

ASENKRON MOTORLARDA ROTOR
ARIZALARININ STATOR AKIMI VERİLERİ YARDIMIYLA
ANALİZİ ve TESPİTİ

Ahmet KABUL

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs – 2013

ASENKRON MOTORLARDA ROTOR ARIZALARININ STATOR AKIMI
VERİLERİ YARDIMIYLA ANALİZİ ve TESPİTİ

Ahmet KABUL

Dumlupınar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği uyarınca
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

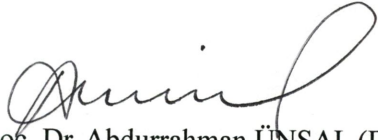
Danışman: Doç. Dr. Abdurrahman ÜNSAL

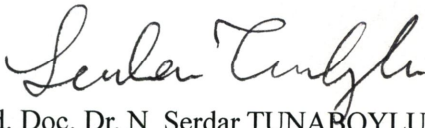
Mayıs – 2013

KABUL VE ONAY SAYFASI

Ahmet KABUL'un YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı ASENKRON MOTORLARDA ROTOR ARIZALARININ STATOR VERİLERİ YARDIMIYLA ANALİZİ ve TESPİTİ başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü eğitim öğretim ve sınav yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

30 / 05 / 2013

Üye 
Doç. Dr. Abdurrahman ÜNSAL (Danışman)

Üye 
Yrd. Doç. Dr. N. Serdar TUNABOYLU

Üye 
Yrd. Doç. Dr. Nazım İMAL

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun / /2013 gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hasan GÖÇMEZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ASENKRON MOTORLARDA ROTOR ARIZALARININ STATOR AKIMI VERİLERİ YARDIMIYLA ANALİZİ ve TESPİTİ

Ahmet KABUL

Elektrik - Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2013

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Abdurrahman ÜNSAL

ÖZET

Asenkron motorlar nispeten yüksek verimleri, düşük bakım talepleri ve güvenilirlikleri nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan elektrik motorlarıdır. Asenkron motorlarda karşılaşılan arızalar uzun süreli üretim durmalarına ve mali kayıplara yol açabilmektedir. Bu yüzden asenkron motorların sağlıklı çalışması özellikle endüstriyel ve diğer kullanım alanlarındaki uygulamalar açısından oldukça önemli bir konudur.

Kırık rotor çubuğu asenkron motorlarda karşılaşılan yaygın arıza türlerinden bir tanesidir. Bu tez çalışması, sincap kafesli asenkron motorlardaki kırık rotor çubuklarını tespit etmek için NLMS (Normalize Edilmiş En Küçük Ortalama Kareler) filtre ile Hilbert Zarf Analiz tekniklerini birleştiren bir yöntem sunmaktadır. Önerilen yöntemin doğruluğu deneysel veriler kullanılarak test edilmektedir. Stator akım verisi deneysel veri olarak kullanılmaktadır. Deneysel veriler bir asenkron motorda üç adet eşdeğer rotor (sağlam rotor, üç kırıklı rotor ve beş kırıklı rotor) kullanılarak farklı yükleme koşulları altında (%25, %50, %75, %100, %125 ve %150) çalıştırılmasıyla üretilmektedir. Önerilen yöntemin sonuçları ile Fourier Dönüşümü analizinin sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, sunulan yöntemin sincap kafesli asenkron motorlarda karşılaşılan rotor çubuğu arızalarında başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Asenkron motor, Fourier Dönüşümü, Hilbert Zarf Analizi, Kırık rotor çubuğu, Stator akımı.

BROKEN ROTOR BAR DETECTION USING STATOR CURRENT DATA IN INDUCTION MACHINES

Ahmet KABUL

Electric & Electronic Engineering, M.S.Thesis, 2013

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Abdurrahman ÜNSAL

SUMMARY

Induction motors are the most widely used electrical motors in industrial applications due to their reliability, relatively high efficiency, and lower maintenance demand. Any fault taking place in induction motors may result in long down-time and lead to financial losses. Therefore the reliability of induction motors are quite important for mainly industrial and other applications.

Broken rotor bars are the most common fault types that may be seen in induction motors. This thesis presents a combination of NLMS (Normalized Least Mean Square) filter and Hilbert Envelope Analysis methods for detecting broken rotor bars of the squirrel-cage induction motors. The proposed method is tested by using experimental data. Stator current data is used as experimental data. The experimental data is produced by using three identical rotors (one healthy rotor, one with three broken bars, and one with five broken rotor bars) in an induction motor under different loading (25%, 50%, and 100 %) conditions. The results of the recommended method are compared to the results of Fourier Transform. The results shown that the proposed method can be successfully used for detecting the rotor faults of squirrel-cage induction motors.

Keywords: Broken rotor bar, Fourier Transform, Hilbert Envelope Analysis, Induction motor, Stator current.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamda, karşıma çıkan her zorluğu kolaylaştıran, yardımlarını ve desteğini her daim sürdüren, tez danışmanlığımı yapan Sayın Hocam Doç. Dr. Abdurrahman ÜNSAL'a en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım için Eskişehir Anadolu Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Güç Sistemleri Laboratuvarı'nı kullanmama imkân sağlayan Prof. Dr. Doğan Gökhan ECE'ye ve laboratuvar kullanımı sırasında bana yardımcı olan Arş. Gör. Murat BAŞARAN'a, tezimin uygulama sürecinde bana destek olan Wroclaw University of Technology Öğretim Üyesi Dr. Radoslaw Zimroz'a en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince bana manevi olarak destek veren bölümümüzün değerli hocalarıyla birlikte mesai arkadaşlarıma ve en önemlisi bu zorlu süreçte sürekli olarak desteklerini arkamda hissettiğim aileme ve eşime teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTORLAR.....	3
2.1. Asenkron Motorların Tarihçesi.....	3
2.2. Asenkron Motorların Kullanımı	4
2.3. Asenkron Motorların Yapısı ve Çeşitleri.....	4
2.4. Sincap Kafesli Asenkron Motorlar	5
2.5. Asenkron Motorların Çalışma Prensibi	6
3. ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTOR ARIZALARI.....	8
3.1. Literatür Taraması	9
4. ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTORLARDAKİ KIRIK ROTOR ÇUBUĞU ARIZASI.....	11
5. GELİŞTİRİLEN YÖNTEM	13
5.1. Stator Akım Verilerinin Ölçülmesi ve Kaydedilmesi	14
5.1.1. Test düzeneği	14
5.1.2. Verilerin kaydedilmesi	15
5.2. Sinyal İşleme Bölümü	15
5.2.1. Fourier Dönüşümü	16
5.2.2. Adaptif filtre	16
5.2.2.1. Adaptif LMS	17
5.2.2.2. Adaptif NLMS	19
5.2.3. Zarf analizi	20

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devamı)

	<u>Sayfa</u>
5.2.4. Hilbert dönüşümü	22
5.3. Sonuçların Karşılaştırılması.....	23
5.4. Sonuçların Değerlendirilmesi	23
6. TEST SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	43
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	45
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	47

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Tesla'nın 1888 Yılında Geliştirdiği İndüksiyon Motorlarından Birisi	3
2.2 1891 Yılında Geliştirilmiş Alternatif Akım Generatörü	4
2.3 Bir Asenkron Motorun Kesit Görüntüsü	5
2.4 Kısa Devre Çubuklu Rotor	6
2.5 120° Faz Farklı Üç Faz Gerilim	7
2.6 Döner Manyetik Alan Oluşumu	7
3.1 Asenkron Motor Arızaları	9
5.1 Geliştirilen Yöntemin Şematik Gösterimi	13
5.2 Kurulan Test Düzenegi	14
5.3 Asenkron Motor Etiket Değerleri	14
5.4 Adaptif Filtre Genel Yapısı	17
5.5 FIR Filtre Yapısı	18
5.6 NLMS Filtre Blok Diyagramı	19
5.7 Zarf Analizi	20
5.8 Sağlam Rotor %25 Yükleme Fourier Dönüşümü	25
5.9 Sağlam Rotor %25 Yükleme NLMS Adaptif Filtre	25
5.10 Sağlam Rotor %25 Yükleme Hilbert Zarf Analizi	25
5.11 Sağlam Rotor %50 Yükleme Fourier Dönüşümü	26
5.12 Sağlam Rotor %50 Yükleme NLMS Adaptif Filtre	26
5.13 Sağlam Rotor %50 Yükleme Hilbert Zarf Analizi	26
5.14 Sağlam Rotor %75 Yükleme Fourier Dönüşümü	27
5.15 Sağlam Rotor %75 Yükleme NLMS Adaptif Filtre	27
5.16 Sağlam Rotor %75 Yükleme Hilbert Zarf Analizi	27
5.17 Sağlam Rotor %100 Yükleme Fourier Dönüşümü	28
5.18 Sağlam Rotor %100 Yükleme NLMS Adaptif Filtre	28
5.19 Sağlam Rotor %100 Yükleme Hilbert Zarf Analizi	28
5.20 Sağlam Rotor %125 Yükleme Fourier Dönüşümü	29
5.21 Sağlam Rotor %125 Yükleme NLMS Adaptif Filtre	29
5.22 Sağlam Rotor %125 Yükleme Hilbert Zarf Analizi	29
5.23 Sağlam Rotor %150 Yükleme Fourier Dönüşümü	30
5.24 Sağlam Rotor %150 Yükleme NLMS Adaptif Filtre	30

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.25 Sağlam Rotor %150 Yükleme Hilbert Zarf Analizi	30
5.26 3 Kırıklı Rotor %25 Yükleme Fourier Dönüşümü	31
5.27 3 Kırıklı Rotor %25 Yükleme NLMS Adaptif Filtre.....	31
5.28 3 Kırıklı Rotor %25 Yükleme Hilbert Zarf Analizi.....	31
5.29 3 Kırıklı Rotor %50 Yükleme Fourier Dönüşümü	32
5.30 3 Kırıklı Rotor %50 Yükleme NLMS Adaptif Filtre.....	32
5.31 3 Kırıklı Rotor %50 Yükleme Hilbert Zarf Analizi.....	32
5.32 3 Kırıklı Rotor %75 Yükleme Fourier Dönüşümü	33
5.33 3 Kırıklı Rotor %75 Yükleme NLMS Adaptif Filtre.....	33
5.34 3 Kırıklı Rotor %75 Yükleme Hilbert Zarf Analizi.....	33
5.35 3 Kırıklı Rotor %100 Yükleme Fourier Dönüşümü	34
5.36 3 Kırıklı Rotor %100 Yükleme NLMS Adaptif Filtre.....	34
5.37 3 Kırıklı Rotor %100 Yükleme Hilbert Zarf Analizi.....	34
5.38 3 Kırıklı Rotor %125 Yükleme Fourier Dönüşümü	35
5.39 3 Kırıklı Rotor %125 Yükleme NLMS Adaptif Filtre.....	35
5.40 3 Kırıklı Rotor %125 Yükleme Hilbert Zarf Analizi.....	35
5.41 3 Kırıklı Rotor %150 Yükleme Fourier Dönüşümü	36
5.42 3 Kırıklı Rotor %150 Yükleme NLMS Adaptif Filtre.....	36
5.43 3 Kırıklı Rotor %150 Yükleme Hilbert Zarf Analizi.....	36
5.44 5 Kırıklı Rotor %25 Yükleme Fourier Dönüşümü	37
5.45 5 Kırıklı Rotor %25 Yükleme NLMS Adaptif Filtre.....	37
5.46 5 Kırıklı Rotor %25 Yükleme Hilbert Zarf Analizi.....	37
5.47 5 Kırıklı Rotor %50 Yükleme Fourier Dönüşümü	38
5.48 5 Kırıklı Rotor %50 Yükleme NLMS Adaptif Filtre.....	38
5.49 5 Kırıklı Rotor %50 Yükleme Hilbert Zarf Analizi.....	38
5.50 5 Kırıklı Rotor %75 Yükleme Fourier Dönüşümü	39
5.51 5 Kırıklı Rotor %75 Yükleme NLMS Adaptif Filtre.....	39
5.52 5 Kırıklı Rotor %75 Yükleme Hilbert Zarf Analizi.....	39
5.53 5 Kırıklı Rotor %100 Yükleme Fourier Dönüşümü	40
5.54 5 Kırıklı Rotor %100 Yükleme NLMS Adaptif Filtre.....	40
5.55 5 Kırıklı Rotor %100 Yükleme Hilbert Zarf Analizi.....	40

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.56 5 Kırıklı Rotor %125 Yükleme Fourier Dönüşümü	41
5.57 5 Kırıklı Rotor %125 Yükleme NLMS Adaptif Filtre.....	41
5.58 5 Kırıklı Rotor %125 Yükleme Hilbert Zarf Analizi.....	41
5.59 5 Kırıklı Rotor %150 Yükleme Fourier Dönüşümü	42
5.60 5 Kırıklı Rotor %150 Yükleme NLMS Adaptif Filtre.....	42
5.61 5 Kırıklı Rotor %150 Yükleme Hilbert Zarf Analizi.....	42

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Asenkron Motor Arızaları.....	8
5.1 Yük Kademesine Göre Çekilen Akım Değerleri.....	15
5.2 Zarf Analizi ve Hilbert Dönüşümü.....	21
5.3 Sağlam Rotor %25 Yükleme	25
5.4 Sağlam Rotor %50 Yükleme	26
5.5 Sağlam Rotor %75 Yükleme	27
5.6 Sağlam Rotor %100 Yükleme.....	28
5.7 Sağlam Rotor %125 Yükleme.....	29
5.8 Sağlam Rotor %150 Yükleme.....	30
5.9 3 Kırıklı Rotor %25 Yükleme.....	31
5.10 3 Kırıklı Rotor %50 Yükleme.....	32
5.11 3 Kırıklı Rotor %75 Yükleme	33
5.12 3 Kırıklı Rotor %100 Yükleme	34
5.13 3 Kırıklı Rotor %125 Yükleme	35
5.14 3 Kırıklı Rotor %150 Yükleme	36
5.15 5 Kırıklı Rotor %25 Yükleme.....	37
5.16 5 Kırıklı Rotor %50 Yükleme.....	38
5.17 5 Kırıklı Rotor %75 Yükleme.....	39
5.18 5 Kırıklı Rotor %100 Yükleme	40
5.19 5 Kırıklı Rotor %125 Yükleme	41
5.20 5 Kırıklı Rotor %150 Yükleme	42
6.1 Sonuçların Genel Değerlendirmesi	43

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
NLMS	Normalized Least Mean Squares
US	United States
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineering
IAS	Industry Applications Society
EPRI	Electric Power Research Institute
FFT	Fast Fourier Transform
STFT	Short Time Fourier Transform
Hz	Hertz
MCSA	Motor Current Signature Analysis
d/dk	Devir/Dakika
kW	Kilowatt
A	Amper
sn	Saniye
MHz	Megahertz
NI	National Instruments
DAQ	Data Acquisition
PCI	Peripheral Component Interconnect
DFT	Discrete Fourier Transform
LMS	Least Mean Squares
RLS	Recursive Least Squares
FIR	Finite Impulse Response
t	Zaman Tanım Aralığı
f	Frekans Tanım Aralığı
Δf_b	Temel Frekans ile Yan Bant Frekansları Arasındaki Frekans Fark Değeri
$A(f_s)$	Temel Bileşen (50 Hz) Genliği
$A(f_{sb})$	Yan Bant Frekansları Harmonik Genliği
$A(\text{Harmonik}_1)$	1. Harmonik Genliği

1. GİRİŞ

Asenkron motorlar icatlarının üzerinden 100 yılı aşkın bir süre geçmesine rağmen endüstriyel süreçlerde elektrik enerjisinin mekanik enerjiye çevrilmesi konusunda önemli bir misyonu yerine getirmektedirler. Asenkron motorlar bakımlarının kolay, fiyatlarının ucuz, yapılarının basit ve sağlam olmasından dolayı endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Asenkron motorların yaygın kullanımından dolayı bu motorların sağlıklı bir şekilde çalışması, enerjinin verimli kullanılması ve endüstriyel üretim süreçlerinin sekteye uğramaması açısından büyük önem arz etmektedir. Asenkron motorların bu önemine binaen oluşabilecek muhtemel arıza durumlarının önceden tespitine yönelik motor izleme ve arıza tespit yöntemleri önemli bir konu haline gelmiştir. Asenkron motor arızaları genel olarak elektriksel ve mekaniksel arızalar olmak üzere iki ana kategoride toplanabilir. Elektriksel arızalar stator ve rotor arızaları, mekaniksel arızalar ise rulman arızaları ve eksen bozukluğu arızaları alt başlıkları altında incelenmektedir. Bu tezin konusunu da asenkron motor arızalarının yaklaşık %10'unu oluşturan kırık rotor çubuğu arızaları oluşturmaktadır. Tez çalışmasında sırasıyla sağlam rotor, üç kırıklı rotor ve beş kırıklı rotor kullanılan bir asenkron motor bir senkron generatör ile yüklenmektedir. Generatör çıkışına da kademeli rezistif bir yük bağlanarak değişik kademelerde (%25, %50, %75, %100, %125 ve %150) yükleme yapılmaktadır. Akım ölçüm işlemi, şönt dirençler üzerinden akan akımların bir veri toplama kartı yardımıyla toplanmasıyla yapılmıştır. Veri toplama kartı ölçülen analog verileri sayısal verilere dönüştürmek amacıyla da kullanılmıştır. Toplanan bu sayısal veriler daha sonra MATLAB ortamında geliştirilen sinyal işleme yöntemleri yardımıyla incelenmiştir.

Tezin ikinci bölümünde üç fazlı asenkron motorların kısaca tarihçesi, endüstriyel uygulamalardaki önemi ve kullanım alanları, üç fazlı asenkron motorlarda döner manyetik alan oluşumu açıklanacaktır.

Üçüncü bölümde üç fazlı asenkron motorlarda meydana gelen elektriksel ve mekaniksel arıza çeşitleri açıklanacak bugüne kadar yapılan literatür çalışmaları hakkında bilgi verilecektir.

Dördüncü bölümde üç fazlı asenkron motorlarda karşılaşılan kırık rotor çubuğu arızaları hakkında bilgi verilecek ve bu arızaların tespitinde önemli bir yer tutan motor akım imza analizi üzerinde durulacaktır.

Beşinci bölümde kırık rotor çubuğu arızalarının tespitine yönelik yapılan çalışma adım adım anlatılacak ve açıklanacaktır. Ölçüm ve kayıt işlemi tamamlanmış olan veriler ilk önce arıza dışındaki çevresel etmenlerden kaynaklanan gürültü sinyallerinden NLMS filtre

yardımıyla ayıklanacak ardından da elde edilen sinyal Hilbert Zarf Analizi tekniğiyle analiz edilecektir.

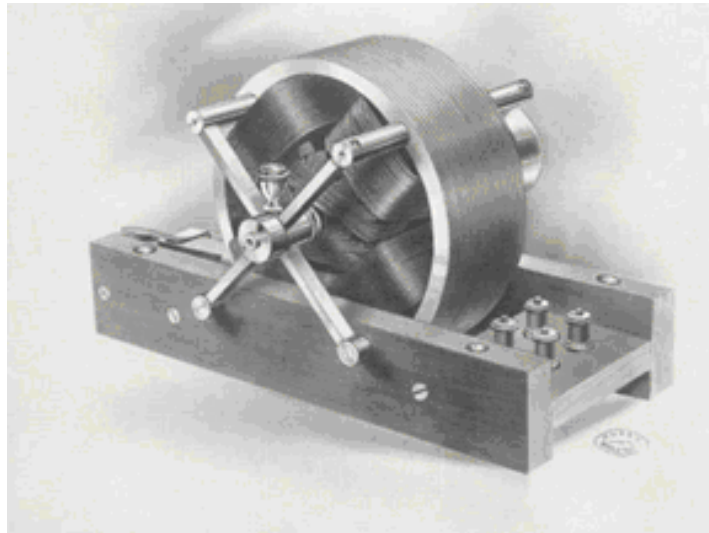
Altıncı bölümde deney sonuçları analiz edilecektir. Bunun için ilk değerlendirme klasik yöntem olan Fourier Dönüşümü sonucu elde edilen yan bant frekanslarının Hilbert Zarf Analizi sonucu elde edilen harmonik frekansı ile örtüşüp örtüşmediği sınanacaktır.

Tez çalışması, deney sonuçlarının tartışılacağı yedinci bölüm ile bitmektedir. Bu bölümde çalışmanın genel bir değerlendirmesi yapılacak ve gelecekteki çalışmalar için ne şekilde geliştirilebileceği konusunda sunulabilecek öneriler belirtilmektedir.

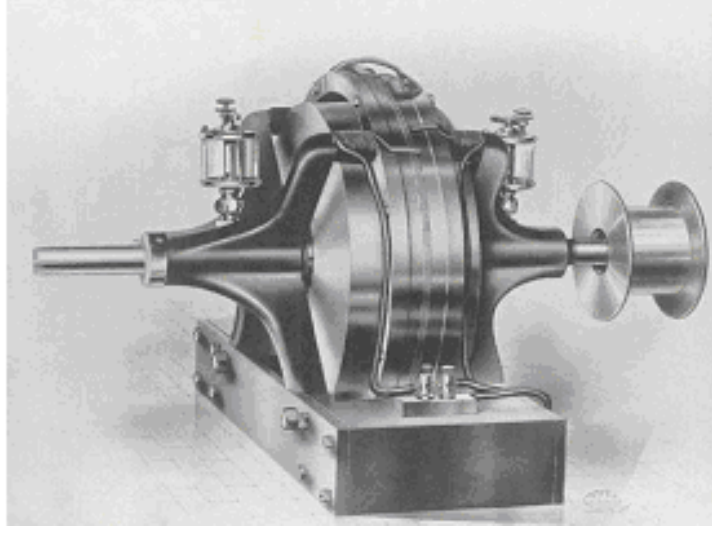
2. ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTORLAR

2.1. Asenkron Motorların Tarihçesi

Asenkron motorların tarihi, 1824 yılında döner manyetik alan fikrini teorik olarak geliştiren François Arago'ya kadar dayanmaktadır. Bu fikir daha sonra Walter Baily tarafından uygulanmıştır. Baily, alternatif akım motorunun atası sayılan bakır bir disk yapmıştır. Bu disk, her ne kadar dönen herhangi bir yük için uygun olmasa da akım kullanılarak geliştirilen ilk sistemdir. Galileo Ferraris ve Nikole Tesla, birbirinden habersiz döner manyetik alan fikrine dayanan indüksiyon motorlarını icat etmişlerdir. Tesla, 1883 yılında indüksiyon motorunu icat ettiğini 1915 yılında yayınladığı otobiyografisinde anlatmıştır. Ferraris, Tesla'nın tasarladığı indüksiyon motorunu 1885 yılında başladığı çalışmalarla daha da geliştirmiştir. Ferraris'in bu araştırmalarının sonucunda indüksiyon motorunun çalışma prensiplerini ortaya koyduğu çalışmaları 1888 yılında Turin Royal Academy of Sciences'ta yayınlandı. Aynı yıl içerisinde Tesla da geliştirdiği indüksiyon motoru için US (United State) 381968 Patentini aldı. Mikhail Dolivo Dobrovolsky 1889 yılında ilk sincap kafesli indüksiyon motorunu icat etmiştir. Tesla tarafından geliştirilen indüksiyon motoru ve alternatif akım generatörüne ait resimler sırasıyla şekil 2.1 ve şekil 2.2'de görülmektedir (<http://www.elektrikport.com>).



Şekil 2.1 Tesla'nın 1888 Yılında Geliştirdiği İndüksiyon Motorlarından Birisi



Şekil 2.2 1891 Yılında Geliştirilmiş Alternatif Akım Generatörü

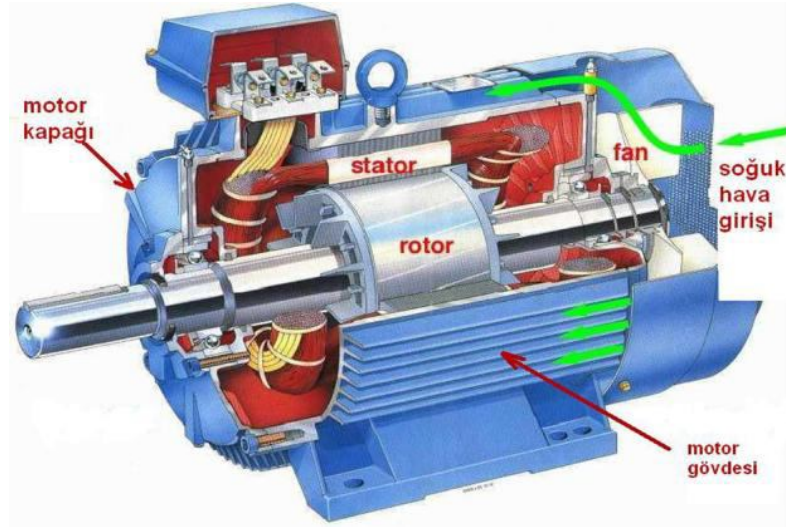
2.2. Asenkron Motorların Kullanımı

Asenkron motor, motor sargılarına verilen alternatif akımın oluşturduğu döner manyetik alanın dönme hızı ile rotor dönme hızı aynı olmayan motorlara denir. Bu motorlar indüklemeye prensibine göre çalıştıkları için aynı zamanda indüksiyon motoru olarak da anılmaktadır. İcatlarının üzerinden 100 yılı aşkın süre geçmesine rağmen, asenkron motorlar bakımlarının kolay, fiyatlarının ucuz, yapılarının basit ve sağlam, tam yükteki verimlerinin yüksek olması, çalışmaları sırasında ark oluşturmamaları, çeşitli fazlarda üretilibilmeleri gibi nedenlerden dolayı endüstriyel alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır (Çakır vd., 2009; Agbachi, et al., 2012; Arabacı and Bilgin, 2011; Taştan, 2006).

Endüstride kullanılan motorların yaklaşık olarak %80'i asenkron motorlardır. Yaklaşık 30 yıllık bir ömre sahip olan asenkron motorların beklenmedik şekilde arızalanmaları, üretimin aksamasına ve giderek artan tamir masraflarına neden olacağından dolayı asenkron motorların takibinin yapılması ve arızalarının önceden tespit edilmesi oldukça önem kazanan bir konu olmuştur (Aydın, 2009; Thomson and Gilmore, 2003).

2.3. Asenkron Motorların Yapısı ve Çeşitleri

Asenkron motorlar stator, rotor, gövde, yataklar, kapaklar ve fan olmak üzere toplam 6 adet fiziksel parçadan oluşmaktadır. Bir asenkron motorun fiziksel parçaları şekil 2.3'te (<http://www.elektrikport.com>) görülmektedir.



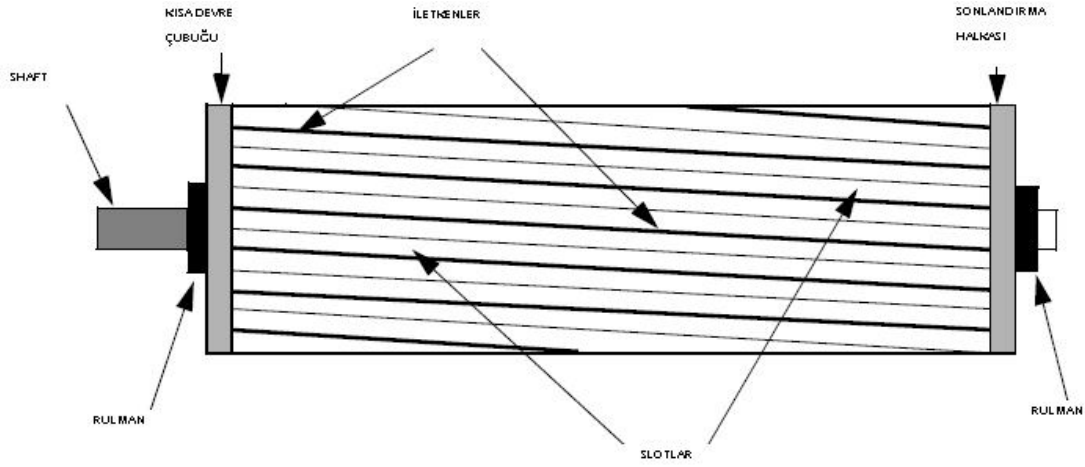
Şekil 2.3 Bir Asenkron Motorun Kesit Görüntüsü

Asenkron motorlar yapılarına göre bilezikli asenkron motorlar ve sincap kafesli asenkron motorlar olmak üzere iki kategoriye ayrılırlar.

Bilezikli asenkron motorlar, üç fazlı değişik hızlı motorlara ihtiyaç duyulan yerlerde tercih edilen motor tipidir. Kalkınma momentlerinin yüksek olmasından dolayı bilezikli asenkron motorlar yük altında çalışan vinç, asansör gibi sistemlerde kullanılmaktadır. Bir sonraki bölümde endüstride kullanılan asenkron motorların büyük çoğunluğunu oluşturan sincap kafesli asenkron motorlar açıklanacaktır.

2.4. Sincap Kafesli Asenkron Motorlar

Sincap kafesli asenkron motorların rotor çubuğu ve kısa devre kafes sargıları farklı yöntemlerle elde edilmektedir. Bu asenkron motorların kısa devre kafes sargıları pres dökümle elde edilir. Kısa devre rotor çubuğu ise silisyumlu saçların kalıpla preste kesilerek paket edildikten sonra rotor kanalları içine alüminyum eritilerek dökülmesiyle elde edilir. Rotor çubukları küçük güçlü asenkron motorlarda alüminyumdan, büyük güçlü asenkron motorlarda ise bakırdan yapılır. Rotorun her iki tarafına yerleştirilen alüminyum halkalar rotor çubuklarını kısa devre eder. Bu çalışma prensibinden dolayı bu tip rotora kısa devreli rotor denir. Şekil 2.4'te (Küllaç, 2011) kısa devre çubuklu bir rotorun resmi görülmektedir.



Şekil 2.4 Kısa Devre Çubuklu Rotor

2.5. Asenkron Motorların Çalışma Prensibi

Asenkron motorlar indüksiyon prensibine göre çalışan motorlardır. Bunun yanında asenkron motorun rotorunun dönebilmesi için stator sargılarında döner manyetik alan oluşması ve rotor iletkenlerinden bir akım geçmesi gerekmektedir. Asenkron motorlarda stator ile rotor arasında elektriksel bir bağlantı yoktur. Stator sargılarında döner manyetik alan oluşması için aralarında faz farkı bulunan en az iki akımın sargılardan geçmesi gerekmektedir. Bu gereklilikten dolayı asenkron motorların sargıları, aralarında 120° faz farkı olacak şekilde yerleştirilir ve böylelikle gerekli olan döner manyetik alan elde edilmiş olur. Döner manyetik alanın oluşumu şekil 2.6'da (Ece vd., 2012) görülmektedir. Bu manyetik alan rotor iletkenlerini kestiğinde, iletkenlerde gerilim indüklemesi meydana gelir. Yapısal olarak rotor sargılarının uçları kısa devre edildiğinden, bu sargılarda kısa devre akımı oluşur. Bu akım da rotorlardaki N-S kutuplarını oluşturur. Statordaki kutuplar ile rotorda meydana gelen bu kutuplar etkileşime girerek bir döndürme kuvveti ortaya çıkarırlar. Oluşan bu kuvvet ile rotor, döner alan yönünde dönmeye başlar. Rotor dönme hızının frekansı kaynak frekansı ile aynıdır ancak senkron hız ile rotor hızı arasında bir fark gözlemlenir. Bu farkın azalması için, rotor manyetik akı ile aynı yönde dönmeye çalışır. Teorikte bu böyle olsa da pratikte hiçbir zaman rotor hızı stator alan hızını yakalayamayacaktır. Dolayısıyla rotor, stator alan sargısının hızına göre daha düşük bir hızda dönecektir. Rotor dönme hızı ile stator alan sargılarının arasındaki bu hız farkı “kayma hızı” olarak adlandırılır. Kayma hızı rotor miline bağlanan yükün miktarı ile de orantılıdır.

Motorun senkron hızı, kaynak frekansı ve motor kutup sayısı ile doğru orantılıdır. Kayma hızının etkisinden dolayı rotor dönme hızı senkron hızdan daha düşüktür. Üç fazlı bir

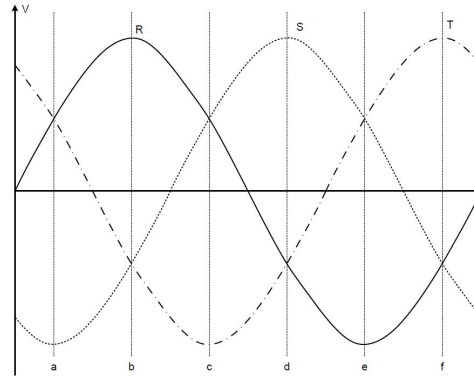
asenkon motorun senkon hızı ve kayma yüzdesi sırasıyla Eşitlik 1 ve Eşitlik 2’de verilen formüllerle hesaplanabilmektedir.

$$n_s = \frac{120 \times f_s}{p} \quad (1)$$

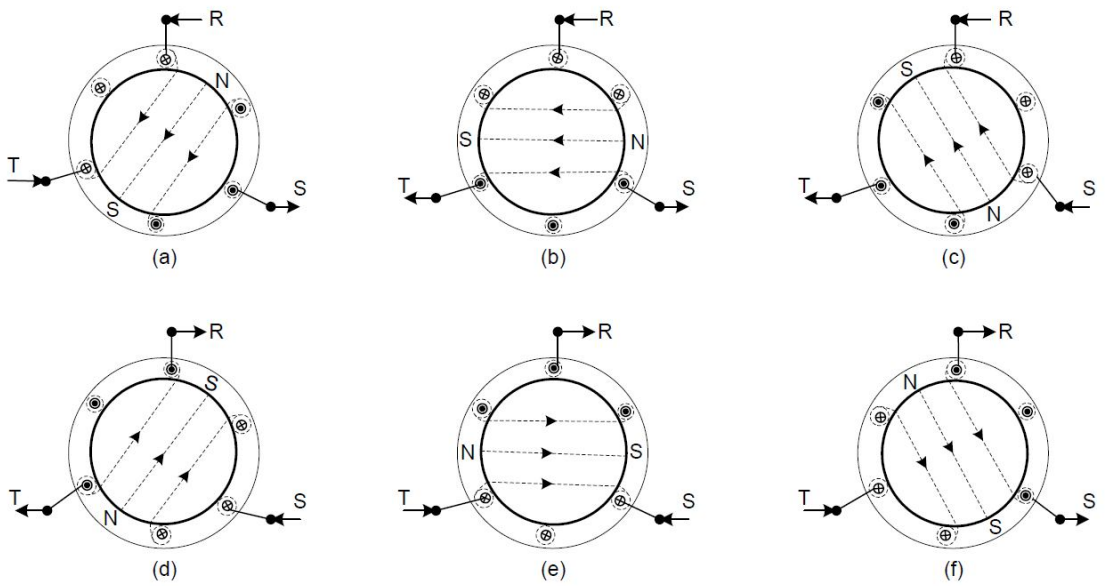
n_s =Senkon Hız f_s =Kaynak Frekansı p =Motor Kutup Sayısı

$$\%s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100 \quad (2)$$

s =Kayma n_s =Senkon Hız n_r =Rotor hızı



Şekil 2.5 120° Faz Farklı Üç Fazlı Gerilim



Şekil 2.6 Döner Manyetik Alan Oluşumu

3. ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTOR ARIZALARI

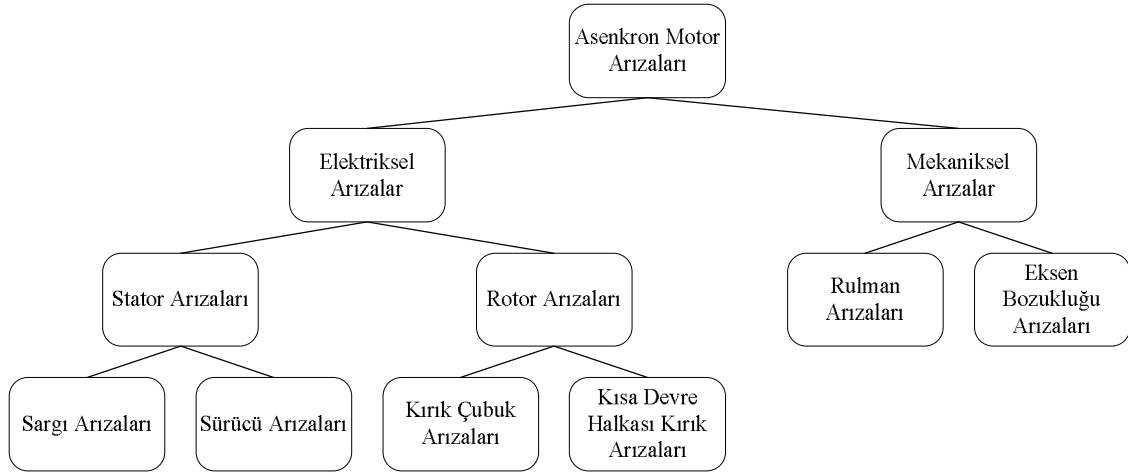
Elektrik motorları kullanılmaya başladığından beri kullanıcılar çeşitli arızalarla karşılaşmışlardır. Önceleri, üreticiler ve kullanıcılar arızalar karşısında detaylı araştırma ve analiz yapmadan aşırı akım koruma, gerilim regülatörü kullanma ve topraklama önlemleri ile arızaların üstesinden gelmeye çalışmışlardır. Asenkron motorların yapısal gelişimine ve kullanım oranına bağlı olarak, asenkron motor üreticileri ve kullanıcıları çok daha farklı arızalarla karşılaşmaya başlamışlardır. Asenkron motor arızaları üzerine bugüne kadar çok farklı çalışmalar yapılmasına rağmen, asenkron motorların farklı alanlarda, farklı çevresel şartlarda ve farklı kurulumlar/montajlamalar altında çalışmalarından dolayı kullanıcılar halen beklenmedik arızalarla karşılaşabilmekte bu durum da araştırmacılara arıza analizi üzerinde değişik çalışmalar yapma ortamı sunmaktadır (Benbouzid, 2000; Bonnett, 1978).

Asenkron motorlarda çeşitli elektriksel ve mekaniksel durumlara bağlı olarak karşılaşılan arızalar IEEE-IAS (Institute of Electrical and Electronics Engineering – Industry Applications Society) ve EPRI (Electric Power Research Institute)’ye göre genellikle 4 ana grupta toplanabilir (Akar vd., 2011). Bu arızaların dağılımları çizelge 3.1’de(Akar vd., 2011) gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Asenkron Motor Arızaları

	IEEE-IAS(%)	EPRI(%)
Rulman Arızaları	44	41
Rotor Arızaları	26	36
Stator Sargı Arızaları	8	9
Diğer Arızalar	22	14

Asenkron motor arızalarının sınıflandırılmış durumu şekil 3.1’de (Akar vd., 2011) görülmektedir.



Şekil 3.1 Asenkron Motor Arızaları

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda arıza tespit ve durum izleme yöntemleri üzerine farklı çalışmalar yapılmıştır. Asenkron motor arızalarının tespit ve teşhisinde genel olarak izlenebilir moment, hız, titreşim, akım, gerilim vb. gibi bir veya birkaç verinin takibini yapacak modeller üzerinde durulmaktadır (Lorand, et al., 2004). Asenkron motorlarda karşılaşılan arıza durumlarına yönelik tespit ve teşhis araştırmacılar tarafından 1980’li yıllardan itibaren önemli bir çalışma haline gelmiştir.

3.1. Literatür Taraması

Penman, Dey, Tait & Bryan, elektrik motorları üzerindeki durum izleme çalışmalarına örnek teşkil edebilecek ilk çalışmayı 1986 yılında yapmışlardır. Yayınladıkları makalede çeşitli arıza durumları için stator akım verilerini frekans tanım aralığında incelemişlerdir (Penman, et al., 1986).

Clark, McShane & Wakeley, 1987 yılında yaptıkları çalışmada asenkron motorlarda karşılaşılan başlıca arızaları, motorun çeşitli parçalarının tasarım yapılarının yeniden dizayn edilmesiyle aşmaya çalışmışlardır (Clark, et al., 1987).

Kliman, Koegl, Stein, Endicott & Madden, 1988 yılında yaptıkları çalışmada asenkron motorlardaki tek kırıklı rotor çubuğunu tam yük altında tespit edebilen bilgisayar tabanlı bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntemde giriş verisi olarak stator akımı kullanılmıştır (Kliman, et al., 1988).

Elkasabgy, Eastham & Dawson, 1992 yılında, üç fazlı sincap kafesli 30 BG, 4 kutuplu bir asenkron motorda endüklenen gerilim sinyalinin analiz ederek kırık rotor çubuğu arızası tespitine yönelik çalışma yapmışlardır (Elkasabgy, et al., 1992).

Haji & Toliyat 2002 yılında yaptıkları çalışmada, park vektör dönüşümü ve motor akım imza analizi algoritmalarını birlikte kullanarak kırık rotor çubuğu ve eksantriklik arızalarını tespit etmek için kullanmışlardır (Haji and Toliyat, 2002).

Ayhan, Chow & Song, 2005 yılında yaptıkları çalışmada kırık rotor çubuğu arızalarını tespiti için motor akım imza analizi ve diskriminant analizini içeren bir yöntem kullanmışlardır. Geliştirilen yöntem dört farklı yük senaryosu altında denenmiştir (Ayhan, et al., 2005).

Aydın, Akın & Karaköse, 2008 yılında yaptıkları çalışmada zaman serisi veri madenciliği ve destek vektör makinaları kullanan bir yöntemi farklı çalışma koşullarında ortaya çıkan kırık rotor çubuğu arızalarının tespiti için geliştirmişlerdir. Geliştirilen yöntemde sağlam ve arızalı asenkron motor verileri veri madenciliği yöntemiyle işlenerek faz uzayları elde edilmiş ve destek vektör makinaları yardımıyla da sınıflandırılmıştır (Aydın vd., 2008).

Kowalski & Kanior, 2008 yılında yaptıkları çalışmada kırık rotor çubuğu arızasının tespiti için stator akım verilerini zaman tanım aralığında kaydederek, bu verileri FFT(Hızlı Fourier Dönüşümü), STFT (Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü) ve Dalgacık Dönüşümü gibi metodlarla frekans tanım aralığında analiz etmişlerdir (Kowalski and Kanior, 2008).

Mahamad & Hiyama, 2009 yılında yaptıkları çalışmada rulman arızalarının tespiti için titreşim verilerini kullanmışlardır. Titreşim verilerini zaman tanım aralığında kaydederek, FFT yardımıyla verilerin frekans tanım aralığında analizini yapmışlardır. Bu çalışmada yüksek frekanslı bileşenleri elimine etmek için zarf analizi yöntemi de kullanılmıştır (Mahamad and Hiyama, 2009).

Qin & Liu, 2011 yılında yaptıkları çalışmada asenkron motorlarda karşılaşılan arıza tiplerinden birisi olan kırık rotor çubuğu problemlerinin çözümü için stator akım verilerini bant-geçiren filtre ve Hilbert Zarf Dönüşümü tekniğini kullanarak analiz etmişlerdir (Qin and Liu, 2011).

Li, Zhou, Zhao & Chen, 2012 yılında yaptıkları çalışmada asenkron motorlarda karşılaşılan mekanik arıza tiplerinden birisi olan rulman arızalarını Hilbert Zarf Dönüşümü yöntemiyle tespit etmişlerdir (Li, et al., 2012).

4. ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTORLARDA KIRIK ROTOR ÇUBUĞU ARIZASI

Asenkron motor arızalarının yaklaşık olarak %10'unu oluşturan kırık rotor çubuğu arızası, asenkron motorlarda önemli problemlere neden olan motor arızalarından bir tanesidir (Arabacı and Bilgin, 2011). Kırık rotor çubuğu problemleri, motor kalkınma anında düşük performansa, moment dengesizliklerine, ısınma veya titreşim sorunlarına yol açmaktadır (Didier, et al., 2006).

3 fazlı simetrik stator sargıları 50 Hz'lik simetrik bir kaynaktan beslenirse, senkron hızda ileri yönde dönen bir manyetik alan üretir ve bu simetri sağlandığı sürece de geri yönde herhangi bir manyetik alan üretilmez. Rotordan akan akım üç fazlı bir manyetik alan meydana getirerek rotorun dönmesini sağlar ancak bu dönme hızı kaymaya bağlı olarak gelişir. Rotor çubuklarında ortaya çıkan kırık arızası rotorun dönme simetrisini bozarak, ileri yönlü oluşan manyetik dönme alanına bağlı olarak geri yönlü bir manyetik dönme alanı oluşturur. Bu durum da stator akımı üzerinde temel bileşen frekansının sağında ve solunda yan bant frekanslarının oluşmasına neden olur (Mehala and Dahiya, 2007).

Bu frekansları bulmak için Eşitlik 3'teki ifade kullanılmaktadır (Arabacı and Bilgin, 2011; Lorand, et al., 2004; Mehala and Dahiya, 2007; Supangat, et al., 2007; Güran ve Eren, 2012):

$$f_k = f_s (1 \pm 2s) \quad (3)$$

Bu eşitlikte f_k kırık rotor çubuğu frekansını, f_s kaynak(şebeke frekansını) ve s kayma oranını belirtmektedir.

Eşitlik 3'ten de anlaşılacağı üzere kayma oranına bağlı olarak iki adet yan bant frekansı elde edilmektedir. Bu yan bantlardan, düşük frekanslı yan bantın genliği kırık rotor sayısına bağlıyken, yüksek frekanslı yan bantın genliği rotor hızındaki değişimlere bağlıdır (Güran ve Eren, 2012; Wang, et al., 2011).

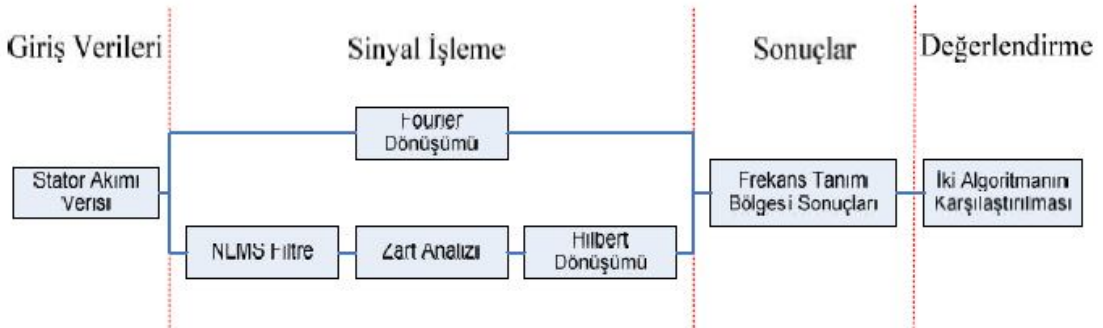
MCSA (Motor Akım İmza Analizi), asenkron motorlarda karşılaşılan kırık rotor çubuğu arızalarının tespitinde kullanılan önemli yöntemlerden bir tanesidir. Motor akım imza analizinde Fourier Dönüşümü kullanılarak stator akım verileri frekans tanım aralığında analiz edilebilir. Elde edilen akım verisi frekans tanım aralığında analiz edilirse arızaların bu frekans tanım aralığında değişikliklere yol açtığı rahatlıkla tespit edilebilmektedir. Bu yöntemin en önemli avantajı tek bir ölçüm cihazının yeterli olmasıdır. Üç fazlı asenkron motorun herhangi bir fazından ölçüm alınabilmektedir. MCSA ile motor arızaları daha başlangıç aşamasındayken

tespit edilerek, arkasından gelebilecek olası büyük arızaların asenkron motora ciddi zarar vermesinin önüne geçilebilir. Bu yöntemin ikinci önemli bir avantajı ise sisteme online olarak uygulanabilmesidir (Lorand, et al., 2004; Penrose, 2004; Kral, et al., 2009; Duyar, 2009).

Bu analiz yönteminde araştırmacıların en temel problemi sağlıklı bir motorun frekans tanım aralığındaki stator akım analizinin arızalı bir rotor çubuğuna sahip motorun frekans tanım aralığındaki akım analizinden farkının net olarak ortaya konması gerekliliğidir. Her ne kadar sağlıklı bir motor denilse de normal çalışma şartlarında çalışan sağlıklı bir motorun stator akım verisi çevresel, mekaniksel veya elektriksel şartlardan kaynaklanan birçok gürültü verisi barındırmaktadır. Dolayısıyla arızalı bir motorun akım verisi ile sağlıklı bir motorun akım verisinin frekans tanım aralığı analizi yapılmadan önce doğru bir sonuç karşılaştırması yapılabilmesi için motorun akım verisi dışındaki verilerden ayıklanması/filtrelenmesi gerekmektedir. Bütün bu sinyal işleme operasyonlarından sonra çeşitli yük varyasyonlarının motorun stator akımı üzerindeki etkilerinin analizi daha sağlıklı olarak yapılabilir (Arabacı and Bilgin, 2011; Benbouzid, 2000).

5. GELİŞTİRİLEN YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, asenkron motorlarda karşılaşılan önemli arıza tiplerinden birisi olan kırık rotor çubuğu probleminin çözümüne yönelik alternatif bir yöntem önerilmiştir. Fourier Dönüşümü her ne kadar bu problemin çözümüne yönelik bir yöntem olarak öne çıksa da içerisinde ciddi eksiklikler barındırmaktadır. Zarf Analizi yönteminin, yapılan literatür araştırmasında özellikle rulman arızalarının yol açtığı titreşim verilerinin analizinde kullanıldığı görülmektedir. Tez çalışmasında genellikle mekaniksel verilerin (rulman gibi) analizinde kullanılan Zarf Analizi yöntemi, elektriksel veri olan stator akımının analizinde kullanılmaktadır. Analizin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi için, deney setinden alınan akım verileri öncelikle NLMS adaptif filtreden geçirilerek, akım sinyalinin üzerine binen gürültünün elimine edilmesi sağlanmaktadır. Gürültü bileşenlerinden ayrılan sinyale daha sonra yüksek genlikli düşük frekanslı sinyal bileşenlerinin elde edilmesi amacıyla Hilbert Zarf Analizi yöntemi uygulanır. Geliştirilen kırık rotor çubuğu tespit yönteminin şematik gösterimi şekil 5.1’de görülmektedir. Şekil 5.1’de yer verilen her bir bloğun açıklaması bir sonraki bölümde yapılacaktır.

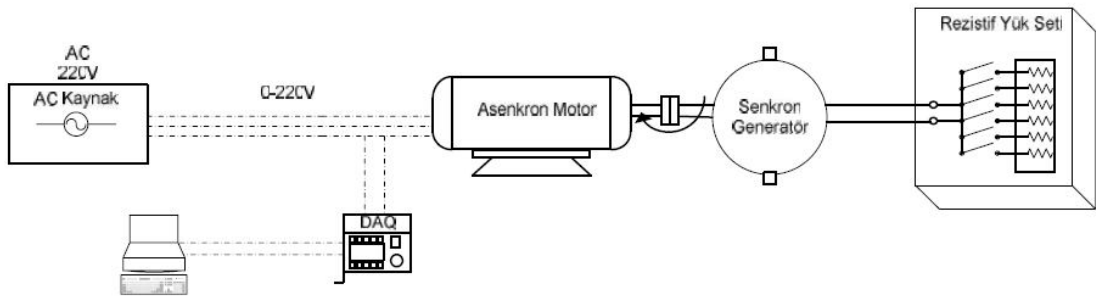


Şekil 5.1 Geliştirilen Yöntemin Şematik Gösterimi

5.1. Stator Akım Verilerinin Ölçülmesi ve Kaydedilmesi

5.1.1. Test düzeneği

Bu çalışmada sırasıyla sağlam rotor, üç kırıklı rotor ve 5 kırıklı rotor çubuğuna sahip bir asenkron motor bir generatör ile yüklenmiştir. Generatör de toplam 6 farklı yük kademesinden oluşan rezistif yük gruplarına bağlanarak, motorun şebekeden çektiği akım sinyalleri kaydedilmiştir. Test düzeneği şekil 5.2’de görülmektedir.



Şekil 5.2 Kurulan Test Düzeneği

Tez çalışmasında şekil 5.3’te etiket değerleri verilen, 3 fazlı, 2 kutuplu, 2840 d/dk dönüş hızına, 2.2 kW güce sahip, güç faktör değeri 0.82 olan sincap kafesli asenkron motor kullanılmıştır.



Şekil 5.3 Asenkron Motor Etiket Değerleri

Asenkron motor, üç fazlı çift yataklı bir senkron generatör ile toplam 6 kademedan oluşan rezistif yük modülüne bağlanmıştır. Motorun yüklenme durumuna göre ölçülen stator akım verileri çizelge 5.1’de görülmektedir.

Çizelge 5.1 Yük Kademesine Göre Çekilen Akım Değerleri

Yük Kademesi	Ölçülen Stator Akımı(A)	Yükleme Durumu
Kademe 1	3.6	%25
Kademe 2	4.1	%50
Kademe 3	4.7	%75
Kademe 4	4.9	%100
Kademe 5	5	%125
Kademe 6	5.4	%150

5.1.2. Verilerin kaydedilmesi

Geliştirilen yöntemin ilk bölümünde üç fazlı asenkron motorun herhangi bir fazından alınan stator akım verileri 20000 örnekleme frekansı ile 40 sn boyunca kaydedilmiştir. Bu işlem için maksimum örnekleme hızı 1.25 MHz olan 16 bit çözünürlüğe sahip NI-6251 (National Instruments) veri toplama (DAQ) kartı, PCI (Çevresel Bileşen Arayüzü) yardımıyla bilgisayara bağlanarak kullanılmıştır.

Elde edilen veriler NI tarafından geliştirilen Labview programı yardımıyla “.mat” dosyası olarak kaydedilmiştir. Toplam 6 adet yük kombinasyonu ve 3 adet farklı rotor arızası durumu için 18 adet farklı veri kaydı gerçekleştirilmiştir. Kaydedilen dosyaların MATLAB programında işlenebilmesi için, dosyaların bu programda işlenebilecek formatta yükleme işlemi yapılmalıdır. Yükleme işlemi dosya boyutunun yüksek olmasından dolayı “load –ascii” komutuyla yapılmıştır.

5.2. Sinyal İşleme Bölümü

Geliştirilen yöntemin ikinci bölümünde MATLAB paket programı kullanılarak Fourier Dönüşümü, NLMS filtre, Zarf Analizi ve Hilbert Dönüşümü yöntemleri geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemler bir sonraki bölümde detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

5.2.1. Fourier Dönüşümü

Bir fonksiyonun farklı frekanslardaki sinüsoidal fonksiyonlarının toplamı biçimindeki açılımına Fourier Dönüşümü denilmektedir (Ayhan, 2008). FFT yöntemi DFT(Ayrık Fourier Dönüşümü) yönteminin daha hızlı çalışan bir formudur. Ayrık Fourier Dönüşümü,

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi nk}{N}} \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (4)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Fourier Dönüşümü, kırık rotor çubuğu arızalarının incelenmesinde en çok başvurulmuş analiz yöntemlerinden bir tanesidir. Bu analiz yöntemiyle yan bant harmoniklerinin genlik ve frekans değerleri hesaplanarak, kırık rotor çubuğu arızaları hakkında tespitlerde bulunmaktadır. Yan bant harmoniklerinin genlik ve frekans değerleri, rotor çubuğundaki kırığın sayısına/derinliğine, motorun yük durumuna ve kaynağın kalitesine (harmonikler yönünden) göre değişkenlik gösterebilmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda görülmüştür ki yan bant frekansları harmonik genliklerinin tespiti Fourier Dönüşümü yöntemiyle, düşük yük durumlarında ve kötü kaynakla beslenen (harmonikler yönünden) sistemlerde sağlıklı bir şekilde yapılamamaktadır. Ayrıca yan bant frekans harmonik genliklerinin temel bileşen (50 Hz) genliğinin maksimum %3'üne karşılık gelmesi yan bant frekans harmoniklerinin tespitini oldukça zorlaştırmaktadır (Deneysel sonuçlarda hesaplaması yapılmıştır). Fourier Dönüşümü'nün bu eksikliklerinden dolayı yeni bir sinyal işleme metoduna ihtiyaç duyulmaktadır.

5.2.2. Adaptif filtre

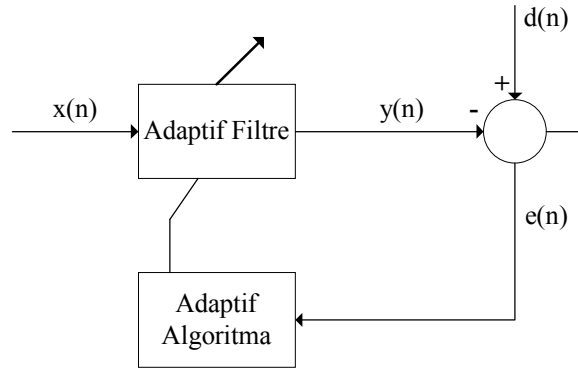
Sayısal sinyal işleme teknikleri günümüz mühendislik uygulamalarında (ses işleme, sistem tanımlama, gürültü filtreleme vb.) yaygın olarak kullanılmaktadır (Drumwright, 1998). Adaptif filtreler sinyalin çıkış karakteristiğini, işaretin ve gürültünün zaman içinde değişen özelliklerine uydurulabilen, esnek yapıya sahip olan filtrelerdir.

Adaptif filtre katsayılarının ayarlanmasında kullanılan yöntemler en küçük kareler tabanlı yöntemler ve eğitim tabanlı yöntemler olmak üzere iki başlık altında toplanabilir. LMS (En Küçük Ortalama Kareler) yöntemi, NLMS yöntemi gibi eğitim tabanlı filtreler düşük işlem yüküne sahip olduklarından dolayı yüksek örnekleme hızına sahiptirler. Bu yöntemler çoğunlukla adaptif sinyal işleme ve haberleşme işlemlerinde kullanılır. RLS (Özyinelemeli En Küçük Kareler) yöntemi en küçük kareler tabanlı yöntemler başlığı altında değerlendirilen bir

yöntemdir. RLS yöntemi yüksek örnekleme hızı gerektirmeyen durumlarda yakınsama özelliğinin eğitim tabanlı yöntemlere göre daha iyi olmasından dolayı tercih edilmektedir (Tiryaki vd., 2008). Tasarlanan filtreyi sonlu darbe cevaplı $[y_n = W^T X(y : R \rightarrow R)]$ bir sistem olarak düşünersek her bir adım için hata sinyalini minimize edecek genel çözüm yaklaşımı Eşitlik 5'teki gibi tanımlanabilir (Önder ve Acır, 2006).

$$e(n) = \text{Min}_w \frac{1}{2} (d_n - y_n)^2 \quad (5)$$

Adaptif filtrenin genel yapısı şekil 5.4. (Tiryaki vd., 2008)'de gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Adaptif Filtre Genel Yapısı

Bu blok diyagramda $x(n)$ adaptif filtrenin ayrık-zamanlı giriş sinyalini, $y(n)$ adaptif filtrenin belirlenen parametreler sonucunda ürettiği çıkış sinyalini, $d(n)$ istenen referans sinyalini, $e(n)$ ise hata sinyalini tanımlamaktadır. Hata sinyali matematiksel olarak adaptif filtrenin takip etmesi için üretilen sinyal ile adaptif filtrenin belirlenen parametreler sonucunda ürettiği çıkış sinyali arasındaki fark alınarak hesaplanır. Parametre ayarlama uygulamalarıyla tasarlanan adaptif filtrede hata sinyalinin karesinin beklenen değerini minimum yapan parametre tahminleri iteratif olarak hesaplanır (Tiryaki vd., 2008).

5.2.2.1. Adaptif LMS

Tasarlanan bir adaptif filtrenin giriş sinyali $x(n)$ ve çıkış sinyali $y(n)$ olsun. Bu sistemin transfer fonksiyonu (Drumwright, 1998),

$$y(n) = w^T(n) x(n) \quad (6)$$

olarak yazılabilir.

Bu eşitlikte,

$$x(n) = [x(n), x(n-1), x(n-2), \dots, x(n-(N-1))]^T \quad (7)$$

ve

$$w(n) = [w_0(n), w_1(n), w_2(n), \dots, w_{N-1}(n)]^T \quad (8)$$

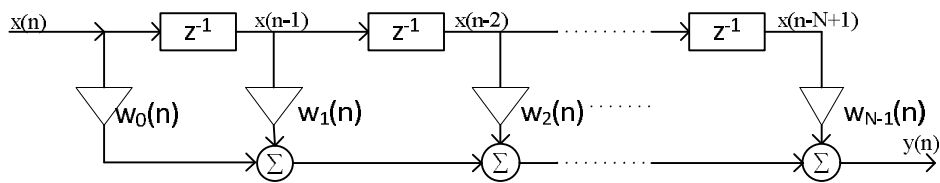
olarak açılımı yapılır.

LMS adaptif filtre, FIR (Sonlu İmpulse Tepkisi) filtrenin (şekil 5.5.) (Douglas, 1999) katsayılarını ayarlamak için kullanılır (Mathews, 2003).

Adaptif LMS yöntemi ağırlık vektörünü hesaplayan

$$w(n+1) = w(n) + \mu e(n)x(n) \quad (9)$$

parametre denklemini kullanmaktadır. Bu denklem her bir iterasyonda hatayı küçültecek şekilde değişmektedir. Bu denklemde $w(n)$ n anındaki parametre vektörünü, $x(n)$ giriş vektörünü, μ filtrenin öğrenme sabitini, $e(n)$ ise hatayı tanımlamaktadır. μ değeri, LMS filtrenin önemli parametrelerinden bir tanesidir. Eğer öğrenme sabiti 1'den küçük ise, $x(n)$ dizisinin n. elemana yakın olan değerlerinin ağırlığı daha öncekilere göre artar. Bu durumda bir önceki çıkış değerleri, yeni değerlerin hesaplanmasında kullanılır. Böylece Eşitlik 9'da verilen parametre denklemi her bir iterasyon için bir önceki hata ve çıkış değerleri kullanılarak hatayı istenilen minimum değere getirene kadar hesaplamaya devam eder.



Şekil 5.5 FIR Filtre Yapısı

5.2.2.2. Adaptif NLMS

NLMS filtre giriş sinyalinin fazla miktarda gürültü barındırdığı ortamlarda gürültü sinyallerinin filtrelenmesi amacıyla kullanılmaktadır (Ilyas, et al., 2008).

NLMS filtre, LMS filtre grubunun içerisinde yer alan özelleşmiş bir filtredir. Bu filtrede LMS yönteminde yer alan çıkış tahminlerindeki hata toplamına ek olarak iterasyonlar arasındaki parametre değişimleri de dikkate alınır. NLMS adaptif filtre yapısal olarak LMS filtre yapısı ile aynıdır. İkisi arasındaki temel fark ağırlık kontrol mekanizmasının hesaplanmasında ortaya çıkmaktadır. NLMS adaptif filtrenin filtre yapısına doğrudan etki eden ağırlık kontrol değişkeni, giriş vektörü ile hata sinyalinin durumuna göre iterasyonlarını filtre kararlı hale ulaşıncaya kadar devam ettirir. NLMS filtrenin çıkış vektörü,

$$y(n) = w^T(n)x(n) \quad (10)$$

eşitliği ile hesaplanır. Bu eşitlikte $w(n)$, n anındaki parametre vektörünü tanımlamaktadır.

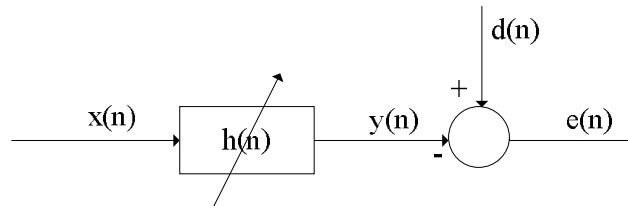
NLMS filtre yöntemine göre bir sonraki parametre vektörü

$$w(n+1) = w(n) + \frac{\tilde{\mu}}{a + \|x(n)\|^2} x(n) e^*(n) \quad (11)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır.

Bu eşitlikte filtrenin öğrenme sabiti $0 \leq \tilde{\mu} \leq 2$ aralığındadır. $\tilde{\mu}$ değeri ise pozitif sabiti göstermektedir (Ilyas, et al., 2008; Peters and Antoniu, 1997)

Bu çalışmada adaptif filtre olarak NLMS filtre kullanılmaktadır. NLMS filtrenin kodları olarak MATLAB ortamında geliştirilmiştir. Geliştirilen filtrede en iyi sonuçların elde edilebilmesi için adaptif filtrenin derecesi 64(M), filtrenin adım aralığı 0.2(m_u), filtrenin offset değeri ise 10^{-6} olarak seçilmiştir.

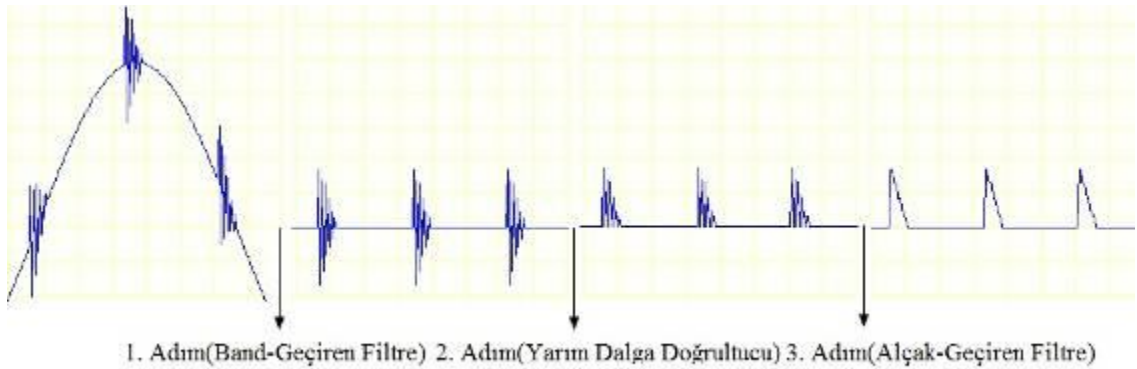


Şekil 5.6 NLMS Filtre Blok Diyagramı

$x(n)$ sinyali deney sisteminden alınıp MATLAB ortamına yüklenen stator akım sinyalini göstermektedir. Bu sinyalin filtrenin tepki cevabı ile konvolüsyonundan $y(n)$ sinyali elde edilmektedir. Bu sinyalin filtreye uygulanan ideal sinyalden $(d(n))$ farkı alınarak hata sinyali $e(n)$ elde edilmektedir.

5.2.3. Zarf Analizi

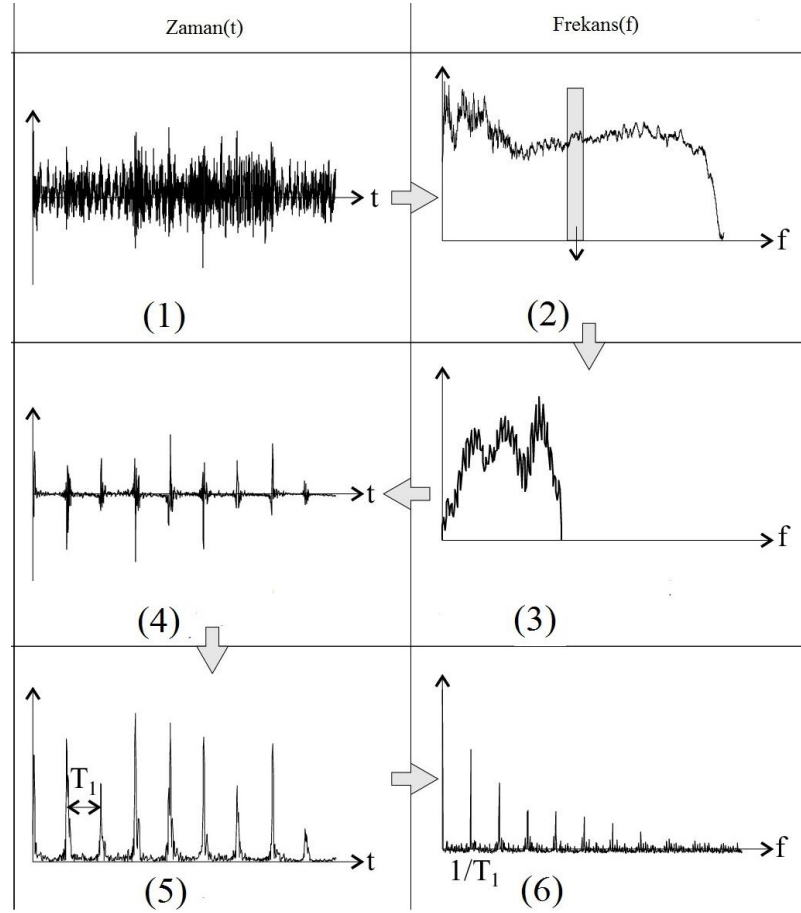
Zarf Analizi, akım sinyallerinin temel bileşen frekansı (50 Hz) civarındaki yüksek frekansları filtreden geçirerek rotor çubuğundaki arızaların sebep olduğu yan bant frekanslarını açığa çıkararak analiz edilmesini sağlar. Zarf Analizi yönteminde, toplanan ham akım verileri t3 adımda işlenmektedir. 1. adımda band-geçiren filtre tasarımı yapılır. Bu filtrenin temel bileşen frekansı, sistemin temel bileşen frekansına yakın bir değerde seçilir. 2. adımda yarım-dalga doğrultucu tasarımı yapılır. Bu doğrultmaç vasıtasıyla Zarf Analizi sırasında çalışılacak olan frekans tanım aralığı üzerindeki sinyalin pozitif değerleri işleme alınır. 3. adımda alçak geçiren filtre tasarımı yapılarak, sinyalin yüksek frekans bileşenleri elimine edilir ve düşük frekanslı rotor çubuğu arızaları frekans tanım aralığında görüntülenir. Zarf Analizi, yüksek frekansları düşük frekanslı sinyallere dönüştürerek, yüksek genlikli düşük frekanslı akım verilerini elde etmeye çalışır ve böylece elde edilen dalga formu frekans tanım aralığı analizine uygun hale gelir (Kaplan vd., 2012). Bu işlemin grafiksel gösterimi şekil 5.7 (<http://www.mobiusinstitute.com>)’de verilmektedir.



Şekil 5.7 Zarf Analizi

Zarf Analizi ve Hilbert Dönüşümü, sinyal analizinin frekans tanım aralığında kullanılabilmesi için birlikte kullanılan sinyal analiz tekniklerinden bir tanesidir. Bu iki tekniğin uygulanma esasları çizelge 5.2 (Randall, 2011)’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.2 Zarf Analizi ve Hilbert Dönüşümü



Çizelge 5.2 de verilen tablo incelendiğinde:

(1) nolu adımda zaman tanım aralığında kaydedilen sinyal görülmektedir. (2) nolu adımda sinyalin frekans tanım aralığındaki hali görülmektedir. (3) numaralı adımda frekans tanım aralığında görüntülenen sinyalin analiz edilmek istenilen bölümü band-geçiren filtre yardımıyla görüntülenir. (4) numaralı adımda seçilen bölgenin band-geçiren filtre analizi tamamlanarak tekrar zaman tanım aralığına geçilir. (5) numaralı adımda zaman tanım aralığındaki sinyale yarım dalga doğrultucu uygulanarak sinyalin sadece pozitif değerlerinin incelenmesi sağlanır (Zarf Analizi). (6) nolu adımda sinyal Hilbert Dönüşümü yardımıyla yeniden frekans tanım aralığında görüntülenir ve sinyalin harmonik analizi düşük frekanslı harmoniklerin incelenmesi ile yapılabilir (Hilbert Zarf Analizi).

5.2.4. Hilbert dönüşümü

1743 yılında İsveçli matematikçi Leonard Euler

$$e^{jz} = \cos(z) + j \sin(z) \quad (12)$$

formülünü bulmuştur.

Bundan yaklaşık 150 yıl sonra Kennely ve Steinmetz, elektrik mühendisliğinde harmonik dalganın matematiksel tarifini,

$$e^{j\omega t} = \cos(\omega t) + j \sin(\omega t) \quad (13)$$

formülü ile yapmışlardır.

20. yüzyılın başlarında Alman bilim adamı Hilbert, daha sonraları kendi ismiyle anılacak olan Hilbert Dönüşümünü, $\cos(\omega t)$ 'nin Hilbert dönüşümünün $\sin(\omega t)$ olduğunu göstererek bulmuştur.

Bir $x(t)$ sinyalinin Hilbert Dönüşümü $\mathbf{x}(t)$ olarak tanımlanır. Bu iki sinyal arasında analitik olarak güçlü bir bağ vardır. Bir sinyalin tam olarak ifade edilebilmesi için sinyalin genlik ve faz bileşenlerinin de matematiksel olarak ifade edilmesi gerekir.

Fourier Dönüşümü bir fonksiyonun genlik ve faz değerlerin bulabilmek için kullanılır. Hilbert Dönüşümü genlik ve faz değerlerinin reel ve sanal kısımları arasında ilişki kurmak için kullanılır.

$x(t)$ fonksiyonunun Hilbert Dönüşümü (Kschischang, 2006),

$$\mathbf{x}(t) = H[x(t)] = \frac{1}{\pi t} * x(t) \quad (14)$$

konvolüsyonu ile hesaplanabilir. Eşitlikten de anlaşılacağı üzere Hilbert Dönüşümü bir filtreleme işlemidir.

Hilbert Dönüşümü'nün transfer fonksiyonu,

$$H_h(f) = -j \operatorname{sgn}(f) = \begin{cases} +j, & f > 0 \\ -j, & f < 0 \end{cases} \quad (15)$$

olarak bulunur.

Bu fonksiyonun darbe cevabı,

$$h_H(n) = \begin{cases} 0, & n = 0 \\ \frac{2 \sin^2\left(\frac{\pi n}{2}\right)}{\pi n}, & n \neq 0 \end{cases} \quad (16)$$

olarak hesaplanır.

Hilbert dönüşümü, sonsuz uzunluktaki sinyallere uygulanırsa dönüşüm geniş bir frekans cevabına sahip olacaktır. Ancak uygulamalarda sınırlı sayıda katsayı kullanıldığı için Hilbert Dönüşümü'nün frekans cevabı bir tür band-geçiren filtre gibi davranacaktır (Serbes, 2009).

Eşitlik 15'teki ifade dikkate alındığında Hilbert Dönüşümü'nün aslında bir tür filtre olduğu görülür. Bu dönüşüm yardımıyla bir sinyalin genlik değeri değişmeden bütün bileşenlerin fazları f 'nin işaretine bağlı olarak $\pm \frac{\pi}{2}$ kadar değişir (Pınar ve Akçığ, 1995).

Bu çalışmada Hilbert Dönüşümü, Zarf Analizi yöntemiyle birlikte kullanılmaktadır. Zarf Analizi yöntemi kullanılarak yüksek frekanslı sinyal bileşenlerinin düşük frekanslı sinyal bileşenlerine dönüştürüldüğünden bahsedilmiştir. Sinyalin analizinin, frekans tanım aralığında tamamlanabilmesi için MATLAB ortamında geliştirilen Hilbert Dönüşümü tekniği uygulanır.

5.3. Sonuçların Karşılaştırılması

MATLAB ortamında gerçekleştirilen Fourier Dönüşümü ve Hilbert Zarf Analizi yöntemlerinin sonuçları bu bölümde elde edilir. İlk olarak Fourier Dönüşümü yardımıyla yan bant frekansları tespit edilir ve temel bileşen frekansı ile yan bant frekansları arasındaki değer hesaplanır. Daha sonra bu çalışmada Fourier Dönüşümü'nün yerine önerilen yöntem kullanılarak sinyalin frekans tanım aralığındaki harmonik frekansı tespit edilir.

5.4. Sonuçların Değerlendirilmesi

Geliştirilen yöntemin son bölümünde elde edilen grafiksel sonuçlar değerlendirilecektir. Bu deney düzeneğinde sağlam rotor, 3 kırıklı rotor ve 5 kırıklı rotor sırasıyla %25, %50, %75, %100, %125 ve %150'lik yük kademeleriyle yüklenerek hem Fourier Dönüşümü sonuçları hem de Hilbert Zarf Analizi sonuçları elde edilmiştir.

Sonuçlar her bir senaryonun altında tablo yapılarak değerlendirilmiştir. Tabloda, Fourier Dönüşümü sonucu elde edilen taşıyıcı bileşen frekansı ile yan bant frekansları arasındaki fark (Δf_b) ile Hilbert Zarf Analizi sonucu elde edilen harmonik frekansı gösterilmiştir. Yine aynı tabloda, Fourier Dönüşümü sonucu elde edilen yan bant frekansları harmonik genliğinin temel

bileşen genliğinin yüzde kaçına denk geldiği ile Hilbert Zarf Analizi sonucunda elde edilen 1.harmonik değerinin temel bileşen (50 Hz) genlik değerinin yüzde kaçına denk geldiği gösterilmiştir.

Her bir durum için toplam 3 adet grafik elde edilmiştir. Örneğin şekil 5.8 sağlam motorun Fourier Dönüşümü analiz sonucunu, şekil 5.9 NLMS adaptif filtre sonucu elimine edilen hata sinyali, şekil 5.10 Hilbert Zarf Analizi sonucu elde edilen sinyalin hem zaman tanım aralığındaki hem de frekans tanım aralığındaki sonuçlarını göstermektedir. Diğer senaryolardaki şekilsel sıralamalar da aynı gösterimle yapılmıştır.

Motorun sırasıyla sağlam, 3 kırıklı ve 5 kırıklı rotor olmak üzere %25 yüklendiği durumlarda elde edilen sonuçlar şekil 5.8-5.9-5.10, 5.26-5.27-5.28 ve 5.44-5.45-5.46'de verilmiştir. Bu yükleme sonucunda elde edilen sonuçlar sırasıyla çizelge 5.3-5.9-5.15'te gösterilmiştir.

Motorun sırasıyla sağlam, 3 kırıklı ve 5 kırıklı rotor olmak üzere %50 yüklendiği durumlarda elde edilen sonuçlar şekil 5.11-5.12-5.13, 5.29-5.30-5.31 ve 5.47-5.48-5.49'da verilmiştir. Bu yükleme sonucunda elde edilen sonuçlar sırasıyla çizelge 5.4-5.10-5.16'da gösterilmiştir.

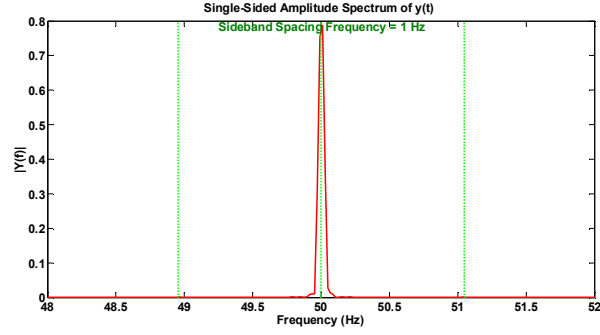
Motorun sırasıyla sağlam, 3 kırıklı ve 5 kırıklı rotor olmak üzere %75 yüklendiği durumlarda elde edilen sonuçlar şekil 5.14-5.15-5.16, 5.32-5.33-5.34 ve 5.50-5.51-5.52'de verilmiştir. Bu yükleme sonucunda elde edilen sonuçlar sırasıyla çizelge 5.5-5.11-5.17'de gösterilmiştir.

Motorun sırasıyla sağlam, 3 kırıklı ve 5 kırıklı rotor olmak üzere %100 yüklendiği durumlarda elde edilen sonuçlar şekil 5.17-5.18-5.19, 5.35-5.36-5.37 ve 5.53-5.54-5.55'de verilmiştir. Bu yükleme sonucunda elde edilen sonuçlar sırasıyla çizelge 5.6-5.12-5.18'de gösterilmiştir.

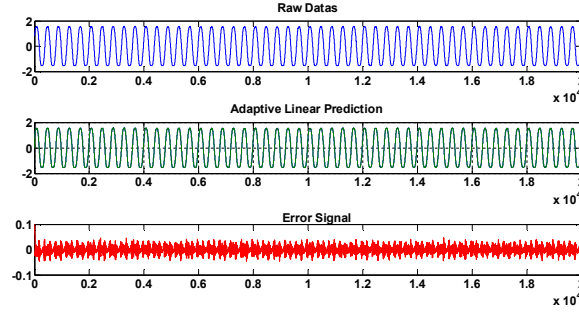
Motorun sırasıyla sağlam, 3 kırıklı ve 5 kırıklı rotor olmak üzere %125 yüklendiği durumlarda elde edilen sonuçlar şekil 5.20-5.21-5.22, 5.38-5.39-5.40 ve 5.56-5.57-5.58'te verilmiştir. Bu yükleme sonucunda elde edilen sonuçlar sırasıyla çizelge 5.7-5.13-5.19'da gösterilmiştir.

Motorun sırasıyla sağlam, 3 kırıklı ve 5 kırıklı rotor olmak üzere %150 yüklendiği durumlarda elde edilen sonuçlar şekil 5.23-5.24-5.25, 5.41-5.42-5.43 ve 5.59-5.60-5.61'de verilmiştir. Bu yükleme sonucunda elde edilen sonuçlar sırasıyla çizelge 5.8-5.14-5.20'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçların toplu gösterimi çizelge 6.1'de verilmiştir.

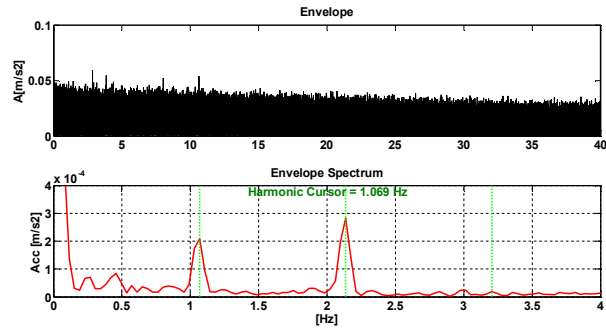
Sağlam Rotor Yük Kademesi 1(%25)



Şekil 5.8 Sağlam Rotor %25 Yükleme Fourier Dönüşümü



Şekil 5.9 Sağlam Rotor %25 Yükleme NLMS Adaptif Filtre

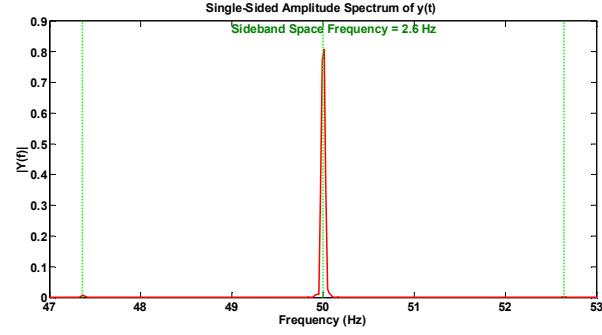


Şekil 5.10 Sağlam Rotor %25 Yükleme Hilbert Zarf Analizi

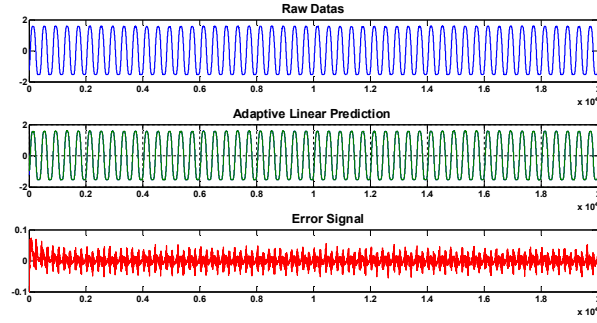
Çizelge 5.3 Sağlam Rotor %25 Yükleme

Analiz Türü	$\Delta f_b(\text{Hz})/\text{Harmonik Frekansı}(\text{Hz})$	Genlik Yüzdesi Karşılaştırma
FFT	1	0.177
Hilbert	1.069	38.39

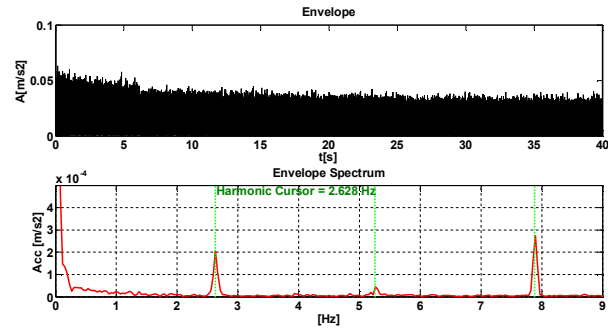
Sağlam Rotor Yük Kademesi 2(%50)



Şekil 5.11 Sağlam Rotor %50 Yükleme Fourier Dönüşümü



Şekil 5.12 Sağlam Rotor %50 Yükleme NLMS Adaptif Filtre

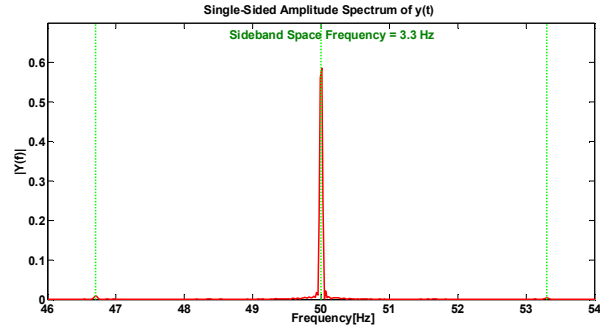


Şekil 5.13 Sağlam Rotor %50 Yükleme Hilbert Zarf Analizi

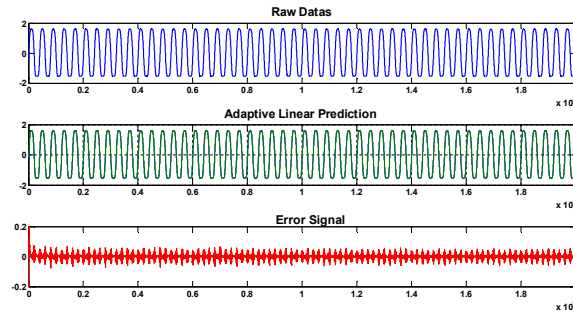
Çizelge 5.4 Sağlam Rotor %50 Yükleme

Analiz Türü	Δf_b (Hz)/Harmonik Frekansı(Hz)	Genlik Yüzdesi Karşılaştırma
FFT	2.6	0.778
Hilbert	2.628	47.63

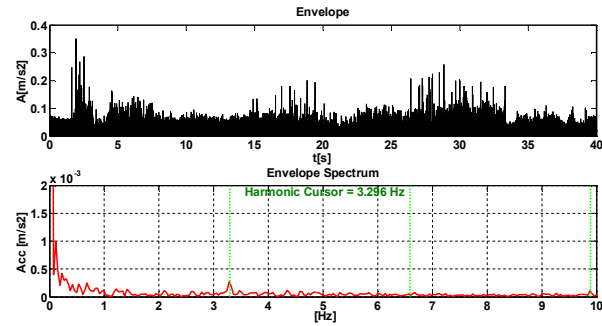
Sağlam Rotor Yük Kademesi 3(%75)



Şekil 5.14 Sağlam Rotor %75 Yükleme Fourier Dönüşümü



Şekil 5.15 Sağlam Rotor %75 Yükleme NLMS Adaptif Filtre

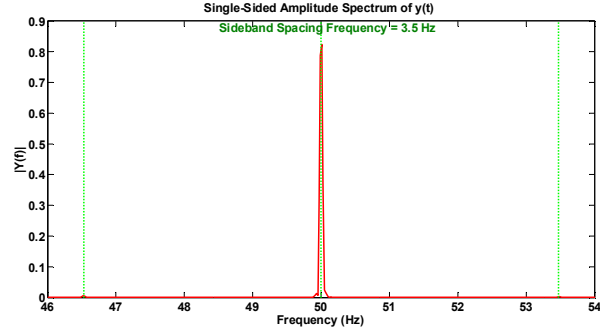


Şekil 5.16 Sağlam Rotor %75 Yükleme Hilbert Zarf Analizi

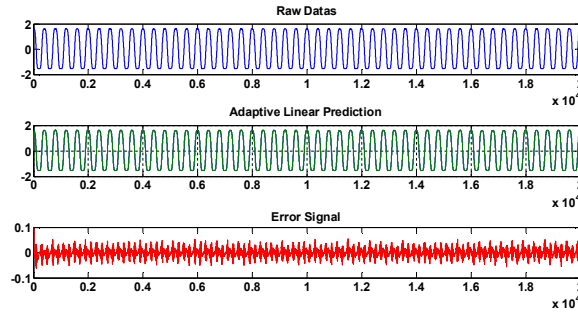
Çizelge 5.5 Sağlam Rotor %75 Yükleme

Analiz Türü	Δf_b (Hz)/Harmonik Frekansı(Hz)	Genlik Yüzdesi Karşılaştırma
FFT	3.3	1.528
Hilbert	3.296	19.47

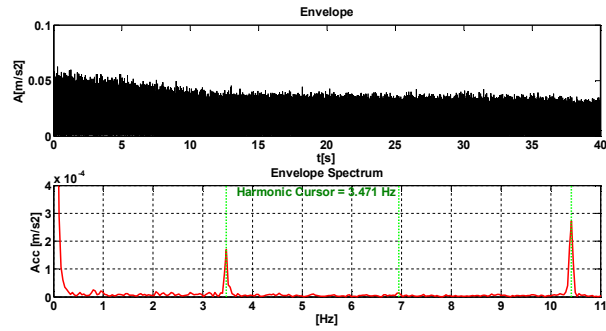
Sağlam Rotor Yük Kademesi 4(%100)



Şekil 5.17 Sağlam Rotor %100 Yükleme Fourier Dönüşümü



Şekil 5.18 Sağlam Rotor %100 Yükleme NLMS Adaptif Filtre

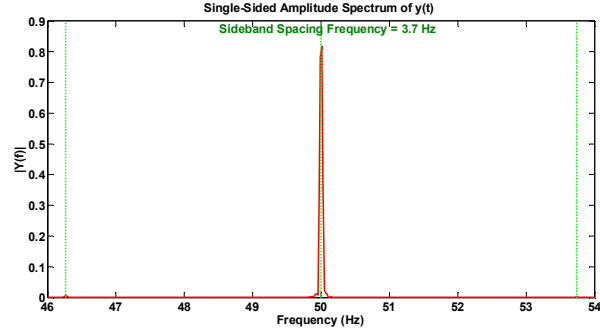


Şekil 5.19 Sağlam Rotor %100 Yükleme Hilbert Zarf Analizi

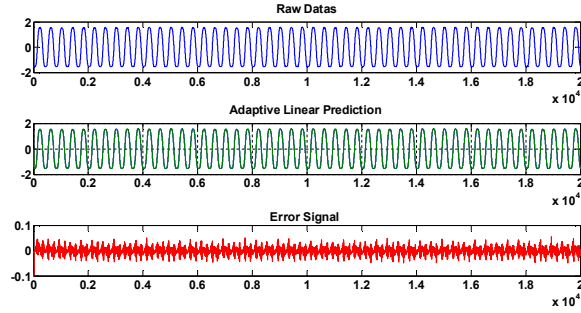
Çizelge 5.6 Sağlam Rotor %100 Yükleme

Analiz Türü	Δf_b (Hz)/Harmonik Frekansı(Hz)	Genlik Yüzdesi Karşılaştırma
FFT	3.5	0.609
Hilbert	3.471	25.97

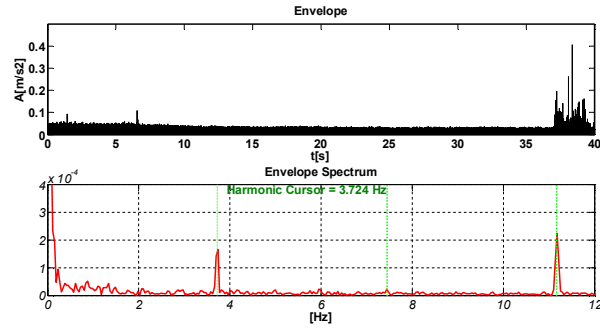
Sağlam Rotor Yük Kademesi 5(%125)



Şekil 5.20 Sağlam Rotor %125 Yükleme Fourier Dönüşümü



Şekil 5.21 Sağlam Rotor %125 Yükleme NLMS Adaptif Filtre

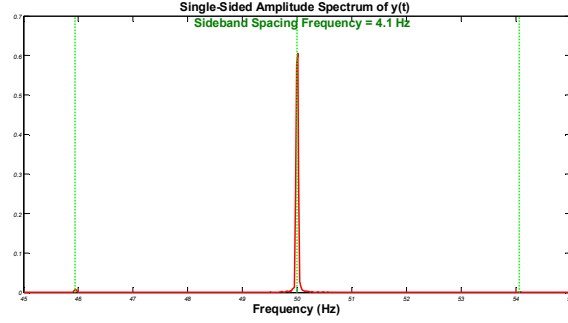


Şekil 5.22 Sağlam Rotor %125 Yükleme Hilbert Zarf Analizi

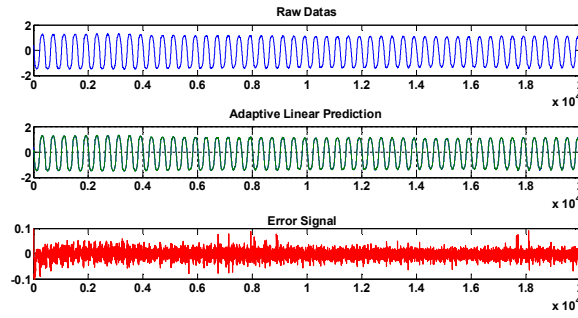
Çizelge 5.7 Sağlam Rotor %125 Yükleme

Analiz Türü	Δf_b (Hz)/Harmonik Frekansı(Hz)	Genlik Yüzdesi Karşılaştırma
FFT	3.7	0.655
Hilbert	3.724	20.77

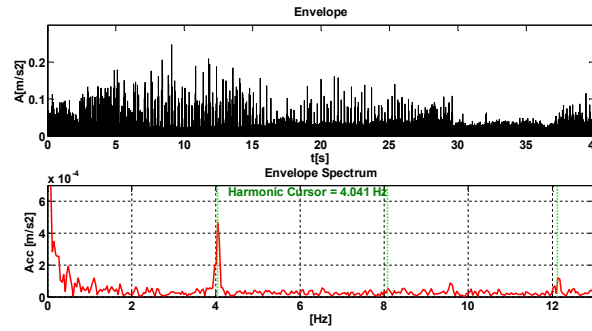
Sağlam Rotor Yük Kademesi 6(%150)



Şekil 5.23 Sağlam Rotor %150 Yükleme Fourier Dönüşümü



Şekil 5.24 Sağlam Rotor %150 Yükleme NLMS Adaptif Filtre

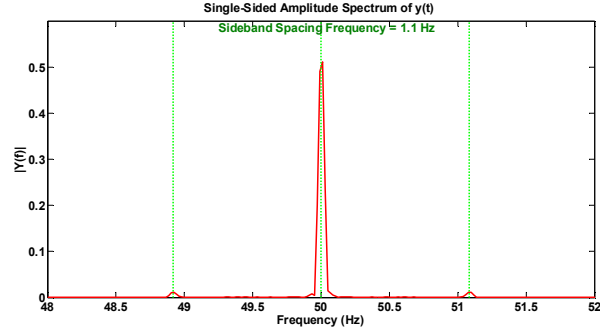


Şekil 5.25 Sağlam Rotor %150 Yükleme Hilbert Zarf Analizi

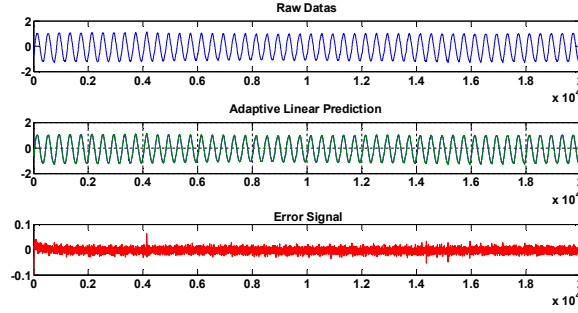
Çizelge 5.8 Sağlam Rotor %150 Yükleme

Analiz Türü	Δf_b (Hz)/Harmonik Frekansı(Hz)	Genlik Yüzdesi Karşılaştırma
FFT Analizi	4.1	1.329
Hilbert Zarf Analizi	4.041	72.03

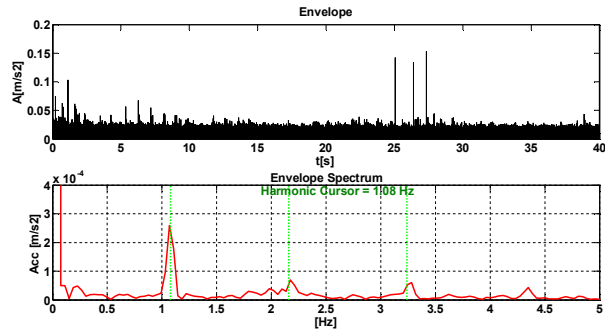
3 Kırıklı Rotor Çubuğu Yük Kademesi 1(%25)



Şekil 5.26 3 Kırıklı Rotor %25 Yükleme Fourier Dönüşümü



Şekil 5.27 3 Kırıklı Rotor %25 Yükleme NLMS Adaptif Filtre

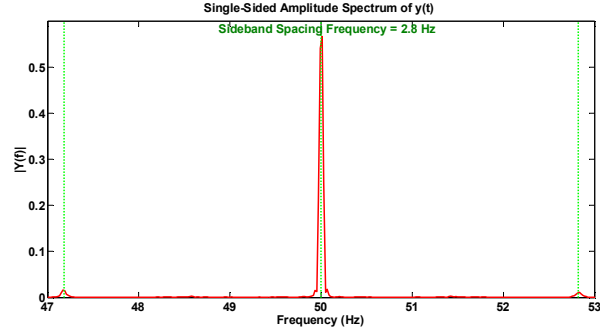


Şekil 5.28 3 Kırıklı Rotor %25 Yükleme Hilbert Zarf Analizi

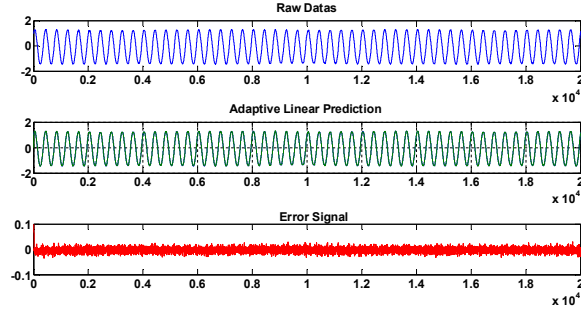
Çizelge 5.9 3 Kırıklı Rotor %25 Yükleme

Analiz Türü	Δf_b (Hz)/Harmonik Frekansı(Hz)	Genlik Yüzdesi Karşılaştırma
FFT Analizi	1.1	2.254
Hilbert Zarf Analizi	1.08	50.86

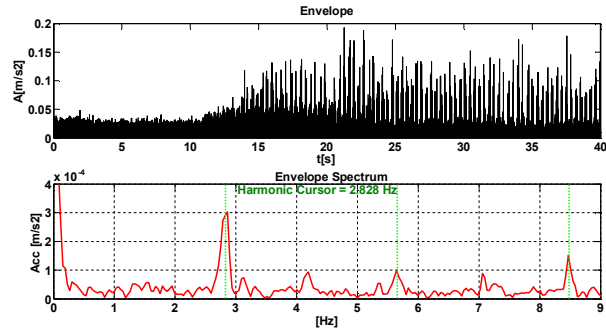
3 Kırıklı Rotor Çubuğu Yük Kademesi 2(%50)



Şekil 5.29 3 Kırıklı Rotor %50 Yükleme Fourier Dönüşümü



Şekil 5.30 3 Kırıklı Rotor %50 Yükleme NLMS Adaptif Filtre

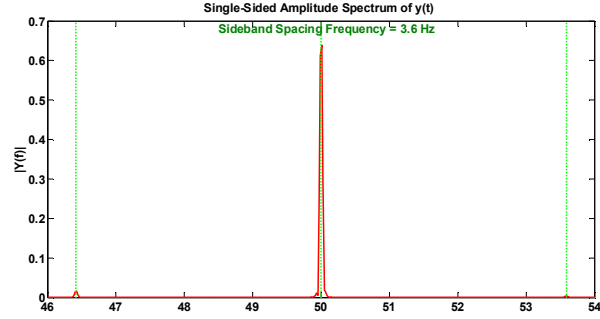


Şekil 5.31 3 Kırıklı Rotor %50 Yükleme Hilbert Zarf Analizi

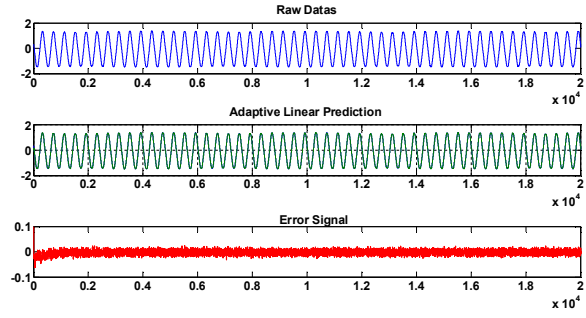
Çizelge 5.10 3 Kırıklı Rotor %50 Yükleme

Analiz Türü	Δf_b (Hz)/Harmonik Frekansı(Hz)	Genlik Yüzdesi Karşılaştırma
FFT Analizi	2.8	2.817
Hilbert Zarf Analizi	2.828	30.60

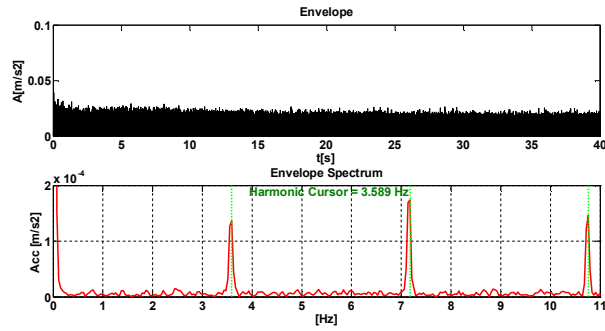
3 Kırıklı Rotor Çubuğu Yük Kademesi 3(%75)



Şekil 5.32 3 Kırıklı Rotor %75 Yükleme Fourier Dönüşümü



Şekil 5.33 3 Kırıklı Rotor %75 Yükleme NLMS Adaptif Filtre

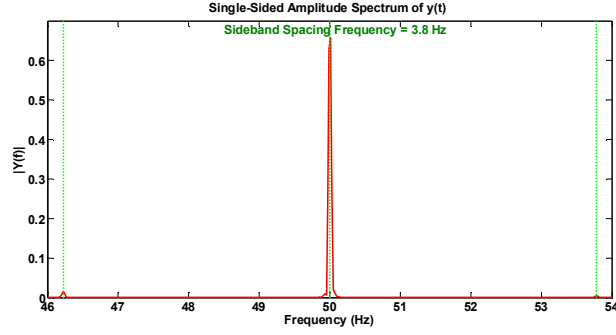


Şekil 5.34 3 Kırıklı Rotor %75 Yükleme Hilbert Zarf Analizi

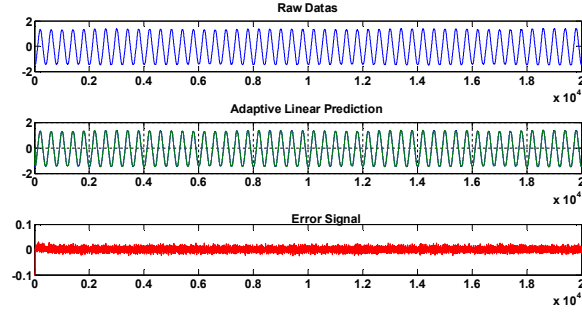
Çizelge 5.11 3 Kırıklı Rotor %75 Yükleme

Analiz Türü	Δf_b (Hz)/Harmonik Frekansı(Hz)	Genlik Yüzdesi Karşılaştırma
FFT Analizi	3.6	2.428
Hilbert Zarf Analizi	3.589	18.13

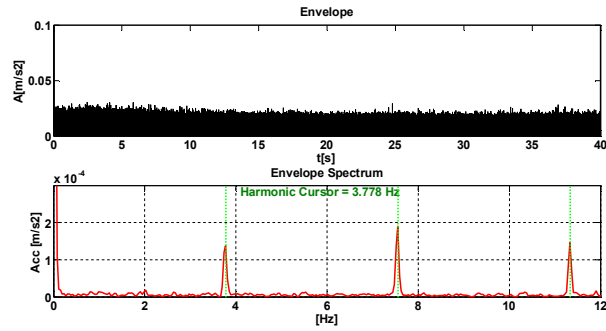
3 Kırıklı Rotor Çubuğu Yük Kademesi 4(%100)



Şekil 5.35 3 Kırıklı Rotor %100 Yükleme Fourier Dönüşümü



Şekil 5.36 3 Kırıklı Rotor %100 Yükleme NLMS Adaptif Filtre

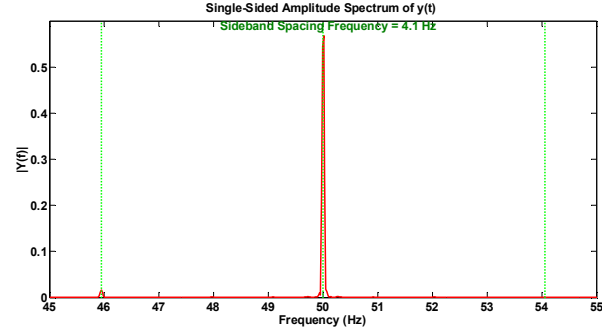


Şekil 5.37 3 Kırıklı Rotor %100 Yükleme Hilbert Zarf Analizi

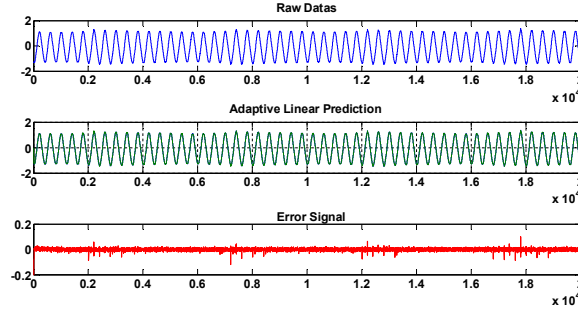
Çizelge 5.12 3 Kırıklı Rotor %100 Yükleme

Analiz Türü	Δf_b (Hz)/Harmonik Frekansı(Hz)	Genlik Yüzdesi Karşılaştırma
FFT Analizi	3.8	2.102
Hilbert Zarf Analizi	3.778	18.03

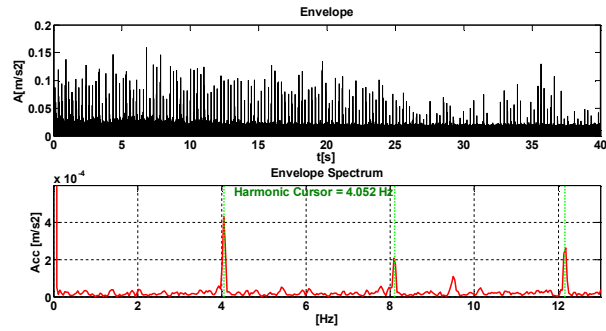
3 Kırıklı Rotor Çubuğu Yük Kademesi 5(%125)



Şekil 5.38 3 Kırıklı Rotor %125 Yükleme Fourier Dönüşümü



Şekil 5.39 3 Kırıklı Rotor %125 Yükleme NLMS Adaptif Filtre

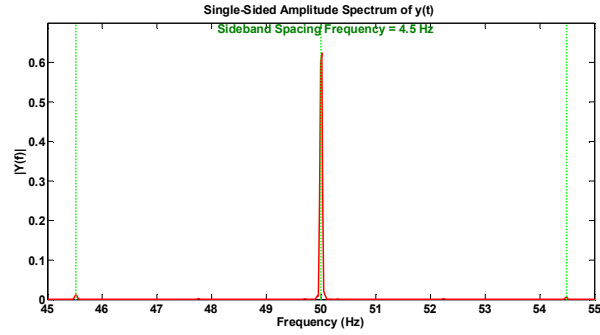


Şekil 5.40 3 Kırıklı Rotor %125 Yükleme Hilbert Zarf Analizi

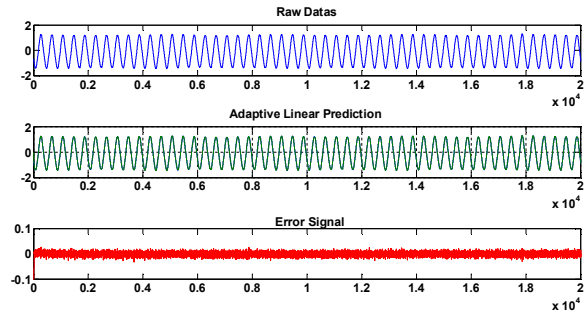
Çizelge 5.13 3 Kırıklı Rotor %125 Yükleme

Analiz Türü	Δf_b (Hz)/Harmonik Frekansı(Hz)	Genlik Yüzdesi Karşılaştırma
FFT Analizi	4.1	2.827
Hilbert Zarf Analizi	4.052	64.49

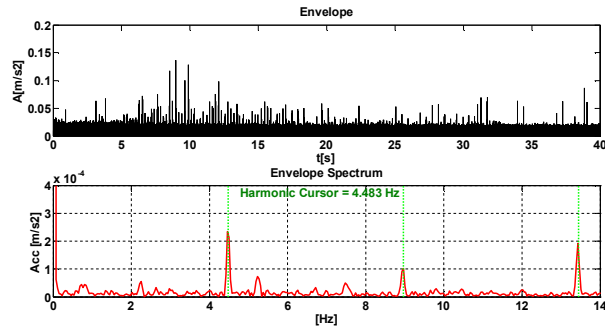
3 Kırıklı Rotor Çubuğu Yük Kademesi 6(%150)



Şekil 5.41 3 Kırıklı Rotor %150 Yükleme Fourier Dönüşümü



Şekil 5.42 3 Kırıklı Rotor %150 Yükleme NLMS Adaptif Filtre

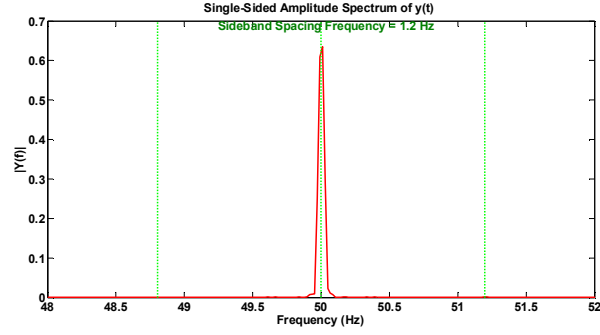


Şekil 5.43 3 Kırıklı Rotor %150 Yükleme Hilbert Zarf Analizi

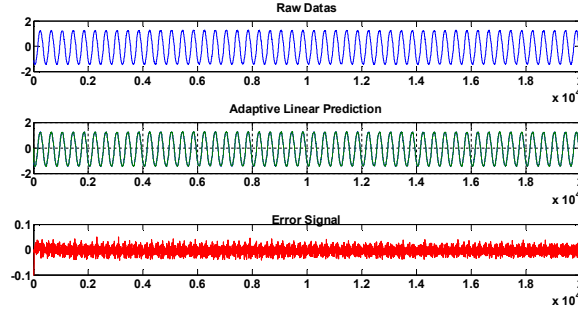
Çizelge 5.14 3 Kırıklı Rotor %150 Yükleme

Analiz Türü	Δf_b (Hz)/Harmonik Frekansı(Hz)	Genlik Yüzdesi Karşılaştırma
FFT Analizi	4.5	1.706
Hilbert Zarf Analizi	4.483	49.10

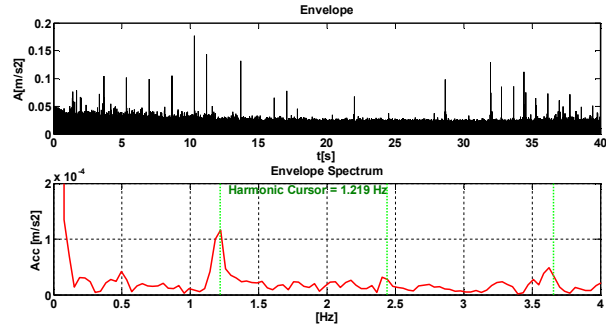
5 Kırıklı Rotor Çubuğu Yük Kademesi 1(%25)



Şekil 5.44 5 Kırıklı Rotor %25 Yükleme Fourier Dönüşümü



Şekil 5.45 5 Kırıklı Rotor %25 Yükleme NLMS Adaptif Filtre

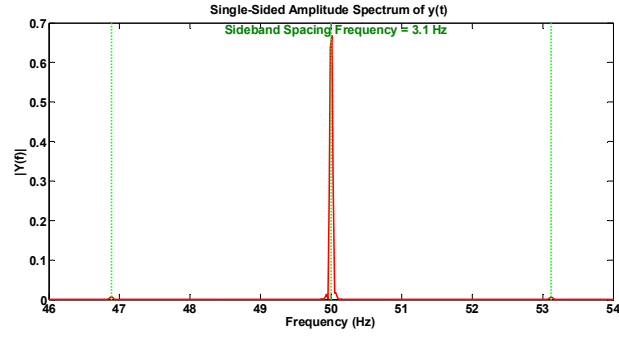


Şekil 5.46 5 Kırıklı Rotor %25 Yükleme Hilbert Zarf Analizi

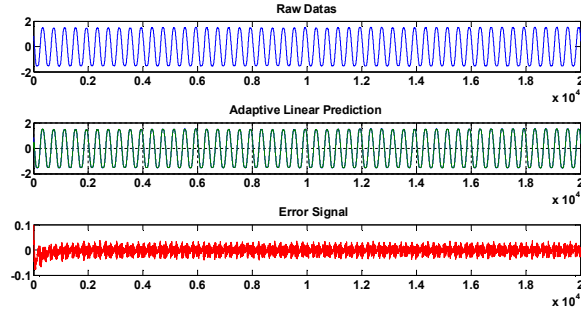
Çizelge 5.15 5 Kırıklı Rotor %25 Yükleme

Analiz Türü	Δf_b (Hz)/Harmonik Frekansı(Hz)	Genlik Yüzdesi Karşılaştırma
FFT Analizi	1.2	0.186
Hilbert Zarf Analizi	1.219	14.83

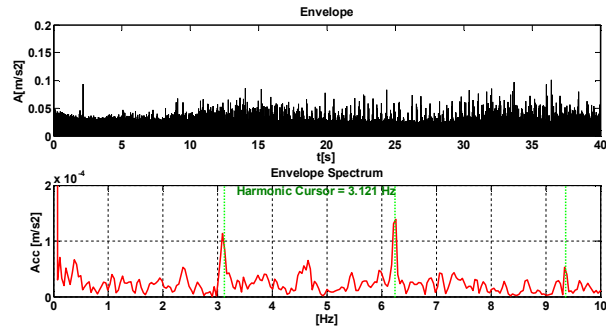
5 Kırıklı Rotor Çubuğu Yük Kademesi 2(%50)



Şekil 5.47 5 Kırıklı Rotor %50 Yükleme Fourier Dönüşümü



Şekil 5.48 5 Kırıklı Rotor %50 Yükleme NLMS Adaptif Filtre

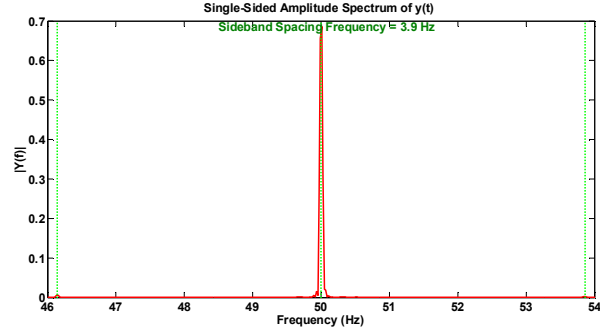


Şekil 5.49 5 Kırıklı Rotor %50 Yükleme Hilbert Zarf Analizi

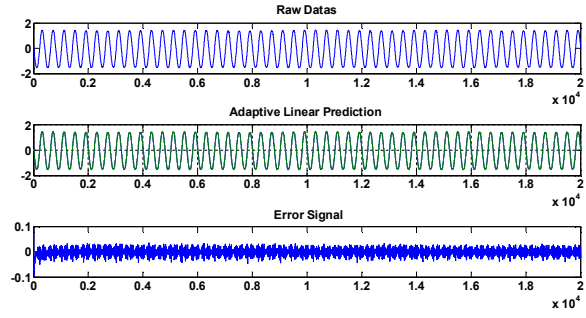
Çizelge 5.16 5 Kırıklı Rotor %50 Yükleme

Analiz Türü	Δf_b (Hz)/Harmonik Frekansı(Hz)	Genlik Yüzdesi Karşılaştırma
FFT Analizi	3.1	1.142
Hilbert Zarf Analizi	3.121	9.04

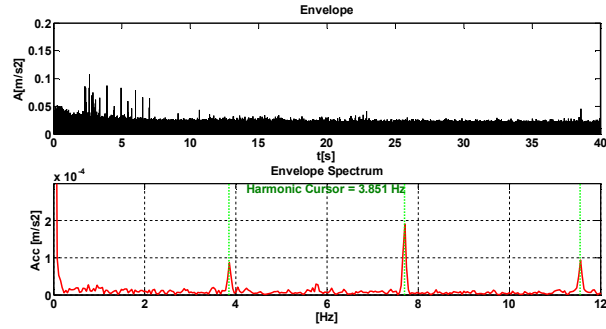
5 Kırıklı Rotor Çubuğu Yük Kademesi 3(%75)



Şekil 5.50 5 Kırıklı Rotor %75 Yükleme Fourier Dönüşümü



Şekil 5.51 5 Kırıklı Rotor %75 Yükleme NLMS Adaptif Filtre

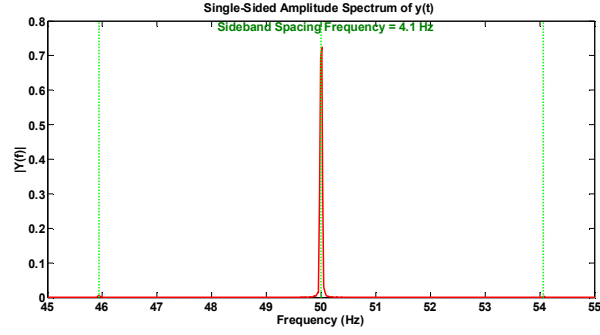


Şekil 5.52 5 Kırıklı Rotor %75 Yükleme Hilbert Zarf Analizi

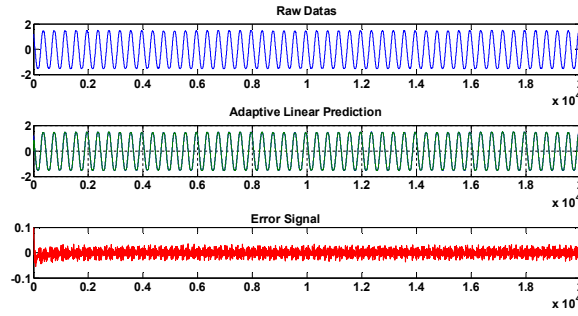
Çizelge 5.17 5 Kırıklı Rotor %75 Yükleme

Analiz Türü	Δf_b (Hz)/Harmonik Frekansı(Hz)	Genlik Yüzdesi Karşılaştırma
FFT Analizi	3.9	0.88
Hilbert Zarf Analizi	3.851	10.25

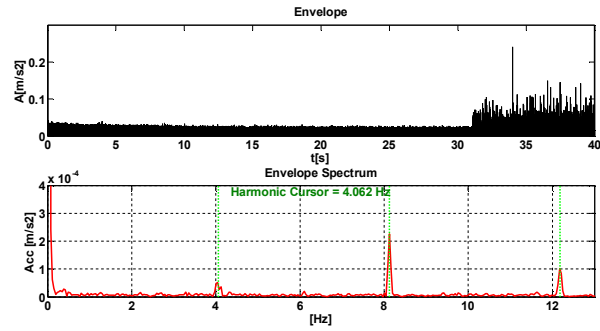
5 Kırıklı Rotor Çubuğu Yük Kademesi 4(%100)



Şekil 5.53 5 Kırıklı Rotor %100 Yükleme Fourier Dönüşümü



Şekil 5.54 5 Kırıklı Rotor %100 Yükleme NLMS Adaptif Filtre

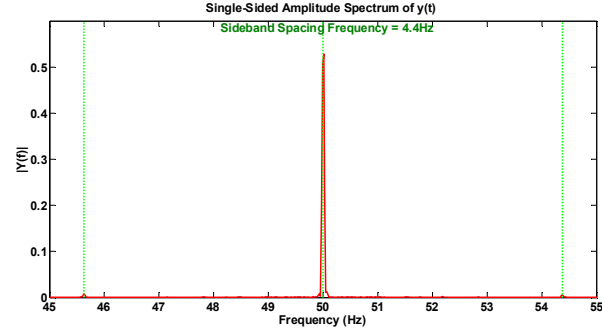


Şekil 5.55 5 Kırıklı Rotor %100 Yükleme Hilbert Zarf Analizi

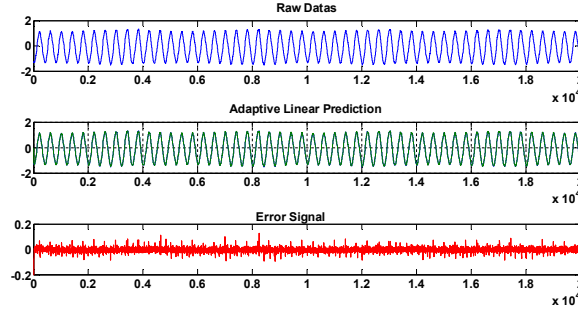
Çizelge 5.18 5 Kırıklı Rotor %100 Yükleme

Analiz Türü	Δf_b (Hz)/Harmonik Frekansı(Hz)	Genlik Yüzdesi Karşılaştırma
FFT Analizi	4.1	0.753
Hilbert Zarf Analizi	4.062	7.035

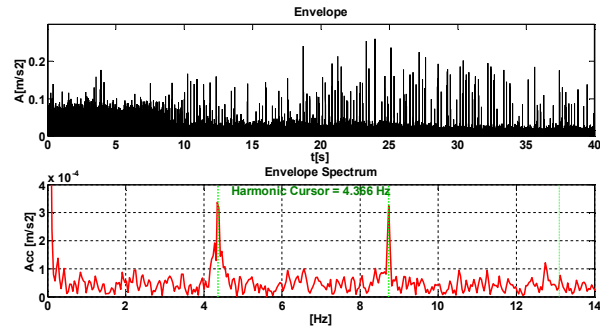
5 Kırıklı Rotor Çubuğu Yük Kademesi 5(%125)



Şekil 5.56 5 Kırıklı Rotor %125 Yükleme Fourier Dönüşümü



Şekil 5.57 5 Kırıklı Rotor %125 Yükleme NLMS Adaptif Filtre

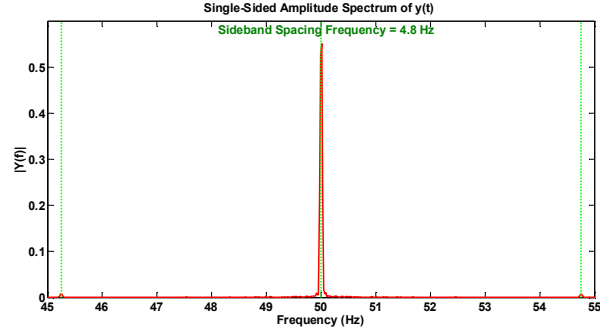


Şekil 5.58 5 Kırıklı Rotor %125 Yükleme Hilbert Zarf Analizi

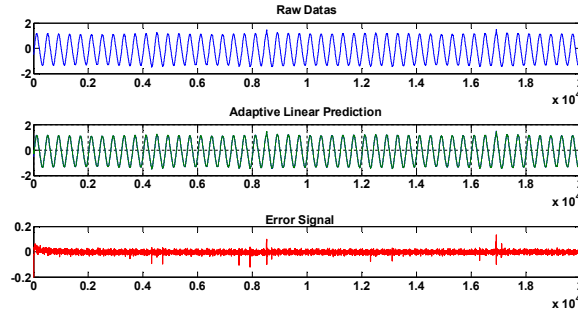
Çizelge 5.19 5 Kırıklı Rotor %125 Yükleme

Analiz Türü	Δf_b (Hz)/Harmonik Frekansı(Hz)	Genlik Yüzdesi Karşılaştırma
FFT Analizi	4.4	1.41
Hilbert Zarf Analizi	4.366	45.56

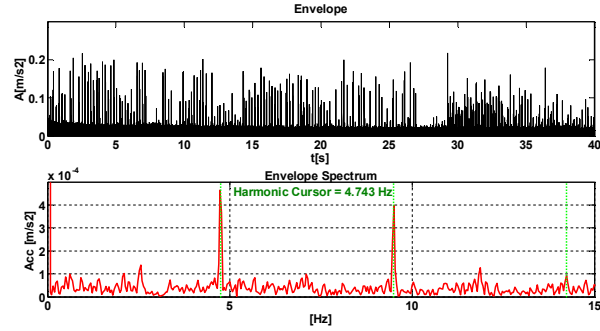
5 Kırıklı Rotor Çubuğu Yük Kademesi 6(%150)



Şekil 5.59 5 Kırıklı Rotor %150 Yükleme Fourier Dönüşümü



Şekil 5.60 5 Kırıklı Rotor %150 Yükleme NLMS Adaptif Filtre



Şekil 5.61 5 Kırıklı Rotor %150 Yükleme Hilbert Zarf Analizi

Çizelge 5.20 5 Kırıklı Rotor %150 Yükleme

Analiz Türü	Δf_b (Hz)/Harmonik Frekansı(Hz)	Genlik Yüzdesi Karşılaştırma
FFT Analizi	4.8	1.383
Hilbert Zarf Analizi	4.743	76.61

6. TEST SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Çizelge 6.1 Sonuçların Genel Değerlendirmesi

Rotor Durumu	Yük Durumu	Fourier Dönüşümü	Hilbert Zarf Analizi	Fourier Dönüşümü	Hilbert Zarf Analizi	%s
		Δf_b (Hz)	Harmonik Frekansı(Hz)	$\% \frac{A(f_s)}{A(f_{sb})}$	$\% \frac{A(Harmonik_1)}{A(f_s)}$	
Sağlam Rotor Çubuğu	1.Kademe	1	1.069	0.177	38.39	1
	2.Kademe	2.6	2.628	0.778	47.63	3
	3.Kademe	3.3	3.296	1.528	19.47	3
	4.Kademe	3.5	3.471	0.609	25.97	4
	5.Kademe	3.7	3.724	0.655	20.77	4
	6.Kademe	4.1	4.041	1.329	72.03	4
3 Kırıklı Rotor Çubuğu	1.Kademe	1.1	1.08	2.254	50.86	1
	2.Kademe	2.8	2.828	2.817	30.60	3
	3.Kademe	3.6	3.589	2.428	18.13	4
	4.Kademe	3.8	3.778	2.102	18.03	4
	5.Kademe	4.1	4.052	2.827	64.49	4
	6.Kademe	4.5	4.483	1.706	49.10	5
5 Kırıklı Rotor Çubuğu	1.Kademe	1.2	1.219	0.186	14.83	1
	2.Kademe	3.1	3.121	1.142	9.04	3
	3.Kademe	3.9	3.851	0.88	10.25	4
	4.Kademe	4.1	4.062	0.753	7.035	4
	5.Kademe	4.4	4.366	1.41	45.56	4
	6.Kademe	4.8	4.743	1.383	76.61	5

Δf_b : Temel Bileşen Frekansı ile Yan Bant Frekansları Arasındaki Fark

$A(f_s)$: Temel Bileşen Frekans Genliği

$A(f_{sb})$: Yan Bant Frekansları Harmonik Genliği

$A(Harmonik_1)$: 1.Harmonik Genliği

Sonuçların genel bir değerlendirilmesi yapıldığında Fourier Dönüşümü'nün yerine önerilen Hilbert Zarf Analizi yönteminin avantajları şu şekilde sıralanabilir.

Fourier Dönüşüm yönteminde, temel bileşen frekansın genliği ile yan bant frekansının genliği arasındaki fark oldukça büyüktür. Çizelge 6.1 incelendiğinde yan bant frekans genliği temel bileşen frekans genliğinin yaklaşık olarak %1'ine karşılık gelmektedir. Bu durum Fourier Dönüşümü kullanılarak elde edilen sinyalin frekans tanım bölgesi analizini oldukça güçleştirmektedir. Hilbert Zarf Analizi yönteminin frekans tanım bölgesindeki sonuçlar incelendiğinde ise %1'lik oran %10'ların üzerine çıkarak sinyalin analizine oldukça büyük bir kolaylık getirmektedir.

Bu çalışmanın temelini oluşturan Hilbert Zarf Analizi sonuçları Fourier Dönüşümü sonuçları ile karşılaştırıldığında Fourier Dönüşümü sonucu elde edilen yan bant frekans değeri ile temel bileşen frekansı arasındaki fark, Hilbert Zarf Analizi sonucunda elde edilen harmonik frekansa oldukça yakın çıkmaktadır. Bu durumda geliştirilen yöntemin doğru bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

Fourier Dönüşümü frekans tanım bölgesi sonuçlarına bakıldığında oldukça geniş bir pencerede daha az veri incelemesi yapılabilmektedir. Ancak Hilbert Zarf Analizi yönteminin frekans tanım bölgesi analizinde daha dar bir pencerede daha çok veri incelemesi yapılabilmektedir.

Fourier Dönüşümü'nün sorunlarından birisi olan düşük yük altında yan bant frekanslarının zor şekilde tespit edilebilmesi problemine geliştirilen yöntem çözüm getirmiştir.

Fourier Dönüşümü sonuçlarında kırık rotor çubuğu arızasının yol açtığı yan bant harmoniklerinin genliği incelendiğinde arıza sinyalinin dışında birçok gürültü verisi içerdiği de görülmektedir. Bu da sinyalin hangi kısımlarının sadece arıza kaynaklı olduğunu tespit etmeyi güçleştirmektedir. Geliştirilen yöntem de ise deney test düzeneğinden kaydedilen stator akım verisi ilk önce NLMS filtreden geçirilerek gürültünün elimine edilmesi sağlanır. Daha sonra Zarf Analizi kapsamında gerçekleştirilen band-geçiren filtre yardımıyla sinyalin sadece belirli bir bölgesinin analiz edilmesi sağlanarak kırık rotor çubuğu arızasının neden olduğu yan bant harmoniklerinin genliğinin sadece arıza tabanlı olması amaçlanmıştır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında stator akım verileri yardımıyla kırık rotor çubuğu arızalarının tespitine yönelik bir yöntem geliştirilmiştir. Bu amaçla kurulan test düzeneğinde sağlam rotor, üç kırıklı rotor ve beş kırıklı rotora sahip sincap kafesli bir asenkron motor bir generatöre ve rezistif yük düzeneğine bağlanarak %25, %50, %75, %100, %125 ve %150 oranlarında 6 farklı 6 farklı yük kademesinde yüklenmiştir. Her bir yükleme sonrası motor stator akım verileri kaydedilmiş ve bu veriler MATLAB paket programında geliştirilen Fourier Dönüşümü, NLMS adaptif filtre ve Hilbert Zarf Dönüşümü programlarıyla işlenmiştir.

Çalışmanın temel amacı kırık rotor çubuğu arızalarının tespitinde sıklıkla kullanılan ve özellikle düşük yük durumunda ve gürültülü ortamlarda net tespitler ortaya koyamayan Fourier Dönüşümü'nün yerine yeni bir yaklaşım geliştirebilmektir. Bu kapsamda elde edilen test sonuçlarına bakıldığında söz konusu durumlarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Kaydedilen akım sinyallerinin içerisinde yer alan arıza kaynaklı gürültü bileşenlerinin yanında çevresel şartlardan kaynaklanan gürültü sinyallerinin ayıklanması arıza analizinin sağlıklı yapılması için oldukça önemli bir adımdır. Çalışmada kullanılan NLMS adaptif filtrenin bu ihtiyaca cevap verdiği görülmüştür.

Çalışmanın bir başka amacı genellikle vibrasyon verilerinin analizinde kullanılan Zarf Analizi tekniğinin yapılacak geliştirmelerle stator akım verilerinin analizinde de kullanılabilir olmasını sağlamaktır. Zarf Analizi tekniği MATLAB ortamında geliştirilirken yapılan değişikliklerle söz konusu tekniğin Hilbert Dönüşümü ile birlikte kullanılarak kırık rotor çubuğu arızalarında da başarılı bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.

Zarf Analizi tekniği daha çok maden sektöründe ağır çalışma şartlarına sahip yüksek güçlü motorlarda kullanılan bir analiz yöntemidir. Bu tekniğin stator akım verilerinde de başarılı bir şekilde uygulanması durumunda ağır çalışma şartlarına sahip yüksek güçlü motorların sadece titreşim verilerine göre değil aynı zamanda akım verilerinin incelenmesiyle de arıza tespiti yapılması mümkün olacaktır. Bu doğrultuda geliştirilen Hilbert Zarf Dönüşümü yönteminin yardımcı bir adaptif filtre programı yardımıyla stator akım verilerine de uygulanabileceği görülmüştür.

Çalışma kapsamında geliştirilen yöntemin analiz süresi Fourier Dönüşümü'ne göre daha uzundur. Bu durum online takip yöntemiyle izlenen motorların analizinde sıkıntıya yol açabilecektir. Geliştirilen yöntem anlık motor takibi için uygun olup sürekli takip yöntemi için

şimdilik uygun değildir. Geliştirilen yöntemin üzerinde yapılacak iyileştirmelerle bu problem çözüme kavuşturulabilir.

Tez çalışmasında geliştirilen yöntem sadece kırık rotor çubuğu arızaları üzerinde kullanılmış ve sonuçlandırılmıştır. Bu yöntem elektriksel kaynaklı diğer arıza yöntemleri üzerinde de denenebilir ve elde edilen sonuçlar arıza karakteristiğine göre çeşitli sınıflandırma yöntemleri yardımıyla sınıflandırılarak akıllı çözüm yöntemleri sunulabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Agbachi, E. O., Ambafi, J. G., Tola, O. J., Ohize, H. O., 2012, Design and Analysis of Three Phase Induction Motor Using Computer Program, World J of Engineering and Pure and Applied Sci. 2(4):118.

Akar, M., Fenercioğlu, A., Soyaslan, M., 2011, Asenkron Motorlarda Rotor Çubuğu Kırık Arızasının Elektromanyetik Tork İle Tespiti, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11).

Arabacı, H. and Bilgin O., 2011, Detection of Rotor Bar Faults by Using Stator Current Envelope, Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 Vol II, WCE 2011, London, U.K.

Aydın İ., 2009, Kırık Rotor Çubuğu ve Stator Arızalarının Teşhisinde Yapay Sinir Ağı Yaklaşımı, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 25 (1-2) 134 – 149.

Aydın, İ., Karaköse, M., Akın, E., 2008, Zaman Serisi Veri Madenciliği ve Destek Vektör Makinalar Kullanan Yeni Bir Akıllı Arıza Sınıflandırma Yöntemi, Gazi Üniversitesi Mühendislik – Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 23, No 2, 431 – 440.

Ayhan, B., Chow, M. Y., Song, M. H., 2005, Multiple Signature Processing-based Fault Detection Schemes for Broken Rotor Bar in Induction Motors, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 2.

Ayhan, T., 2008, FFT Algoritmalarının FBGA Üzerinde Gerçeklenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi, Bitirme Ödevi.

Benbouzid, M. E. H., 2000, A Review of Induction Motors Signature Analysis as A Medium for Faults Detection, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 5.

Bonnett, A. H., 1978, Analysis of Winding Failures in Three-Phase Squirrel Cage Induction Motors, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-14, No. 3.

Clark, P. E., McShane, I. E., Wakeley, K., 1987, The Diagnosis and Solution of Electrical Machine Problems - Part I: Design Influences, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol IA-23, No. 1.

Çakır, A., Çalış, H., Ayrılmış A., Kızıl, A., 2009, 3 Fazlı Asenkron Motorun Sabit V/F Oranlı Kapalı Döngü Hız Denetimi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu(IATS'09), Karabük, TÜRKİYE.

Didier, G., Ternisien, E., Caspary O., Razik, H., 2006, Fault Detection of Broken Rotor Bars in Induction Motor Using A Global Fault Index, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42, No. 1.

Douglas, S. C., 1999, Digital Signal Processing Handbook, Introduction to Adaptive Filters, Chapter 18.

Drumwright, T., 1998, Adaptive Filtering, p. 35.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

Duyar, A., 2009, Model Bazlı Arıza Analizi ve Kestirimci Bakım, Mühendis ve Makina, Cilt 50, Sayı 598.

Ece, D. G., Ünsal, A., Çanakoglu, A.İ., Tunaboylu, S.N., 2012, Elektrik Makinaları, TC Anadolu Üniversitesi Yayını No:2619, Açıköğretim Fakültesi Yayını No:1587, 198 s.

Elkasabgy, N. M., Eastham, A.R., Dawson, G. E., 1992, Detection of Broken Bars in the Cage Rotor on an Induction Machine, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 28, No. 1.

Güran, F. ve Eren, L., 2012, Motor Akım İmza Analizinde Park Dönüşümüyle Temel Harmonik Bastırımı, EMO Bilimsel Dergi, Cilt 2, Sayı 3, s. 45-49.

Haji, M. and Toliyat, H. A., 2002, Pattern Recognition – A Technique for Induction Machines Rotor Fault Detection “Eccentricity and Broken Rotor Bar Fault”, Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 2.

[http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/alternatif-akm-motorlar-\(-alternating-current-\)-birinci-bolum/8343#ad-image-0](http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/alternatif-akm-motorlar-(-alternating-current-)-birinci-bolum/8343#ad-image-0) [Erişim Tarihi: 04/03/2013]

<http://www.mobiusinstitute.com/articles.aspx?id=2088> [Erişim Tarihi: 09/04/2013]

Ilyas, M. Z., Noor, A. O. A., Ishak, K. A., Hussain A., Samad, S. A., 2008, Normalized Least Mean Square Adaptive Noise Cancellation Filtering For Speaker Verification In Noisy Environments, 2008 International Conference on Electronic Design, Penang, Malaysia.

Kaplan, K., Bayram, S., Kuncan, M., Ertunç, H. M., 2012, Farklı Rulman Hatalarından Elde Edilen Titreşim Sinyalleri Üzerindeki Radyal Yüklerin Etkisi , Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK-2012, Niğde.

Kliman, G. B., Koegl, R. A., Stein, J., Endicott, R. D., Madlen, M. W., 1988, Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 3, No. 4.

Kowalski, C. T. and Kanior, W., 2008, Effectiveness of the Frequency Analysis of the Stator Current in the Rotor Fault Detection of Induction Motors, IEEE International Conference on Industrial Technology.

Kral, C., Haumer A., Grabner, C., 2009, Modeling and Simulation of Broken Rotor Bars in Squirrel Cage Induction Machines, Proceedings of the World Congress on Engineering 2009 Vol I WCE 2009, London, U. K.

Kschischang, F. R., 2006, The Hilbert Transform, The Edward S. Rogers Sr. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto.

Küllaç, Ö., 2011, Asenkron Motorlarda Yapay Zeka Teknikleri Kullanılarak Hız Kontrol Tekniklerinin Modellenmesi ve Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği ABD, 112 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

Li, K., Zhou, J., Zhao, Q., Chen X., 2012, Research on Fault Diagnosis Method of Bearing Based on Second Generation Wavelet Packets, IEEE International Conference on Computer Science and Information Processing.

Lorand, S., Barna, D. J., Agoston, B. K., 2004, Rotor Faults Detection in Squirrel-Cage Induction Motors By Current Signature Analysis, 2004 IEEE-TTC-International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, Cluj-Napoca, Romania.

Mahamad, A. K. and Hiyama, T., 2009, Improving Elman Network using Genetic Algorithm for Bearing Failure Diagnosis of Induction Motor, IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives.

Mathews, V. J. and Douglas, S. C., 2003, Adaptive Filters, Chapter 5, Analysis of The LMS Filter.

Mehala N. and Dahiya R., 2007, Motor Current Signature Analysis and Its Applications In Induction Motor Fault Diagnosis, International Journal of Systems Applications, Engineering & Development, Vol. 2, Issue 1.

Önder, Y. ve Acır, N., 2006, Kısa Gecikmeli Uyartım Potansiyellerine Klasik Adaptif Filtre Tekniklerinin Uygulanması, Elektrik, Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, (ELECO), Bursa, Türkiye, 298-301.

Penman, J., Dey, M. N., Tait, A. J., Bryan, W. E., 1986, Condition Monitoring of Electrical Drives, Electric Power Applications, IEE Proceedings B, Vol. 133, Issue 3, pp. 142-148.

Penrose, H. W., 2004, Motor Current Signature Analysis and Interpretation.

Peters, S.D. and Antoniu A., 1997, A Self-Tuning NLMS Adaptive Filter Using Parallel Adaptation, IEEE Trans. On Circuits & Systems-II Analog and Digital Signal Processing, 44, 1.

Pınar, R. ve Akçığ, Z., 1995, Hilbert Dönüşümlerinin Gravite Yönteminde Kullanılması, Jeofizik, 9-10, 1-2, 51-56.

Randall, R. B., 2011, Machine Diagnostics Using Advanced Signal Processing, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, The University of New South Wales.

Qin, Y. and Liu Q., 2011, On-line Detection of Rotor Bar Breaking Based on Band-pass Filter and Hilbert Envelope Analysis, IEEE Power Engineering and Automation Conference.

Serbes, G., 2009, Analysis of Quadrature Doppler Signals with a Modified Dual-Tree Complex Wavelet Transform, Master's Thesis, TC Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

Supangat, R., Grieger, J., Ertuğrul, N., Soong, W. L., Gray, D. A., Hansen, C., 2007, Detection of Broken Rotor Bar Faults and Effects of Loading In Induction Motors During Rundown, Proceedings of IEMDC'07:pp.196-201.

Taştan D., 2006, Tek Fazlı Asenkron Motorun Hız Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD, 135 s.

Thomson, W. T. and Gilmore, R. J., 2003, Motor Current Signature Analysis To Detect Faults In Induction Motor Drives – Fundamentals, Data Interpretation, And Industrial Case Histories, Proceedings Of The Thirty-Second Turbomachinery Symposium.

Tiryaki, S., Hatun, M., Koçal, O. H., 2008, Yeni Bir Adaptif Filtreleme Yöntemi:Hibrid GS-NLMS Algoritması, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt13, Sayı 2.

Wang, J., Gao R. X., Yan, R., 2011, Broken-Rotor-Bar Diagnosis for Induction Motors, 9th International Conference on Damage Assessment of Structures (DAMAS 2011), Journal of Physics: Conference Series 305 012026.