

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK MOTORLARINDA RULMAN ARIZALARININ OLUŞUMU VE
TİTREŞİM İŞARETLERİNİN SPEKTRAL ANALİZİ İLE ARIZA TANISI**

701315

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik Müh. Serkan SOYARSLAN
504981029

101315

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Haziran 2001

Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Haziran 2001

Tez Danışmanı :

Doç.Dr. Serhat ŞEKER

Diğer Jüri Üyeleri :

Prof.Dr. Faik MERGEN (İ.T.Ü.)

Doç.Dr. Osman Nuri UÇAN (İ.Ü.)

HAZİRAN 2001

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında değerli fikirleri, ilgi ve anlayışıyla bana kılavuzluk eden sayın hocam Doç. Dr. Serhat Şeker' e ve sevgi ve desteğini bir an olsun esirgemeyen aileme teşekkürü borç bilirim.

Haziran 2001

Serkan Soyarslan



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

KISALTMALAR
TABLO LİSTESİ
ŞEKİL LİSTESİ
SEMBOL LİSTESİ
ÖZET
SUMMARY

1. GİRİŞ	1
2. MAKİNE BAKIM TEKNOLOJİLERİ VE GELİŞİMİ	4
3. DURUM İZLEME VE ARIZA BELİRLEME TEKNİKLERİ	6
3.1. Spektral Analiz Yöntemleri	6
3.1.1. Güç Spektrumu Yoğunluğu ve Zaman-Frekans Teknikleri	6
3.1.2. Kısa-Zaman Fourier Dönüşümü	7
4. ELEKTRİK MAKİNELERİNDE GÜRÜLTÜ VE TİTREŞİM	9
4.1 Mekanik Gürültü	9
4.1.1 Dinamik Dengesizlik	9
4.1.2 Bilyalı Rulmanlar	10
4.1.3 Silindirik Rulmanlar	10
4.1.4 Fanlar	11
4.1.5 Dişliler	11
4.2 Elektriksel Gürültü Ve Titreşim	12
4.2.1 Doyma	12
4.2.2 Amper Sarımların Dağılımı	12
4.2.3 Hava Aralığı	12
4.2.4 Stator Dişlerinin Sayısı ve Rotor İletkenleri	13
4.2.5 Çıkık Kutup Etkisi	13
4.2.6 Stator Kutup Sayısı	13
4.2.7 Uygulanan Gerilimin Frekansı	13
4.2.8 Armatür veya Rotor Çekirdeğinin Çarpıklığı (Eğriliği)	14
4.2.9 Komutasyon ve Amper-Sarım Oranları	14
4.2.10 Armatür Olukları	14
4.3 Gürültü Kontrolü	14

4.3.1	Gürültünün Kaynağında Azaltılması	15
4.3.2	Havadan Nakledilen Gürültü Seviyesinin Azaltılması	16
5	RULMAN ARIZASI VE TİTREŞİM İŞARETLERİNİN ANALİZİ	17
6	RULMAN ARIZALARININ OLUŞUMU VE YAPAY ESKİTME SÜREÇLERİ	31
6.1.	Rulman İle Motorun Elektriksel Modelleri	32
6.2.	Sürücü Devre Kaynaklı Boşalmalar	34
6.3.	Rulman Akımlarının Önlenmesine Yönelik Alınması Gerekli Tedbirler	36
6.4.	Hızlandırılmış Yapay Eskitme Süreçleri ile Rulman Bozukluklarının Oluşturulması	37
7	MOTOR TİTREŞİM İŞARETLERİNİN ANALİZİ VE ARIZA TANISI	39
7.1.	Zaman Tanım Bölgesi İşaretlerinin İncelenmesi	39
7.1.1	Zaman Tanım Bölgesi İşaretlerinin Yorumu	44
7.2.	Makine Titreşim İşaretlerinin Güç Spektrum Yoğunlukları (GSY) ve Yorumu	45
7.2.1.	Güç Spektrum Yoğunluklarının Yorumu	50
7.3.	Rotor Dengesizliğinin Gözlenmesi	51
7.3.1	0-300 Hz Arasındaki Güç Spektrum Yoğunluklarının Yorumu	56
8	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	58
	KAYNAKLAR	61
	ÖZGEÇMİŞ	64
	TEŞEKKÜR	65

KISALTMALAR

KZFD	: Kısa Zaman Fourier Dönüşümü
TDF	: Temel Dizi (zincir) Frekansı
BD	: Bilya Dönme Frekansı
DB	: Dış Bilezik Frekansı
IB	: İç Bilezik Frekansı
IEEE	: Institute of Electrical and Electronic Engineers
IEC	: International Electromechanical Commission
NEMA	: National Electrical Manufacturers Association
GSY	: Güç Spektrum Yoğunlukları
IMI	: Industrial Monitoring Instrumentation (USA)



TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 5.1.	Rulman frekans faktörleri	20
Tablo 5.2.	1715 dev/dak da dönen SKF 6311 için rulman frekansları	21
Tablo 7.1.	Her bir eskitme aşamasında zaman işaretlerinin hesaplanan varyans değerleri	43
Tablo 7.2.	Rotor dengesizlik frekansları	56



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 5.1.	:Bir Rulmanın Genel Yapısı.....	17
Şekil 5.2.	:Rulman Frekanslarının Hesaplaması İçin Parametreler.....	19
Şekil 5.3.	:1715 dev/dak da Dönen NSK 6311 Rulmanının Titreşim..... Spektrumu	20
Şekil 5.4.	:Rulman Spektrumunun Yakınlaştırılmış Görüntüsü.....	22
Şekil 5.5.	:Rulman Titreşiminin Ölçülmesi İçin Test Düzeneği.....	23
Şekil 5.6.	:Rulman Yük Bölgesi.....	23
Şekil 5.7a.	:45° ye Monte Edilmiş İvmeölçer.....	24
Şekil 5.7b.	:Yatay Monte Edilmiş İvmeölçer.....	25
Şekil 5.8.	:Kötü Bir Rulman.....	27
Şekil 5.9.	:İyi Bir Rulman.....	28
Şekil 5.10.	:Alçak Frekans Periyodik Titreşimi ve Yüksek Frekans..... Geçici Hallerini Gösteren Rulman Titreşimi	29
Şekil 5.11.	:Eksenli Kayık Sürtünmesiz Rulman.....	30
Şekil 6.1.	:Boşalma Modunda Akan Akımların Oluşturduğu Tipik..... Rulman Eskimesi	32
Şekil 6.2.	:Asenkron Motor Gücüne Bağlı Olarak Kapasitif..... Elemanların Değerlerinin Değişimi	33
Şekil 6.3.	:Bir Rulmanın En Genel Elektriksel Modeli.....	34
Şekil 6.4.	:Motor Ve Rulmanın Birleştirilmiş Elektriksel Modeli.....	34
Şekil 6.5.	:Yapay Rulman Eskitmesi.....	37
Şekil 6.6.	:Performans Testi Ve Algılayıcı Yerleri.....	38
Şekil 7.1.	:Başlangıç Aşamasındaki Genlik-Zaman Değişimi.....	39
Şekil 7.2.	:Birinci Eskitme Aşamasındaki Genlik-Zaman Değişimi.....	40
Şekil 7.3.	:İkinci Eskitme Aşamasındaki Genlik-Zaman Değişimi.....	40
Şekil 7.4.	:Üçüncü Eskitme Aşamasındaki Genlik-Zaman Değişimi.....	41
Şekil 7.5.	:Dördüncü Eskitme Aşamasındaki Genlik-Zaman Değişimi.....	41
Şekil 7.6.	:Beşinci Eskitme Aşamasındaki Genlik-Zaman Değişimi.....	42
Şekil 7.7.	:Altıncı Eskitme Aşamasındaki Genlik-Zaman Değişimi.....	42
Şekil 7.8.	:Yedinci Eskitme Aşamasındaki Genlik-Zaman Değişimi.....	43
Şekil 7.9.	:Her Bir Eskitme Aşamasında Zaman İşaretlerinin..... Hesaplanan Varyans Değerlerinin Değişimi	44
Şekil 7.10.	:Başlangıç Aşamasındaki Genlik-Frekans Değişimi.....	46
Şekil 7.11.	:Birinci Eskitme Aşamasındaki Genlik-Frekans Değişimi.....	46
Şekil 7.12.	:İkinci Eskitme Aşamasındaki Genlik-Frekans Değişimi.....	47
Şekil 7.13.	:Üçüncü Eskitme Aşamasındaki Genlik-Frekans Değişimi.....	47
Şekil 7.14.	:Dördüncü Eskitme Aşamasındaki Genlik-Frekans Değişimi.....	48
Şekil 7.15.	:Beşinci Eskitme Aşamasındaki Genlik-Frekans Değişimi.....	48
Şekil 7.16.	:Altıncı Eskitme Aşamasındaki Genlik-Frekans Değişimi.....	49
Şekil 7.17.	:Yedinci Eskitme Aşamasındaki Genlik-Frekans Değişimi.....	49
Şeki 7.18a.	:Sağlam Durumdaki Titreşim İşaretleri İçin KZFD.....	50
Şeki 7.18b.	:Bozuk Durumdaki Titreşim İşaretleri İçin KZFD.....	51
Şekil 7.19.	:Başlangıç Aşamasındaki Genlik-Frekans Değişimi..... (0-300 Hz)	52

Şekil 7.20.	:Birinci Eskitme Aşamasındaki Genlik-Frekans Değişimi.....	52
	(0-300 Hz)	
Şekil 7.21.	:İkinci Eskitme Aşamasındaki Genlik-Frekans Değişimi.....	53
	(0-300 Hz)	
Şekil 7.22.	:Üçüncü Eskitme Aşamasındaki Genlik-Frekans Değişimi.....	53
	(0-300 Hz)	
Şekil 7.23.	:Dördüncü Eskitme Aşamasındaki Genlik-Frekans Değişimi.....	54
	(0-300 Hz)	
Şekil 7.24.	:Beşinci Eskitme Aşamasındaki Genlik-Frekans Değişimi.....	54
	(0-300 Hz)	
Şekil 7.25.	:Altıncı Eskitme Aşamasındaki Genlik-Frekans Değişimi.....	55
	(0-300 Hz)	
Şekil 7.26.	:Yedinci Eskitme Aşamasındaki Genlik-Frekans Değişimi.....	55
	(0-300 Hz)	
Şekil 7.27.	:Rotor Dengesizlik Frekansı 29.03 Hz deki genlikler.....	57



SEMBOL LİSTESİ

Δf	: Frekans Çözünürlüğü
Δt	: Örnekleme zamanı
TDF	: Temel Dizi(zincir) Frekansı
BD	: Bilya Dönme Frekansı
DB	: Dış Bilezik Frekansı
$İB$	: İç Bilezik Frekansı
rps	: İç Bileziğin saniyedeki devir sayısı
Bd	: Bilya Çapı
Pd	: Dış Açıklık Dairesi Çapı
Φ	: Temas açısı
C_b	: Yağ ile Yuvarlanan Elemanlar ve Bileziklerin Oluşturduğu Kapasitif Eleman
V_{th}	: Kapasitif Elemanın Dayanma ya da Eşik Gerilimi
C_{sf}	: Stator Gövde Arasındaki Kapasitif Eleman
C_{sr}	: Stator-Rotor Kapasitif Elemanı
C_{rf}	: Rotor-Gövde Kapasitif Elemanı
Z_l	: Lineer olmayan bir empedans
R_b	: İç ve Dış Bilezik Dirençleri İle “n” Tane Paralel Yuvarlanma Elemanının İç Dirençlerinin Eşdeğerinin Seri Toplamı
V_{rg}	: Mil Gerilimi
σ^2	: Varyans
x_i	: Verinin i. noktadaki değeri
μ	: aritmetik ortalama

ELEKTRİK MOTORLARINDA RULMAN ARIZALARININ OLUŞUMU VE TİTREŞİM İŞARETLERİNİN SPEKTRAL ANALİZİ İLE ARIZA TANISI

ÖZET

İndüksiyon motorları, endüstride en dayanıklı ve kullanımı en yaygın olan makinalardır. Söz konusu bu motorların elektriksel ve mekaniksel kısımlarındaki arızaların erken belirlenmesi ise endüstriyel bir sürecin güvenli ve ekonomik işletimi için çok önemlidir. Bu nedenle endüstriyel bir sistemin süreç donanımlarının izlenmesi ve erken arıza tanısının artan ihtiyacı, makine ölçmelerinden eskimeye duyarlı enformasyonu çıkarma için yeni ve güvenilir bir işaret analizi tekniği geliştirmeye yönelik çabaları da arttırmıştır.

Elektrik makinelerinin arıza tanısında, bozuklukların % 50'nden fazlası, rulman ve mil dengesizlikleri gibi mekaniksel karakterdedir. Bu durumlar için spektral analiz tekniği, farklı işletim koşulları altında dönen makinelerin veri analizini yapmak için kolaylıkla kullanılabilir.

Durağan işaretler genellikle standart Fourier Dönüşümü Teknikleri kullanılarak analiz edilir. Sistem durağan olmayan veya geçici bir duruma girdiği zaman Fourier Tekniği, işaretin bu duruma uygun dar bölgesinde çalışmaz. Durağan olmayan analiz, zaman- frekans ve zaman-ölçek teknikleri kullanılarak yerine getirilebilir. Bu anlamda en fazla kullanılan yöntem Spektral Analiz teknikleridir.

Spektral analiz yöntemlerinin bir uygulaması olan bu çalışmanın amacı da, makine rulmanlarında hızlandırılmış mekaniksel yaşlanma süreçleri ile ilgili olarak, elektrik motorlarından alınmış titreşim işaretlerinden özellik çıkartmak ve indüksiyon motorlarının her bir yaşlanma sürecinde rulman bozulmasının etkisini belirlemektir. Bu ise, Güç Spektrum Yoğunluğunun titreşim işaretlerine uygulanması ile kolaylıkla başarılmıştır. Böylece rulman arızası kaynaklı rotor dengesizliklerinin gelişimi de eskitme süreçleri vasıtasıyla izlenebilmiştir.

BEARING DAMAGE DETECTION AND FAULT DIAGNOSIS USING THE SPECTRAL ANALYSIS METHODS FOR MOTOR VIBRATION SIGNAL

SUMMARY

Induction motors are the most rugged and the most widely used machines in industry. The early detection of anomalies in the electrical or mechanical parts of the electric motors is important to the safe and economic operation of an industrial process. The increased need for monitoring and prognosis of process equipment in industrial system has increased the efforts towards developing new and reliable signal analysis techniques for extracting degradation-sensitive information from machinery measurements.

More than fifty percent of the failures are mechanical in nature, such as bearing, balance and alignment-related problems. For these situations, the spectral analysis techniques can be easily used for the data analysis of rotating machinery under the different operating conditions.

Stationary signals are often analyzed by using the standard Fourier Transform Techniques. When the system is non-stationary or undergoes a transient, the Fourier Technique does not provide proper compression of the signals. The analysis of non stationary signals may be performed using the time-frequency and time-scale techniques. The most used technique is the Spectral analysis techniques.

The purpose of this project is also to extract features from vibration signals measured from motors subjected to accelerated bearing fluting aging, and to detect the effects of bearing fluting at each aging cycle of induction motors. This is achieved by the application of Spectral Analysis Techniques to vibration signals. Hence, the imbalance of the rotor is easily determined by the evaluation of the aging process.

1.GİRİŞ

Endüstride yer alan sistemlerin daha güvenilir ve daha ekonomik işletilmesi ihtiyacı son senelerde yeni bir teknolojiyi de beraberinde getirmiştir. Bu yeni teknolojinin adı Öngörülü Bakım ve Güvenilirlik (Predictive Maintenance and Reliability-PM&R) tir.

Bakım ve güvenilirlik kavramlarının birlikte ele alındığı bu yeni uygulama biçiminde gelişen elektronik teknolojisine de bağlı olarak çeşitli durum izleme yöntemleri ve donanımları geliştirilmiştir [1, 2].

Endüstriyel bir sürecin güvenilirliği düşünüldüğünde ise sistemin genel olarak kesintiye uğramadan üretim sürekliliğinin sağlanması anlaşılabilir. Bu bağlamda endüstriyel süreçlerde en fazla kullanılan eleman olan asenkron makinelerin, süreç güvenilirliği ve ekonomik işletim açısından önemi ise yadsınamaz bir gerçektir.

Literatürde ise, endüstriyel uygulamalarda kullanılan asenkron motorların arıza belirleme çalışmalarında kullanılmış birçok durum izleme çalışması gerçekleştirilmiştir [3-14]. Bu çalışmalardan ortaya çıkartılan sonuçlara göre arızaların dağılımı aşağıdaki gibi belirlenebilir.

Rulman kaynaklı arızalar : %41

Stator kaynaklı arızalar : %37

Rotor kaynaklı arızalar : %10

Diğer : %12

Arızaya neden olan hata mekanizmaları; aşırı ısınma, yalıtımda bozulmalar, mekanik arızalar ve motor devresi hatalarıdır. Yukarıdaki tablo motor arızalarının %50 den fazlasının rulman bozukluğu, mil dengesizliği, rotor ve yük milinin eş uyumlu olmaması gibi mekaniksel nedenlerden kaynaklandığını göstermektedir.

- Rulman arızaları: Dönme elemanları, iç ve dış bilezik ve dönme elemanlarını tutan kafeste olabilecek arızalardır.
- Stator arızaları: Stator gövdesi, stator çekirdeği ve stator sargılarında meydana gelebilecek arızalardır.
- Rotor arızaları: Rotor çubukları, mil ve rotor gövdesinde olabilecek arızalardır.
- Diğer arızalar: Faz empedanslarındaki dengesizlikler nedeniyle gerilim dengesizliğinin oluşması gibi elektriksel hatalar, aşırı yükleme, kötü kavramalar ve motorun iyi yataklanmaması gibi hatalardır.

Son senelerde ise güç elektroniği devrelerinin gelişimine paralel olarak sürücü devrelerden kaynaklanan rulman arızaları ön plana çıkmıştır [15].

Bu tezde ise endüstriyel sistemlerde en çok kullanılan elemanlardan biri olan asenkron motorların rulman arıza karakteristiklerini belirleme çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla laboratuvar ortamında yapay eskitme süreçleri ile oluşturulmuş rulman arıza verileri kullanılmıştır [16-17]. Makinanın rulman bölgesine yakın noktasındaki titreşim işaretinin, frekans tanım bölgesi analizi yapılarak rulman arızasına ilişkin özellik belirlenmesi gerçekleştirilmiş ve rulman arızasına ilişkin detaylı tespitler yapılmıştır. Bu anlamda titreşim işaretlerindeki enerjinin artımını izlemek için her bir eskime süreci sonrasında işaretlerin varyansları hesaplanarak, tüm eskime süreçleri bakımından nasıl bir değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Bundan sonra her bir zaman işaretinin güç spektrumu yoğunluklarına bakılarak rulman arıza tanısına ilişkin özellik çıkarımı yapılmış ve spektrumun alçak frekans bölgesindeki frekanslar fiziksel anlamları bakımından değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda rotor dengesizliği ve buna ilişkin olarak ortaya çıkan çeşitli harmoniklerin değişimi rulman arızasının gelişimine paralel olarak gösterilmiştir.

Bu çalışma aşağıdaki gibi düzenlenmiştir:

Giriş bölümünde konuya ilişkin literatür bilgisi verilerek çalışmada yapılanlar özetlenmiştir. İkinci bölümde ise makina bakım teknolojileri hakkında kısa bir bilgi verilmiştir. Üçüncü bölüm daha çok durum izleme teknikleri ile ilgili olup spektral analiz yöntemleri tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde makina titreşim ve gürültüsü konusunda kısa bir bilgi verilmiştir. Bu bölüm uygulama bölümünde kullanılacak titreşim analizi kısmının bir ön çalışması niteliğindedir. Beşinci bölümde, rulman yapısı hakkında bilgi verildikten sonra rulman arızasına ilişkin olarak titreşim işaretlerinin analizinden söz edilmiştir. Altıncı bölümde ise, rulman arıza oluşum mekanizması tanıtılıp, rulmanın elektriksel modelleri, sürücü devrelere ilişkin arıza oluşumu ve rulman arızalarının önlenmesi anlatılmıştır. Yedinci bölüm olan uygulama bölümü her bir eskitme sürecine ilişkin zaman ve frekans tanım bölgesi işaretlerinin gelişimi ile ilgili sonuçların elde edildiği ve bu sonuçların yorumlandığı bir bölümdür. Son bölüm olarak verilen sonuçlar ve öneriler kısmında ise bu çalışmada yapılan analiz sonuçları verilerek, sonraki çalışmalara hazırladığı olanaklar öneriler şeklinde sunulmuştur.

2. MAKİNE BAKIM TEKNOLOJİLERİ VE GELİŞİMİ

Endüstriyel süreçlerde kullanılan elektrik motorlarının elektriksel ve mekanik kısımlarındaki arızaların erken belirlenmesi, süreç güvenilirliği ve ekonomikliği açısından son derece önemlidir. Bu nedenle, öngörülü bakım (Predictive Maintenance) amaçlı durum izleme (condition monitoring) çalışmaları, makina durum bilgisinin ortaya çıkartılmasının temelini oluşturur [1-3].

Ayrıca bakım teknolojisinin gelişim sıralaması ise düzeltici bakım, periyodik (zaman tabanlı) bakım ve öngörülü (durum tabanlı) bakım şeklinde verilebilir.

Düzeltilici bakım ya da arıza sonrası bakım eleman arızalandığında yapılan bakımdır. Bir otomobilde kopuk fan kayışının değiştirilmesi, bir su sızıntısı olduktan sonra çatının tamir edilmesi, bir basınç algılayıcısının hatalı okumalar gösterdiğinde değiştirilmesi ya da yeniden kalibrasyonu örnek olarak verilebilir.

Periyodik veya zaman tabanlı bakım bir eleman üzerinde önceden belirlenmiş aralıklarda ya da işletme şartları tasarımında önceden belirlenmiş kriterleri sağlamak amacıyla yapılan bakımdır ve önleyici bakım olarak da bilinir. Bir aletin periyodik olarak yapılan kalibrasyonu, filtrelerin periyodik olarak yerleştirilmesi, yapımcı firma tarafından belirlendiği üzere bir otomobildeki motor yağının değiştirilmesi örnek olarak verilebilir. Hepsinde de elemanın durumuna bakılmaksızın ve gerekli olmadıkça bile yapılır.

Öngörülü veya durum tabanlı bakım bir elemanın performans parametrelerinin sürekli ya da periyodik olarak izlenmesi ve bunların daha önceden belirlenmiş limitlerle (uyarı ve alarm limitleri) karşılaştırılması esasına dayanır. Bu yolla sürecin çalışmasını devam ettirebilmek için ne çeşit bir önlem alınacağı saptanır. Bu, bakımın gerektiği zaman gerçekleştirilmesi olup, durum tabanlı bakım zamana bağlı değildir. Bir elemanın davranışındaki başlamakta olan değişiklikleri tespit etmek ve zamanında problemi düzeltmek ise bu tür bakımın stratejisini oluşturur. Dönen makinalarda durum izleme,

alet kalibrasyonu bulguları, sıcaklık, basınç, akış gibi süreç değişkenlerini izleme örnek olarak verilebilir. Bu tür bakımın gerçekleştirilebilmesi amacıyla endüstriyel sistemdeki elemanlar için durum izleme çalışmaları yapılır ve elemanların arıza başlamadan önce hangi karakteristik özellikler gösterdiği belirlenir. Gelişmekte olan bir arızayı gösteren bu karakteristik özelliklerden yararlanarak sistemdeki elemanlar gerektiği zaman devreden çıkartılır ve bakıma alınır. Böylece sistemdeki ani kesintiler önlenerek sistemin daha güvenilir ve ekonomik bir şekilde işletimi söz konusu olur.

Bu anlamda öngörülü ve durum tabanlı bakım teknolojileri son 20 yıldır üçüncü kuşak olarak isimlendirilen teknoloji grubu içerisinde yer alır. Bu teknoloji grubundaki yaklaşımlarda en fazla kullanılan yöntemlerden biri ise spektral analiz yöntemi olup bu yolla makina durum bilgisi frekans tanım bölgesinde kolayca ifade edilebilir. Ayrıca durum bilgisi, zaman serisi şeklindeki verilerin istatistiksel analizi yoluyla da elde edilebilir. Ancak daha güvenilir ve duyarlı izleme çalışmaları için yeni tekniklere gereksinim duyulduğundan bu amaçla son senelerde birçok mühendislik alanında başarıyla uygulanmış olan zaman-frekans (zaman-ölçek) yöntemleri, makina durum izleme alanında da kullanılmıştır.

3. DURUM İZLEME VE ARIZA BELİRLEME TEKNİKLERİ

Elektrik makinalarındaki durum izleme çalışmalarına ilişkin işaret tabanlı analizler bakımından gözönüne alınacak temel teknikler istatistiksel analiz, spektral analiz ve zaman-frekans analizi gibi tekniklerdir. Bu teknikler vasıtasıyla makinadan alınacak olan titreşim, akım, gerilim, sıcaklık ve ses gürültü seviyesi gibi test işaretleri kolayca analiz edilerek arızaya ilişkin özellik çıkarımları yapılabilir. [18]

3.1. Spektral Analiz Yöntemleri

İşaretlerin spektral özelliklerini çıkartmak bakımından en bilinen yöntemlerden biri Fourier Dönüşümü üzerine temellenmiş güç spektrumu yoğunluğudur. Konuya ilişkin tanımlar aşağıdaki gibi verilebilir.

3.1.1. Güç Spektrumu Yoğunluğu ve Zaman-Frekans Teknikleri

Bir raslantı işaretine ait frekans bilgisini elde etmek amacıyla ayrık Fourier dönüşümü hesaplanarak o işaretin frekans domenine dönüşümü yapılır. N örnekli bir veri bloğu için Δf frekans çözünürlüğü ve Δt de örnekleme zamanı 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. $x(t)$ işaretinin öz güç spektral yoğunluğu (ÖGSY) da

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

bağıntısıyla hesaplanır [18]. Herhangi iki $x(t)$ ve $y(t)$ işaretleri arasındaki çapraz güç spektral yoğunluğu (ÇGSY) da benzer şekilde hesaplanır.

İşaretlerdeki durağan ve durağan olmayan değişimleri belirlemek bakımından Fourier dönüşümüne alternatif olarak Kısa-Zaman Fourier dönüşümü ve Dalgacık Dönüşümü teknikleri geliştirilmiştir. Özellikle son on yıldır durağan olmayan işaret analizleri için çok çözünürlüklü dalgacık analizi tekniği güçlü bir yöntem olarak kullanılmaktadır [17].

3.1.2. Kısa-Zaman Fourier Dönüşümü

1946 yılında Gabor tarafından tanıtılan Kısa-Zaman Fourier Dönüşümü (KZFD), işaretlerin frekans bileşenlerinin zaman içindeki yerini ifade etmek için kullanılan bir yöntemdir. KZFD spektrumu sabit bir pencere aralığı vasıtasıyla işareti pencereleyerek bulunur. Söz konusu işaret bu pencere aralığı içinde yaklaşık durağan olarak kabul edilebilir. Pencere aralığı zaman ve frekans çözünürlüklerinin her ikisini de sabitler. KZFD, τ anında merkezlenmiş $g(t')$ sabit penceresi içinde durağan kabul edilen bir $x(t')$ işareti gözönüne alınarak aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$KZFD(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t') g(t' - \tau) \exp[-2\pi f t'] dt' \quad (3.3)$$

Bu denklem, işareti zaman-frekans (t, f) düzlemi içindeki iki boyutlu bir fonksiyona betimler. Bu analiz, seçilen $g(t')$ penceresine bağlıdır. Uygulamada önce $g(t')$ penceresi seçilir ve KZFD nin çözünürlüğü, tüm zaman-frekans düzlemi üzerinde sabitlenir. KZFD, zaman-frekans arasındaki uyumayı da sağlar ve her ikisi bakımından da bilgi içerir. Ancak bu bilgi sınırlı bir duyarlılıkla bulunur ve bu duyarlılık seçilen pencerenin büyüklüğü ile belirlenir. KZFD de zaman ve frekansın eş anlamlı çözünürlüğü *belirsizlik prensibi* vasıtasıyla önlenir. Bu durumda, zaman çözünürlüğü pencere uzunluğunu değiştirerek düzeltilirken, frekans çözünürlüğü kötüleşir. Bu anlamda Δt ile verilen ve Δf band genişliğinin çarpımı ile sınırlandırılan *Heisenberg'in belirsizlik eşitsizliği*

$$\Delta f \times \Delta t \geq \frac{1}{4\pi} \quad (3.4)$$

şeklinde tanımlanır.



4. ELEKTRİK MAKİNELERİNDE GÜRÜLTÜ VE TİTREŞİM

Gürültü genel anlamda istenmeyen bir ses çeşididir. İnsan kulağı ise sesin iki ayrı özelliği olan ses şiddeti ve frekansına göre yanıt vermektedir.

Motor çalışmasında daha çok düşük şiddette olsa bile, gürültü frekansı insan kulağına rahatsızlık verecek bir özellik olarak ön plana çıkmaktadır.

Titreşim ve gürültü, iletim şekliyle ayırdedilirler. Titreşim motor yapısı tarafından çevredeki parçalara iletilirken, gürültü, ortamı çevreleyen hava ile iletilir. Motor gürültüsü ve titreşiminin sebepleri iki genel gruba ayrılabilirler; bunlar sırasıyla mekanik ve elektriksel nedenlerdir.

4.1 Mekanik Gürültü

Mekanik gürültü genellikle rulman, fan ve dişli elemanların bir sonucudur. Bazı sesler doğaldır ve azaltılabilir fakat tamamıyla yok edilemez.

Diğer bir gürültü kaynağı da dengesiz dönme sonucu oluşur. Birçok motor üreticisi, üretim sırasında dahili dönen parçaların dengesi için önlemler alırlar. Dengesiz dönme, gürültünün yanında, motor ömrünü kısaltan rulman ve milin zamanından önce aşınmasına neden olur.

4.1.1. Dinamik Dengesizlik

Dinamik dengesizlik, ağırlığa bağlı olarak simetrisiz dönen elemandan kaynaklanmaktadır. Sargıdaki iletken boşluğunun düzgün olmaması, rotor malzemesinin her yerinde aynı özelliği taşıması, veya fan montajı, veya mildeki kayıklık anlaşılır bir dengesizliğe neden olabilirler. Küçük güçlü motorlarda dinamik dengeleme ile dengeleme küçük bir hata içinde sağlanabilir. Standart denge sınırları motor tipine, dönen elemanın ağırlığına ve hızına bağlı olarak üreticiler tarafından belirlenir.

Özel tolerans dengelemesi de mümkündür fakat diğer gürültü ve titreşim üreten faktörler kontrol edilip düzeltildikten sonra nadiren zorunludur. Bazı motorlarda dinamik dengesizliği kontrol etmenin kolay yolu motoru hızlandırmak ve sonra gücü kesmektir. Eğer titreşim yavaşlama esnasında hala devam ediyorsa, problemin mekanik dinamik dengesizlik olduğu anlaşılır.

4.1.2. Bilyalı Rulmanlar

Rulman gürültüsü, rulman hızı ve ön yüklemeyle çok yakından ilişkilidir. Ön yükleme, yüklenmemiş bilyalardaki sesi önlemek için bilyalı rulmana uygulanan aksiyel kuvvettir. Gürültünün önemli olduğu uygulamalarda rulmanın dış yoluna iletilen aksiyel kuvvetin (ön yükün) ayarlanması için bir ayar vidası bulunması gerekir. Bir kilit somunu fabrika ayar pozisyonunun elde edilmesini sağlar.

Dikkatle yapılmış ve elektronik olarak incelenmiş bilyalı rulmanlarda bile 40 db in altındaki gürültü seviyelerine ulaşmak zordur ve 60 db e ulaşan gürültüler de az değildir. Bilyalı rulman üretimindeki çok küçük değişimler gürültü seviyesinde önemli etkiler oluştururlar. Bu yüzden aynı görünümlü motorların gürültü seviyeleri (10 db veya daha fazla) farklı değerler alabilirler.

4.1.3. Silindirik Rulmanlar

Eğer yük ve çalışma sınırları sağlanıyorsa, daha düşük gürültü seviyelerine sahip silindirik rulmanlar tercih edilir. Bunlarda en sık görülen problem saplama pulu gürültüsünün kontrolüdür. Saplama pulundan gelen aralıklı sıyrma sesinin kontrolü zordur ve bilya/saplama düzeneğinin kullanımı genellikle minimum gürültünün gerektiği yerlerde belirlenmiştir. Silindirik rulmanların düzgün çalışması için boşluk gerektiğinden (ön yüklemeli bilyalı rulmanların tersi), elektromagnetik doyuma yakın veya erişmiş olarak çalışan veya yüksek derecede dinamik dengesizlikle çalışan güçlü motorlarda görülen, radyal titreşime karşı bu tip rulmanlar oldukça duyarlıdır. Bu koşullar altında ve özellikle eğer yüksek ısılar rulman yağ tabakasını inceltirse,

rulmanda vuruntular ve çarpmalar oluşacaktır. Bu durum oluşmaya başladığında motor üreticisi mil rulman boşluk toleransını normalden daha yakın biçimde kontrol etmelidir.

4.1.4. Fanlar

Fanlar düşük hızlı motorlarda bile gürültünün ana kaynağı olabilirler. Hava hareketinden oluşan gürültü, genellikle insan kulağının daha az duyarlı olduğu çok düşük bir frekans noktasındadır. Ne kadar böyle olsa da çıkış kaynağından geçen havanın oluşturduğu ses çok rahatsız edici olabilir. Yüksek hızlı fan tasarımı, siren etkisinden korunmak için özel dikkat gerektirir ve fan pervaneleri sabit bir yüzeye çok yakın olmamalıdır.

(NOT: yanlış gürültü seviyesi ölçümü yapılmaması için gürültü ölçüm aygıtları, direk hava akışı hattı üzerine yerleştirilmemelidir.)

4.1.5. Dişliler

Dişliler, mekanizmanın tipine ve imalatın doğruluğuna bağlı olarak, aşırı gürültülere neden olabilir veya olmayabilirler. Sonsuz vida dişli, kayan temas hareketi ile normalde gürültüsüz sayılır. Eğer sayısal olarak yüksek giriş hızında düşük bir orana sahipse, yazılı toleranslardan küçük sapmalarda bile gürültüye neden olabilirler.

Helezon dişliler de sessizdir, çünkü dişlerin üst üste binmesi yükün dişten dişe yumuşak bir iletimi şeklinde olur. Özellikle eğer dişlinin durumuna göre maksimum oran kullanıldıysa düz dişli, gürültü kontrolü en zor olan dişlidir. Bu koşullar altında herhangi bir zamanda ne kadar az sayıda diş temas halinde ise, o kadar sert yük iletimine ve bunun sonucunda gürültüye neden olur. Yük altında bu gürültü daha da kötüleşir ve genellikle yük arttıkça yoğunluğu da artar.

Tüm dişlilerdeki önemli bir faktörde “çok hafif yüklerde” oluşan diş boşluğu sesidir. Hafif yüklerde, en küçük tolerans sapması bile dişlide çok küçük ani hız değişimlerine ve böylece gürültü oluşmasına neden olacaktır. Dişlileri daha ağır yüklemek gürültüyü

azaltabilir. Çok az yüklenmiş dişlilerde diş boşluğu gürültüsü, özellikle sayısal olarak düşük oranlarda normal olarak düşünülür. (Birçok durumda uygulanan yük, diş boşluğu gürültü noktasını aşmaya yeter.)

4.2 Elektriksel Gürültü ve Titreşim

Gürültü ve titreşimin elektriksel kaynakları, mekaniksel olanlardan daha belirsiz olmasına rağmen rahatsız edici olabilirler. Birçok elektriksel gürültü kaynağı uygulamadan çok, motorun konstrüksiyon ve tasarımı ile ilişkili olduğundan üretim safhasında minimize edilmelidir. Elektriksel gürültü ve titreşim kaynakları aşağıdaki gibi verilebilir.

4.2.1. Doyma

Magnetik devrelerin aşırı doyması, aşırı elektriksel gürültü ve titreşimin en sık görülen sebeplerinden biridir. Her motorun magnetik kısmı magnetik gerilmeye uğramadan ancak belli bir miktarda akıyı taşıyabilir. Eğer akı çok artarsa, kaçak akı oluşur. Ayrıca akı yolunun en kuvvetsiz kısmında (genellikle stator dişleri) aşırı titreşim oluşturan gerilmeler, elektriksel gürültü ve sesin oluşmasına neden olurlar.

4.2.2. Amper Sarımların Dağılımı

Motor sessiz çalışması, akı gücünden başka akının hava aralığında nasıl dağıldığına da bağlıdır. Asenkron motorlarda ideal olan akı şeklinin sinüzoidal olmasıdır. Daha fazla stator dişi daha sinüzoidal bir dağılım şekli üretir.

4.2.3. Hava Aralığı

Asenkron motorlardaki hava aralığının radyal uzunluğu motor gürültüsünde etkilidir. Bazı motorlarda gürültüyü azaltmak için hava aralığı arttırılabilir. Genel olarak, geniş hava aralıklarının, motor veriminde ters bir etkisi olduğundan tercih edilmez.

“Fırçalı” motorlarda kutup uçlarında hava aralığını yükselterek, daha sessiz çalışma elde edilebilir.

4.2.4. Stator Dişlerinin Sayısı ve Rotor İletkenleri

Sessiz motor çalışması sadece belli oranlar veya stator dişlileri ve rotor iletkenleri kombinasyonları ile üretilebilir. Ne kadar böyle olsa da optimum sessizlik için üretilen kombinasyon, motor veriminden veya çıkış torkundan fedakarlık anlamına gelmektedir. Bu yüzden (gürültü en önemli faktör olmadığı sürece) motor tasarımı, istenen motor gürültüsü, gerekli çıkış ve verim arasında uzlaşa içinde olmalıdır.

4.2.5. Çıkık kutup Etkisi

Rotor dış çapında bulunan ferromagnetik malzemenin bulunduğu alanlar çıkık kutuplar olarak adlandırılırlar. Motor çalışırken, bu kutuplar oldukça yoğunlaşan magnetik kuvvet bölgesi haline gelirler. Çıkık kutuplardaki yoğunlaşan magnetik kuvvet, rotorların magnetik dengesizliğe karşı daha hassaslaşmasına neden olur.

4.2.6. Stator Kutup Sayısı

İstenen çalışma hızından bağımsız olarak verilen küçük güçlü motor yapısındaki tüm endüksiyon sargı tipleri için bir temel stator çekirdek dizimi tasarımı uygulanmaktadır. Stator tabaka geometrisi tüm sargı tipleri için magnetik yolu oluşturur ve genellikle en genel çalışma hızı için optimize edilir. Dört kutuplu çalışma en genel haldir. Verilen bir güç çıkışı için bir tabakalama uygulandığında, magnetik gürültü iki kutuplu sargıda genellikle daha düşük olur. Altı kutuplu çalışma yerine dört kutuplu kullanılırsa hava aralığındaki yüksek akı yoğunluğu daha yüksek magnetik gürültü üretimine neden olur.

4.2.7. Uygulanan Gerilimin Frekansı

Asenkron motorlar hat frekansının yüksek harmoniklerini üretirler ve bunlar saç dizimi tasarımında göz önüne alınır. Doymaya yakın durumlar veya aşırı doyma, harmonikleri büyütür ve istenmeyen elektriksel gürültü üretir. Genelde hat frekansı ne kadar

yüksekse harmoniklerden kaynaklanan elektriksel gürültü de o kadar rahatsız edici olur. Çok düşük frekanslarda (25 Hz'in altında) harmonikler motor yapısında titreşimi önlemek için esnek montajı zorunlu kılan rezonans etkisine neden olurlar.

4.2.8. Armatür Veya Rotor Çekirdeğinin Çarpıklığı (Eğriliği)

Eğer dönen çekirdek çarpıklaşırsa daha sessiz bir çalışma elde edilebilir. Bu, rotor iletkenlerinin ve armatür sargısının magnetik alana belli bir açıyla girerek devre relüktansının ani değişimini azaltır ve böylece stator ve rotor dişleri arasındaki titreşimi minimize eder. Ne kadar böyle olsa da rotor ve sargı montajında karşılaşılan zorluklardan dolayı, kullanılabilecek çarpıklık açısının da pratik sınırları vardır. Ayrıca hız düzenini ve motorun verimini düşüreceği de dikkate alınmalıdır.

4.2.9. Komutasyon Ve Amper-Sarım Oranları

Fırçalı motorların sessiz çalışması iyi komutasyona bağlıdır. Sargı alanlı motorlarda iyi komutasyon elde etmek için, alan amper-sarımları ile sargı amper-sarımları arasında mükemmel bir oran olmalıdır. Motor fırçaları yumuşak ve sessiz çalışacak biçimde tasarlanmalı ve kıvılcım oluşumu minimum düzeyde olmalıdır. İyi komutasyon, ayrıca fırça malzemesinin doğru seviyelenmesiyle de ilişkilidir. Böylece komutatör üzerinde düz komutatör filmi oluşur ve sonucunda kıvılcımlar azalır.

4.2.10. Armatür olukları

Fırçalı tip motorlarda oluk sayısı motorun gürültü seviyesi ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek ve çift oluk sayısı daha yumuşak ve sessiz çalışma için daha çok tercih edilmektedir.

4.3. Gürültü Kontrolü

Motorların minimum gürültü ve titreşim seviyesinde çalışmasını sağlamak için üreticinin aldığı ölçümlere ek olarak, motor kullanıcısının takip edeceği birçok gürültü

azaltıcı yöntem mevcuttur. Gürültü azaltma için genel yaklaşım, gürültünün kaynağında azaltılması ve havadan nakledilen gürültü seviyesinin azaltılması şeklinde verilebilir.

Motor gürültü ve titreşimi konusundaki çalışmalar, motor tasarımına ek olarak, kullanımı, uygulamasının montajı, motor yanında ses emici veya yansıtıcı yüzeylerin varlığı (veya yokluğu) motor çalışırken üretilen çeşitli frekanslardaki ölçülebilir ses seviyesini etkilediğini göstermektedir.

4.3.1. Gürültünün Kaynağında Azaltılması

Gürültüyü kaynağında azaltmaya girişmeden önce, frekans ve gürültü veya titreşim arasındaki ilişki iyice anlaşılmalıdır. Bu gürültü azaltma çalışmalarında en çok gözden kaçırılan safhadır.

Alçak frekanslı gürültü kaynakları: Alçak frekanslı gürültülerin nedeni motorun dönme frekansında oluşan rotor veya armatür dengesizlikleridir. 60 Hz, 1800 devir/dak'lık bir motorun dönme frekansı 30 Hz dir. Bu frekans aslında normal duyma sınırları dışındadır. Ne kadar böyle olsa da bu frekansta oluşan titreşimler eğer motorda önleyici ölçümler yapılmazsa diğer parçalarda duyulabilen rezonans frekanslarının oluşmasına neden olurlar. Alçak frekanslı gürültülerin etkilerini minimuma indirmek için en etkin yaklaşım, esnek montaj ve bağlamadır. Kauçuk, keçe, mantar veya yay gibi esnek malzemeler motor ayaklarının altına veya taban ve yapı arasına yerleştirilebilirler. İdeal montaj, motorun ve destek sisteminin doğal frekansının minimum rahatsız edici frekanstan daha düşük olmasına olanak sağlayacak şekilde yumuşak olmasıdır.

Diğer faktörler (yük altında yapılan montajın dönmesi gibi) nedeniyle ideal montaj durumu her zaman sağlanamaz. Genel olarak olabilecek en esnek montajı kullanmak en iyisidir.

Esnek montajlamadan sonra bile titreşim sorun oluşturuyorsa motor montajına ağırlık eklemek titreşimi etkili biçimde azaltacaktır. Örneğin, motor montaj ağırlığını iki misline çıkarınca titreşim genliği yarıya düşer.

Genelde taşınabilen aygıtlarda bulunan diğer bir sorun da montaj yüzeyi olarak ince tabaka metal kaplamalardır. İnce duvarlı yapılar bir zar gibi işler ve ses üretir.

Genellikle 60 Hz lik asenkron motorda elektromekanik kaynaklı bozucu etkiler 120 Hz de daha güçlüdür ve çoğunlukla 500 Hz in üstünde ihmal edilebilir.

Yüksek frekanslı gürültü kaynakları: Yüksek frekanslı gürültünün (500 Hz in üzerinde) en temel kaynakları bilyalı rulmanlar ve soğutma fanlarıdır. Fırçalı motorlarda fırça gürültüsü de bir faktör olabilir.

Bilyalı rulman gürültüsü genellikle asenkron motorlarda en kötü gürültü durumudur ve 1000 ile 4000 Hz arasında meydana gelir. Eğer yük şartlarını karşılıyorsa silindirik rulmanlı motorları seçmek bu sorunları çözecektir. Fırça malzemelerini değiştirmek fırça gürültüsünü azaltmaya yardımcı olacaktır. Bu frekans düzeyinde havadan nakledilen gürültü, akustik azaltıcı malzemeler kullanılarak etkin biçimde azaltılır.

4.3.2. Havadan Nakledilen Gürültü Seviyesinin Azaltılması

Gürültü kaynağı ile dinleyici arasındaki mesafenin artması veya sadece kaynağın dinleyiciye göre yerinin değiştirilmesi gürültü seviyesinin düşmesini sağlayabilir.

Gürültü seviyesini düşürmek ve kontrol etmek için akustik emici malzemeler kullanıldığında motor vantilasyonun engellenmemesine dikkat etmek gerekir.

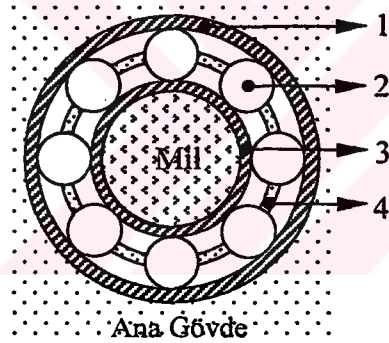
Tam kapalı bir ortam veya çok sayıda odacık kombinasyonu ile de sesin istenen düzeyde azalması sağlanabilir. Odacıklar kadar etkin olmasa da yüksek frekans sesini kalkanlamak için bariyerler de kullanılabilir.

Genellikle odacıkların vantilasyon anlamında motor ısınmasına etkiyebileceğine dikkat etmek gerekir. Akustik malzemelerle belirlenen dikkatle tasarlanmış vantilasyon kanalları, motor ısısı dışarı atılırken gürültü seviyesinin azalmasına olanak tanıyacaktır.[19]

5. RULMAN ARIZASI VE TİTREŞİM İŞARETLERİNİN ANALİZİ

Genel olarak rulmanlar mekanik yatakların bir alt sınıfı olup bir makinada birbirine göre farklı hızlarda dönme hareketi yapan parçaların olduğu yerlerde kullanılırlar. Dönme hareketi yapan kısımların arasındaki sürtünme kuvvetini en aza indirmek veya ortadan kaldırmak rulmanların kullanılmasında temel amaçtır. Genel olarak rulmanlar iç ve dış halka ile yuvarlanan elemanlar ve bu elemanları tutan bir kafesten oluşurlar.

Yuvarlanan elemanlar itibari ile de yuvarlak, küresel (bilyalı), silindirik veya iğne gibi değişik tiplerde rulmanlar mevcuttur. Şekil 1'de bilyalı tip bir rulmanın genel yapısı verilmiştir.



Şekil 5.1. Bir Rulmanın genel yapısı (1-dış bilezik, 2-yuvarlanan elemanları, 3-iç bilezik, 4-kafes) [15]

Günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişmesine paralel olarak birçok titreşim analizi programlarının geliştirilmesi rulmanlarda durum izleme çalışmalarını kolaylaştırmıştır. Bu anlamda rulman arızalarının % 90' ı aylar önceden bildirilebilmektedir. Hala rulman arızalarının % 10' u tahmin edilemeyen bir karakterdedir. % 90 gibi büyük bir yüzdenin önceden bildirilebilmesi, birçok firmanın titreşim izleme programlarını geliştirmeye yönelik araştırma yapması için yeterli bir sebeptir.

Genellikle rulman fabrikalarındaki üretimden çok az sayıda kötü rulman çıkmaktadır. Buralardaki kalite kontrolü diğer üretim malzemelerinin üretimine kıyasla en üst

düzydedir. Rulman birçok nedenden bozulabilir, en azı üretimden kaynaklanan kusurlardır. Her rulmanın belli kusurları vardır ve buna bağı olarak derecelendirilirler. Yüksek kalitedeki rulmanları, alçak kalitedekilerden ayıran, bu kusurların derecesidir. Rulman arızalarının birincil ana sebebi bu kusurların varlığı değildir. Rulman arızalarının çevresel ve yapısal etkilere dayalı ana sebepleri:

- 1- Nemi içeren, kirlilik, 2- Aşırı gerilme, 3- Yağ eksikliği, 4- Üretim sonrası oluşan kusurlardır.

Rulmanlar, ancak nominal ömürlerinin % 10' una ulaşabilmektedirler. Laboratuvar koşulları altındaki rulman ömrü testleri 100 ile 1000 yıl arasında sonuçlanmaktadır. Açıkça görülmüştür, tasarım ve üretim rulmanların ömürlerini sınırlayan kusurları oluşturmazlar. Çalışma koşullarında ise bu faktörler, laboratuvar testlerinde olduğu gibi optimum seviyede değildir. Testler, biraz dikkatle uzun ömrün elde edilebileceğini ispatlamaktadır. Rulman arızasının önceden bildirilmesi üretim yöneticisi için önemli bir bilgidir, fakat arızanın kaynağının bilinmesi olayın yinelenmesini önlemek için anahtar bilgidir. Çok az sayıdaki arıza kaynağı üretim sırasında oluşur, arızaların büyük bir kısmı kullanım ile birlikte ortaya çıkmaktadır. Bu önemlidir çünkü üretim kusurları konusunda pek fazla bir şey yapılamaz. Kullanıcıların oluşturduğu kusurları önlemek içinse birçok şey yapılabilir. Arızaya neden olacak kusurlar büyük bir olasılıkla makine çalıştırıldığı anda mevcuttur ve modern titreşim aygıtları bunları tespit edebilir.

Yapılan analizler sonucunda belirli titreşim durumlarının belli frekanslarda ortaya çıktığı görülmüştür. Titreşimin frekansının bilinmesi tanı problemi için en önemli şeydir. Rulmanlarda belirli titreşim frekansları ya da üretilen seslerin genliği rulman durumunun bir göstergesidir. Bilyalı rulmanlar dört farklı ses verirler. Bunlar;

Temel dizi (zincir) frekansı (TDF)

Bilya dönme (BD) frekansı

Dış bilezik (DB)

İç bilezik (IB)

Bu belirli frekansların hesaplanması için gerekli formüller şunlardır:

$$TDF = \frac{rps}{3} \left[1 - \frac{Bd}{Pd} \cos \phi \right] \quad (5.1)$$

$$BD = \frac{Pd}{2Bd} (rps) \left[1 - \left(\frac{Bd}{Pd} \right)^2 \cos^2 \phi \right] \quad (5.2)$$

$$DB = N(TDF) \quad (5.3)$$

$$IB = N(rps - TDF) \quad (5.4)$$

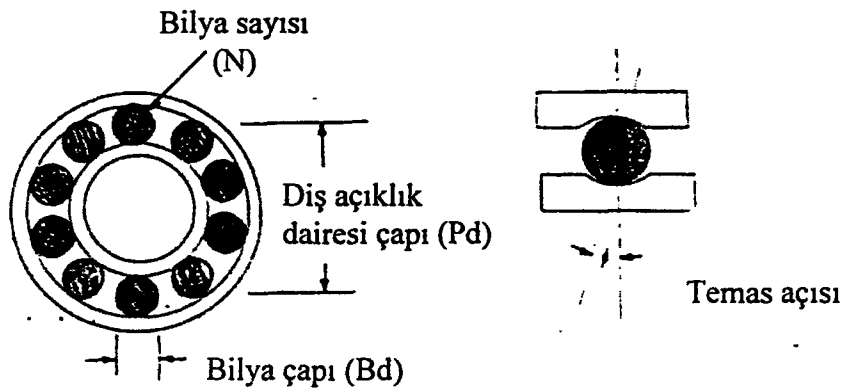
rps = iç bileziğin saniyedeki devir sayısı

Bd = bilya çapı

Pd = diş açıklık dairesi çapı

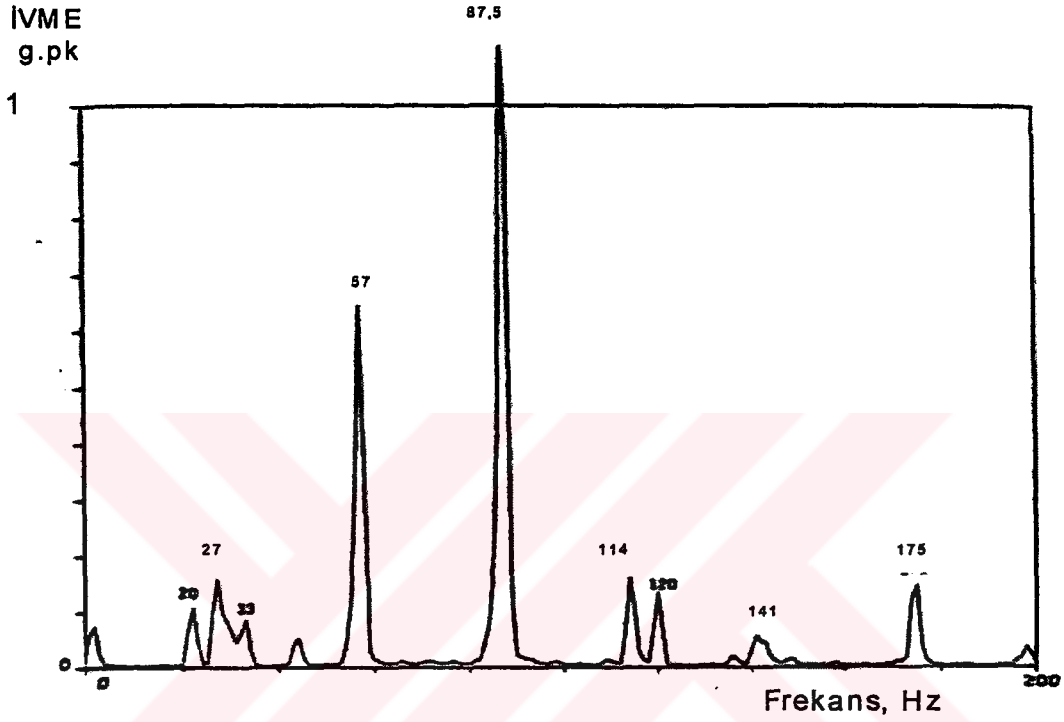
N = bilya sayısı

Φ = temas açısı



Şekil 5.2. Rulman Frekanslarının Hesaplanması İçin Parametreler [20]

Bu formüller teoriktir, hesaplanan ve ölçülen rulman frekansları arasında farklılık olabilir.



Şekil 5.3 1715 dev/dak Dönen NSK 6311 Rulmanının Titreşim Spektrumu [20]

Uygulamada rulman frekans cetveli tabloları mevcuttur. Örneğin 6311 tipindeki rulmanın FAG,SKF ve NTN gibi farklı ticari markalardaki özellikleri Tablo 5.1 deki gibi cetvelenmiştir.

Tablo 5.1. Rulman Frekans Faktörleri [20]

	TDF	BD	DB	IB
FAG 6311	0,378	1,928	3,024	4,976
SKF 6311	0,382	2,003	3,057	4,943
NTN 6311	0.384	2,040	3,072	4,928

NOT: Titreşim frekansını elde etmek için bu faktörler dönme hızı ile çarpılır.

Farklılıklar büyük olabilir. Rulman tabloları milin döndüğünü ve dış bileziğin sabit olduğunu varsaymaktadır. Eğer bu koşullar gerçekleşmiyorsa, cetvelenmiş sayılar geçersizdir. Sonuç olarak rulman üreticileri tasarım numaralarını değiştirmeksizin rulmanlarının iç yapısını değiştirme hakkına sahiptirler. Yani bilya sayısını, bilya boyutunu veya dış açıklık dairesi çapını, rulmanın yapısını, oturumunu veya fonksiyonunu etkilemediği sürece değiştirebilirler ve yeni rulman eski numarasını taşır. Tek zorunluluğu aynı frekansı üretmeseler de makine de değiştirilebilir olmasıdır.

Rulman frekansları Tablo 5.1 deki sayıların milin dönme hızı ile çarpılmasıyla bulunur. Eğer SKF 6311 rulmanı ele alınırsa, Tablo 5.2 deki frekanslar bulunur.

Tablo 5.2. 1715 dev/dak da Dönen SKF 6311 İçin Rulman Frekansları [20]

Temel dizi(zincir) frekansı = $0,382 \times 28,58 = 10,92$ Hz

Bilya dönme frekansı = $2,003 \times 28,58 = 57,25$ Hz

Dış bilezik frekansı = $3,057 \times 28,58 = 87,37$ Hz

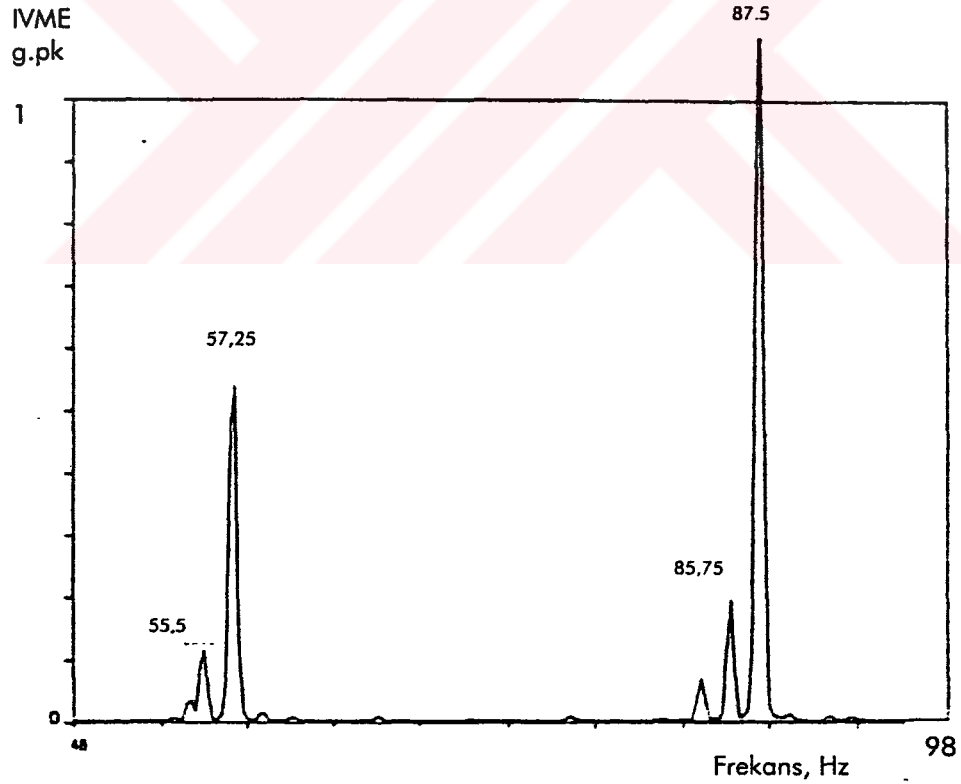
İç bilezik frekansı = $4,943 \times 28,58 = 141,27$ Hz

Şekil 5.3 te üç yüksek frekans görülüyor. Burada temel dizi(zincir) frekansı (TDF) gözüküyor. Bu durum ciddi bir kafes kusuru olmadığını işaret eder. 57 ve 87,5 Hz deki titreşim tepeleri bilya dönme (BD) ve dış bilezik (DB) frekansları gibi görünüyor fakat dönme hızının harmonikleri de olabilirler. Dönme hızının harmonikleri ise

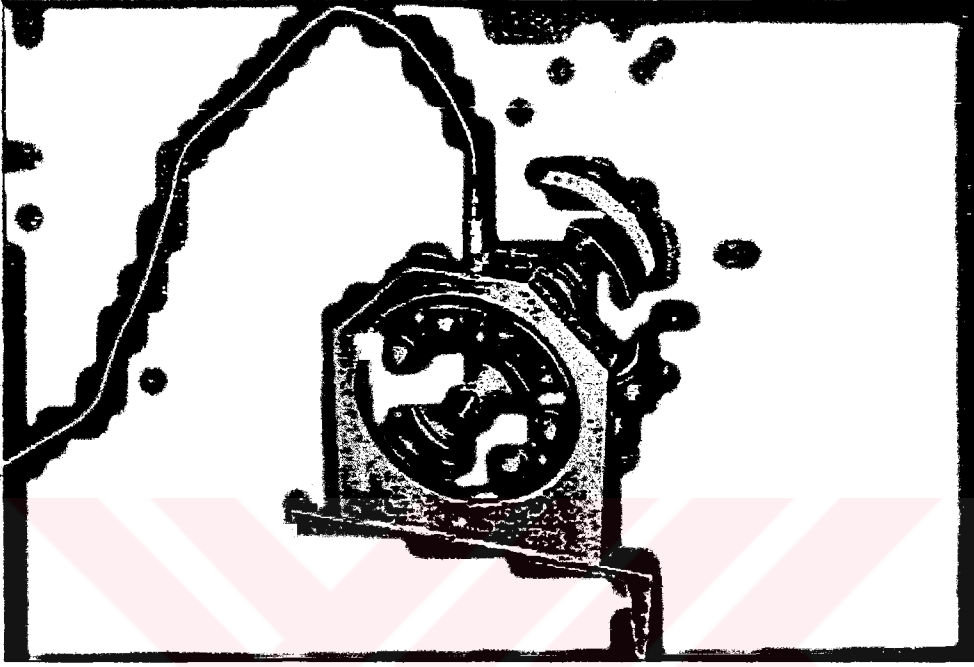
$$2 \times 28,58 = 57,16 \text{ Hz}$$

$$3 \times 28,58 = 85,74 \text{ Hz dir.}$$

Bunu belirlemenin bir yolu tepelere daha yakından bakmak olacaktır. Bu. Şekil 5.4 de yapılmıştır. Burada 57 Hz tepesinin 55,5 ve 57,25 Hz de iki ayrı göze çarpan titreşime bölündüğünü görüyoruz. 57,25 Hz daha çok bilya dönme ve dönüş hızı harmoniği gibi görünüyor. İki frekans çok yakın ve üst üste binmişler. Yakınlaşınca ikiye ayrılır. Bu, rulman izlemede analiz edenin dikkat etmesi gereken bir durumu tanımlamaktadır. Tablo 5.2 deki rulman frekans faktörleri birbirine çok yakın olduğundan, ölçülen rulman frekansı ve dönme hızı harmoniği üst üste binecektir. 87,5 Hz tepesi, dönme hızının üçüncü harmoniği olan 85,75 Hz ve açıkça dış bilezik frekansı olan 87,5 Hz de iki tepeye bölünmüştür.



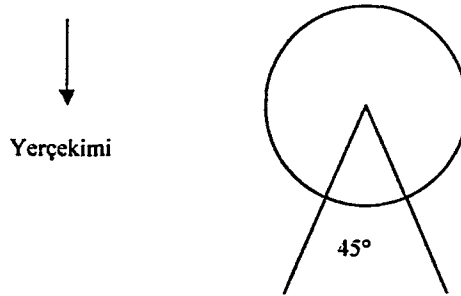
Şekil 5.4. Rulman Spektrumunun Yakınlaştırılmış Görüntüsü [20]



Şekil 5.5. Rulman Titreşiminin Ölçülmesi İçin Test Düzenegi [20]

Bu rulman, Şekil 5.5 te gösterilen test yapısında yağsız biçimde kuru olarak çalıştırılmıştır..

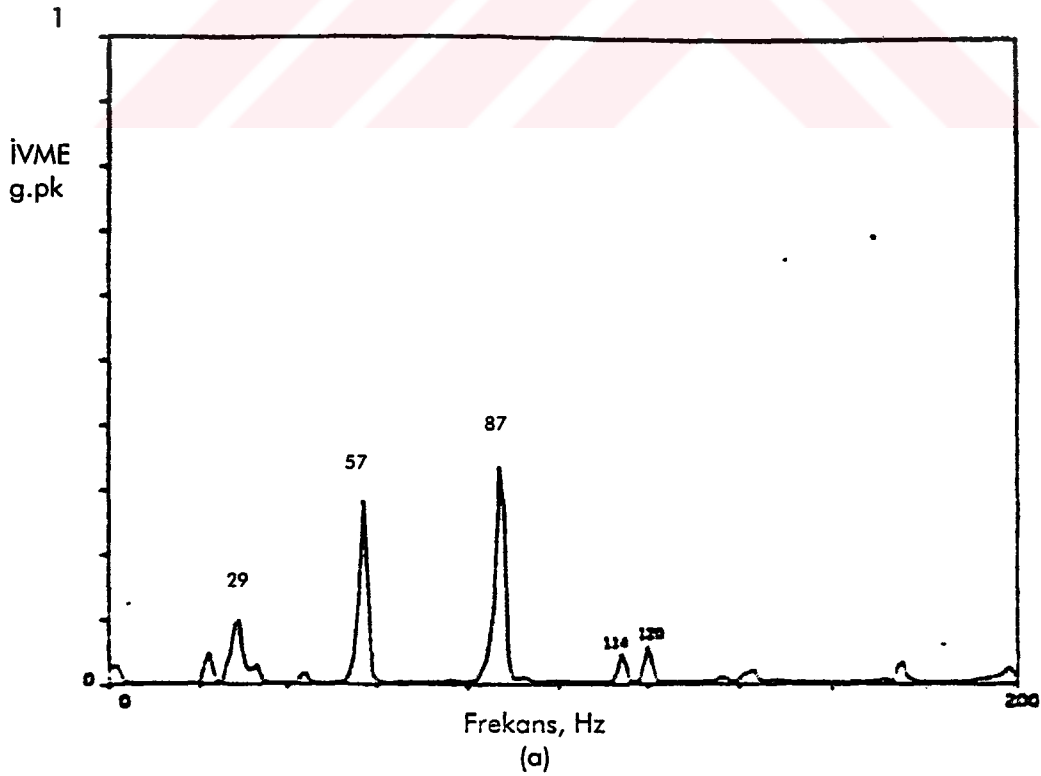
Şekil 5.5 teki ivmeölçer dik olarak monte edilmiştir. Bu, yatay milli makinelerdeki rulman titreşimlerinin izlenmesi için en iyi konumdur. Çünkü ivmeölçer duyarlı eksen, rulman yük bölgesi ile aynı çizgidedir. Rulman yük bölgesi rulmanın 45° lik yay çizen alt kısmındadır. (Şekil 5.6)



Şekil 5.6. Rulman Yük Bölgesi [20]

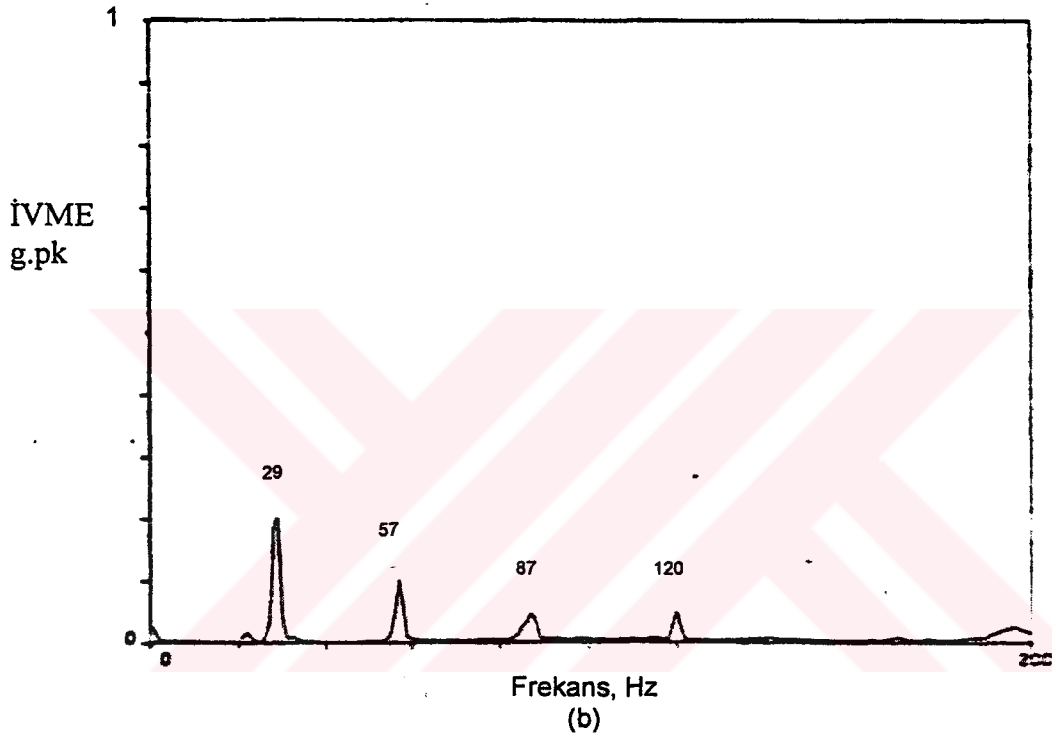
Alt merkezli yük bölgesi, makinenin yerçekimi ağırlığı rulmanlardaki birincil kuvvet olduğu sürece geçerlidir. Rulmana farklı yönlerden kuvvetler etkiyorsa örneğin kayışlı fanlar, yük bölgesi değişecektir. İtme (thrust) rulmanları açık olarak aksiyel yük bölgesine sahiptirler ve aksiyel yönde daha iyi izlenirler. Rulmanlarda baskın bir yerçekimi kuvveti olan normal makinelerde rulman frekanslarını görmek için dikey yönlü izleme daha iyidir. Ne kadar böyle olsa da dengesizlik (imbalance) yatay konumlandırılmış bir algılayıcıyla daha iyi tespit edilir. Çünkü bir çok makine yatay yönde daha esnektirler. Eğer rulmana sadece bir algılayıcı monte edilecekse, izlemenin amacına göre konum seçilir. Rulman frekansları için en iyisi doğrudan yük bölgesinde izleme yapmaktır. Birçok rulman için bu, pratik olmayan alt kısımdır. Bu durumda, baskın rulman kuvvetleri ile aynı yönde izleme, örneğin dikey, yeterli olacaktır.

Şekil 5.7a ve 5.7b, şekil 5.3 teki aynı NSK 6311 rulman testlerinin karşılaştırılabilir resimleridir. Şekil 5.7a 45° açıyla monte edilmiş ivmeölçerle ve Şekil 5.7b de yatay



Şekil 5.7a. 45° ye Monte Edilmiş İvmeölçer [20]

olarak monte edilmiş ivmeölçerle elde edilmiştir. İvmeölçerleri dikey konumdan farklı monte edince 57 ve 87 Hz belirgin biçimde düştü. Bu örnek rulman titreşimi izlemesi için algılayıcı yerleşiminin önemini vurgulamaktadır.



Şekil 5.7b. Yatay Monte Edilmiş İvmeölçer [20]

Eğer rulman tabloları mevcut değilse, rulman frekansları aşağıdaki şekilde yaklaşık olarak bulunabilir;

$$TDF = 0,4(\text{hız}) \quad (5.5)$$

$$DB = 0,4(\text{hız}) \times N \quad (5.6)$$

$$IB = 0,6(\text{hız}) \times N \quad (5.7)$$

N : Bilya sayısı

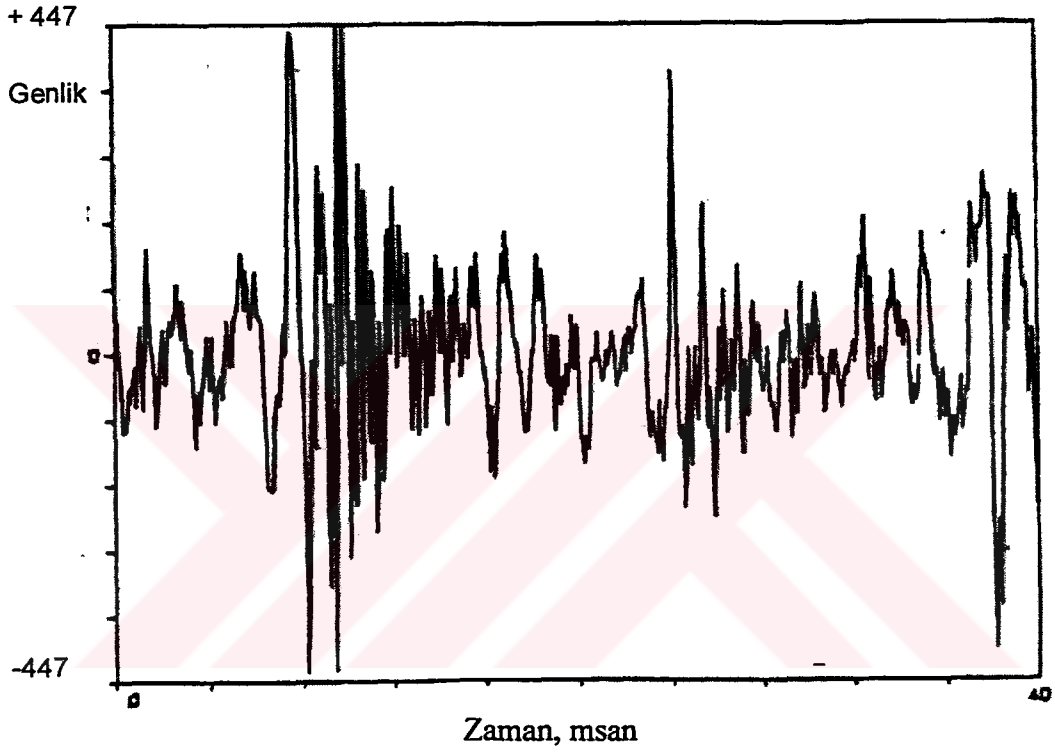
Bu formüller kafesin mil hızının % 40 ile döndüğü gerçeğine dayanmaktadır. Bu, kafesi işaretleyip iç bileziği 360° döndürdükten sonra herhangi bilyalı rulmanı el ile çevirerek

kolaylıkla kontrol edilebilir. Bu formüllere göre dış bilezik frekansı dönme hızının %40 ının bilya sayısı kadar katıdır. İç bilezik frekansı da dönme hızının %60 ının bilya sayısı kadar katıdır. Bu hız ölçülebilir. Birçok bilyalı rulman 7 ile 15 bilyaya sahiptir. Bunların da büyük kısmı 9 ile 11 arasında bilyası olanlardır. Eğer bilya sayısı bilinmiyorsa varsayalımki 10 bilya, dış ve iç bilezik frekansları için hızı 4 ve 6 ile çarparak kaba bir yaklaşım yapılabilir. Bunun alan ölçmelerinde, rulman frekanslarının belirlenmesinde kullanışlılığı kanıtlanmıştır.

5.5, 5.6, 5.7 denklemleri eğer yuvarlanan elemanların sayısı 12 den az ise %2 hata içinde sonuçlanmaktadır. Eleman sayısı arttıkça hata da artmaktadır.

Bu titreşimlerin bağıl genlikleri, rulman durumunun göstergesidirler. Bu rulman frekansları az yüklenmiş olsa bile yeni rulmanlarda da mevcut olacaktır. Rulman parçaları aşındıkça, bu belirli sesler/tonlar daha gürültülü veya daha yüksek genlikte olacaklardır. Frekans aynı kalacaktır. Rulman aşınmasının ilk göstergeleri metal metale çarpışmalardır. Bu metal çarpışmaları bilyaların, bilezik veya kafes yapısıyla temas etmesidir. Bunlar 1000 ile 10000 Hz arasındaki bir frekans ile zaman domeninde şok darbeleri olarak kendini gösterirler. Frekans domeninde de rasgele çıkıp giden tepeler şeklinde görülürler. Frekans domeninde titreşimler geniş bir band şeklinde çıkar. Bu yüzden bunları, algılayıcı olarak bir ivmeölçer ile zaman domeninde göstermek en iyisidir. Bu şok darbelerinin varlığının kötü rulman göstergesi olması şart değildir. Bunlar, kusurlardan, fazla yükten veya yağsızlıktan kaynaklanan metal metale çarpışmaların göstergesidirler. Eğer bu durumun devam etmesine izin verilirse, hızlı aşınmaya ve erken gelişen arızaya neden olur.

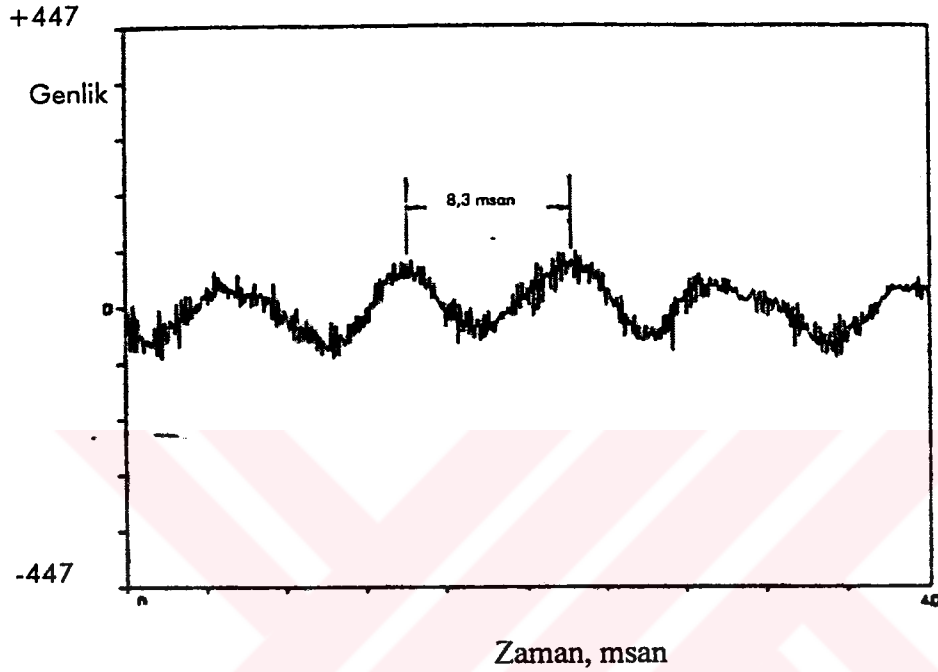
Şekil 5.8 kötü bir rulmanın zaman şeklini göstermektedir. (Bkz. Şekil 5.8 genliğin üst ve alt noktaları arasındaki şok darbeleri).



Şekil 5.8. Kötü Bir Rulman. Şok Darbeleri Metal Metale Teması Gösteriyor.İvmeölçer Duyarlılığı 100 mV/g [20].

Rulman şok darbelerini gösterirken, kıyaslamalar için tutarlı görüntü pencereleri oluşturulmalıdır.

Metal çarpışmasıyla oluşan bu şok darbeleri hiçbir alet olmadan bile rulman üzerinden bir tornavida ile duyulabilir. Bu durumda gücü kestikten sonra ve motor yavaşlarken tıklamayı dinlemek en uygun zaman olacaktır.

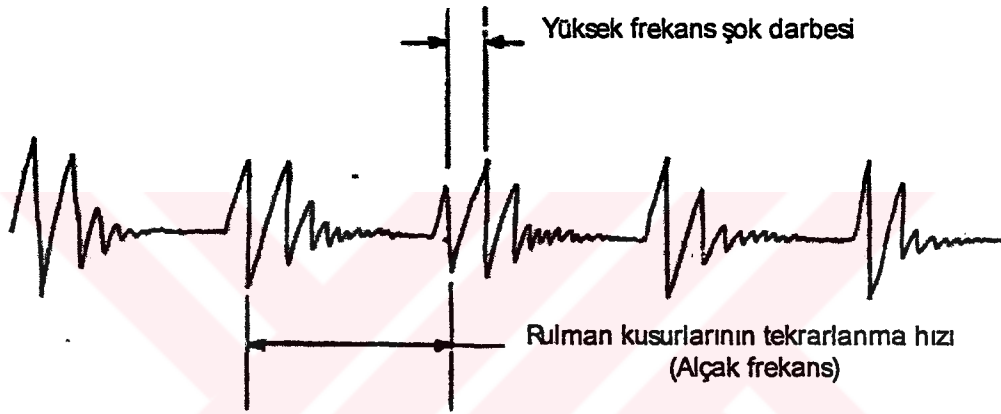


Şekil 5.9. İyi Bir Rulman. Şok Darbesi Yok.[20]

Aşınma ilerledikçe, bu şok darbelerinin sayısı ve şiddeti artar. Rulman analizörleri özellikle bu yüksek frekanslı şok darbelerini gözler ve sayarlar. Yakın yüksek frekanslar da bu aygıtlarla belirlenebilmektedir. Örneğin, kayış sesi, bağlantı korumalarının sürtünmesi, pompa boşluğu, kumanda subap sesi, buhar kaçakları veya diğer darbeler. Diğer kaynaklar ise rulman gürültüsü olarak sayılmaktadır.

Rulmanlardan çıkan iki tip titreşimi özetlemekte fayda vardır. Birincisi bilyaların, hızların tekrarlanmasıyla karşılaşılan kusurdur. Bunlar çalışma hızının 4-10 katı arasında oluşan alçak frekanslı titreşimlerdir. Bunlar, Şekil 5.10 da rulman dönme hızı kusurları olarak gösterilmiştir. Bu kusurun periyodu aynı kusuru meydana getiren bilyalar arasındaki zaman aralığıdır. Bilyalar bu kusuru meydana getirdiğinde bir metal

 arpışması olur ve rulman kaplaması üzerinde bir basınç dalgası şeklinde yüksek frekanslı bir şok darbesi dolaşır. Bu titreşimler ivmeölçerle tespit edilebilir. şok darbelerinin kısa süreli geçici doğası frekans domeninde iyi görünmelerine engel olur fakat zaman domeninde açıkça görülebilirler. Bu yüzden rulman yıpranmasının ilk göstergeleri bu yüksek frekans şok darbeleridir.



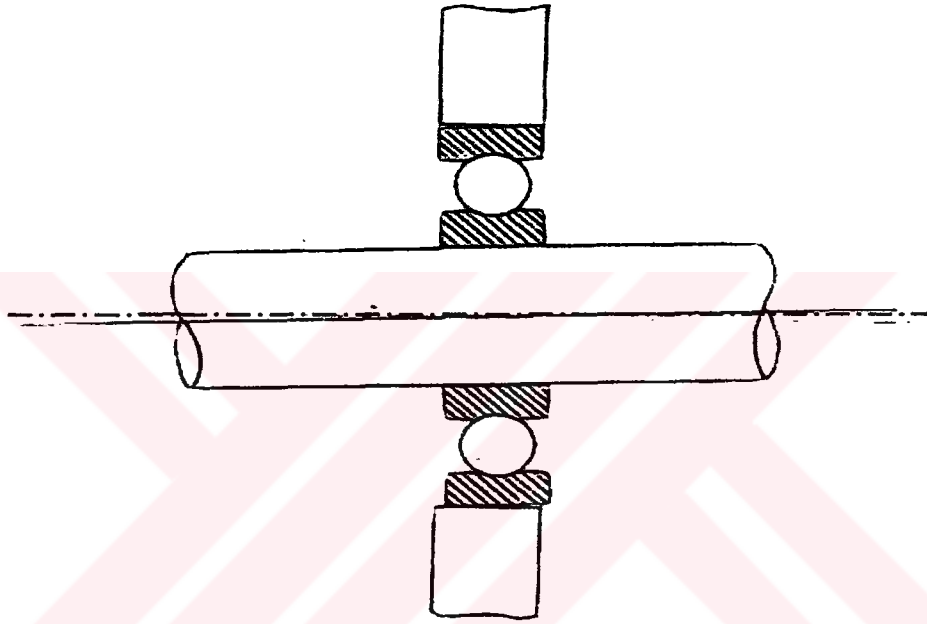
şekil 5.10. Alçak Frekans Periyodik Titreşimi Ve Yüksek Frekans Geçici Hallerini Gösteren Rulman Titreşimi [20].

Rulman aşınması ilerledikçe ilk önce dış bilezikte pul pul dökülmeler şeklinde kusurlar görülür. Dökülmeler arttıkça dış bilezik frekansının genliği yükselir. Arızanın son safhalarında, bilyalar dökülmeleri i  bileziğe aktarır ve iç bilezik frekansı artar. Bu süreçte, şok darbeleri büyür ve sıklaşır. Dış bilezik frekansının bağlı genliği ve iç bilezik frekansının varlığı arızanın ne zaman gerçekleşeceğini gösterir.

Rulman bu noktada değiştirilmezse ve görsel olarak izlenirse büyük olasılıkla dış bilezikte kusurlar çıplak gözle görülebilir. Ne kadar böyle olsa da, bu rulmanın değişmesi gerekiyor anlamına gelmez. Bu karar, üretim şartları, sürekli çalışmanın ters sonuçları, yedek parçaların bulunması ve bir sonraki planlı bakım zamanı gibi diğer faktörleri de düşünecek bakım personelinin sorumluluğundadır.

Rulmanlar yük taşıyan elemanlardır ve arızanın son safhalarına kadar da yükü taşımaya devam edecektir. Bazı firmalar rulmanları yıpranmanın ilk işaretlerinden sonra ve hatta

arıza sonrasında bile çalıştırmaya devam ederler. Bazen bu üretim çevrimindeki zorunluluğa bağlı olarak yapılır ve bazen de eski tecrübelerle bağlı olarak yapılan bir seçimdir. Titreşim analizi yapanın görevi üretim sorumlusuna gelişen kusuru bildirmek ve ona rulman aşındıkça durum hakkında tavsiyelerde bulunmaktır.



Şekil 5.11. Ekseni Kayık Sürtünmesiz Rulman [20]

Rulmanlar, eksanel bozukluk içeren şekilde monte edilmiş olabilirler. Örneğin, ekseni muhafaza borusuna tam dik olmayabilir. (Şekil 5.11). Mil ve muhafaza dönme sırasında devirsel olarak bozulacaktır. Eksanel bozukluğun başka göstergeleri de mevcuttur; 1 rpm de ve 180° faz farklarında yüksek aksiyel titreşim. Eğri bir rotor da aynı harmonik belirtilerini verir. Gerçek arızanın bulunabilmesi için ek analiz teknikleri de uygulanmalıdır. Bunlar;

- Mili elle çevirirken mil kayıklığını ölçme aygıtı ile ölçmek
- Mil ve rulman yüzeylerinin temas noktaları ve aşınma noktalarını görsel olarak dikkatle izlemek.[20]

6. RULMAN ARIZALARININ OLUŞUMU VE YAPAY ESKİTME SÜREÇLERİ

Rulmanların genellikle iki tarafı koruyucu kapaklarla kapatılmış olup içi elektriksel olarak iletken olmayan bir yağ (gres) ile doldurulmuştur. Dönme hareketi başlamadan evvel iç bilezik taşımakta olduğu yükü yuvarlanma elemanları vasıtası ile dış bileziğe ve dolayısıyla ana gövdeye aktarır. Bu durumda bütün elemanlar birbirlerine temas etmektedir. Hareketin başlaması ve dönen elemanın genel olarak anma hızının %10'una çıkması ile söz konusu temas kaybolur ve elemanlar arasında 0,1 ile 2 μm kalınlığında bir gres film tabakası oluşur [21]. Bu halde bilezikler ile yuvarlanan elemanlar arasındaki sürtünme kuvveti minimum düzeye düşmüş bulunmaktadır.

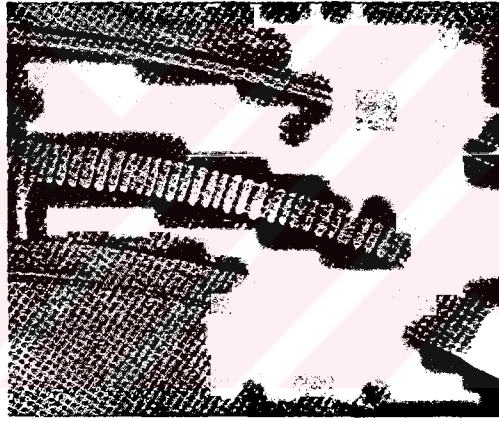
Bu dönme hareketi esnasında elektromagnetik, elektrostatik, rotor üzerindeki gerilimler ile sargılardaki ve hava aralığındaki magnetik dengesizliklerden dolayı “mil gerilimleri” oluşur [7,22]. Bu gerilimler yüksek hızlardaki dönme esnasında yağın delinme gerilimi olan eşik gerilimine ulaşırlarsa, yağ tabakasını delip kıvılcımlar halinde elektriksel atlamalara sebep olurlar [23,24]. Bu tip atlamalara “boşalma modu”nda atlamalar da denir. Alçak hızlarda ise bu gerilimler temas halinde bulunan rulman bileşenleri üzerinden “iletim modu”nda akımların akmasına sebep olur.

Böylece rulmanlar üzerinden akan akımlar her ne kaynaklı olursa olsun iki değişik modda meydana gelir. İletim modunda oluşan endüktif akımlar rulman içerisinde bir süreklilik gösterdiğinden, diğerine nazaran rulmanda kısa bir zaman diliminde ortaya çıkabilecek bir arızaya sebep olmamaktadır. Bir başka kaynakta ise hareket halinde olmayan rulmanlardan yüksek akımların bileziklere hiç zarar vermeden aktığı rapor edilmiştir [25]. Ancak iletim modunun aksine boşalma modundaki kapasitif akımlar ise rastlantısal boşalmalar halinde gerçekleşir. Mil gerilimi ne kadar büyük ise akan akımın değeri de o kadar büyük olmaktadır.

Bu atlamalar zaman içerisinde rulman bileziklerinin yapısal şekillerinde gözle görülür düzeyde bozulma ve aşınmalar oluşturur. Yüksek rulman akımları her seferinde atlama

noktasını belli bir derecede ergiterek mikron düzeyinde parçacıklar kopartır. Zaman içerisinde de yağ tabakasındaki bu delinmeler yağın özelliklerinin bozulmasına ve yağlama işlevini yerine getirememesine sebep olur [26].

Bu bozukluklar sonucu yuvarlanma elemanları ile bilezikler arasındaki yağ filmi kalınlığı çevre boyunca bir dalgalılık ve pürüzlülük gösterir. Böylece rulmandaki yıpranma, makine için belirlenen titreşim, gürültü ve boşluk gibi toleranslar kabul edilemeyecek seviyeye gelinceye -kısaca rulman bozuluncaya- kadar hızlanarak büyüyen bir trend içerisinde artar. Boşalma modunda akan akımların oluşturduğu tipik bir dış bilezik eskimesi Şekil 6.1 de gösterilmiştir [27].



Şekil.6.1. Boşalma modunda akan akımların oluşturduğu tipik rulman eskimesi [27]

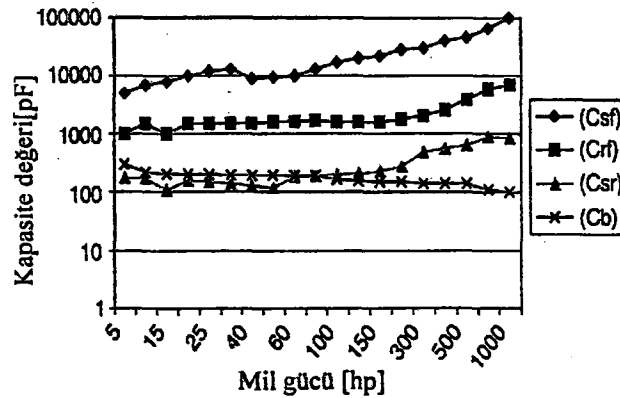
6.1 Rulman İle Motorun Elektriksel Modelleri

Rulmanların değişik hızlarda ve yük durumlarındaki halleri için bir kaç değişik model ortaya atılmıştır [28,29]. Her ne kadar belli noktalarda birbirlerinden farklılık gösterebilirler de genel olarak modeller inceleme bakımından düşük ve yüksek hızlarda olmak üzere iki şekilde kurulabilir.

İlk modelde rotor çok yavaş döndüğünden yuvarlanma elemanı ve bilezikler arasında yaklaşık 10^{-10} m kalınlığında bir yağ filmi bulunmakta ve bu temas noktasındaki direnç 0.5Ω 'dan küçük değerler almaktadır [28]. Bu sebeple düşük hızlarda rulmanlar en basit şekilde bir direnç ile modellenebilir.

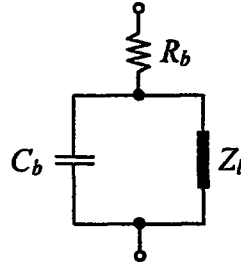
Daha önce belirtildiği üzere hızın artmasıyla yuvarlanma elemanları ile bilezikler arasında düşük hızlardakine nazaran oldukça kalın (0,1-2 μm) bir yağ filmi oluşur. Böylece düşük hızlardaki omik karakterdeki temas ortadan kalkar. Zaten elektriksel olarak yalıtkan bir özellik taşıyan yağ ile (yağ bir dielektrik malzeme olarak düşünülürse) yuvarlanan elemanlar ve bilezikler kapasitif bir eleman (C_b) oluştururlar. Genel bir fikir vermesi açısından mineral bazlı greslerin yaklaşık 10^6V/m mertebesinde bir delinme gerilimine sahip olduğu ve tipik bir yağ filminin 0,2 μm kalınlığında olduğu kabul edilirse, bu kapasitif elemanın dayanma ya da eşik gerilimi (V_{th}) 0,4V olarak bulunabilir [28].

Asenkron motor modelinde rulman kapasitesi (C_b) haricinde üç tane daha kapasite elemanı bulunmaktadır. Bunlardan stator-gövde arasındaki kapasitif eleman (C_{sf}), stator iletkenleri ile gövde arasında bulunan hava aralığı çevresi ve boyunca dağıtılmış kapasitelerin bir eşdeğeridir. Yine aynı şekilde hava aralığı çevresi ve boyunca dağıtılmış olan stator-rotor (C_{sr}) ve rotor-gövde (C_{rf}) kapasitif elemanlarının da eşdeğerleri modelde yer almaktadır. Bu üç eşdeğer eleman ile rulman modelinde yer alan rulman kapasitesinin makinanın anma gücüne göre değişimleri Şekil 6.2 de verilmiştir [30]. Genel olarak modellerde C_{sf} yalnız başına kullanılabilir olsa da sürücü devrelerin bulunduğu durumlarda oluşan yüksek dv/dt oranları diğer kapasitif elemanların da modele dahil edilmesini gerekli kılmaktadır.



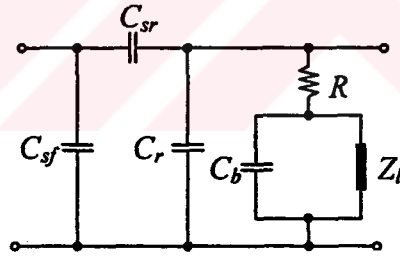
Şekil.6.2. Asenkron motor gücüne bağlı olarak kapasitif elemanların değerlerinin değişimi [30].

Genel olarak bir rulman modeli, kapasitif, omik ve lineer olmayan bir empedans (Z_l) kullanılarak en basit biçimde üç eleman ile Şekil 6.3 deki gibi kurulabilir [31]. Rulman modelinde kullanılan direnç (R_b), iç ve dış bilezik iç dirençleri ile, “n” tane paralel yuvarlanma elemanının iç dirençlerinin eşdeğerinin seri toplamı olarak tanımlanabilir.



Şekil.6.3. Bir rulmanın en genel elektriksel modeli [31].

Bu bilgiler ışığında gerçekçi bir elektriksel model olarak asenkron motor ve rulman modelleri Şekil 6.4 teki gibi birleştirilebilir [31].



Şekil 6.4. Motor ve rulmanın birleştirilmiş elektriksel modeli [31].

6.2 Sürücü Devre Kaynaklı Boşalmalar

Yakın zamandaki çalışmalar göstermiştir ki 1920’de Alger’in belirttiği magnetik asimetriyle oluşan mil gerilimleri ile kaynağı sürücü sistemler olan mil gerilimleri birbirlerinden farklıdır [32]. Rulman teknolojisindeki ilerlemeler ışığında, rulman ömrünün uzatılabilmesi için yuvarlanma elemanları optimum hidrodinamik formlarda tasarlanmıştır. Ancak sürücü devrelerin elektrik makinaları ile birlikte sıklıkla kullanıldığı günümüzde, en iyi performans için optimize edilmiş rulmanlarda dahi hiç beklenmeyen arızalar ortaya çıkmıştır.

Yine aynı çalışmalar yuvarlanma elemanlarının hidrodinamik tasarımlarının şaft gerilimlerinin oluşmasına sebep olacak bir mekanizmaya sahip olduğu ve sonucunda da boşalma akımlarına yol açtığı görülmüştür [31]. Boşalma akımlarının darbe genişlik modülasyonlu sürücü devreler ile oluşabilmesi için şaft gerilimlerinin (V_{rg}) oluşması, stator ile rotor arasında kapasitif bir eleman (C_{sr}) bulunması ve rulman kapasitesinin (C_b) üzerinde yeterli miktarda gerilimin birikmesi gereklidir.

Herhangi tipik bir eviricide yük uçları bazen hiç istenmediği halde anahtarlama frekansından ve anahtar karakteristiklerinden dolayı aynı anda eş potansiyele çekilmekte ve sargılar üzerinde toprağa nazaran gerilimler oluşmaktadır. Bu gerilimlere ortak uç gerilimleri ve dolayısıyla oluşturacağı akımlara da ortak uç akımları denir. Bu gerilimlerin oluşma sebebi genellikle sargıların toprakla arasında bulunan ve hava aralığı çevresi ve boyunca dağılmış olan kapasitenin yüklenmesi sonucudur.

Bu yüklenme yüksek potansiyeldeki doğru gerilim barasına bağlı anahtarların yeteri kadar kısa bir süre de olsa aynı anda iletimde kalmaları sayılmaktadır. Örnek olarak, herhangi bir ateşleme serisinden sonra pozitif baraya bağlı anahtarların aynı anda belli bir süre iletimde kaldıklarını varsayalım. Bu süre zarfında asenkron makinanın herhangi bir fazının iki ucu da eş potansiyele çıkacak ve toprağa karşı belli bir gerilim değerine ulaşacaktır. Bu gerilim değeri zaman içerisinde her iki anahtar da devrede olduğu sürece kapasite elemanlarını yükleyecek ve yağ filminin eşik gerilimi aşıldığında da ortak uç akımı (rulman akımı) olarak rulman üzerinden toprağa enerji akacaktır [29].

İletime girme ve kesime gitme süreleri uzun ve birbirleri arasında farklılık gösteren anahtarların bulunduğu ve taşıyıcı frekansı belli limitlerin üzerinde olan sürücülerin sürdüğü makinalarda ortak uç geriliminin delinme geriliminin üstüne çıkması daha sık olmaktadır. Bu ise doğal olarak rulmanların ömürlerini kısaltmakta ve makina güvenilirliğini de azaltmaktadır.

Kapasite elemanlarının yüklenerek, yağın delinme dayanımı üzerine ulaşacak gerilim değerlerine çıkma sıklığı yukarıda belirtilenlerin haricinde başka birçok parametreye bağlıdır. Bu parametreler makinanın yüklenmesi, hızlanıp yavaşlaması, doğru gerilim barasının ve sürücü devrenin kararlılığı sayılabilir. İşte bu sebeple rulman akımları birçok parametrenin etkisi altında rastlantısal bir şekilde boşalmakta ve yine rulman bilezikleri çevresinde belli aralıklardan ziyade rastlantısal şekilde bütün yüzeyde tahribat oluşturmaktadır. Ayrıca zamanla tahribattan dolayı oluşan oyuklara yuvarlanma elemanlarının “düşmesi” sonucu bu oyuklar boşalmalar ile daha da derinleşmekte ve elektrik makinası mekanik olarak daha fazla tehlikeye maruz kalmaktadır.

6.3. Rulman Akımlarının Önlenmesine Yönelik Alınması Gerekli Tedbirler

IEEE Standart 112'ye göre test edilmiş motorlarda 300mV'u aşan mil gerilimlerinin oluşturduğu rulman akımlarının rulman bileziklerinde oyuklar oluşturarak eskimesine ve hatta bozulmasına yol açtığı gözlemlenmiştir [33]. Mil gerilimi 300mV'u aşan durumlarda makinanın rulmanlarına zarar gelmemesi için rulmanlarından en az biri kapasitif karakterli dolaşım akımlarını engellemek amacıyla yalıtılmalıdır.

Bu yalıtma işleminde yalıtılması gereken rulman yükün bağlanmadığı mil ucu olmalıdır. Böylece sürülen yük dolaşım akımları için akım yolu teşkil etmez. Ancak pratikte iki rulmanın birden yalıtılması tercih edilmelidir. Bu tip bir rulman yalıtma işlemi NEMA ve IEC standartlarına göre gövde numarası sırasıyla 504 ve 315'ten büyük makinalar için yapılmalıdır [27,33,34]. Bununla beraber, mil topraklama bileziklerinin elektrik makinası, dişli kutusu ve takogeneratör ile yük millerine bağlanması da rulman akımlarının en düşük seviyelerde tutulmasına yardımcı olacaktır.

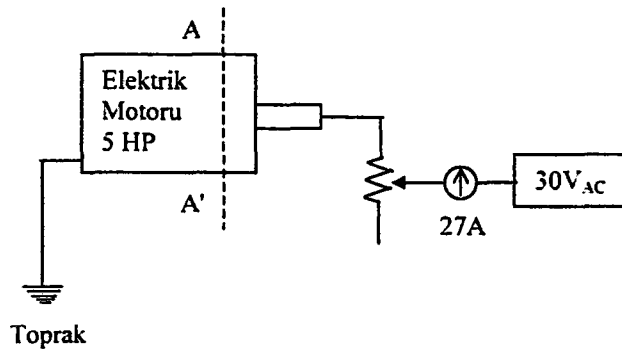
Ayrıca sürücü devrenin taşıyıcı frekansını 800-3500 Hz arasında seçmek (bu aralıktaki düşük frekanslarda rulman içindeki modelde bulunan kapasitelerin çok yüksek empedans göstermesinden dolayı) statordan rotora enerji transferi en düşük seviyeye indirecektir [27,34]. Böylece taşıyıcı frekansının azaltılmasına bağlı olarak motor

performansının düşmesine rağmen mil gerilimleri ile oluşan rulman akımlarındaki boşalma sayısı azaltılmış olur. Ayrıca sürücü devrenin yıldız noktası uygun değerlikli bir filtre kullanılarak doğru gerilim barasının “0” (sıfır) noktasına bağlanması gereklidir. Bu suretle mil gerilimlerinden dolayı akabilecek akımlar için motor ve rulmanlar yerine düşük empedanslı bir yol temin edilmiş olur .

Bu tedbirlerin yanısıra motor gövdesi, yüksek frekanslı akımların gövdeden toprağa kolayca akmalarını sağlayacak şekilde topraklanmalı ve her motor için standartlarda belirtilen enerji kabloları ile bağlama elemanları kullanılmalıdır. Bu önlemlerin yanısıra sürücüler ile motorlar mümkün olan en kısa kablo ile birbirlerine bağlanmalıdır.

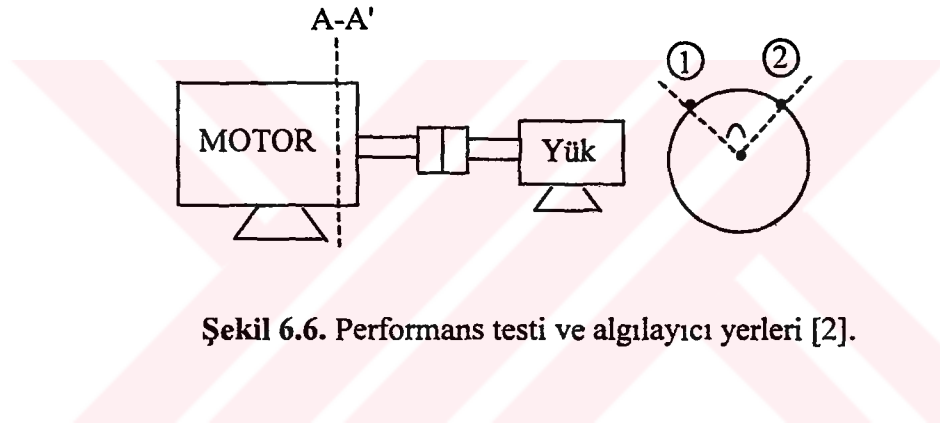
6.4. Hızlandırılmış Yapay Eskitme Süreçleri ile Rulman Bozukluklarının Oluşturulması

Rulman bozukluğuna neden olan elektriksel boşalmanın benzetimi için aşağıdaki gibi bir deney düzeneği oluşturulmuştur [2]. Rulmanda yağın delinme gerilimi 15 Vpk/ μm dir. Yağ filmi kalınlığı ise 0,2-2 μm olduğu için delinme gerilimi 3-30 Vpk arasında olacaktır. Bu nedenle harici kaynak gerilimi 3-30 Vpk arasında olacaktır. Bu nedenle harici kaynak gerilimi 30 V alınmıştır. Mil akımı ise 1 Ω dan büyük bir direnç değeri için 27 A olarak göz önüne alınmıştır. Yapay rulman eskitmesi, elektriksel olarak, 27 A lik akımın 30 dakika süreyle mile uygulanması şeklinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.5. Yapay rulman eskitmesi [2].

Bu şekildeki eskitmenin yanı sıra ayrıca yedi aşamada uygulanan termal ve kimyasal eskitme süreçleri de gerçekleştirilmiştir. Her süreçten sonra eskime hızlanmış ve motor bir test platformu üzerinden performans testinden geçirilmiştir. % 0–115 lik yük altında gerçekleştirilen performans testinde rulman arızasının analizinde kullanılacak olan titreşim işareti Şekil 6.6 daki A-A' kesitine göre 2 numaralı konumdaki titreşim algılayıcısından alınmıştır. Bu algılayıcı IMI tarafından üretilen 323B01 modeli olup, yüksek band genişlikli, ivmeölçer tipinde, $\pm 50g$ ölçme aralığında ve $100 \text{ mV/g} \pm 5\%$ duyarlığında bir elemandır. Kullanılan rulman ise SKF 6205 tir.



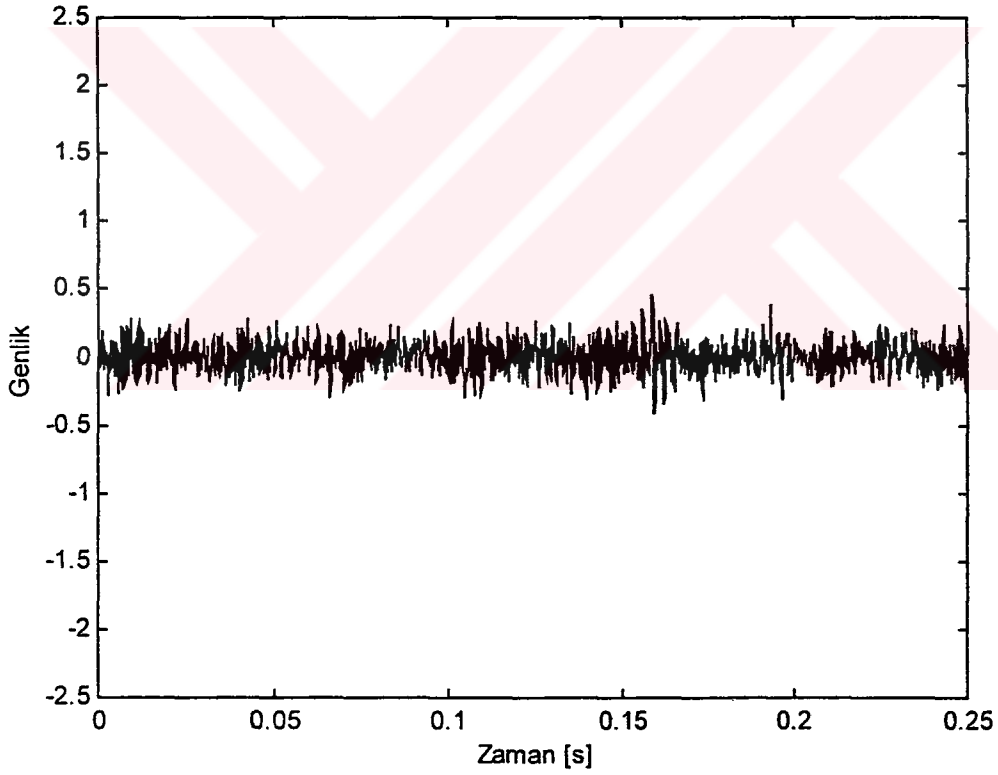
Şekil 6.6. Performans testi ve algılayıcı yerleri [2].

7. MOTOR TİTREŞİM İŞARETLERİNİN ANALİZİ VE ARIZA TANISI

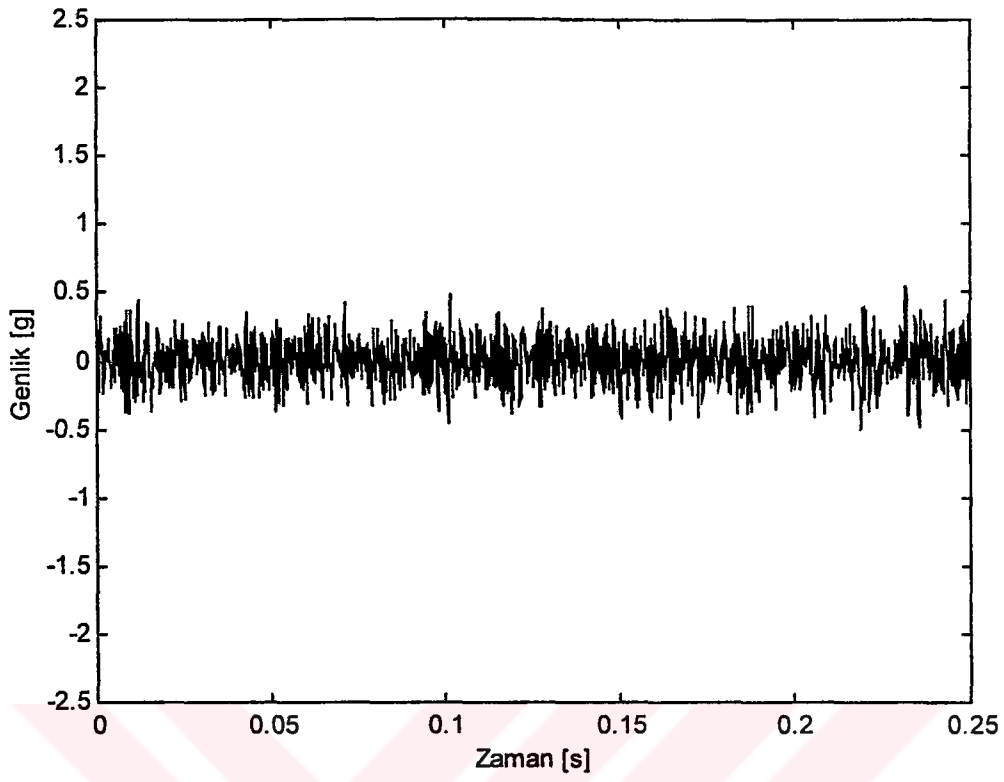
Burada rulman eskitme süreçlerine ilişkin olarak % 100 yük altında titreşim işaretlerinin zaman ve frekans tanım bölgesi analizleri yapılmıştır.

7.1 Zaman Tanım Bölgesi İşaretlerinin İncelenmesi

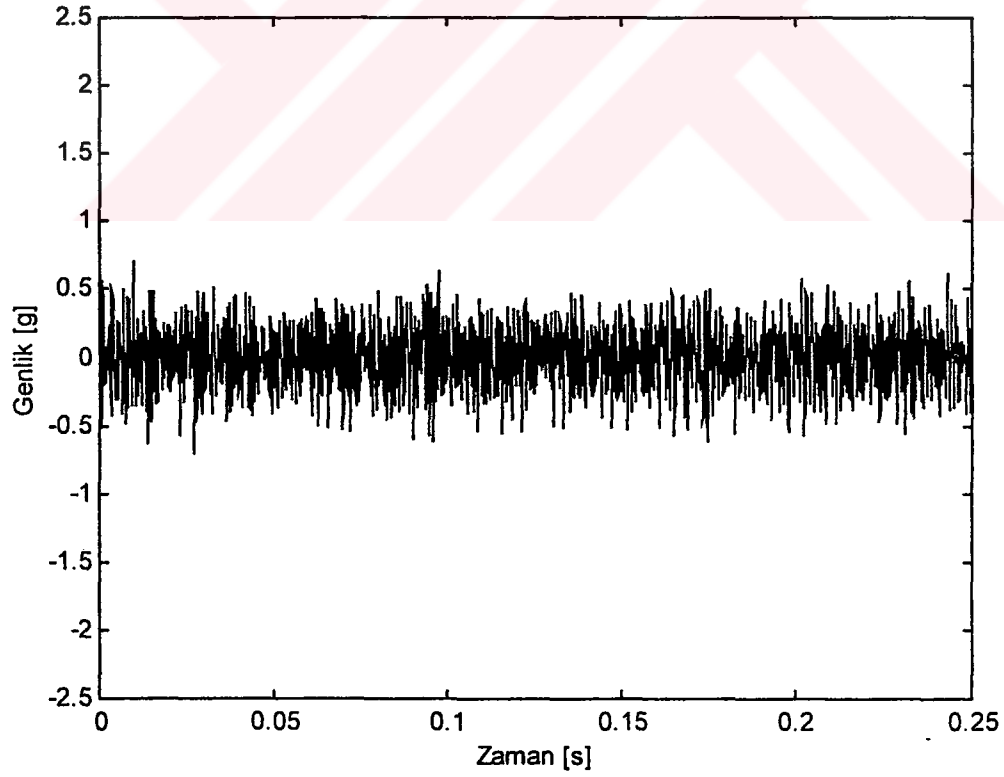
Burada makine titreşim işaretlerinin her bir aşama için 0,25 sn.' lik değişimleri verilerek yorumları yapılmıştır.



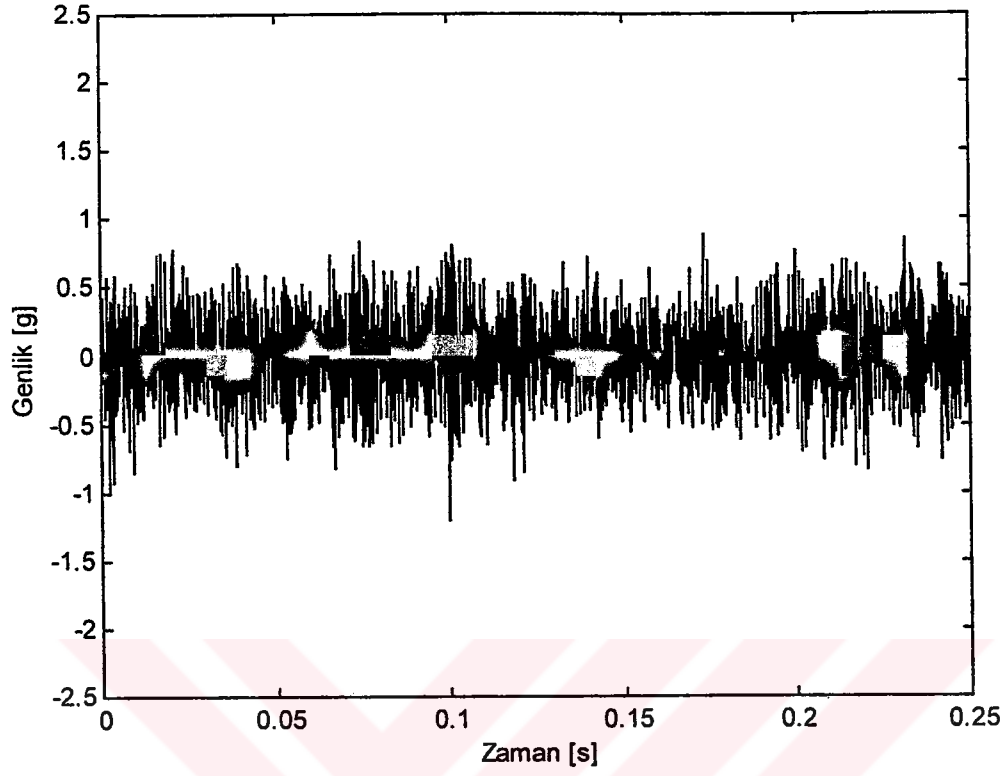
Şekil 7.1. Başlangıç aşamasındaki Genlik-Zaman değişimi.



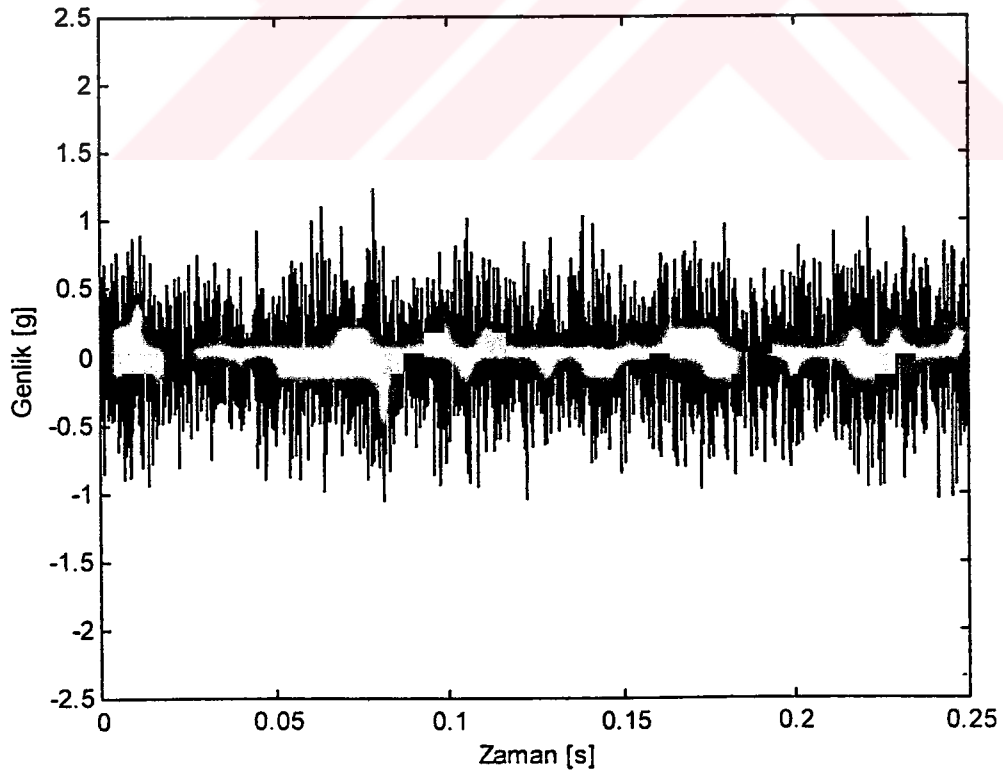
Şekil 7.2. Birinci eskitme aşamasındaki Genlik-Zaman değişimi.



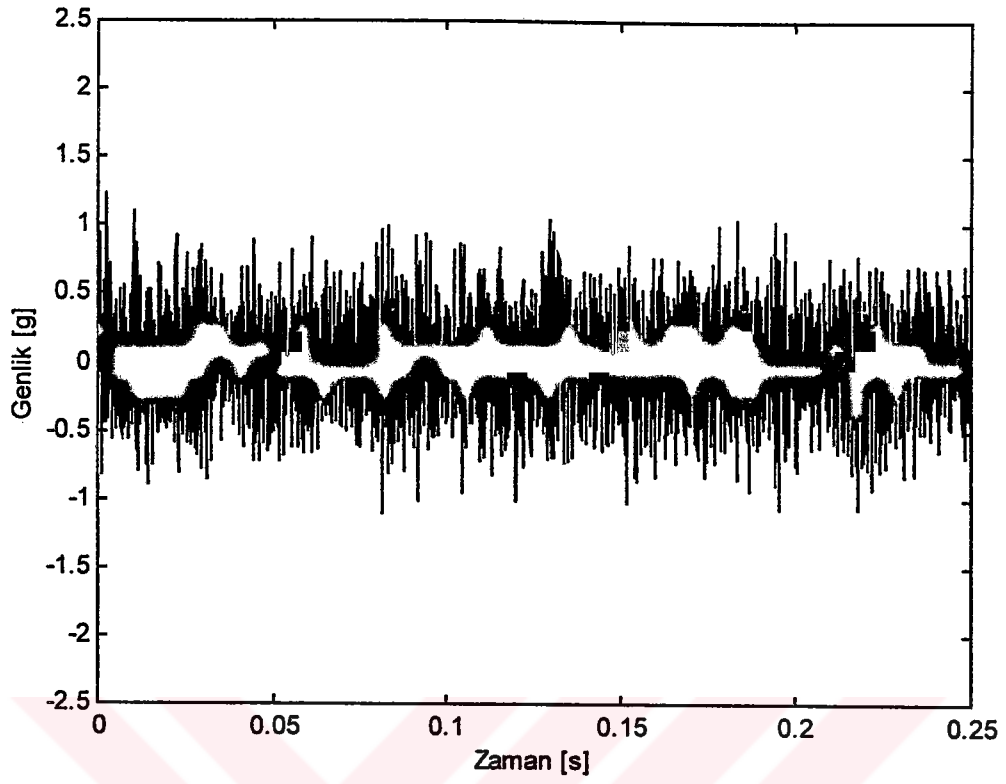
Şekil 7.3. İkinci eskitme aşamasındaki Genlik-Zaman değişimi.



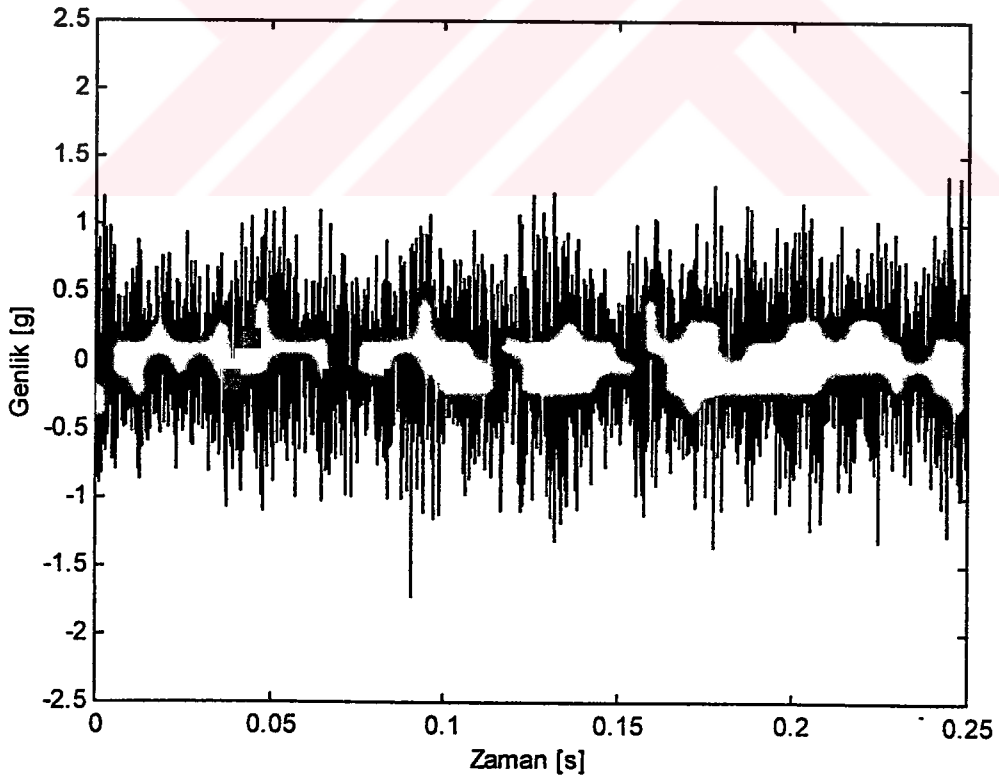
Şekil 7.4. Üçüncü eskitme aşamasındaki Genlik-Zaman değişimi.



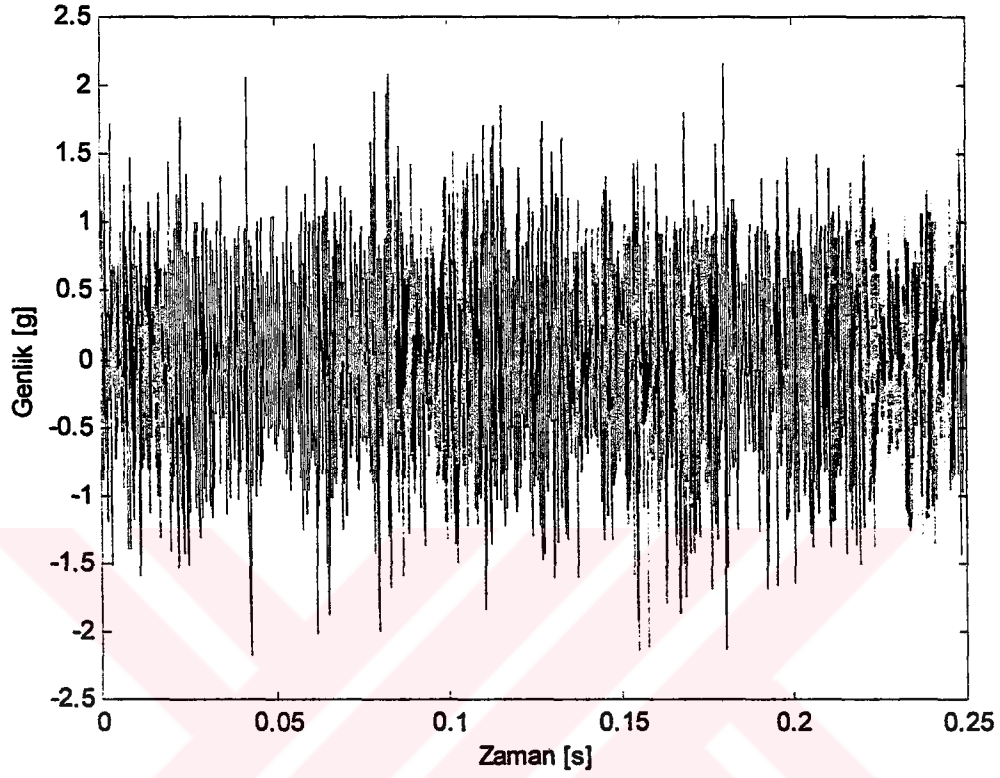
Şekil 7.5. Dördüncü eskitme aşamasındaki Genlik-Zaman değişimi.



Şekil 7.6. Beşinci eskitme aşamasındaki Genlik-Zaman değişimi.



Şekil 7.7. Altıncı eskitme aşamasındaki Genlik-Zaman değişimi.

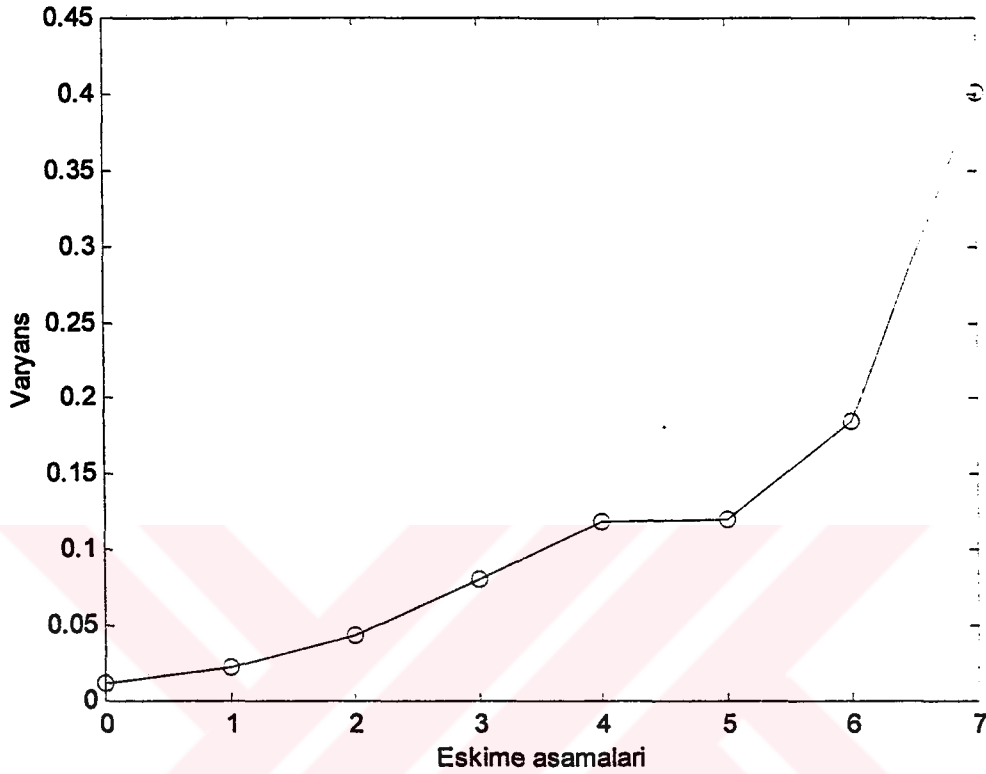


Şekil 7.8. Yedinci eskitme aşamasındaki Genlik-Zaman değişimi.

Her bir eskitme aşamasında zaman işaretlerinin hesaplanan varyans değerleri ve değişimi aşağıdaki gibi Tablo 7.1 ve Şekil 7.9 ile verilmiştir.

Tablo 7.1 Her Bir Eskitme Aşamasında Zaman İşaretlerinin Hesaplanan Varyans Değerleri.

Eskitme Aşamaları	0 (Başlangıç)	1	2	3	4	5	6	7 (Son)
Varyans	0.0121	0.0228	0.0434	0.0810	0.1184	0.1195	0.1853	0.4007



Şekil 7.9. Her Bir Eskitme Aşamasında Zaman İşaretlerinin Hesaplanan Varyans değerlerinin değişimi.

7.1.1 Zaman Tanım Bölgesi İşaretlerinin Yorumu

Makine titreşim işaretlerinin sağlam durum ve yedi aşamadan oluşan eskitme durumları için ivme ölçer algılayıcısından alınan zaman tanım bölgesi işaretlerindeki değişimler incelenmiştir. Bu amaçla her bir durumda işaretin enerjisindeki değişikliğin ölçüsü, istatistiksel bir büyüklük olan varyans ile tanımlanmıştır. Varyans matematiksel olarak aşağıdaki eşitlik ile verilen karesel bir büyüklüktür.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_i (x_i - \mu)^2}{N} \quad (7.1)$$

Burada

σ^2 : varyans

x_i : verinin i . noktadaki değeri

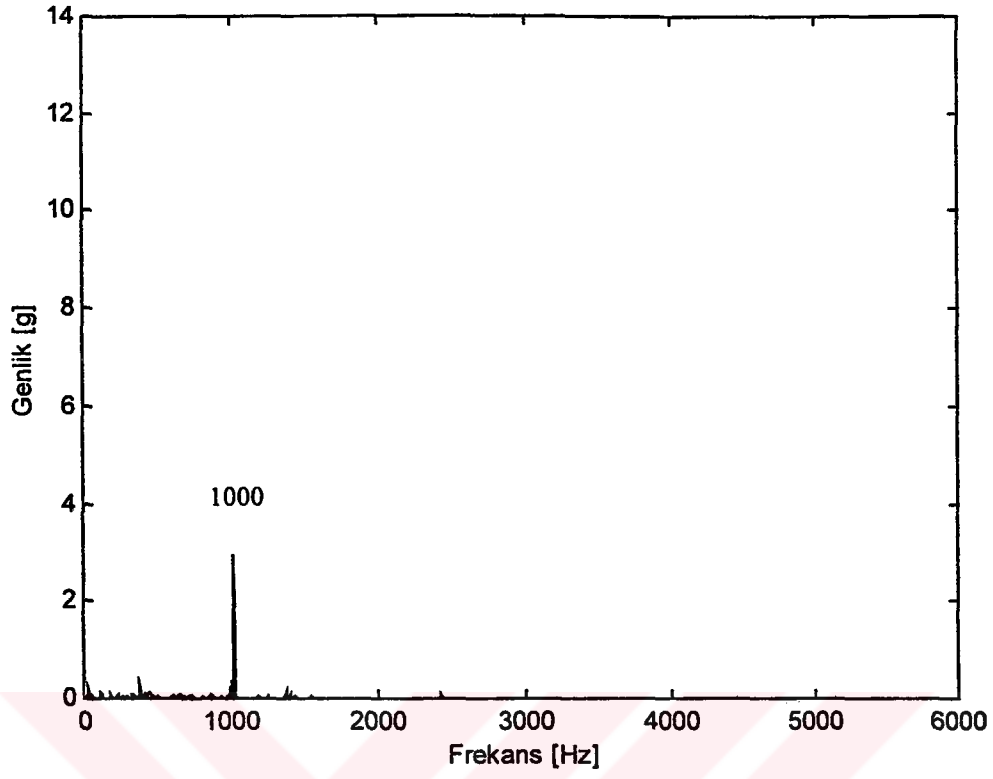
N : toplam veri sayısı

μ : aritmetik ortalamadır. ($\mu = \frac{\sum x_i}{N}$)

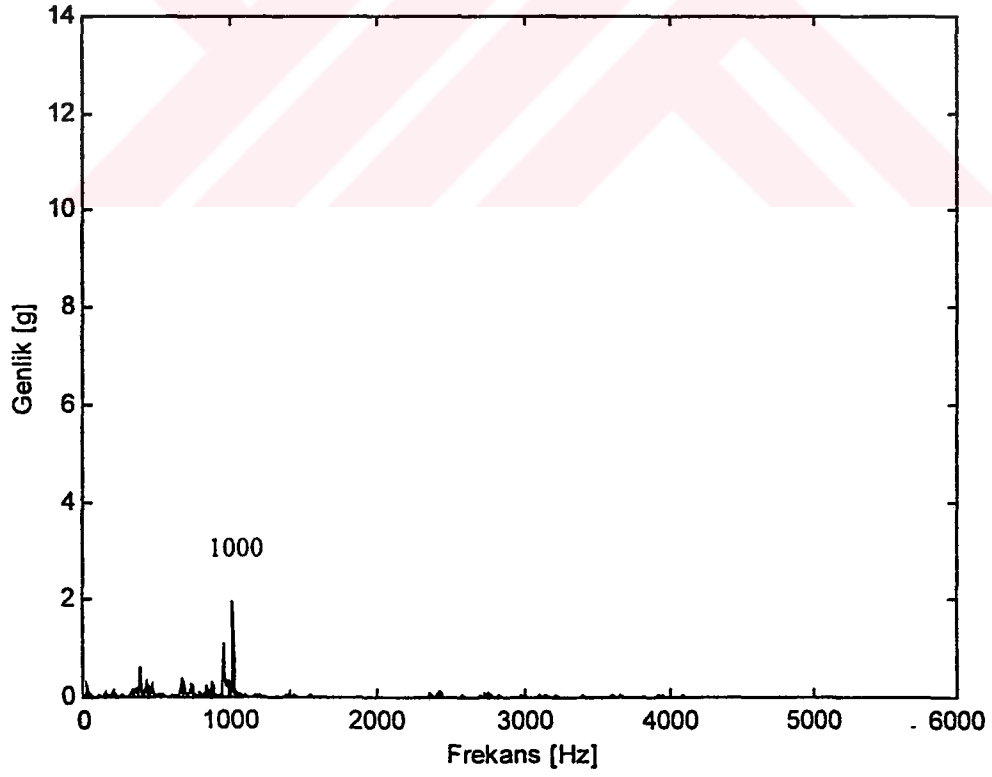
Buna göre Tablo 1 deki hesaplanmış varyans değerleri Şekil 7.9' a göre grafik olarak gösterilebilir. Bu sonuca göre eskime süreci sağlam durumdan dördüncü aşamaya kadar yükselen bir eğilim göstermekte olup işaretin enerjisinde ya da fiziksel anlamda mekanik bozulmanın artmakta olduğunu göstermektedir. 4 ve 5' inci aşamalar arasındaki sabit varyans değeri iki şekilde yorumlanabilir. Bunlar sırası ile veri toplamadaki bir yanlışlık olabileceği gibi, yeni bir arızanın (bozulmanın) başlangıcı da olabilir. Burada daha çok ikinci yorum esas alınmıştır. Bundan sonraki varyans değerlerine bakıldığında da hızlı bir değişim gözlenmiştir. Sağlam ve son eskitme aşamasına ilişkin varyans değerleri karşılaştırıldığında aralarındaki oran ~33'tür. Bu ise standart sapma anlamında ~5-6 katlık bir değişime karşı gelirken bu da bu süreçler sonunda rulmanların % 99.7 den daha büyük bir olasılıkla (özellikle dördüncü aşamadan sonra) bozulduğunun göstergesidir.

7.2 Makine Titreşim İşaretlerinin Güç Spektrum Yoğunlukları (GSY) ve Yorumu

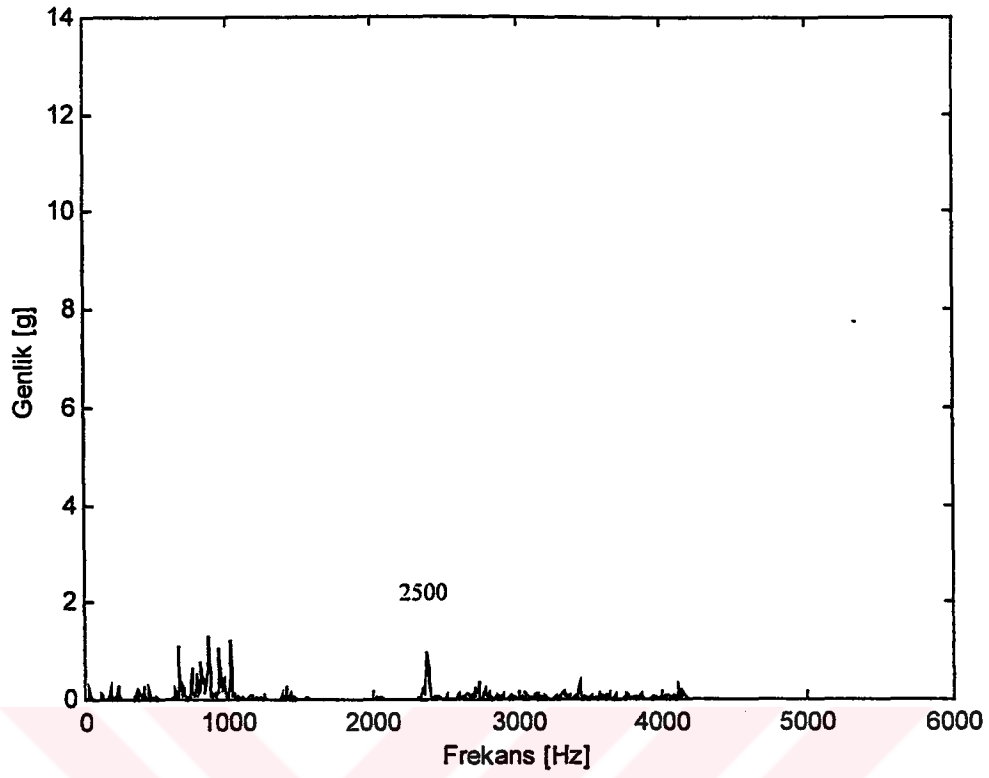
Bu incelemede her bir durumda zaman tanım bölgesi işaretlerinin GSY ları hesaplanarak arızanın frekans tanım bölgesindeki gelişimi izlenmiştir.



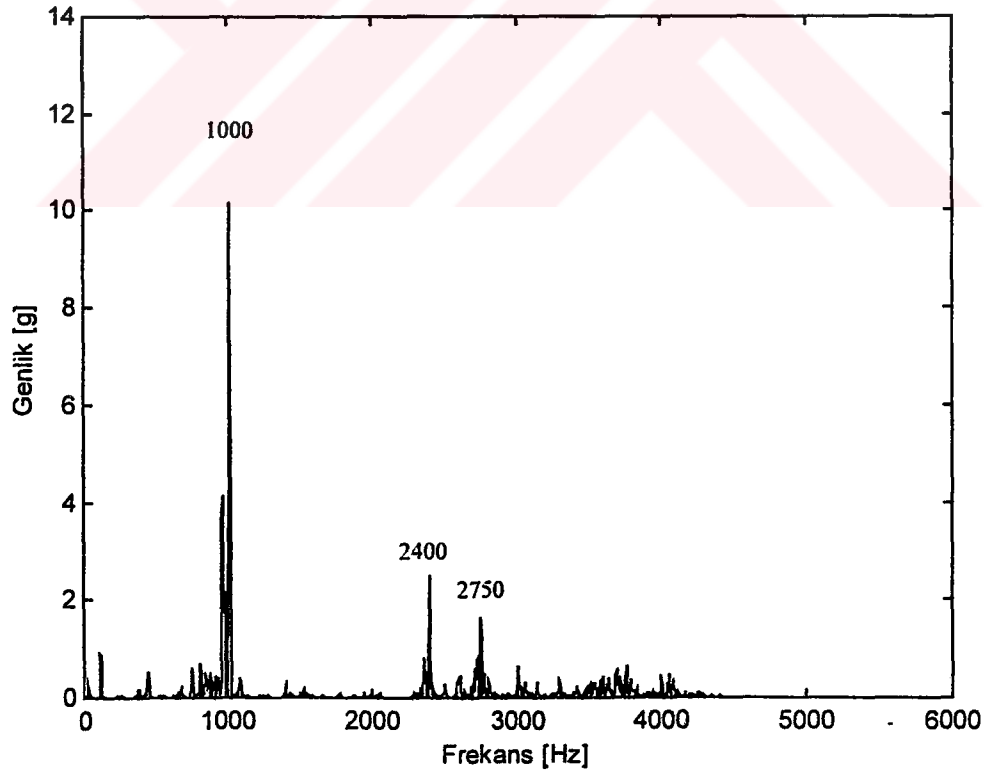
şekil 7.10. Başlangıç aşamasındaki Genlik-Frekans değişimi.



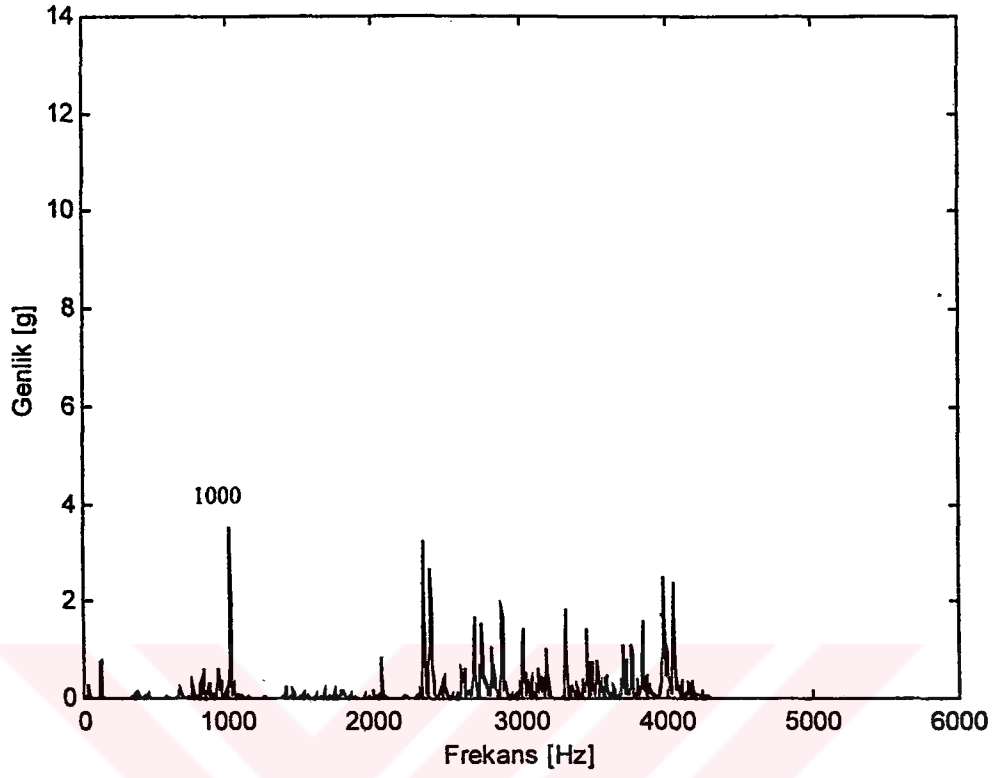
şekil 7.11. Birinci eskitme aşamasındaki Genlik-Frekans değişimi.



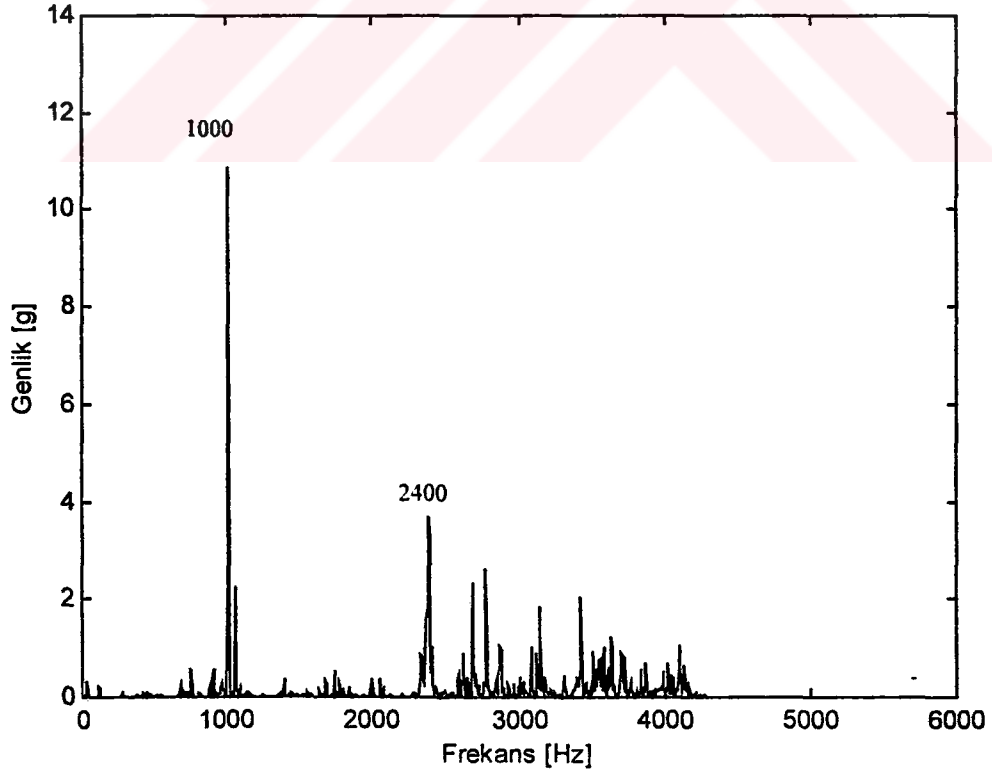
Şekil 7.12. İkinci eskitme aşamasındaki Genlik-Frekans değişimi.



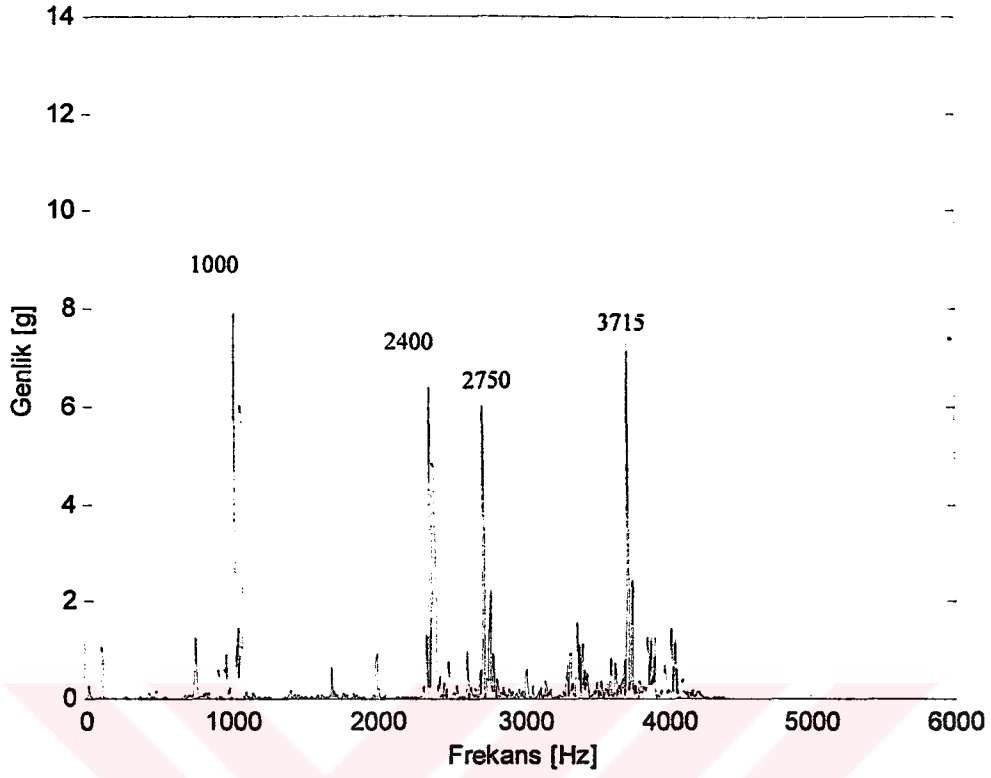
Şekil 7.13. Üçüncü eskitme aşamasındaki Genlik-Frekans değişimi.



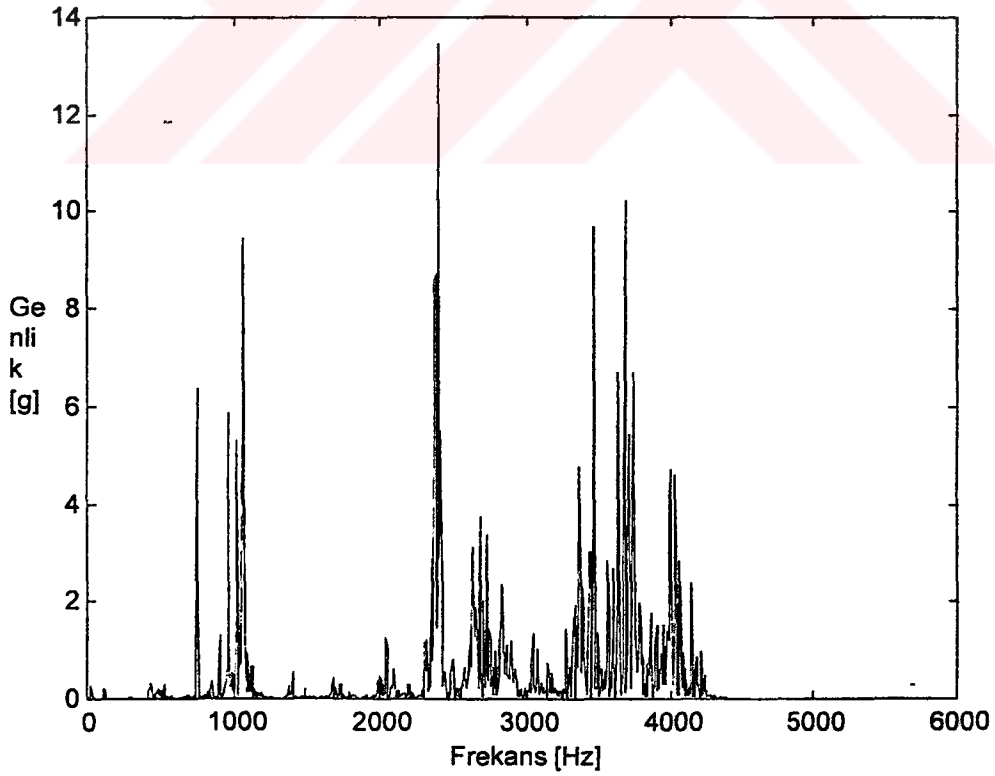
Şekil 7.14. Dördüncü eskitme aşamasındaki Genlik-Frekans değişimi.



Şekil 7.15. Beşinci eskitme aşamasındaki Genlik-Frekans değişimi.



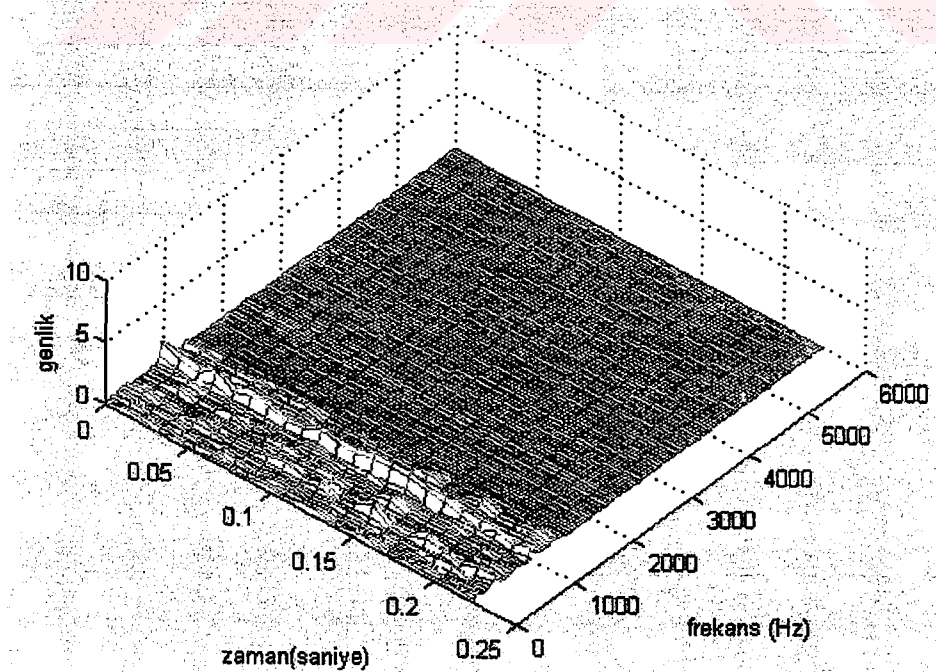
şekil 7.16. Altıncı eskitme aşamasındaki Genlik-Frekans değişimi.



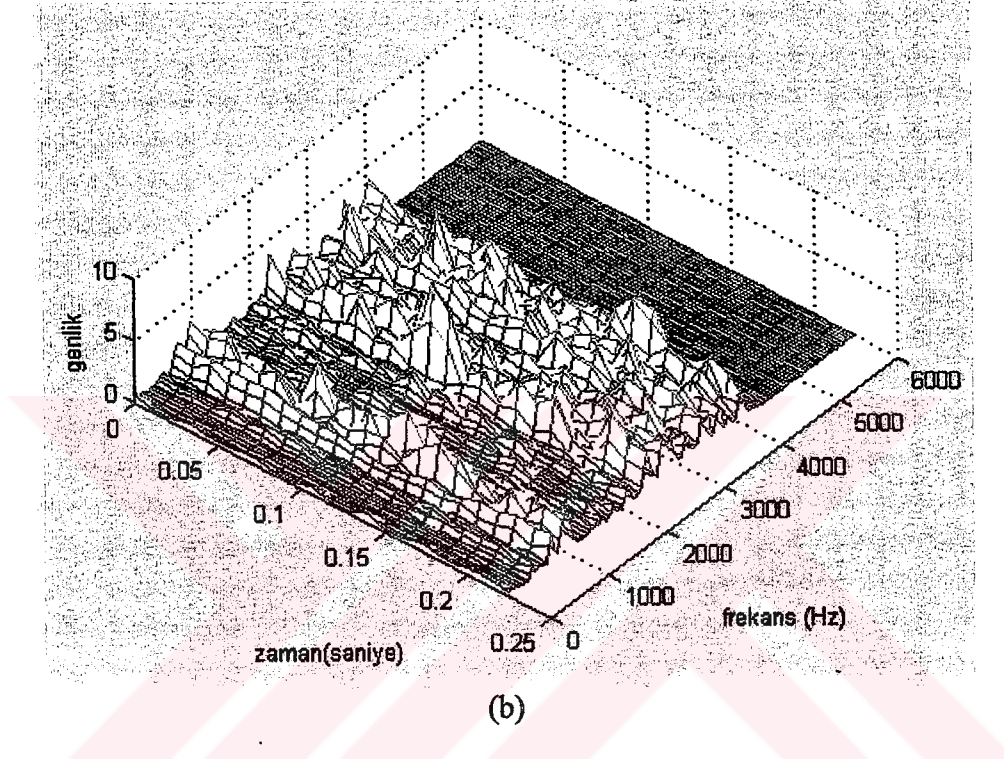
şekil 7.17. Yedinci eskitme aşamasındaki Genlik-Frekans değişimi.

7.2.1 Güç Spektrum Yoğunluklarının Yorumu

Sağlam durumdaki titreşim işaretinin güç spektrum yoğunluğuna bakıldığında 1000 Hz de bir tepe değer ve 0-1000 Hz arasında küçük genlikler gözlenmiştir. Bundan sonraki birinci eskitme aşaması sonrasında özellikle alçak frekans bölgesinde yer alan (0-1000 Hz) genliklerde genlik artışı ortaya çıkmıştır. İkinci aşamada ise 2500 Hz sonrasındaki genlikler belirginleşmiştir. Üçüncü aşamada da sadece 1000 Hz, 2400 Hz ve 2750 Hz lik özel frekans genlikleri kuvvetlenmiştir. Dördüncü aşamada, özellikle 2500-4000 Hz arasındaki genliklerde büyük değişimler görülmüştür. Bu durum işaret enerjisinin artmasıyla ilişkilendirilirse dördüncü aşama sonunda rulman arızası 2500-4000 Hz de tamamen ortaya çıkmış olup bundan sonraki beşinci aşamada sadece 1000 Hz ve 2400 Hz lik önceki frekansların genliklerinde artış olmuştur. Beşinci aşamanın bir geçiş aşaması olması yorumu ile altıncı aşamada özellikle 1000 Hz, 2400 Hz ve 2750 Hz lik genliklerin kuvvetlenmesi ile birlikte 3715 Hz lik yeni bir kuvvetli genlik ortaya çıkmıştır. Son eskitme aşaması olan yedinci aşamada ise rulman arızasını karakterize eden 2000-4000 Hz arasındaki yüksek frekanslar çok kuvvetlenerek rulman arızası oluşturma süreci tamamlanmıştır. Bu ilişki aşağıdaki Kısa Zaman Fourier Dönüşümü (KZFD) ile tanımlanan üç boyutlu şekillerde daha açık olarak gösterilmiştir.



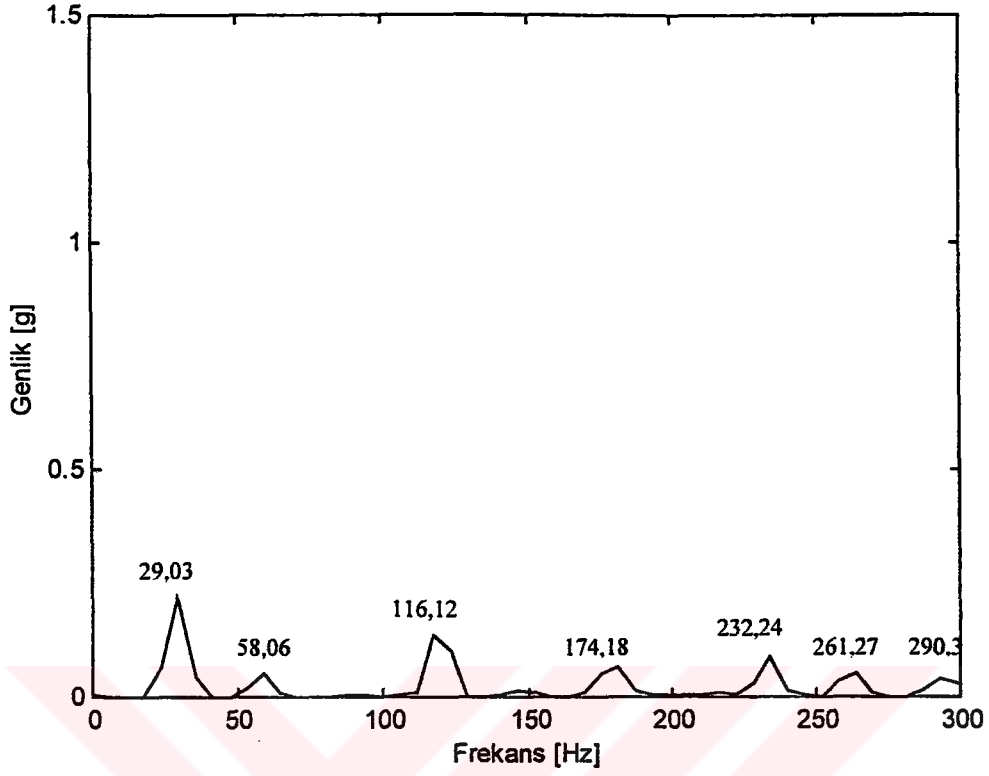
Şekil 7.18a. Sağlam Durumdaki Titreşim işaretleri için KZFD.



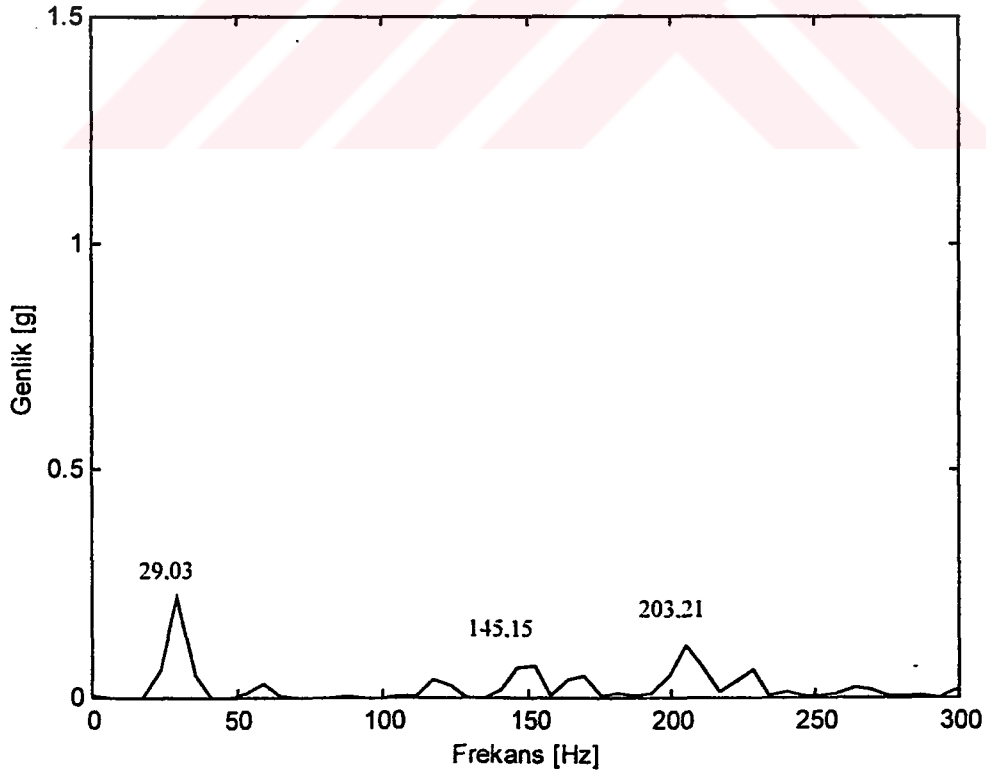
Şekil 7.18b. Bozuk Durumdaki Titreşim işaretleri için KZFD.

7.3 Rotor Dengesizliğinin Gözlenmesi

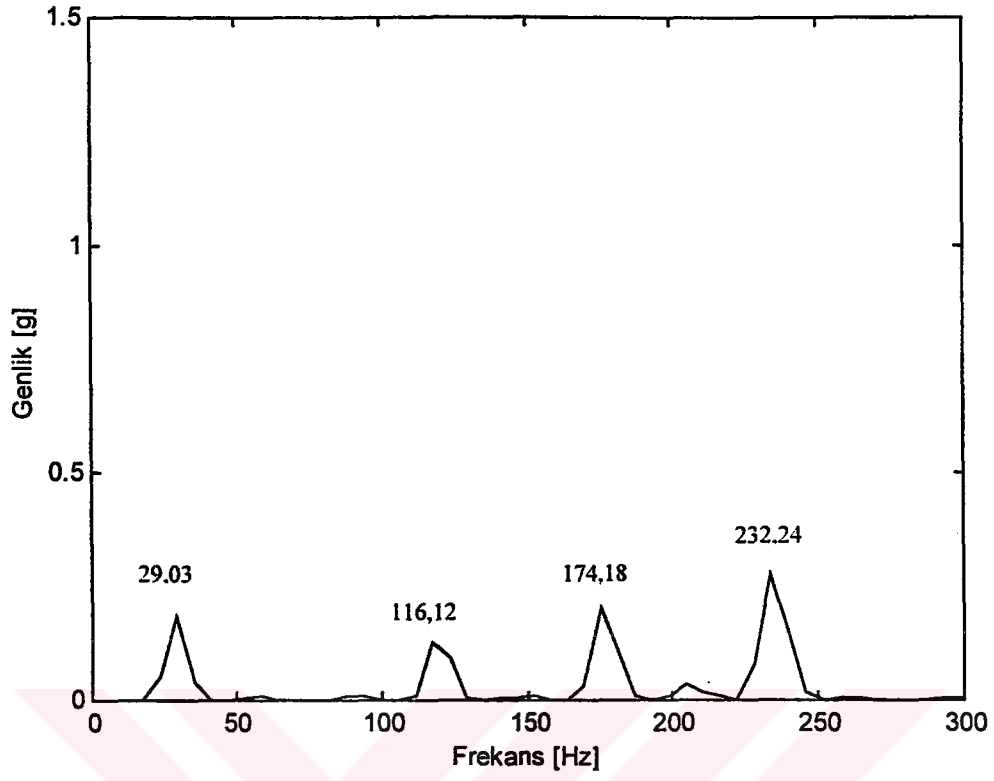
Güç spektrum yoğunluklarının alçak frekans bölgesinde rotor dengesizlikleri frekansı ve çeşitli harmonikler 0-300 Hz lik frekans aralığında aşağıdaki şekiller vasıtasıyla gözlenmiştir.



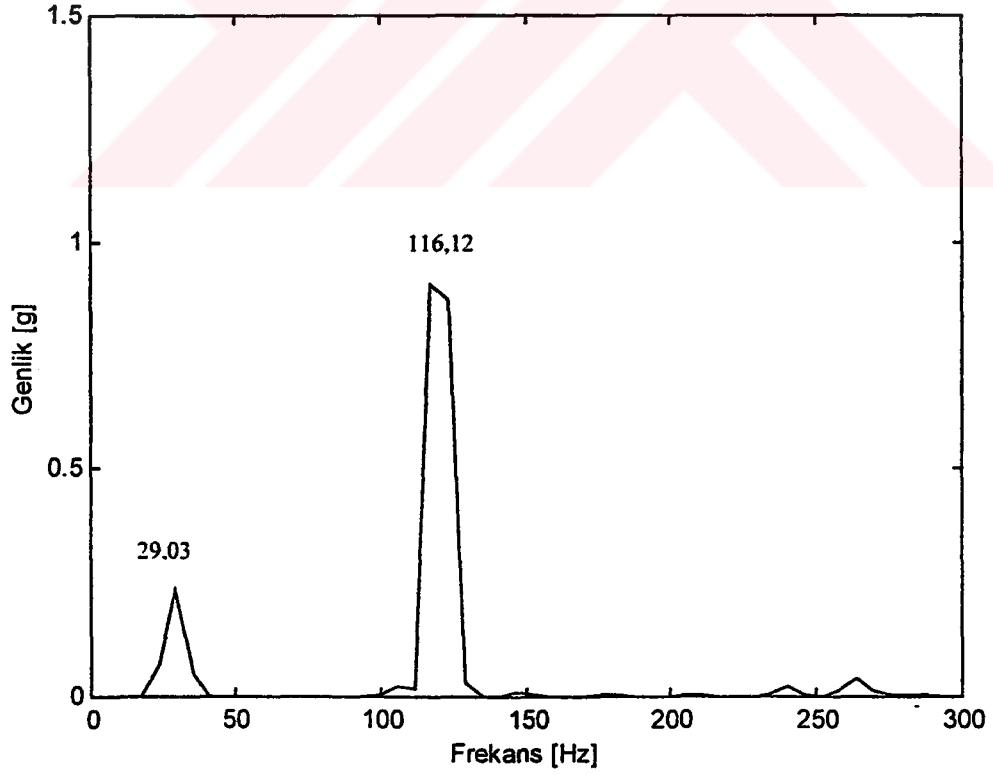
Şekil 7.19. Başlangıç aşamasındaki Genlik-Frekans değişimi.



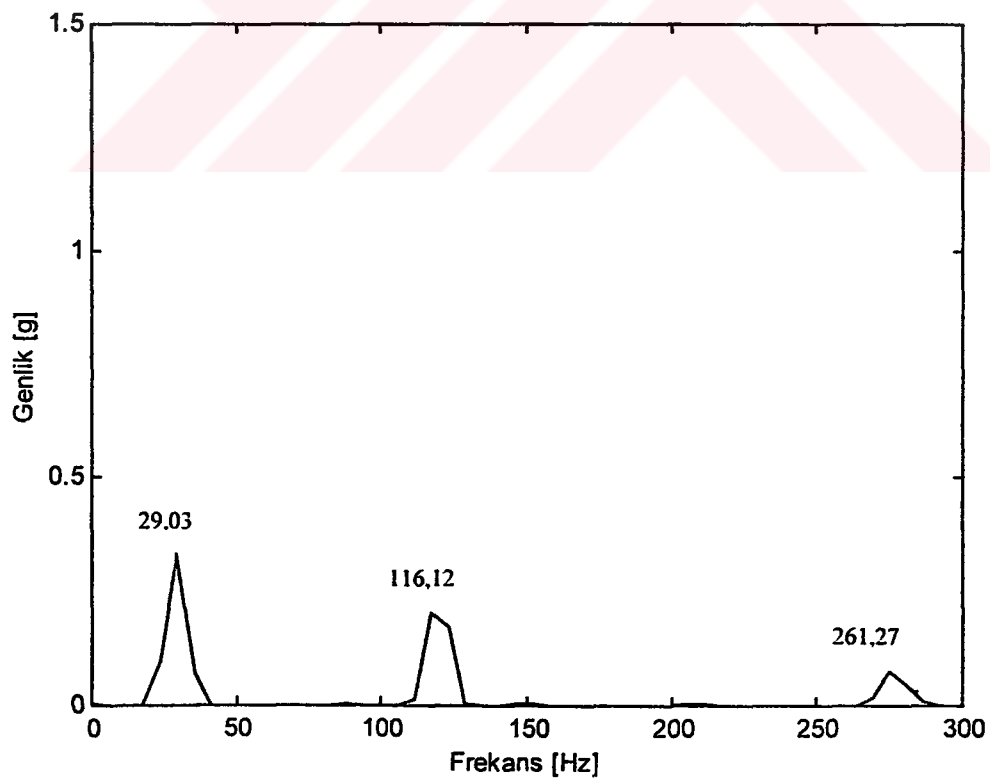
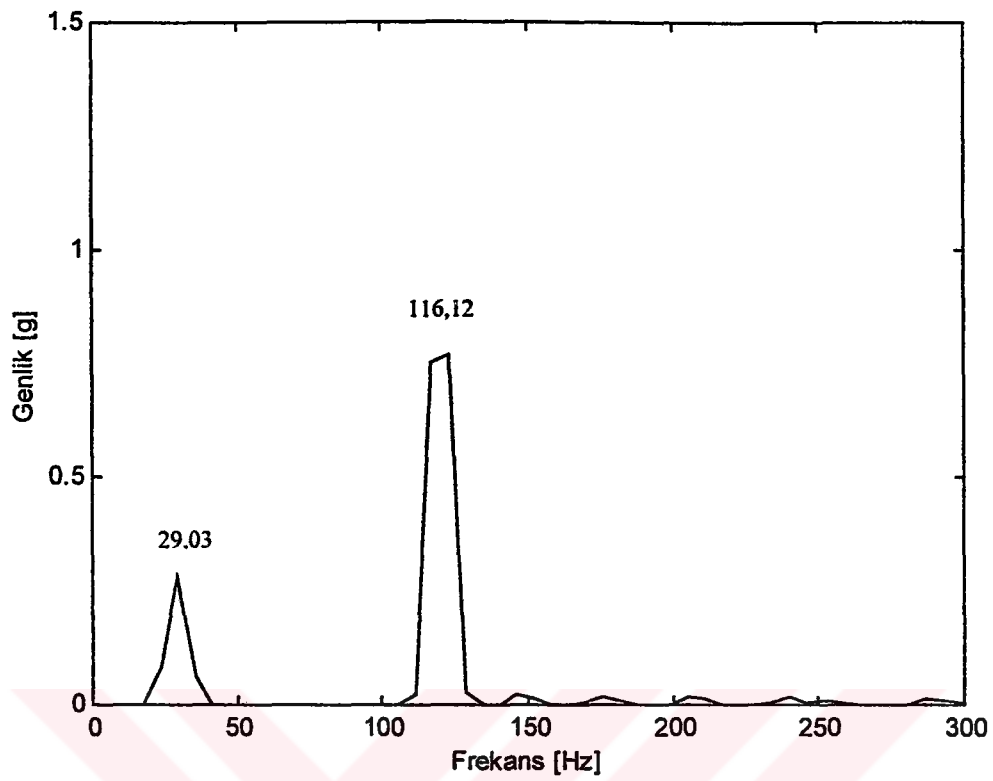
Şekil 7.20. Birinci eskitme aşamasındaki Genlik-Frekans değişimi.

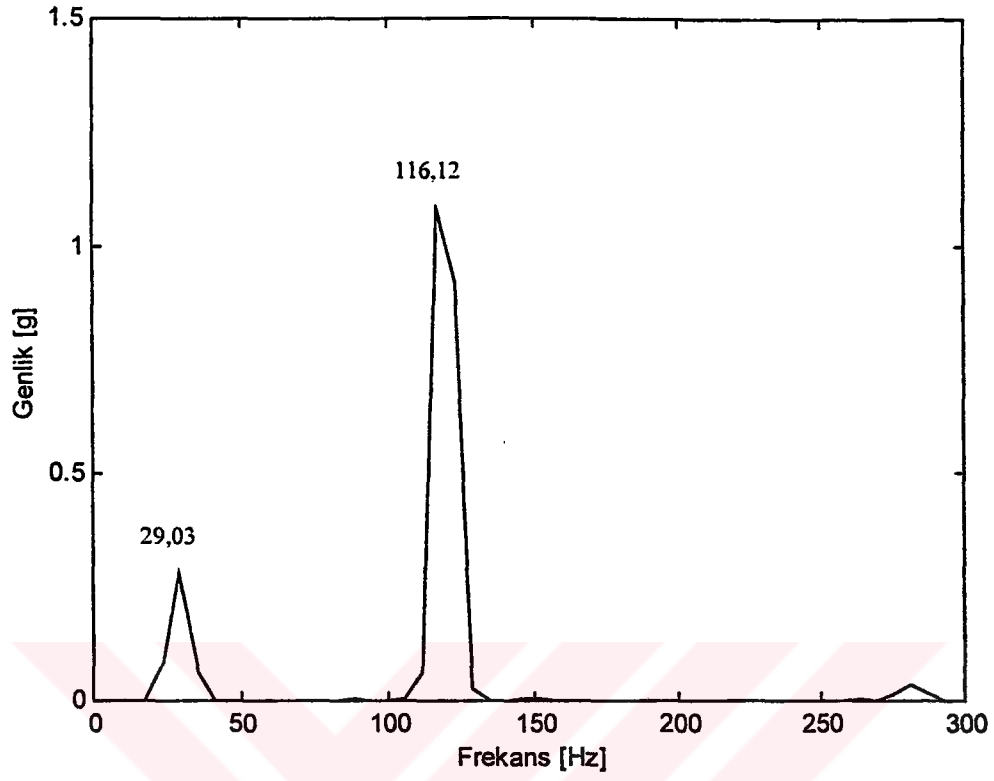


Şekil 7.21. İkinci eskitme aşamasındaki Genlik-Frekans değişimi.

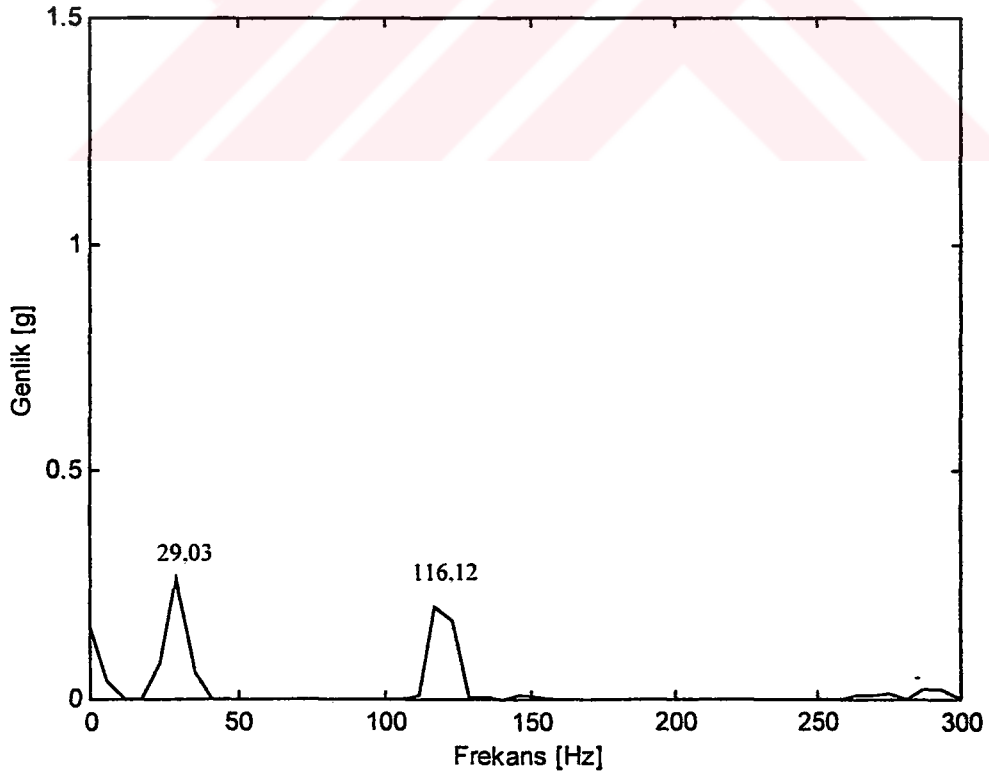


Şekil 7.22. Üçüncü eskitme aşamasındaki Genlik-Frekans değişimi.





Şekil 7.25. Altıncı eskitme aşamasındaki Genlik-Frekans değişimi.



Şekil 7.26. Yedinci eskitme aşamasındaki Genlik-Frekans değişimi.

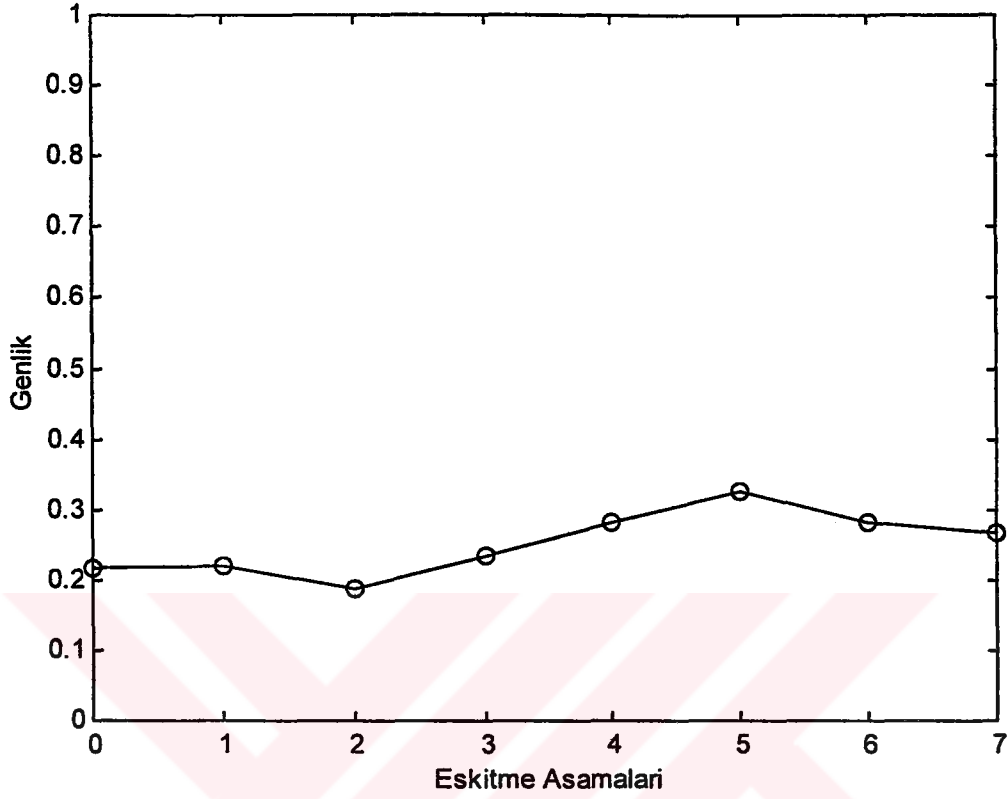
7.3.1 0-300 Hz Arasındaki Güç Spektrum Yoğunluklarının Yorumu

Sağlam durumdaki titreşim işaretinin güç spektrumunun 0-300 Hz lik alçak frekans bölgesi incelendiğinde 1742 devir/dak dönme hızındaki motorun 29.03 Hz lik temel dönme frekansı belirlenerek bunun 2, 4, 6, 8 ve 10 gibi çift harmoniklerinin baskın olduğu gözlenmiştir. Birinci eskitme aşaması sonrasında bu çift harmonikler yerine beşinci ve yedinci harmonikler ortaya çıkmıştır. İkinci aşama sonrasında ise yeniden 4, 6 ve 8 gibi dönme frekansının çift harmonikleri kuvvetlenmiştir. Üçüncü aşamada sadece dördüncü harmonik kuvvetlenmiştir. Dördüncü aşamada ise bu dördüncü harmoniğe ilişkin genlikte çok az bir azalma ile birlikte mevcut durum korunmuştur. Beşinci aşama yine dördüncü harmonik genliğinin azalması ile birlikte dokuzuncu harmoniğin yeniden ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Altıncı aşamada beşinci aşamadaki duruma benzer bir durumla birlikte dördüncü harmoniğin genliğinde üçüncü aşamadaki genlikle karşılaştırılınca yine bir artış görülmüştür. Son aşama ise yine beşinci aşamanın benzeri bir durum göstermiştir.

(*) : Rotor dengesizlik frekansı 29.03 Hz deki genlikler.

Tablo 7.2 Rotor dengesizlik frekansları.

Eskitme Aşamaları	0 (Başlangıç)	1	2	3	4	5	6	7 (Son)
Genlik(*)	0.2182	0.2185	0.1868	0.2344	0.2820	0.3247	0.2820	0.2661



Şekil 7.27. : Rotor dengesizlik frekansı 29.03 Hz deki genlikler.

Burada 2. eskime sürecinde oluşan temel frekans genliğinde bir azalma olmuştur. 2.-5. eskitme aşamalarında rotor dengesizliği düzgün olarak artmaktadır. 6. ve 7. aşamalarda ise genliklerde azalmalar görülmüştür.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada endüstrideki bakım teknolojilerine ilişkin kısa bir bilgi verildikten sonra , endüstriyel süreçlerdeki motor arıza tanısına ilişkin durum izleme tekniklerinden söz edilmiştir. Bu amaçla yapay olarak eskitilmiş rulman arıza verileri esas alınmıştır.

Yapay eskitme süreçleri motor miline dışarıdan verilen akım etkisi ile oluşturulmuş ve aynı zamanda da eskimenin hızlandırılması bakımından termal ve kimyasal eskitme süreçleri uygulanmıştır. Her eskitme kademesinden sonra motora performans testi uygulanarak üzerinden elektriksel ve mekaniksel kısımlara ait işaretler alınmıştır [2]. Bu tezde yalnızca motor rulmanına yakın bir noktadaki tek bir titreşim sensor bilgisi ele alınarak, biri sağlam durum olmak üzere toplam sekiz aşamadaki işaretlerle inceleme yapılmıştır.

Bu çalışmada incelenen titreşim işaretlerinin analizleri neticesinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır :

1. Her bir eskitme sonrasında alınan titreşim işaretlerinin analizi neticesinde eskitme aşamalarına ilişkin varyans değerlerinin hesaplanması ile tüm eskitme sürecindeki ortalama eğilim (trend) gözlenmiştir. Bu eğilime göre özellikle 0-4 arasındaki eskitme süreçlerinde yükselen bir değişim görülürken, 4-5 arasında hiç bir değişim gözlenmemiştir. Bu durum, istatistiksel anlamda arızanın başlangıcı olarak yorumlanmıştır. Bundan sonraki 5. ve 7. süreçler arasındaki değişim ise yine hızlı bir biçimde artmıştır. Eskimenin matematiksel göstergesi olarak kullanılan bu varyans değeri, karesel bir büyüklük olduğu için aynı zamanda işaretlerdeki enerji artışının bir ölçüsü olarak da verilmiştir. Sonuç olarak eskime, işaretlerdeki enerjinin artması yönündedir.
2. Titreşim işaretlerinin güç yoğunluğu spektrumları hesaplanarak rulman arızasını karakterize eden frekans bölgesinin, özellikle kısa zaman Fourier dönüşümünün yapıldığı spektrogramlardan 2-4 kHz arasında yer aldığı sonucuna varılmıştır. Bu özelliğin 4 kHz in ötesinde görülmemesinin nedeni, veri toplama sisteminde kesim frekansı 4 kHz de olan bir alçak geçiren filtrenin

kullanılmış olmasıdır.

3. Titreşim işaretlerinin hesaplanmış güç spektrumu yoğunluklarının alçak frekans bölgesinde ise, özellikle göz önüne alınan 0-300 Hz lik bölgesinde, temel frekans olarak 29.03 Hz lik (motor bu durumda 1742 devir/dak. hızında) mil hızı belirlenmiştir ayrıca bu temel frekansın tepe değerlerinin her bir eskitme aşamasındaki değişimine bakılarak özellikle 2.-5. eskitme aşamalarında rotor dengesizliğinin düzgün olarak arttığı gözlenmiştir. 2. eskime sürecinde oluşan temel frekans genliğindeki azalma 2. aşamanın rulmanda oluşturduğu etkinin, başlangıçta var olan rotor dengesizliğini rastgele olarak kompanze etmesi olarak yorumlanabilir. 6. ve 7. aşamalardaki genlik azalmaları ise bu defa 5. eskitme süreci sonunda gelişen rulman arızasının (Bu, varyans değişiminden de gözlemlenmişti.) yine bu noktada rotor dengesizliğini kompanze edecek karakterde oluşması şeklinde yorumlanmıştır.

Bu sonuçlardan sonra, titreşim işaretleri bakımından rotor dengesizliğinin gelişimini ifade etmek için temel dengesizlik frekansı ve onun çeşitli harmoniklerinin rulman eskitme aşamaları ile daha sistematik olarak ilişkilendirilmesi, ayrı bir çalışmanın konusu olarak önerilebilir.

Bütün bu titreşim işareti analizleri sonucunda rulman arıza gelişimi ve rotor dengesizlik durumu arasındaki ilişki, hızlandırılmış eskitme süreçleri ile oluşturulan yapay yaşlandırma deneyleri vasıtasıyla spektral analiz yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu incelemenin sonraki aşamalarında, rotor-dengesizliğini elektriksel verilerden de yola çıkarak belirlemek mümkün olabilecektir. Bu anlamdaki öneriler aşağıdaki iki madde ile verilebilir. Bunlar sırası ile ;

1. Motor akım işaretlerinin spektral analizi,
2. Motor akım işaretlerindeki rotor dengesizliğini gösteren temel frekans bileşeninin genliğini kuvvetlendirecek yeni bir işaret analizi tekniğinin oluşturulmasıdır.

Bu alışma yukarıdaki öneriler doğrultusunda geliştirilirse, literatürde ilk kez ortaya çıkartılacak önemli bir çalışmaya da zemin hazırlamış olacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] D. Kowal, "Proactive Maintenance Strategy for Electrically Induced Bearing Damage," Proceedings of MARCON 99, Vol. 2, pp. 67.01-67.07, May 1999.
- [2] A.S. Erbay and B.R. Upadhyaya, *Multi-Sensor Fusion for Induction Motor Aging Analysis and Fault Diagnosis*, Research Report, The University of Tennessee, Maintenance and Reliability Center, Knoxville, UTNE/BRU/99-01, October 1999.
- [3] A.H. Bonnet and G.C. Soukup, "Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 28, No. 4, pp. 921-937, August 1992.
- [4] K.R. Cho, J.H. Lang, and S.D. Umas, "Detection of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using State and Parameter Estimation", *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. 28, No. 3, pp. 702-709, May/June 1992.
- [5] S.W. Bowers, K.R. Piety, and R.J. Colsher, "Evaluation of the Field Application of Motor Current Analysis", *Proceedings of the Meeting of the Vibration Institute*, 1993.
- [6] R. Schoen, T.G. Habetler, F. Kamran, and R.G. Bartheld, "Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring", *1994 IEEE Industrial Application Meeting*, Vol. 1, pp. 110-116, 1994.
- [7] M.J. Costello, "Shaft Voltages and Rotating Machinery," *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. 29, No. 2, pp. 419-425, 1993
- [8] S.V. Bowers and K.R. Piety, "Proactive Motor Monitoring Through Temperature Shaft Current and Magnetic Flux Measurements", *CSI 1993 Users Conference*, September 20-24, 1993, pp.2-3.
- [9] J.R. Nicholas, "Predictive Condition Monitoring of Electric Motors", *P/PM Technology*, pp. 28-32, August 1993.
- [10] G.A. Bisbee, "Why Do Motor Shaft and Bearing Fail", *TAPPI Journal*, Vol. 77, No. 9, pp. 251-252, September 1994.
- [11] Stewart v. Bowers, "Integrated Strategy For Predictive Maintenance of AC Induction Motors, P/PM Technology, pp. 34-40, October 1996.
- [12] R.R. Schoen and T.G. Habetler, "Effects of Time-Varying Loads on Rotor Fault Detection in Induction Machines," *IEEE Transactions on*

Industry Applications, Vol. 31, No. 4, pp. 900-906, July-August 1995.

- [13] **G.B. Kliman and J. Stem**, "Induction motor fault detection via passive current monitoring", *Proceedings of the International Conference on Electric Machines*, pp. 13-17, August 1990.
- [14] **G.B. Kliman and J. Stem**, "Methods of motor current signature analysis", *Electric Machines and Power Systems*, Vol. 20, No. 5, pp. 463-474, September 1992.
- [15] **Zeki Akçalı, Serhat Şeker, R. Nejat Tunçay**, "Asenkron Elektrik Makinelerinde Sürücü Devrelere Bağlı Rulman Arızalarının Oluşumu, ELECO 2000, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu Bursa, S: 81-85, Eylül 2000
- [16] **A.S. Erbay, B.R. Upadhyaya, J.P. McClanahan, and S. Seker**, "Accelerated Aging Studies of Induction Motors," *Proceedings of MARCON 98*, Vol. 1, pp. 33.01-33.14, May 1998.
- [17] **S. Seker, B.R. Upadhyaya, A.S. Erbay, J.P. McClanahan, and A.A. daSilva**, "Rotating Machinery Monitoring and Degradation Trending Using Wavelet Transforms," *Proceeding of MARCON 98*, Vol. 1, pp. 23.01-23.11, May 1998.
- [18] **V.S. Vaseghi**, *Advanced Signal Processing and Digital Noise Reduction*, John Wiley, New York, pp. 38-42, 1996.
- [19] **"Handbook"**, **Bodine Electric Company** 2500W. Bradley Chicago IL 60618, pp (7-10, 7-16), 1993.
- [20] **V. Wowk**, "Machinery Vibration" Mc Graw-Hill Inc. Pp (148 – 164), 1991.
- [21] **A. Binder, A. Schrepfer**, "Bearing Currents in Induction Machines due to Inverter Supply", ICEM '98, International Conference on Electrical Machines, September 2-4 1998, Istanbul, v.1, pp.586-591.
- [22] **Z. Krzemień**, "Bearing Current in Induction Motors Supplied with Power from PWM Inverters", ICEM '98, International Conference on Electrical Machines, September 2-4 1998, Istanbul, v.1, pp.592-596.
- [23] **S.P. Verma, R.S. Gilgis, R.J. Fleming**, "The Problems and Failures Caused by shaft Potentials and Bearing Currents in Turbogenerators", Int. Conf. On Large High Voltage Electric System, CIGRE Session, 1980, paper 11-10.

- [24] **J. Boyd, H.N. Kaufman**, "The Conduction of Current in Bearings", ASLE Trans. , October 1958, pp.67-77.
- [25] **S. Andreason**, "Passage of Electrical Currents thru Rolling Bearings", SKF Gothenburg.
- [26] **S. Şeker, E. Ayaz, E. Türkcan, A.S. Erbay**, "Dalgacık Analizi Tekniği ile Elektrik Makinalarında Hızlandırılmış Eskimeye Bağlı Rulman Arıza Tanısı", SİU'99, Sinyal İşleme Uygulamaları, 1999, Bilkent, Ankara.
- [27] **D. MacDonald, W. Gray**, "PWM Drive Related Bearing Failures", IEEE Industry Applications Magazine, July/August 1999, pp.41-47.
- [28] **J.M. Erdman, R.J. Keakman, D.W. Schelegel, G.L. Skibinski**, "Effect of PWM Inverters on AC Motor Bearing Currents and Shaft Voltages", Proc. IEEE 10th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC '95), Dallas, TX, 1995, v.1, pp.24-33.
- [29] **S. Chen, T.A. Lipo, D. Fitzgerald**, "Source of Induction Motor Bearing Currents Caused by PWM Inverters", IEEE Trans. on Energy Conversion, March 1997, v.11, n.1, pp.25-32.
- [30] **D.F. Busse, J.M. Erdman, R.J. Kerkman, D.W. Schlegel, G.L. Skibinski**, "Bearing Current and Their Relationship to PWM Drives", IEEE Trans. on Power Electronics, March 1997, v.12, n.2, pp.243-252.
- [31] **D.F. Busse, J.M. Erdman, R.J. Kerkman, D.W. Schlegel, G.L. Skibinski**, "The Effects of PWM Voltage Source Inverters on the Mechanical Performance of Rolling Bearings", IEEE Trans. on Industrial Applications, March/April 1997, v.33, n.2, pp.567-576.
- [32] **P. Alger, H. Samson**, "Shaft Currents in Electric Machines", presented at the A.I.R.E. Conference in Philadelphia, PA, February 1924.
- [33] **NEMA Standards Publication No. MG 1-1993**, Motors and Generators
- [34] **P.J. Link**, "Minimizing Electric Bearing Currents in ASD Systems", IEEE Industry Applications Magazine, July/August 1999, pp.55-66.

ÖZGEÇMİŞ

Serkan Soyarslan 31.12.1975 tarihinde İskenderun'da doğdu. Kozyatağı İlkokulu' nun ardından ortaokul ve Lise 2' nci sınıfa kadar Özel Yunus Emre Lisesi'nde öğrenim gördü. Lise 3' ncü sınıfı Kadıköy İntaş Lisesi' nde bitirdikten sonra Şubat 1998 de İstanbul Teknik Üniversitesi' nden Elektrik Mühendisi ünvanı ile mezun oldu. Eylül 1998' de Elektrik Mühendisliği Programı' nda yüksek lisans yapmaya hak kazandı. Halen, Alstom Elektrik Endüstrisi A.Ş. de Elektrik Mühendisi olarak görev yapmaktadır.



TEŞEKKÜR

Bu tezde kullanılan deneysel verilerin sağlandığı The University of Tennessee, Nuclear Eng. Dept. ve Maintenance & Reliability Center yetkililerine teşekkürü bir borç bilirim.

