

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN STATOR KISA DEVRE
ARIZASININ TESPİTİ VE ARIZA ŞİDDETİNİN OTOMATİK OLARAK
BELİRLENMESİ**

FERHAT ÇIRA

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞUBAT 2017

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN STATOR KISA DEVRE
ARIZASININ TESPİTİ VE ARIZA ŞİDDETİNİN OTOMATİK OLARAK
BELİRLENMESİ**

FERHAT ÇIRA

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞUBAT 2017



Eşim ve Kızıma

Tezin Başlığı: Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Stator Kısa Devre Arızasının Tespiti ve Arıza Şiddetinin Otomatik Olarak Belirlenmesi

Tezi Hazırlayan: Ferhat ÇIRA

Sınav Tarihi: 27.02.2017

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Mehmet Salih MAMİŞ
İnönü Üniversitesi

Tez Danışmanı: **Prof. Dr. Müslüm ARKAN**
İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. Ahmet ALKAN
Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Doç. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU
Fırat Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Taner GÖKTAŞ
İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL
Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Doktora Tezi olarak sunduğum “**Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Stator Kısa Devre Arızasının Tespiti Ve Arıza Şiddetinin Otomatik Olarak Belirlenmesi**” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Ferhat ÇIRA

ÖZET

Doktora Tezi

SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN STATOR KISA DEVRE ARIZASININ TESPİTİ VE ARIZA ŞİDDETİNİN OTOMATİK OLARAK BELİRLENMESİ

Ferhat ÇIRA

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

115+xiv sayfa

2017

Danışman: Prof. Dr. Müslüm ARKAN

İkinci Danışman: Yrd. Doç. Dr. Bilal GÜMÜŞ

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. Özellikle hassas hız ve konum kontrolü gerektiren uygulamalarda sıkça kullanılan bir motor türü olan sürekli mıknatıslı senkron motorlarda (SMSM), statorda meydana gelebilecek kısa devre olayı beklenmeyen sonuçlar doğurabileceğinden erken evrede tespiti oldukça kritik ve önemlidir.

Bu tez çalışmasında, bir SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızasının henüz başlangıç aşamasında iken tespitine ve arıza şiddetinin belirlenebilmesine imkân sağlayan iki yöntem önerilmektedir. İlk yöntem sadece bir stator faz akımını kullanarak akımın spektrumundan elde edilen temel ve 3. harmonik bileşenlerinin

genliklerinden arızayı ve arıza şiddetini geniş bir hız ve yük aralığında tespit etmektedir. Diğer yöntem ise; SMSM'nin stator 3-faz akım ve gerilim sinyallerinden Park dönüşümü aracılığı ile elde edilen akım ve gerilim uzay vektörlerinde stator kısa devre arızasına bağlı olarak değiştiği tez kapsamında yapılan çalışmalarla tespit edilen pozitif ve negatif arıza harmoniklerini kullanarak çok geniş bir hız ve yük aralığında stator kısa devre arızasını ve şiddetini tespit etmektedir. Her iki yöntemde de stator kısa devre arızasını ve şiddetini otomatik olarak yüksek doğrulukta tespit edebilmek için yapay sinir ağları kullanılmıştır.

Arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesi için SMSM'nin matematiksel durum denklemleri kullanılarak Matlab/Simulink ortamında oluşturulan sağlıklı ve arızalı motor modellerinin benzetimi ile her iki yöntemde kullanılan arıza sinyalleri (imzaları) test edilmiştir. Deneysel devre düzeneği kullanılarak benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Bu tezde arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesi için deneysel düzenden elde edilen arıza imzaları ile örüntüler elde edilmiş ve makina öğrenme algoritmaları ile arıza şiddetinin sınıflandırılması sağlanmıştır. Farklı arıza oranlarına sahip motorlardan geniş bir hız ve yük aralığında elde edilen arıza imzaları ile farklı makina öğrenme algoritmaları eğitilmiş ve sonuçları birbiriyle karşılaştırılmıştır. Bu algoritmaların doğrulukları ve başarıları dikkate alınarak stator kısa devre arızasının tespitinde hangi algoritmaların daha uygun olduğu belirtilmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Stator kısa devre arızası, Arıza tespiti, Sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM), Makina öğrenme algoritmaları, Negatif ve pozitif harmonik analizi.

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

AUTOMATIC DETERMINATION OF STATOR SHORT CIRCUIT FAULT AND FAULT SEVERITY OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Ferhat ÇIRA

İnönü University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Electrical-Electronics Engineering

115+xiv pages

2017

Supervisor: Prof. Dr. Müslüm ARKAN

Co-Supervisor: Asst. Prof. Dr. Bilal GÜMÜŞ

Stator faults are one of the types of faults that are common in electric machines. An electric machine with a short circuit fault in the stator can not provide the desired performance and efficiency. The short circuit between two windings in the stator of an electric machine results in a high temperature rise between those windings and in a short time it can cause a short circuit in the windings around. Thus, the short-circuit phenomenon that begins at small ratios can spread rapidly and affect the operation of that machine. The stator short-circuit detection at early-stage is critical and important because it may cause unexpected results, especially in permanent magnet synchronous motors (PMSM), commonly used in applications where precise speed and position control is required.

In this thesis, two methods are proposed which enable the fault detection and fault severity estimation of a PMSM while the short-circuit fault between stator windings is still in its initial stage. The first method uses one stator phase current

only to detect the fault and the severity of the fault from the amplitudes of the fundamental and 3rd harmonic components obtained from the current spectrum at a wide load and speed range. The other method uses the positive and negative stator short-circuit fault related harmonics in the current and the voltage space vectors, which are identified by the studies made in the thesis, to detect short circuit fault and fault severity at wide range of speed and load conditions. The space vectors are obtained from the stator 3-phase current and voltage signals of the PMSM by the Park transformation. In both of the methods, artificial neural networks were used to automatically detect the stator short-circuit fault and determine fault severity at high accuracy rate.

For the detection of fault and determination of fault severity, PMSM's mathematical equations are used to simulate the faulty motor models created in Matlab / Simulink environment and the fault signatures used in the two methods are tested. Similar results were obtained using an experimental test bench.

In this thesis, for the detection of fault and estimation of fault severity, patterns were formed by fault signatures obtained from experimental test bench and classification of fault severity was provided by machine learning algorithms. Various machine learning algorithms are trained and the results are compared with each other using fault signatures obtained from motors with different fault rates at a wide speed and load range conditions. Considering accuracy and success of the algorithms, the suitability of the algorithms for determination of stator short circuit fault were identified.

KEYWORDS: Stator inter-turn fault, fault detection, Machine learning algorithms, Permanent magnet synchronous machine (PMSM), Negative and positive harmonic analysis.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi, birikim ve ilminden her zaman faydalandığım, çalışmalarımın her safhasında yardım ve önerilerini benden eksik etmeyen, büyük fedakârlık gösteren değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Müslüm ARKAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam ve akademik yaşantım boyunca bana her türlü desteği sunan, cesaretlendiren, bana inanan ve güvenen ikinci danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Bilal GÜMÜŞ ve Yrd. Doç. Dr. Rojan GÜMÜŞ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora çalışmalarım boyunca beni değerli bilgileriyle yönlendiren tez izleme komitesi üyeleri sayın Prof. Dr. M. Salih MAMİŞ ve Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk ÖZGÜVEN'e ve bana destek olan ve çalışmalarımı yorumda bulunan elektrik makinaları grubundan Yrd. Doç. Dr. Taner GÖKTAŞ'a teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan, hayatımın her evresinde maddi ve manevi olarak beni hep destekleyen annem Sultan ÇIRA, babam Mahmut ÇIRA ve tüm kardeşlerime ayrıca tez çalışmam boyunca bana her zaman destek olup, cesaretlendiren, anlayış ve sabır gösteren eşim Dr. Sümeyra Cevheroğlu ÇIRA ve kızım Yağmur ÇIRA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmasını 2013/57 numaralı proje ile desteklediği için İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine, kullandığımız motorların özel imalatını yapan FEMSAN firmasına, firma yetkilileri Burçin ve Tuncay beylere, laboratuvarlarında çalışma imkânı bulduğum Dicle Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği ve İnönü Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümleri akademik ve idari personellerine teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii

1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bakış	1
1.2. SMSM Arızaları	2
1.2.1. Sarımlar Arası Kısa Devre Arızası.....	4
1.2.2 Rotor Mıknatıslarının Demanetizasyonu Arızası.....	6
1.2.3. Eksen Kaçıklığı	8
1.2.4. Rulman Hasarları	8
1. 3. Tezin Amacı.....	9
1. 4. Tez İçeriği	10

2. DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALARIN ÖZETİ.....	12
2.1. Elektrik Makinalarının Statorunda Meydana Gelen Arızalar ile İlgili Çalışmalar	13
2.2. SMSM’lerde Stator Sarım Arızasının Tespiti Üzerine Yapılan Çalışmalar	17
2.3. Sonuç.....	20

3. TEZDE KULLANILAN YÖNTEMLER.....	21
3.1. Durum İzleme.....	21
3.1.1 Veri Toplama	22
3.1.2 Arıza Tespiti.....	22
3.1.3 Arıza Teşhisi	23
3.2 Sinyal İşleme ve Spektral Analiz ile Arıza Tespiti	24
3.2.1 Ayırık-Zamanlı Fourier Dönüşümü (DFT)	25
3.2.1.1 Reel Sinyalin FFT’si	26

3.2.1.2 Kompleks Sinyalin FFT'si	26
3.2.1.3 Negatif Frekans İçeren Kompleks Sinyalin FFT'si	27
3.3 Stator Kısa Devre Arızası Tespit Yöntemleri	29
3.3.1 Stator Akımının 3. harmonik Genlik Değeri Değişimi Kullanılarak Arıza Tespiti	29
3.3.2 Uzak Vektör Negatif ve Pozitif Akım ve Gerilim Bileşenlerinin Harmonik Analizi.....	31
3.4. Arıza Şiddetinin Otomatik Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler	36
3.4.1 Çok Katlı Yapay Sinir Ağı ile Sınıflandırma	39
3.4.2 Destek Vektör Makinası ile Sınıflandırma.....	42
3.4.3 k-En Yakın Komşuluk Yöntemi ile Sınıflandırma	45
3.4.4 Karar Ağacı Yöntemi ile Sınıflandırma.....	47
3.4.5 Rastgele Orman Algoritması ile Sınıflandırma.....	49
3.5 Sonuç.....	50

4. STATOR SARIMLAR ARASI KISA DEVRE ARIZALI SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN MATEMATİKSEL MODELİ, BENZETİMİ VE SONUÇLARI.....	51
4.1 Sağlıklı Motorun Benzetim Sonuçları.....	59
4.2 Kısa Devre Oranı %0.5 olan Arızalı Motor Benzetim Sonuçları	60
4.3 Kısa Devre Oranı %1 olan Arızalı Motor Benzetim Sonuçları.....	61
4.4 Kısa Devre Oranı %2 olan Arızalı Motor Benzetim Sonuçları.....	62
4.5 Kısa Devre Oranı %7 olan Arızalı Motor Benzetim Sonuçları.....	63
4.6 Kısa Devre Oranı %12.5 olan Arızalı Motor Benzetim Sonuçları	64
4.7 Benzetim Modelinden Elde Edilen Stator Faz Akımlarının Frekans Düzleminde Analiz Edilmesi	65

5. DENEYSEL DEVRE DÜZENİĞİ VE DENEYSEL SONUÇLAR	68
5.1 Deneysel Devre Düzenegi.....	68
5.1.1 Veri Toplama Sistemi	68
5.1.2 Motor ve Yükleme Sistemi	70
5.2 Deneylerin Yapılışı	71
5.3 Deneysel Sonuçlar.....	73

5.3.1 Stator Akımının 3. Harmonik Genlik Değeri Değişimi Kullanılarak Arıza Tespiti	73
5.3.2 Stator Akımın 3. Harmonik Değişimi ile Arıza şiddetinin Belirlenmesi	75
5.3.3 Stator Akım ve Gerilimlerinin Uzay Vektör Negatif ve Pozitif Bileşen Harmonikleri Kullanılarak Arıza Tespiti.....	77
5.3.4 Stator Akım ve Gerilimlerin Uzay Vektör Negatif ve Pozitif Bileşen Harmonikleri Kullanılarak Arıza şiddetinin Belirlenmesi	82
 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	97
6.1. Sonuçlar	97
6.2 Öneriler	100
 7. KAYNAKLAR	102

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 SMSM'nin arıza türleri	3
Şekil 1.2 Büyük motorlar için motor arızaları anketi	3
Şekil 1.3 Bir SMSM'de stator sarımlar arası kısa devre arızası gösterimi	4
Şekil 1.4 Statorunun bir fazındaki sarımlar arasında kısa devre olayı.....	5
Şekil 1.5 SMSM'nin sürekli mıknatıslarının çalışma noktaları.....	7
Şekil 3.1 Arıza Teşhis Yöntemleri.....	24
Şekil 3.2 Reel sinyalin FFT spektrumu.	26
Şekil 3.3 Kompleks sinyalin FFT spektrumu.	27
Şekil 3.4 Sinüzoidal kompleks bir işaretin negatif ve pozitif yönde gösterimi	27
Şekil 3.5 Negatif sinyal içeren kompleks sinyalin FFT spektrumu.	29
Şekil 3.6 Arıza tespitin ve arıza şiddetinin stator akımının 1. ve 3. harmonik genliği ile yapılması iş-akış şeması.....	31
Şekil 3.7 Arıza tespiti ve arıza şiddetinin uzay vektör akım ve gerilimlerinin pozitif ve negatif harmonikleri ile yapılması iş-akış şeması.....	35
Şekil 3.8 Bir örüntü tanıma sistemi blok diyagramı.	38
Şekil 3.9 MLP'nin şematik gösterilişi.	40
Şekil 3.10 Doğrusal Olarak ayrılabilen (örtüşmeyen) veri kümesi	43
Şekil 3.11 SVM ile sınıflandırma mimarisi.	44
Şekil 3.12 K-en yakın komşuluk sınıflandırma yöntemi.	46
Şekil 3.13 Karar Ağacı Diyagramı.	48
Şekil 3.14 Rastgele Orman (RF) Algoritması Örneği.....	50
Şekil 4.1 $i_{sf,abc}$ stator akımlarının ve V_0 elde edilmesi.	54
Şekil 4.2 Arızalı durumda $i_{s,abc}$ 'nin elde edilmesi.	56
Şekil 4.3 Arıza akımı i_f 'nin elde edilmesi.....	57
Şekil 4.4 V_0 'ın elde edilmesi.	57
Şekil 4.5 Sarımlar arası kısa devre arızalı SMSM'nin gerilim kaynaklı inverter (VSI) sürücülü hız kontrol modelinin Matlab/Simulink benzetimi.	58
Şekil 4.6 Stator gerilimleri (V_{abc}).....	59
Şekil 4.7 Stator akımları (i_{abc}).....	59
Şekil 4.8 Kısa devre akımı (i_f)	59
Şekil 4.9 Stator gerilimleri (V_{abc}).....	60
Şekil 4.10 Stator akımları (i_{abc}).....	60

Şekil 4.11 Kısa devre akımı (i_f)	60
Şekil 4.12 Stator gerilimleri (V_{abc}).....	61
Şekil 4.13 Stator akımları (i_{abc}).....	61
Şekil 4.14 Kısa devre akımı (i_f)	61
Şekil 4.15 Stator gerilimleri (V_{abc}).....	62
Şekil 4.16 Stator akımları (i_{abc}).....	62
Şekil 4.17 Kısa devre akımı (i_f)	62
Şekil 4.18 Stator gerilimleri (V_{abc}).....	63
Şekil 4.19 Stator akımları (i_{abc}).....	63
Şekil 4.20 Kısa devre akımı (i_f)	63
Şekil 4.21 Stator gerilimleri (V_{abc}).....	64
Şekil 4.22 Stator akımları (i_{abc}).....	64
Şekil 4.23 Kısa devre akımı (i_f)	64
Şekil 4.24 (a) Sağlıklı SMSM, (b) %2 kda, (c) %12.5 kda, (d) %25 kda SMSM'nin benzetim modelinden elde edilen akım spektrumlarının karşılaştırılması	65
Şekil 5.1 (a) Gerilim algılama devresi (b) Akım algılama devresi	69
Şekil 5.2 Deneysel sistemin şematik gösterimi.....	71
Şekil 5.3 Deneysel sistemin görüntüsü.	71
Şekil 5.4 Stator akım spektrumları a) %2 kda, b) %12.5 kda, ve c) %25 kda.....	74
Şekil 5.5 Arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde stator akımının 1. ve 3. harmonik genlik değerlerinin sınıflandırmada kullanılmasının şematik gösterimi.	75
Şekil 5.6 MLP kullanılarak otomatik arıza tespiti doğruluk tablosu.	76
Şekil 5.7 MLP kullanılarak otomatik arıza şiddetinin belirlenmesi için doğruluk tablosu	76
Şekil 5.8 1300 dev/dk hızda, yüksüz çalışan sağlıklı ve arızalı SMSM için negatif ve pozitif akım harmoniklerinin değişiminin karşılaştırılması	78
Şekil 5.9 1300 dev/dk hızda tam yükte çalışan sağlıklı ve arızalı SMSM için negatif ve pozitif akım harmoniklerinin değişiminin karşılaştırılması	79
Şekil 5.10 1300 dev/dk hızda yüksüz çalışan sağlıklı ve arızalı SMSM için negatif ve pozitif gerilim harmoniklerinin değişiminin karşılaştırılması	79

Şekil 5.11	1300 dev/dk hızda tam yükte çalışan sağlıklı ve arızalı SMSM için negatif ve pozitif gerilim harmoniklerinin değişiminin karşılaştırılması	80
Şekil 5.12	2000 dev/dk hızda yüksüz çalışan sağlıklı ve arızalı SMSM için negatif ve pozitif akım harmoniklerinin değişiminin karşılaştırılması.	80
Şekil 5.13	2000 dev/dk hızda tam yükte çalışan sağlıklı ve arızalı SMSM için negatif ve pozitif akım harmoniklerinin değişiminin karşılaştırılması.	81
Şekil 5.14	2000 dev/dk hızda yüksüz çalışan sağlıklı ve arızalı SMSM için negatif ve pozitif gerilim harmoniklerinin değişiminin karşılaştırılması	81
Şekil 5.15	2000 dev/dk hızda tam yükte çalışan sağlıklı ve arızalı SMSM için negatif ve pozitif gerilim harmoniklerinin değişiminin karşılaştırılması	81
Şekil 5.16	Negatif gerilim bileşenleri (a) temel harmonik imzası ($-f_v$)'nin arıza şiddetine bağlı değişimi, (b) 3. harmonik imzası ($-3f_v$)'nin arıza şiddetine bağlı değişimi.	85
Şekil 5.17	(a) Negatif akım bileşeni 3. harmonik imzası ($-3f_c$), (b) Pozitif akım bileşeni 3. harmonik imzası ($+3f_c$)'nin arıza şiddetine bağlı değişimi.	86
Şekil 5.18	(a) Pozitif akım bileşeni 3. harmonik imzası ($+3f_c$)'nin arıza şiddetine göre dağılımı. (b) Negatif akım bileşeni 3. harmonik imzası ($-3f_c$)'nin arıza şiddetine göre dağılımı.	89
Şekil 5.19	(a) Negatif gerilim bileşeni temel harmonik imzası ($-f_v$)'nin arıza şiddetine göre dağılımı. (b) Negatif gerilim bileşeni 3. harmonik imzası ($-3f_v$)'nin arıza şiddetine göre dağılımı.	90
Şekil 5.20	Arıza tespitinin ve arıza şiddetinin uzay vektör akım ve gerilimlerinin pozitif ve negatif harmonikleri ile sınıflandırılmasının şematik gösterimi..	91
Şekil 5.21	MLP ile arıza şiddetinin belirlenmesi doğruluk sınıflandırma tabloları (a) $-f_v$, (b) $-3f_c$	92
Şekil 5.22	MLP ile arıza şiddetinin belirlenmesi doğruluk sınıflandırma tabloları (a) $-3f_v$, (b) $+3f_c$	94

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 4.1 SMSM Benzetim Modeli Parametreleri.....	58
Tablo 4.2 800 dev/dk tam yüklü.....	67
Tablo 4.3 1800 dev/dk tam yüklü.....	67
Tablo 5.1 SMSM Parametreleri.....	70
Tablo 5.2 Stator akımının 3. harmonik genliği arıza imzası ile arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde tahmin doğruluğu yüzdesi	77
Tablo 5.3 1300 dev/dk-Yüksüz	83
Tablo 5.4 1300 dev/dk-Tam yüklü	84
Tablo 5.5 2000 dev/dk-Yüksüz	84
Tablo 5.6 2000 dev/dk-Tam yüklü	84
Tablo 5.7 $-f_v$ Arıza imzası ile arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde tahmin doğruluğu yüzdesi	91
Tablo 5.8. $-3f_c$ Arıza imzası ile arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde tahmin doğruluğu yüzdesi	93
Tablo 5.9 $-3f_v$ Arıza imzası ile arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde tahmin doğruluğu yüzdesi	93
Tablo 5.10 $+3f_c$ Arıza imzası ile arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde tahmin doğruluğu yüzdesi	95
Tablo 5.11 $-f_v, -3f_v, -3f_c, +3f_c$ Arıza imzaları ile arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde tahmin doğruluğu yüzdesi.....	95

SİMGELER VE KISALTMALAR

f_s	Besleme geriliminin temel frekansı
T_{load}	Yük momenti
f_{dmg}	Demagnetizasyon frekans harmonikleri
p	Kutup çifti sayısı
i_q	Durağan referans çatıdaki q -ekseni akım bileşeni
v_q	Durağan referans çatıdaki q -ekseni gerilim bileşeni
i_d	Durağan referans çatıdaki d -ekseni akım bileşeni
v_d	Durağan referans çatıdaki d -ekseni gerilim bileşeni
I_{sv}	Kompleks akım uzay vektörü
V_{sv}	Kompleks gerilim uzay vektörü
f_v	Pozitif gerilim temel harmoniği
f_c	Pozitif akım temel harmoniği
MCSA	Motor akım imza analizi
kda	Kısa devre arızası
CCVSI	Akım kontrollü gerilim kaynaklı inverter
SMSM	Sürekli mıknatıslı senkron motor
MLP	Çok katmanlı yapay sinir ağı
kNN	K-en yakın komşuluk yöntemi
SVM	Destek vektör makinası yöntemi
DT	Karar ağacı yöntemi
RF	Rastgele orman algoritması

GİRİŞ

1.1. Genel Bakış

Motor arızaları, tümleşik bir sistemin performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Arızalı motorun arızasının henüz başlangıç aşamasında tespit edilip önlem alınması, sistemlerin devamlılığı açısından büyük önem arz etmektedir. Geç kalınmış bir müdahale sonucu telafisi mümkün olmayan ekonomik kayıplar ortaya çıkabileceği gibi sistemin çalışamaz hale gelmesi de söz konusu olabilmektedir. Erken arıza teşhisi ile ortaya çıkabilecek sonuçların önceden kestirilip tedbir alınması, ekonomik kayıpların da önüne geçilmesini sağlamaktadır.

Elektrik motorları hareketli kontrol ve robotik gibi endüstriyel uygulamalarda en önemli rol oynayan bileşenlerden biridir. Endüstride daha hızlı ve daha güvenilir makinalar ile üretime devam edilmesi oldukça önemlidir. Son 10 yılda yüksek güç yoğunluğu, hassas ve kesin dinamik performans ve yüksek verimlilik talep edildiğinden değişik elektrik motor teknolojileri ve adaptif motor kontrol yöntemleri popüler hale gelmiştir [1-3].

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM), yüksek verim kabiliyeti, hacim ve ağırlığına göre yüksek güç sağlaması, hassas ve kararlı kontrol imkanı, yüksek moment gibi pek çok avantajlarından ötürü endüstri, tıp, uzay araçları ve silah sistemlerinde en fazla tercih edilen motor türlerinden biridir. Döner hareket yapan tüm motorlarda olduğu gibi SMSM'lerin de çalışma ömrü sağlıklı çalışmalarına bağlıdır. Sağlıklı olmayan yani arızalı olan motorun çalışma ömrü de kısadır. Arızanın henüz başlangıç aşamasında iken tespit edilmesi ve buna müdahale edilmesi sistemin devamlılığı açısından ve motor çalışma ömrü açısından büyük öneme sahiptir.

Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar ayarlanabilir hızlarda sürülebilen ve yukarıda belirtilen özellikleri ile birçok işin üstesinden gelebilmesi nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahip olduğu için üzerine yoğun çalışılan bir konu haline gelmiştir [4]. Yüksek hızlarda sürülebilmesi, düşük hızlarda bile hassas moment kontrol kabiliyeti, yüksek güç ağırlık oranı, kompakt yapısı ve yüksek verimi gibi özellikleri SMSM'leri çekici hale getirmiştir [5]. Sm-Co ve Hd-Fe-B gibi nadir toprak elementli doğal mıknatıslardaki gelişmeler SMSM'lerin daha kompakt ve

verimli hale gelmesini sağlayan gelişmelerdir. Üstelik SMSM'lerde asenkron motorların aksine güç faktörü ve motor verimi, kutup sayısına ve motor hızına bağlı değildir. Tüm bu üstün özellikleri sayesinde SMSM'ler otomotiv, robotik ve havacılık endüstrilerinde en fazla kullanılmaya başlanan motorlar haline gelmiştir [6].

Diğer yandan güvenli çalışmanın kritik öneme sahip olduğu sistemlerde, sistemin bir bileşenindeki küçük bir arıza, büyük felaketlere yol açabilecek seviyeye ulaşabilmektedir [7]. Bu nedenle güvenilir çalışma, güvenlik ve arıza toleransı gibi kavramların bu tür sistemlerde önemi büyüktür. Sistemin güvenilirliğini geliştirmek için meydana gelebilecek potansiyel arızaları tespit ve tolere edebilen kontrol sistemlerini de tasarlamak gereklidir [8].

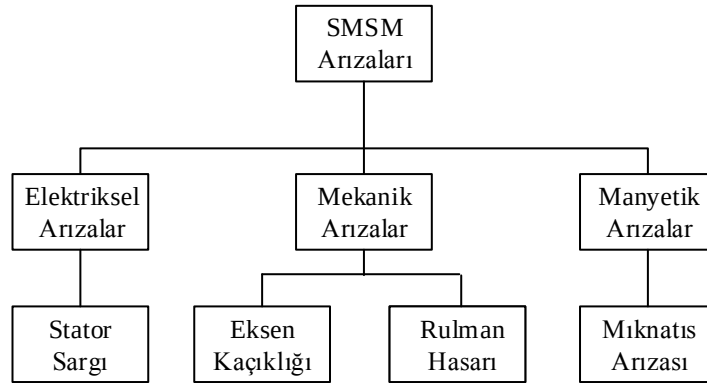
Elektrik makinalarının arıza tespitinde sıcaklık ölçümü, radyo frekans emisyonu görüntüleme tekniği, ses ve titreşim izleme, akustik ses ölçümü, motor momenti, rotor hızı ve stator akım harmonik analizinin de yapıldığı çok sayıda farklı yöntem bulunmaktadır [9]. Bu yöntemlerden en sık ve yaygın kullanılanı benzersiz arıza örüntüsü sağlaması nedeniyle stator akım izleme yöntemidir [10]. Stator akım izleme yöntemi ile ekstra her hangi bir ekipmana ihtiyaç duyulmaksızın stator faz sargılarından elde edilen stator akımları kullanılır.

Stator akım izleme yöntemi çok sayıda matematiksel işlem tekniğine dayanır. Bunlardan Fourier dönüşüm temelli yöntemler motorun sürekli durum çalışma koşullarındaki uygulamalarda geniş kullanım alanı bulmaktadır [11]. Bununla birlikte sürekli olmayan çalışma koşullarındaki uygulamalarda zaman-frekans analizi temelli yöntemler halen tercih edilmektedir [5].

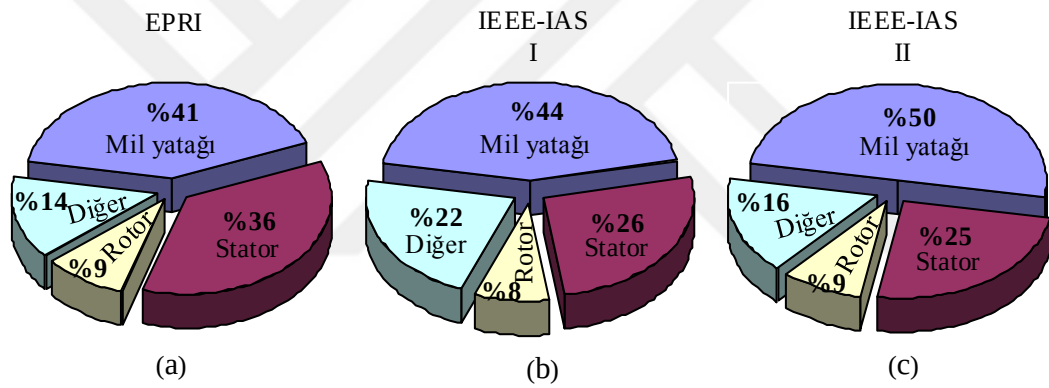
1.2. SMSM Arızaları

SMSM'lerde meydana gelen arızalar manyetik, elektriksel ve mekanik arızalar olarak sınıflandırılabilir. Manyetik arızalar genellikle mıknatıs kırıklığını ve demagnetizasyonu kapsamaktadır. Elektriksel arızalar ise sargılardaki bağlantı hataları, stator açık-devre, sarımlar arası kısa devre, faz-faz kısa devre ve faz-toprak arası kısa devre gibi arıza durumlarını kapsamaktadır. Mekanik arızalar, statik ve dinamik hava aralığı düzensizliği, bükülmüş şaft veya dinamik eksen kaçıklığı ve hasarlı rulman arızaları gibi anormalliklerden meydana gelmektedir [12]. SMSM'nin

arızaları Şekil 1.1’de de ifade edildiği üzere elektriksel, manyetik ve mekanik arızalar şeklinde üç grupta incelenmektedir [12].



Şekil 1.1 SMSM’nin arıza türleri [12]



Şekil 1.2 Büyük motorlar için motor arızaları anketi [2, 3].

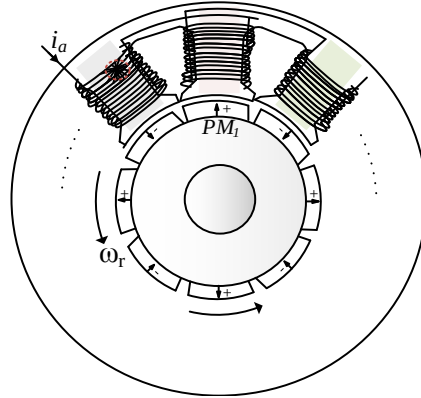
Mekanik arızalar daha çok motorun dönen mekanik parçalarından kaynaklanan arızalarken elektriksel arızalar motordaki elektriksel kısımlarından dolayı meydana gelen arızalardır. Stator sargı arızaları, kırık rotor arızası, eksen kaçıklığı ve mil yatağı arızası gibi arızalar genel olarak tüm motorlarda meydana gelen başlıca arızalardandır. Şekil 1.2’de EPRI [2] ve IEEE [3] tarafından yapılan anket ve araştırmalara göre büyük motorlarda meydana gelen arızaların yüzdeleri gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre mil yatağı ve stator arızaları baskın arıza tiplerindendir. Stator arızalarının tüm arızalar içerisindeki oranı %30 civarındadır.

1.2.1. Sarımlar Arası Kısa Devre Arızası

Elektriksel arızalara en çok neden olan problem sargı yalıtımının bozulmasıdır. Kısa devre arızası henüz çok küçük boyutlarda yani sarımlar arası kısa devre arızası durumunda iken birkaç sarımda meydana gelen yalıtım bozulması giderek yayılarak daha şiddetli yalıtım arızalarına sebebiyet vermektedir [13]. Bu tür sarımlar arası kısa devre arızaları kısa devre olan sarım üzerinde kilitlenmiş rotor akımının iki katına kadar büyüklükte, sargıların aşırı ısınmasına neden olan bir kısa devre akımı meydana getirir [14]. Sarımlar arası meydana gelen kısa devre yayılarak önce aynı fazdaki tüm sargıların kısa devre olmasına ve zamanla da faz-faz arası kısa devre arızasına yol açmaktadır.

Elektriksel arızalar stator sargılarının bağlantı anormallikleri, stator sarımlarının açık-devresi ve stator sarımlarının kısa devresi ile ilişkilidir. Stator sargı yalıtımının bozulmasına bağlı olarak gelişen sarımlar arası kısa devre arızası üç fazlı motorlarda en sık rastlanan arıza türlerinden biridir [15].

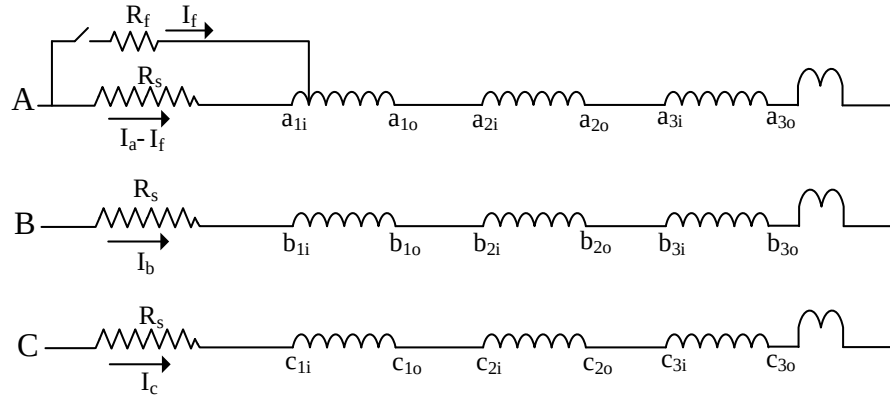
SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızası, statorda aşırı bir akımın indüklenmesine ve rotor mıknatıslarının nötr akısına zıt bir manyetik akı oluşmasına bu da rotor mıknatıslarının hızlı biçimde demagnetize olmasına sebep olabilmektedir [16]. Şekil 1.3'de bir sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM)'nin bir fazında meydana gelen sarımlar arası kısa devre arızası gösterilmektedir.



Şekil 1.3 Bir SMSM'de stator sarımlar arası kısa devre arızası gösterimi

Sarımlar arası kısa devre olayı SMSM'lerde en sık karşılaşılan arızalardan biridir. Şematik olarak Şekil 1.4'te gösterilen kısa devre olayı tespit edilmediğinde,

makinada mıknatısların demagnetize olması gibi bir takım önemli problemlere neden olmaktadır [16].



Şekil 1.4 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. Stator faz sargısındaki kısa devre arızası, makina akısını üç yönden etkilemektedir. Bunlardan ilki kısa devreye sahip olan faz sargısı daha az MMF üreteceğinden etkinliği azalır. Üstelik kısa devre olayı özellikle oluklardaki sızıntı akısının artmasına yol açacağından bu durum saturasyon (doygunluk) koşullarının değişmesine neden olur. Böylece stator devresinin etrafındaki akı yoğunluğu değişmiş olur. İkincisi kısa devre olan sarımlar bağımsız bir faz gibi hareket ederek kısa devreli faz sargılarına zıt etkili kendi MMF'ini oluştururlar. Daha sonra kısa devreli sargılarda oluşan akım, temel hava aralığı akısının meydana gelmesine engel olacaktır [12]. Üçüncüsü, kısa devre akımları sargılardaki sıcaklığın artmasına sebep olduğundan sargı yalıtımı bozulabilmektedir.

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. Harmonik genliklerinin kısa devre olayına bağlı değişimleri sarımlar arası kısa devre arızasının tespitinde kullanılabileceği fikrinin temelini oluşturmaktadır.

Sarımlar arası kısa devre arızaları başlangıçta küçük boyutta olsa bile, motora ciddi hasarlar verebilecek faz-toprak kısa devre arızasına yol açabilmektedir [13]. Faz-toprak kısa devre arıza akımı motorun çekirdeğinde (nüvesinde) çok ciddi bir hasara ve motorun sistemden çıkarılıp kullanım dışı kalmasına yol açabilmektedir

[17]. Ayrıca sarımlar arası kısa devre arızasından dolayı oluşan aşırı stator akımları, rotor mıknatıslarının nötr akısına zıt bir manyetik akım oluşmasına ve rotor mıknatıslarının hızlı biçimde demagnetize olmasına neden olabilmektedir [16].

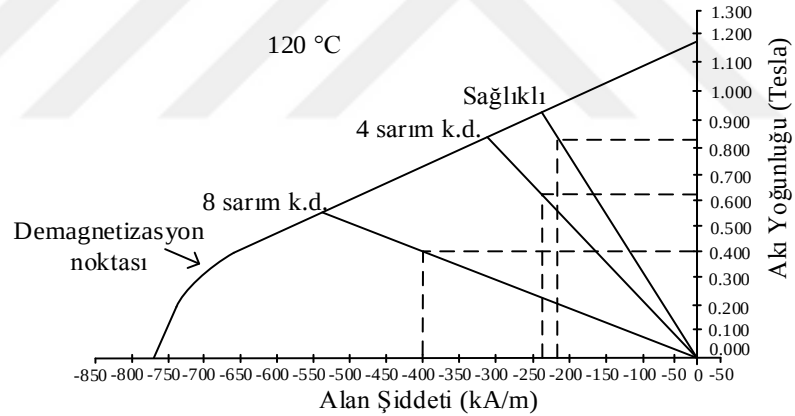
Diğer taraftan, üç fazlı bir motorun faz dirençleri mümkün olabildiğince dengelidir. Endüstride genellikle paslanma veya çalışma ortamının kirliliği bağlantılarda dengesizlik meydana getirmektedir. Üstelik titreşimli çalışma ve ısı döngü işlemleri bağlantıların bozulmasına neden olabilmektedir [18]. Bağlantı gevşekliği, hem lokal aşırı ısınmaya, dengesiz gerilim ve akımlara hem de kısa devre ve açık devre gibi elektriksel arızalara sebebiyet verebilmektedir [19]. Akım veya gerilim dengesizliği durumu, motor sıcaklığının aşırı yükselmesine neden olduğu gibi motor verimine ve performansına olumsuz etkisi olan negatif gerilim ve akım bileşenlerinin oluşmasına yol açabilmektedir. Ayrıca, gerilim dengesizliği, kendi genliğinin birkaç katı büyüklüğünde bir akım dengesizliği meydana getirebilmektedir. Stator sargılarının sarımlar arası kısa devre arızasına bağlı olarak zamanla ısınmasından dolayı empedans dengesizliği de bununla birlikte artış gösterebilmektedir [20].

1.2.2 Rotor Mıknatıslarının Demagnetizasyonu Arızası

Mıknatısta meydana gelen kısmi demagnetizasyon arızası, dengesiz manyetik çekme, manyetik harmonikler, akustik gürültü ve titreşim gibi birçok olumsuz mekanik etkilere neden olmaktadır [21]. Bu arıza dolaylı olarak SMSM'nin mekanik mil momentinin azalmasına ve motor performansının da olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır [16]. Kısmi demagnetizasyon arızasından dolayı, SMSM, arızasız durum ile aynı mil momentini üretebilmek için daha yüksek bir stator akımına ihtiyaç duymaktadır. Bu akım artışı SMSM'nin stator sarımlarındaki sıcaklığı arttırmakta ve bu da daha büyük bir demagnetizasyona ve stator akım artışına neden olmaktadır [22]. Buna ek olarak sarımlar arası kısa devre arızası da aşırı akımlara neden olacağından buna bağlı demagnetizasyon arızasını meydana getirebilmektedir [16]. Yaşanabilecek en kötü durum, armatür reaksiyonu en yüksek seviyede olduğunda, yani motor aşırı yüklerle sürüldüğünde statorun tüm sargılarının tamamen kısa devre olması durumudur [21]. Stator sargılarının kısa devre olan miktarının artması arıza etkilerini de artırır ve sürekli mıknatısın çalışma noktasının

geri dönülemez demagnetizasyon bölgesi noktasına kadar düşmesine neden olabilir [23].

Sürekli mıknatıslı makinalar, normal çalışma koşulları altında çalıştırıldığı sürece, rotor mıknatıslığı devam edebilecek şekilde tasarlanmışlardır. Stator sargılarında meydana gelen kısa devre arızasından dolayı oluşan kısa devre akımından veya aşırı yüklenmeden dolayı, motorun aşırı ısınması rotor mıknatıslarının çalışma noktasının demagnetizasyon bölgesinin altına düşmesine neden olabilir. Şekil 1.5'te SMSM'nin sağlıklı, 4 ve 8 sarımın kısa devre olması durumları için 120 °C'lik çalışma sıcaklığındaki demagnetizasyon eğrisi ile çalışma noktaları görülmektedir. Çalışma noktası, demagnetizasyon eğrisi ile dış manyetik devrenin geçirgenliğini ifade eden lineer doğrunun kesiştiği nokta olarak tanımlanır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, sıcaklık artışı demagnetizasyon eğrisini sağa doğru yavaşmasına neden olabilmesidir. Böylece k demagnetizasyon noktası lineer bölgeye yaklaştıkça, mıknatısların kalıcı ve geri dönülemez biçimde demagnetize olma riski ortaya çıkmaktadır [24].



Şekil 1.5 SMSM'nin sürekli mıknatıslarının çalışma noktaları [24].

Eğer arıza, çalışma noktasının altındaki lineer bölgeye kadar düşmesine sebebiyet verirse o zaman geri dönüşü olmayan bir akı kaybı da meydana gelecektir [25]. Demagnetizasyonun bir sonucu olarak, dağıtılmış manyeto motor kuvvet (MMF) sinüzoidal değildir. Eğer demagnetizasyon var ise demagnetizasyon frekans harmonikleri gözükür [5].

$$f_{dmg} = f_s |1 \pm k / p|, \quad k=1,2,3,...n \quad (1.1)$$

Burada k herhangi bir tam sayıyı, p kutup çifti sayısını ve f_s kaynağın temel frekansını ifade etmektedir.

1.2.3. Eksen Kaçıklığı

Eksen kaçıklığı arızaları, mekanik arızalar sınıfında incelenmektedir. Eksen kaçıklığı arızası statik, dinamik ve karışık eksen kaçıklığı arızalarını kapsamaktadır. Bu arızalar dengesiz kütle, şaft burulması ve rulman toleransı gibi imalat hatalarından dolayı meydana gelmektedir. Eksen kaçıklığı, moment vuruntusu, gürültü ve titreşimli çalışma gibi problemlere neden olabilir [12].

Eksen Kaçıklığı arızaları, elektrik motorlarında meydana gelen arızaların içerisinde kayda değer bir oranı oluşturmaktadır. Dönen makinalardaki eksen kaçıklığı, stator ile rotor arasındaki hava aralığının düzensiz olması şeklinde tanımlanır [26]. İki çeşit hava aralığı eksen kaçıklığı arızası vardır bunlar; statik ve dinamik eksen kaçıklığıdır. Statik eksen kaçıklığı durumunda hava aralığı boşluğu düzensizdir, ancak minimum olan radyal uzunluk sabittir. Rotor şaftının merkezi tam ortada olmadığı ve minimum radyal uzunluk rotora bağlı değiştiği durumda dinamik eksen kaçıklığı meydana gelmektedir [27]. Statik ve dinamik eksen kaçıklığı genellikle aynı anda var olma eğilimindedir. İmalatı gereği sağlıklı motorlarda da küçük ve kabul edilebilir seviyede statik eksen kaçıklığı bulunmaktadır.

Dinamik eksen kaçıklığından ötürü oluşan arıza harmonikleri aşağıdaki eşitlikte ifade edilmiştir [28].

$$f_e = f_s \left(1 \pm \frac{2k-1}{p} \right) \quad (1.2)$$

Burada f_e stator akımlarındaki arıza harmoniklerini (frekanslarını) ifade etmektedir.

1.2.4. Rulman Hasarları

Elektrik makinalarının büyük çoğunluğunda rulman ve rulman içerisinde bilyeler kullanılmaktadır. Her rulman içte ve dışta olmak üzere iki adet bilezikten oluşmaktadır. Dönüşü sağlayan bir set bilye bu halka bileziklerin içerisinde bulunmaktadır. Elektrik makinaları dengeli yükleme, iyi hizalama vb. gibi normal

Çalışma koşulları altında alıştırılrsa bile rulmanlarda metal yorulması nedeniyle arızalar meydana gelebilir. Metal yorulması, rulmanların zamanla pullanma ile dökölmesine ve küçük çatlaklarla kırılmaya başlamasına neden olabilmektedir. Bunlar dışında titreşim, doğal eksen kaçıklığı ve rulman akımları da rulman hasarlarının sebebi olabilmektedir [29].

Rulman arızaları bazen eksen kaçıklığı arızası olarak kabul edilen rotor asimetrisi olarak ortaya çıkabilmektedir [26]. Rulman bilyeleri ile ilişkili hasarlar dış rulman hasarları, iç rulman hasarları, bilye hasarları ve takım hasarları olarak sınıflandırılabilir. Tüm bu mekanik hasarlar, sarımlarındaki stator akımlarında yeni harmoniklerin oluşmasına ve makina içerisindeki akı dağılımının bozulmasına yol açar. Arıza frekanslarının (harmoniklerinin) karakteristiği makinanın mutlak hareketinin (titreşiminin) sonucudur [30]. Stator akımı stator ile rotor arasındaki hava aralığı miktarının değişmesinden daha ziyade makinanın mutlak hareketinden etkilenmektedir. Rulman arızası meydana geldiğinde arıza frekansları esas olarak elektriksel kaynak frekansı tarafından modüle edilmektedir.

Rulman arızalarından kaynaklanan mekanik yer değiştirme, eksen kaçıklığının her iki yöne hareketi şeklinde tanımlanabilen makina hava aralığının değişimine neden olmaktadır. Rulman arızaları aşağıda verilen frekanslarda stator akım harmonikleri üretmektedir [31–33].

$$f_{i,o} = \frac{n_b}{2} f_r \left[1 \pm \frac{b_d}{p_d} \cos \beta \right] \quad (1.3)$$

$$f_{bng} = |f_s \pm k f_{i,o}| \quad (1.4)$$

Burada n_b rulman bilyelerinin sayısını, $f_{i,o}$ karakteristik titreşim frekanslarını, f_r rotor mekanik hızını, b_d bilye çapını, p_d rulman aralığı çapını, β yuvadaki bilyelerin dokunma açısını ifade etmektedir.

1. 3. Tezin Amacı

Çok sayıdaki üstün yönleri ile kullanımı gittikçe yaygınlaşan sürekli mıknatıslı senkron motorlarda meydana gelen stator arızalarının, motor verimine, güvenilir ve kararlı çalışmasına olumsuz yönde etki ettiği daha önce yapılan çalışmalarda vurgulanmıştır. Bu sebeple stator arızalarına neden olan ve genellikle sargı

yalıtımının bozulmasından kaynaklanan sarımlar arası kısa devre arızasının henüz başlangıç aşamasındayken tespiti kritik bir önem taşımaktadır. Stator sarımlar arası kısa devre arızası çok hızlı yayılabilen ve tüm sistemin çökmesine neden olabilecek bir arıza türü olması bakımından, SMSM'nin arızasının erken belirlenebilmesi, sistemin güvenilir çalışması için gerekli bakım stratejilerini kurgulamaya imkân verir.

Bu tezin ana amacı bir sürücü ile beslenen üç fazlı SMSM'lerde sıkça karşılaşılan sarımlar arası kısa devre arızasının erken evrede tespit etmek ve arızalı SMSM'lerin arıza şiddetinin yapay sinir ağları ile otomatik olarak belirleyebilmektir. Bu tez kapsamında motor faz akımları ve gerilimleri kullanılarak arıza tespiti ve arıza şiddetinin sınıflandırılması için aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır.

- Farklı hız ve yükler altında çalışan SMSM'nin tek faz stator akımına hızlı Fourier dönüşümü (FFT) uygulanarak, akım spektrumlarının izlenmesi, sağlıklı ve farklı orandaki arıza şiddetine sahip SMSM'lerin harmonik genliklerinin değişimlerinin analiz edilmesi.
- Vektör kontrol ile sürülen SMSM'nin stator akım ve gerilim d - q eksen bileşenlerinden (i_q , v_q ve i_d , v_d) yararlanılarak bir arıza tespit algoritmasının geliştirilmesi ve yeni arıza imzalarının belirlenmesi
- Arızanın tespitinde ve arıza şiddetinin belirlenmesinde kullanılabilecek ve başarılı sonuçlar verdiği gözlenen yeni arıza imzaları kullanılarak k-en yakın komşuluk yöntemi (kNN), destek vektör makinası yöntemi (SVM), karar ağacı yöntemi (DT), rastgele orman (RF) yöntemi ve çok katmanlı yapay sinir ağları yöntemi (MLP) gibi sınıflandırma yöntemleri kullanılarak arıza şiddetinin otomatik olarak belirlenmesi ve yöntemlerin başarısının birbirleri ile karşılaştırılması.

1. 4. Tez İçeriği

Bu tez çalışması 6 ana bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1'de SMSM'de meydana gelen arızalara genel bir bakış sunulmuştur.

Bölüm 2'de daha önceki çalışmaların anlatıldığı kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Bu bölümde SMSM ve diğer elektrik makinalarında stator sargı

yalıtımının bozulması ile meydana gelen kısa devre arızaları ve tespit yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Bölüm 3'te arıza tespitinde kullanılan durum izleme yöntemleri, arızaların tespiti ve teşhis edilmesinde kullanılan yöntemler ve arıza şiddetinin belirlenmesi için tezde kullanılan sınıflandırma yöntemleri anlatılmıştır.

Bölüm 4'te SMSM'nin sağlıklı ve arızalı durumları için matematiksel modelleri elde edilerek bilgisayar benzetimi yapılmış ve bu benzetime ait sonuçlar verilmiştir. Bu bölümde sürekli mıknatıslı senkron motor modellendikten sonra geliştirilen yöntem ve algoritmalar temel alınarak benzetim sonuçları incelenmiştir.

Bölüm 5'te arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesi için geliştirilen algoritmaları uygulamak için gereken deneysel devre düzeneği ve gereksinim duyulan akım ve gerilim verilerini elde etmek ve işlemek için gereken donanım detaylı olarak açıklanmıştır. Ayrıca laboratuvar ortamında oluşturulan deney düzeneği ile yapılan uygulamalardan elde edilen deneysel sonuçlar incelenmiştir.

Bölüm 6'da bu tezin sonuçlarını, katkısını ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalar için önerileri içermektedir.

2. DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALARIN ÖZETİ

Son yıllarda bilim insanlarınca arıza tespiti alanında yapılan çalışmalarda büyük artış gözlenmektedir. Henüz başlangıç aşamasındaki arızanın tespiti ile karşılaşılabilecek ciddi bir arızanın önüne geçilebileceği gibi büyük ekonomik kayıpları da bertaraf edeceğinden literatürde özellikle asenkron motorlar ve diğer motor türlerindeki arızalar üzerine çok sayıda çalışma ve arıza tespit yöntemi mevcuttur.

Elektrik motorları arızaları genellikle mekanik ve elektriksel arızalar olmak üzere iki ana başlıkta incelenmektedir. Mekanik arızalarda motorun rulman, yatak, dişli, yağsızlık, dinamik ve statik eksantriklik gibi arızaları incelenmektedir. Elektriksel arızalarda stator sargı kısa devre, rotor sargı kısa devre, faz-toprak kısa devre, sargıların yanlış bağlanması, yanlış toprak bağlantısı ve açık devre gibi arızalar incelenmektedir [27, 46–48].

Elektrik makinalarındaki sargıların yalıtımında kullanılan organik malzemeler aşırı ısınma, ani gerilim dalgalanmaları, çalışma ortamının kirliliği gibi bir takım zorlayıcı unsurlara maruz kalmaktadırlar. Bu unsurlar zamanla sargı yalıtımının bozulmasına neden olmaktadır. Stator sargı yalıtımının bozulmasının ana nedenlerden biri aşırı ısınmadır. Sargı yalıtımının bozulmasına neden olan aşırı ısınmanın olası 3 nedeni vardır. Bunlar; yaşlanma, aşırı yüklenme ve kısa devre akımıdır [37]. Sıcaklık limitlerinin üzerinde işletilen en iyi yalıtıma sahip sargı bile hızlıca bozulabilir. Kurala göre, çalışma limitinden 10 °C üzerinde işletilen stator sargı yalıtımının ömrü %50 kısalmaktadır [38].

Stator kaynaklı arızaların, elektrik makinalarında görülen arızalar içerisindeki payı %30-%40 arasındadır [26, 35, 36, 39–41]. Sargılardaki kısa devre olayı aşırı ısınma nedeniyle stator oluklarındaki bobinin etrafındaki yalıtkanın özelliğini yitirmesi sonucu, iki veya daha fazla sarımın birbirine temas etmesi ile ortaya çıkan bir durumdur [42–44]. Belli sayıdaki sarımın kısa devre olmasıyla sargının o bölümünde yüksek genlikli bir kısa devre akımı oluşur. Bunun yanı sıra faz sargısı üzerinde kısa devre üzerinden tamamlanan devre neticesinde sargı indüktansında bir dengesizlik meydana gelmektedir. Kısa devre olan sarım sayısının, faz sargısı içerisindeki payı, yüzde olarak kısa devre arıza oranı ile ifade edilmektedir.

Elektrik makinalarının statorunda meydana gelen arızaların tespiti ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda sunulmaktadır. Bu arıza tipi elektrik makinalarında meydana gelen yaygın arızalardan olduğundan araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Ayrıca SMSM’lerde meydana gelen stator arızalarının genellikle küçük boyutlardaki sarımlar arası kısa devre arızalarının giderek yayılmasına bağlı olarak geliştiği ile ilgili, çok sayıda çalışma olduğundan bu tez çalışmasında bu tür arızaların tespitine ve arıza şiddetinin belirlenmesine yönelik çalışılmıştır.

2.1. Elektrik Makinalarının Statorunda Meydana Gelen Arızalar ile İlgili Çalışmalar

Elektrik makinalarının stator sarım arızası üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır [27, 47, 48, 51]. Bunlardan T.W. Thomson ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada asenkron motor arızalarını tespit etmek için Motor Akım İmza Analizi (Motor Current Signature Analysing-MCSA) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem genellikle kısa devre sarım arızası, rotor çubuğu kırığı arızası, eksen kaçıklığı ve diğer mekanik arızaları tespit etmek için etkili durum izleme yöntemlerinden biridir [9]. MCSA yönteminin üstün yönleri; uygulanan yükten ve diğer dengesizliklerden etkilenmiyor olması ve ayrıca meydana gelen elektriksel veya mekanik arızalar nedeniyle gerilim kaynağı frekansı etrafında oluşan harmonik bileşenlerinin daha görünür hale gelmesidir [57, 58].

[47]’de motoru süren bir VSI’nin altı anahtarının aktif durumunun istatistiksel dağılımı CCVSI sürücülü motor uygulamalarında sarım arızasının imzası olarak önerilmektedir. Ancak bu çalışmada VSI’nin karakteristiği yeterince göz önüne alınmamıştır zira yük osilasyonundan veya inverterin nonlineerliğinden (doğrusal olmayışından) kaynaklı olarak altı anahtarın istikrarsız veya dengesiz çalışması söz konusu olabilmektedir. Bu nedenle bu yöntem kullanılacak ise bu tür durumlar dikkate alınmalıdır.

Bir diğer sarım arızası tespit yöntemi makinanın terminal gerilimlerine yüksek frekanslı bir taşıyıcı sinyalin enjekte edilmesidir [48]. Bu yöntem sarım arızasının tespiti için yüksek frekanslı negatif akım bileşeninin kullanılmasını esas almaktadır. Bu yöntem sürücünün ideal olmamasından ya da nonlineer çalışmasından olumsuz olarak etkilenmediği halde karmaşık ve zor hesaplamalar gerektirmektedir.

[49]'da uzay vektör domenindeki zamanla değişen bir sinyalin gözlemlenmesine dayanan veri adaptasyon yöntemi önerilmektedir. Bu önerilen yöntem, zamanla değişen bir sinyaldeki her frekans bileşeninin ister saat yönünde isterse saat yönünün tersinde dönsün referans çatıdaki bir dc bileşenmiş gibi gözlemlenmesi fikrine dayanmaktadır. Bu prensip zamanla değişen bir sinyalin spesifik (belirli) frekans bileşenlerinin daha basit ve kolayca elde edilebileceğini sağlamaktadır.

Bir sürücüdeki doğal asimetriyi gidermek ya da etkisini telafi etmek için yapay sinir ağı tabanlı look-up tabloları kullanılmaktadır [50, 51]. Bu iki yöntem, doğal sürücü asimetrisi olan sistemlerdeki motorların sarım arızasının tespitinde hassasiyeti attırabilecek yöntemlerdir. Ancak bunun için nöronların eğitim aşaması için genellikle motorun tüm çalışma koşullarındaki çok sayıda ve yoğun verileri alınması gerekmektedir.

Sarımlar arasında bir kısa devre oluşması, bir makinada ortadan kaldırılması ve tespit edilmesi oldukça zor olan, en kritik ve önemli arıza türüdür [46]. Stator sarım arızaları genellikle yalıtım arızası ile ilgilidir. Sarımlar arası kısa devre arızasının akım, gerilim, eksenel akı ve $d-q$ gerilim ve akım bileşenlerinin analizine bağlı birçok tespit yöntemi mevcuttur [52, 53]. Durağan olmayan sinyallerin frekans içeriklerini analiz etmenin en iyi yolu bu amaçla geliştirilen çok sayıda zaman-frekans analizi yöntemlerini kullanmaktır [54, 55]. Güçlerin Ayırıştırılması Tekniği (Power Decomposition Technique-PDT) sinyallerin pozitif ve negatif bileşenleri ölçmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu bileşenlerin değişimi ile motorun dengesizlik durumlarının izlenmesi motoru analiz etmek için uygun bir araçtır. Motorun negatif bileşeninin değişimi motor stator kısa devre arızasının tespitinde kullanılabilmektedir [56].

[57]'de asenkron motorun stator kısa devre arızasının tespitinde Park-Hilbert dönüşümlerinden elde edilen 5 farklı arıza imzaları kullanılmaktadır. Bu çalışmada arıza imzaları olarak $2f_s \pm f_r$, f_s ve $f_s \pm f_r$ kullanılmaktadır. Arıza şiddeti ve yük miktarı arttıkça bu arıza imzalarının daha belirgin olduğu vurgulanmaktadır.

[58]'de %25 ve %40 stator kısa devre arıza şiddetine sahip asenkron motorun arıza tespitinde arızanın meydana geldiği sargı üzerindeki sıcaklık artışının kızılötesi termal görüntüleri kullanılması deneysel olarak yapılmıştır. [59]'da ise stator kısa

devre arızası, kırık rotor arızası ve rulman arızası olan asenkron motorun 3 farklı arıza türü için kızılötesi termal görüntüleri elde edilmiş ve bu görüntüler arıza türünü belirleyen yapay sinir ağı ve kNN sınıflandırıcılarda arıza imzaları olarak eğitimde kullanılmıştır. Buna göre eğitilen her iki sınıflandırıcı sonucunda arıza türü %100 doğrulukla belirlenebilmektedir.

[60]'da asenkron motorun akım sinyallerinin örneklendirilmesine dayanan ve Multi-agent System (MAS) olarak isimlendirilen bir arıza tespit algoritması önerilmiştir. Bu algorithmada, arıza imzası olarak kullanılan stator akımlarının zaman eksenindeki değerleri normalize edilerek, eğitilen sınıflandırıcı ile yapılan arıza tespitinin %90 üzerinde bir başarı yakaladığı bildirilmektedir.

[61]'de asenkron motorun şekilsel gerilim zarfı ile şekilsel akım zarfı ve bunların birbiriyle olan oto korelasyonu göz önüne alınarak stator kısa devre arıza tespiti yapılmaktadır. [62]'de ise asenkron motorun stator kısa devre arıza tespitinde ani güç imzası kullanılmıştır. Burada %10 kısa devre arızalı motor akım sinyallerinin spektrumu incelendiğinde $2f_s \pm f_r$ ve $4f_s \pm f_r$ harmonik bileşenlerinden arızanın tespit edildiği bildirilmiştir.

[63]'te dalgacık dönüşümü (wavelet) ile kısa devre arıza tespiti yapılmış ve asenkron motorun üç faz stator akımlarının d1, d4 ve d5 dalgacık paketlerindeki arızaya bağlı değişimler ile arıza indeksleri elde edilmiştir. Bu arıza indeksleri kullanılarak eğitilen yapay sinir ağı ile arıza tespitinin %99 doğrulukla yapıldığı ifade edilmiştir.

[64]'de kısa devre arızalı bir asenkron motordan elde edilen ses sinyallerinin ses kartı ile toplanıp sağlıklı bir motorunki ile kıyaslanarak arıza tespiti yapılmıştır. Analog olarak alınan ses sinyallerinin FFT ile işlenerek, elde edilen arıza imzaları, kNN sınıflandırıcı ile eğitilmiş ve arıza tespitinin %96 doğrulukla yapıldığı bildirilmiştir.

[65]'te asenkron motorun stator kısa devre arızasının Park dönüşümü kullanılarak elde edilen uzay vektör akım ve gerilim negatif bileşenlerinden elde edilen admitansların dengesizliğinden tespit edilebildiği bildirilmektedir. Burada eşitlik (2.1)'de gösterildiği gibi negatif akım ve gerilimler, admitansların elde edilmesinde kullanılmıştır.

$$\begin{aligned}
I &= i_d + j\dot{i}_q \\
&= I_p \varepsilon^{j\omega t} + I_n^* \varepsilon^{-j\omega t} \\
&= Y_p V_p \varepsilon^{j\omega t} + Y_n^* V_n^* \varepsilon^{-j\omega t}
\end{aligned} \tag{2.1}$$

Elde edilen admitans matrisleri, sağlıklı ve arızalı durumlar ile karşılaştırılarak arıza tespiti yapılabilmektedir [65].

[66]'da %1, %3, %5 ve %10 stator kısa devre arıza oranlarına sahip asenkron motorların üç faz akım sinyallerinin her bir periyodu zaman domeninde 100 eşit parçaya bölünülerek, her bir bölüme ait genlik değerleri ile yapay sinir ağları, destek vektör makinası ve bulanık sınıflandırıcılar eğitilmiş ve arıza tespiti yapılmıştır.

[67]'de asenkron motorun durum izlemesi için endüstri onaylı örüntü gözlem algoritması (PSA) ve genetik algoritma (GA) kullanılmıştır. Burada arıza tespit sistemi ve stator sargılarındaki arıza koşulları η_f ve θ_f olarak simgelenen iki özgün parametre ile karakterize edilmiştir. Bu parametrelerden η_f arıza şiddetini, θ_f ise arızanın yerini ifade etmektedir. Burada ifade edilen parametreler kullanılarak yapılan arıza tespit algoritmasına parametre tahmin metodu denilmektedir. η_f ve θ_f olarak simgelenen iki özgün parametre, oluşturulan matematiksel modellerde endüktans matrisinde eşitlik (2.2)'de belirtildiği gibi kullanılmış ve Matlab/Simulink'te oluşturulan benzetim modelinde arıza tespiti yapılmıştır.

$$L_{sf} = \eta_f L_p \begin{bmatrix} \cos(\theta_f) \\ \cos(\theta_f - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_f + 2\pi/3) \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

Burada L_p ortak indüktans matrisini temsil etmekte olup L_{sf} arıza koşullarındaki stator indüktans matrisi olarak tanımlanmaktadır.

[68]'de asenkron motorun stator fazlarından elde edilen akım sinyallerinin birbirleri ile olan ilişkisine ve benzerliğine dayalı olan ortak bilgi (MI) tabanlı bir arıza tespit yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemle göre sağlıklı motorlardan elde edilen akım sinyallerinin zaman domenindeki örüntüsü ile %1, %3, %5 ve %10 oranında stator kısa devre arıza şiddetlerine sahip, asenkron motorlardan elde edilen akım sinyallerinin zaman domenindeki örüntüleri karşılaştırılmaktadır. Bu akım

sinyallerinin benzerlik ilişkisi yapay sinir ağında eğitilerek bir arıza tespit sınıflandırma algoritması elde edilmektedir. Yapılan testler sonucunda bu algoritmayla %93 doğruluk başarı oranı ile arıza tespiti yapılmıştır.

[69]'da üç fazlı bir asenkron motorun stator kaynaklı kısa devre arızalarının tespiti temel bileşen analizi (PCA) yöntemi kullanılarak elde edilen katsayılar ile yapay sinir ağı tiplerinden biri olan çok katmanlı algılayıcı (MLP) ile yapılmaktadır. Böylece %84 doğruluk oranına sahip bir başarı elde edilmektedir.

[70]'te stator kısa devre arızasının tespitinde akımın negatif bileşeninin kullanılması etkili bir yöntem olduğu ortaya konmuştur. Ancak sarım dengesizliği veya dengesiz besleme gerilimi gibi anormalliklerin de akımın negatif bileşenini etkilediği tespit edilmiştir.

[71]'de asenkron motorlarda sarımlar arası kısa devre arızasının tespiti için akımın negatif bileşen temel harmoniği ($-f$) ile birlikte stator faz akımının pozitif ve negatif 3. harmoniği ($\pm 3f$) kullanılmıştır. Burada stator sargı asimetrikliğinin sarım arızası ile karıştırılmaması için pozitif 3. harmonik ile negatif 3. harmoniğinin birlikte ele alınması gerektiği ifade edilmiştir.

[72]'de asenkron motorun stator arızasının tespiti için yapay zekâ tabanlı alternatif bir yaklaşım geliştirilmiştir. Ayrıca [73]'de asenkron motorun zaman domenindeki akım genlikleri kullanılarak rotor, stator ve rulman arızalarının tespiti için karar ağacı, destek vektör makinası, k-en yakın komşuluk yöntemi ve yapay sinir ağları gibi örüntü sınıflandırıcıları kullanılmıştır.

Sonuç olarak, sarımlar arası kısa devre arızalarının tespiti ve teşhisi alanında son yıllarda büyük gelişmeler elde edilmiştir. Stator sarım arızası, başlangıç aşamasında tespit edilirse, uygun bakım stratejisi ile arıza, felaket ve geri dönülmez bir boyuta ulaşmadan önlenebileceğinden, araştırmacılar için sarım arızalarının erken teşhisi ilgi çekici olmuştur.

2.2. SMSM'lerde Stator Sarım Arızasının Tespiti Üzerine Yapılan Çalışmalar

Stator sarım arızası, kısa devre sarımlarında aşırı ısı üretmesine yol açan büyük bir akım üretir. Bu ısı, kısa devre akımının karesiyle orantılı arıza şiddetini hızlandıran olumsuz bir etki yaratmaktadır [74]. Bu olumsuz etkisinden ötürü sarım

arızasının erken evrede tespit edilmesi motorun veya tüm sürücü sisteminin tamamen çalışamaz hale gelmesini önlemek için zorunluluk arz eder. Geleneksel sıcaklık ölçümü (termal) izleme yöntemleri bu amaçla kullanılamaz. Çünkü termal izleme yöntemleri sarım arızasından kaynaklanan ve motor geneline çok hızlı ilerleyen ve genişleyen sıcaklık artış bölgesini tespit etmede çok yavaş kalmaktadır. Üstelik stator sarım arızasının kesin pozisyonu öngörülebilir değildir. Arızaların makinanın elektriksel özelliklerindeki belirgin değişimleri yapılan yoğun araştırmalarla ortaya çıkarılmıştır. Bu nedenle sarım arızasının erken tespitine yönelik yöntemleri geliştirmek büyük bir ilgi konusu olmuştur [74, 70–85].

[86, 87]'de SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızasının tespitinde stator faz akımı spektrumundan yalnızca 5. harmonik veya 5. ve 7. harmonikleri kullanılmıştır. [88]'de SMSM'nin aynı tür arızanın tespitinde yalnızca faz akımı spektrumunun 9. harmoniği kullanılmıştır.

[89]'da SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızasının tespiti için yapılan benzetim ve deneysel çalışmalar sonucunda arızanın faz akım spektrumunun 0.25, 0.75, 1.25, 1.75, 2.25. harmonikleri gibi yan bantlarında, tespit edilebileceği belirtilmiştir.

Elektrik Motorlarındaki stator sarımlar arası kısa devre arızasının faz akımının 3. harmoniğinden tespit edilebileceği ilk kez 2008 yılında asenkron motor üzerinde yapılan çalışmada belirtilmiştir [90]. Söz konusu çalışmada yazarlar arızanın bir dengesizliğe neden olduğunu ve bu dengesizlik sonucu asenkron motorların faz akımlarının 3. harmoniğinde bir farklılık gözlemlendiğini bildirmişlerdir.

[91]'de SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızası, farklı sargı konfigürasyonlarına bağlı olarak faz akım spektrumunun 5., 7. ve 9. harmoniklerinin yanı sıra 3. harmoniklerinden de tespit edilmiştir.

Akımların negatif bileşenleri SMSM'nin akı asimetrisinden kaynaklanmaktadır. Akı asimetrisi de sarımlar arası kısa devre arızasından dolayı olduğundan bu arızayı tespit etmek için akımın negatif bileşenleri kullanılabilir. [92]'de SMSM'de meydana gelen faz-faz kısa devre arızasının tespitinde concordia örüntüsü adı verilen Park vektör yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşıma göre akım sinyalleri d ve q eksenlerine aktararak I_d ve I_q akımları elde edilmektedir.

Elde edilen bu akımların birbirine göre çizdirilerek oluşan örüntünün görüntüsünün analizi ile motorun arızalı veya sağlıklı olup olmadığı anlaşıldığı bildirilmiştir.

[93]'de %2 ile %25 arasındaki farklı oranlarda sarımlar arası kısa devre arızalarına sahip SMSM'lerden alınan akım sinyallerinin 3. ve 5. harmoniklerin en yüksek genlik değerleri kullanılarak 13 farklı arıza oranı durumu için bir yapay sinir ağı eğitilerek motorun arızalı olup olmadığı tespit edildiği bildirilmiştir. Ancak yapay sinir ağlarında sınıflandırma yapılırken veri setinin genişliği ve veri sayısının fazlalığı sınıflandırma güvenilirliğini arttıran önemli unsurlardandır. Diğer bir unsur ise sınıflandırma yapılırken çapraz doğrulama yapılarak sonuç alınmasıdır. Zira çapraz doğrulama yapılmadığı sürece sınıflandırmanın güvenilirliğinden söz edilemez. Dolayısıyla 13 adet veri seti olan bir ağın doğruluk oranı güvenilir bir sonuç vermemektedir.

[94]'de sarımlar arası kısa devre arızalı bir SMSM'nin pozitif akım bileşeninin 3. harmoniğinin temel harmoniğe bölümünden elde edilen oran ile arıza tespiti yapılabildiği bildirilmiştir.

[95]'de oluşturulan SMSM benzetim modelinden elde edilen üç faz stator faz akımlarına Park dönüşüm matrisi uygulanarak elde edilen dq-ekseni akımının (I_d , I_q) akımlarının 2. harmonik bileşeninin genliği kullanılarak %50 sarımlar arası kısa devre arızalı bir motorun arızalı olduğu tespit edilebildiğinden I_d ve I_q akımlarının 2. harmoniğinin arıza tespitinde kullanılabileceği bildirilmektedir.

[96]'da yine matematiksel model denklemleri kullanılarak elde edilen SMSM benzetim sonuçlarına göre, sarımlar arası kısa devre arızalarında kullanılabilecek ve en iyi sonuç veren arıza imzasının reaktif güç genliği olduğu bildirilmiştir. Reaktif güç genliğinin kısa devre arızasına bağlı olarak değiştiği ve mükemmel bir arıza tespit örüntüsü olarak kullanılabileceği vurgulanmıştır.

[97]'de bir SMSM'nin sarımlar arası kısa devre arıza tespitinin, motoru sürmek için kullanılan PWM inverter sürücünün anahtarlamaları sonucu meydana gelen dalgalanma akımı kullanılarak geliştirilen bir devre ile yapılmıştır. Bu yöntemde kuadratik ortalama (rms) detektörü ve band geçiren filtre kullanılmaktadır. Bu yöntem kullanılarak 5 fazlı bir SMSM'nin sarımlar arası kısa devre arızası tespit edilmiştir.

Literatürdeki neredeyse tüm çalışmalarda motorlardaki dengesizliği ve arıza neticesinde meydana gelen küçük değişimleri tespit edebilmekte kullanılabilecek imzalar belirlenmeye çalışılmaktadır. Ani güç ikinci dereceden harmoniği [77], hava aralığı momenti [78], negatif akım bileşeni [79], negatif empedans [80], sıfır gerilim bileşeni [83] ve bileşenlerdeki uyumsuz empedans matrisi [50, 74], bu imzalardan bazılarıdır.

Bunlar dışında son zamanlarda yapılan çalışmalarda ileri ve karmaşık matematiksel modeller gerektirmeyen akıllı sistemlerin (yapay zeka öğrenme algoritmalarının) arıza tespitinde ve arıza sınıflandırmasında kullanımının artması oldukça dikkat çekicidir. Bunlardan en yaygın kullanılan yöntemler yapay sinir ağları [72, 98], destek vektör makinası [99, 100], bulanık mantık [101, 102], karar ağaçları [103] ve hibrit sınıflandırıcı sistemleri [104, 105] olmaktadır.

2.3. Sonuç

Yapılan çalışmalarda stator sarım arızalarının tespitinde çok çeşitli yöntem ve algoritmalar önerilmiştir. Mevcut metotların çoğunda stator faz akımlarının analizi ile arıza tespiti yapılmaktadır. Bu tezde, daha önceki çalışmalarda arıza tespitinde ve arıza sınıflandırılmasında kullanılmayan bazı arıza imzaları ve yeni yaklaşımlarla uygulamalar sunulmaktadır.

3. TEZDE KULLANILAN YÖNTEMLER

Bu bölümde, tezde kullanılan yöntemler tanıtılmaktadır. Bu amaçla makinadan toplanan verilerin değişimleri analiz edilerek meydana gelebilecek şiddetli bir arızadan önce makinanın durumunu öngörebilmek ve bakım gereksinimlerini önceden sağlayabilmek amacıyla kullanılan ve durum izleme olarak literatüre giren yöntemler anlatılmıştır. Durum izleme ile arıza tespiti yapılabilmesi için, verilerin toplanarak sinyal işleme ile özellik çıkarma ve çıkarılan özelliklerden sınıflandırmada kullanılabilecek özellikleri belirleme, yani özellik seçimi ve son olarak arızanın şiddetinin belirlenebilmesini sağlayan sınıflandırma işlemi yapılmaktadır.

Özellik çıkarımı ve seçimi için kayıt edilen akım ve gerilim sinyallerinin işlenmesinde uzay vektör yöntemi ile negatif ve pozitif harmonik bileşenlerine ayırma yöntemi ve hızlı Fourier dönüşümü (FFT) ile spektral analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Arıza tespitinin yapılması ve şiddetinin belirlenmesi için ise çok katmanlı yapay sinir ağları (MLP), destek vektör makinası (SVM), k-en yakın komşuluk yöntemi (kNN), karar ağacı (DT) ve Random Forest (RF) yöntemleri kullanılmıştır.

3.1. Durum İzleme

Durum izleme, bir makinanın çalışma karakteristiğinin makinadan toplanan verilerin değişim trendine bakılarak meydana gelebilecek şiddetli bir arızadan önce makinanın durumunu öngörebilmek ve bakım gereksinimlerini önceden sağlayabilmek amacıyla kullanılan bir yöntem veya uygulama olarak tanımlanabilir. Makina durum izleme periyodik veya sürekli olarak yapılabilir [106].

Periyodik durum izlemede makina verileri, yalnızca belirli bir zaman aralığında portatif ve tak-çıkart sensörlerle yapılmaktadır. Bu izleme türü genellikle arıza tipi bilinen makinaların arızalarında kullanılır. Temel amaç arıza durumunu ve şiddetinin trendini kontrol etmektir. Diğer taraftan sürekli durum izleme, makina sistemine sabitlenmiş sensörlerden sürekli olarak veri toplanıp bu verilerin otomatik olarak analiz edilmesidir. Bu durum izleme tipi kritik ve hassas işler yapan makinalarda kullanılmaktadır [107].

Bir durum izleme sistemi aşağıdaki üç temel adımı içermelidir [26].

- Veri toplama
- Arıza tespiti
- Arıza teşhisi

3.1.1 Veri Toplama

Veri toplama, arıza tespitinin temel adımlarından biridir. Durum izleme verileri, sistemin durumuna ilişkin ölçümlerdir. Bu ölçümler akım ve gerilim sinyalleri, titreşim verisi, akustik ses verisi, yağ analizi verisi, sıcaklık, nem, basınç gibi veriler olabilir. Ultrasonik sensörler, mikro sensörler, akustik ses emisyon sensörleri, sıcaklık sensörleri gibi birçok sensör değişik tipteki verileri ölçmek ve toplamak için özel olarak tasarlanmıştır. Kullanılan sensörler izleme yöntemine ve makinanın arıza mekanizmasına bağılı olarak seçilmektedir [108].

Bu tezde, stator sargı kısa devre arıza tespiti için stator akım ve gerilim sinyalleri toplanmıştır. Bu amaçla akım ve gerilim sensörleri kullanılmıştır.

3.1.2 Arıza Tespiti

Arıza tespitinin amacı makinada olası bir başlangıç aşamasındaki arızanın var olup olmadığını belirlemek ve bununla ilgili gerekli olan doğru müdahaleler yapılmasına imkân sağlamaktır. Arıza tespitinde kullanılabilmesi için, özellik çıkarma yöntemi, zaman domeni, frekans domeni, ya da zaman-frekans domeni analizi gibi sinyal işleme teknikleri kullanılarak makinanın sağlıklı ve arızalı durum "imzaları" elde edilebilir [109].

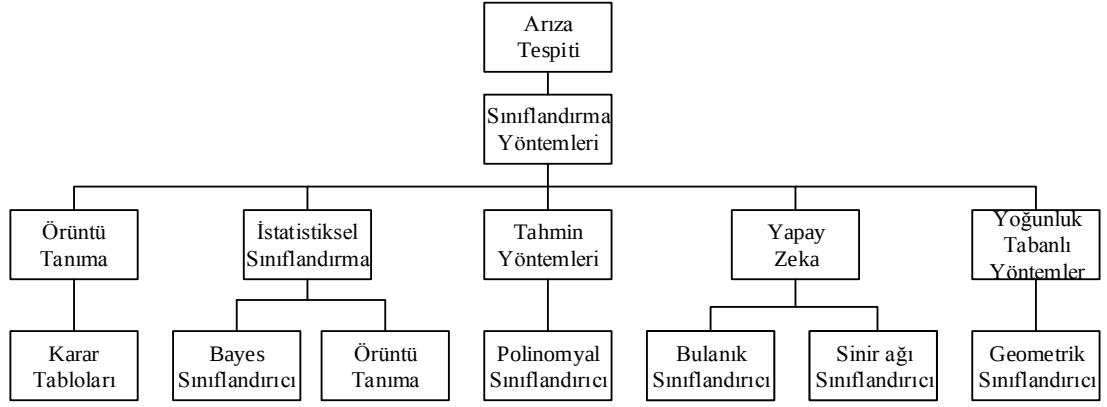
Arıza tespiti ve teşhisini kolaylaştırmak amacıyla toplanan verilerin faydalı bilgilerini ortaya çıkarmak için verilerin analizinde kullanılmak üzere çok sayıda sinyal işleme yöntemi geliştirilmiştir. Seçilen sensörlere ve motor uygulamalarına bağılı olarak, çok sayıda sinyal işleme tekniğı içerisinde en uygun olanını seçmek oldukça önemlidir. En geniş kullanım alanı olan spektral analiz yöntemi hızlı Fourier dönüşümüdür (FFT). Arıza tespitinde spektral analizin kullanılmasının ana fikri, ilgilenilen belirli bir frekans aralığını veya tüm spektrumu yakından inceleyip analiz ederek sinyalden özelliklerin çıkarılmasıdır.

Frekans analizini sınırlayan tek şey, makinadaki arıza durumunda çok yaygın olan, durağan olmayan dalga sinyallerini analiz etmede yetersiz kalmasıdır. Çoğu SMSM uygulamalarında moment ve hız sabit değildir ve değişken çalışma koşullarında çalışmaktadırlar. Arıza tespiti ile ilişkili olan frekanslar genellikle temel frekans ile matematiksel olarak ilişkilidir (Yaygın olarak temel frekansın derecesi olarak ifade edilir).

Wavelet analizi veya Cohen sınıfı [110] gibi zaman-frekans dağılımları harmonik frekanslarını takip etmek için uygulanabilir [111]. Ancak çözünürlüğü arttırmak için bazı zaman-frekans dönüşümü tabanlı yöntemlerde, temel harmoniğin genliğinin, ilgilenilen harmoniklerin genliğinden çok daha büyük olması nedeniyle analiz edilen sinyalden temel harmoniği çıkarabilmek için, bir filtre kullanılması gerekebilmektedir. Ayrıca çoğu yöntem bir arıza imza indeksi elde edebilmek için her zaman aralığında geniş bir spektrum bandı, ya da tüm spektrum işlenir.

3.1.3 Arıza Teşhisi

Makina arıza teşhisi, arıza tespiti adımıyla elde edilen bilgilerin veya sinyal işleme adımının en olası arızanın tipi, büyüklüğü ve yerinin belirlenmesi yardımıyla ve beklenen etkilerinin analiz edildiği süreçtir [109]. Geleneksel olarak, arıza teşhisi spektral grafikler, spektrogram ve wavelet spektrogram gibi yardımcı grafik araçları kullanılarak çevrimdışı olarak ve bir analiz uzmanı tarafından manuel olarak yapılır. Bu nedenle bu işi yapan kalifiye ve bu konuda iyi yetişmiş teknisyenlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple yapılan son çalışmalarda otomatik arıza teşhisi büyük bir ilgi odağı haline gelmektedir. Otomatik arıza teşhisi işlenmemiş (ham) sinyallerden çıkarılan belirgin özellikler kullanılarak sinyallerin sınıflandırılması yoluyla yapılabilir. Şekil 3.1. arıza teşhis yöntemlerini göstermektedir [112].



Şekil 3.1 Arıza Teşhis Yöntemleri

3.2 Sinyal İşleme ve Spektral Analiz ile Arıza Tespiti

Motorlardaki arızaların tespiti genellikle MCSA ile yapılabilmektedir. Rulman arızası, rotor çubuğu kırığı arızası gibi çeşitli mekanik arızaları tespit etmek için çok sayıda MCSA tabanlı yaklaşımlar önerilmiştir. Stator gerilim dengesizliği ve sarım kısa devre arızası tespiti için de gelişmiş sinyal işleme teknikleri kullanılarak yine MCSA tabanlı yaklaşımlar önerilmektedir. Online stator akım izleme sistemi, motor arıza tespiti için kullanılmaktadır. Arıza tespitinde kullanılan analiz yöntemlerinin büyük çoğunluğu motor akım veya titreşim imza analizinde FFT tabanlı yöntemleri kullanılmaktadır. FFT analiz edilen sinyalin içeriğinde barındırdığı farklı frekans bileşenlerini verir.

Bu tezde, çok sayıda frekans bileşeni içeren sinyalleri analiz etmede kullanılan ve stator sarım arızasının tespitinde başarılı sonuçlar veren FFT tekniği kullanılmıştır. Sinyalleri analiz etmek için kullanılan en basit ve geleneksel yöntem FFT'dir. FFT, bir sinyalin farklı frekanslardaki enerji dağılımını gözleyebilmek için o sinyale uygulanan Fourier dönüşümü ile ifade edilebilir [113].

FFT yöntemi, sürekli mıknatıslı senkron motorların stator sarımlar arası kısa devre arızasının tespitinde motor terminallerinden ölçülen akım ve gerilim sinyallerinin spektrum analizinde oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Motor akım ve gerilim harmoniklerini izleyerek yapılan arıza tespiti uygulamalarında harmoniklerin elde edilmesi için sinyallerin zaman-frekans düzleminde analiz edilmesi gerekmektedir.

Motor akım ve gerilim sinyallerinin sürücü anahtarlamalarına, motor yükünün salınımına veya arızaya bağlı olarak içerisinde çeşitli dereceden harmonikler barındırdığından saf bir sinüs forumunda değildir. Bu nedenle motor akım ve gerilim sinyallerinin içeriğindeki harmonik bileşenlerinin frekans düzleminde incelenmesi ve arıza durumunda gösterdiği değişim miktarı ile motorun arıza şiddetinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu tezde sürekli mıknatıslı senkron motorun sağlıklı durumda ve farklı şiddetteki arıza durumlarında akım ve gerilim harmoniklerinin genliklerindeki değişim detaylı şekilde incelenmektedir.

3.2.1 Ayırık-Zamanlı Fourier Dönüşümü (DFT)

Ayrık zamanlı Fourier dönüşümü (DFT) ayrık-zamanlı sinyallerde harmonik veya frekans içeriğini matematiksel olarak hesaplayan bir yöntemdir. DFT analog sinyallerde mümkün olmayan ayrık sinyali analiz etme, manipüle etme ve sentezleme imkanı sağlar. DFT ayrık frekans domeni bileşenleri $X(m)$ cinsinden

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi nm/N} \quad (3.1)$$

olarak tanımlanır. Burada $x(n)$ analog zaman domeni sinyali $x(t)$ 'den örneklenen ayrık işareti, m ($m=0,1,\dots,N-1$) frekans domenindeki DFT çıkışının indisini, n ($n=0,1,\dots,N-1$) zaman domen indisini ve N giriş sinyalinin örnekleme sayısını ve DFT'deki frekans noktalarını belirtmektedir. DFT N tane örnekleme giriş sinyali için N tane eşit frekans noktası verir [114].

DFT sonucu elde edilecek farklı sinüslerin frekansları sinyal örnekleme frekansı f_s ve örnekleme sayısı N 'e bağlıdır. Böylece frekans domeninde her bir noktanın frekansı

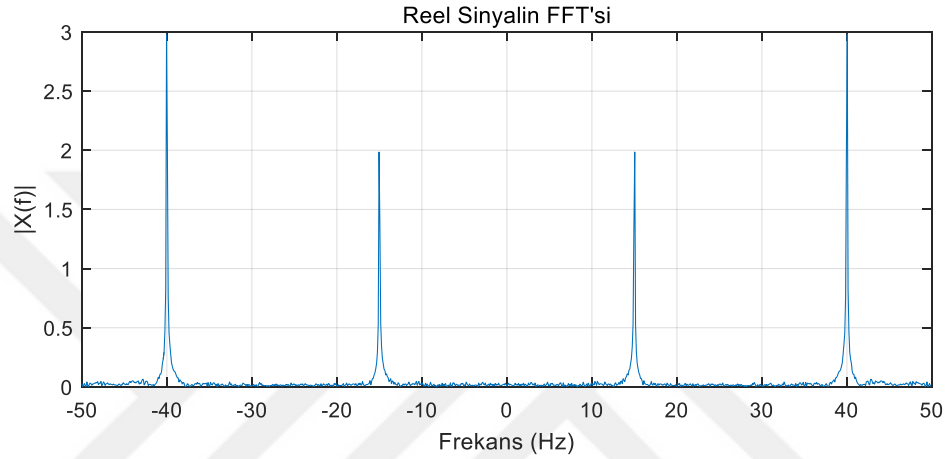
$$f(m) = \frac{mf_s}{N} \quad (3.2)$$

olur.

Denklem (3.1)'den görüldüğü gibi örnekleme sayısı N artıkça DFT hesaplaması verimli değildir. Uygulamada DFT yerine örnekleme sayısı 2'nin kuvveti olduğunda daha verimli bir yöntem olan Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) kullanılır. FFT aritmetik işlem sayısını büyük oranda azaltarak ($2N^2$ 'den $N \log_2 N$ 'e) gerçek hesaplamalarda avantaj sağlar.

3.2.1.1 Reel Sinyalin FFT'si

Şekil 3.2 $x(t) = 2\sin 2\pi 15t + 3\sin 2\pi 40t$ sinyalinin FFT'sini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi FFT spektrumu simetriktir. Bunun manası, eğer FFT N tane reel girişli sinyale uygulanırsa N tane farklı kompleks FFT çıkış terimi elde edilir. Ancak bunlardan ilk $N/2$ terim bağımsızdır. Yani negatif frekansta gösterilen terimler $(X(N/2+1))$ 'den $X(N-1)$ kadar olan terimler) ekstra bir bilgi içermezler [114].



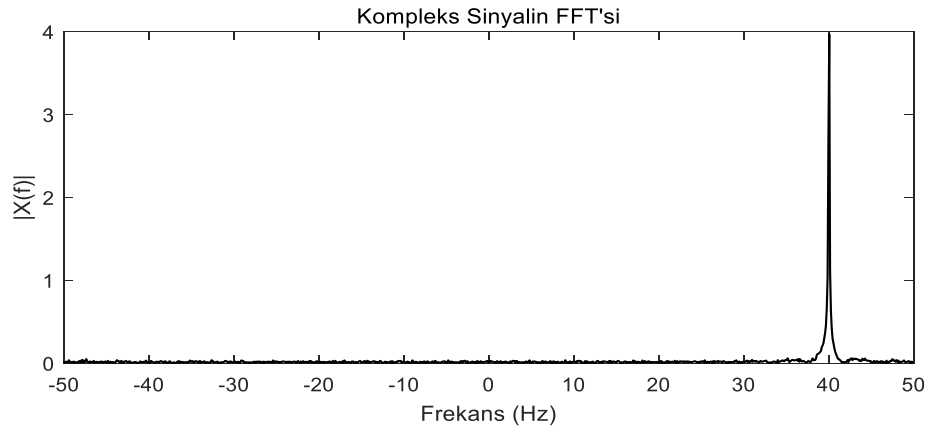
Şekil 3.2 Reel sinyalin FFT spektrumu.

3.2.1.2 Kompleks Sinyalin FFT'si

FFT giriş sinyali $x_c(n)$ 'nin

$$x_c(n) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi nk/N} \quad (3.3)$$

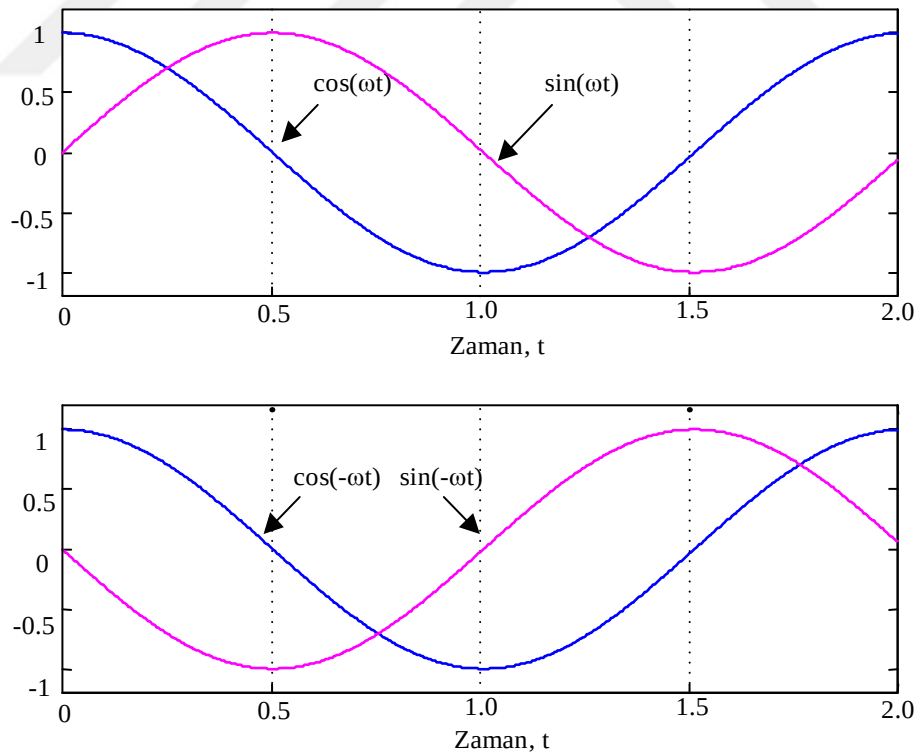
olduğunu varsayalım. Burada k , N tane örnek içinde oluşan toplam periyod sayısıdır. Şekil 3.3 $x_c(n)$ 'nin FFT sonucunu göstermektedir. Dikkat edilirse giriş sinyali kompleks olduğundan sadece ilk $N/2$ terim spektrumda mevcuttur [114]. Negatif frekansta gösterilen $(X(N/2+1))$ 'den $X(N-1)$ kadar olan terimler kompleks sinyaller için spektrumda yoktur [114].



Şekil 3.3 Kompleks sinyalin FFT spektrumu.

3.2.1.3 Negatif Frekans İçeren Kompleks Sinyalin FFT'si

Negatif frekans kavramı, pozitif frekansa göre tanımlandığında daha iyi anlaşılır. Şekil 3.4'te gösterildiği gibi radyan olarak negatif frekanslı sinüsün açısıl argümanı negatiftir.



Şekil 3.4 Sinüzoidal kompleks bir işaretin negatif ve pozitif yönde gösterimi [115].

Reel sinüzoidal sinyali kompleks vektör olarak göstermek için ω açısal hızı ile pozitif yönde dönen vektör ile $-\omega$ açısal hızı ile negatif yönde dönen vektör birleştirilebilir. Böylece kompleks vektörler Euler denkleminde

$$e^{\pm j\omega t} = \cos \omega t \pm j \sin \omega t \quad (3.4)$$

olur. Burada $\pm$ dönme yönünü göstermektedir. Sinüs ve kosinüs sinyalleri iki kompleks vektörün toplamı olarak ifade edilebilir.

$$\sin n\omega t = \frac{e^{jn\omega t} - e^{-jn\omega t}}{2j} \quad (3.5)$$

$$\cos n\omega t = \frac{e^{jn\omega t} + e^{-jn\omega t}}{2} \quad (3.6)$$

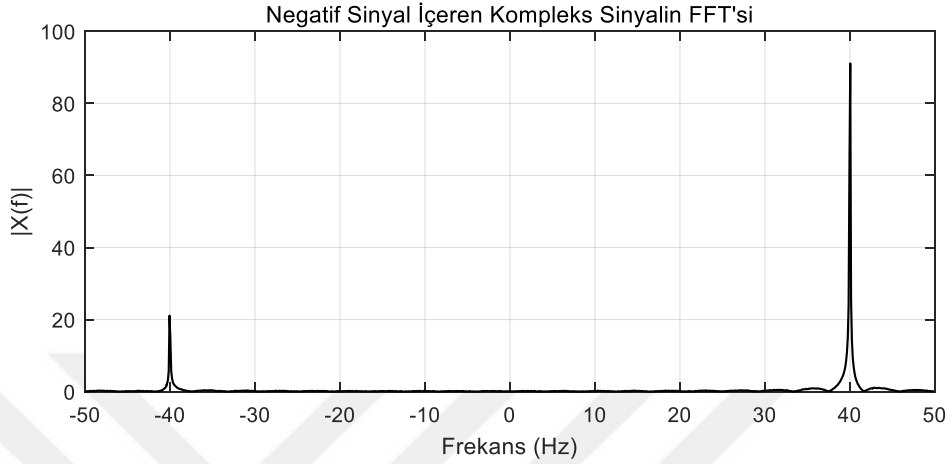
Kompleks vektör olarak ifade edilen reel sinyal için negatif frekans vektörün dönme yönünü belirtir.

Negatif frekans(lar) içeren kompleks sinyal FFT ile frekans domenine aktarıldığında negatif frekansta terim(ler)e sahip olacaktır. Sonuç olarak negatif ve pozitif frekanslar içeren kompleks sinyalin FFT'si hem pozitif hem de negatif frekans terimlerinden oluşacaktır. Bu durumda FFT spektrumundaki negatif ve pozitif sinyaller simetriden dolayı olmayıp birbirlerinin “ayna” görüntüleri değildir [114, 115].

AC motorlardaki gerilim ve akım dengesizlikleri motorda negatif ve pozitif akım ve gerilim bileşenlerinin oluşmasına sebep olurlar. Bu dengesiz akım ve gerilimleri pozitif ve negatif bileşenlerine ayırmak için simetrik bileşenler yöntemi kullanılabilir. Fakat bu sadece temel frekanstaki pozitif ve negatif bileşenleri verecektir [56]. FFT kullanılarak akım ve gerilimdeki tüm pozitif ve negatif bileşenleri bulmak mümkündür. Bunun için reel olan akım ve gerilim sinyalleri kompleks forma dönüştürülmelidir. Bu tezde akım ve gerilim sinyallerini kompleks forma dönüştürmek için bölüm 3.3’de anlatılan uzay vektörleri kullanılmıştır. Örneğin dengesiz 3-faz sinyaller (akımlar veya gerilimler)

$$\begin{aligned} x_a(t) &= 95 \sin(\omega t) \\ x_b(t) &= 100 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ x_c(t) &= 100 \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

ise bunların uzay vektörü $\mathbf{X}_s$ 'in FFT spektrumu Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi hem pozitif hem de negatif frekans bileşenlerinin değerlerini FFT spektrumundan elde etmek mümkündür.



Şekil 3.5 Negatif sinyal içeren kompleks sinyalin FFT spektrumu.

Bu tez çalışmasında akım ve gerilim sinyalleri kompleks düzleme aktarıldıktan sonra Fourier katsayıları analiz edilmektedir. Dolayısıyla kompleks işaretlerin hem pozitif hem de negatif harmonik bileşenleri elde edilerek incelenmiştir. Tez kapsamında negatif ve pozitif akım ve gerilim harmonik bileşenlerinin stator kısa devre arıza tespitinde etkisi incelenmiş olup hem pozitif hem de negatif akım ve gerilim harmonik bileşenlerinin arıza tespitinde ve arıza şiddetinin belirlenmesinde oldukça etkili arıza imzaları olduğu ortaya çıkmıştır.

3.3 Stator Kısa Devre Arızası Tespit Yöntemleri

3.3.1 Stator Akımının 3. Harmonik Genlik Değeri Değişimi Kullanılarak Arıza Tespiti

Yapılan çok sayıda ölçüm, izleme ve karşılaştırmadan sonra aynı hız ve yük durumundaki özdeş ancak farklı arıza şiddetine sahip motorlarda stator faz akımının 3. harmoniğinin arıza şiddetine bağımlı olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra aynı arıza şiddetine sahip farklı hız ve yüklenme durumlarında akımın 3. harmoniğinin değişimi de izlenmiştir. Bunun sonucunda da yüklenme miktarı yüksek olan aynı

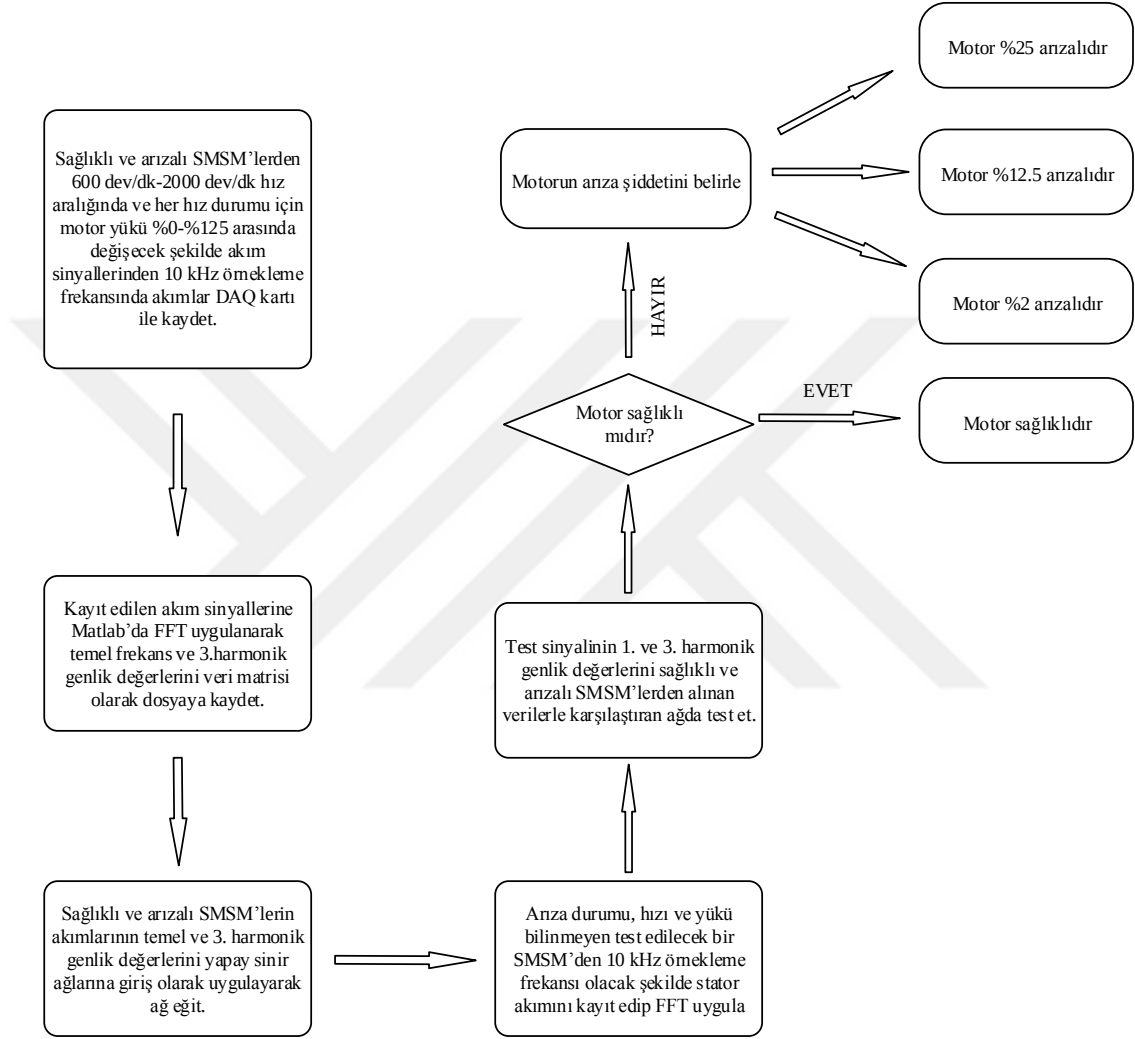
arıza şiddetine ve aynı hıza sahip motorlarda akımın 3. harmonik genliğinin yüklenme miktarı daha düşük olan motorun akımının 3. harmoniğinin genliğinden daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Yüklenme miktarı ile motor akımının 3. harmoniği arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Bu nedenle SMSM'deki stator sarımlar arası kısa devre arızasının stator faz akımının 3. harmonik genlik değişiminden otomatik tespiti ve arıza şiddetinin makina öğrenme algoritmaları kullanılarak otomatik olarak yapılması bu tezde önerilen yöntemlerden birisidir..

Bu kapsamda stator akım sinyalinin 3. harmonik genliği kullanılarak arıza tespiti ve arıza şiddetinin otomatik olarak belirlenmesi için aşağıdaki iş akış şeması kullanılmaktadır. Sınıflandırma giriş verisi olarak akımının 3. harmoniğinin ve akımın temel harmoniğinin genliği alınmıştır.

Öncelikle sınıflandırmada kullanılmak üzere geniş bir veri seti elde edilmelidir. Bu veri seti ne kadar fazla farklı durum içerirse sınıflandırma ağının sonucu da o kadar güvenilir olmaktadır. Bunun için sağlıklı, %2, %12,5 ve %25 sarımlar arası kısa devre arızasına sahip 600 dev/dk - 2000 dev/dk arasında her 100 dev/dk hız değişimi durumunda ve %0 - %125 yüklenme aralığında 8 farklı noktada çalışan SMSM'lerden 10 kHz örnekleme frekansında stator akım sinyalleri DAQ kartı ile kayıt edilmiş, dijital veriler olarak kayıt edilen sinyallere Matlab ortamında FFT uygulanarak giriş verisi olarak belirlenen 3. harmonik ($3f_s$) genliği ve temel harmonik genlik değerleri dosyaya kayıt edilmiştir. Burada temel harmoniğin (f_s) genlik değeri, doğrudan motorun yüklenme oranına bağlı olarak değiştiğinden bu çalışmada yükü temsil etmek için kullanılmaktadır. Elde edilen bu iki arıza imzası girişler olacak şekilde MLP, kNN, SVM, DT ve RF sınıflandırıcı ağları eğitilmiştir. Eğitilen bu sınıflandırıcı ağların başarıları karşılaştırmalı olarak sonuçlar bölümünde verilmektedir.

Bu çalışmada sınıflandırmanın doğruluğunu test etmek amacıyla kullanılan test verisi, tüm veri kümesi içerisinde %20 oranında ayrılarak eğitim yapılmaktadır. Yapılan eğitimin doğruluğunun pekişmesi açısından veriler 10 parçaya ayrılarak her eğitim döngüsü sırasında çapraz doğrulama (cross-validation) yapılmış ve böylece ağın güvenilirliğinin artırılması sağlanmıştır. Akım verilerinin motorların farklı yük ve farklı hız koşullarında çalıştırılarak elde edilmesi de motorun tüm çalışma koşullarındaki verilerini almayı sağlamaya yönelik bir strateji olarak benimsenmiştir. Böylece her yük ve hız koşulu için genelleme yapılabilir sonuçlar elde edilmesi

sağlanmıştır. Ayrıca farklı sınıflandırma metotları uygulanarak stator kısa devre sargı arızası için hangi metodun doğruluğunun daha yüksek ve güvenilir olduğu tespit edilmiştir. Böylece bu tür uygulamalarda hangi sınıflandırma algoritmasının daha başarılı sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Tüm bu iş ve işlemleri şematik olarak özetleyen iş akış şeması Şekil 3.6'da verilmektedir.



Şekil 3.6 Arıza tespitinin ve arıza şiddetinin stator akımının 1. ve 3. harmonik genliği ile yapılması iş-akış şeması

3.3.2 Uzak Vektör Negatif ve Pozitif Akım ve Gerilim Bileşenlerinin Harmonik Analizi

CCVSI sürücülü uygulamaların şebeke besleme gerilimli uygulamalarından en belirgin farkı bir kontrol algoritması ile işletilmesidir. CCVSI sürücülü makinaların akımları kontrollü olduğundan akım tabanlı sarım arızalarının tespit yöntemleri zayıf

kalmaktadır. Bunun anlamı, CCVSI sürücülü uygulamalarda sarım arızası imzası sadece sarım arızasına bağlı olmalı ve kontrol algoritması ile ilişkili olmamalıdır.

Stator sarım arızası AC makinaların fazında dengesizliğe sebebiyet vermektedir. Bu dengesizlik stator faz-nötr gerilimi ve hat akımlarında negatif bileşenleri meydana getirmektedir [79, 80]. Pozitif gerilim bileşeni ile negatif akım bileşeni arasındaki veya tam tersi olarak gelişen etkileşimden, ani gücün ikinci dereceden harmonikleri ortaya çıkmaktadır [77, 78]. CCVSI sürücü çıkış gerilimini ayarlayarak hat akımlarını referansı takip edecek şekilde ayarlamaya çalışmaktadır. Akım referansı mükemmel şekilde dengeli ve akım kontrolü mükemmel ise o zaman stator sarım arızası varsa bile herhangi bir negatif akım bileşeni gözlenmeyecektir, fakat bu durumda stator akımında görülmeyen negatif temel bileşen inverterin çıkış terminal geriliminde gözükcektir. Çünkü CCVSI, hat akımlarının simetrikliğini sürdürebilmesini sağlamak için negatif gerilim bileşeni enjekte edecektir. Ancak, bu yalnızca ideal durumda mümkündür. Pratikte hız kontrolörü sınırlı bir performansa sahiptir. Üstelik sarım arızasından kaynaklı ikinci dereceden harmonik içeren hız (konum) bilgisi hız kontrolörünün girişlerinden biridir. Eğer hız kontrolörü, kontrolör çıkışından (moment referansından) ikinci dereceden harmoniği gideremezse akım referansının simetrisi de bozulacaktır. Ayrıca, hız (konum) bilgisi *abc* sürekli durum referans çatısından senkron *d-q* referans çatısına dönüşümünde veya tam tersi dönüşümünde kullanılmaktadır. Buna ek olarak, akım kontrolörünün performansı pratikte ideal değildir. Bu sebeple CCVSI ile sürülen sarım arızasına sahip bir SMSM'nin kontrol algoritması bunu bastırmaya çalışsa bile halen negatif akım bileşeni gözlenebilmektedir. Ancak buradan sarım arızası nedeniyle ortaya çıkan negatif akım bileşeninin derecesi CCVSI sürücülü SMSM'nin hız ve akım kontrol performansından etkilendiği ortaya çıkmaktadır. Eğer hız kontrolörünün bant genişliği dönen hızın ikinci dereceden harmoniğinin oldukça altındaysa hız kontrolörünün çıkışı (moment referansı) *DC*'ye yakın olacak ve makinanın terminal gerilimlerinin temel bileşeni hat akımındaki negatif bileşenini domine edecektir. Diğer yandan eğer moment referansı (akım referansı) ikinci dereceden harmonik içeriyorsa o zaman negatif temel bileşen inverterin çıkış gerilimlerine ve hat akımlarına dağılacaktır. Bu gözlemlere dayanarak, sarım arızasına dayalı negatif gerilim bileşeni yöntemi [51]'de önerilmiştir.

Bu tez çalışmasında abc faz akım ve gerilim bileşenlerinin yerine, Park dönüşüm matrisi ile elde edilen d - q eksen bileşenleri SMSM stator sarımlar arası kısa devre arızasının tespiti için kullanılmıştır. Bu dönüşüm matrisi ile üç faz akım veya gerilim bileşenleri birbirlerine göre 90° faz farkı olan iki faz uzay vektör akım veya gerilim bileşenlerine dönüştürülür. Böylece akım uzay vektörleri ve gerilim uzay vektörleri elde edilir.

Ölçülen abc faz akımları ve gerilimlerini durağan referans çatı d - q eksenlerine dönüştürmek için denklem (3.8) ve denklem (3.9) kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} [i_a - 0.5(i_b + i_c)] \\ i_q &= \frac{\sqrt{3}}{3} (i_b - i_c) \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} v_d &= \frac{2}{3} [v_a - 0.5(v_b + v_c)] \\ v_q &= \frac{\sqrt{3}}{3} (v_b - v_c) \end{aligned} \quad (3.9)$$

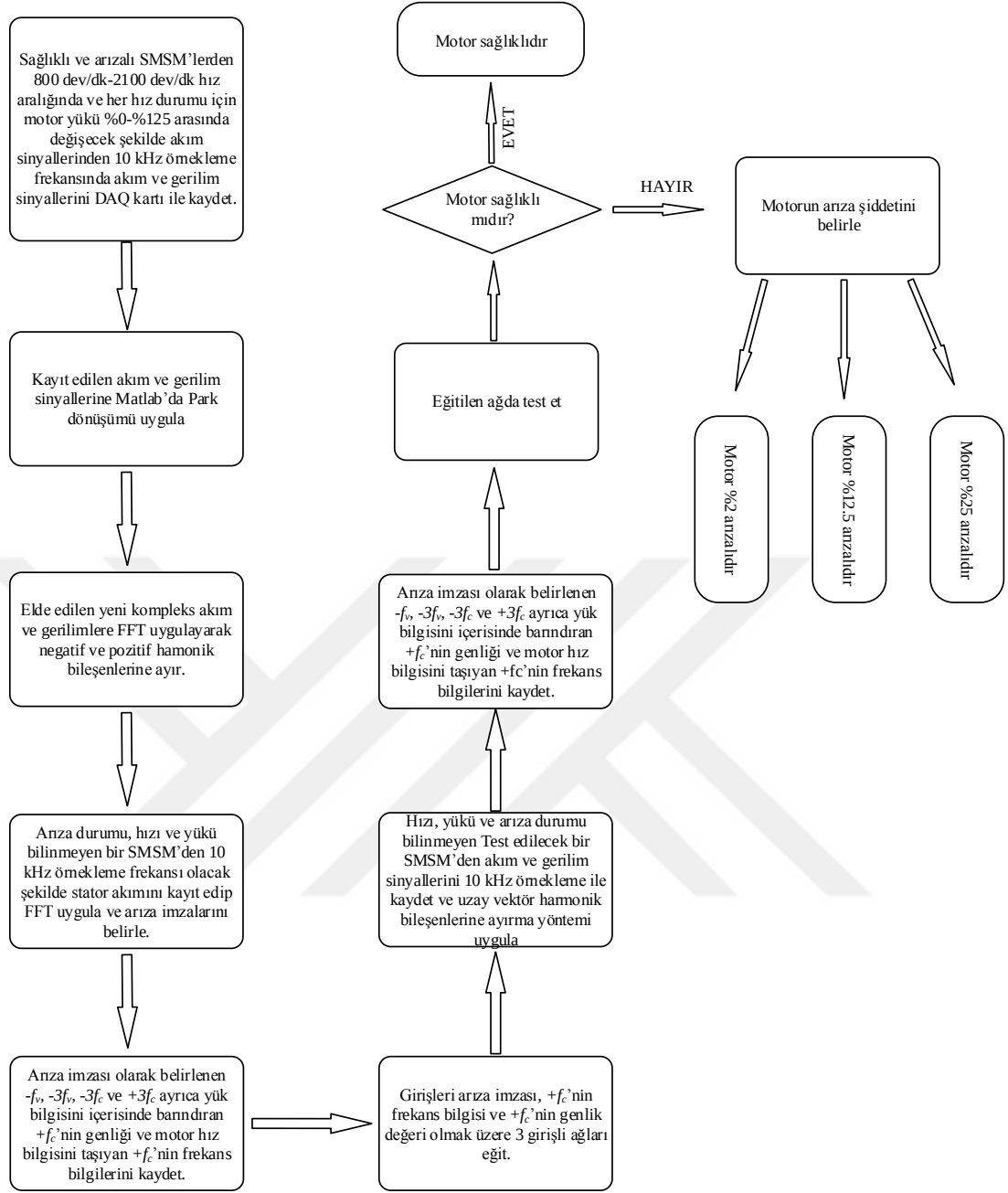
Park dönüşüm matrisi kullanılarak elde edilen akım ve gerilimlerin d ve q eksen bileşenleri (i_q , v_q ve i_d , v_d) ile denklem (3.10)'dan yararlanılarak $\mathbf{I}_{sv}$ ve $\mathbf{V}_{sv}$ olarak isimlendirilen yeni kompleks akım ve gerilim uzay vektörleri elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{sv} &= I_d + jI_q \\ \mathbf{V}_{sv} &= V_d + jV_q \end{aligned} \quad (3.10)$$

Elde edilen bu kompleks akım ve gerilim uzay vektörlerine FFT uygulanarak hem pozitif hem de negatif harmonik bileşenleri analiz edilmiştir. Yapılan detaylı analizler sonucunda, SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızası durumunda bazı harmoniklerinin genliğinde ciddi biçimde değişim meydana gelmekte olduğu, bazı harmoniklerde ise nispeten daha küçük değişimler meydana gelmekte olduğu izlenmiştir. Stator sargılarındaki arıza şiddetinin artması ile söz konusu harmonik genliklerinin de arıza şiddetinin artışına paralel yönde değiştiği tespit edilmiştir. Elde edilen bu harmoniklerin arıza imzası ve harmonik genliklerindeki değişim miktarlarının da arızanın şiddetinin belirlenmesinde kullanılabileceği sonucuna varılmaktadır.

SMSM'nin yükü, hızı ve stator akım ve gerilim sinyallerinin negatif ve pozitif harmonik bileşenleri kullanılarak arıza tespiti yapılması ve arıza şiddetinin belirlenmesi için Şekil 3.7'deki iş akış şeması kullanılmaktadır. Sınıflandırma başarısının yüksek ve ağ sonucunun güvenilir olabilmesi için mümkün olabilecek en geniş hız ve yük aralıklarında alınacak arıza imza verileri ile geniş bir veri seti elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle sağlıklı, %2, %12,5 ve %25 sarımlar arası kısa devre arızasına sahip 800 dev/dk -2100 dev/dk arasında her 100 dev/dk'lık hız değişimi durumunda ve %0 - %125 yüklenme aralığında 8 farklı noktada çalışan SMSM'lerden, 10 kHz örnekleme frekansında 3 akım ve 3 gerilim sinyali olmak üzere, 6 analog kanaldan, DAQ kartı ile sinyaller 2 saniye süresince kayıt edilmiştir.





Şekil 3.7 Arıza tespiti ve arıza şiddetinin uzay vektör akım ve gerilimlerinin pozitif ve negatif harmonikleri ile yapılması iş-akış şeması

Akım ve gerilim uzay vektörlerinden FFT yardımıyla harmonik bileşenleri elde edilmiş, bu bileşenlerden arıza imzaları olarak tanımlanan negatif gerilim bileşeninin temel harmonik genlik değeri ($-f_v$), negatif gerilim bileşeninin 3. harmonik genlik değeri ($-3f_v$), negatif akım bileşeninin 3. harmonik genlik değeri ($-3f_c$) ile pozitif akım bileşeninin 3. harmonik genlik değerinin ($+3f_c$) yanı sıra, pozitif akım bileşeninin temel harmoniğinin genlik değeri ile pozitif akım bileşeninin temel harmoniğinin

frekans değerleri dosyaya kayıt edilmiştir. Burada pozitif akım bileşeninin temel harmoniğinin genlik değeri, doğrudan motorun yüklenme oranına bağlı olarak değiştiğinden bu çalışmada yükü temsil etmek için, pozitif akım bileşeninin temel harmoniğinin frekans değeri ise doğrudan motor hızına bağlı olarak değiştiğinden motor hızını temsil etmek için kullanılmaktadır.

3.4. Arıza şiddetinin Otomatik Olarak Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler

Elektrik Makinalarının arıza tespiti ve arıza tespitinde kullanılan özelliklerin bir sınıflandırıcıda eğitilerek arıza tespitinin otomatik olarak yapılması üzerine yapılan çalışmalar gittikçe popüler hale gelmektedir. SMSM'lerin stator kısa devre arızasının tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesine yönelik olan bu tezde arıza tespitinde etkin olan sinyal özellikleri belirlenmiştir. Hem arızanın tespitinde hem de arıza şiddetinin belirlenmesinde kullanılabilecek bu özellikler ile motorun farklı yük ve hız durumlarında, arıza şiddetinin seviyesine göre karakteristik özellikler belirlenmiştir. Bu karakteristik özelliklerin arıza şiddetine göre değişim miktarı sınıflandırıcı ağlarda eğitim ve test verileri olarak kullanılması, sınıflandırmanın başarısında etkili olmaktadır. Bu tezde arıza tespiti ve arıza şiddetinin otomatik olarak belirlenmesi amacıyla çok katmanlı yapay sinir ağları (MLP), destek vektör makinası (SVM), k-en yakın komşuluk yöntemi (kNN), karar ağacı (DT) ve Random Forest (RF) gibi örüntü tanıma (T) yöntemleri ve algoritmaları kullanılmıştır. Bu yöntemlerin sınıflandırmadaki başarıları karşılaştırmalı olarak sonuçlar bölümünde sunulmuştur.

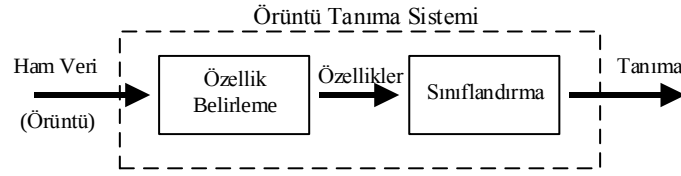
Bu tezde bir SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızasının tespiti ve arıza şiddetinin otomatik olarak belirlenmesi için birbirinden farklı sınıflandırıcılar kullanılmaktadır. rnt Tanıma ile sınıflandırma genellikle biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılsa da, son yıllarda motor arızalarının tespit uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. rnt tanımayı anlamak için örüntünün ne olduğunu bilmek gerekmektedir.

rnt, ilgilenilen varlıklar ile ilgili gözlenebilir veya llenebilir bilgilere verilen addır. Ses sinyali, uzaktan algılama verisi, insan yüzü, retina, parmak izi, bir metin içerisindeki karakterler veya motordan elde edilen işaretler (akım, gerilim, titreşim vb), örüntüye dair bazı örneklerdir. Gerçek dünyadaki bu örüntüler,

genellikle ilgilenilen verilerin nicel tanımlama şekilleridir [116]. Örüntü tanıma, insanların çeşitli ses, görüntü ve benzeri tüm örüntülerin biçimsel şekillerinden çıkardıkları dilsel şekillendirmedir. Aslında, örüntü tanıma bilimin, mühendisliğin ve günlük hayatın geniş bir alanındaki etkinlikleri kapsamaktadır. Örüntü tanıma uygulamalarını insanların yaşantısında da görebiliriz: hava değişimin algılanması, binlerce çiçek, bitki, hayvan türünü tanımlama, kitap okuma, yüz ve ses tanıma gibi bulanık sınırlara sahip birçok etkinlikte örüntü tanıma kullanılır. İnsan örüntü tanınması, geçmiş tecrübelerle dayalı öğrenme esaslıdır. Daha önce karşılaşılan örüntü tanıma olaylarını yaşanan tecrübeler ışığında değerlendirebilme olanağı sağlayabilmektedir. Örneğin belirli bir sesi tanımak için kullanılan kuralları tanımlamak mümkün değildir. İnsanlar bu işlemlerin birçoğunu oldukça iyi yapmalarına rağmen, bu işlemleri daha ucuz, iyi, hızlı ve otomatik olarak makinaların yapmasını arzularlar. Örüntü tanıma, akıllı ve öğrenebilen makinaları gerçekleyebilmek amacıyla ortaya çıkan çok disiplinli bir mühendislik yöntemidir [116].

Örüntü tanıma olayı şu şekilde tanımlanabilir: Aralarında ortak özellik bulunan ve aralarında bir ilişki kurulabilen karmaşık işaret örneklerini veya nesneleri bazı tespit edilmiş özellikler veya karakterler vasıtası ile tanımlama veya sınıflandırmadır. Bu bağlamda, örüntü tanımanın en önemli amaçları; bilinmeyen örüntü sınıflarına belirli bir şekil vermek ve bilinen bir sınıfa ait olan örüntüyü teşhis etmektir [116]. Örüntü tanıma olarak bilinen uygulamalar, makina öğrenmesi, örüntü sınıflandırma, ayırım analizi ve nitelik tahmini gibi isimlerle de anılmaktadır.

Genel bir örüntü tanıma sistemi, Şekil 3.8’de gösterildiği gibi 2 temel aşamadan oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla özellik belirleme ve sınıflandırma aşamalarıdır. Özellik belirleme aşaması, elektronik algılayıcılarla toplanmış olan ham örüntüyü karakterize eden, özelliklerinin elde edilebilmesi için çeşitli dönüşüm tekniklerinin gerçekleştirildiği süreçtir. Sınıflandırma aşaması ise özellik belirleme süreci sonucunda örüntüden elde edilen özellikleri kullanarak, bir karar verme mekanizması (sınıflandırıcı) yardımıyla örüntünün ait olduğu sınıfın belirlendiği süreçtir.



Şekil 3.8 Bir örüntü tanıma sistemi blok diyagramı.

Özellik belirleme aşamasında amaç, çevreden algılanan yüksek boyutlu ham örüntüyü karakterize edebilen, kararlı, ölçülebilir ve mümkün olduğunca daha küçük boyutlu bir bilgi ile temsil edebilmektir. Bu süreç sonucunda ham örüntüden elde edilen bu nitelikteki bilgiye özellik vektörü adı verilir. Özellik belirleme sürecinde, ham veriyi temsil eden bu özellik kümesi elde edilirken aslında birbiriyle ilişkili üç aşamalı bir yol izlenir. Bunlar:

- **Ön işleme:** Özellik belirleme sürecinin ilk aşamasını oluşturur. Bu aşamada gerektiğinde örüntü filtrelenir, bölütlere ayrılır, çeşitli gösterim teknikleri kullanılarak işlenir, bileşenlere ayrılır veya modellenir [116].
- **Özellik çıkarma:** Özellik çıkarımı, en basit ifadeyle ön işleme aşaması sonucunda yeniden düzenlenen örüntünün boyut indirgeme işlemlerinin gerçekleştiği aşamadır. Sınıflandırılacak bir örüntü genellikle çok fazla miktarda ve gereksiz bilgi içerir. Bu durum, sınıflandırma hassasiyetini düşürürken işlem süresini de yükseltir. Bu olumsuzluğu gidermek için, örüntü bilgisi daha az miktardaki başka bir veriye dönüştürülür. Örüntüye ait fazla ve gereksiz verinin elenip, sadece örüntüyü temsil eden ve toplam veriden çok daha az sayıdaki karakteristik bilginin elde edildiği bu dönüşüme özellik çıkarma adı verilir. Karakteristik özelliklerin çıkarımı, örüntü tanıma sistemlerinin kritik tasarım aşamalarından biridir. Çıkarılan özelliklerin ayırt edici ve mümkün olduğunca az sayıda olması, tanıma işleminin daha basit sınıflandırıcılarla, daha yüksek hassasiyetle ve daha kısa sürede gerçekleştirilmesini sağlar [117].
- **Özellik seçme:** Özellik çıkarma işlemleri sonucu örüntüden elde edilen özellik kümesi ile örüntünün boyutu büyük oranda küçültülür. Ancak elde edilen bu özellik kümesi içerisindeki bazı özellikler örüntü ile ilişkisiz olabileceği gibi bazı özellikler de örüntüyü temsil etmede fazlalık teşkil edebilir [118]. Gereksiz olan ve fazlalık teşkil eden bu özellikler kullanılacak sınıflandırıcının genelleme ve ayrıştırma yeteneğini olumsuz yönde etkiler. Özellik seçme aşaması ile özellik

kümesinden bu tür istenmeyen özelliklerin çeşitli yöntemler kullanılarak arındırılıp daha iyi bir özellik alt kümesi bulunması amaçlanır.

Bilinmeyen bir örüntüyü tanıyabilmek için özellik belirleme aşamasından sonra sınıflandırma işlemi yürütülür. Sınıflandırma, bilinmeyen bir örüntünün hangi sınıfa dâhil olduğunu, o örüntüye ait özellikleri giriş olarak kullanan bir sınıflandırıcı yardımıyla belirleme işlemidir. Sınıflandırma işlemi temel olarak iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, ilgilenilen örüntü sınıflarından elde edilen özellik verileri ile sınıflandırıcı eğitilerek bir karar mekanizması oluşturulur. İkinci aşamada ise herhangi bir örüntü sınıfından elde edilen özellik verisi eğitilen sınıflandırıcı girişine verilerek bunun hangi sınıfa dâhil olduğuna karar verilir.

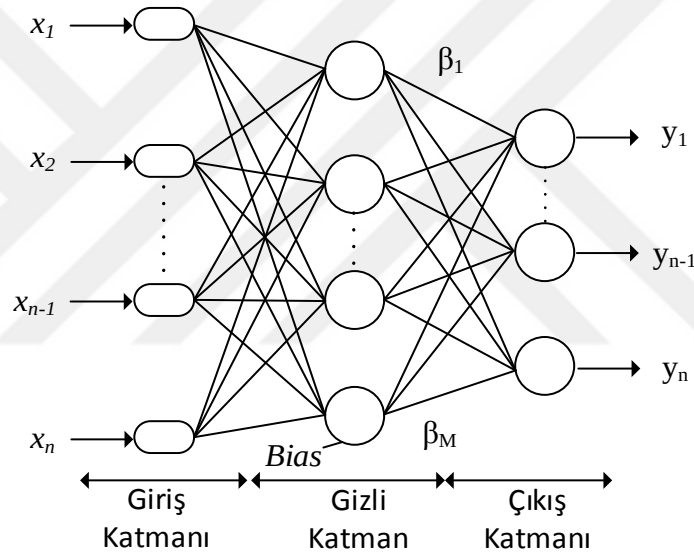
Sınıflandırma yöntemleri kullanılan öğrenme stratejisine göre genel olarak iki grupta incelenir: Güdümlü ve güdümsüz öğrenme. Güdümlü öğrenmede, ilgilenilen örüntüler ve bu örüntülerin ait olduğu sınıflar arasında bir model oluştururken eğitme işlemi sırasında ilgilenilen örüntü sınıflarının belirlenmiş özellikleri ile birlikte bu örüntülerin ait olduğu sınıflarda (etiketlerde) sınıflandırıcıya gösterilir. Güdümsüz öğrenmede ise sınıflandırıcıya eğitim esnasında sadece ilgilenilen örüntülerin belirlenmiş özellikleri gösterilerek bunlar arasındaki benzerlik, uzaklık gibi fonksiyonlar kullanılarak bir model oluşturulur.

3.4.1 Çok Katmalı Yapay Sinir Ağı ile Sınıflandırma

SMSM'nin akım ve gerilimlerinden elde edilen sağlıklı ve arızalı motorları birbirinden ayırmak ve arızalı motorun arıza şiddetini belirlemek için tespit edilen arıza imaları ile eğitilen çok katmanlı yapay sinir ağı (MLP) yöntemi kullanılmaktadır. Vektör kontrol ile sürülen SMSM'lerde hız kontrolü için inverterli sürücüler kullanılmaktadır. Motorların çalışma performansında inverter çıkışının dengeli bir yapıya sahip olması oldukça önemlidir ancak uygulamada hiçbir motor sürücüsü tam dengeli ve kusursuz değildir. Bu kusurlar inverterin doğrusal olmayışı, motorun doğal asimetrisi ve akım veya hız ölçüm hataları gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. Sürücü kusurları, sarım arıza yönteminin hassasiyetini etkileyen bir unsurdur. Çünkü sürücü kusurlarının fiziksel sonuçları sarım arızasının yarattığı asimetriklikle karıştırılmaktadır. Daha güvenilir bir sarım arıza tespiti için bu kusurlardan kaynaklı etkilerin giderilmesi kritik önemdedir. Fakat bu etkileri

gidermek biraz zordur çünkü bu kusurlar motorun doğrusal olmayan çalışma koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Bu sorunu çözmek için çok sayıda yapay sinir ağı tabanlı örüntü tanıma algoritması uygulanmıştır.

İdeal olmayan bir motor sürücü sisteminin sarım kısa devre arızasının tespiti zordur. Bu zorluğu aşmak için geniş bir uzaydaki girişleri birbirinden bağımsız veri kümesindeki belirgin örüntüleri etkin şekilde tespit edebilecek yöntemler geliştirilmiştir [119]. Bu yöntemler yapay zekâ, bulanık mantık ve yapay sinir ağları gibi uzman sistemleri kapsamaktadır. Bunlardan yapay sinir ağları (ANN) doğrusal olmayan tahminlerinden ötürü makina arızalarının tespitinde kullanılmaktadır. Temel olarak, bu tahminler, uygun ağırlık katsayıları ile birbirine bağlı yapay nöronların uygun bir ağ oluşturulması ile elde edilmektedir



Şekil 3.9 MLP'nin şematik gösterilişi.

Şekil 3.9'da MLP ağ yapısına ait örnek model gösterilmiştir. Bu yapıda giriş ve çıkışlar; x_i ve y_i ile gösterilmiştir. Girişler $x_i = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T \in R^N$ vektörü, çıkışlar $y_i = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T \in R^N$ vektörü ile gösterilmiştir. Gizli katmanda N tane sinir hücresi bulunduran ve aktivasyon fonksiyonu $g(x)$ ile tanımlanan en temel MLP sinir ağı yapısı, matematiksel gösterim olarak denklem (3.11)'deki gibi ifade edilebilir [120].

$$\sum_{i=1}^M \beta_i g(w_i \cdot x_j + b_i) = o_j, j = 1 \dots N \quad (3.11)$$

$\beta_i = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M]^T$ i'ninci gizli sinir hücresine ve çıkış sinir hücrelerine bağlı olan çıkış ağırlık dizisidir. b_i ise i'ninci gizli sinir hücresine eklenen eşik değeri olarak tanımlanabilir. $o_j = [o_1, o_2, \dots, o_j]^T$ ise MLP ağına beklenen ya da olması istenen çıkışıdır. $w_i \cdot x_j$ ise w_i ve x_j 'nin içsel çarpımını yani ağırlıklandırılmış girişlerini ifade eder. En temel haliyle oluşturulan bu MLP ağ yapısının ortalama olarak “sıfır” hata değerine yaklaşabildiği kabul edilmektedir. Yani, olması istenen çıkış ve verilen çıkış ilişkisi $\sum_{j=1}^N \|o_j - y_j\| = 0$ şeklinde ifade edilebilir. Bu durumda (3.12) numaralı denklem yeniden yazılırsa (3.12) numaralı denklem elde edilmektedir.

$$\sum_{i=1}^M \beta_i g(w_i \cdot x_j + b_i) = y_j, j = 1 \dots N \quad (3.12)$$

Sinir ağırları, kabul edilebilir bir tahminin elde edilmesinden önce, giriş değerleri çok farklı kombinasyonlar ile eğitilmelidir. Bir sinir ağı tabanlı çevrimdışı eğitim mümkün olabilecek tüm çalışma koşullarından elde edilen giriş verileri ile eğitilmesi gerekir. Fakat pratikte gerçekleştirilecek tüm çalışma koşullarında veri elde etmek mümkün olmayabilir. Bu nedenle mümkün olan en geniş çalışma koşullarında ve çok sayıda birbirine yakın giriş verileri alınarak en yakın tahmin elde edilebilir. Ağı eğitimi sırasında çıkış ile istenilen sonuç arasındaki farkın azaltılması için ağırlıklar eğitim algoritmasına bağlı olarak değişir. Ortalama karesel hata eğrisi, eğitim iterasyonları boyunca, ağı çıkışı ile istenilen sonuç arasındaki farkın karesini gösterir. Ağı fazla eğitilmesi durumunda ağı genelleştirme yapması zorlaşır. Ağı eğitimi durdurmak için geçerlilik kriteri kullanılır.

Sarım arızasının tespitinde belirli bir hız ve yük durumu gibi dar bir çalışma koşulunda giriş verisi alınarak sinir ağı eğitildiğinde, doğru olmayan bir sonuç verebilecektir. [51]'de bir asenkron motordaki sarım kısa devre arızasının tespitine yönelik ileri beslemeli sinir ağı kullanılması önerilmektedir. Buna göre farklı yük koşulları altında çalışan asenkron motordan alınan negatif akım bileşenleri ve pozitif gerilim bileşenleri ile negatif gerilim bileşenini tahmin edebilmek için bir yapay sinir ağı eğitilmiştir. Daha sonra izleme aşamasında sarım arızasından kaynaklanan asimetrikliği tespit edebilmek için ölçülen ve tahmin edilen negatif gerilim

bileşenleri karşılaştırılmıştır. Eğitimde kullanılan giriş verilerinin alındığı çalışma koşullarının dışındaki veri kümesinden, test verisi alındığında, arıza tespiti tahmin başarımının çok düştüğü gözlenmektedir. Ancak önerilen yöntemin geliştirilmesi ile akım kontrollü gerilim kaynaklı inverter (CCVSI) ile sürülen motorların sarım arızasının tespitinde güvenilir sonuçlar verebildiği gözlenmektedir.

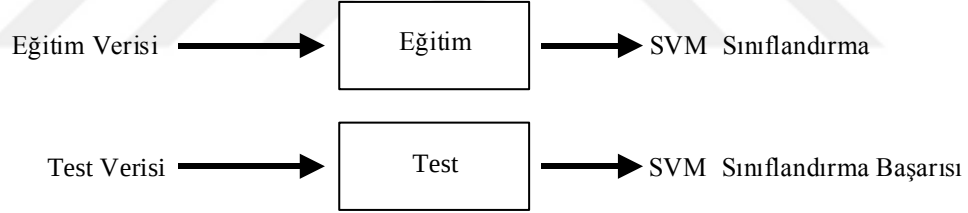
Bu tezde sağlıklı ve farklı orandaki arızalı SMSM'den, rotor dönüş hızı en düşüğü 800 dev/dk, en yükseği 2100 dev/dk olmak üzere, her 100 dev/dk'lık hız değişimleri ve 8 farklı yük durumu için 112'şer veri kayıt edilmiştir. Bu verilerden, arıza tespitinde kullanılabilecek arıza imzaları belirlenmiştir. Bu arıza imzaları, MLP'nin eğitim, çapraz doğrulama ve test veri uzayı olarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar 5. bölümde verilmektedir.

3.4.2 Destek Vektör Makinası ile Sınıflandırma

SMSM fazlarından ölçülen akım ve gerilimlerinden elde edilen arıza imzaları ile arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde kullanılan bir diğer sınıflandırma yöntemi destek vektör makinası (SVM) yöntemidir. Optimizasyona dayalı sınıflandırma teknikleri arasında yer alan Destek Vektör Makinası (SVM), genellikle veri madenciliği sınıflandırma problemlerinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem sınıflandırmayı doğrusal veya doğrusal olmayan bir fonksiyon yardımıyla yerine getirir. Destek vektör makinası yöntemi, veriyi birbirinden ayırmak için en uygun fonksiyonun tahmin edilmesi esasına dayanmaktadır. Daha çok makina öğrenmesi yöntemleri arasında yer alan bu yöntem günümüzde veri madenciliği alanında da tercih edilmeye başlanmıştır. Destek Vektör Makinaları öğrenme, sınıflandırma, kümeleme, yoğunluk tahmini ve son olarak da verilerden regresyon kuralları üretmek için kullanılan bir eğitime algoritmasıdır. SVM'nin teorik temelleri ilk olarak V. Vapnik tarafından 1960'lı yıllarda atıldıktan sonra ilk olarak 1995 yılında sınıflandırmada kullanılmıştır. Vapnik'in teorisi eğitim kümelerindeki hata ile VC (Vapnik-Chervonenkis) boyutuna göre ifade edilen hipotez uzayının karmaşıklığının her ikisini de küçükleyen çözümün bulunduğunu göstermektedir [121]. Bu sınıflar arasında birçok doğrunun çizilebilme ihtimali vardır. Hata toleransını en düşük hale getirmek için çizilebilecek doğrular arasında her iki sınıfa en uzak olacak şekilde çizilen doğru bulunmalıdır.

dereceli programlama adı verilen metotları kullanarak çözmektedir. SVM öğrenme metodu teorik olarak VC boyutu ve yapısal risk minimizasyonu (SRM) prensiplerine uygun olarak tasarlanmıştır.

Şekil 3.11, tüm makina öğrenme metotları için geçerli olan bir mimaridir. Sınıflandırma işlemi yapılırken eldeki verilerin bir kısmı eğitim için, kalan kısmı ise test için ayrılır. Çünkü eğitme verilerinin, sınıflandırıcının doğruluk tahmininde de kullanılması iyimser (gerçek uygulamalara göre daha yüksek olan) sonuçlar elde etmemize sebep olur. Bu verilerin birbirine oranı sınıflandırma işleminin doğruluk oranını (aynı zamanda hata oranını) doğrudan etkilemektedir. Doğruluk oranını etkileyen bir diğer faktör de verilerin sahip olduğu dağılımdır. Matematiksel olarak SVM, dağılımından bağımsız formül yapısı üzerine kurulmuştur. SVM tekniğinde de önce eğitim verileri alınıp, SVM eğitilerek sınıflandırıcı model oluşturulur. Daha sonra çıkış değerini önceden bildiğimiz test verileri için sistemin hesaplayacağı çıkış değeri gözlemlenir. Sonra bu iki değer arasındaki farklılık oranına göre SVM'nin sınıflandırma performansı değerlendirilir [122].



Şekil 3.11 SVM ile sınıflandırma mimarisi.

Destek Vektör Makinalarında karşılaşılabilecek iki durum, sınıflandırma yapılırken verilerin lineer olarak ayrılacakları bir yapıda olması veya lineer olarak ayrılamayan yapıda olmasıdır. Ancak, gerçek yaşam problemlerinin büyük çoğunluğu birçok farklı bileşenden oluşan problemlerdir ve lineer olarak ayrılmış bir yapı halinde karşımıza çıkmazlar. Lineer olarak ayrılmış olan veriler arasında direkt olarak maksimum sınırın bulunması oldukça kolaydır, ancak lineer olarak ayrılamayan veriler öncelikle lineer olarak ayrılacakları farklı bir uzaya aktarılmalıdırlar [123].

3.4.3 k-En Yakın Komşuluk Yöntemi ile Sınıflandırma

Sınıflandırma teknikleri içerisinde yaygın olarak kullanılan algoritmalarından olan k-en yakın komşu yöntemi (kNN), aradaki mesafeye dayalı olarak sınıflandırma yapan bir algoritmadır. Parametrik olmayan bu yöntem en basit ve yorumlanması kolay denetimli makina öğrenme algoritmalarından biridir [124]. k-en yakın komşuluk yöntemi, n boyutlu özellik uzayında nesneleri sınıflandırmak ya da tahmin etmek için mesafe olarak kendisine en yakın komşu örneklerini kullanır. k-en yakın komşu yönteminde sınıflandırma yapabilmek için kaç adet en yakın komşu sayısının katılacağı, k gibi bir pozitif tam sayı ile belirtilir. Eğer k=1 ise sınıflandırmaya çalıştığımız örnek, en yakın komşusunun bulunduğu sınıfa dahil olacaktır.

Bu yöntem kestirim için de kullanılmaktadır. En yakın komşuların belirlenmesinde seçilen örnek ile eğitim kümesindeki örnekler arasındaki uzaklık ölçümü yapılır. Bu ölçümler Euclidean, Manhattan ve Cheyshev gibi ölçüm fonksiyonları kullanılarak yapılmaktadır. Bunlardan en çok kullanılan fonksiyon olan Euclidean uzaklık fonksiyonu denklem (3.13)'te gösterildiği gibidir.

$$d_{ab} = \|a - b\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2} \quad (3.13)$$

Burada a ve b, n-boyutlu uzaydaki iki nokta ise aralarındaki mesafe Euclidean fonksiyonu ile bu şekilde hesaplanabilmektedir. Bu algoritma test verisi ile eğitimi yapılmış tüm veriler arasındaki mesafelerin hesaplanmasını gerekli kılar. Uzaklık mesafeleri en kısıdan en uzağa doğru sıralanır, bu sıralama aynı zamanda seçilen örneğe en yakın komşudan en uzak komşuya olan sıralamayı da gösterir. Yöntemde, sınıflandırma yapılacak verilerin öğrenme kümesindeki normal davranış verilerine benzerlikleri hesaplanarak; en yakın olduğu düşünülen k adet verinin ortalamasıyla, belirlenen eşik değere göre sınıflara atamaları yapılır. Yani sınıflandırmada kullanılan bu algoritmaya göre sınıflandırma sırasında çıkarılan özelliklerden (feature extraction), sınıflandırılmak istenen yeni bireyin daha önceki bireylerden k tanesine yakınlığına bakılmaktadır. Önemli olan, her bir sınıfın özelliklerinin önceden net bir şekilde belirlenmiş olmasıdır. Yöntemin performansını;

- K en yakın komşu sayısı,
- Eşik değeri,

- Benzerlik ölçütü etkilemektedir [125].

Buradaki k , 1'den büyük ve genelde tek sayı olarak seçilen bir tam sayıdır. K en yakın komşuluk yönteminde sadece bir tane en büyük benzeme değerine değil, k tane en büyük benzeme değerine bakılarak sonuca ulaşılır. Seçilmiş olan k değerinin küçük olması durumunda birbirine benzerlikleri yüksek olan kayıtlar bir sınıfa sokulurken, k değerinin büyük seçilmesi birbirine benzemeyen kayıtların aynı sınıfa sokulması hatasını ortaya çıkarabilir.

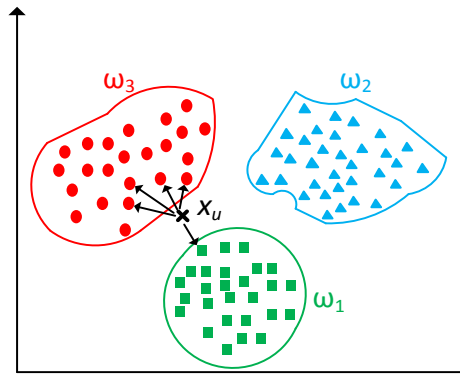
Bu yöntemin avantajları arasında;

- K -en yakın komşunun ortalaması alındığı için gürültülü veriden az etkilenmesi,
- Uygulaması ve anlaşılmasının kolay olması,

Dezavantajları olarak;

- En yakın komşuların sayısı olan k parametresinden,
- Seçilen uzaklık ölçütünden oldukça etkilenmesi,
- Eğitim verisinin büyük olduğu durumlarda verimli olması sayılabilir.

Örneğin, w_1 , w_2 ve w_3 olmak üzere üç adet sınıf olduğu varsayılın ve bilinmeyen bir x_u örneği sınıflandırılmaya çalışılsın. $k=5$ değeri için 5 en yakın komşu incelendiğinde 4 adet komşunun w_3 sınıfında olduğu, 1 adet komşunun ise w_2 sınıfında olduğu görülmektedir. Baskın olan taraf w_3 olduğu için x_u örneği w_3 sınıfına dâhil olur (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 K -en yakın komşuluk sınıflandırma yöntemi.

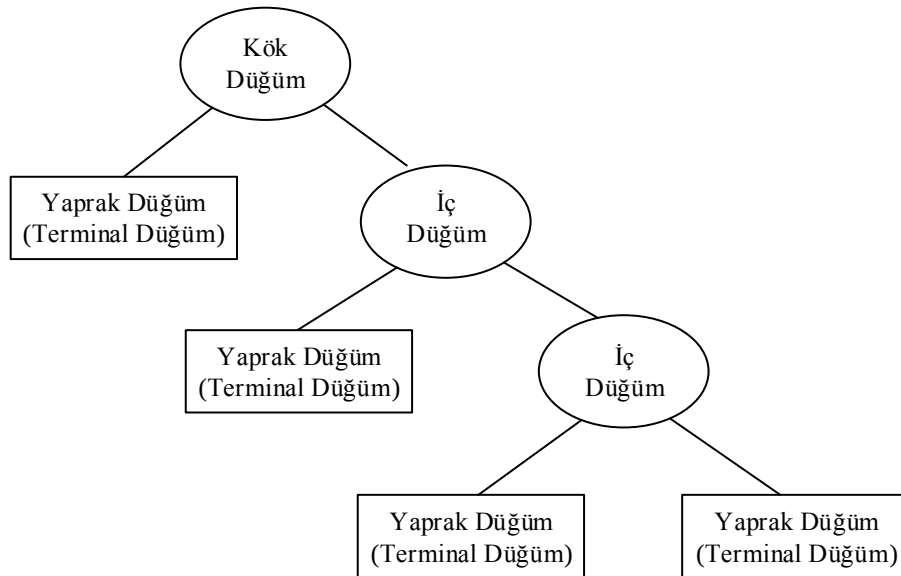
3.4.4 Karar Ağacı Yöntemi ile Sınıflandırma

Karar ağacı yöntemi (DT), yorumlanmasının kolay olması, veri tabanı sistemlerine entegre edilebilirliği, yüksek güvenilirliği gibi nedenlerle sınıflama yöntemleri içerisinde yaygın kullanıma sahip yöntemlerden biridir. Bu yöntem kestirimci ve tanımlayıcı özelliklere sahiptir. Karar ağacı düğüm, dal ve yaprak olarak adlandırılan üç kısımdan oluşan, anlaşılması kolay bir yöntemdir [126]. Bu ağaç yapısında her bir değişken bir düğüm tarafından temsil edilir. Dallar ve yapraklar ağaç yapısının diğer elemanlarıdır. Ağaçta en son kısım yaprak en üst kısım ise kök olarak adlandırılır. Kök ve yapraklar arasında kalan kısımlar ise dal olarak ifade edilir. Başka bir ifadeyle bir ağaç yapısı; verileri içeren bir kök düğümü, iç düğümler (dallar) ve uç düğümlerden (yapraklar) oluşur. Eğitim verilerine ait değişken bilgilerinden yararlanılarak bir karar ağacı yapısı oluşturulmasında temel prensip verilere ilişkin bir dizi sorular sorulması ve elde edilen cevaplar doğrultusunda hareket edilerek en kısa sürede sonuca gidilmesi olarak ifade edilebilir. Bu şekilde karar ağacı, sorulara aldığı cevapları toplayarak, karar kuralları oluşturur. Ağacın ilk düğümü olan kök düğümünde verilerin sınıflandırılması ve ağaç yapısının oluşturulması için sorular sorulmaya başlanır ve dalları olmayan düğümler ya da yapraklar bulunana kadar bu işlem devam eder.

Karar ağaçlarının oluşturulmasındaki en önemli adım ağaçtaki dallanmanın hangi kritere veya kıstasa göre yapılacağı ya da hangi değişken değerlerine göre ağaç yapısının oluşturulacağıdır. Literatürde bu problemin çözümü için geliştirilmiş çeşitli yaklaşımlar vardır. Bunlardan en önemlileri bilgi kazancı ve bilgi kazanç oranı, Gini indeksi, Twoing kuralı ve Ki-Kare olasılık tablo istatistiği yaklaşımlarıdır. Karar ağacında bulunan her bir dalın belirli bir olasılığı mevcuttur. Bu sayede son dallardan köke veya istenilen yere ulaşana dek olasılıkların hesaplanması mümkündür. Karar düğümü, gerçekleştirilecek testi belirtir. Bu testin sonucu ağacın veri kaybetmeden dallara ayrılmasına neden olur. Her düğümde test ve dallara ayrılma işlemleri ardışık olarak gerçekleşir ve bu ayrılma işlemi üst seviyedeki ayrımlara bağımlıdır. Ağacın her bir dalı sınıflama işlemi tamamlamaya adaydır. Eğer bir dalın ucunda sınıflama işlemi gerçekleşmiyorsa, o dalın sonucunda bir karar düğümü oluşur. Ancak dalın sonunda belirli bir sınıf oluşuyorsa, o dalın sonunda yaprak vardır. Bu yaprak, veri üzerinde belirlenmek istenen sınıflardan biridir. Karar ağacı işlemi kök düğümünden başlar ve yukarıdan aşağıya doğru yaprağa ulaşana dek ardışık düğümleri takip

ederek gerçekleşir [127]. Karar ağacı tekniğini kullanarak verinin sınıflanması iki basamaklı bir işlemdir [126]. İlk basamak öğrenme basamağıdır. Öğrenme basamağında önceden bilinen bir eğitim verisi, model oluşturmak amacıyla sınıflama algoritması tarafından analiz edilir.

Öğrenilen model, sınıflama kuralları veya karar ağacı olarak gösterilir. İkinci basamak ise sınıflama basamağıdır. Sınıflama basamağında test verisi, sınıflama kurallarının veya karar ağacının doğruluğunu belirlemek amacıyla kullanılır. Eğer doğruluk kabul edilebilir oranda ise kurallar yeni verilerin sınıflanması amacıyla kullanılır [127]. Karar ağaçları geçmiş veriye dayanarak yeni verilerin hangi sınıfa ait olduğuna, kurallar çıkartarak karar vermektedir. Karar ağacı, sorulan sorular ve alınan cevaplar doğrultusunda hareket eder ve sorulan sorulara alınan cevapları birleştirerek kurallar oluşturur. Oluşan ağaç birçok “eğer-ise”(if-then)’den oluşan kurallar bütünüdür de diyebiliriz. Soru sormaya verideki hangi değişkenden başlanacağına karar verildiğinde ilgili değişken ağacın kök düğümünü oluşturmuş olur. Kök düğümden başlayarak, cevabı veri tabanında bulunan sorular sorulup alınan cevaplara göre yeni düğümler oluşturulmaktadır. Her düğüm kendinden sonra iki veya ikiden fazla dala ayrılmaktadır. Oluşan düğümden sonra yeni soru sorulamıyorsa dallanma bitmiştir ve bir sınıfı temsil eden yaprağa ulaşılmıştır [128]. Şekil 3.13’de karar ağacını oluşturan kök düğüm, iç düğüm ve terminal düğümler gösterilmiştir.



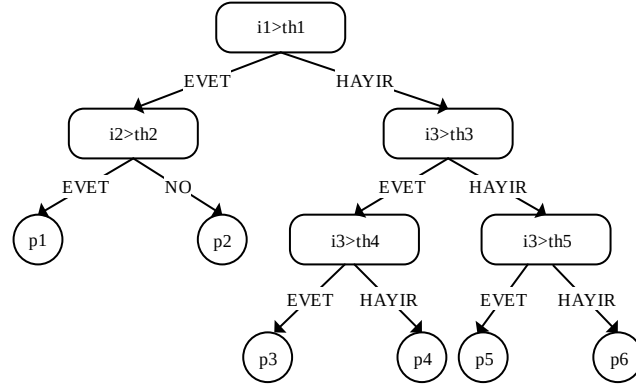
Şekil 3.13 Karar Ağacı Diyagramı.

3.4.5 Rastgele Orman Algoritması ile Sınıflandırma

SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızasının tespitinde ve arıza şiddetinin otomatik olarak belirlenmesinde bir tür optimize edilmiş karar ağacı algoritması olan Rastgele Orman (RF) metodu kullanılmıştır. L. Breiman tarafından [129], tek bir karar ağacı üretmek yerine her biri birbirinden farklı eğitim veri kümesiyle eğitilen birden fazla, çok değişkenli ağacın kararlarının birleştirilmesini öngören "Torbalama" yöntemi geliştirilerek RF algoritması elde edilmiştir. Bu yöntem, birbirinden farklı alt eğitim veri kümelerinin oluşturulmasında önyükleme tekniğini, ağaçların gelişimi aşamasında da rastgele özellik seçimini kullanır. Torbalama yönteminden farklı olarak, ağaçların gelişimi aşamasında veri kümesindeki tüm değişkenleri kullanmak yerine her bir düğümde rastgele seçilen değişkenler arasından en iyisini kullanarak her bir düğümü dallara ayırmasıdır. Burada ağaçlar rastgele seçilen değişkenlere göre oluşturulur. Oluşturulan yeni veri kümelerinden ağaç gelişimi işlemi de CART algoritmasına göre yapılır. Ancak RF algoritmasında CART algoritmasındaki gibi ağaç budama işlemi yapılmaz [129, 130]. Ağaç budama metodu, ağaç tabanlı sınıflandırıcıların performansını olumsuz etkilemektedir [131]. RF algoritmasında budamanın yapılmaması bu yöntemi diğer karar ağacı yöntemlerinden daha avantajlı ve tercih edilir hale getirmektedir. Ayrıca RF algoritmasının diğer karar ağacı algoritmalarından daha hızlı, aşırı uyuma karşı dayanıklı ve ne kadar istenirse o kadar ağaçla çalışabilir olması tercih edilmesindeki diğer faktörlerdir. Bu üstün özelliklerinden ötürü RF algoritması şu anki algoritmalar arasında doğruluğu eşsiz bir algoritma olarak tanımlanmaktadır [132]. Şekil 3.14'de RF algoritmasının daha iyi ifade edilebilmesi için anlaşılması kolay bir örnek verilmiştir. Burada, $I=\{i1, i2, i3\}$ giriş özellik vektörü, $Th=\{th1, th2, th3, th4, th5\}$ eşik değerleri vektörü ve $P=\{p1, p2, p3, p4, p5$ ve $p6\}$ ise tahmin edilen değerler vektörü olsun. RF tahmin algoritması şu üç adımdan oluşur.

- Tahmin ölçütünün doğru seçilmesi
- Veri seti bölütlendirilirken ihtiyaç duyulan kadar bölüte ayrılması
- Uygun alt ağaç algoritmasının seçimi

Bu adımların doğru uygulanması sonucu verilerin sınıflandırmasının güvenilirliği artmaktadır. Bu çalışmada uygulanan RF algoritması bu ölçütlere tamamen uyulmuştur.



Şekil 3.14 Rastgele Orman (RF) Algoritması Örneği.

3.5 Sonuç

Bu bölümde, SMSM’lerdeki arıza tespiti üzerine yapılmış çalışmaları kendi bağlamında sunabilmek için durum izleme, veri toplama, arıza tespiti ve teşhisi yöntemlerinin tanımları ve kısa tanıtımı yapılmıştır.

Belirli bir durum için en iyi yöntemin seçimine karar vermek için, makina durum izlemenin avantaj ve dezavantajlarının göz önüne alınması gerekir. Makina durum izleme yöntemleri, makinanın kullanılabilirliğini, verimliliğini ve güvenilirliğini arttırmak, ayrıca güvenli çalışma imkânını geliştirmek gibi, avantajları sağlayabileceği gibi, durum izleme için kullanılacak ekipmanların ek maliyeti ve durum izleme sistemi eğitimi için ek maliyet gibi dezavantajları ortaya çıkabilmektedir.

Bu bölümde SMSM’lerde meydana gelen stator kısa devre arızalarını tespit etmek için kullanılan yöntemler açıklanmış ve arıza şiddetinin otomatik olarak belirlenmesi için kullanılan örüntü tanıma ve sınıflandırma yöntemleri tanıtılmıştır.

4. STATOR SARIMLAR ARASI KISA DEVRE ARIZALI SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN MATEMATİKSEL MODELİ, BENZETİMİ VE SONUÇLARI

Bu bölümde, sağlıklı ve stator sarımlar arası kısa devre arızalı bir yüzeysel mıknatıslı SMSM'nin matematiksel modelinin çıkarılması anlatılmıştır. Önceki çalışmalarda AC makinalarının stator sarımlar arası kısa devre arızasının tespiti için çok sayıda model önerilmiştir. Bu çalışmada yıldız bağlı, statorunun her fazında N adet sarım bulunan ve yalnızca a -fazında n adet sarımı kısa devre edilmiş SMSM'nin arızalı ve diğer fazlarda oluşan etkilerini gösteren matematiksel eşitlikler aşağıda verilmektedir.

Stator sargılarında kısa devre olması durumunda kısa devre olan n adet sarımın toplam sarım sayısı N 'e oranı, $\vartheta = n/N$, arızanın şiddetini göstermektedir. Bu arıza türünde n adet sarımın da ayrı bir faz olarak iş görmesi ve üzerinden i_f arıza akımının geçmesi nedeniyle model oluşturulurken motorun 4 fazlı bir model olarak tasarlanması gerekmektedir. Kısa devre olan sarımda aynı zamanda bir R_f arıza direnci de meydana gelmektedir [133]. Oluşturulan bu modelde SMSM'nin inverterli vektör kontrol modeli kullanıldığından, SMSM'nin abc modeli kurulduktan sonra Park-Clarke dönüşüm matrisi yardımıyla motorun d - q modeli elde edilmiş ve hız kontrolü bu şekilde uygulanmıştır. İlk olarak motorun arızasız (sağlıklı) modeli oluşturulmuş ve daha sonra arızalı model elde edilmiştir. Arızalı SMSM için kullanılan Park-Clarke dönüşüm ve ters dönüşüm matrisleri (4.1) ve (4.2)'de gösterildiği gibidir:

$$T(qd0) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow T(qd0) \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_q \\ I_d \\ I_0 \\ I_f \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$T(qd0)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 & -1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{3}{2} \end{bmatrix} \Rightarrow T(qd0)^{-1} \begin{bmatrix} I_q \\ I_d \\ I_0 \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_f \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Arızasız SMSM'nin abc faz durum denklemleri (4.3)'de verilmektedir.

$$[V_{s,abc}] = [R_{sh}][i_{s,abc}] + \frac{d}{dt}[\lambda_{s,abc}] + V_0 \quad (4.3)$$

Burada, arızasız (sağlıklı) üç fazlı motorların üç fazlı stator gerilimleri dengeli olduğundan $V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) = 0$ 'dır. Dolayısıyla eşitliğe çoğunlukla yazılmaz.

Stator faz gerilimleri ve akımları matrisi; $[V_{s,abc}] = [V_a \ V_b \ V_c]^t$ ve $[i_{s,abc}] = [i_a \ i_b \ i_c]^t$ şeklinde, arızasız motorun stator dirençler matrisi de

$$[R_{sh}] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \text{ şeklinde ifade edilmektedir. Stator üç fazlı manyetik akı bağı}$$

denklemleri ise (4.4) numaralı denklemde ifade edilmiştir.

$$\lambda_{s,abc} = L_{sh} \cdot i_{s,abc} + \lambda_{PM,abc} \quad (4.4)$$

Bu denklemde, $[L_{sh}] = \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix}$ indüktans matrisini, $\lambda_{PM,abc}$ ise sağlıklı

SMSM'nin manyetik akı bağına ifade etmektedir.

$$[\lambda_{PM,abc}] = \lambda_{PM} \cdot [\cos \theta \ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})]^t \quad (4.5)$$

(4.4) ve (4.5) numaralı denklemlerden elde edilenler (4.3) numaralı eşitlikteki yerlerine yazılırsa (4.6) numaralı eşitlik elde edilmektedir.

$$[V_{s,abc}] = [R_{sh}] \cdot [i_{s,abc}] + [L_{sh}] \cdot \frac{d}{dt}[i_{s,abc}] + \frac{d}{dt}[\lambda_{PM,abc}] \quad (4.6)$$

Stator sarımlar arası kısa devre arızası durumundaki SMSM'nin abc faz düzleminde sürekli durum uzay denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\mathbf{V}_{sf,abc} = \mathbf{R}_{sf} \cdot \mathbf{i}_{sf,abc} + \frac{d}{dt} \lambda_{sf,abc} + \mathbf{V}_0 \quad (4.7)$$

$$\lambda_{sf,abc} = \mathbf{L}_{sf} \cdot \mathbf{i}_{sf,abc} + \lambda_{PMf,abc} \quad (4.8)$$

Bu eşitliklerdeki, $\mathbf{V}_{sf,abc} = [V_a \ V_b \ V_c \ 0]^t$ arızalı motorun stator faz gerilimleri matrisini, $\mathbf{i}_{sf,abc} = [i_a \ i_b \ i_c \ i_f]^t$ arızalı motorun stator faz akımları matrisini,

$$\mathbf{R}_{sf} = \begin{bmatrix} kR_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & -\mathcal{G}R_s \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & \mathcal{G}R_s & 0 & -\mathcal{G}R_s - R_f \end{bmatrix} \text{ arızalı motorun stator sargı dirençleri matrisini,}$$

$$\lambda_{sf,abc} = \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} \text{ arızalı motorun stator akıbağları matrisini,}$$

$$\mathbf{L}_{sf} = \begin{bmatrix} L & M & M & -\mathcal{G}M \\ M & L & M & -\mathcal{G}L \\ M & M & L & -\mathcal{G}M \\ \mathcal{G}M & \mathcal{G}L & \mathcal{G}M & -\mathcal{G}^2 L \end{bmatrix} \text{ arızalı motorun stator indüktanslar matrisini ve}$$

$$\lambda_{PMf,abc} = \begin{bmatrix} \lambda_{PM,a} \\ \lambda_{PM,b} \\ \lambda_{PM,c} \\ \lambda_{PM,f} \end{bmatrix} \text{ ise arızalı SMSM'nin akı bağı matrisini ifade etmektedir. Burada } k$$

$= R_f / R_s$ ve kısa devre olan fazda meydana gelen dengesizliği ifade eden bir sayıdır. Ayrıca arızalı motorun stator akı bağı matrisi (4.9) numaralı eşitlikte verilmektedir.

$$\lambda_{PMf,abc} = \lambda_{PM} \cdot \left[\cos(\theta) \quad \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad \mathcal{G} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right]^t \quad (4.9)$$

Eşitlikler kullanılarak arızalı motorun $\mathbf{V}_0$ eşitliği aşağıdaki şekilde elde edilmektedir.

$$\mathbf{V}_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) - \frac{1}{3}R_s(k-1)i_a + \frac{1}{3}\mathcal{G}R_s i_f + \frac{1}{3}\mathcal{G}(L+2M)\frac{di_f}{dt} - \frac{d}{dt} \lambda_{PM,0} \quad (4.10)$$

(4.10) numaralı eşitlikte kullanılan ortalama sürekli mıknatıs akı bağı

$$\lambda_{PM,0} = \frac{1}{3}(\lambda_{PM,a} + \lambda_{PM,b} + \lambda_{PM,c}) \text{ ile ifade edilmektedir.}$$

Tüm bu eşitlikler kullanılarak (4.11) numaralı eşitlikte gösterilen $\mathbf{V}_f$ elde edilmiştir.

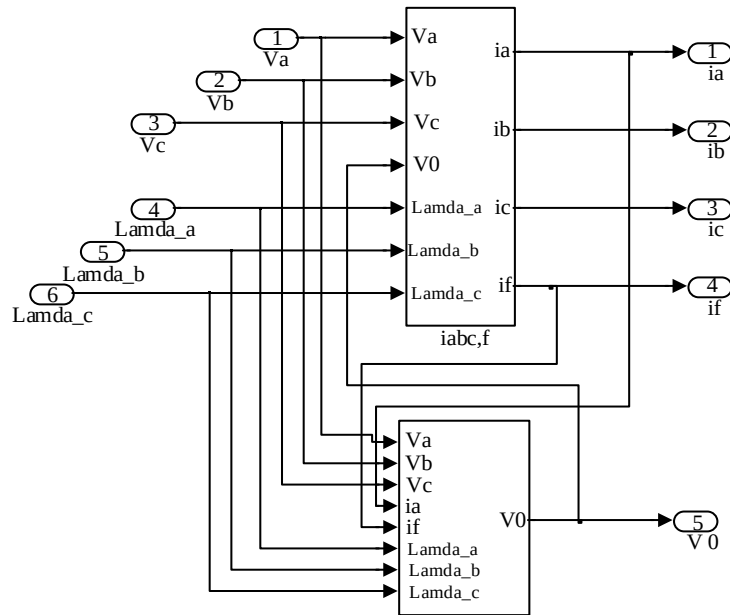
$$\mathbf{V}_f = i_f R_f = \mathcal{R}_s (i_b - i_f) + \mathcal{L}[L_f]^t \cdot \frac{d[i_{s,abc}]}{dt} - \mathcal{L}^2 L \frac{di_f}{dt} + \mathcal{L} \frac{d}{dt} \left(\lambda_{PM} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \quad (4.11)$$

(4.11) numaralı eşitlik kullanılarak SMSM'nin i_f kısa devre akımı elde edilerek bilgisayar benzetim modeli oluşturulmaktadır.

Bilgisayar benzetim modeli oluşturulurken öncelikle SMSM'nin bazı parametrelerinin belirlenebilmesi gerekmektedir. Benzetim modelinin deneysel sisteme en yakın sonuçlar verebilmesi için deneysel sistemde kullanılan motor parametreleri benzetim modelinde de kullanılmalıdır. Bu parametreler motordan ölçülebileceği gibi motorun kataloğundan da elde edilebilmektedir. Tablo 4.1'de benzetim modelinde kullanılan motor parametreleri verilmiştir.

Yukarıda verilen eşitliklerle akım kontrollü inverter (CCVSI) beslemeli üç fazlı SMSM'nin kısa devre arızalı benzetim modeli Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş olup oluşturulan bloklar aşama aşama bu bölümde anlatılmaktadır.

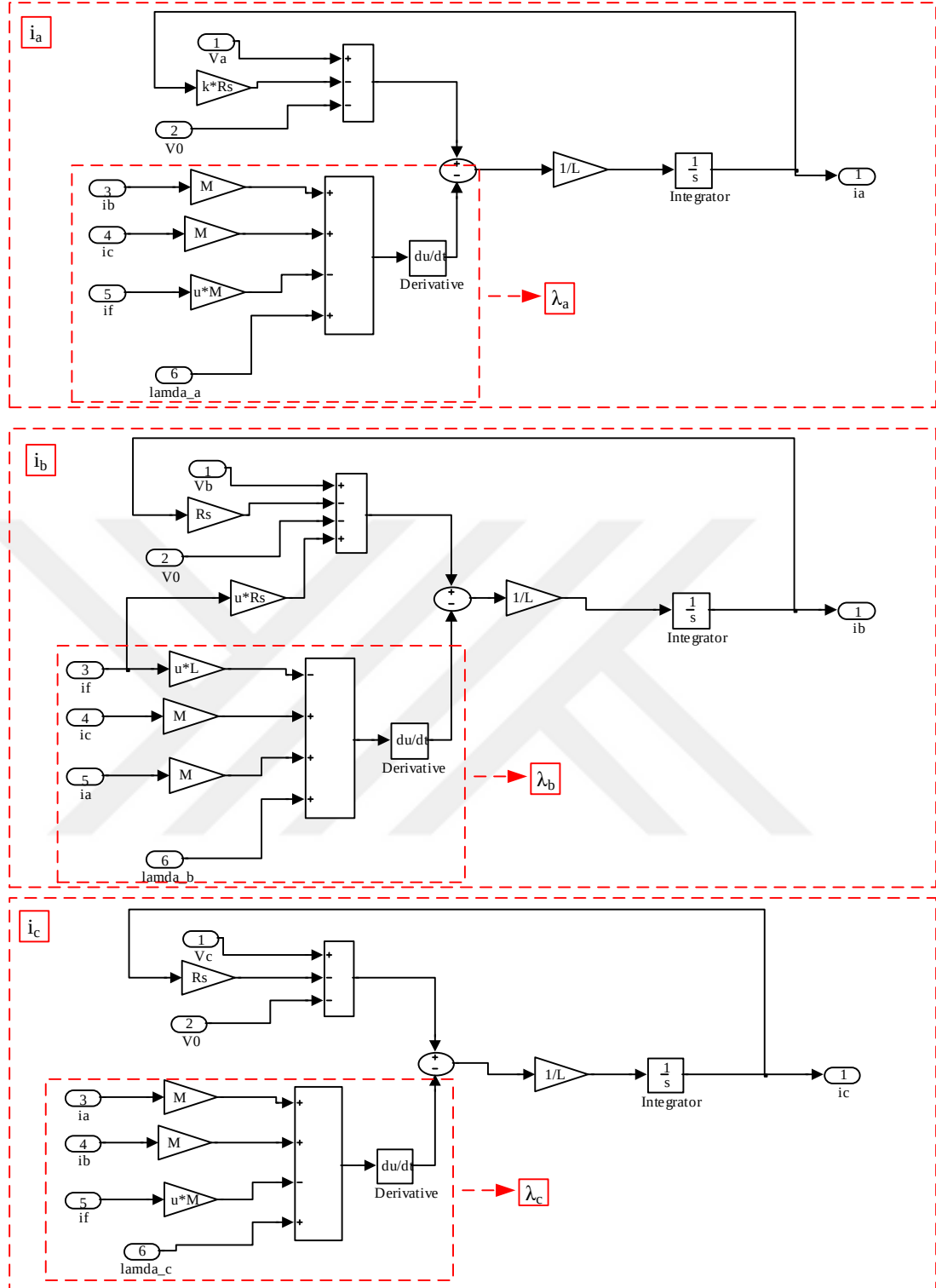
(4.7) numaralı eşitliğin benzetim bloğu aşağıda Şekil 4.1'de verilmektedir.



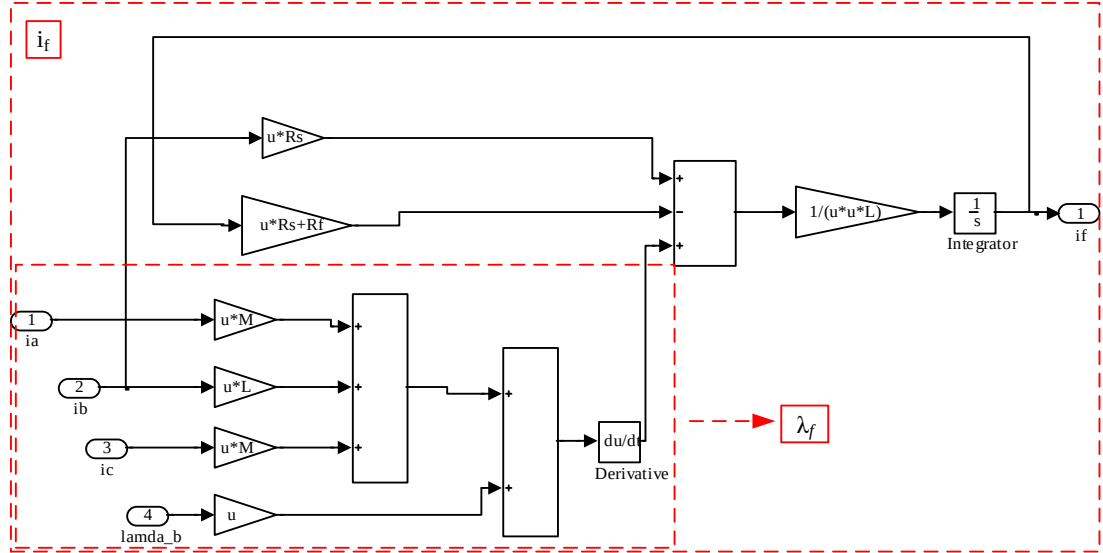
Şekil 4.1 $i_{sf,abc}$ stator akımlarının ve V_0 elde edilmesi.

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi arızalı üç fazlı stator akımları yani $i_{sf,abc}$ ’yi ve V_0 ’yi elde etmek için inverterde üretilen üç fazlı $V_{s,abc}$ gerilimler, V_0 ve $\lambda_{sf,abc}$ ’nin giriş olarak uygulanması gerekmektedir. Burada $V_{s,abc}$ gerilimleri inverter bloğundan gelmektedir. V_0 bloğu, (4.10) numaralı eşitlikten, $\lambda_{sf,abc}$ ise (4.6) numaralı eşitlikten elde edilmiştir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 de $i_{sf,abc}$ bloğunun elde edilişi gösterilmektedir. Şekil 4.4’te ise V_0 ’ın elde edilişi gösterilmektedir.

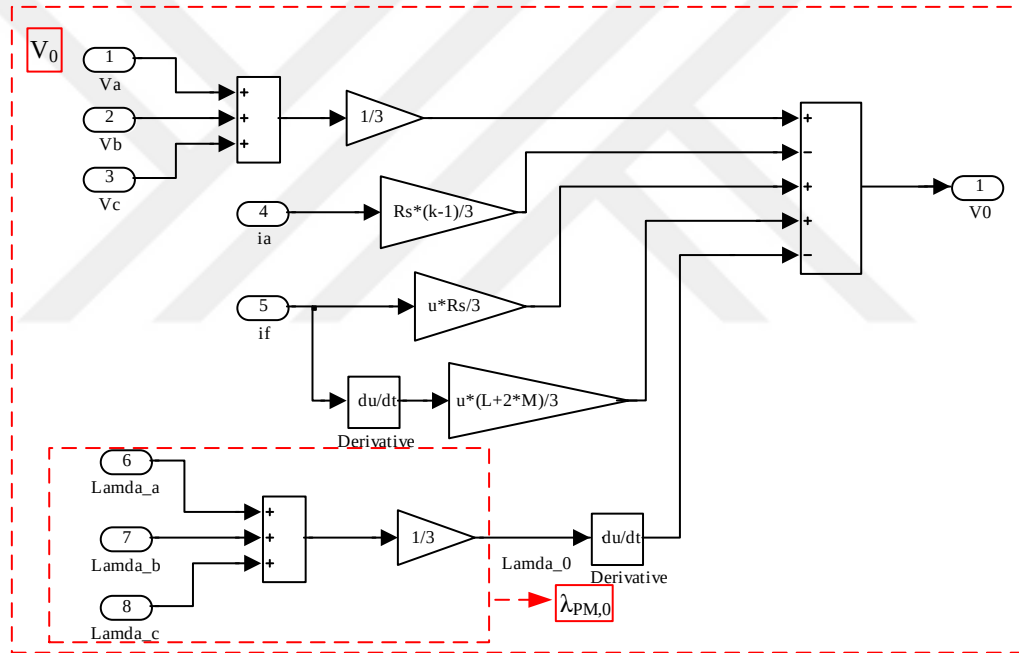




Şekil 4.2 Arızalı durumda $i_{s,abc}$ 'nin elde edilmesi.



Şekil 4.3 Arıza akımı i_f 'nin elde edilmesi



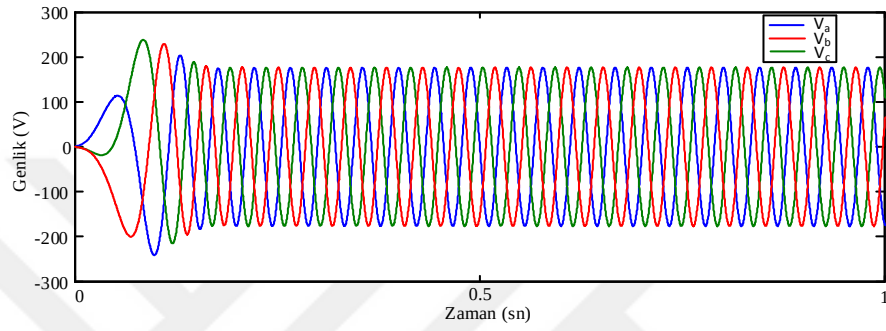
Şekil 4.4 V_0 'ın elde edilmesi.

Yukarıda verilen benzetim blokları kullanılarak oluşturulan sarımlar arası kısa devre arızalı SMSM'nin gerilim kaynaklı inverterli (VSI) hız kontrol modelinin Matlab/Simulink diyagramı Şekil 4.5'te verilmiştir.

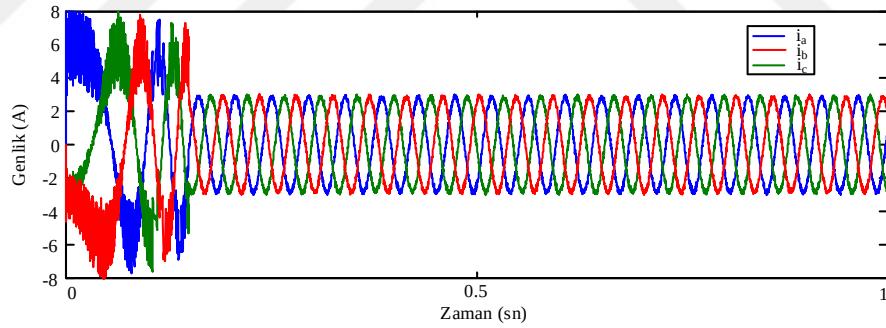
iyi ortaya çıkacaktır. Yapılan benzetim çalışması gerçek sisteme en yakın sonuçları verecek şekilde tasarlanmıştır.

4.1 Sağlıklı Motorun Benzetim Sonuçları

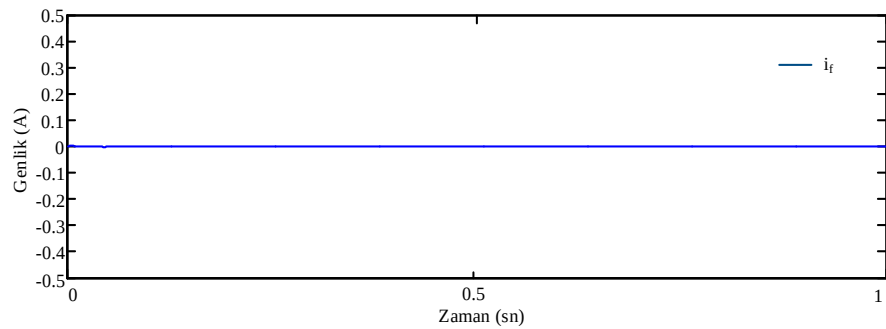
Herhangi bir fazında kısa devre olan sarımların bulunmadığı sağlıklı bir SMSM'nin stator akım ve gerilimlerinin grafikleri 1 sn'lik zaman boyunca Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verildiği gibidir.



Şekil 4.6 Stator gerilimleri (V_{abc})



Şekil 4.7 Stator akımları (i_{abc})

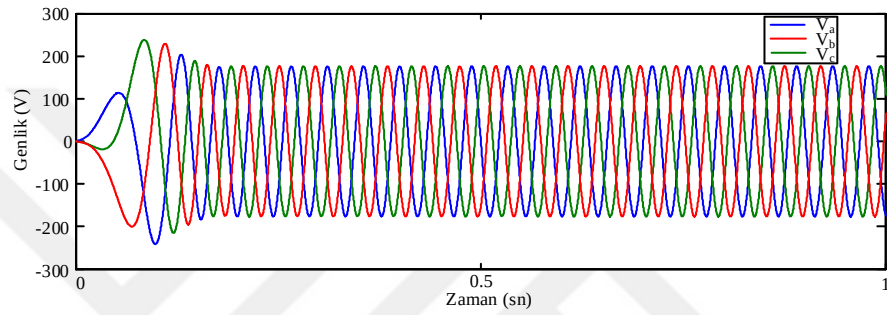


Şekil 4.8 Kısa devre akımı (i_f)

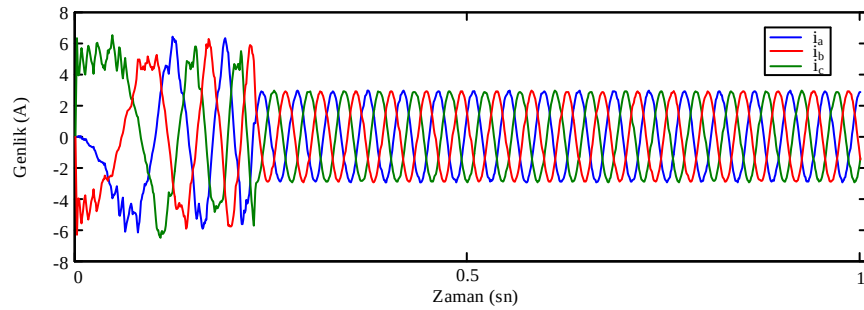
Motor stator sargılarında arıza bulunmadığından yani sağlıklı çalıştığından ötürü gerilimler ve akımlar oldukça dengeli ve kısa devre akımı yoktur (Şekil 4.8).

4.2 Kısa Devre Oranı %0.5 olan Arızalı Motor Benzetim Sonuçları

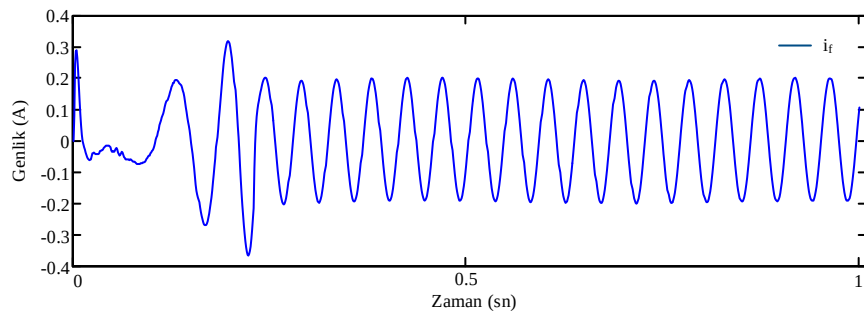
Tek fazında %0,5 kısa devre arıza (kda) şiddetine sahip SMSM'nin stator faz gerilimleri ve akımları Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 da, kısa devre akımı ise Şekil 4.11'de verilmektedir.



Şekil 4.9 Stator gerilimleri (V_{abc})



Şekil 4.10 Stator akımları (i_{abc})

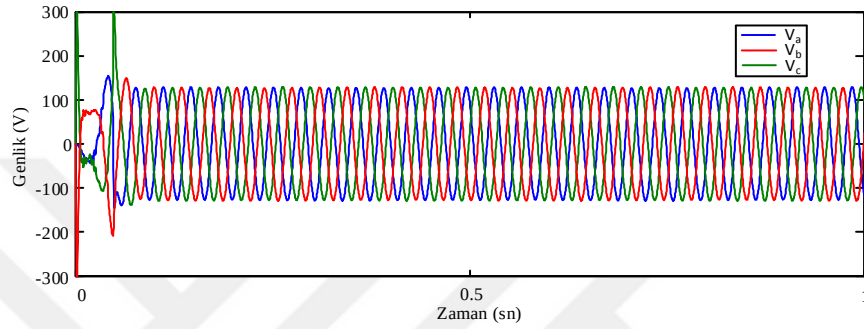


Şekil 4.11 Kısa devre akımı (i_f)

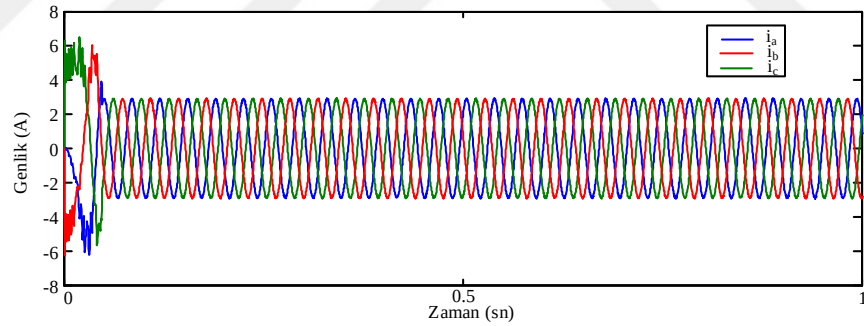
Bu grafiklerden stator faz akımlarının ve gerilimlerinin yanı sıra kısa devre arıza akımlarının 1 sn'lik durumlarını zaman düzleminde izlenebilmesi, arıza şiddeti arttığında bunların değişimlerinin izlenmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir.

4.3 Kısa Devre Oranı %1 olan Arızalı Motor Benzetim Sonuçları

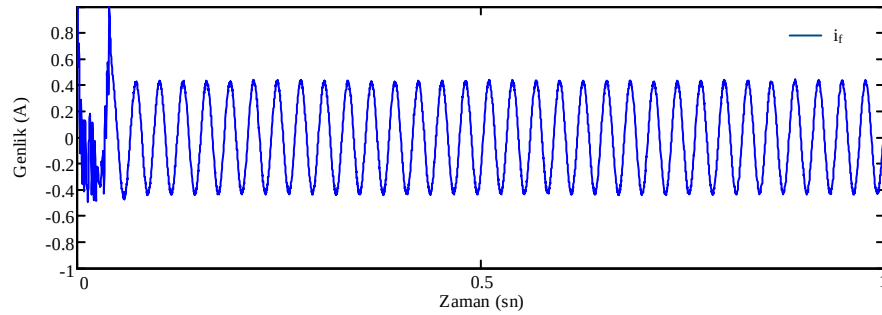
Tek fazında %1 arıza şiddetine sahip SMSM'nin stator faz gerilimleri ve akımları Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de kısa devre akımı ise Şekil 4.14'te verilmektedir.



Şekil 4.12 Stator gerilimleri (V_{abc})



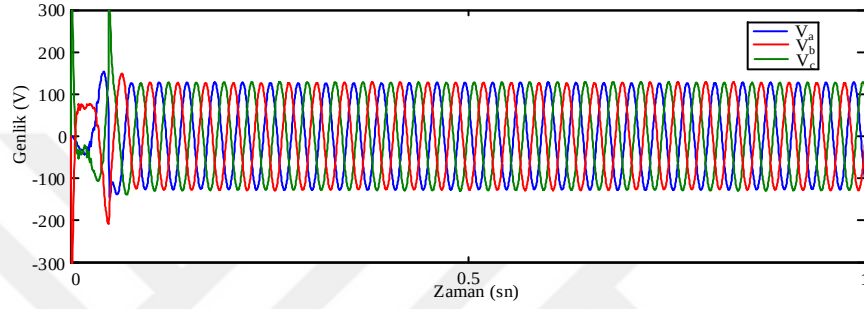
Şekil 4.13 Stator akımları (i_{abc})



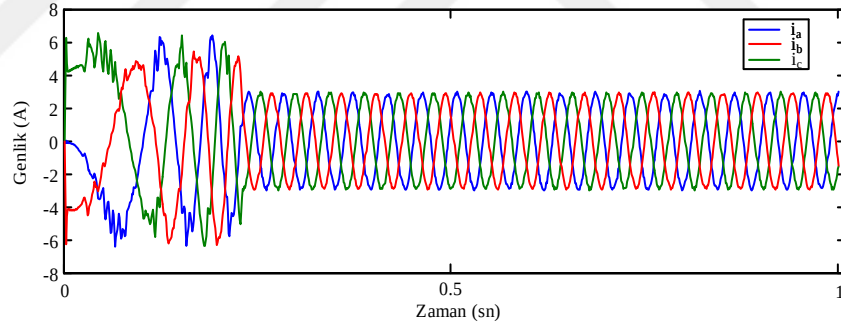
Şekil 4.14 Kısa devre akımı (i_f)

4.4 Kısa Devre Oranı %2 olan Arızalı Motor Benzetim Sonuçları

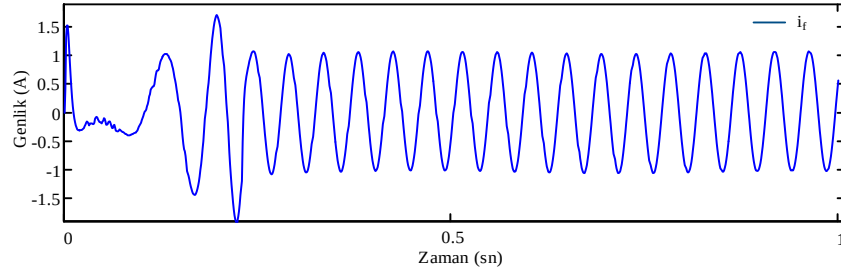
Tek fazında %2 arıza şiddetine sahip SMSM'nin stator faz gerilimleri ve akımları Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da, kısa devre akımı ise Şekil 4.17'de verilmektedir. Tek fazında binde 5 arıza şiddetine sahip olan bir SMSM ile tek fazında yüzde 2 kısa devre arızası olan motor akımları ve gerilimleri kıyaslandığında üç faz stator akımları ve gerilimlerinde gözle görünür her hangi bir değişim olmadığı, ancak kısa devre akımlarında artış olduğu izlenmektedir.



Şekil 4.15 Stator gerilimleri (V_{abc})



Şekil 4.16 Stator akımları (i_{abc})

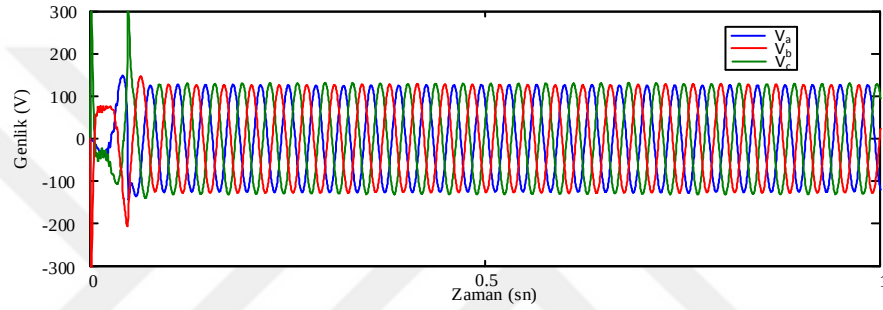


Şekil 4.17 Kısa devre akımı (i_f)

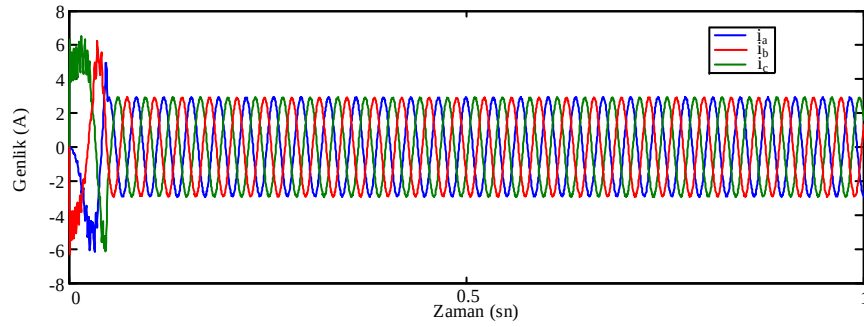
Burada kısa devre akımının ölçülmesi gerçek bir sistemde çok zor olduğu halde benzetim modelinde buna imkân sağlanmaktadır. Zaman düzleminde stator akım ve gerilimleri arasında görülemeyen farklılıklar frekans düzleminde bazı harmoniklerin genliklerindeki değişimler izlenerek daha rahat gözlemlenebilmektedir.

4.5 Kısa Devre Oranı %7 olan Arızalı Motor Benzetim Sonuçları

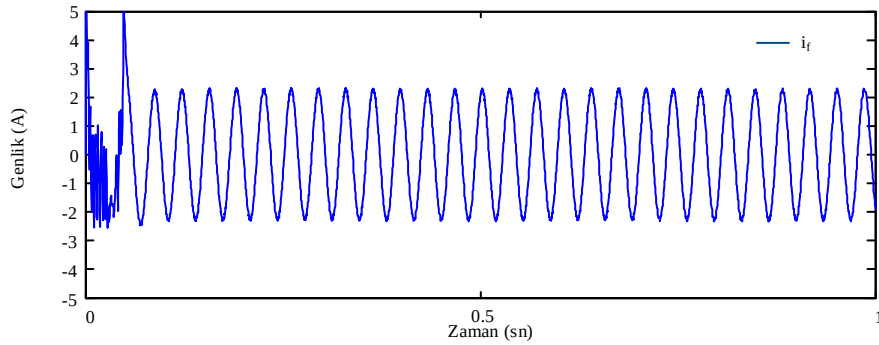
Tek fazında %7 kısa devre arıza şiddetine sahip SMSM'nin stator faz gerilimleri ve akımları Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da, kısa devre akımı ise Şekil 4.20'de verilmektedir.



Şekil 4.18 Stator gerilimleri (V_{abc})



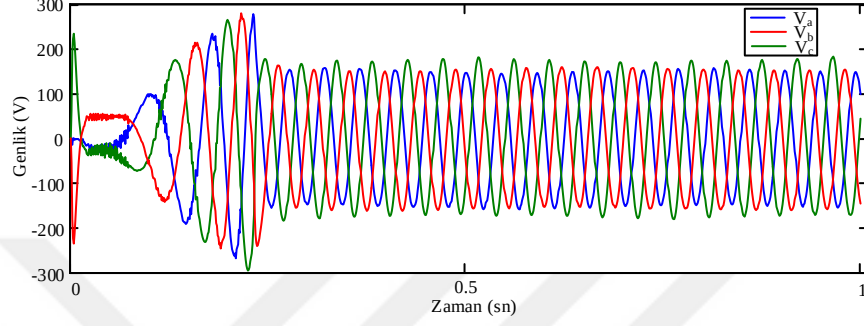
Şekil 4.19 Stator akımları (i_{abc})



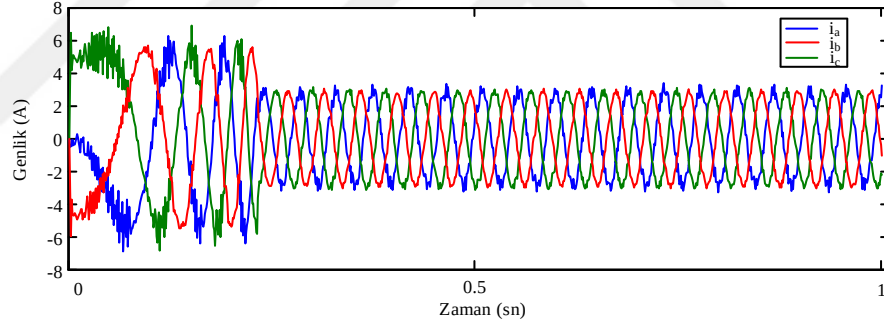
Şekil 4.20 Kısa devre akımı (i_f)

4.6 Kısa Devre Oranı %12.5 olan Arızalı Motor Benzetim Sonuçları

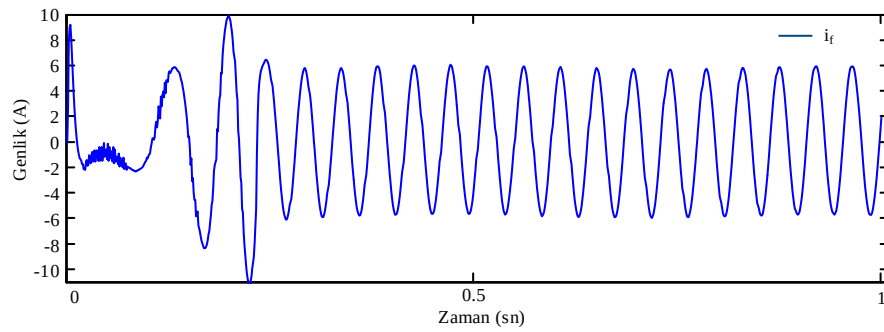
Tek fazında %12.5 arıza şiddetine sahip SMSM'nin stator faz gerilimleri ve akımları Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de kısa devre akımı ise Şekil 4.23'te verilmektedir. Arıza şiddeti yüzde 2'den yüzde 12.5'e çıktığında stator gerilimlerindeki dengesizlik ve stator faz akımlarındaki düzensizlik gözle görülebilir hale gelmektedir.



Şekil 4.21 Stator gerilimleri (V_{abc})



Şekil 4.22 Stator akımları (i_{abc})

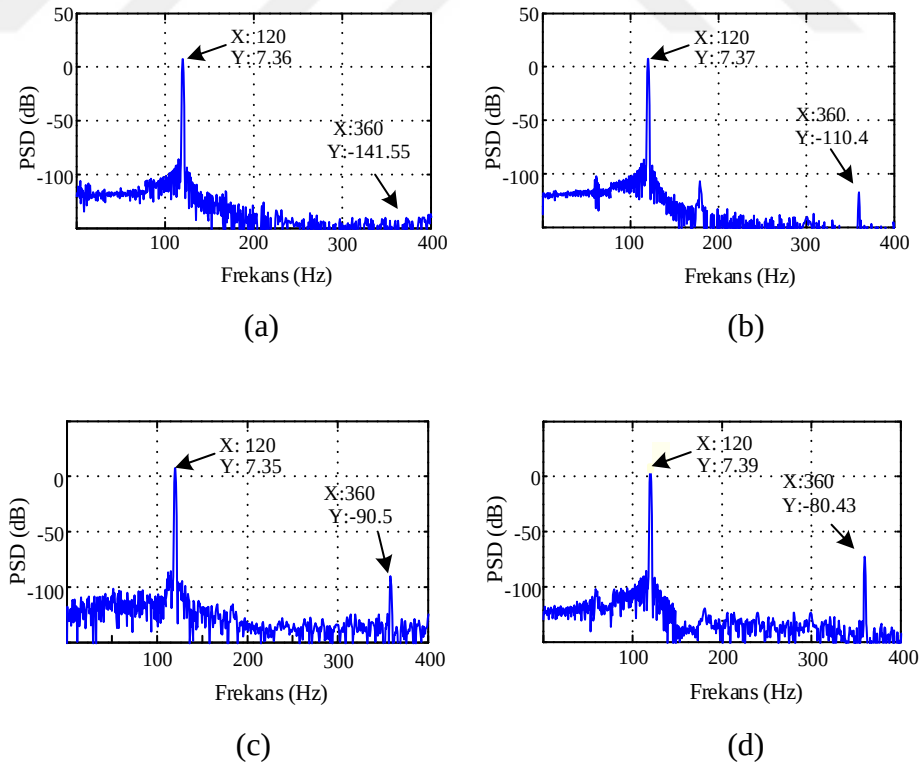


Şekil 4.23 Kısa devre akımı (i_f)

Beklenildiği gibi kısa devre akımının genliği de stator faz akımının nominal değerinin iki katına çıkmıştır. Kısa devre akımının yüksek değerlere ulaşması motorun sargı sıcaklığını aniden yükselteceğinden motora ciddi hasarlar verebileceği önceki çalışmalarda ortaya konmaktadır. Bu nedenlerle motorun arızasının küçük boyutlarda iken tespiti oldukça büyük bir öneme sahiptir. Buradan görülmektedir ki motorun arızasının erken evrede tespiti için stator faz akım ve gerilimleri zaman düzleminde izlemek başarı sağlamamaktadır.

4.7 Benzetim Modelinden Elde Edilen Stator Faz Akımlarının Frekans Düzleminde Analiz Edilmesi

Benzetim modelinde istenilen hızda ve yük koşulu altında farklı arıza şiddetine sahip SMSM'nin akımları FFT yöntemi kullanılarak frekans düzleminde izlenebilmektedir. Böylece çalışma koşulu ve arıza şiddeti değişimlerine karşı akım harmoniklerinin genliklerindeki değişimler arıza tespitinde ve arıza şiddetinin sınıflandırılmasında kullanılabilecektir. Bu bölümde 1800 dev/dk hızda, tam yüklü durumdaki SMSM'nin farklı arıza şiddetlerinde akım spektrumlarına bakılmıştır.



Şekil 4.24 (a) Sağlıklı SMSM, (b) %2 kda, (c) %12.5 kda, (d) %25 kda SMSM'nin benzetim modelinden elde edilen akım spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 4.24'te SMSM'nin sağlıklı ve stator sarımlar arası kısa devre arızalı benzetim modelinden elde edilen akım spektrumları görülmektedir. Bu grafiklerden de anlaşıldığı üzere 1800 dev/dk hızda tam yükte farklı kısa devre oranlarına sahip SMSM'lerin her dört durum için akım spektrumları kıyaslandığında 3. harmonik genlik değerinin arıza şiddetine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Sağlıklı SMSM'nin akım spektrumunun 3. harmonik genlik değeri -141.55 dB iken, %2 kda SMSM'nin 3. harmoniğinin genlik değerinin -110.4 dB'ye yükseldiği, %12,5 kda durumunda -90.50 dB'ye ve %25 kda durumunda ise -80.43 dB'ye yükseldiği açıkça gözlenmektedir. Bu da benzetim modeli ile deneysel çalışmanın birbirini desteklediğini göstermektedir. Hazırlanan bu benzetim modeli ile farklı hız ve yüklenme koşullarında alınan tüm sonuçlar benzer şekildedir. Elde edilen benzetim modeli ile deney yapmaya ihtiyaç duyulmadan istenilen kısa devre oranındaki SMSM akım ve gerilim verisi alınabilmektedir.

Benzetim modeli kullanılarak 3 faz akım ve gerilim verileri alınarak uzay vektör negatif ve pozitif bileşen harmoniklerinin arıza şiddetine göre değişimi izlendiğinde genlik değişimleri Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te gösterildiği gibidir. Tablo 4.2'de görüldüğü üzere uzay vektör gerilimin negatif bileşeninin temel harmoniğinin ($-f_v$) genlik değeri motorun sağlıklı olup olmamasına ve arızalıysa arıza şiddetine göre değişim göstermektedir. Sağlıklı motorda 0.00046 V iken %2 kda durumunda 0.07161 V'a %12,5 kda durumunda 7.534 V'a ve son olarak %25 kda durumunda 14.987 V'a yükselmektedir. Negatif gerilim bileşenin 3. harmonik genlik değeri ($-3f_v$) sağlıklı durumda 0.00105 V, %2 kda durumunda 0.08202 V, %12,5 kda durumunda 1.269 V ve %25 kda durumunda 3.181 V değerine çıkmaktadır. Negatif akım bileşenin 3. harmonik genlik değeri ($-3f_c$) sağlıklı durumda 0.00010 V, %2 kda durumunda 0.0014 A, %12,5 kda durumunda 0.00298 A ve %25 kda durumunda 0.0068 A değerine çıkmaktadır. Pozitif akım bileşenin 3. harmonik genlik değeri ($+3f_c$) sağlıklı durumda 0.00073 A, %2 kda durumunda 0.0015 A, %12,5 kda durumunda 0.007 A ve %25 kda durumunda 0.0108 A değerine çıkmaktadır.

Tablo 4.2 800 dev/dk tam yüklü

800 dev/dk		Sağlıklı	%2 Anızalı	%12,5 Anızalı	%25 Anızalı
GERİLİM	$-f_v$	0.00046	0.07161	7.53400	14.98700
	$-3f_v$	0.00105	0.08202	1.26900	3.18100
AKIM	$-3f_c$	0.00010	0.00140	0.00298	0.00680
	$+3f_c$	0.00073	0.00358	0.01390	0.03061

Tablo 4.3’de de 1800 dev/dk hızda tam yükte çalıştırılan benzetim modelinden elde edilen arıza imzalarının arıza şiddetine göre değişimi gösterilmektedir. Burada Tablo 4.2’de olduğu gibi arıza şiddeti arttıkça söz konusu arıza imza harmoniklerinin genlik değerleri artış göstermektedir. Hız değişimine bağlı olarak Tablo 4.3’deki değerler Tablo 4.2’den daha yüksek değerlere ulaşmaktadır.

Tablo 4.3 1800 dev/dk tam yüklü

1800 dev/dk		Sağlıklı	%2 Anızalı	%12,5 Anızalı	%25 Anızalı
GERİLİM	$-f_v$	0.00062	0.04040	7.24500	14.02000
	$-3f_v$	0.00170	0.10870	1.32200	3.90100
AKIM	$-3f_c$	0.00047	0.00068	0.00180	0.04340
	$+3f_c$	0.00076	0.00272	0.00970	0.01770

5. DENEYSEL DEVRE DÜZENEGİ VE DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızası durumu için deneysel sonuçlar incelenmektedir. Bunun için tasarlanan deneysel düzenek kısaca tanıtılmaktadır. SMSM'nin sağlıklı ve farklı kısa devre oranlarındaki arıza durumları farklı yük ve hızlarda test edilerek elde edilen sonuçlar tartışılmaktadır.

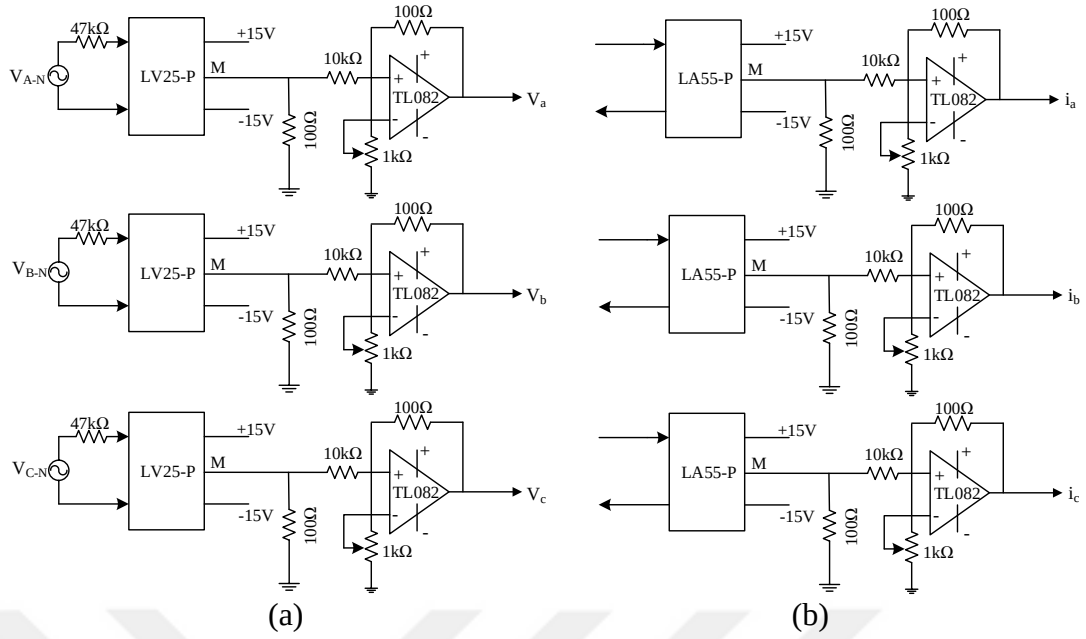
5.1 Deneysel Devre Düzenegi

Bu bölümde ilk olarak SMSM'den elde edilen akım ve gerilim sinyallerini belli bir örnekleme frekansında kayıt etmeye imkan sağlayan veri toplama sistemi anlatılacaktır. Daha sonra SMSM'nin yükleme sistemi hakkında bilgi verilecektir.

5.1.1 Veri Toplama Sistemi

SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızasının tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesi için geliştirilen algoritmalarda üç faz gerilim ve akımlar ölçülmektedir. Analog sinyallerin analog dijital dönüştürücüler (ADC) vasıtasıyla ölçülebilmesi için uygun forma dönüştürülmesi gereklidir. Motor fazlarından gelen gerilim ve akım bilgilerini DAQ ile ölçmek için birer arayüz devresi kullanılmaktadır.

Deneysel devre düzeneginde akım ve gerilim algılayıcıları olarak LEM firması tarafından üretilen LA55-P ve LV25-P modelleri kullanılmıştır. Akım algılayıcısının ölçme aralığı 0-50A, gerilim algılayıcısının ölçme aralığı ise 10-500V'tur. Şekil 5.1.a ve 5.1.b'de akım ve gerilim algılayıcı devrelerin şemaları gösterilmektedir. Bu şemalar kullanılarak basılan baskı devreler akım ve gerilim verilerini veri toplama kartına aktararak işlenmesine olanak vermektedir.



Şekil 5.1 (a) Gerilim algılama devresi (b) Akım algılama devresi

Motor terminallerinden akan kaynak akımı LEM firmasının LA 55-P kodlu Hall Effect akım dönüştürücüsü kullanılarak ölçülmektedir. Sensörün dönüştürme oranı 1:1000, giriş nominal akım değeri 50 A'dır. Maksimum giriş akımı uygun direnç değerleri seçildiğinde 100 A'e kadar çıkmaktadır. Ölçüm hassasiyeti $\pm 0.65\%$ doğrulukla ölçüm yapabilmektedir. Duyarlılığı arttırmak için motor kablosu 5 sarım olarak sensörün çekirdeğine sarılmıştır. Böylece 5A'lık motor akımının tepeden tepeye $\pm 2.5V$ aralığında bir çıkış gerilimine karşılık gelmesi sağlanmaktadır.

Motor faz gerilimleri LEM firmasının LV 25-P kodlu gerilim dönüştürücüsü kullanılarak ölçülmektedir. Sensörün nominal gerilim ölçüm aralığı 10-500 V arasındadır. Besleme gerilimi 12 V seçildiğinde $\pm 0.9\%$ doğrulukla ölçüm yapabilmektedir. Çok hızlı tepki süresi olan bu sensörün ölçüm tepki süresi 40 μs 'dir. LV 25-P gerilim sensörü sahip olduğu bu özellikleri ile durum izleme uygulamalarında çok tercih edilen bir sensördür.

Örnekleme için 8 adet analog girişi 2 adet analog çıkışı olan NI 6341-USB DAQ kartı kullanılmıştır. İstenilen frekansta ve sürede verileri toplamak için LabVIEW'de yazılmış arayüz programı kullanılmıştır. Düzenekte kullanılan SMSM'leri süren eviricili sürücünün besleme fazlarından, NI 6341 DAQ'ın analog giriş portları ile gerçek zamanlı akım ve gerilim verileri kayıt altına alınmıştır.

5.1.2 Motor ve Yükleme Sistemi

SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızasının tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesi amacıyla tek fazında arıza şiddeti birbirinden farklı sarımlar arası kısa devre arızası bulunan, diğer yönlerden birbirine özdeş motor parametreleri Tablo 5.1'de verilen üç fazlı 1 kW'lık, 3 Nm'lik anma momentine sahip 3 adet SMSM imalatı yapılmıştır. Bu SMSM'lerden arıza şiddeti en düşük oranda olanının, tek fazında %2 oranında sarım, kısa devre edilmiştir. Diğer ikisi sırasıyla tek fazında %12,5 ve %25 oranında kısa devre edilmiş sarıma sahip motorlar olarak imal edilmiştir. Böylece deneysel olarak motorun sağlıklı olup olmadığı, arızalı ise arıza şiddetinin hangi oranda olduğunun kestirimi yapılabilecektir. Burada amaç kullanıcıya, arıza şiddeti %2 ise motorun arızalanmaya başladığı, %12,5 ise arızanın giderek arttığını ve %25'e ulaştıysa artık motorun bakıma alınması gerektiğinin bilgisinin verilmesini sağlamaktır.

Motoru yüklemek amacıyla fuko freni kullanılmıştır. Fuko frenin besleme gerilim değeri değiştirilerek test edilen motorun yükleme miktarı ayarlanmıştır. Bu amaçla ayarlanabilir DC gerilim kaynağı kullanılmıştır. Böylece SMSM'yi istenilen oranda yükleyerek farklı yüklenme koşullarındaki çalışma durumları için akım ve gerilim verileri kayıt edilmiştir.

Tablo 5.1 SMSM Parametreleri

Güçü	1 kW
Faz Sayısı	3
Sarım Sayısı / Faz	280
Mil Momenti	3 Nm
Kutup sayısı	8
Bobin İndüktansı	7.16 mH
Faz Sargı Direnci	7.6 Ω
Atalet momenti	0.0001854 kgm ²
Şebeke frekansı	50 Hz
Şebeke gerilimi,	220 V
Max. Hız	3000 dev/dk

Deneysel düzenek şematik olarak Şekil 5.2'de deneysel düzeneğin görüntüsü ise Şekil 5.3'te verilmektedir.

harmonik genliklerindeki değişimler üzerine odaklanıldığında; arıza şiddetinin, motor çalışma hızının ve motorun yüklenme miktarının değişimiyle, hangi akım harmonik genliklerinde değişimler olduğu saptanmıştır. Bunun için ilk çalışmanın deneysel tasarımında 10 kHz'lik örnekleme frekansı ile sağlıklı ve tek fazında %2, %12,5 ve %25 oranında kısa devre arıza oranına sahip motorlardan, 600 dev/dk - 2000 dev/dk hız aralığında ve %0-%125 yüklü durumları için belirli sayılarda deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde farklı arıza şiddetine sahip motorların aynı yük ve hız durumundaki akım sinyalleri kayıt edildiğinden arıza şiddetine bağımlı akım harmoniği tespit edilmeye çalışılmıştır. Yapılan çok sayıda ölçüm, izleme ve karşılaştırmadan sonra aynı hız ve yük durumundaki özdeş, ancak farklı arıza şiddetine sahip motorlarda stator faz akımının 3. harmoniğinin arıza şiddetine bağımlı olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra aynı arıza şiddetine sahip, farklı hız ve yüklenme durumlarında akımın 3. harmoniğinin değişimi de izlenmiştir. Bunun sonucunda da yüklenme miktarı yüksek olan aynı arıza şiddetine ve aynı hıza sahip motorlarda akımın 3. harmonik genliğinin yüklenme miktarı daha düşük olan motorun akımının 3. harmoniğinin genliğinden daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Yüklenme miktarı ile motor akımının 3. harmoniği arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Aynı şekilde motor hızının da akımın 3. harmoniğinin genliğinde pay sahibi olduğu ve hız ile 3. harmonik arasında da bir ilişki bulunduğu belirlenmiştir. Ancak buradaki tespitlerden motor akımının 3. harmoniğinin arıza şiddeti, motor hızı ve yüklenme miktarı ile ne ölçüde ilişkili olduğunun belirlenmesi gerekmektedir.

İkinci çalışmada da ilk çalışmada kullanılan üç farklı arıza şiddetine sahip SMSM'lerden 800 dev/dk - 2100 dev/dk hız aralığında ve %0 - %125 yüklenme oranlarında örnekleme frekansı 10 kHz olacak şekilde 3 sn süresince üç faz stator akım ve gerilimleri kayıt altına alınmıştır. Bu çalışmada kayıt edilen üç faz akım ve gerilim sinyalleri öncelikle $d-q$ düzlemine aktarılmıştır. Akım ve gerilim $d-q$ sinyalleri kullanılarak akım ve gerilim uzay vektörleri oluşturulmuş ve daha sonra elde edilen bu kompleks sinyallere FFT uygulanarak içeriğindeki negatif ve pozitif bileşenler izlenmiştir. Farklı arıza şiddetine sahip motorların farklı hız ve yük durumları için negatif ve pozitif akım ve gerilim bileşenlerinin değişimi belirlenerek elde edilen bu özelliklerin arıza tespitinde kullanılması değerlendirilmiştir. Belirlenen bu arıza imzaları kullanılarak motorun sağlıklı mı yoksa arızalı mı olduğunu tahmin etmenin yanı sıra arızalıysa arıza şiddetinin de tahmini

hedeflenmiştir. Tespit edilen arıza imzalarının arıza şiddetine bağlı değişimleri sonuçlarda verilmektedir.

5.3 Deneysel Sonuçlar

Bilindiği üzere stator sarımlar arası kısa devre arızası meydana geldiği sargı üzerinde bir dengesizlik meydana getirmektedir.. Bu dengesizlik kısa devre olan sarımların sayısına ve sargı içerisindeki yüzdelik orana bağlı olarak değişir. Örneğin sargı içerisinde kısa devre olan sarım oranı çok küçük ise bu dengesizlik motorun çalışma performansı üzerinde hissedilir boyutlarda olmadığından, motorun titreşimi, sıcaklığı, gürültüsü veya zaman düzlemindeki akım ve gerilim grafiklerinde ölçülebilir boyutlarda olmadığından tespit edilmesi zordur. Böyle henüz başlangıç aşamasındaki ve klasik yöntemlerle tespit edilemeyen, ancak ileride çok büyük problemlere neden olabilecek arızaların tespiti, motorun güvenli ve güvenilir çalışması açısından oldukça önemlidir.

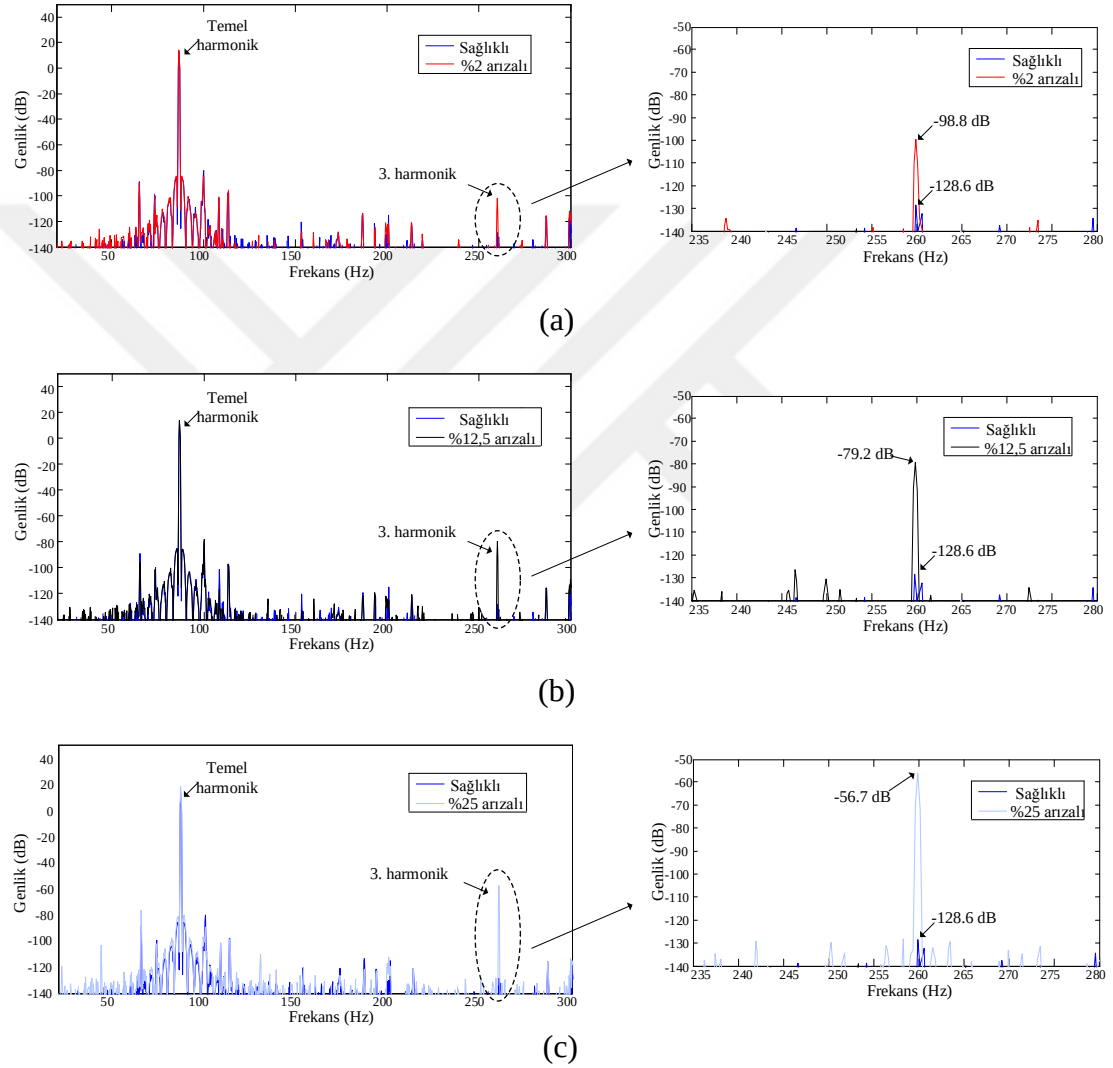
Gözle görülebilir veya hissedilebilir boyutlarda olmayan arızaların tespiti için araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar neticesinde oldukça farklı yöntemler önerilmektedir.

Bu tezde stator sarımlar arası kısa devre arızasının tespiti ve arıza şiddetinin sınıflandırmasının yüksek doğrulukta yapılması için 2 yöntem önerilmiştir. Bu yöntemlerden birincisi, stator fazından ölçülen ve kayıt edilen akım bilgisine FFT uygulanarak, 3. harmonik genliğindeki değişim miktarının ölçülmesi ve hem arızanın tespiti hem de arıza şiddetinin sınıflandırılması esasına dayanmaktadır. İkinci yöntem stator sargılarından ölçülen ve kayıt edilen akım ve gerilim bilgilerinin, 3 fazdan 2 fazlı $d-q$ düzlemine aktarılarak elde edilen uzay vektörlere FFT uygulanması ile akım ve gerilimlerin, negatif ve pozitif bileşenlerindeki değişimin izlenmesi esasına dayanmaktadır.

5.3.1 Stator Akımının 3. Harmonik Genlik Değeri Değişimi Kullanılarak Arıza Tespiti

Bu yöntem, SMSM'nin herhangi bir faz sargısından akan akımın belirli bir örnekleme aralığıyla kayıt edilerek çevrimdışı olarak izlenmesine olanak verdiği gibi

anlık olarak izlenmesi ve sistem çalışır durumdayken çevrimiçi olarak arıza tespitine de olanak vermektedir. Bu çalışmada 10 kHz örnekleme frekansı ile kayıt ettiğimiz akım bilgisine FFT uygulamak suretiyle oluşan temel harmonik ve 3. harmoniğin genlik değişimlerinden arıza olup olmadığı, eğer arıza varsa, arıza şiddetinin yüzdelik olarak hangi aralıkta olduğu belirlenebilmiştir. Bu amaçla arıza şiddeti bilinen üç adet birbirine özdeş SMSM kullanılarak sınıflandırıcı ağlarının eğitim ve test verileri oluşturulmuştur.



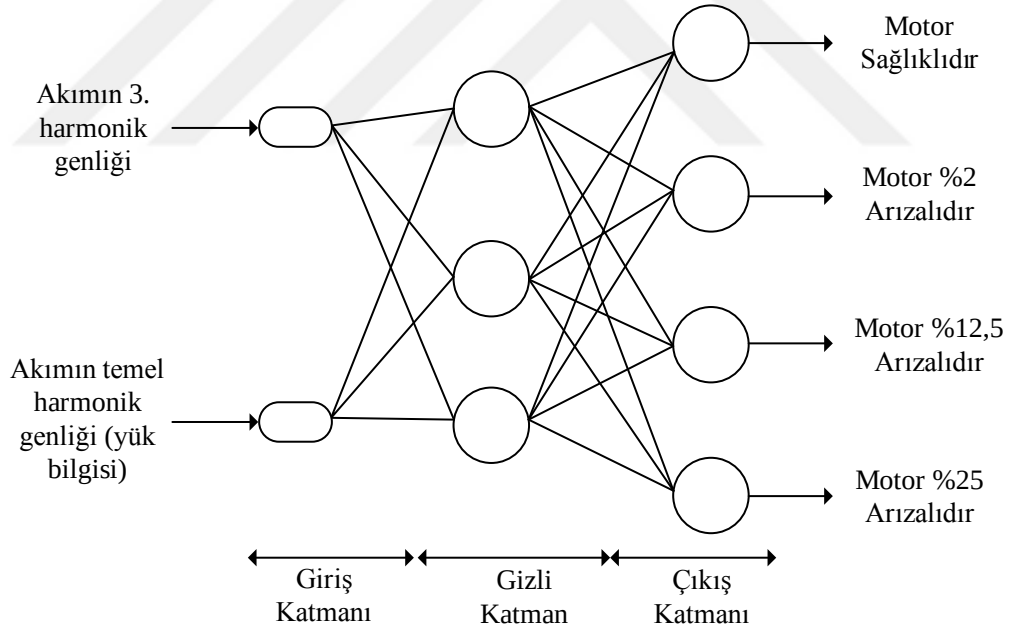
Şekil 5.4 Stator akım spektrumları a) %2 kda, b) %12.5 kda, c) %25 kda

Şekil 5.4'te belirli bir hız ve yük durumunda çalışan sağlıklı ve farklı arıza oranlarına sahip SMSM'lerin stator akım spektrumları karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Bu grafiklerden anlaşıldığı üzere arıza şiddeti arttıkça akımın 3. harmoniğinin genlik değeri de artış göstermektedir. Şekil 5.4.a'da görüldüğü üzere,

sağlıklı motor akımının 3. harmonik genlik değeri ile arıza şiddeti %2 olan motor akımının 3. harmonik genlik değeri arasında 29,8 dB'lik bir fark var iken, arıza şiddeti %12,5 olan motor akımının 3. harmonik genlik değeri ile 49,4 dB'lik bir fark olduğu, Şekil 5.4.b'de görülmektedir. Arıza şiddeti %25 olan motorun akımının 3. harmonik genlik değeri ile sağlıklı motor arasında 71,9 dB'lik bir fark olduğu da Şekil 5.4.c'de görülmektedir.

5.3.2 Stator Akımının 3. Harmonik Değişimi ile Arıza Şiddetinin Belirlenmesi

Bu çalışmada kullanılan sınıflandırıcılardan MLP, yapay sinir ağları temelli bir sınıflandırıcı olduğundan Şekil 5.5'te giriş, çıkış ve gizli katmanları şematik olarak gösterilmektedir. Bu tezde kullanılan tüm sınıflandırıcı algoritmalar doğruluk oranları ve işlem süreleri farklılık gösterse bile benzer mantıkla çalışmaktadır. Arıza tespitin ve arıza şiddetinin stator akımının 1. ve 3. harmonik genliği ile yapıldığı sınıflandırıcı algoritmalarda 2 adet giriş ve 4 adet çıkış vardır.



Şekil 5.5 Arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde stator akımının 1. ve 3. harmonik genlik değerlerinin sınıflandırmada kullanılmasının şematik gösterimi.

Şekil 5.6'da farklı yük ve hız durumları için kayıt edilip, FFT kullanılarak SMSM'nin stator faz akımı spektrumundan elde edilen 1. ve 3. harmonik genlik değerlerinin arıza imzası olarak kullanılmasıyla çok katmanlı yapay sinir ağı (MLP) algoritması ile elde edilen otomatik arıza tespiti sonucu görülmektedir. Buna göre

motor stator akımının 1. ve 3. harmoniklerinin genliğinin stator sarımlar arası kısa devre arızasına bağlı olarak değişiminden yararlanılarak bir yapay sinir ağı eğitilebilmektedir. Eğitilen çok katmanlı yapay sinir ağı algoritmasının SMSM'nin sarımlar arası kısa devre arızasına sahip olup olmadığını %97.8 doğrulukla tahmin edebildiği görülmektedir.

Sağlıklı	157	6	96.3%
%2 Arızalı	1	152	99.4%
	99.4%	96.2%	97.8%
	Sağlıklı	%2 Arızalı	

Şekil 5.6 MLP kullanılarak otomatik arıza tespiti doğruluk tablosu.

Arıza tespitinin yüksek bir doğruluk oranı ile tahmin edilmesi motor arıza tespitinin başarısı açısından önemli bir sonuçtur. MLP'nin arıza şiddetinin belirlenmesinde kullanılmasıyla elde edilen başarı oranı farklı kda'lar için ortalama %91.9 olmaktadır. Bu sınıflandırmanın doğruluk tablosu Şekil 5.7'de verilmektedir.

Sağlıklı	157	6	1	0	95.7%
%2 Arızalı	1	152	9	1	93.3%
%12.5 Arızalı	0	0	85	19	81.7%
%25 Arızalı	0	0	5	80	94.1%
	99.4%	96.2%	85.0%	80.0%	91.9%
	Sağlıklı	%2 Arızalı	%12.5 Arızalı	%25 Arızalı	

Şekil 5.7 MLP kullanılarak otomatik arıza şiddetinin belirlenmesi için doğruluk tablosu

Aynı arıza imzası eğitim, test ve doğrulama verisi olarak kullanılarak eğitilen makina öğrenme algoritmalarının doğruluk tahminleri Tablo 5.2’de görülmektedir. Bu tabloda da görüldüğü üzere, destek vektör makinası algoritması (SVM) kullanılarak yapılan arıza tespiti %94.4 doğruluk ile arıza şiddetinin belirlenmesi ise %88.8 doğrulukla tahmin edilebilmektedir. k-en yakın komşuluk (kNN) algoritması ile arıza tespiti %88.7 ve arıza şiddeti %87.3 doğruluk ile tahmin edilebilmektedir. Rastgele orman (random forest-RF) algoritması kullanılarak arıza tespiti %97.1 ve arıza şiddeti %91.3 doğruluk ile tahmin edilmektedir. Son olarak karar ağacı (decision tree-DT) öğrenme algoritması ile arıza tespiti %97.4 ile arıza şiddeti ise %92 doğruluk ile tespit edilmektedir. Bu uygulamanın sonucuna göre, 3. harmonik genliği arıza imzası kullanılarak yapılacak arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde en başarılı yöntem MLP algoritmasıdır.

Tablo 5.2 Stator akımının 3. harmonik genliği arıza imzası ile arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde tahmin doğruluk yüzdeleri

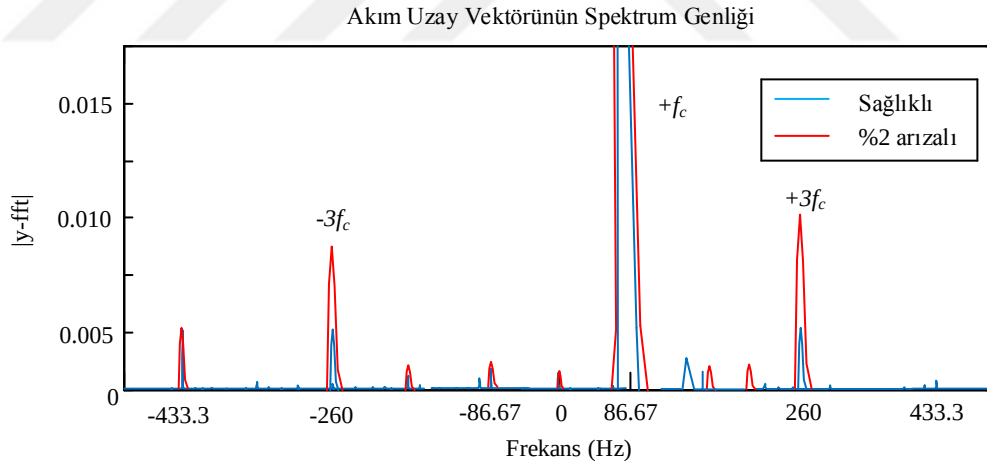
Sınıflandırma Türü	Arıza Tespiti	Arıza Şiddeti
MLP	%97.8	%91.9
SVM	%94.4	%88.8
kNN	%88.7	%87.3
RF	%97.1	%91.3
DT	%97.4	%92.0

5.3.3 Stator Akım ve Gerilimlerinin Uzay Vektör Negatif ve Pozitif Bileşen Harmonikleri Kullanılarak Arıza Tespiti

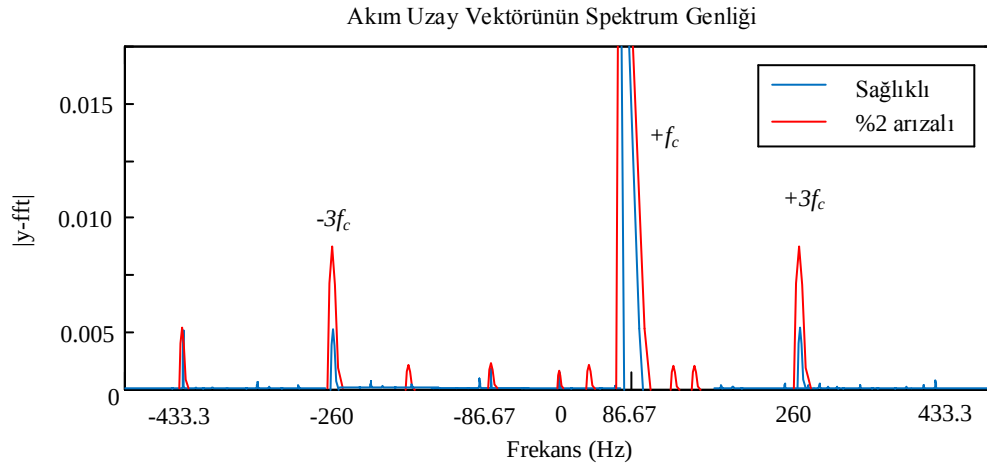
Arızalı bir motorun faz dengesizliğinin kendini mutlaka simetrik bileşenlerin harmonik değerlerinde göstereceği esasına dayalı olarak arızanın tespitinde ve arıza şiddetinin belirlenmesinde simetrik bileşenlerin izlenmesinin sonuç verici bir yöntem olacağından yola çıkılarak bu yöntem elde edilmiştir.

Bu çalışmada 10 kHz örnekleme frekansı ile 3 saniye süresince kayıt edilen, üç faz akım ve gerilim sinyalleri, uzay vektör dönüşüm matrisi yardımıyla $d-q$ eksenlerine aktararak elde edilen kompleks akım ve gerilim sinyallerine FFT uygulanmıştır.

Bu sayede akım ve gerilim sinyallerinin simetrik bileşenleri, yani negatif ve pozitif simetrik bileşenlerin harmoniklerinin değişimi izlenebilmiştir. Burada asıl amaçlanan sağlıklı ve arızalı durumlarda hangi simetrik bileşen harmoniğinin ne oranda değiştiğini belirleyebilmektir. Farklı hız ve yük durumları için sağlıklı ve arızalı SMSM'lerden kayıt edilen akım sinyalleri uzay vektör simetrik bileşenlerin harmonik analizi ile incelendiğinde, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 elde edilmiştir. Buna göre, örneğin 1300 dev/dk'lık sabit hızda çalışan sağlıklı ve başlangıç aşamasında kabul edilebilen %2'lik kda SMSM'nin negatif ve pozitif bileşen akım harmoniklerindeki değişimler incelendiğinde, Şekil 5.8'de görüldüğü üzere, yüksüz durumda, motorun arıza durumunda, akım uzay vektör temel harmoniği ($+f_c$), akım uzay vektör 3. harmoniği ($+3f_c$) ve akım uzay vektör negatif bileşen 3. harmoniğinin ($-3f_c$) genliklerinde artış gözlenmektedir. Aynı şekilde aynı hız koşullarında çalıştırılan SMSM'lerin tam yüklü çalışma koşulunda da arıza durumunda aynı harmoniklerin artış kaydettiği Şekil 5.9'da gözlenmektedir. Artış miktarları ve değişim oranları arızanın tespitinde ve arıza şiddetinin oranının belirlenmesinde etkin olarak kullanılabilecek özellikleri belirlemede büyük rol oynamaktadır.

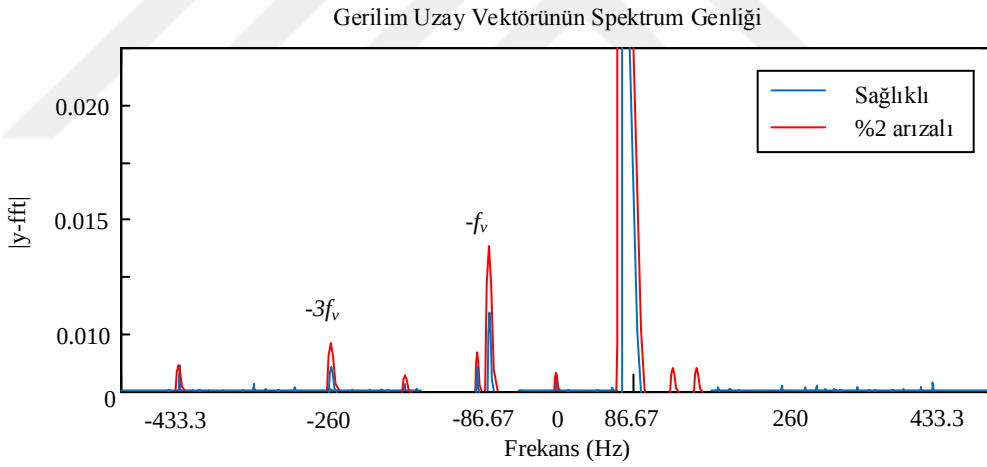


Şekil 5.8 1300 dev/dk hızda, yüksüz çalışan sağlıklı ve arızalı SMSM için negatif ve pozitif akım harmoniklerinin değişiminin karşılaştırılması



Şekil 5.9 1300 dev/dk hızda tam yükte çalışan sağlıklı ve arızalı SMSM için negatif ve pozitif akım harmoniklerinin değişiminin karşılaştırılması

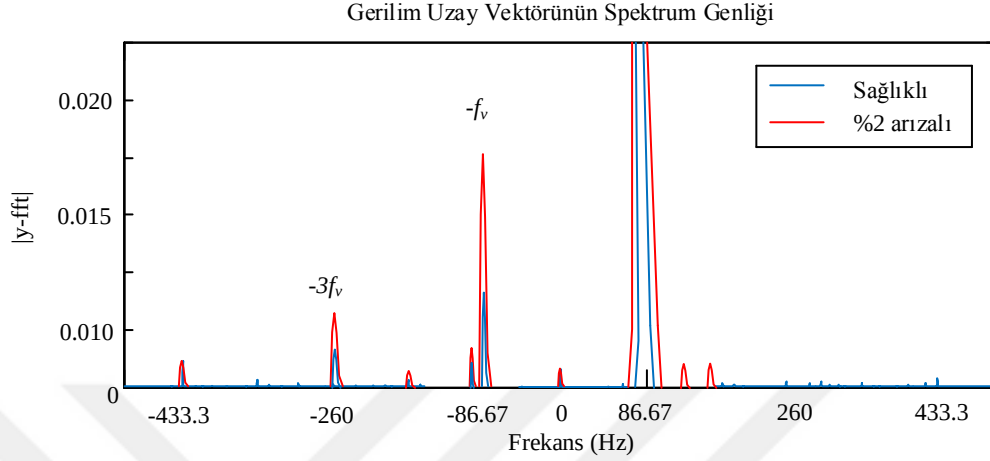
Aynı çalışma koşulları için gerilim uzay vektörlerinin spektrum genliklerindeki değişimler Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de görülmektedir.



Şekil 5.10 1300 dev/dk hızda yüksüz çalışan sağlıklı ve arızalı SMSM için gerilim harmoniklerinin değişiminin karşılaştırılması

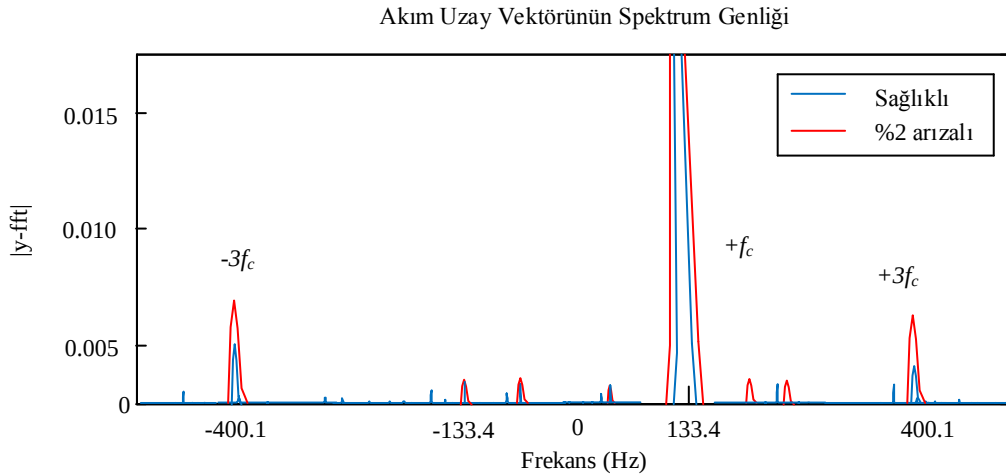
Burada, özellikle yüksüz durum için sağlıklı ve arızalı durumdaki SMSM’lerin spektrumlarının genliklerindeki değişimin karşılaştırılması Şekil 5.10’da görülmektedir. Aynı şekilde ve tam yüklü durum için sağlıklı ve arızalı durumdaki SMSM’lerin spektrumlarının genliklerindeki değişimin karşılaştırılması Şekil 5.11’de açıkça görülmektedir. Buna göre arıza durumunda gerilim uzay vektör negatif bileşen temel harmoniğinin ($-f_v$) ve akım uzay vektör negatif bileşen 3.

harmoniğinin ($-3f_v$) genliğinde artış olduğu izlenmektedir. Buradaki artışın miktarı ve oranları arızanın varlığının tespitinin yanı sıra, arıza şiddetinin oranının belirlenmesinde etkin olarak kullanılabilecek özellikleri belirlemede büyük rol oynamaktadır.

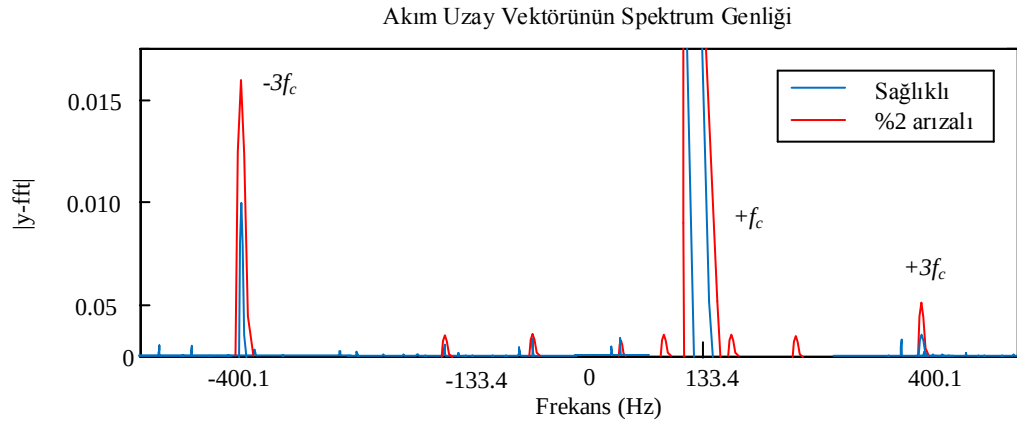


Şekil 5.11 1300 dev/dk hızda tam yükte çalışan sağlıklı ve arızalı SMSM için gerilim harmoniklerinin değişiminin karşılaştırılması

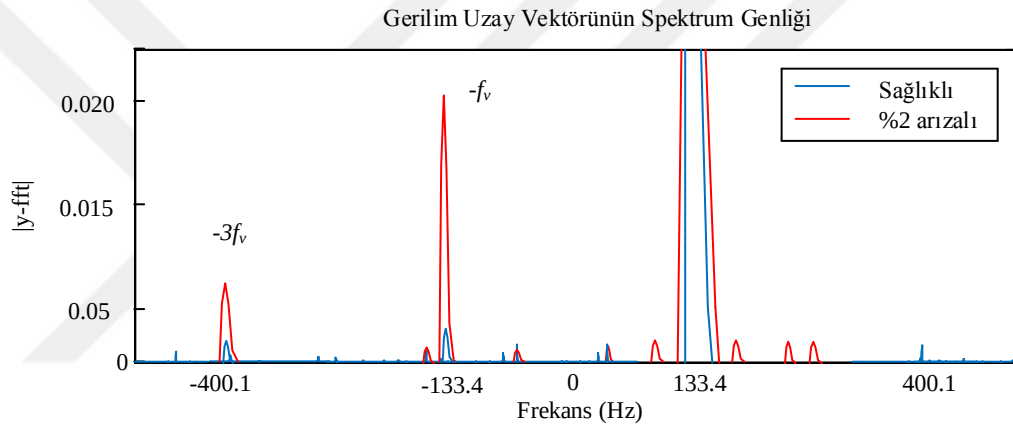
Yukarıda bahsedildiği üzere SMSM'nin çalıştırılma hızı arttırıldığında örneğin 2000 dev/dk'da sabitlendiğinde yukarıda bahsedilen arıza tespitinde ve arıza şiddetinin belirlenmesinde etkin olabilecek özelliklerin değişimi Şekil 5.12- Şekil 5.15'te verilmektedir.



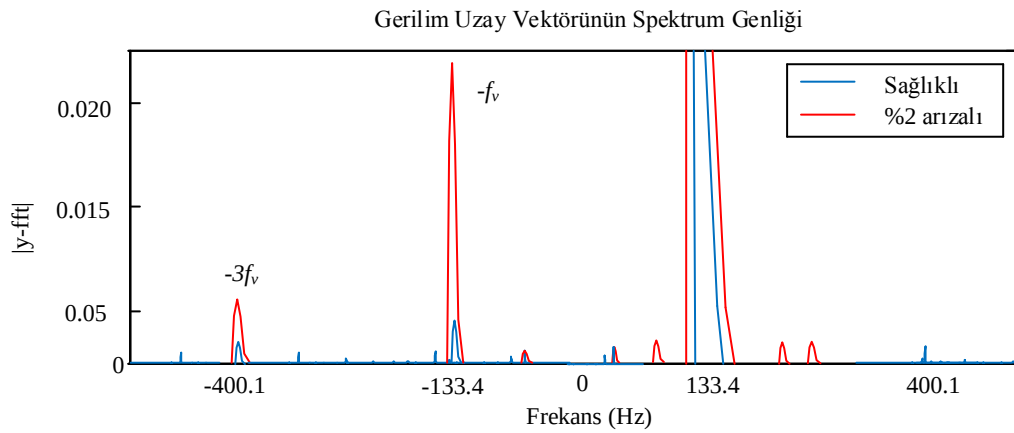
Şekil 5.12 2000 dev/dk hızda yüksüz çalışan sağlıklı ve arızalı SMSM için negatif ve pozitif akım harmoniklerinin değişiminin karşılaştırılması.



Şekil 5.13 2000 dev/dk hızda tam yükte çalışan sağlıklı ve arızalı SMSM için negatif ve pozitif akım harmoniklerinin değışiminin karşılaştırılması



Şekil 5.14 2000 dev/dk hızda yüksüz çalışan sağlıklı ve arızalı SMSM için gerilim harmoniklerinin değışiminin karşılaştırılması



Şekil 5.15 2000 dev/dk hızda tam yükte çalışan sağlıklı ve arızalı SMSM için gerilim harmoniklerinin değışiminin karşılaştırılması

5.3.4 Stator Akım ve Gerilimlerin Uzay Vektör Negatif ve Pozitif Bileşen Harmonikleri Kullanılarak Arıza Şiddetinin Belirlenmesi

Bu yöntem farklı hız ve yük koşulları altında çalışan farklı kısa devre arıza şiddeti oranlarına sahip SMSM'lerin üç faz akım ve gerilimlerin simetrik bileşen harmoniklerinin değişimlerinin izlenmesi esasına dayanmaktadır. Bu amaçla birbirine özdeş ve farklı arıza şiddeti oranlarına sahip tüm motorlar 800 dev/dk–2100 dev/dk hız aralığında ve %0-%125 yük aralığında çalıştırılarak belirli sayıda üç faz akım ve gerilim sinyalleri kayıt edilmiştir. Böylelikle sırasıyla sağlıklı, %2 kda, %12,5 kda ve %25 kda motorların her birinden 112'şer üç fazlı akım ve gerilim sinyalleri kayıt edilmiştir.

Kayıt edilen veriler sağlıklı ve arızalı durumlardaki simetrik bileşenlerin durumlarının belirlenebilmesi ve arıza şiddeti arttıkça bu bileşenlerdeki değişim miktarının artış oranı ile arıza şiddetinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Sağlıklı ve farklı orandaki arızalı koşullardaki negatif ve pozitif bileşen harmoniklerinin hangilerinin ne oranda değiştiği ve bu değişimlerin yük ve hıza bağlı olarak nasıl değiştiği bilgileri öğrenme algoritmalarının eğitim ve test verilerini oluşturmuştur. Eğitim verisi olarak kullanılan sinyallerin test amacıyla kullanılan veriler arasından seçilmemesi ve her eğitim sırasında çapraz doğrulama (cross-validation) ile ağırlıklı güvenirliliğinin artırılması sağlanmıştır. Böylece motorun her yük ve hız koşulu için genelleme yapılabilir sonuçlar elde edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca farklı sınıflandırma metotları uygulanarak hangi metodun doğruluğunun daha yüksek ve güvenilir olduğu tespit edilmiştir. Böylece bu tür uygulamalarda hangi sınıflandırma algoritmasının daha başarılı sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Motor çalışma hızı, yüklenme oranı ve arıza şiddeti gibi parametrelerin değişimlerinden etkilenen özelliklerin hangileri olduğu ve bu özelliklerin etkilenme oranlarının görülmesi açısından aşağıda 2 farklı hızda, yüksüz ve tam yüklü durumlardaki arıza şiddeti birbirinden farklı SMSM'lerin akım ve gerilim uzay vektör spektrum genliklerinin değişimleri Tablo 5.3 - Tablo 5.6'da detaylı şekilde verilmektedir. Bu tablolara bakılarak arıza şiddetinin artması durumunda yüksüz ve tam yüklü motorların hangi sinyal özelliklerinin değişiminin belirgin olduğu belirlenebilmektedir. Böylece arıza şiddeti sınıflandırma algoritmasında kullanılacak özellik elde edilmektedir. Tablolar detaylı olarak irdelendiğinde; arıza şiddeti, motor hızı ve yükü değiştikçe SMSM'nin $+3f_c$, $-3f_c$ akım uzay vektör harmonik

genliklerinde ve $-f_v$ ve $-3f_v$ gerilim uzay vektör harmonik genliklerinde değişim gözlenmektedir. Bu harmoniklerden arıza şiddetine bağlı olarak değişen harmoniklerin her birine "arıza imzası" denilebilir. Çünkü her harmonik aslında sinyalin kendine has özelliklerini temsil ettiğinden bundan sonra arıza imzası olarak anılacaktır.

Bu imzalardan bazılarının yük durumuna bazılarının ise hız durumuna göre bariz bir şekilde değişim gösterdiği gözlenmektedir. Böylece bu imzaların bize motorun yalnızca arıza durumu ile ilgili değil aynı zamanda hız ve yük durumu ile ilgili de bilgi verebildiği belirlenmiştir. Örneğin Tablo 5.3'de verilen verilerden yola çıkarak, motor hızı 1300 dev/dk ve yüksüz çalışma durumunda iken arıza şiddetinin artışına bağlı olarak $-f_v$ ve $-3f_v$ gerilim uzay vektör harmonikleri ile $+3f_c$ ve $-3f_c$ akım uzay vektör harmoniklerinin ciddi bir artış kaydettiği görülmektedir. Tablo 5.4'teki verilere bakılacak olursa, 1300 dev/dk ve tam yüklü çalışma durumunda iken aynı harmoniklerin arıza şiddetine bağlı olarak artış gösterdiği görülmektedir. Böylece $-f_v$ ve $-3f_v$ gerilim uzay vektör harmonikleri ile $+3f_c$ ve $-3f_c$ akım uzay vektör harmoniklerinin genliklerinin değişiminin arıza imzası olarak kullanılabileceği $+f_c$ pozitif akım harmoniklerinin genlik değişimlerinin de yük değişimlerini veren harmonik olarak kullanılabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca $+f_c$ pozitif akım temel harmonik bileşeninin frekans değerinin de motorun hız bilgisini verdiğinden bu frekans değişiminden motorun hız bilgisi sınıflandırmada giriş olarak kullanılmaktadır. Burada bahsedilen arıza imzalarının hız, yük ve arıza şiddetine göre değişimi aşağıda detaylı olarak anlatılmaktadır.

Tablo 5.3 1300 dev/dk-Yüksüz

		Sağlıklı	%2 Anızalı	%12,5 Anızalı	%25 Anızalı
GERİLİM	$-f_v$	0.00591	0.01352	0.04215	0.06030
	$-3f_v$	0.00293	0.00458	0.01050	0.01650
AKIM	$-3f_c$	0.00463	0.01035	0.02724	0.05719
	$+3f_c$	0.00523	0.01240	0.02530	0.05020

Tablo 5.4 1300 dev/dk-Tam yüklü

		Sağlıklı	%2 Anızalı	%12,5 Anızalı	%25 Anızalı
GERİLİM	$-f_v$	0.006215	0.01603	0.04390	0.07320
	$-3f_v$	0.003070	0.00424	0.01060	0.02240
AKIM	$-3f_c$	0.008380	0.01260	0.03630	0.07170
	$+3f_c$	0.008000	0.01320	0.04900	0.09700

Tablo 5.5 2000 dev/dk-Yüksüz

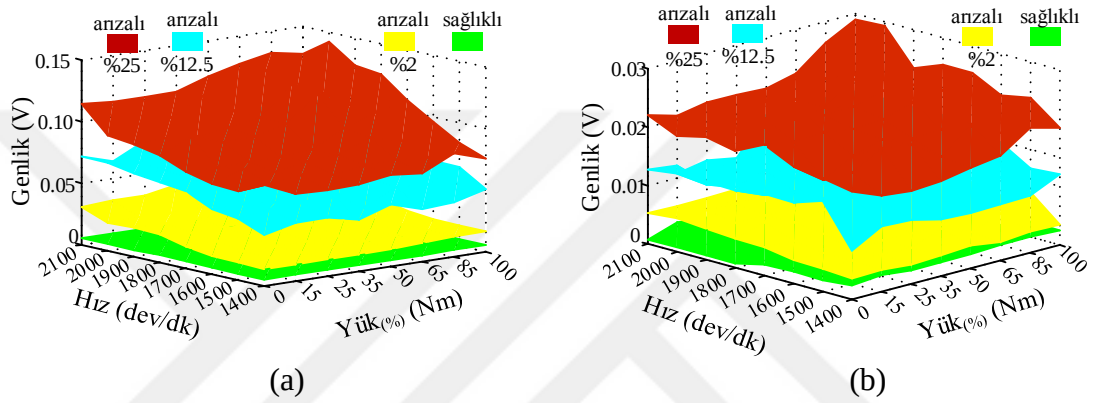
		Sağlıklı	%2 Anızalı	%12,5 Anızalı	%25 Anızalı
GERİLİM	$-f_v$	0.00860	0.02270	0.07120	0.09340
	$-3f_v$	0.00055	0.00580	0.01480	0.01880
AKIM	$-3f_c$	0.00590	0.00680	0.04300	0.06370
	$+3f_c$	0.00370	0.00518	0.02120	0.04480

Tablo 5.6 2000 dev/dk-Tam yüklü

		Sağlıklı	%2 Anızalı	%12,5 Anızalı	%25 Anızalı
GERİLİM	$-f_v$	0.02280	0.03087	0.09503	0.14230
	$-3f_v$	0.00016	0.00208	0.01984	0.02930
AKIM	$-3f_c$	0.01350	0.01593	0.08308	0.12440
	$+3f_c$	0.00259	0.00453	0.04730	0.09537

Yukarıda farklı hız ve farklı yük durumları için çeşitli arıza oranlarında sarımlar arası kısa devre arızasına sahip motorlardan elde edilen verilerle oluşturulan

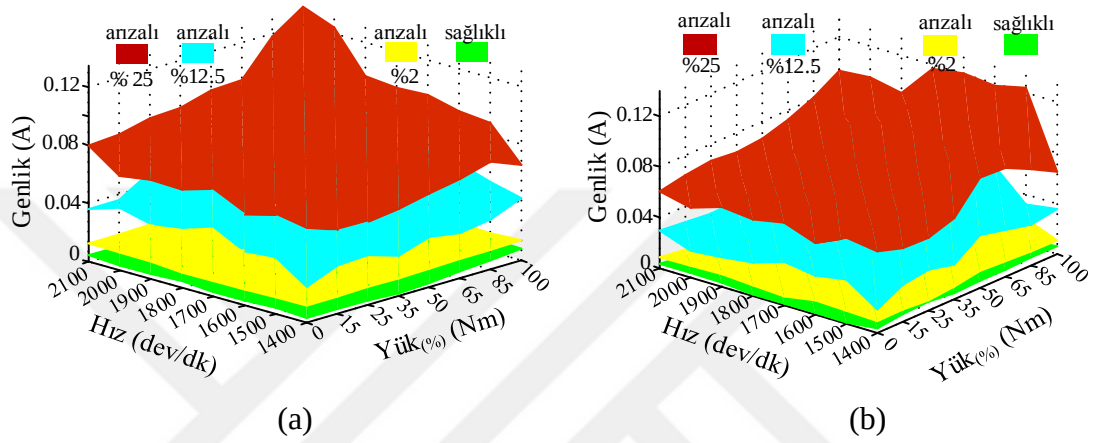
tablolardan da anlaşıldığı üzere, farklı arıza şiddetine sahip SMSM'lerden farklı hız ve yüklenme durumları için elde edilen sinyal imzalarından, o arıza sınıfına ait örüntüler elde edilebilmektedir. Aşağıda 1400 dev/dk - 2100 dev/dk hız aralığında farklı yüklenme oranlarında çalıştırılan ve farklı arıza şiddetine sahip özdeş SMSM'lerden elde edilen sinyallerin, uzay vektör simetrik bileşen harmoniklerinin analiz edilmesi ile elde edilen imzaların arıza şiddeti, motor hızı ve yüklenme durumuna göre nasıl değişim gösterdiği karşılaştırmalı olarak Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.16 Negatif gerilim bileşenleri (a) temel harmonik imzası ($-f_v$)'nin arıza şiddetine bağlı değişimi, (b) 3. harmonik imzası ($-3f_v$)'nin arıza şiddetine bağlı değişimi.

Şekil 5.16.a'da görüldüğü üzere, uzay vektör geriliminin negatif bileşeninin temel harmoniğinin genlik değeri, motorun sağlıklı olup olmamasına ve arızalıysa arıza şiddetine göre değişim göstermektedir. Sağlıklı motorda hangi hız ve yükte çalışıyor olursa olsun genlik değeri 0.0050 - 0.0073 V aralığındadır. Oysa ki küçük bir kısa devre arızasında farklı hız ve yüklerde harmonik genliği yüke ve hıza bağlı olarak 0.0135-0.0408 V aralığında değişim gösterdiği gözlenmektedir. Bu şekilde arıza şiddeti arttıkça bu harmoniğin genliğinin de arttığı rahatlıkla gözlenmektedir. Şekil 5.16.b'de gerilimin negatif bileşeninin 3. harmoniğinin genlik değerinin, motorun sağlıklı ve arızalı durumlarına göre nasıl değişim gösterdiği görülmektedir. Burada sağlıklı durumdaki motorun negatif gerilim bileşeninin 3. harmonik genlik değeri yükün ve hızın değişimine bağlı olarak 0-0.0027 V aralığının dışına çıkmazken en küçük arıza şiddeti olan %2 kda durumunda 0.0036-0.0065 V aralığında değiştiği,

%12,5 kda durumunda 0.0084-0.0170 V aralığında değiştiği ve en yüksek arıza şiddeti durumu olan %25 kda durumunda da 0.0159-0.029 V aralığında değiştiği gözlenmektedir. Böylece motorun arıza durumunda motorun ($-3f_v$) imzasından yararlanılarak arızalı olup olmadığı öğrenilebileceği gibi, yük ve hız durumları da sınıflandırma girdisi olarak verildiğinde, arıza şiddetinin belirlenmesinde etkin bir imza olduğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.17 (a) Negatif akım bileşeni 3. harmonik imzası ($-3f_c$), (b) Pozitif akım bileşeni 3. harmonik imzası ($+3f_c$)'nin arıza şiddetine bağlı değişimi.

Uzay vektör negatif akım bileşeninin 3. harmoniğinin ($-3f_c$) ve pozitif akım bileşeninin 3. harmoniğinin ($+3f_c$) genliklerinin, motorun arızalı olup olmadığına bağlı olduğu Şekil 5.17'de gösterilmektedir. Şekiller detaylı olarak incelenirse Şekil 5.17.a'da gösterilen uzay vektör negatif akım bileşeninin 3. harmonik imzası $-3f_c$ 'nin genliğinin, motorun sağlıklı olup olmamasına ve arıza şiddetine bağlı olarak değişim gösterdiği görülmektedir. Burada sağlıklı durum için $-3f_c$ 'nin genliği 0.0033-0.0090 A aralığında yüke ve hıza bağlı olarak değişmektedir. %2 kda durumunda ise bu değer 0.0120-0.0154 A aralığındadır. %12.5 kda durumundaki $-3f_c$ 'nin genliği 0.0246- 0.947 A aralığında ve %25 kda durumunda ise 0.0652-0.1327 A aralığında olduğu görülmektedir. Bu arıza imzasının genliğinin değişimi yüke ve hıza bağlı olmadığından $-3f_c$ arıza imzası tek başına motor arızasının tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde kullanılabilir ve yüksek bir doğrulukla başarı sağlayabilir. Uzay vektör pozitif akım bileşeninin 3. harmonik ($+3f_c$) imzasının arızaya bağlı değişimi Şekil 5.17.b'de gösterilmektedir. Burada sağlıklı durum için $+3f_c$ 'nin

genliği 0-0.006 A aralığında değişim göstermektedir. %2 kda durumunda ise bu değer 0.0058-0.0237 A aralığındadır. %12.5 kda durumundaki $-3f_c$ 'nin genliği 0.0187- 0.0631 A aralığında ve %25 kda durumunda 0.0509-0.1241 A aralığında olduğu görülmektedir.

Bu arıza imzaları kullanılarak arıza tespiti veya arıza şiddetinin sınıflandırılması yapıldığında, yük ve hız durumlarının bilinmesi veya sinyallerin özelliklerinden elde edilebilmesi gerekmektedir. Çünkü genlik aralıklarına bakılacak olursa bazı değerlerin birbirini kapsadığı görülecektir. Sınıflandırmanın doğru ve başarılı olabilmesi için aynı yük ve hız durumundaki arıza imzalarının karşılaştırılması gereklidir. Örneğin 1500 dev/dk hızda ve tam yüklenme durumundaki SMSM'den alınan arıza imzası ile 2000 dev/dk yarı yüklenme durumundaki arıza imzasının genlik değerlerinin karşılaştırılması yanıltıcı olabilir. Çünkü bu durumda, yük durumu ve hız durumunun arıza imzasına olan etkisi yadsınmış olmaktadır. Bu nedenle arıza sınıflandırması yapılırken her arıza imzasının kayıt edildiği koşuldaki hız ve yük bilgisine de ihtiyaç duyulmaktadır. Yük ve hız bilgisi pozitif akım bileşeninin temel harmoniğinin ($+f_c$) frekans ve genlik bilgisinden alınmıştır. Tüm bu sonuçların detaylı değerlendirmeleri sonuçlar bölümünde yer almaktadır.

Şekil 5.18.a'da hız ve yük değişimine bağlı olarak SMSM'nin sağlıklı, %2, %12,5 ve %25 stator sarımlar arası kısa devre arızasına sahip durumları için ölçülen akımların uzay vektör pozitif akım bileşeninin 3. harmonik imzasının ($+3f_c$) üç boyutlu dağılımı görülmektedir. Burada dikkat edileceği gibi sağlıklı SMSM'nin $+3f_c$ değeri çok küçük genliktedir. Bu değerler hıza ve yüke bağlı olarak çok aşırı olmasa da bir değişim göstermektedir.

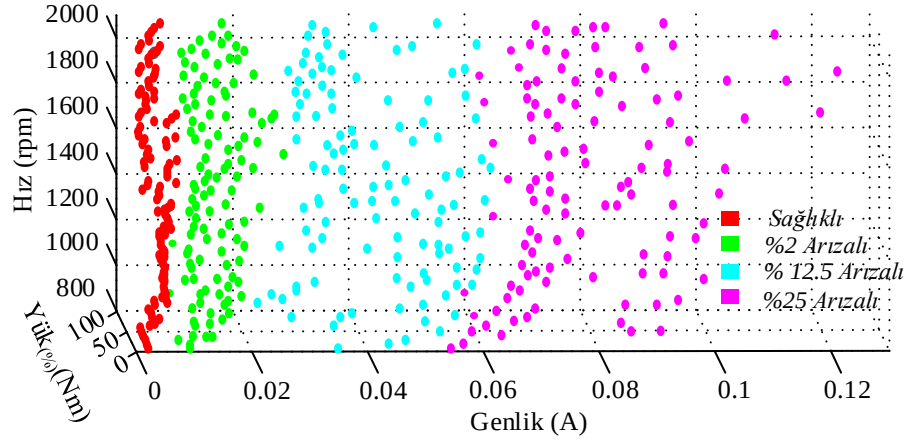
Sağlıklı ve %2 arızalı motor verilerinin 3 boyutlu dağılımları arasında belirgin bir fark olması, bu arıza imzasının arıza tespitinde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Aynı şekilde %2, %12,5 ve %25 arıza durumları için de benzer şekilde dağılımlar arasında belirli bir fark olduğu ve bu sayede $+3f_c$ 'nin arıza şiddetinin belirlenmesinde kullanılabilecek bir arıza imzası olduğu ortaya çıkmaktadır.

Şekil 5.18.b'de negatif akım bileşeni 3. harmonik imzası ($-3f_c$)'nin arıza şiddetine göre üç boyutlu dağılımı görülmektedir. Arıza şiddeti arttıkça $-3f_c$ 'nin genlik değerinin de buna paralel olarak artış göstermesi $-3f_c$ 'nin arıza tespitinde ve

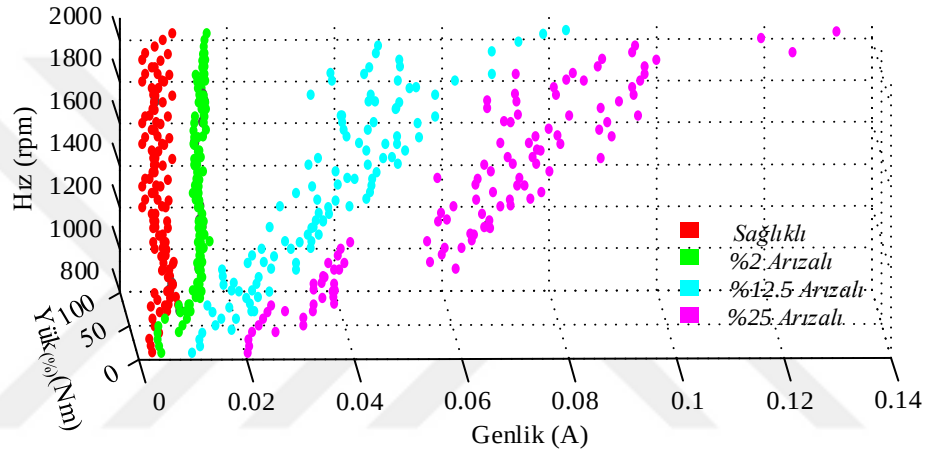
arıza şiddetinin belirlenmesinde kullanılabilecek bir arıza imzası olduğunu ortaya koymaktadır.

Arıza şiddetinin yüksek seviyelere çıkmasıyla $-3f_c$ 'nin genliğinin de özellikle yüksek hızlı uygulamalarda yüksek seviyelere ulaşması bu arıza imzasının arıza tespitinde ve arıza şiddetinin belirlenmesinde yüksek doğrulukta bir sonuç ortaya koyabileceğinin bir göstergesi olarak yorumlanabilir.

Bu tez çalışmasında negatif ve pozitif akım bileşenlerinin yanı sıra negatif ve pozitif gerilim bileşenleri de incelenmiştir. Özellikle arıza tespitinde ve arıza şiddetinin belirlenmesinde yüksek doğrulukta sonuçlar veren harmonikler geniş bir hız ve yük aralığında incelenmiş olup, hepsi için genellenebilir sonuçlar veren arıza imzaları olduğu ortaya konmuştur. Bu kapsamda negatif gerilim bileşeni temel harmoniği ve 3. harmoniğinin arıza tespitinde ve arıza şiddetinin belirlenmesinde oldukça önemli arıza imzaları olduğu tespit edilmiştir.



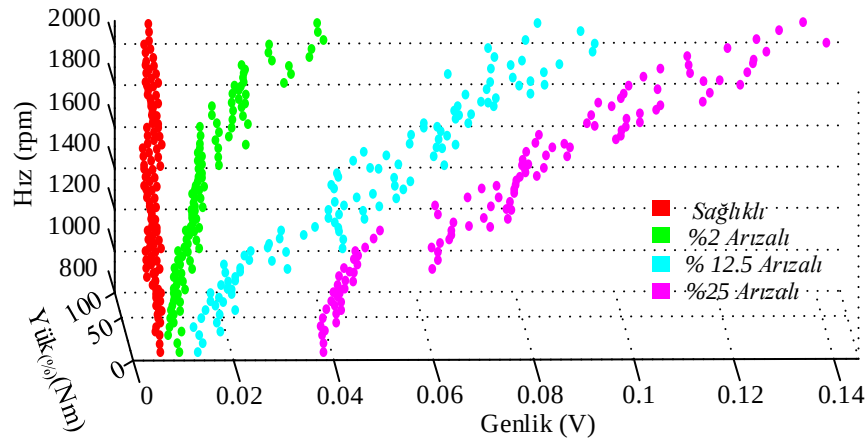
(a)



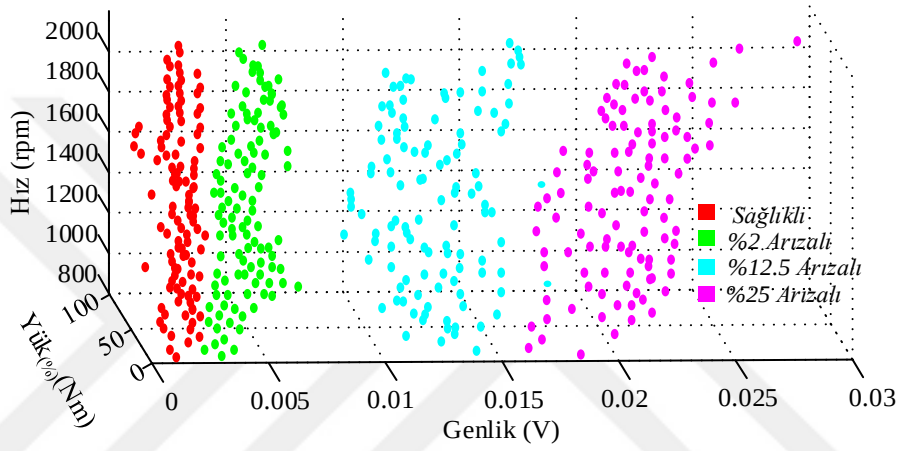
(b)

Şekil 5.18 (a) Pozitif akım bileşeni 3. harmonik imzası ($+3f_c$)'nın arıza şiddetine göre dağılımı. (b) Negatif akım bileşeni 3. harmonik imzası ($-3f_c$)'nin arıza şiddetine göre dağılımı

Bu arıza imzalarının farklı yük ve hız aralıklarındaki arıza şiddetlerine göre üç boyutlu dağılımları Şekil 5.19.a ve Şekil 5.19.b'de gösterilmektedir. Bu şekillerde görüldüğü üzere arıza şiddeti yükseldiğinde söz konusu arıza imzalarının genlikleri de buna bağlı olarak artış göstermektedir. Bu sayede arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesi, yüksek bir başarıyla mümkün olmaktadır.



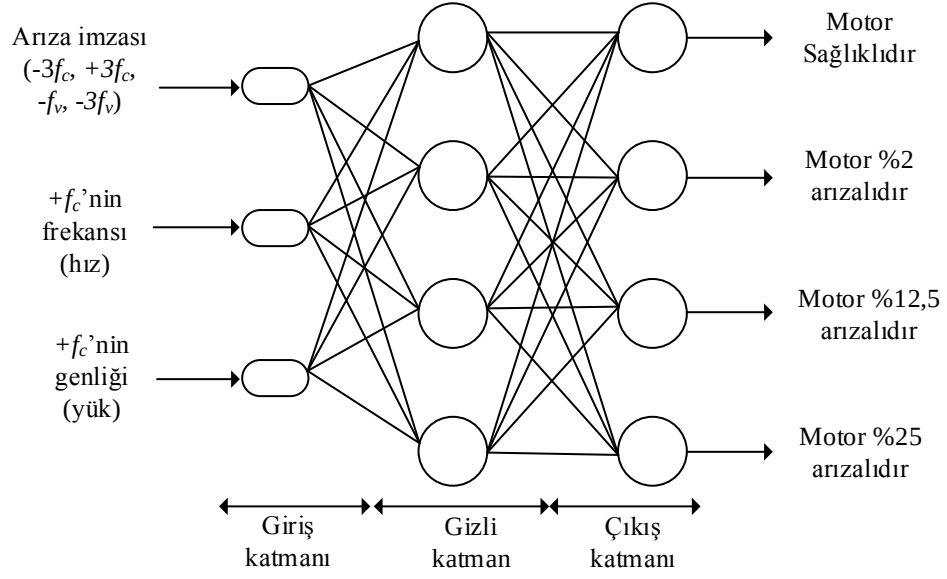
(a)



(b)

Şekil 5.19 (a) Negatif gerilim bileşeni temel harmonik imzası ($-f_v$)'nin arıza şiddetine göre dağılımı. (b) Negatif gerilim bileşeni 3. harmonik imzası ($-3f_v$)'nin arıza şiddetine göre dağılımı.

Sağlıklı ve farklı stator sarımlar arası kısa devre arıza oranına sahip SMSM'lerin stator faz akım ve gerilim sinyallerinden elde edilen bu 4 farklı arıza imzaları her ağ sınıflandırıcı eğitiminde, motor hızı ve motor yükü ile birlikte girişler olacak şekilde, 3 giriş kullanılarak, MLP, kNN, SVM, DT ve RF sınıflandırıcı ile ağlar eğitilmiştir. Eğitilen bu sınıflandırıcı ağların başarı oranları karşılaştırmalı olarak aşağıdaki tablolarda verilmektedir. Tüm bu arıza imzaları kullanılarak örüntü tanıma sistemi elde edilmektedir. Şekil 5.20'de sınıflandırıcı ağların yapısı şematik olarak gösterilmiştir. Burada 3 girişli ve 4 farklı sonuca sahip bir ağ eğitimi yapılmaktadır. Ağın girişleri ve çıkışları şekilde gösterilmektedir.



Şekil 5.20 Arıza tespitin ve arıza şiddetinin uzay vektör akım ve gerilimlerinin pozitif ve negatif harmonikleri ile sınıflandırılmasının şematik gösterimi

Arıza imzası olarak $-f_v$ 'nin kullanılmasıyla eğitilen makina öğrenme algoritmalarının doğruluk tahminleri Tablo 5.7'de görülmektedir.

Tablo 5.7 $-f_v$ Arıza imzası ile arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde tahmin doğruluğu yüzdesi

Sınıflandırma Türü	Arıza Tespiti	Arıza Şiddeti
MLP	%99.6	%99.8
SVM	%82.2	%88.4
kNN	%93	%92.6
RF	%98.7	%98.7
DT	%97.8	%97.1

Tablo 5.7'de görüldüğü üzere MLP ile arıza tespiti %99.6 doğrulukla, arıza şiddeti ise %99.8 doğruluk yüzdesi ile belirlenebilmektedir. SVM ile arıza tespiti %82.2 ve arıza şiddetinin belirlenmesi %88.4 doğruluk ile tahmin edilebilmektedir. kNN algoritması ile arıza tespiti %93, arıza şiddeti %92.6 doğruluk ile tahmin edilebilmektedir. RF algoritması kullanılarak arıza tespiti %98.7, arıza şiddeti %98.7 doğruluk ile tahmin edilmektedir. Son olarak DT öğrenme algoritması ile arıza tespiti

%97.8 ile arıza şiddeti ise %97.1 doğruluk ile tespit edilmektedir. Bu uygulamanın sonucuna göre $-f_v$ arıza imzası kullanılarak yapılan arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde en başarılı yöntem MLP algoritmasıdır.

Sağlıklı	112	0	0	0	100%
%2 Arızalı	1	111	0	0	99.1%
%12.5 Arızalı	0	0	112	0	100%
%25 Arızalı	0	0	0	112	100%
	99.1%	100%	100%	100%	99.8%
	Sağlıklı	%2 Arızalı	%12.5 Arızalı	%25 Arızalı	

(a)

Sağlıklı	109	3	0	0	93.3%
%2 Arızalı	5	107	0	0	95.5%
%12.5 Arızalı	0	0	107	5	95.5%
%25 Arızalı	0	0	2	110	98.2%
	93.3%	95.5%	98.2%	95.5%	96.5%
	Sağlıklı	%2 Arızalı	%12.5 Arızalı	%25 Arızalı	

(b)

Şekil 5.21 MLP ile arıza şiddetinin belirlenmesi doğruluk sınıflandırma tabloları
(a) $-f_v$, (b) $-3f_c$

Şekil 5.21.a'da $-f_v$, Şekil 5.21.b'de $-3f_c$ arıza imzalarının kullanılmasıyla MLP arıza tespit tahmini doğruluk yüzdeleri verilmiştir. Arıza imzası olarak $-3f_c$ 'nin kullanılmasıyla eğitilen makina öğrenme algoritmalarının doğruluk tahminleri Tablo 8'de görülmektedir.

Tablo 5.8'de görüldüğü üzere MLP ile arıza tespiti %96.3 doğrulukla, arıza şiddeti ise %96.5 doğruluk yüzdesi ile belirlenebilmektedir. SVM ile arıza tespiti %79 doğruluk ile arıza şiddetinin belirlenmesi %81 doğruluk ile tahmin edilebilmektedir. kNN algoritması ile arıza tespiti %82, arıza şiddeti %80 doğruluk ile tahmin edilebilmektedir.

Tablo 5.8. $-3f_c$ Arıza imzası ile arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde tahmin doğruluğu yüzdesi

Sınıflandırma Türü	Arıza Tespiti	Arıza Şiddeti
MLP	%96.3	%96.5
SVM	%79	%81
kNN	%82	%80
RF	%97	%97
DT	%95	%94

RF algoritması kullanılarak arıza tespiti %97, arıza şiddeti %97 doğruluk ile tahmin edilmektedir. DT öğrenme algoritması ile arıza tespiti %95 ile arıza şiddeti ise %94 doğruluk ile tespit edilmektedir. Bu uygulamanın sonucuna göre $-3f_c$ arıza imzası kullanılarak yapılan arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde en başarılı yöntem RF algoritmasıdır.

Arıza imzası olarak $-3f_v$ 'nin kullanılmasıyla eğitilen makina öğrenme algoritmalarının doğruluk tahminleri Tablo 5.9'da görülmektedir. Görüldüğü üzere MLP ile arıza tespiti %98 doğrulukla, arıza şiddeti ise %97.1 doğruluk yüzdesi ile belirlenebilmektedir. SVM ile arıza tespiti %91, arıza şiddetinin belirlenmesi %95.5 doğruluk ile tahmin edilebilmektedir. kNN algoritması ile arıza tespiti %88, arıza şiddeti %93 doğruluk ile tahmin edilebilmektedir. RF algoritması kullanılarak arıza tespiti %98.4, arıza şiddeti %98.7 doğruluk ile tahmin edilmektedir.

Tablo 5.9 $-3f_v$ Arıza imzası ile arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde tahmin doğruluğu yüzdesi

Sınıflandırma Türü	Arıza Tespiti	Arıza Şiddeti
MLP	%98	%97.1
SVM	%91	%95.5
kNN	%88	%93
RF	%98.4	%98.7
DT	%98.3	%98.4

Son olarak DT öğrenme algoritması ile arıza tespiti %98.3 ile arıza şiddeti ise %98.4 doğruluk ile tespit edilmektedir. Bu uygulamanın sonucuna göre $+3f_c$ arıza imzası kullanılarak yapılan arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde en başarılı yöntemlerin DT ve RF algoritmaları olduğu görülmektedir.

Sağlıklı	110	2	0	0	98.2%
%2 Arızalı	4	108	0	0	96.4%
%12.5 Arızalı	0	0	108	4	96.4%
%25 Arızalı	0	0	2	110	98.2%
	98.2%	98.2%	100%	100%	97.1%
	Sağlıklı	%2 Arızalı	%12.5 Arızalı	%25 Arızalı	

(a)

Sağlıklı	111	1	0	0	99.1%
%2 Arızalı	1	111	0	0	99.1%
%12.5 Arızalı	0	0	108	4	96.4%
%25 Arızalı	0	0	2	110	98.2%
	99.1%	99.1%	100%	99.1%	97.8%
	Sağlıklı	%2 Arızalı	%12.5 Arızalı	%25 Arızalı	

(b)

Şekil 5.22 MLP ile arıza şiddetinin belirlenmesi doğruluk sınıflandırma tabloları
(a) $-3f_v$, (b) $+3f_c$.

Şekil 5.22.a'da $-3f_v$, Şekil 5.22.b'de $+3f_c$, arıza imzalarının kullanılmasıyla MLP arıza tespit tahmini doğruluk yüzdeleri verilmiştir. Arıza imzası olarak $+3f_c$ 'nin kullanılmasıyla eğitilen makina öğrenme algoritmalarının doğruluk tahminleri Tablo 5.10'da görülmektedir. Burada görüldüğü üzere MLP ile arıza tespiti %99.4 doğrulukla, arıza şiddeti ise %97.8 doğruluk yüzdesi ile belirlenebilmektedir. SVM ile arıza tespiti %90 doğruluk ile arıza şiddetinin belirlenmesi %92.6 doğruluk ile tahmin edilebilmektedir. kNN algoritması ile arıza tespiti %84, arıza şiddeti %87 doğruluk ile tahmin edilebilmektedir.

Tablo 5.10 $+3f_c$ Arıza imzası ile arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde tahmin doğruluğu yüzdesi

Sınıflandırma Türü	Arıza Tespiti	Arıza Şiddeti
MLP	%99.4	%97.8
SVM	%90.0	%92.6
kNN	%84.0	%87.0
RF	%99.3	%97.5
DT	%98.3	%95.0

RF algoritması kullanılarak arıza tespiti %99.3, arıza şiddeti %97.5 doğruluk ile tahmin edilmektedir. DT algoritması ile arıza tespiti %98.3 ile arıza şiddeti ise %95 doğruluk yüzdesi ile tespit edilmektedir. Bu uygulamanın sonucuna göre $+3f_c$ arıza imzası kullanılarak yapılan arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde en başarılı yöntemin çok küçük bir farkla da olsa MLP öğrenme algoritması olduğu görülmektedir.

Akım ve gerilim uzay vektör spektrumlarından elde edilen $-f_v$, $-3f_v$, $-3f_c$ ve $+3f_c$ arıza harmoniklerinin hepsi kullanılarak eğitilen makina öğrenme algoritmalarının doğruluk tahminleri Tablo 5.11’de verilmektedir. Burada görüldüğü üzere MLP ile arıza tespiti ve arıza şiddeti %100 doğruluk yüzdesi ile belirlenebilmektedir. SVM ile arıza tespiti %99.6 doğruluk ile arıza şiddetinin belirlenmesi %99.8 doğruluk ile tahmin edilebilmektedir. kNN algoritması ile arıza tespiti e arıza şiddeti %100 doğruluk ile tahmin edilebilmektedir.

Tablo 5.11 $-f_v$, $-3f_v$, $-3f_c$, $+3f_c$ Arıza imzaları ile arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde tahmin doğruluğu yüzdesi

Sınıflandırma Türü	Arıza Tespiti	Arıza Şiddeti
MLP	%100	%100
SVM	%99.6	%99.8
kNN	%100	%100
RF	%99.2	%99.2
DT	%97.4	%98.5

RF algoritması kullanılarak arıza tespiti %99.2, arıza şiddeti %99.2 doğruluk ile tahmin edilmektedir. DT algoritması ile arıza tespiti %97.4 ile arıza şiddeti ise %98.5 doğruluk yüzdesi ile tespit edilmektedir. Bu uygulamanın sonucuna göre $-f_v$, $-3f_v$, $-3f_c$ ve $+3f_c$ arıza imzaları ile yapılan arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde en başarılı yöntemlerin MLP ve kNN algoritmaları olduğu görülmektedir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Sürekli mıknatıslı senkron motorların kararlı yapısı ve tasarımında birçok avantajı barındırmasından ötürü, hassas kontrolün kritik önemli olduğu tüm uygulamalarda yaygın olarak kullanılması onu üzerinde çalışmayı gerektiren bir motor haline getirmiştir. Hassas ve kararlı bir SMSM'nin düzgün ve sağlıklı çalışması, hem güvenilirlik hem de güvenli çalışma açısından oldukça kritik bir önem taşımaktadır. Sağlıklı çalışmayan ve küçükte olsa arızaya sahip bir SMSM hiçbir zaman göstermesi gereken çalışma performansını doğru biçimde gösteremez. Tüm bu nedenlerden ötürü SMSM'lerin yapısında meydana gelecek arızaları henüz küçük boyutlardayken tespit edilmesi ve büyümeden önlenmesi oldukça önemlidir.

Tüm elektrikli motorlarda olduğu gibi SMSM'lerde de stator arızaları tüm arızalar içerisinde büyük bir orana sahiptir. Stator arızaları, çoğunlukla sargılarda meydana gelen kısa devrelere bağlı olarak gelişen sargı yalıtım arızası ile çok kısa sürede çok hızlı bir yayılım göstererek motorun çalışamaz hale gelmesine neden olabilmektedir. Birkaç sarımın kendi arasında kısa devre olmasıyla ortaya çıkan kısa devre arızası bir anda statorda büyük bir ısı meydana getirerek tüm sistemi tehlikeye sokabilmektedir. İşte tüm sebeplerle motorda meydana gelen arızayı tespit etmenin yanında, arıza şiddetinin de belirlenebilmesi kullanıcılara büyük bir avantaj sağlayacaktır. Arıza şiddetinin hangi seviyede olduğunun bilinmesi kullanıcıya bakım ya da yedekleme konusunda zaman kazandıracağından ekonomik kayıplarında önüne geçilebilecektir.

Bu tezde hem arıza tespitinde hem de arızanın şiddetinin belirlenmesinde kullanılabilecek yeni arıza imzaları önerilmiştir. Ayrıca bu arıza imzaları kullanılarak, arıza tespit ve arıza şiddetinin belirlenmesi işlerinin otomatik yapılabilmesini sağlamak için farklı örüntü tanıma algoritmaları kullanılmış ve bu algoritmaların performansları birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Stator sarımlar arası kısa devre arızası tespitinde ve arıza şiddetinin belirlenmesinde kullanılabilecek yeni arıza imzalarının belirlenmesi için hem benzetim hem de deneysel çalışmalar yapılmıştır. Benzetim modelini oluşturmak için SMSM'nin sağlıklı ve arızalı durum dinamik matematiksel fonksiyonları

oluşturulmuş ve bu matematiksel fonksiyonlar kullanılarak SMSM'nin sağlıklı ve arızalı vektör kontrol benzetim modeli kurulmuştur. Bu benzetim modellerinden elde edilen sonuçlar deneysel verilerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak kurulan benzetim modelinin doğruluğu test edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, SMSM'lerde sıkça karşılaşılan stator sarımlar arası kısa devre arızasının tespiti için güvenilir ve uygulaması kolay iki yöntem geliştirilmiştir.

Geliştirilen yöntemlerden ilki, stator faz akımının 3. harmoniğinin değişiminin tespiti yöntemidir. Bu yöntem, karmaşık yapıdaki inverter sürücülü SMSM'lerin arıza oranı henüz küçük boyutlarda bile olsa arızanın tespit edilmesini büyük bir doğrulukla sağlamıştır. Bu yöntemde, SMSM'nin herhangi bir fazından ölçülen akım, belirli bir örnekleme frekansı ile kayıt edilerek, bu akıma FFT uygulanarak akımın frekans bileşenleri incelenmiştir. Sağlıklı ve arıza şiddetinin giderek artan SMSM'lerin akım harmoniklerinin analiz edilmesi ile arızalı SMSM'nin hangi yük ve hız koşulunda olursa olsun, 3. harmonik genliğinin sağlıklı SMSM'nin stator faz akımının 3. harmonik genlik değerinden daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Aynı karşılaştırma, arıza şiddeti daha yüksek oranlarda olan SMSM'ler ile yapıldığında, 3. harmonik genlik değerinin arıza şiddetinin artmasıyla orantılı olduğu bir diğer tespit olmuştur. Böylece temel harmoniğin (f_s) 3 katı frekanslarında ($3f_s$) arıza aranabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Arızanın $3f_s$ frekansında net biçimde görülmesi ve $3f_s$ frekansındaki genlik değerlerinin arızanın şiddetine bağlı olarak değişim göstermesi, arıza türünün tespiti ve arıza şiddetinin otomatik olarak belirlenebilmesi için kullanılmıştır. Bu amaçla, farklı hız ve yüklenme oranlarında çok sayıda sinyal elde edilerek bu sinyallerin $3f_s$ frekansındaki genlik değerleri giriş olacak şekilde öğrenme algoritmaları eğitilmiş ve %97.8 doğruluk yüzdesiyle arızanın otomatik olarak tespit edilebileceği ve %91.9 doğruluk yüzdesiyle de arıza şiddetinin otomatik olarak belirlenebileceği sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu sonuç çok yüksek bir güvenilirlik sağlamıyor olsa da yeterli kabul edilebilmektedir.

Geliştirilen bir diğer algoritma ise SMSM'lerin stator sarımlar arası kısa devre arızalarının tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesinde faz akım ve gerilim sinyallerinin birlikte kullanılmasıyla daha güvenilir olan ve yeni arıza imzaları içeren uzay vektör pozitif ve negatif bileşen harmoniklerinin değerlendirilmesi yöntemidir. Bu yöntem ile öncelikle SMSM'nin 3 faz akım ve gerilim sinyalleri kayıt edilip, bu akım ve gerilim sinyalleri Park dönüşüm matrisi kullanılarak $d-q$ referans çatı

düzlemine aktarılmıştır. Elde edilen yeni q eksenindeki i_q akım ve v_q gerilim bileşeni ile d eksenindeki i_d akım ve v_d gerilim bileşenleri $I_{sv} = I_d + jI_q$ ve $V_{sv} = V_d + jV_q$ şeklinde fazörel olarak toplanarak akım ve gerilim uzay vektörleri (I_{sv}, V_{sv}) elde edilmektedir. Bu elde edilen kompleks akım ve gerilim uzay vektörlerine FFT uygulanarak negatif ve pozitif harmonik bileşenleri izlenebilmektedir. Sağlıklı ve farklı orandaki kısa devre arıza şiddetine sahip SMSM'ler için yapılan analizde arızanın kendisini $-3f_c$, $+3f_c$, $-f_v$ ve $-3f_v$ harmoniklerinde net biçimde gösterdiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak; $-3f_c$ arıza imzası kullanılarak en yüksek doğruluk oranı RF algoritması ile elde edilmekte ve arıza tespitinde %97, arıza şiddetinde %97 ise başarımlarına ulaşılmaktadır. $+3f_c$ arıza imzası ile yine RF algoritması kullanılarak en yüksek doğruluk oranına ulaşılmakta, arıza tespitinde %99.4, arıza şiddetinde ise %97.8 başarımlar sağlanmaktadır. $-f_v$ arıza imzası en yüksek doğruluk oranı MLP algoritması kullanılarak elde edilmektedir, bu yöntemle arıza tespitinde %99.6, arıza şiddetinde %99.8 doğruluğa ulaşılabilmektedir. $-3f_v$ arıza imzası ile en yüksek doğrulukta başarımlar RF algoritması ile elde edilmektedir, arıza tespitinde %98, arıza şiddetinde %98.4 doğruluk oranına erişilmiştir.

$-3f_c$, $+3f_c$, $-f_v$ ve $-3f_v$ arıza imzalarının beraber arıza tespitinde ve arıza şiddetinin belirlenmesinde kullanılması durumunda tüm sınıflandırma algoritmalarının tahmin yüzdelerinin (doğruluklarının) arttığı net biçimde görülmektedir. Bu durumda ise arıza tespiti ve arıza şiddetinin belirlenmesi %100 doğrulukla MLP ve kNN algoritmaları kullanılarak elde edilmektedir. Ayrıca bu arıza imzalarının ağa giriş olarak verilmesi diğer sınıflandırıcıların da çok yüksek doğrulukla tahmin yapabilmesini sağlamıştır, öyle ki en düşük doğruluk yüzdesi bile %98.5 olmaktadır. Bunun en büyük nedeni ağlara giriş olarak tanımlanan arıza imza sayısının fazla olması ve her bir imzanın başlı başına arıza imzası olarak kullanılabilmesidir.

Önerilen metot, uygulanabilmesi bakımında oldukça basit, sonuçları bakımından güvenilir ve motor parametrelerinden bağımsızdır. Bu tezde ele alınan arıza imzalarının performansları karşılaştırıldığında, tek arıza imzası kullanıldığında $-f_v$ hem arıza tespitinde hem de arıza şiddetinin belirlenmesinde en güvenilir imza olmakta ve doğruluğu en yüksek sonuçları vermektedir. Öğrenme algoritmalarının performanslarının karşılaştırmasında ise MLP ve RF algoritmalarının bu uygulamalarda daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir.

Geliştirilen tüm metotların uygulanabilirliğini test etmek için bilgisayar benzetimi ve deneysel devre düzeneği oluşturulmuştur. Bilgisayar benzetimi için Bölüm 4'te anlatıldığı üzere Matlab/Simulink modeli oluşturulmuştur. Sunulan deneysel ve benzetim sonuçları ile SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızasının henüz başlangıç aşamasındayken tespit edilebileceği ve ileri seviyedeki arızalarda, arıza şiddetinin boyutunun otomatik olarak belirlenebileceği gösterilmiştir.

6.2 Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen algoritmalar ve yöntemler farklı motor hızı ve farklı yükleme koşullarında laboratuvar ortamında ve farklı ortam sıcaklığı koşullarında deneysel olarak test edilmiştir. Ancak bu deneysel çalışmada her ne kadar gerçek çalışma koşulları dikkate alınarak uygulanmaya çalışılsa da sanayi ve endüstri koşullarında test edilmesi hesaplanmayan bazı etkilerin (nem, rutubet, toz, kir v.b.) geliştirilen algoritmalar üzerindeki etkisinin incelenmesi fayda sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında benzetim modelinden ve deneysel olarak elde edilen ve arıza tespitinde oldukça etkin sonuçlar veren arıza imzalarının, analitik olarak hesaplanarak, arıza durumunda motor sürücüsünün arızanın etkilerini bastırarak şekilde tasarımını yapmak arızanın bozucu etkilerinden motorun ve tüm sistemin korunmasını sağlayacaktır.

Arızanın tespiti ve arıza şiddetinin yüksek doğrulukla otomatik olarak belirlenebilmesi için bu tezde kullanılan sınıflandırma algoritmalarının dışında kalan ve henüz elektrik makinalarının herhangi bir uygulamasında kullanılmayan sınıflandırıcılar ile arıza tahminleri yapılabilir.

Yüzeyel mıknatıslı SMSM'lerde yapılan bu çalışmayı içsel mıknatıslı SMSM'lerde de yapılması literatüre katkı sağlayabilir.

Hem SMSM'lerde hem de asenkron motorlarda inverterin dengesizliği veya besleme kaynağındaki dengesizlik stator sargı arızalarından kaynaklanan harmoniklere benzer frekanslarda harmonikler üretebilmektedir. Bu iki durumu birbirinden ayırtılabilecek algoritmalar geliştirilmesi faydalı olabilir.

SMSM'nin stator ile rotoru arasındaki hava aralığının çok küçük boyutlarda olmasından dolayı akı sensörlerinin buralara yerleştirilmesi mekanik ve elektriksel açıdan oldukça zordur. Bu nedenle üretilen çok hassas doğrulukla çalışan kaçak akı sensörleri kullanılarak, SMSM'nin sarımlar arası kısa devre arızasının kaçak akı temelli tespiti yapılabilir.



7. KAYNAKLAR

- [1] C. Ortega, A. Arias, C. Caruana, J. Balcells, and G. M. Asher, "Improved waveform quality in the direct torque control of matrix-converter-fed PMSM drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 6, pp. 2101–2110, 2010.
- [2] J. Beerten, J. Verwekken, and J. Driesen, "Predictive Direct Torque Control for Flux and Torque Ripple Reduction," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 1, pp. 404–412, 2010.
- [3] R. . Errouissi, M. . Ouhrouche, W.-H. . Chen, and A. M. . Trzynadlowski, "Robust cascaded nonlinear predictive control of a permanent magnet synchronous motor with antiwindup compensator," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 8, pp. 3078–3088, 2012.
- [4] K. Raggl, B. Warberger, T. Nussbaumer, S. Burger, and J. W. Kolar, "Robust angle-sensorless control of a PMSM bearingless pump," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 6, pp. 2076–2085, 2009.
- [5] J. R. Riba Ruiz, J. A. Rosero, A. Garcia Espinosa, and L. Romeral, "Detection of demagnetization faults in permanent-magnet synchronous motors under nonstationary conditions," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 7, pp. 2961–2969, 2009.
- [6] S. Rajagopalan, W. le Roux, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Dynamic eccentricity and demagnetized rotor magnet detection in trapezoidal flux (Brushless DC) motors operating under different load conditions," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 5, pp. 2061–2069, Sep. 2007.
- [7] Y. Zhang and J. Jiang, "Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems," *Annu. Rev. Control*, vol. 32, no. 2, pp. 229–252, Dec. 2008.
- [8] P. Poure, P. Weber, D. Theilliol, and S. Saadate, "Fault tolerant control of a three-phase three-wire shunt active filter system based on reliability analysis," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 2, pp. 325–334, Feb. 2009.
- [9] W. T. Thomson and M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 7, no. 4, pp. 26–34, 2001.
- [10] L. Frosini and E. Bassi, "Stator current and motor efficiency as indicators for different types of bearing faults in induction motors," *IEEE Trans. Ind.*

Electron., vol. 57, no. 1, pp. 244–251, Jan. 2010.

- [11] R. N. Andriamalala, H. Razik, L. Baghli, and F.-M. Sargos, “Eccentricity fault diagnosis of a dual-stator winding induction machine drive considering the slotting effects,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 12, pp. 4238–4251, Dec. 2008.
- [12] B. M. Ebrahimi, J. Faiz, and M. J. Roshtkhari, “Static-, dynamic-, and mixed-eccentricity fault diagnoses in permanent-magnet synchronous motors,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, 2009.
- [13] S. Grubic, J. M. Aller, and T. G. Habetler, “A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 12, pp. 4127–4136, Dec. 2008.
- [14] R. M. Tallam, T. G. Habetler, and R. G. Harley, “Transient model for induction machines with stator winding turn faults,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 3, pp. 632–637, 2002.
- [15] K.-H. Kim, B.-G. Gu, and I.-S. Jung, “Online fault-detecting scheme of an inverter-fed permanent magnet synchronous motor under stator winding shorted turn and inverter switch open,” *IET Electr. POWER Appl.*, vol. 5, no. 6, pp. 529–539, 2011.
- [16] K. C. Kim, S. B. Lim, D. H. Koo, and J. Lee, “The shape design of permanent magnet for permanent magnet synchronous motor considering partial demagnetization,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 10, pp. 3485–3487, 2006.
- [17] R. M. Tallam, T. G. Habetler, and R. G. Harley, “Transient model for induction machines with stator winding turn faults,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 3, pp. 632–637, 2002.
- [18] J. Bockstette, E. Stolz, and E. Wiedenbrug, “Upstream impedance diagnostic for three-phase induction motors,” in *2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, 2007, pp. 411–414.
- [19] J. Yun, J. Cho, S. Bin Lee, and J. Y. Yoo, “Online detection of high-resistance connections in the incoming electrical circuit for induction motors,” *IEEE*

Trans. Ind. Appl., vol. 45, no. 2, pp. 694–702, 2009.

- [20] A. Von Jouanne and B. Banerjee, “Assessment of voltage unbalance,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 16, no. 4, pp. 782–790, 2001.
- [21] S. Yu and R. Tang, “Electromagnetic and mechanical characterizations of noise and vibration in permanent magnet synchronous machines,” in *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, vol. 42, no. 4, pp. 1335–1338.
- [22] S. Ruoho, J. Kolehmainen, J. Ikaheimo, and A. Arkkio, “Interdependence of demagnetization, loading, and temperature rise in a permanent-magnet synchronous motor,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 3, pp. 949–953, Mar. 2010.
- [23] P. Zheng, J. Zhao, R. Liu, C. Tong, and Q. Wu, “Magnetic characteristics investigation of an axial-axial flux compound-structure PMSM used for HEVs,” in *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, vol. 46, no. 6, pp. 2191–2194.
- [24] Z. Guoxin, T. Lijian, S. Qiping, and T. Renyuan, “Demagnetization analysis of permanent magnet synchronous machines under short circuit fault,” *Power Energy Eng. Conf. (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*, pp. 1–4, 2010.
- [25] G. H. Kang, J. Hur, H. Nam, J. P. Hong, and G. T. Kim, “Analysis of irreversible magnet demagnetization in line-start motors based on the finite-element method,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, no. 3 I, pp. 1488–1491, 2003.
- [26] S. Nandi, H. A. Toliyat, and X. Li, “Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—a review,” *IEEE Trans. ENERGY Convers.*, vol. 20, no. 4, 2005.
- [27] B. M. Ebrahimi and J. Faiz, “Diagnosis and performance analysis of three-phase permanent magnet synchronous motors with static, dynamic and mixed eccentricity,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 4, no. 1, pp. 53–65, 2010.
- [28] J. Hong, S. Bin Lee, C. Kral, and A. Haumer, “Detection of airgap eccentricity for permanent magnet synchronous motors based on the d-axis inductance,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 5, pp. 2605–2612, 2012.
- [29] J. Rosero, L. Romeral, E. Rosero, and J. Urresty, “Fault detection in dynamic conditions by means of discrete wavelet decomposition for pmsm running

- under bearing damage,” in *2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2009, pp. 951–956.
- [30] J. R. Stack, T. G. Habetler, and R. G. Harley, “Fault classification and fault signature production for rolling element bearings in electric machines,” in *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2003 - Proceedings*, 2003, pp. 172–176.
- [31] J. R. Stack, R. G. Harley, and T. G. Habetler, “An amplitude modulation detector for fault diagnosis in rolling element bearings,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 5, pp. 1097–1102, 2004.
- [32] J. C. Urresty Betancourt, “Electrical and magnetic faults diagnosis in permanent magnet synchronous motors.” Universitat Politècnica de Catalunya.
- [33] M. Arkan, H. Çaliş, and M. E. Tağluk, “Bearing and misalignment fault detection in induction motors by using the space vector angular fluctuation signal,” *Electr. Eng.*, vol. 87, no. 4, pp. 197–206, Jun. 2005.
- [34] G. B. Kliman, R. A. Koegl, J. Stein, R. D. Endicott, and M. W. Madden, “Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 3, no. 4, pp. 873–879, 1988.
- [35] A. Siddique, G. S. Yadava, and B. Singh, “A review of stator fault monitoring techniques of induction motors,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 1, pp. 106–114, Mar. 2005.
- [36] M. El and H. Benbouzid, “A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 5, 2000.
- [37] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, “Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. 4, pp. 921–937, 1992.
- [38] T. A. Lipo, *Introduction of AC machine design*. Wisconsin Power Electronics Research Center, 2004.
- [39] Ye Zhongming and Wu Bin, “A review on induction motor online fault diagnosis,” in *Proceedings IPEMC 2000. Third International Power Electronics and Motion Control Conference (IEEE Cat. No.00EX435)*, 2000, vol. 3, pp. 1353–1358.

- [40] T. G. Habetler and R. G. Harley, "Incipient bearing fault detection via motor stator current noise cancellation using wiener filter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 4, pp. 1309–1317, Jul. 2009.
- [41] T. G. Habetler and R. G. Harley, "Bearing fault detection via stator current noise cancellation and statistical control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 12, pp. 4260–4269, Dec. 2008.
- [42] N. Ream, "Discrete-time signal processing," *Electronics and Power*, vol. 23, no. 2, p. 157, 1977.
- [43] G. Stone and J. Kapler, "Stator winding monitoring," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 4, no. 5, pp. 15–20, 1998.
- [44] J. Douglas, "Hydro generator failure," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 8, no. 11, pp. 4–6, Nov. 1988.
- [45] N. Mehala and R. Dahiya, "Motor current signature analysis and its applications in induction," *Int. J.*, vol. 2, no. 1, pp. 29–35, 2007.
- [46] M. A. Awadallah and M. M. Morcos, "Application of AI tools in fault diagnosis of electrical machines and drives-an overview," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, no. 2, pp. 245–251, Jun. 2003.
- [47] T. M. Wolbank, K. A. Loparo, and R. Wöhrnschimmel, "Inverter statistics for online detection of stator asymmetries in inverter-fed induction motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 4, pp. 1102–1108, 2003.
- [48] F. Briz, M. W. Degner, A. Zamarrón, and J. M. Guerrero, "Online stator winding fault diagnosis in inverter-fed ac machines using high-frequency signal injection," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 4, pp. 1109–1117, 2003.
- [49] S. M. A. Cruz, H. A. Toliyat, and A. J. M. Cardoso, "DSP implementation of the multiple reference frames theory for the diagnosis of stator faults in a DTC induction motor drive," in *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2003 - Proceedings*, 2003, pp. 223–228.
- [50] F. C. Trutt, J. Sottile, and J. L. Kohler, "Online condition monitoring of induction motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 6, pp. 1627–1632, Nov. 2002.

- [51] R. M. Tallam, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Stator winding turn-fault detection for closed-loop induction motor drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 3, pp. 720–724, 2003.
- [52] H. A. Toliyat, S. P. Waikar, and T. A. Lipo, "Analysis and simulation of five-phase synchronous reluctance machines including third harmonic of airgap MMF," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 34, no. 2, pp. 332–339, 1998.
- [53] H. A. Toliyat and T. A. Lipo, "Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 10, no. 2, pp. 241–247, Jun. 1995.
- [54] N. Arthur and J. Penman, "Condition monitoring with non-linear signal processing," in *IEE Colloquium on Non-Linear Signal and Image Processing*, 1998, vol. 1998, pp. 4–4.
- [55] J. Rosero, J. Cusido, A. G. Espinosa, J. A. Ortega, and L. Romeral, "Broken bearings fault detection for a permanent magnet synchronous motor under non-constant working conditions by means of a joint time frequency analysis," in *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2007, pp. 3415–3419.
- [56] M. Arkan, "stator fault diagnosis in induction motors," PhD. Thesis, University of Sussex, 2000.
- [57] A. Allal and B. Chetate, "A new and best approach for early detection of rotor and stator faults in induction motors coupled to variable loads," *Front. Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 176–191, Jun. 2016.
- [58] M. Eftekhari, M. Moallem, S. Sadri, and M.-F. Hsieh, "A novel indicator of stator winding inter-turn fault in induction motor using infrared thermal imaging," *Infrared Phys. Technol.*, vol. 61, pp. 330–336, 2013.
- [59] A. Glowacz and Z. Glowacz, "Diagnosis of the three-phase induction motor using thermal imaging," *Infrared Phys. Technol.*, vol. 81, pp. 7–16, Mar. 2017.
- [60] R. H. C. Palácios, I. N. da Silva, A. Goedtel, and W. F. Godoy, "A novel multi-agent approach to identify faults in line connected three-phase induction motors," *Appl. Soft Comput.*, vol. 45, pp. 1–10, 2016.

- [61] T. Ghanbari, "Autocorrelation function-based technique for stator turn-fault detection of induction motor," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 100–110, Mar. 2016.
- [62] A. Küçüker and M. Bayrak, "Detection of stator winding fault in induction motor using instantaneous power signature analysis," *TURKISH J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 23, pp. 1263–1271, 2015.
- [63] N. R. Devi, D. V. S. S. Siva Sarma, and P. V. Ramana Rao, "Diagnosis and classification of stator winding insulation faults on a three-phase induction motor using wavelet and MNN," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 5, pp. 2543–2555, Oct. 2016.
- [64] A. Glowacz and Z. Glowacz, "Diagnosis of stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signals," *Appl. Acoust.*, vol. 117, pp. 20–27, 2017.
- [65] T. Kato, K. Inoue, and K. Yoshida, "Diagnosis of stator-winding-turn faults of induction motor by direct detection of negative sequence currents," *Electr. Eng. Japan (English Transl. Denki Gakkai Ronbunshi)*, vol. 186, no. 3, pp. 1346–1353, 2014.
- [66] W. F. Godoy, I. Nunes Da Silva, A. Goedel, R. Henrique, and C. Palácios, "Evaluation of stator winding faults severity in inverter-fed induction motors," *Appl. Soft Comput.*, vol. 32, pp. 420–431, 2015.
- [67] F. Duan and R. Živanović, "Induction motor stator fault detection by a condition monitoring scheme based on parameter estimation algorithms," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 44, no. 10, pp. 1138–1148, Jun. 2016.
- [68] G. H. Bazan, P. R. Scalassara, W. Endo, A. Goedel, W. F. Godoy, and R. H. C. Palácios, "Stator fault analysis of three-phase induction motors using information measures and artificial neural networks," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 143, pp. 347–356, 2017.
- [69] R. H. C. Palácios, A. Goedel, W. F. Godoy, and J. A. Fabri, "Fault identification in the stator winding of induction motors using pca with artificial neural networks," *J. Control. Autom. Electr. Syst.*, vol. 27, no. 4, pp. 406–418, Aug. 2016.

- [70] M. Bouzid and G. Champenois, "Experimental compensation of the negative sequence current for accurate stator fault detection in induction motors," in *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2013, pp. 2804–2809.
- [71] Q. Wu and S. Nandi, "Fast single-turn sensitive stator interturn fault detection of induction machines based on positive-and negative-sequence third harmonic components of line currents," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 3, 2010.
- [72] W. F. Godoy, I. N. da Silva, A. Goedel, and R. H. Cunha Palácios, "Evaluation of stator winding faults severity in inverter-fed induction motors," *Appl. Soft Comput.*, vol. 32, pp. 420–431, 2015.
- [73] R. H. Cunha Palácios, I. N. da Silva, A. Goedel, and W. F. Godoy, "A comprehensive evaluation of intelligent classifiers for fault identification in three-phase induction motors," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 127, pp. 249–258, 2015.
- [74] S. Bin Lee, R. M. Tallam, and T. G. Habetler, "A robust, on-line turn-fault detection technique for induction machines based on monitoring the sequence component impedance matrix," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 3, pp. 865–872, 2003.
- [75] D. E. Schump, "Predict motor failure with insulation testing," in *Conference Record of 1997 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, 1997, pp. 48–50.
- [76] D. E. Schump, "Reliability testing of electric motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 25, no. 3, pp. 386–390, 1989.
- [77] R. Maier, "Protection of Squirrel-Cage Induction Motor Utilizing Instantaneous Power and Phase Information," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. 2, pp. 376–380, 1992.
- [78] J. S. Hsu, "Monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, no. 5, pp. 1016–1021, 1995.
- [79] G. B. Kliman, W. J. Premerlani, R. A. Koegl, and D. Hoeweler, "A new approach to on-line turn fault detection in AC motors," *IAS '96. Conf. Rec.*

- 1996 *IEEE Ind. Appl. Conf. Thirty-First IAS Annu. Meet.*, vol. 1, pp. 687–693, 1996.
- [80] J. Sottile and J. L. Kohler, “On-line method to detect incipient failure of turn insulation in random-wound motors,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 8, no. 4, pp. 762–768, 1993.
- [81] J. Penman, H. G. Sedding, B. A. Lloyd, and W. T. Fink, “Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 9, no. 4, pp. 652–658, 1994.
- [82] S. M. A. Cruz and A. J. Marques Cardoso, “Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended park’s vector approach,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 37, no. 5, pp. 1227–1233, 2001.
- [83] M. A. Cash, T. G. Habetler, and G. B. Kliman, “Insulation failure prediction in AC machines using line-neutral voltages,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 34, no. 6, pp. 1234–1239, 1998.
- [84] P. Garcia, F. Briz, M. W. Degner, and A. B. Diez, “Diagnostics of induction machines using the zero sequence voltage,” in *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting.*, 2004, vol. 2, pp. 735–742.
- [85] A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, and C. Tassoni, “Closed-loop control impact on the diagnosis of induction motors faults,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 5, pp. 1318–1339, 2000.
- [86] J.-C. Urresty, J.-R. Riba, and L. Romeral, “Application of the zero-sequence voltage component to detect stator winding inter-turn faults in PMSMs,” *Electr. Power Syst. Res.*, 2012.
- [87] J. Rosero, a. Garcia, J. Cusido, L. Romeral, and J. a. Ortega, “Fault detection by means of hilbert huang transform of the stator current in a pmsm with demagnetization,” *2007 IEEE Int. Symp. Intell. Signal Process. WISP*, vol. 25, no. 2, pp. 312–318, 2007.
- [88] J. Rosero, A. G. Espinosa, J. Cusido, J. A. Ortega, and L. Romeral, “Simulation and fault detection of short circuit winding in a permanent magnet

- synchronous machine (PMSM) by means of fourier and wavelet transform,” in *Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2008, pp. 411–416.
- [89] B. M. Ebrahimi and J. Faiz, “Feature extraction for short-circuit fault detection in permanent-magnet synchronous motors using stator-current monitoring,” *IEEE Trans. POWER Electron.*, vol. 25, no. 10, 2010.
 - [90] Q. Wu and S. Nandi, “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*, 2010, vol. 46, no. 3, pp. 974–983.
 - [91] H. Saavedra, J.-C. Urresty, J.-R. Riba, and L. Romeral, “Detection of interturn faults in PMSMs with different winding configurations,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 79, pp. 534–542, 2014.
 - [92] M. R. M. and A. O. N. M. Hadeif, A. Djerdir, N. Ikhlef, “A fault severity index for stator winding faults detection in vector controlled pm synchronous motor,” *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 10, pp. 2326–2333, 2015.
 - [93] S. S. Moosavi, A. Djerdir, Y. Ait-Amirat, and D. A. Khaburi, “ANN based fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor under stator winding shorted turn,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 125, pp. 67–82, 2015.
 - [94] L. Otava, “Implementation of pmsm inter-turn short fault detection using frequency analysis of stator currents,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 25, pp. 86–91, 2016.
 - [95] M. A. S. Nejad and M. Taghipour, “Inter-turn stator winding fault diagnosis and determination of fault percent in PMSM,” in *2011 IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC)*, 2011, pp. 128–131.
 - [96] M. Taghipour-GorjiKolaie, S. M. Razavi, M. A. Shamsi-Nejad, and A. Darzi, “Inter-turn stator winding fault detection in PMSM using magnitude of reactive power,” in *ICCAIE 2011 - 2011 IEEE Conference on Computer Applications and Industrial Electronics*, 2011, pp. 256–261.
 - [97] B. Sen and J. Wang, “Stator interturn fault detection in permanent-magnet machines using pwm ripple current measurement,” *IEEE Trans. Ind.*

Electron., vol. 63, no. 5, pp. 3148–3157, May 2016.

- [98] M.-Y. Chow, R. N. Sharpe, and J. C. Hung, “On the application and design of artificial neural networks for motor fault detection. II,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 40, no. 2, pp. 189–196, Apr. 1993.
- [99] B. M. Ebrahimi, M. Javan Roshtkhari, J. Faiz, and S. V. Khatami, “Advanced eccentricity fault recognition in permanent magnet synchronous motors using stator current signature analysis,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 4, pp. 2041–2052, 2014.
- [100] P. Konar and P. Chattopadhyay, “Bearing fault detection of induction motor using wavelet and Support Vector Machines (SVMs),” *Appl. Soft Comput.*, vol. 11, no. 6, pp. 4203–4211, 2011.
- [101] F. Zidani, M. El Hachemi Benbouzid, D. Diallo, and M. S. Nait-Said, “Induction motor stator faults diagnosis by a current concordia pattern-based fuzzy decision system,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, no. 4, pp. 469–475, Dec. 2003.
- [102] P. V. Jover Rodríguez and A. Arkkio, “Detection of stator winding fault in induction motor using fuzzy logic,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 8, no. 2, pp. 1112–1120, 2008.
- [103] V. T. Tran, B.-S. Yang, M.-S. Oh, and A. C. C. Tan, “Fault diagnosis of induction motor based on decision trees and adaptive neuro-fuzzy inference,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 2, pp. 1840–1849, 2009.
- [104] M. Seera, Chee Peng Lim, D. Ishak, and H. Singh, “Fault detection and diagnosis of induction motors using motor current signature analysis and a hybrid fmm-cart model,” *IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst.*, vol. 23, no. 1, pp. 97–108, Jan. 2012.
- [105] M. Seera, C. P. Lim, D. Ishak, and H. Singh, “Offline and online fault detection and diagnosis of induction motors using a hybrid soft computing model,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 13, no. 12, pp. 4493–4507, 2013.
- [106] M. Chris, *Machine Condition Monitoring and Fault Diagnostics*. 2007.
- [107] M. J. Carr and W. Wang, “An approximate algorithm for prognostic modelling using condition monitoring information,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 211, no. 1,

pp. 90–96, 2011.

- [108] Y. Han and Y. H. Song, “Condition monitoring techniques for electrical equipment-a literature survey,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, no. 1, pp. 4–13, 2003.
- [109] P. J. Tavner, “Published in iet electric power applications review of condition monitoring of rotating electrical machines,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 2, no. 4, pp. 215–247, 2008.
- [110] S. Rajagopalan, J. A. Restrepo, J. M. Aller, T. G. Habetler, and R. G. Harley, “Nonstationary motor fault detection using recent quadratic time-frequency representations,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 3, pp. 735–744, 2008.
- [111] J. Pons-Llinares, J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, M. Pineda-Sanchez, and V. Climente-Alarcon, “Induction motor diagnosis based on a transient current analytic wavelet transform via frequency B-plines,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 5, pp. 1530–1544, 2011.
- [112] A. K. S. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, “A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 7, pp. 1483–1510, 2006.
- [113] A. Bracale, G. Carpinelli, D. Lauria, Z. Leonowicz, T. Lobos, and J. Rezmer, “On some spectrum estimation methods for analysis of nonstationary signals in power systems. Part I. Theoretical aspects,” in *2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power (IEEE Cat. No.04EX951)*, 2004, pp. 266–271.
- [114] Richard G. Lyons, *Understanding Digital Signal Processing*. United States: Pearson Education Inc., 2004.
- [115] D. K. Perovic, “On-line diagnosis of faults in induction motor and pump,” PhD. Thesis University of Sussex, 2000.
- [116] Türkoğlu. İ., “Durağan olmayan işaretler için zaman-frekans entropilerine dayalı akıllı örüntü tanıma,” ,Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, 2002.
- [117] Günal. S., “Örüntü tanıma uygulamalarında altuzay analiziyle öznetelik seçimi ve sınıflandırma,” Doktora Tezi, Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi, 2008.

- [118] R. Aarabi, A., Wallois, F. and Grebe, “Automated neonatal seizure detection: A multistage classification system through feature selection based on relevance and redundancy analysis,” *Clin. Neurophysiol.*, vol. 117, pp. 328–340, 2006.
- [119] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and P. Vas, “Recent developments of induction motor drives fault diagnosis using ai techniques,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 5, pp. 994–1004, 2000.
- [120] O. F. Alcin, A. Sengur, S. Ghofrani, and M. C. Ince, “GA-SELM: Greedy algorithms for sparse extreme learning machine,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 55, pp. 126–132, 2014.
- [121] V. N. Vapnik, *Statistical learning theory*. John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [122] E. Çomak, “Destek vektör makineleri çoklu sınıf problemleri için çözüm önerileri,” Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, 2004.
- [123] D. A. Demirci, “Destek Vektör Makineleri ile Karakter Tanıma,” Tez, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2007.
- [124] D. S. Cunningham P, “K-neighbour classifiers,” Dublin, Ireland, 2007.
- [125] S. İ. Kırmızıgül Çalışkan S, “K means ve k en yakın komşu yöntemleri ile ağlarda nüfuz tespiti,” in 2. *Ağ ve Bilgi Güvenliği Sempozyumu*.
- [126] K. M. Han J, *Data mining: Concepts and techniques*, 1st ed. San Francisco, USA: Morgan Kaufmann Publishers, 2000.
- [127] Özekes S., “Veri madenciliği modelleri ve uygulama alanları,” *İstanbul Ticaret Üniversitesi Derg.*, vol. 2, no. 3, pp. 65–82, 2003.
- [128] A. M., “Veri madenciliğine genel bakış ve Random Forest yönteminin incelenmesi: Sağlık alanında bir uygulama,” Ankara Üniversitesi, 2010.
- [129] L. Breiman, “Random forests,” *Mach. Learn.*, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, 2001.
- [130] K. J. Archer and R. V. Kimes, “Empirical characterization of random forest variable importance measures,” *Comput. Stat. Data Anal.*, vol. 52, no. 4, pp. 2249–2260, 2008.
- [131] M. Pal, “Random forest classifier for remote sensing classification,” *Int. J.*

Remote Sens., vol. 26, no. 1, pp. 217–222, 2005.

- [132] L. Breiman and A. Cutler, “Breiman and Cutler’s random forests for classification and regression,” *Packag. “randomForest,”* p. 29, 2012.
- [133] L. Romeral, J. C. Urresty, J.-R. Riba Ruiz, and A. G. Espinosa, “Modeling of surface-mounted permanent magnet synchronous motors with stator winding interturn faults,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 5, 2011.



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Ferhat ÇIRA

Doğum Yeri ve Tarihi: BATMAN/ 01.06.1983

Adres: Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Müh. Böl.
DİYARBAKIR

E-Posta: fcira@dicle.edu.tr

Lisans:

(2001-2006) Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Y. Lisans:

(2007-2010) Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Makinaları A.B.D.

Mesleki Deneyim:

(2006-2007) Elektrik İç Tesisat Proje Mühendisi, Batman

(2007-Devam) Araştırma Görevlisi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü DİYARBAKIR

Bu Tez Kapsamında Yapılan Yayınlar

Proje:

F. Çıra, M. Arkan, “Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Sayısal İşaret İşleme Tabanlı Durum İzlemesi ve Arıza Teşhisi”, İ.Ü. BAP birimi, Proje No: 2013/57.

Uluslararası SCI indekslerde taranan makaleler:

- 1- **F. Çıra**, M. Arkan, B. Gümüş (2016), Detection of Stator Winding Inter-Turn Short Circuit Faults in Permanent Magnet Synchronous Motors and Automatic Classification of Fault Severity via a Pattern Recognition System, Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 11, No. 2, pp.416-424, SCI, Doi: 10.5370/JEET.2016.11.2.416

Uluslararası konferanslarda sunulan bildiriler:

- 2- **F. Çıra**, M. Arkan, B. Gümüş (2015), A New Approach to Detect Stator Fault in Permanent Magnet Synchronous Motors, *10th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED) Portugal-Guarda, September 1-4, 2015*, pp.316-321,. Doi: 10.1109/DEMPED.2015.7303708
- 3- **Çıra Ferhat**, Arkan Müslüm, Gümüş Bilal, Göktas Taner (2016), Analysis of Stator Interturn Short-circuit Fault Signatures for Inverter-fed Permanent Magnet Synchronous Motors. *The 42nd Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, October 23-27, 2016, pp.1453-1457, Doi: 10.1109/IECON.2016.7793717.