



**Asenkron Motorlarda Kaçak Akı ile Arızanın Türü,
Büyüklüğü ve Arıza Noktasının Tespiti; Kablosuz Anlık
Durum İzleme Sisteminin Geliştirilmesi**

Program Kodu: 1001

Proje No: 117E766

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Müslüm ARKAN

Araştırmacılar:

Prof. Dr. Mehmet Salih MAMIŞ
Dr. Öğr. Üyesi Taner GÖKTAŞ

Bursiyerler:

İmran EKİNCİ
Nihat YÜKLÜ

HAZİRAN 2020
MALATYA

ÖNSÖZ

Elektrik enerjisinin kullanımı ve tüketiminde elektrik makineleri önemli rol oynamaktadır. Elektrik makinelerinden biri olan asenkron motorlar, sanayide ve ev elektroniği gibi tüketici elektroniğinde önemli bir iş yüküne sahiptir. Bu tip motorlarda meydana gelebilecek herhangi bir beklenmeyen arıza; sanayide üretimin durmasına, üretim maliyetlerinin artmasına ve dolayısıyla iş veriminin düşmesine ve son tüketicinin hayat konforunun etkilenmesine sebep olabilmektedir. Bu yüzden elektrik motorlarında oluşabilecek olası arızaları doğru ve erken tespit edip gerekli önlemleri önceden almak oldukça önemlidir. Asenkron motorlarda oluşabilecek temel arızaları elektriksel ve mekaniksel olarak iki sınıfa ayırabiliriz. Literatürde ve uygulamada bu tip arızaları tespit etmek için ısı analizi, kimyasal analiz, titreşim analizi ve elektriksel analizler gibi birçok yöntem bulunmaktadır.

Günümüzde en çok kullanılan arıza tespit metodu "Motor Akım İmza Analizi (Motor Current Signature Analysis-MCSA)" yöntemidir. Bu yöntemde stator faz akımlarının frekans spektrumu alınarak arıza sonucu ortaya çıkan harmoniklerin incelenmesi sonucunda arızanın tespiti, çeşidi ve büyüklüğü bulunabilmektedir. Ancak bu tip bir analizde arıza sinyallerinin varlığı ve büyüklüğü; arızanın çeşidinden, motorun topolojisinden, stator sargı bağlantı yapılarından ve yükün durumundan etkilenebilmektedir. Bu yüzden bu projede stator etrafında oluşan manyetik alanının davranışı incelenmiş ve olası her arıza için karakteristik arıza sinyalleri kaçak akı bilgisinden yararlanılarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada asenkron motorlarda meydana gelen elektriksel ve mekaniksel arızaları tespit etmek için kaçak akı spektrumlarından yararlanılmıştır. ANSYS@Maxwell-2D programında modellenen motorlarda kaçak akı spektrumlarındaki karakteristik arıza sinyalleri belirlenmiş ve bu sinyaller kullanılarak çok katmanlı yapay sinir ağı (Multilayer perceptron) ile değişik türdeki arızalar otomatik olarak sınıflandırılmış ve tespit edilmiştir. Elde edilen karakteristik arıza sinyallerinin güvenilirliği kaçak akı sensöründen (TI-DRV425) elde edilen akı bilgilerini kullanarak deneysel olarak da ispatlanmıştır. Proje kapsamında kablosuz anlık durum izleme sistemi geliştirilerek kullanıcı dostu bir arıza tespit modülü tasarlanmıştır.

Proje çalışmalarının gerçekleştirilmesi için TÜBİTAK 1001 BİLİMSEL VE TEKNOLOJİK ARAŞTIRMA PROJELERİ DESTEKLEME PROGRAMI kapsamında PROJE NO: 117E766 ile 206.986,00 TL mali destek alınmıştır. Proje ekibi olarak TÜBİTAK'a desteklerinden dolayı teşekkür ediyoruz.

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER LİSTESİ	iv
TABLolar LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ	1
2. ASENKRON MOTORDA MEYDANA GELEN ARIZALAR	5
2.1. Kırık Rotor Çubuk Arızası	6
2.2. Eksantriklik Arızası	8
2.3. Stator Kısa Devre Arızası	10
3. ASENKRON MOTORUN ve ARIZALARIN MODELLENMESİ	11
3.1. Asenkron Motorun Modellenmesi	11
3.2. Değişik Tipteki Arızaların Modellenmesi	13
3.2.1. Kırık rotor çubuk arızasının modellenmesi	13
3.2.2. Eksantriklik arızasının modellenmesi	13
3.2.3. Stator kısa devre arızasının modellenmesi	14
3.3. Örnek Bir Asenkron Motor Modeli ve Benzetim Sonuçları	15
4. KARAKTERİSTİK ARIZA SİNYALLERİNİN BELİRLENMESİ ve ÇOK KATMANLI YAPAY SİNİR AĞI MODELİ (MLP) İLE ARIZALARIN OTOMATİK OLARAK BELİRLENMESİ	18
4.1. Kırık Rotor Çubuk Arızası Durumunda Arıza Sinyallerinin Belirlenmesi	18
4.1.1. Bir kırık rotor çubuk arızası	18
4.1.2. Komşu iki kırık rotor çubuk arızası	20
4.1.3. Statorun üçgen veya yıldız bağlanması durumunda kırık rotor çubuk arızası	22
4.1.4. Farklı topolojilere sahip asenkron motorlarda kırık rotor çubuk arızası	22
4.1.5. Rotor slot harmoniklerinin yan bandlarının kırık rotor çubuk arızası durumunda incelenmesi	23
4.1.6. Rotor çubuklarının farklı konumlarda kırılması- yarım kutup ve tam kutup adımı	24
4.2. Eksantriklik Arızası Durumunda Arıza Sinyallerinin Belirlenmesi	26
4.3. Stator Kısa Devre Arızası Durumunda Arıza Sinyallerinin Belirlenmesi	28
4.4. MLP ile Arızaların Otomatik Tespiti	28
5. DENEYSEL DÜZENEK ve DENEYSEL SONUÇLAR	34
5.1. Deneysel Devre Düzenegi	34
5.2. Deneysel Sonuçlar	37
5.2.1. Bir kırık rotor çubuk arızası deneysel sonuçları	37
5.2.2. Komşu iki rotor çubuk arızası deneysel sonuçları	38

5.2.3. Farklı topolojilere sahip asenkron motorlarda kırık rotor arızası deneysel sonuçları	39
5.2.4. Rotor slot harmoniklerinin yan bandlarının kırık rotor çubuk arızası durumunda deneysel olarak incelenmesi	40
5.2.5. Rotor çubuklarının farklı konumlarda kırılması deneysel sonuçları	41
5.2.6. Sürücü (DTC) ile beslenen asenkron motorda kırık rotor arızası deneysel sonuçları	42
5.2.7. Eksantriklik arızası deneysel sonuçları	43
5.2.8. Stator kısa devre arızası deneysel sonuçları	44
5.2.9. MLP ile arızaların otomatik tespiti deneysel sonuçları	45
6. ANLIK ARIZA TESPİT MODÜLÜNÜN TASARIMI	47
6.1. Donanım	47
6.1.1. DSP ve Ekran	47
6.1.2. Kablosuz Haberleşme	48
6.2. Yazılım	48
6.2.1. Kullanıcı Ara Yüzü	48
6.2.2. Analog Sinyalin Örneklenmesi	49
6.2.3. Kaçak Akının Frekans Spektrumunda İncelenmesi	50
6.2.4 Arıza tespiti	50
6.2.5 Kablosuz Haberleşme	50
7. SONUÇLAR	52
KAYNAKLAR	54

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Asenkron motorlarda meydana gelen arızalar.....	5
Şekil 2.2. Motor akım imza analizi metodu.....	6
Şekil 2.3. Kırık rotor çubuk arızası durumunda karakteristik arıza harmoniklerinin değişimi....	8
Şekil 2.4. Eksantriklik arızası durumu a) Statik eksantriklik b) Dinamik eksantriklik c) Karışık eksantriklik.....	9
Şekil 2.5. Stator kısa devre arızası.....	10
Şekil 3.1. RMXprt 'de motor modelinin seçimi ve motor parametrelerinin belirlenmesi.....	11
Şekil 3.2. RMXprt ile oluşturulan model ve stator sargı düzeni.....	11
Şekil 3.3. ANSYS@Maxwell-2D programında manyetik alan vektörlerinin tanıtılması.....	12
Şekil 3.4. Kırık rotor çubuk arızasının ANSYS@Maxwell-2D paket programında oluşturulması.....	13
Şekil 3.5. a) Eksantrik arızası modeli b) İstenilen eksantriklik arızasının oluşturulması.....	14
Şekil 3.6. ANSYS@Maxwell paket programında stator kısa devre arızasının modellenmesi	14
Şekil 3.7. a) Test edilen asenkron motor b) Asenkron motorun ANSYS@Maxwell-2D modeli.....	15
Şekil 3.8. 36 slot, 28 bar (rotor çubuk sayısına) sahip asenkron motor RMXprt sonuçları.....	16
Şekil 3.9. ANSYS@Maxwell-2D sonuçları a) Moment-Zaman Grafiği b) Stator akımları-Zaman Grafiği.....	17
Şekil 3.10. ANSYS@Maxwell-2D ile Modellenen Asenkron Motorun Manyetik Alan Dağılımı.....	17
Şekil 4.1. Bir kırık rotor çubuk arızasına sahip motor ve kaçak akı sensörü pozisyonu.....	18
Şekil 4.2. Bir kırık rotor çubuk arızası durumunda a) Stator akım spektrumu b) Kaçak akı spektrumu (%100 Yükte).....	19
Şekil 4.3. Farklı yüklenme koşullarında karakteristik arıza sinyallerinin davranışı (1 Kırık Çubuk Arızası durumunda).....	19
Şekil 4.4. İki komşu kırık rotor çubuk arızasına sahip motor ve kaçak akı sensörü pozisyonu.....	20
Şekil 4.5. İki komşu kırık rotor çubuk arızası durumunda a) Stator akım spektrumu b) Kaçak akı spektrumu (%100 Yükte).....	21
Şekil 4.6. İki komşu kırık rotor çubuk arızası durumunda a) Stator akım-zaman grafiği b) Kaçak akı-zaman grafiği (%100 Yükte).....	21
Şekil 4.7. Farklı yüklenme koşullarında karakteristik arıza sinyallerinin davranışı (2 komşu kırık rotor çubuk arızası durumunda).....	21
Şekil 4.8. Kırık rotor çubuk arızası durumunda stator sargı bağlantısının arıza sinyallerine etkisinin incelenmesi (%100 Yükte).....	22
Şekil 4.9. ANSYS@Maxwell 2D paket programında modellenen farklı topolojilere sahip asenkron motorlar.....	23

Şekil 4.10. Farklı topolojilere sahip asenkron motorlarda kaçak akı spektrumu (%100 Yükte).....	23
Şekil 4.11. Kırık rotor çubuk arızası durumunda Rotor slot harmoniğinin (RSH) yan bandları (%100 Yükte) a) Stator akım spektrumu b) Kaçak akı spektrumu.....	24
Şekil 4.12. Farklı konumlarda kırılan rotor çubukları a) Komşu iki rotor çubuk b) Tam kutup adımı c) Yarım kutup adımı.....	24
Şekil 4.13. Rotor çubuklarının farklı konumlarda kırılması (%100 Yükte) a) Stator akım spektrumu b) Kaçak akı spektrumu.....	25
Şekil 4.14. Farklı yüklenme koşullarında karakteristik arıza sinyallerinin davranışı a) Tam-kutup adımı arızası durumunda b) Yarım-kutup adımı arızası durumunda (Not: iki komşu kırık rotor çubuk arızası durumu için Şekil 4.7'ye bakınız).....	26
Şekil 4.15. Eksantriklik arızası durumu (Tam yükte) (a) Stator akım spektrumu [0-1000 Hz] b) Kaçak akı spektrumu [0-1000 Hz].....	27
Şekil 4.16. Farklı Eksantriklik arızaları durumunda kaçak akı spektrumları (Tam yükte) a) [500-525 Hz] b) [600-700 Hz] c) [700-800 Hz] d) [800-920 Hz].....	27
Şekil 4.17. Kısa devre arızası durumunda kaçak akı spekturumu.....	28
Şekil 4.18. Çok katmanlı yapay sinir ağının (MultiLayer Perceptron-MLP) şematik gösterimi.....	29
Şekil 4.19. MLP ile otomatik arıza tespiti.....	29
Şekil 4.20. Karakteristik arıza harmoniklerinin elde edilmesi.....	30
Şekil 4.21. Kırık rotor çubuk arızası için MLP'nin doğruluk tablosu.....	31
Şekil 4.22. Statik eksantriklik arızası için MLP'nin doğruluk tablosu.....	31
Şekil 4.23. Dinamik eksantriklik arızası için MLP'nin doğruluk tablosu.....	32
Şekil 4.24. Arıza sınıflandırılması için MLP'nin doğruluk tablosu (1-Sağlıklı, 2-Kırık çubuk, 3-Statik Eksantriklik, 4-Dinamik Eksantriklik, 5-Stator arızası).....	32
Şekil 5.1. Deneysel devre düzeneği.....	34
Şekil 5.2. Kırık rotor çubuk arızasına sahip rotorlar.....	35
Şekil 5.3. Statik Eksantriklik arızasının oluşturulması.....	35
Şekil 5.4. DAQ kartı ile motor çıkış bilgilerinin toplanması.....	36
Şekil 5.5. Bir kırık rotor çubuk arızası durumunda a) Stator akım spektrumu b) Kaçak akı spektrumu (%100 Yükte) (Deneysel sonuç).....	37
Şekil 5.6. Farklı yüklenme koşullarında karakteristik arıza sinyallerinin davranışı (1 Kırık Çubuk Arızası durumda) (Deneysel sonuç).....	37
Şekil 5.7. İki komşu kırık rotor çubuk arızası durumunda a) Stator akım spektrumu b) Kaçak akı spektrumu (%100 Yükte) (Deneysel sonuç).....	38
Şekil 5.8. İki komşu kırık rotor çubuk arızası durumunda a) Stator akım-zaman grafiği b) Kaçak akı-zaman grafiği (%100 Yükte) (Deneysel sonuç).....	38
Şekil 5.9. Farklı yüklenme koşullarında karakteristik arıza sinyallerinin davranışı (2 komşu kırık rotor çubuk arızası durumunda).....	39

Şekil 5.10. Farklı topolojilere sahip asenkron motorlarda kaçak akı spektrumu a) 36slot-26 bar (%100 Yükte) (Deneysel sonuç)	40
Şekil 5.11. Kırık rotor çubuk arızası durumunda Rotor slot harmoniğinin (RSH) yan bandları (%100 Yükte) a) Stator akım spektrumu b) Kaçak akı spektrumu (Deneysel sonuçlar).....	40
Şekil 5.12. Rotor çubuklarının farklı konumlarda kırılması (%100 Yükte) a) Stator akım spektrumu b) Kaçak akı spektrumu (Deneysel sonuçlar).....	41
Şekil 5.13. Farklı yüklenme koşullarında karakteristik arıza sinyallerinin davranışı a) Tam-kutup adımı arızası durumunda b) Yarım-kutup adımı arızası durumunda (Not: iki komşu kırık rotor çubuk arızası durumu için Şekil 5.9'a bakınız) (Deneysel sonuçlar).....	42
Şekil 5.14. Sürücü (DTC) ile beslenen asenkron motorda kırık rotor çubuk arızası durumunda kaçak akı spektrumu (%100 yükte) (Deneysel sonuç).....	42
Şekil 5.15. Statik Eksantriklik arızası durumu (Tam yükte) (a) Stator akım spektrumu [0-1000 Hz] b) Kaçak akı spektrumu [0-1000 Hz] (Deneysel sonuç).....	43
Şekil 5.16. Statik Eksantriklik arızası durumunda kaçak akı spektrumu (Tam yükte) a) [570-590 Hz] b) [770-790 Hz] (Deneysel sonuç).....	44
Şekil 5.17. Kısa devre arızası durumunda kaçak akı spekturumu (Deneysel sonuç).....	44
Şekil 5.18. Kırık rotor çubuk arızası için MLP'nin doğruluk tablosu (Deneysel sonuç).....	45
Şekil 5.19. Statik eksantriklik arızası için MLP'nin doğruluk tablosu (Deneysel sonuç).....	46
Şekil 5.20. Arızaların sınıflandırılması için MLP'nin doğruluk tablosu (Deneysel sonuç)..... (1-Sağlıklı, 2-Kırık çubuk, 3-Statik Eksantriklik, 4-Stator arızası).....	46
Şekil 6.1. STM32F429 DSP Kartı.....	47
Şekil 6.2. HCO5 Bluetooth Kartı.....	48
Şekil 6.3. Geliştirilen algoritmanın gerçek sistemde uygulanma akış diyagramı.....	49
Şekil 6.4. TFT LCD panelde kaçak akı, FFT spektrum ve arıza gösterimi.....	50
Şekil 6.5. Kablosuz arıza tespit sistemi cihaz prototipi.....	51

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Test Edilen Motorun Parametreleri (Gerçek plaka değerleri).....	16
Tablo 5.1. Deneylerde kullanılan motorun parametreleri.....	36

ÖZET

Asenkron motorlarda stator sargılarının kısa devre olması, rotor çubuklarının kırılması ve eksen kaçıklığı oluşabilecek temel arızalardır. Elektriksel ve mekanik arızaları tespit etmek için kullanılan en yaygın yöntem motor akım imza analizi (Motor Current Signature Analysis-MCSA) yöntemidir. Bu yöntemde arıza harmonikleri haricinde besleme kaynağı düzensizliği, statik ve dinamik yük durumlarını temsil eden harmonikler gibi bilgiler de bulunmaktadır. Bunlar arıza durumunda ortaya çıkan karakteristik harmonikler ile karışabilmektedir. Ayrıca asenkron motorlar bilindiği üzere güç, verim ve hız açısından değişik stator ve rotor yapısında (topoloji) üretilmektedir. Ayrıca arızanın çeşidine göre bazı karakteristik harmonikler stator akımında baskın olarak görülememektedir. Bu yüzden sadece motor akım bilgisine bakılarak arızanın tespiti, türü, büyüklüğü ve arıza noktasının belirlenmesi tam olarak sağlanamamaktadır. Arıza tespitini daha güvenilir biçimde sağlayabilmek için motor etrafındaki kaçak akılarından (leakage flux) yararlanılarak da arıza tespiti yapılabilmektedir. Motordaki kaçak akı bilgisini ölçmek için genellikle motor çerçevesine (frame) bir bobin (search coil) eklenmektedir. Ancak bu yöntemde elde edilen gerilim bilgisi eklenen sarımın sayısına, yönüne ve rotor dönme hızına bağlıdır. Motorun hava aralığında bulunan akı bilgisini ölçmek için ise stator oluklarına yerleştirilen alan etkili (hall-effect) sensörler kullanılmaktadır. Bu sensörleri stator oluklarına yerleştirebilmek için rotor kısmının motordan çıkartılması ve oluklara belirli sayıda sensörlerin yerleştirilmesi gerekmektedir. Özellikle büyük güçlü motor uygulamalarında sensör ve montaj maliyeti ağır finansal kayıplara neden olmaktadır. Uygulama zorluğu, maliyeti ve direkt akı bilgisi vermemesi gibi sebeplerden dolayı bu tip sensörlerin arıza tespitinde kullanımını kısıtlanmaktadır.

Proje çalışmalarının sonucu olarak, motorun manyetik davranışını, kaçak akı ölçümü ile doğrudan inceleyerek motor topolojisinden, besleme kaynağından ve yükün statik/dinamik durumundan bağımsız olarak arızanın tespiti doğru bir şekilde sağlanmıştır. Farklı yüklenme koşullarında her bir arıza türü için kaçak akıdaki etkin arıza harmonikleri belirlenmiştir. Çok katmanlı yapay sinir ağı (MLP-Multilayer perceptron) kullanılarak farklı tip arızalar otomatik olarak sınıflandırılmış ve tespit edilmiştir. Geliştirilen algoritmalar DSP'ye uygulanarak gerçek zamanlı arıza tespit modülü geliştirilmiş ve her bir arıza türü için önerilen arıza harmoniklerinin etkinliği deneysel sonuçlar ile de doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Arıza tespiti ve teşhisi, gerçek zamanlı arıza tespiti, Kaçak Akı, Asenkron Motor.

ABSTRACT

Basic faults that can occur in asynchronous motors are the stator windings short circuit, broken rotor bars, and misalignment. The most common method used to detect electrical and mechanical faults is motor current signature analysis (MCSA). However, besides fault harmonics, source irregularity harmonics and harmonics which represent static and dynamic load states are present in MCSA. Sometimes these harmonics can interfere with the fault characteristic harmonics. In addition, induction motors are produced for different stator and rotor configurations (topology) in terms of power, efficiency and speed. Beside, some characteristic fault harmonics are not observed in the current spectrum depending on the fault type. Therefore, only the motor current information cannot be used to determine the fault type, fault level, and fault location. In addition, fault detection is performed by utilizing the leakage and air gap fluxes. A search coil is usually added to the motor frame to measure the leakage flux information. However, the information obtained in this method depends on the windings number, the windings direction and the rotation speed. To measure air gap flux hall-effect sensors are placed in the stator slots. In order to place these sensors, the rotor must be removed and a certain number of sensors must be installed in the stator slots. Especially, in large motor applications, the cost of sensor and assembly is causing heavy financial losses. In addition, these hall-effect sensors have less resolution, and give a voltage-dependent flux information instead of direct flux information. Because of application difficulties, cost and indirect measurement of flux, application of such sensors are limited in fault detection.

In this project, the fault detection is achieved through analyzing magnetic behavior of motor by direct measurement of leakage flux regardless of motor topology, supply source and static / dynamic load states. The effective fault harmonics in the leakage flux are determined for each type of faults under different load conditions. The different faults were classified and detected automatically using the multi-layer artificial neural network (MLP-Multilayer perceptron). The real-time fault detection module was developed by deploying the developed algorithms to DSP and the efficacy of proposed harmonics for each fault type were proved by experimental results.

Keywords: Fault detection and diagnostics, real-time fault detection, Leakage Flux, Induction Motor.

1. GİRİŞ

Asenkron motorlar dayanıklı, güvenilir ve bakım gerektirmeyen yapılarından dolayı yıllardır endüstride üretimin neredeyse tüm aşamalarında yer alan en yoğun iş yüküne sahip motorlardır. Asenkron motorlarda oluşan beklenmedik arızalar endüstride üretimin durmasına, finansal kayıplara, üretim maliyetlerinin artmasına ve dolayısıyla üretim veriminin düşmesine ve enerji açığına sebep olmaktadır. Bu yüzden özellikle üretimin yoğun olduğu alanlarda arızaların henüz başlangıç aşamasında tespit edilip önlem alınması üretimin devamlılığı, ürün kalitesi ve üretim verimi açısından son derece önemlidir.

Günümüzde elektrik makinelerinde arıza tespiti için kullanılan en yaygın yöntem motor akım imza analizi (motor current signature analysis) metodudur. Motordan sensörler vasıtasıyla alınan hat analog akım bilgisi, belirli bir frekansta örneklenecek dijital bilgiye çevrilir. Elde edilen bu dijital akım bilgisine sinyal işleme yöntemleri uygulanarak frekans spektrumu elde edilir. Burada en yaygın olarak kullanılan sinyal işleme yöntemi Hızlı Fourier Dönüşümüdür (FFT). Elde edilen frekans spektrumunda ortaya çıkan karakteristik arıza harmonikleri arıza çeşidi, büyüklüğü vb. motor durum bilgilerini içermektedir. Ancak stator akımı sadece arıza durumunda değil aynı zamanda besleme kaynağı harmoniklerinden ve dengesizliğinden, statik ve dinamik yük durumlarından da etkilenmektedir. Örneğin; asenkron motorlar çalışma şartları ve yük durumuna bağlı olarak bazen yük salınımına maruz kalabilirler. Yük momentindeki salınım asenkron motorun kontrol ve sistem dinamiğini etkilemekle birlikte yük salınımına maruz kalan bu tip motorlarda doğru ve net bir arıza durum tespiti yapmak oldukça zorlaşmaktadır. Asenkron motorlarda durum tespit yöntemleri dikkate alındığında bugüne kadar yapılan birçok çalışmada motor yük durumu sabit olarak ele alınmıştır. Ancak yük momenti salınımı durumunda asenkron motorların akım spektrumu incelendiğinde yanıltıcı arıza sinyalleri görülebilmektedir. Bu sinyaller karakteristik arıza sinyalleri üzerinde arıza tespitini zorlaştıracak yönde bir etkiye sebep olmaktadır. (Long vd., 2005) yük salınımı tarafından üretilen pozitif ardışık bileşen harmonikler ile rotor arızası tarafından üretilen negatif ardışık bileşen harmonikler arasındaki etkileşimden yararlanarak bir arıza indeksi oluşturmuştur. Bu etkileşim sonucunda yük salınımı var iken kırık rotor çubuk arızası d-ekseni akım spektrumunda DC değerin varlığı ile tespit edilebilmektedir. Stator akımındaki yüksek dereceli uzay harmonikleri tarafından oluşan bileşenler yardımıyla kırık rotor çubuk arızası yük momenti salınımından ayrıştırılabilmektedir (Didier vd., 2005). (Bossio vd., 2009) stator akımındaki anlık aktif ve reaktif akım bileşenlerini elde ederek kırık rotor çubuk arızası ve düşük frekanslı yük momenti salınımlarını incelemiştir. Anlık aktif ve reaktif güç spektrumlarının analizi yardımıyla da kırık rotor çubuk arızası düşük frekanslı yük momenti salınımlarından ayrıştırılmaktadır (De Angelo vd., 2010). Anlık aktif ve reaktif güç teorisinden elde edilen anlık

aktif ve reaktif Park's akım vektörlerinden yararlanılarak kırık rotor çubuğu arızası düşük frekanslı yük salınımlarından ayrıştırılmıştır (Pezzani vd., 2010). Ancak mevcut yöntemlerin çoğunda stator akımındaki besleme kaynağı düzensizliği ve motorun topolojisi göz önüne alınmamıştır. Kullanılan tüm yöntemlerde arızaya sebep olan harmonikler belirli bir motor topolojisi için incelenmiştir. Bu durum mevcut akım tabanlı analizlerin arıza tespitinde kullanılmasını kısıtlamaktadır.

Asenkron motorlarda arıza tespitinde uygulanan bir diğer yöntem ise stator oluklarına yerleştirilen Alan-Etkili (Hall-Effect) sensörler vasıtasıyla hava aralığındaki akı bilgisini incelemektir. (Dias vd., 2006) hall-effect sensörden elde edilen manyetik alan akı şiddeti bilgisine yapay sinir ağları tekniğini uygulayarak kırık rotor çubuk sayısını tespit etmiştir. Alan etkili sensörler ile elde edilen hava aralığı akısının frekans spektrumundan yararlanılarak kırık rotor çubuğu arızasının çok düşük kayma değerlerinde bile ana harmonikten gözlenebileceği gösterilmiştir (Dias ve Chabu 2014). Ancak burada ana harmoniğin yüklenme durumunda değişebileceği göz önüne alınmamıştır. (Mirzaeva vd., 2016; Mirzaeva vd., 2017; Saad ve Mirzaeva 2016) stator slotlarına koydukları birkaç adet hall-effect sensörler ile motorun hava aralığı akısını kırık rotor, stator kısa devre, statik ve dinamik eksantriklik arızası durumları için incelemiştir. Arıza durumlarını zaman ve frekans eksenlerinde inceleyerek arıza noktasının yerini stator ve rotora göre tespit etmişlerdir. Ancak uygulamada kullanılan sensör sayısı ve rotor montajı maliyeti oldukça arttırmaktadır. (Saad ve Mirzaeva 2015) ise asenkron motorlarda hava aralığındaki akıda bulunan uzay harmoniklerini incelemiştir. Eksantriklik durumunda çift dereceli harmoniklerin hava aralığındaki akıda arttığı gözlenmiştir. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki alan etkili sensörler kullanılarak motorun hava aralığında ki ana akım bilgisine ulaşılarak arıza tespiti yapılabilmektedir. Ancak bu sensörlerin sayısı ve montaj maliyeti düşünülürse özellikle büyük güçlü motorlarda ağır finansal kayıplara yol açacaktır.

Asenkron motorlarda araştırma sargıları (search coils) kullanılarak da arıza tespiti yapılabilir. Bu yöntemde motor çerçevesine (frame) eklenen sargıda motorun manyetik akısındaki değişime göre bir gerilim indüklenir. Bu gerilimin değeri Faraday kanunu gereği sarım sayısına ve akıdaki değişim oranına bağlıdır. (Henao vd., 2003; Yazidi vd., 2005a) stator sargı arızasını external stray flux sensor (yüksek sarım sargılı bobin) kullanarak tespit etmiştir. Bu çalışmada motor yüksüz durumda iken arızalı stator sarım sayısı çok düşük olsa bile arıza tespiti sağlanmıştır. Ancak elde edilen sonuçların sensörün konumuna bağlı olduğu görülmüştür. Yine aynı sensör yapısı kullanılarak asenkron motorda kırık rotor çubuğu arızası tespiti üzerine çalışmalar yapılmıştır (Yazidi vd., 2005b). Bu çalışmada kaçak akı (stray flux)'dan dolayı flux sensöründe indüklenen gerilimde $(1-2s)f_s$ harmoniğinin tüm yüklenme koşullarında çok daha baskın olduğu görülmüştür. (Bacha vd., 2006) stator gerilim asimetrisi

ve kırık rotor çubuğu arızası giriş gücüne, kaçak akıya ve momente bakarak incelemiştir. Kaçak akıdan dolayı search coil sarımında indüklenen gerilimde $(1\pm 2s)f_s$ harmoniğinin varlığı açıkça görülmektedir. Asenkron motorlarda kırık rotor çubuk arızası durumunda wound flux sensor (yüksek sarımlı search coils)'de kaçak akıdan dolayı indüklenen sensör gerilimde sf_s ve $3sf_s$ sinyalleri temel kırık rotor çubuk arızası sinyali olarak tanımlanmıştır (Ceban vd., 2010; Ceban vd., 2012; Romary vd. 2013). (Bouzida vd., 2014; Elkasabgy vd., 1992) search coil kullanarak kaçak akıda kırık rotor çubuk arızasını incelemiştir. Bu çalışmada search coil gerilim spektrumunda $f_r \pm sf_s$ harmonikleri tespit edilmiştir. Ayrıca kırık rotor çubuk (Chernyavska ve Vitek 2016) ve eksantriklik arızası (Ishkova ve Vitek 2016) tarafından axial hall probe kullanılarak incelenmiştir. Manyetik akı yoğunluğu spektrumunun akım spektrumuna göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. (Frosni vd., 2015) emerson flux probe ile aksenal ve custom flux probe ile de radyal akı ölçümleri yapılarak mil yatağı arızasını tespit etmiştir. Stator sarım arızası için stator slotlarına yerleştirilen gözlemci sarımlarda (observer coil) meydana gelen gerilim (Surya vd., 2015) ve eksantriklik arızası (Wang vd., 2015) tarafından incelenmiştir. Karışık (mixed) ve dinamik eksantriklik arızasında slot kaçak akısının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Kapalı çevrim kontrollü asenkron motorlarda eksantriklik arızası durumunda taşıyıcı frekansın etkisinden dolayı stator faz akımında bazı arızalı sinyaller bastırılmaktadır. Ancak araştırma sargılarındaki gerilimin eksantriklik arızası durumunda düştüğü açık bir şekilde görülmektedir (Alcin vd., 2014). Araştırma sargılarını bazen stator oluklarına yerleştirerek de arıza tespiti sağlanabilir (Arjmand ve Sargolzaei 2016). Araştırma sargılarından elde edilen hava aralığı akısının analizi ile stator kısa devre arızası ve eksantriklik arızası tespit edilmiştir. (Arjmand ve Sargolzaei 2016) özellikle stator sargısında meydana gelen kısa devre arızasının yerinin tespitinde ve eksantriklik arızasının yönünün tespitinde araştırma sargılarından elde edilen gerilimin sadece ana harmoniğini inceleyerek arıza tespitini sağlamıştır. Aksenal Akı makinelerinde (Axial Flux Machines) sadece hava aralığı akısının ana harmoniği incelenerek hava aralığına bırakılan 3 farklı araştırma sargısı ile statik eksantriklik arızası anlık olarak tespit edilmiştir (Godoy vd., 2016).

Genelde arıza tespiti akım spektrumu gibi yardımcı grafik araçları kullanılarak çevrimdışı (offline) olarak ve bir uzman tarafından manuel yapılır. Bu nedenle otomatik arıza teşhisi büyük bir ilgi odağı haline gelmiştir. Otomatik arıza teşhisi işlenmemiş (ham) sinyallerden çıkarılan belirgin özellikler kullanılarak sinyallerin sınıflandırılması yoluyla yapılır. Çok katmanlı yapay sinir ağı (MLP-Multilayer Perceptron) yöntemi vb.leri kullanılarak arızanın türü ve şiddetini otomatik olarak belirlemek mümkündür. Mevcut çalışmalar incelendiğinde, asenkron motorlarda meydana gelen/gelebilecek arızaları tespit etmek için çok sayıda yöntem önerilmesine karşılık, bu çalışmaların büyük bir bölümünde stator akımının, hava aralığındaki akının alan etkili sensörler ile incelenmesi ve hava aralığı/motor çevresindeki akının araştırma

sargılarında meydana gelen gerilimler ile incelenmesi temeline dayandığı görülmektedir. Ancak, bu yöntemlerin bazı dezavantajları bulunmaktadır;

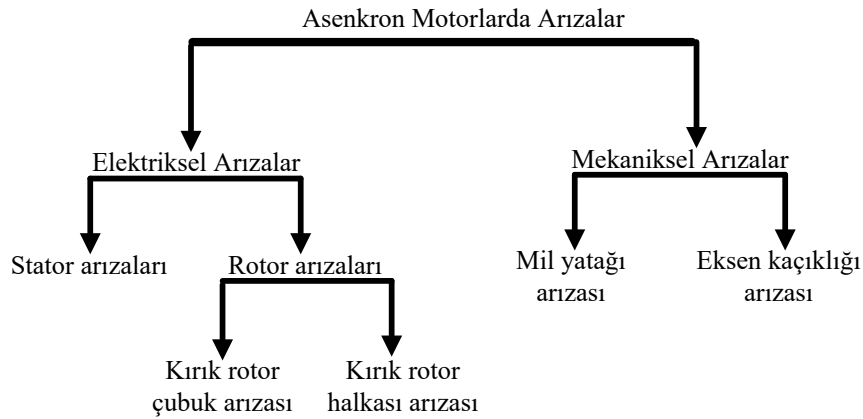
- Stator akımında arızaya sebep olan harmonikler haricinde besleme kaynağı düzensizliği ve yükün statik/dinamik durumunun etkisi bulunmaktadır. Bu etki bazen yanlış arıza sinyallerinin (false alarm) görünmesine sebep olmaktadır.
- Alan etkili sensörlerin montaj maliyeti özellikle büyük güçlü motorlarda oldukça ağır finansal kayıplara sebep olacaktır. Alan etkili sensörlerin çıkışta verdiği gerilim bilgisi sıcaklığa bağlı olarak değişmesi, duyarlılığının akı (fluxgate) sensörlerine göre oldukça düşük seviyede olması
- Araştırma bobinlerinde indüklenen gerilimin sadece akıdaki değişime değil aynı zamanda sarım sayısına bağlı olması arızaya sebep olan harmoniklerin genliği hakkında hatalı sonuçlar verebilmektedir.
- Araştırma bobinlerinin montaj maliyeti, elde edilen gerilimin hız ve sarım sayısına bağlı olması ve özellikle küçük ve dar ortamlarda kullanım zorluğu arıza tespiti uygulamalarında kullanımını zorlaştırmaktadır.

Bu proje kapsamında uygulanan teknikte ise kaçak akının akı sensörleri (fluxgate) kullanılarak ölçülmesi ile motorun arıza durumunda manyetik davranışı hem zaman hem de frekans ekseninde incelenmiştir. Sadece zaman eksenine bakılarak arıza tespiti sağlanması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Farklı stator ve rotor oluk sayısında, farklı stator bağlantı şekillerinde olan farklı tip asenkron motorlarda akım, gerilim, hız, moment ve kaçak akı bilgisi sürekli durumda analiz edilerek motor topolojisinden bağımsız bir arıza tespit algoritması geliştirilmiştir. Proje kapsamında; kırık rotor çubuk arızası, eksantriklik arızası ve stator kısa devre arızası kaçak akı bilgisi kullanılarak yüksek doğrulukta tespit edilmiştir ve DSP tabanlı gerçek zamanlı bir arıza tespit modülü oluşturulmuştur.

Giriş bölümünden sonra Bölüm 2'de asenkron motorda meydana gelen mekaniksel ve elektriksel arızalarda ortaya çıkan temel karakteristik harmonikler hakkında teorik bilgiler anlatılmıştır. Bölüm 3'te ANSYS@Maxwell paket programında oluşturulan motor modelleri ve kırık rotor çubuk, eksantriklik ve stator kısa devre arızası modellerinin nasıl oluşturulduğu anlatılmıştır. Bölüm 4'de ise simülasyon ortamında elde edilen sonuçlar gösterilmiş ve kaçak akıdaki etkin arıza sinyalleri belirlenmiş ve çok katmanlı yapay sinir ağı kullanılarak arızalar otomatik olarak sınıflandırılmış ve tespit edilmiştir. Belirlenen arıza sinyalleri farklı motor yüklenme koşullarında çalıştırılarak bu sinyallerin arıza tespitinde etkinliği de test edilmiştir. Bölüm 5'te ise deneysel devre düzeneği tanıtılarak deneysel sonuçlar elde edilmiş ve Bölüm 6'da anlık arıza tespit modülünün tasarım aşamaları anlatılmıştır. Bölüm 7'de ise sonuçlar ve öneriler bulunmaktadır.

2. ASENKRON MOTORDA MEYDANA GELEN ARIZALAR

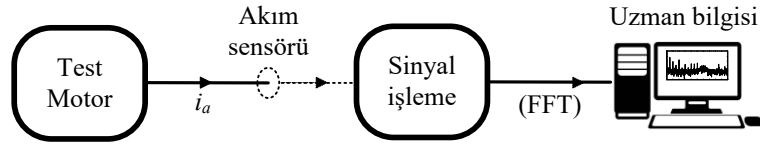
Genel olarak asenkron motorda oluşan arızalar, mekaniksel ve elektriksel olmak üzere iki temel başlık altında toplanabilir (Şekil 2.1). Mekaniksel arızalar daha çok motorun mekanik kısmından kaynaklanan arızalar iken elektriksel arızalar motordaki elektriksel hatalardan dolayı meydana gelen arızalardır. Stator sargı arızaları, kırık rotor arızası, eksen kaçıklığı ve mil yatağı arızası asenkron motorda meydana gelen başlıca arızalardandır. (EPRI EL-267 1982) ve (IEEE Motor Reliability Working Group 1985) tarafından yapılan araştırmalarda büyük motorlarda meydana gelen arızaların yüzdelerini belirtilmektedir. Bu sonuçlara göre mil yatağı ve stator arızaları baskın arıza tiplerindedir. Bununla birlikte rotor arızaları %10 civarında olup net bir şekilde sınıflandırılabilir.



Şekil 2.1. Asenkron motorlarda meydana gelen arızalar

Asenkron motorda herhangi bir arıza meydana geldiğinde arızanın türüne ve yoğunluğuna bağlı olarak, giriş gerilimi ve akımında dalgalanma, moment ve hızda salınım ve sargılarda aşırı ısınma meydana gelebilmektedir.

Makinenin stator akımı, gerilimi ve manyetik akı gibi elektriksel büyüklüklerine bakılarak hata tespiti yapılabilmektedir. Herhangi bir mekaniksel veya elektriksel arıza durumunda makinedeki akım, gerilim ve akı gibi elektriksel değişkenler karakteristik hata sinyallerini içerir. Motordaki elektriksel büyüklükler arasında motor stator akımının analizi; düşük maliyetli durum izleme ve motorun durum bilgisini anlık olarak sağlaması gibi sebeplerden dolayı en çok tercih edilen elektriksel analiz türüdür. Stator akımı besleme kaynağı harmoniklerinden, statik ve dinamik yük durumlarından, mekaniksel ve elektriksel arızalardan etkilenmektedir. Makineden elde edilen elektriksel büyüklükleri zaman ekseninde incelemek ve hata tespitini sağlamak oldukça zordur. Bu yüzden elde edilen büyüklükler frekans eksenine dönüştürülerek frekans spektrumu elde edilmekte ve hata tespiti sağlanmaktadır. Stator akım spektrumunun incelenmesi metoduna motor akım imza analizi (MCSA) denilmektedir. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi motor akım imza analizi yöntemi ile arıza tespiti temel olarak üç adımdan oluşmaktadır.



Şekil 2.2. Motor akım imza analizi metodu

Motorun fazından sensörler vasıtasıyla alınan faz analog akım bilgisi, belirli bir frekansta örneklenecek dijital bilgiye çevrilir. Elde edilen bu dijital akım bilgisine sinyal işleme yöntemleri uygulanarak frekans spektrumu elde edilir. Burada en yaygın olarak kullanılan sinyal işleme yöntemi Hızlı Fourier Dönüşümüdür (FFT). Elde edilen frekans spektrumunda ortaya çıkan karakteristik arıza harmonikleri arıza çeşidi, yüzdesi vb. motor durum bilgilerini içermektedir.

Motor akım imza analizi yönteminin diğer kullanılan yöntemlere göre en önemli avantajları arasında herhangi ek bir fiziksel donanıma gerek kalmadan motor durum tespitini anlık olarak sağlayabilmesi, motorun iç kısmına ulaşamadığı durumlarda ve tehlikeli çalışma ortamlarında bile motor akım bilgilerini basit bir akım probu ile elde edilebilmesi olarak sıralanabilir. MCSA tekniği ile asenkron motorlarda kırık rotor çubuk arızası, stator kısa devre arızası, eksen kaçıklığı, mil yatağı vb. arızalar tespit edilebilmektedir.

2.1. Kırık Rotor Çubuk Arızası

Sincap kafese sahip asenkron motorlar daha az bakım gerektirmesi, yüksek verimi gibi sebeplerden dolayı rotoru sargılı motorlara göre daha çok tercih edilmektedir. İsminden de anlaşıldığı gibi rotoru sincap kafesini andıran rotor çubuklarından oluşmaktadır. Akımın aktığı bu rotor çubukları çeşitli sebeplerden dolayı bazen çatlayabilir veya kırılabilirler. Bu olaya kırık rotor çubuk arızası denilmektedir. Kırık rotor çubuk arızası direkt olarak motorun fiziksel dinamiğini etkilemese de bu arızadan dolayı kırık rotor çubuklarında aşırı ısınma meydana gelmektedir. Ayrıca kırık rotor çubuğu yüksek hızlarda stator çekirdeğinde yüksek gerilimlerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durum ciddi yalıtım sorunlarına, sargıların yanmasına, yüksek onarım maliyetine ve dolayısıyla üretim maliyetinin artması gibi sorunlara sebep olmaktadır. Rotorda herhangi bir rotor çubuğu kırıldığında kırık olan rotor çubuğundan akım akamayacaktır. Kırık rotor çubuğundan akması gereken akım kırık rotor çubuğuna komşu olan diğer çubuklardan akacaktır. Bu aşırı akımlardan dolayı komşu rotor çubukları da kısa sürede zarar görecektir.

Kırık rotor çubuk arızası MCSA tekniği ile akımdaki harmoniklere bakılarak tespit edilebilmektedir. Akımda ortaya çıkan harmonikleri açıklamak için asenkron motorun çalışma prensibi dikkate alınabilir. Normal bir çalışmada sağlıklı bir motorda, statora göre rotor çubuklarından akan akımın ürettiği manyetik alan hızı rotorun gerçek dönme hızı n_m 'den daha

yüksek bir hızdadır. Bu durumda durağan stator sargılarına göre akım taşıyan rotor iletkenleri tarafından üretilen dönen manyetik alanın hızı;

$$n_m + n_{kayma} = n_m + n_s - n_m = n_s \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'den de görüldüğü üzere, sabit stator sargısındaki durağan bir gözlemciye göre, rotorda oluşan dönen manyetik alanın toplam hızı stator manyetik alanın hızı olan n_s 'e eşittir. Kırık rotor çubuk arızası durumunda rotor hızına göre kayma hızında fakat ters yönde ek bir dönen manyetik alan ortaya çıkmaktadır. Kırık rotor çubuklarından dolayı rotor tarafından üretilen ters yönde dönen manyetik alanın hızı n_b olarak adlandırılırsa;

$$\begin{aligned} n_b &= n_m - sn_s = \overbrace{n_s}^{n_m} (1-s) - sn_s \\ &= n_s - 2sn_s \\ &= (1-2s)n_s \end{aligned} \quad (2.2)$$

Kırık rotor durumunda durağan stator sargılarının gördüğü dönen manyetik alan, $(1-2s)n_s$ 'tir. Denklem (1.6) frekansa bağlı olarak yazılırsa kırık rotor çubuk arızası frekansı (f_b) elde edilir.

$$f_b = (1-2s)f_s \quad (2.3)$$

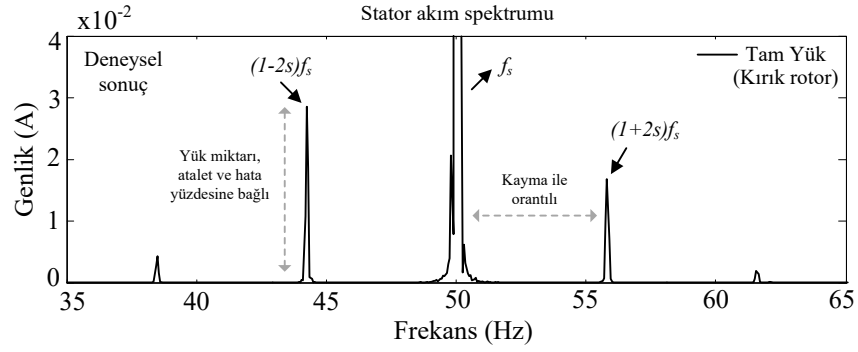
Kırık rotor çubuğu arızası durumunda stator akımında kayma frekansının iki katı frekanslarındaki sol ve sağ yan band bileşenlerine bakılarak arıza tespiti sağlanabilmektedir:

$$f_b = (1 \pm 2ks)f_s \quad k=1,2,3... \quad (2.4)$$

Bazen bu yan band harmonikleri üretim aşamasındaki aksaklıklardan dolayı sağlıklı bir motorda bile frekans spektrumunda görülebilmektedir. Fakat bu harmonikler genelde kırık rotor çubuğu durumunda ortaya çıkan harmoniklerden çok daha küçük değerdedir. Motor faz spektrumunda gözlenebilen diğer spektral bileşenler denklem şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$f_b = \left[\left(\frac{k}{p} \right) (1-s) \pm s \right] f_s \quad \frac{k}{p} = 1,3,5... \quad (2.5)$$

Kırık rotor durumunda ortaya çıkan sağ ve sol yan band harmoniklerinin genliği rotorun atalet momentine, motor yüküne ve kırık rotor çubuğu sayısına bağlıdır. Yan band harmoniklerinin ana harmoniğe olan uzaklığı ise motor kayma miktarına bağlıdır. Motorda kayma değeri arttıkça bu harmoniklerin ana harmoniğe olan uzaklığı artmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Kırık rotor çubuk arızası durumunda karakteristik arıza harmoniklerinin değişimi

2.2. Eksantriklik Arızası

Asenkron motorlarda rotor ile stator arasındaki hava boşluğunun homojen dağılmaması sonucu oluşan mekanik arıza türü eksantriklik arızası olarak tanımlanmaktadır. Bu arızalar orantısız kütle, şaft bükülmesi ve rulmandaki aksaklıklar gibi üretim aşamasında yapılan eksikliklerden dolayı meydana gelebilmektedir. Eksantriklik arızası hız ve momentte salınım, stator akımında, hava aralığı akısında gürültülere sebep olmaktadır. Eksantriklik arızasının tespiti için durum görüntüleme ve tespit yöntemleri kullanılmaktadır.

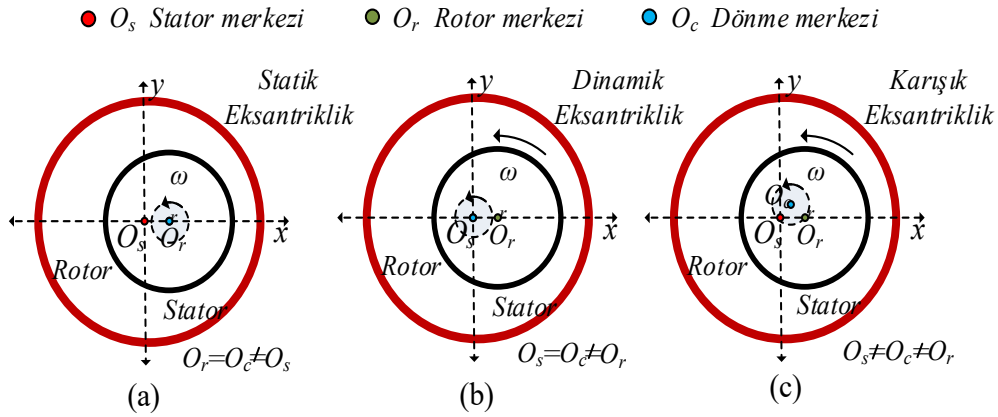
Eksantriklik arızası; Şekil 2.4'te görüldüğü gibi rotor ve rotor dönme pozisyonlarına bağlı olarak statik eksantriklik (SE), dinamik eksantriklik (DE) ve karışık eksantriklik (ME) olmak üzere üç çeşittir.

Rotor merkezi (O_r) ve rotor dönme merkezi (O_c); stator merkezinden (O_s) kaymış durumda ve hava boşluğu uzunluğunun x - y ekseninde sabitlendiği durumda Şekil 2.4a'daki gibi statik eksantriklik arızası, dönme merkezinin stator merkezinde olması fakat rotor merkezinin stator merkezinden farklı olması durumunda Şekil 2.4b'deki gibi dinamik eksantriklik arızası meydana gelmektedir. Dinamik eksantriklik arızasında hava aralığı rotor pozisyonuna ve zamana bağlı olarak değişmektedir. Her iki arıza türünün de birlikte görülmesi durumunda ise Şekil 2.4c'deki gibi karışık eksantriklik () arızası oluşmaktadır.

Eksantriklik arızası olan sürekli mıknatıslı asenkron motorlarda düzensiz bir hava boşluğu ve manyetik alan oluşmaktadır. Statik eksantriklik durumunda oluşan hava boşluğuaşğıdaki bağıntı ile ifade edilmektedir:

$$g(\varphi, t) = g_0(1 - \delta_{se} \cos(\omega_r t - \varphi)) \quad (2.6)$$

Burada; g_0 sağlıklı motordaki radyal hava boşluğu uzunluğu, $g_0 \in (0,1)$, δ_{se} statik eksantriklik derecesi, φ stator çevresindeki boşluk değişkeni, $\omega_r = \omega_s / p$ rotor açısal hızı, p kutup çifti sayısı, ω_s açısal besleme frekansını ifade etmektedir.



Şekil 2.4. Eksantriklik arızası durumu a) Statik eksantriklik b) Dinamik eksantriklik c) Karışık eksantriklik

Hava boşluğu manyetik geçirgenliği, üçüncü, dördüncü ve sonraki terimleri ihmal edilerek aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\Lambda(\Phi, t) = \frac{1}{g(\varphi, t)} = \frac{1}{g_0(1 - \delta_{se} \cos(\omega_r t - \varphi))} \quad (2.7)$$

$$j_s(\varphi, t) = j_0 \sin(\omega_s t - p\varphi) \quad (2.8)$$

$$B_s(\varphi, t) = \Lambda(\varphi, t) \int \mu_0 j_s(\varphi, t) d\varphi \quad (2.9)$$

Burada; j_s stator iç yüzeyindeki akım yoğunluğunu, j_0 maksimum akım yoğunluğunu; B_s stator hava boşluğu akı yoğunluğunu ifade etmektedir. Denklemlerdeki ifadeler birleştirildiğinde hava boşluğunun akı yoğunluğu, aşağıdaki bağıntı ile elde edilmektedir:

$$\begin{aligned}
 B_s(\varphi, t) &= \frac{\mu_0 j_0}{g_0 p} \cos(\omega_s t - p\varphi) \\
 &+ \frac{\mu_0 j_0 \delta_{se}}{2g_0 p} \cos\left(\left(1 + \frac{1}{p}\right)\omega_s t\right) \\
 &+ \frac{\mu_0 j_0 \delta_{se}}{2g_0 p} \cos\left(\left(1 - \frac{1}{p}\right)\omega_s t - (p-1)\varphi\right)
 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Eksantriklik arızası bulunan bir motorda düzensiz manyetik alan dağılımından dolayı hava aralığı akı dağılımı bozulmakta ve akım, akı, moment ve hızda harmonikler görülmektedir. asenkron motorlarda eksantriklik arızası durumunda stator akım spektrumunda denklem (1.6)'daki harmonikler görülmektedir:

$$f_{arıza} = f_s \pm f_r \quad (2.11)$$

Burada; f_s besleme kaynağı frekansını, f_r ise rotor dönme frekansını ifade etmektedir. Bu harmoniklerin genliği motor yüküne, arızanın şiddetine ve çeşidine göre değişebilmektedir.

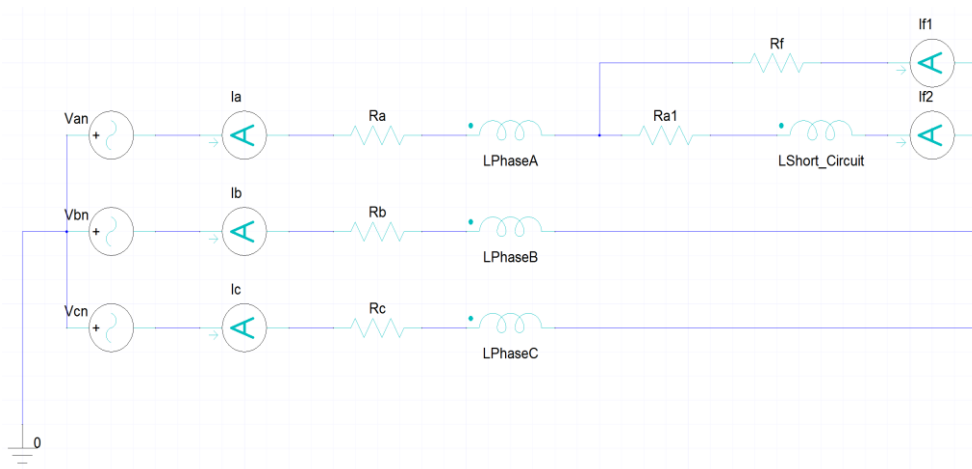
2.3. Stator Kısa Devre Arızası

Stator arızaları elektrik makinalarında yaygın olarak görülen arıza türlerinden biridir. Statorunda kısa devre arızası bulunan bir elektrik makinası istenen performansı ve verimi gösteremez. Bir elektrik makinasının statorundaki herhangi iki sarımın kısa devre olması o sarımlar arasında yüksek bir ısı artışına sebep olmakta ve kısa sürede etrafındaki sarımların da kısa devre olmasına neden olabilmektedir. Bu yüzden, küçük oranlarda başlayan kısa devre olayı hızlı biçimde yayılarak makinanın çalışmasını etkileyebilmektedir. Sarımlar arası kısa devre olayı en sık karşılaşılan arızalardan biridir. Şematik olarak Şekil 2.5'te gösterilen kısa devre olayı tespit edilmediğinde bu arızadan kaynaklı diğer arızalar meydana gelebilmektedir.

Şekil 2.5 statorunun bir fazındaki sarımlar arasında kısa devre olayı stator sarımlar arası kısa devre olayında oluşan i_f kısa devre akımı, hava aralığındaki stator MMF dağılımını etkilemektedir. Sarımlar arası kısa devre olayı sonucu stator simetrisinin bozulması ile bazı harmoniklerin genliklerinin ciddi değişimler göstermesi, sarımlar arası kısa devre olayının ciddi sonuçları arasında sayılabilir. Asenkron motorda stator kısa devre arızası durumunda stator akımında ortaya çıkan arıza harmonikleri

$$f_{stator_ariza} = f_s \left[\frac{n}{p} (1-s) \pm k \right] \quad (2.12)$$

şeklindedir. Burada f_s temel frekans, s motor kayması, p çift kutup sayısını, $n=1, 2, 3, \dots k=1, 3, 5, \dots$ ifade etmektedir. Ayrıca stator sarım arızası $\pm 3f_s$ harmoniklerinin akımda değişimine de neden olmaktadır (Wu ve Nandi, 2010).

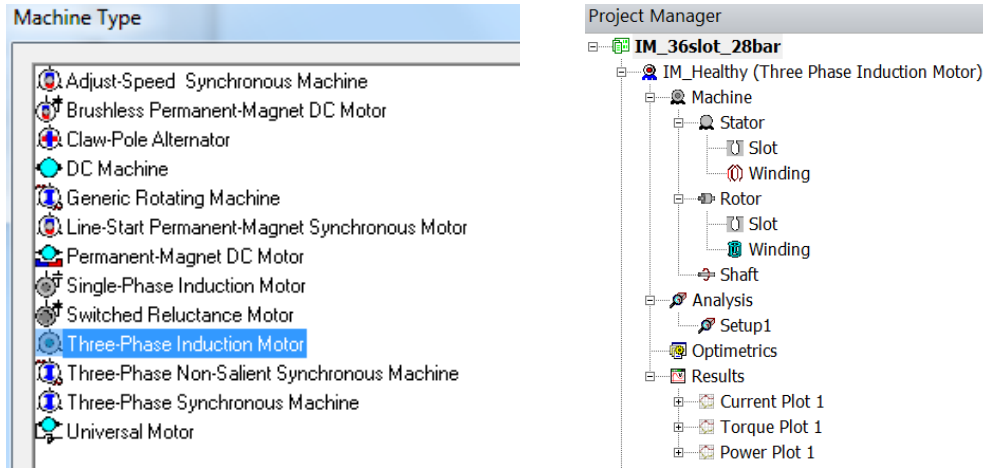


Şekil 2.5. Stator kısa devre arızası gösterimi

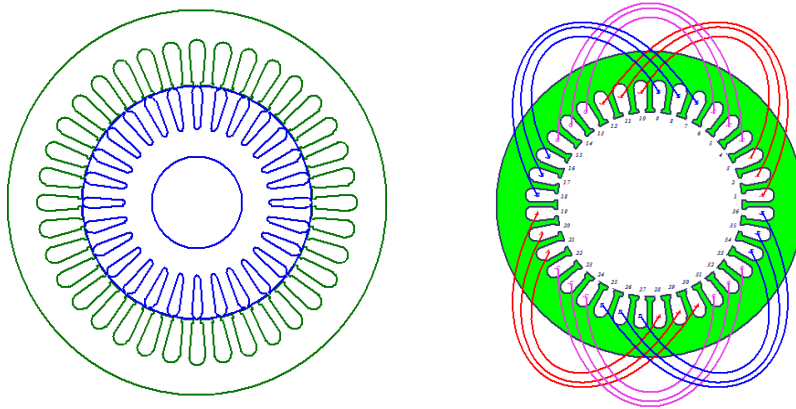
3. ASENKRON MOTORUN ve ARIZALARIN MODELLENMESİ

3.1. Asenkron Motorun Modellenmesi

Proje çalışmalarında deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırması için Asenkron motorlarda farklı tip arızaların oluşturulması ve kaçak akısında ve stator akımındaki etkilerinin incelenmesi amacıyla ANSYS@ Maxwell-2D paket programı kullanılmıştır. Bu bölümde asenkron motorun ANSYS@ Maxwell-2D paket programında modellenmesi konusunda açıklayıcı bilgiler verilecektir. Asenkron motoru ANSYS@Maxwell programında modellemek için öncelikle ANSYS@ RMXprt bölümünde motorun türü belirlenir. Şekil 3.1'de üç faz asenkron motor görüldüğü gibi, Three Phase Induction Motor olacak şekilde seçilir. Daha sonra Şekil 3.1'de gösterildiği gibi motorun boyutlarına göre rotor, stator ve şaft başlıkları altında bulunan motor parametreleri belirlenerek uygun asenkron motor modeli geometrisel ve elektriksel olarak oluşturulur. Motorun stator rotor geometrileri ve kullanılan malzemelerin seçimi belirlendikten sonra motor sargı düzeni belirlenir. Oluşturulan örnek bir model için elde edilen motor modeli ve sargı düzeni Şekil 3.2 'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. RMXprt'de motor modelinin seçimi ve motor parametrelerinin belirlenmesi



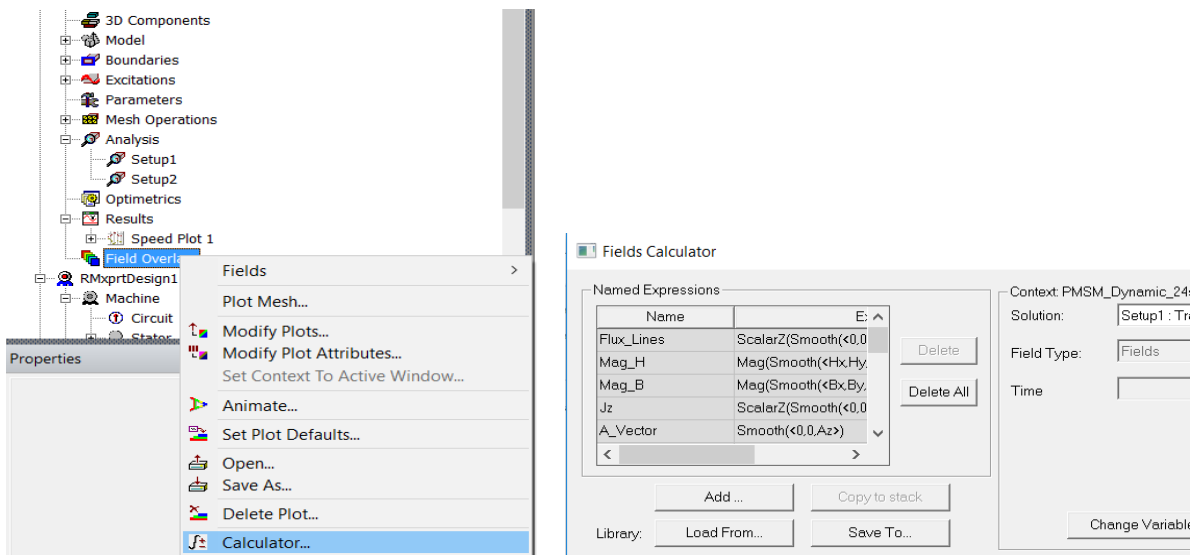
Şekil 3.2. RMXprt ile oluşturulan model ve stator sargı düzeni

RMxprt kısmında modelleme yapıldıktan sonra, programda Analysis kısmında Add Solution Setup sekmesine seçilir ve bir çözüm setup'ı oluşturulur. Bu adımda çıkış gücü, momenti vb. motorun etiket değerleri girilmektedir. ANSYS@Maxwell-2D modelini oluşturmak için RMxprt kısmında analiz işlemi sonrasında Analysis kısmında sağ mouse ile Create Maxwell Design seçilerek iki boyutlu ANSYS@Maxwell modeli otomatik olarak oluşturulmuş olur.

Proje kapsamında oluşturulan modellerde stator çekirdeği çapı, rotor çekirdeği çapı, şaft çapı, rotor çubuk yapıları ve motor çekirdeğinin derinliği gibi gerçek motor ölçüleri ve geometrisi göz önüne alınmıştır. Ayrıca stator sargı yapısı, hava aralığı, stator iletkenlerinin fiziksel durumu, stator ve rotor manyetik malzemeleri de oluşturulan asenkron motor modelinde dikkate alınmıştır.

ANSYS@Maxwell-2D modelinde uygulanan testlerde kaçak akı bilgisini ölçmek ve kaçak akıda etkin arıza sinyallerini incelemek için motorun dışındaki bir veya birkaç noktaya kaçak akı sensörü/sensörleri yerleştirilebilmektedir. Asenkron motor etrafında istenilen bir noktada kaçak akı yoğunluğunu incelemek için Şekil 3.3'de belirtilen Field Overlays\Calculator bölümünde gerekli ayarlar yapılır. Burada Bx ve By koordinat vektörleri belirlenir. Belirlenen noktalardan geçen kaçak akı bilgisini x-y koordinatlarında inceleyebilmek için Bx ve By manyetik alan bilgileri programa tanıtılır. Kaçak akı yoğunluğu tanımlaması yapıldıktan sonra kaçak akı manyetik alan yoğunluğunun izleneceği nokta seçilir.

Oluşturulan motor modeli uygun örnekleme frekansında çalıştırılarak motordaki manyetiksel ve mekaniksel değişimler farklı arıza tiplerinde ve farklı yüklenme koşullarında incelenebilmektedir.

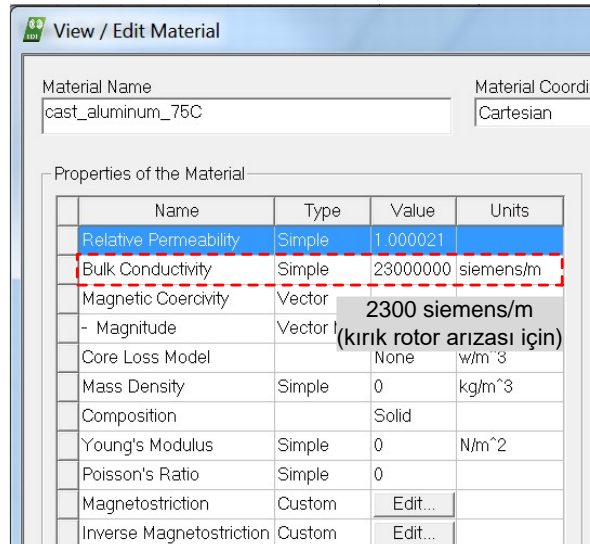


Şekil 3.3. ANSYS@Maxwell-2D programında manyetik alan vektörlerinin tanıtılması

3.2. Değişik Tipteki Arızaların Modellenmesi

3.2.1. Kırık rotor çubuk arızasının modellenmesi

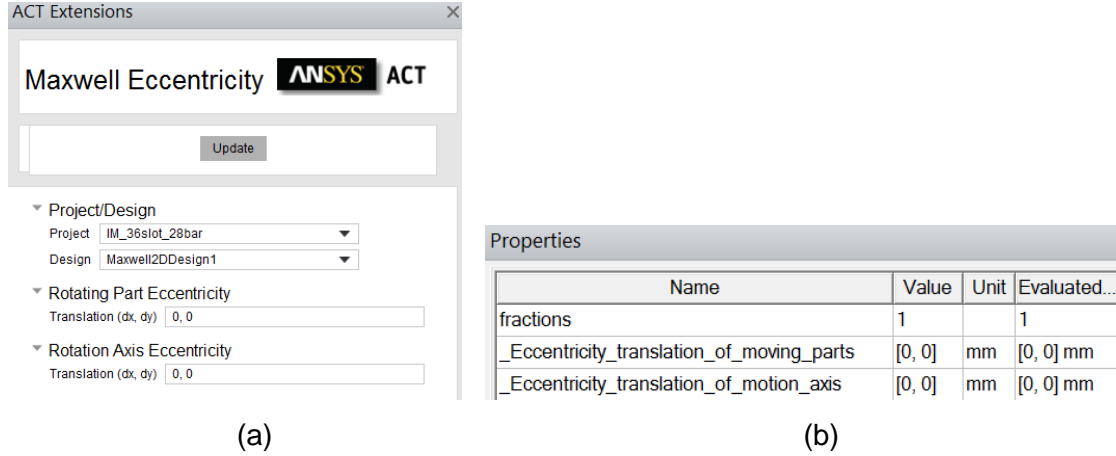
Yapılan literatür taramalarında ve araştırmacıların bilgileri doğrultusunda kırık rotor çubuk arızasının modellenmesi için en yaygın kullanılan ve doğru sonuç veren tekniğin rotor çubuk iletkenlik katsayısının düşürülmesi tekniği olduğu görülmüştür. Bu sebeple ANSYS@Maxwell-2D paket programında kırılacak rotor çubuğunun iletkenliği Şekil 3.4'te görüldüğü üzere 10000 kat düşürülmüştür. Böylece arızanın başlangıç aşaması modellenebilmektedir. Arızanın şiddetine göre bu iletkenlik katsayısı düşürülüp-arttırılabilir. Tam kırık rotor çubuk arızasına sahip bir rotorda ilgili rotor çubuğundan akım akmayacağı için rotor iletkenliği sıfır olacaktır. Oluşturulan model rotor çubuklarının farklı konumlarda kırılmasına ve farklı akı sensörü konumlarında analizlerin yapılmasına imkân sağlanmaktadır.



Şekil 3.4. Kırık rotor çubuk arızasının ANSYS@Maxwell-2D paket programında oluşturulması

3.2.2. Eksantriklik arızasının modellenmesi

Eksantriklik arızasının modellenmesi işlemi rotor eksenini ve rotorun dönme eksenini arızanın türüne göre farklı pozisyonlarda kaydırılarak oluşturulmuştur. ANSYS@Maxwell paket programında eksantriklik arızasının oluşturulması için rotor ve rotor dönme eksenlerinin konumları göz önüne alınmalıdır. Rotor merkezi (O_r) ve rotor dönme merkezi (O_c); stator merkezinden (O_s) kaymış ve hava boşluğu uzunluğunun x-y ekseninde sabitlendiği durumda statik eksantriklik arızası oluşmaktadır. Dönme merkezinin stator merkezinde bulunması fakat rotor merkezinin bu merkezlerden farklı olması durumunda ise dinamik eksantriklik arızası oluşmaktadır. Her iki arıza türünün de birlikte görülmesi durumunda da karışık eksantriklik arızası oluşmaktadır.

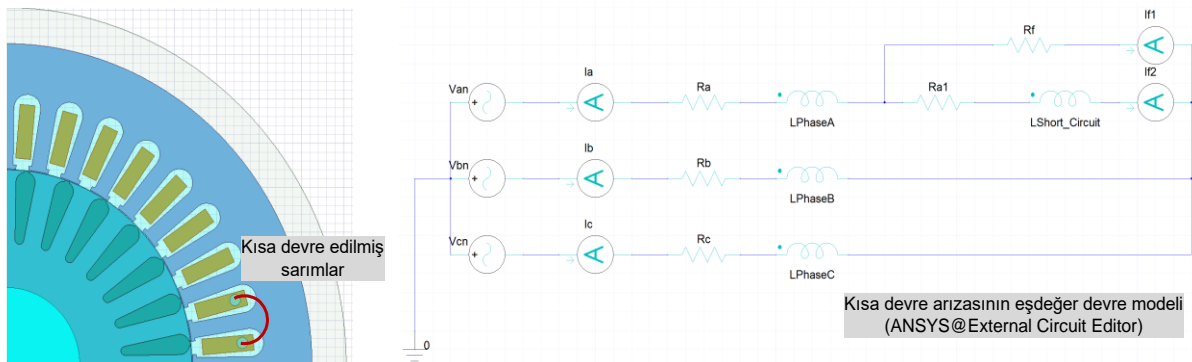


Şekil 3.5. a) Eksantrik arızası modeli b) İstenilen eksantriklik arızasının oluşturulması

ANSYS@Maxwell paket programında bulunan eksantrik oluşturma modülü kullanılarak statik, dinamik ve karışık eksantriklik arızaları farklı şiddetlerde oluşturulabilir. Bunun için Şekil 3.5a'da görüldüğü gibi View>ACT Extensions>Maxwell Eccentricity Wizard seçeneği kullanılır. Bu modül ile istenilen eksantriklik arızası Şekil 3.5b'deki gibi hareketli kısımlar (rotor ve barlar) ve dönme eksenini ayarları yapılarak oluşturulabilir.

3.2.3. Stator kısa devre arızasının modellenmesi

Stator kısa devre arızası analizi için A-fazındaki sargıların bir kısmı kısa devre edilmiştir. Bu işlem yapılırken faz sargıların harici kaynak ile beslenerek (External Circuit Editor aracılığıyla) arızalı asenkron motor modeli oluşturulmuştur. Şekil 3.6'da ANSYS@Maxwell-2D programında oluşturulan model görülmektedir. Oluşturulan modelde A-fazında bir slotta bulunan 42 adet sarımdan 5 adet sarım kısa devre edilmiştir. Faz başına düşen direnç değerleri kısa devre sarım oranına (arızanın şiddetine) göre değiştirilebilmektedir. Aynı zamanda kısa devre akımı bir direnç ile istenilen düzeyde sınırlandırılmaktadır.



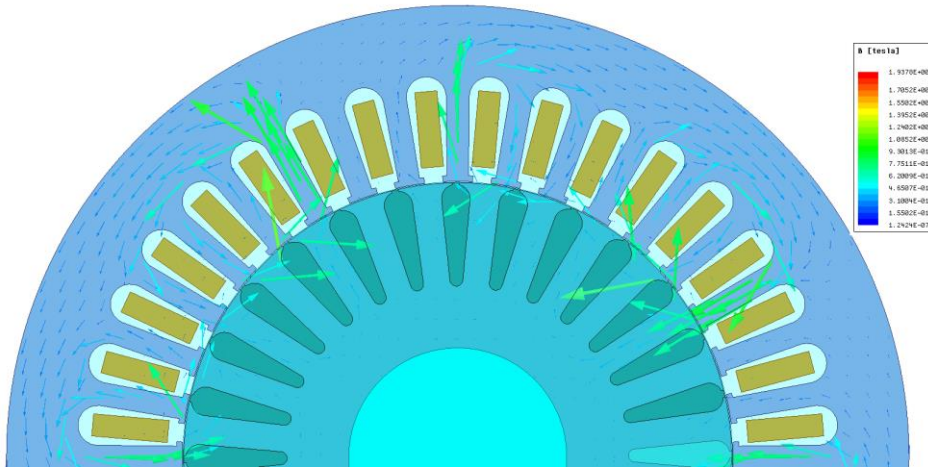
Şekil 3.6. ANSYS@Maxwell paket programında stator kısa devre arızasının modellenmesi

3.3. Örnek Bir Asenkron Motor Modeli ve Benzetim Sonuçları

ANSYS@Maxwell-2D programında örnek bir model olarak 2.2kW'lık bir asenkron motor seçilmiştir. Siemens firmasına ait gerçek motor bilgileri kullanılarak asenkron motorun benzetim modeli oluşturulmuştur. Bu modelde gerçek motorun kesiti alınarak stator, rotor ve şaft geometrileri ile stator sarım düzeni göz önüne alınmıştır. Şekil 3.7'de test edilen gerçek bir asenkron motor ve bu motorun ANSYS@Maxwell-2D modeli gösterilmektedir. Üç faz, 50 Hz, 2.2 kW'lık bu motorun gerçek etiket değerleri Tablo 3.1.'de verilmiştir. Modellenen motor ilk olarak RMXprt programında analiz edilmiştir. Şekil 3.8'de RMXprt modeli sonuçlarının Tablo 1.'deki gerçek motor etiket değerleri ile uyduğu net bir şekilde görülmektedir. RMXprt sonuçlarında ayrıca motorun dinamik performans bilgileri, mekaniksel ve elektriksel parametreleri incelenebilmektedir (Şekil 3.8.).



(a)



(b)

Şekil 3.7. a) Test edilen asenkron motor b) Asenkron motorun ANSYS@Maxwell-2D modeli

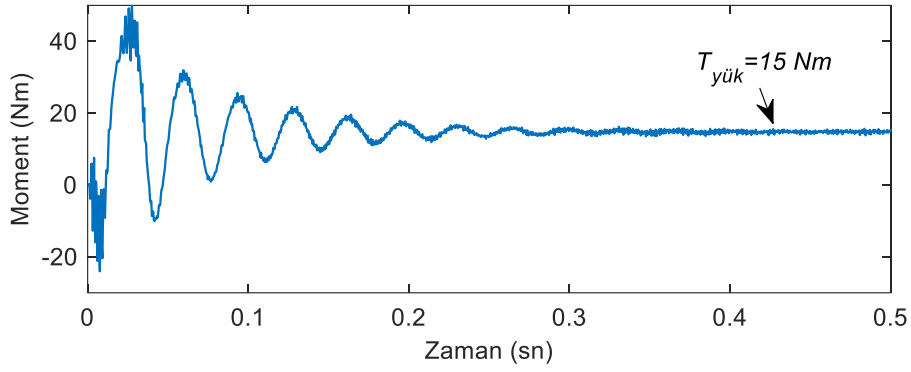
Tablo 3.1. Test Edilen Motorun Parametreleri (Gerçek plaka değerleri)

Kutup sayısı	4
Stator oluk sayısı	36
Rotor çubuk sayısı	28
Stator dış çapı, mm	145
Stator iç çapı, mm	89
Rotor dış çapı, mm	88
Rotor iç çapı, mm	34.7
Nominal gerilim, V	400
Besleme frekansı, Hz	50
Nominal güç, kW	2.2
Nominal akım, A	4.7
Rotor atalet katsayısı, kgm ²	0.047

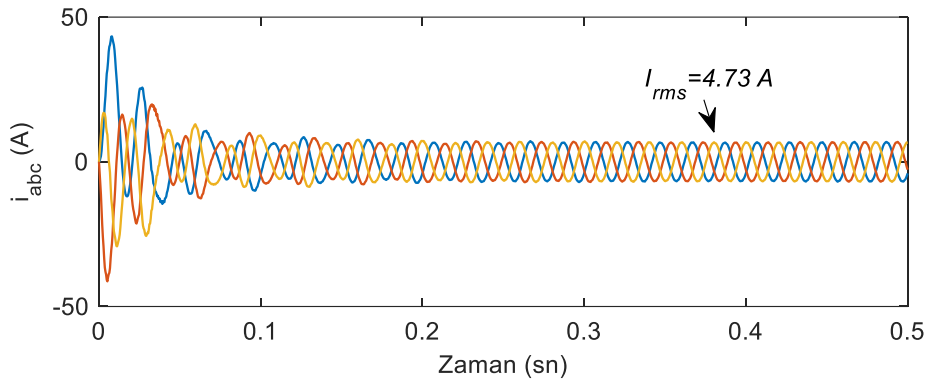
Performance	Design Sheet	Curves
Total Net Weight (kg):	12.2409	
Armature Core Steel Consumption (kg):	10.1941	
Rotor Core Steel Consumption (kg):	7.02727	
RATED-LOAD OPERATION		
Stator Resistance R1 (ohm):	2.80573	
Stator Resistance at 20C (ohm):	2.30794	
Stator Leakage Reactance X1 (ohm):	2.66834	
Slot Leakage Reactance Xs1 (ohm):	1.30031	
End Leakage Reactance Xe1 (ohm):	0.892877	
Harmonic Leakage Reactance Xd1 (ohm):	0.470155	
Rotor Resistance R2 (ohm):	2.69985	
Rotor Leakage Reactance X2 (ohm):	4.01002	
Resistance Corresponding to		
Iron-Core Loss Rfe (ohm):	7.77919e+07	
Magnetizing Reactance Xm (ohm):	81.5354	
Stator Phase Current (A):	4.78993	
Current Corresponding to		
Iron-Core Loss (A):	2.58656e-06	
Magnetizing Current (A):	2.4678	
Rotor Phase Current (A):	3.86138	
Copper Loss of Stator Winding (W):	189.108	
Copper Loss of Rotor Winding (W):	120.766	
Iron-Core Loss (W):	0.00156135	
Frictional and Windage Loss (W):	0	
Stray Loss (W):	0	
Total Loss (W):	309.876	
Input Power (kW):	2.51308	
Output Power (kW):	2.2092	
Mechanical Shaft Torque (N.m):	14.7948	
Efficiency (%):	87.6695	
Power Factor:	0.805545	
Rated Slip:	0.0519655	
Rated Shaft Speed (rpm):	1422.05	

Şekil 3.8. 36 slot, 28 bar (rotor çubuk sayısına) sahip asenkron motor RMXprt sonuçları

Şekil 3.9. 'da modellenen asenkron motorun ANSYS@Maxwell-2D simülasyon sonuçları görülmektedir. Şekil 3.9a'da görüldüğü gibi asenkron motorun yük momenti 15 Nm'dir. Şekil 3.9b'de ise stator akımlarının etkin değerinin 4.73 A olduğu net bir şekilde görülmektedir. Bu sonuçlara göre modellenen asenkron motorun, test edilen gerçek asenkron motor plaka etiket değerleri ile yüksek doğrulukla uyduğu ve oluşturulan modellerin doğruluğu olduğu görülmüştür.



(a)

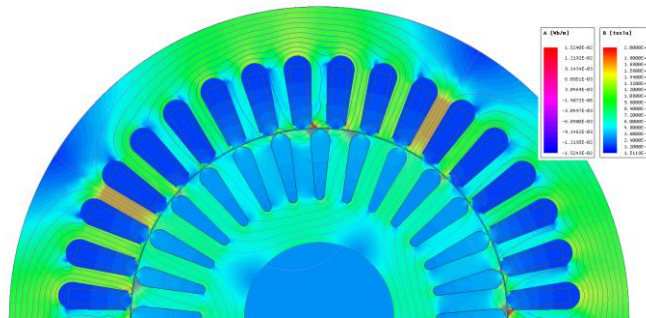


(b)

Şekil 3.9. ANSYS@Maxwell-2D sonuçları a) Moment-Zaman Grafiği b) Stator akımları-Zaman Grafiği

Son olarak modellenen asenkron motorun manyetik alan davranışı ANSYS@Maxwell-2D modelinde incelenmiştir. Motorun herhangi bir andaki manyetik akı yoğunluğu dağılımı Şekil 3.10'da görülmektedir. Şekil dikkatlice incelendiğinde modellenen motorda normal çalışma koşullarında herhangi bir manyetik doyum olmadığı ve manyetik alanın simetrik dağıldığı görülmektedir.

Böylece 1. İş paketinde belirtildiği asenkron motorların modellenmesi ve değişik tipteki arızaların oluşturulması başarılı bir şekilde sağlanmıştır.



Şekil 3.10. ANSYS@Maxwell-2D ile Modellenen Asenkron Motorun Manyetik Alan Dağılımı

4. KARAKTERİSTİK ARIZA SİNYALLERİNİN BELİRLENMESİ ve ÇOK KATMANLI YAPAY SİNİR AĞI MODELİ (MLP) İLE ARIZALARIN OTOMATİK OLARAK BELİRLENMESİ

4.1. Kırık Rotor Çubuk Arızası Durumunda Arıza Sinyallerinin Belirlenmesi

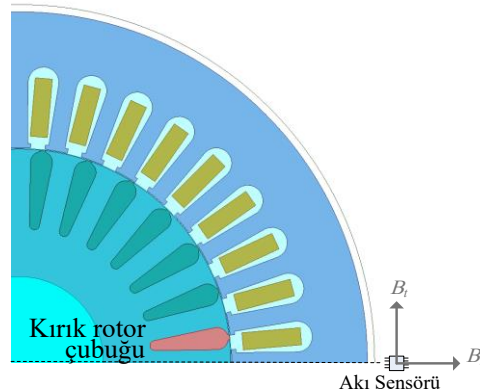
Asenkron motorda kırık rotor çubuk arızası durumunda stator akım ve kaçak akıdaki etkin arıza sinyallerini belirlemek için ANSYS@Maxwell-2D programında oluşturulan asenkron motor modelleri 2.5 KHz'lik örnekleme frekansında farklı yüklenme koşullarında çalıştırılmıştır. Uygulanan testlerde kaçak akı bilgisini ölçmek ve kaçak akıda daha etkin arıza sinyallerinin olduğunu göstermek için motorun dışındaki bir noktaya kaçak akı sensörü/sensörleri yerleştirilmiştir. Sağlıklı ve arızalı asenkron motor modelleri kullanılarak etkin arıza sinyalleri belirlenmiştir.

Kırık rotor çubuk arızasını kapsamlı bir şekilde analiz etmek için aşağıda belirtilen testler yapılmıştır;

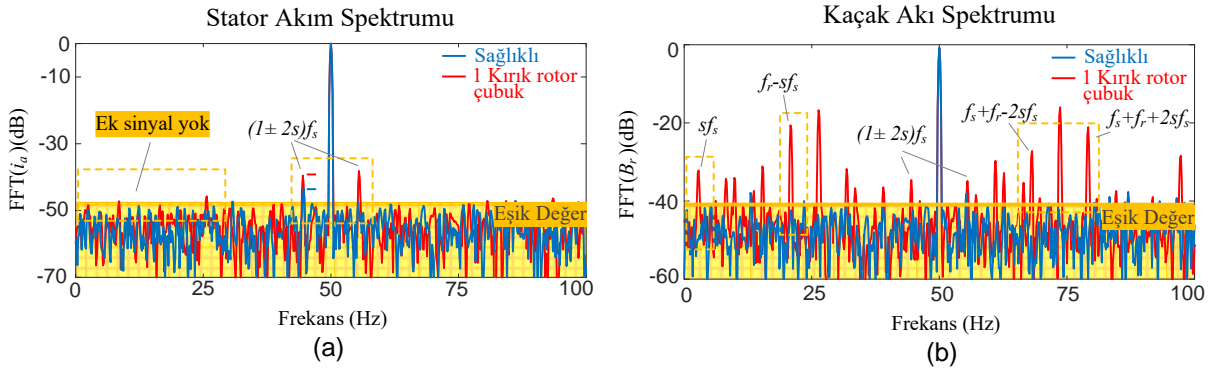
- Bir kırık rotor çubuk arızası
- Komşu iki kırık rotor çubuk arızası
- Statorun üçgen veya yıldız bağlı olması durumunda kırık rotor çubuk arızası
- Farklı topolojilere sahip asenkron motorlarda kırık rotor çubuk arızası
- Rotor slot harmoniklerinin yan bandlarının kırık rotor çubuk arızası durumunda incelenmesi
- Rotor çubuklarının farklı konumlarda kırılması , yarım-kutup adımı (Half-pole pitch), tam kutup adımı (full-pole pitch)

4.1.1. Bir kırık rotor çubuk arızası

Modellenen 2.2 kW'lık 50 Hz'lik asenkron motorda (36slot, 28bar) 1(bir) kırık rotor çubuk arızası oluşturulmuştur. Elde edilen modelde stator akımları ve kaçak akı spektrumları incelenmiştir ve kaçak akıda stator akımına göre daha fazla etkin arıza sinyallerinin olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.1.'de 1(bir) kırık rotor çubuk arızasına sahip asenkron motor görülmektedir.



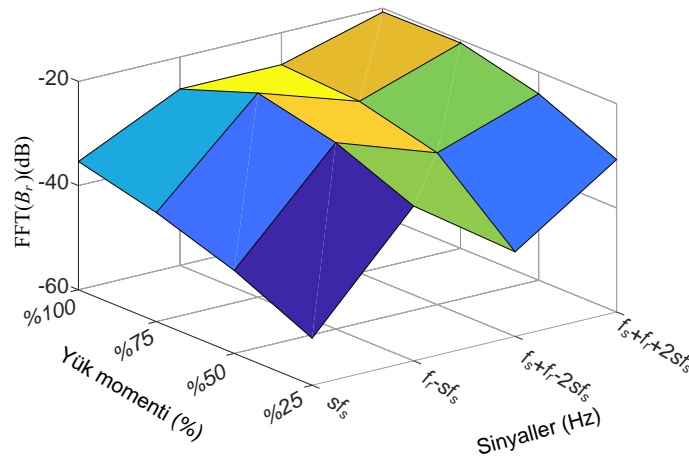
Şekil 4.1. Bir kırık rotor çubuk arızasına sahip motor ve kaçak akı sensörü pozisyonu



Şekil 4.2. Bir kırık rotor çubuk arızası durumunda a) Stator akım spektrumu b) Kaçak akı spektrumu (%100 Yükte)

Şekil 4.2’de asenkron motor tam yük çalışma koşullarında çalışırken 1 (bir) kırık rotor çubuk arızası durumunda stator akım ve kaçak akı spektrumları gösterilmektedir. Motor 1420 rpm hızda, $s=0.055$ kayma değerinde ve $f_r= 23,66$ Hz’lik dönme frekansında çalışmaktadır. Şekil 4.2a’da görüldüğü gibi literatürde tanımlı olan sağ ve sol yan band harmonikleri $(1\pm 2s)f_s$ sinyalleri stator akımında arıza durumunda ortaya çıkmaktadır. Aynı koşullar altında Şekil 4.2b’de ki kaçak akı spektrumu incelendiğinde arıza durumunda bazı ek sinyallerin ortaya çıktığı görülmektedir. Özellikle sf_s , f_r-sf_s ve $f_s+f_r\pm 2sf_s$ sinyallerinin arıza durumunda daha baskın olduğu görülmektedir. Böylece kaçak akı spektrumunun arıza tespitinde stator akım spektrumuna göre daha güvenilir ve doğru sonuçlar verdiği görülmektedir.

Şekil 4.3.’te ise asenkron motor farklı yük momenti değerlerinde çalıştırılarak belirlenen arıza sinyallerinin genliklerinin değişimi incelenmiştir. Beklenildiği gibi arıza sinyallerinin genliği motor yüklendikçe artmaktadır. Özellikle nominal yüklenme koşullarında karakteristik sinyallerin daha belirgin olduğu görülmektedir. Arıza sinyallerinden f_r-sf_s ve $f_s+f_r+2sf_s$ harmonik genliklerinin motor yükünden daha bağımsız olduğu net bir şekilde görülmektedir.



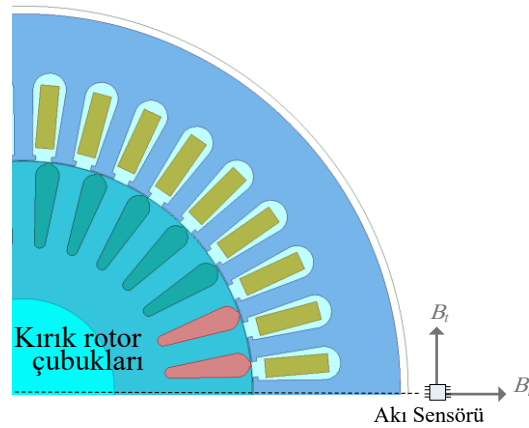
Şekil 4.3. Farklı yüklenme koşullarında karakteristik arıza sinyallerinin davranışı (1 Kırık Çubuk Arızası durumunda)

4.1.2. Komşu iki kırık rotor çubuk arızası

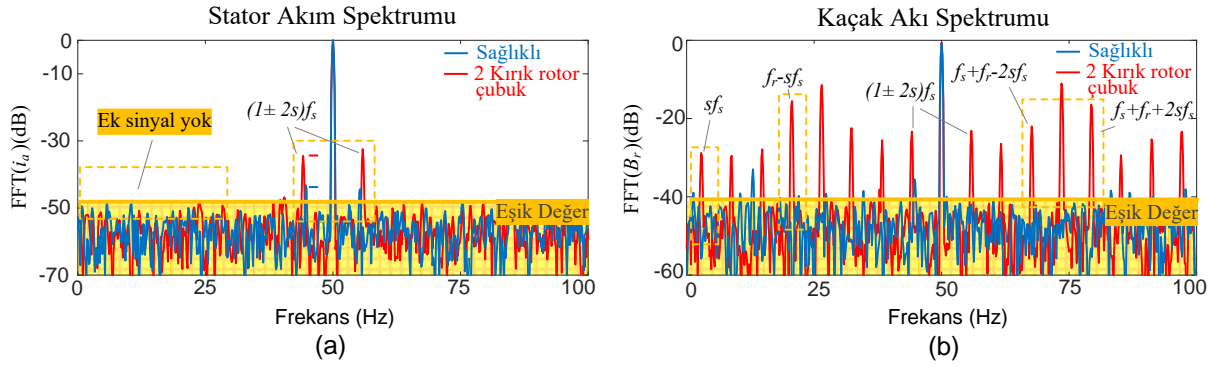
Şekil 4.4'te 2(iki) komşu kırık rotor çubuk arızasına sahip asenkron motor modeli görülmektedir. Oluşturulan model farklı yüklenme koşullarında çalıştırılan stator akımındaki ve kaçak akıdaki karakteristik sinyaller incelenmiştir. Şekil 4.5a'da arıza durumunda ortaya çıkan harmonikler stator akım spektrumunda $(1\pm 2s)f_s$ frekanslarında 55.5 Hz ve 44.5 Hz'de net bir şekilde görülmektedir. Böylece belirlenen arıza sinyalleri literatür ile doğrulanmıştır. Şekil 4.5b'de kaçak akı spektrumu incelendiğinde sf_s , f_r-sf_s ve $f_s+f_r\pm 2sf_s$ ($f_r=23.66$ Hz) harmonikleri kaçak akıda kırık rotor çubuk arızası durumunda görülmektedir. Bilindiği gibi arıza şiddeti arttıkça belirlenen sinyallerin genliğinde artmaktadır. Bir önceki test koşullarında 1(bir) kırık rotor çubuk arızasına göre 2(iki) komşu rotor çubuk arızasına sahip motorda sinyallerin genliği aynı koşullar altında daha baskındır.

Kaçak akı analizi ile sadece zaman eksenini analiz edilerek arıza tespiti sağlanabilmektedir. Şekil 4.6'da iki komşu kırık rotor çubuk arızası durumunda stator akımı ve kaçak akı zaman ekseninde incelenmiştir. Şekil 4.6a'da görüldüğü gibi stator akımında arıza durumunda belirgin bir fark yok iken Şekil 4.6b'de kaçak akıda zaman ekseninde arıza durumunda arızalı rotor çubuğu dolayısıyla akı azalırken yan çubuklardaki akı yoğunluğunun arttığı net bir şekilde görülmektedir. Böylece herhangi bir sinyal işleme metoduna ihtiyaç duymadan arıza tespiti sağlanabilmektedir. Ancak sonuçların güvenilirliği açısından tamamlayıcı olarak frekans spektrumu ile birlikte incelenmesi gereklidir.

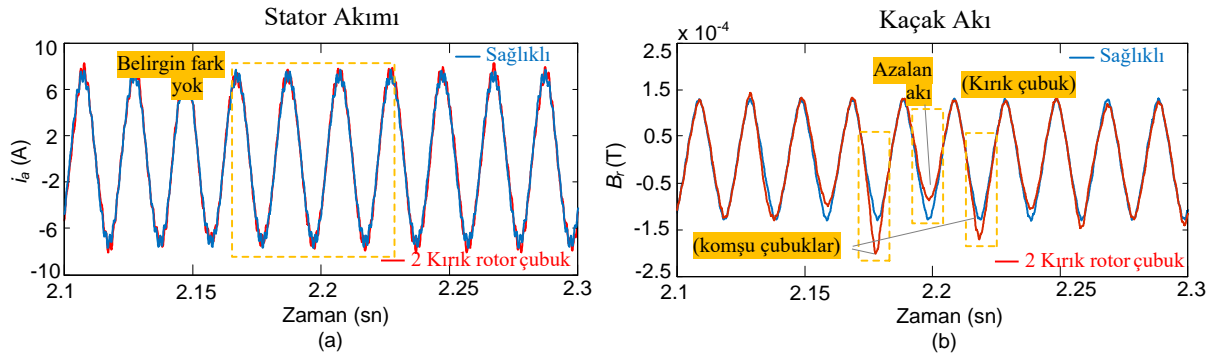
Şekil 4.7'de ise farklı yük momenti değerlerinde iki komşu kırık rotor çubuk arızasına sahip motorda kaçak akıda belirlenen karakteristik arıza sinyallerinin değişimi görülmektedir. Görüldüğü gibi özellikle f_r-sf_s ve $f_s+f_r+2sf_s$ sinyalleri yük momentinin değişmesinden daha az etkilenmektedir. Bu sinyaller bize yükten bağımsız bir arıza tespiti sağlamaktadır.



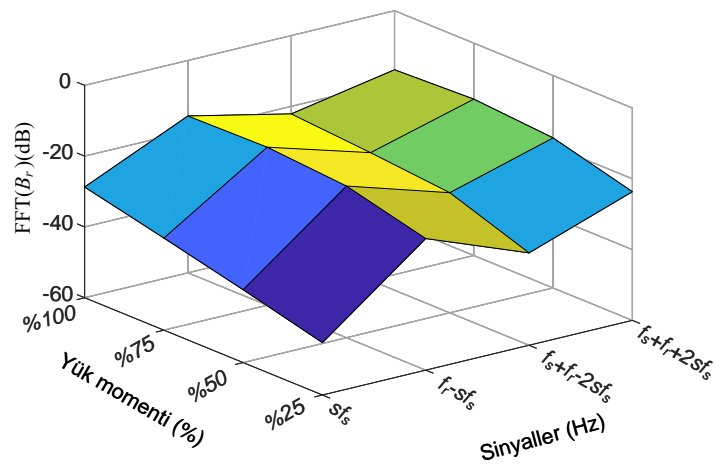
Şekil 4.4. İki komşu kırık rotor çubuk arızasına sahip motor ve kaçak akı sensörü pozisyonu



Şekil 4.5. İki komşu kırık rotor çubuk arızası durumunda a) Stator akım spektrumu b) Kaçak akı spektrumu (%100 Yükte)



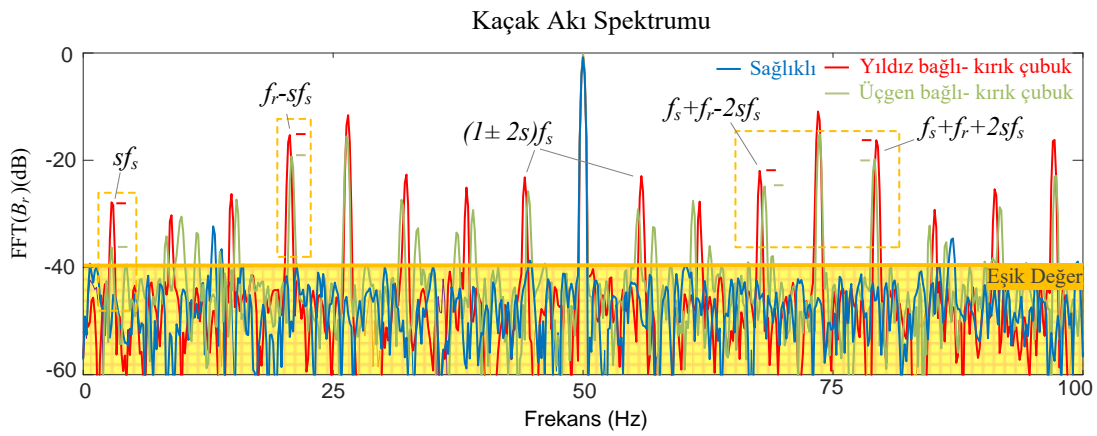
Şekil 4.6. İki komşu kırık rotor çubuk arızası durumunda a) Stator akım-zaman grafiği b) Kaçak akı-zaman grafiği (%100 Yükte)



Şekil 4.7. Farklı yüklenme koşullarında karakteristik arıza sinyallerinin davranışı (2 komşu kırık rotor çubuk arızası durumunda)

4.1.3. Statorun üçgen veya yıldız bağlanması durumunda kırık rotor çubuk arızası

Stator sargı bağlantısının arıza sinyallerine etkisini incelemek için 36 slot, 28 bara sahip olan asenkron motorun statoru ANSYS@Maxwell-2D programında hem yıldız hem de üçgen olarak bağlanarak analiz edilmiştir. Yapılan testler tam yük durumunda $s=0.055$, $n_m=1420$ rpm yüklenme koşulunda yapılmıştır. Şekil 4.8'de stator bağlantısının kaçak akıda belirlenen sinyallere etkisi görülmektedir. Üçgen ve yıldız bağlantıya göre beklenildiği gibi karakteristik arıza harmoniklerinin genlikleri değişmektedir. Ancak Şekil 4.8'de de görüldüğü gibi kaçak akıdaki sf_s , f_r-sf_s ve $f_s+f_r\pm 2sf_s$ arıza sinyalleri her iki stator sargı bağlantısı durumunda net bir şekilde görülmektedir. Böylece stator sargı bağlantısından bağımsız bir arıza tespiti sağlanabilmektedir.

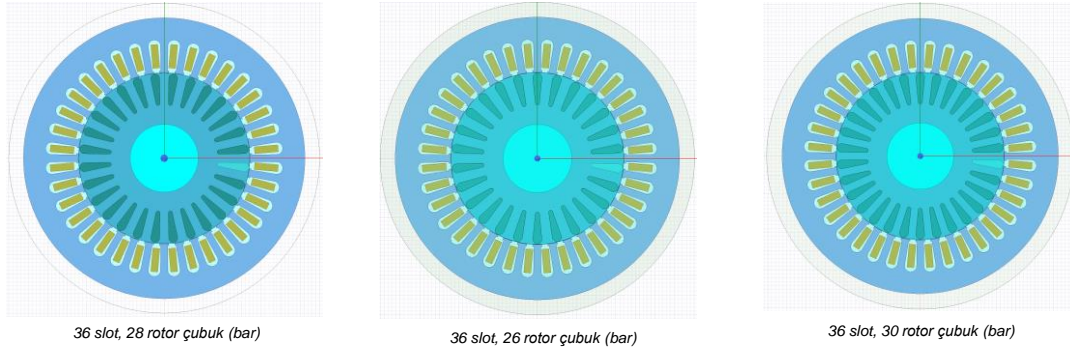


Şekil 4.8. Kırık rotor çubuk arızası durumunda stator sargı bağlantısının arıza sinyallerine etkisinin incelenmesi (%100 Yükte)

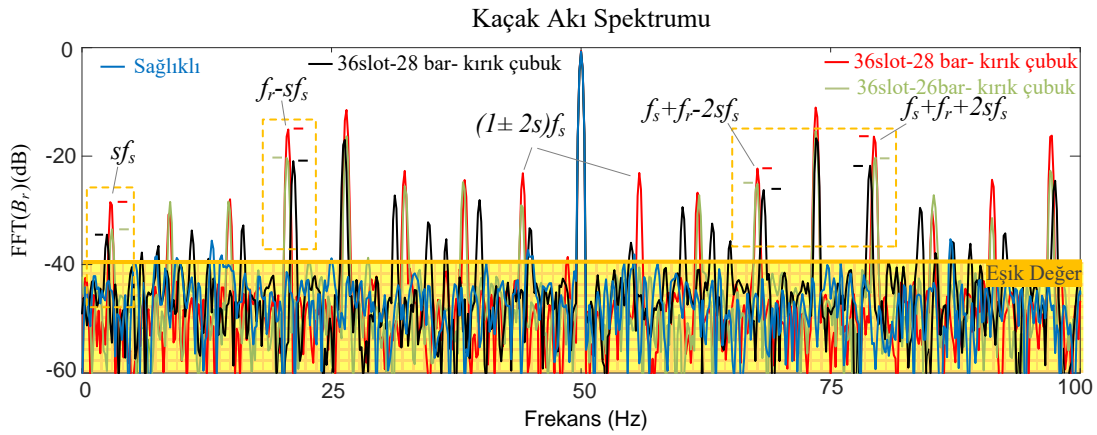
4.1.4. Farklı topolojilere sahip asenkron motorlarda kırık rotor çubuk arızası

Motor topolojisinin kırık rotor çubuk arıza sinyallerindeki etkisini incelemek için üç farklı motor topolojisine sahip asenkron motorlar ANSYS@Maxwell-2D'de modellenmiştir. Şekil 4.9'da sırasıyla 36 slot-28 bar, 36 slot-26 bar, ve 36 slot-30 bara sahip asenkron motorların ANSYS@Maxwell-2D modelleri görülmektedir. Modellenen bu motorlar komşu iki kırık rotor çubuk arızası durumunda ve tam yük koşullarında ($s=0.055$, $n_m=1420$ rpm) çalıştırılmıştır.

Şekil 4.10'da farklı topolojilere sahip asenkron motorlarda iki kırık rotor çubuk arızası var iken kaçak akı spektrumları incelenmiştir. Bu spektrumlarda daha önce belirlenen karakteristik arıza sinyallerinin (sf_s , f_r-sf_s ve $f_s+f_r\pm 2sf_s$) her üç farklı motorda arıza durumunda kaçak akıda belirgin bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir. 36slot-28bar'a sahip asenkron motorda arıza sinyallerinin diğer topolojilerinkine göre daha baskın olduğu Şekil 4.10'da görülmektedir. Bu harmoniklerin genliklerinin motor topolojisinden etkilenmesine rağmen özellikle f_r-sf_s ve $f_s+f_r\pm 2sf_s$ sinyallerinin genliklerinin motor topolojisinden daha bağımsız olduğu görülmektedir.



Şekil 4.9. ANSYS@Maxwell 2D paket programında modellenen farklı topolojilere sahip asenkron motorlar



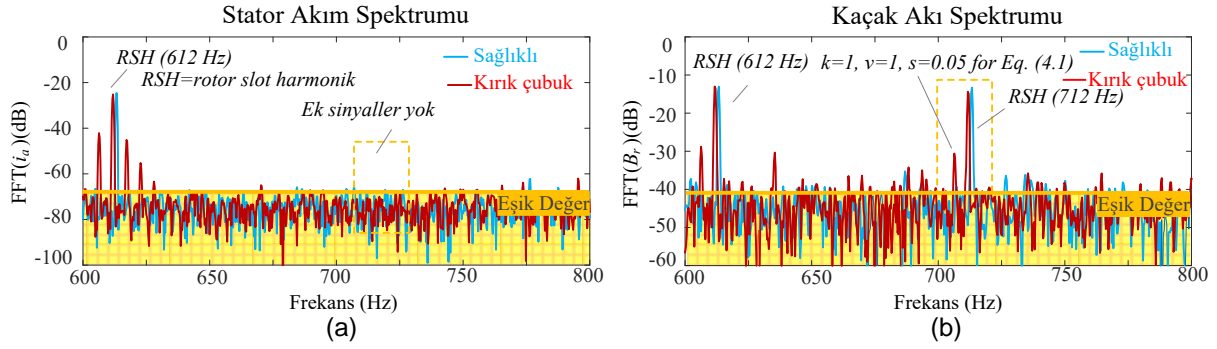
Şekil 4.10. Farklı topolojilere sahip asenkron motorlarda kaçak akı spektrumu (%100 Yükte)

4.1.5. Rotor slot harmoniklerinin yan bandlarının kırık rotor çubuk arızası durumunda incelenmesi

Bu çalışmada rotor slot harmoniklerinin yan bandları kırık rotor çubuk arızasına sahip asenkron motorda stator akım ve kaçak akı spektrumunda incelenmiştir. Daha önceki yapılan çalışmalarda rotor slot harmoniklerinin yan bandlarında denklem 4.1'deki arıza harmonikleri görülmektedir.

$$f_{rsh} = \left[\frac{N_r(1-s)}{p} \pm v \pm 2ks \right] f_s \quad (4.1)$$

Burada N_r rotor çubuk (bar) sayısı, p çift kutup sayısı, $v=1, 3, 5, \dots$ ve $k=1, 2, 3, \dots$ 'ı temsil etmektedir. Şekil 4.11'de sırasıyla stator akım ve kaçak akı spektrumları görülmektedir. Şekil 4.11a'da (2)'ye göre $v=1$ ve $k=1$ değeri için stator akım spektrumunda rotor slot harmoniğinin (712 Hz) yan bandlarında herhangi bir ek sinyal görülmemektedir. Ancak kaçak akı spektrumunda Şekil 4.11b'de görüldüğü üzere rotor slot harmoniğinin (712 Hz) yan bandlarında kırık rotor çubuk arızası sinyalleri net bir şekilde görülmektedir. Böylece kaçak akının stator akımından daha etkin ve güvenilir sonuçlar sağladığı sonucuna varılmıştır.



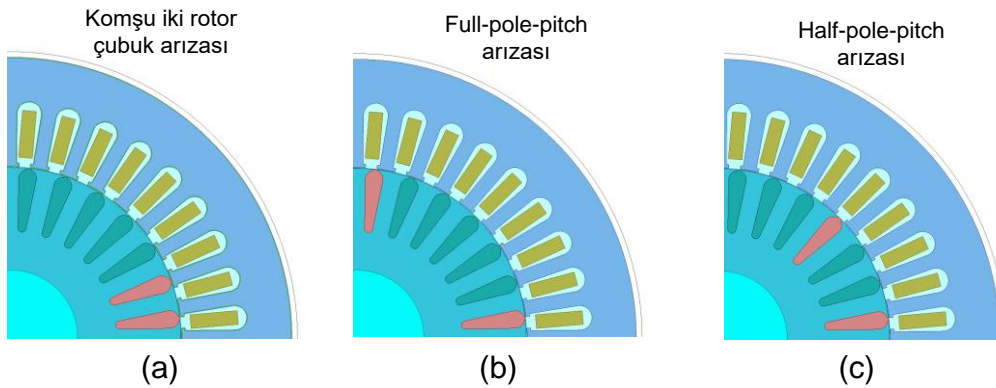
Şekil 4.11. Kırık rotor çubuk arızası durumunda Rotor slot harmoniğinin (RSH) yan bandları (%100 Yükte) a) Stator akım spektrumu b) Kaçak akı spektrumu

Bu çalışma ilgili elde edilen bulgular uluslararası konferansta (ENRES 2018) bildiri olarak sunulmuş ve yayınlanmıştır.

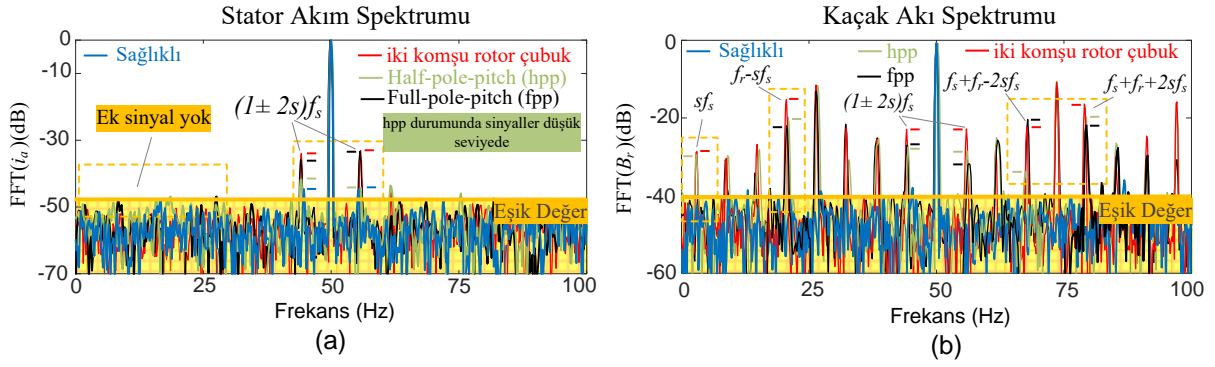
4.1.6. Rotor çubuklarının farklı konumlarda kırılması- yarım kutup ve tam kutup adımı

Asenkron motorlarda kırık rotor çubuk arızasında arızalı rotor çubuklarının konumu stator akımında bulunan arıza sinyallerinin genliklerini etkileyebilmektedir. Özellikle rotor çubuklarının 90° (half-pole, yarım kutup) ve 180° (full-pole, tam kutup) elektriksel derece fark ile kırılması sonucunda sadece stator akımına bakılarak arıza tespiti oldukça zorlaşmaktadır. Literatürde bu konu ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların çoğunda stator akımındaki bazı yan band harmonikleri ve yüksek frekanslı harmonikler incelenmiştir.

Bu çalışmada ise ANSYS@Maxwell-2D programında modellenen motorda yarım kutup adımı (half-pole), tam kutup adımı (full-pole) ve komşu 2(iki) rotor çubuk arızası durumunda stator akım ve kaçak akı spektrumları incelenmiştir. Şekil 4.12'de modellenen asenkron motorlar ve farklı kırık rotor çubuklarının konumları görülmektedir. Mevcut modeller tam yük koşullarında ($s=0.055$, $n_m=1420$ rpm) 2.5 KHz'lik örnekleme frekansında çalıştırılmıştır.



Şekil 4.12. Farklı konumlarda kırılan rotor çubukları a) Komşu iki rotor çubuk b) Tam kutup adımı c) Yarım kutup adımı

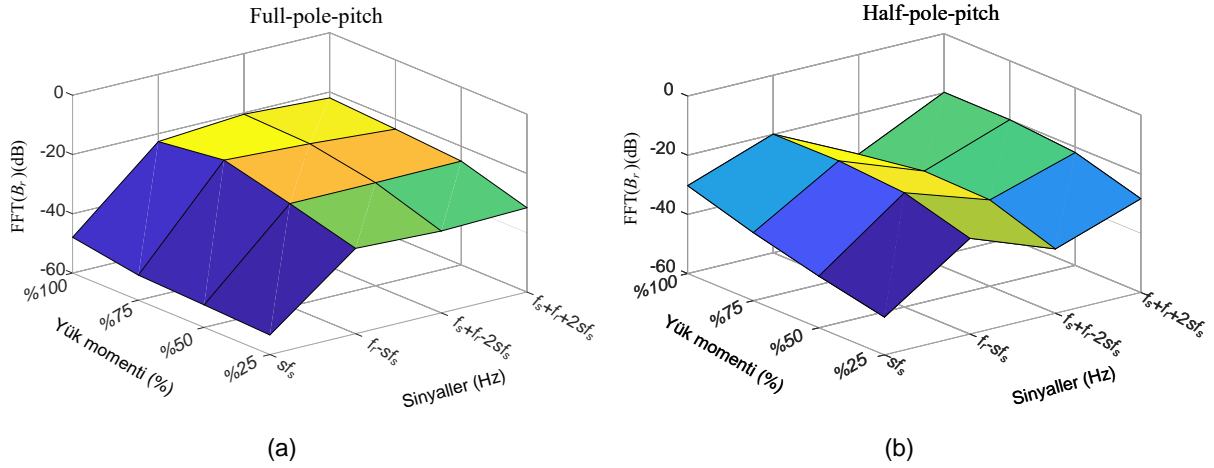


Şekil 4.13. Rotor çubuklarının farklı konumlarda kırılması (%100 Yükte) a) Stator akım spektrumu b) Kaçak akı spektrumu

Şekil 4.13'te farklı konumlarda kırılan rotor çubuklarının stator akımındaki ve kaçak akıda ki etkileri gösterilmiştir. Şekil 4.13a'da stator akımı dikkatlice incelenirse ana harmoniğin yan bandlarında kırık rotor çubuk arızasına ait sinyaller görülmektedir. Ancak özellikle Half-pole-pitch arızası durumunda bu sinyallerin genliğinin oldukça düştüğü net bir şekilde görülmektedir. Böylece sadece stator akımına bakılarak kırık rotor çubuk arızasının tespiti bazen yanıltıcı olabilir. Ancak Şekil 4.13b'de ki gibi kaçak akı spektrumu aynı koşullar altında incelenirse stator akımına göre daha etkin arıza sinyallerinin olduğu görülmektedir. Özellikle kaçak akı spektrumunda daha önce belirlenen karakteristik arıza sinyalleri incelenirse;

- sf_s sinyali iki komşu rotor çubuk arızası ve half pole-pitch arızası durumunda oldukça baskın bir şekilde görülmektedir.
- $f_r - sf_s$ sinyali incelenirse iki komşu rotor çubuk arızasında, yarım kutup ve tam kutup adımı arızasına göre daha baskın olduğu görülmekte ve üç durumda da arızaların tespit edildiği net bir şekilde gözlenmektedir.
- $f_s + f_r - 2sf_s$ sinyalinde komşu iki rotor çubuk arızası ve tam kutup adımı arızası net bir şekilde görülürken yarım-kutup adımı arızası durumunda sinyalin genliği oldukça düşmektedir.
- $f_s + f_r + 2sf_s$ sinyali dikkatlice incelenirse her üç arıza durumunda bu sinyalin ortaya çıktığı net bir şekilde gözlenmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre sf_s ve $f_s + f_r - 2sf_s$ sinyalleri kullanılarak yarım-kutup adımı ve iki komşu rotor çubuk arızası diğer arızalardan ayırt edilebilmektedir. Ayrıca $f_r - sf_s$ ve $f_s + f_r + 2sf_s$ sinyallerine bakılarak kırık rotor çubuklarının konumlarından bağımsız olarak sağlıklı duruma göre daha etkin ve güvenilir bir arıza tespiti yapıldığı görülmektedir. Şekil 4.14'te kaçak akıdaki karakteristik sinyallerin farklı yüklenme koşullarındaki davranışı incelenmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi tam-kutup adımı ve yarım-kutup adımı arızasında $f_r - sf_s$ ve $f_s + f_r + 2sf_s$ sinyalleri motor yükünden daha bağımsız ve güvenilir sonuçlar vermektedir. Bu çalışma ilgili elde edilen bulgular uluslararası konferansta (ICAAID 2019) bildiri olarak sunulmuş ve yayınlanmıştır.

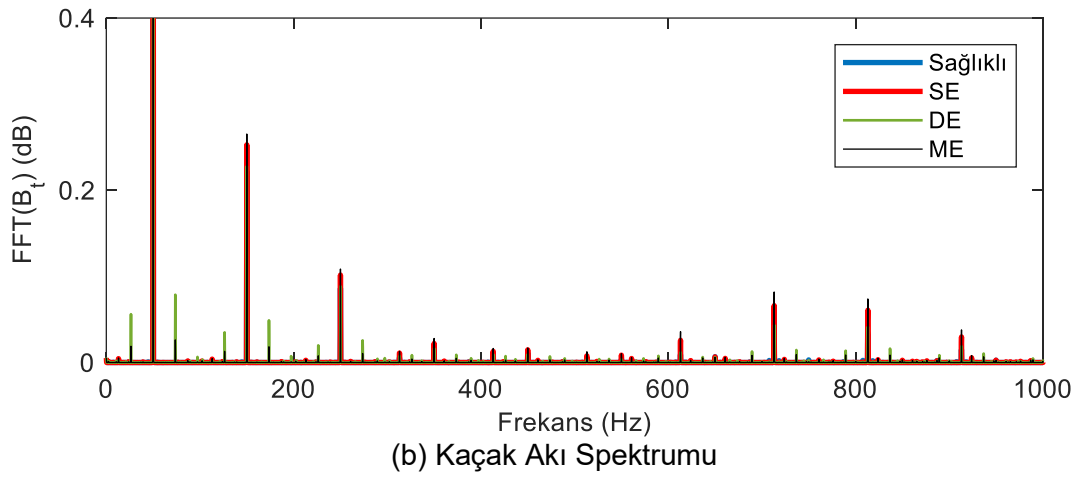
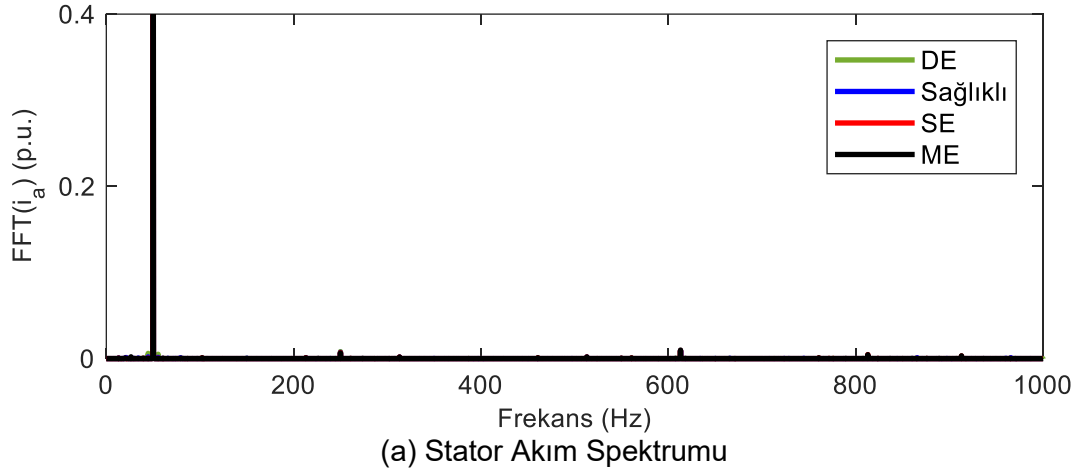


Şekil 4.14. Farklı yüklenme koşullarında karakteristik arıza sinyallerinin davranışı a) Tam-kutup adımı arızası durumunda b) Yarım-kutup adımı arızası durumunda (Not: iki komşu kırık rotor çubuk arızası durumu için Şekil 4.7'ye bakınız)

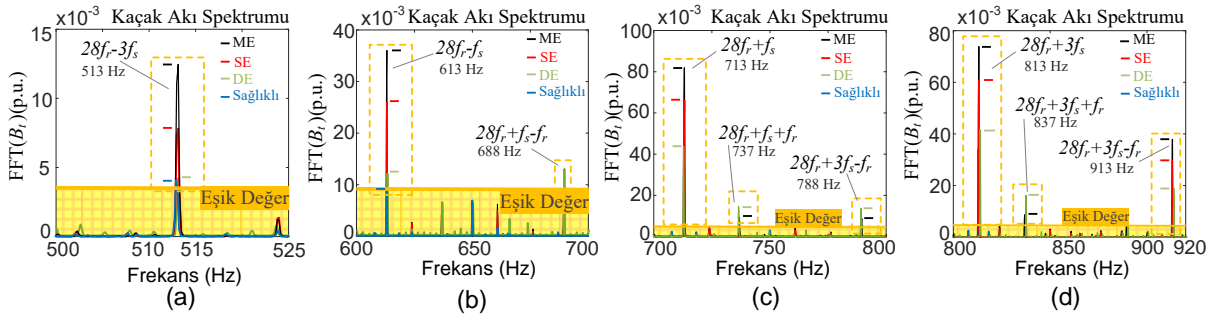
4.2. Eksantriklik Arızası Durumunda Arıza Sinyallerinin Belirlenmesi

Eksantriklik arızası durumunda stator akımında ve kaçak akıdaki temel arıza sinyallerini tespit etmek için ANSYS@Maxwell-2D programında modellenen asenkron motor tam yük koşulunda ($f_r=23.66$ Hz, $s=0.055$ ve $f_s=50$ Hz) statik, dinamik ve karışık eksantriklik durumunda çalıştırılmıştır. Arıza şiddeti; Statik Eksantriklik (SE) ve dinamik Eksantriklik (DE) için %40, Karışık (Mixed) eksantriklik (ME) arızası için ise %60 olarak oluşturulmuştur. Şekil 4.15'te eksantriklik arızası durumunda stator akım ve kaçak akı spektrumları görülmektedir. Şekil 4.15'da görüldüğü gibi stator akımında arıza sinyalleri yok denecek kadar azdır var olan sinyallerinde genliği oldukça düşüktür. Ancak Şekil 4.15b'deki gibi kaçak akı spektrumuna bakıldığında her farklı tip eksantriklik arızası için belirgin sinyaller net bir şekilde görülmektedir.

Şekil 4.16 ise kaçak akıdaki sinyalleri daha iyi analiz edebilmek kaçak akı spektrumu farklı frekans bölgelerinde incelenmiştir. Yapılan analiz sonucunda N_r rotor bar sayısı olmak üzere kaçak akıda $N_r f_r + f_s$, $N_r f_r - f_s$, $N_r f_r + 3f_s$, $N_r f_r - 3f_s$ sinyalleri statik eksantriklik arızası durumunda sağlıklı duruma göre oldukça baskın olduğu görülmüştür. Bu çalışmada $N_r=28$ 'dir. Özellikle $N_r f_r - f_s$ sinyalinin statik eksantriklik arızası durumunda ayırıcı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kaçak akıdaki $N_r f_r + f_s - f_r$, $N_r f_r + f_s + f_r$, $N_r f_r + 3f_s - f_r$, $N_r f_r + f_s + f_r$ sinyalleri ise dinamik eksantriklik arızası durumunda oldukça net bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir. Karışık eksantriklik (ME) durumunda arıza şiddetinin de yüksek seçilmesiyle birlikte belirlenen sinyaller karışık eksantriklik arızası durumunda da net bir şekilde görülmektedir. Bu sinyallerin büyüklüğünün motor yükü düşüğe arttığı gözlemlenmiştir. Daha düşük yüklerde belirlenen sinyallerin genliğinin motor yüklenme miktarına bağlı olarak arttığı görülmüştür.



Şekil 4.15. Eksantriklik arızası durumu (Tam yükte) (a) Stator akım spektrumu [0-1000 Hz] b) Kaçak akı spektrumu [0-1000 Hz]



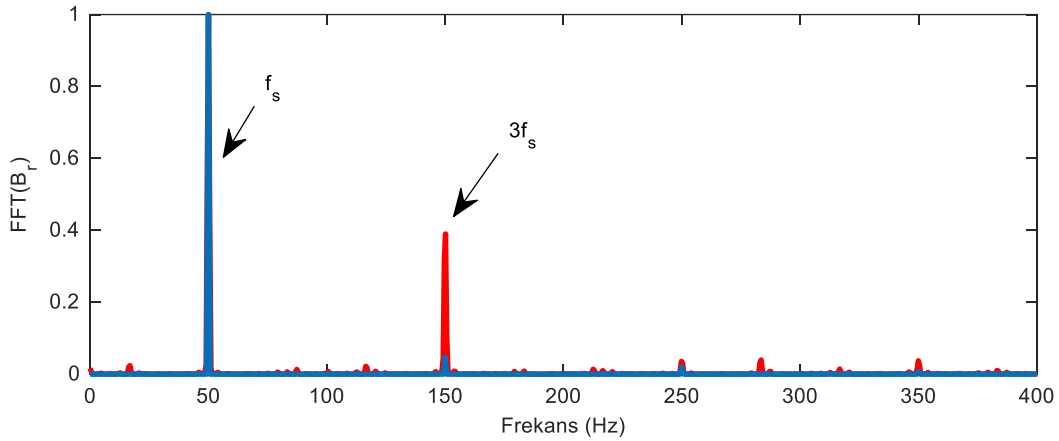
Şekil 4.16. Farklı Eksantriklik arızaları durumunda kaçak akı spektrumları (Tam yükte) a) [500-525 Hz] b) [600-700 Hz] c) [700-800 Hz] d) [800-920 Hz]

Belirlenen bu sinyaller çok katmanlı yapay sinir ağı (MLP) kullanılarak farklı tip eksantriklik arızaları otomatik olarak tespit edilmiştir. Daha sonraki bölümlerde MLP ağ eğitimi sonuçları gösterilmektedir.

4.3. Stator Kısa Devre Arızası Durumunda Arıza Sinyallerinin Belirlenmesi

Daha önce modellenen stator kısa devre arızasına sahip asenkron motor tam yük koşulunda çalıştırılmıştır. Örnek çalışma olarak A-fazının bir slotundaki 42 sarımdan 5 tanesi kısa devre edilmiştir.

Yapılan testler sonucunda Şekil. 4.17’de kaçak akıda stator kısa devre arızası durumunda 3. Harmoniğin değeri arttığı net bir şekilde gözlenmektedir. Bu sinyalin genliğinin kısa devre olan sarım sayısı ve motor yükü ile orantılı olarak arttığı belirlenmiştir.

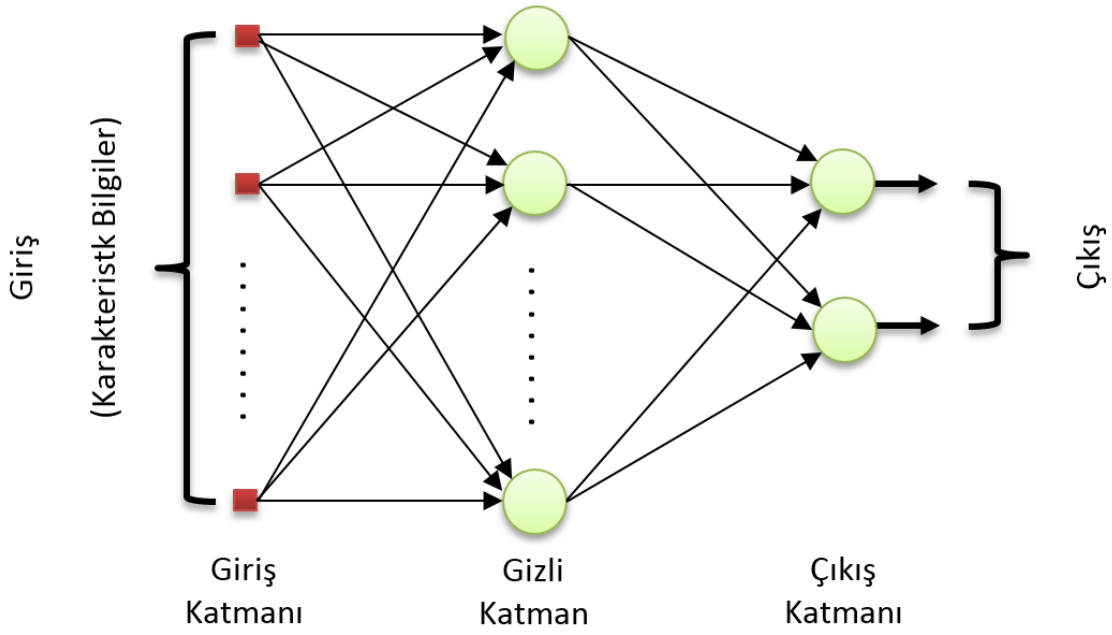


Şekil 4.17. Kısa devre arızası durumunda kaçak akı spekturumu

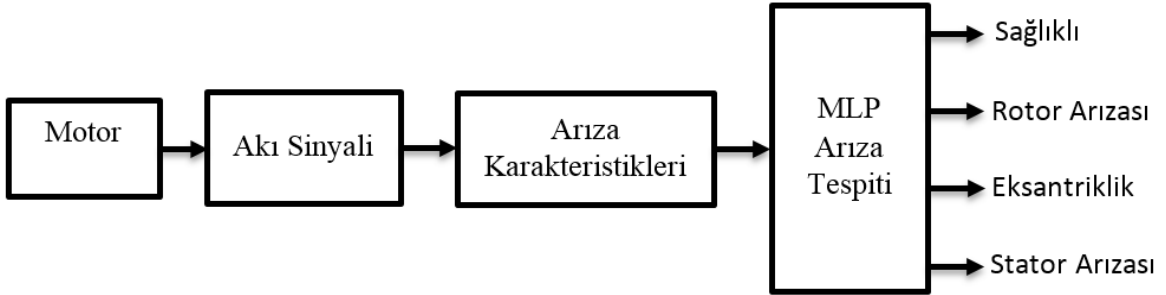
Bu bölümde 2. İş paketinde belirtildiği gibi kaçak akıdaki etkin arıza harmonikleri ANSYS@ Maxwell-2D benzetim sonuçlarından yararlanılarak başarılı bir şekilde belirlenmiştir.

4.4. MLP ile Arızaların Otomatik Tespiti

Asenkron motorların ANSYS@Maxwell-2D paket programı kullanılarak oluşturulan ve sonuçları detaylı şekilde analiz edilen kırık rotor çubuk arızası, eksantriklik arızası ve stator arızalarının yapay sinir ağları (ANN) kullanılarak otomatik olarak tespit edilmesi için çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla farklı yük koşullarında ve farklı elektriksel ve mekaniksel arızalar için kaçak akıda oluşan etkin arıza harmonikleri belirlenmiştir. Proje başvurusunda belirtildiği gibi arızaların otomatik olarak belirlenmesi için çok katmanlı algılayıcı (Multi Layer Perceptron) (MLP) yapay sinir ağı kullanılmıştır. MLP ağ yapısı giriş katmanı, en az bir gizli (ara) katman ve çıkış katmanından oluşur (Şekil 4.18.). MLP’nin asıl gücü gizli katmandaki hesaplama birimidir. Sadece bir gizli katmanla dahi MLP sürekli herhangi bir fonksiyonu öğrenme gücüne sahiptir. İleri beslemeli yapay sinir ağı (Feedforward ANN) yapısına sahip MLP için öğretmenli (supervised) öğrenme yöntemi kullanılmıştır. Ağ yapısında bulunan ağırlık değerleri ve eşik değerleri öğrenme safhasında geri yayımlı öğrenme kuralı (backpropagation) ile güncellenmiştir.



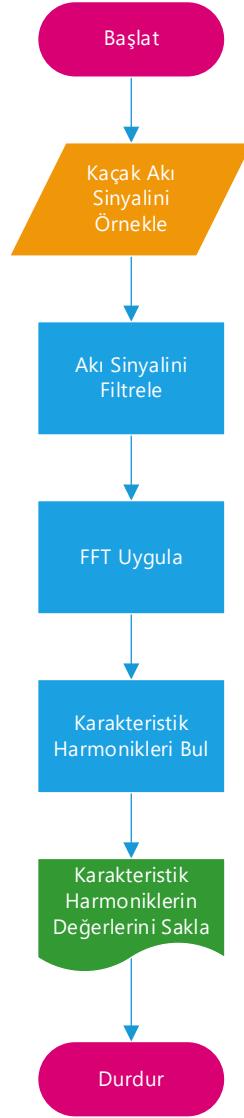
Şekil 4.18. Çok katmanlı yapay sinir ağının (MultiLayer Perceptron-MLP) şematik gösterimi



Şekil 4.19. MLP ile otomatik arıza tespiti

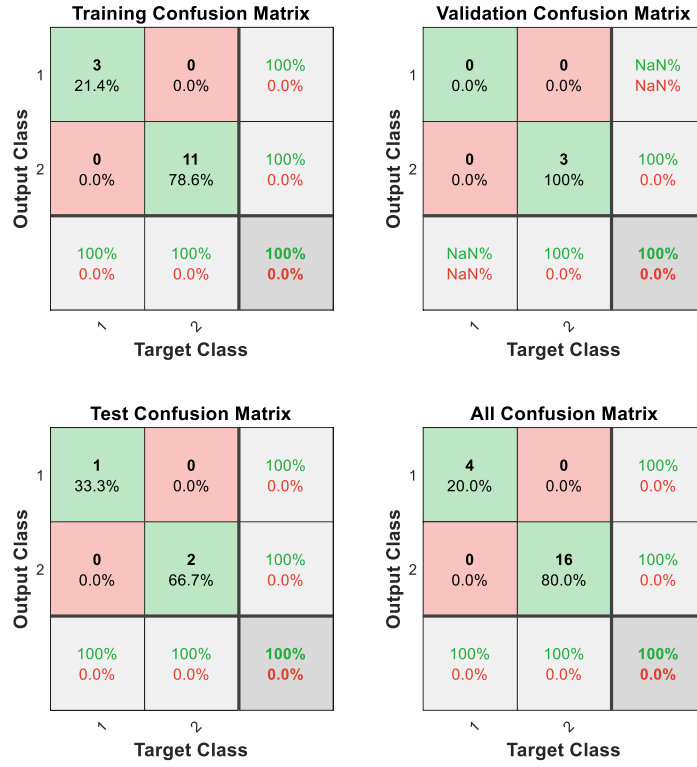
Kaçak akı kullanılarak asenkron motor arızalarının otomatik olarak tespit etmek için Matlab programında bulunan ve çok kullanışlı bir yapıya sahip olan **Neural Network Toolbox**'ı kullanılmıştır.

Otomatik arıza tespiti için kullanılan genel şema Şekil 4.19'da verilmiştir. Yapay sinir ağı ile arıza tespiti için kaçak akı sensöründen alınan akı sinyali ön işleme tabi tutulmuş, karakteristik sinyaller çıkarılmış ve daha önce eğitilen MLP ile elde edilen çıkışlar işlenerek arıza tipi belirlenmiştir. MLP'nin eğitiminde kullanılan karakteristik arıza harmoniklerinin elde edilmesi için Şekil 4.20'deki akış diagramı kullanılmıştır.



Şekil 4.20. Karakteristik arıza harmoniklerinin elde edilmesi

Şekil 4.21’de kırık rotor çubuk arızası ve sağlıklı durum için farklı yük koşullarında eğitilen dataların doğruluk tablosu verilmiştir. Bu tabloya göre arızalı durumu %100 başarı oranı ile tespit edilmiştir. Şekil 4.22. farklı yük koşullarında statik eksantriklik ve sağlıklı durum için eğitilen ve test edilen MLP’nin doğruluk tablosunu göstermektedir. 1. çıkış motorun sağlıklı, 2. çıkış ise statik eksantriklik durumunu ifade etmektedir. Doğruluk tablosundan görüldüğü gibi ağın sağlıklı ve arıza sınıflandırmasını %100 başarı oranı ile tahmin ettiği görülmektedir. Dinamik eksantriklik arızası için doğruluk tabloları Şekil 4.23’de verilmiştir. Şekil 4.24’te sağlıklı, rotor, statik eksantriklik, dinamik eksantriklik ve stator arızalarının sınıflandırmasının otomatik yapıldığı MLP sonucu verilmiştir. Eğitim ve test sonuçlarından MLP’nin yeteri düzeyde arızaları doğru olarak tespit ettiği ve sınıflandırmanın başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği belirlenmiştir.



Şekil 4.21. Kırık rotor çubuk arızası için MLP'nin doğruluk tablosu



Şekil 4.22. Statik eksantriklik arızası için MLP'nin doğruluk tablosu



Şekil 4.23. Dinamik eksantriklik arızası için MLP'nin doğruluk tablosu



Şekil 4.24. Arıza sınıflandırması için MLP'nin doğruluk tablosu (1-Sağlıklı, 2-Kırık çubuk, 3-Statik Eksantriklik, 4-Dinamik Eksantriklik, 5-Stator arızası)

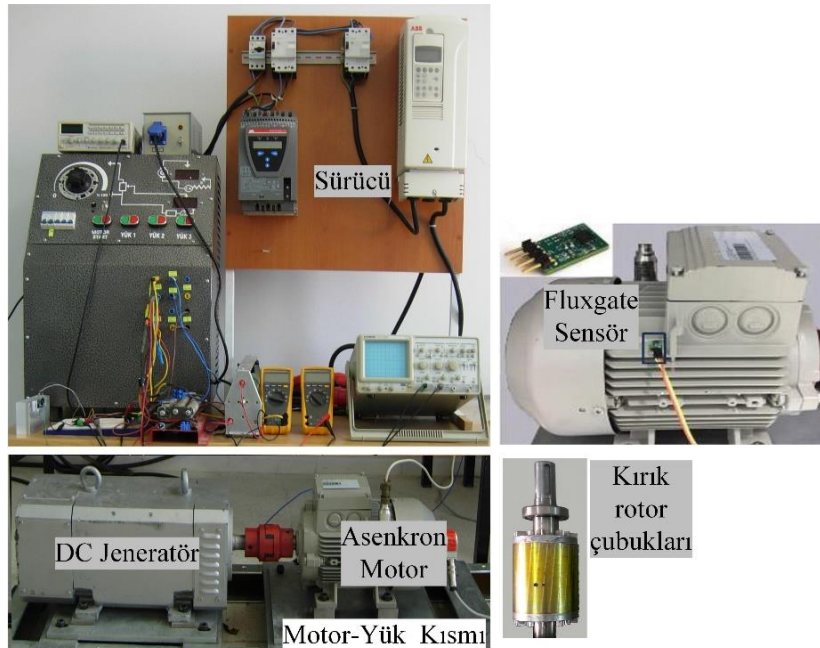
Proje kapsamında kırık rotor çubuk, eksantriklik ve stator kısa devre arızası durumunda ortaya çıkan baskın arıza harmonikleri kaçak akıda belirlenmiştir. Farklı yüklenme koşullarına göre elde edilen bulgularda kaçak akıdaki sinyallerin arıza tespitinde daha güvenilir olduğu görülmüştür. Arıza sinyalleri farklı topolojilere sahip asenkron motorlarda, farklı stator bağlantı şekillerinde kapsamlıca analiz edilmiştir ve sonuçları sunulmuştur.

Ayrıca 3. İş paketinde belirtildiği gibi MLP ile yapılan testlerde sağlıklı ve arızalı durum bilgileri kullanılarak %100 başarı oranı ile arıza tespiti ve arıza sınıflandırması yapay sinir ağı modeli kullanılarak yapılmıştır.

5. DENEYSEL DÜZENEK ve DENEYSEL SONUÇLAR

5.1. Deneysel Devre Düzenegi

Proje kapsamında elde edilen bulguların doğruluğunu ve güvenilirliğini ispatlamak için uygun deneysel düzenek oluşturulmuştur. Deneysel devre düzeneginde stator akımları, stator gerilimleri, vibrasyon sinyalleri, hız bilgisi ve kaçak akı bilgisi ölçülebilmektedir. Tasarlanan devre düzenegi Şekil 5.1'de görülmektedir. Asenkron motoru farklı yükleme koşullarında yükleyebilmek için DC jeneratör kullanılmıştır. Uyarma akımı ve yük dirençleri ayarlanarak jeneratörün dolayısıyla asenkron motorun yüklenmesi sağlanmıştır. DC jeneratör ile asenkron motorun düzgün bir şekilde akuple olabilmesi için uygun kuplajlar kullanılmıştır ve yanlış hizalamadan dolayı meydana gelebilecek gürültüleri engellemek için lazer ayarlama cihazı kullanılmıştır. Ayrıca bu devre düzeneginde asenkron motor doğrudan şebeke veya sürücü ile beslenebilmektedir. Kaçak akı bilgisinin ölçülebilmesi için fluxgate sensörü kullanılmıştır. Şekil 5.1.'de kullanılan Texas Instrument firmasının ürettiği DRV425 akı sensörü görülmektedir. Akı sensörleri direkt olarak akı bilgisini vermenin yanında yüksek ölçüm aralığına, yüksek doğruluğa ve sıcaklığa karşı dayanımı oldukça yüksek bir donanıma sahiptir. Kaçak akının ölçülmesi için motorun dışına uygun olarak yerleştirilen akı sensöründen yararlanılarak motorun anlık manyetik davranışı gözlemlenmiştir. Akı sensörü motorun farklı noktalarına koyularak motordaki radyal, ve teğetsel akılar ölçülmüştür. Kaçak akı sensörlerinin ölçüm aralığının çok geniş aralıkta [nanoTesla -to- Tesla] olmasından dolayı düşük seviyeli gürültüler sensör çıkışında görülmektedir. Gürültü seviyelerini minimize etmek için uygun analog ve dijital filtreler tasarlanmıştır.



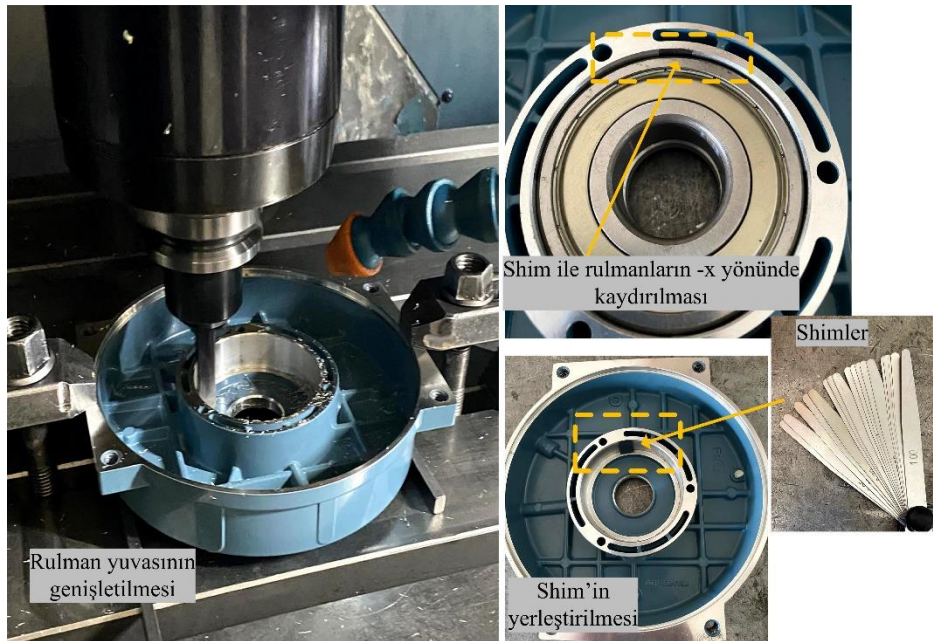
Şekil 5.1. Deneysel devre düzenegi

Oluşturulan devre düzeneğinde kırık rotor çubuk arızası için arıza şiddetine uygun olarak rotorda bulunan bir veya iki rotor çubuğu bir matkap yardımıyla delinmiş ve rotor çubuğu kırılmıştır. Böylece ilgili rotor çubuğundan akım akmayacaktır. Şekil 5.2.'de kırılan rotor çubukları görülmektedir. Rotor çubukları; bir kırık rotor çubuğu, iki komşu kırık rotor çubuğu, yarım-kutup adımı a ve tam-kutup adımı uzaklıklarında olacak şekilde kırılmıştır.

Eksantriklik arızası için motorun ön ve arka kapakları çıkartılarak, rotor rulman yuvaları belli bir seviyede (0.1 mm) oyularak genişletilmiştir. Daha sonra oyulan bu yuvalara yerleştirilen rotor uygun şimlerle sıkıştırılarak rotorun -x yönünde 0.1 mm kayması sağlanmıştır. Böylece statik eksantriklik arızası oluşturulmuştur. Şekil 5.3'te oyulan rotor kapakları ve rotorun uygun şimler ile bu yuvalara yerleştirilmesi gösterilmektedir.

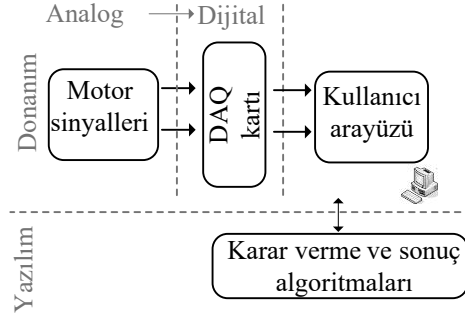


Şekil 5.2. Kırık rotor çubuk arızasına sahip rotorlar



Şekil 5.3. Statik Eksantriklik arızasının oluşturulması

Stator arızası için ilgili faza ait sargı bağlantı uçları arıza şiddetine bağlı olarak kısa devre edilmiştir. Kurulan test düzeneğinde ayrıca yanlış hizalama (misalignment) arızası da oluşturulabilmektedir. Deneylerde örnekleme frekansı 2.5 kHz olarak belirlenmiş ve 10 sn boyunca datalar toplanmıştır. Şekil 5.4'te görüldüğü gibi motordan elde edilen stator akımı ve kaçak akı bilgileri DAQ kartı ile örneklenecek dijital bilgiye dönüştürülmüş ve kullanıcı arayüzüne aktarılmıştır.



Şekil 5.4. DAQ kartı ile motor çıkış bilgilerinin toplanması

Motor terminallerinden akan stator akımları LEM firmasının LTA50P/ST1 kodlu Hall Effect akım dönüştürücüsü kullanılarak ölçülmektedir. Sensörün nominal çıkış akımı her bir giriş amper sarım için 1 mA'dir (sarım oranı 1/1000). Giriş maksimum tepe akım değeri 50A'dir. Duyarlılığı arttırmak için motor kablosu 2 sarım olarak sensörün çekirdeğine sarılmıştır. Böylece 5A'lık motor akımı için $\pm 1.5V$ aralığında tepeden tepeye bir çıkış sağlanmaktadır. Örnekleme için 16 bitlik Eagle PCI30G DAQ kartı kullanılmıştır. İstenilen frekansta ve sürede verileri toplamak için DAQ kartı ile birlikte gelen Agilent VEE'de yazılmış arayüz programı kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan asenkron motorun parametreleri Tablo 5.1'de görülmektedir.

Tablo 5.1. Deneylerde kullanılan motorun parametreleri

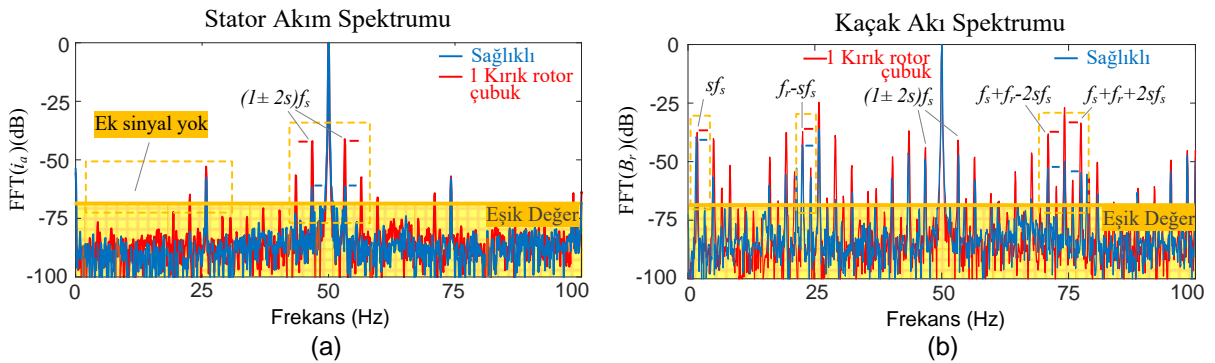
Kutup sayısı	4
Stator oluk sayısı	36
Rotor çubuk sayısı	26
Stator dış çapı, mm	145
Stator iç çapı, mm	104
Rotor dış çapı, mm	103.5
Rotor iç çapı, mm	36
Nominal gerilim, V	400
Besleme frekansı, Hz	50
Nominal güç, kW	2.2
Nominal akım, A	4.7
Rotor atalet katsayısı, kgm^2	0.047

5.2. Deneysel Sonuçlar

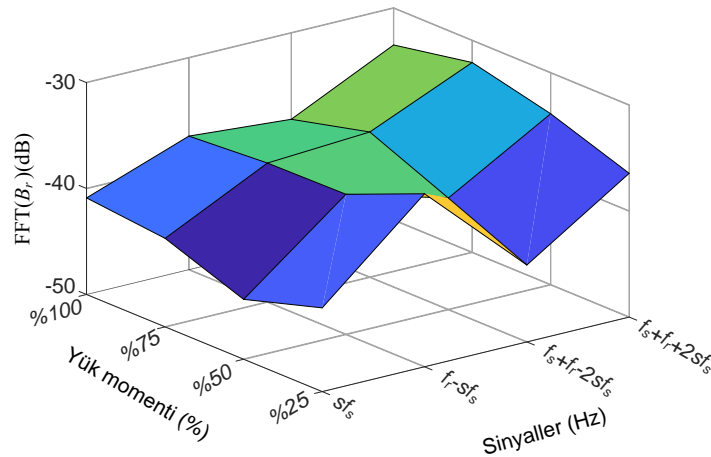
5.2.1. Bir kırık rotor çubuk arızası deneysel sonuçları

Şekil 5.5.'de asenkron motor tam yük çalışma koşullarında ($n_m=1450$ rpm, $s=0.033$, $f_r=24,16$ Hz) çalışırken 1 kırık rotor çubuk arızası durumunda stator akım ve kaçak akı spektrumları gösterilmektedir. Şekil 5.5a'da sadece $(1\pm 2s)f_s$ sinyalleri stator akımında arıza durumunda ortaya çıkmaktadır. Şekil 5.5b'deki kaçak akı spektrumu incelendiğinde arıza durumunda sf_s , f_r-sf_s ve $f_s+f_r\pm 2sf_s$ sinyallerinin daha baskın olduğu görülmektedir. Böylece simülasyonlarda elde edilen karakteristik sinyallerin deneysel olarak ortaya çıktığı net bir şekilde görülmektedir.

Şekil 5.6.'da ise asenkron motor farklı yük momenti değerlerinde çalıştırılarak belirlenen arıza sinyallerinin genliklerinin değişimi deneysel olarak incelenmiştir. Özellikle nominal yüklenme koşullarında karakteristik sinyallerin daha belirgin olduğu görülmektedir. Arıza sinyallerinden f_r-sf_s ve $f_s+f_r+2sf_s$ harmonik genliklerinin motor yükünden daha bağımsız olduğu net bir şekilde görülmektedir. (Benzetim sonuçları için Şekil 4.3.'e bakınız)



Şekil 5.5. Bir kırık rotor çubuk arızası durumunda a) Stator akım spektrumu
b) Kaçak akı spektrumu (%100 Yükte) (Deneysel sonuç)

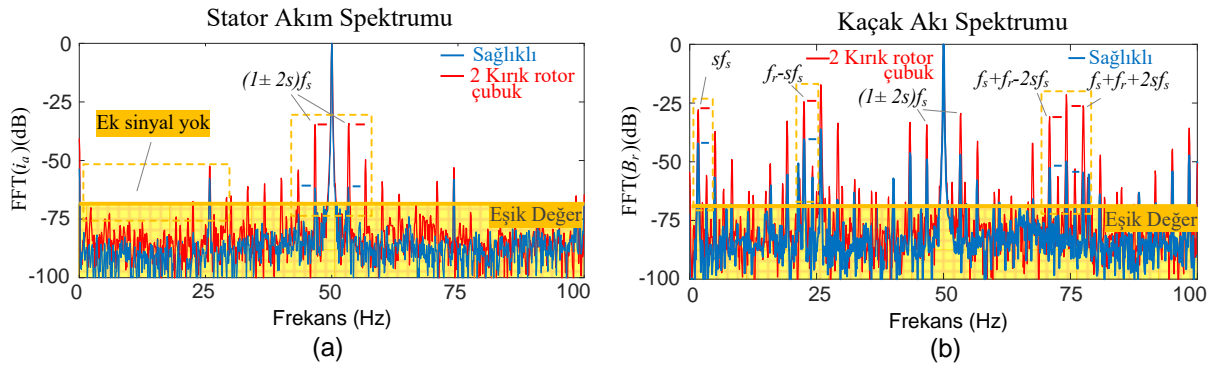


Şekil 5.6. Farklı yüklenme koşullarında karakteristik arıza sinyallerinin davranışı (1 Kırık Çubuk Arızası durumunda) (Deneysel sonuç)

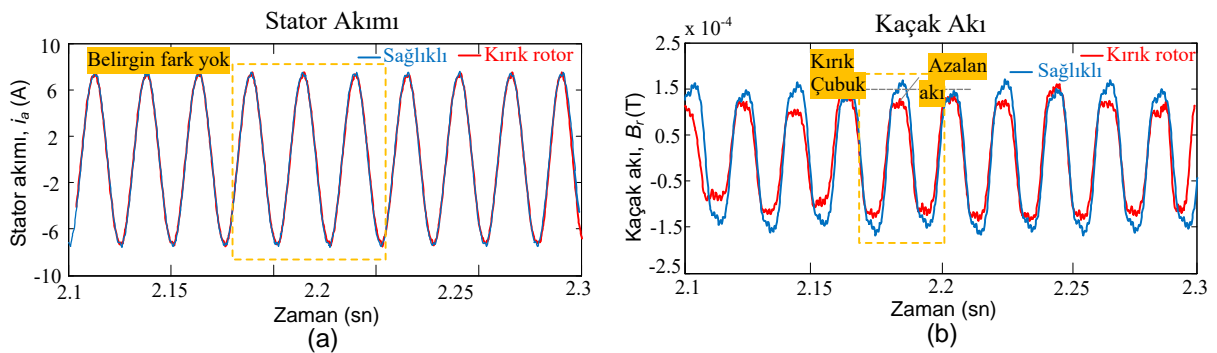
5.2.2. Komşu iki rotor çubuk arızası deneysel sonuçları

Asenkron motor tam yüklenme koşullarında çalıştırılarak stator akımındaki ve kaçak akıdaki karakteristik sinyaller incelenmiştir. Şekil 5.7a'da arıza durumunda ortaya çıkan harmonikler stator akım spektrumunda $(1\pm 2s)f_s$ frekanslarında 53.3 Hz ve 46.7 Hz'de net bir şekilde görülmektedir. Şekil 5.7b'de kaçak akı spektrumu incelendiğinde sf_s , f_r-sf_s ve $f_s+f_r\pm 2sf_s$ ($f_r=24.16$ Hz) harmonikleri kaçak akıda görülmektedir. Bir önceki test koşullarında 1(bir) kırık rotor çubuk arızasına göre 2(iki) komşu rotor çubuk arızasına sahip motorda sinyallerin genliği aynı koşullar altında daha baskındır.

Kaçak akı analizi ile sadece zaman eksenini analiz edilerek arıza tespiti sağlanabilmektedir. Şekil 5.8'de iki komşu kırık rotor çubuk arızası durumunda stator akımı ve kaçak akı zaman ekseninde incelenmiştir. Şekil 5.8a'da görüldüğü gibi stator akımında arıza durumunda belirgin bir fark yok iken Şekil 5.8b'de kaçak akıda zaman ekseninde arıza durumunda arızalı rotor çubuğu dolayısıyla akı azalırken yan çubuklardaki akı yoğunluğu arttığı net bir şekilde görülmektedir. Böylece herhangi bir sinyal işleme metoduna ihtiyaç duymadan arıza tespiti sağlanabilmektedir. Ancak sonuçların güvenilirliği açısından tamamlayıcı olarak frekans spektrumu ile birlikte incelenmesi gereklidir.

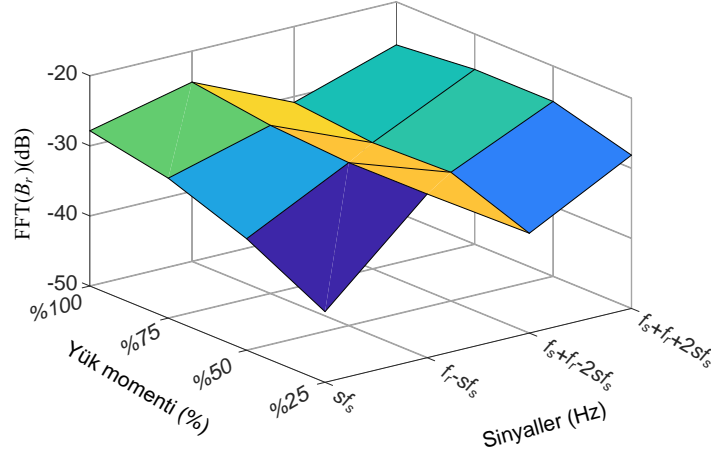


Şekil 5.7. İki komşu kırık rotor çubuk arızası durumunda a) Stator akım spektrumu b) Kaçak akı spektrumu (%100 Yükte) (Deneysel sonuç)



Şekil 5.8. İki komşu kırık rotor çubuk arızası durumunda a) Stator akım-zaman grafiği b) Kaçak akı-zaman grafiği (%100 Yükte) (Deneysel sonuç)

Şekil 5.9'da ise farklı yük momenti değerlerinde iki komşu kırık rotor çubuk arızasına sahip motorda kaçak akıda belirlenen karakteristik arıza sinyallerinin değişimi görülmektedir. Görüldüğü gibi özellikle f_r-sf_s ve $f_s+f_r+2sf_s$ sinyalleri yük momentinin değişmesinden daha az etkilenmektedir. Bu sinyaller bize yükten bağımsız bir arıza tespiti sağlamaktadır. (Benzetim sonuçları için Şekil 4.7.'ye bakınız.)

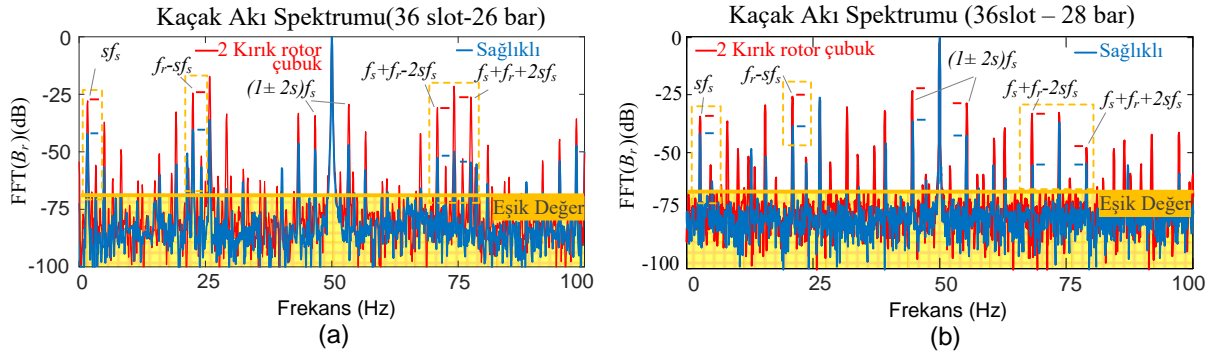


Şekil 5.9. Farklı yüklenme koşullarında karakteristik arıza sinyallerinin davranışı (2 komşu kırık rotor çubuk arızası durumunda)

5.2.3. Farklı topolojilere sahip asenkron motorlarda kırık rotor arızası deneysel sonuçları

Motor topolojisinin kırık rotor çubuk arıza sinyallerindeki etkisini deneysel olarak incelemek için aynı güç değerlerine sahip iki farklı test motoru kullanılarak testler yapılmıştır. Kullanılan test motorlarından biri 36 slot-26 bar diğeri ise 36 slot-28 bar'a sahiptir. Test edilen bu motorlar komşu iki kırık rotor çubuk arızası durumunda ve tam yük koşullarında (36slot-26 bar için $s=0.03$, $n_m=1450$ rpm; 36slot-28 bar için $s=0.05$, $n_m=1420$ rpm) çalıştırılmıştır.

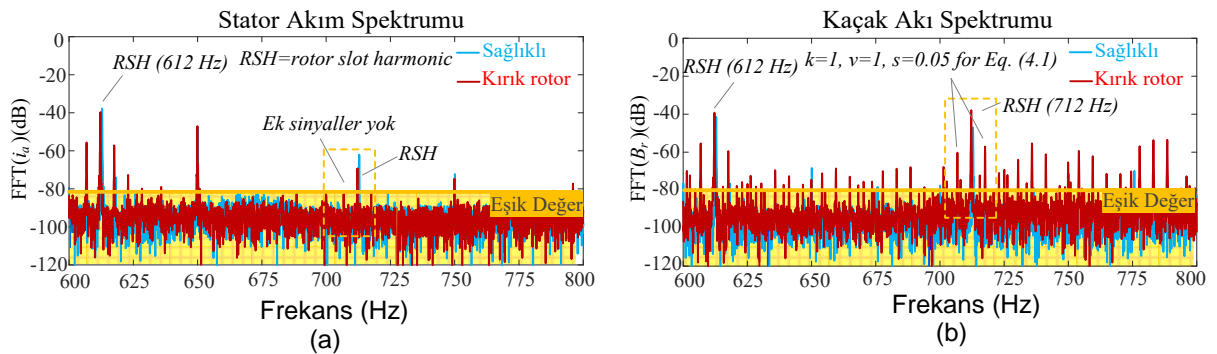
Şekil 5.10'da farklı topolojilere sahip asenkron motorlarda iki kırık rotor çubuk arızası var iken kaçak akı spektrumları incelenmiştir. Bu spektrumlarda daha önce belirlenen karakteristik arıza sinyallerinin (sf_s , f_r-sf_s ve $f_s+f_r\pm 2sf_s$) her iki farklı motorda arıza durumunda kaçak akıda belirgin bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir. Bu harmoniklerin genliklerinin motor topolojisinden etkilenmesine rağmen özellikle f_r-sf_s ve $f_s+f_r\pm 2sf_s$ sinyallerinin genliklerinin motor topolojisinden daha bağımsız olduğu görülmektedir. Bu harmoniklerin yanı sıra ana harmoniğin yan bandlarında bulunan $(1\pm 2s)f_s$ sinyalleri de her iki topolojiye sahip motorda kaçak akıda net bir şekilde görülmektedir. Bu sonuçlara göre kaçak akı spektrumunda belirlenen sinyallerin genliklerinin motor topolojisinden etkilenmesine rağmen arızalı durumda sağlıklı duruma göre çok daha baskın olduğu ve arıza tespitinde motor topolojisinden bağımsız olarak arıza tespiti sağlandığı görülmektedir.



Şekil 5.10. Farklı topolojilere sahip asenkron motorlarda kaçak akı spektrumu a) 36slot-26 bar (%100 Yükte) (DeneySEL sonuç)

5.2.4. Rotor slot harmoniklerinin yan bandlarının kırık rotor çubuk arızası durumunda deneysel olarak incelenmesi

Kırık rotor çubuk arızası durumunda rotor slot harmoniğinin yan bandlarında benzetim sonuçlarından elde edilen sinyallerin deneysel olarak güvenilirliğini incelemek için 36slot-28 bara sahip asenkron motor tam yük koşullarında çalıştırılmıştır. Şekil 5.11'de stator akım ve kaçak akı spektrumlarını göstermektedir. Şekil 5.11'de hem stator akımında hemde kaçak akıda görüldüğü gibi rotor slot harmoniklerinden 612 Hz 'in yan bandlarından karakteristik arıza sinyalleri her iki spektrumda görülmektedir. Ancak Şekil 5.11a'da görüldüğü gibi rotor slot harmoniklerinden 712 Hz'in yan bandlarında stator akımında herhangi bir arıza sinyali görülmemektedir. Şekil 5.11b'deki kaçak akı spektrumu incelendiğinde rotor slot harmoniği (RSH) olan 712 Hz 'in yan bandlarında 706.5 Hz ($v=1, k=1$ denklem 4.1 için) arıza sinyalleri net bir şekilde görülmektedir. Böylece kaçak akı spektrumu incelenerek daha etkin ve güvenilir bir arıza tespiti sağlanabilmektedir. (Benzetim sonuçları için Şekil 4.11.'e bakınız.) Not: Bu çalışma ilgili sonuçlar uluslararası konferansta (ENRES 2018) tam metin bildiri olarak sunulmuş ve yayınlanmıştır.



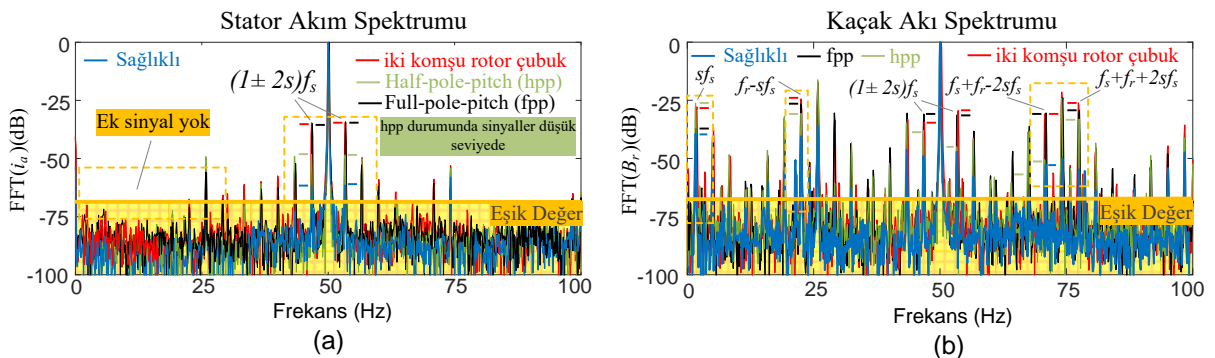
Şekil 5.11. Kırık rotor çubuk arızası durumunda Rotor slot harmoniğinin (RSH) yan bandları (%100 Yükte) a) Stator akım spektrumu b) Kaçak akı spektrumu (DeneySEL sonuçlar)

5.2.5. Rotor çubuklarının farklı konumlarda kırılması deneysel sonuçları

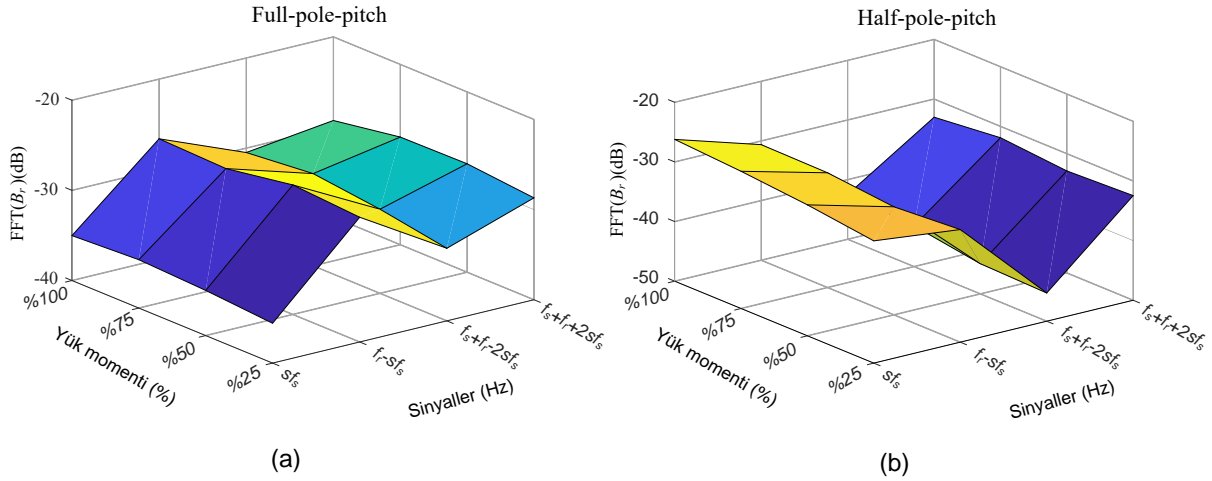
Asenkron motorda (36 slot-26 bar) yarım kutup adımı, tam kutup adımı ve komşu 2(iki) rotor çubuk arızası durumunda stator akım ve kaçak akı spektrumları deneysel olarak incelenmiştir. Bölüm 5.1.'de Şekil 5.2'de yarım kutup adımı ve tam kutup adımına sahip arızalı rotorlar görülmektedir. Asenkron motor tam yük koşullarında ($s= 0.033$, $n_m=1450 \text{ rpm}$) 2.5 kHz'lik örnekleme frekansında çalıştırılmıştır.

Şekil 5.12'de farklı konumlarda kırılan rotor çubuklarının stator akımındaki ve kaçak akıdaki etkileri gösterilmiştir. Şekil 5.12a'da stator akımı dikkatlice incelenirse ana harmoniğin yan bandlarında kırık rotor çubuk arızasına ait sinyaller görülmektedir. Ancak özellikle yarım-kutup adımı arızası durumunda bu sinyallerin genliğinin oldukça düştüğü net bir şekilde görülmektedir. Motor yükü düştükçe bu sinyalin genliği oldukça düşmekte ve arıza tespiti oldukça zorlaşmaktadır. Bu yüzden sadece stator akımına bakılarak kırık rotor çubuk arızasının tespiti bazen yanıltıcı olabilir. Ancak Şekil 5.12b'de ki gibi kaçak akı spektrumu aynı koşullar altında incelenirse stator akımına göre daha etkin arıza sinyallerinin olduğu görülmektedir. Özellikle kaçak akı spektrumunda daha önce belirlenen karakterisk arıza sinyalleri sf_s , f_r-sf_s ve $f_s+f_r\pm 2sf_s$ incelenirse; benzetim sonuçları ile uyuşan sonuçlar görülmektedir. Ayrıntılı bilgi için Bölüm 4.1.6 incelenebilir.

Elde edilen sonuçlara göre sf_s ve $f_s+f_r-2sf_s$ sinyalleri kullanılarak yarım-kutup adımı ve iki komşu rotor çubuk arızası diğer arızalardan ayırt edilebilmektedir. Ayrıca f_r-sf_s ve $f_s+f_r+2sf_s$ sinyallerine bakılarak kırık rotor çubuklarının konumlarından bağımsız olarak sağlıklı duruma göre daha etkin ve güvenilir bir arıza tespiti yapıldığı görülmektedir. Şekil 5.13'te kaçak akıdaki karakteristik sinyallerin farklı yüklenme koşullarındaki davranışı incelenmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi tam-kutup adımı ve yarım-kutup adımı arızasında f_r-sf_s ve $f_s+f_r+2sf_s$ sinyalleri motor yükünden daha bağımsız ve güvenilir sonuçlar vermektedir. Bu çalışma ilgili elde edilen sonuçlar uluslararası konferansta (ICAAID 2019) tam metin bildiri olarak yayınlanmıştır.



Şekil 5.12. Rotor çubuklarının farklı konumlarda kırılması (%100 Yükte) a) Stator akım spektrumu b) Kaçak akı spektrumu (Deneysel sonuçlar)

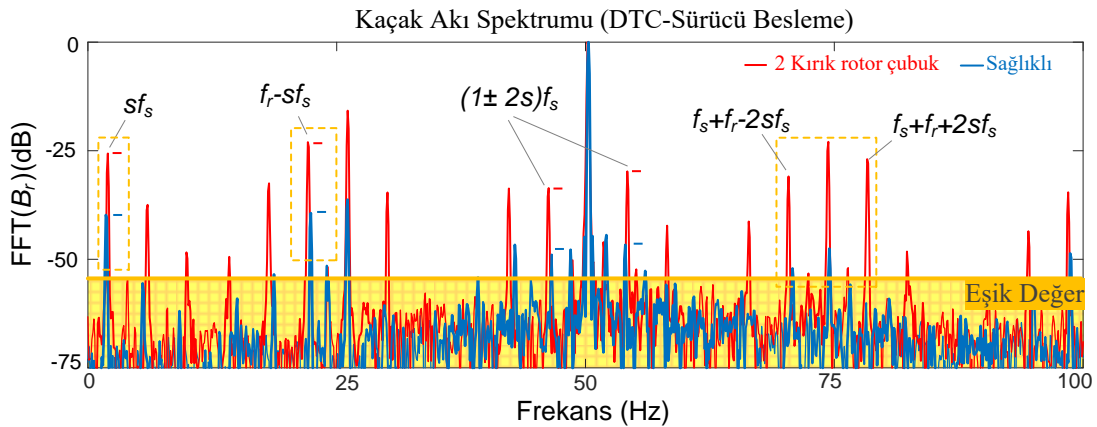


Şekil 5.13. Farklı yüklenme koşullarında karakteristik arıza sinyallerinin davranışı a) Tam-kutup adımı arızası durumunda b) Yarım-kutup adımı arızası durumunda (Not: iki komşu kırık rotor çubuk arızası durumu için Şekil 5.9'a bakınız) (Deneysel sonuçlar)

5.2.6. Sürücü (DTC) ile beslenen asenkron motorda kırık rotor arızası deneysel sonuçları

Belirlenen karakteristik kırık rotor çubuk arızası sinyallerinin sürücü altında beslenen asenkron motorda etkinliğini ispatlamak için asenkron motor doğrudan moment kontrollü (DTC) altında tam yükte, $n_m=1450 \text{ rpm}$ ' de çalıştırılmıştır.

Şekil 5.14'de DTC ile beslenen asenkron motorda iki kırık rotor çubuk arızası var iken kaçak akı spektrumu gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi stator akımının yan bandlarında $(1\pm 2s)f_s$ arıza sinyalleri görülmektedir. Ayrıca kaçak akıda belirlenen sf_s , f_r-sf_s ve $f_s+f_r\pm 2sf_s$ frekanslarında daha etkin sinyaller net bir şekilde görülmektedir. Şekil dikkatlice incelenirse özellikle $f_s+f_r\pm 2sf_s$ sinyalleri sağlıklı duruma göre oldukça baskındır. Bu sonuçlara göre kaçak akıda belirlenen karakteristik kırık rotor çubuk arızası sinyalleri motor besleme kaynağından bağımsız olarak etkin ve güvenilir sonuçlar verdiği görülmüştür.

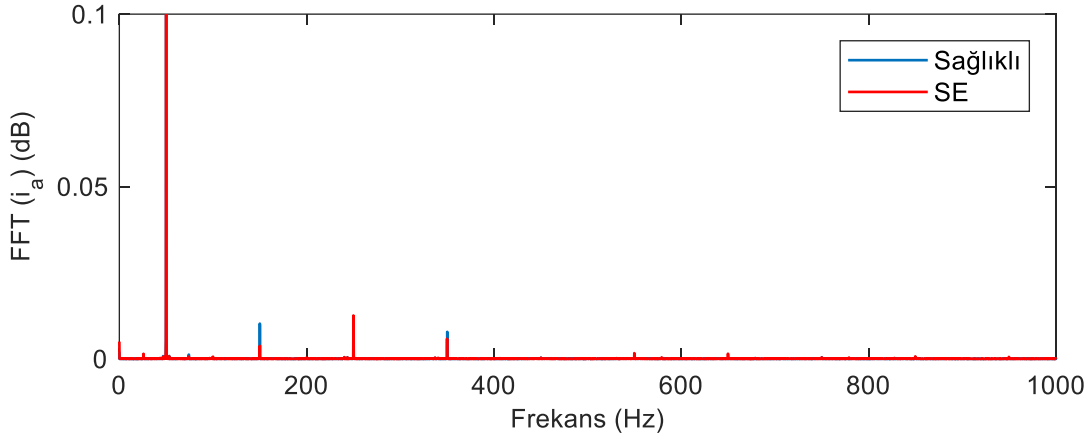


Şekil 5.14. Sürücü (DTC) ile beslenen asenkron motorda kırık rotor çubuk arızası durumunda kaçak akı spektrumu (%100 yükte) (Deneysel sonuç)

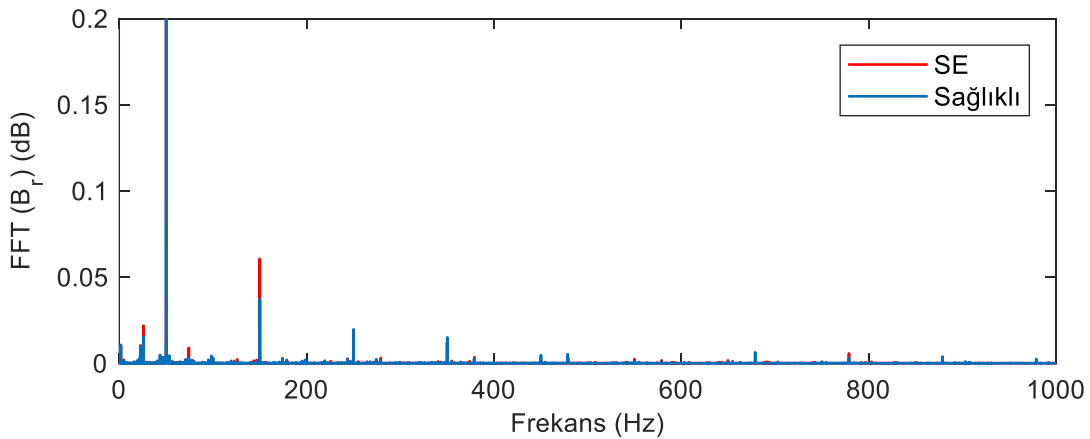
5.2.7. Eksantriklik arızası deneysel sonuçları

Eksantriklik arızası durumunda stator akımında ve kaçak akıdaki temel arıza sinyallerini tespit etmek için asenkron motor tam yük koşulunda ($f_r=24.2$ Hz, $s=0.033$ ve $f_s=50$ Hz) statik eksantriklik arızası durumunda çalıştırılmıştır. Arıza şiddeti; Statik Eksantriklik (SE) %40 olarak oluşturulmuştur. Şekil 5.15'de eksantriklik arızası durumunda stator akım ve kaçak akı spektrumları görülmektedir.

Şekil 5.16'da ise kaçak akıdaki sinyalleri daha iyi analiz edebilmek kaçak akı spektrumu farklı frekans bölgelerinde incelenmiştir. Yapılan analiz sonucunda N_r rotor bar sayısı olmak üzere kaçak akıda $N_r f_r - f_s$, $N_r f_r + 3f_s$ sinyalleri statik eksantriklik arızası durumunda sağlıklı duruma göre oldukça baskın olduğu görülmüştür. Bu çalışmada $N_r=26$ 'dir. Özellikle $N_r f_r - f_s$ sinyalinin statik eksantriklik arızası durumunda ayırt edici olduğu belirlenmiştir.

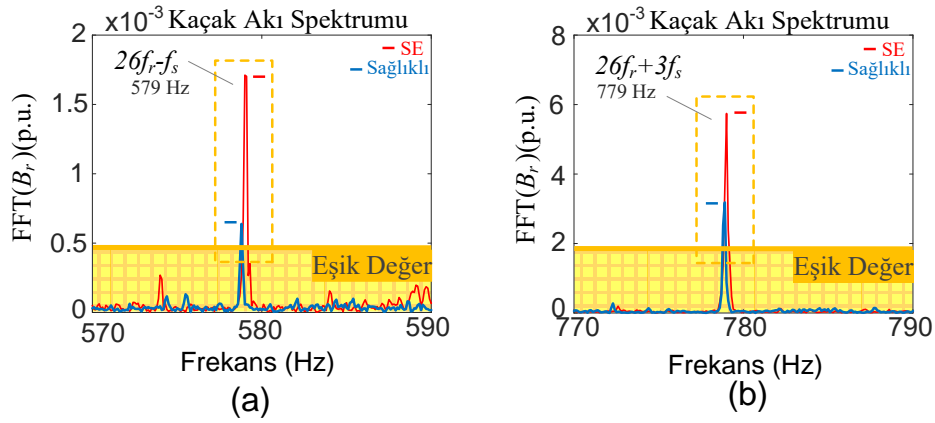


(a) Stator Akım Spektrumu



(b) Kaçak Akı Spektrumu

Şekil 5.15. Statik Eksantriklik arızası durumu (Tam yükte) (a) Stator akım spektrumu [0-1000 Hz] b) Kaçak akı spektrumu [0-1000 Hz] (Deneysel sonuç)

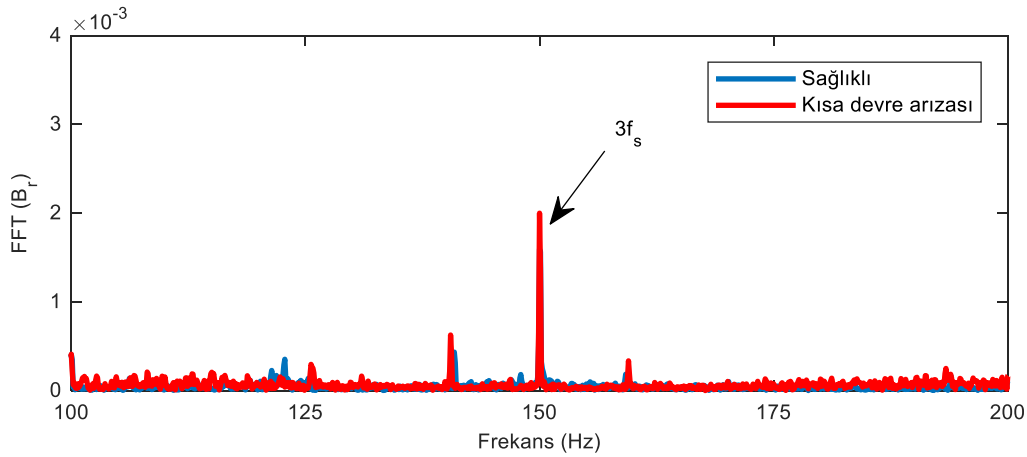


Şekil 5.16. Statik Eksantriklik arızası durumunda kaçak akı spektrumu (Tam yükte)
a) [570-590 Hz] b) [770-790 Hz] (Deneysel sonuç)

5.2.8. Stator kısa devre arızası deneysel sonuçları

Stator kısa devre arızası durumunda kaçak akıdaki harmonikleri incelemek için test edilen motorda kısa devre arızası daha önce belirtildiği gibi oluşturulmuştur. Motor tam yükte çalıştırılmış ve kaçak akı spektrumu incelenmiştir.

Şekil 5.17'de görüldüğü gibi stator kısa devre arızası durumunda sargıların simetrisinin bozulmasının sonucu olarak kaçak akıda 3. Harmoniğin genliği artmaktadır. Bu harmoniğin genliği kısa devre olan sarım sayısına ve motor yüküne bağlı olduğu görülmüştür.

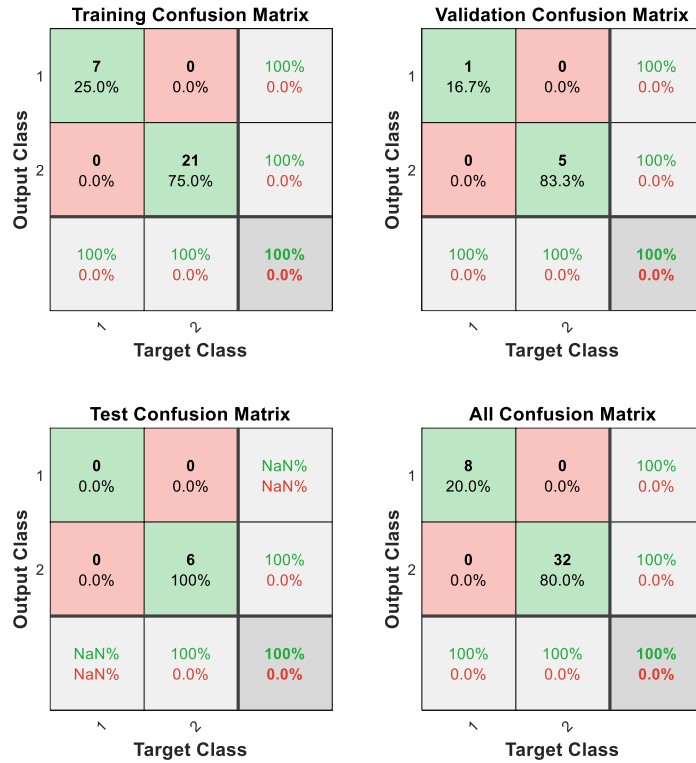


Şekil 5.17. Kısa devre arızası durumunda kaçak akı spekturumu (Deneysel sonuç)

5.2.9. MLP ile arızaların otomatik tespiti deneysel sonuçları

Asenkron motorda kaçak akı spektrumlarından elde edilen karakteristik arıza sinyalleri kullanılarak çok katmanlı yapay sinir ağı modeli ile arıza tespiti otomatik olarak sağlanmıştır. Deneylerde kullanılan asenkron motor farklı yük momenti değerlerinde çalıştırılarak arıza sinyallerinin sağlıklı duruma göre genlikleri belirlenmiş ve bu veriler yapay sinir ağına giriş olarak kullanılmıştır.

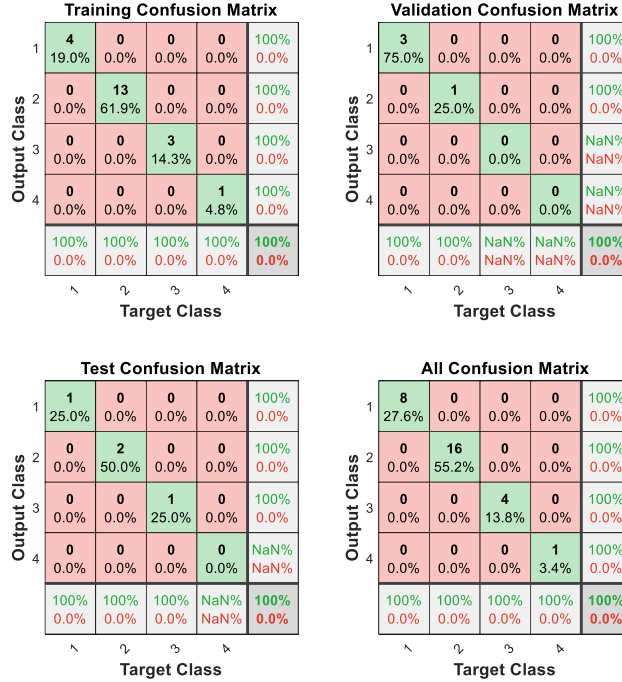
Şekil 5.18'de bir kırık rotor çubuk, iki komşu rotor çubuk, yarım kutup adımı ve tam kutup adımı arızasına sahip motorlar ve sağlıklı motor bilgileri kullanılarak farklı yük koşullarında eğitilen dataların doğruluk tablosu verilmiştir. Bu tabloya göre kırık rotor çubuk arızası %100 başarı oranı ile tespit edilmiştir. Şekil 5.19'da ise statik eksantriklik arızası durumunda farklı yük koşullarında eğitilen dataların doğruluk tablosu verilmiştir. Deneysel verilerle arızaların sınıflandırılması sonucu Şekil 5.20'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre %100 başarı oranı ile arızaların otomatik olarak tespit edilmesi ve sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.18. Kırık rotor çubuk arızası için MLP'nin doğruluk tablosu (Deneysel sonuç)



Şekil 5.19. Statik eksantriklik arızası için MLP'nin doğruluk tablosu (Deneysel sonuç)



Şekil 5.20. Arızaların sınıflandırılması için MLP'nin doğruluk tablosu (Deneysel sonuç) (1-Sağlıklı, 2-Kırık çubuk, 3-Statik Eksantriklik, 4-Stator arızası)

Böylece 4. İş paketinde belirtildiği gibi deneysel devre düzeneği oluşturularak belirlenen sinyallerin gerçek verilerle başarılı bir şekilde test edilmesi sağlanmıştır.

6. ANLIK ARIZA TESPİT MODÜLÜNÜN TASARIMI

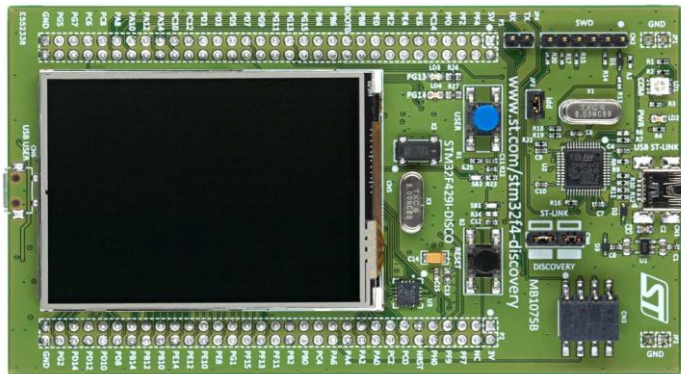
Proje kapsamında geliştirilen algoritmaların anlık arıza tespitinde kullanılabilirliğini göstermek için akı sensörü, DSP kartı, entegre ekran ara yüz ve kablosuz haberleşme içeren portatif bir modül tasarlanmıştır. Bu modülün amacı, motorlardan anlık olarak dataların toplanması, geliştirilen arıza tespit algoritmaların anlık olarak uygulanması ve sonuçların değerlendirilmesi ve değerlendirme sonuçlarının ve toplanan akı bilgilerinin kablosuz olarak istenen cihazlara (PC veya Mobil) uzman kişilerce analiz etmek üzere aktarılmasıdır. Tasarlanan modül yapılmak istenen işlemi seçme ve sonuçları gerçek zamanlı görüntülemek üzere dokunmatik bir TFT LCD ekrana sahiptir.

6.1. Donanım

6.1.1. DSP ve Ekran

DSP ve ekran için STMicroelectronics'in STM32F429 Discovery kiti kullanılmıştır. Şekil 6.1' de görülen STM32F429 kartı STM32F429ZIT6 Arm-Cortex-M4 mikroişlemcisini içeren bir DSP kartıdır. DSP kartı 180 MHz çalışma frekansına, 2Mbit flash, 256Kb RAM ve 64 Mbit SDRAM hafızaya sahiptir. Mikroişlemcinin bütün analog ve dijital giriş/çıkış pinlerine erişim mevcuttur. 3 adet 12 bitlik yüksek çözünürlükte analog-dijital (ADC) giriş ucu bulunmaktadır ve bu pinlerde gürültü önleyici filtreler vardır. 21 haberleşme arayüzü (SCI, SPI vb.) ile diğer çevre birimleri ile haberleşme sağlanabilmektedir. Ayrıca 32-bit olan mikroişlemci çözünürlüğü yazılımsal olarak ayarlanabilen bir LCD-TFT kontrolöre sahiptir. Kart üzerinde sürücüsü STMicroelectronics tarafından sağlanan dokunmatik 2.4" QVGA TFT LCD ekran bulunmaktadır. Bu özellik kullanıcı ile kart arasında etkileşim gerektiren uygulamalar için büyük kolaylık sağlamaktadır.

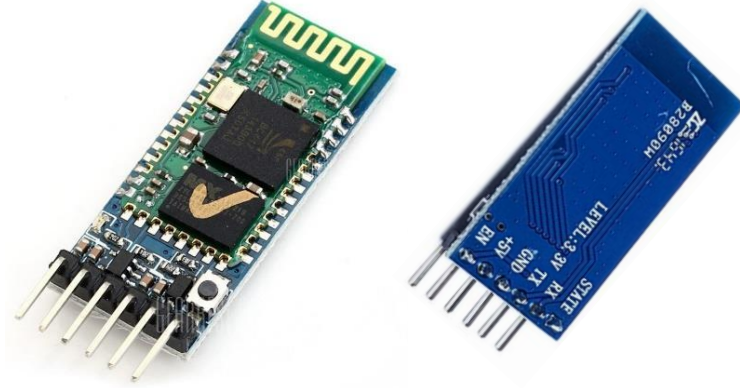
Dijital Sinyal işleme (DSP), yüksek hız, büyük hafıza, çoklu haberleşme arayüzü, entegre dokunmatik TFT LCD ekran vb özelliklerinden dolayı proje kapsamında geliştirilen anlık arıza tespit modülü için STM32F429 Discovery kiti tercih edilmiştir.



Şekil 6.1. STM32F429 DSP Kartı

6.1.2. Kablosuz Haberleşme

Kablosuz haberleşme için HC05 Bluetooth-Serial Modül Kartı kullanılmıştır. Kablosuz seri haberleşme uygulamaları için tasarlanan kart, hızlı prototipleme ve diğer kartlara rahat bağlanma amacı ile gerekli pinlere erişim sağlamaktadır. 10m'lik bir haberleşme mesafesine sahip olan HCO5 kartı Bluetooth 2.0 desteklemektedir. Haberleşme frekansı 2.4Ghz'dir.



Şekil 6.2. HCO5 Bluetooth Kartı

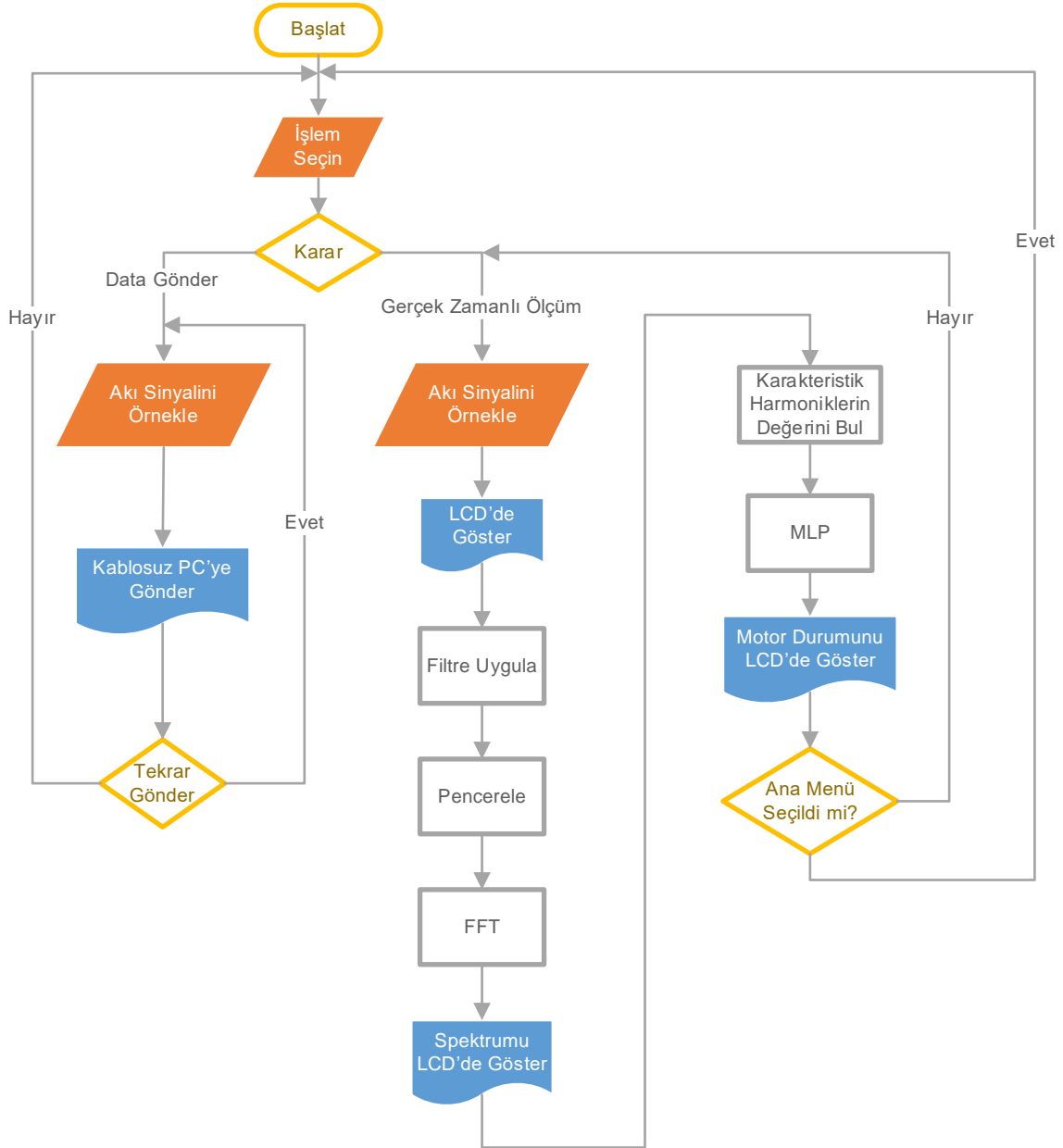
6.2. Yazılım

Geliştirilen arıza tespit algoritmalarının anlık arıza tespit modülünde uygulaması için kullanıcı ara yüzü, analog sinyalin örnekleme, örnekleme sinyallerinin FFT'sinin alınması, arıza tespiti ve dataların kablosuz diğer cihazlara gönderilmesi için gerekli yazılımlar proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazılım programının temel akış diyagramı Şekil 6.3'te sunulmuştur.

6.2.1. Kullanıcı Ara Yüzü

Öncelikle kullanıcı ara yüz programı dataların PC'ye gönderilmesi veya gerçek zamanlı ölçüm için seçenek sunmaktadır. Gerçek zamanlı ölçüm seçildiğinde ekranda örnekleme sinyalinin zamanla değişim şekli, sinyalinin FFT'si ve arıza olup olmadığı varsa arıza tipi görüntülenmektedir. Ana menü ile alt menüler arasında dokunmatik ekran sayesinde geçiş gerçekleşmektedir.

Dataların gönderilmesi alt menüsü seçildiğinde hem örnekleme sinyalleri hem de analiz sonuçları istenirse PC veya mobil cihazlara transfer edilmektedir.



Şekil 6.3. Geliştirilen algoritmanın gerçek sistemde uygulanma akış diyagramı

6.2.2. Analog Sinyalin Örneklenmesi

DSP kartın analog girişine bağlanan akı sensörü ile kaçak akı 2.5 kHz örnekleme frekansı ile dijitale dönüştürülmektedir. ADC'den 2.5 kHz'de örnekleme yapmak için hassas bir gecikme fonksiyonu kullanılmıştır. Analog giriş ucu olarak ADCIN0 (PA0 portu) seçilmiştir. ADC biriminin sonuç kaydedicilerine (ADCRESULT REGISTER) 12 bit olarak yüklenen değer okunmakta ve daha sonra işlenmek üzere 8192 örnek bir diziye saklanmaktadır. Örneklenen kaçak akı sinyali zaman ekseninde LCD ekranda gösterilmektedir.

6.2.3. Kaçak Akının Frekans Spektrumunda İncelenmesi

DSP kartında maksimum 8192 gerçek sayılı FFT desteklediğinden bir döngü içinde her defasında 8192 örnek alındıktan sonra FFT alınmaktadır. Kaçak akı sinyaline FFT uygulanmadan önce pencereleme fonksiyonu kullanılarak (Hanning) spektral sızıntılar minimize edilmiştir. FFT çözünürlüğü 8192 data limitinden dolayı 0.305 Hz olmaktadır.

6.2.4 Arıza tespiti

Gerçek zamanlı ekranda daha önce geliştirilen algoritmaların uygulanması ile arıza bilgisi de görüntülenmektedir. Bunun için DSP yazılımı öncelikle belirlenen karakteristik harmoniklerin değerlerini spektrumdan bulmakta, daha sonra bu karakteristik harmonikleri geliştirilen algoritmalarla göre değerlendirerek varsa eğer arıza türünü kullanıcıya bildirmektedir. Şekil 6.4'te TFT LCD panelde kaçak akı bilgisi, FFT uygulaması ve arızaların LCD ekranda tespiti görülmektedir.



Şekil 6.4. TFT LCD panelde kaçak akı, FFT spektrum ve arıza gösterimi

6.2.5 Kablosuz Haberleşme

Örneklenen kaçak akı sinyali ve elde edilen arıza bilgileri data transfer alt menüsünden Bluetooth kartı aracılığıyla kablosuz olarak PC'ye gönderilmektedir. Uygun bir program ile PC'ye gönderilen bilgiler daha sonra değerlendirilmek üzere kayıt edilebilmektedir. Haberleşme için DSP kartın seri haberleşme birimi kullanılmıştır. Tasarlanan kablosuz arıza tespit modülü deney düzeneğinde kullanılarak gerçek zamanlı test edilmiş ve geliştirilen algoritmaların uygulanabildiği görülmüştür. Şekil 6.5'de geliştirilen kablosuz anlık arıza tespit sistemi prototipi görülmektedir. Bu prototip DSP, LCD panel, fluxgate sensörü ve enerji besleme sistemi (power-bank) içermektedir.



Şekil 6.5. Kablosuz arıza tespit sistemi cihaz prototipi

Böylece anlık olarak kaçak akı bilgisinin toplanmasıyla kullanıcı dostu, ucuz maliyetli, yüksek güvenilirlikli, kolay uygulanabilen bir arıza tespit sistemi prototipi projede önerildiği üzere tasarlanmıştır.

Sonuç olarak; 5. ve 6. iş paketi kapsamında geliştirilen algoritmalar DSP'ye aktarılmış olup anlık kablosuz arıza tespit modülü prototipi yapılmıştır. Testler başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

7. SONUÇLAR

Endüstride ve sanayinin birçok aşamasında sıkça kullanılan asenkron motorların çalışma ömrü uygun çalışma şartlarına bağlıdır. Bu yüzden bu tip motorlarda meydana gelebilecek potansiyel arızaların doğru ve güvenilir bir şekilde tespit edilmesi mevcut sistemlerin sürekliliği ve verimi açısından büyük öneme sahiptir. Bu nedenle bu tip motorların kullanıldığı sistemlerde meydana gelebilecek potansiyel arızaları tespit edebilecek durum görüntüleme ve arıza tespit sistemleri tasarlamak gerekmektedir. Projede asenkron motorlarda meydana gelen mekaniksel ve elektriksel arızaları kaçak akı bilgisinden yararlanılarak tespit edebilecek bir yaklaşım uygulamalı olarak gerçekleştirilmiştir.

Kırık rotor çubuk, eksantriklik ve stator kısa devre arızalarını tespit edebilmek için kaçak akıdaki karakteristik sinyallerden yararlanılmıştır. Öncelikle ANSYS@Maxwell-2D paket programında modellenen sağlıklı bir motor ve arızalı motorlar farklı yüklenme koşullarında test edilmiş ve stator akım spektrumları ile kaçak akı spektrumları her test için karşılaştırılmıştır ve kaçak akı analizinin mevcut stator akım analizine göre avantajları gösterilmiştir. Kaçak akıda bulunan ek arıza sinyalleri ile karakteristik arıza harmonikleri belirlenmiştir. Bu harmoniklerin farklı motor yüklenme koşullarında güvenilirliği test edilmiştir. Ayrıca çok katmanlı yapay sinir ağı (Multilayer Perceptron) kullanılarak arızaların otomatik olarak tespit edilmesi %100 başarı oranı ile sağlanmıştır. Kullanılan bu yöntemin diğer yöntemlerden farklı kılan özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yük ve besleme kaynağından bağımsız bir arıza tespitine imkân sağlaması.
- Kaçak akıda bazı arıza tiplerinde sadece zaman eksininde anlık arıza tespitine imkan sağlaması ve böylece kompleks sinyal işleme metotlarına gerek duyulmaması
- Motor topolojisinden (stator sargıların bağlantı şekli, stator ve rotor oluk sayısı vb.) bağımsız bir arıza tespitine olanak sağlaması
- Arıza türünün ve arıza şiddetinin çok katmanlı yapay sinir ağı (Multilayer Perceptron-MLP) yöntemi ile otomatik olarak yapılması
- Akı sensörü, DSP, kablosuz haberleşme modülü ve kullanıcı arayüzü ile anlık arıza tespitine olanak sağlayabilmesi
- Kullanılacak sensörün kesin manyetik akı bilgisini vermesi yanı sıra ucuz, kompakt ve kolay uygulanabilir olması

Elde edilen bulguların güvenilirliğini ispatlamak için uygun test düzeneği oluşturulmuştur. Bu düzende kaçak akı bilgisini ölçmek için ucuz ve güvenilir olan TI-DRV425 fluxgate sensörü kullanılmıştır. Kırık rotor çubuk arızası için rotor çubukları uygun şekilde

kırılmış, eksantriklik arızasında rotor –x yönünde belli bir miktar kaydırılırken stator kısa devre arızasında ilgili sarımlar kısa devre edilmiş ve farklı test koşullarında kaçak akıdaki sinyallerin benzetim sonuçları ile uyduğu görülmüştür. Motor etrafındaki manyetik alan gürültülerinin etkisi kaçak akı sensöründen elde edilen bilgileri olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için yazılımsal ve donanımsal olarak uygun filtreler kullanılmıştır.

Yapılan tüm çalışmalar sonucunda elde edilen algoritmalar kullanılarak kablosuz anlık durum izleme cihazı prototipi gerçekleştirilmiştir. Bu prototip üzerinde bulunan dokunmatik LCD panel ile operatör tarafından rahat bir şekilde kullanılacak bir yazılım arayüzü gerçekleştirilmiştir. Panel üzerinde anlık motor arıza durumu bilgisi gözlemlenebilmektedir. Elde edilen sonuçlar yöntemin oldukça başarılı olduğunu göstermiştir.

Proje kapsamında prototipi üretilen anlık kablosuz arıza tespit modülüne motor arıza durumu haricinde motorun anlık sıcaklık bilgisi, fan soğutma sistemi bilgisi, anlık güç ve çekilen akım bilgisi vb. elektriksel ve mekaniksel parametrelerde eklenerek daha etkin ve güvenilir bir yeni tip akıllı sensör teknolojisi (smart-sensor Technologies) geliştirilebilir. Ayrıca geliştirilen prototipe titreşim sensörü ve akım sensörü de eklenerek farklı arıza tiplerinin aynı anda olması durumunda stator akımı, kaçak akı ve titreşim analizleri birlikte incelenerek daha erken, güvenilir ve etkin bir motor durum izleme sisteminin de geliştirilmesi faydalı olacaktır. Bu proje kapsamında kullanılan yöntemler ve geliştirilen algoritmalarından sanayide kullanılan diğer tip motorlara da uygulanabilmesi için çalışmalar yapılması önerilmektedir. Böylece motor türünden bağımsız hızlı, etkin ve güvenilir bir arıza tespiti sağlanabilecektir.

KAYNAKLAR

- Alcin, O. F., Sengur, A., Ghofrani, S., and Ince M.C. 2014. "GA-SELM: Greedy algorithms for sparse extreme learning machine", *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, 55, 126–132.
- Arjmand-M, A. H., Sargolzaei N. 2016. "Intelligent fault diagnosis of induction motors based on multi-objective feature selection using NSGA-II", *6th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE)*, 183-188.
- Bacha, K., Gossa, M., Henao, H. and Capolino G. A. 2006. "Comparative Investigation of Diagnosis Media of Stator Voltage Asymmetry and Rotor Broken Bars in Induction Machines", *Proceedings of IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Paris*, pp. 5040-5045.
- Bellini, A., Filippetti, F., Tassoni, C. and Capolino G. A. 2008. "Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55 (12), pp. 4109-4126.
- Bossio, G.R., De Angelo, C.H., Bossio, J.M., Pezzani, C.M. and Garcia G.O. 2009. "Separating broken rotor bars and load oscillations on IM fault diagnosis through the instantaneous active and reactive currents", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56 (11), 4571-4580.
- Bouzida, A., Touhami, O. and Ibtouen R. 2014. "Rotor fault diagnosis using external search coils voltage analysis", *Proceedings of International Conference on Electrical Machines (ICEM), Berlin*, pp. 1654-1658.
- Ceban, A., Pusca, R. and Romary R. 2012. "Study of Rotor Faults in Induction Motors Using External Magnetic Field Analysis", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59 (5), 2082-2093.
- Ceban, A., Pusca R. and Romary R. 2010. "Eccentricity and broken rotor bars faults - Effects on the external axial field", *Proceedings of The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome*, pp. 1-6.
- Chernyavska, I., Vitek O. 2016. "Analysis of broken rotor bar fault in a squirrel-cage induction motor by means of stator current and stray flux measurement", *Proceedings of IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Varna*, pp. 532-537.
- De Angelo, C.H., Bossio, G.R. and Garcia G.O. 2010. "Discriminating broken rotor bar from oscillating load effects using the instantaneous active and reactive powers", *Electric Power Applications, IET*, 4 (4) 281-290.
- Dias, C. G., Chabu I. E. 2014. "Spectral Analysis Using a Hall Effect Sensor for Diagnosing Broken Bars in Large Induction Motors", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63 (12), 2890-2902.
- Dias, C. G., Chabu, I. E. and Bussab M. A. 2006. "Hall Effect Sensor and Artificial Neural Networks Applied on Diagnosis of Broken Rotor Bars in Large Induction Motors", *IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications*, 34-39.
- Didier, G., Ternisien, E. and Razik H. 2005. "Detection of incipient rotor cage fault and mechanical abnormalities in induction motor using global modulation index on the line current spectrum", *Proceedings of Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2005 5th IEEE International Symposium on*, 1-6.
- Elkasabgy, N. M, Eastham, A. R. and Dawson G. E. 1992. "Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28 (1), 165-171.
- EPRI EL-2678, 1982. "Improved Motors for Utility Applications, final report", Vol 1, 1763-1.
- Frosini, L., Harlişca, C., and Szabó L. 2015. "Induction Machine Bearing Fault Detection by Means of Statistical Processing of the Stray Flux Measurement", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62 (3), pp. 1846-1854.

- Godoy, W. F., da Silva, I. N., Goedel, A., Palácios, R. H. C., Bazan G. H. and Moríñigo-Sotelo D. 2016. "An application of artificial neural networks and PCA for stator fault diagnosis in inverter-fed induction motors", XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2165-2171.
- Goktas, T., Arkan, M., Mamis, M.S., and Akin B. 2017. "Broken rotor bar fault monitoring based on fluxgate sensor measurement of leakage flux", Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, FL, USA, pp. 1-6.
- Goktas, T., Arkan, M., Mamis, M.S., and Akin B. 2017. "Separation of Induction Motor Rotor Faults and Low Frequency Load Oscillations Through the Radial Leakage Flux", Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition Conference (ECCE), Cincinnati, OH, USA, (accepted)
- Goktas, T., Lee K., Zafarani, M., and Akin B. 2016. "Analysis of magnet defect faults in permanent magnet synchronous motors through fluxgate sensors", Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, pp. 2875-2880.
- Goktas, T., Zafarani, M., Lee K., Akin, B., and Sculley T. 2017. "Comprehensive Analysis of Magnet Defect Fault Monitoring Through Leakage Flux", IEEE Transactions on Magnetics, 53 (4), 1-10.
- Henao, H. , Demian, C. and Capolino G. A. 2003. "A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor," IEEE Transactions on Industry Applications, 39 (5), 1272-1279.
- Ishkova, I., Vítek O. 2016. "Analysis of induction motor faults by means of monitoring the current and magnetic flux density spectrums", Proceedings of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Anacapri, pp. 611-616.
- Long W., Habetler, T.G. and Harley R.G. 2005. "Separating load torque oscillation and rotor fault effects in stator current-based motor condition monitoring", Proceedings of Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on.1889-1894.
- Mirzaeva G., Saad K. I., and Jahromi M. G. 2017. "Comprehensive Diagnostics of Induction Motor Faults Based on Measurement of Space and Time Dependencies of Air Gap Flux", in IEEE Transactions on Industry Applications, 53 (3), 2657-2666.
- Mirzaeva, G., Saad, K. and Jahromi M. G. 2016. "Comprehensive Diagnostics of Induction Motor Faults Based on Internal Flux Measurement ", IEEE Transactions on Industry Applications, PP (99) 1-1.
- Motor Reliability working Group. 1985. "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations", Part I, and II, IEEE Trans. On Industry Applications.
- Pezzani, C.M., Donolo, P.D., Castellino, A.M., Bossio, G.R. and De Angelo C.H. 2010. "A new approach to the Park's vector for broken bars and load oscillation diagnosis on IM", Proceedings of Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on, 1221-1226.
- Romary, R., Pusca, R., Lecointe, J. P. and Brudny J. F. 2013. "Electrical machines fault diagnosis by stray flux analysis", Proceedings of IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Paris, pp. 247-256.
- Saad, K., Mirzaeva G. 2015. "Space-time representation of the main air gap flux of a three phase squirrel cage induction motor and its application to detect eccentricity", IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 1466-1472.
- Saad, K., Mirzaeva G. 2016. "Advanced diagnosis of rotor faults in large induction motors based on internal flux measurement", Proceedings of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Portland, OR, pp. 1-8.
- Surya, G. N. , Khan, Z. J. and Ballal M. S., 2015. "A novel radial flux sensing technique for stator turn fault detection in induction motors in online mode using observer coil", Proceedings of International

Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), Bangalore, pp. 93-98.

Texas Instruments DRV425 Fluxgate Magnetic-Field Sensor Datasheet. 2016. "SBOS729A, Revised".

Wang, H., Bao, X., Di, C. and Cheng Z. 2015. "Detection of eccentricity fault using slot leakage flux monitoring", Proceedings of 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), Seoul, pp. 2188-2193.

Wu, Q. and Nandi, S. 2010. "Fast single-turn sensitive stator interturn fault detection of induction machines based on positive- and negative-sequence third harmonic components of line currents," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, no. 3, pp. 974–983.

Yazidi, A., Henao, H., and Capolino G. A. 2005. "Broken rotor bars fault detection in squirrel cage induction machines", Proceedings of IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, San Antonio, TX, pp. 741-747.

Yazidi, A., Henao, H., Capolino, G. A., Artioli, M., Filippetti, F. and Casadei D. 2005. "Flux signature analysis: An alternative method for the fault diagnosis of induction machines", Proceedings of IEEE Russia Power Tech, St. Petersburg, pp. 1-6.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. MÜSLÜM ARKAN
Proje No:	117E766
Proje Başlığı:	Asenkron Motorlarda Kaçak Akı İle Arızanın Türü, Büyüklüğü Ve Arıza Noktasının Tespiti; Kablosuz Anlık Durum İzleme Sisteminin Geliştirilmesi
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	MEHMET SALİH MAMIŞ, TANER GÖKTAŞ
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İNÖNÜ Ü.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/06/2018 - 01/06/2020
Onaylanan Bütçe:	206986.0
Harcanan Bütçe:	101319.19
Öz:	<p>Asenkron motorlarda stator sargılarının kısa devre olması, rotor çubuklarının kırılması ve eksen kaçıklığı oluşabilecek temel arızalardır. Elektriksel ve mekanik arızaları tespit etmek için kullanılan en yaygın yöntem motor akım imza analizi (Motor Current Signature Analysis-MCSA) yöntemidir. Bu yöntemde arıza harmonikleri haricinde besleme kaynağı düzensizliği, statik ve dinamik yük durumlarını temsil eden harmonikler gibi bilgiler de bulunmaktadır. Bunlar arıza durumunda ortaya çıkan karakteristik harmonikler ile karışabilmektedir. Ayrıca asenkron motorlar bilindiği üzere güç, verim ve hız açısından değişik stator ve rotor yapısında (topoloji) üretilmektedir. Ayrıca arızanın çeşidine göre bazı karakteristik harmonikler stator akımında baskın olarak görülememektedir. Bu yüzden sadece motor akım bilgisine bakılarak arızanın tespiti, türü, büyüklüğü ve arıza noktasının belirlenmesi tam olarak sağlanamamaktadır. Arıza tespitini daha güvenilir biçimde sağlayabilmek için motor etrafındaki kaçak akılarından (leakage flux) yararlanılarak da arıza tespiti yapılabilmektedir. Motordaki kaçak akı bilgisini ölçmek için genellikle motor çerçevesine (frame) bir bobin (search coil) eklenmektedir. Ancak bu yöntemde elde edilen gerilim bilgisi eklenen sarımın sayısına, yönüne ve rotor dönme hızına bağlıdır. Motorun hava aralığında bulunan akı bilgisini ölçmek için ise stator oluklarına yerleştirilen alan etkili (hall-effect) sensörler kullanılmaktadır. Bu sensörleri stator oluklarına yerleştirebilmek için rotor kısmının motordan çıkartılması ve oluklara belirli sayıda sensörlerin yerleştirilmesi gerekmektedir. Özellikle büyük güçlü motor uygulamalarında sensör ve montaj maliyeti ağır finansal kayıplara neden olmaktadır. Uygulama zorluğu, maliyeti ve direkt akı bilgisi vermemesi gibi sebeplerden dolayı bu tip sensörlerin arıza tespitinde kullanımını kısıtlanmaktadır.</p> <p>Proje çalışmalarının sonucu olarak, motorun manyetik davranışını, kaçak akı ölçümü ile doğrudan inceleyerek motor topolojisinden, besleme kaynağından ve yükün statik/dinamik durumundan bağımsız olarak arızanın tespiti doğru bir şekilde sağlanmıştır. Farklı yüklenme koşullarında her bir arıza türü için kaçak akıdaki etkin arıza harmonikleri belirlenmiştir. Çok katmanlı yapay sinir ağı (MLP-Multilayer perceptron) kullanılarak farklı tip arızalar otomatik olarak tespit edilmiştir. Geliştirilen algoritmalar DSP'ye uygulanarak gerçek zamanlı arıza tespit modülü geliştirilmiş ve her bir arıza türü için önerilen arıza harmoniklerinin etkinliği deneysel sonuçlar ile de doğrulanmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Arıza tespiti ve teşhisi, gerçek zamanlı arıza tespiti, Kaçak Akı, Asenkron Motor
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Detection of Broken Bar Fault based on the Sidebands of Rotor Slot Harmonics in Leakage Flux (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 2- Monitoring of Leakage Flux for Rotor Fault Detection under non-adjacent broken rotor bars in Induction Motors (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),