

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ASENKRON MOTOR STATOR ARIZALARININ KAÇAK AKI YÖNTEMİ İLE
TESPİTİ VE PROTOTİP GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kürşad AKBAYIR

Elektrik Elektronik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Müslüm ARKAN

HAZİRAN 2022

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ASENKRON MOTOR STATOR ARIZALARININ KAÇAK AKI YÖNTEMİ İLE
TESPİTİ VE PROTOTİP GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kürşad AKBAYIR
(36183615047)

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Müslüm ARKAN

HAZİRAN 2022

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalıőmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedен beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Müslüm ARKAN'a ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Taner GÖKTAŞ'a

alıőmalarımда ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalıőmalarım süresince benden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme,

teşekkür ederim.



ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “ASENKRON MOTOR STATOR ARIZALARININ KAÇAK AKI YÖNTEMİ İLE TESPİTİ VE PROTOTİP GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığıın bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Kürşad AKBAYIR



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Stator Arızaları.....	2
1.2 Tezin Amacı.....	4
1.3 Tez İçeriği.....	4
2. KAÇAK AKI KULLANILARAK YAPILAN STATOR ARIZA TESPİT ÇALIŞMALARI	6
3. ASENKRON MOTORUN VE STATOR SARIM-SARIM ARASI KISA DEVRE ARIZASININ MODELLENMESİ.....	10
3.1 Asenkron Motorun Modellenmesi	10
3.2 Stator Sarım-Sarım Arası Kısa Devre Arızasının Oluşturulması	19
4. BENZETİM SONUÇLARININ ANALİZİ	23
4.1 Stator Akımının Analizi.....	24
4.2 İndüklenen Gerilim Analizi	26
4.3 Çıkış Momentinin Analizi	27
4.4 Kaçak Akı Analizi	28
5. ARIZA TESPİT MODÜLÜ.....	42
5.1 Kullanılan Materyal	42
5.1.1 Kaçak akı sensörü.....	42
5.1.2 DSP mikrodenetleyici kart	42
5.1.3 Kablosuz haberleşme.....	43
5.2 Yazılım	44
5.2.1 Kullanıcı arayüzü.....	44
5.2.2 Analog sinyalin sayısallaştırılması	44
5.2.3 Kaçak akının frekans spektrumuna dönüşümü.....	45
5.2.4 Arızanın tespiti	45
5.2.5 Kablosuz haberleşme.....	45
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	47
KAYNAKLAR.....	49
ÖZGEÇMİŞ	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 : Motor Parametreleri	11
Çizelge 4.1 : %100 yük altında çalışan asenkron motorun 5 sarım stator kısa devre arızası durumunda kaçak akı RMS değişimi	29
Çizelge 4.2 : %100 yük altında çalışan bir asenkron motorda 5 sarım kısa devre arızası durumunda kaçak akı değişimleri.....	31
Çizelge 4.3 : %75 yük altında çalışan bir asenkron motorda 5 sarım kısa devre arızası durumunda kaçak akı değişimleri.....	32
Çizelge 4.4 : %50 yük altında çalışan bir asenkron motorda 5 sarım kısa devre arızası durumunda kaçak akı değişimleri.....	33
Çizelge 4.5 : %25 yük altında çalışan bir asenkron motorda 5 sarım kısa devre arızası durumunda kaçak akı değişimleri.....	34
Çizelge 4.6 : %100 yük altında ve 10 sarım kısa devre arızası durumunda çalışan asenkron motorda kaçak akı değişimleri.....	35
Çizelge 4.7 : %100 yük altında ve 20 Sarım kısa devre arızası durumunda çalışan asenkron motorda kaçak akı değişimleri.....	35
Çizelge 4.8 : %100 yük altında ve 42 Sarım kısa devre arızası durumunda çalışan asenkron motorda kaçak akı değişimleri.....	36
Çizelge 4.9 : 5 sarım-sarım arası kısa devre arızasında 5 derece (arızalı slotun olduğu) noktasındaki 450Hz ve 650 Hz değişim Çizelgesi. (a) farklı yüklenme koşullarında (b) farklı arıza şiddetlerinde	39

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 : Asenkron motor arızaları.	1
Şekil 1.2 : Asenkron motor stator sarım-sarım kısa devre arızası.....	3
Şekil 2.1 : Harici manyetik alan ölçümü.	6
Şekil 2.2 : Arama bobinlerinin konumları (Penman, 1994).....	7
Şekil 3.1 : Makina tipinin belirlenmesi.	12
Şekil 3.2 : Asenkron motor parametrelerinin girilmesi.....	12
Şekil 3.3 : Parametreleri girilen asenkron motor RMXprt görünümü.....	13
Şekil 3.4 : Asenkron motorun sargı düzeni	13
Şekil 3.5 : Motor performans ve tasarım bilgilerini veren analiz sonuçları.....	14
Şekil 3.6 : Modelin ANSYS@Maxwell-2D modülüne aktarımı	15
Şekil 3.7 : Asenkron motorun ANSYS@Maxwell-2D görünümü.....	15
Şekil 3.8 : Asenkron motorun ölçüm yapılacak kaçak akı noktaları.....	16
Şekil 3.9 : Manyetik alan vektörlerinin tanıtılması.....	17
Şekil 3.10 : Manyetik alan vektörlerinin tanıtılması	17
Şekil 3.11 : Örnekleme zamanının ve örnekleme süresinin girilmesi	18
Şekil 3.12 : Motorun çalışma yük değerinin ayarlanması.....	18
Şekil 3.13 : Stator sarım-sarım kısa devre arızasının modellenmesi	19
Şekil 3.14 : Asenkron motorun ANSYS@Maxwell-2D simülasyon sonuç grafikleri a) Kaçak akı-Zaman grafiği b) Moment-Zaman grafiği	20
Şekil 3.15 : Asenkron motorun ANSYS@Maxwell-2D simülasyon sonucu oluşan akım-zaman grafikleri	21
Şekil 3.16 : Manyetik akı çizgileri ve manyetik akı yoğunluğu dağılımı.....	22
Şekil 3.17 : ANSYS@Maxwell-2D programı mesh yapısı	22
Şekil 4.1 : Motor yönlerinin gösterimi	23
Şekil 4.2 : %100 yük altında çalışan bir asenkron motorun arıza büyüklüğü ile stator akım efektif değerlerinin karşılaştırılması.....	24
Şekil 4.3 : Farklı yüklerde (0%-100%) Faz-A akımı efektif değer değişimi	25
Şekil 4.4 : Sağlıklı ve 5 sarım arızalı asenkron motorda A-Fazı frekan spektrumu ..	25
Şekil 4.5 : Stator kısa devre arızası durumunda tam yük çalışmada 3. harmonik artış oranları (Arızalı değer/Sağlıklı değer oranı).....	26
Şekil 4.6 : %100 yük altında çalışan bir asenkron motorda farklı arıza şiddetlerinde indüklenen gerilimdeki 7. harmonik (350 Hz) artış oranları.....	26

Şekil 4.7 : Stator 5-sarım kısa devre arızası durumunda farklı yüklerde (0%-100%) indüklenen gerilimdeki 7. harmonik artış oranları (Arızalı değer/Sağlıklı değer oranı)	27
Şekil 4.8 : Çıkış momenti spektrumu, tam yükte, stator sarım-sarım arası kısa devre arızası durumunda.....	28
Şekil 4.9 : Tam yük altında çalışan bir asenkron motorda farklı arıza seviyelerinde çıkış momentindeki harmoniklerin değişim oranı (Arızalı değer/Sağlıklı değer).....	28
Şekil 4.10 : Sağlıklı ve 5 sarım arızalı asenkron motorda kaçak akı bozulması (120 Derece)	30
Şekil 4.11 : %100 yük altında çalışan sağlıklı ve 5 sarım arızalı asenkron motorda 11.harmonik (550 Hz) artış grafiği. (180 derece).....	31
Şekil 4.12 : %75 yük altında çalışan sağlıklı ve 5 sarım arızalı asenkron motorda 11.harmonik (550 Hz) artış grafiği. (180 derece).....	32
Şekil 4.13 : %50 yük altında çalışan sağlıklı ve 5 sarım arızalı asenkron motorda 11.harmonik (550 Hz) artış grafiği. (180 derece).....	33
Şekil 4.14 : %25 yük altında çalışan sağlıklı ve 5 sarım arızalı asenkron motorda 11.harmonik (550 Hz) artış grafiği. (180 derece).....	34
Şekil 4.15 : %100 yük altında çalışan sağlıklı, 5, 10, 20 ve 42 sarım arızalı asenkron motorda 11.harmonik (550 Hz) artış grafiği. (180 derece).....	36
Şekil 4.16 : %100 yük altında $28f_r+3f_s$ (813 Hz) harmoniğinin sağlıklı ve 5 sarım kısa devre durum karşılaştırması	37
Şekil 4.17 : %75 yük altında $28f_r+3f_s$ (823 Hz) harmoniğinin sağlıklı ve 5 sarım kısa devre durum karşılaştırması	38
Şekil 4.18 : %50 yük altında $28f_r+3f_s$ (833 Hz) harmoniğinin sağlıklı ve 5 sarım kısa devre durum karşılaştırması	38
Şekil 4.19 : %25 yük altında $28f_r+3f_s$ (842 Hz) harmoniğinin sağlıklı ve 5 sarım kısa devre durum karşılaştırması	38
Şekil 4.20 : %100 yük altında çalışan sağlıklı ve 5 sarım arızalı asenkron motorda 9.harmonik (450 Hz) ve 11.harmonik (650 Hz) artış grafiği. (5 derece)	39
Şekil 4.21 : A-Fazı ve B-Fazı kısa devre yapılmış stator arızalı asenkron motorlar	40
Şekil 4.22 : B-Fazı kısa devre yapılmış, %100 yük altında çalışan sağlıklı ve 5 sarım arızalı asenkron motorda 9.harmonik (450 Hz) ve 11.harmonik (650 Hz) artış grafiği. (65 derece)	41

Şekil 5.1 : DRV425 Fluxgate Magnetic-Field Sensor	42
Şekil 5.2 : STM32F429 DSP kart	43
Şekil 5.3 : HC06 bluetooth kartı	43
Şekil 5.4 : Verilerin serial terminal programından izlenmesi.....	44
Şekil 5.5 : TFT LCD ekran (kullanıcı arayüzü)	45
Şekil 5.6 : Arıza modülü akış diyagramı	46



SEMBOLLER VE KISALTMALAR

RMS	: Root Mean Square (Etkin değer)
FEM	: Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
FFT	: Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
f_s	: Besleme kaynağı frekansı
f_r	: Rotor akımları frekansı
s	: Motor kayması
B_x	: x eksenine kaçak akısı
B_y	: y eksenine kaçak akısı
p	: Çift kutup sayısı
Z	: Rotor bar sayısı
DSP	: Digital Signal Processor (Sayısal sinyal işlemcisi)
MCSA	: Motor current signature analysis (Motor akım imza analizi)
OC	: Observer coil (Gözlemci Bobin)
SC	: Search coil (Arama Bobini)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ASENKRON MOTOR STATOR ARIZALARININ KAÇAK AKI YÖNTEMİ İLE TESPİTİ VE PROTOTİP GELİŞTİRİLMESİ

Kürşad AKBAYIR

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

53+X sayfa

2022

Danışman: Prof. Dr. Müslüm ARKAN

Asenkron motorlar sağlamlığı, basitliği ve ucuz olmaları nedeniyle endüstride en çok kullanılan elektrik motorlarıdır. Bu nedenle asenkron motor arızaları üretimin durması, iş gücü kayıplarının oluşması ve verimin düşmesi gibi maliyetli sonuçlar doğurmaktadır. Asenkron motorlarda görülen en yaygın arızalardan biri stator sarım-sarım arası kısa devre arızalarıdır. Başlangıç aşamasında fark edilmesi oldukça güç olan bu arızaların teşhisinde kullanılan klasik yöntem Motor Akım İmza Analizi (Motor current signature analysis-MCSA) yöntemidir. Ancak bu yöntem değişken yük durumlarında ve besleme kaynağı düzensizliklerinde yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir.

Bu çalışmada, asenkron motorun gövdesinden sızan kaçak akının analizine dayanan arıza teşhis yöntemi üzerinde durulmuş ve stator arızasını başlangıç aşamasında kaçak akının analizi ile tespit edebilecek bir prototip tasarlanmıştır. Bu amaçla, Sonlu Elemanlar Yöntemini (Finite Element Method-FEM) kullanan ANSYS@Maxwell-2D programında bir asenkron motor modeli tasarlanmış, çeşitli arıza oranları uygulanmış, farklı çalışma yüklerinde çalıştırılarak toplanan kaçak akı bilgileri analiz edilmiş ve arıza teşhisinde kullanılabilecek algoritmalar elde edilmiştir. Analiz aşamasında zaman domenindeki kaçak akı işaretlerine Matlab programında Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform-FFT) uygulanarak işaretlerin frekans spektrumları elde edilmiştir. Frekans domenindeki sağlıklı ve arızalı motor harmonikleri karşılaştırılarak kullanılabilecek karakteristik arıza işaretleri tespit edilmiştir. Çalışmanın son aşamasında ise kaçak akı ölçümü ile stator sarım-sarım arası kısa devre arızasını gerçek zamanlı olarak tespit edebilecek bir prototip tasarlanmıştır. Bu işlem için DSP tabanlı STM32F429 mikrodenetleyici kartı kullanılmıştır. Simülasyon sonucu çıkarılan algoritmaya dayanan yazılım mikrodenetleyici karta yüklenmiş ve kaçak akı yöntemi ile stator arızası teşhisi yapabilen bir prototipin uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Asenkron motor, Stator arızası, Kaçak akı yöntemi, Gerçek zamanlı arıza tespiti

ABSTRACT

Master Thesis

DETECTING INDUCTION MOTOR STATOR FAULTS BY LEAKAGE FLUX METHOD AND DEVELOPMENT OF PROTOTYPE

Kürşad AKBAYIR

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Electrical Electronics Engineering

53+X pages

2022

Supervisor: Prof. Dr. Müslüm ARKAN

Induction motors are the most widely used electric motors in the industry due to their robustness, simplicity and cheapness. For this reason, induction motor failures cause costly consequences such as production stoppage, loss of workforce and decrease in efficiency. One of the most common faults seen in induction motors is short circuit faults between stator turn-to-turn. The classical method used in the diagnosis of these faults, which are very difficult to notice at the beginning stage, is the Motor Current Signature Analysis (MCSA) method. However, this method can give misleading results in variable load situations and supply source irregularities.

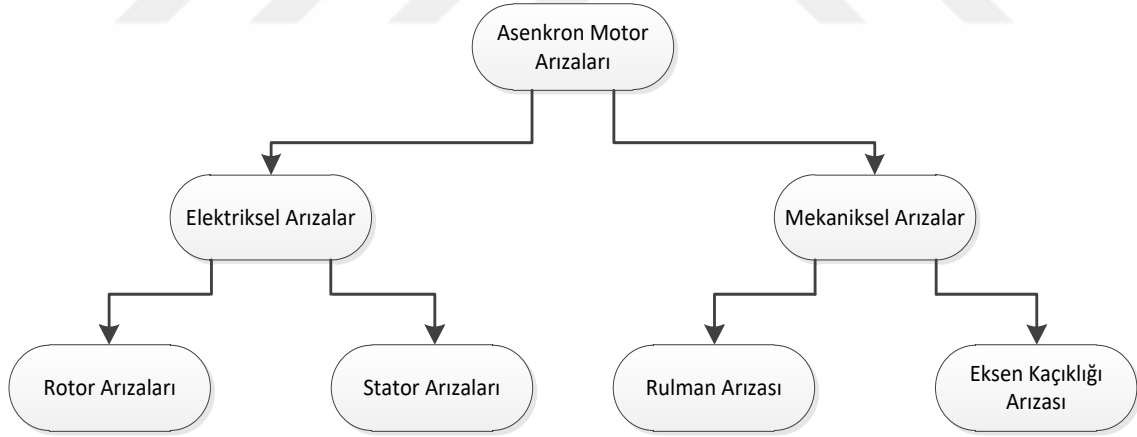
In this study, the fault diagnosis method based on the analysis of the leakage flux leaking from the body of the induction motor is emphasized, and a prototype is designed that can detect the stator fault at the initial stage by analyzing the leakage flux. For this purpose, an induction motor model was designed in the ANSYS@Maxwell-2D program using the Finite Element Method-FEM, various failure rates were applied, the leakage flux information collected by operating at different operating loads was analyzed and algorithms that could be used in fault diagnosis were obtained. In the analysis phase, the frequency spectrums of the signals were obtained by applying Fast Fourier Transform (FFT) to the leakage flux signals in the time domain in the Matlab program. By comparing healthy and faulty motor harmonics in the frequency domain, characteristic fault signatures that can be used are determined. In the last stage of the study, a prototype was designed that can detect the short circuit fault between the stator turn-to-turn in real time by measuring the leakage flux. The DSP-based STM32F429 microcontroller card is used for this process. The software based on the algorithm obtained as a result of the simulation, has been loaded on the microcontroller board, and the feasibility of a prototype that could diagnose stator failure with the leakage flux method was demonstrated.

Keywords: Induction motor, Stator failure, Leakage flux method, Real-time fault detection

1. GİRİŞ

Asenkron motorlar, basit yapılı, sağlam ve ucuz olmaları nedeniyle endüstride en çok tercih edilen elektrik motorlarıdır. Asenkron motorlar tüm elektrik motorlarının yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır [1,2]. Bu nedenle asenkron motor arızaları endüstride üretimin durmasına, verimin azalmasına, işgücü kayıplarının oluşmasına yol açmaktadır. Bu kayıpları en aza indirebilmek için asenkron motor arızalarına erken safhada müdahale edebilmek çok önemlidir.

Asenkron motor arızaları, elektriksel ve mekaniksel arızalar olmak üzere temel iki sınıfa ayrılırlar (Şekil 1.1). Mekaniksel arızalar rulman arızaları, eksen kaçıklığı gibi motorun mekanik aksamıyla ilgili arızalar olup, elektriksel arızalar ise kırık rotor çubuğu, stator sargılar arası kısa devreler gibi motorun elektriksel yapısında oluşan arızalardır. Stator arızaları rulman arızalarından sonra en çok görülen asenkron motor arızalarıdır. Bu arızalar tüm arızaların yaklaşık % (30-40)'ını oluşturmaktadır [3-5].



Şekil 1.1: Asenkron motor arızaları

Asenkron motor arızaları başlangıçta anlaşılması zor olan küçük belirtilerle başlamakta, fark edilemediğinde ise geri dönüşü olmayan daha büyük arızalara dönüşmektedir. Başlangıç aşamasındaki bu tip küçük arızaların belirtileri aslında motorun bazı parametrelerinde görülebilmektedir. Asenkron motorlarda meydana gelen arızanın

şiddetine ve türüne göre besleme geriliminde dengesizlik, hızda ve momentte salınım ve aşırı ısınma gibi belirtiler görülebilir. Araştırmacılar tarafından bu belirtiler kullanılarak geliştirilmiş çeşitli arıza tespit metotları vardır. Başlıca arıza teşhis analiz yöntemleri;

- Sıcaklık Analizi
- Titreşim Analizi
- Elektriksel Analiz'dir.

Motorda oluşan herhangi bir arıza, sıcaklık artışı olarak belirti verebilir. Sıcaklık sensörleri motor üretim aşamasında sargılara monte edilir [6,7]. Yüzey sıcaklığı ölçebilen termal kameralar da motor arıza durum izleme amaçlı kullanılabilir [2].

Titreşim analizi mekanik ve elektriksel arızaları tespit edebilen en klasik yöntemlerden biridir. Asenkron motorda oluşacak herhangi bir arıza durumu motorun momentinde ve hızında salınımlara yol açar, bu da kendisini motorun gövdesinde oluşan titreşim olarak gösterir. Titreşimlerin ölçülmesi için ek titreşim sensörleri kullanılır. Titreşim analizi motor arızalarında kullanılan etkili bir yöntemdir ancak sensörlerinin pahalı olması kısıtlı bir kullanım alanı olmasına neden olan bir dezavantajdır [8].

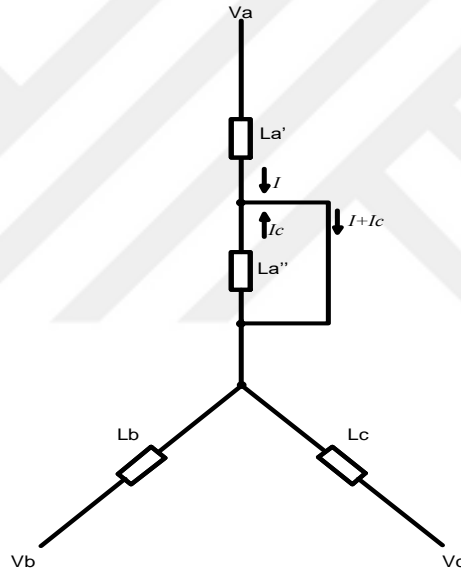
Stator akımlarının izlenmesi ve manyetik akı izlenimi gibi birçok elektriksel analiz yöntemi vardır. Asenkron motorda oluşan mekaniksel veya elektriksel bir arıza durumunda, motorun akımında, geriliminde ve manyetik akısında arızaya işaret eden karakteristik sinyaller oluşur. En çok kullanılan elektrik analiz yöntemi stator akım analiz yöntemidir. Motorda oluşan arızayı zaman domeninde inceleyerek teşhis etmek oldukça zordur. Bu nedenle zaman domeninde ölçülen verilere Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanarak elde edilen frekans spektrumunda inceleme yapılır. Motor akım imza analizi (MCSA) adı verilen bu yöntemin dezavantajları besleme kaynağında var olan harmoniklerden, dinamik ve statik yük durumlarından etkilenmesidir. Sensörlerinin ucuz olması ve non-invazif olması ise avantajlarıdır.

1.1 Stator Arızaları

Bu arızalar genelde başlangıç aşamasında birkaç sarımın kısa devresi ile başlamakta, zamanla kısa devre nedeniyle akan yüksek akımın etkisiyle ısının artmasına, bu da sarımlar arası yalıtımı sağlayan yalıtkan maddenin aşınmasına ve motoru tamamen kullanılmaz hale getirebilecek büyük arızalara yol açmaktadır. Böyle bir arıza durumu üretimin durmasına,

işgücü kaybına, motor tamir maliyetinin artmasına, iş sağlığı sorunlarına ve zaman kayıplarına neden olmaktadır.

Ayrıca stator sarım arızaları elektrik motorunun hem enerji tüketimini arttırmakta , hem de verimini hızlı bir şekilde düşürmektedir. Arıza durumunda stator akımının tersi yönünde bir dolaşım akımı oluşur (Şekil 1.2). Bu da ters elektromotor kuvvete neden olmaktadır. Stator kısa devre arızalarında toplam elektromotor kuvvet sarım sayısının düşmesinden ve ters yönlü bir elektromotor kuvvet oluşmasından dolayı azalmaktadır [9, 10]. Toplam elektromotor kuvvetteki bu değişim motorun manyetik alan dağılımında bir dengesizlik oluşturarak motor manyetik simetrisini bozmaktadır. Stator arızası dengesiz stator akımlarına ve harmonik oluşumlarına, aşırı ısınmaya, motor momentinde ve hızda salınımına ve dolayısıyla motorda gürültü ve titreşime sebep olmaktadır [11,12].



Şekil 1.2: Asenkron motor stator sarım-sarım arası kısa devre arızası

Stator kısa devre arızasının nedeni olan stator sarımları arası yalıtım bozulmasına etki eden faktörleri 4 ana grupta toplayabiliriz.

Isıl nedenler: Elektrik motorlarının ortam sıcaklıklarındaki artışlar ısıl yaşlanmayı da artırmaktadır. Sıcaklıktaki her 10 °C artış yalıtım ömrünü yarıya indirir. Sıcaklığın ısıl yaşlanma üzerindeki etkisini en aza indirebilmek için çalışma sıcaklığını düşürme ve kullanılan yalıtım malzeme sınıfını artırma yaklaşımları kullanılabilir [13]. Başlatma sırasında stator akımları normal akımından 5 veya 8 kat fazladır. Bu yüzden tekrarlanan başlatmalar stator sarım sıcaklığını hızla artırır [14].

Elektriksel Nedenler: Değişken frekanslı sürücüler, devre kesicilerin, akım sınırlayıcı sigortaların açılıp kapanması, kapasitör anahtarlama, üç fazlı arızalar, hattan hatta, hattan toprağa, çok fazlı hattan toprağa arızalar [14].

Mekaniksel Nedenler: Stator sargı hareketi ve rotorun dönme esnasında statora sürtünmesi gibi etkiler [13].

Çevresel Etkiler: Nem, ortam sıcaklığı artışı ve yeterli havalandırma yapılamaması gibi etmenlerde asenkron motorlarda stator arızalarına neden olmaktadır [13].

1.2 Tezin Amacı

Asenkron motorlarda en sık görülen elektrik arızası olan stator sarım-sarım arası kısa devre arızalarını tespit edebilmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin kendilerine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Bu tezin amacı klasik arıza teşhis yöntemlerine alternatif olacak kaçak akı yöntemini kullanarak stator sarım-sarım arası kısa devre arıza çıkarımı yapabilen bir algoritma ve DSP mikrodenetleyici kart, akı sensörleri ve kablosuz haberleşme modülüne sahip olan bir prototip geliştirmektir. Bu amaçla ilk önce çeşitli oranlarda stator sarım-sarım arası kısa devre arızasına sahip olan asenkron motorlar ANSYS@maxwell paket programı yardımıyla modellenmiş ve değişken yüklerde çalıştırılarak çeşitli noktalardan kaçak akı ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar sağlıklı durum ile karşılaştırılarak karakteristik arıza işaretleri belirlenmiştir. Matlab programı yardımıyla zaman domeninde elde edilen işaretlere FFT işlemi uygulanmış ve frekans spektrumu analizi yapılmıştır. STM32F429 mikrodenetleyici kartı kullanılarak bir stator sarım-sarım arası kısa devre arızası teşhisinde kullanılacak bir prototip tasarlanmıştır. Kaçak akı ölçümleri için DRV flux gate sensörleri kullanılmış, kaçak akı ölçümünü, FFT işlemini ve arıza çıkarım sonuçlarını yapabilen kodlar yazılarak söz konusu karta yüklenmiştir.

1.3 Tez İçeriği

Bu tez 6 bölümden oluşmuştur. Bölüm 2' de asenkron motor stator sarım-sarım arası kısa devre arızalarının teşhisi için yapılan literatür çalışmaları anlatılmıştır.

Bölüm 3'de bir asenkron motor ve stator sarım-sarım arası kısa devre arızasının ANSYS@maxwell programıyla nasıl modellendiği, kaçak akı ölçümlerinin nasıl yapıldığı anlatılmıştır.

Bölüm 4’de benzetim sonuçları analiz edilerek kaçak akı yardımıyla arıza teşhisinde kullanılacak karakteristik işaretler aranmıştır.

Bölüm 5’de kaçak akı sensörleri kullanan bir STM32F429 DSP tabanlı bir mikrodenetleyicinin arıza tespitinde kullanılmak üzere tasarlanan prototip tanıtılmıştır.

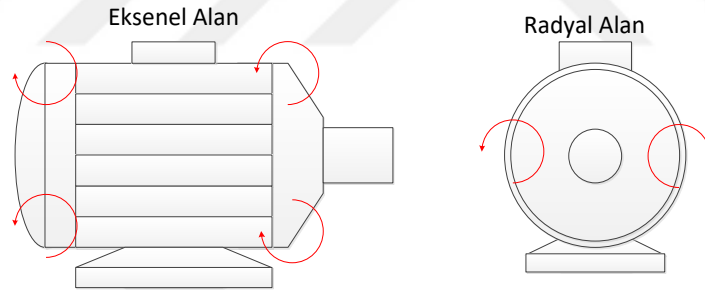
Bölüm 6’da yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.



2. KAÇAK AKI KULLANILARAK YAPILAN STATOR ARIZA TESPİT ÇALIŞMALARI

Kaçak akı stator ve rotor akımlarından oluşan manyetik akının motorun dışına sızması ile oluşur ve harici manyetik alan olarak adlandırılır. Harici manyetik alan eksenel ve radyal bileşenlerden oluşur. Eksenel akı alanı sargı sonlarında akan akımdan meydana gelen manyetik alandır. Radyal akı alanı ise motorun hava boşluğu (Air-gap) manyetik alanının stator demiri tarafından zayıflatılmış halidir. Sensörün konumuna bağlı olarak ölçülen bu alanlar aynı kaynaktan gelmemekte ve aynı fiziksel durumdan kaynaklanmamaktadır [15].

İdeal bir elektrik makinesindeki eksenel akı sifıra eşit olmalıdır. Ancak gerçekte bu durum asla gerçekleşmez. Rotor ve stator devrelerinde her zaman ufak asimetrikler oluşur. Üretim aşamasında yapılan ufak hatalar ve kullanılan malzemenin homojen olmaması buna neden olur [16,17]. Eksenel akının ölçümleri non-invazif (non-invasive) (bir makine gövdesine dağıtılan bobinler kullanılarak) veya invazif (invasive) (bir makinenin içine yerleştirilmiş bir bobin kullanılarak) olabilir [16].

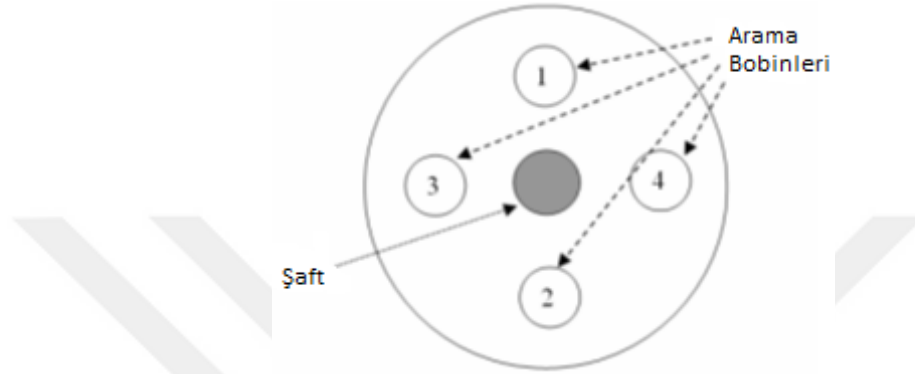


Şekil 2.1: Harici manyetik alan ölçümü

Stator sarım-sarım arası kısa devre arızasında kaçak akı tekniğinin bazı avantajları vardır. Bunlar;

- Sadece arızayı değil oluştuğu yeri de gösterebilir.
- Mevcut üretilmiş motorlarda da kullanımı mümkündür.
- Besleme kaynağındaki harmoniklerden etkilenmediğinden klasik MCSA yönteminden daha güvenilirdir.
- Günümüzde bu amaçla kullanılacak küçük ve ucuz sensörler mevcuttur.

Kaçak akının stator arıza teşhisinde kullanılabileceğini ilk olarak Penman et al. göstermiştir. Bu çalışmada makinanın miliyle eşmerkezli yerleştirilen bir bobin sayesinde makinanın aksenal akı bileşenlerini analiz ederek sarımlar arası arıza tespit edilmiştir. Motor mili ve stator uç sargılarının arasındaki mesafenin yaklaşık yarısı kadar bir mesafeye simetrik olarak konumlu 4 adet bobin yerleştirerek arızanın yeri de tespit edilmiştir [11,18].



Şekil 2.2: Arama bobinlerinin konumları (Penman, 1994)

Asenkron motorun aksenal kaçak akısını ölçmek üzere konumlandırılmış bir arama bobininden (search coil-SC) indüklenen gerilim işareti bir bilgisayara aktarılarak stator kısa devre arızalarının bulunabileceği deneysel olarak gösterilmiştir [19,20]. Bir diğer deneysel çalışmada aksenal harici manyetik akının frekans spektrumunda stator arıza durumunda 3. harmonikte arıza işareti görülmüştür [21].

Referans [22] 'de tek bir rogowski arama bobini kullanılarak stator sarım hataları tespit edilmiş ve bu yöntemin MCSA'dan daha etkili bir yöntem olduğu gösterilmiştir. Yine aynı sensör kullanılarak yapılan bir başka çalışmada ise harici kaçak akı ölçümü ile stator ve kırık rotor çubuğu arızaları tespit edilmiştir [23].

Arıza tespitinde kullanılmak üzere kaçak akı ölçümü için çeşitli sensörler ve ölçüm şekillerinin tasarlandığı çalışmalarda mevcuttur. Bu çalışmalardan birinde yeni bir kaçak akı sensörü tasarlanmıştır. Asenkron motorun arka uç plakası iç tarafına yerleştirilen iki adet dahili akı sensörü yardımıyla aksenal yönde ölçülen orbital akı bilgisinden stator sarım-sarım arası kısa devre arızası teşhisi yapılmıştır [24]. Arama bobini kullanılan bir başka çalışmada ise x,y,z yönlerinde aynı anda ölçüm yapabilen bir harici akı sensörü kullanılmış ve çeşitli yük değerlerinde stator kısa devre arızalarının tespit edilebileceği gösterilmiştir [25].

Motorun manyetik alan ölçümüne dayanan birçok stator arızası tespit çalışmaları vardır. Bunlardan biride moturun hava boşluğu akısını analiz etme yöntemidir. Motorun hava boşluğu akısı Alan Etkili (Hall Effect) sensörler aracılığıyla ölçülebilir. Asenkron motorun tüm slotlarına yerleştirilen hall efekt sensörleriyle hava boşluğu akısı ölçümü ile arıza teşhisinin yanı sıra arızanın yerinin ve şiddetinin de tespit edilebileceği gösterilmiştir. İnvazif bir yöntem olmasına karşın arama bobini kullanılan yöntemlere göre daha başarılı sinyal gürültü oranı vermesi tercih sebebi olarak görülmektedir. Bu yöntemin hem stator kısa devre arızalarında hem de kırık rotor çubuğu arızalarının teşhisinde kullanılabileceği gösterilmiştir [26]. Bir başka çalışmada hava boşluğuna yerleştirilen hall effect sensörleri kullanılmış ve stator kısa devre arızaları ile eksantriklik arızalarını tespit eden ve ayırt edebilen bir durum izleme prototipi hazırlanmıştır [27]. Kaçak akı ölçümünü invazif olarak ölçmeyi tercih eden bir başka çalışmada stator slotları arasına yerleştirilebilen özel bir search coil tasarlanmış ve kırık rotor çubuğu arızası ile stator kısa devre arızası teşhisinde kullanılabileceği gösterilmiştir [28].

Referans [29]'da arıza tespit çalışmalarına yeni bir teknik ile katılmıştır. Bu çalışmada dahili gözlemci bobin (observer coil - OC) kullanılarak ölçülen radyal akının arıza tespitinde harici akı sensörlerinden daha verimli olduğu ileri sürülmüştür. Gözlemci bobinler stator slotlarına yerleştirilmiştir. Arıza durumunda endüklenen voltajın etkin değerinde (Root Mean Square - RMS), ana harmonik, 3. harmonik ve toplam harmonik bozulmalarından takip edilebileceği gösterilmiştir. Yine gözlemci bobin kullanan farklı bir çalışmada stator bobinleri ile eş merkezli ve dahili olarak yerleştirilen bobinler sayesinde hava aralığı akısı bozulmadan ölçülen radyal akı bilgisinden stator sarım-sarım arası kısa devre arızalarının teşhisinin yapılabileceği gösterilmiştir [30]. Yine statora yerleştirilen gözlemci bobinler tarafından ölçülen manyetik akı yardımıyla stator sarım-sarım arası kısa devre arızalarının tespitinin yapılabildiği ve arızanın yerinin tespit edilebileceği gösterilmiştir [31].

Kaçak akı ölçümüne dayanan bir başka yöntem de ise motor etrafına birbirlerine göre 180 derece açıyla yerleştirilmiş iki akı sensöründen yararlanılmaktadır. Motorun yüklü ve yüksüz çalışma durumlarında belirli harmoniklerin artış yönüne göre arıza tespiti yapılmaktadır [32-36]. Benzer bir çalışmada Pearson korelasyon katsayısı adı verilen bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde birbirlerine 180 derece açıyla yerleştirilmiş iki adet arama bobininin ölçtüğü harici manyetik alan değerleri kullanılır. Bu yöntemde motorun sağlıklı durum bilgisine ihtiyaç duyulmaz [37, 38].

Asenkron motor arızaları tespit çalışmalarında kaçak akıyı ölçebilmek için birçok sensör çeşidi kullanılmıştır. Bunlardan biride fluxgate sensörüdür. Referans [39] kırık rotor çubuğu arızalarının tespitinde motor etrafında oluşan harici kaçak akıyı fluxgate sensörü ile ölçülmüştür. Elektrik motor arızalarında fluxgate sensörü kullanılan birçok çalışma vardır [40].



3. ASENKRON MOTORUN VE STATOR SARIM-SARIM ARASI KISA DEVRE ARIZASININ MODELLENMESİ

Asenkron motor stator sarım-sarım arası kısa devre arızalarında, motorun arızalara verdiği karakteristik parametreleri analiz edebilmek amacıyla Sonlu Elemanlar Yöntemini (Finite Element Method-FEM) kullanan ANSYS@Maxwel-2D simülasyon programı kullanılmıştır. Bu amaçla parametreleri bilinen bir sincap kafesli asenkron motor program aracılığıyla modellenmiş ve ardından sağlıklı durum ile karşılaştırmalar yapabilmek amacıyla çeşitli büyüklüklerde stator sarım-sarım arası kısa devre arızaları oluşturulmuştur.

Elde edilen sağlıklı ve arızalı motor modelleri çeşitli yüklerde çalıştırılarak kaçak akı ve stator akımı gibi değişkenlere ait veriler toplanmıştır. Toplanan bu verilere Matlab programı aracılığıyla FFT işlemi uygulanmış ve frekans spektrumunda karakteristik arıza işaretleri belirlenmiştir.

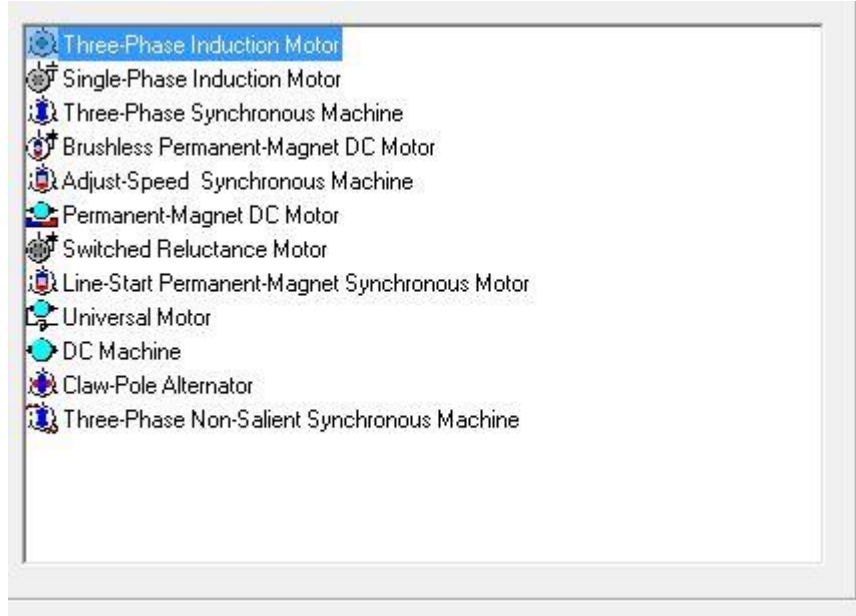
3.1 Asenkron Motorun Modellenmesi

Bu simülasyon çalışmasında Çizelge 3.1’de parametreleri verilen asenkron motor programa tanıtılmıştır. ANSYS@Maxwell programında elektrik makinalarının simülasyonu için ANSYS@RMxprt modülü kullanılmaktadır. ANSYS@RMxprt modülünde ilk olarak ne tip bir elektrik makinasının tanımlanacağı belirtilir. Şekil 3.1’deki arayüzden “Three-Phase Induction Motor” seçeneği seçilmedir. Sırasıyla Şekil 3.2’de görüldüğü gibi üç fazlı asenkron motorun fiziksel ve elektriksel bilgileri girilmelidir. Şekil 3.3’de parametreleri girilen asenkron motorun RMxprt modülünde görünümü verilmiştir. Statora ait sargı düzeni de girildikten sonra motorumuzun modellenmesi bitmiş olur.

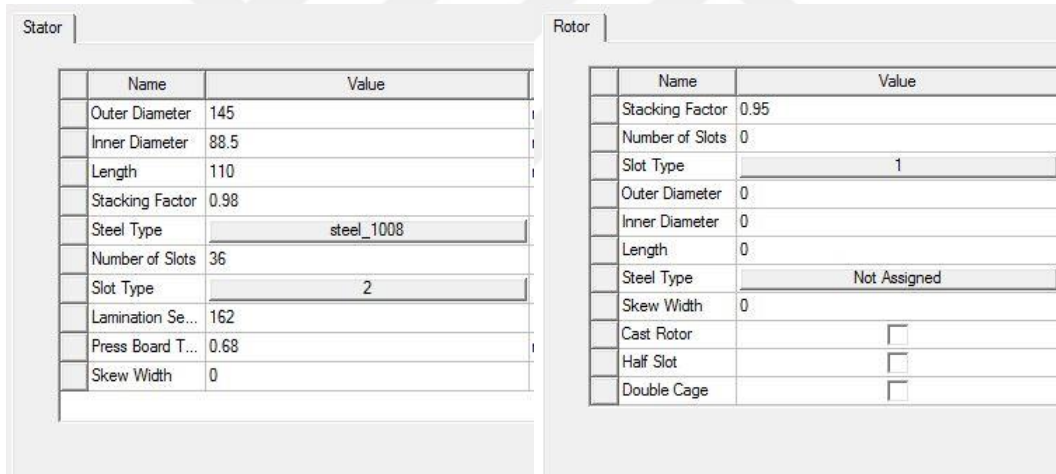
ANSYS@RMxprt modülü aracılığıyla parametre girişleri tamamlanan modellemenin ikinci aşaması ise motorun analizinin yapılmasıdır. Bu analiz işleminin sonucu bize tanımlanan motora ait performans ve tasarım bilgilerini verir.

Çizelge 3.1: Motor parametreleri.

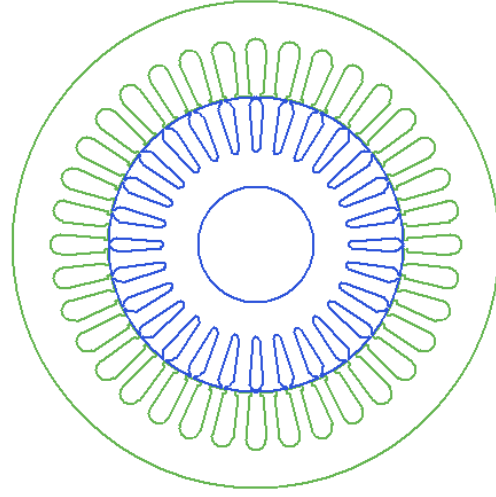
Nominal Gerilim, V	380
Nominal Akım, A	4,7
Nominal Güç, kW	2.2
Nominal Hız, d/dk	1420
Kutup Sayısı	4
Stator Slot / Rotor Çubuk Sayısı	36/28
Faz / Slot Başı Sarım Sayısı	252/42
Tam Yük Momenti, Nm	15
Stator Dış Çap, mm	145
Stator İç Çap, mm	88.5
Rotor Dış Çap, mm	88
Rotor İç Çap, mm	35
Stator Uzunluğu, mm	110
Besleme Frekansı, Hz	50



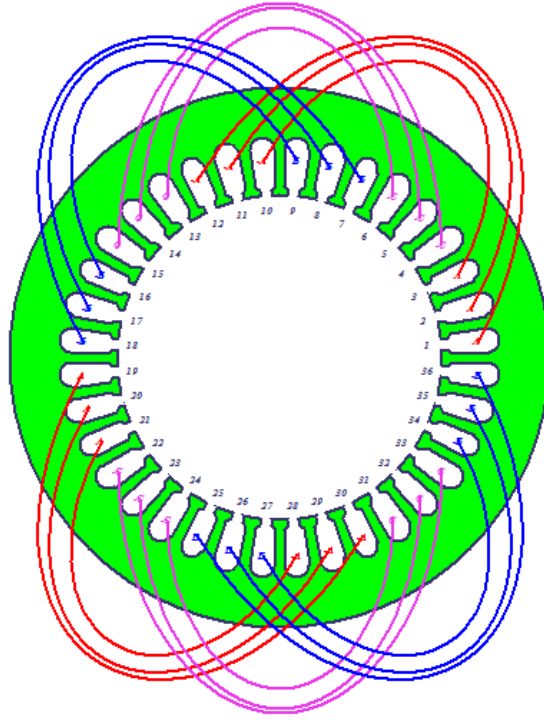
Şekil 3.1: Makina tipinin belirlenmesi



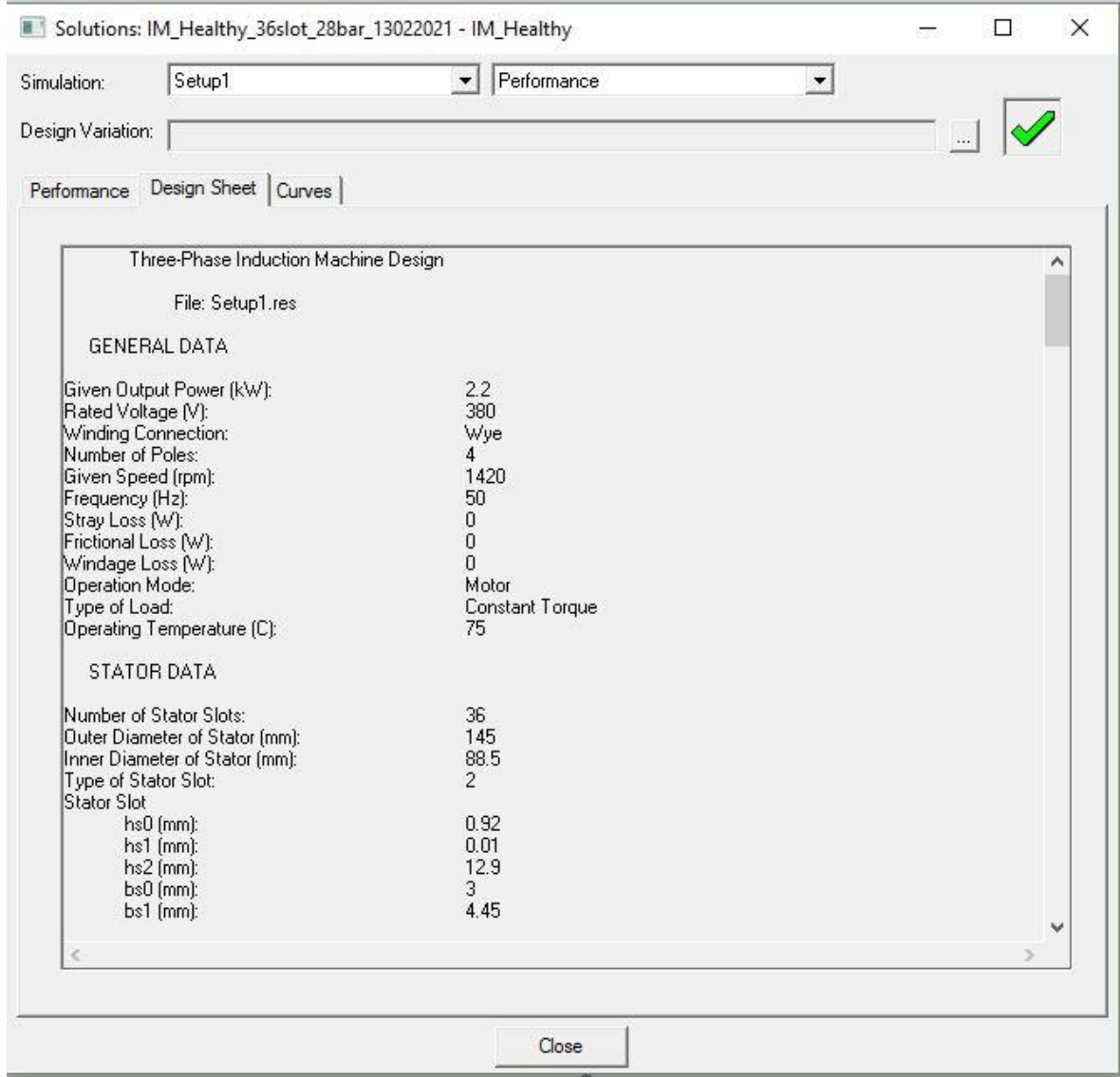
Şekil 3.2: Asenkron motor parametrelerinin girilmesi



Şekil 3.3: Parametreleri girilen asenkron motor RMXprt görünümü

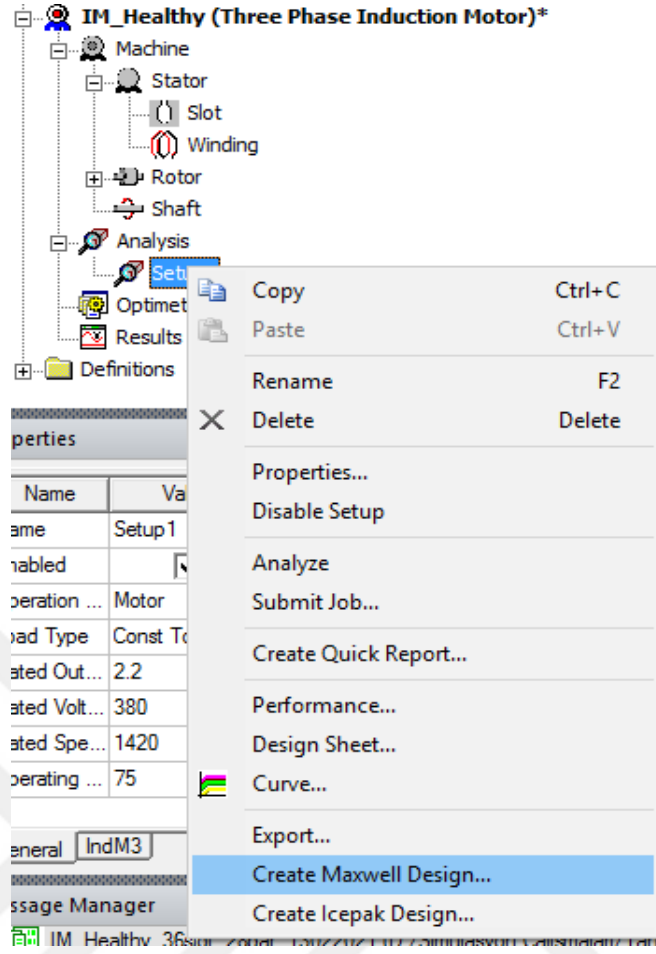


Şekil 3.4: Asenkron motorun stator sargı düzeni

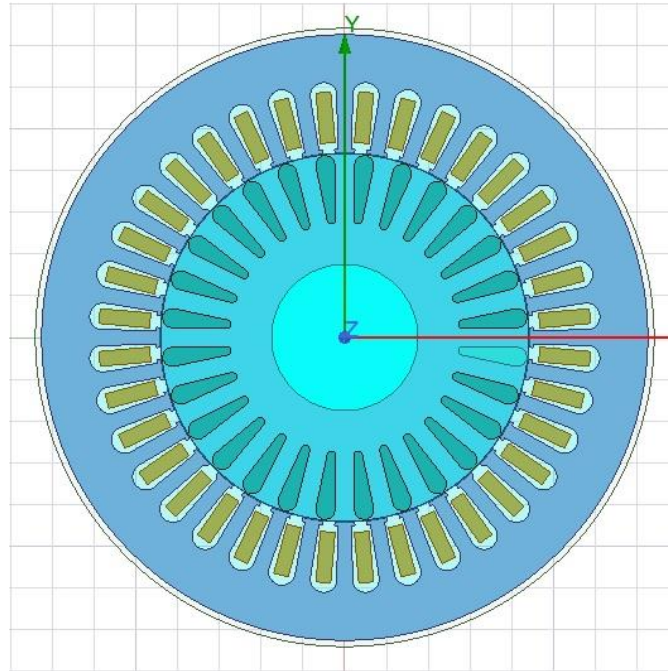


Şekil 3.5: Motor performans ve tasarım bilgilerini veren analiz sonuçları

ANSYS@RMxprt modülünde tasarımı tamamlanan asenkron motorun sağlıklı ve arızalı durumlarındaki kaçak akı ve stator akımı davranışlarını iki boyutlu ortamda inceleyebilmek amacıyla ANSYS@Maxwell-2D modülüne aktarmamız gereklidir. Bu modül aracılığıyla tanımlı motorun iki boyutlu analizleri elde edilebilecek ve bu sayede motorun istenilen noktalarındaki kaçak akılar takip edilebilecek, sonrasında çeşitli stator sarım-sarım arası kısa devre arızaları oluşturularak stator akımı ve tanımlı noktalardaki kaçak akılar ölçülebilecektir.

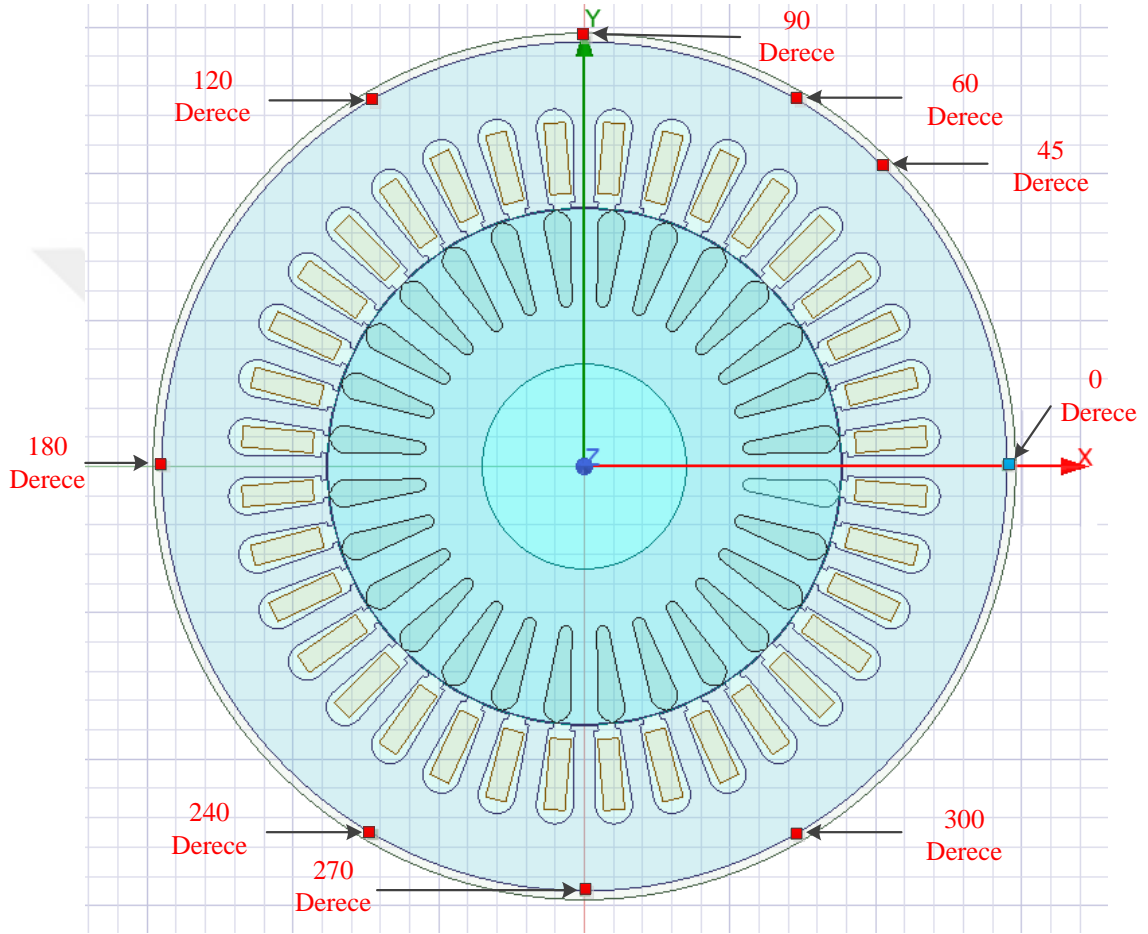


Şekil 3.6: Modelin ANSYS@Maxwell-2D modülüne aktarımı

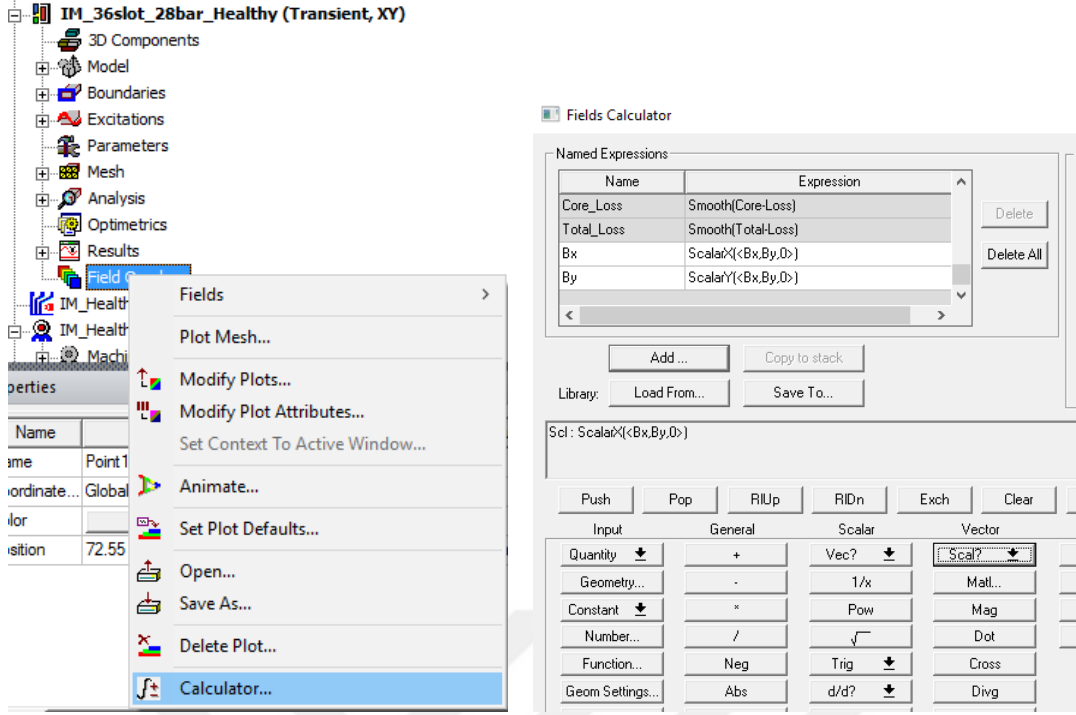


Şekil 3.7: Asenkron motorun ANSYS@Maxwell-2D görünümü

Bu aşamada artık kaçak akı ölçümü yapılan noktaların programa tanıtılması gereklidir. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda motorun eksenini boyunca sırasıyla 0° , 45° , 60° , 90° , 120° , 180° , 240° , 270° ve 300° açılarında birer kaçak akı ölçüm noktası modele eklenmiştir. Motorun çevresinde oluşan vektörel manyetik alanın x ve y ekseninde alacağı değerleri ölçebilmek amacıyla programın “*Fields Overlays > Calculator*” kısmından Şekil 3.9’daki gibi gerekli tanımlamaların yapılması gerekmektedir.

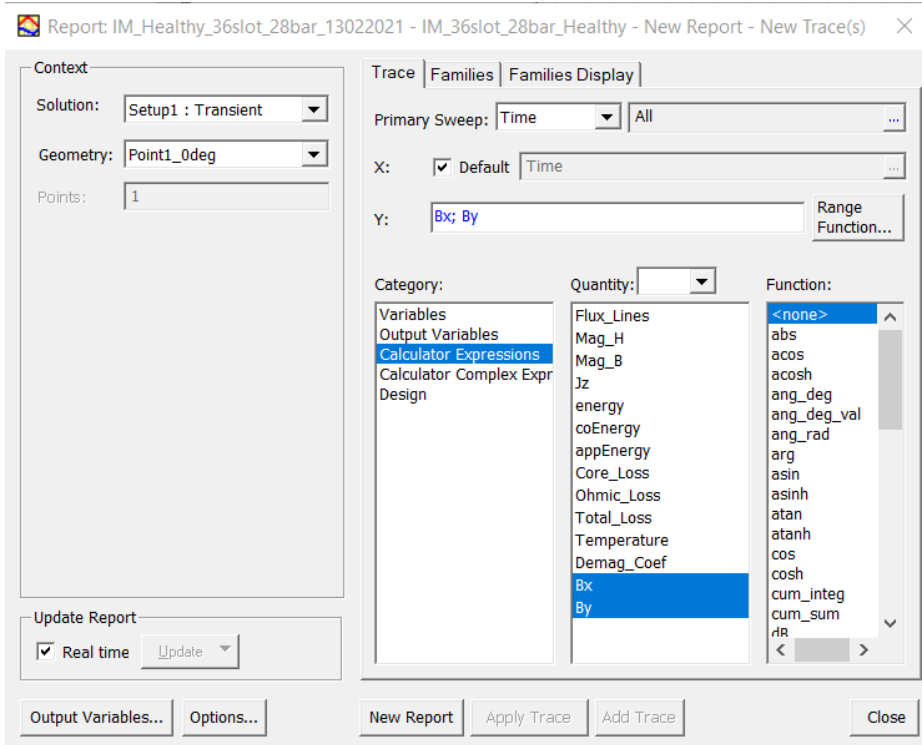


Şekil 3.8: Asenkron motorun ölçüm yapılacak kaçak akı noktaları



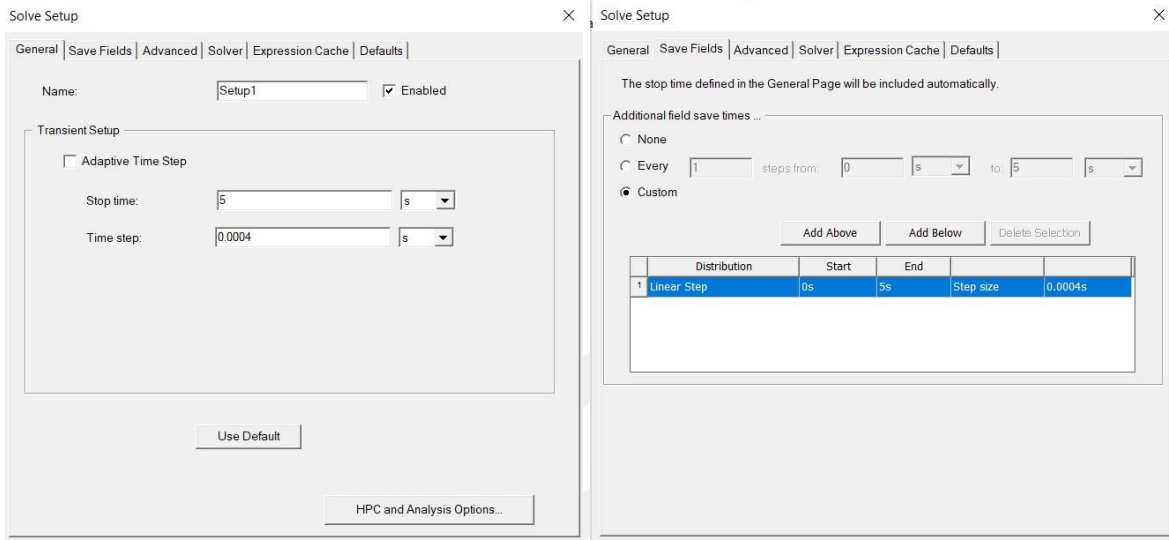
Şekil 3.9: Manyetik alan vektörlerinin tanımlanması

Skalar manyetik alan tanımlanmasının yapılmasının ardından artık istenilen noktalardaki B_x ve B_y değerlerinin değişimi takip edebilir. Raporlama kısmından tanımlı ölçüm noktalarımızdaki tanımlı skalar değişkenlerimizin raporlamasını oluşturabiliriz.



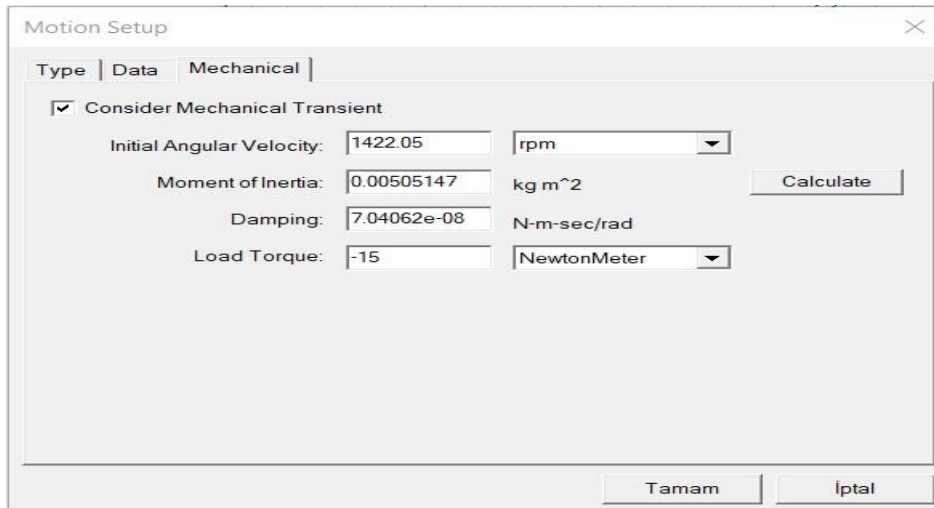
Şekil 3.10: Manyetik alan vektörlerinin tanımlanması

Artık sağlıklı bir asenkron motorda istenilen simülasyon yapılabilir. Simülasyonu başlatılmak için programın **“Analysis”** kısmından örnekleme zamanının ve ne kadar sürede örnekleme yapılacağını girilmesi gereklidir (Şekil 3.11). Tez kapsamında yapılan çalışmalarda 0,0004 saniye aralıklarda (2500 Hz) 5 saniye boyunca örneklemler alınması yeterli görülmüştür.



Şekil 3.11: Örnekleme zamanının ve örnekleme süresinin girilmesi

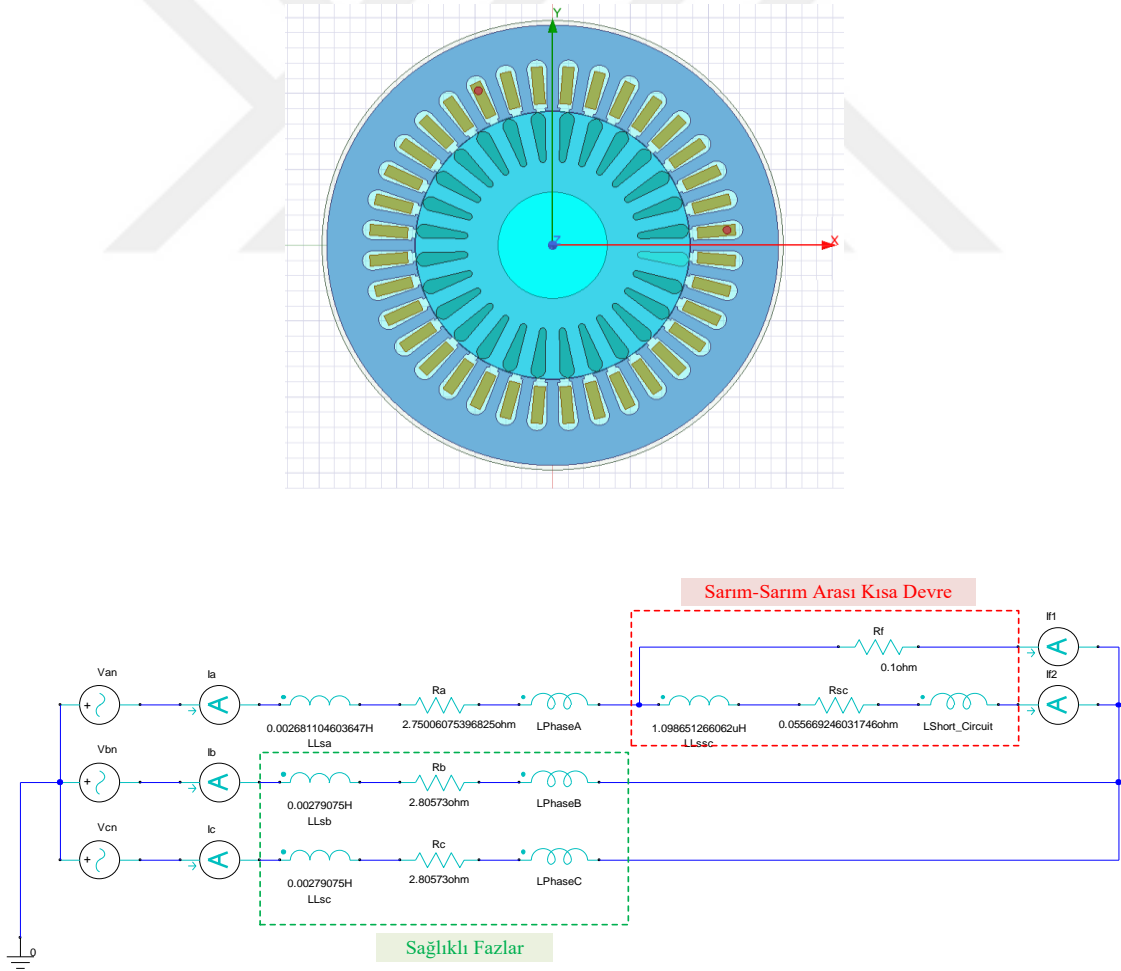
Simülasyon sonuçlarını farklı çalışma yüklerinde de inceleyebilmek amacıyla programın **“motion setup”** menüsünün **“Load Tourqe”** kısmında motorun çalışma tork değerinin değiştirilmesi gereklidir.



Şekil 3.12: Motorun çalışma yük değerinin ayarlanması

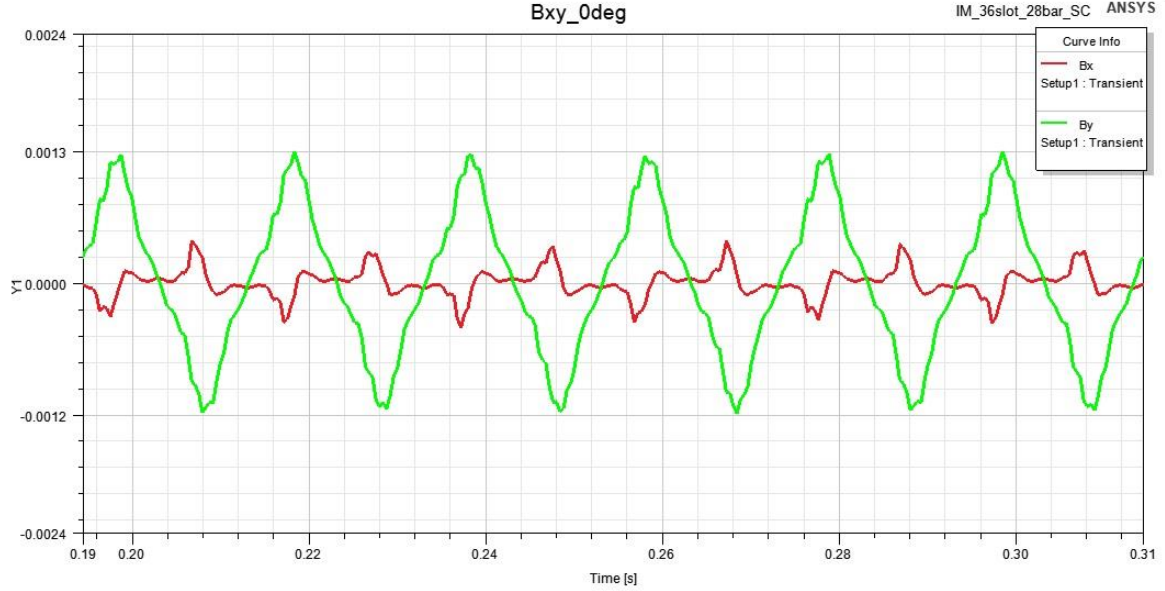
3.2 Stator Sarım-Sarım Arası Kısa Devre Arızasının Oluşturması

Bu bölümde sağlıklı olarak tanımladığımız ve simülasyonunu yaptığımız asenkron motorda bu kez stator sarım-sarım arası kısa devre arızası oluşturularak benzer simülasyon tekrarlanacaktır. Bunun için programın “*External Circuit Editor*” menüsüyle stator devresi faz beslemeleri harici kaynak olarak tanımlanmıştır. Kısa devre akımını sınırlamak için uygun bir direnç kullanılmıştır (R_f). Arızanın şiddetine göre arızalı sargıdan akacak kısa devre akımı bu direncin değeriyle ayarlanabilir [41]. Ardından statorun birinci slotunda olduğu varsayılan sarım-sarım arası kısa devre arızası için hesaplanan devre elemanı değerleri programa girilmiştir. A-fazındaki bu arızanın şiddetini ayarlamak için gerekli olan faz direnci ve endüktans değerleri ayrı ayrı programa girilmiştir. Böylelikle her bir slotta bulunan toplam 42 sarımdan 5, 10, 20 ve 42 sarım kısa devreler oluşturulmuş ve simülasyonları yapılmıştır.

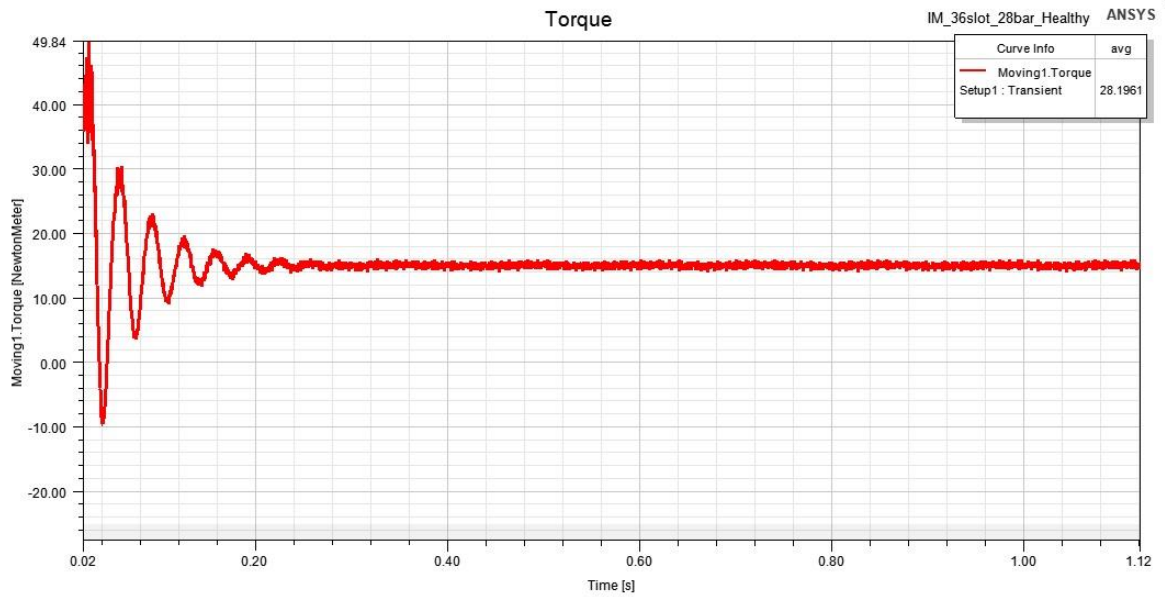


Şekil 3.13: Stator sarım-sarım kısa devre arızasının modellenmesi

Şekil 3.14 ve 3.15’de modellenen asenkron motorun ANSYS@Maxwell-2D simülasyon sonuçlarına ait bazı grafikler verilmiştir.



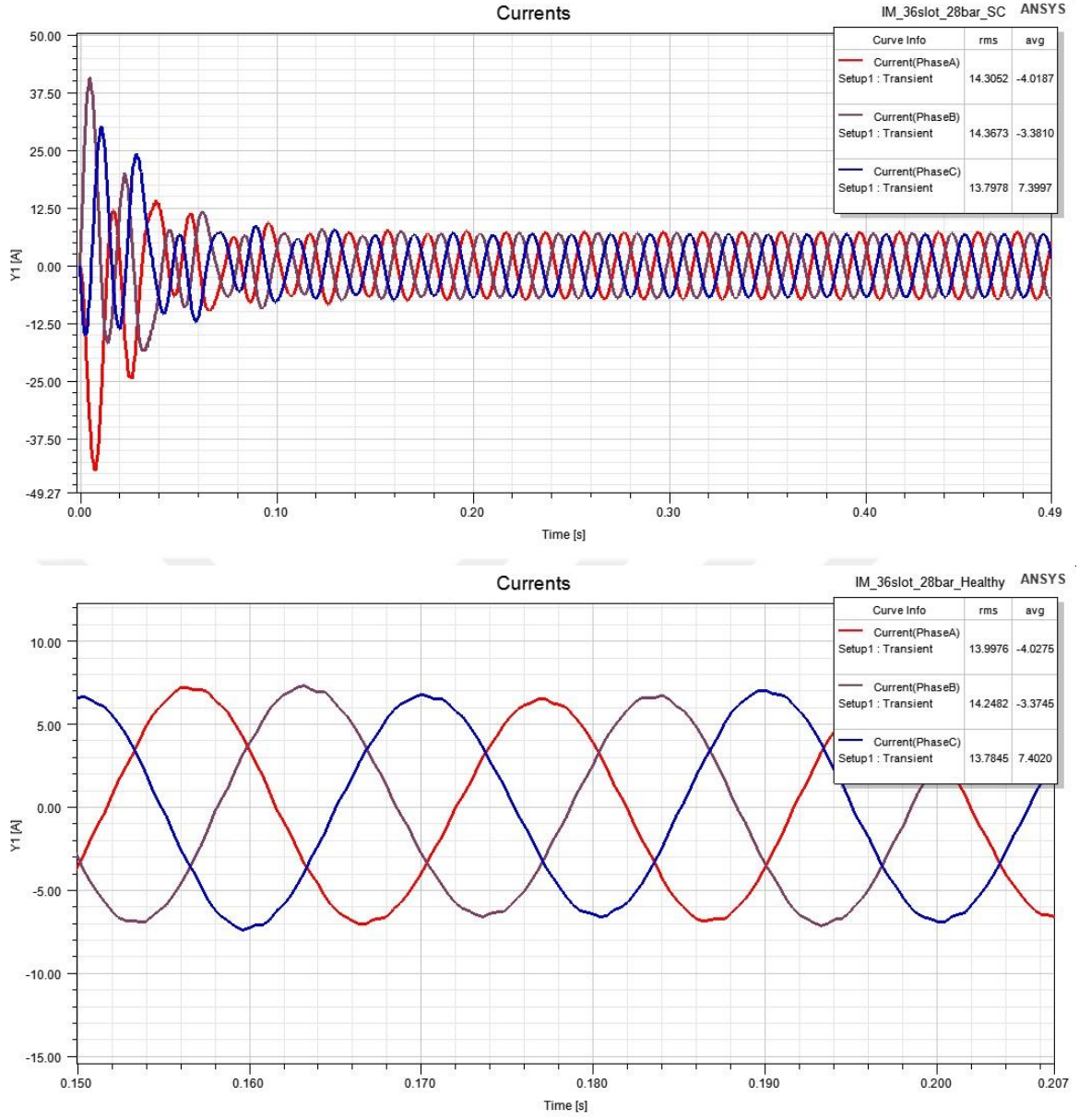
(a)



(b)

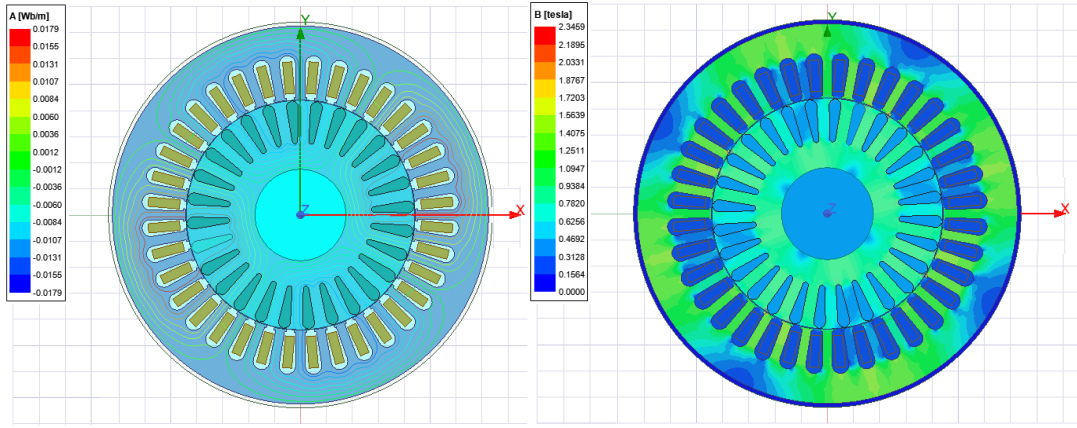
Şekil 3.14: Asenkron motorun ANSYS@Maxwell-2D simülasyon sonuç grafikleri

a) Kaçak akı-Zaman grafiği b) Moment-Zaman grafiği

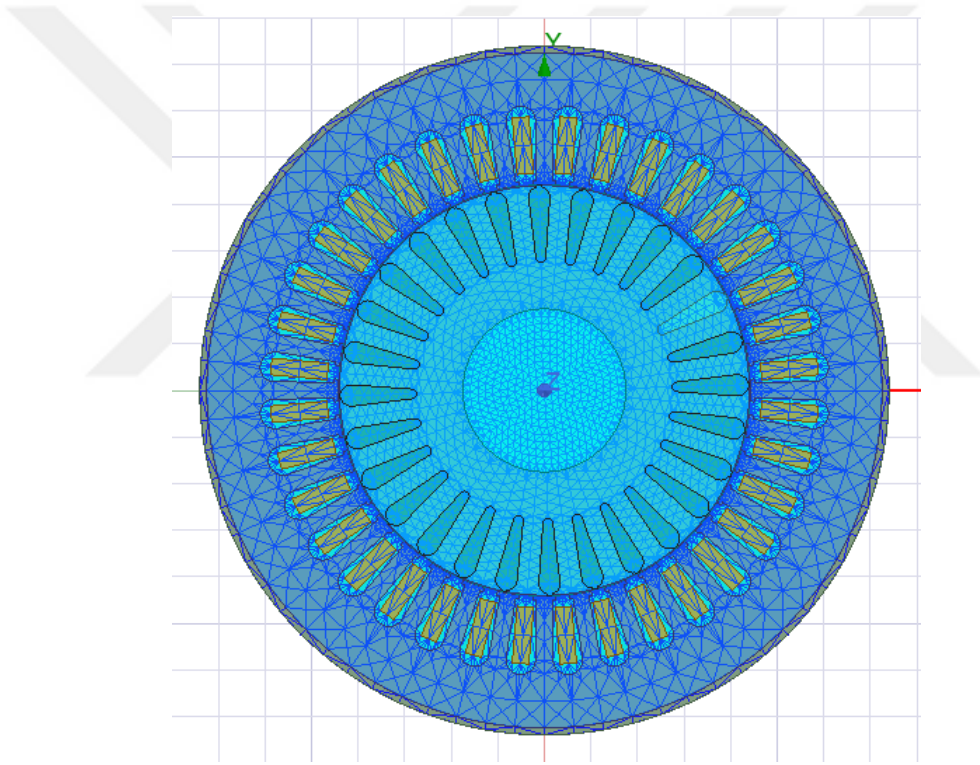


Şekil 3.15: Asenkron motorun ANSYS@Maxwell-2D simülasyon sonucu oluşan akım-zaman grafikleri

Modellenen asenkron motorun ANSYS@Maxwell-2D programından alınan manyetik akı dağılımı ve program tarafından otomatik olarak oluşturulan mesh Şekil 3.16 ve 3.17’de görülmektedir.



Şekil 3.16: Manyetik akı çizgileri ve manyetik akı yoğunluğu dağılımı



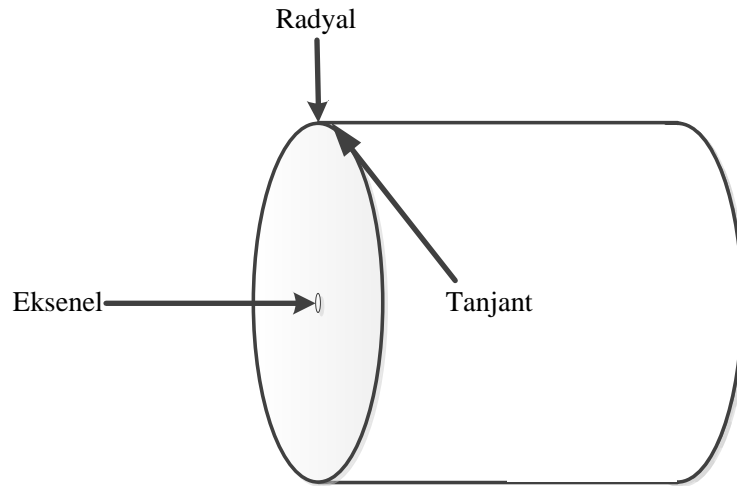
Şekil 3.17: ANSYS@Maxwell-2D programı mesh yapısı

4. BENZETİM SONUÇLARININ ANALİZİ

Asenkron motorlarda meydana gelen stator sarım-sarım arası kısa devre arızalarını kaçak akı yöntemiyle tespit edebilmek amacıyla gerekli olan algoritmayı çıkarabilmek için Bölüm 3’de ANSYS Maxwell programında bir asenkron motor modellenmiş, sağlıklı ve arızalı durumları farklı çalışma yüklerinde simüle edilmiştir. Sağlıklı ve arızalı durumda motor çeşitli yüklenme değerinde çalıştırılmış ve motorun akım, moment, indüklenen gerilim ve kaçak akı değerleri toplanmıştır. Kaçak akı analizi için motorun stator çevresine yerleştirilen birçok noktadan kaçak akı ölçüm verileri toplanmıştır. Bu bölümde elde edilen bu veriler analiz edilerek arıza durumunda meydana gelmesi beklenen karakteristik arıza işaretleri belirlenmiştir. Simülasyon çalışmalarımızda örnekleme frekansı olarak 2500 Hz kullanılmıştır. Asenkron motor 5 saniye simüle edilerek her bir kaçak akı noktası için 12500 adet sinyal verisi toplanmıştır. Motorun ilk kalkış anındaki geçici rejim durum verilerini kullanmamak için ilk 300 adet değer çıkartılmıştır. Elde edilen veri dizilerinin matematiksel analizi için Matlab programından yararlanılmıştır. İlk aşamada B_x ve B_y yönlerinden alınan verilerin motorun radyal ve tanjant yönlerinde bileşenlerini bulabilmek için işaretlere (4.1) ve (4.2) denklemleri uygulanarak yeni veri dizileri elde edilmiştir.

$$B_{radyal} = B_x \cdot \cos(\theta) + B_y \cdot \sin(\theta) \quad (4.1)$$

$$B_{Tanjant} = B_y \cdot \cos(\theta) - B_x \cdot \sin(\theta) \quad (4.2)$$

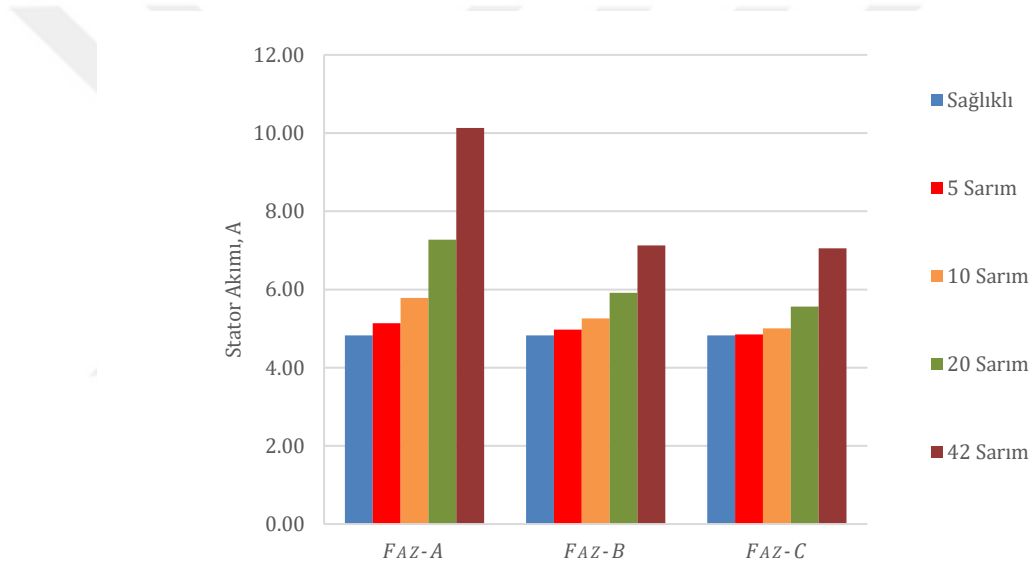


Şekil 4.1: Motor kaçak akı yönlerinin gösterimi

4.1 Stator Akımının Analizi

Asenkron motorlarda stator sarım-sarım arası kısa devre arızası durumunda motorun elektriksel ve mekaniksel yapısında oluşan asimetriden kaynaklanan stator akımı bozulmaları meydana gelir. Özellikle bu durum stator akımının frekans spektrumunda 3. harmonikte görülür [42].

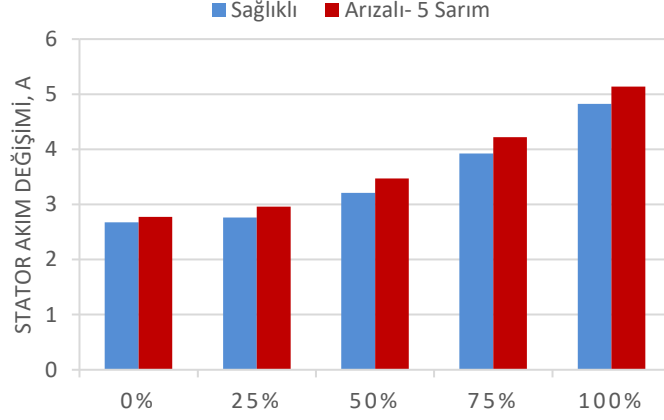
Stator sarım-sarım arası kısa devre arızasının stator akımlarına etkisini inceleyebilmek için öncelikle tam yükte (%100) çalışan bir motorda farklı şiddetlerde arızalar oluşturularak motor çalıştırılmıştır. Şekil 4.2’de sağlıklı ve farklı sayıda sarım kısa devre arızalı motorların %100 yük altında çalıştırılması ile elde edilen her üç faz akımının efektif değerlerindeki değişim gösterilmiştir.



Şekil 4.2: %100 yük altında çalışan bir asenkron motorun arıza büyüklüğü ile stator akım efektif değerlerinin karşılaştırılması

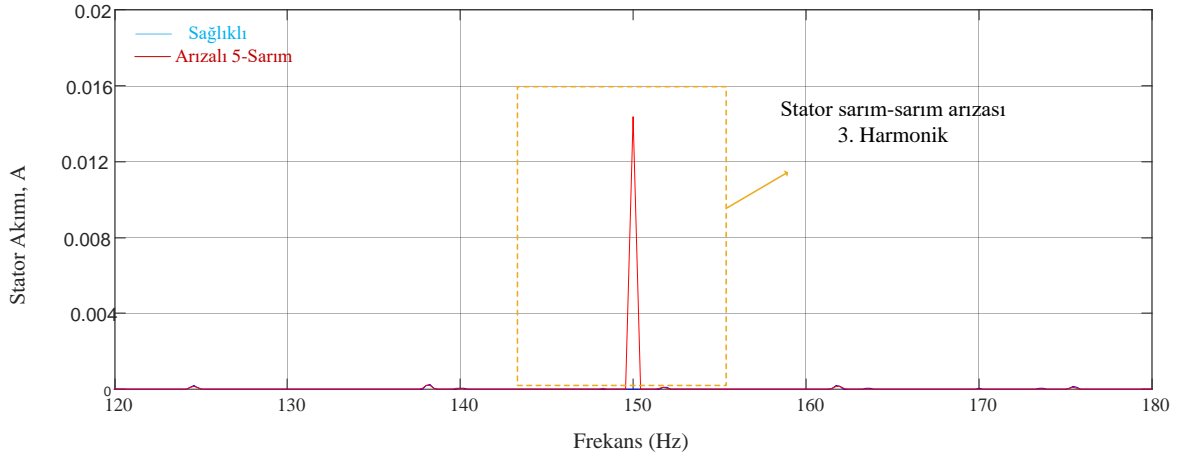
Şekilden de görüldüğü gibi her üç fazdan akan akımın efektif değerinin genliği arıza şiddeti ile orantılı olarak artmaktadır. Bununla birlikte arızanın gerçekleştiği A-fazındaki artış miktarı diğer iki fazdan açık bir şekilde daha fazladır.

Sabit arıza seviyesinde (5 sarım) motor farklı yüklenme koşullarında çalıştırılmış ve arızanın gerçekleştiği A-fazındaki akan akımın efektif genliğinin artışı Şekil 4.3’de incelenmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi yüklenme oranı arttıkça akan akımın efektif değeri de artmaktadır. Arıza şiddetinin ve çalışma yükünün artması ile statorda akan akımların efektif değerlerinde de artış olacağı görülmektedir. Bu artış sargılarda ısınmaya yol açacak ve yalıtımın aşınmasına neden olacaktır.



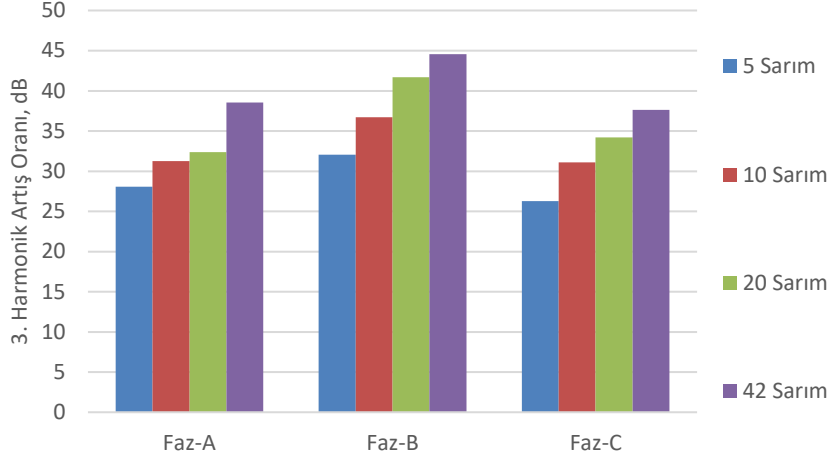
Şekil 4.3: Farklı yüklerde (0%-100%) Faz-A akımı efektif değer değişimi

Stator akımının zaman domeninde incelenmesi bir ön bilgi vermekle birlikte arızanın şiddeti ve türü hakkında tek başına yeterli olmamaktadır. Bu nedenle stator kısa devre arızasını doğru tespit edebilmek için işaretlere FFT işlemi uygulanmalı ve frekans domeninde analizler yapılmalıdır. Simülasyon sonucu elde ettiğimiz stator akım FFT sonuçlarını incelediğimizde sağlıklı durumda görülmeyen 3. harmonikte Şekil 4.4’de görüldüğü gibi büyük bir artış izlenilmiştir.



Şekil 4.4: Sağlıklı ve 5 sarım arızalı asenkron motorda A-Fazı frekans spektrumu

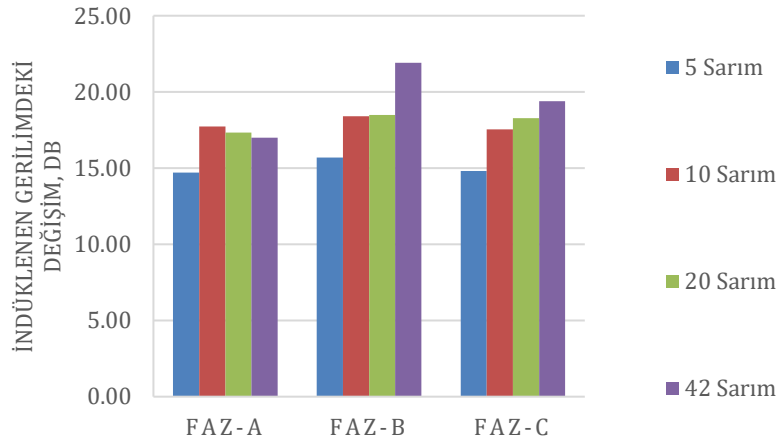
Asenkron motor tam yükte ve çeşitli arıza seviyelerinde çalıştırılmış ve her üç fazın akım frekans spektrumu çıkartılarak 3. harmonik artış değerleri incelenmiştir. Şekil 4.5’ de görüldüğü gibi her üç fazda da arıza şiddetiyle orantılı bir artış görülmüştür.



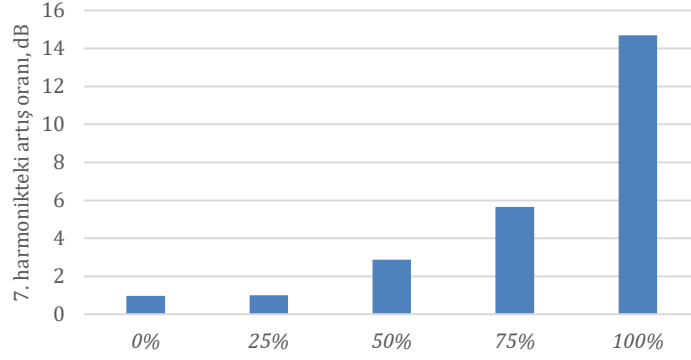
Şekil 4.5: Stator kısa devre arızası durumunda tam yük çalışmada 3. harmonik artış oranları (Arızalı değer/Sağlıklı değer oranı)

4.2 İndüklenen Gerilim Analizi

Sağlıklı ve arızalı asenkron motorlar çeşitli yüklerde ve arıza şiddetlerinde çalıştırılmış ve indüklenen gerilimin frekans spektrumu çıkartılmıştır. Yapılan simülasyonun analizine göre indüklenen gerilimin karakteristik arıza işareti 7. harmonik (350 Hz) olarak görülmüştür. Şekil 4.6’da %100 yük altında farklı arıza seviyelerinde çalışan bir asenkron motorda her üç fazda da indüklenen gerilimin 7. harmonik artışı görülmektedir. Bu artış arızanın olmadığı diğer iki fazda daha yüksek ve arıza şiddetiyle orantılıdır. Ancak arızanın olduğu fazda artış arıza şiddetiyle doğru orantılı değildir.



Şekil 4.6: %100 yük altında çalışan bir asenkron motorda farklı arıza şiddetlerinde indüklenen gerilimdeki 7. harmonik (350 Hz) artış oranları



Şekil 4.7: Stator 5-sarım kısa devre arızası durumunda farklı yüklerde (0%-100%) indüklenen gerilimdeki 7. harmonik artış oranları (Arızalı değer/Sağlıklı değer oranı)

Şekil 4.7’de ise sabit bir arızada motor yüklenme durumuna göre 7. harmoniğin artış oranı görülmektedir. Buna göre yüklenme oranı arttıkça 7. harmonikte artış oranında artmaktadır.

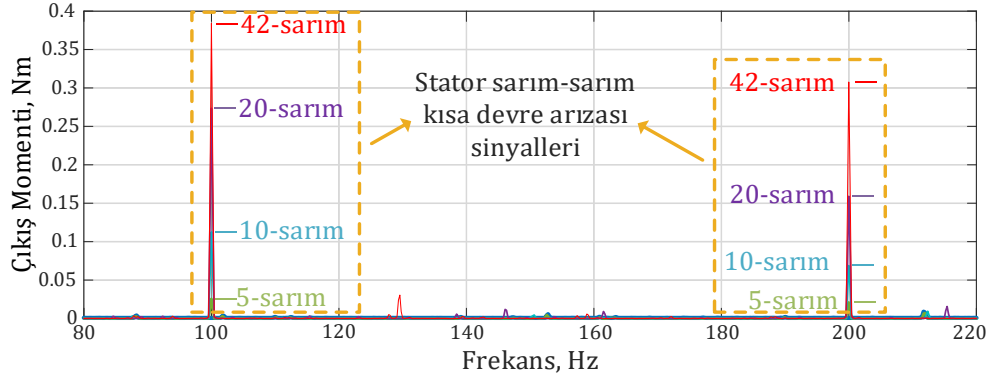
4.3 Çıkış Momentinin Analizi

Stator sarım-sarım arası kısa devre arıza durumu motorun çıkış momentinde salınımlara yol açar. Hava aralığında oluşan dengesizlik motor momentinde karakteristik arıza işaretlerinin oluşmasına neden olur. Çıkış momenti frekans spektrumunda besleme kaynağının iki katında harmoniklerin oluşması beklenmektedir [43].

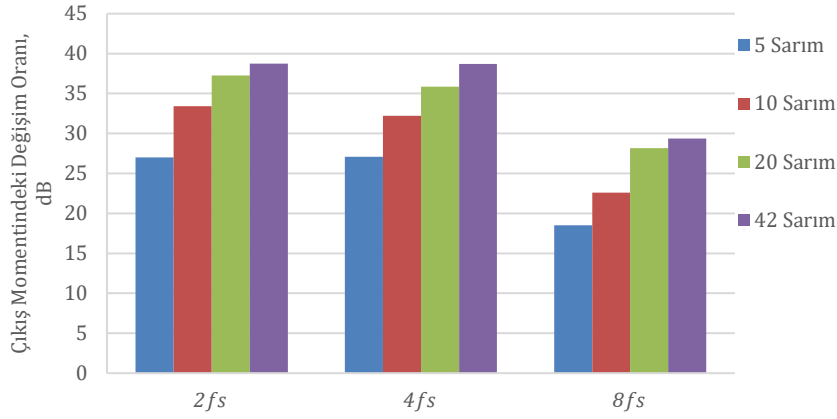
Yapılan simülasyonun analiz sonuçlarında çıkış momentinde görülen harmonikler;

$$f_{ariza_tork} = 2kf_s \quad (4.3)$$

Burada k değeri 1,2,4 ...olarak tanımlanır. Şekil 4.8’de tam yükte çalışan bir asenkron motorda farklı arıza seviyelerinde çıkış momentinde oluşan 100 Hz ve 200 Hz’deki arıza harmoniklerinin durumu gösterilmiştir. Buna göre söz konusu harmoniklerde arıza şiddetiyle orantılı artış görülmüştür. Şekil 4.9’da ise $2f_s$, $4f_s$, $8f_s$ harmoniklerinin sağlıklı duruma göre artış oranı farklı yüklenme koşullarında karşılaştırılmıştır. Arıza şiddeti arttıkça çıkış momentinde belirlenen harmoniklerin genliğinin arttığı görülmüştür.



Şekil 4.8: Çıkış momenti spektrumu, tam yükte, stator sarım-sarım arası kısa devre arızası durumunda



Şekil 4.9: Tam yük altında çalışan bir asenkron motorda farklı arıza seviyelerinde çıkış momentindeki harmoniklerin değişim oranı (Arızalı değer/Sağlıklı değer)

4.4 Kaçak Akı Analizi

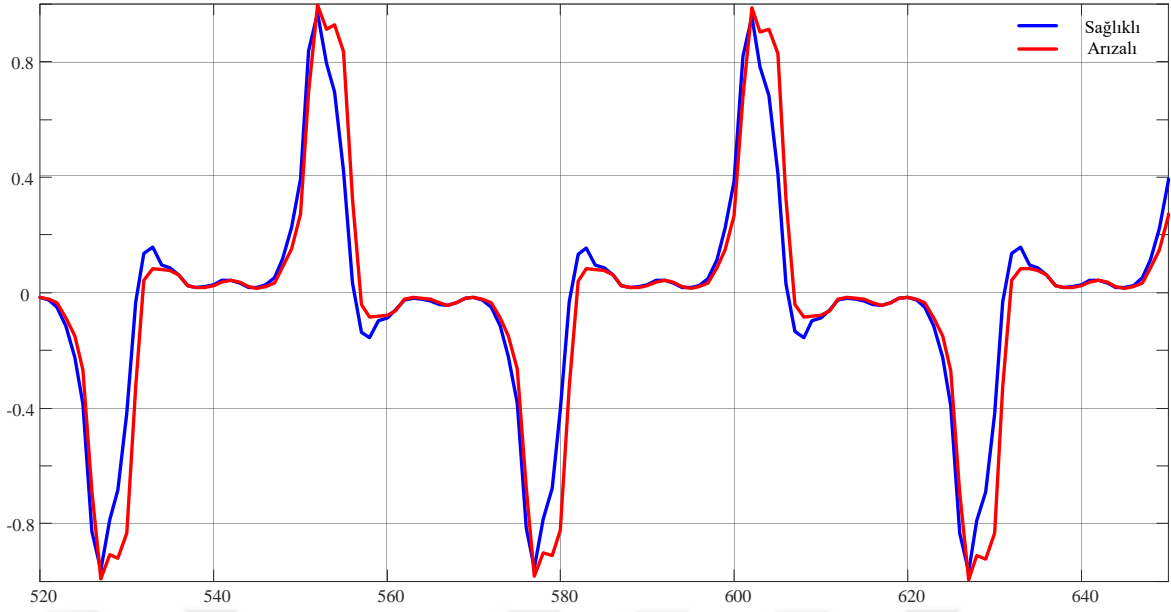
Bu tez çalışmasında stator sarım-sarım arası kısa devre arıza teşhisi için kaçak akı yöntemi kullanılacağından kaçak akı analizi daha kapsamlı olarak incelenmiştir. İlk aşamada motorun radyal yönde kaçak akı bileşenlerinin zaman domenindeki sağlıklı ve arızalı durumları incelenmiştir. Kaçak akının etkin değerinin (RMS) arıza durumunda değişimine bakıldığında;

Çizelge 4.1: %100 yük altında çalışan asenkron motorun 5 sarım stator kısa devre arızası durumunda kaçak akı RMS değişimi.

Noktalar	Radyal			Tanjant		
	Sağlıklı	Arızalı	Arızalı / Sağlam	Sağlıklı	Arızalı	Arızalı / Sağlam
0_deg	1.28E-04	1.35E-04	1.05	7.69E-04	6.89E-04	0.90
45_deg	1.44E-04	1.43E-04	1.00	1.30E-03	1.30E-03	1.00
60_deg	1.28E-04	1.17E-04	0.92	7.69E-04	7.50E-04	0.98
90_deg	3.37E-04	3.22E-04	0.95	7.69E-04	7.46E-04	0.97
120_deg	1.28E-04	1.45E-04	1.14	7.69E-04	7.82E-04	1.02
180_deg	3.37E-04	3.83E-04	1.13	7.69E-04	8.02E-04	1.04
240_deg	1.27E-04	1.29E-04	1.01	7.69E-04	7.78E-04	1.01
270_deg	1.28E-04	1.41E-04	1.11	7.69E-04	7.83E-04	1.02
300_deg	3.37E-04	3.20E-04	0.95	7.69E-04	7.49E-04	0.97

Kısa devre arıza modelimizde 5 sarımlık stator kısa devre arızasını A fazının ilk slotuna uygulamıştık. Bu nedenle kısa devre sarımları motorun 5 ve 115 derecelerine denk gelmişti. Çizelge 4.1’de %100 yük altında çalışan sağlıklı ve 5 sarım-sarım arası kısa devre arızası bulunan iki motorun kaçak akı RMS değerleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi motorun radyal yönde kaçak akı azalışı en fazla 60 derece radyal yönünde görülmüştür. Bu nokta kısa devre sarımlarımızın orta noktasıdır. Yaklaşık %8 değerinde kaçak akı düşümü olmuştur. Bununla birlikte kısa devre sarımlarının dış bölgelerinde %14 lere varan kaçak akı artışı görülmüştür.

Şekil 4.10’da sağlıklı ve arızalı motorlara ait kaçak akı grafikleri incelendiğinde bir miktar bozulmanın olduğu görülmekle birlikte zaman domeninde kaçak akı yöntemi ile arıza teşhisinde bulunmak oldukça zor olduğu görülmektedir.



Şekil 4.10: Sağlıklı ve 5 sarım arızalı asenkron motorda kaçak akı bozulması (120 Derece)

Kaçak akının zaman domeninde incelenmesinden stator kısa devre arızasının tespit edilmesinin çok zor olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle zaman domeninde elde ettiğimiz sinyallere Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulayarak frekans domeninde karakteristik arıza işaretleri aranmıştır. Asenkron motorlarda eksenel yönde ölçülen kaçak akı ile arıza tespit edilebileceğine önceden değinilmiştir. Buna göre;

$$f_{Stator_eksenel} = n \cdot \frac{(1-s)}{p} \cdot f_s \pm k \cdot f_s \quad (4.4)$$

Denklemden elde edilen frekans değerlerinde arıza sinyallerinin oluşacağı beklenmektedir. Burada p çift kutup sayısı, $n=1,2,3..$, $k=1,3,5$ ve f_s kaynak frekansdır.

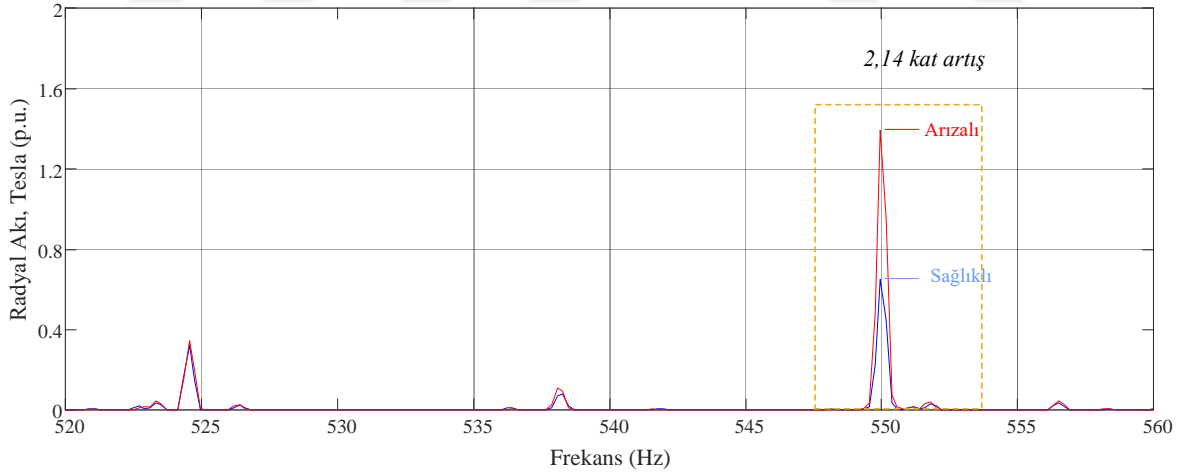
Radyal yönde yapılan ölçümlerde eksenel yöndeki bu harmoniklere benzer artış gösteren harmoniklerin varlığı aranmıştır. Bu amaçla sağlıklı durum ile 5 sarım arızalı durum da oluşan frekans spektrum harmoniklerindeki artış oranları karşılaştırılarak Çizelge 4.2'de verilen çizelge elde edilmiştir. Motorun çevresindeki 9 ayrı noktadan alınan radyal kaçak akıların Arızalı değer /Sağlıklı değer oranları incelenmiştir. Çizelgenin ikinci sütununda arıza durumunda ilgili frekansta kaçak akı artış görülen nokta sayısı, üçüncü sütununda ise azalma görülen nokta sayısı belirtilmiştir. Son sütunda ise bu 9 ayrı noktanın artış oranlarının ortalaması alınmıştır. Çizelgenin ikinci kısmında ise en çok artış görülen harmoniğin motorun çevresindeki 9 ayrı ölçüm noktasındaki artış oranları büyükten küçüğe ayrı ayrı yazılmıştır.

Çizelge 4.2: %100 yük altında çalışan bir asenkron motorda 5 sarım kısa devre arızası durumunda kaçak akı değişimleri.

Frekans (Hz)	Artış Görülen Nokta Sayısı	Azalma Görülen Nokta Sayısı	Arızalı / Sağlıklı Kaçak Akı Oranı Ortalaması
550	9	0	1,53
850	6	3	1,20
950	7	2	1,12
1150	5	4	1,12
813	5	4	1,11
1050	6	3	1,11

Frekans	Arızalı / Sağlıklı Kaçak Akı Oranı Ortalaması	Ölçüm Noktası
550	2,42	120_deg
550	2,16	45_deg
550	2,14	180_deg
550	1,79	300_deg
550	1,35	90_deg
550	1,33	240_deg
550	1,27	270_deg
550	1,05	60_deg
550	1,02	0_deg

Çizelge incelendiğinde oransal ve adetsel olarak en fazla artışın 11. harmonikte (550 Hz) olduğu görülmüştür. Tüm noktaların 11. harmonik ortalama artış oranı %53 'tür.



Şekil 4.11: %100 yük altında çalışan sağlıklı ve 5 sarım arızalı asenkron motorda 11.harmonik (550 Hz) artış grafiği. (180 derece)

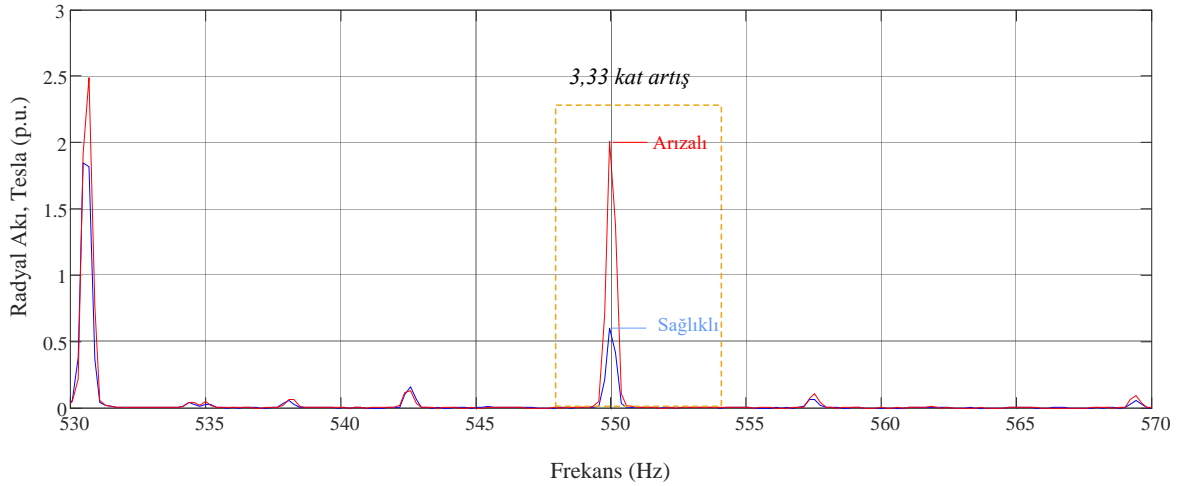
Tam yükte (%100) elde ettiğimiz sonuçları farklı yüklerde de kontrol edebilmek için motor %75, %50 ve %25 yük altında çalıştırılmıştır. Çizelge 4.3, 4.4 ve 4.5'de sırasıyla %75, %50 ve %25 yükte çalışan motorun arızalı durumundaki harmonik artış oranları verilmiştir. Çizelgelerden anlaşılacağı üzere stator sarım-sarım arası kısa devre arızalarında 11. harmoniği (550 Hz) takip etmek motorun tüm çalışma yük oranlarında istenilen sonucu

vermekle birlikte yük oranı azaldıkça ortalama kaçak akı artış oranında azalmakta ve artış görülen nokta sayısı da azalmaktadır.

Çizelge 4.3: %75 yük altında çalışan bir asenkron motorda 5 sarım kısa devre arızası durumunda kaçak akı değişimleri.

Frekans	Artış Görülen Nokta Sayısı	Azalma Görülen Nokta Sayısı	Arızalı / Sağlıklı Kaçak Akı Oranı Ortalaması
550	8	1	1,39
823	5	4	1,10
1050	7	2	1,08
723	4	5	1,08
1223	4	5	1,06
50	5	4	1,06

Frekans	Arızalı / Sağlıklı Kaçak Akı Oranı Ortalaması	Ölçüm Noktası
550	3,33	180_deg
550	1,85	120_deg
550	1,77	300_deg
550	1,58	90_deg
550	1,26	240_deg
550	1,19	270_deg
550	1,04	60_deg
550	1,01	45_deg
550	0,95	0_deg

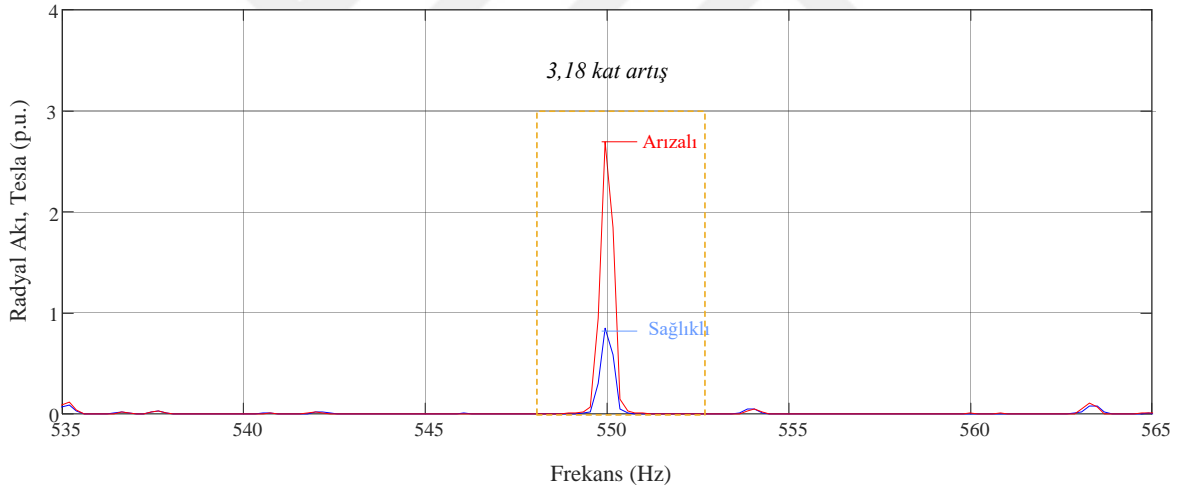


Şekil 4.12: %75 yük altında çalışan sağlıklı ve 5 sarım arızalı asenkron motorda 11.harmonik (550 Hz) artış grafiği. (180 derece)

Çizelge 4.4: %50 yük altında çalışan bir asenkron motorda 5 sarım kısa devre arızası durumunda kaçak akı değişimleri.

Frekans	Artış Görülen Nokta Sayısı	Azalma Görülen Nokta Sayısı	Arızalı / Sağlıklı Kaçak Akı Oranı Ortalaması
550	6	3	1,17
50	5	4	1,06
833	5	4	1,06
650	5	4	1,06
733	4	5	1,06

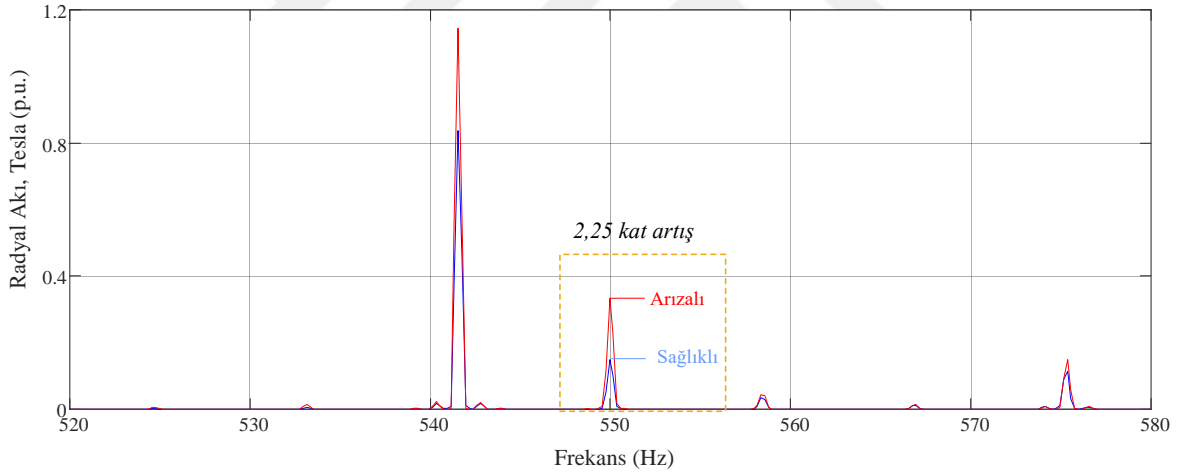
Frekans	Arızalı / Sağlıklı Kaçak Akı Oranı Ortalaması	Ölçüm Noktası
550	3,18	180_deg
550	1,70	90_deg
550	1,42	120_deg
550	1,41	300_deg
550	1,22	240_deg
550	1,06	60_deg
550	0,94	270_deg
550	0,78	0_deg
550	0,66	45_deg



Şekil 4.13: %50 yük altında çalışan sağlıklı ve 5 sarım arızalı asenkron motorda 11.harmonik (550 Hz) artış grafiği. (180 derece)

Çizelge 4.5: %25 yük altında çalışan bir asenkron motorda 5 sarım kısa devre arızası durumunda kaçak akı değişimleri.

Frekans	Artış Görülen Nokta Sayısı	Azalma Görülen Nokta Sayısı	Arızalı / Sağlıklı Kaçak Akı Oranı Ortalaması	Frekans	Arızalı / Sağlıklı Kaçak Akı Oranı Ortalaması	Ölçüm Noktası
342	5	4	1,33	550	2,25	180_deg
550	5	4	1,11	550	1,49	90_deg
742	6	3	1,10	550	1,40	240_deg
842	6	3	1,09	550	1,36	60_deg
642	5	4	1,07	550	1,26	300_deg
650	5	4	1,06	550	0,88	45_deg
442	4	5	1,06	550	0,85	120_deg
				550	0,49	0_deg
				550	0,46	270_deg



Şekil 4.14: %25 yük altında çalışan sağlıklı ve 5 sarım arızalı asenkron motorda 11.harmonik (550 Hz) artış grafiği. (180 derece)

Arıza şiddetinde yapılan değişikliğe harmoniklerin cevabını görebilmek amacıyla yapılan 5, 10, 20 ve 42 sarımlık kısa devre arızalı motorların simülasyonunda aşağıdaki çizelgeler elde edilmiştir.

Çizelge 4.6: %100 yük altında ve 10 sarım kısa devre arızası durumunda çalışan asenkron motorda kaçak akı değişimleri.

Frekans	Artış Görülen Nokta Sayısı	Azalma Görülen Nokta Sayısı	Arızalı / Sağlıklı Kaçak Akı Oranı Ortalaması
550	8	1	2,29
1050	6	3	1,24
650	5	4	1,22
813	5	4	1,22
1150	7	2	1,21
713	4	5	1,17
913	6	3	1,15
350	4	5	1,13
50	4	5	1,12
950	6	3	1,11

Frekans	Arızalı / Sağlıklı Kaçak Akı Oranı Ortalaması	Ölçüm Noktası
550	7,76	180_deg
550	3,23	120_deg
550	2,74	45_deg
550	2,60	300_deg
550	1,80	270_deg
550	1,65	240_deg
550	1,51	0_deg
550	1,08	90_deg
550	0,94	60_deg

10 sarımlık kısa devre arızasında yine 11. harmonikte artış gözlemlenmiş olup 5 sarımlık arıza durumundan daha fazla bir artış oranıyla karşılaşmıştır.

Çizelge 4.7: %100 yük altında ve 20 sarım kısa devre arızası durumunda çalışan asenkron motorda kaçak akı değişimleri.

Frekans	Artış Görülen Nokta Sayısı	Azalma Görülen Nokta Sayısı	Arızalı / Sağlıklı Kaçak Akı Oranı Ortalaması
550	9	0	4,76
650	7	2	2,09
850	5	4	2,03
113	6	3	1,80
613	7	2	1,69
713	8	1	1,67
813	9	0	1,64
913	9	0	1,55
513	7	2	1,54
1050	6	3	1,50

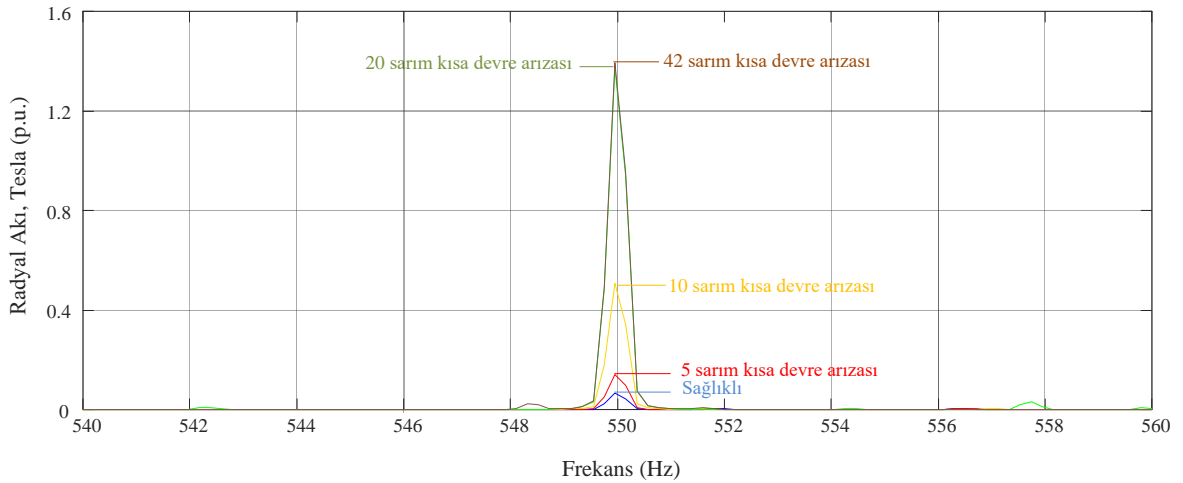
Frekans	Arızalı / Sağlıklı Kaçak Akı Oranı Ortalaması	Ölçüm Noktası
550	21,06	180_deg
550	8,67	300_deg
550	7,15	120_deg
550	3,87	0_deg
550	3,71	45_deg
550	2,11	240_deg
550	2,07	270_deg
550	1,66	90_deg
550	1,23	60_deg

Çizelge 4.8: %100 yük altında ve 42 sarım kısa devre arızası durumunda çalışan asenkron motorda kaçak akı değişimleri.

Frekans	Artış Görülen Nokta Sayısı	Azalma Görülen Nokta Sayısı	Arızalı / Sağlıklı Kaçak Akı Oranı Ortalaması
550	7	2	7,40
613	7	2	3,47
513	7	2	3,07
713	7	2	3,07
850	6	3	2,69
113	7	2	2,84
813	8	1	2,47
413	7	2	2,45
13	6	3	2,38
650	8	1	2,18

Frekans	Arızalı / Sağlıklı Kaçak Akı Oranı Ortalaması	Ölçüm Noktası
550	30,42	300_deg
550	21,38	180_deg
550	20,14	90_deg
550	13,19	270_deg
550	2,18	45_deg
550	1,56	0_deg
550	1,31	60_deg
550	0,86	120_deg
550	0,39	240_deg

Arıza şiddeti ile kaçak akı artış oranının doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre radyal alandan alınan kaçak akı ölçümünden arıza teşhisi yapabilmek için özellikle 550 Hz olmakla birlikte birçok frekanstaki artışları takip etmek gereklidir. Motorun her noktasında artış sağlanmadığından mümkün olduğunca fazla sayıda ve değişik açılardan alınacak ölçümlerin ortalamasının kullanılmasında yarar vardır.



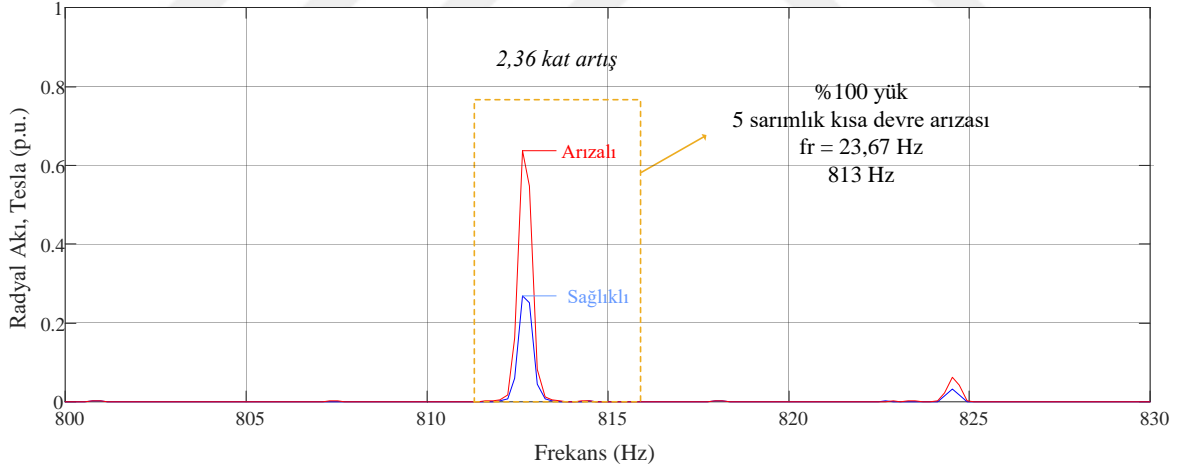
Şekil 4.15: %100 yük altında çalışan sağlıklı, 5, 10, 20 ve 42 sarım arızalı asenkron motorda 11.harmonik (550 Hz) artış grafiği. (180 derece)

Sağlıklı duruma göre belirgin bir artış görülen bir diğer harmonikte şu şekilde tanımlanır.

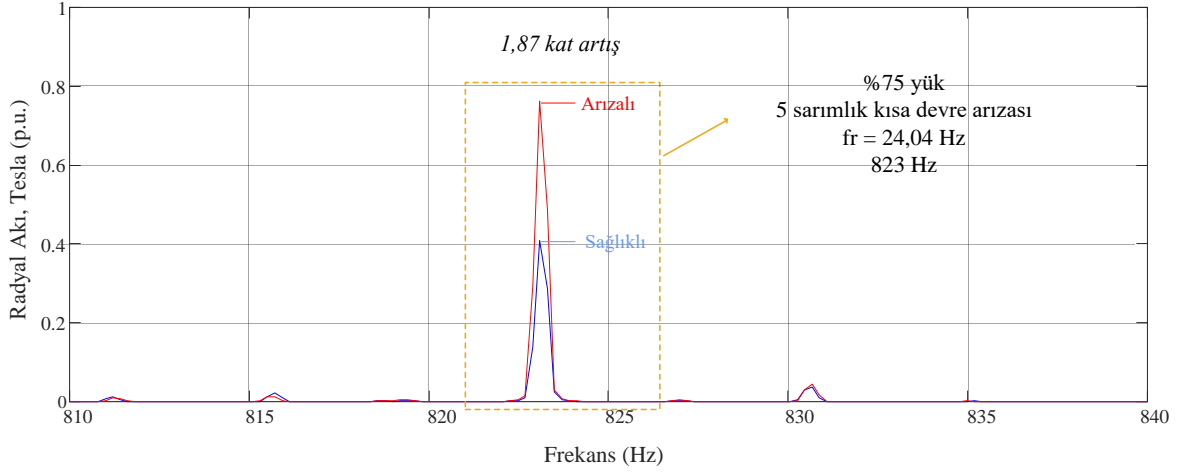
$$f_{sf_flux} = Z \cdot f_r + 3f_s \quad (4.5)$$

Burada f_r rotor dönme frekansı, Z ise rotor çubuk sayısıdır. Simülasyonu yapılan motorda $Z=28$ olduğundan $28f_r+3f_s$ frekans değerine ulaşırız. Bu frekans değerinde aşağıdaki şekillerde görüldüğü gibi farklı yüklenme koşullarında bile söz konusu artış görülmektedir.

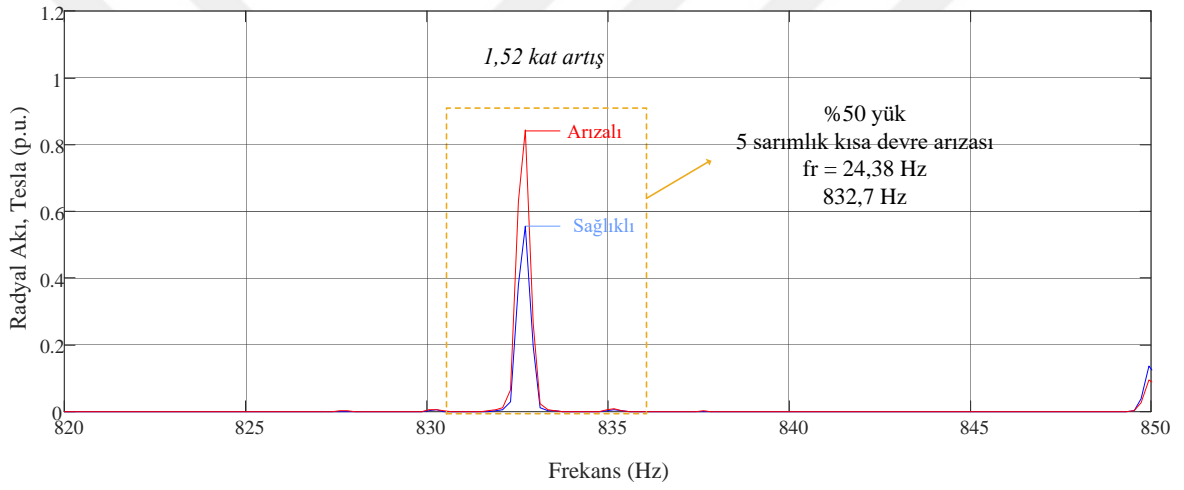
Stator etrafına farklı açılarda yerleştirilen akı sensörlerinden alınan sonuçlar üzerinde yapılan analizlerde, belirlenen bu karakteristik sinyallerin genliğinin konuma göre etkilendiği görülmüştür. Özellikle stator sarım-sarım arası kısa devre arızasının olduğu bölgelerde bu sinyaller oldukça belirgin iken arıza konumundan farklı bir bölgede elde edilen kaçak akı spektrumunda bu sinyallerin etkinliği azalabilmektedir. Bu durum ileriki çalışmalarda stator sarım-sarım kısa devre arızasının yerini tespit etmek içinde kullanılabilir.



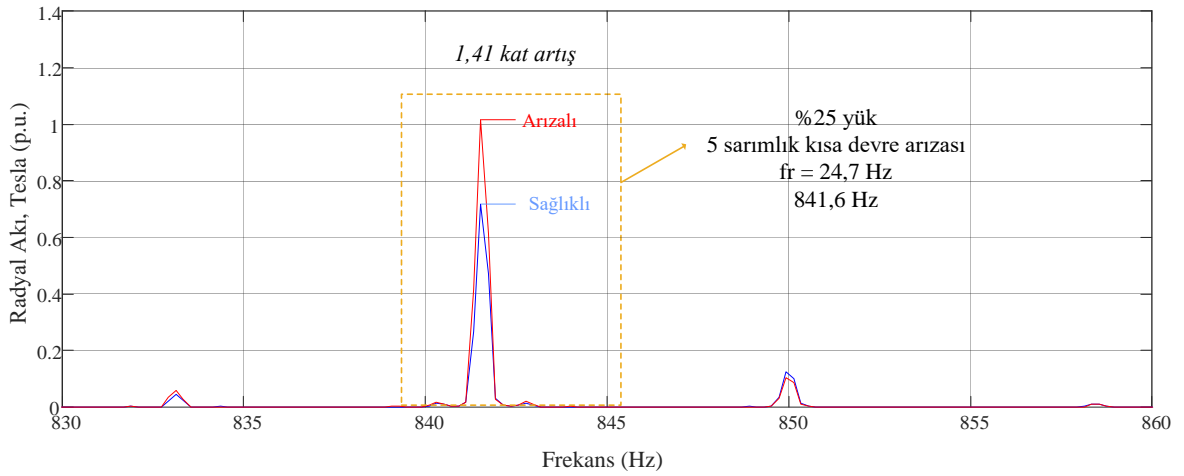
Şekil 4.16: %100 yük altında $28f_r+3f_s$ (813 Hz) harmoniğinin sağlıklı ve 5 sarım kısa devre durum karşılaştırması



Şekil 4.17: %75 yük altında $28f_r+3f_s$ (823 Hz) harmoniğinin sağlıklı ve 5 sarım kısa devre durum karşılaştırması

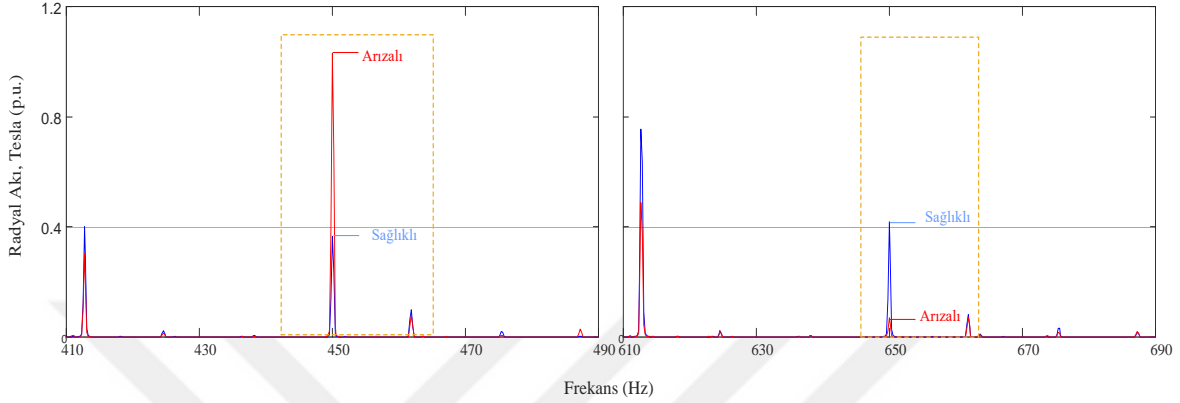


Şekil 4.18: %50 yük altında $28f_r+3f_s$ (833 Hz) harmoniğinin sağlıklı ve 5 sarım kısa devre durum karşılaştırması



Şekil 4.19: %25 yük altında $28f_r+3f_s$ (842 Hz) harmoniğinin sağlıklı ve 5 sarım kısa devre durum karşılaştırması

Radyal kaçak akı frekans spektrumu analizlerinde dikkat çeken bir diğer harmonik genlik değişimi 9. ve 13. (450 Hz – 650 Hz) harmoniklerde görülmüştür. Modelimizde kısa devre arızası 5 derece konumundadır. 5 derece konumuna bir ölçüm noktası eklediğimizde tüm çalışma yüklerinde ve tüm farklı arıza şiddetlerinde 9. harmonikte artış, buna karşın 13. harmonikte ise bir azalış gözlemlenmiştir (Şekil 4.20).



Şekil 4.20: % 100 yük altında çalışan sağlıklı ve 5 sarım arızalı asenkron motorda 9.harmonik (450 Hz) ve 13.harmonik (650 Hz) artış grafiği. (5 derece)

450 Hz ve 650 Hz'lerdeki bu değişimin detaylı analizi için farklı yük ve arıza şiddetlerinde simülasyonlar yapılmıştır. Çizelge 4.9'da görüldüğü gibi tüm yüklerde 9. harmonikte artma, 13. harmonikte ise azalma olmuştur. Ayrıca yüklerle birlikte değişimin ters orantılı olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.9: 5 sarım-sarım arası kısa devre arızasında 5 derece (arızalı slotun olduğu) noktasındaki 450 Hz ve 650 Hz değişim çizelgesi. (a) farklı yüklenme koşullarında (b) farklı arıza şiddetlerinde.

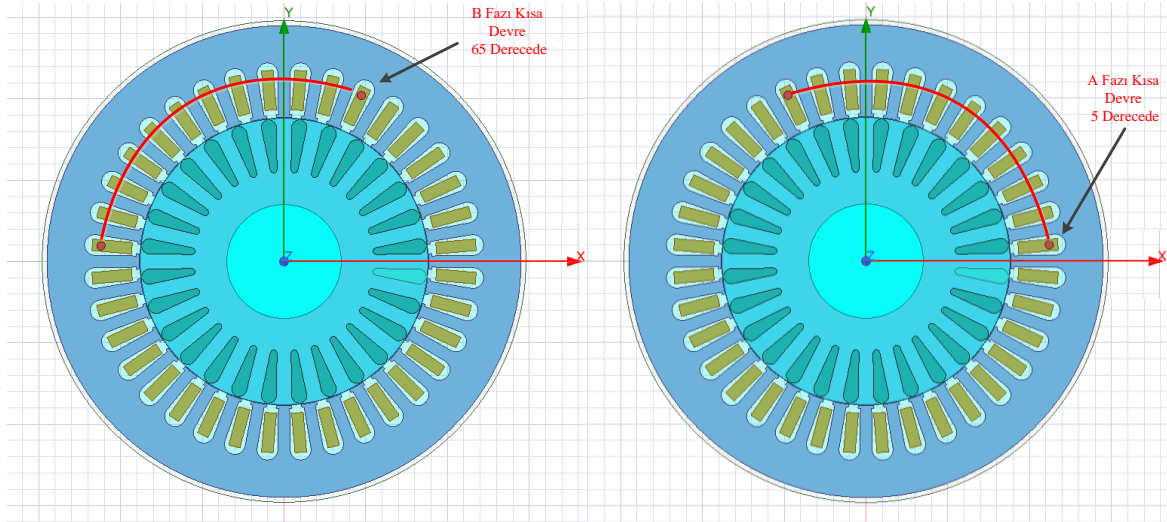
	<i>Arızalı Değer/ Sağlıklı DeğervOranı</i>	
	450 Hz	650 Hz
100%	2,81	0,17
75%	3,03	0,16
50%	3,68	0,20
25%	5,18	0,25

(a)

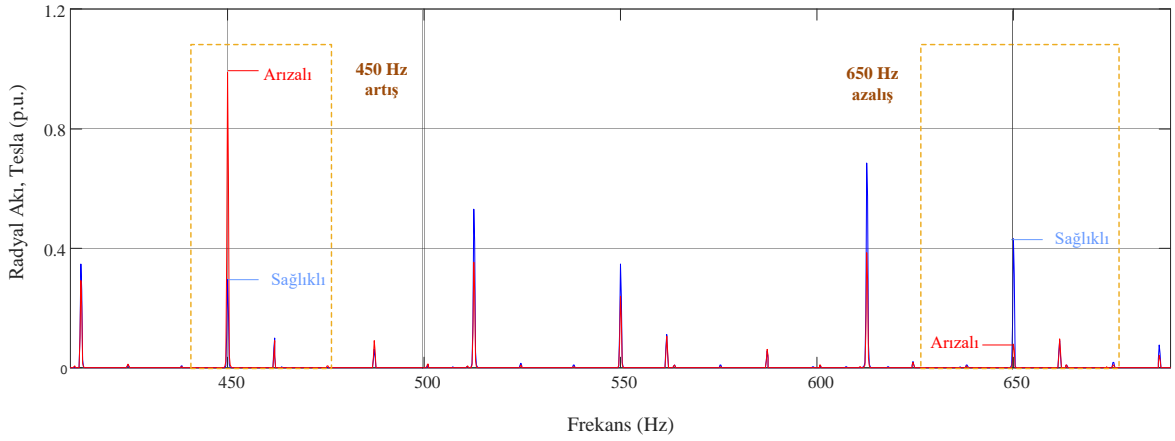
<i>Arızalı Değer / Sağlıklı Değer Oranı</i>		
Kısa Devre Sarım Sayısı	450 Hz	650 Hz
10 Sarım	2,06	0,42
20 Sarım	1,42	0,09
42 Sarım	1,90	0,52

(b)

Elde edilen bu bilginin geçerliliğini test etmek için kısa devre fazı ve slotu farklı olan simülasyonlarda yapılmıştır. Bu amaçla kısa devre fazı “B” olarak seçilmiştir. Bu kez kısa devre arızalı slotumuz 5 dereceden 65 dereceye kaymıştır. Bu noktadaki harmonikler Şekil 4.22’de görüldüğü şekliyle karşılaştırıldığında 450 Hz dikkat çeken artış varken 650 Hz de ise azalma gözlemlenmiştir. Yalnızca arızanın olduğu noktada, her türlü çalışma yükünde ve her türlü arıza şiddetinde görülen bu ilişki arızanın tespitinin yanı sıra arızanın yerinin tam olarak bulunmasına da yaramaktadır.



Şekil 4.21: A-Fazı ve B-Fazı kısa devre yapılmış stator arızalı asenkron motorlar.



Şekil 4.22: B-Fazı kısa devre yapılmış, % 100 yük altında çalışan sağlıklı ve 5 sarım arızalı asenkron motorda 9.harmonik (450 Hz) ve 13.harmonik (650 Hz) artış grafiği. (65 derece)

Simülasyon sonuçları bize göstermektedir ki bir asenkron motorda meydana gelebilecek sarım-sarım arası stator kısa devre arızasının tespitinde radyal yönde ölçülen kaçak akılardan arıza teşhisi için üç farklı yöntem kullanılabilir. Bunlar ;

1. Stator çevresinde farklı açılardan çok sayıda ölçüm yapılarak 11. harmoniğin (550 Hz) artış ortalaması incelenebilir. Ortalama değerde kayda değer bir artış varlığı arızanın olduğunu gösterebilir.
2. $28f_r + 3f_s$ formülü ile elde edilen slot harmonik frekansında arızanın olduğu slotun yakınında kaçak akı artışı aranır. Söz konusu harmonikte görülen artış ölçüm noktasının yakınında arıza olduğunu gösterir.
3. Son yöntemde ise arızalı slotun üstünde 9. harmonikte bir artış ve 13. harmonikte ise bir azalış görülür. Böylece arızanın teşhisinin yanı sıra yeri de bulunmuş olur.

5. ARIZA TESPİT MODÜLÜ

Simülasyon sonuçlarının analizi sonucu elde edilen arıza tespit algoritmalarını kullanarak gerçek zamanlı bir arıza tespit modülü tasarlanmıştır. Bu amaçla asenkron motorun kaçak akısını ölçebilmek amacıyla bir akı sensörü, toplanan verilerin analizinin yapılması ve arıza tespit algoritmasının çalıştırılması amacıyla bir DSP mikrodenetleyici kart, verilerin kablosuz olarak bir terminale (PC, Mobil) aktarılabilmesini sağlamak amacıyla bir bluetooth modül kullanılmıştır.

5.1 Kullanılan Materyal

5.1.1 Kaçak akı sensörü

Asenkron motor statorunun etrafında yayılan kaçak akının ölçülebilmesi amacıyla Texas Instruments (TI) firmasına ait DRV425 Fluxgate Magnetic-Field Sensorü kullanılmıştır. Bu sensör tek eksenli manyetik alanların ölçümü için tasarlanmış yüksek hassasiyetli bir sensördür. 47 KHz kadar ± 2 mT hassasiyette ölçümler sunabilmektedir. Algılanan manyetik alanla orantılı bir analog sinyali çıktı olarak verir.

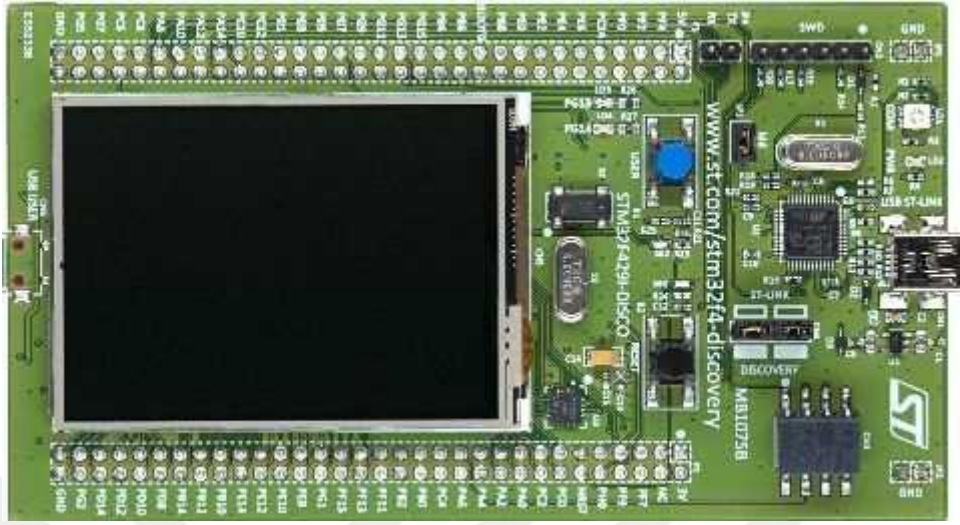


Şekil 5.1: DRV425 Fluxgate Magnetic-Field Sensor

5.1.2 DSP mikrodenetleyici kart

Kaçak akı sensörleriyle zaman domeninde toplanan verilerin frekans domenine dönüştürebilecek ve arıza harmoniklerini tespit edebilecek olan algoritmayı çalıştıracak gerçek zamanlı bir DSP mikro denetleyici kartına ihtiyaç vardır. Bu amaçla STMicroelectronics firmasının ürettiği yüksek performanslı ARM Cortex M4 çekirdeğine sahip STM32F429 mikrodenetleyici kart kullanılmıştır. STM32F429 kartı 2 Mbytes Flash memory, 256 Kbytes RAM ve 64-Mbit SDRAM'e sahip yüksek performanslı bir DSP mikrodenetleyici kartıdır. 2.4" QVGA TFT LCD dokunmatik ekranı sayesinde kullanıcı ve

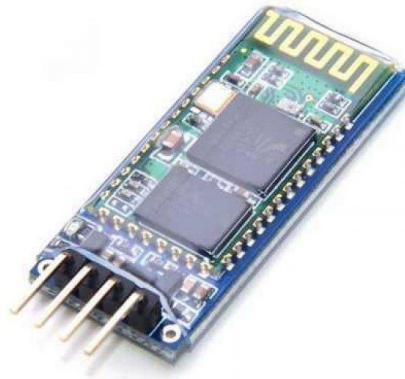
kart arasında etkileşim sağlanabilmekte ve elde edilen sonuçların çıktısı ikinci bir cihaza gerek kalmadan kullanıcıya iletilebilmektedir.



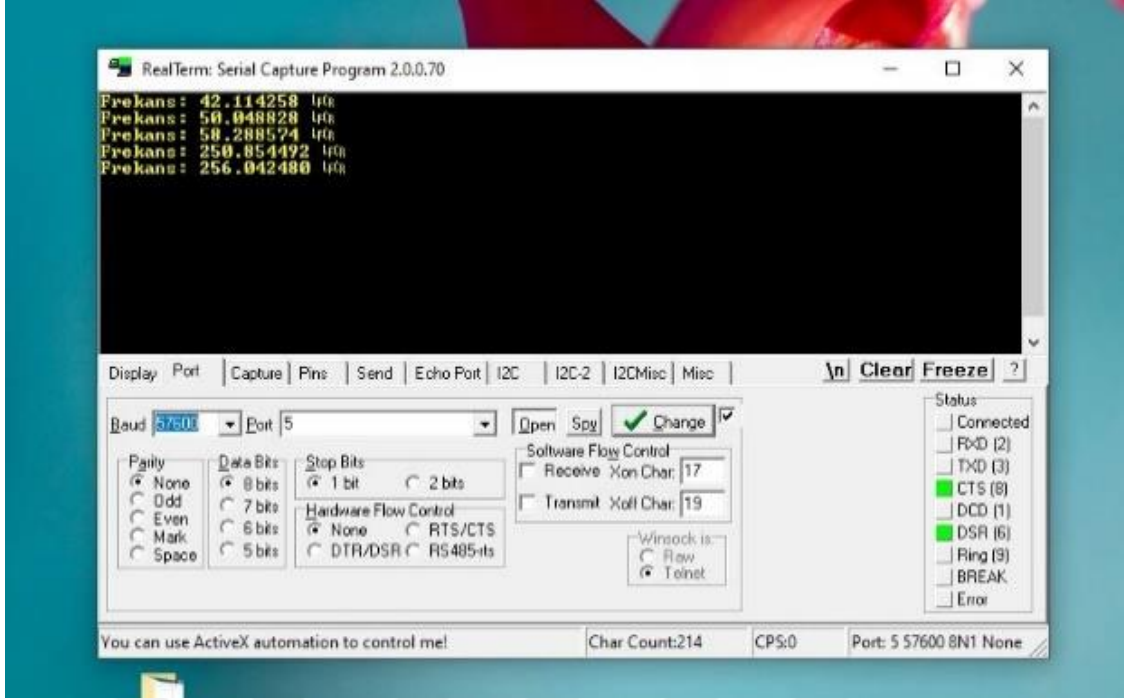
Şekil 5.2: STM32F429 DSP kart

5.1.3 Kablosuz haberleşme

Prototip çalışmasında kullanılan kablosuz haberleşmenin amacı, mikrodenetleyici ekranından görebileceğimiz arıza uyarısının istenildiğinde pratik bir şekilde bir PC veya mobil bir cihaza aktarılmasıdır. Aynı zamanda elde edilen verilerin depolanmasını da sağlamaktadır. Kablosuz haberleşme olarak wireless veya bluetooth kartlar kullanılabilir. Bu çalışmada HC06 Bluetooth kart kullanılmıştır.



Şekil 5.3 HC06 bluetooth kartı



Şekil 5.4: Verilerin serial terminal programından izlenmesi

5.2 Yazılım

Akı sensörüyle alınan analog verilerin belirli örnekleme frekansı ile sayısal verilere çeviren, zaman domeninde toplanan bu verilerin FFT işlemi ile frekans domenine aktaran, Bölüm 4’de çıkartılan arıza teşhis algoritmalarını uygulayan ve kullanıcı arayüzünden oluşan yazılım mikrodenetleyici karta yüklenmiştir. Arıza modülünün yazılım akış diyagramı Şekil 5.6’da verilmiştir.

5.2.1 Kullanıcı arayüzü

Mikrodenetleyicinin dokunmatik ekranı sayesinde oluşturulan kullanıcı arayüzü, FFT işleminin başlatılmasını, FFT sonucu oluşan frekans grafiklerinin ve işletilen algoritma sonucu elde edilen arıza uyarısının ekrana yansıtılmasını, toplanan tüm sonuçların kablosuz olarak ikinci bir cihaza aktarılmasını sağlamaktadır.

5.2.2 Analog sinyalin sayısallaştırılması

Akı sensöründen elde edilen analog sinyal mikrodenetleyicinin ADC portları sayesinde dijitale çevrilir. ADC portu olarak mikrodenetleyicinin PA0 portu kullanılmıştır.

2,5 kHz örnekleme frekansı ile alınan analog işaret 12 bitlik hassasiyetle sayısal verilere dönüştürülür. FFT işleminde kullanılmak üzere 8192 örnekten oluşan veri dizileri oluşturulur.

5.2.3 Kaçak akının frekans spektrumuna dönüşümü

DSP tabanlı mikrodenetleyici kartı en fazla 8192 gerçek sayılı FFT işlemini desteklediğinden veri kümelerimizi 8192 adetlik dizilere ayırırız. Her bir küme tamamlandığında mikrodenetleyici kart FFT işlemini uygular. FFT işleminden önce spektral sızıntılar nedeniyle pencereleme işlemi uygulanır. Döngü şeklinde bu işlem kendini sürekli tekrarlar. 2500 Hz'lik örnekleme frekansı ile 8192 örnek alındığından frekans spektrumu 0,305 Hz hassasiyetinde oluşur.

5.2.4 Arızanın tespiti

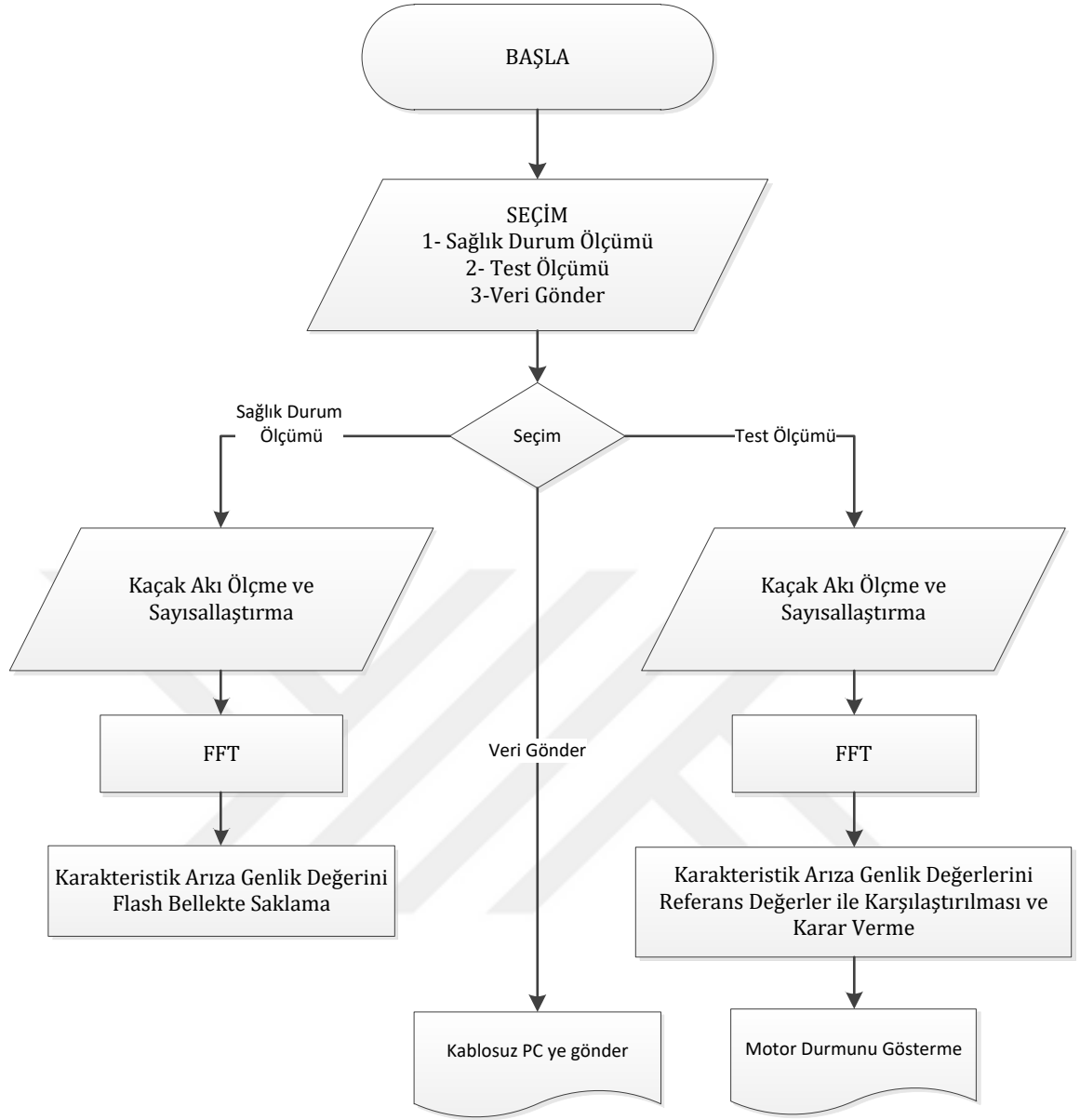
FFT işlemi sonucu oluşan veri dizisinde arıza teşhisinde kullanılacak karakteristik harmonikler seçilir ve uygulanan algoritma sonucu çıkan arıza bilgisi ekrana yansıtılır.



Şekil 5.5: TFT LCD ekran (kullanıcı arayüzü)

5.2.5 Kablosuz haberleşme

Sayısal kaçak akı sinyali ve arıza bilgileri kullanıcı arayüzü sayesinde Bluetooth kart aracılığıyla ikinci bir cihaza (PC, Mobil) kablosuz olarak gönderilmektedir. Gönderilen veriler burada kaydedilebilir. DSP kartın seri haberleşme birimi kullanılmıştır.



Şekil 5.6: Arıza modülü akış diyagramı

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Asenkron motorlar endüstride çok yaygın kullanılır ve arıza durumlarında verim kayıplarına, üretimin durması nedeniyle işgücü kayıplarına ve motorun arıza şiddeti ile orantılı motor onarım kayıplarına neden olmaktadır. Bu nedenle arızalar daha başlangıç aşamasında tespit edilip gerekli müdahalelerin yapılması büyük maddi kayıplara engel olacağından önemlidir. Bunun için birçok araştırmacı tarafından çeşitli arıza tespit çalışmaları yapılmıştır. Ancak arıza tespit sistemlerinin güvenilir olması, mevcut motorlara uygulanabilir olması, sensörlerinin ucuz olması ve kullanımının kolay olması istenilen özelliklerdendir.

Asenkron motor arızalarının önemli bir bölümü stator sargılarında görülen kısa devre arızalarıdır. Bu arızalar motorun verimini düşürdüğü gibi, müdahalede geç kalındığında tüm sargıların yanması ile motorun tamamen elden çıkmasına ve üretimin durmasına neden olabilecek önemli bir arızadır.

Bu tez çalışmasında asenkron motor stator arızaları incelenmiş ve kaçak akı tabanlı arıza teşhis algoritmasına sahip bir DSP mikrodenetleyici kartlı arıza tespit modülü tasarlanmıştır. ANSYS@maxwell programı aracılığıyla sağlıklı ve arızalı motor modelleri simüle edilmiştir. Çeşitli yüklerde de analiz yapabilmek amacıyla motor çalışma yükü olarak %100, %75, %50 ve %25 aralıkları uygulanmış ve 42 sarımlık stator slotunda 5, 10, 20 ve 42 sarımlık arızalar modellenmiştir.

Yapılan simülasyon çalışmalarının sonuçları analiz edildiğinde kaçak akı ile stator sarım-sarım arası kısa devre arızalarının tespiti için üç farklı yöntemin kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. İlk çalışmada motor eksenine etrafından 9 ayrı noktadan kaçak akı ölçümleri alınmış ve FFT işlemi sonrası çıkan harmoniklerde (arızalı değer) / (sağlam değer) karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda çoğu noktanın 11. harmoniğinde (550 Hz) dikkat çeken bir artışa rastlanılmıştır. 11. harmoniğin takip edilmesi ile arıza tespitinin yapılabileceği görülmüştür. Ancak tüm noktalarda artış olmadığından güvenilir bir sonuç elde edebilmek için çeşitli açılardan çok sayıda ölçüm yapılarak ortalamasının alınması uygun olacaktır.

Çeşitli noktalardan alınan kaçak akı ölçümlerinin analizi sonucu $28f_r + 3f_s$ slot harmoniğinde arızanın olduğu bölgelerden alınan ölçümlerde dikkat çeken bir artışa rastlanılmıştır. Söz konusu harmoniğin takip edilmesine dayanan bu yöntem arızanın tespitinin yanı sıra arızanın konumunu da bize gösterebilmektedir.

Bir diğer yönteme ise arızanın oluştuğu slotun tam üstüne denk gelen noktadan alınan kaçak akı ölçümlerinin karşılaştırılması ile ulaşılmıştır. Buna göre 9. harmonikte (450Hz) belirgin bir artış buna karşılık 13. harmonikte (650 Hz) ise belirgin bir azalış grlmştir. Sonuçlar çeşitli yük altında çalışan motorlarda da denenmiş ve yk ile ters orantılı olarak aynı değişimlere rastlanılmıştır. Konuma bağlı ve hassas ölçüm gerektiren bu yöntemin doğruluğunu artırmak için “A” fazında gerçekleştirilen arızalı model yerine bu kez “B” fazında arıza bulunan başka bir model ile çalışılmıştır. Yeni arıza noktasından alınan kaçak akı değerleri incelenmiş ve ilk modeldeki ile benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Son olarak sonuçların analizi ile elde edilen arıza tespit yöntemlerin algoritmaları çıkartılarak STM32F429 mikrodenetleyici kartına algoritma yazılımı yüklenmiş ve kaçak akı yöntemi ile arıza teşhisi yapılabileceği gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Doğan, Z.** (2012). *Ayrıklaştırma yöntemleri ve yapay sinir ağı kullanarak asenkron motorlarda arıza teşhisi* (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi (Turkey)).
- [2] **Tabak, A., & Özkaymak, M.** (2018). Elektrik Motorlarında Uygulanan Bakım Yöntemlerinin İncelenmesi, Karşılaştırılması ve Uzaktan Erişimin Kestirimci Bakıma Etkisi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(4), 889-905.
- [3] **Eftekhari, M., Moallem, M., Sadri, S., & Shojaei, A.** (2013, May). Review of induction motor testing and monitoring methods for inter-turn stator winding faults. In *2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)* (pp. 1-6). IEEE.
- [4] **Darie, E., & Darie, E.** (2007, October). About Modeling of Induction Motor Faults|. In *6TH International Conference on Electromechanical and Power Systems—Chi-in-u, Rep. Moldova* (Vol. 7).
- [5] **Miljković, D.** (2015). Brief review of motor current signature analysis. *HDKBR Info magazin*, 5(1), 14-26.
- [6] **Göktaş, T.** (2015). *Yük salınımı durumunda asenkron motorda rotor çubuk arızasının gerçek zamanlı tespiti* (Doktora Tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [7] **Uçar, H. M.** (2008). *Asenkron Motorlarda İşaret Tabanlı Stator Yalıtım Arıza Tanısı* (Doctoral dissertation, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [8] **Doğan, Z.** 2012. Asenkron Motorlarda Akım ve Titreşim Verisine Dayalı Kestirimci Bakım, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Bilimsel Araştırmalar Komisyonu Sonuç Raporu 2011/04, 41s,Tokat
- [9] **Negrea, M. D.** (2006). *Electromagnetic flux monitoring for detecting faults in electrical machines*. (Doctoral dissertation, Helsinki University of Technology Department of Electrical and Communications Engineering).
- [10] **Siddique, A., Yadava, G. S., & Singh, B.** (2005). A review of stator fault monitoring techniques of induction motors. *IEEE transactions on energy conversion*, 20(1), 106-114.
- [11] **Nandi, S., Toliyat, H. A., & Li, X.** (2005). Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—A review. *IEEE transactions on energy conversion*, 20(4), 719-729.
- [12] **Özelgin, İ.** (2006). *Asenkron Motor Arızalarının Dinamik Parametrelere Etkisi ve Frekans Analizi ile Tanısı* (Doctoral dissertation, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [13] **Ünsal, A., & Kabul, A.** (2017). Asenkron Motor Rotor Arızalarının İstatiksel Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 20(2), 283-289.
- [14] **Alsaedi, M. A.** (2015). Fault diagnosis of three-phase induction motor: a review. *Optics*, 4(1-1), 1-8.

- [15] **Cherif, H., Menacer, A., Romary, R., & Pusca, R.** (2017, September). Dispersion field analysis using discrete wavelet transform for inter-turn stator fault detection in induction motors. In *2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)* (pp. 104-109). IEEE.
- [16] **Ewert, P.** (2019). Application of neural networks and axial flux for the detection of stator and rotor faults of an induction motor. *Power Electronics and Drives, 4*.
- [17] **Henao, H., Demian, C., & 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.
- [18] **Penman, J., Sedding, H. G., Lloyd, B. A., & Fink, W. T.** (1994). Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors. *IEEE transactions on Energy conversion, 9*(4), 652-658.
- [19] **Wolkiewicz, M., & Skowron, M.** (2017). Diagnostic system for induction motor stator winding faults based on axial flux. *Power electronics and drives, 2*.
- [20] **Assaf, T., Henao, H., & Capolino, G. A.** (2004, May). Simplified axial flux spectrum method to detect incipient stator inter-turn short-circuits in induction machine. In *2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (Vol. 2, pp. 815-819). IEEE.
- [21] **Toni, K., Slobodan, M., & Aleksandar, B.** (2007, May). Detection of turn to turn faults in stator winding with axial magnetic flux in induction motors. In *2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference* (Vol. 1, pp. 826-829). IEEE.
- [22] **Henao, H., Demian, C., & 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.
- [23] **Yazidi, A., Henao, H., Capolino, G. A., Artioli, M., Filippetti, F., & Casadei, D.** (2005, June). Flux signature analysis: An alternative method for the fault diagnosis of induction machines. In *2005 IEEE Russia Power Tech* (pp. 1-6). IEEE.
- [24] **Lamim Filho, P. C., Santos, D. C., Batista, F. B., & Baccarini, L. M.** (2020). Axial Stray Flux Sensor Proposal for Three-Phase Induction Motor Fault Monitoring by Means of Orbital Analysis. *IEEE Sensors Journal, 20*(20), 12317-12325.
- [25] **Prahesti, F. E., Asfani, D. A., Negara, I. M. Y., & Dewantara, B. Y.** (2020, July). Three-phase induction motor short circuit stator detection using an external flux sensor. In *2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)* (pp. 375-380). IEEE.
- [26] **Saad, K., & Mirzaeva, G.** (2014, February). Fault diagnostics of induction motors based on internal flux measurement. In *2014 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 201-206). IEEE.
- [27] **Mirzaeva, G., & Saad, K. I.** (2018). Advanced diagnosis of stator turn-to-turn faults and static eccentricity in induction motors based on internal flux measurement. *IEEE Transactions on Industry Applications, 54*(4), 3961-3970.

- [28] **Youn, Y. W., Hwang, D. H., Sun, J. H., & Kang, D. S.** (2011). A method for indentifying broken rotor bar and stator winding fault in a low-voltage squirrel-cage induction motor using radial flux sensor. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 6(5), 666-670.
- [29] **Surya, G. N., Khan, Z. J., Ballal, M. S., & Suryawanshi, H. M.** (2016). A simplified frequency-domain detection of stator turn fault in squirrel-cage induction motors using an observer coil technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(2), 1495-1506.
- [30] **Surya, G. N., Khan, Z. J., & Ballal, M. S.** (2016, July). Radial flux signature analysis for identifying source unbalance and stator turn fault in cage motors using radial flux sensing coil. In *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)* (pp. 1-6). IEEE.
- [31] **Surya, G. N., Khan, Z. J., & Ballal, M. S.** (2015, December). A novel radial flux sensing technique for stator turn fault detection in induction motors in online mode using observer coil. In *2015 International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)* (pp. 93-98). IEEE.
- [32] **Ceban, A., Pusca, R., Romary, R., & Lecoite, J. P.** (2011). Diagnosis of inter-turn short circuit fault in induction machine. *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series*, 35, 103-110.
- [33] **Pusca, R., Romary, R., Ceban, A., & Brudny, J. F.** (2010). An online universal diagnosis procedure using two external flux sensors applied to the ac electrical rotating machines. *Sensors*, 10(11), 10448-10466.
- [34] **Irhoumah, M., Pusca, R., Lefevre, E., Mercier, D., Romary, R., & Demian, C.** (2017). Information fusion with belief functions for detection of interturn short-circuit faults in electrical machines using external flux sensors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(3), 2642-2652.
- [35] **Pusca, R., Demian, C., Mercier, D., Lefèvre, É., & Romary, R.** (2012, October). An improvement of a diagnosis procedure for AC machines using two external flux sensors based on a fusion process with belief functions. In *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 5096-5101). IEEE.
- [36] **Pusca, R., Romary, R., & Ceban, A.** (2012, September). Detection of inter-turn short circuits in induction machines without knowledge of the healthy state. In *2012 XXth International Conference on Electrical Machines* (pp. 1637-1642). IEEE.
- [37] **Irhoumah, M., Pusca, R., Lefevre, E., Mercier, D., & Romary, R.** (2019). Detection of the stator winding inter-turn faults in asynchronous and synchronous machines through the correlation between harmonics of the voltage of two magnetic flux sensors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(3), 2682-2689.
- [38] **Irhoumah, M., Pusca, R., Lefèvre, E., Mercier, D., & Romary, R.** (2017, August). Diagnosis of induction machines using external magnetic field and correlation coefficient. In *2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)* (pp. 531-536). IEEE.

- [39] **Goktas, T., Arkan, M., Mamis, M. S., & Akin, B.** (2017, May). Broken rotor bar fault monitoring based on fluxgate sensor measurement of leakage flux. In *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [40] **Goktas, T., Lee, K. W., Zafarani, M., & Akin, B.** (2016, March). Analysis of magnet defect faults in permanent magnet synchronous motors through fluxgate sensors. In *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 2875-2880). IEEE.
- [41] **Arkan, M.** (2000) *Stator fault diagnosis in induction motors*, (Phd Thesis, University of Sussex, 215s, Brighton.)
- [42] **Joksimovic, G. M., & Penman, J.** (2000). The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors. *IEEE Transactions on Industrial electronics*, 47(5), 1078-1084.
- [43] **Siddique, A., Yadava, G. S., & Singh, B.** (2005). A review of stator fault monitoring techniques of induction motors. *IEEE transactions on energy conversion*, 20(1), 106-114.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Kürşad AKBAYIR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** 1998, Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM:

- 1998-2009 Türk Telekom A.Ş. Bilişim Ağları Mühendisi
- 2009-2012 Malatya Meteoroloji Bölge Müdürlüğü
- 2012-Devam Malatya DSİ 92. Şube Müdürlüğü

YÜKSEK LİSANS VEYA DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

- **Akbayır, K., Göktaş, T., & Arkan, M.(2022).** Asenkron Motorlarda Stator Sarım-Sarım Arası Kısa Devre Arızasının Elektriksel, Mekaniksel ve Manyetiksel Motor Parametrelerine Dinamik Etkileri. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi (Basıma kabul edildi).