

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜRÜCÜYLE BESLENEN SİNCAP KAFESLİ ASENKRON
MOTORLARDA ROTOR ÇUBUK ARIZALARININ EŞZAMANLI TANISI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Emre SAYMAN

Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
Programı : KONTROL VE OTOMASYON MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2006

**SÜRÜCÜYLE BESLENEN SİNCAP KAFESLİ ASENKRON MOTORLARDA
ROTOR ÇUBUK ARIZALARININ EŞZAMANLI TANISI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Emre SAYMAN
(504021123)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Aralık 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 31 Ocak 2006**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Tamer KUTMAN (İ.T.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Uğur ÇELTEKLİGİL (SAÜ)
Yrd.Doç.Dr. Fikret ÇALIŞKAN (İ.T.Ü.)**

OCAK 2006

ÖNSÖZ

Günümüzde, endüstride kullanılan üç fazlı asenkron motorlar, dayanıklılıkları, ucuz olmaları ve bakım maliyetlerinin az olması sebebiyle elektrik motorları arasında en sık kullanılan makinelerdendir. Bu kadar geniş kullanım alanı olan bir motorda çalışma koşullarından dolayı meydana gelebilecek bir arıza, üretim kapasitesinde düşüşe, bakım maliyetlerinin artmasına sebep olacağı gibi hayati tehlikelerin oluşmasına da sebep olabilir. Meydana gelen arızalardan rotorla ilgili olanların büyük bir kısmı rotor çubuk arızalarından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden rotor arızalarının belirlenmesi ve tanısı için değişik yöntemlerle çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada, rotor arızalarının belirlenme ve tanısında kullanılan, motor akımının frekans analizi yönteminin teorik incelenmesi ve deneysel olarak uygulanması gerçekleştirilmiş, teorik ve pratik çalışmaların sonuçları karşılaştırılmış ve bu arıza belirleme ve tanılamasının bir motor sürücüsüyle yapılabilirliğinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmayı gerçekleştirmemdeki katkılarından dolayı Elektrik Yük.Müh. Duhan SÖNMEZ'e, Elektrik Yük.Müh. Murat İMERYÜZ'e, Motorsan Ltd. Şirketi'ne ve Sn.Haluk UZAY'a, bana sunduğu çalışma ortamı ve kaynaklardan dolayı Control Techniques firmasına, Yrd.Doç.Dr.A.Faruk BAKAN'a, Arş.Gör.İsmail AKSOY'a, Arş.Gör.Dr.Nuh ERDOĞAN'a, çalışmamın hazırlanmasında bana destek olan, bilgi ve birikimini benimle paylaşan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Tamer KUTMAN'a, sabır ve desteklerinden ötürü aileme içten teşekkürlerimi sunarım.

Aralık, 2005

Emre SAYMAN

İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Araştırması	2
1.3. Çalışmanın Amacı	4
1.4. Çalışmanın Kapsamı	5
BÖLÜM 2. ASENKRON MOTORLARDA ARIZA BELİRLEME VE TANISI	7
2.1. Giriş	7
2.2. Sincap Kafesli Asenkron Motorların Rotorlarında Meydana Gelen Arızalar ve Nedenleri	9
2.2.1. Termal Zorlanmalar	11
2.2.1.1. Termal Aşırı Yüklenmeler	11
2.2.1.2. Termal Dengesizlikler	12
2.2.1.3. Sıcak Noktalar ve Aşırı Kayıplar	13
2.2.1.4. Rotorda Kıvılcımlar Oluşması	13
2.2.2. Manyetik Zorlanmalar	14
2.2.2.1. Elektromanyetik Etki	14

2.2.2.2. Dengesiz Manyetik Çekiş	14
2.2.2.3. Elektromanyetik Gürültü ve Titreşim	15
2.2.3. Dinamik Zorlanmalar	15
2.2.3.1. Rotora Etki Eden Kuvvetlerin Oluşturduğu Zorlanmalar	15
2.2.3.2. Merkezkaç Kuvvetlerinin Oluşturduğu Zorlanmalar	15
2.2.3.3. Periyodik Zorlanmalar	15
2.2.4. Çevre Şartlarından Meydana Gelen Zorlanmalar	16
2.2.5. Mekanik Zorlanmalar	16
2.3. Elektrik Motorlarında Arıza Belirleme ve Tanısının Önemi	16
2.4. Arıza Belirleme ve Tanılama Yaklaşımları	17
2.4.1. Model Tabanlı Arıza Belirleme ve Tanılaması	17
2.4.1.1. Nicel Yönden Model Tabanlı Arıza Belirleme ve Tanılaması	17
2.4.1.2. Nitel Yönden Model Tabanlı Arıza Belirleme ve Tanılaması	18
2.4.2. Veriye Dayanan (Veri GÜdümlü) Arıza Belirleme ve Tanılaması	19
2.4.2.1. Nicel Yönden Veriye Dayanan Arıza Belirleme ve Tanılaması	19
2.4.2.2. Nitel Yönden Veriye Dayanan Arıza Belirleme ve Tanılaması	19
2.5. Çalışmada Seçilen Yaklaşım	20
2.6. Arıza İzleme Örnekleri	20
BÖLÜM 3. ROTOR ÇUBUK ARIZALARININ TEORİK VE DENEYSEL ANALİZİ	27
3.1. Giriş	27
3.2. Rotor Çubuk Arızalarının Teorik Analizi	27
3.2.1. Matematiksel Yaklaşım	27
3.2.2. Teorik Yaklaşım	32
3.3. Rotor Çubuk Arızalarının Deneysel Analizi	40
3.4. Teorik ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması	48

BÖLÜM 4. AKILLI SÜRÜCÜLERİN EŞZAMANLI ARIZA BELİRLEME OLANAKLARI	51
4.1. Sürücü Özellikleri	51
4.2. Arıza Belirleme ve Tanısının Motor Sürücüsüyle Yapılabilmesinin Avantajları	53
4.3. Sürücüyle Rotor Arızasının Belirleme ve Tanılaması	54
BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	56
5.1. Sürücü ile Arıza Belirleme ve Tanılama Uygulamalarındaki Zorluklar, Öneriler	56
5.2. Genel Değerlendirme ve Sonuçlar	57
KAYNAKLAR	59
Ek-A	65
Ek-B	68
Ek-C	73
ÖZGEÇMİŞ	74

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1.	Frekans Analizleri, Ölçülen Hız, Hesaplanan Kayma	50
-------------------	---	----

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	: Model Tabanlı Arıza Belirleme ve Tanısı Yöntemi Blok Diyagramı.....	5
Şekil 2.1	: Arıza Belirleme ve Tanılama Yöntemleri.....	17
Şekil 2.2	: Stator Akımına Yapılan Frekans Analizi.....	21
Şekil 2.3	: Uygulanan Frekans Analizi Sonucu.....	21
Şekil 2.4	: Rotor Çubuk Arızası Meydana Gelen bir Motor.....	22
Şekil 2.5	: Rotor Çubuğundaki Arızanın Statora Verdiği Zarar.....	22
Şekil 2.6	: Kırık Rotor Çubuğu.....	23
Şekil 2.7	: Fan Motorunun Frekans Analizi.....	24
Şekil 2.8	: Yük Değişiminden Sonra Fan Motorunun Frekans Analizi.....	25
Şekil 2.9	: Arızasız Motorun Frekans Analizi.....	26
Şekil 2.10	: Arızalı Motorun Frekans Analizi.....	26
Şekil 3.1	: Sincap Kafesli Asenkron Motorun Rotor Devresi.....	28
Şekil 3.2	: Rotor Çubuk Akımları.....	29
Şekil 3.3	: Normal Rotor Çubuk Yerleşiminin Gösterimi.....	29
Şekil 3.4	: Bir Rotor Çubuğu Kırılmış Rotor Çubuklarının Yerleşimi.....	29
Şekil 3.5	: Arıza Oluşmadan Önceki Endüktans Matrisi.....	31
Şekil 3.6	: Arıza Oluştuktan Sonraki Endüktans Matrisi.....	31
Şekil 3.7	: Sincap Kafesli Rotor.....	32
Şekil 3.8	: Test Motoru ve Arızalı Rotorlar.....	41
Şekil 3.9	: Test Düzeneği.....	42
Şekil 3.10	: Örneklenen Stator 1 Faz Akımı (50 Hz).....	42
Şekil 3.11	: Ölçüm Yapılan Osiloskop.....	43
Şekil 3.12	: %50 Yüklü, Kırksız Rotorlu Motorun Frekans Analizi.....	43
Şekil 3.13	: %50 Yüklü, 1 Kırıklı Rotorlu Motorun Frekans Analizi.....	44
Şekil 3.14	: %50 Yüklü, 2 Kırıklı Rotorlu Motorun Frekans Analizi.....	44
Şekil 3.15	: %50 Yüklü, 0, 1 ve 2 Kırıklı Rotorlu Motorların Frekans Analizi (Alt alta).....	45
Şekil 3.16	: %50 Yüklü, 0, 1 ve 2 Kırıklı Rotorlu Motorun Frekans Analizi.....	46
Şekil 3.17	: %80 Yüklü, 0, 1 ve 2 Kırıklı Rotorlu Motorun Frekans Analizi.....	47
Şekil 4.1	: Tipik bir AC Motor Sürücü (Control Techniques).....	52

SEMBOL LİSTESİ

$[V]$	: Gerilim Sütun matrisi.
$[R]$	: Direnç matrisi.
$[I]$	: Akım Sütun matrisi.
$[L]$	: Endüktans matrisi.
$[V_S]$	: Stator gerilimi sütun matrisi.
$[V_R]$	: Rotor gerilimi sütun matrisi.
$[I_S]$	: Stator akımı sütun matrisi.
$[I_R]$	: Rotor akımı sütun matrisi.
$[I_{S1,2,3}]$	: Stator faz akımları.
$[I_{R1,2,...,e}]$	: Rotor faz akımları.
$[R_S]$	: Stator direnç matrisi.
$[R_R]$	: Rotor direnç matrisi.
$[R_e]$	: Kısa devre halkasının direnç matrisi.
$[L_S]$	: Stator sargılarının endüktans matrisi.
$[L_R]$	: Rotor sargılarının endüktans matrisi.
$[L_e]$	: Kısa devre halkasının endüktans matrisi.
$[L_{Sp}]$	: Bir stator fazının endüktansı.
$[M_S]$	: İki stator fazı arasındaki karşıt endüktans.
$[M_{SR,RS}]$	: Stator – rotor sargılarının karşıt endüktans matrisi.
$[L_{SR}]$	: Bir stator fazı – bir rotor fazı karşıt endüktansı.
N_R	: Rotor çubuk sayısı.
J	: Atalet momenti.
Ω_r	: Rotorun açısal hızı.
Θ_r	: Rotorun açısı.
ξ	: Sürtünme katsayısı.
T_e	: Motorun ürettiği elektriksel moment.
T_l	: Yük momenti.

SÜRÜCÜ İLE BESLENEN SİNCAP KAFESLİ ASENKRON MOTORLARDA ROTOR ÇUBUK ARIZALARININ EŞZAMANLI TANISI

ÖZET

Bu çalışmada, sincap kafesli asenkron motorların rotor arızalarından en sık rastlanılan olan rotor çubuk arızaları incelenmiş, kırılan rotor çubuklarının motorun işletme parametreleri üstündeki etkileri açıklanmıştır. Asenkron motorun matematiksel modelinde kırık rotor çubuğunun nasıl temsil edilmesi gerektiği, kırık rotor çubuğunun belirlenmesinde kullanılan teori ve bu teorinin asenkron motor sürücülerinin rotor çubuk arızalarını belirleme ve tanısında ne şekilde kullanılabileceği irdelenmiş, ayrıca rotor çubuğu kırığı hakkındaki teorik ve deneysel çalışmamızın sonuçları karşılaştırılmıştır.

Endüstride, bir motor arızasının, üretimi aksatmadan önce tanısı gereklidir. Arıza oluşmaya başladığı anda bu arızanın tanısını sağlayabilecek uygulamalar, üretimdeki zamansız duruşları ve bakım maliyetlerini en alt seviyeye düşürür.

Arıza belirleme ve tanısı konusunda kapsamlı araştırmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda, rotor çubuklarından birinin kırılması durumunda, motorun stator akımının frekans analizinde temel bileşen yanında $(1 \pm 2s) \times f$ frekanslarında yan bantlar ortaya çıktığı gözlenmiştir. Bu yan bantların FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) ile belirlenmesi konusunda çalışmalara rastlanmaktadır.

Bu çalışmada seçilen, stator akımının frekans analizi ile arıza belirleme ve tanısı yöntemi, motora herhangi bir ölçüm cihazının takılmasını veya motorda bir değişiklik yapılmasını gerektirmez.

Motor sürücülerinde alan kontrolünün ve vektör kontrolünün kullanılmaya başlanması asenkron motor sürücülerinde önemli değişikliklerin meydana gelmesine sebep olmuştur. 1980’li yıllarda motor sürücülerinde mikroşlemcilerin kullanılmasıyla, sürücüler “akıllı cihaz” olarak tanımlayabileceğimiz birer cihaz haline gelmiştir. Bu sürücüler, motor kontrol etmekle kalmayıp kullanıcının istediği bazı ek fonksiyonları da içerisinde barındıran genel amaçlı sürücülerdir.

Bu konuda bundan sonra yapılacak çalışmalarda, arıza belirleme ve tanısının “akıllı cihaz” olarak tanımladığımız motor sürücülerine ne şekilde uygulanabileceği konusunda çalışılmalıdır.

Yapılan bu çalışma, motor sürücülerıyla arıza belirleme ve tanısı konusunda çalışan araştırmacılara bir kaynak oluşturacaktır.

ONLINE ROTOR BAR FAULT DIAGNOSIS OF DRIVER FED SQUIRREL CAGE ASYNCHRONOUS MOTORS

SUMMARY

In this study, rotor bar faults, which is one of the major rotor related faults of asynchronous motors have been examined. The effects of a broken rotor bar on the various parameters of the motor have been discussed. A representation of a broken rotor bar is shown on the mathematical model of the motor and the possibility of using advanced capabilities of asynchronous motor drives for diagnostic purposes have been discussed.

There is a need for being able to detect and identify fault conditions in asynchronous motors before their complete breakdown. In the industry, scheduling a replacement or repairing of unit is always preferred to managing a crisis situation.

Extensive research has been carried out recently in fault detection and diagnostic. It is now well known that the amplitude of sideband currents at frequencies $(1 \pm 2s) \times f$ rises when rotor bars break. Methods to measure them by FFT (Fast Fourier Transform) are being tuned.

This study considers one aspect of the problem of detecting broken rotor bar faults in the moving rotor of an induction motor without the addition of intrusive instrumentation to the motor. The motor should not need to be modified by the addition of magnetic field sensors, temperature or vibration monitors. All detection of faults is to be done by means of monitoring the stator current of the machine.

The introduction of the so-called field oriented control technique (magnetising-flux-oriented control) and other vector-control schemes (i.e. rotor-flux-oriented control, stator-flux oriented control) has brought significant changes in the field of asynchronous motor drives. In the 1980's microprocessors have enabled the development of cost effective digital drives and the widespread availability of DSPs (Digital Signal Processors) has enabled the development of a large variety of drives with advanced features. The possibility of the application of a fault detection and diagnosis approach for broken rotor bars with motor drives should be studied more in detail in future studies.

The topics mentioned in this study about diagnostic capabilities of motor drives will constitute a cost effective industrial solution for motors that are driver fed in industry.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1 Giriş

Günümüzdeki rekabet şartları işletmeleri sürekli olarak verimlilik artışlarına ve elde edilen iyisini yapmaya yöneltmektedir. Bunları başarmak için atılması gereken ilk adım işletmelerdeki süreçlerin gerçek zamanlı olarak sürekli izlenmesi, ikinci adım ise bu süreçlerin izlenmesi ile elde edilen verileri kullanarak süreç optimizasyonu ve düşük maliyetli üretim yollarının belirlenmesidir [1-3].

Verimlilik artışlarını, dolayısı ile süreç optimizasyonlarını, engelleyen en yaygın masraflar işletmelerdeki plansız duruş zorunluluklarından kaynaklanmaktadır. Bu konuda yapılan bir çalışma [4], A.B.D.'deki işletmelerde endüstriyel ekipman ve makinelerin kullanılabilirlik oranının %85 - %95 arasında değiştiğini göstermektedir. Plansız duruşlardan kaynaklanan gelir kaybı bazı sektörlerde karın %30 - %40'ı gibi oranlara yükselebilmektedir.

Plansız duruşlardan kaynaklanan yüksek maliyetler, doğal olarak, dikkatleri işletmedeki bakım faaliyetlerine çekmiştir. Endüstriyel makine ve ekipmanların bakım süreçleri, plansız işletme duruşlarından nihai ürünün kalitesine kadar herşeyi etkilemektedir. Geleneksel olarak, işletmelerdeki bakım çalışmaları iki farklı yöntem izlenerek yapılagelmiştir. Birinci yöntemde, mevcut makine ve ekipmanda arıza çıkıncaya kadar bir bakım yapılmayıp, ancak arıza çıktıktan sonra bakım ve onarım çalışmaları yapılmaktadır. Bu da üretim kayıplarını ve büyük bakım bütçeleri ayırmak zorunluluğunu beraberinde getirmektedir. İkinci yöntemde ise bakım çalışmaları planlı olarak belirli aralıklarla yapılarak makine ve ekipmanın ömrünü uzatmak hedeflenmektedir. Önleyici bakım olarak adlandırılan bu yöntemde belirli aralıklarla işletme duruşlarına gidilerek makine ve ekipman bakıma alınmaktadır. Bu aşamada genellikle yağlama, boyama, temizleme, ayarlama, bazı parçaların değiştirilmesi gibi işlemler yapılmaktadır. Örneğin, bir rulmana belirli bir çalışma ömrü biçilmekte, biçilen ömrün sonuna yaklaşıldığında rulman değiştirilmektedir. Bu yöntem arıza çıktıktan sonra bakım yapmaktan daha iyidir, ancak bakım masrafları

hala yüksektir, anormal çalışma şartlarından doğabilecek arızalar hala plansız işletme duruşlarına yol açabilecek durumdadır. Aynı zamanda hatalı, dikkatsiz bakım çalışmaları, kısa sürede yeni plansız duruş ortaya çıkması riskini arttırmaktadır.

Mevcut makine ve ekipman ile artan üretim taleplerini karşılama ihtiyacı kestirimci ve proaktif bakım kavramlarının gelişmesine neden olmuştur. Kestirimci bakım kavramı, mevcut makine ve ekipmanın durumunu izleyerek, yavaş yavaş gelişen arızaları başlangıç aşamasında bularak plansız duruşları asgariye indirmeyi hedeflemektedir. Bu yöntem belirli aralıklarla bakım çalışması yapmaya göre daha etkili ve daha az maliyetlidir.

Proaktif bakım kavramı ise daha herhangi bir arıza gelişimi başlamadan, arızaya sebebiyet verebilecek temel etkenleri ortaya çıkarmayı hedeflemektedir. Kestirimci bakımı hastalık belirtileri ilk çıktığında, hastalık ilerlemeden doktora gitmeye benzetirsek, proaktif bakımı daha herhangi bir hastalık durumu yok iken hastalığa neden olacak etkenleri bulup ortadan kaldırmaya benzetebiliriz.

İstatistikler göstermektedir ki asenkron motor arızalarının %10'u rotor kısmında meydana gelmektedir. En sık rastlanılan arızalardan biri olan stator iletkenlerinde oluşabilecek arızalar ise, yalıtım malzemelerindeki, stator dizaynındaki ve üretimindeki gelişimle giderek azalmaktadır. Bilindiği gibi asenkron motorlar, aşınmanın, paslanmanın hızla oluşabildiği kirli, tozlu ortamlarda da çalıştırılmaktadır. Bu çalışma koşulları altında motorlar zorlanmakta ve ayrıca rotor dizayn ve üretiminde çok az değişiklik meydana gelmesi nedeniyle, rotora ilişkin arızaların yüzdesi diğer meydana gelen arızalar arasında giderek artmaktadır [5].

1.2 Literatür Araştırması

Endüstrisi gelişmiş ülkelerde tüm üretim kapasitesinin % 40 – 50'lik bir kısmını elektrik motorları kullanabilmektedir. Asenkron motorlar, elektrik motorları içinde endüstride yaygın olarak kullanılan motorlardandır. Bu motorların güvenilirlik, verimlilik ve performans gibi özellikleri, asenkron motor uygulamalarının uygulandığı alanları arttırmıştır. Endüstride kullanımına sık karşılaşılan bu asenkron motorlarla ilgili olarak, motorların kullanım sürelerinin uzunluğu, motorun kullanıldığı yerle ilgili olarak motordan yüksek bir verimlilik beklentisi ve maliyet konusundaki rekabet asenkron motorlarda arıza belirleme ve tanısının önemini

gitgide arttırmaktadır. Bu sebeple, son 25 yılda, asenkron motorların arızalarının belirlene ve tanısında yapılan çalışmalarda sürekli bir artış görülmektedir. Yapılan çalışmalarda görülen bu artış, beraberinde bu konuda literatürdeki araştırmaların da zenginleşmesini sağlamıştır. Çalışmanın bu bölümünde asenkron motorlardaki arıza belirlene ve tanı teknikleri hakkında yapılmış çalışmalardan bazıları sunulacaktır. Bununla birlikte, motor arızalarının güvenilir ve doğru bir şekilde belirlenmesi ve tanı yapılması, meydana gelebilecek arızaların nedenlerini ve bu arızaların motor performansı üstündeki etkisini de anlamayı gerektirir [6].

S.Williamson ve A.C. Smith [7] döner alan teorisi ve rotor çubuklarının ayrıntılı bir modelini kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, kırılan rotor çubuğunun asenkron motorun matematiksel modelindeki etkisi de incelenmiştir.

Yazıcı ve Kliman, [8] kırık rotor çubuklarının ve rulman arızalarının belirlenmesinde kullanılabilecek adaptif, istatistiksel bir zaman – frekans yöntemi sunmuşlardır. Bu çalışmada motorun normal çalışma koşullarının zamanla değişmesi ve motor geometrisinin akım üzerindeki etkisi dolayısıyla, test aşamasına geçilmeden önce motorun normal koşullarının anlaşılması için bir öğrenme aşaması kullanılmıştır.

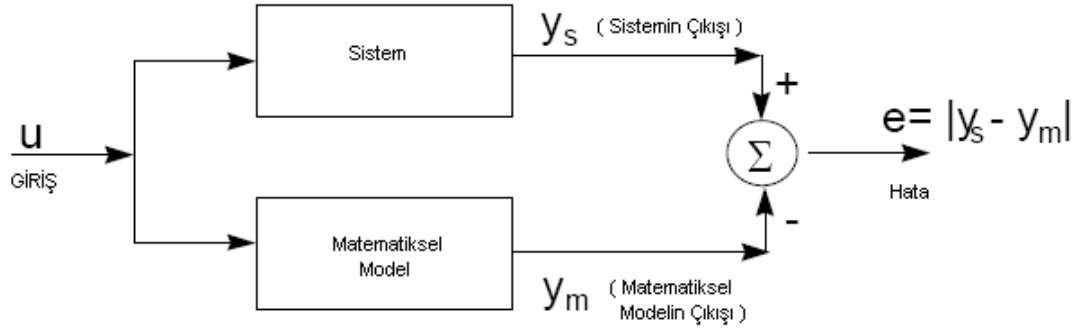
Filippetti [9], statorun simetrik sarımlarının bir döner alan oluşturması ve bu döner alanın da rotor devresinde bir gerilim endüklemesi ana fikrini temel alan çalışmasında, rotor devresinde meydana gelecek bir asimetrisinin akımda pozitif ve negatif bileşenleri olacağını belirtmiştir. Oluşan negatif bileşenler statorda $(1 - 2s)f$ frekansında elektromanyetik kuvvet endükleyecektir. Ayrıca bu bileşenler hızda da bazı dalgalanmalara sebep olacaktır ama makina–yük ataleti bu dalgalanmaları filtreleyecektir ve hızdaki bu dalgalanmalar stator akımında $(1 + 2s)f$ frekansında ek bir etki gösterecektir.

Benbouzid [10], Kalman Filtresi kullanarak asenkron motorun rotor direncini tahmin etmiştir. Rotor çubuk direncinin, rotor çubuğu kırıldığında arttığı göz önüne alınarak yapılan bu çalışmada, Kalman Filtresi kullanılarak hazırlanan bir gözlemleyici sistemine stator gerilimleri ve akımları giriş olarak uygulanmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır. Bununla birlikte, Benbouzid'in çalışmasında, beklendiği gibi sistem asenkron motorun parametrelerinin değişimine ve Kalman Filtresinde kullanılan P ve Q matrislerinin ilk değerlerinin seçilmesine çok duyarlı olmuştur.

Ülkemizde asenkron motorlarda arıza belirlenmesi ve tanısı konusunda Artesis firmasının çalışmaları bulunmaktadır [1-3]. Artesis firmasının uyguladığı yöntemde asenkron motorun kara kutu modellemesi üstünde çalışılır. Bu modelleme şeklinde, motorun iç yapısı değil, motora uygulanan girişler ve bu girişlere bağlı alınan çıkışlar analiz edilir. Sağlıklı çalıştığı bilinen bir motor belli bir süre için gözlenir ve sağlıklı haldeki giriş - çıkış değerleri belirlenir. Bu gözlem süresine “Öğrenme Süresi” denilebilir. Çalışma koşullarında meydana gelebilecek ve sağlıklı bir motorda meydana gelmemesi gereken bir durum oluştuğunda sistem kısa bir gecikmeden sonra arıza uyarısı verir. Artesis’in kullandığı bu arıza belirleme yönteminde arıza belirlenmesi için sisteme model tabanlı yaklaşılr. Model tabanlı arıza belirleme ve tanı yöntemi Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Model tabanlı arıza belirleme ve tanı yönteminde, gerçek sistemden alınan verilerle, motor sağlıklı çalışırken motordan alınan verilerin oluşturduğu modelin karşılaştırılması temel alınmıştır. Bu şekilde arıza belirlenmesi ve tanısı yapıldığı zaman model tabanlı arıza belirlenmesi ve tanısı sistemimiz, öğrenme süresinde motorun sağlıklı durumunda karşılaşılabilecek tüm durumları kendi oluşturduğu modelde bulundurmalıdır.

1.3 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada kullanılan, Veriye Dayanan (Veri GÜdümlü) Arıza Belirleme ve Tanılama yaklaşımının ana ilkesi, makineye teorik bir yaklaşım sonucu elde edilen teorik sonuçlar ve formülasyon ile gerçekleşen dinamik davranışın karşılaştırılmasından ibarettir. Model tabanlı arıza belirlenmesi ve tanısı yaklaşımında zaman içinde model ile gerçek sistem parametrelerinde olabilecek değişiklikler makine veya süreçte motoru etkileyen beklenmedik değişikliklerin gözlemlenmesinde kullanılır. Burada makine veya süreci çalıştıran motor, bir anlamda algılayıcı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1.1 Model Tabanlı Arıza Belirleme ve Tanı Yöntemi Blok Diyagramı

Bu çalışmanın amacı, elektrik motorlarında meydana gelen arızaların sınıflandırılarak bu arızaların nedenlerinin gösterilmesi, sincap kafesli asenkron motorlarda meydana gelen rotor çubuk arızalarının teorisinin incelenmesi, bu arızaların modellenmesi, motorun matematiksel modeli üstünde arızaların irdelenmesi, arıza oluştuğunda modelde ne gibi değişiklikler olduğunun gösterilmesi, rotor çubuk kırığının stator akımına etkilerinin pratik olarak gösterilmesi ve bundan sonra yapılacak çalışmalar için sürücüyle beslenen asenkron motorlarda sürücü tarafından eşzamanlı arıza belirlemesi ve tanısının imkan ve önemini vurgulamaktır. Bu çalışma, ileride, elektrik motorlarında arıza belirleme ve tanısı üzerine çalışacak araştırmacılara, rotor çubuk arızalarının eşzamanlı olarak bağlı oldukları sürücü tarafından önceden tanı konmasını sağlayacak yöntemlerin oluşturulmasına ışık tutacaktır.

1.4 Çalışmanın Kapsamı

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. BÖLÜM 1’de, çalışma hakkında genel bakış, çalışmanın amacı ile kapsamı hakkında görüş ve düşünceleri aktaran bir giriş bölümü yer almaktadır.

BÖLÜM 2’de, elektrik motorlarında meydana gelen arızalar sınıflandırılmıştır ve bu arızalar meydana gelme nedenleriyle birlikte verilmiştir. Bu bölümde ayrıca arıza belirleme ve tanısının öneminden bahsedilmiş, arıza belirleme ve tanı yaklaşımları sınıflandırılarak açıklanmış, literatürde yer alan bazı arıza izleme senaryoları verilmiştir.

BÖLÜM 3’te, sincap kafesli bir asenkron motorun rotor çubuğunda bir arıza meydana geldiğinde stator akımında gözlenen değişiklikler teorik açıdan incelenmiş,

matematiksel modellemenin neden zor olduğu ve literatürde bu konuda yapılan çalışmalar açıklanmıştır. Bu bölümde ayrıca sincap kafesli asenkron motorun rotor çubuk arızasının motorun matematiksel modeline olan etkisi gösterilmiş ve motorda oluşan arızaların motorun işletme büyüklükleri üstüne olan etkisi açıklanmıştır. Yapılan deneysel çalışma detaylı olarak anlatılmış, teorik sonuçlarla karşılaştırması yapılarak, konu üstünde yapılacak çalışmalarda dikkat edilmesi gereken noktalar vurgulanmıştır.

BÖLÜM 4’te, son yıllarda üretilen ve “akıllı cihaz” kapsamına giren asenkron motor sürücülerinin özellikleri incelenmiş, asenkron motorlardaki arıza belirleme ve tanısının böyle bir sürücüyle ne şekilde ve sürücüye ne gibi yazılımsal ve donanımsal ekler yapılması durumunda yapılabileceği, ayrıca arıza belirleme ve tanısının motorun devamlı bağlı bulunduğu bir sürücüyle yapılabilmesinin avantajları açıklanmıştır.

BÖLÜM 5’de, sürücüyle yapılabilecek arıza belirleme ve tanısının nasıl bir yöntem kullanıldığında en verimli sonucu verebileceği, sürücüyle beslenen bir sincap kafesli asenkron motora bu çalışmada kullanılan teorik yaklaşımın nasıl uygulanabileceği, günümüzde kullanılan sürücülere ne gibi ilaveler yapılması gerektiği incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, yapılan bu çalışmanın zayıf ve kuvvetli yanları tartışılarak, ilerideki aşamalarda yapılacak çalışmaları yönlendirecek öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2. ASENKRON MOTORLARDA ARIZA BELİRLEME VE TANISI

2.1. Giriş

Elektrik motorlarında elektriksel ve mekaniksel arızalar meydana gelebildiği gibi elektriksel ve mekaniksel arızaların bir kombinezonu da oluşabilir. Bunun yanında, meydana gelen arızalar termal, kimyasal ve diğer etkenlerden dolayı meydana gelmiş de olabilir. Meydana gelen arızaların çoğu geçici rejimdeki anlık mekanik zorlanmalar veya elektriksel izolasyon sorunu oluşturacak bir çalışma şekli sonucunda oluşur. Oluşabilecek elektriksel izolasyon arızaları motora daha da fazla zarar verebilecek arıza akımlarının akmasına sebep olabilir. Elektriksel izolasyon arızalarının nedeni genelde motor iletkenlerindeki aşırı akımdan kaynaklanan aşırı ısınmadan meydana geldiği için, bu gibi arızalar iletkenlerdeki sıcaklıkları gözleyen ısı-çiftler veya direnç sıcaklıklarının ölçülmesiyle belirlenebilir. Elektrik motorlarında, elektriksel bir sebepten kaynaklanan arıza meydana gelmesi durumu, mekaniksel bir arıza meydana gelmesi durumundan daha sık karşılaşılan bir durumdur. Mekaniksel arızaların çoğunluğu rotor rulmanlarında meydana gelen arızalardan oluşmaktadır ve bu tip arızalar titreşim ve ses analiziyle beraber rulman sıcaklıklarının gözlenmesi gibi gözleme yöntemleriyle arıza daha yeni oluşmaya başlamışken belirlenebilir [11, 12].

Elektrik motorlarında meydana gelen arızaları genel olarak şu şekilde [13] özetleyebiliriz:

- 1) Rulman arızaları: Meydana gelen tüm motor arızaları arasında %40 – 50’lik yüzdeyle en sık karşılaşılan arızadır.
- 2) Stator sargı arızaları: Asenkron motorların arızalarının %30 – 40’lık bir kısmı stator sargılarında meydana gelen arızalardan kaynaklanmaktadır. Stator sargılarında meydana gelen arızaların makine empedans matrisinde

asimetrilere sebep olduğu ve bunun da makinenin dengesiz akım çekmesine sebep olduğu model üstünde ve deneylerle gösterilmiştir [13].

- 3) Rotor çubuğunun veya kısa devre halkasının kırılması: Asenkron motorların tüm arızaları arasında rotor arızalarının % 5 – 10'luk bir yeri vardır. Bu arızanın belirlenmesinde frekans analizi ve parametre kestirimi yaygınlıkla kullanılmıştır.
- 4) Eksen kaçıklığıyla ilgili arızalar: Eksen kaçıklığı, stator-rotor arasındaki hava aralığının her yerde aynı olmamasıdır. Statik ve dinamik olmak üzere iki tip eksen kaçıklığı arızası vardır. Statik bir eksen kaçıklığı durumunda, stator-rotor arasındaki hava aralığının en az olduğu noktanın her zaman aynı yerde olması ve rotorun bu şekilde dönmesi söz konusudur. Dinamik eksen kaçıklığında ise rotor milinin merkezi rotorun dönme ekseninde değildir. Böylece stator-rotor arasındaki hava aralığının en az olduğu nokta rotorla beraber döner [50].

Asenkron motorlarda meydana gelebilecek farklı arızaların belirtileri ve sebepleri aşağıda özetlenmiştir. Bu özet, arızanın meydana geldiği yerin belirlenmesinde ve gerekli önlemlerin alınmasında yararlı olabilir [14].

Genelde karşılaşılan ilk çalıştırma arızaları:

- Çalışmada başarısızlık, motorun çalışması beklenirken hiçbir hareket gözlenmez. Sigorta devrelerinde, devre açıcılarda bir sorun olabilir. Motorun bağlı bulunduğu yük mekanik olarak kilitlenmiş olabilir, motor yüke göre yanlış seçilmiş olabilir.
- Ani akımların aşırı değerler alması. Aşırı akıma karşı koruma düzeneklerinin seçiminde yanlışlık yapılmış olabilir veya elektrik şebekesinde bir arıza meydana gelmiş olabilir.

Asenkron motorun kalkış aşamasında meydana gelebilecek arızalar:

- Motor kalkış aşamasında zorlanır, yüksek ses ve titreşim oluşturur. Motorun kalkışını sağlayacak yeterli moment üretilmemiştir, besleme gerilimi düşüktür veya değişik asimetrikler (merkezden kaçıklık) dolayısıyla motor kalkışta zorluk yaşıyor olabilir.

- Kalkış süresinin çok uzaması. Bunun sebebi olarak aşırı yüklenme, motorun iç yapısına yönelik asimetriler veya motorun tasarımından kaynaklanan sorunlar olabilir.
- Sincap kafesli asenkron motorların kalkışı başarısız olursa, sorun rotor kafesinde meydana gelen rotor çubuklarının kırılmasından veya rotor çubuklarını birleştiren halkada meydana gelen bir kırıktan kaynaklanıyor olabilir.

Asenkron motorun sürekli çalışma koşulları altında meydana gelebilecek arızalar:

- Aşırı ses ve titreşim. Asenkron motorun bu arızası çeşitli manyetik ve elektriksel asimetriden (rotor ekseninin yer değiştirmesi, stator veya rotor sarımlarında oluşabilecek bir kısa devre) veya rulman arızalarından kaynaklanıyor olabilir.
- Statorun bazı bölgelerinde aşırı ısınma. Bu arıza, stator sargılarındaki bir arızadan dolayı, asimetrik şebeke geriliminden dolayı veya rotorun ekseninin yer değiştirmesinden kaynaklanıyor olabilir.
- Genel aşırı ısınma. Bu arıza meydana gelebilecek çeşitli asimetrilere, aşırı stator geriliminden, motor fanının arızalanmasından, çalışma ve durma periyotlarının sıklığından, aşırı akım durumunda devreyi kesecek elemanların yanlış seçilmesinden kaynaklanıyor olabilir.

2.2. Sincap Kafesli Asenkron Motorların Rotorlarında Meydana Gelen Arızalar ve Nedenleri

Rotorda meydana gelen arızaların çoğunluğu rotor çubuğunun kırılmasından kaynaklanır. Rotor çubuklarında meydana gelen bu arızanın sebebi de, rotor çubuğunun imalatında kullanılan malzemeden çok, rotor çubuğunun üretimi ve kafesin oluşturulması sırasında nasıl bir yöntem izlendiği ile ilgilidir. Rotor çubuklarının kırılma şekilleri incelendiği zaman anlaşılmaktadır ki rotor çubuklarındaki kırıklar genellikle rotor çubuğunun kafesin sonlandırıcı halkası ile birleştiği yerde meydana gelmektedir. Bu kırılmayı önleyecek şekilde rotor dizaynı yapılmasının ve döküm rotor çubukları seçilmesinin bu arızanın oluşma sıklığını azaltmaya yönelik iyi bir yaklaşım olduğu söylenebilir [15].

Sincap kafesli asenkron motorlarda kullanılan iki tip rotor bulunmaktadır. Birinci tip rotor, döküm yöntemiyle rotor çubuklarının elde edilmesine dayanırken, ikinci tip rotor üretiminde, rotor çubukları önce imal edilir, daha sonra bir araya getirilerek rotor oluşturulur. Döküm yöntemiyle imal edilen motorlar geçmişte genelde küçük motorlardı. Fakat bu yöntemle motor üretimindeki gelişmeler günümüzde 4000 beygir gücünde rotoru döküm motorlar üretilmesine imkan vermektedir.

Döküm yapılarak elde edilen rotorlarda alüminyum veya alüminyum alaşım kullanılır. Dökümle elde edilmiş rotorların avantajları şu şekilde sıralanabilir:

1. Üretilcek rotor çubuklarının şeklinde daha geniş seçenek vardır.
2. Ucuz olan alüminyum veya alüminyum alaşımın getirdiği ekonomi.
3. Genellikle en ucuz üretim şeklidir.
4. Çalışma ömrü daha fazladır.
5. Rotor çubuklarıyla kısa devre halkalarının birleşim yerleri daha sağlamdır.

Döküm motorların en büyük dezavantajları ise:

1. Döküm yapabilmek için ilk yatırım maliyetinin çokluğu.
2. Alüminyum alaşımın kalitesinin yüksek olmasının gerekliliği.
3. Rotor çubuklarının tamirinin imkansız oluşu.
4. Döküm sırasında oluşabilecek döküm hataları.

Kullanılan ikinci tip rotor için, rotor çubuklarının dışarıda elde edilerek rotora sonradan eklenmesi yönteminin avantajları ise şöyle sıralanabilir:

1. İlk yatırım maliyetinin düşüklüğü.
2. Üretilebilecek motorun güç sınırlandırılması olmaması.

Bu tip motorların dezavantajları ise:

1. İmalat maliyeti.
2. Motorun hız – moment karakteristiğinin imalat ile değiştirilememesi.
3. Bu tip rotorlarda arızaların daha sık görülmesi.

Genelde, büyük asenkron motorların yapılmasında alüminyum, bakır veya bu metallerin alaşımları kullanılır. Rotor imalatında üretilen rotorun çalışma ömrünü

etkileyen en önemli faktör rotor çubuklarının üretildiği metal değil, rotorun imalat edilme şekli ve dizaynıdır. Bakırın erime sıcaklığının 1250 derece ve alüminyumun erime sıcaklığının 1082 derece olması, bakırın daha uygun bir seçim olduğu sonucunu işaret etse de, rotor çubukları bakırdan yapılmış motorların kısa devre halkalarına kaynak yapılan aradaki kaynak maddesinin erime sıcaklığının 593 derece olması, rotor imalatında alüminyumun daha sağlam bir yapı oluşturacağını göstermektedir. Rotor çubuklarının kırılmasının esas sebebi kullanılan metal değil rotorun tasarımıdır.

Bu bölümde, rotorda meydana gelebilecek çeşitli zorlanmalar ve bu zorlanmaların rotorun çalışmasını nasıl etkilediği açıklanacaktır.

2.2.1. Termal Zorlanmalar

2.2.1.1. Termal Aşırı Yüklenmeler

Termal aşırı yüklenmeler, hızlanma, normal çalışma veya inişli çıkışlı çalışmalar sırasında meydana gelebilir. Termal zorlanma durumlarında, bazı motorların statorlarında arıza meydana gelirken, bazı motorların da bu gibi durumlarda rotorlarında arıza meydana gelir. Genelde, motorlar tam devirle dönerken, motorun termal bakımdan dayanıklılığını, statorun termal dayanıklılığı belirler. Hızda meydana gelen dalgalanma, bir rotor arızasını meydana getiren en sık rastlanılan sebeptir. Ayrıca, termal koruma düzeneklerinin belirlenmekte en çok zorlandığı arıza çeşidi de hızda meydana gelen bu dalgalanmalardır. Termal algılayıcılar genellikle statorun içerisine yerleştirilir ve rotorda meydana gelen bir termal arızayı belirlediklerinde geç kalınmış olabilir. Rotorun termal aşırı yüklenmelerden korunmasının en iyi yolu, akım algılayıcı elemanların motorun ilk çalışma akımıyla, meydana gelen dalgalanmalardan kaynaklanan aşırı akımları anında belirleyebilmesidir. Termal aşırı yüklenmelere sebep olan arıza sebepleri şöyle sıralanabilir:

- Anormal sayıda tekrar tekrar motorun çalıştırılması. Bu şekilde rotor çubuklarında ve çubukları birleştiren halkada çok yüksek ısı meydana gelebilir.
- Yük ve motorun hız – moment eğrisinin yanlış seçilmesinden dolayı motorun nominal devrine çıkamaması.

- Bir rulman arızası sonucunda rotorun statora sürtmesi.
- Rotor devresinde, rotor çubuklarını birleştiren halkada meydana gelen bir ısı artışı sonucunda rotor çubuklarının kırılması.
- Tıkanmış filtrelerden dolayı motor havalandırmasının yetersiz kalması.
- Statora uygulanan şebeke geriliminin dengesiz olması ve bundan kaynaklanan negatif akım bileşenleri ve rotordaki ısı artışı.

Termal aşırı yüklenmelere bağlı olan rotor arızaları, rotor kafesinin ve rotor çubuklarını birleştiren halkanın gözle incelenmesiyle belirlenebilir. Aşırı ısınmanın etkileri genelde gözle görülür bir şekildedir, hatta rotor kafesinin erimiş kısımları oluşmuş olabilir.

2.2.1.2. Termal Dengesizlikler

Termal dengesizlikler sürekli çalışma şartları altında veya ilk çalışma anlarında meydana gelebilir. Motorda termal dengesizlik meydana gelmesinin sebepleri şu şekilde sıralanabilir.

- Motorun tekrar tekrar çalıştırılması, deri olayı sebebiyle rotor çubuklarında ısı artışını meydana getirir ve termal dengesizlik oluşur.
- Rotor çubukları arasında ısı transferinin eşit olmayışı termal dengesizlik oluşturur.
- İlk çalışmaya başlamada rotor ile stator arasındaki ısıya bağlı genişlemenin eşit derecede olmaması termal dengesizlik oluşturur ve bu sebeple titreşim olur.
- Rotor çubuklarında, kısa devre halkasında veya rotor çubuklarının kısa devre halkasıyla birleştiği yerdeki başarısız kaynak rotorda termal dengesizlikler oluşmasına sebep olur.

Bu gibi durumlar, genelde yüksek hızlı motorlarda ve rotor boyunun rotor çapına oranının büyük olduğu motorlarda meydana gelir. Bu arıza tipinin belirlenmesindeki bir zorluk ise, arıza sebebiyle meydana gelen titreşim yüksüz çalışma koşullarında kabul edilecek seviyelerde olabilir ve motorun sağlıklı çalıştığı zannedilebilir. Bu yüzden, bazı motor üreticileri yüksek hızlı motorlarını üretirken, üretim kalitesinin

sağlanması amacıyla yapılan testlerin bir aşamasında motorlarını yük altında çalıştırmaktadırlar.

Termal dengesizliklere sebep olabileceği iddia edilen başka etkenler de vardır. Bu yüzden, titreşim meydana gelen bir motorun belirlenmesi nispeten kolayken, bu arızanın sebebinin belirlenmesi çoğu zaman çok zordur.

2.2.1.3. Sıcak Noktalar ve Aşırı Kayıplar

Sıcak noktalar ve önceden tahmin edilemeyen kayıplar motorun üretim, tasarım veya tamir aşamalarında oluşabilir. Bu gibi durumlara sebep olabilecek olayları şu şekilde sıralayabiliriz:

- Rotor çubuklarının düzgün yerleştirilememesinden kaynaklanan arızalar.
- Rotor sac paketinin üretiminde simetride yaşanan bozulmalardan kaynaklanan arızalar.
- Rotor çubuklarıyla rotor sac paketinin istenilen sağlamlıkta birleştirilememesinden kaynaklanan arızalar.
- Rotor çubuklarıyla kısa devre halkasının kötü bağlantısı sonucu oluşan arızalar.

Motor üreticileri, üretimlerindeki kalite kontrol sistemleri ve yaptıkları testleriyle bu gibi arızaların çoğunu belirleyebilmektedir. Motor üretim ve kontrol aşamalarından geçince, arıza belirlenmesi daha zor hale gelmektedir. Bununla birlikte, yük altındaki motorlarda, ses, titreşim, ısı, akım, güç ve kaymaya bağlı verilerle motorun arızalı olup olmadığı hakkında bir fikir yürütülebilir.

2.2.1.4. Rotorda Kıvılcımlar Oluşması

Rotorda kıvılcımlar oluşmasına sebep olabilecek birtakım sebepler vardır. Oluşan bu kıvılcımların bazılarının rotora bir zararı yokken, bazıları da rotor arızalarına sebep olabilir.

Rotora bir hasar vermeyecek şekilde oluşan kıvılcımlar normal çalışma koşulları altında oluşabilir. Bu kıvılcımlar genelde küçük olduklarından dolayı veya motorun dışarıdan görülemeyecek kısımlarında oluşmalarından dolayı gözle görülemezler. Tam yüklü sabit hızla dönen bir rotorda kıvılcımlar oluşması beklenmezken, rotorda kıvılcımların oluşması durumu genelde besleme gerilimindeki dalgalanmalardan,

yükten kaynaklanan hızdaki dalgalanmalardan kaynaklanabilir. Motor tam yüklü halde çalışırken, dönen rotordaki rotor çubuklarını etkileyen merkezkaç kuvveti, motorun ürettiği elektromanyetik kuvvetten fazladır. Meydana gelebilecek kıvılcımlar arasında arıza sebebi olabilecek sebeplerden en sık karşılaşılanı, rotor çubuklarından birinin veya rotor çubuğuyla rotor çubuklarını birleştiren halka arasında kalan yerin kırılmasıdır. Rotor çubukları genelde, rotor çubuklarını birleştiren halkayla olan bağlantı yerlerinden kırılır. Rotorda kıvılcımlar oluşmasını önlemek için üretim aşamasında kusursuz bir üretim ve kullanım aşamasında da düzgün bir kullanım gerekir.

2.2.2. Manyetik Zorlanmalar

2.2.2.1. Elektromanyetik Etki

Rotor çubuklarından akan akımın oluşturduğu akı, elektromanyetik kuvvetler oluşturur. Oluşan bu kuvvetler rotor çubuğunun akımının karesiyle doğru orantılıdır. Bu kuvvetler, rotor çubuğunda akan akımın frekansının iki katı bir frekansta rotor çubuğunda titreşim meydana getirmektedir. Bu kuvvetler, rotor çubuklarının eğilmesine, bükülmesine sebep olacak zorlanmalar oluşturur. Oluşan bu zorlanmalar yeterince büyük olursa rotor çubuğunda meydana gelecek bir arızaya sebep olabilir. Bu tip arızaların, rotor çubuğu döküm yapılarak elde edilen motorlarda daha seyrek olduğu bilinmektedir.

2.2.2.2. Dengesiz Manyetik Çekiş

Dengesiz manyetik çekiş rotorun eğilmesine ve stator sarımlarına çarpmasına sebep olabilir. Teoride, ideal motorlarda rotor, hava aralığında tam ortaya yerleştirilmiştir. Manyetik kuvvetler zıt yönlerde dengelenmiştir ve rotorun eğilmesine sebep olmaz. Pratikte ise rotorlar eksen kaçıklığı ve rulman arızası gibi etkilerden dolayı hava aralığında mükemmel olarak ortalanmamış olabilir.

Motor tasarımcıları bu problemle ilgili olarak, hava aralığının alabileceği değerlerin bir üst ve alt limit değerlerini belirlemişlerdir. Bu limit değerler, motorun büyüklüğüne de bağlı olarak, hava aralığının % 10'u ile % 20'si arasında değişebilir.

2.2.2.3. Elektromanyetik Gürültü ve Titreşim

Bir önceki bölümde değinilen rotorun eksen kaçıklığı problemi, motorda ses ve titreşim gibi sorunlar ortaya çıkmasına da sebep olabilir. Motor yüklü halde çalışırken ortaya çıkan ses yüksüz çalışmaya göre daha fazladır. Eksen kaçıklığına bağlı titreşimler genellikle stator geriliminin frekansının bir fonksiyonu olarak değişir. Araştırmalar göstermiştir ki, ciddi derecede eksen kaçıklığı olan motorlarda, 2 – 3 dB’ lik fazladan bir gürültü oluşabilir.

2.2.3. Dinamik Zorlanmalar

Rotor ile ilgili sık karşılaşılan bazı dinamik zorlanmalar bu bölümde incelenecektir.

2.2.3.1. Rotor Etki Eden Kuvvetlerin Oluşturduğu Zorlanmalar

Rotor mili, motorun tam yüklü çalışırken karşılaşacağı momente uygun olarak tasarlanmıştır. Bu seviyenin üzerine çıkılması durumuyla geçici hal durumlarında karşılaşılabılır. Bu gibi geçici hal durumlarıyla genelde motor yol almaya başladığı ilk çalışma anlarında karşılaşılr. Rotor milinde normal şartlarda karşılaşılanın çok üstünde kuvvetle karşılaşılmasının bir başka şekli de rezonans oluşması durumudur. Rezonans durumu ile özellikle yüksek hızlı motorlarda karşılaşılr.

2.2.3.2. Merkezkaç Kuvvetlerinin Oluşturduğu Zorlanmalar

Rotor dizaynı yapılırken nominal hızın belli bir katına kadar hızlara güvenle çıkılabilmesi ihtimali göz önüne alınır. Nominal hızın çok üstüne çıkılmasa bile dikkat edilmesi gereken bir nokta ise bu hızlarda dönen bir motora o anda uygulanacak gerilimin rotor üzerinde oluşturacağı mekanik kuvvet ve termal zorlanmalardır. Bu konuya dikkat edilmemesi durumunda motorda ilk olarak yüksek bir titreşim ve ardından hasar oluşturabilecek durumlar oluşabilir. Dikkat edilmesi gereken bir başka nokta ise uygulamadan kaynaklanan sorunların motoru nominal devrinin çok üstüne çıkarmaması gerektiğidir.

2.2.3.3. Periyodik Zorlanmalar

Rotor mili motora zarar verecek periyodik zorlanmalara maruz kalabilir. Periyodik stresler, uygulamadaki motorun tahrik ettiği sistemle, motor arasındaki bağlantının eksen kaçıklığından veya aşırı sıkı takılmış kayış-kasnak bağlantılarından kaynaklanabilir. Bağlantı yapılırken periyodik streslerin oluşmaması için mekanik

aksamda gerekli önlemlerin alınması gerekir. Bu çeşit bir arıza meydana gelmesi durumunda üretici firma, sistemin gereksinimlerini karşılayacak en etkili önlemlerin alınmasını sağlar.

2.2.4. Çevre Şartlarından Dolayı Meydana Gelen Zorlanmalar

Çevre şartlarından kaynaklanan ve rotorun ömrünü kısaltan her türlü etken bu çalışmada zorlanma olarak kabul edilmiştir. Motor fanının çalışmasını etkileyecek tıkanıklıklar, aşınmış fanlar, nem veya rotor malzemesinin yapısını bozacak çeşitli kimyasallar zorlanma olarak ele alınabilir. Yüksek derecede nemli ortamlarda 0,254 – 1.016 mm arasında hava aralığına sahip motorlarda, statorun hava aralığına bakan kısımlarında ve rotor yüzeyinde paslanma meydana gelebilir. Bu gibi motor ömrünü zorlayıcı ortamlarda çalışacak motorlar seçilirken motor üreticileri bu konuda haberdar edilmelidir, bu şekilde motor üreticilerinin kaplama malzemeleriyle paslanmaya karşı önlem alabildiği bilinmektedir.

2.2.5. Mekanik Zorlanmalar

Motorlarda zorlanmalara sebep olan yukarıda belirtilen nedenlerden başka mekanik zorlanmalar başlığı altında toplayabileceğimiz bazı başka zorlanma çeşitleri de vardır. Bunlar, sac paketlerinin bütünlüğünün bozulması, kırık veya aşınmış parçalar, rotor / stator geometrisinde uyumsuzluk, hava aralığının düzgün olmayışı, rotor milinin eğikliği, rulman arızaları, imalat aşamasında yanlış malzeme seçimi şeklinde sıralanabilir.

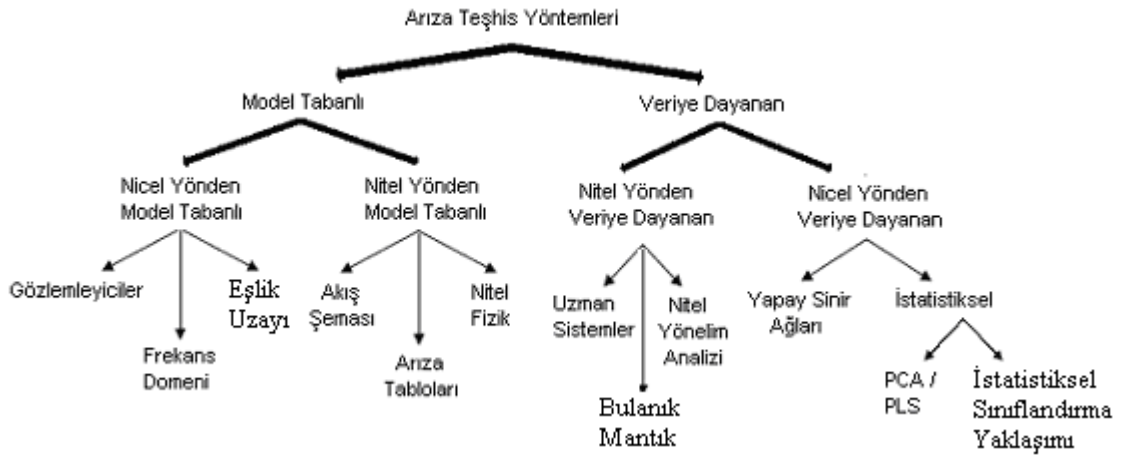
2.3. Elektrik Motorlarında Arıza Belirleme ve Tanılamasının Önemi

Kullanılan elektrik motorlarının sorunsuz çalışması gereken petrokimyasal, kimyasal endüstrilerde ve savunma endüstrisinde, kritik görevler yerine getiren motorların arızalanması; üretimde, arıza belirlenmesi ve onarım çalışmalarında çok yüksek maddi kayıplara ve hatta hayati kayıplara sebep olabilmektedir. Endüstri dallarının bu kayıpları ortadan kaldırmak için yaptığı yatırımlar, önleyici bakım çalışmalarında yoğunlaşmıştır. Önleyici bakım çalışmaları da öngörülmemiş, beklenmeyen arıza durumlarında üretimde aksamalara yol açmaktadır. Arızanın eşzamanlı saptanması ve arızanın başlangıç aşamasında tanısı ile önleyici bakım çalışmalarının bu şekilde başlaması durumunda üretimde hiçbir aksama olmayacaktır.

Arızanın eşzamanlı saptanması için makinenin performansı her an izlenmelidir. Arıza belirleme ve tanılmasındaki son gelişmeler motorun elektromanyetik alanının izlenmesi, motorun çalışma ısısının ölçülmesi, titreşim analizi ve motor akımının analizi gibi yöntemleri geliştirmiştir.

2.4. Arıza Belirleme ve Tanılama Yaklaşımları

Arıza belirleme ve tanısı konusunda analitik yöntemlerden yapay zeka yöntemlerine kadar değişik yaklaşımlar vardır. Arıza belirleme ve tanısına model tabanlı yaklaşırsak, kullanılan bazı metotlar sistemin tam matematiksel modeline ihtiyaç duymaktadırlar. Bununla beraber bazı metotlar ise hiçbir şekilde bir matematiksel modele ihtiyaç duymayıp sistemin bilinen giriş – çıkış değerlerinden faydalanırlar. Arıza belirleme ve tanı yöntemleri en genel anlamda model tabanlı ve veriye dayanan olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilirler. Aşağıda arıza belirleme ve tanılama yöntemleri bir şekilde özetlenmiştir [16].



Şekil 2.1 Arıza Belirleme ve Tanılama Yöntemleri

2.4.1. Model Tabanlı Arıza Belirleme ve Tanılaması

2.4.1.1. Nicel Yönden Model Tabanlı Arıza Belirleme ve Tanılaması

Nicel yönden model tabanlı yapılan arıza belirleme ve tanılama yöntemleri genellikle sistemin giriş çıkış modelinden ve durum uzayı modelinden faydalanır. Bu yöntemler gözlemleyici, eşlik uzayı ve frekans domeni metotları olarak sınıflandırılır.

Gözlemleyici tabanlı yaklaşımlar : Gözlemleyici tabanlı yaklaşımların ardındaki ana fikir, gözlemleyicilerden yararlanarak sistemden alınan sonuçlarla sistem çıkışları hakkında tahmin öne sürebilmektir. Sistemin tahmin edilen çıkışları ile sistemden beklenen çıkış arasındaki fark da sistemde bir arıza meydana geldiğinin habercisi olarak kullanılır [17, 18].

Frekans Domeni : Arıza belirlemesi yapılmak istenen sistemin transfer fonksiyonunun frekans domeninde incelenmesi sonucunda sistemin durumu hakkında bilgi sahibi olunabilir. Arıza belirlenmesi ve tanılama problemine bu şekilde yaklaşan Ding ve Frank'ın çalışması [19] bu konudaki araştırmalar için incelenebilir. Gözlemleyici tabanlı yaklaşım ile frekans domen yaklaşımı arasındaki benzerlik [16]'de lineer sistemler için gösterilmiştir.

Eşlik Uzayı Yaklaşımları : Eşlik denklemleri sistemin bilinen giriş ve çıkış bilgileri üzerine kurulan modellerin veya durum uzayı modellerinin yeniden düzenlenmiş ve genellikle dönüştürülmüş şeklidir. Eşlik uzayı yaklaşımlarındaki temel fikir, sistemin modelinin parametreleriyle gerçek sistemin parametrelerinin birbirine uyup uymadığının gözlemlenmesidir. Bu yaklaşımda arızanın tanısının en iyi şekilde yapılabilmesi için model yapısının en uygun şekilde oluşturulması gerekir. Bu konudaki çalışmalar da göstermiştir ki, gözlemleyici tabanlı yaklaşımlarla eşlik uzayı yaklaşımları arasında benzerlikler vardır.

2.4.1.2. Nitel Yönden Model Tabanlı Arıza Belirleme ve Tanılaması

Akış Şeması Yaklaşımları: Neden sonuç ilişkileri akış şemaları şeklinde gösterilebilir. Akış şeması, sistemi temsil eden birimler arasındaki oklarla sistemin gösterilmesidir. Arızadan sebep çıkarım yöntemlerinden biri olan akış şemaları, nitel modellerin temsili olarak gösterilmesinde en sık kullanılan yöntemlerdendir. Akış şemaları kullanılarak yapılan arıza belirleme çalışmalarına literatürde rastlanmaktadır [16].

Arıza Tabloları Yaklaşımları: Arıza tabloları, sistem güvenilirliğini analiz etmekte kullanılır. Arıza tablosu yöntemi 1961 yılında Bell Telefon Laboratuvarları'nda tasarlanmıştır. Arıza tabloları genellikle çeşitli seviyelerdeki çeşitli birimleri içerir ve bu birimler aralarında “ve” veya “veya” kapılarıyla bağlanmıştır. Bu konuda detaylı bilgi [16]'da verilmiştir.

Nitel Fizik Yaklaşımları: Arıza belirleme ve tanısında nitel fizik yaklaşımı, diferansiyel denklemlerden nitel denklemlerin elde edilmesi anlamına gelir. Bu konuda yapılmış çalışmalar [16]'da listelenmiştir.

2.4.2. Veriye Dayanan (Veri GÜDÜMLÜ) Arıza Belirleme ve Tanılaması

2.4.2.1. Nicel Yönden Veriye Dayanan Arıza Belirleme ve Tanılaması

Yapay Sinir Ağları Yaklaşımları : Arıza belirleme ve tanısında yapay sinir ağlarının kullanımı konusunda literatürde pek çok yayına rastlanmaktadır. Arıza tanısında değişik ağ yapıları kullanılmıştır. Arıza belirleme ve tanısında yapay sinir ağlarının en sık kullanılan öğrenme algoritmalarından biri geri yayılım algoritmasıdır.

İstatistiksel Sınıflandırma Yaklaşımları : Arıza tanısı aslında bir sınıflandırma problemidir, bu nedenle klasik istatistiksel örüntü tanıma yapısı altında incelenebilir. Arıza tanısı, sistemin arıza durumları hakkındaki, teorik bilgi ve istatistiksel özellikleri konusundaki bilgi birikimine dayanarak, zaman içinde sistem hakkındaki anlık tahminlerin bir araya getirilmesi problemi olarak da düşünülebilir.

2.4.2.2. Nitel Yönden Veriye Dayanan Arıza Belirleme ve Tanılaması

Uzman sistemler ve nitel yönelim analizi, sistemin geçmiş bilgilerinden yararlanan başlıca iki yöntemdir.

Uzman Sistem Yaklaşımları : Uzman sistemlerde kural–tabanlı olarak, sistem tanıyarak, özellik çıkartma yaklaşımı pek çok uygulama için kullanılmıştır. Uzman sistemler problemleri çözerken genellikle oldukça dar bir bilgi geçmişi ile çalışan özel sistemlerdir. Literatürde uzman sistemler kullanılarak yapılan arıza tanılaması çalışmalarına pek çok çalışmada rastlanmaktadır.

Nitel Yönelim Analizi Yaklaşımları : Nitel yönelim analizi ve kestirim, süreç izlemenin önemli unsurlarındandır. Sistemin yöneldiği durumun modellenmesi, bir süreçte gerçekleşen çeşitli önemli olayların açıklanmasında ve sistemin ileriki durumlarının tanısında çok yararlı bir yaklaşımdır. Arıza tanısına yönelik çalışmalar arasında nitel yönelim analizi yaklaşımı kullanarak yapılmış çalışmalara rastlanmaktadır [16].

2.5. Çalışmada Seçilen Yaklaşım

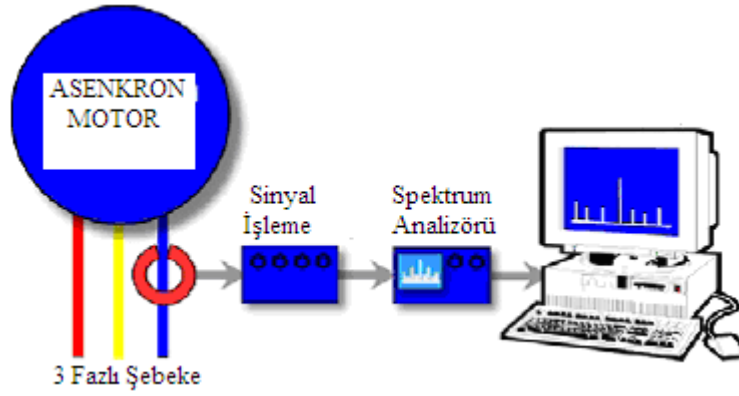
Bu çalışmada seçilen yaklaşım, teorik yönden, arızasız bir motorda stator-rotor hava aralığında oluşan pozitif yöndeki döner manyetik alanın, motorun rotor devresinde meydana gelebilecek bir arızada değişmesine dayanmaktadır. Asimetrik bir motorda, simetrik motorda oluşan pozitif yöndeki döner manyetik alana ek olarak negatif yönde de bileşenler oluşur. Negatif yönde oluşan bu döner manyetik alanın stator akımına olan etkisi, rotorda oluşan arızanın belirleme ve tanısında kullanılabilir. Bu çalışmada bu tanı yöntemi teorik yönden açıklanmış ve pratik yönden ise, Motorsan Ltd. Şti.'ne özel olarak yaptırılan rotor çubukları kırık olarak üretilmiş 71M4B tipi 0,37kW'lık sincap kafesli asenkron motorun, sağlam ve kırık rotorla çalışması incelenmiştir. Bu çalışma sırasında stator akımları gözlenmiş ve teorik olarak varılan sonuçlarla pratikte gerçek sistemden alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Meydana gelen arızanın sisteme teorikte ne gibi etkileri olacağı konusu üstünde çalışarak, bu teorik çalışma sonucunda elde edilen sonuçlarla gerçek sistemin çıkışlarının karşılaştırılması şeklindeki bir yaklaşım, Veriye Dayanan (Veri Güdümlü) Arıza Belirleme ve Tanılama yaklaşımının Nicel Yönden Veriye Dayanan Arıza Belirleme ve Tanılama sınıfında, İstatistiksel Sınıflandırma Yaklaşımları'na girmektedir.

2.6. Arıza İzleme Örnekleri

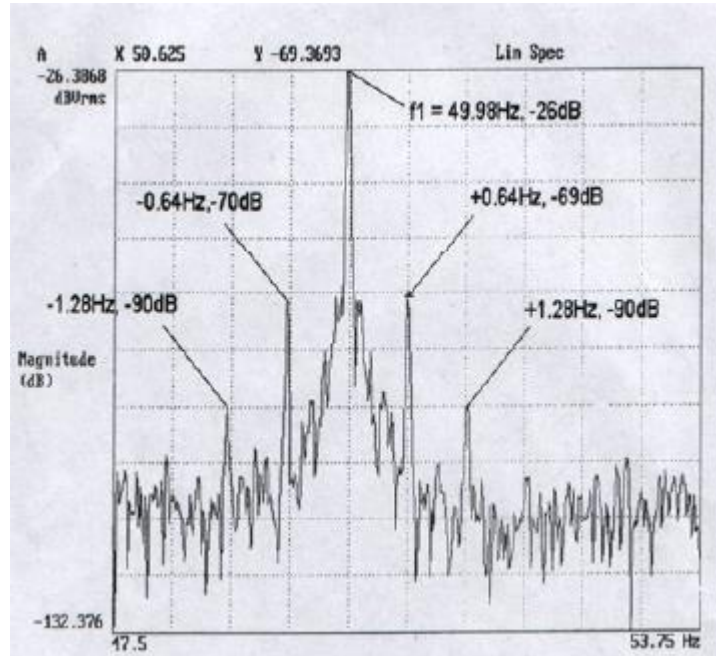
Örnek 1:

Motor parametreleri: 3-Faz, 11kV, 1950kW (2614HP), 120A, 50Hz, 1485d/d, Sincap Kafesli Asenkron Motor. Rotor çubuk sayısı: 60. Bu örnekte bahsedilen arıza belirleme ve tanılması, İngiltere'de düşük basınçlı bir kompresör motorunda gerçekleştirilmiştir [54]. Motorun tek faz stator akımına uygulanan frekans analizi yöntemi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Stator Akımına Yapılan Frekans Analizi

Motorun stator akımına uygulanan frekans analizinin sonucu aşağıda görülmektedir.



Şekil 2.3 Uygulanan Frekans Analizi Sonucu

Motorun stator akımının temel bileşeninin (49,98Hz) hemen iki yanında $\pm 0.64\text{Hz}$ 'de yan bantlar görülmektedir. Bu yan bantlar kayma frekansının iki katı olan yan bantlardır ve kırık rotor çubuğundan şüphelenilmektedir. Motor 104A çekmektedir ve dolayısıyla nominal yükte çalışmamaktadır. Rotor çubuğunun kırılarak, rotorda içinde bulunduğu oluktan çıkmasının, stator sargılarına da zarar verebileceğini diğer bir örnek motor için aşağıdaki resimde görebiliriz [54].



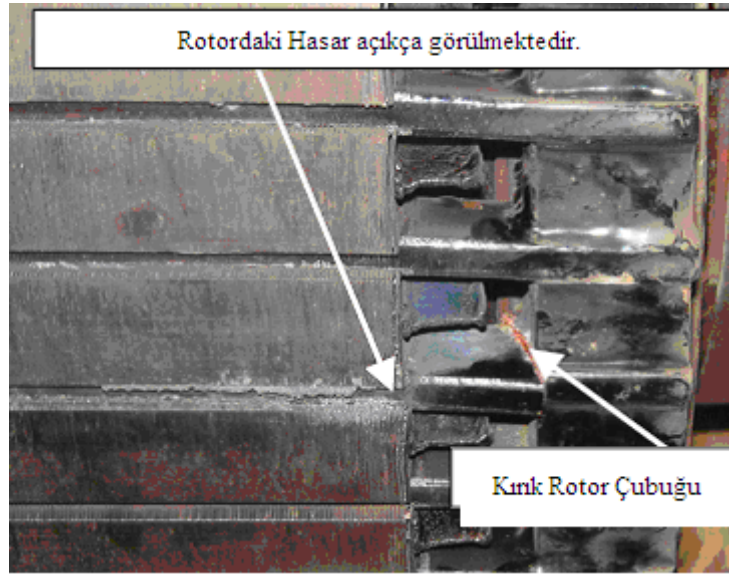
Şekil 2.4 Rotor Çubuk Arızası Meydana Gelen Bir Motor

Yukarıdaki resimde görülen rotor çubuk kırılmasının sonucu olan stator iç yüzeyindeki zararı da aşağıdaki resimde görebiliriz.



Şekil 2.5 Rotor Çubuğundaki Arızanın Statora Verdiği Zarar

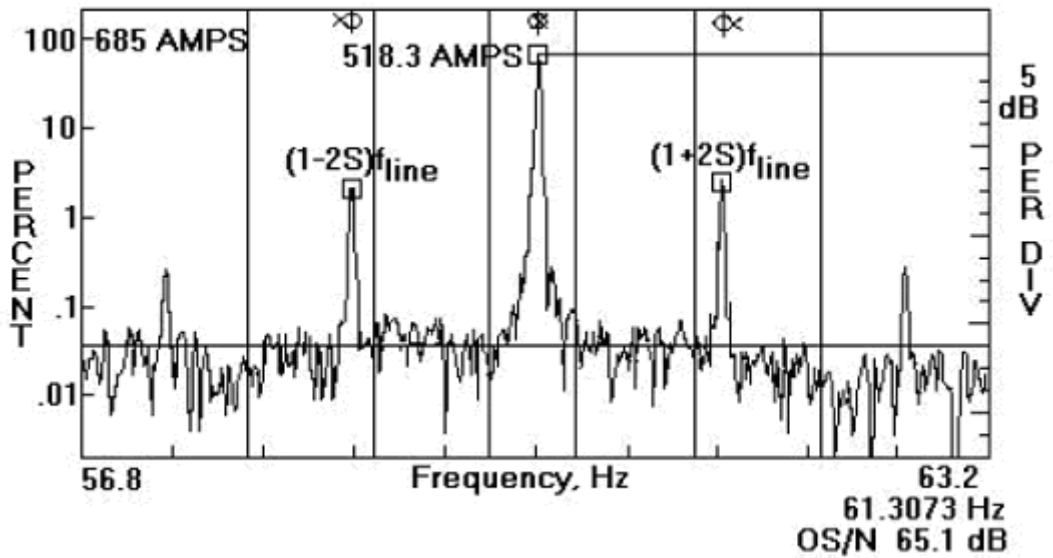
Düşük basınçlı kompresör motorunun rotorunda, aşağıdaki şekilde de gösterildiği gibi bir rotor çubuğunun tamamen kırıldığı gözlemlenmiştir. Stator akımının frekans analizi sonucu yapılan tanının doğru olduğu kanıtlanmaktadır.



Şekil 2.6 Kırık Rotor Çubuğu

Örnek 2:

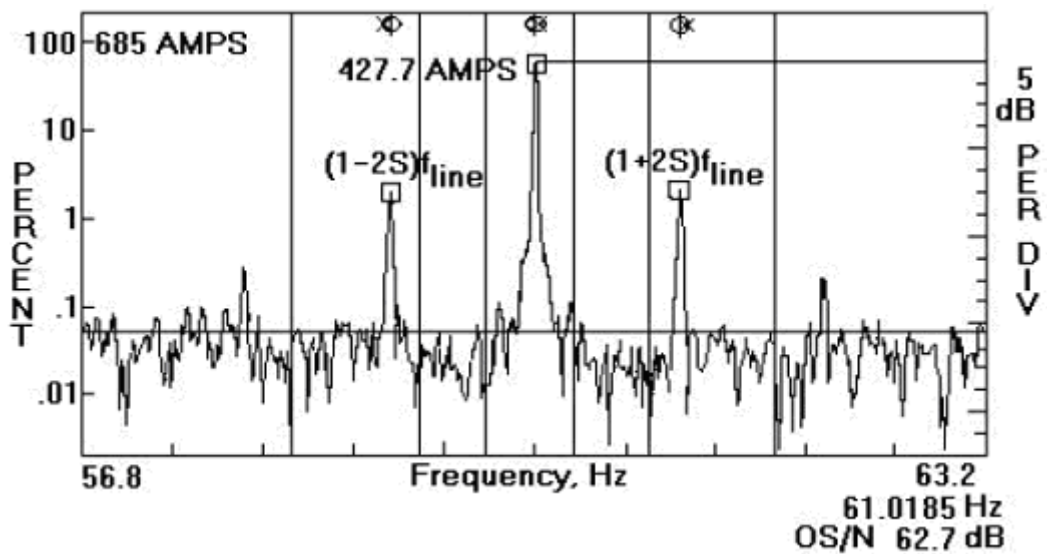
3600d/d'lık bir fan motorunun düzgün çalışmadığı ve çalışmasında birtakım anormallikler olduğu gözlemlenmiştir [55]. Motorun çalışması esnasında, şiddetinde değişimler olan bazı sesler de motorda bir arıza olabileceği fikrini kuvvetlendirmiştir. Motorun bir faz akımına ampermetre ile bakıldığında ampermetre ibresinin titreşim yaptığı ve sabit kalamadığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin motordan mı yoksa fandan mı kaynaklandığı bilinmemektedir. Motor akımına frekans analizi uygulanmıştır ve sonuçları aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 2.7 Fan Motorunun Frekans Analizi

Frekans analizinde görülen yan bantlar sonucunda motorda kırık rotor çubukları olacağı tahmin edilebilir. Yan bantların temel bileşenle aralarındaki fark ne kadar azsa rotor arızasının o kadar ciddi bir boyuta ulaşmış olduğu da söylenebilir. Yukarıdaki şekilden elde edilen sonuçlar, tanılamamın ne kadar doğru yapıldığının anlaşılabilmesi için aynı görevi yerine getiren diğer 3 motor için de gerçekleştirilmiştir ve herhangi bir yan banta rastlanmamıştır. Tanılamamızın doğruluğunu kuvvetlendirmek için yapılan bir diğer testte de, oluşan yan bantların kırılan rotor çubuklarından mı yoksa yükten kaynaklanan mekanik bir salınımın sonucunda görülen sinyaller mi olduğu incelenmiştir. Yapılan bu testte, arızalı motorun hızı ölçülmüştür. Motorun yükü azaltıldığında, motor devri artmalı ve kayma da azalmalıdır. Azalan kaymanın sonucunda, arızayı tanılamamızı sağlayan yan bantlar temel bileşene yaklaşmalıdır. Öte yandan, yan bantların yükten veya mekanik diğer etkenlerden kaynaklanması durumunda kaymada bir azalma olduğunda yan bantların yerinde herhangi bir değişiklik olmamalıdır. Aşağıdaki şekilde, yüklenmesi biraz azaltılan ve dolayısıyla kayması azalan bir motorun frekans grafiği görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, bir önceki şekilde görülen yan bantlar temel bileşene yaklaşmıştır ve bu sonuç da arızanın motorun kırılan rotor çubuklarından kaynaklandığını kanıtlamaktadır [55].

Yapılan akım ölçümleri ve frekans analizleri sonucunda varılan kırık rotor çubuğu tanısı sebebiye motor, üreticisine gönderilmiş ve rotor çubuklarının %40'ının kırık veya çatlamış olduğu gözlenmiştir.



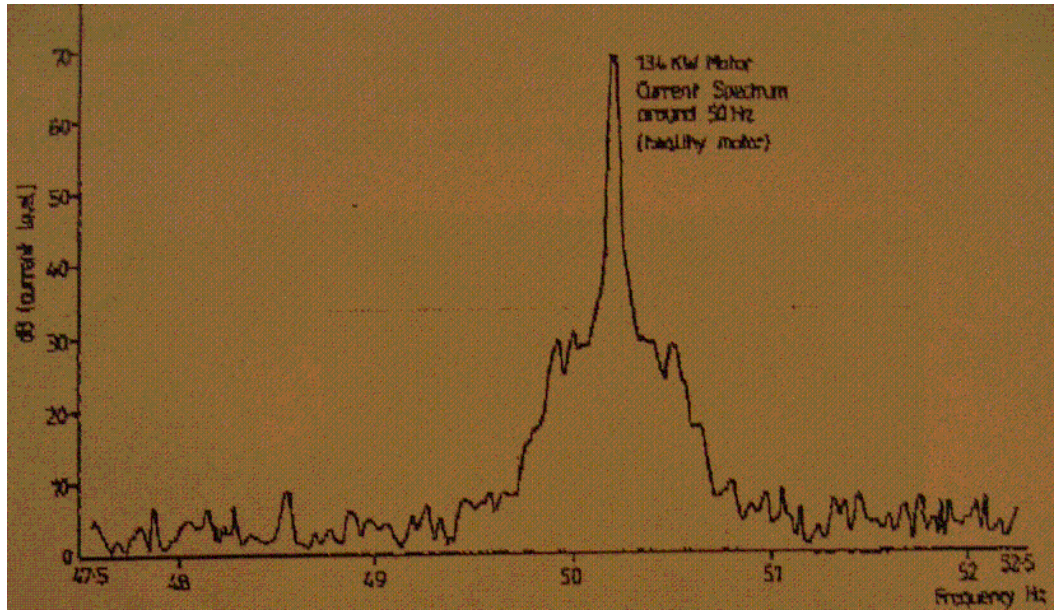
Şekil 2.8 Yük Değişiminden Sonra Fan Motorunun Frekans Analizi

Örnek 3:

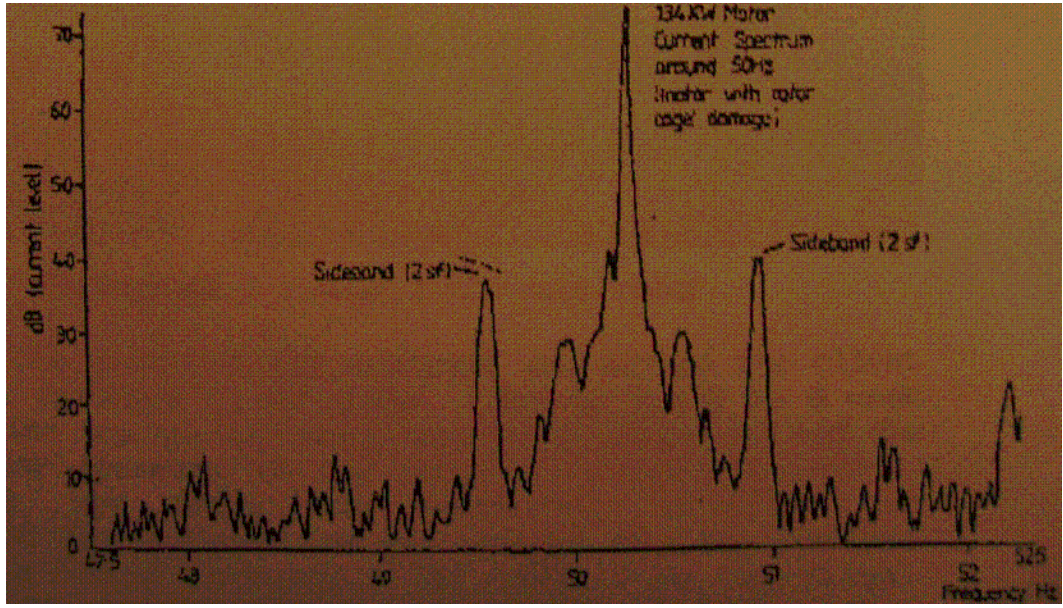
Motor özellikleri: 3 Fazlı, Sincap Kafesli Asenkron Motor, 134kW, (150HP), 440V, 210A, 1485d/d, 50Hz, 0,88 güç faktörü, yıldız bağlı, tek kafesli, rotor çubukları alüminyum döküm, 58 rotor çubuklu, kompresör motoru [27].

Aynı özelliklere sahip iki kompresör motoru çalışmaktadır. Kullanıcıdan gelen şikayetler, motorlardan birinin titreşimli olarak çalışması ve normal olmayan bir ses oluşturmasıdır. Motorda bir frekans analizi uygulanmadan önce, şüphelenilen rotor rulmanları iki kez değiştirilmiştir. Değiştirilen rotor rulmanlarıyla boşa çalıştırılan motor, serviste fark edilir bir titreşim yapmamış, fakat yenilenen rulmanlarla yük altında fabrikada çalışmaya başladığında tekrar aynı belirtileri göstermiştir. Boşa çalıştırılan bir motorda, kırık rotor çubuğunun sebep olduğu ses ve titreşim oldukça düşük seviyede oluşmaktadır. Bunun sebebi boşa çalıştırılan bir motorda rotor çubukları üzerinden çok az akım akmasıdır. Bu yüzden boşa çalışmada rotor çubuk kırığının belirlenmesi pek mümkün değildir. Yapılan rulman değişimlerinin bir sonuç vermemesi, motor arızasının kırılan rotor çubuklarından dolayı mı olduğunu, yoksa hava aralığının düzgün olmamasından mı kaynaklandığı veya motorun miline bağlı olan pompanın, motora bağlandığı mekanizmada oluşan bir titreşimin motor milini de etkileyerek motorun titreşimine sebep mi olduğunu düşündürmüştür [27].

Arızalı ve arızasız motorların stator akımlarına yapılan frekans analizi sonucunda aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.



Şekil 2.9 Arızasız Motorun Frekans Analizi



Şekil 2.10 Arızalı Motorun Frekans Analizi

Yapılan testte motorların 120A'lık bir stator akımıyla çalışmaları sağlanmıştır. Bu akım değeri, motorların %57 yüklendiğini göstermektedir. ($I_n=210A$) Motorun sökülerek incelenmesi sonucunda görülmüştür ki, yukarıda frekans grafiği verilen motorun 10 adet rotor çubuğu, rotor çubuklarını birleştiren kısa devre halkasına yakın yerlerden kırılmıştır ve ek olarak diğer bazı rotor çubuklarında da kırılma başlangıçları olduğu gözlemlenmiştir [27].

BÖLÜM 3. ROTOR ÇUBUK ARIZALARININ TEORİK VE DENEYSEL ANALİZİ

3.1. Giriş

Elektrik motorlarında bir arıza durumu söz konusu olduğunda, bu arızanın mutlaka bir etkisinin olacağı ve dolayısıyla oluşan arıza durumunun motorun bazı parametrelerini değiştireceğinden yola çıkılırsa, arıza durumunun belirlenmesi ve tanınmasında da arızanın sebep olduğu parametrelerdeki birtakım değişikliklerin gözlenmesi doğru bir yaklaşım olur.

Sincap kafesli asenkron motorlarda, rotor kafesi simetrik olduğu sürece, rotor çubuklarından akan akımlar eşit büyüklüktedir ve $2\pi/m$ (m = rotor çubuk sayısı) faz farkıyla sinüzoidal olarak akmaktadırlar [24]. Rotor kafesinin simetrikliği, çubuk kırılmasından veya kısa devre halkasının kırılmasından dolayı bozulduğu zaman çubuk akımlarının büyüklükleri farklı olacak ve çubuk akımları arasındaki sabit faz farkı da bozulacaktır.

Rotorda meydana gelen böyle bir arızanın, rotor çubuk akımlarındaki sabit faz farkını bozacağı ve bozulan faz farkının önceden normal olan bazı motor parametrelerini değiştireceği fikri bu bölümde teorik ve deneysel olarak incelenecektir.

3.2. Rotor Çubuk Arızalarının Teorik Analizi

3.2.1. Matematiksel Yaklaşım

Endüstride yaygın olarak kullanılan sincap kafesli veya kısa devre rotorlu asenkron makine, statoru 3, rotoru m fazlı bir yapıya sahiptir. Bu makinalarda rotor ve stator arasındaki hava aralığı düzgündür.

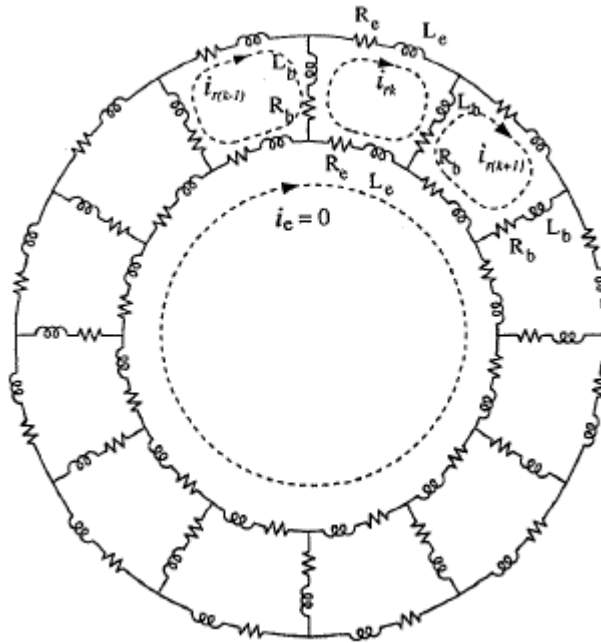
Literatürde, asenkron motorlarla ilgili farklı problemlerin incelenmesine imkan verecek çok sayıda matematiksel model kurulmuştur. Kurulan modeller arasında eş değer devrelerden, d-q modellerine ve abc modellerine pek çok yöntem kullanılmıştır. [21]'de gösterilen modellere karma modeller diyebiliriz. Bu modellere

karma modeller denmesinin sebebi, modellerde rotorda veya statorda meydana gelecek bir arızayı abc yöntemiyle modelleyebilmenin yanında, motorun diğer kısımlarına ait denklemlerinde d-q modelinin kullanılmasıdır. Bu modeller ile hem arızanın modellenmesi sağlanır, hem de olabildiğince hızlı bir model kurulabilir.

Sincap kafesli asenkron motorlarda rotor çubuk arızalarının matematiksel modelde gösterilebilmesi için uygun modelin seçilmesi çok önemlidir. Rotor çubuk arızalarının belirlenmesi konusunda yapılan çalışmalarda, modelleme yönünden değişik yöntemlere rastlanmaktadır.

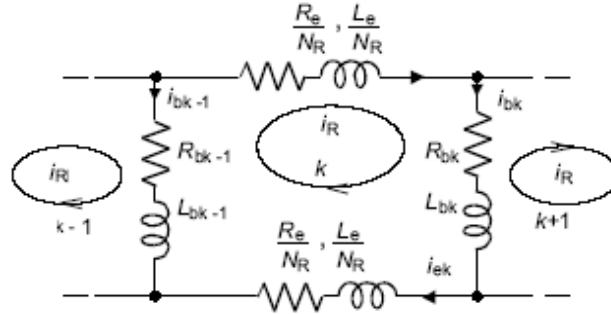
[56]'da kullanılan modelde, asenkron motor 4'e 4'lük matrislerle d-q yöntemiyle modellenmiş ve modelin çalıştırıldığı programlama ortamında her iterasyon sonucunda rotor çubuk arızasının etkisinin modele yansıtılması kullanılan bir [T] matrisi yardımıyla sağlanmıştır. [26]'da kullanılan matematiksel modelde, stator d-q modelleme yöntemiyle modellenmiş, rotor m-fazlı olarak bırakılmıştır. Bu, simülasyonun bir miktar daha hızlanmasını sağlayacaktır.

Rotorda meydana gelen asimetri sonucundaki akım dağılımını incelemek için sincap kafesli motorun rotorunun Şekil 3.1'deki birebir modeli göz önüne alınmalıdır [23].



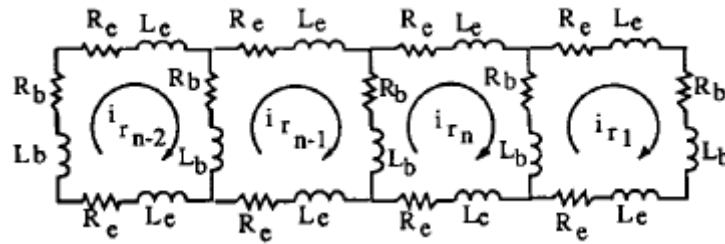
Şekil 3.1 Sincap Kafesli Asenkron Motorun Rotor Devresi

Rotorunda m adet çubuk olan bir motorda çevre akımları, komşu iki çubuk üstünde ve bu komşu çubukları birleştiren kısa devre halkası parçaları üzerinden akmaktadır. Çevre akımlarını daha detaylı görmek için Şekil 3.2'ye bakabiliriz [23].

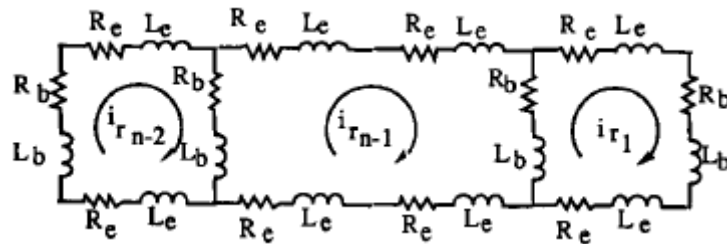


Şekil 3.2 Rotor Çubuk Akımları

Rotor arızaları, matematiksel modelde endüktans ve direnç matrislerinde uygun değişiklikler yapılarak temsil edilebilir. Arıza ile ilgili rotor gerilimleri ve akımları düzenlenerek temsil edilir. Sağlıklı bir rotor Şekil 3.5'deki gibi gösterilirse, bir rotor çubuğu kırılan rotoru Şekil 3.6'daki gibi düşünebiliriz [7].



Şekil 3.3 Normal Rotor Çubuk Yerleşiminin Gösterimi



Şekil 3.4 Bir Rotor Çubuğu Kırılmış Rotor Çubuklarının Yerleşimi

Rotor çubuklarının modelde nasıl gösterilmesi gerektiği konusunda iki yaklaşım yapılabilir. Bunlardan birincisi, Şekil 3.5'de görülen normal rotorun rotor çubuğu kırıldığında Şekil 3.6'daki duruma geldiğini kabul edip kırılan rotor çubuğunun tamamen kırıldığının ve üzerinden kesinlikle akım akmadığının düşünülmesidir. İkinci yaklaşım ise kırılan rotor çubuğunun üzerinden az da olsa bir miktar akım

akabileceğinin düşünülüp modeldeki direnç matrisindeki ilgili direncin örneğin 200 katına çıkartılmasıdır.

Kırık rotor çubuğunun modellenmesi konusundaki bu iki yaklaşımın ikisinde de rotor direncinin değişmesi gerekir. Aynı zamanda stator – rotor karşıt endüktanslarının nasıl değiştirilmesi gerektiği de düşünülmelidir. Rotor çubuğunun tamamen kırıldığı ve üzerinden hiç akım akmadığının kabul edildiği birinci yaklaşımda, üzerinden akım akmayan kırık bir rotor çubuğunda stator akımlarının bir karşıt endüktans oluşturamayacağı düşünülüp ilgili karşıt endüktansın modelden tamamen kaldırılması mantıklı bir yaklaşım olur. Rotor çubuğunun tamamen kırılmadığı ve direnç değerinin 200 katına çıkartıldığı ikinci yaklaşımda ise karşıt endüktansın hesaplanmasında zorluklar bulunmaktadır ve bu konu bu çalışmanın kapsamını aşmaktadır. Endüktans hesabı için [57,58]'e bakılabilir. Endüktans hesabının dışında, rotor çubuklarının her birinin temsil edildiği bir modelde, örneğin 52 çubuklu bir motorda, rotor devresine ait 52 adet denklem olacaktır. Kısa devre halkasının etkisi [26], mekanik denklem ve stator sargılarının da temsil edildiği bir modelde sistem 57 adet denklemle temsil edilmelidir. Bu 57 denklemde rotorun dönme açısına bağlı endüktans ifadelerini içeren ve lineer olmayan bir yapı söz konusudur. Bu konuda yapılan çalışmalar, doğru bir yaklaşımla sincap kafesli asenkron motorun hiçbir simetriklik kabul edilmeden bir modelinin yapılabileceğini göstermiştir[25, 26, 29, 46, 59]. Her bir rotor çubuğunun ayrı ayrı temsil edildiği bu modellerde dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri, endüktans matrisinin rotorun dönme açısına olan bağımlılığıdır [28]. Simülasyonda her bir iterasyonda endüktans matrisinin tersinin alınması gerekmektedir ki, rotor çubuğu sayısı arttıkça bu zaman alıcı bir işlem haline gelmektedir [47]. Ayrıca, bu şekilde modellemede karşılaşılabilecek bir başka sorun ise endüktans matrisinin tersinin her iterasyonda alınıp alınamayacağıdır. Endüktans matrisinin tersinin alınmasında bir zorlukla karşılaşmak istenmiyorsa, rotor devresindeki kısa devre halkasının da modele olan etkisini göz önüne almalıyız. Bu yöntemin, endüktans matrisinin tersinin alınmasının gerektiği durumlarda modellemeyi kolaylaştırdığı bilinmektedir[26].

Bir rotor çubuğu kırıldığında, önceden komşu çevrelerde akmakta olan örneğin I_{n-1} ve I_n akımları, $I_{n-1}=I_n$ koşulunu sağlayarak Şekil 3.4'daki gibi tek bir çevre akımı halini alır[56]. Bu koşulun sağlanması için matematiksel modeldeki matrislerde uygun

[illegible]

Örneğin rotordaki üçüncü çubuğun kırıldığını varsayalım, bu durumda rotor devresinde ikinci ve dördüncü çubuk üzerinden aynı çevre akımının dolaştığı düşünülebilir. Matematiksel modeldeki $[L_R]$ ve $[R_R]$ matrislerinde üçüncü satır ikinci satıra, üçüncü sütun ikinci sütuna eklendiğinde model, kırık rotor çubuğunu temsil edebilecek bir hale gelmiş olur. Bu işlem Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Matris işlemlerinde boyut sorunu çıkmaması için üçüncü rotor gerilimi ve üçüncü rotor akımı, ilgili gerilim ve akım matrislerinden kaldırılır. Stator–rotor karşıt endüktans matrisinde de ilgili karşıt endüktans ifadesi denklemden kaldırılır. Bu durumda tüm sistemi temsil eden denklemimizin rankı bir azalmıştır. Endüktans matrisinin bir satır ve bir sütun küçülmüş son hali Şekil 3.6’da gösterilmiştir [7].

[illegible]

31

Rotor çubuklarından birisinin kırılması durumunda bu çubuk üzerinden geçmeyen rotor çubuk akımı, arıza anında yukarıda matematiksel modelde de öngörüldüğü gibi kırılan çubuğa komşu çubuklardan geçer. Kırılan çubuğun yanındaki çubuklardan geçen akımın bu artışı, önceden hiçbir sorun olmayan rotor çubuklarından normalden daha fazla akım akmasına, işletme şartlarında bu rotor çubuklarının daha çok ısınmasına ve zaman içinde kırılmasına sebep olur. Bu durumda anlaşılmaktadır ki, rotor devresinde bir çubuğun kırılması, zincirleme bir etki oluşturarak, yanındaki çubukların zorlanmaya başlamasına ve zamanla bu çubukların da kırılarak diğer çubuklarda bir akım yığılmasına sebep olmaktadır.

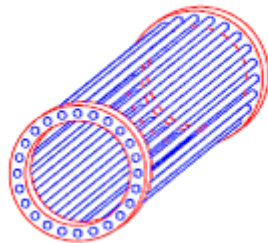
Statorda veya Rotor çubuklarında meydana gelebilecek bir asimetrinin modellenebileceği motor modellerinin kurulması zor olmakla beraber bu konuda yapılmış çalışmalar bulunmaktadır [26, 29, 59].

3.2.2. Teorik Yaklaşım

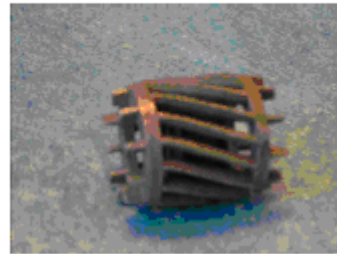
Bilinmektedir ki, simetrik bir kaynaktan beslenen, üç fazlı simetrik stator sargıları senkron hızda dönen bir manyetik alan oluşmasına sebep olmaktadır. Pozitif yöndeki bu döner manyetik alana ek olarak, negatif yönde de bir döner manyetik alan oluşacaktır. Kaynakta veya stator sargılarında herhangi bir asimetri bulunmuyorsa oluşan negatif yöndeki manyetik alan toplamda gözükmeyecektir. Yani, simetrik bir rotorda negatif yöndeki alan bileşenlerinin toplamının sıfır olması beklenir [60].

Kaynakta veya stator sargılarında meydana gelecek bir asimetride dönüş yönünde oluşan döner manyetik alana zıt yönde oluşan manyetik alanın etkisi kaybolmayacaktır [5, 14, 22, 58, 59].

Sincap kafesli rotor



Sincap kafesli rotorun bir resmi



Şekil 3.7 Sincap Kafesli Rotor

Yukarıda bahsettiğimiz döner alan teorisini rotor devresine uygulayalım. Aynı teorinin rotora uygulanmasında göz önünde bulundurulması gereken en önemli nokta, rotor devresindeki akımın ve endüklenen Elektromotor Kuvvetin (EMK) frekansının kaynak veya stator akımı frekansında değil kayma frekansında olduğudur.

s : Kayma.

f_1 : Kaynak frekansı, Hz.

f_2 : $s \cdot f_1$ Hz.

f_2 : Rotor akımının kayma frekansı, Hz.

Sincap kafesli asenkron motorun rotor çubuklarındaki akımlar, bir manyetik alan oluşturacaklardır. Oluşan bu manyetik alan, dönen rotora göre kayma frekansında ve aynı yönde dönmektedir. Sincap kafesli rotor simetrik olduğu sürece bu dönen manyetik alan, rotora göre kayma frekansında, rotora göre pozitif yönde dönecektir.

Rotor devresinde bir asimetri oluştuğunda, simetrik rotorda rotora göre kayma frekansında dönen manyetik alana zıt yönde, yani rotorun dönüş yönünün tersi yönünde ve kayma frekansında bir döner manyetik alan oluşacaktır.

Rasyonel mekanikte, mutlak hız, bağıl hız ve sürüklenme hızı gibi tanımlar vardır. Mutlak hız, rotor döner alanının sabit kısma göre hızı, bağıl hız rotor döner alanının dönen rotora göre hızı ve sürüklenme hızı da rotorun sabit kısma göre hızıdır [22].

Rotor çubukları sağlam bir motoru ele alalım, herhangi bir asimetri söz konusu olmadığında rotorda, rotora göre kayma frekansında ($s \cdot W_s$) pozitif yönde bir döner manyetik alan oluşur:

$$W_r + s \cdot W_s = W_s \quad (3.1)$$

Bu pozitif yöndeki manyetik alan, kaymanın hesabından:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.2)$$

ve dolayısıyla;

$$s = \frac{W_s - W_r}{W_s} \quad (3.3)$$

$$s \cdot W_s = W_s - W_r \quad (3.4)$$

$$W_r = W_s \cdot (1 - s) \quad (3.5)$$

Şeklinde doğrulanabilir.

Rotor çubuklarından birinin kırık olduğunu ve bu yüzden de rotor çubuk akımlarının oluşturduğu döner manyetik alanda kayma frekansındaki ($s \cdot W_s$) negatif bileşenlerin yok olmadığını düşünelim, bu durumun ifadesi $W_r - s \cdot W_s$ şeklindedir. Yukarıda W_r için elde edilen ifadeyi burada yerine koyarsak;

$$W_r - s \cdot W_s = [W_s \cdot (1 - s)] - s \cdot W_s \quad (3.6)$$

Bu denklemden arızalı rotorun ifadesi olarak;

$$W_r - s \cdot W_s = W_s \cdot (1 - 2s) \quad (3.7)$$

elde edilir.

Bunun sonucu olarak, kayma frekansında ve rotora göre negatif yönde dönen bu manyetik alan, durağan stator sargılarında aşağıda belirtilen frekansta akım ve Elektromotor Kuvvet (EMK) endükler [14, 23, 25, 30, 57, 58].

$$f_b = (1 - s)f - sf = (1 - 2s)f \quad (3.8)$$

$$f = f_1 \cdot (1 - 2s) \quad (3.9)$$

Literatürde bu matematiksel ifadeden, rotor çubuk kırıklarına bağlı iki kat kayma frekansı yan bandı olarak bahsedilir. Ortaya çıkan bu yan bant sebebiyle, momentte bir titreşim oluşur ve buna bağlı olarak, motorun ataletine bağlı olan bir hız salınımına sebep olan periyodik bir akım değişimi ortaya çıkar. Hızda oluşan bu salınım, (3.9)'da oluşan yan banda ek olarak $f = f_1 \cdot (1 + 2s)$ 'de bir başka yan bandın ortaya çıkmasına sebep olur. Bu sebeptendir ki, kırık rotor çubukları stator akımında $f = f_1 \cdot (1 \pm 2s)$ Hz frekanslarında akım bileşenleri endüklenmesine sebep olur [20, 28, 35].

$$f = f_1 \cdot (1 \pm 2s) \dots f = f_1 \cdot (1 - 2s) \text{ Rotor çubuğu kırığı sebebiyle.} \quad (3.10a)$$

$$\dots f = f_1 \cdot (1 + 2s) \quad (3.10b)$$

Kırılan rotor çubuğunun hızda sebep olduğu salınımlar sebebiyle oluşur.

Sincap kafesli asenkron motorlarda meydana gelen rotor arızalarının belirlenme ve tanınması konusuna pek çok farklı yaklaşımlarda bulunulmuştur.

Rotorda bir asimetri meydana gelmesi sonucunda, motorun ürettiği elektromanyetik momentte bir titreşim oluşur. Sürekli halde, momentteki bu titreşimin frekansı $2.s.W_1$ 'dir. Bunun sebebi, stator akımının pozitif ve negatif bileşenlerinin birbirine göre farklarının aşağıdaki denklemde verildiği gibi olmasıdır.

$$W_1 - (1 - 2s) \cdot W_1 = 2 \cdot s \cdot W_1 \quad (3.11)$$

Motorun ürettiği momentte oluşan bu titreşim, motorda istenmeyen ses ve titreşimlerin oluşmasına sebep olur. Bu titreşimlerden düşük seviyede olanlar bile, motor frekansı ile aynı frekansta olması durumunda sistemde bir rezonansa sebep olacağı için istenmemektedir. Stator gerilimlerinin ve akımlarının eşzamanlı belirlenmesi ile motorun ürettiği elektriksel momentin hesaplanma yöntemleri mevcuttur [14]. Hesaplanan moment, rotordaki asimetriden ötürü $2.s.W_1$ frekanslı titreşimleri içerecektir. Rotordaki arızanın büyüklüğü momentin salınım yaptığı aralıkla doğru orantılıdır [35].

Rotor asimetrisinin belirlenmesinde kullanılabilecek bir başka yöntem, eksenel kaçak akıların gözlemlenmesidir. Bunun için motor mili etrafına bir bobin yerleştirilip bobindeki frekans bileşenlerinin belirlenmesi gerekir.

Uygulanması zor olan bir yöntem ise x-ray ve ultrason tekniklerinin kullanılmasıdır.

Bunlar dışında, rotor asimetrisinin belirlenmesi için rotor hızındaki salınımlar da kullanılabilir. Fakat bu yöntemle rotordaki arızanın büyüklüğü hakkında bir bilgi elde edilmesi zordur. Ayrıca, hız ölçümünün yüksek bir çözünürlükte yapılması gerekir. Ek olarak, bu yöntemin kesinliğini yükün eylemsizliği de etkiler [14].

Literatürde bu yönde yapılan çalışmalar arasında, rotor arızasının belirlenmesi için motorun şebekeden ayrılmasını gerektiren yöntemler de incelenmiştir [61]. Bu yöntemde, kırık rotor çubukları olduğundan şüphelenilen motorun şebekeyle bağlantısı kesilir ve dolayısıyla sadece rotor devresi akısının statorda endüklediği gerilim rotor arızasının belirlenmesinde kullanılır. Motorda herhangi bir rotor asimetrisi bulunuyorsa, bu arıza statorda endüklenen gerilimleri etkileyecektir. Bu yöntemin kullanılmasıyla, arıza belirleme ve tanılamada karşılaşılan, yükün etkisiyle, rotor çubuğu kırığı etkisinin birbirinden tamamen ayrılması mümkün olacaktır.

Yukarıda bahsedilen tüm arıza belirleme ve tanılama yöntemlerinden günümüzde en çok ilgi göreni stator faz akımının frekans analizi yöntemidir. Bunun sebebi olarak, bu yöntemin motorun iç yapısına hiçbir müdahale gerektirmemesi, tek gerekenin stator tek faz akımı olmasıdır.

Stator bir faz akımının frekans analizi yönteminde stator akımına frekans analizi uygulanır. Frekans analizinde 50Hz'lik bir motorun temel bileşeninin her iki yanında yan bantlar oluşması rotor çubuk arızasının bir göstergesi olarak düşünülür.

Denklem $f = f_1.(1 \pm 2s)$ 'i değişik yüklenme durumları için irdelenecek olursak, rotordaki bir asimetri sonucu temel bileşenin her iki yanında oluşan yan bantların temel bileşene olan uzaklığı, yüklenme derecesi ile doğru orantılıdır. Bunun anlamı, $f = f_1.(1 \pm 2s)$ 'den de anlaşılabilceği gibi, yüklenme arttıkça kaymanın artacağı ve Denklem $f = f_1.(1 \pm 2s)$ 'in sonucunda ortaya çıkan değerlerin temel bileşenden uzaklaşacağıdır.

Örnek olarak, 50 Hz'lik rotor çubuklarından birkaçı kırık bir sincap kafesli asenkron motoru ele alalım. Kayma değeri olarak $s = 0.05$ için oluşacak yan bantlar;

$$f_{\text{yan bant},1} = (1 - 2.s).f_1 = (1 - 2.0,05).50 = 45 \text{ Hz.} \quad (3.12)$$

$$f_{\text{yan bant},2} = (1 + 2.s).f_1 = (1 + 2.0,05).50 = 55 \text{ Hz.} \quad (3.13)$$

olarak bulunur. Motorun yüklenme derecesinin azaldığını ve dolayısıyla kaymasının da azaldığını düşünelim, bu durumda, örneğin $s = 0.03$ için oluşacak yan bantlar:

$$f_{\text{yan bant},1} = (1 - 2.s).f_1 = (1 - 2.0,03).50 = 47 \text{ Hz.} \quad (3.14)$$

$$f_{\text{yan bant},2} = (1 + 2.s).f_1 = (1 + 2.0,03).50 = 53 \text{ Hz.} \quad (3.15)$$

olarak bulunur. Şimdi de, motorun yüklenme derecesinin arttığını ve dolayısıyla kayma değerinin de arttığını düşünelim, örneğin $s = 0.07$ için:

$$f_{\text{yan bant},1} = (1 - 2.s).f_1 = (1 - 2.0,07).50 = 43 \text{ Hz.} \quad (3.16)$$

$$f_{\text{yan bant},2} = (1 + 2.s).f_1 = (1 + 2.0,07).50 = 57 \text{ Hz.} \quad (3.17)$$

olarak bulunur. Bu üç durum için yapılan hesaplamalardan da görüleceği gibi, motorun yüklenme derecesi arttıkça, kayması da artacağından $f = f_1.(1 \pm 2s)$ 'e göre temel bileşen yanında oluşan yan bantlar temel bileşenden uzaklaşacaklardır. $f = f_1.(1 \pm 2s)$ 'den çıkarılabilecek bir başka sonuç, rotor çubuklarından birkaçı kırık

olan bir asenkron motorun boşta çalışmadaki akımına uygulanacak bir frekans analizinde, tahmin edileceği gibi kayma sıfıra çok yakın olacağından, yan bantlar temel bileşene çok yakın olacaktır. Kayma eğer sıfıra çok yakınsa görmeyi beklediğimiz yan bantlar temel bileşenden ayrı olarak gzkmeyecektir. Bu sebeptedir ki, sincap kafesli asenkron motorun stator bir faz akımına frekans analizi yapılarak uygulanan arıza tanı yöntemi yükte çalışan motorlar için uygulanmalıdır. Özellikle nominal kaymada ve nominal kaymanın üstünde bir kayma değerinde yapılan frekans analizinin çok daha sağlıklı bir arıza belirleme ve tanılama sağlayacağı bilinmektedir [14]. Bir motorun kırık olmayan hali ile bir rotor çubuğu kırık halinin oluşan yan bantlar yönünden ayrıntılı karşılaştırılması [29]'da incelenebilir. Rotor ubuğu kırığının pratik uygulaması Bölüm 3.3'de ayrıntılı olarak incelenecektir.

Bu çalışmanın amacında, temelde yatan, rotor çubuk arızalarının akıllı motor sürücüleriyle belirlenmesi ve tanısında kullanılabilmesi konusunda; asimetri sonucu ortaya çıkan yan bantların yerinin ve büyüklüğünün belirlenmesi için bir arıza tanı stratejisi geliştirilmesidir. Bu konuda aşağıdaki konuların dikkate alınması gereklidir:

- Değişik rotor dizaynları
- Geniş ölçekteki g seçenekleri
- Değişik yüklenme koşulları
- Mekanik yük karakteristikleri

Yukarıda verilen faktörler, üç fazlı asenkron motorlarda, sürücüyle gerçekleştirilebilecek bir arıza belirleme ve tanılama sisteminin doğruluğunu etkileyebilirler. Rotor ubukları kırılmış üç fazlı bir asenkron motorun teorik analizi [7]'de detaylı olarak incelenebilir.

Akıma ek olarak, hava aralığı akısı [14], moment, titreşim ve hız da rotor çubuğu kırığı meydana geldiğinde değişim gösterir. Bununla birlikte, endüstriyel bir ortamda arıza belirleme ve tanılama amaçlı tekniklerden hangisinin seçilmesi gerektiği konusu üstünde düşünülmesi gereken bazı noktalar vardır. Bunlar:

- i. Motorun analiz edilecek büyüklüğünü ölçmekte kullanılacak sensör sağlam olmalıdır.
- ii. Sensör ve analiz cihazları güvenilir olmalıdır.

iii. Arıza tanılması güvenilir olmalıdır.

iv. Oluşan arızanın niteliği ve niceliği hakkında bilgi verilmelidir.

v. İdeal olarak, arıza oluşuktan sonra kalan çalışma süresini tahmini olarak vermelidir. (Prognoz)

vi. İdeal olarak, oluşan arızanın sebebi hakkında sensörlerden alınan bilgiler yardımıyla eşzamanlı olarak bir kestirim yapılabilmelidir.

Yukarıda, i'den iv'e sıralanan maddelerin gerçekleştirilmesi, v ve vi'nin gerçekleştirilmesinden daha kolaydır. Bugün endüstride de kabul edilmektedir ki, [54] üç fazlı asenkron motorlarda rotor çubuk arızasının belirleme ve tanısında, stator akımının frekans analizi yapılarak, akımın içerdiği frekans bileşenlerine bakılması ve buna göre bir sonuca varılması yukarıda sıralanan yöntemler arasında en kolay uygulanabilen yöntemdir.

Stator akımındaki etki, frekans analizi yardımıyla incelenebilmektedir. Bir arıza oluştuğunda, arızanın belirlenmesi için frekans domeninde değil de zaman domeninde çalışılıyorsa, meydana gelen stator akımındaki değişikliğin fark edilmesi zordur [36].

Stator akımına FFT dönüşümü uygulanması yöntemi arıza tanısı için pek çok başka yöntemden daha iyi sonuç veren bir yöntemdir. Stator akımının frekans analizi yapılarak rotor çubuk arızasının belirlenmesi yöntemi ilk olarak Hargis, Gaydon ve Kamash tarafından yapılmıştır [33]. Ancak FFT uygulanmasındaki dezavantaj, temel bileşen yanında oluşacak diğer harmoniklerin büyüklüklerinin tahmin edilmesinin zorluğundan kaynaklanır. Bu harmoniklerin temel bileşene olan yakınlığı ve yukarıda belirtilen tahmindeki zorluk, sinyalin uzun bir zaman boyunca yüksek bir frekansta örneklenerek sinyalin bileşenlerine ayrılmasını zorunlu kılar [26].

Asenkron motorda arıza belirlenmesi ve tanısı yapılırken dikkat edilmesi gereken bir nokta da değişik rotor tasarımlarının, değişik güçteki motorların, değişik yük koşullarının veya yük karakteristiklerinin yapılan çalışmayı etkileyebileceğidir. Akılda bulunmalıdır ki rotor çubuklarının kırılması, stator akımında bir etkiye sebep olacağı gibi aynı zamanda hava aralığındaki akıya, üretilen momente, titreşime ve hıza da etkileri olmaktadır.

Örneğin, asenkron motorun ürettiği elektriksel moment, motorda bir rotor arızası oluşması durumunda, sürekli halde, sabit değerinin etrafında belli bir frekansta salınmaya başlayacaktır [26, 33 - 35].

Aynı şekilde motor hızı da rotor çubuğu kırıldığında bir salınım yapmaya başlayacaktır. Bu salınım, kırılan rotor çubuk sayısı arttıkça daha da gözle görünür bir hale gelecektir.

Rotor çubuklarından biri kırıldığında, kırılan rotor çubuğundan hiç akım akmadığını düşünürsek, önceden belli bir faz açısıyla rotor çubuklarından sinüzoidal bir şekilde akmakta olan akım, bu durumda sinüzoidalliğini kaybederek gitgide üçgen dalgaya dönüşmekte ve bir miktar artmaktadır [26]. Rotor çubuk arızalarında her zaman olduğu gibi kırılan rotor çubuğu sayısı zamanla artacağından, çubuk akımlarının şekli de gitgide üçgen dalga halini alacaktır [26].

Yapılan çalışmalar göstermiştir ki, sincap kafesli asenkron motorda bir rotor arızası meydana geldiğinde temel bileşenin her iki yanında oluşan yan bantlar, 50Hz'in harmoniklerinde de ortaya çıkmaktadır. Fakat harmonik derecesi arttıkça yan bantların da ayırt edilmesi güçleşmektedir [14, 57, 62]. Özellikle rotor çubuk arızası olan küçük güçteki motorlarda ($< 4\text{hp}$) beşinci ve yedinci harmonikler etrafında beklenen yan bantların görülmediğini deneysel çalışmalar kanıtlamaktadır [63].

Stator akımının frekans analizinin yapılarak rotor çubuk kırığı tanısına varılması için motorun nominal yükte çalışması koşulu yoktur. Fakat nominal yüke yakın yüklerde daha sağlıklı bir frekans analizi yapılabilir [27, 32].

Stator bir faz akımına bakılarak rotor çubuk kırıkları belirlenirken, devir ve kayma bilgisi eğer kesin olarak bilinmiyorsa, frekans analizi sonucu elde edilen yan bantlar, yük titreşiminden kaynaklanan yan bantlar olabilir. Bu durum arıza tanısını yanlış bir sonuca götürebilir. Yanlış tanının önlenmesi amacıyla, rotor hızının ölçülmesine gerek kalmadan yük etkileri ile kırık rotor çubuğu etkilerini ayırt eden yöntemler geliştirilmektedir [58]. Bu gibi hız ve kayma bilgisine ihtiyaç duymadan doğru bir tanıya varılabilmesi için motorun üç faz gerilim ve akım değerlerinin kullanılması gereklidir. Bu yöntemde, motorun gerçek akım değerleriyle, aynı yükte yüklenmiş bir matematiksel modelinin akım değerleri karşılaştırılır ve bu karşılaştırmaya göre bir sonuca varılır.

Sağlıklı bir motorda yük momentinden kaynaklanan salınımların stator akımında hangi frekanslarda ortaya çıkacağı aşağıdaki denklemle verilebilir [58].

$$f_{LOAD} = f_1 \pm m \cdot f_{ROTOR} = f_1 \left[1 \pm m \cdot \left(\frac{1-s}{p/2} \right) \right] \quad (3.18)$$

Burada; f_e = stator frek., $m = 1, 2, 3 \dots$, f_{rm} = rotor frek., p = kutup say., s = kayma.

Rotorun pozisyonuyla değişen hava aralığındaki düzensizlik, denklem (3.19)'da verilen denklemdeki frekanslarda yan bantlar oluştururlar. Aynı şekilde, kırık rotor çubuklarının da denklem (3.10)'da verilen frekanslarda yan bantlar oluşturduğunu biliyoruz. Bu iki denklemin (3.19), (3.20) belirttiği frekanslarla (3.18) 'nın belirttiği frekanslar karşılaştırılacak olursa, asenkron motorun çalıştığı yük aralığı içinde moment salınımlarının rotor çubuk kırılmasından kaynaklanan yan bantı bastırabileceği görülmektedir [58].

$$f_{ECC} = f_{ROTOR} \left[1 \pm k \cdot \left(\frac{1-s}{p/2} \right) \right] \quad (3.19)$$

$$f_{SLOT+ECC} = f_{ROTOR} \left[(k \cdot R \pm n_d) \cdot \left(\frac{1-s}{p/2} \right) \pm n_w \right] \quad (3.20)$$

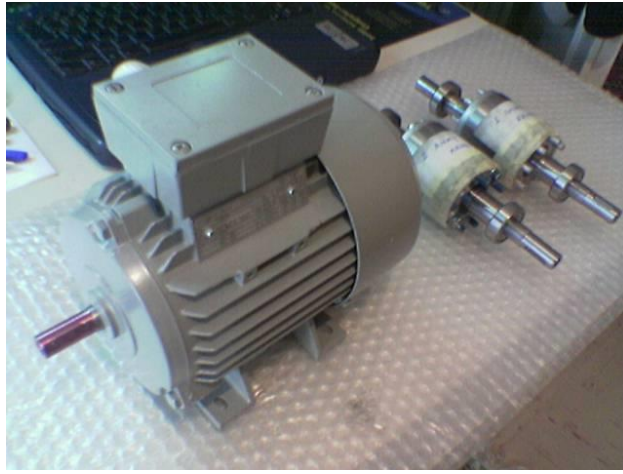
Kırık rotor çubuklarının, stator sarımındaki arızaların ve hava aralığı düzensizliğinin belirleme ve tanılama çalışması frekans analizleriyle birlikte [5]'de incelenebilir.

Literatürde, sincap kafesli asenkron motorların frekans analizine bakılarak ne kadar rotor çubuğu kırığı bulunduğu dair birtakım yaklaşımlar yapılmaktadır. Bu gibi yaklaşımların doğru sonuçlar vermeyebileceği [27]'de görülebilir.

3.3. Rotor Çubuk Arızalarının DeneySEL Analizi

Yapılan deneyde, özellikleri Ek - C'de verilen ve Motorsan Ltd. Şti. tarafından sağlanan 71M4B tipi, 0,37 kW'lık, 4 kutuplu, sincap kafesli bir asenkron motor kullanılmıştır. Bu test motoru, deney amacı doğrultusunda özel olarak üretilmiştir ve aynı motora ait 3 adet rotor bulunmaktadır. Bu rotorlardan birincisinin rotor çubukları sağlam, ikincisinin rotor çubuklarından bir tanesinde çubuk kırığı

bulunmakta, üçüncüsünde ise rotor çubuklarından iki tanesinde çubuk kırığı bulunmaktadır. Bu bölümde üç adet rotor sırayla motora takılarak, değişik rotor çubuğu kırıkları durumları için aynı özelliklere sahip üç motor karşılaştırılmış olacaktır. Döküm yöntemiyle elde edilen sincap kafesli bu rotorlarda, rotor çubuğu kırığı, döküm malzemesinin arasına yerleştirilen yalıtkan bir malzeme ile sağlanmıştır. Bunun dışında, sağlıklı bir stator ve rotora sahip bir motor da rotora dışarıdan müdahale edilerek deneye uygun hale getirilebilir. Bu durumun, özellikle, rulman değişimi de söz konusu olmadığı için mantıklı bir yaklaşım olduğu söylenebilir.



Şekil 3.8 Test Motoru ve Arızalı Rotorlar

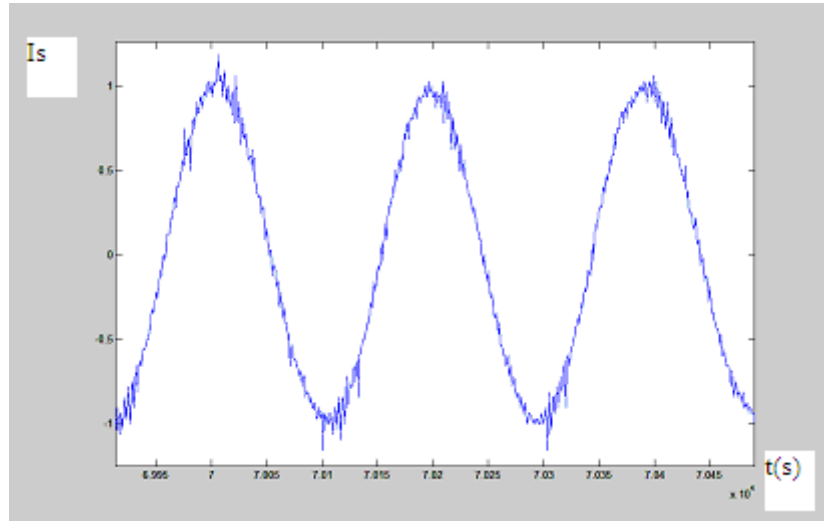
Yük motoru olarak kullanılan motorun özellikleri; 0,55kW, 1400d/d, 220/380 üçgen/yıldız, $\cos(\mu) = 0,76$, 50Hz, 2,60/1,50A. Motorların sürücüleri Control Techniques firması tarafından sağlanmıştır ve bu sürücülerin özellikleri Bölüm 4'te daha detaylı incelenecektir. Ölçme düzeneği olarak, YTÜ Güç Elk. Lab.'da bulunan LeCroy LT262 Waverunner2 kullanılmıştır. Motor millerinin, kaplin ile birbirlerine çalışma sırasında bir titreşim oluşturmayacak şekilde bağlanması gereklidir. Kullanılan kaplin, arasındaki esnek malzeme sayesinde, millerin birbirlerini %100 karşılamamalarından kaynaklanacak etkilerin frekans analizinde görünerek arıza belirleme ve tanısını etkilemesini önlemektedir.

Deney sırasında, her iki motoru da kontrol eden sürücüler, test motorumuzun nominal akımı olan 1,12A'in yarısı kadar akım çekmesini, dolayısıyla nominal yükünün %50'si kadar yüklenmesini sağlamıştır.



Şekil 3.9 Test Düzeneği

Bir el takometresi yardımıyla, her bir rotor için, yükte çalışan motorun o anki hızı ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Her üç rotor için de %50 ve %80 yük altında akım örnekleme işlemi yapılmıştır. Örnekleme işlemi osiloskop yardımıyla yapılmıştır ve örnekleme frekansı 10kHz olup, örnekleme süresi ise 10s'dir.



Şekil 3.10 Örneklenen Stator 1 Faz Akımı (50 Hz)

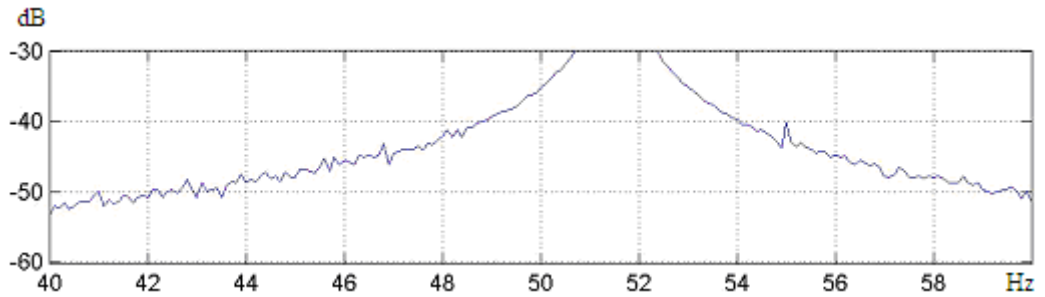
Literatürde, bu konudaki deneysel çalışmalarda, 2,5 kHz'lik örnekleme frekansı ile ve 1s'nin üzerinde olan bir örnekleme süresiyle, arıza belirlemesi ve tanısı için yeterli çözünürlükte bir frekans analizi yapılabilmesinin mümkün olduğu görülebilir.



Şekil 3.11 Ölçüm Yapılan Osiloskop (LeCroy LT262 Waverunner2)

Osiloskopa örneklenen değerlere, MATLAB programındaki fft komutu kullanılarak frekans analizi yapılmıştır. Elde edilen değerlere MATLAB’de bakıldığında, örneklenen akımın frekans analizinde, temel bileşeninin 50Hz olmadığı ve her bir rotor için çok az da olsa bir miktar değiştiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi yeni sürücülerde bulunan ve kayma kompanzasyonu adı verilen bir özelliktir. Kayma kompanzasyonu, sürücünün frekans referansını değiştirerek, motor yükünün değişmesi durumunda bile, motor hızının istenen devirde kalmasını sağlayan bir sürücü özelliğidir.

%50 Yükleme durumunda, elde edilen sonuçlardan görülmektedir ki sağlıklı rotorla yapılan deneyde, herhangi bir yan bant oluşması beklenmezken, çubuğu kırık olan rotorlara göre temel bileşene daha yakın bir yerde (≈ 46.7 Hz, 54.9 Hz) küçük yan bantlar vardır. (Temel bileşenin frekansı: 51.499Hz, el takometresi ile ölçülen devire göre hesaplanan kayma: $s = 0.0533$)

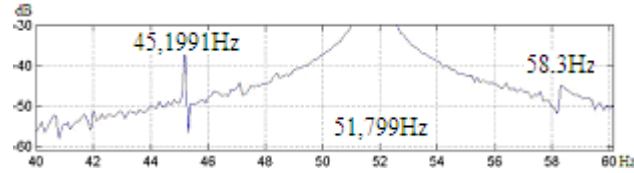


Şekil 3.12 %50 Yüklü, Kırksız Rotorlu Motorun Frekans Analizi

Bunun sebebini şu şekilde açıklayabiliriz; Stator akımının frekans analizi ile rotor çubuk kırıklarının belirlenmesi ve tanısı yöntemi, motor fabrikalarında aynı üretim bandında, yeni üretilmiş motorların üretim kalitelerine göre sınıflandırılmasında da

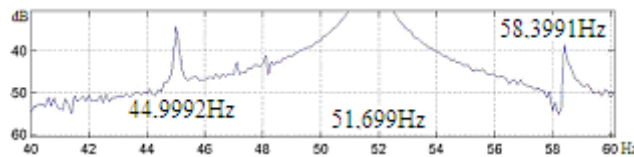
kullanılmaktadır. Ayrıca sağlıklı motorda görülen göreceli olarak küçük yan bantlar, rotorun çubuklarının kırık olduğunu göstermez. Bu yan bantlar, rotor devresindeki çubuklar arasındaki, örneğin rotor çubuğunun döküm işlemi sırasında oluşan bir direnç farkının sebep olabileceği, bir asimetriyi göstermektedir.

Aynı durumda, %50 yüklenme için, sağlıklı rotor çıkartılıp, motora rotor çubuklarından birinin kırık olduğu bilinen rotor yerleştirilerek yapılan deney sonucunda aşağıdaki grafik elde edilmiştir. (Temel bileşenin frekansı: 51.799Hz, el takometresi ile ölçülen devire göre hesaplanan kayma: $s = 0.0533$, çıkan yan bantlar: $f_{A1} = 45,1991 \text{ Hz}$, $f_{A2} = 58,3 \text{ Hz}$)



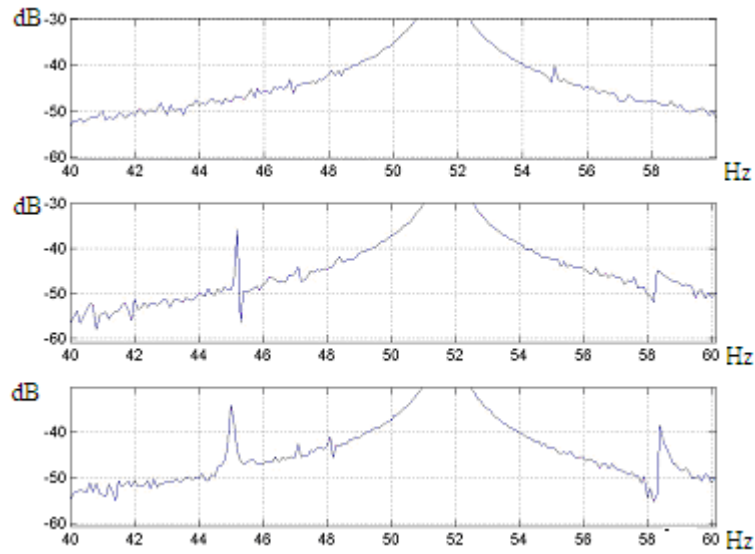
Şekil 3.13 %50 Yüklü, 1 Kırıklı Rotorlu Motorun Frekans Analizi

Bu grafikte, Bölüm 3.2’de anlatılan $(1 - 2s) \cdot f$ açıkça görülmektedir ve bu frekans bileşeni rotor çubuk kırığına işaret etmektedir. Çubuk kırılmasından dolayı oluşan asimetrinin sebep olduğu rotordaki hız dalgalanmasının etkisi de temel bileşenin sağ tarafında, 58,3 Hz’de görülmektedir. Şekil 3.12 ile şekil 3.13’ün karşılaştırılması ile rotor çubuk kırığının motor akımına etkisi anlaşılabilir. Bir çubuğu kırık rotor çıkartılıp, iki çubuğunun kırık olduğu bilinen bir rotor yerleştirildikten sonra yapılan deney sonucunda, örneklenen stator akımının MATLAB’de frekans analizi yapıldığında aşağıdaki grafik elde edilmiştir. (Temel bileşenin frekansı: 51,699Hz, el takometresi ile ölçülen devire göre hesaplanan kayma: $s = 0,06$, çıkan yan bantlar: $f_{A1} = 44,9992 \text{ Hz}$, $f_{A2} = 58,3991 \text{ Hz}$)



Şekil 3.14 %50 Yüklü, 2 Kırıklı Rotorlu Motorun Frekans Analizi

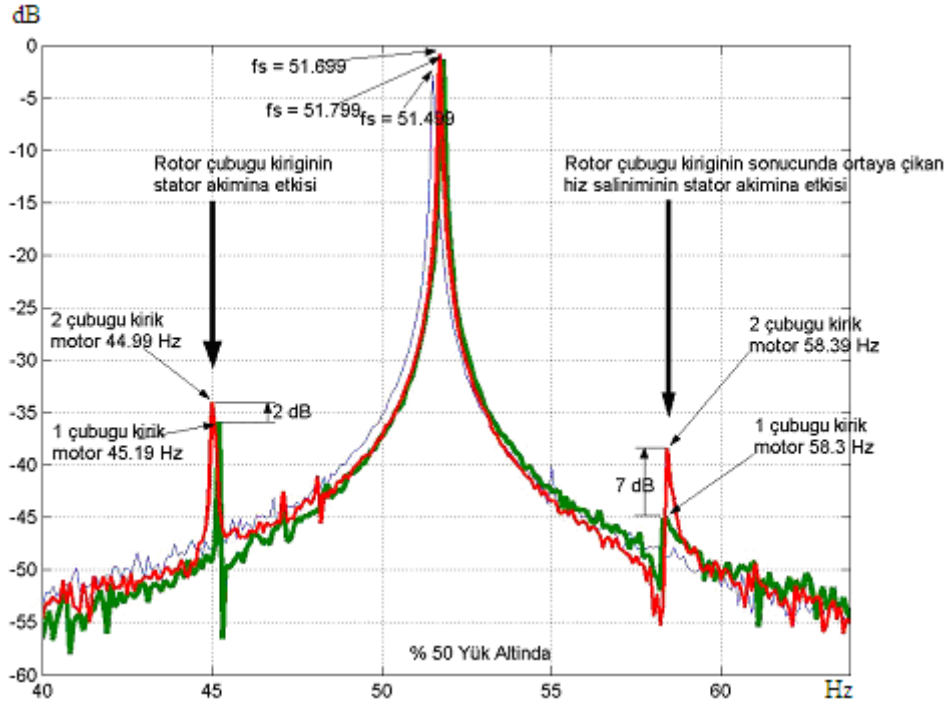
Bu grafikte, teorik analiz yapıldığı Bölüm 3.2’de de detaylı olarak anlatıldığı gibi rotor asimetrisine bağlı yan bantlarda bir miktar yükselme görülmüştür. İki rotor çubuğu kırık olan rotor takıldığında, rotordaki asimetrinin derecesi bir önceki duruma göre arttığından dolayı, bu arızanın hava aralığındaki etkisi ve dolayısıyla stator akımındaki etkisi de artmıştır. Şekil (3.15)’de 0,1 ve 2 rotor çubuğu kırık olduğu bilinen rotorlar için %50 yüklenme durumundaki stator akımı frekans analizlerini alt alta görmekteyiz.



Şekil 3.15 %50 Yüklü, 0, 1 ve 2 Kırıklı Rotorlu Motorların Frekans Analizi (Alt alta)

Rotor asimetrisi sonucunda ortaya çıkan yan bantların frekanslarından da görülebileceği gibi, aynı yüklenme koşulları altında (%50 yüklenme) kayma aynı değeri alacağından, değişik rotor çubuğu arızası durumlarında bile, yan bantlar çok yakın frekanslarda oluşacaktır. Buradan, bir motor için rotor çubuğu arızasından kaynaklanan yan bantların frekanslarının, motorun o anki stator akımı frekansına ve kayma değerine bağlı olduğu sonucuna varabiliriz.

Şekil 3.16’da 0, 1 ve 2 rotor çubuğu kırık olduğu bilinen rotorlar için stator akımına yapılan frekans analizi sonuçları, daha detaylı bir grafikte, bir arada gösterilmiştir.



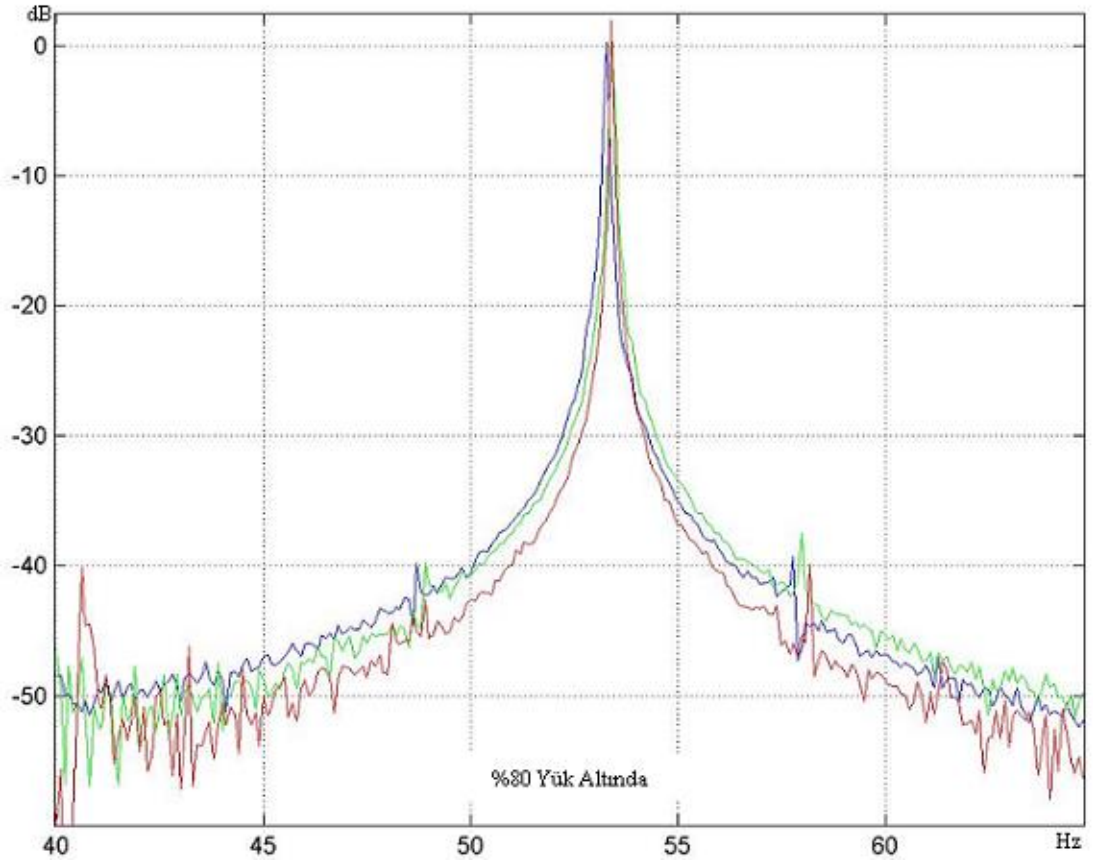
Şekil 3.16 %50 Yüklü, 0, 1 ve 2 Kırıklı Rotorlu Motorun Frekans Analizi

Yukarıdaki grafikte, Mavi: Kırıklı rotor için, Yeşil: 1 Kırıklı rotor için, Kırmızı: 2 Kırıklı rotor içindir. 1 Kırıklı rotoru olan motor ile 2 kırıklı rotoru olan motorun frekans analizleri arasındaki bir başka fark da, temel bileşenin sağ tarafındaki yan bantta görülmektedir.

Bölüm 3.2’de açıklandığı gibi, temel bileşenin sağ tarafında oluşan yan bant, asimetrinin sebep olduğu, hızdaki salınımdan dolayı oluşmaktadır. 1 Kırıklı rotoru olan motor ile 2 kırıklı rotoru olan motorun temel bileşenlerinin sağında yer alan yan bantları arasında 7 dB’lik bir fark oluşmuştur. Bu fark bize, artan rotor çubugu kırığı sayısının aynı statora sahip bir motorda, motor hızında daha yüksek seviyede bir salınıma sebep olduğunu göstermektedir.

Bölüm 3.2’de bahsedilen, stator akımının frekans analizi sonucu temel bileşene yakın oluşan yan bantların yükten kaynaklanabilme olasılığı, yapılan uygulamada söz konusu değildir çünkü yük her durumda aynı kalmakta ve sadece rotor değişimi yapılarak diğer bütün parametrelerin aynı kalması sağlanmış olmaktadır.

Fakat, aynı motorun değişik yüklenme koşullarındaki frekans analizine bakılacak olursa, yüklenme derecesi arttıkça kayma değerinin büyüyeceği göz önüne alınarak daha fazla yüklenen bir motorun rotor çubuk arızalarına bağlı yan bantlarının temel bileşenden daha uzaklaşacağı söylenebilir.



Şekil 3.17 %80 Yüklü, 0, 1 ve 2 Kırıklı Rotorlu Motorun Frekans Analizi

Şekil 3.16 ile aynı şekilde, yukarıdaki grafikte de, mavi: kırıklı rotor, yeşil: bir kırıklı rotor, kırmızı: 2 kırıklı rotoru temsil etmektedir. %80 yüklenme durumunda alınan değerler bize %50 yüklenme durumunda olduğu kadar net sonuçlar verememektedir. Bunun sebebi olarak; deney yapılan motorun gücünün küçük olması, rotor çubuk arızalarının pratikte yüksek güçteki motorlarda meydana gelmesi söylenebilir. İdeal olarak, rotor çubuk arızalarının analizinde kullanılacak yöntemin, rotor çubuk arızaları dışındaki diğer tüm etkenlerin etkilerini ortadan kaldıracak şekilde seçilmesi gerekmektedir. Görüldüğü gibi %80 yüklenme durumunda, %50 yüklenme durumundakine göre sinyal üstünde daha fazla gürültü bulunmaktadır. Tahmin edilmektedir ki, bu gibi sebeplerden, %80 yüklenme durumu için elde edilen bu şekildeki yan bantların varlığından net olarak söz edilememektedir.

Bu deneyin, %50, %80 ve %100 yüklenme durumlarında yüksek güçteki bir motorda tekrarlanmasıyla, beklenen yan bantların fark edilebilirliğinin çok daha fazla olmasının sağlanacağı düşünülmektedir.

3.4. Teorik ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Bölüm 3.2’de, sincap kafesli asenkron motorun rotor çubuklarının kırılması durumunda, bu arızanın stator akımında $f = f_1.(1 \pm 2s)$ frekanslı bileşenler ortaya çıkarması gerektiği belirtilmiştir. Bölüm 3.3’te ise rotor çubuğu kırığı olduğu bilinen bir motora frekans analizi uygulanmış ve sonuçta grafiklerde birtakım yan bantlar görülmüştür. Yapılan deney sonucunda, %50 yüklenme durumundaki test motorunun değişik rotor kırığı durumlarında elde edilen frekans analizleri, Bölüm 3.3’te verilmiştir. Bu bölümde teorik yaklaşımla Bölüm 3.2’de verilen frekans analizi yönteminin, Bölüm 3.3’te rotor çubuğu kırığı olduğu bilinen bir test motoru için ne kadar doğru sonuçlar verdiği irdelenecektir.

Uygulamamızda, ölçüm için kullanılan osiloskobun akım probunun olması ve akımın 10kHz ile 10s boyunca örneklenmiş olmasından dolayı deneysel çalışmamızın yeterince doğru yapıldığını düşünürsek; deney sonucu elde ettiğimiz grafiklerden yola çıkarak motor parametrelerini hesaplayıp, bulunan değerlerin gerçek motor parametreleriyle karşılaştırılması uygun bir yaklaşım olur.

%50 Yüklenme için 1 rotor çubuğu kırık rotorla alınan ölçümlere frekans analizi yapılmasıyla elde edilen Şekil 13’den görüleceği gibi, asenkron motor sürücüsünün kayma kompanzasyonundan dolayı, akımın temel bileşeninin frekansı 51,799Hz’dir. Şekilde oluşan yan bantların 45,1991Hz ve 58,3Hz frekans değerlerinde olduğu görülmektedir. Frekans analizindeki bu değerler için el takometresi ile ölçülen hız 1420d/d’dır. 1420d/d’lık hız, motorun o an 0,0533’lük bir kayma değerine sahip olduğunu göstermektedir. Deney sonucu elde ettiğimiz yan bantların frekanslarından yola çıkarak hesaplarsak: ($f_1 = 51,799\text{Hz}$.)

$$58,3000 = f = f_1.(1 + 2s) \quad \text{ve}$$

$$45,1991 = f = f_1.(1 - 2s)$$

Buradan, motorun o anki kayma değeri: $s = 0,0630$, hız ise $n = 1405\text{d/d}$ olarak bulunur. Bu değerler el takometresi kullanılarak bulunan hız ve hesaplanan kayma değerlerinden az bir farklılık göstermektedir.

Aynı şekilde, %50 yüklenme için 2 rotor çubuğu kırık rotorla alınan ölçümlerde, akımın temel bileşeninin frekansı 51,699Hz’dir. Şekil.14’te oluşan yan bantların yeri 44,9992Hz ve 58,3991Hz olarak görülmektedir. Frekans analizindeki bu değerler için

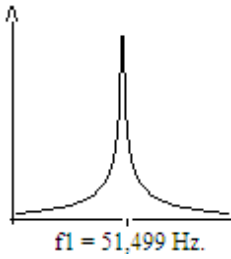
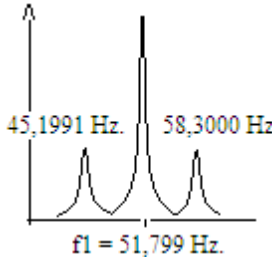
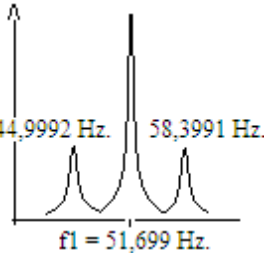
el takometresi ile ölçülen hız 1410d/d'dır. 1410d/d'lık hız, motorun o an 0,06'lık bir kayma değerine sahip olduğunu göstermektedir. Deney sonucu elde ettiğimiz yan bantların frekanslarından yola çıkarak hesaplarsak: ($f_1 = 51,699\text{Hz.}$)

$$58,3991 = f = f_1.(1 + 2s) \quad \text{ve}$$

$$44,9992 = f = f_1.(1 - 2s)$$

İki rotor çubuğu kırık olduğu bilinen motorun bu değerlerinden yola çıkılarak motorun o anki kayma değeri: $s = 0,06478$, hız ise $n = 1402\text{d/d}$ olarak bulunur. Bu değerler de el takometresi kullanılarak bulunan hız ve hesaplanan kayma değerlerinden az bir farklılık göstermektedir. Bu anlatılanlar Tablo 3.1'de özetlenmiştir. Grafiklerde görülen, sinyal üstündeki yan bantların haricindeki bileşenlerin neden kaynaklandığı araştırılmalıdır. Gürültüden kaynaklanmış olabileceği durumlar da söz konusu olabilir.

Tablo 3.1: Frekans Analizleri, Ölçülen Hız, Hesaplanan Kayma

Osiloskopla Alınan Akım Örneklerine Uygulanan Frekans Analizi Sonucu	Kırıklı Rotorla Yapılan Frekans Analizi	1 Kırık Rotorla Yapılan Frekans Analizi	2 Kırıklı Rotorla Yapılan Frekans Analizi
			
<u>HIZ :</u> El takometresi ile ölçülen hız Elde edilen grafiklerden hesaplanan hız	1420 d/d x	1420 d/d 1405 d/d	1410 d/d 1402 d/d
<u>KAYMA :</u> El takometresi ile ölçülen hızdan hesaplanan kayma Elde edilen grafiklerden hesaplanan kayma	0,0533 x	0,0533 0,0630	0,06 0,06478

BÖLÜM 4. AKILLI SÜRÜCÜLERİN EŞZAMANLI ARIZA BELİRLEME OLANAKLARI

4.1. Sürücü Özellikleri

Sürücüler, en basit anlamda, alternatif akım motorlarını pozisyon geri beslemesi olan veya olmayan durumlarda kontrol edebilen akıllı birimlerdir. Motor sürücüleri tarihsel gelişimlerinde ilk kullanılmaya başlandığında bir güç katı olarak kullanılmıştır. Motor sürücülerinin, kendi özelliği olarak veya sonradan eklenebilecek şekilde bazı başka özelliklerinin de olması beklenir [37]. Bu özellikler şu şekilde sıralanabilir:

- Kontrol Arayüzlerine Alternatifler: Sürücü, kendi üzerinden dijital veya analog giriş / çıkış birimleriyle kontrol edilebilir veya bağlı bulunduğu bir sistemle yüksek hızlı bir arayüzle haberleşebilir.
- Alternatif Pozisyon Kontrol Birimleriyle Arayüz: Dijital kodlayıcılar yaygın olarak kullanıldığı halde bazı durumlarda başka birimlerle de uygun çalışır.
- Yerinde Programlanabilme Özelliği: Büyük sistemlerde her birimin kendi üzerinden de kontrol edilebilmesi arzu edilir. Bir sürücü kendi üzerinden programlanabilme özelliğini kullanıcıya sunmalıdır.
- Hem sürücüden motora, hem de motordan sürücüye iki yönlü güç akışına izin verilebilmelidir.
- Sürücüden motora giden akımda yüksek dereceli harmonik bulunmamalıdır.

1995 Yılında, sürücü teknolojilerinde gerçekleşen en büyük gelişme, her türlü motorun her türlü çalışma koşulları altında kontrol edilmesini sağlayacak, “akıllı cihaz” kapsamına giren, genel amaçlı sürücülerin kullanılmaya başlanmasıdır. Control Techniques firması, Unidrive adlı ürünü ile bu sürücülerin üretimini dünyada ilk yapan firma olmuştur. Üretilen bu sürücünün mikroişlemcisinde ilk defa vektörel kontrol algoritması kullanılmaya başlanmıştır [38]. Şekil 4.1’de görülen bu genel amaçlı sürücü, açık çevrim sensörsüz vektörel kontrol, kapalı çevrim akı – vektörel

kontrol ve yüksek performanslı fırçasız servo motor kontrolu teknolojilerini bir arada bulunduran bir üründür.



Şekil 4.1 Tipik Bir AC Motor Sürücü (Control Techniques)

Bu sürücü 1MW'a kadar olan güçlere kadar hizmet verebilir. Seri bir haberleşme arayüzünden programlanabildiği gibi, üzerindeki kontrol modülünden de programlanabilen bu sürücü kullanıcıya, farklı kontrol yöntemleri için bile aynı parametre ayarlarını ve kullanıcı arayüzünü sağlar. Böylece farklı kontrol yöntemleri için kullanıcının farklı bir bilgi birikimine sahip olması gerekmez. Unidrive sürücüsünde sürücünün işlemlerini yapmasını sağlayan mikroişlemci dışında sonradan eklenebilen ve serbest olarak programlanabilen ikinci bir mikroişlemci bulunur. Programlama dili Microsoft - Visual Basic'e benzeyen bu ek mikroişlemci sayesinde Unidrive, kendisinden istenilen özel görevleri yerine getirebilir. Unidrive sürücüsüne yazılabilecek programların bellekte kapladığı toplam alan 384 kB'dır. Bu bellek alanının 80 kB'ı, kullanıcının sürücüye eklemek istediği fonksiyonların programlarını yazacağı bellek alanı olarak ayrılmıştır. Sincap kafesli asenkron motorun rotor çubuk arızalarının Unidrive sürücüsü ile belirleme ve tanılanması konusunda, sürücünün yapması gereken işlemlerin, bahsedilen 80 kB'lık bellek alanını aşacağı düşünüldeği durumlarda ikinci bir 384kB'lık bellek alanı sürücüye eklenebilir.

Control Techniques firmasının Unidrive adlı ürününde 32bit'lik bir mikroişlemci kullanılmıştır. Bu mikroişlemci, tam sayı ve kayar noktalı değerlerin hesabını

yapabilir. Unidrive sürücüsünün akım kontrolörünün çevrim zamanı 250 mikro saniyedir. Bu durumda, çalışmamızdaki büyük boyutlu matrislerin tersinin alınması gibi yüksek işlem hızı gerektiren matematiksel işlemlerde 250 mikro saniyelik bu çevrim zamanı aşılabılır. Motor arızasının belirlenmesi ve tanısı için bir çevrim zamanı kadar kısa zaman aralıklarında sürücünün motoru kontrol etmesi pratik bir uygulama değildir. Bu durum, ikinci çevrim süresi sonunda işlem sonucunun elde edilmesiyle az bir gecikmeyle sonlanabilir.

Sincap kafesli asenkron motorlarda rotor çubuk kırığının sürücü ile belirlenmesi için frekans analizi uygulanmak istendiğinde, dar bellekte kullanılabilecek fft algoritmalarının gibi hızlı işlem yapabilecek sistem elemanları kullanılması gerektiği düşünülmelidir.

4.2. Arıza Belirleme ve Tanısının Motor Sürücüsüyle Yapılabilmesinin Avantajları

Asenkron motor sürücüsü kullanılarak motor pek çok zorlayıcı duruma ve arıza durumuna karşı en baştan koruma altına alınmış sayılabilir [40]. Motoru zorlayan durumlar, arıza durumları ve sürücünün bu gibi durumlardaki davranışı aşağıda özetlenmiştir:

- Aşırı hıza çıkılması: Sürücünün kontrolü altında olacak şekilde nominal hızın üstüne çıkılması mümkündür. Sürücü, motorun hızını her türlü durumda bilmektedir.
- Aşırı Yüklenme: Sürücü motorun çektiği akımı her zaman kontrol altında tutmaktadır. Akımın ani iniş ve çıkışlarına izin verilmez.
- Sık Tekrarlanan Çalışma / Durma Koşulları: Sürücü ile beslenen motorlarda motor akımı, gerilimi her zaman kontrol altında olduğu için motorda bir sorun oluşturmaz.

Yukarıda verilenlere rağmen, sürücüyle beslenen motorlarda da rotor çubuğu kırıklarıyla karşılaşılabilir. Bunun sebebinin çalışma koşulları olmadığı durumlarda, rotor çubuğu kırılmasına; Motorun imalatı sırasında rotor çubuklarının kısa devre halkasıyla olan bağlantısındaki zayıflık, rotor malzemesinin yanlış seçimi veya motorun tasarımındaki bir hata sebep olarak gösterilebilir. Bunun dışında, sağlıklı çalışan bir arıza belirleme ve tanı sisteminin, arıza ilk belirtilerini göstermeye

başladığı anda buna tanı koyabileceğini düşünersek, rotor çubuklarındaki en ufak bir arıza başlangıcından bile haberdar olunacağı söylenebilir.

Şu anda piyasada, arıza belirlenmesi üzerinde çalışan firmaların arıza meydana gelmesini önleyecek birtakım ürünleri bulunmaktadır. Endüstride sıklıkla kullanılan sincap kafesli asenkron motorun pek çok uygulamada bir motor sürücüsüyle kontrol edildiğini düşünersek, motor sürücüsünün motoru bu şekilde korumasının önemi daha da iyi anlaşılacaktır. Motorda bir rotor arızası meydana gelmesi durumunda, bölüm 3.3.1’de de açıklandığı gibi arızanın stator akımına olan etkisi sürücüyle belirlenebilirse sürücüye bir arıza tanılama özelliği de eklenmiş olur [41]. Asenkron motor sürücülerinin motor akımını sürekli kontrol altında tutması ve sürücünün içinde bulunan kendi programlanabilir mikroişlemcisi göz önüne alınırsa, sürücüyle bir arıza tanılması yapılabileceği öngörülebilir [48].

4.3. Sürücüyle Rotor Arızasının Belirleme ve Tanısı

Literatürde motorun stator akımının analizini yaparak kırık rotor çubukları veya ileri derecede hava aralığındaki düzensizliği belirleyecek cihazlar üstünde çalışmalar da yapılmaktadır. Bu çalışmalardan bazılarında [64] motorun hızının ölçülmesinin de gerekmediği, motorun işletme büyüklüklerinden faydalanılarak motorla ilgili gerekli bilgilerin hesaplanabileceği ve arıza durumu hakkında bir sonuca varılabileceği belirtilmektedir.

Sürücüyle yapılabilecek bir arıza belirleme ve tanı sisteminin temelinde, izlenen sinyalin değeri ve bu değerin ne anlama geldiğinin bir bilgisi vardır. Bu bilgilerin oluşturduğu bir veri tabanından faydalanılarak arıza belirleme ve tanılmasına yönelik kararlar verilebilir [39].

Örneğin [14]’de yapay sinir ağlarının elektrik motorlarındaki arızaların belirlenmesi ve tanısında kullanılması durumunda motorun matematiksel modelinin kurulmasına gerek kalmayacağı, zaman harcayan uzun simülasyonların yapılmasının gerekmeyeceği söylenmiştir. Yapay sinir ağları, bir sistemin giriş ve çıkışlarına bakarak kara kutu modelleme yöntemiyle sistem hakkında bilgi sahibi olmakta ve dolayısıyla herhangi bir matematiksel modele ihtiyaç duymamaktadır.

Control Techniques firmasının asenkron motor sürücüsüyle yapılabilecek bir arıza belirleme ve tanı sisteminde uygulanması gereken adımlar aşağıda açıklanmıştır [39].

- Sinyal hakkında veri toplanması: Burada asenkron motor sürücüsü, stator akımından belirlenen örnekleme frekansında örnekler almalı ve bu örnekleri hafızasında saklamalıdır.
- Hafızaya yerleştirilen stator akımı değerlerine, aynalama meydana gelmeden frekans analizi yapılabilmesi için öncelikle bir filtreleme işlemi yapılabilir. Daha sonra elde edilen veri tabanında, frekans analizi için gerekecek işlem sayısını karşılayacak kadar bilgi bırakılarak geri kalanlar işlem süresini azaltmak için ihmal edilebilir.
- Frekans Analizi: Sürücünün hafızasındaki değerlere frekans analizi uygulanır ve sonuç sürücünün hafızasına kaydedilir.
- Arıza belirleme ve tanı: Bu adımda, frekans analizi sonucunda elde edilen grafikte temel bileşenin yanında rotor çubuk arızasından kaynaklanan yan bantlar olup olmadığı kontrol edilir. Bir arıza belirlendiğinde ise kullanıcı, sürücünün arayüzü vasıtasıyla bilgilendirilir.

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sürücü ile Arıza Belirleme ve Tanılama Uygulamalarındaki Zorluklar, Öneriler

Arıza belirleme ve tanılmasının sürücüyle yapılmasında karşılaşılabilecek sorunlar; sürücünün işlemcisinin bölüm 4.2’de sayılan adımları yapması için ihtiyacı olan işlem zamanı ve belleğe kaydedilmesi gereken girişler ve hesaplanan sonuçlar için belleğin yetip yetmeyeceğidir.

Bir sürücünün, bağlı olduğu motoru her an arıza belirlemesi ve tanılması amaçlı olarak kontrol etmesi gerekmemektedir. Sürücüye eklenebilecek böyle bir arıza belirleme ve tanılama uygulamasının, gün içinde belli bir süre için sürücü tarafından otomatik olarak gerçekleştirilmesinin yeterli olduğu sonucuna varılabilir. Bu durumda işlem zamanının artık bir sorun olarak düşünülmesi gerekmez.

Frekans analizinin yapılmasında gerekli olan bellek miktarı, analizi yapılacak olan sinyalden alınacak örnek sayısı ile doğru orantılıdır. Sürücünün hafızasının yetmeyebileceğinin düşünüldüğü uygulamalarda harici bir bellek, sinyalden alınan örneklerin hafızada tutulması için kullanılabilir. Bu durumda, harici belleğe ulaşmakta oluşabilecek bazı gecikmeler söz konusu olabilir, fakat bu gecikmeler sürücüde işlem hızıyla ilgili bir sıkıntı olmadığı için dikkate alınmayabilir.

Rotor çubuğu kırık motorların frekans analizlerinde oluşan harmoniklerin temel bileşene yakın olduğu bilinmektedir [42-44]. Sürücüde uygulanabilecek bu şekildeki bir arıza belirleme ve tanılama algoritmasında, işlemlerin yan bantları temel bileşenden ayırabilecek doğrulukta yapılması gerekmektedir.

DSP - Sayısal işaret işleyiciler ile bu çalışmada bahsedilen Unidrive sürücüsünün bir karşılaştırması yapılırsa aşağıdaki sonuçlara ulaşılır:

- Unidrive sürücüsünde yüksek işlem hızı gerektiren, matris tersinin bulunması gibi bazı matematiksel işlemler, 250 mikro saniyelik çevrim zamanında sonuçlandırılmayabilir. DSPler bu konuda avantajlı olmalarına rağmen önceden de belirtildiği gibi motor sürücüsünün bu işlemi gün içerisinde belli bir sayıda yapacağı göz önüne alınırsa bu dezavantaj ihmal edilebilir.

- Sürücüye yazılması planlanan FFT analizi yapan programın, kullanıcıya ayrılan 80kB'ı aşmaması gerekir, aştığı durumlarda ek bir bellek kullanılmalı veya dar bellekte FFT uygulamalarına başvurulmalıdır.
- DSPLerin yüksek maliyetli olması ve endüstride genellikle sürücüyle kontrol edilen motorların bulunması sebebiyle, Unidrive sürücüsüne eklenecek bir arıza belirleme ve tanı özelliğinin, arızadan kaynaklanan plansız duruşların ve bakım maliyetlerinin azalmasını ve üretimde kalitenin artmasını sağlayacağı anlaşılmaktadır.

Bu çalışmanın başlangıcında, sürücüyle arıza belirlemesi ve tanılması yapmak amacıyla yola çıkılmıştır. Gerekli araştırma ve geliştirme çalışmalarının yapılması durumunda sürücünün akım ölçme özelliği, içerisinde bulunan işlemcisi, belleği ve kullanıcı ara yüzü göz önüne alınırsa, uygun bir yaklaşımla sürücüyle arıza belirlemesi ve tanılması yapılabileceği öngörülebilir [45]. Bunun için herhangi bir donanımsal ek yapılması gerekli değildir. Literatürde, rotor milinin hızını, motorun üç faz gerilim ve akım değerlerinin bilinmesiyle hesaplayabilen ve kullanıcıya motor arızaları hakkında bilgi veren çalışmalara rastlanmaktadır [64].

5.2. Genel Değerlendirme ve Sonuçlar

Bölüm 3.2'de bahsedilen ve rotor çubuk arızalarının, motorun stator akımının frekans analizinde belirli frekanslarda yan bantlar oluşturacağı teorisinin, Bölüm 3.3'de anlatılan deneysel uygulamayla birebir aynı sonuçları olmadığı görülmektedir. Yapılan uygulamada, seçilen yöntem ve kullanılan cihazların güvenilirliği, deneysel çalışmamız sayesinde, teorik çalışmamızdaki bir parametredeki hata payını görmemizi sağlamaktadır. Tablo 3.1'deki teorik ve pratik sonuçların tamamen aynı çıkmamasındaki neden olarak, teorik hesaplarda kullandığımız kayma değerinin hesaplandığı motor hız bilgisinin, doğruluğundan emin olunmayan bir el takometresi ile yapılan bir ölçüm sonucu alınmış olması gösterilebilir. % 50 Yüklenme durumu için, bir çubuğu kırık rotorda yapılan deneyde, el takometresi 1420 d/d'lık bir hız gösterirken, deney sonucu elde edilen grafiklerdeki yan bantların frekanslarının kullanılmasıyla yapılan hesaplama sonucu bulunan hız ise 1405d/d'dır. Aradaki %1,06'lık hata payının, el takometresinden kaynaklandığını söyleyebiliriz. İkinci durumda ise, aynı % 50 yüklenme altında, 2 çubuğu kırık rotorda yapılan deneyde, el takometresi 1410d/d'lık bir hız gösterirken, deney sonucu elde edilen grafiklerdeki

yan bantların frekanslarının kullanılmasıyla yapılan hesaplama sonucu bulunan hız ise 1402d/d'dır. Aynı şekilde, bu durumda da aradaki %0,6'lık hata payının, el takometresinden kaynaklandığını söyleyebiliriz.

Sonuç olarak, nominal çalışma koşulları altında, herhangi bir sincap kafesli asenkron motorun rotor çubuk arızasının olup olmadığı, yapılan frekans analizi sonucunda stator bir faz akımının $f = f_1(1 \pm 2s)$ frekanslı akım bileşenleri içerip içermediğine bakılarak kesin olarak söylenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Duyar, A., Durakbaşı, T. ve Çeştepe E.**, Artesis Teknoloji Sistemleri A.Ş., MCM: Üretim Risklerini Azaltan, Türkiye’de Geliştirilmiş Yeni Bir Teknoloji – **www.artesis.com**.
- [2] **Albaş, E., Durakbaşı, T. ve Eroğlu, D.**, Application of e New Fault Detection Technology for Quality Improvement of Appliance Motors – **www.artesis.com**.
- [3] **Albaş, E., Arıkan, T. ve Kuzkaya, C.**, In-Process Motor Testing Results Using Model Based Fault Detection Approach – **www.artesis.com**.
- [4] **Bell, D.R.**, The Hidden Cost of Downtime: Strategies for Improving Return on Assets, SmartSignal Co., USA, 2003.
- [5] **Thomson, W.T. ve Fenger, M.**, 2001. Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults, *IEEE Industry Applications Magazine*, July / August, 26-34.
- [6] **Benbouzid, M.E.H.**, 1999. Bibliography on Induction Motors Fault Detection and Diagnosis, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.14 No.4 December, s. 1065-1074.
- [7] **Williamson, S., Eng, C. ve Smith, A.C.**, 1982. Steady-State Analysis of Three-Phase Cage Motors with Rotor-Bar and End-Ring Faults, *IEE Proceedings*, Vol.129, Pt.B, No.3, May, s.93-100.
- [8] **Yazıcı, B. ve Kliman, G.B.**, 1999. An Adaptive Statistical Time-Frequency Method for Detection of Broken Bars and Bearing Faults in Motors Using Stator Current, *IEEE Transaction on Industry Application*, Vol.35, No.2, March / April, s.442-452.
- [9] **Filippetti, F., Vas, P., Franceschini, G. ve Tassoni, C.**, 1998. AI Techniques in Induction Machines Diagnosis Including the Speed Ripple Effect, *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol.34, No.1, Jan. / Feb., s.98-108.
- [10] **Benbouzid, M.E.H., Said, M.S.N. ve Benchaib, A.**, 2000. Detection of Broken Bars in Induction Motors Using an Extended Kalman Filter for Rotor Resistance Sensorless Estimation, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol.15, No.1, March, s.66-70.

- [11] **Edwards, S.**, Shock and Vibration Digest, Vol. 30, No.1, pp.4–13. Fault Diagnosis of Rotating Machinery,- 30.04.2005 www.swan.ac.uk/mecheng/staff/sedwards/SVD_Review.html
- [12] **Zhongming, Y.E. ve Bin, W.U.**, 2000. A Review on Induction Motor Online Fault Diagnosis, Power Electronics and Motion Control Conference. Proceedings. PIEMC. Volume 3, 15-18 Aug. pp. 1353 – 1358 vol.3
- [13] **Hajiaghajani, M.**, 2003. Modeling, Detection and Classification of Eccentricity and Broken Bar Faults in Electric Machines. *Doktora Tezi*, Office of Graduate Studies, Texas A&M University, U.S.A.
- [14] **Vas, P.**, 1993. Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines. Clarendon Press, Oxford.
- [15] **Bonnett, A.H. ve Soukoup, G.C.**, 1986. Rotor Failures in Squirrel Cage Induction Motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.IA-22 No.6 November / December, s. 1165-1173.
- [16] **Yang, Q.**, 2004. Model-Based and Data Driven Fault Diagnosis Methods with Applications to Process Monitoring, *Doktora Tezi, School of Graduate Studies*, Case Western University, U.S.A.
- [17] **Liu, K.C.**, 1995. Model - Based Failure Detection in Induction Motors Using Nonlinear Filtering, *Doktora Tezi, Department of Systems, Control and Industrial Engineering*, Case Western University, U.S.A.
- [18] **Wade, S., Dunnigan, M.W. ve Williams, B.W.**, 1997. Modeling and Simulation of Induction Machine Vector Control with Rotor Resistance Identification, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.12 No.3 May, s. 495-506.
- [19] **Ding, X. ve Frank, P.M.**, 1990. Fault detection via factorization approach. Syst. Contr. Lett. 14 (5), s. 431 - 436.
- [20] **Devanneaux, V., Kabbaj, H., Dagues, B. ve Faucher, J.**, 2001. An Accurate Model of Squirrel Cage Induction Machines Under Rotor Faults, ICEMS.2001.970693, Vol.1 18 – 20 Aug.
- [21] **Pillay, P. ve Levin, V.**, 1995, Mathematical Models for Induction Machines, IEEE, IAS, Annual Meeting, pg.606-616.
- [22] **Sarioğlu, M. K.**, 1983. Elektrik makinelerinin Temelleri III, Asenkron Makineler. Çağlayan Kitapevi, İstanbul.
- [23] **Menacer, A., Said, M., Said, N., Benakcha, A.H. ve Drid, S.**, 2004. Stator Current Analysis of Incipient Fault Into Asynchronous Motor Rotor Bars Using Fourier Fast Transform, *Journal of Electrical Engineering*, Vol.55 No.5-6 January / February, s. 122-130.

- [24] **Krause, P.C.**, 1987. Analysis of Electric Machinery. McGraw–Hill Book Company, Singapore.
- [25] **Didier, G., Razik, H., Abed, A. ve Rezzoug, A.**, 2002. On Space Harmonics Model Of A Three Phase Squirrel Cage Induction Motor For Diagnosis Purpose, *EPE-EPMC 2002 Dubrovnik & Cavtat*.
- [26] **Baghli, L.**, Modelling Rotor Cage Induction Motors for Default Detection, Electrical Machine Models for Diagnostic Symposium, 1997. www.baghli.com 30.04.2005
- [27] **Thomson, W.T. ve Rankin, D.**, 1987. Case Histories of On-Line Rotor Cage Fault Diagnosis, Condition Monitoring '87: Proceedings of an International Conference on Condition Monitoring held at University College of Swansea, s.798-819.
- [28] **Toliyat, H.A., Parlos, A.G., Nandi, S. ve Bharadwaj, R.M.**, 1999, Study of Three Phase Induction Motors with Incipient Rotor Cage Faults Under Different Supply Conditions, Proceedings of the IEEE - IAS Annual Meeting, Phoenix, AZ Oct.3-7 1999, pp.1922-1928.
- [29] **Sutherland, P.E. ve Salon, S.J.**, 2002, Analysis of Rotor Faults in Three Phase Induction Machines, 37th IAS Annual Meeting, Vol.3, 13-18 Oct.
- [30] **Kliman, G.B. ve Koegl, R.A.**, 1988. Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.3 No.4 December, s. 873-879.
- [31] **Liang, B., Ball, A.D. ve Iwnicki, S.D.**, 2002. Simulation and Fault Detection of Three-Phase Induction Motors, *Proceedings of IEEE TENCON '02*, s.1813-1817.
- [32] **Thomson, W.T. ve Stewart, I.D.**, 1988. On-Line Current Monitoring for Fault Diagnosis in Inverter Fed Induction Motors. Proceedings of IEE 3rd International Conf. In Power Electronics and Variable Speed Drives, London, July.
- [33] **Toliyat, H.A., Haji, M. ve Ahmed, S.**, 2002, Induction Machines Performance Evaluator “Torque Speed Estimation and Rotor Fault Diagnostic”, http://www.apec-conf.org/2002/APEC02_Technical_Sessions.html
- [34] **Fiser, R. ve Ferkolj, S.**, 1998. Development of Steady-State Mathematical Model of Induction Motor with Rotor Cage Faults. ICEM. International Conf. on Electrical Machines, Istanbul Turkey, Sept. 2 – 4. Vol. 3/3, pp. 2188 – 2191 ISBN 975-429-128-4.
- [35] **Elkasabgy, N.M., Eastham, A.R. ve 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 January / February, s. 165-171.

- [36] **Mirafzal, B., Demerdash, N.A.O.**, 2004. Induction Machine Broken-Bar Fault Diagnosis Using the Rotor Magnetic Field Space-Vector Orientation, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.40 No.2 March / April, s. 534-542.
- [37] **Cade, M., Barrass, P.**, A Truly Universal A.C. Drive, Control Techniques plc, Newtown, UK. **www.controltech.com**
- [38] **Drury, W.**, Electrical Variable Speed Drives – Mature Consumable or Radical Infant?, Control Techniques plc, Newtown, UK. **www.controltech.com**
- [39] **Toliyat, H.A., Nandi, S. ve Gopalarathnam, T.**, Feasibility Study to Include Fault Diagnosis as a Housekeeping Function for Motor Drives Application using the TMS320F240. www.ti.com/sc/docs/general/dsp/fest99/poster/cgopalarathnam.pdf
- [40] **Vas, P. ve Drury, W.**, 1996, Electrical Machines and Drives: Present and Future, IEEE. **www.controltech.com**
- [41] **Wasko, C.R. ve Iwanciw, P.**, 1988, Advanced Diagnostic Capabilities of AC Drives with a Microprocessor Interface, IEEE.
- [42] **Vas, P. ve Filippetti, F.**, 1994, Broken Bar Detection in Induction Machines: Comparison Between Current Spectrum Approach and Parameter Estimation Approach, IEEE Industry Application Society Annual Meeting IAS '94, Denver, October 1994.
- [43] **Cupertino, F., Vanna, E., Salvatore, L ve Stasi, S.**, 2003. Comparison of Spectral Estimation Techniques Applied to Induction Motor Broken Bars Detection, *SDEMPED 2003, Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*, 24-26 August, Atlanta, GA, USA, s. 129-134.
- [44] **Drif, M., Benouzza, N., Kraloua, B., Bendiabdellah, A. ve Dente, J.A.**, 2002. Squirrel Cage Rotor Faults Detection in Induction Motor Utilizing Stator Power Spectrum Approach, *Conference of Power Electronics, Machines and Drives*, 16-18 April, Conference Publication No. 487, s. 133-138.
- [45] **Jarzyna, W.**, 1998. Diagnosis Ability of Induction Drive Systems, *Conference of Power Electronics and Variable Speed Drives*, 21-23 September, Conference Publication No. 456, s. 574-578.
- [46] **Lipo, T.A. ve Munoz, A.R.**, 1999. Complex Vector Model of the Squirrel-Cage Induction Machine Including Instantaneous Rotor Bar Currents, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.35 No.6 November / December, s. 1332-1340.
- [47] **Schaeffert, E., Lecarpentier, E. ve Zaim, M.E.**, 1998. Unbalanced Induction Machine Simulation Dedicated to Condition Monitoring. ICEM '98 2 – 4 Sep. 1998 pp.414. Istanbul, Turkey.

- [48] **Toliyat, H.A., Lipo, T.A. ve White, J.C.**, 1991. Analysis of a Concentrated Winding Induction Machine for Adjustable Speed Drive Applications Part 1 (Motor Analysis), *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.6 No.4 December, s. 679-683.
- [49] **Toliyat, H.A. ve Lipo, T.A.**, 1995. Transient Analysis of Cage Induction Machines Under Stator, Rotor Bar and End Ring Faults, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.10 No.2 June, s. 241-247.
- [50] **Toliyat, H.A., Arefeen, M.S., Parlos, A.G.**, 1996. A Method for Dynamic Simulation of Air-Gap Eccentricity in Induction Machines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.32 No.4 July / August, s. 910-918.
- [51] **Toliyat, H.A., Lipo, T.A., Luo, X., Liao, Y. ve El-Antably, A.**, 1995. Multiple Coupled Circuit Modelling of Induction Machines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.31 No.2 March / April, s. 311-318.
- [52] **Kutman, T.**, 1982. *Sincap Kafesli Asenkron Makinenin Matematiksel Modeli, TÜBİTAK VII. Bilim Kongresi Tebliğleri*, s.359-374
- [53] **Cade, M.**, High Performance Vector Drives Require Accurate Parameter Estimation, Control Techniques plc, Newtown, UK.
www.controltech.com
- [54] **Thomson, W.T., Fenger, M.**, Case Histories of Current Signal Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives, Electrical Mach. and Drives Conf. 2003, IEEE Int.Vol.3, 1-4, June 2003, pp.1459 – 1465
- [55] **Xu, M., Alford, T.**, Motor Current Analysis and Its Applications in Induction Motors Fault Diagnosis, 1997 Predictive Maintenance Tech. National Conf., Dallas, Texas, Dec. 1 – 4
- [56] **Cunha, C., Lyra, R.**, Simulation and Analysis of Induction Motors with Rotor Asymmetry, IEEE Trans. On Industrial Applications, Vol.41, no.1 Jan- Feb 2005
- [57] **Bangura, J.F.**, Diagnosis of Normal and Abnormal Operations of Induction Motors in ASDS by a Coupled Finite Element Network Technique, Ph.D. Thesis 1994, Digital Dissertations.
- [58] **Schoen, R.**, Online Current Based Condition Monitoring of Three Phase Induction Machines, Ph.D. Thesis 1994, Digital Dissertations.
- [59] **Nandi, S.**, Fault Analysis for Condition Monitoring of Induction Motors, Ph. D. Thesis, Digital Dissertations.
- [60] **Jha, C.S., Murty, S.S.**, Generalised Rotating Field Theory of Wound Rotor Induction Machines Having Asymmetries in Stator and/or Rotor Windings, Proc. IEE 120(8) pp. 867 – 873

- [61] **Milimonfared, J.**, A Novel Approach for Broken Rotor Bar Detection in Cage Induction Motors, IEEE Trans. Ind. App. Vol.35 no.5 '99
- [62] **Deleroi, W.**, Squirrel Cage Motor with Broken Bar in the Rotor – Physical Phenomena and Their Exp.Ass. Proc. ICEM '82 Hungary, pp.767-770
- [63] **Nandi, S., Toliyat, H.**, 1999. Study of Three Phase Induction Machines with Incipient Rotor Cage Faults Under Different Supply Conditions. Proc. Of the IEEE-IAS Annual Meeting, Phoenix,AZ,Oct.3-7 pp.1922-1928
- [64] **Fenger, M., Thomson, W.**, Development of a Tool to Detect Faults in Induction Motors via Current Signal Analysis, Iris Rot.Mach.Conf. 20003 June, CA.

Ek - A ASENKRON MOTORUN ROTORU 16 FAZ KABUL EDİLEREK KURULAN MATEMATİKSEL MODELİ

Endüstride geniş uygulama alanı bulan sincap kafesli asenkron makinenin sürekli sinüzoidal rejimde analizi için bazı varsayımlarla lineer bir matematiksel modeli kurulabilir [20, 52].

Sincap kafesli bir asenkron motorun matematiksel modeli denklem (6.1)'deki gibi yazılabilir [22].

$$[V] = [R][I] + \frac{d}{dt}([L][I]) \quad (6.1)$$

Bu denklemde [V] ve [I] matrisleri:

$$[V] = \begin{bmatrix} [V_S] \\ \dots \\ [V_R] \end{bmatrix}, \quad [I] = \begin{bmatrix} [I_S] \\ \dots \\ [I_R] \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

şeklinde. [V] ve [I] matrislerinin elemanları olan [V_S], [V_R], [I_S] ve [I_R] ise aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

$$[V_S] = [V_{S1} \ V_{S2} \ V_{S3}]^T \quad (6.3)$$

$$[V_R] = [0 \ 0 \ \dots \ 0]_{1 \times N_R + 1} \quad (6.4)$$

$$[I_S] = [I_{S1} \ I_{S2} \ I_{S3}]^T \quad (6.5)$$

$$[I_R] = [I_{R1} \ I_{R2} \ \dots \ I_{Rk} \ \dots \ I_{RN_R} \ I_e]^T \quad (6.6)$$

Denklem (6.6)'da görülmektedir ki, rotorun elektriksel modelinde kısa devre halkasının da etkisi göz önüne alınacaktır [49]. Denklem (6.1) ile verilen asenkron makinenin modelindeki [R] direnç matrisinin elemanları aşağıda gösterilmiştir.

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_S]_{3 \times 3} & [0]_{3 \times N_R} & [0]_{3 \times 1} \\ [0]_{N_R \times 3} & [R_R]_{N_R \times N_R} & -\frac{R_e}{N_R} [1]_{N_R \times 1} \\ [0]_{1 \times 3} & -\frac{R_e}{N_R} [1]_{1 \times N_R} & R_e \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

[R] Matrisinin elemanlarından [R_S] matrisi aşağıda gösterilmiştir. Rotor çubuklarının ve kısa devre halkasının direnç değerlerini içeren [R_R] matrisi, rotoru 16 çubuklu bir asenkron motorda kısa devre halkasının da eklenmesiyle 17'ye 17'lik bir matris haline gelmiştir.

$$[R_S]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Denklem (6.1)'de verilen [L] endüktans matrisi ise aşağıda verilmiştir.

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_S]_{3 \times 3} & [M_{SR}]_{3 \times N_R} & [0]_{3 \times 1} \\ [M_{RS}]_{N_R \times 3} & [L_R]_{N_R \times N_R} & -\frac{L_e}{N_R} [1]_{N_R \times 1} \\ [0]_{1 \times 3} & -\frac{L_e}{N_R} [1]_{1 \times N_R} & L_e \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Denklem (6.9)'daki [L_S]_{3x3} matrisi aşağıda gösterilmiştir.

$$[L_S]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} L_{Sp} & M_S & M_S \\ M_S & L_{Sp} & M_S \\ M_S & M_S & L_{Sp} \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

Denklem (6.10)'da kullanılan M_S, stator sargıları arasındaki karşıt endüktans ifadesi:

$$M_S = -\frac{L_{Sp}}{2} \quad (6.11)$$

şeklinde hesaplanır [23]. Stator ve rotor sargıları arasındaki karşıt endüktans ise rotorun mekaniksel dönme açısı θ 'ya bağlıdır. Karşıt endüktans matrisinin θ 'ya bağlı olması, asenkron motorun abc yöntemiyle modellenmesinde sistemin lineer olmayan bir yapıya sahip olmasını sağlamaktadır. $[M_{SR}]$ aşağıda verilmiştir.

$$[M_{SR}]_{N_R \times 3} = M_{SR} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + (1) \cdot \frac{2\pi}{N_R}) & \dots & \cos(\theta + (15) \frac{2\pi}{N_R}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3} + (1) \cdot \frac{2\pi}{N_R}) & \dots & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3} + (15) \frac{2\pi}{N_R}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3} + (1) \cdot \frac{2\pi}{N_R}) & \dots & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3} + (15) \frac{2\pi}{N_R}) \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

Denklem (6.9)'deki endüktans matrisinde bulunan $[L_R]$ matrisi rotor çubuklarının aralarındaki endüktans ifadelerini göstermektedir ve Ek-B'de görülebilir..

Motorun elektriksel denklemlerine ek olarak, motorun mekanik kısmına ait denklemi de eklenmelidir.

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} + \xi \cdot \Omega_r = T_e - T_l \quad , \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \Omega_r \quad (6.13)$$

Motorun ürettiği elektriksel moment aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$T_e = \frac{1}{2} \cdot [I]^T \cdot \frac{d[L]}{d\theta_r} \cdot [I] \quad (6.14)$$

Bilindiği gibi $[L_{SS}]$ ve $[L_{RR}]$ matrislerindeki elemanlar sabittir ve moment ifadesi Denklem (6.15) şeklinde sadeleştirilebilir.

$$T_e = [I_s]^T \cdot \frac{d[L_{SR}]}{d\theta_r} \cdot [I_r] \quad (6.15)$$

Vs = [V1; V2; V3];
V = [Vs(1); Vs(2); Vs(3); Vr; Ve];

% Karşıt endüktans matrisi hesaplanır.

Msr =

msr * [cos(teta_r * (pi / 180)), cos(teta_r * (pi / 180) + (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + 2 * (2*pi)/16), cos(teta_r * (pi / 180) + 3 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + 4 * (2*pi)/16), cos(teta_r * (pi / 180) + 5 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + 6 * (2*pi)/16), cos(teta_r * (pi / 180) + 7 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + 8 * (2*pi)/16), cos(teta_r * (pi / 180) + 9 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + 10 * (2*pi)/16), cos(teta_r * (pi / 180) + 11 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + 12 * (2*pi)/16), cos(teta_r * (pi / 180) + 13 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + 14 * (2*pi)/16), cos(teta_r * (pi / 180) + 15 * (2*pi)/16), 0;

cos(teta_r * (pi / 180) - (2*pi)/3),
cos(teta_r * (pi / 180) - (2*pi)/3 + (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 2 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 3 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 4 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 5 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 6 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 7 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 8 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 9 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 10 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 11 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 12 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 13 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 14 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 15 * (2*pi)/16), 0;

cos(teta_r * (pi / 180) + (2*pi)/3),
cos(teta_r * (pi / 180) + (2*pi)/3 + (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 2 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 3 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 4 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 5 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 6 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 7 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 8 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 9 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 10 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 11 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 12 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 13 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 14 * (2*pi)/16),
cos(teta_r * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 15 * (2*pi)/16), 0];

% Elektriksel tork ifadesinde kullanılacak olan karşıt endüktansın türevi hesaplanır.

```

derMsr =
-1 *
[ sin(teta_r( k ) * (pi / 180)),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + 2 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + 3 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + 4 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + 5 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + 6 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + 7 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + 8 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + 9 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + 10 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + 11 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + 12 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + 13 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + 14 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + 15 * (2*pi)/16);

sin(teta_r( k ) * (pi / 180) - (2*pi)/3),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) - (2*pi)/3 + (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 2 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 3 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 4 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 5 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 6 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 7 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 8 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 9 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 10 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 11 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 12 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 13 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 14 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) - (2*pi)/3 + 15 * (2*pi)/16);

sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + (2*pi)/3),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + (2*pi)/3 + (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 2 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 3 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 4 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 5 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 6 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 7 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 8 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 9 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 10 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 11 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 12 * (2*pi)/16),
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 13 * (2*pi)/16),

```

```
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 14 * (2*pi)/16),  
sin(teta_r( k ) * (pi / 180) + (2*pi)/3 + 15 * (2*pi)/16) ];
```

```
Mrs = Msr';
```

```
% Toplam endüktans matrisi aşağıdaki şekilde yazılır.
```

```
L = [Lss, Msr; Mrs, Lrr];
```

```
% Motorun ürettiği elektriksel tork ifadesi hesaplanır.
```

```
Te( k ) = -0.5 * I_k' * [ zeros( [ 3 3 ] ), derMsr; derMsr', zeros( [ 16 16 ] ) ] * I_k;
```

Ek - C MOTOR PARAMETRELERİ

71M4B 0.37 KW 1500 d/d Motoru için motor üreticisinden alınan değerler:

230 / 400 V

0.40 mm Tel 154 Sarım

Stator Ankoş Sayısı	: 24
Rotor Ankoş Sayısı	: 18
Helis Adımı	: 1.0 adım
Rotor Çapı	: 65 mm
Rotor Mil Geçme Delik Çapı	: 19.5
Hava Aralığı Tek Taraflı	: 0.20 mm
Stator Ankoş Kesiti	: 58.6
Rotor Paket Boyu	: 55 mm

U_N (Gerilim)	400 V
P_{1A} (Giriş Gücü)	550 W
P_{2A} (Çıkış Gücü)	370 W
I_N (Yük Akımı)	1.07 A
I_0 (Boştaki Akım)	0.88 A
n_N (Yükteki Devir)	1350 d/d
$\cos(\phi)$ (Faz Açısı)	0.74
M_N (Döndürme Momenti)	2.57 Nm
M_A (Kalkış Momenti)	5.18 Nm
n_N % (Verim)	67.3
t_u (Sıcaklık Artışı)	63.2 K
R_f (Sargı Direnci)	25.6 Ohm
Tel Çapı	0.40 mm
Sarım Sayısı	154 Siper

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında İstanbul’da doğdu. 1998 yılında Özel Kültür Fen Lisesi’nden mezun oldu. Lisans eğitimini 1998–2002 yılları arasında, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümünde tamamladı. 2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği’nde yüksek lisans eğitimine başladı.