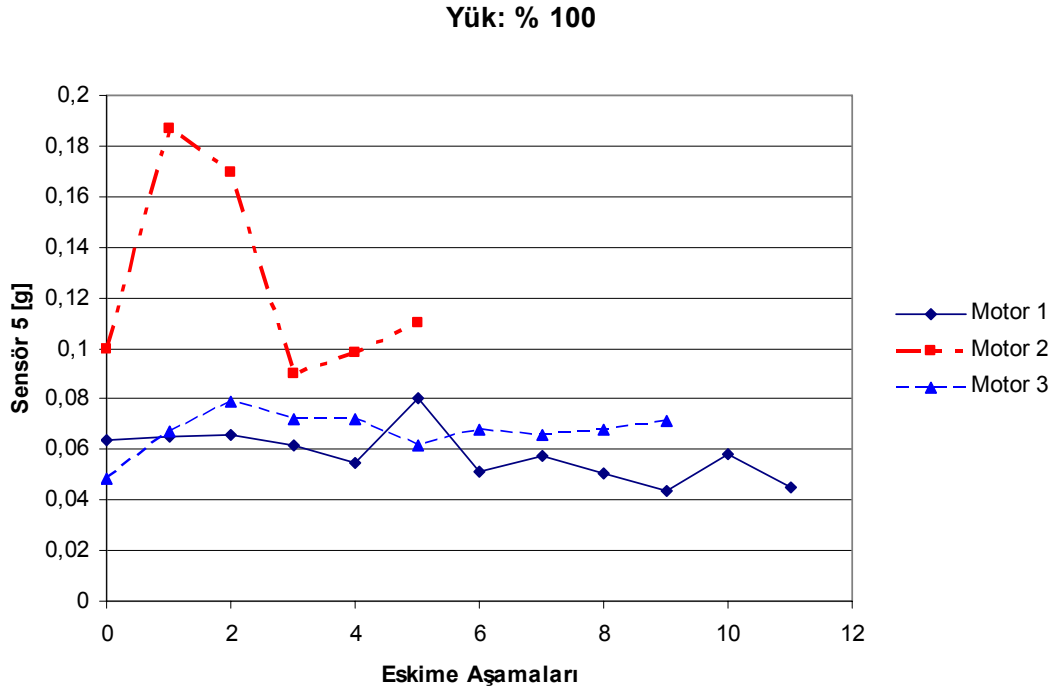


Şekil 5.7: Boşta çalışma durumu için üç motora ilişkin Sensör 5'ten alınan titreşim değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri



Şekil 5.8: % 50 yüklenme durumu için üç motora ilişkin Sensör 5'ten alınan titreşim değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri

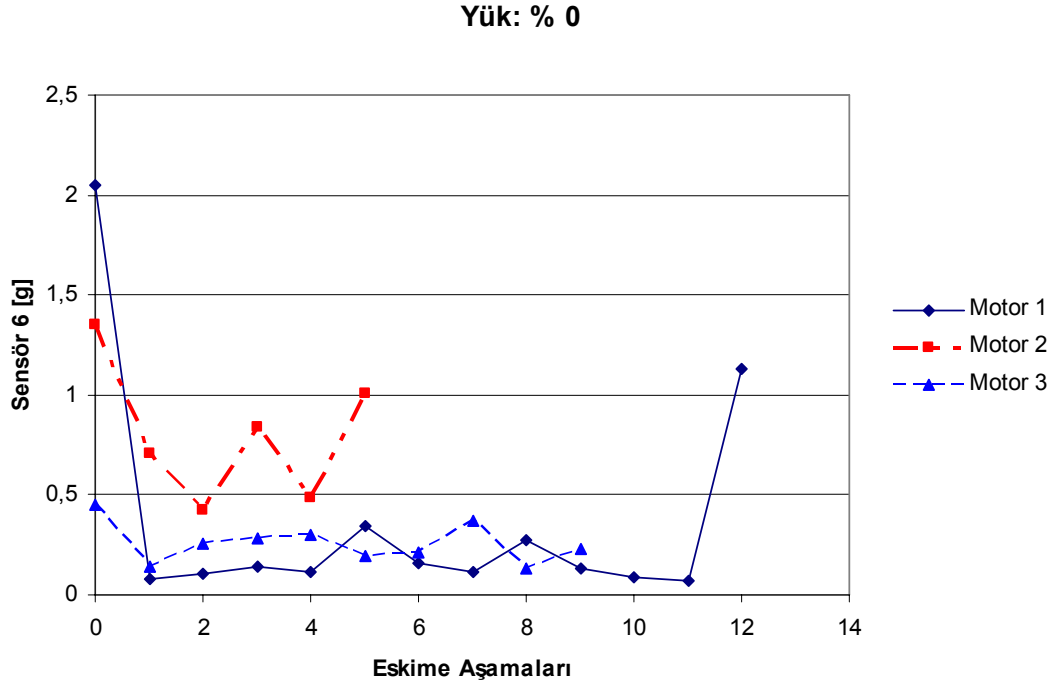
Şekil 5.7’den Şekil 5.9’a kadar olan şekillerde ise yine her üç motorun boşa, % 50 ve % 100 yüklenme durumu için, motorun gövdesinde yer alan 5 numaralı titreşim sensöründen alınan titreşim işaretlerinin her bir eskime süreci sonunda aldığı değerlerin değişimleri sunulmaktadır. Bu sensörden elde edilen titreşim işaretlerinin 9 numaralı sensörden daha düşük değerler aldığı görülmektedir.



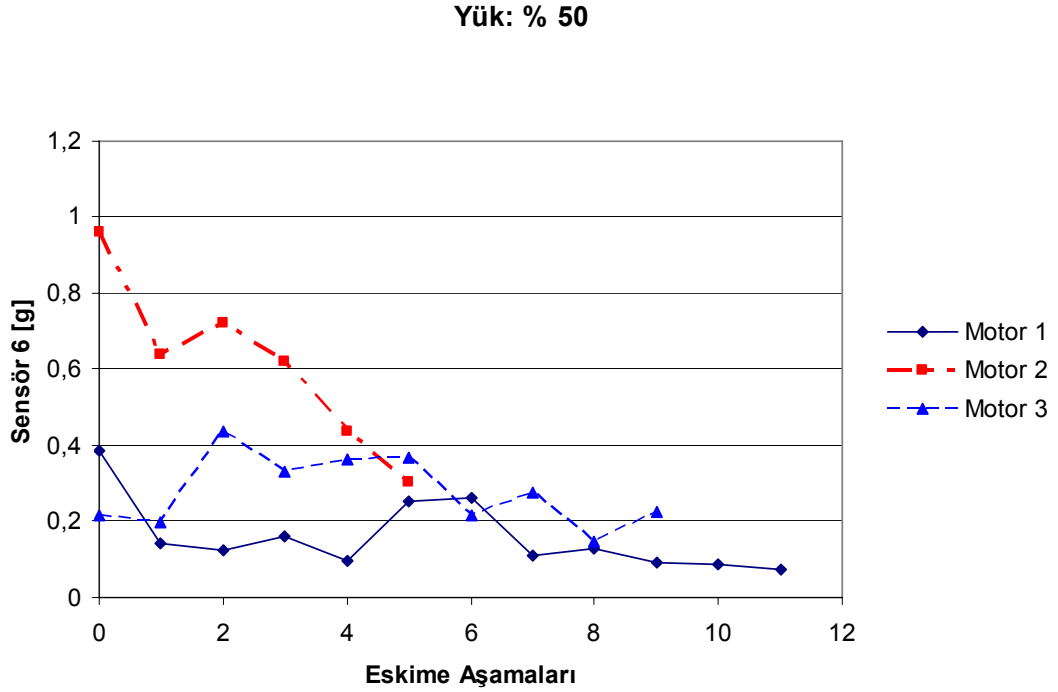
Şekil 5.9: % 100 yüklenme durumu için üç motora ilişkin Sensör 5’ten alınan titreşim değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri

Motorların fan tarafında, eksenel yöndeki 6 numaralı titreşim sensöründen alınan ve Şekil 5.10’dan Şekil 5.12’ye kadar olan şekillerde sunulmaktadır.

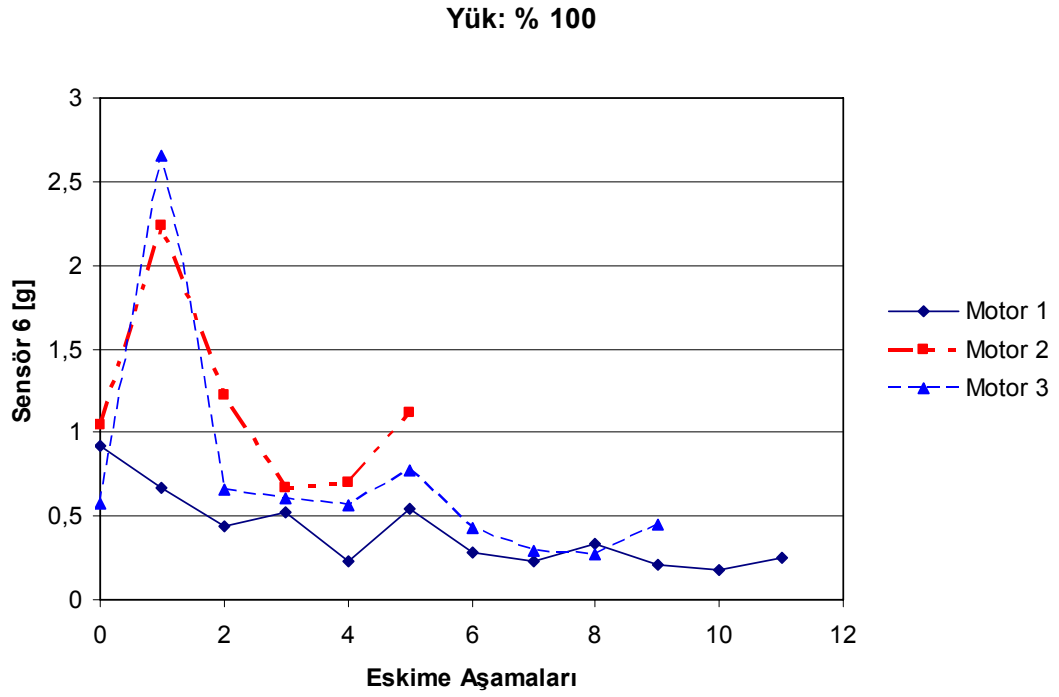
Her bir eskime aşaması sonucunda, motorların değişik yüklenme koşullarında yüklenmesi sonucunda elde edilen sadece motor akımları veya titreşim işaretleri üzerinde spektral analiz yöntemleri uygulanmasına karar verilmiştir.



Şekil 5.10: Boşta çalışma durumu için üç motora ilişkin Sensör 6'dan alınan titreşim değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri



Şekil 5.11: % 50 yüklenme durumu için üç motora ilişkin Sensör 6'dan alınan titreşim değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri



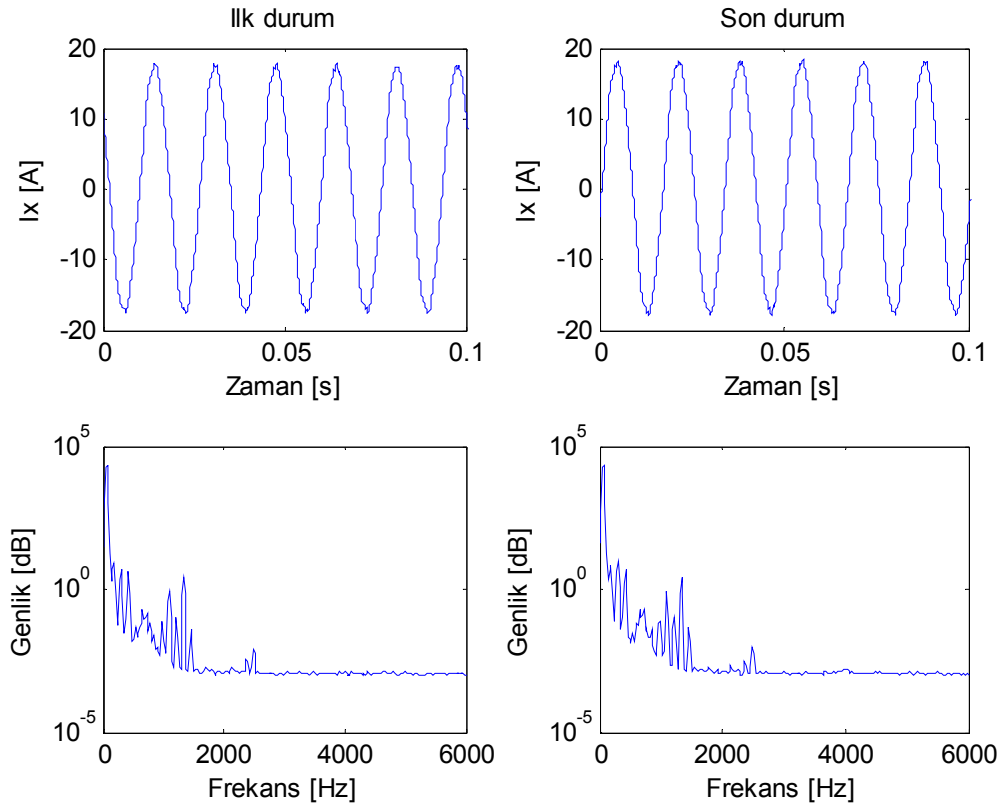
Şekil 5.12: % 100 yüklenme durumu için üç motora ilişkin Sensör 6'dan alınan titreşim değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri

Bu çalışmada motor üzerindeki değişik ivmeölçerlerden alınan motor titreşim işaretleri ve motorun faz akımları kullanılarak akım-titreşim çapraz ilişki fonksiyonları (koherens fonksiyonları) incelenmiş ve bu değişimler Bölüm 6'da sunulmuştur.

6. SPEKTRAL VE DALGACIK ANALİZİ İLE ASENKRON MOTOR STATOR YALITIMI BOZULMA ÖZELLİKLERİNİN ÇIKARTILMASI

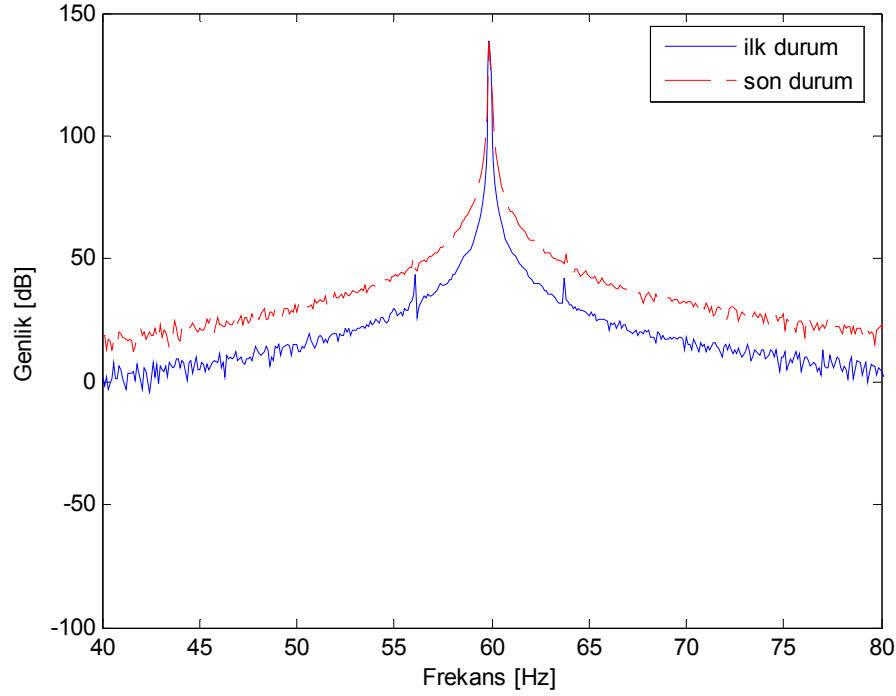
6.1 Akım İşaretlerinin Analizi

Bu bölümde yapılan analizlerde stator sargısı yalıtımı yaşlandırma (eskime) deneylerine ilişkin verilerden en etkili sonuçları alabilmek amacıyla, en büyük yalıtım arızasının olacağı minimum direnç değerine karşılık gelen değer olan akımın etkin değerinin en yüksek ölçüldüğü değer olan 10. aşamadaki akım değeri, başlangıç akımıyla karşılaştırılmıştır. Analizler 1 numaralı motorun % 100 yüklenme durumunda, I_x akımı ile yapılmıştır.



Şekil 6.1: Motor 1'in % 100 yüklenme durumunda ilk ve eskimiş durumlarına ilişkin I_x akımı dalga şekilleri ve bunların frekans dağılımları

Şekil 6.1’de sunulan I_x faz akımının zaman domenindeki anlık değer değişimleri ve ve logaritmik eksenle çizdirilmiş frekans dağılımları arasında yapılan karşılaştırma sonucunda, iki durum arasında bir fark görülmemiştir. Karşılaştırmayı daha dar bir frekans aralığında yapmak üzere, 40–80 Hz aralığında 60 Hz şebeke frekansı civarında karşılaştırma yapılmış ve Şekil 6.2’deki grafik elde edilmiştir. Bu durumda sistemin enerjisinde bozulmayla birlikte bir artış gözlenir.

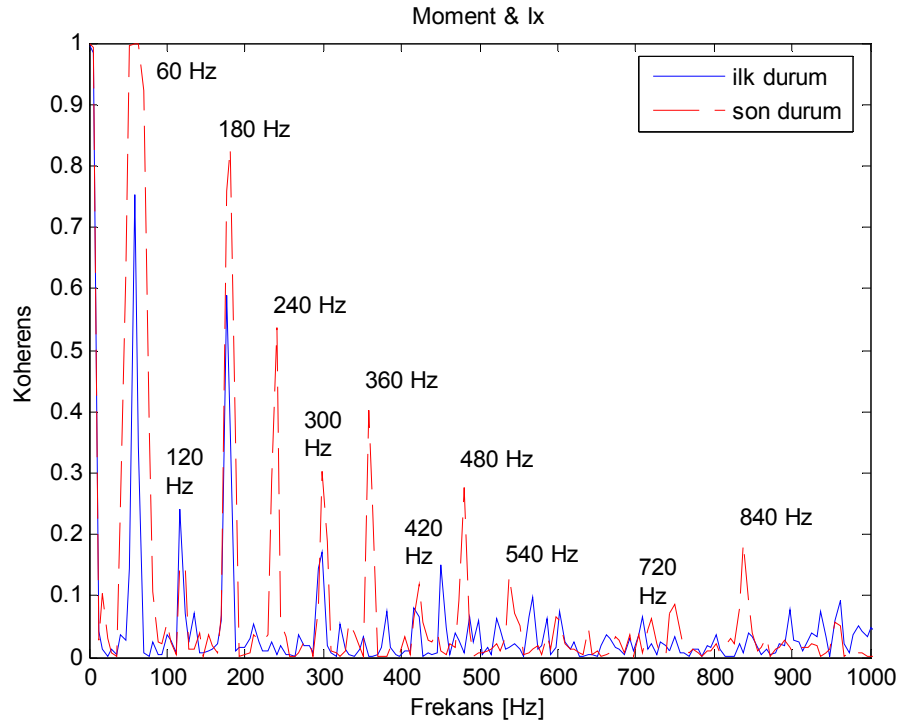


Şekil 6.2: Motor 1’in % 100 yüklenme durumunda ilk ve eskimiş durumlarına ilişkin I_x akımı genliğinin 60 Hz civarındaki frekans aralığında değişimi

Akım işareti frekans domeninde incelenmiş ve yalıtım arıza özelliklerinin belirlenmesine yönelik karakteristik frekanslar belirlenmiştir. Bu amaçla, sağlam ve eskimiş motorlardan alınan akım işaretlerinin 60 Hz civarındaki frekans değişimi incelenmiş, ilk durum ve eskimiş durum arasında işaretin enerjisinde artış gözlenmiştir. Şekil 6.2’de bu enerjinin ilk durumdan 10. eskitme aşamasına kadar artmış olduğu ve eskimenin etkisi görülmektedir. Burada yaşlanmanın etkisi olarak frekans dağılımında belirgin bir değişiklik görülememiştir. Şekil 6.2’de görülen enerji artışı özellik çıkartımı bakımından yeterli bir özellik olarak görülmemektedir.

6.2 Akım-Moment ve Akım-Titreşim İşaretlerinin Analizi

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 6.3'te görüldüğü üzere, ilk ve eskimiş durumlara ilişkin karakteristik frekans değerleri elde edilmiştir. Burada 60 Hz şebeke frekansına göre 120, 240, 360, 480, 720, 840 Hz frekanslı çift harmonikler ve 180, 300, 420, 540 Hz frekanslarında ise şebekeden kaynaklandığı düşünülen tek harmonikler gözlenmiştir.

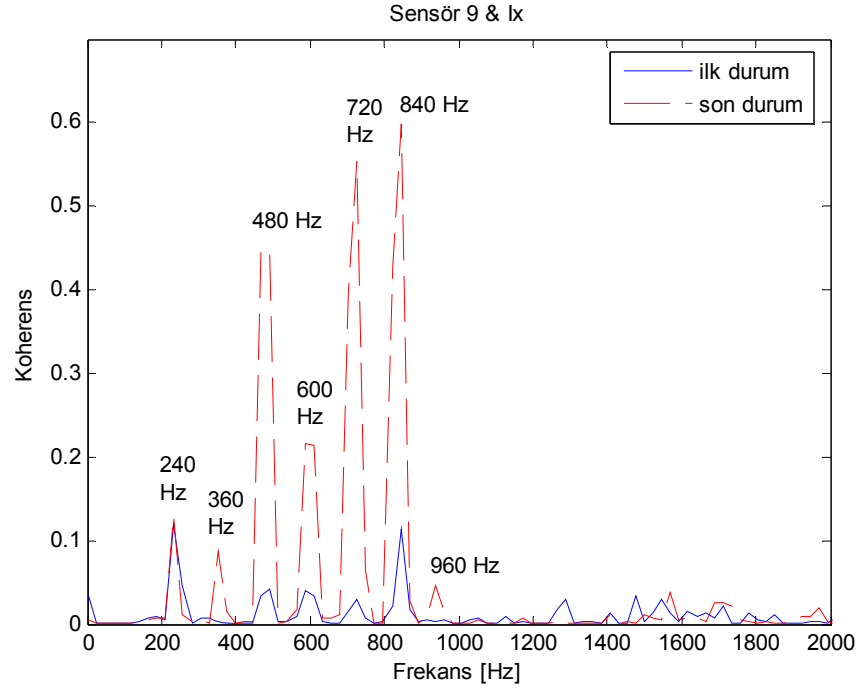


Şekil 6.3: İlk ve eskimiş (son durum) durumlar arasındaki akım-moment değişiminin koherensi

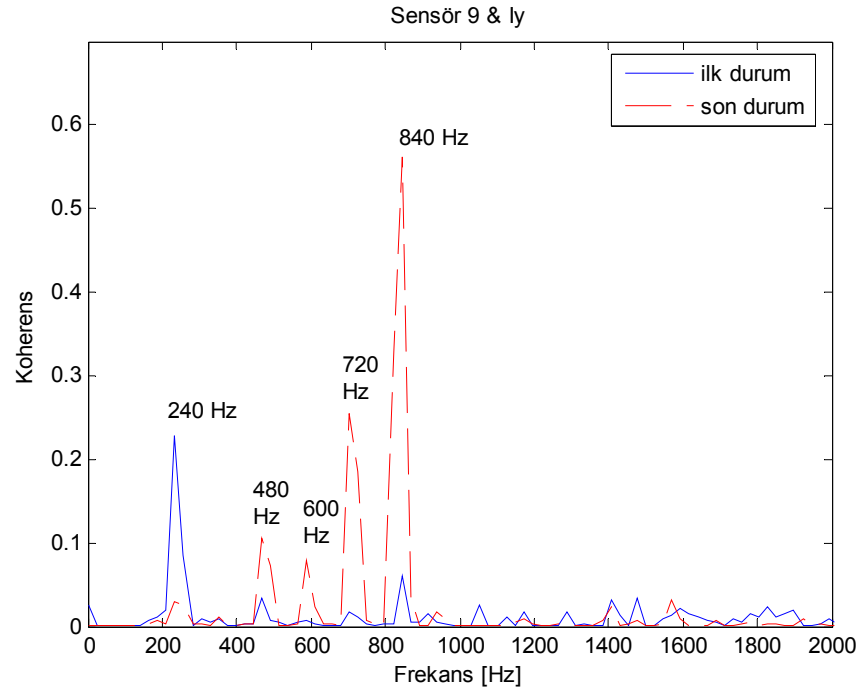
Daha sonra ilk ve eskimiş durumda 1 numaralı motor akımlarının değişimleri ile ilgili deney verilerine, titreşim işaretleri de gözönüne alınarak, koherens tekniği uygulanmıştır. Buradan ilk ve eskimiş durumlar arasındaki bazı frekans bileşenlerinin karakteristik değerleri belirlenmiştir. Burada anlamlı olan frekanslar 120, 240, 480, 720, 840 ve 960 Hz gibi çift harmonikler olarak ortaya çıkmıştır.

Moment- I_x akımı arasındaki koherens analizinden elde edilen sonuçların doğrulanması açısından titreşim-akım koherens analizine de bakılacak olursa, burada

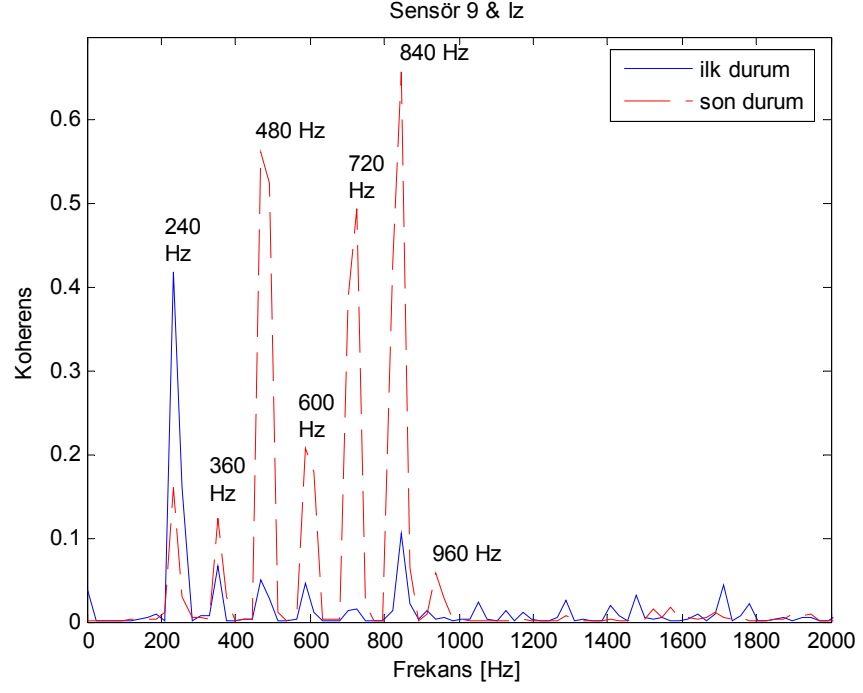
da çift harmoniklerin önem kazandığı görülmektedir.



(a)



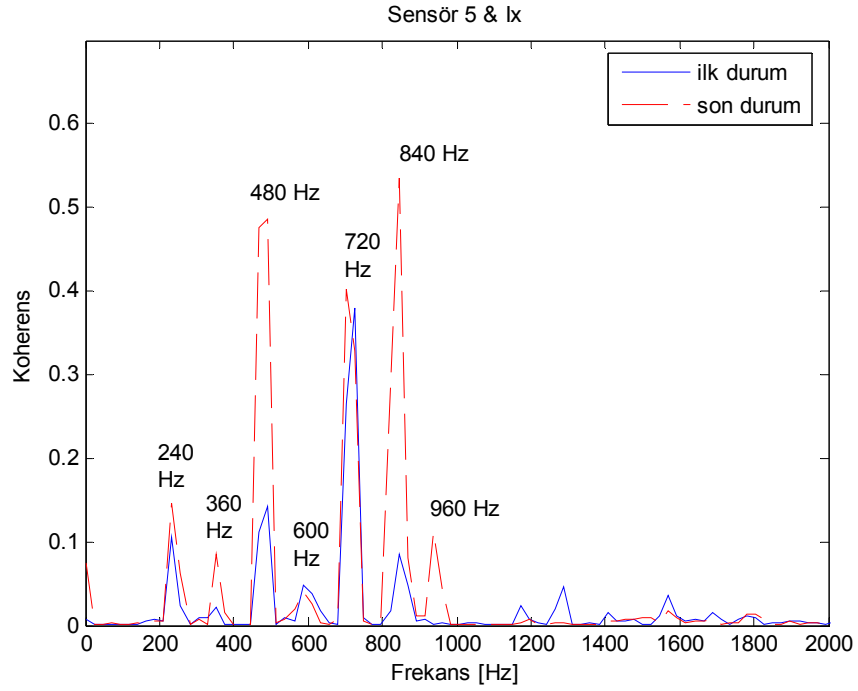
(b)



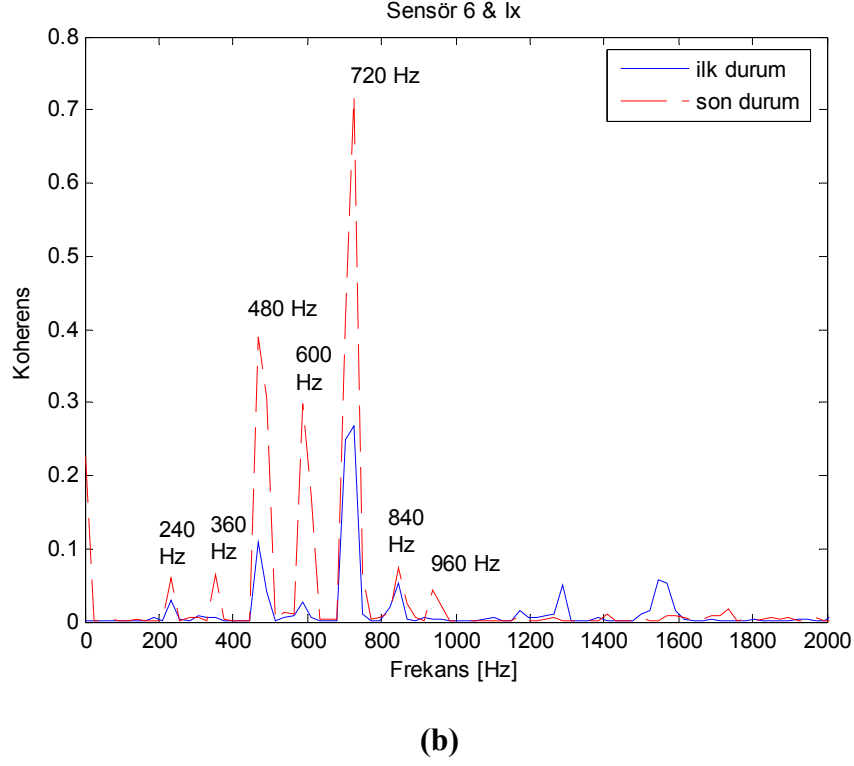
(c)

Şekil 6.4: İlk ve eskimiş yalıtım durumları için 0-2000 Hz aralığında akım ve titreşim işaretleri arasındaki koherens

a) I_x ve Sensör 9; b) I_y ve Sensör 9; c) I_z ve Sensör 9.



(a)

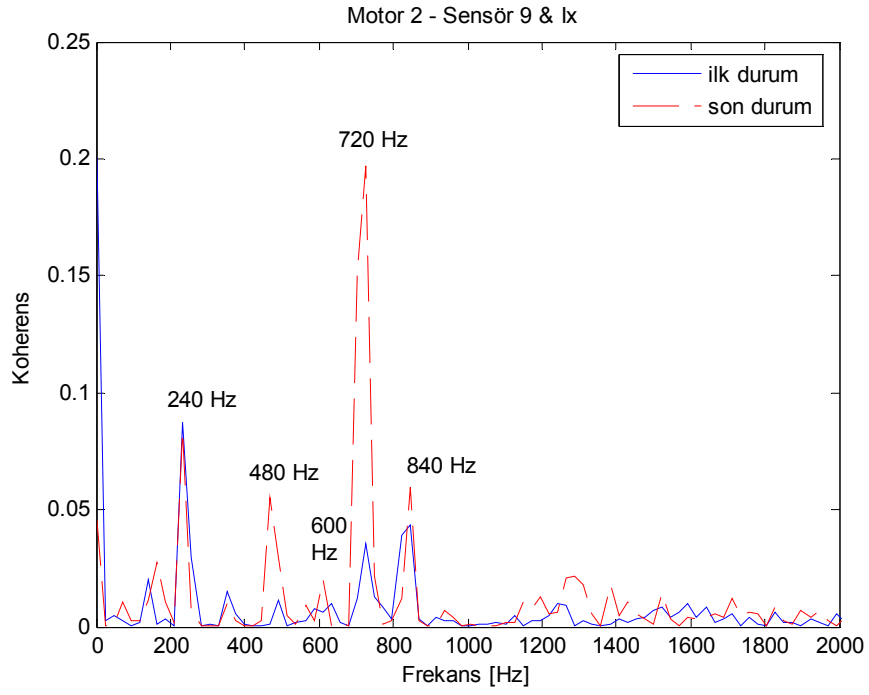


Şekil 6.5: Motor 1'e ilişkin % 100 yüklenme durumu için ilk ve eskimiş durumlar arasındaki akım-titreşim işaretlerinin koherensi. a) I_x ve Sensör 5; b) I_x ve Sensör 6.

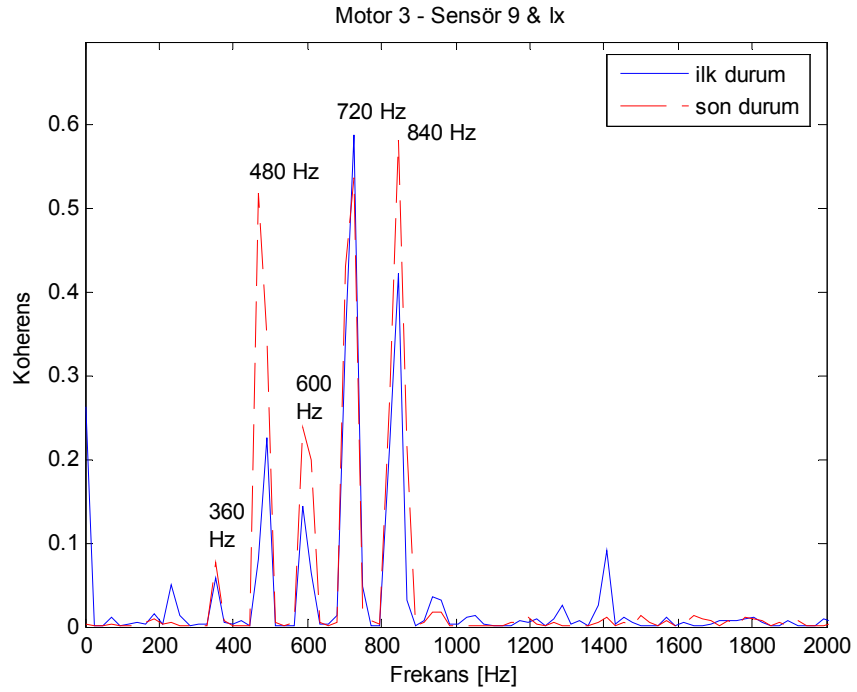
Motor 1'in yük tarafındaki 9 numaralı sensöründen alınan titreşim işareti ile I_x , I_y ve I_z faz akımları arasındaki koherensler Şekil 6.4'te verilmiştir.

Daha sonra 1 numaralı motorun I_x faz akımı baz alınarak, gövde üzerinde yer alan 5 numaralı sensöründen ve mil tarafında bulunan eksenel yöndeki 6 numaralı sensöründen alınan titreşim işaretleri ile I_x faz akımı arasındaki değişimler hesaplanmış ve Şekil 6.5'de verilmiştir. Bu değişimlerin sonucunda da çift harmoniklerin eskime ile değişimleri gösterilmiştir.

Motor 1 için yapılan incelemeler sonucunda elde edilen sonuçların karşılaştırılması bakımından, Motor 2 ve Motor 3'e ilişkin I_x akımları ve Sensör 9 arasındaki koherens değişimleri incelenmiş ve Şekil 6.6'da sunulmuştur.



(a)

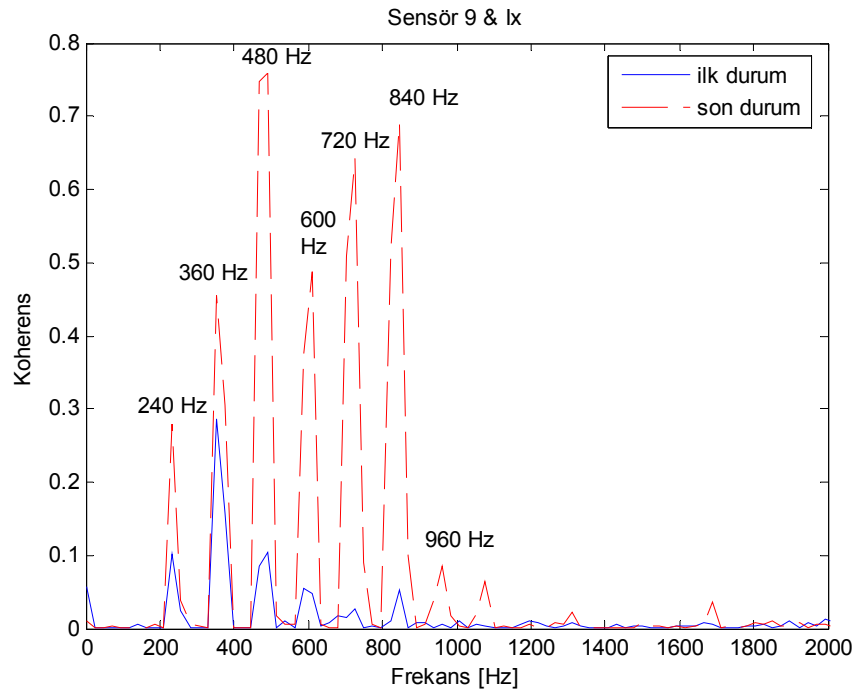


(b)

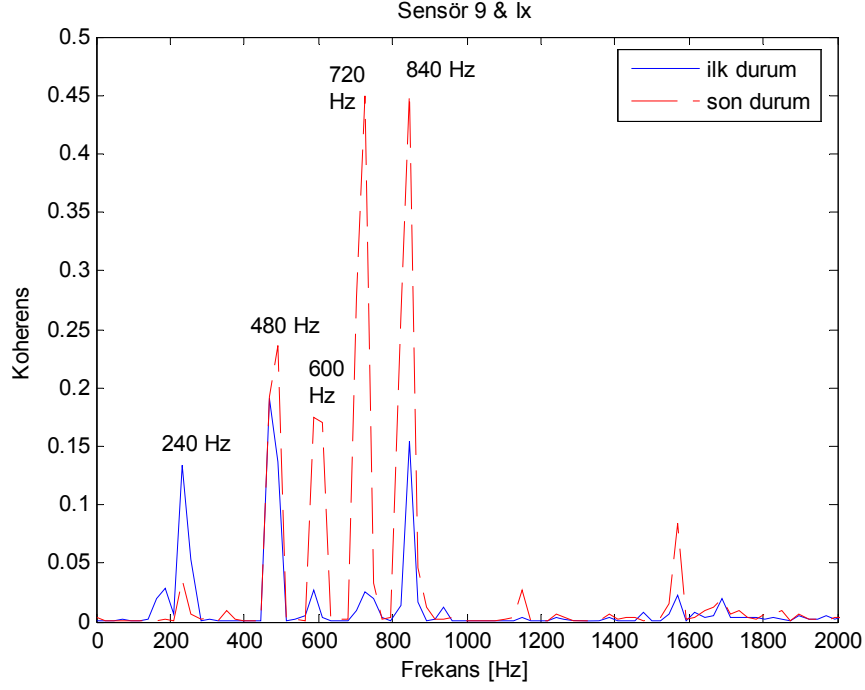
Şekil 6.6: İlk ve eskimiş yalıtım durumları için 0-2000 Hz aralığında akım ve titreşim işaretleri arasındaki koherens. a) Motor 2; b) Motor 3.

Böylece % 100 yüklenmiş olan 1 numaralı motora ait I_x faz akımı bilgisi ve 9 numaralı sensörden alınan titreşim bilgisi arasından çıkarılan özellikler aynı motora ilişkin diğer faz akımları, Sensör 6 ve Sensör 5 ile yapılan analizlerle de doğrulanmıştır. Bu sonuçlar aynı özelliklerde olan ve aynı koşullarda deneye tabi tutulan diğer iki motora ait I_x akımı ile Sensör 9 arasındaki koherens analizinden de gösterilmiştir.

Bu çalışmaların en sonunda 1 numaralı motorun % 50 yüklenme durumu için de Şekil 6.7’de sunulan şekilde, Sensör 9 ile I_x akımı arasındaki koherens analizi de yapılmış ve % 100 yüklenme durumu için elde edilen çıkarımları destekleyici sonuçlar elde edilmiştir.



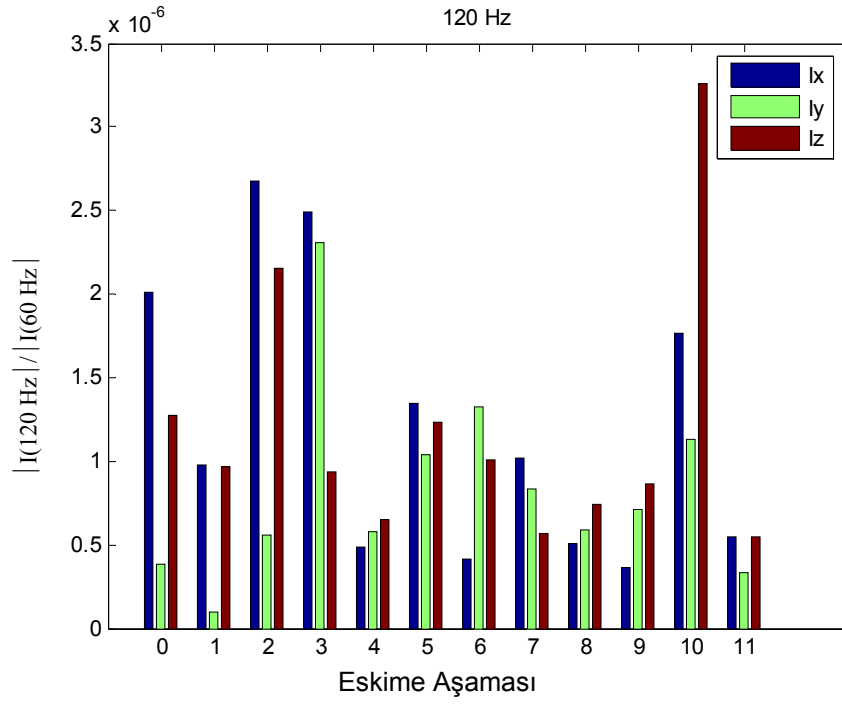
Şekil 6.7: Motor 1'in % 50 yüklenme durumu için ilk ve eskimiş durumlar arasındaki I_x akımı ile Sensör 9'dan alınan titreşim işaretleri arasındaki koherens



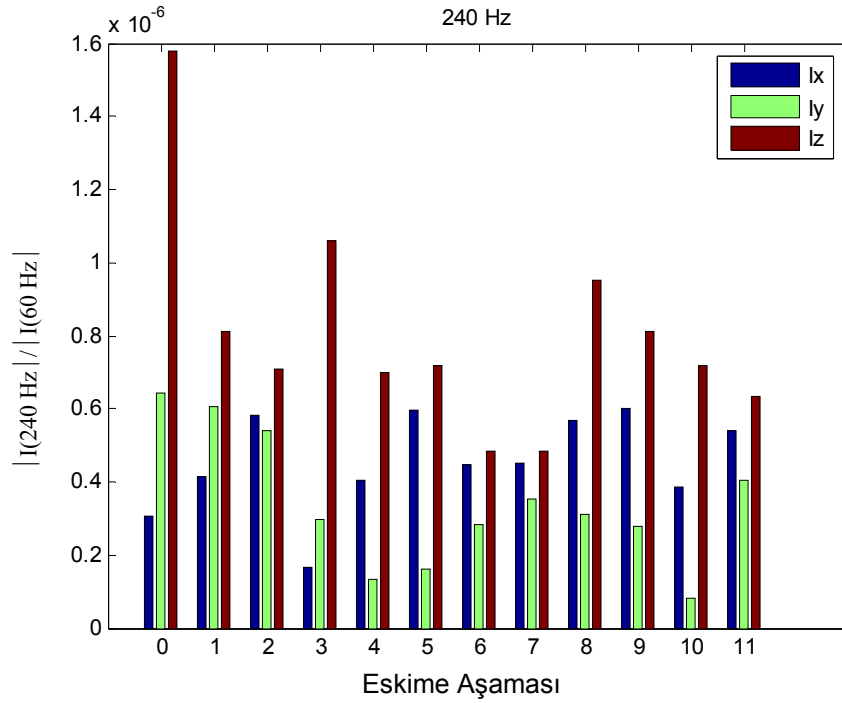
Şekil 6.8: Motor 1'in % 115 yüklenme durumu için ilk ve eskimiş durumlar arasındaki I_x akımı ile Sensör 9'dan alınan titreşim işaretleri arasındaki koherens

6.3 Stator Yalıtım Bozulmasına İlişkin Olarak Yaşlanma Süreçleri ile Çift Harmonik Değerlerinin Değişimi

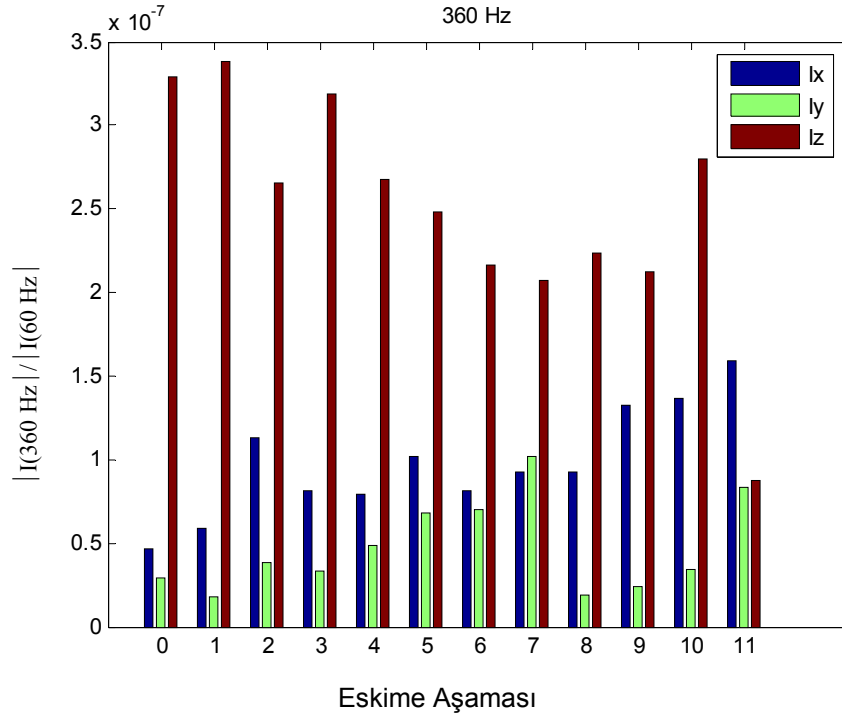
Her yaşlanma (eskime) aşamasına ilişkin olarak çift harmoniklerin 240, 360, 480, 600, 720 ve 840 Hz frekans değerlerinde ortaya çıkan özelliklerin aşama aşama nasıl değiştiği belirlenip, bu frekans bileşenlerinin 60 Hz'deki genlik değerlerine oranı şeklinde hesaplanmış ve Güç Spektrumu Yoğunluğu (GSY) hesabında bu bağlı değişimler Şekil 6.9'dan Şekil 6.16'ya kadar olan şekillerde sunulmuştur. Bu çalışma 1 numaralı motorun % 100 yüklenme durumu için ve üç faz akımları dikkate alınarak yapılmıştır.



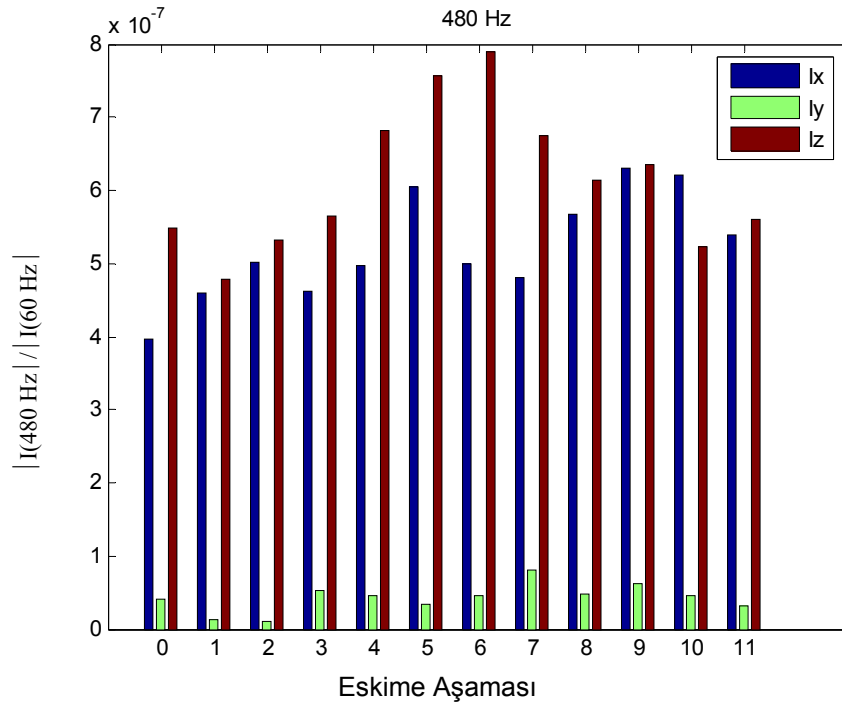
Şekil 6.9: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 120 Hz’lik bileşenin 60 Hz’e göre bağlı değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri.



Şekil 6.10: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 240 Hz’lik bileşenin 60 Hz’e göre bağlı değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri.



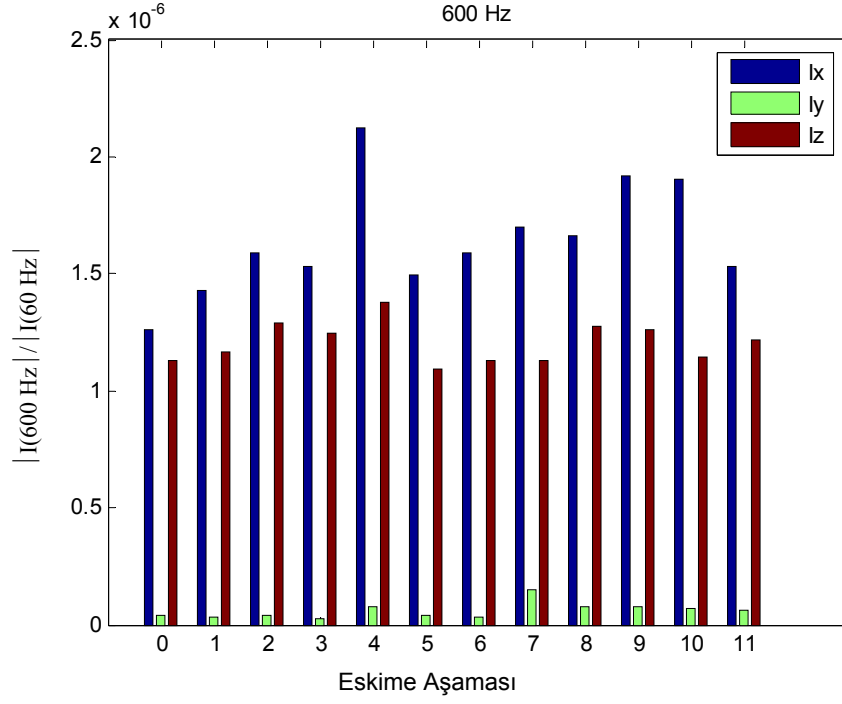
Şekil 6.11: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 360 Hz’lik bileşenin 60 Hz’e göre bağlı değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri.



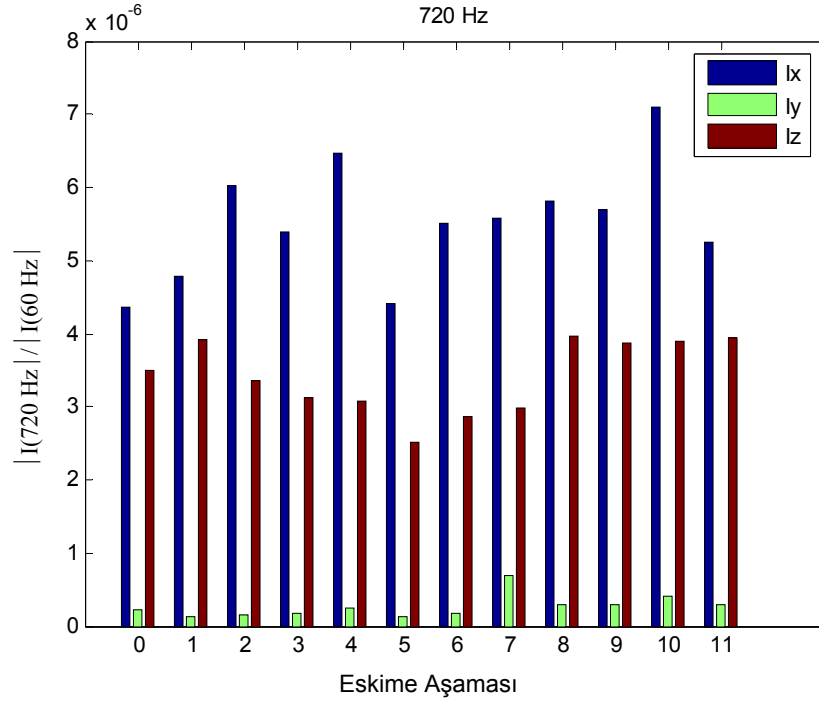
Şekil 6.12: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 480 Hz’lik bileşenin 60 Hz’e göre bağlı değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri

Şekil 6.9’dan Şekil 6.16’ya kadar olan şekillerden görüldüğü gibi çift harmonik değerlerindeki bağlı genlik değişimlerinde her eskime aşamasında, fazlar arasında

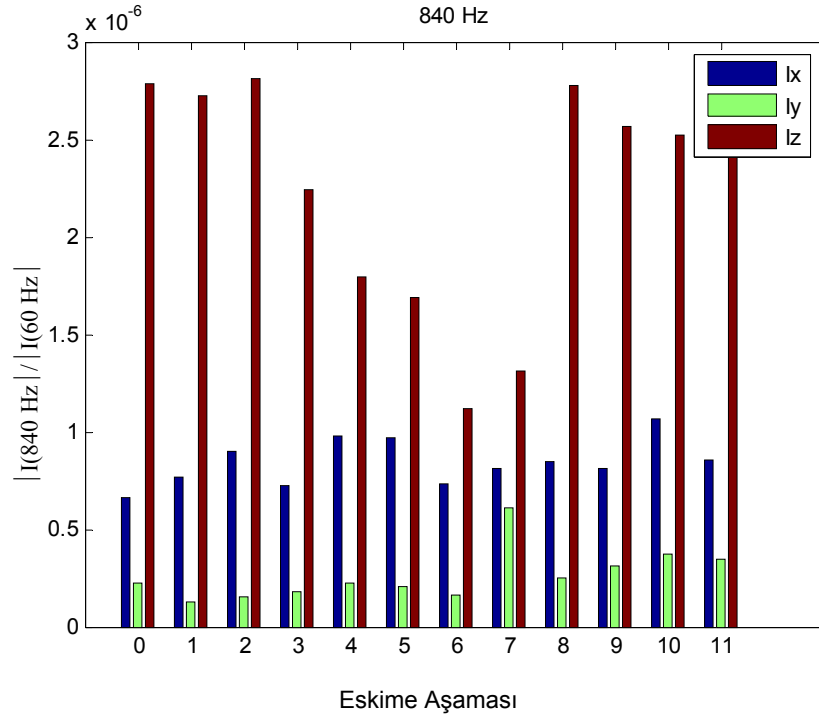
denge-sizlikler görölmektedir. Bu denge-sizlikler özellikle 480 Hz – 720 Hz arasında çok büyük farklar şeklinde ortaya çıkmaktadır.



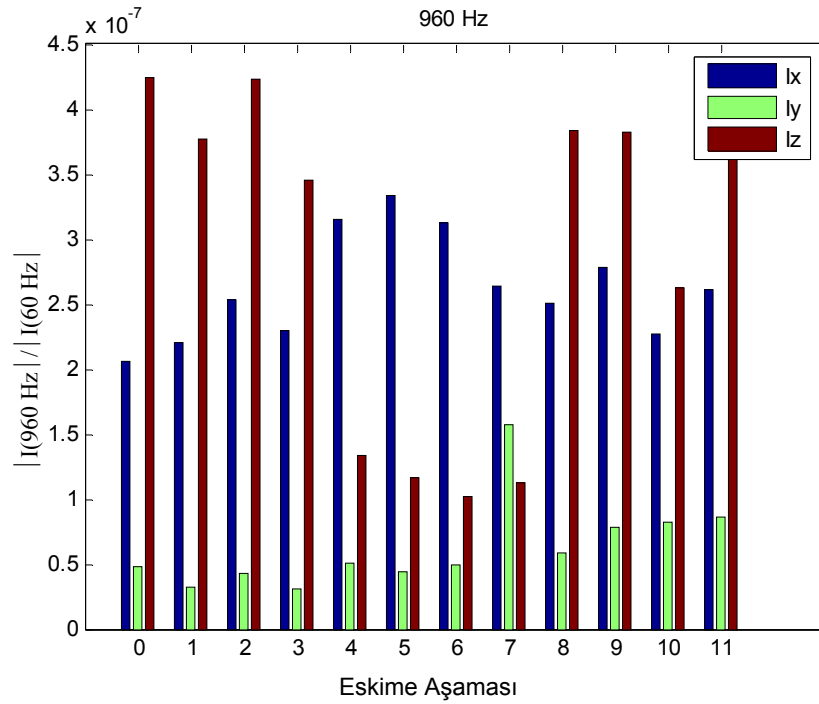
Şekil 6.13: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 600 Hz’lik bileşenin 60 Hz’e göre bağıl değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri



Şekil 6.14: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 720 Hz’lik bileşenin 60 Hz’e göre bağıl değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri



Şekil 6.15: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 840 Hz’lik bileşenin 60 Hz’e göre bağlı değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri

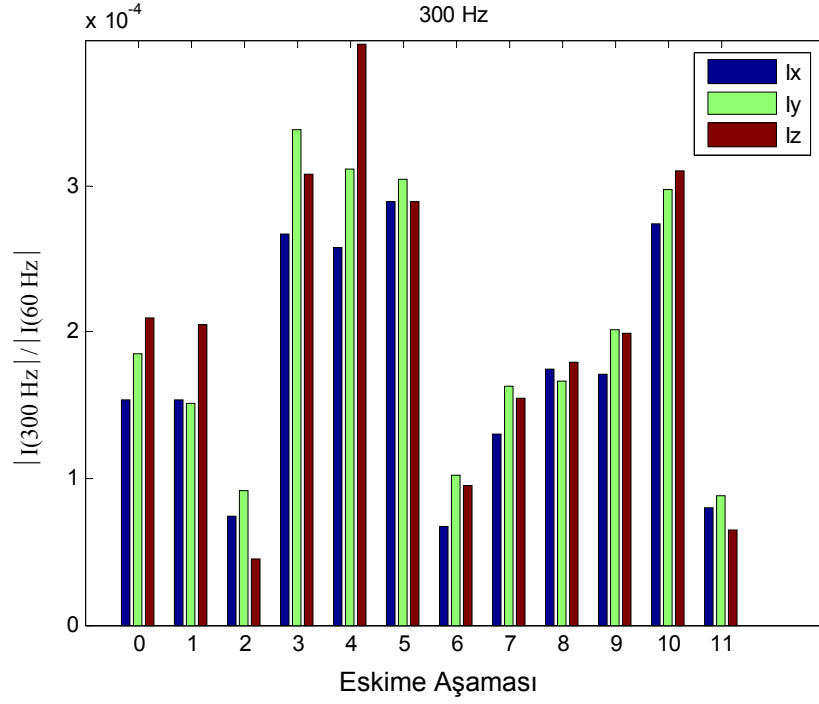


Şekil 6.16: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 960 Hz’lik bileşenin 60 Hz’e göre bağlı değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri

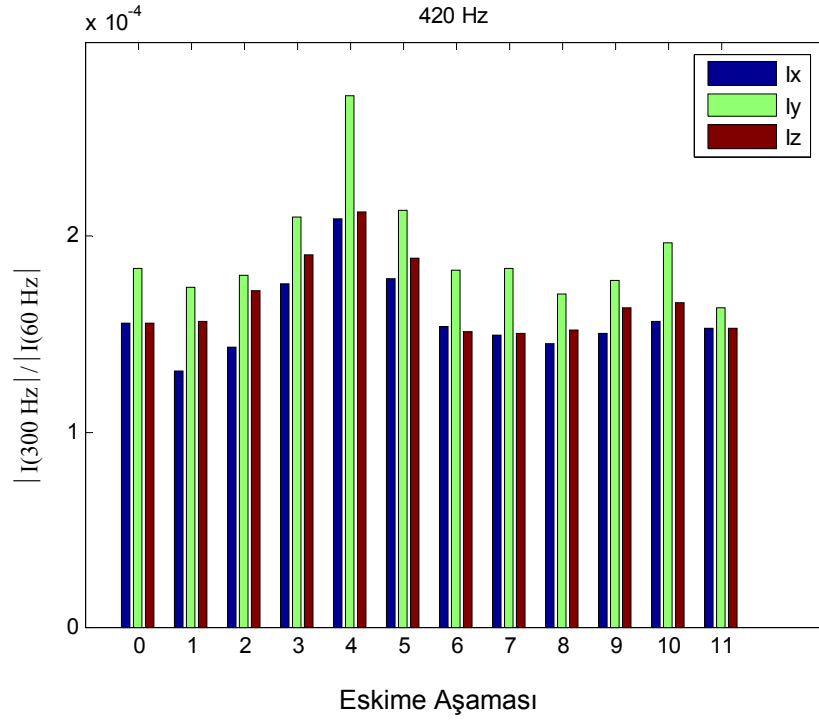
Karşılaştırma bakımından 60 Hz’e göre tek harmoniklerin değerleri de Şekil 6.17 ve Şekil 6.18’de verilmiştir (300 ve 420 Hz). Burada verilen sargı yalıtım arızasının

göstergesi olmayan tek harmonikler her üç fazda da birbiri ile uyumlu olarak değişmekte olup aralarında yüksek benzerlik bulunmaktadır.

Şekil 6.9 ve Şekil 6.18 arasındaki tek ve çift harmoniklere ilişkin faz akımlarının bağıl genlik değişimlerinin genel bir değerlendirmesi olarak, çift harmoniklerdeki dengesizliğin belirgin olduğu, buna karşılık tek harmoniklerde fazlar arasının daha dengeli olduğu sonucuna varılmaktadır. Bu da stator sarğı yalıtım arızasının bir göstergesi olarak verilmektedir.



Şekil 6.17: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 300 Hz lik bileşenin 60 Hz'e göre bağıl değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri



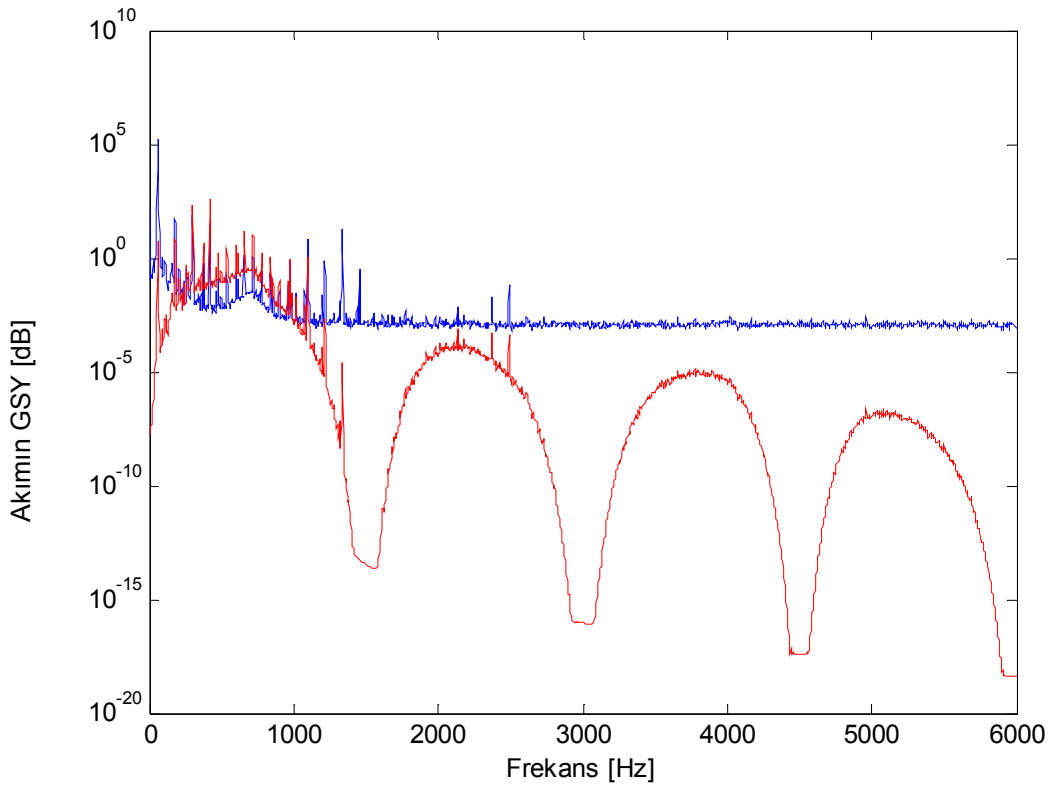
Şekil 6.18: I_x , I_y ve I_z akımlarının GSY hesabında 420 Hz lik bileşenin 60 Hz’e göre bağlı değerlerinin eskime aşamalarındaki değişimleri

6.4 Yalıtım Bozulmasının Dalgacık Analizi Yaklaşımı ile Doğrulanması

Yalıtım bozulmasının belirtisi, koherens analizi ile motor akım ve titreşim işaretleri arasında ortaya çıkan çift harmonikler şeklinde karakterize edildiğinden, 1 numaralı motora ilişkin I_x akımında 240-840 Hz arasında gözükten bu frekans değerlerini içeren yaklaşık 200-1000 Hz’lik bir frekans aralığındaki yine % 100 yüklenme durumu için I_x akımının dağılımındaki değişimi gözlemlemek için “*Sürekli Dalgacık Analizi*” kullanılmıştır.

Motorun faz akımlarının güç spektrumu yoğunluklarının hesaplanması sonucunda yapılan spektrum analizleri yalıtım bozulmasına ilişkin belirgin bir bilgi sağlayamamaktadır. Bu nedenle sadece akım bilgisi yerine, akım – titreşim çiftinin özellik çıkartmada daha çok bilgi içerdiği 6. bölümde yapılan analizler sonucu ortaya çıkartılmıştı. Bunun sonucunda bilgi çıkarımının sadece elektriksel büyüklükleri kullanmak yerine, akım ve titreşim gibi elektriksel ve mekanik özelliklerin beraber kullanımı ile sağlanabileceği gösterilmiştir. Ancak bu çapraz ilişkinin (akım – titreşim ilişkisi) ortaya çıkarttığı çift harmonik etkisini gözönünde tutarak, akımlara ilişkin güç spektrumu yoğunluklarında çift harmonik genliklerinin 60 Hz’deki temel

bileşen genliğine göre hesaplanan bağıl genlik değişimleri, faz akımları arasındaki dengesizlik de yalıtım bozulmasının bir göstergesi olarak saptanmıştır. Stator yalıtımının akımlar vasıtasıyla, stator sargı yalıtım bozukluğunun bu şekilde belirlenmesi çift harmoniklerdeki değişim şeklinde ortaya çıkan bir ön bilgiyi gerekli kılmaktadır. Bu bakımdan elektriksel bir büyüklük olan faz akımı bilgisini kullanmak klasik spektral analiz yaklaşımları altında yeterli olmamaktadır. Bu bağlamda, Fourier dönüşümüne alternatif bir yöntem olan dalgacık analizi yaklaşımının da araştırmamızda elde edilen çıkarımların doğrulanması açısından kullanılması düşünülmüştür.

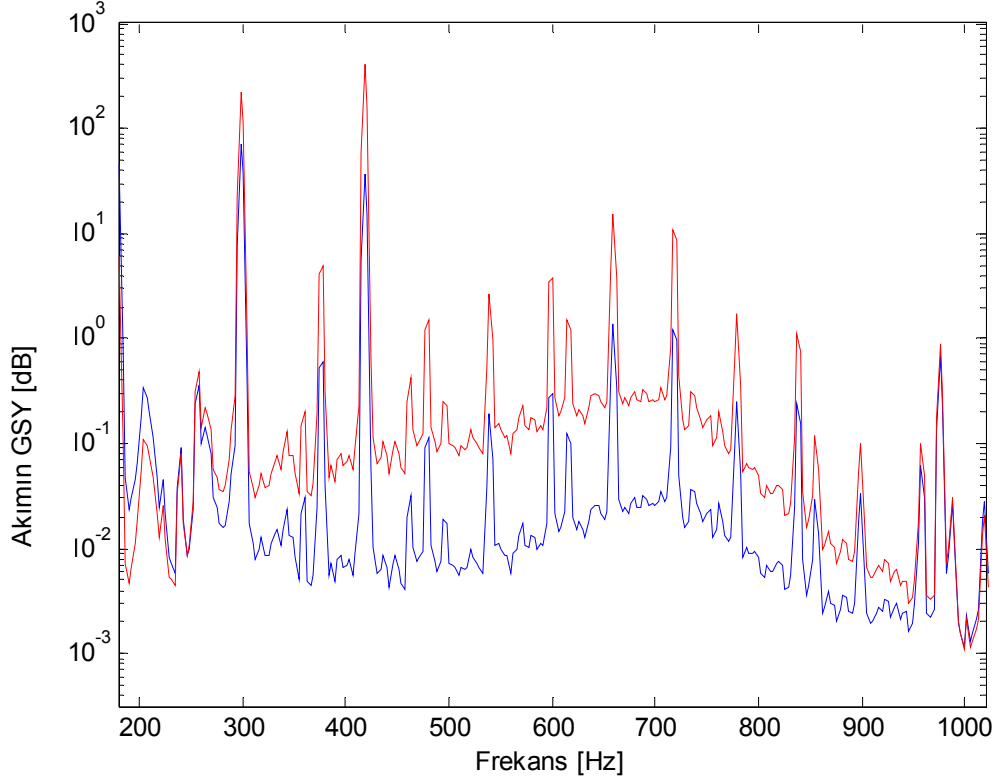


Şekil 6.19: SDD uygulaması sonucu elde edilen 5. ölçekteki işaretin GSY (kırmızı) ve akım GSY (mavi) frekansla değişiminin karşılaştırılması

Bu amaçla önce motorun bir fazına ilişkin olarak alınan (I_x) akım işaretinin Güç Spektrumu Yoğunluğu (GSY) hesaplanmıştır. Daha sonra aynı akım işaretinin sürekli dalgacık dönüşümü (SDD) ile 5 ayrı ölçek değerinde ayrıştırılması ile elde edilen 5. ölçek değerinin GSY değişimi hesaplanarak bu iki GSY yaklaşımı birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Buradaki 5. ölçek, frekans aralığı bakımından, 0–6000 Hz arasındaki toplam frekans aralığının 200–1000 Hz arasındaki alçak frekans

bölgesine karşı düşmektedir. Çünkü stator sargı yalıtım bozulmasını gösteren çift harmonik bileşenleri 240 Hz ile 960 Hz arasında değiştiği için bu frekans aralığına karşı düşen sürekli frekans bölgesi SDD uygulamasında 5. ölçekle 200 - 1000 Hz arasında gösterilmektedir. Buna ilişkin gösterim Şekil 6.19'daki gibidir.

Şekil 6.19'de verilen değişimler daha ayrıntılı olarak 200-1000 Hz arasında gösterilirse, iki işaret arasında enerji artışı Şekil 6.20'deki gibi görülür.



Şekil 6.20: SDD-uygulamasının 200–1000 Hz arasındaki değişimi

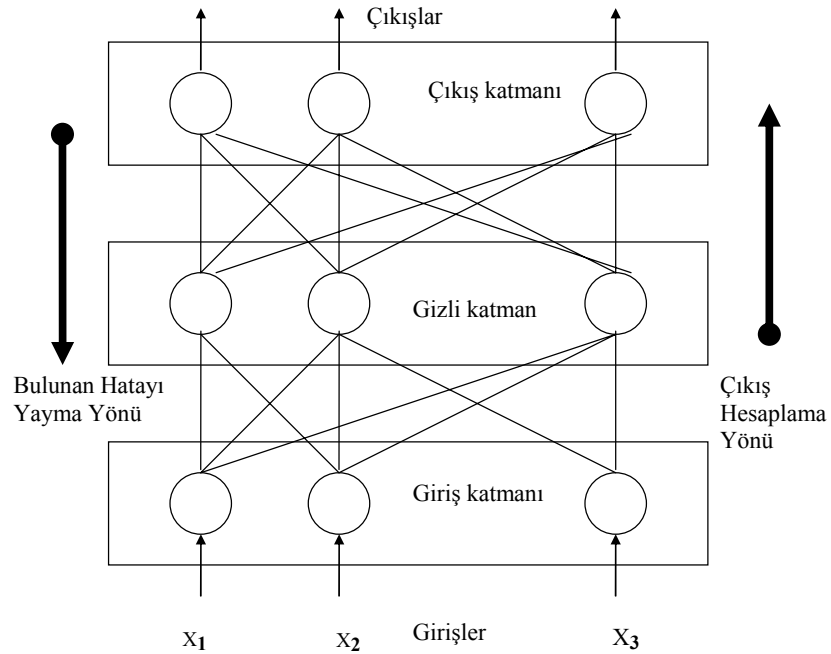
Sürekli dalgacık analizinin Fourier analizine göre üstün yanı olan, veri kaybı olmadan, istenen frekans aralığındaki bilginin analizine olanak tanınması sayesinde, yalıtım bozulmasının etkisi, gelişimine paralel olarak 240 - 960 Hz arasında sinyal enerjisindeki artış olarak ortaya çıkmıştır. Bu da koherens yaklaşımı ile ortaya çıkan 240–960 Hz frekans aralığındaki çift harmonik etkisini de kapsayan genel bir sinyal enerjisi artışıdır. Böylece bu frekans aralığındaki enerji artışı, çift harmoniklerin yalıtım bozukluğu ile olan ilişkisini de doğrulamaktadır.

7. YAPAY SİNİR AĞLARI İLE DURUM İZLEME

Bu bölümde, stator arıza tanısı için bir sanal arıza dedektörü gerçekleştirebilmek amacıyla yapılan yapay sinir ağı çalışmaları sunulmuştur.

7.1 YSA Modelinin Oluşturulması

Bu tez çalışmasının ana bölümlerinde stator yalıtım bozulmasına ilişkin olarak kullanılan koherens yaklaşımında, akım ve titreşim işaretleri arasındaki ilişki 0 – 1 arasında değer alan ve her biri belli bir frekansla temsil edilen genliklerle tanımlanmıştı. Bu tanımlama sonucunda stator sargı yalıtımı bozulması, sağlam ve bozuk durum karşılaştırmaları ile bazı özel frekanslardaki genlik değişimleri ile belirlenmişti.



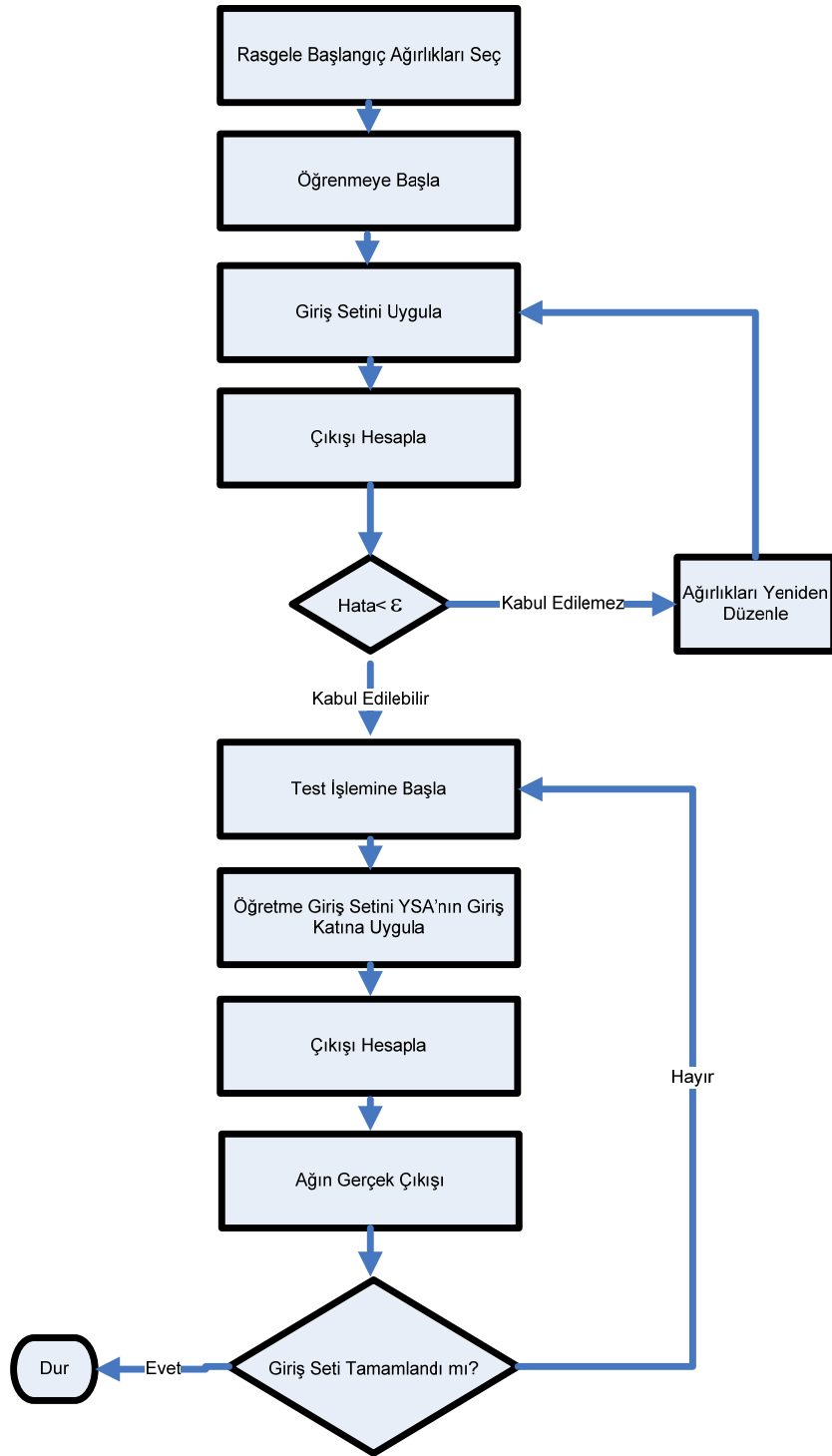
Şekil 7.1: İleri beslemeli kendinden birleşmeli YSA topolojisi

Stator yalıtım durumunun izlenmesi bakımından, sağlam ve bozuk durum karşılaştırması dışında diğer ara durumlar da göz önünde bulundurulabilir ve yapay sinir ağları ile durum izlemesi gerçekleştirilebilir. Bu nedenle çalışmanın bu bölümünde sağlam durum için elde edilen koherens verileri, bir YSA'ya öğretilerek, normal durumu öğrenen kendinden birleşmeli (auto-associative) YSA'nın anormal (bozuk) durumda çıkışında büyük hata değişimleri üretecek olması nedeniyle hatadaki değişimlerin gözlemlenmesinden bir durum saptaması yapılabilir.

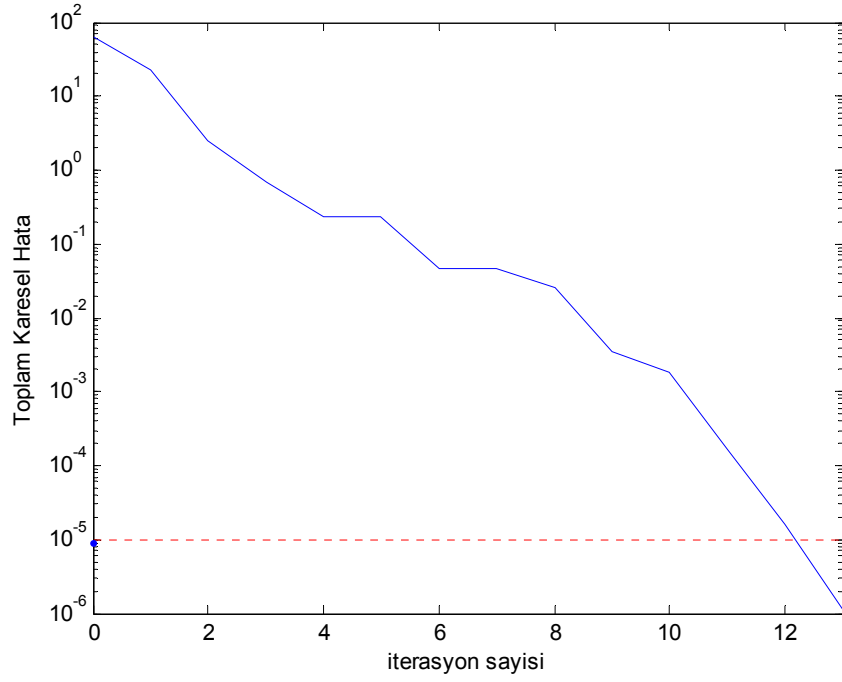
Genel anlamda N noktada hesaplanan koherens verileri için $N/2$ nokta içeren belli bir frekans aralığı için giriş - çıkış çifti olarak YSA kendinden birleşmeli yapıda oluşturulabilir. Bu şekildeki YSA yapısı Levenberg-Marquadt algoritmasına dayalı geriye yayılım algoritmasında oluşturulur. Şekil 7.1 bu tip bir yapının şematik görüntüsünü vermektedir.

YSA'nın eğitim ve sorgulama süreçleri akış diyagramı şeklinde Şekil 7.2'deki gibi verilmiş olup, koherens verilerinin 0 – 1 genlik değerlerini almasından dolayı ayrıca bir normalizasyon işlemine gerek duyulmamıştır.

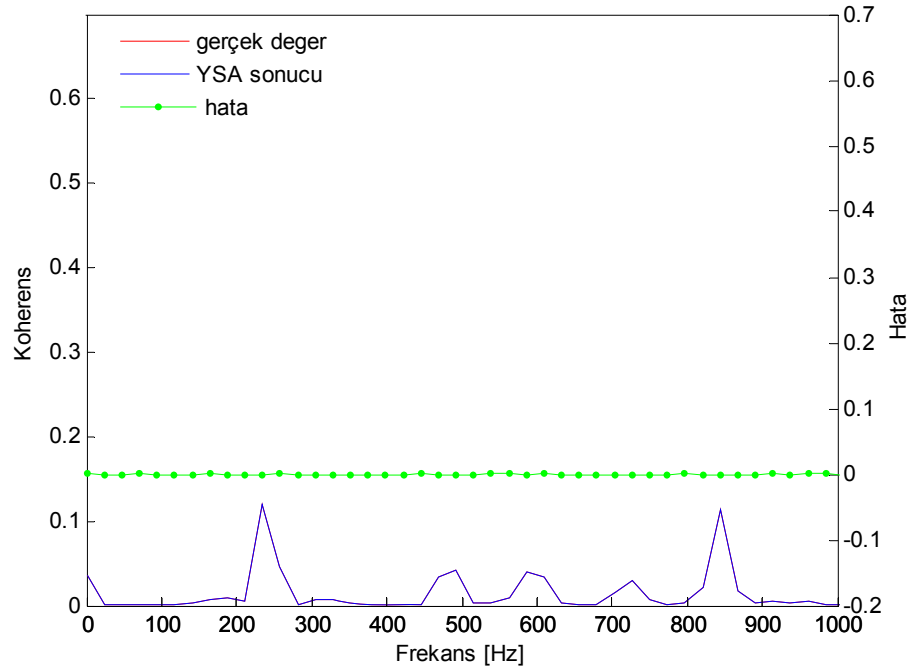
Uygulama açısından 50 giriş düğümü, 10 saklı düğüm sayısı ve yine giriş sayısına eşit 50 çıkış düğüm sayısı ile oluşturulan kendinden birleşmeli YSA topolojisinde YSA'nın eğitim sürecinde hata fonksiyonunun değişimi Şekil 7.3; eğitim ve test sonuçları Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'de gösterilmiştir.



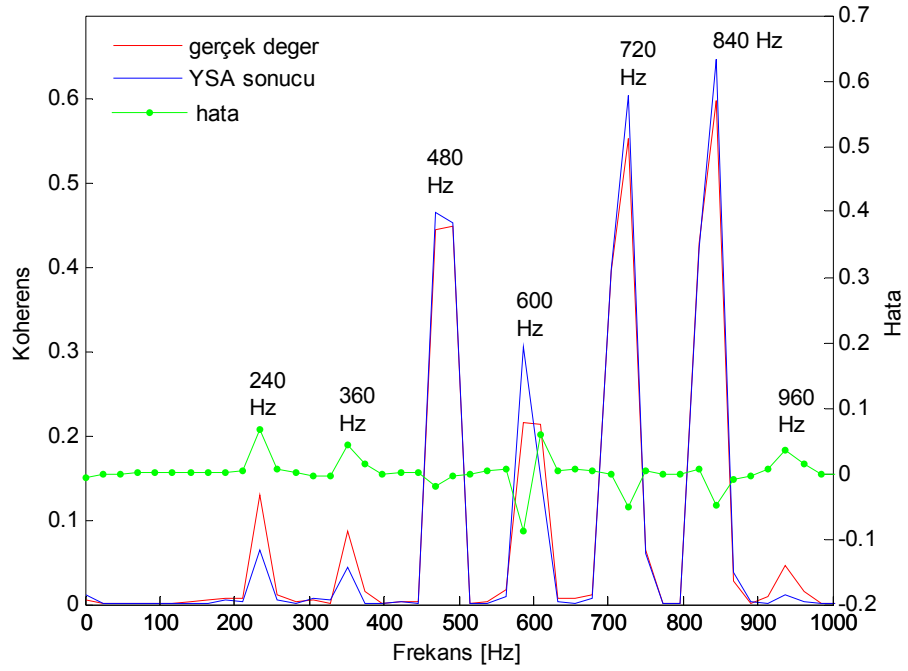
Şekil 7.2: YSA'nın eğitim ve sorgulama süreçleri akış diyagramı



Şekil 7.3: YSA'nın eğitim sürecindeki toplam karesel hatanın iterasyon sayısı ile değişimi



Şekil 7.4: Motor sargı yalıtımının sağlam durumuna ilişkin YSA'nın eğitim sonucu



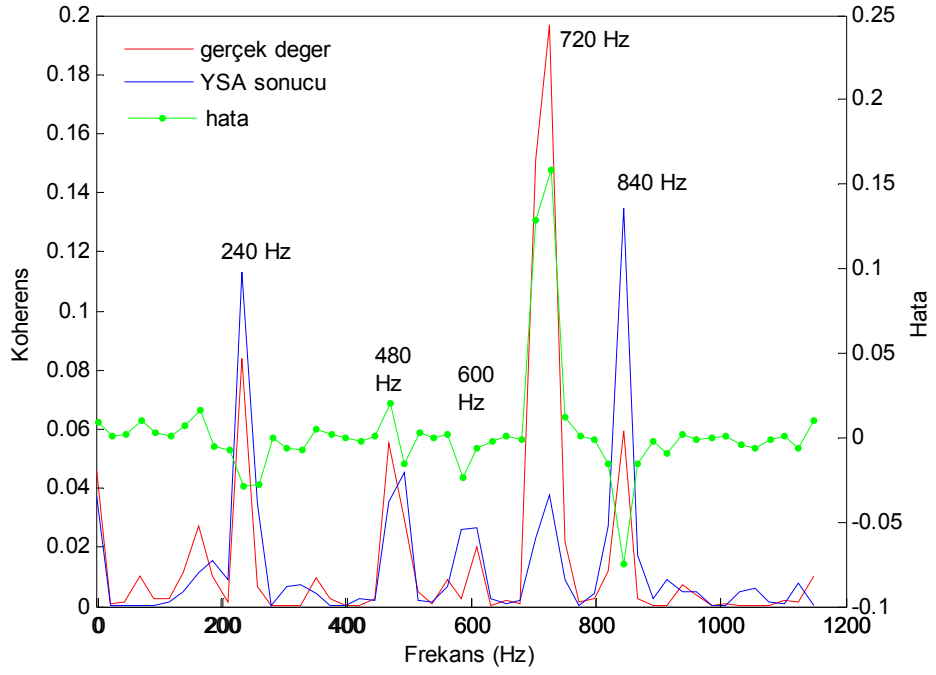
Şekil 7.5: Motor 1'in son eskime aşamasına ilişkin YSA'nın sınaama sonucu

Şekil 7.5'te görüleceği gibi çift harmoniklerde büyük genlik değişimleri gözlenmekte ve bu yolla stator arızası kolayca saptanabilmektedir.

Böylece stator yalıtım arızasının hata değişim fonksiyonundan izlenmesi kendinden birleşimli bir YSA yaklaşımı ile sanal bir detektör şeklinde oluşturulmuştur.

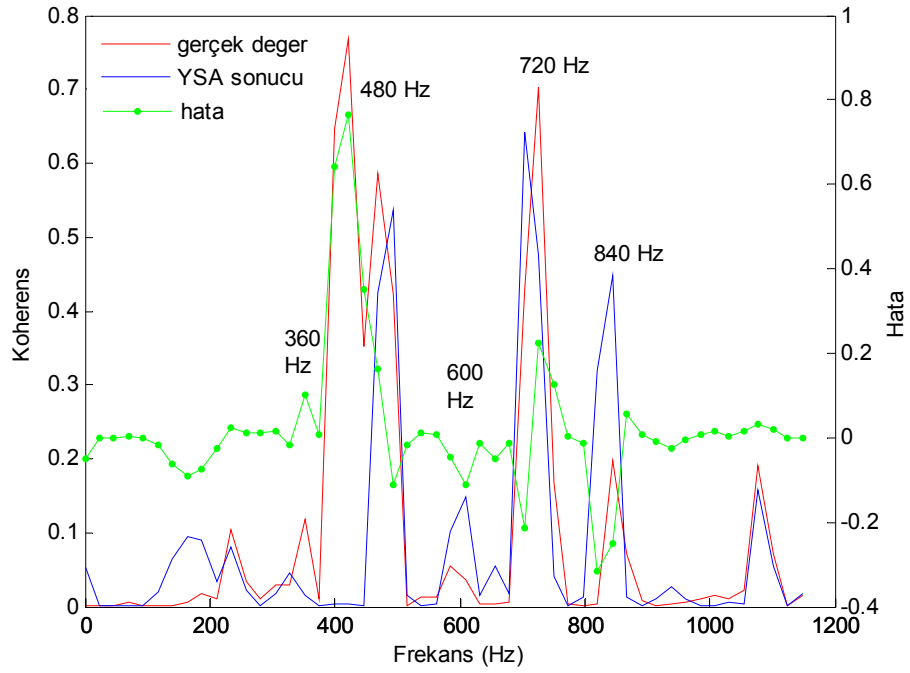
7.2 YSA Modelinin Farklı Motorlardaki Başarımı

Motor 1'e ilişkin verilerle gerçekleştirilen YSA uygulaması eşdeğer diğer 2 motora da uygulanmış ve Şekil 7.6 ve Şekil 7.7'deki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 7.6: Motor 2'nin son eskime aşamasına ait YSA'nın sınaama sonucu

Şekil 7.6'dan gözlemlendiği gibi YSA modeli ile yine motor 2 için de çift harmoniklerin varlığı başarı ile saptamıştır.

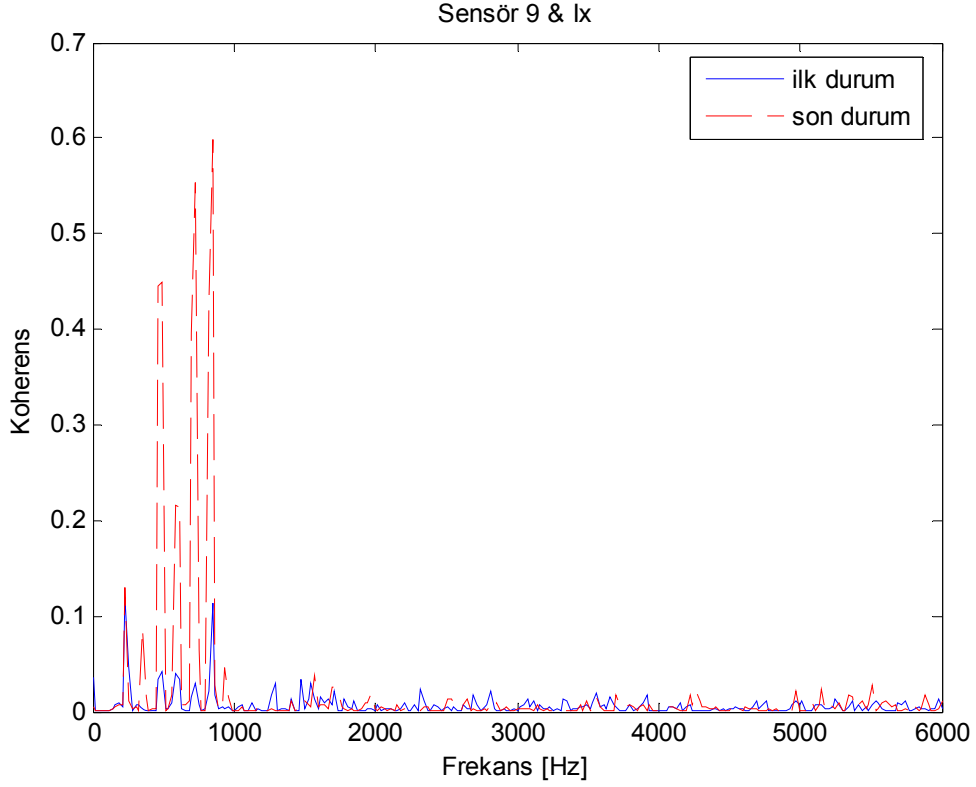


Şekil 7.7: Motor 3'ün son eskime aşamasına ait YSA'nın sınaama sonucu

Benzer şekilde aynı uygulama motor 3 için de tekrarlandığında yine aynı başarımlar elde edilmiştir. Bu bağlamda YSA yaklaşımının farklı motorlarda uygulanabilirliği gösterilmiş ve bu yöntemin gelişmekte olan stator yalıtım bozulmasının izlenmesine uygun genel bir yaklaşım olduğu kanıtlanmıştır.

8. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Bu çalışmada, laboratuvar koşullarında elde edilen stator yaşlandırma deneylerine ilişkin verilerin analizi ile motor arıza nedeniyle devre dışı kalmadan, meydana gelen yalıtım arızasının belirlenmesi hedeflenmiştir. Deneyler sonucunda toplanan verilere özellik çıkarımını destekleyecek en uygun işaret analizi yöntemi aranmış ve bunun da motor akım ve titreşim işaretleri arasındaki çapraz ilişkiyi kullanan *Koherens* yaklaşımı olduğu saptanmıştır. Yapılan ön çalışmalarda sadece motor akımları üzerindeki spektral analizlerin çok ayırtedici olmadığı ve bu anlamda özellik çıkarımının çok kolay olmadığı görülmüştür. Yalnız başına titreşim işaretlerinin de stator arızası bakımından bir anlam ifade edemeyeceği düşünüldüğünde Bölüm 2’de sunulan stator durum izleme ve arıza tanısı yöntemlerine dayalı olarak akım ve titreşim işaretlerinin birleşimi ele alınmıştır. Bu birleşim içerisinde, akım işaretleri içerisindeki bilginin titreşimle korelasyonlu olduğu durumlar gözlemlenmiş ve bunların frekans domenindeki karşılıkları belirlenmiştir. Bu yaklaşım kısaca Koherens analizi şeklinde sunulmuştur. Koherens analizi yaklaşımında stator yaşlanma aşamalarına bağlı olarak bazı frekans değerlerinde bir gelişim gözlemlenmiş olup, bu bağlamda motorun ilk ve son durumlarının karşılaştırılmaları ile baskın özellikler belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada bu ikili ilişki tek bir sensör bilgisine dayandırılmamış olup, akım bilgisi üç ayrı titreşim sensörü bilgisi ile çapraz olarak ilişkilendirilmiştir. Bunun sonucunda faz akımlarından birisi, motorun yüke bağlandığı taraftaki 9 numaralı titreşim sensörü, gövdedeki 5 numaralı titreşim sensörü ve fan tarafında eksenel yöndeki 6 numaralı titreşim sensörü ile 3 ayrı şekilde çaprazlanarak en belirgin frekans değişimlerinin stator akımı ile yük tarafındaki titreşim sensörlerinin arasında ortaya çıktığı belirlenmiştir. Çalışmanın başlangıcında Motor 1’in % 100 yüklenme durumunda, I_x akımı ve sensör 9 ile yapılmıştır. Buna ilişkin şekil, sağlam ve bozuk durum arasındaki bir karşılaştırma olarak Şekil 8.1’deki gibi verilebilir.



Şekil 8.1: Sağlam (ilk durum) ve eskimiş (son durum) yalıtım durumları için akım ve titreşim işaretleri arasındaki koherens

Şekil 8.1’den görüleceği gibi yaşlanma ile ilgili olarak 0-1000 Hz arasında genlik kuvvetlenmeleri ortaya çıkmıştır. Bazı frekanslardaki bu genlik gelişimi stator yaşlanma deneyinin fiziksel bir göstergesi olarak anlamlandırılabilir ve bu frekans aralığı içindeki frekans bileşenleri de stator yalıtım arızasına ilişkin özellikler olarak tanımlanabilir. Bu bağlamdaki bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- ◆ Akım işaretlerine ait verilerle yapılan analiz kısmi bilgi vermektedir. Bu konuda frekans dağılımlarında belirgin farklılıklar gözlenmemiştir.
- ◆ 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 yansımaları nedeniyle, akım-titreşim ilişkisinin stator sargısında meydana gelecek bir bozulma nedeniyle oluşacak dengesizlik sonucunda meydana gelen dengesiz momentlerin daha belirleyici olacağı kararına varılmıştır. Bu bağlamda, örneğin stator yalıtımındaki bozulmaların akım dengesizliklerine ve sonuçta da magneto-motor kuvvetteki değişimler yoluyla

titreşimlere yansıtacağı bilgisi çıkartılmıştır. Bunun sonucunda da akım-titreşim işaretlerinin sonuçları irdelenmiştir. Bu irdeleme sonucunda Şekil 8.1 ve bunun daha dar bir frekans aralığındaki değişimi olan Şekil 6.4'den görüleceği gibi 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.

Sonuç olarak özellikle 6., 8., 10., 12., 14. ve 16. harmoniklerde oldukça büyük kuvvetlenmeler (değişimler) gözlemlenmiştir ve 60 Hz'in çift harmonikleri olan bu harmonikler yalıtım bozulmasının karakteristik özelliği olarak yorumlanmıştır.

Motor 1'in % 100 yüklenme durumunda I_x faz akımı ve sensör 9 dan alınan titreşim işareti arasındaki koherens ile belirlenen karakteristik özellikler, aşağıda verilen farklı yaklaşımlarla doğrulanmıştır.

1. Belirlenen karakteristik değerlerin her bir yaşlanma periyodu boyunca değişimleri çıkarılmış, koherens tekniği ile elde edilen çıkarımların burada da farklı bir bakış ile doğrulanması yapılmıştır.
2. Tam yükte tek bir motor üzerinde elde edilen bu sonuçlar deneyde kullanılan diğer iki eşdeğer motora ilişkin veriler üzerinde de aynı sonuçları vermiştir. Bu sonuçlar Şekil 6.6'da verilmektedir.
3. Motor 1'in % 100 yüklenme durumu için I_x akımı ile yapılan analiz, I_y ve I_z fazlarına ilişkin akımlarla da yapıldığında I_x akımı için bulunanları doğrulayıcı sonuçlar elde edilmiştir.
4. Motor 2 ve Motor 3'ün % 100 yüklenme durumunda I_x akımı ile Sensör 9 arasında yapılan analiz tekrarlanmış ve çift harmoniklerdeki benzer değişim burada da gözlenmiştir.
5. Motor 1'in % 50 ve % 115 yüklenme durumları için yapılan analizde de elde çift harmoniklerin değişimine dayanan çıkarımları destekleyecek değişimler görülmüştür.

Stator yalıtımının sağlıklı durumuna ilişkin koherens değerleri eğitim sürecinde ileri beslemeli bir Yapay Sinir Ağına (YSA) öğretilerek, normal durumdaki bilgiyi öğrenen YSA'nın bozuk durumda çıkışta üreteceği büyük hata değişimlerinin

izlenmesi ile stator yalıtımına ilişkin arıza tanısı gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda stator durumunu izleyen sanal bir detektör oluşturulmuştur. Motor 1 için gerçekleştirilen sanal detektör ayrıca farklı bir uygulama olarak Motor 2 ve Motor 3 için de sınanmış olup çift harmoniklerin, dolayısıyla stator yalıtım arızasının belirlenmesi bakımından aynı başarımla elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında elde edilen bulguların literatürle uyumlu ve bu doğrultuda belirtilen görüşleri doğrulayıcı nitelikte olduğu belirlenmiştir [17, 32].

Sonuç olarak, stator sargı yalıtımındaki arızaların makinenin empedansında simetrisizliğe neden olduğu ve bunun sonucunda motor besleme devresinden 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.

Yukarıdaki sonuçlar ve yorumlar ışığı altında elde edilen bulgular, tamamen orijinal bir çalışmanın ürünü olarak bu tez çalışması ile sunulmuştur. Gelecekteki çalışmalar bakımından deneysel çalışmalar, matematiksel modellemelerle de desteklenerek bu sonuçlar irdelenebilir. Ayrıca deneyler farklı motor güçleri ve gerilimleri için de yapılabilir ve bu tez çalışmasında ortaya atılan sanal detektör kavramına ilişkin öğrenebilen algoritma bir donanım içindeki matematik-kütüphanesine (Math-Library) yerleştirilerek, stator arıza tanısına yönelik akıllı bir izleme sistemi de gerçekleştirilebilir. Bu amaçla sanal detektör gerçek zamandaki durum izleme çalışmalarında kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Arkan, M., Perovic, D.K. and Unsworth, P.**, 2001. On-line Stator Fault Diagnosis in Induction Motors, *IEE Proceedings of Electric Power Applications*, **148**, 537-547.
- [2] **Nandi, S.**, 2006. Detection of Stator Faults in Induction Machines Using Residual Saturation Harmonics, *IEEE Transactions on Industry Application*, **42**, 1201-1208.
- [3] **Nandi, S., Toliyat, H.A. and Li, X.**, 2005. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors- A review, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, **20**, 719-729.
- [4] **Lee, S.B., Younsi, K. and Kliman, G.B.**, 2005. An Online Technique for Monitoring the Insulation Condition of AC Machine Stator Winding, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, **20**, 737-745.
- [5] **Erbay, S.**, 1999. Multi-Sensor Fusion for Induction Motor Aging Analysis and Fault Diagnosis., *PhD Thesis*, The University of Tennessee, Knoxville.
- [6] **Arfat, S., Yadava, G. S. and Bhim, S.**, 2005. A Review of Stator Fault Monitoring Technique of Induction Motors, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **20**, 106-114.
- [7] **Gojko, M.J. and Penman, J.**, 2000. The Detection of Inter-turn Short Circuits in Stator Windings of Operating Motors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **147**, 1078-1084.
- [8] **Şeker S., Ayaz E., Upadhyaya, B. R. and 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.
- [9] **Kohler, J.L., Sottile, J. and Trutt, F.C.**, 2002. Condition Monitoring of Stator Windings in Induction Motors: Part I - Experimental Investigation of the Effective Negative Sequence Impedance Detector, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, **138**, 1447-1453.

- [10] **Sottile, J., Trutt, F.C. and Kohler J.L.**, 2002. Condition Monitoring of Stator Windings in Induction Motors: Part II - Experimental Investigation of Voltage Mismatch Detectors, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, **38**, 1454-1459.
- [11] **Douglas, H., Pillay, P. and Ziarani A.K.**, 2004. A New Algorithm for Transient Motor Current Signature Analysis Using Wavelets, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, **40**, 1361-1368.
- [12] **Penman, J., Sedding, H.G. and Fink W.T.**, 1994. Detection and Location of Interturn Short Circuits in the Stator Windings of the Operating Motors, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, **9**, 652-658.
- [13] **Didier, G., Ternisien, E., Caspary, O. and Razik, H.**, 2006. Fault Detection of Broken Rotor Bars in Induction Motor Using a Global Flux Index, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, **42**, 79-88.
- [14] **Siddique, A., Yadava, G. and Singh, B.**, 2003. Applications of Artificial Intelligence Techniques for Induction Machine Stator Fault Diagnostics, *Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, Atlanta, GA, USA, 24-26 August, 29-34.
- [15] **Neti, P. and Nandi, S.**, 2006. Stator Inter-turn Fault Detection of Synchronous Machines Using Field Current Signature Analysis, *IEEE Conference Record of Industry Applications Conference (IAS)*, 8-12 October, 2360-2367.
- [16] **Nandi, S. and Toliyat, H.A.**, 2000. Novel Frequency Domain Based Technique to Detect Incipient Stator Inter-Turn Faults in Induction Machines, *IEEE Conference Record of Industry Applications Conference (IAS)*, 8-12 October, 367-374.
- [17] **Cruz, S.M.A., Cardoso, A.J.M. and Toliyat, H.A.**, 2003. Diagnosis of Stator, Rotor and Airgap Eccentricity Faults in Three-Phase Induction Motors Based on the Multiple Reference Frames Theory, *IEEE Conference Record of Industry Applications Conference (IAS)*, 12-16 October, 1340-1346.

- [18] **Henao, H., Demian, C. and Capolino, G.A.**, 2003. A Frequency-Domain Detection of Stator Windings Faults in Induction Machines Using an External Flux Sensor, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, **39**, 1272-1279.
- [19] **Pereira, L.A., Gazzana, D. S. E., Caspary, O. and Pereira, L.F.A.**, 2005. Motor Current Signature Analysis and Fuzzy Logic Applied to the Diagnosis of Short-Circuit Faults in Induction Motors, *IEEE Annual Conference of Industrial Electronics Society*, 6-10 November, 275-280.
- [20] **Nandi, S.**, 2000. Fault Analysis for Condition Monitoring of Induction Motors, *PhD Thesis*, Texas A&M University, Texas.
- [21] **Bachir, S., Champenois, G., Tnani, S. and Gaubert, J-P.**, 2005. Stator Fault Diagnosis in Induction Machines under Fixed Speed, *European Conference on Power Electronics and Applications*, 11-14 September, 1-9.
- [22] **Neti, P. and Nandi, S.**, 2006. Stator Inter-turn Fault Detection of Synchronous Machines Using Field Current Signature Analysis, *IEEE Conference Record of Industry Applications Conference (IAS)*, 8-12 October, 2360-2367.
- [23] **Mihet-Popa, L. and Pacas, M.**, 2005. Failure Detection in Converter Fed Induction Machines under Different Operation Conditions, *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, 15-18 May, 967-974.
- [24] **Xu-hong, W. and Yi-gang, H.**, 2006. Fuzzy Model Based On-line Stator Winding Turn Fault Detection for Induction Motors, *Proceedings of the Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA'06)*, 838-843.
- [25] **Yazidi, A., Thailly, D., Henao, H., Romary, R., Capolino, G.-A. and Brudny, J-F.**, 2004. Detection of Stator Short-circuit in Induction Machines Using an External Leakage Flux Sensor, *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 166-169.

- [26] **Tallam, R.M., Habetler, T.G. and Harley R.G.**, 2002. Stator Winding Turn-Fault Detection for Closed-Loop Induction Motor Drives, *37th IAS Annual Meeting Conference Record of IEEE*, 553-1557.
- [27] **Albizu, I., Zamora, I., Mazbn, A.J., Saenz, J.R. and Tapia, A.**, 2004. On-line Stator Fault Diagnosis in Low Voltage Induction Motors, *39th Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 504-508.
- [28] **Joksimovic, G., Djurovic, M., Penman, J.**, 2001. Cage Rotor MMF: Winding Function Approach, *IEEE Power Engineering Review*, 64-66.
- [29] **Stone, G.C.**, 2005. Recent Important Changes in IEEE Motor and Generator Winding Insulation Diagnostic, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, **41**, 91-100.
- [30] **Chetwani, S.H., Shah, M.K. and Ramamoorthy M.**, 2005. Online Condition Monitoring of Induction Motors through Signal Processing, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, **41**, 2175-2179.
- [31] **IEEE Std 43-2000**, 2000. Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery, *American National Standards Institute*.
- [32] **Penrose, H.W.**, Estimating Motor Life Using Motor Circuit Analysis Predictive Measurements, *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference*, 23-25 September, 451-454.
- [33] **Fenger, M., Lloyd, B.A., Thomson, W.T.**, 2003. Development of a Tool to Detect Faults in Induction Motors via Current Signature Analysis, *Cement Industry Technical Conference*, May 2003, 37-46.
- [34] **Arkan, M. and Unsworth, P.J.**, 1999. Stator Fault Diagnosis in Induction Motors using Power Decomposition, *Proceedings of IEEE Industry Applications Conference 34th Annual Meeting*, **3**, 1908-1912.
- [35] **Thomson, W.T. and Fenger, M.**, 2001. Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults, *IEEE Industry Applications Magazine*, **4**, 26-34.

- [36] **Habetler, T.G., Harley, R.G., Tallam, R.M., Lee, S.B., Obaid, R. and Stack, J.**, 2002. Complete Current-Based Induction Motor Condition Monitoring: Stator, Rotor, Bearing and Load, *CIEP 8th Power Electronics Congress Technical Proceedings*, 20-24 October, 3-8.
- [37] **McCully, P.J. and Landy, C.F.**, 1997. Evaluation of Current and Vibration Signals for Squirrel Cage Induction Motor Condition Monitoring, *8th International Conference on Electrical Machines and Drives*, 1-3 September, 331-335.
- [38] **Goode, P.V. and Chow, M.**, 1995. Using a Neural Fuzzy System to Extract Heuristic Knowledge of Incipient Faults in Induction Motors: Part II - Application, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **42**, 139-146.
- [39] **Bo, Y., Jian, L., Zhang, X., Yonghong, C. and Xie, H.**, 2001. Using AC Current Parameters to Evaluate Aging Condition of Stator Insulation, *Proceedings of International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)*, 19-22 November, 725-728.
- [40] **Stone, G.C., Warren, V. and Fenger, M.**, 2001. Diagnostic information Obtained from Examining a Large Stator Winding PD Result Database, *Proceedings of International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)*, 19-22 November, 635-640.
- [41] **Negrea, M.D.**, 2006. Electromagnetic Flux Monitoring for Detecting Faults in Electrical Machines, *PhD Thesis*, Helsinki University of Technology, Helsinki.
- [42] **Maseghi, V.S.** 1996. Advanced Signal Processing and Digital Noise Reduction, John Wiley, New York.
- [43] **Corres, J.M., Bravo, J., Arregui, F.J. and Matias, I.R.**, 2006. Unbalance and Harmonics Detection in Induction Motors Using an Optical Fiber Sensor, *IEEE Sensors Journal*, **6**, 605-612.
- [44] **Bolat, S. and (ve) Kalenderli, Ö.**, 2003. Levenberg_Marquardt Algoritması Kullanılan Yapay Sinir Ağı ile Elektro Biçim Optimizasyonu, *International XII. Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks – TAINN*, Çanakkale, 2003.

- [45] **Cruz, S.M.A. and Cardoso, A.J.M.**, 2003. Diagnosis of Stator Inter-turn Short Circuits in DTC Induction Motor Drives, *38th Annual Meeting Conference Record of the Industry Applications Conference (IAS)*, 12-16 October, 1332-1339.
- [46] **Hsu, J.S.**, 1995. Monitoring of Defects in Induction Motors Through Air-Gap Torque Observations, " IEEE Trans. Ind. Appl., vol.31, no. 5, Sep. /Oct. 1995.
- [47] **H. A. Toliyat and T. A. Lipo**, 1995. Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults, IEEE Trans. Energy Convers., vol. 10, 2, pp. 241–247.

EK A

YALITIM YAŞLANDIRMA DENEYLERİNDE KULLANILAN CİHAZLARIN TEKNİK ÖZELLİKLERİ

A.1 Denenen Motorlara İlişkin Teknik Özellikleri

Deneyler aynı özelliklere sahip üç asenkron motor üzerinde yapılmıştır. Denenen motorlara ilişkin ortak özellikler Tablo A.1’de verilmektedir.

Tablo A.1: Denenen motorların plaka bilgisi

Motor Tipi	Premium Efficiency Motor
Yapımcı	US Electrical Motors Division of Emerson Electric Co. St. Louis, MO
Model Numarası	7965B
Motor Gücü (HP)	5
Motor Hızı (devir/dakika)	1750
Faz Sayısı	3
Gövde Numarası	184T
Gövde Tipi	TCE
Anma Gerilimi (Volt)	230 / 460
Anma Akımı (Amper)	13.0 / 6.5
Servis Faktörü	1.15
Frekans (Hertz)	60
NEMA Tasarımı	B
Yalıtım Sınıfı	F
Kapatma	TE
Maksimum Çalışma Ortamı Sıcaklığı	40 °C
LR KVA Kodu	J
Çalışma Periyodu	Sürekli
Güç Faktörü	82.5
Motor Verimi (%)	90.2
Maksimum Reaktif Güç (kVAr)	1.4
Yüke Bağlı Olmayan Taraftaki	6206-2Z-J/C3
Rulman Tipi	
Yüke Bağlı Taraftaki Rulman Tipi	6205-2Z-J/C3
ID Numarası	Z08Z177R190F /

Tablo A.2: Motor boyutları

Boyut	Değer (cm)
A	18.1
B	17.2
C	40.2
D	11.43
2F	14
H	1.03
Maksimum N	2.7
Maksimum O	21.3
Maksimum P	24
U	2.2
Maksimum AA	1.9
SQ Key	0.6

A.2 Deney Düzenğinde Kullanılan Dinamometreye İlişkin Teknik Özellikler

Motorların performans deneyleri, 3 kW, 1800 devir/dak. dinamometre (LSC 132 MC 7 Tipinde) ve universal kavraması olan ayarlanabilir bir deney düzleminde (platformunda) yapılmıştır. Dinamometre 0-2 A ve 0-200 V ile uyarılmış ve 21.63 Ohm'luk (oda sıcaklığında) açık bir dirençle yüklenmiştir.

A.3 Motor Yük Performans Deneyi ve Veri Toplama Sistemi

Her eskitme aşamasının sonunda motor performansı, sıfırdan tam yükün %115'ine kadar değişen çeşitli yükler altında denenmiştir. Bu deneyler sonucunda elde edilen verilerin toplanması sırasında işaret kuvvetlendirme, filtreleme ve toplama işlemleri *National Instruments* (NI) donanım ve yazılımıyla gerçekleştirildi.

Motor performans deney düzeneği, 3 kW dinamometre, ayarlanabilir motor platformu, universal kavrama, takometre ve moment algılayıcısı içermektedir. Dinamometrenin merkezinden bir kol vasıtasıyla 25,4 cm uzaklıktaki moment ölçerin yük hücresi Tablo A.3'de gösterilen özelliklere sahiptir. Veri toplama panosu için analog çıkış üreten momentölçerin özellikleri Tablo A.4'da verilmiştir.

Tablo A.3: Yük hücresinin zellikleri

Tip	“Super-Mini Load Cell”
Yapımcı	Interface, Inc. 7401 E. Butherus Dr. Scottsdale, Arizona 85260
Model Numarası	SM-100
Seri Numarası	D09912
Yük Kapasitesi	445 N
ıkış, Gerilme	3.005 mV/V
Giriş Direnci	350 + 40 / -3.5 Ohm
ıkış Direnci	350 ± 3.5 Ohm
Non-Lineerlik	< ± %0.03 Nominal ıkış
Histerezis	< ± %0.02 Nominal ıkış
Kompanze Edilen Sıcaklık Aralığı	-17.8 °C - 66 °C
Sıfırdaki Sıcaklık Etkisi	± %0.15 Nominal ıkış / 38 °C
Sıfır Dengesi	< ± %1 Nominal ıkış

Tablo A.4: Momentlerin seçilmiş zellikleri

Tip	“INFCS INFINITY C Strain Gage Meter”
Yapımcı	Newport Electronics, Inc. 2229 South Yale St. Santa Ana, CA 92704-4426
Model Numarası	9210-001
Seri Numarası	6141673
Analog / Dijital İ znrlğ	15 bit
25 °C daki doğruluk	Okuma ± %0.03, 1–2s Birim Basamak Yanıtı
Analog ıkış Lineerlięi	%0.2
Analog ıkış Birim Basamak Yanıt Zamanı	Son deęerin %99’una 2 – 3 s’de çıkar

Momentler, 0–133 Nm’ye 0–10 V’luk bir analog çıkış üretmesi için ayarlanmıştır.

Motor besleme gerilimlerini ölçmek için kullanılan gerilim dönüřtürücülerin zellikleri Tablo A.5’de verilmektedir.

Tablo A.5: Gerilim dönüştürücülerinin özellikleri

Algılayıcı Tipi	DA Gerilim Dönüştürücü
Yapımcı	Ohio Semitronics, Inc. 4242 Reynolds Dr. Hilliard, Ohio 43026-1264
Model Numarası	VT7-009D
Frekans Aralığı	DC - 10000 Hertz
DC Gerilim Aralığı	0 - 500 Volt
Çıkış Gerilimi	$\pm 10 V_{DC}$
Aşırı Yük	Tam ölçek oranının 2 katı
Elektriksel Yalıtım Düzeyi (Giriş / Çıkış / Kasa Arasında)	1500 V _{AC}
Aşırı Yük	100000 Ohm dan büyük
Yanıt Hızı	50 mikrosaniye
Ayarlanabilir Alan Toleransı	$\pm \%10$
Doğruluk	$\pm \%0.25$ F.S. @ DC Lineerlik ve tekrarlanabilirlik etkisi dahil
Sıcaklık Etkisi	-10 °C to 60 °C: $\pm \%1.0$ RDG.
Çıkış Yükleme	2000 Ohm minimum
Alet Gücü	110 V _{AC} , 60 Hz, 5 VA

Motor faz akımlarını ve dinamometre yük akımını ölçmek için kullanılan Hall etkili akım algılayıcılarının özellikleri Tablo A.6’da verilmiştir.

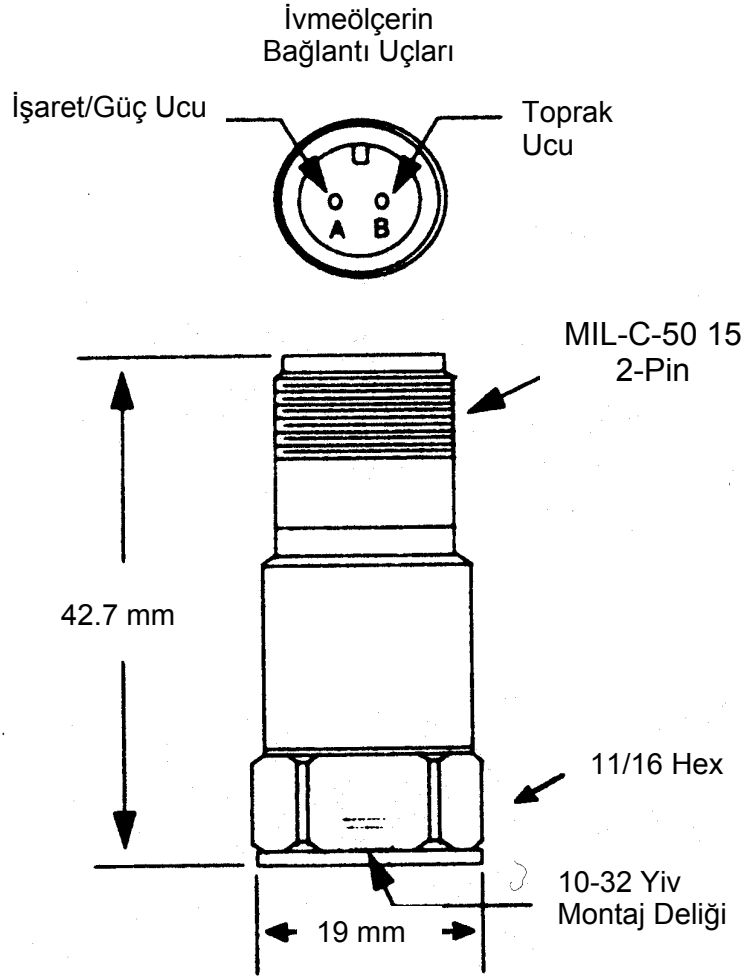
Tablo A.6: Akım dönüştürücülerinin özellikleri

Algılayıcı Tipi	“Hall Effect” Akım Algılayıcı
Yapımcı	Ohio Semitronics, Inc. 4242 Reynolds Dr. Hilliard, Ohio 43026-1264
Model Numarası	CTF-501T
Giriş Akımı	500 A _{AC} , 700 A _{DC}
Çıkış Akımı @ 500 A	100 mA
Sıcaklık Etkisi	- 40 °C - 80 °C: $\pm \%0.5$ FS
Doğruluk	$\pm \%0.3$ FS Lineerlik, set noktası 25 °C deki offset etkisi dahil
Lineerlik	$\pm \%0.1$ FS
Aşırı akım	800 A 3 Dak./Saat
DC yerleşme kaybı	Yok
Yanıt Hızı	1 mikrosaniye
di/dt	50 A/ μ s
Bant genişliği	150 kHz
Yalıtım (Giriş / Çıkış)	2500 V _{AC}
Yük Direnci	250 Ohm
Kaynak Gerilimi	$\pm 15 V \pm 1 V_{DC}$
Uyarma Akımı	$< \pm 135$ mA
Durgun Akım	< 35 mA + I _N

Deneyde kullanılan ivmeölçerlerin özellikleri Tablo A.7’de ve görünüş resmi Şekil A.1’de verilmiştir.

Tablo A.7: Yüksek bant genişlikli ivmeölçerlerin özellikleri

Algılayıcı Tipi	Yüksek Frekanslı Endüstriyel İvmeölçer
Yapımcı	Industrial Monitoring Instrumentation 3425 Walden Av. Depew, New York
Model #	323B01
Duyarlık	100 mV/g $\pm$ %5
Ölçme Aralığı	$\pm$ 50 g
Çözünürlük	0.0002 g
Frekans Aralığı	144 – 480000 cpm $\pm$ %5 102 – 600000 cpm $\pm$ %10 48 – 9000000 cpm $\pm$ 3 dB
Bastırılan Rezonans Frekansı	40 kHz
Genlik Doğrusallığı	$\pm$ %1
Enine Duyarlılığı	$\leq$ %5
Şok Limiti	5000 g
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-54 - 121 °C
Çıkışın $\pm$ %1’ine Yerleşme Zamanı	5 saniye
Boşalma Zaman Sabiti	$\geq$ 0.2 saniye
Spektral Gürültü	4.0 μ g/ $\sqrt$ Hz (10 Hz) 1.2 μ g/ $\sqrt$ Hz (100 Hz) 0.4 μ g/ $\sqrt$ Hz (1 kHz)
Kasa Yalıtım Koruması	RFI / ESD
Yayılan Elektriksel Gürültü	200 μ g (1 – 10 kHz)
Algılayıcı Eleman Malzemesi	Seramik
Güç Kaynağı	Model 482A05 I.C.P. Güç Kaynağı



Şekil A.1: Yüksek bant genişlikli bir ivmeölçer.

Tablo A.8’de de denenen asenkron motorların stator sargı sıcaklığını 205°C’ye çıkaran rölenin ayar değerleri verilmiştir.

Tablo A.8: Asenkron motorun stator sargı sıcaklığını 205°C’ye çıkaran rölenin ayar değerleri [5]

Tanım	Devreye Girme	Devreden Çıkma	Periyot
Isıtma	3 (1,17 s)	0 (= 2,5 s)	30 dakika
Geçici Çalışma	1	1-7,2	1 saat
Kararlı (Sürekli) Çalışma	1 (0,79 s)	7,2 (5,84 s)	47 saat