



**ŞEBEKE KALKIŞLI SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORDA
STATOR SARGI ARIZASI TEŞHİSİ**

KÜBRA TETİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Dr. Öğr. Üyesi Zafer DOĞAN

Nisan- 2019

Her hakkı saklıdır.

T.C.
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞEBEKE KALKIŞLI SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORDA STATOR
SARGI ARIZASI TEŞHİSİ

KÜBRA TETİK

TOKAT
Nisan - 2019

Her hakkı saklıdır.

Kübra TETİK tarafından hazırlanan “**Şebeke Kalkışlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorda Stator Sargı Arızası Teşhisi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 11 NİSAN 2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

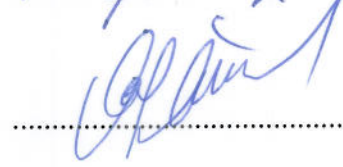
Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Zafer DOĞAN
Gaziosmanpaşa Üniversitesi



Üye
Doç. Dr. Mehmet AKAR
Gaziosmanpaşa Üniversitesi



Üye
Prof. Dr. Okan ÖZGÖNENEL
Ondokuz Mayıs Üniversitesi



ONAY

Prof. Dr. Çetin ÇEKİCİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

06/05/2019



TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Kübra TETİK

11 Nisan 2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞEBEKE KALKIŞLI SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORDA STATOR SARGI ARIZASI TEŞHİSİ

KÜBRA TETİK

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ ZAFER DOĞAN

Elektrik motorları, elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren ve yaşamın her alanında kullanılan makinelerdir. Bu motorların arızalanması hem üretim kaybı oluşturmakta hem de işletme maliyetini artırmaktadır. Bu nedenle elektrik makinelerinde durum izleme sayesinde hızlı arıza tespiti ile donanım hasarı ve onarım masrafları azaltılırken uzun işletme ömrü ve enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Yüksek verim, yüksek güç faktörü gibi faydalara sahip, Şebeke Kalkışlı Sürekli Miknatıslı Senkron Motorlar (ŞKSMSM) sabit hız gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu nedenle ŞKSMSM'nin durum izlemesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada ŞKSMSM'de oluşan stator sargı arızalarının tespiti için Gabor-Mertebe Takip Analizi (Gabor-MTA) yoluyla zaman-frekans boyutunda işaret analizine dayalı yeni bir yöntem sunulmuştur. Motorda stator sargı arızası bir ayarlı direnç kullanılarak yapay olarak oluşturulmuştur. Motorun arızalı ve sağlam fazlarına ait akım ve sayısal hız işaretleri beş farklı yük (0, %50, %75, %100 ve %115 yük) ile durağan ve dinamik çalışma koşullarında sağlam ve arızalı durumlar için izlenmiş ve bir bilgisayarda kayıt altına alınmıştır. Durağan koşul sabit hız sabit yük ve dinamik koşullar değişken hız sabit yük ile değişken yük sabit hızlı çalışmadır. Toplanan veriler MTA yöntemi ile analiz edilerek arıza harmoniklerinin frekans boyutunda mertebeleri hesaplanmıştır. Arızaya ait frekans bileşeninin temel frekansın 3. harmoniğine denk gelen 6. mertebede olduğu görülmüştür. Arıza durumunun ve arıza seviyesinin tespiti için Gabor-MTA yoluyla 6. mertebe harmonik bileşeninin zaman boyutunda işareti elde edilmiştir. Bu işaret bileşeninin enerji seviyesi ve istatistiksel parametreleri hesaplanarak arıza ve arıza seviyelerine ait özellikler çıkartılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin ŞKSMSM'lerde stator sargı arızalarının tespiti için başarılı bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur.

2019, 97 Sayfa

ANAHTAR KELİMELER: Sargı Arızası Tespiti, Şebeke Kalkışlı Sürekli Miknatıslı Senkron Motor, Gabor Mertebe Takip Analiz Yöntemi.

ABSTRACT

MASTER THESIS

DIAGNOSIS OF STATOR WINDING FAULT IN LINE-START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

KÜBRA TETİK

**TOKAT GAZIOSMANPASA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

SUPERVISOR: ASST. PROF. DR. ZAFER DOĞAN

Electric motors are machines that convert electrical energy into mechanical energy and are used in all areas of life. The faults of these motors creates loss of production and increases the operating cost. Therefore, with fast fault detection, hardware damage and repair costs are reduced while long operating life and energy savings are ensured. Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors(LSPMSM) with advantage high efficiency and high power factor have been widely used in require constant speed. For this reason, monitoring of LSPMSMS is very important. In this study, a new method based on signal analysis in the time-frequency dimension is presented by Gabor-Order Tracking Analysis (Gabor-OTA) for the detection of winding faulty in LSPMSM. The winding faults in the motor is artificially constructed using a rheostat. The current and digital speed signals of the faulty and healthy phases of the motor were monitored for five different loads (0, 50%, 75%, 100% and 115% load) and in stable and dynamic operating conditions for healthy and faulty conditions and recorded on a computer. Stable condition is constant speed constant load operation, dynamic conditions are variable speed constant load and variable load constant speed operation. The collected data were analyzed by OTA method and the frequency of fault harmonics were calculated. The frequency component of the fault was found to be in the 6th order, which corresponds to the 3rd harmonic of the fundamental frequency. Signal of the 6th order harmonic component in the time dimension is obtained via the Gabor-OTA to determine the fault status and the fault level. By calculating the energy level and the statistical parameters of this signal component, the properties of the fault and fault levels have been extracted. The results showed that the proposed method was a successful method for detecting stator winding failures in LSPMSM.

2019, 97 Page

KEYWORDS: Fault Detection, Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors, Order Tracking Analysis Method.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim sürecinde kendisinden çok şey öğrendiğim, tez çalışmam boyunca da her türlü desteği sağlayan ve yol gösteren, çalışmalarına çok büyük katkısı olan değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zafer Doğan'a

Tez çalışması süresince değerli yardım ve önerilerinden dolayı Sayın Doç. Dr. Mehmet AKAR'a,

Son olarak her zaman yanımda olan, bu mutluluğun en çoğunu hak eden, benliğimi borçlu olduğum canım anneme ve babama teşekkürlerimi sunarım.

Kübra TETİK

Nisan 2019

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	7
3.1. Şebeke Kalkışlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar	8
3.2. Şebeke Kalkışlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Yapısı.....	8
3.3. Şebeke Kalkışlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Fayda ve Mahsurları.....	14
3.4. Şebeke Kalkışlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Matematiksel Modeli.....	19
3.5. Şebeke Kalkışlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorda Arızalar	29
3.5.1. Elektriksel arızalar	29
3.5.2. Mekaniksel arızalar	32
3.5.3. Manyetik arızalar	33
3.6. Kullanılan Arıza Tespit Yöntemleri.....	34
3.6.1. Hızlı Fourier dönüşümü	34
3.6.2. Gabor mertbe takip analiz yöntemi	39
3.6.3. Özellik çıkartmak için kullanılan istatistiksel analiz yöntemleri	45
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	46
4.1. Deney Düzenegi ve Veri Toplama	47
4.2. Stator Sargı Arızasının Oluşturulması	50
4.3. Stator Sargı Arızasının Arızalı Fazda Analizi	50
4.3.1. Durağan çalışmada stator sargı arızasının tespiti	52
4.3.2. Dinamik çalışmada stator sargı arızasının tespiti.....	66

4.4. Stator Sargı Arızasının Sağlam Fazda Analizi.....	84
5. SONUÇ	89
6. KAYNAKLAR	93
7. ÖZGEÇMİŞ	97



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
i_{ds}, i_{qs}, i_{0s}	Stator akımları
$i_{qr}^r, i_{dr}^r, i_{0r}^r$	Rotor akımları
L_{mq}, L_{md}	Mıknatıslanma indüktansı
i_m	Mıknatıslanma akımı
λ_m	Mıknatıslanma akısı
$v_{ds}^r, v_{qs}^r, v_{0s}^r$	Stator gerilimleri
v_{qr}^r, v_{dr}^r	Rotor gerilimleri
$\lambda_{qs}^r, \lambda_{ds}^r, \lambda_{0s}^r$	Stator akıları
$\lambda_{qr}^r, \lambda_{dr}^r, \lambda_{0r}^r$	Rotor akıları
r_s	Stator direnci
r_{qr}^r, r_{dr}^r	Rotor direnci
L_{lr}^r	Rotor kaçak indüktansı
L_{ls}	Stator kaçak indüktansı
ω_m	Açısal hız
T_e	Elektromanyetik tork
P	Kutup sayısı
T_{ind}	Kafes torku
T_{exc}	Uyartım torku
T_{Rel}	Relüktans torku
$R_{a_1 a_2 bc}^S$	Stator direnç matrisi
μ	Kısa devre yapılan sarımların oranı
N_{sh}	Kısa devre yapılan sarım sayısı
N_s	Stator faz başına sarım sayısı
R_f	Dış arıza direnci
R_{abc}^s, R_{abc}^r	Sağlam koşullar altında stator ve rotor direnci matrisleri
$\lambda_{a_1 a_2 bc}^s, \lambda_{abc}^r$	Akı bağlantı vektörleri
$L_{a_1 a_2 bc}^{ss}, L_{abc}^r$	Sargı arızalı stator ve rotor indüktans matrisleri

$L_{a_1 a_2 bc}^{sr}, L_{a_1 a_2 bc}^{rs}$	Sargı arızalı stator ve rotor karşılıklı indüktans matrisleri
$\lambda_{m a_1 a_2 bc}^s$	Stator üzerinde oluşan bağlantı akısı
$L_{abc}^{ss}, L_{abc}^{rr}$	Stator ve rotor devreleri için indüktans matrisleri
v_q^s, v_d^s ve v_0^s	Stator qd0 gerilimleri
$v_q^{r'}, v_d^{r'}$ ve $v_0^{r'}$	Stator tarafına göre akan qd0 rotor gerilimleri
i_q^s, i_d^s ve i_0^s	Stator qd0 akımları
$i_q^{r'}, i_d^{r'}$ ve $i_0^{r'}$	Stator tarafına göre akan qd0 rotor akımları
L'_{lrq}, L'_{lrd}	Stator tarafına göre rotor kaçak indüktansları
$L_{\Delta m}$	Çıkıntıya bağlı indüktans
a_0, a_k, b_k	Fourier katsayıları
$w(t)$	Pencere fonksiyonu
τ	Zamanda öteleme miktarı
N	Veri uzunluğu
T	İşaret periyodu
$S_{xx}(k)$	$x(t)$ işaretine ait güç spektrum yoğunluğu
T	Zaman örnekleme adımı
Ω	Frekans örnekleme adımı
$p[k]$	Takometre veri serisi
$s[k]$	Akım veri serisi
ΔM	Örnekleme zaman aralığı
ΔN	Örnekleme frekans aralığı
M	Zaman noktalarının sayısını
N	Toplam frekans
$\omega(t)$	Açısal hız
l	Belirli bir mertebe
Q	Örnekleme oranı
$\theta(t)$	Konum

Kısaltmalar	Açıklama
ŞKSMSM	Şebeke Kalkışlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
SMSM	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
PSEİ	Parçacık Sürü En İyilemesi
FTA	Frekans Tepki Analizi
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
YSA	Yapay Sinir Ağı
FFT	Fast Fourier Transform
NdBF _e	Neodyum - Boron-Demir
AlNiCo	Alüminyum-Nikel-Kobalt
SmCo	Samaryum-Kobalt
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
HFD	Hızlı Fourier Dönüşümü
MTA	Mertebe Takip Analizi
Gabor-MTA	Gabor Mertebe Takip Analizi
VKF-MTA	Vold Kalman Filtre tabanlı Mertebe Takip Analizi
HFD-MTA	Hızlı Fourier Dönüşümü tabanlı Mertebe Takip Analizi
YÖT-MTA	Yeniden Örnekleme Tabanlı Mertebe Takip Analizi
KZFD	Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü
AFD	Ayrık Fourier Dönüşümü
AGD	Ayrık Gabor Dönüşümü
RPM	Revolutions per Minute
IEC	International Electrotechnical Comission
IE3	International Efficiency Level 3
IE4	International Efficiency Level 4
IE5	International Efficiency Level 5

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1. Üç fazlı ŞKSMS motor kesiti	9
Şekil 3.2. ŞKSMSM Rotor kafes yapısı	10
Şekil 3.3. SMSM’de Rotor yüzeyine yerleştirilmiş mıknatıs görünümü.....	12
Şekil 3.4. SMSM’de Rotor gövdesine radyal yerleştirilmiş mıknatıs görünümü.....	12
Şekil 3.5. SMSM’de Rotora dairesel yerleştirilmiş mıknatıs görünümü	13
Şekil 3.6. Akı bariyerlerinin gösterimi	13
Şekil 3.7. Motor verimlilik sınıfları.....	15
Şekil 3.8. ŞKSMSM ile ASM için mil torkuna karşı verimlilik - güç faktörü .	17
Şekil 3.9. ŞKSMSM teorik tork-hız eğrisi.....	18
Şekil 3.10. Üç fazlı ŞKSMSM eşdeğer devresi	18
Şekil 3.11. A fazında sargı arızası bulunan ŞKSMSM statoru	22
Şekil 3.12. ŞKSMSM arıza sınıflandırması.....	29
Şekil 3.13. Üç fazlı ŞKSMSM’de stator sargı arızaları	30
Şekil 3.14. Eksenden kaçıklık tipleri	32
Şekil 3.15. Akım spektrum grafiği.....	38
Şekil 3.16. Gabor MTA işleyiş diyagramı	42
Şekil 4.1. Önerilen arıza tespit yönteminin öbek çizelgesi.....	46
Şekil 4.2. Deney düzeneği	47
Şekil 4.3. Veri toplama işlemleri için oluşturulmuş program görüntüsü	50
Şekil 4.4. Sargı arızası oluşumu.....	50
Şekil 4.5. Motor akım zaman grafiği	52
Şekil 4.6. Durağan koşulda boşa çalışma HFD ve mertebe spektrumları	54
Şekil 4.7. Durağan koşulda %50 yüklü çalışma HFD ve mertebe spektrumları.....	56
Şekil 4.8. Durağan koşulda %75 yüklü çalışma HFD ve mertebe spektrumları.....	57
Şekil 4.9. Durağan koşulda %100 yüklü çalışma HFD ve mertebe spektrumları.....	58
Şekil 4.10. Durağan koşulda %115 yüklü çalışma HFD ve mertebe spektrumları.....	59
Şekil 4.11. Durağan koşulda %100 yüklü çalışma 6. mertebe dalga şekilleri..	60
Şekil 4.12. Durağan koşulda %100 yüklü çalışma 6. mertebe enerji seviyeleri şekilleri.....	61
Şekil 4.13. 6. mertebe işaret grafiği	62
Şekil 4.14. Durağan koşulda 6. mertebe standart sapma histogramları	64
Şekil 4.15. Durağan koşulda 6. mertebe varyans histogramları	65
Şekil 4.16. 0-1500-0 d/d, %100 yüklü dinamik çalışma akım/zaman ve hız/zaman grafiği	67
Şekil 4.17. Dinamik koşulda boşa çalışma HFD ve mertebe spektrumları	68
Şekil 4.18. Dinamik koşulda %50 yüklü çalışma HFD ve mertebe spektrumları	69

Şekil 4.19. Dinamik koşulda %75 yüklü çalışma HFD ve mertebe spektrumları.....	70
Şekil 4.20. Dinamik koşulda %100 yüklü çalışma HFD ve mertebe spektrumları	71
Şekil 4.21. Dinamik koşulda %115 yüklü çalışma HFD ve mertebe spektrumları	72
Şekil 4.22. Dinamik koşulda %100 yüklü çalışma 6. mertebe dalga şekilleri..	74
Şekil 4.23. Dinamik koşulda %100 yüklü çalışma 6. mertebe enerji seviyeleri	75
Şekil 4.24. Dinamik koşulda 6. mertebeye ait standart sapma histogramları...	77
Şekil 4.25. Dinamik koşulda 6. mertebeye ait varyans histogramları	78
Şekil 4.26. 1500d/d sabit hız değişken yükte çalışma	79
Şekil 4.27. Dinamik koşulda 1500 d/d hızlı çalışma HFD ve mertebe spektrumları.....	80
Şekil 4.28. Dinamik koşulda 1500 d/d hızlı çalışmada 6. mertebe dalga şekilleri.....	81
Şekil 4.29. Dinamik koşulda 1500 d/d hızlı çalışmada 6. mertebe enerji seviyeleri.....	82
Şekil 4.30. Dinamik koşulda 1500 d/d hızlı çalışmada 6. mertebeye ait standart sapma ve varyans histogramları.....	83
Şekil 4.31. Dinamik koşulda %100 yüklü çalışma sağlam fazda HFD ve mertebe spektrumları	85
Şekil 4.32. Dinamik koşulda %100 yüklü çalışma sağlam faz 6. mertebe dalga şekilleri.....	86
Şekil 4.33. Dinamik koşulda %100 yüklü çalışma sağlam faz 6. mertebe enerji seviyeleri.....	87
Şekil 4.34. Sağlam fazda 6. mertebeye ait standart sapma ve varyans histogramları	88

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1. Farklı verimlilik standartları.....	14
Çizelge 2. ŞKSMSM ve ASM'ye ait verimlilik ve güç faktörü verileri.....	14
Çizelge 4.1. ŞKSMSM parametreleri	48
Çizelge 4.2. DC makine çalışma parametreleri	48
Çizelge 4.3. Yük durumuna göre sargı arızası halinde motor akım etkin değerleri.....	53
Çizelge 4.4. Frekans-mertebe denklikleri.....	53



1. GİRİŞ

Elektrik motorları, elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren ve yaşamın her alanında kullanılan cihazlardır. Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte elektrik motorları birçok uygulamada kullanım olanağı bulmuştur. Uygulamada bazı sistem türleri sabit hıza gereksinim duyarlar. Endüstride bu tür sistemlerin sabit hız gereksinimi genellikle senkron motorlar tarafından karşılanır. Günümüzde geleneksel senkron motorların yerini motor verimini artırmak amacıyla sürekli mıknatıslı motorlar almıştır. Sürekli mıknatıslar sayesinde motor kayıpları azaltılabilmektedir. Ayrıca mıknatıs kullanılarak yapılan uygun tasarımlarla rotor eylemsizlikleri olumlu yönde geliştirilebilmektedir. Kararlı çalışmada Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor (SMSM) özelliğine sahip olan, Şebeke Kalkışlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor (ŞKSMSM) sabit hız gerektiren havalandırma sistemleri, bant sistemleri vb. alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Fırat, 2006).

Yüksek verim, güç faktörü, mıknatıs alanındaki gelişme gibi faydalarla sürekli mıknatıslı motorlar en çok tercih edilen motor türleri arasındadır. Mıknatısın sağladığı yüksek verimin yanında motorun yapısında da basitleştirme sağlaması bakımından SMSM'lerin uygulama alanları sürekli gelişmektedir. SMSM'ler, sabit frekansta çalışan motorlardır. Ancak bu motorlar doğrudan şebekeden beslendiklerinde kalkış sorunu ortaya çıkmaktadır. Herhangi bir ara devre kullanmadan, doğrudan şebeke beslemeli senkron motorun kalkış yapabilmesi için rotoruna kafes yapısı eklenmiş ve ŞKSMSM yapısı elde edilmiştir (Fırat, 2006; Akar, 2009). ŞKSMSM'nin rotorunda hem sürekli mıknatıs hem de kafes yapısı bulunur. ŞKSMSM'nin rotorunda bulunan kafes yapısı asenkron motor gibi kalkış yapmasını sağlar, mıknatıslar ise senkronlama ve motorun sürekli haldeki başarımını gerçekleştirir. Rotorda ayrıca akı bariyerleri bulunmaktadır. Bunların görevi ise mıknatısın ürettiği akının kendi üzerinden kısa devre olmasını engellemektir (Rahman ve ark., 1990; Stephens ve ark., 1998).

İşletmelerde yaygın olarak kullanılan bu motorlar elektriksel, mekaniksel ve dış hava koşulları gibi zorlanmalarla karşılaşır. Ağır işletme koşullarında çalışan motorlarda birçok farklı arıza meydana gelebilmektedir. ŞKSMSM'lerde meydana gelen arızalar; manyetik, elektriksel ve mekaniksel olarak üç gruba ayrılır. Manyetik arıza; mıknatıslarda oluşan demagnetizasyon veya mıknatısların kırılması durumundaki

arızadır. Rotorda meydana gelebilecek mekaniksel zorlanmalar ve ısısal değişimler bu arızanın oluşumunun en önemli kaynaklarından. Mekaniksel arızalar; eksen den kaçıklık ve rulman arızası olarak sınıflandırılmaktadır. Mekaniksel arızaların temel kaynaklarını motor yük eksenlenmesinde meydana gelen bozukluklar, ani yük değişimleri, toz nem vb. dış ortam etkileri oluşturmaktadır.

Elektriksel arızalar; stator sargı arızaları, rotor çubuk kırığı arızası ve rotor çubuğu halkası kırığı arızasıdır. Bu arızalardan rotor çubuk kırığı arızası ısısal zorlanmalar, manyetik zorlanmalar, üretimden gelen hatalar, dinamiksel sorunlar, çevresel olumsuzluklar ve mekaniksel sorunlardan dolayı oluşan arızalardır (Nandi ve ark., 2005).

Sargı arızaları elektrik motorlarında en sık görülen arıza türlerinden biridir ve genellikle rotorun statora sürtmesi, elektriksel ve manyetik zorlanmalar sonucunda sargılarda oluşan kısa devre durumlarıdır. ŞKSMSM’de sargı arızaları faz-faz, faz-toprak, bobin-bobin gibi daha ciddi arızaları hızla geliştirebilir. Bu arızalar motorda yıkıcı ve yapımı olası olmayan tehlikelere yol açabilir. Bu nedenle sargı arızalarının mümkün olduğu kadar erken teşhisi ciddi önem taşımaktadır (Kim ve ark., 2004).

Motorlarda arıza teşhisi amaçlı durum izlemelerinde genellikle manyetik, ısısal, akustik, titreşim, kimyasal ve elektriksel veriler kullanılmaktadır (Hatik ve ark., 2014). Bu veriler içerisinde en yaygın olanı, elde edilmesinin kolay olmasından dolayı elektriksel akım verileridir (Gunal ve ark., 2009).

Elektrik makinalarında arızaların tespiti için yaygın olarak kullanılan işaret işleme yöntemleri bulunmaktadır. Bunlar zaman boyutunda analiz, frekans boyutunda analiz yöntemi olarak Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) , zaman-frekans boyutunda analiz olarak Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü ve Dalgacık Dönüşümü son olarak ise Park’ın vektör yaklaşımıdır (d-q dönüşümü).

Bu tez çalışmasında, üç fazlı ŞKSMSM’de HFD ve Gabor Mertebe Takip Analiz (Gabor-MTA) yöntemleri kullanılarak farklı yüklerde (boşta, %50, %75, %100 ve %115) stator sargı arızalarının tespiti gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada motorun stator sargısına ayarlı direnç yardımıyla paralel direnç eklenerek arızalı model oluşturulmuştur. Hem sağlam motor hem de arızalı motordan farklı yüklerde çalışma şartlarında motor akımı ve hızı izlenerek kayıt altına alınmıştır.

Farklı yüklerde sağlam ve sargı arızalı ŞKSMSM'den alınan işaretler Labview Signal Express toolboxları aracılığıyla Gabor-MTA ve HFD yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçları karşılaştırılarak arıza tespiti gerçekleştirilmiştir. Gabor dönüşümlerinden yararlanarak yeniden hesaplanan 6. mertebe işaret bileşeninin enerji seviyesi ve istatistiksel parametreleri hesaplanarak arıza ve arıza seviyelerinin net bir şekilde ayırt edilebildiği tespit edilmiştir.

Bu tez çalışması 5 bölümden oluşmaktadır. 1. Bölüm GİRİŞ bölümüdür ve bu bölümde genel olarak ŞKSMSM'lara, bu makinada oluşan arızalara değinilip ayrıca tez çalışmasından bahsedilmiştir. 2. Bölümde kaynakça taramasına yer verilmiştir. 3. Bölüm MATERYAL ve YÖNTEM bölümüdür ve bu bölümde ŞKSMSM'nin yapısı, çalışma ilkesi, fayda ve mahsurları, matematiksel modeli ve arızalı makineye ait matematiksel modeli, ŞKSMSM'da oluşabilen arızalar için ayrıntılı bir biçimde ifade edilip, Gabor-MTA yöntemi ve HFD üzerinde durulmuştur. 4. Bölüm BULGULAR ve TARTIŞMA bölümüdür ve bu bölümde deney düzeneği, arıza oluşturma, veri toplama ve verilerin işlenmesi açıklanıp elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak ifade edilmiştir. 5. Bölümde çalışmanın sonuçları açıklanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde SMSM ve ŞKSMSM'ler için önceden yapılmış arıza tespiti çalışmalarına yer verilmiştir. Yapılan çalışmalarda özellikle stator sargı arıza tespitinin ön planda olduğu analizler incelenmiştir. Farklı araştırmacılar tarafından incelenen sargı arızaları çalışmaları bu bölümde kısaca anlatılmıştır.

Liu ve ark. (2012), SMSM'de oluşan stator sargı arızasının şiddetini ve yerini tespit edebilmek için bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada hem sağlam hem de arızalı model geliştirilmiştir. Arızalı modele göre arızanın şiddetini ve yerini tespit edebilmek için arızalı sarımların toplam sarımlara oranı ve arızalı faz ile eksen arasındaki açı olan iki parametreye ihtiyaç duyulduğu görülmüştür. Bu iki parametrenin karmaşık dağılımından dolayı oluşan tespit edebilme zorluğunu ortadan kaldırmak için Parçacık Sürü En İyilemesi (PSEİ) kullanılmıştır. PSEİ tabanlı tespit algoritması gerçek zamanda faz akımları verisinden arızayı tespit etmek için başarılı sonuç vermiştir. Fakat arıza şiddetine yükleme koşulunun etkisini incelemek olası olmamıştır. Önerilen arıza tespit algoritması yükleme koşulundan bağımsız olduğu için iki parametreyle arıza tespiti doğru bir şekilde yapılabilmektedir.

Nyanteh ve ark. (2013), SMSM'de stator sargısında arızanın yerini ve arıza sırasında kısa devre olmuş sarımların sayını belirleyerek arıza şiddetini belirlemek için bir çalışma yapmışlardır. Arıza teşhisi için PSO ile birleştirilmiş bir Yapay Sinir Ağı (YSA) geliştirilmesini amaçlamışlardır. Bu amaçla sinir ağlarını hem SMSM'den alınan hem de simülasyondan alınan verileri kullanılarak Genişletilmiş Kalman Filtresi yöntemiyle eğitmişlerdir. Sargı arızası farklı seviyelerde iken makine farklı hızlarda çalıştırılıp faz akımları incelenmiştir. Çalışma sonucunda arızanın tipi, yeri ve şiddeti gibi üç önemli bilgiye ulaşmışlardır.

Urresty ve ark. (2013), SMSM'de sargı arızasının tespiti için makine değişken hız koşullarında çalışırken stator akımlarının 3. harmoniği ve sıfır bileşen gerilimlerinin 1. harmoniği olmak üzere Vold-Kalman filtre tabanlı mertebe takibine dayanan iki algılama yöntemi analiz etmişlerdir. Sıfır bileşen gerilimlerinin analizine dayanan yöntem stator akımlarının analizine dayanan yöntemle kıyasla özellikle düşük hızlı çalışma şartlarında geliştirilmiş hassasiyet ve doğruluk sunmuştur. Mertebe takip algoritması geniş bir hız

aralığı ve farklı yük seviyeleri altında ilgili harmonikleri izlemek için başarıyla uygulanmıştır. Çalışmada stator sargı arızasının durağan olmayan hız koşullarında tespiti için incelenen ilgili harmoniklerin motor hızına karşılık grafiklerinden elde edilen ilinti katsayısı ve eğim iki güvenilir arıza göstergesi olarak sunulmuştur. Deneysel sonuçlarla geçici hız koşullarında çalışan SMSM'lerde sargı arızalarının güvenilir bir teşhisini yapmak için önerilen metodolojinin uygunluğunu doğrulamışlardır.

Saavedra ve ark. (2014), SMSM'de sargı arızalarının etkilerinin hem stator akımlarında hem de sıfır bileşen gerilim spektrumunda görülebilir olduğuyla ilgili bir çalışma yapmışlardır. Farklı stator sargı teknikleri için Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile analizler gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre stator akımlarının 3. harmoniği ve sıfır bileşen geriliminin 1. , 7. ve 9. harmoniklerinin arıza teşhisi için izlenebilir olduğu sonucuna varmışlardır.

Foster ve ark. (2015), SMSM'de yüksek dirençli sargı arızalarının teşhisi için bir teknik geliştirmişlerdir. Benzetim ve deney sonuçlarına göre arızanın d ve q eksenlerinde gerilim değişikliklerine yol açtığı tespit edilmiştir. Amaçlanan arıza teşhis tekniğinin SMSM sürücülerde ve sargı arızalarında kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Blanquez ve ark. (2015), senkron makinelerde sargı arızasının teşhisi için Frekans Tepki Analizini (FTA) değerlendirmişlerdir. Durağan halde ve farklı hızlarda birçok test gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde faz faz ve faz toprak arızaları sağlam durumla karşılaştırılmıştır. Eşdeğer sargı empedansından dolayı durağan ve dönen halde alan sargılarının frekans tepkilerinin farklı olduğu görülmüştür. FTA test sonuçlarında faz-faz ve faz toprak arızalarının önemli bir etkiye sahip olduğu ve bu yüzden hem durağan hem de dinamik çalışma şartlarında sağlam durumla karşılaştırılarak arıza teşhisinin yapılabildiği sonucuna ulaşmışlardır.

Moosavi ve ark. (2015), SMSM stator sargılarında sargı arızası üzerine çalışmışlardır. Farklı arıza seviyelerinin teşhisi ve sınıflandırılması için çok katmanlı bir YSA kullanılmıştır. SEY ile yapılan analiz sonuçlarının deneysel sonuçları doğrular nitelikte olduğunu görmüşlerdir. Motor akım işaretlerinin HFD ile analizi yapılmış 3. harmonikte arıza teşhisi yapılabilmektedir. Fakat doğrusal olmayan durumlar için HFD yeterli olmamış, amaçlanan çok katmanlı YSA ile 13 farklı seviyedeki arızanın teşhisi yapılabilmektedir.

Gu (2016), sargı arızalı bir SMSM tasarlamak için SEY'e dayanan benzetim ve deneysel ölçümler gerçekleştirmiştir. Paralel ve seri sargı bağlantılı olarak iki şekilde tasarlanan modellerde farklı hızlarda ters ve doğru eşdeğer gerilimleri, üç faz gerilimleri ve kısa devre direnç akımları amaçlanan model, ölçümler ve SEY benzetimi ile incelenmiş ve arıza teşhisi yapılmıştır. Aynı çalışma hızında ve aynı arıza şiddetinde kısa devre direncinin paralel sargı bağlantılı modelde seri bağlantılı modelden daha büyük olduğu görülmüştür.

Qian ve ark. (2016), çok telli sargılara sahip SMSM'de geçici ve sürekli durumlarda arıza sonrası başarımlarının incelenmesine izin veren analitik bir model geliştirmiş ayrıca farklı arıza modlarını da araştırmıştır. İlk olarak çok telli sargılarda yalıtımın bozulmasından kaynaklanan arıza kiplerinin analizi gerçekleştirilmiştir. İç sarım arızalarının farklı kiplerde modellenmesi için olası arıza etkilerine göre elektromanyetik tork ve faz gerilimleri türetilmiştir. Ayrıca çok telli sargılı SMSM'nin tek telli sargılı SMSM ile karşılaştırıldığında arıza teşhisi için faz gerilimleri veya tork dalgalanmaları gibi genel karakteristik özelliklerin çok belirgin olmadığı görülmüştür. Hem SEY ile gerçekleştirilen analiz sonuçları hem de deneysel analiz sonuçları önerilen arıza davranışlarını tahmin etme modelinin doğruluğunu ve geçerliliğini kanıtlamıştır.

Obeid ve ark. (2017), SMSM'de sargı arızasının izlenmesi ve dalgacık dönüşümüyle tespiti için çalışma yapmıştır. İncelenen arızanın stator akımlarında ve referans gerilimde belirgin bozulmalara yol açtığı görülmüştür. Bu belirgin bozulmaların tanımlanması ve arızalı sarımı içeren fazın yerini belirleme üzerine arıza izleme yöntemi geliştirilmiştir. Kuramsal ve deneysel çalışmalar bu yöntemin sadece arızanın tanımlanması ve yerinin belirlenmesi için değil aynı zamanda gürültü işaret oranının iyileştirilmesinde de etkinliğini ispatlamıştır.

Maraaba ve ark. (2017), asimetrik stator sargılı bir ŞKSMSM için genelleştirilmiş bir dq modeli sunmuştur. Modelin uygulama ve benzetimi Matlab/Simulink yazılımıyla, asimetriye bağlı arıza uygulaması ise SEY'e dayanan JMAG yazılımıyla elde edilmiştir. Asimetrik stator sargı şartları altında uyumlu sonuç veren Matlab ve JMAG benzetimlerine göre motorun tork karakteristiklerinde salınımlar açıkça görülmüştür. Buna ek olarak, stator fazları arasındaki asimetri nedeniyle sürekli durumda yüksek tork salınımları gözlemlenmiştir. Sonuç olarak ŞKSMSM'de asimetriye dayanan stator sargı

arızalarının tespiti için tork frekans spektrumunu araştırmanın doğru bir yol olduğu ispatlanmıştır.

Foncesa ve ark. (2018), ŞKSMSM’de stator arızalarının oluşumunu incelemiştir. Çevrim içi arıza tespiti için Matlab/Simulink’te dinamik bir model geliştirmiştir. Bu model ile ŞKSMSM’nin stator sargılarında sarım-sarım arızalarının tespiti için Genişletilmiş Park Vektör Yaklaşımı uygulaması araştırılmıştır. Bu yaklaşımı doğrulamak için benzetim sonuçları ve motor deney başarımları karşılaştırılmıştır. Sağlam ve arızalı olarak test edilen motor deneyleri ve benzetimden elde edilen akım ve gerilim grafiklerinde düşük frekanslı harmonik bozulmalar görülmüştür. Kaynak frekansı f iken Park Vektör stator akımlarının $2f$ değerinde harmonik bileşeni olarak tanımlanan bir arıza şiddeti faktörünün, arıza seviyesi için iyi bir gösterge olduğu kanıtlanmıştır.

Maraaba ve ark. (2018), üç fazlı bir sargı arızalı ŞKSMSM'nin matematiksel modellemesini geliştirmiştir. MATLAB/Simulink kullanılarak benzetimi ve 1 HP ŞKSMSM kullanılarak deneysel olarak testlerini gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilen matematiksel modelin doğruluğunu, MATLAB benzetimi ve deneysel testlerden elde edilen sonuçların farklı yüklemeye seviyelerinde farklı sayıda kısa devre edilen sarımlar ile karşılaştırarak doğrulamışlardır. Ayrıca, arıza şiddeti ve arıza direncinin arıza akımına etkisini incelemiştir. Bu iki değişkenin arıza akımının büyüklüğünü belirlediğini ifade etmişlerdir. Ek olarak, benzetim ve deneysel sonuçlar, sarımlar arası arızanın, arızayı içeren fazdaki akımı (büyüklük ve zaman tepki profili) etkileyeceğini göstermiştir. Aynı arıza direncinde kısa devre sayısı arttıkça etki de artmaktadır. Ek olarak, sonuçlar sarım arızasının sabit durumda hız tepkisinde harmonikler göstermektedir. Bu nedenle, geliştirilen modelin, bir ŞKSMSM'deki stator sarım arızasının olasılığını ve yerini tespit etmek için kullanılabilir olduğunu göstermişlerdir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde ŞKSMSM’de sargı arızası tespiti üzerine çok fazla çalışma yapılmadığı görülmüştür. Bu motorla benzer stator yapısına sahip olan ASM ve SMSM gibi motorlarda günümüze kadar sargı arızası tespiti üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda araştırmacılar daha çok kararlı durum için motor akım sinyallerinin zaman ve frekans boyutunda analiziyle, dinamik durum için ise zaman-frekans boyutunda sinyal analiziyle arıza tespiti çalışmalarına yoğunlaşmıştır. Bu tez

çalışmasında motorun hem kararlı hem de dinamik durum analizleri yapılmıştır. Motor akım sinyallerinin zaman-frekans boyutunda analizi ile sargı arızası tespiti yapılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

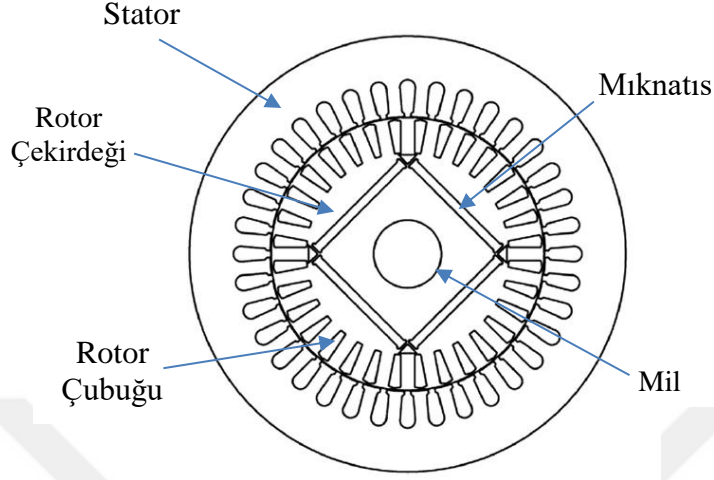
3.1. Şebeke Kalkışlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar

Gelecekte enerji sektöründe sıkıntı yaşamamıza sebep olacak çevresel sorunlar, enerji tasarrufu programlarına daha fazla odaklanmamız için ciddi bir sebep oluşturmaktadır. Bu sıkıntıları çözmek için en etkili yol ise dünyada elektrik tüketiminde en büyük paya sahip elektrik motorlarının verimliliğini geliştirmektir. Şimdiye kadar elektrik motorları içerisinde ASM'ler gerek miktarları gerekse toplam güç verimlilikleri bakımından en büyük bölümü oluşturmaktaydı. Fakat gün geçtikçe daha verimli motor tipleri koşut olarak ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu seçeneklerden biri olan SMSM'ler büyüyen pazar payıyla güçlü bir aday olarak araştırmaların konusu olmuştur (Isfahani ve ark., 2009).

İndüksiyon motorlarına koşut bir çözüm olarak SMSM'lerin geliştirilmesinde, son yıllarda sürekli mıknatısların fiyatlarındaki düşüş de önemli bir etken olmuştur. Bu motorlar kalkış için invertörlere ihtiyaç duyarlar. Fakat invertörler elektrikli motor uygulamalarının %70'inden fazlasını oluşturan fan, pompa ve kompresör gibi sabit hız uygulamaları için ekonomik değildir. 1955 yılında bu sorunun üstesinden gelmek için ŞKSMSM olarak adlandırılacak kafes yapısı eklenmiş SMSM'ler geliştirilmiştir (Merrill, 1955). Ancak geçmişte yüksek enerjili mıknatısların eksikliği ve daha sonra mıknatısların fiyatları ŞKSMSM'lerin yaygın kullanımına engel olmuştur. Son yıllarda yüksek enerjili sürekli mıknatısların makul fiyatlarıyla piyasaya girmesi ŞKSMSM'lerin yolunu açmıştır (Isfahani ve ark., 2009).

3.2 Şebeke Kalkışlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Yapısı

ŞKSMSM tek veya çok fazlı bir stator, elektrik iletimini sağlayan sincap kafesi ve sürekli mıknatıs kutuplarından oluşmaktadır. Şekil 3.1'de üç fazlı bir ŞKSMSM'nin kesiti görülmektedir.



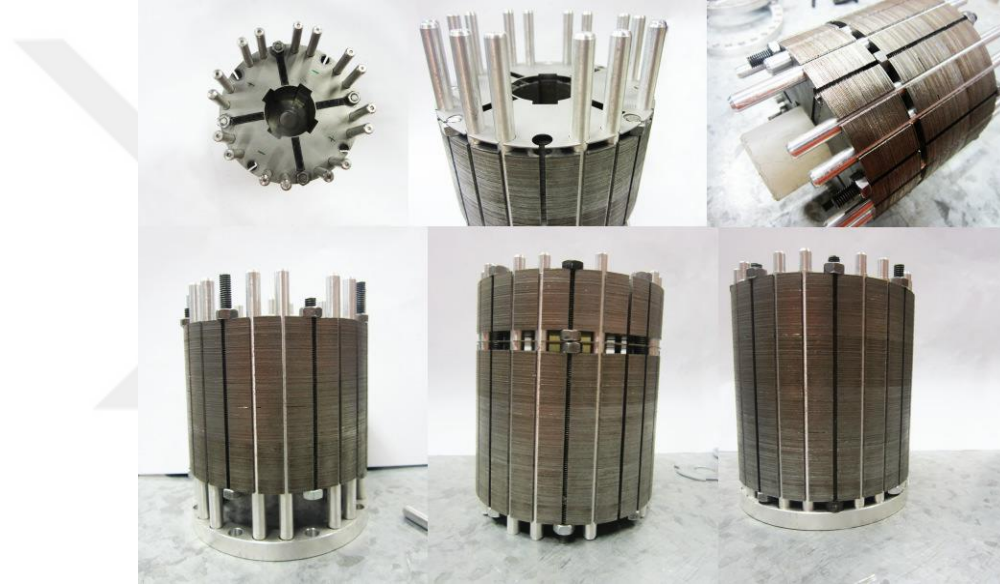
Şekil 3.1. Üç fazlı ŞKSMS motor kesiti (Isfahani ve ark., 2009)

Şekil 3.1’ de de görüldüğü üzere motor rotorunda, motorun sürekli haldeki başarımının artmasını sağlayan mıknatıslar ve motorun ASM gibi kalkış yapmasını sağlayan rotor kafes yapısı bulunmaktadır. Kafes yapısı kalkış esnasında sürekli mıknatısların oluşturduğu karşı torku aşabilmek için yüksek derinliğe sahip bir yapıdadır. Rotorda ayrıca akı bariyerleri bulunmaktadır. Bunların görevi ise mıknatısın ürettiği akının kendi üzerinden kısa devre olmasını engellemektir (Rahman ve ark., 1990; Stephens ve ark., 1998). Şaft çapı ise rotor gövdesinde motor kutuplarının yeterli alana yerleşmesi için ASM’de olduğundan daha küçüktür. Motor, kafes torku ve mıknatıs torkunun bileşkesinin ortaya çıkardığı tork ile bir ASM olarak kalkış yapar. İvertör kullanmadan, doğrudan şebeke beslemeli senkron motorun kalkış yapabilmesi için rotoruna kafes yapısı eklenmiş ve ŞKSMSM yapısı elde edilmiştir (Isfahani ve ark., 2009). Motor hızı senkron motor hızı civarına ulaştığında bir senkronizasyon işlemi başlar ve motor işleyişi senkron olarak devam eder. Senkron durumda relüktans tork bileşeni ile senkron tork bileşeni rotorun hareket etmesini sağlar (Behbahanifard ve Sadoughi, 2015). Relüktans tork bileşeni mıknatıslar rotora gömülü ise oluşur, eğer mıknatıslar yüzeyde ise bu bileşen oluşmaz.

ŞKSMSM’ler basit yapıya sahiptir. Temel olarak durağan kısım stator ve hareketli kısım rotor olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır.

Stator, nüve ve sargılarından oluşmaktadır. Stator oluklarında bulunan sargılara uygulanan üç fazlı gerilim, statorda senkron hızda döner manyetik alan meydana getirerek rotorun dönüş hareketini oluşturur. Burada oluşan senkron hız alternatif akımın frekansı ile doğru orantılı iken, motorun kutup sayısı ile ters orantılıdır (Akar, 2005). Akan akımın manyetik devreyi tamamlamasını sağlayan yapı ise stator nüvesidir.

Rotor, motorun hareketini sağlayan mil torkunun üretildiği kısımdır. ŞKSMSM’de rotor yapısı, sincap kafesli ASM yapısına ilaveten motor mili üzerine yerleştirilen sürekli mıknatıslardan oluşmaktadır. Şekil 3.2’de ŞKSMSM Rotor kafes yapısı gösterilmiştir.

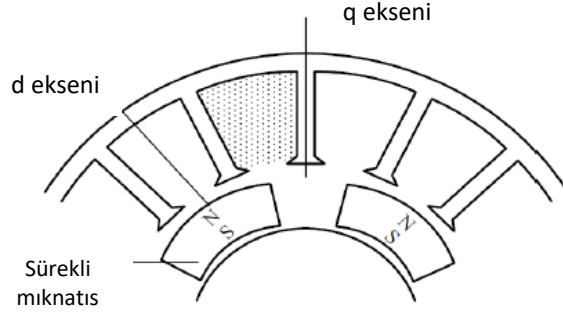


Şekil 3.2. ŞKSMSM Rotor kafes yapısı (Sorgdrager, 2014)

Sincap kafes tipi rotor çok basit ve çok dayanıklı bir yapıya sahiptir. Bu tür rotorlar üzerinde paralel yuvaları olan lamine silindirik bir çekirdekten oluşur. Bu paralel yuvalar rotor iletkenlerini taşır. Rotor sac paketinin dış yüzüne yakın açılan oluklar içine pres dökümlerle eritilmiş alüminyum veya bakırdan çubuklar yerleştirilir. Çubuklara uygun delikler açılmış iki bakır veya pirinç halka, rotorun iki tarafından çıkan çubuklara takılır. Sert lehim veya kaynakla çubuklar halkalara iyice tutturulur. Böylece rotor çubukları iki taraftan kısa devre edilmiş olur ve rotor yapısı bir sincap kafesine benzemektedir ve bu şekilde adlandırılmaktadır. Rotor oluk sayısı stator oluk sayısına eşit olduğunda motor kalkınmaz. Rotor oluk sayısı stator oluk sayısının %70-85’i veya %115-120’si olmalıdır.

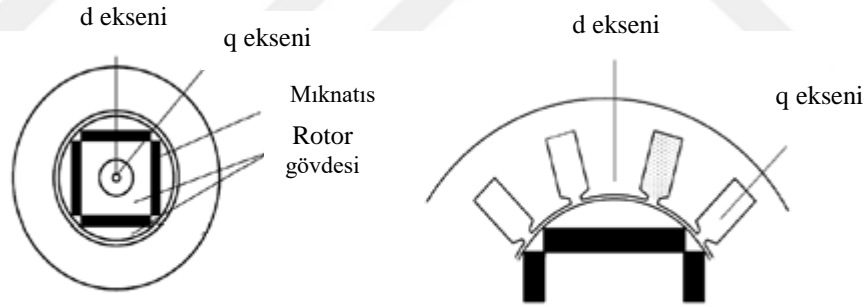
Manyetik sesleri azaltmak ve iyi kalkınma momenti elde etmek için rotor olukları mile paralel olarak değil meyilli olarak açılır. Rotor yuvaları rotorun kilitleme eğilimini azaltmak, stator ile rotor arasında etkili dönüşüm oranını arttırmak ve rotor iletkeninin artan uzunluğuna uygun şekilde, rotor direnci arttırmak amacıyla biraz çarpık yapıdadır (Anonim, 2014; Çevik, 2016).

Sürekli mıknatıslar hava aralığında manyetik alanı oluşturabilmek için N-S kutuplarını oluşturacak biçimde sabitlenir. Bunu sağlamak için farklı şekilde ve birçok türde sabit mıknatıs mevcuttur. Ancak NdBF_e (Neodyum - Boron-Demir) türü mıknatıslar doğal mıknatısiyetinin ve enerjisinin daha fazla olması sebebiyle AlNiCo (Aliminyum-Nikel-Kobalt) ve SmCo (Samaryum-Kobalt) türü mıknatıslara göre daha sık kullanılmaktadır. ŞKSMSM'ler rotorlarında bulunan mıknatısların konumlarına göre farklı tiplerde tasarlanabilmektedir. Mıknatıslar temel anlamda rotora gömülü ya da rotor yüzeyine yerleştirilmiş olarak konumlanmalarına göre ikiye ayrılırlar. Rotora gömülü mıknatıs yapıları ise radyal ve dairesel gömülü olarak ifade edilmektedir. Şekil 3.3'de gösterilen rotor yapısında mıknatıslar rotor yüzeyine yerleştirilmiştir. Bu tasarımda maliyet düşük ve üretim kolaydır. Ancak rotor hava aralığı etkisi ve rotor direnci yüksektir. Tasarım, yüksek titreşimler oluşturması ve mıknatısların yüzeyden kopma riski gibi mahsurları bulunduğundan bu tip rotor yapıları düşük hız gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Rotor gövdesine gömülü mıknatıs yapıları mekanik sağlamlık, düşük ses ve titreşim, düşük kısa devre akım seviyesi ve yüksek verimlilik gibi faydalara sahiptir. Buna karşı rotor gövdesine oluklar açılıp mıknatısların yerleştirilmesi üretimin zorluğunu ve maliyetini artırmaktadır. Tasarım, merkezkaç kuvvetine karşı sağladığı yüksek dayanım sayesinde yüksek hız gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır (Eker, 2013; Kara, 2017).



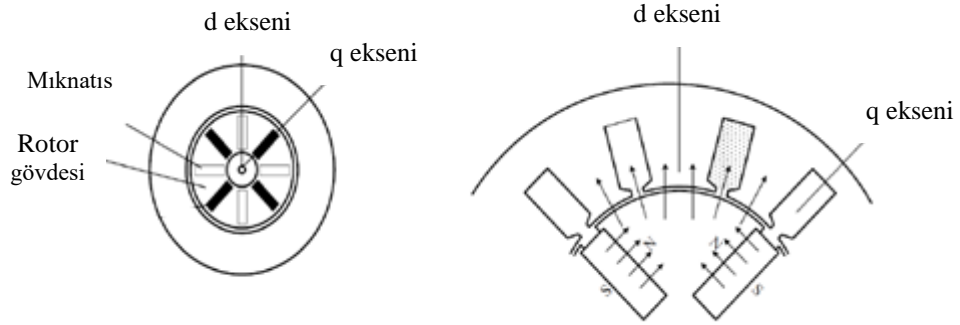
Şekil 3.3. SMSM'de Rotor yüzeyine yerleştirilmiş mıknatıs görünümü (Eker, 2013)

Şekil 3.4'de gösterilen rotor yapısında mıknatıslar rotor gövdesine radyal gömülü olarak yerleştirilmiştir. Bu rotor tasarımına sahip motorlarda hava aralığı küçük ve endüvi tepkisi düşük olmaktadır. Bu tasarıma sahip rotorlarda mıknatısların manyetik olarak kısa devre olmasını önlemek amacıyla rotor yüzeyi ile temas eden bölgeleri oldukça pahalı olan manyetik olmayan bir malzeme ile kaplanmaktadır. Yüksek hız gerektiren uygulamalar için tercih edilmektedir.



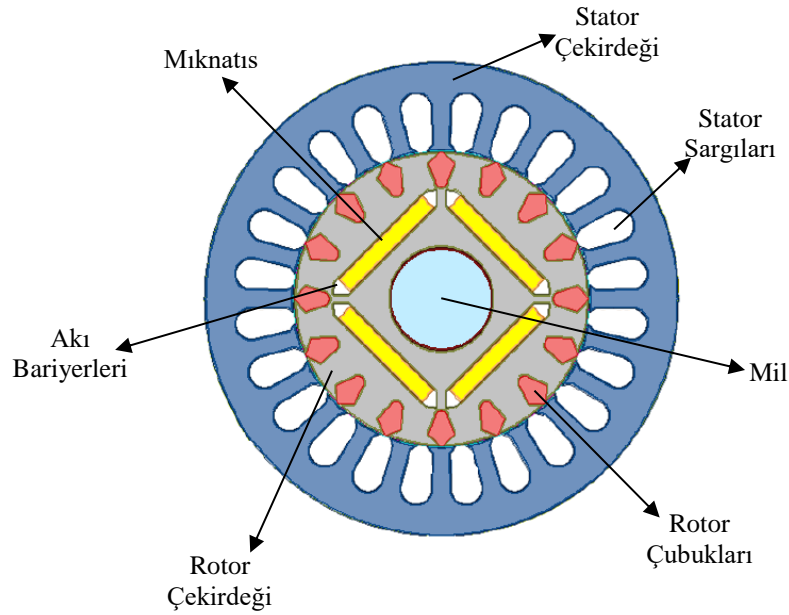
Şekil 3.4. SMSM'de Rotor gövdesine radyal yerleştirilmiş mıknatıs görünümü (Eker, 2013)

Şekil 3.5'de gösterilen rotor yapısında mıknatıslar rotor gövdesine dairesel gömülü olarak yerleştirilmiştir. Bu rotor tasarımına sahip motorlarda mıknatıslar yarıçap doğrultusunda yerleştirilmektedir. Relüktansların enine ve boyuna eksen boyunca farklı olması, makinaların çalışma ve denetim özellikleri üzerinde etkilidir. Bu tasarımın mahsuru hava aralığının diğer tasarımlara oranla daha büyük olmasıdır. Yüksek hız gerektiren uygulamalar için tercih edilmektedir (Eker, 2013).



Şekil 3.5. SMSM’de Rotora dairesel yerleştirilmiş mıknatıs görünümü (Eker, 2013)

Rotorda son olarak Şekil 3.6’da gösterilen akı bariyerleri bulunmaktadır. Bunlar mıknatısın ürettiği akının kendi üzerinden kısa devre olmasını engellemek amacıyla mıknatısların arasına yerleştirilen manyetik olmayan yapılardır. Mıknatıslarda oluşan akının kendisi veya başka mıknatıs üzerinden kısa devre olması kaçak akı miktarını artıracaktır. Akı bariyeri bulunmaması durumunda akı hava aralığına ulaşamayacak ve devreyi tamamlayamayacaktır. Bu durum motor veriminin düşmesine sebep olacaktır. Akının kısa devre olmasını engellemek için farklı bir seçenek olarak da rotor olukları daha derin tercih edilebilir (Kara, 2017).



Şekil 3.6. Akı bariyerlerinin gösterimi (Karami ve ark., 2014)

3.3 ŞKSMS Motorların Fayda ve Mahsurları

ŞKSMSM'ler ASM'ye karşı üstün ve birçok istenilen özelliklere sahiptir. Bu kısımda en önemli fayda ve bazı mahsurları ayrı ayrı yer verilmiştir.

Verimlilik: Son yıllarda süper verimli motorları değerlendiren yeni National Electrical Manufacturers Association (NEMA) standartlarını genişletmek için verimlilik gereksinimleri yükselmiştir (Gülçin, 2018). NEMA verilerine göre kayıpların neredeyse %20'si rotor kafesinde oluşmaktadır. İhmal edilebilir harmonikler dışında ŞKSMSM'de rotor kafes kayıpları oluşmaktadır. Toplam motor kayıplarının en büyük ikinci kısmını oluşturan stator bakır kayıpları, önemli derecede azalan mıknatıslanma akımı sayesinde azalmaktadır. Çizelge 1.'de farklı verimlilik standartları ve Çizelge 2.'de ŞKSMSM ve ASM'ye ait karşılaştırmalı verimlilik ve güç faktörü bilgilerine yer verilmiştir. Tablolar incelendiğinde ŞKSMSM teknolojisinin, International Electrotechnical Commission (IEC) tarafından son yıllarda daha yüksek enerji verimliliğine sahip motorlar için tanımladıkları NEMA Süper Premium verimlilik seviyesine International Efficiency Level 4 (IE4) geçtiği görülmektedir (Kara, 2017). Süper Premium verimlilik seviyesi IE4, Premium verimlilik (IE3) seviyesi ile karşılaştırıldığında %10-15 daha düşük kayıp oranına sahiptir (Feng ve ark., 2010).

Çizelge 1. Farklı verimlilik standartları (Isfahani ve ark., 2009)

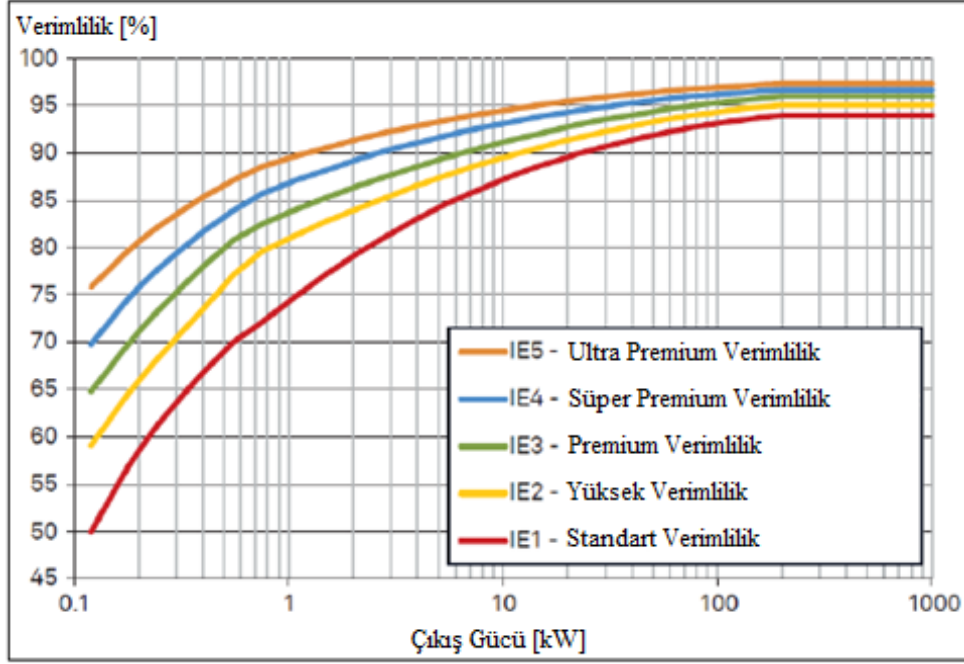
Motor Gücü (HP)	EPACT (1992)	IEEE 841 (2000)	NEMA Premium (2003)	NEMA Super Premium (2008)
1	82.5	84	85.5	87.6
2	84	85.5	86.5	88.5
3	87.5	88.5	89.5	91
5	87.5	88.5	89.5	91
7.5	89.5	90.2	91.7	92.9
10	89.5	90.2	91.7	92.9
25	92.4	93	93.6	94.5
50	93	93.6	94.5	95.3
75	94	94.5	95.4	96.1
100	94.5	95	95.4	96.1
200	95	95.4	96.2	96.7

Çizelge 2. ŞKSMSM ve ASM'ye ait verimlilik ve güç faktörü verileri (Isfahani ve ark., 2009)

Motor Gücü	Asenkron Motorlar		ŞKSMSM	
	Verimlilik	Güç Faktörü	Verimlilik	Güç Faktörü
0.8 HP	0.733	0.688	0.862	0.986
2 HP	0.809	0.77	0.892	0.895
5 HP	0.868	0.854	0.904	0.879
25 HP	0.936	0.88	0.957	0.92

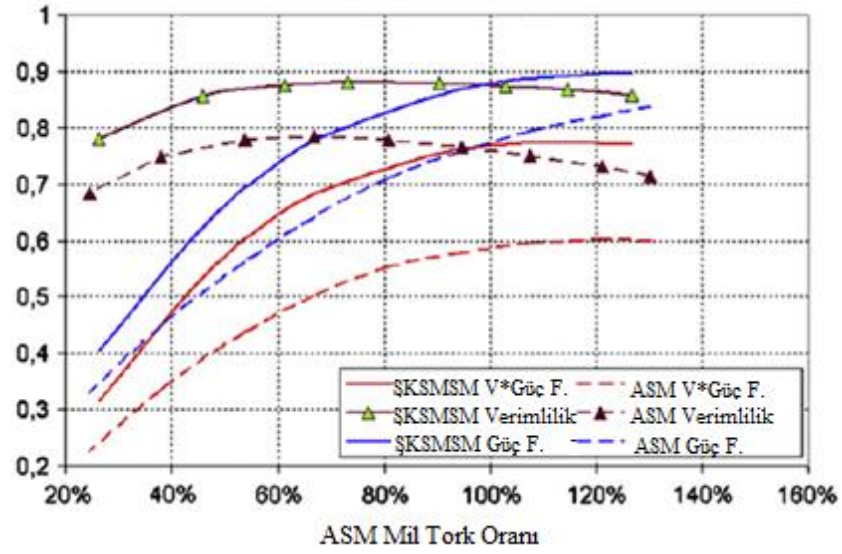
Mutize ve Wang (2013), soğutma fanı uygulamaları için ŞKSMSM ve İndüksiyon Motorlarına ait verimlilik ve güç faktörü karşılaştırmasını, her iki motorun sürekli ve geçici durum başarımları kapsamlı 2-D geçici SEY ile hesaplayarak yapmışlardır. Sürekli durumda ŞKSMSM'nin daha iyi güç faktörü ve verimliliğe sahip olduğu açık bir şekilde göstermişlerdir.

Mevcut verimlilik sınıfları için Şekil 3.7'de karşılaştırmalı bir grafik sunulmuştur. Standart olarak henüz yeni yeni yer alan International Efficiency Level 5 (IE5) verimlilik sınıfının seviyelerinin, bu standardın bir sonraki sürümüne dâhil edilmesi öngörülmektedir. Amaç IE5'in kaybını IE4'e göre yaklaşık% 20 azaltmaktır. IE5 için motor teknolojileri şu anda iyi gelişmemiş ve ticari olarak henüz mevcut değildir (Doppelbauer, M.)



Şekil 3.7. Motor verimlilik sınıfları (Emsa, 2014)

Güç faktörü: İndüksiyon motorları indüktif davranışlarından dolayı düşük güç faktörüne sahiptirler. Bu düşük güç faktörü akım akışını artırıp gerilimi düşürerek elektrik dağıtım sistemlerinde kapasitenin düşmesine neden olur. Bu da iletim kayıplarına, aşırı ısınmaya, stator sargı kayıplarının artmasına ve motor ile diğer donanımların erken arızalanmasına neden olmaktadır. ŞKSMSM'ler ASM'den daha yüksek güç faktörü ile çalışabilirler. Hatta birçok uygulama ve çalışma koşullarında güç faktörü 1'e yakındır. Şekil 3.8'de aynı güce sahip ASM ile üç fazlı ŞKSMSM verimlilik ve güç faktörü açısından karşılaştırılmıştır. ŞKSMSM'nin ASM'ye göre mutlak üstünlüğü görülmüştür.



Şekil 3.8. ŞKSMSM ile ASM için mil torkuna karşı verimlilik ve güç faktörü (Isfahani ve ark., 2009)

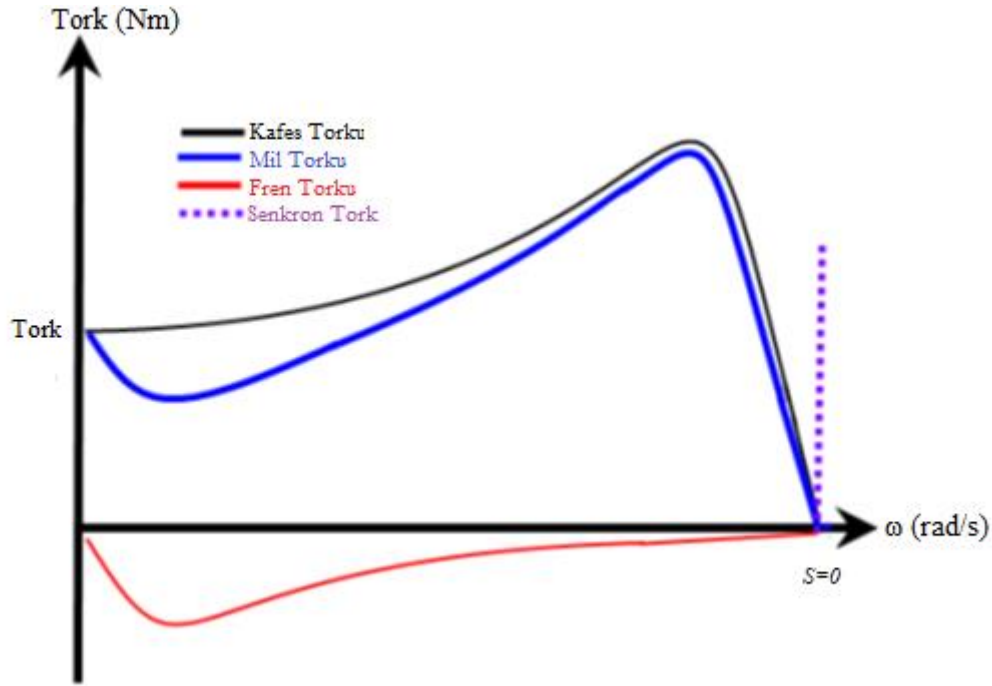
Tork ve Güç Yoğunluğu: Sürekli mıknatısların kullanımı nedeniyle ŞKSMSM'lerin güç yoğunluğu ve tork üretimi açısından diğer motorlardan daha üstün olduğu iyi bilinmektedir. ASM'de motor gücü artışı ile motor ağırlığı büyük bir seviyede artarken ŞKSMSM'de ise daha makul bir seviyede artmaktadır. Bu nedenle bu motorlar daha ufak olup entegre sistemlerde kullanılmak için uygun bulunmaktadır (Isfahani ve ark., 2009).

Rotor Sıcaklığı: Rotor sıcaklığı, motor hızı ve kayıplarından etkilenir. İndüksiyon motorlarında rotor kayıpları, demir kayıpları ve kafes kayıplarından meydana gelmektedir. ŞKSMSM'de senkron hız sayesinde kafes kayıpları kaybolmaktadır. Bu sebeple aynı çıkış gücüne sahip bu motorların rotor sıcaklığı ASM'dekinden %30 daha düşüktür. Aynı zamanda bu fayda sürekli mıknatısları da demagnetizasyondan korumaktadır. Ancak ŞKSMSM'nin kalkışı ASM'den daha yavaş olabileceğinden bu motorların tasarımları sırasında rotorun aşırı ısınması kontrol edilmelidir.

Maliyet: Motor maliyeti, malzeme ve üretim maliyetinin bütünüdür. ŞKSMSM'de sürekli mıknatısların kullanımı bu motorun diğerlerine göre daha yüksek fiyata sahip olmasının temel sebebidir. Fakat son yıllarda özellikle Çin'de artan mıknatıs üretimi, mıknatıs fiyatlarının önemli ölçüde düşmesini sağlamıştır. Yapılan bir araştırmaya göre, 1 HP ŞKSMSM'de kullanılan malzeme fiyatının karşılaştırılabilir bir ASM'den yaklaşık %20 daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Yol Alma ve Senkronizasyon: ŞKSMSM'nin yol alma ve senkronizasyon sorunu birçok araştırmacıyı endişelendiren bir konu olmuştur. Bu sorun mıknatıs kutupları tarafından

oluşturulan fren torkundan kaynaklanmaktadır. Oluşan bu tork, motor kalkışından senkron hıza ulaşıncaya kadar devam eder ve kafes torkuna karşı direnerek motorun çalıştırılmasında veya senkronizasyonunda başarısızlığa neden olabilir. Fren torku, bir ASM'ye göre daha yavaş bir kalkış ve hız eğrisinde bir aşmaya neden olmaktadır. Ayrıca, motorun kalkışında giriş gerilimi, mil eylemsizlik momenti ve kafes direnci de olumsuz etkiye sahiptir. Azalan giriş gerilimi, artan kafes direnci ve mil torku motorun daha yavaş kalkış yapmasına sebep olmaktadır.



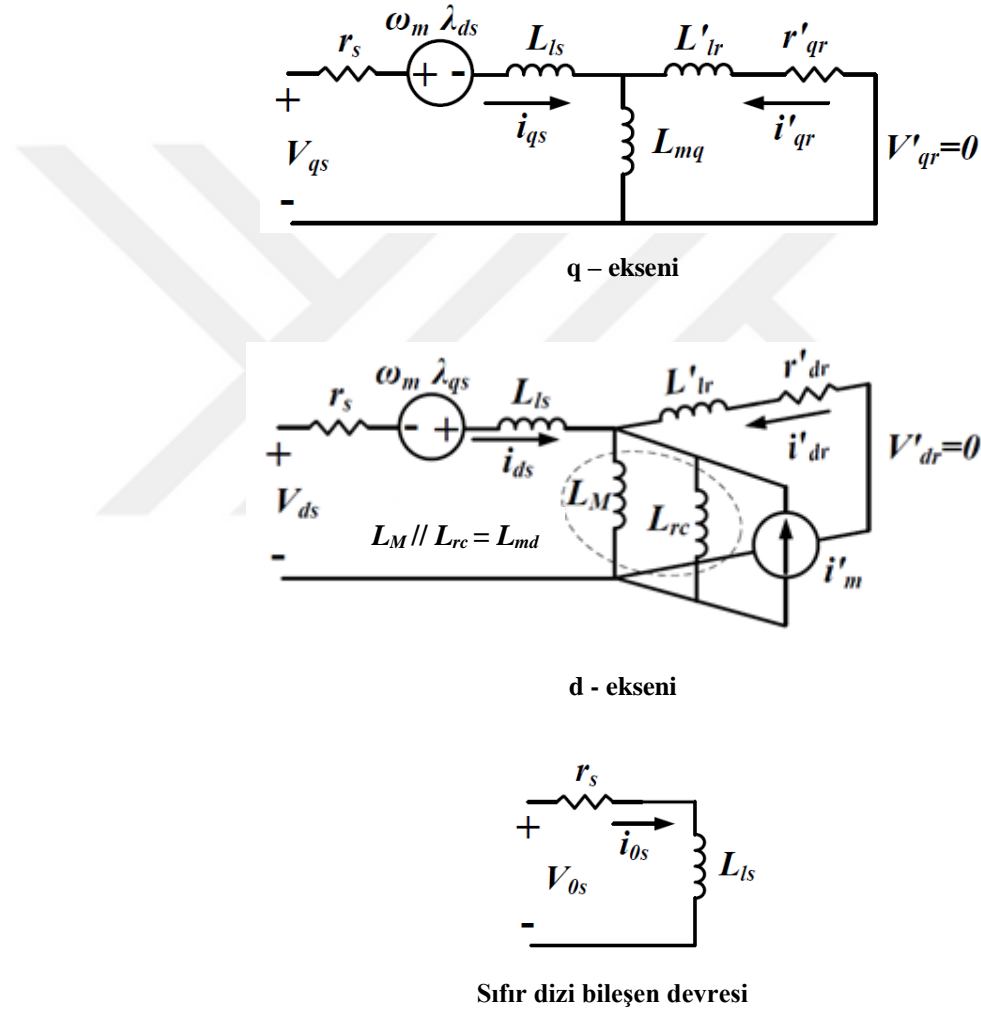
Şekil 3.9. ŞKSMSM teorik tork-hız eğrisi

Üretim ve Boyutlandırma: ŞKSMSM'de stator, ASM ile aynı yapıda fakat rotor, sürekli mıknatısları içerdiği için daha karmaşık bir yapıdadır. Rotor gövdesine sürekli mıknatısların yerleştirilmesi ekstra üretim yükü oluşturmaktadır. Bu motorların üretimindeki bir diğer sorun da ekonomik ve uygulanabilir bir motor olduğuna karar vermektir. İndüksiyon motorları birkaç hp'den MW'lara kadar üretilirken ŞKSMSM'ler üretim, ekonomik ve demagnetizasyonla ilgili engellerden dolayı sınırlı bir güç aralığında üretilmektedir. Sürekli mıknatıslı motorların araştırıldığı ilk zamanlarda ferrit mıknatıslı motorlar 25 HP'e kadar ekonomik bulunuyordu. Günümüzde yüksek enerjili yeni sürekli mıknatısların gelişimiyle 10 MW ve daha fazla güce sahip sürekli mıknatıslı motorlar üretilmektedir. Hitachi Ltd. yüksek verimli pompalarda ŞKSMSM'leri kullanmaktadır ve Toyo Denki Seizo K. K. genel amaçlı kullanılan bu motorları satmaktadır. Yani bu motorlar artık piyasadaki yerini almıştır (İsfahani ve ark., 2009).

3.4 Şebeke Kalkışlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Matematiksel Modeli

Matematiksel modeller ile sistemler daha somut bir şekilde tanımlanarak, sistemin gerçek fiziksel davranışlarının bilinmesi ve sistemde oluşabilecek herhangi bir arızanın tespiti sağlanmaktadır (Doğan, 2012).

Şekil 3.10 'da ŞKSMSM'ye ait eşdeğer devreler gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Üç fazlı ŞKSMSM eşdeğer devresi (Soreshjani ve ark., 2014)

Sürekli mıknatıslı, mıknatıslanma akımı i'_m ve mıknatıslanma indüktansı L_{md} olmak üzere eşdeğer mıknatıslanma akısı λ_m eşitlik 3.1 ile elde edilir.

$$\lambda_m = L_{md} i'_m \quad (3.1)$$

ŞKSMSM’de d-q ve 0 eksenleri için stator gerilimi v_{ds}^r , v_{qs}^r , v_{0s}^r , rotor gerilimi $v_{qr}^{r'}$ ve $v_{dr}^{r'}$, stator akısı λ_{qs}^r , λ_{ds}^r , λ_{0s}^r , rotor akısı $\lambda_{qr}^{r'}$, $\lambda_{dr}^{r'}$, $\lambda_{0r}^{r'}$, stator akımları i_{ds} , i_{qs} , i_{0s} rotor akımları, $i_{qr}^{r'}$, $i_{dr}^{r'}$, $i_{0r}^{r'}$, stator direnci r_s , rotor direnci $r_{qr}^{r'}$, $r_{dr}^{r'}$, mıknatıslanma indüktansı L_{mq} , L_{md} , rotor kaçak indüktansı $L_{lr}^{r'}$, stator kaçak indüktansı L_{ls} , açısal hız ω_m ve türev işlemi (p) ile ifade edilerek aşağıdaki denklemler elde edilmiştir (Soreshjani ve ark., 2014).

$$\begin{aligned} v_{ds}^r &= r_s i_{ds}^r - \omega_m \lambda_{qs}^r + p \lambda_{ds}^r \\ v_{qs}^r &= r_s i_{qs}^r + \omega_m \lambda_{ds}^r + p \lambda_{qs}^r \\ v_{0s}^r &= r_s i_{0s}^r + p \lambda_{0s}^r \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} v_{qr}^{r'} &= r_{qr}^{r'} i_{qr}^{r'} + p \lambda_{qr}^{r'} = 0 \\ v_{dr}^{r'} &= r_{dr}^{r'} i_{dr}^{r'} + p \lambda_{dr}^{r'} = 0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{qs}^r &= L_{ls} i_{qs}^r + L_{mq} (i_{qs}^r + i_{qr}^{r'}) \\ \lambda_{ds}^r &= L_{ls} i_{ds}^r + L_{md} (i_{ds}^r + i_{dr}^{r'}) + L_{md} i_m^{r'} \\ \lambda_{0s}^r &= L_{ls} i_{0s}^r \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{qr}^{r'} &= L_{lr}^{r'} i_{qr}^{r'} + L_{mq} (i_{qs}^r + i_{qr}^{r'}) \\ \lambda_{dr}^{r'} &= L_{lr}^{r'} i_{dr}^{r'} + L_{md} (i_{ds}^r + i_{dr}^{r'}) + L_{md} i_m^{r'} \\ \lambda_{0r}^{r'} &= L_{lr}^{r'} i_{0r}^{r'} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Matematiksel modelin ve eşdeğer devre parametrelerinin mıknatısın dahili ve yüzey montajlı tipleri için kullanılabilir olduğunu belirtmek gerekmektedir. Ayrıca motorun sürekli mıknatıslarında oluşan rotor eddy akım kayıpları, kalıcı mıknatısların (örneğin NdFeB kalıcı mıknatısı) omik direnç değerinin bakır direncinden 80 kat daha büyük olması sebebiyle ihmal edilmiştir (Soreshjani ve ark., 2014).

ŞKSMSM’ye ait mekanik denklemler eşitlik 3.6 ve 3.7’de verilmiştir. Burada (T_e) elektromanyetik torku, ω_m açısal hızı ve P ise kutup sayısını ifade etmektedir.

$$T_e = \frac{3P}{2} [L_{md} i_{dr}^r i_{qs}^r - L_{mq} i_{qr}^r i_{ds}^r + \lambda_m^r i_{qs}^r + (L_{md} - L_{mq}) i_{ds}^r i_{qs}^r]$$

$$T_e = T_{ind} + T_{exc} + T_{rel} \quad (3.6)$$

Elektromanyetik tork ifadesi üç bileşeni içerisinde barındırmaktadır. Bu bileşenler rotorda bulunan mıknatısların konumuna göre oluşabilen relüktans torku, sürekli mıknatıs sayesinde üretilen uyarım torku ve asenkron veya kafes torku olarak da adlandırılan bir indüksiyon torkudur.

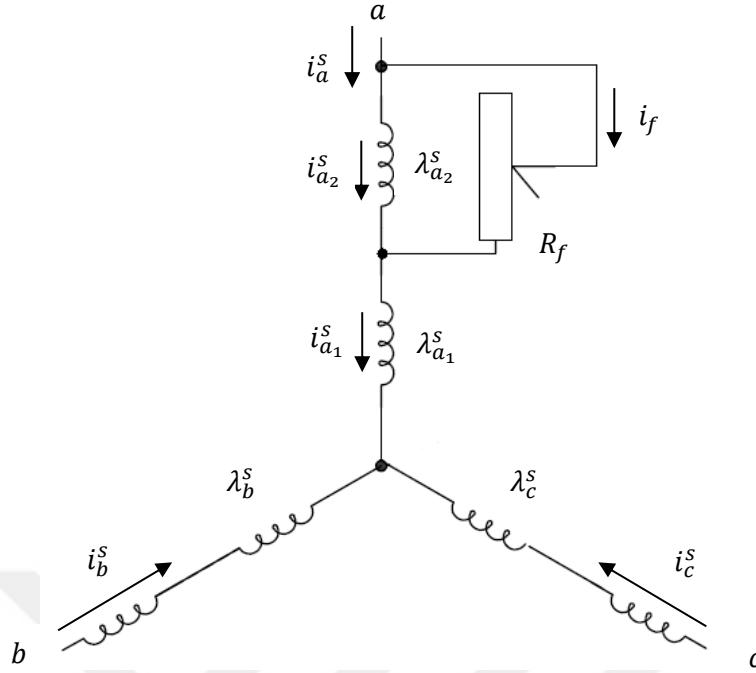
Sürekli mıknatıs akısı (λ'_m), direkt akı bağlantısına yerleştirildiğinde eşitlik 3.7'de verilen ifade SMSM'ler için de elde edilen eşitlik 3.6 ile tamamen aynı olmaktadır.

$$T_e = \frac{3P}{2} [\lambda_{ds}^r i_{qs}^r - \lambda_{qs}^r i_{ds}^r] \quad (3.7)$$

Bu ifadeler tork tahmininde de kullanılabilir (Soreshjani ve ark., 2014).

Stator Sargı Arızalı ŞKSMSM'nin abc Düzleminde Matematiksel Modeli

Bir önceki bölümde anlatılan ŞKSMSM'nin sağlam modeli iyi bilinmektedir. Bununla birlikte, literatürde stator sargı arızası için ŞKSMSM'nin modellenmesi üzerinde hiçbir çalışma yoktur. Şekil 3.11 faz-a'daki stator sargı arızası bulunan bir ŞKSMSM 'nin statorunu göstermektedir. Stator sargı arızası bulunan bir ŞKSMSM 'nin matematiksel modelini türetmek için, Kirchhoff kanunları Şekil 3.10'da kullanılmıştır. Ayrıca, manyetik doygunluğun ihmal edildiği, akı ve manyetik hareket kuvvetinin sinüzoidal olarak dağıldığı ve demir manyetik geçirgenliğinin sonsuz olduğu varsayılmıştır (Maraaba ve ark., 2018).



Şekil 3.11. a fazında sargı arızası bulunan ŞKSMSM statoru

Stator fazlarının sargı direncinin, faz başına sarım sayısı ile doğrudan orantılı olduğu, indüktansın, sarım kuramının öne sürdüğü gibi sarım sayısının karesiyle orantılı olduğu unutulmamalıdır. Ek olarak, Faraday'ın kanununa göre, stator fazlarını kalıcı mıknatıstan bağlayan akı, her fazdaki sarım sayısı ile orantılıdır. Bu kısımda, a fazında sargı arızası bulunan bir ŞKSMSM'nin matematiksel abc modeli elde edilmiştir. Faz a, iki kısma ayrılır: Şekil 3.11'de gösterildiği gibi, kısım-a1 (sağlam bölüm) ve kısım-a2 (arızalı bölüm), Kirchhoff'un gerilim yasasını kullanarak, gerilim denklemleri eşitlik 3.8'de ifade edilmiştir.

$$v_{a_1 a_2 bc}^s = R_{a_1 a_2 bc}^s i_{a_1 a_2 bc}^s + \frac{d\lambda_{a_1 a_2 bc}^s}{dt}$$

$$v_{abc}^r = R_{abc}^r i_{abc}^r + \frac{d\lambda_{abc}^r}{dt} \quad (3.8)$$

$R_{a_1 a_2 bc}^s$ stator için direnç matrisidir. Denklemler 3.9 ve 3.10 matris formunda eşitlik 3.8'i temsil etmektedir. Stator dört adet diferansiyel denklemlerle ifade edilirken, rotor aşağıdaki gibi üç diferansiyel denklemlerle temsil edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} v_{a_1}^s \\ v_{a_2}^s \\ v_{a_3}^s \\ v_{a_4}^s \end{bmatrix} = r_s \begin{bmatrix} 1 - \mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a_1}^s \\ i_{a_2}^s \\ i_b^s \\ i_c^s \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{a_1}^s \\ \lambda_{a_2}^s \\ \lambda_b^s \\ \lambda_c^s \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} v_a^r \\ v_b^r \\ v_c^r \end{bmatrix} = r_r \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^r \\ i_b^r \\ i_c^r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_a^r \\ \lambda_b^r \\ \lambda_c^r \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Şekil 3.11’de gösterildiği gibi arıza akımı $i_f = i_{a_1}^s - i_{a_2}^s = i_a^s - i_{a_2}^s$ ‘dir. Kısa devre yapılan sarımların oranı $\mu = \frac{N_{sh}}{N_s}$ ‘ dir. Burada N_{sh} kısa devre yapılan sarım sayısını, N_s ise stator faz başına sarım sayısını ifade etmektedir.

Eşitlik 3.9’un ilk iki sırasını ekleyerek ve terimleri yeniden düzenleyerek, makine gerilimi denklemleri 3.11 ve 3.12’ de gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} v_{abc}^s \\ v_{abc}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{abc}^s & 0 \\ 0 & R_{abc}^r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc}^s \\ i_{abc}^r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{abc}^s \\ \lambda_{abc}^r \end{bmatrix} + \mu \begin{bmatrix} A_1 \\ 0 \end{bmatrix} i_f \quad (3.11)$$

$$v_{a_2}^s = \mu r_s (i_a^s - i_f) + \frac{d\lambda_{a_2}^s}{dt} = R_f i_f \quad (3.12)$$

$$R_{abc}^s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}, \quad R_{abc}^r = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Burada R_f arıza oluşturmak için stator sargısına paralel olarak bağlanan ayarlı direnci, r_s stator faz direnci ve r_r rotor faz direncidir. Ayrıca $v_a^s = v_{a_1}^s + v_{a_2}^s$ ve $A_1 = [-r_s \ 0 \ 0]^T$ dir. Denklem 3.12 kısa devrelerdeki gerilimi temsil eder. R_{abc}^s ve R_{abc}^r sırasıyla sağlam koşullar altında stator ve rotor direnci matrisleridir. Üç faz arızalı ŞKSMSM’nin şekil 3.10’da gösterilen akı-akım ilişkisi denklemleri 3.14 ’deki gibi yazılabilir.

$$\lambda_{a_1 a_2 bc}^s = L_{a_1 a_2 bc}^{ss} i_{a_1 a_2 bc}^s + L_{a_1 a_2 bc}^{sr} i_{a_1 a_2 bc}^r + \lambda_{m a_1 a_2 bc}^s$$

$$\lambda_{abc}^r = L_{a_1 a_2 bc}^{rs} i_{a_1 a_2 bc}^s + L_{abc}^{rr} i_{abc}^r + \lambda_{m abc}^r \quad (3.14)$$

Burada $\lambda_{a_1 a_2 bc}^s$ ve λ_{abc}^r akı bağlantı vektörlerini, $L_{a_1 a_2 bc}^{ss}$ ve L_{abc}^r sırasıyla sargı arızalı stator ve rotor devreleri için indüktans matrislerini ifade etmektedir. $L_{a_1 a_2 bc}^{sr}$ ve $L_{a_1 a_2 bc}^{rs}$ sargı arızalı motor için stator ve rotor arasındaki karşılıklı indüktans matrislerini ifade etmektedir. $\lambda_{m a_1 a_2 bc}^s$ ise kalıcı mıknatıslardan dolayı stator üzerinde oluşan bağlantı akısıdır. Eşitlik 3.14 matrisel biçimde düzenlenerek Eşitlikler 3.15 ve 3.18 oluşturulmuştur.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{a_1}^s \\ \lambda_{a_2}^s \\ \lambda_b^s \\ \lambda_c^s \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} i_{a_1}^s \\ i_{a_2}^s \\ i_b^s \\ i_c^s \end{bmatrix} + M_2 \begin{bmatrix} i_a^r \\ i_b^r \\ i_c^r \end{bmatrix} + \lambda_m \begin{bmatrix} m \sin \theta_r \\ \mu \sin \theta_r \\ \sin(\theta_r - 120^\circ) \\ \sin(\theta_r + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} m^2 L_{asas} & \mu m (L_{asas} - L_{ls}) & m L_{asbs} & m L_{ascs} \\ \mu m (L_{asas} - L_{ls}) & \mu^2 L_{asas} & \mu L_{asbs} & \mu L_{ascs} \\ m L_{bsas} & \mu L_{bsas} & L_{bsbs} & L_{bscs} \\ m L_{csas} & \mu L_{csas} & L_{csbs} & L_{cscs} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} m L_{asar} & m L_{asbr} & m L_{ascr} \\ \mu L_{asar} & \mu L_{asbr} & \mu L_{ascr} \\ L_{bsar} & L_{bsbr} & L_{bscr} \\ L_{csar} & L_{csbr} & L_{cscr} \end{bmatrix}, m = (1 - \mu) \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_a^r \\ \lambda_b^r \\ \lambda_c^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m L_{asar} & \mu L_{asar} & L_{bsar} & L_{csar} \\ m L_{asbr} & \mu L_{asbr} & L_{bsbr} & L_{csbr} \\ m L_{ascr} & \mu L_{ascr} & L_{bscr} & L_{cscr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a_1}^s \\ i_{a_2}^s \\ i_b^s \\ i_c^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{arar} & L_{arbr} & L_{arcr} \\ L_{brar} & L_{brbr} & L_{brcr} \\ L_{crar} & L_{crbr} & L_{cr cr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^r \\ i_b^r \\ i_c^r \end{bmatrix} +$$

$$\lambda_m \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}^T \quad (3.18)$$

Eşitlik 3.15'in ilk iki satırını ekleyerek ve $\lambda_a^s = \lambda_{a_1}^s + \lambda_{a_2}^s$ eşitliğinden de faydalanarak makinenin sağlam ve arızalı durumları için eşitlik 3.19 oluşturulmuştur.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc}^s \\ \lambda_{abc}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{abc}^{ss} & L_{abc}^{sr} \\ L_{abc}^{rs} & L_{abc}^{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc}^s \\ i_{abc}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{mabc}^s \\ \lambda_{mabc}^r \end{bmatrix} + \mu \begin{bmatrix} A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} i_f \quad (3.19)$$

$$\lambda_{a_2}^s = -\mu A_2^T i_{abc}^s - \mu A_3^T i_{abc}^r - \mu^2 L_{asas} i_f + \mu \lambda_m \sin \theta_r \quad (3.20)$$

$$L_{abc}^{ss} = \begin{bmatrix} L_{asas} & L_{asbs} & L_{ascs} \\ L_{asbs} & L_{bsbs} & L_{csbs} \\ L_{ascs} & L_{bscs} & L_{cscs} \end{bmatrix}, L_{abc}^{rr} = \begin{bmatrix} L_{arar} & L_{arbr} & L_{arcr} \\ L_{arbr} & L_{brbr} & L_{crbr} \\ L_{arcr} & L_{brcr} & L_{crcr} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$L_{abc}^{sr} = \begin{bmatrix} L_{asar} & L_{asbr} & L_{ascr} \\ L_{asbr} & L_{bsbr} & L_{csbr} \\ L_{ascr} & L_{bscr} & L_{cscr} \end{bmatrix} \quad L_{abc}^{rs} = (L_{abc}^{sr})^T \quad (3.22)$$

Burada $A_2 = -[L_{asas} \quad L_{asbs} \quad L_{ascs}]^T$, $A_3 = -[L_{asar} \quad L_{asbr} \quad L_{ascr}]^T$, L_{abc}^{ss} ve L_{abc}^{rr} sırasıyla stator ve rotor devreleri için indüktans matrisleridir. L_{abc}^{sr} ve L_{abc}^{rs} stator ve rotor arasındaki karşılıklı indüktans matrisleridir. λ_m sürekli mıknatıslar tarafından oluşturulan manyetik akının büyüklüğü ve θ_r rotorun açısıdır. Stator sargı arızası altında motor gerilim ve akı-akım ilişkilerinde yapılan değişikliklere ek olarak, elektromanyetik tork formülünün de değiştirilmesi gerekmektedir. Bir ŞKSMSM tarafından üretilen elektromanyetik tork, T_{em} eşitlik 3.23'de gösterildiği gibi manyetik sistemin ortak enerjisi W_c 'den elde edilebilir.

$$T_{em} = \frac{P}{2} \frac{\partial W_c}{\partial \theta_r} \quad (3.23)$$

$$W_c = \frac{1}{2} i_{a_1 a_2 bc}^{sT} L_{a_1 a_2 bc}^s i_{a_1 a_2 bc}^s + i_{a_1 a_2 bc}^{sT} L_{a_1 a_2 bc}^{sr} i_{abc}^r + \frac{1}{2} i_{abc}^{rT} L_{abc}^r i_{abc}^r + i_{a_1 a_2 bc}^{sT} \lambda_{a_1 a_2 bc} + W_{PM} \quad (3.24)$$

$$T_{em} = \frac{P}{2} \left[\frac{1}{2} i_{a_1 a_2 bc}^{sT} \frac{\partial L_{a_1 a_2 bc}^s}{\partial \theta_r} i_{a_1 a_2 bc}^s + i_{a_1 a_2 bc}^{sT} \frac{\partial L_{a_1 a_2 bc}^{sr}}{\partial \theta_r} i_{abc}^r + \frac{1}{2} i_{abc}^{rT} \frac{\partial L_{abc}^r}{\partial \theta_r} i_{abc}^r + i_{a_1 a_2 bc}^{sT} \frac{\partial \lambda_{a_1 a_2 bc}}{\partial \theta_r} \right] \quad (3.25)$$

Mekaniksel denklem eşitlik 3.26'daki gibi ifade edilebilir.

$$\omega_r(t) = \frac{P}{2J} \int (T_{em} + T_L - T_{fren}) dt \quad (3.26)$$

Burada T_{em} elektromanyetik torku, T_L yük torkunu, T_{fren} frenleme torkunu, J motor ataletini, r rotor hızını ve P kutup sayısını ifade etmektedir. Eşitlikler 3.11, 3.12, 3.19, 3.20, 3.25 ve 3.26 stator sargı arızası altındaki ŞKSMSM'nin abc matematiksel modelini temsil etmektedir.

Stator Sargı Arızalı ŞKSMSM'nin dq0 Düzleminde Matematiksel Modeli

Rotor referans eksenine bir Park dönüşümü, stator sargı arızası altındaki ABC-ŞKSMSM modelini dq0 modeline dönüştürmek için kullanılır. Park dönüşümü, tork denkleminde ek olarak gerilim ve akı-akım ilişkisi denklemlerini dönüştürmek için kullanılır. Stator ve rotorun nihai gerilim denklemleri eşitlik 3.27 'de gösterildiği gibidir.

$$\begin{bmatrix} v_q^s \\ v_d^s \\ v_0^s \\ v_q^{r'} \\ v_d^{r'} \\ v_0^{r'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{rq}' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{rd}' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{r0}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \\ i_0^s \\ i_q^{r'} \\ i_d^{r'} \\ i_0^{r'} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_r \lambda_d^s \\ -\omega_r \lambda_q^s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 + \left[\frac{d\lambda_q^s}{dt} \quad \frac{d\lambda_d^s}{dt} \quad \frac{d\lambda_0^s}{dt} \quad \frac{d\lambda_q^{r'}}{dt} \quad \frac{d\lambda_d^{r'}}{dt} \quad \frac{d\lambda_0^{r'}}{dt} \right]^T \\
 + \left[-\frac{2}{3} \mu r_s i_f \cos \theta_r \quad -\frac{2}{3} \mu r_s i_f \sin \theta_r \quad -\frac{1}{3} \mu r_s i_f \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right]^T \quad (3.27)$$

Arızalı sargılar için final gerilim denklemleri eşitlik 3.28 ile verilmiştir.

$$v_{a_2}^s = \mu r_s (i_q^s \cos \theta_r + i_d^s \sin \theta_r + i_0^s - i_f) + \frac{d\lambda_{a_2}^s}{dt} = R_f i_f \quad (3.28)$$

Stator ve rotorun final akı-akım ilişkileri eşitlik 3.29 'da gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \lambda_q^s \\ \lambda_d^s \\ \lambda_0^s \\ \lambda_q^{r'} \\ \lambda_d^{r'} \\ \lambda_0^{r'} \end{bmatrix} = M_3 \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \\ i_0^s \\ i_q^{r'} \\ i_d^{r'} \\ i_0^{r'} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda_m' \\ 0 \\ 0 \\ \lambda_m' \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mu \left(L_{\Delta m} + L_m + \left(\frac{2}{3} \right) L_{ls} \right) \cos \theta_r \\ \mu \left(L_m - L_{\Delta m} + \left(\frac{2}{3} \right) L_{ls} \right) \sin \theta_r \\ \mu \left(\frac{1}{3} \right) L_{ls} \\ \mu \left(L_{\Delta m} + L_m \right) \cos \theta_r \\ \mu \left(L_m - L_{\Delta m} \right) \sin \theta_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{mq} & 0 & 0 & L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_{md} & 0 & 0 & L_{22}^{sr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_{mq} & 0 & 0 & L'_{lrq} + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 & 0 & L'_{lrd} + L_{md} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr0} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Sargı arızası final akı-akım ilişkisi denklemi eşitlik 3.30 ile aşağıda verilmiştir.

$$\lambda_{a_2}^s = x_1 i_q^s + x_2 i_d^s + x_3 i_0^s + x_{11} i_q^{r'} + x_{12} i_d^{r'} + x_{13} i_0^{r'} - \mu^2 L_{asas} i_f + \mu \lambda_m' \sin \theta_r$$

$$[x_1 \quad x_2 \quad x_3] = \left[\mu \left(\frac{3}{2} k_1 + L_{ls} \right) \cos \theta_r \quad \mu \left(\frac{3}{2} k_2 + L_{ls} \right) \sin \theta_r \quad \mu L_{ls} \right]$$

$$[x_{11} \quad x_{12} \quad x_{13}] = \left[\mu \left(\frac{3}{2} k_1 \right) \cos \theta_r \quad \mu \left(\frac{3}{2} k_2 \right) \sin \theta_r \quad 0 \right]$$

$$k_1 = L_{\Delta m} + L_m \quad , \quad k_2 = L_m - L_{\Delta m} \quad (3.30)$$

Burada v_q^s , v_d^s ve v_0^s stator $dq0$ gerilimlerini, $v_q^{r'}$, $v_d^{r'}$ ve $v_0^{r'}$ stator tarafına göre akan $dq0$ rotor gerilimlerini, i_q^s , i_d^s ve i_0^s stator $dq0$ akımlarını, $i_q^{r'}$, $i_d^{r'}$ ve $i_0^{r'}$ stator tarafına göre akan $dq0$ rotor akımlarını ve ω_r ise rotor açısal hızını ifade etmektedir. λ_q^s , λ_d^s ve λ_0^s $dq0$ stator akımlarını, $\lambda_q^{r'}$, $\lambda_d^{r'}$ ve $\lambda_0^{r'}$ stator tarafına göre akan $dq0$ rotor akımlarını, λ_m' ise stator tarafına göre akan kalıcı mıknatıs akısını ifade etmektedir. L'_{lrq} ve L'_{lrd} stator tarafına göre sırasıyla q ve d eksenine karşılık gelen rotor kaçak indüktanslarıdır. L_m mıknatıslanma indüktansı ve L_{ls} ise stator kaçak indüktansıdır. L_{md} ve L_{mq} ise d ve q

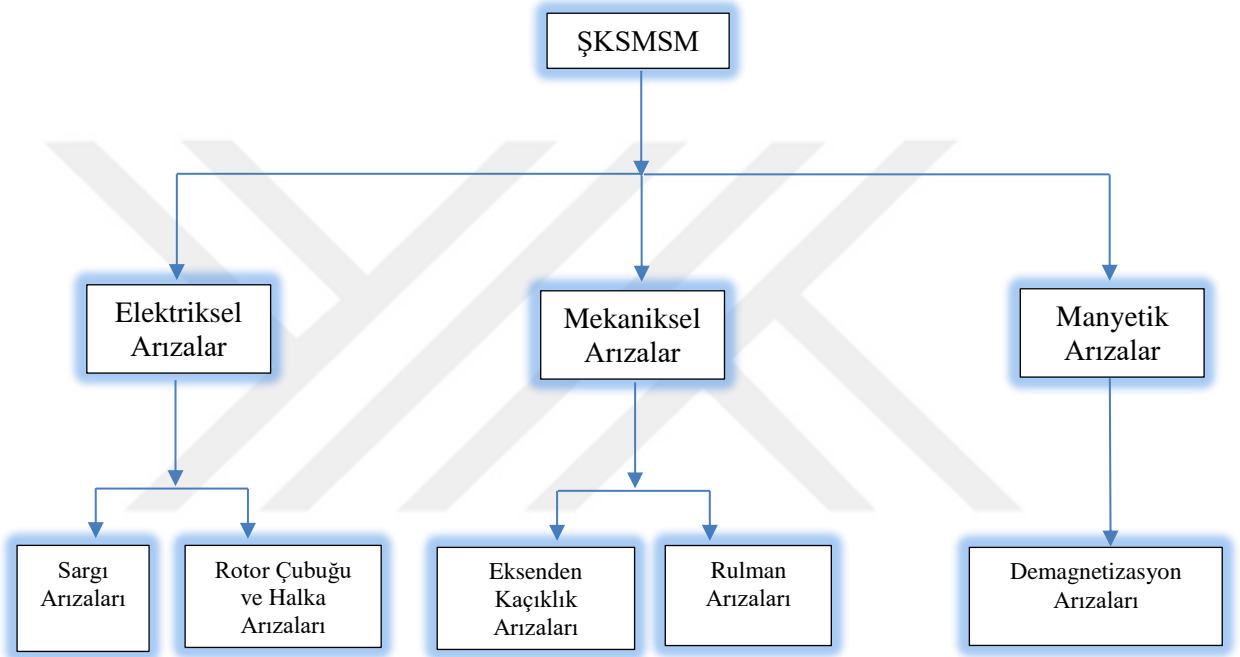
eksenine karşılık gelen ortak indüktanslardır. $L_{\Delta m}$ çıkıntıya bağlı indüktanstır. $dq0$ eksenindeki final elektromanyetik tork formülü eşitlik 3.31 ile gösterilmiştir (Maraaba ve ark., 2018).

$$\begin{aligned}
 T_{em} = & \frac{P}{2} \left[-\frac{9}{2} L_{\Delta m} i_q^s i_d^s + \frac{3}{2} \mu i_f L_{\Delta m} (i_q^s \sin \theta_r + i_d^s \cos \theta_r) + \frac{9}{4} (-(L_m + L_{\Delta m}) i_d^s i_q^{r'} \right. \\
 & + (L_m - L_{\Delta m}) i_d^{r'} i_q^s) + \frac{3}{2} \mu i_f ((L_m + L_{\Delta m}) i_q^{r'} \sin \theta_r - (L_m - L_{\Delta m}) i_d^{r'} \cos \theta_r) + \\
 & \left. \frac{9}{4} L_{\Delta m} (-i_q^{r'^2} \sin 2\theta_r - 2i_d^{r'} i_q^{r'} \cos 2\theta_r + i_d^{r'^2} \sin 2\theta_r) + \frac{3}{2} \lambda_m i_q^s - \mu i_f \lambda_m \cos \theta_r \right] \quad (3.31)
 \end{aligned}$$



3.5. Şebeke Kalkışlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorda Arızalar

Endüstride yaygın olarak kullanılmaya başlanan ŞKSMSM’lerde oluşan arızaların hızlı ve güvenilir bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Kısa sürede arıza teşhisi ile donanım hasarı ve onarım masrafları azaltılırken uzun işletme ömrü ve enerji tasarrufu sağlanır (Kim ve ark., 2004 ; Fırat, 2006). Şekil 3.12’de ŞKSMSM’de oluşan arızalar için bir sınıflandırma gösterilmiştir.



Şekil 3.12. ŞKSMSM arıza sınıflandırması

3.5.1. Elektriksel arızalar

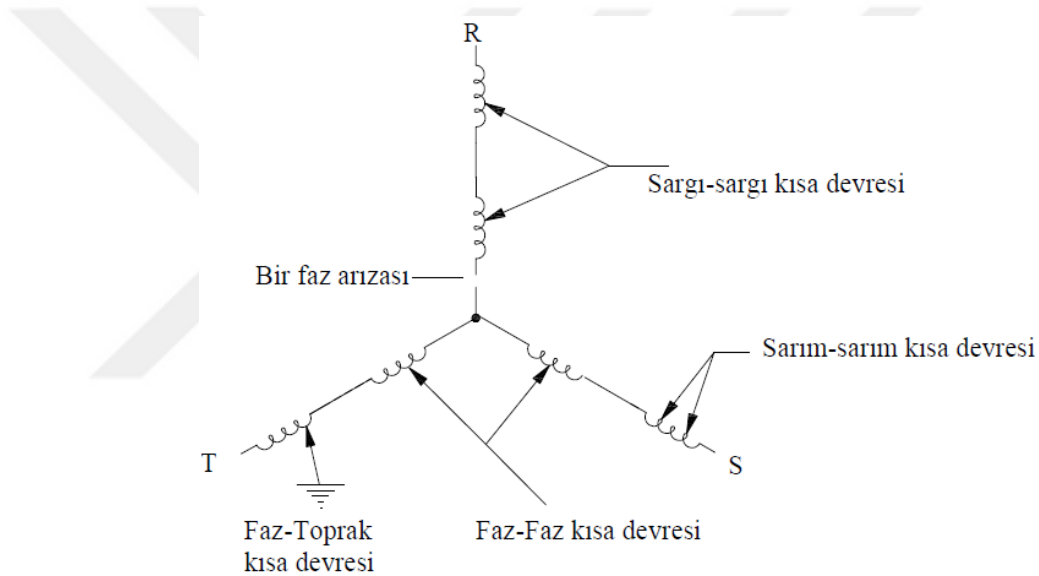
Elektriksel arızalar; stator sargılarında oluşan kısa devreler, rotor halka kırığı ve rotor çubuk kırığı arızalarından oluşmaktadır.

Stator Sargı Arızaları: Stator sargı kısa devreleri olarak da adlandırılan bu arıza, statorun kaydedilen tüm arızalarının en önemlisidir. Sargı arızaları elektrik motorlarında en sık görülen arıza türlerinden biridir ve genellikle rotorun statora sürtmesi, elektriksel ve manyetik zorlanmalar sonucunda sargılarda oluşan kısa devre durumlarıdır (Kim ve ark., 2004 ; Bon-Gwan Gu., 2016). ŞKSMSM çalıştırıldığında kalkış boyunca ASM gibi ve sonrasında senkron motor şeklinde çalıştığı için bu makinenin sargı arızası sonucunda akım spektrumunda oluşturduğu frekans bileşenleri incelenirken hem asenkron hem de

senkron çalışma için ayrı ayrı incelenmelidir. Asenkron çalışma durumunda frekans bileşenlerinin yeri Eşitlik 3.32 ile hesaplanmaktadır (Nandi ve ark., 2005).

$$f_s = \left(k \pm \frac{n(1-s)}{p} \right) f \quad (3.32)$$

Burada P kutup sayısını, f temel harmonik, $k=1,3$ ve $n=1,3,\dots,(2P-1)$ ve s ise kaymayı temsil etmektedir. Senkron çalışma durumunda ise yapılan literatür araştırmasında sargı arızalı stator akımları için temel frekans f_s 'nin 3 katı frekanslarında $3f_s$ izlenerek arıza tespitinin olası olduğu görülmüştür. Şekil 3.13'de üç fazlı ŞKSMSM'de çeşitli sargı arızaları görülmektedir.



Şekil 3.13. Üç fazlı ŞKSMSM'de stator sargı arızaları (Doğan, 2012)

Sarım-Sarım Kısa Devresi: Fazlardan birinin sargı içerisinde meydana gelen sarımların kendi aralarındaki kısa devreleridir. Bu arızanın oluşumunda aşırı yük koşulundan kaynaklanan ısı yükselmeleri, aşınmalar, titreşimler ve gerilim kaynağı etkilidir (Akar, 2009).

Sargı-Sargı Kısa Devresi: Fazlardan birinin farklı sargı grupları arasında oluşan kısa devrelerdir. Bu arızada birden fazla sarım kısa devresi görülür ve arızalı fazın bazı sargılarından aşırı akmasına neden olur. Teller bu aşırı akımın oluşturduğu ısıdan dolayı kısa sürede yanar.

Bir Faz Kısa Devresi: Motorun beslendiği güç kaynağında bir fazın açık olması durumunda görülen arızadır. Bu arızanın oluşumunda faz sargısı içerisinde kopmalar, ilgili faz sigortasının devre dışı kalması, kontaktörün devre dışı kalması, besleme kabloların yanlış bağlanması veya motor klemens bağlantı sorunu etkilidir. Arıza sonucunda aşırı akımların sebep olduğu ısınmalar, yalıtım kaybına neden olur. Ayrıca bu arıza, sargı açık devresi olarak da adlandırılmaktadır.

Faz-Faz Kısa Devresi: Farklı fazlar arasındaki sargılarda oluşan kısa devre durumudur. Farklı oluklardaki sargıların yalıtımının yitirilmesi sonucu birbirleri ile temasında oluşmaktadır. Bu arızanın oluşumunda elektriksel, mekaniksel, termal veya çevresel zorlamalar etkilidir.

Faz-Toprak Kısa Devresi: Bir veya daha fazla fazın toprak ile arasında oluşan kısa devredir. Motor oluk kenarlarında bulunan yalıtımın kaybedilmesiyle topraklanmış gövdeye sargıların teması sonucu oluşmaktadır.

Rotor Arızaları: ŞKSMSM'lerin çalışması sırasında rotor arızaları, kısa devre halkalarında veya rotor çubuklarında ya kısmi çatlama ya da tamamen kırılmalar şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu arızaların ortaya çıkmasındaki nedenler; titreşimler, elektromanyetik gürültüler ve elektromanyetik kuvvetlerden kaynaklanan manyetik zorlamalar, salınımsal kuvvetler, merkezkaç kuvvetleri ve motor milinde yük torkundan kaynaklanan dinamiksel zorlamalar, Rotor çubuk ve halkalarında kullanılan bakır, alüminyum gibi döküm malzemesi içerisindeki gözeneklerde oluşan arklı akımlar, dengesizlikler ve termal aşırı yüklenmelerden kaynaklanan ısısal zorlamalar ve toz, nem, kimyasallar gibi kirleticilerin oluşturduğu çevresel olumsuzluklardır (Akar, 2009).

Rotor Çubuk Kırığı Arızası: Kısa devre çubuklu rotor yapılarına sahip motorlardaki arızaların içerisinde en yaygın görülen arıza tipi, rotor çubuk kırılmalarıdır. Rotordaki herhangi bir çubuğun kırılması, zaten var olan zorlamaları artırır ve zaman içinde komşu çubuklarda da arızalar açar.

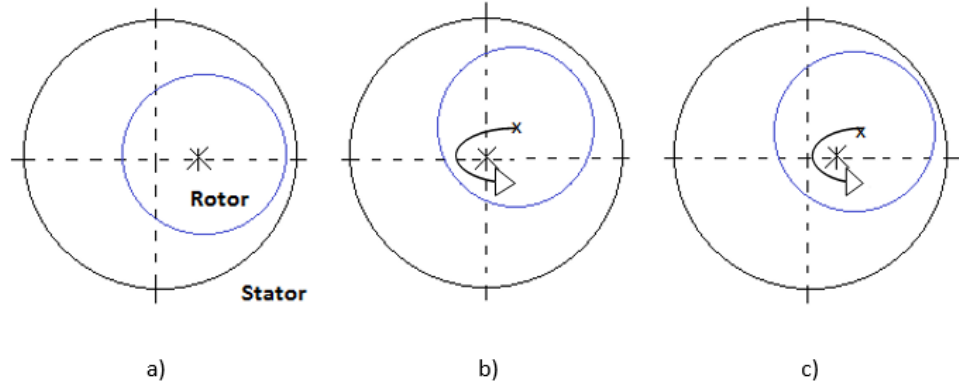
Rotor Halka Kırığı Arızası: Kısa devre halkaları rotor çubuklarını, rotorun her iki yanından kısa devre etmektedirler. Bu halkaların herhangi bir yerinde oluşan kırılmalar rotorun eşdeğer devre direncini değiştirir. Eğer rotor kısa devre halkalarında kırılma başlarsa, değişen rotor eşdeğer devre direnci nedeniyle kısa devre akımları artar ve

rotorda belirli kısımlarda aşırı ısınmalar oluşturur. Özellikle motorun kalkış anlarında yük dalgalanmaları sırasında bu arızanın boyutu ilerler. Sonuçta, rotor kısa devre halkası kırığı arızaları, akım ve hızda dalgalanmalara sebep olur (Mehrijou ve ark., 2011).

3.5.2 Mekaniksel arızalar

Mekaniksel arızalar, eksenden kaçıklık arızaları ve rulman arızalarından oluşmaktadır.

Eksenden Kaçıklık Arızaları: Sağlam motorda stator ve rotor arasındaki hava aralığı homojendir. Eksenden kaçıklık arızası durumunda homojen hava aralığı bozularak dengesizleşir. Eksenden kaçıklık arızaları statik, dinamik ve karışık tip (statik+dinamik) olmak üzere üçe ayrılır. Bu arızalar motorda gürültü, titreşim, verim kaybı ve harmonik oluşumuna neden olur. Şekil 3.14’de eksenden kaçıklık arızaları gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Eksenden kaçıklık tipleri a) Statik, b) Dinamik, c) Karışık (Tetik ve Doğan, 2016)

Statik Eksenden Kaçıklık Arızası: Statik eksenden kaçıklık arızalarında rotor statorun farklı sabit bir eksende döner. Bu arızaların başlıca sebepleri; stator nüvesinin oval olması, üretim aşamasında rotor veya statorun yanlış konumlandırılması, rulmanların yanlış konumlandırılması ve aşınmasıdır.

Dinamik Eksenden Kaçıklık Arızası: Dinamik eksenden kaçıklık arızalarında rotor statorla sürekli değişen eksenlerde döner. Dinamik eksenden kaçıklık arızalarının sebepleri rotor şaftının eğimi, rulmanların aşınması, kritik hızda mekanik rezonans, şaft kayması, stator kapaklarında aşınma sonucu oluşan rulman boşluğu ve dengesiz yüklerdir.

Karışık Eksenden Kaçıklık: Hem dinamik hem de statik eksenden kaçıklığın aynı anda bulunduğu arıza durumudur. Hava boşluğunda değişen akı dağılımı, indüklenen gerilimde harmonik oluşumuna neden olur. Arızanın erken teşhis edilememesi durumunda motorun yanmasına kadar ciddi hasar oluşturabilmektedir (Tetik ve Doğan, 2016).

Rulman Arızaları: Rulmanlar, elektrik motorlarında en önemli mekaniksel bileşenlerden biridir. Rulman, iç ve dış bilezikler olmak üzere iki bilezik ve bu iki bilezik arasında bulunan rulman kafesleri içerisinde yayılmış bilyelere sahiptir. Motorda işletme sırasındaki dinamik yük değişimleri, yük dengesizlikleri, vb. nedenler zamanla rulmanların yorulmalarına neden olur. Bunun bir sonucu olarak, rulman iç ve dış bileziklerinde yıpranmalar oluşur. Bu şekilde yıpranmış rulmanlarda gürültü seviyeleri ve titreşim artar. Artan bu titreşimler sonucunda rulman bilezikleri veya bilyelerde küçük parça kopmaları gerçekleşir. Kopan bu parçalar rulman yağı vasıtasıyla iç kısımlara doğru dağılır. Böylece rulman bilyeleri ve bilezikleri arasında oluşan sürtünme rulmanın hızla bozulmasına neden olur. Rulmanların üretim safhasında yüzeydeki üretim arızaları, yanlış montaj da bir diğer arıza oluşum sebebidir (Doğan, 2012; Eker, 2013).

3.5.3. Manyetik arızalar

Manyetik arızaların en önemli sebebi rotorda oluşabilen mekaniksel zorlanmalar ve ısıl değişimlerdir (Kara ve Doğan, 2016). ŞKSMSM'lerde oluşan demagnetizasyon arızasının başlıca nedenleri sargı arızalarının oluşturduğu aşırı ısınmalar, stator sargılarından geçen akımların oluşturduğu ters yöndeki manyetik alanlar, yüksek kalkış torku gerektiren yük durumları, geçici durumdan durağan hale hızlı geçişler esnasında oluşan endüvi reaksiyonlarıdır. Demagnetizasyon arızası sonrası yapısı bozulan mıknatısın ürettiği akıdaki kayıplar nedeniyle motor verimi düşmektedir. Yine yapısı bozulan mıknatıs düzensiz çekim alanı oluşturması sebebiyle motor gövdesinde titreşim ve gürültü oluşturmaktadır (Shenboo ve Renyuan, 2006 ; Pirierto ve ark., 2011).

3.6. Kullanılan Arıza Tespit Yöntemleri

Kaynakçada yapılan çalışmalar incelendiğinde elektrik motorlarında arıza tespiti için elektriksel ve mekaniksel işaretler zaman boyutunda, frekans boyutunda veya zaman-frekans boyutunda analiz edilerek arızaya ait özellikler elde edilmektedir. Elde edilen bu özellikler kullanılarak arıza tespiti yapılmaktadır. Yapılan bu tez çalışmasında arıza tespiti için pratik, hızlı ve ekonomik olması sebebiyle en yaygın kullanıma sahip olan HFD ve döner makinelerin titreşim analizinde en sık kullanılan yöntemlerden birisi olan Gabor-MTA yöntemleri kullanılmıştır.

3.6.1. Hızlı Fourier dönüşümü

İşaret işleme alanında ortaya atılan ilk kuram Fourier dönüşümüdür. 1807 yılında Fransız matematikçi Joseph Fourier tarafından ısı iletimi ve sıcaklık tanımlamalarını modellemek için ortaya atılmıştır. Bu kuram frekans boyutunda analiz edilen işaretlerin şeklini oluşturduğu düşünülen sinüs ve kosinüslerin toplamı olarak kabul edilebileceğini göstermiştir. Buna göre bir işaret seri şeklinde ifade edilebilir ve analizi gerçekleştirilebilir (Çankaya ve Vatansever, 2002). Eşitlik 3.33' de bir $f(x)$ fonksiyonunun seri şeklinde gösterimi verilmiştir.

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \sin kx) \quad (3.33)$$

Eşitlik 3.33' de yer alan a_0 , a_k ve b_k ifadeleri Fourier katsayılarıdır ve aşağıda eşitlik 3.34, 3.35 ve 3.36'da hesaplamaları gösterilmiştir.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx \quad (3.34)$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(kx) dx \quad (3.35)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(kx) dx \quad (3.36)$$

Bir $f(x)$ fonksiyonunun karmaşık üstel Fourier seri şeklinde gösterimi ise eşitlik 3.37'de ifade edilmiştir.

$$x(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_k e^{jwkt} \quad w = \frac{2\pi}{T} \quad (3.37)$$

Burada; T işaretin periyodunu, c_k harmoniklerin ağırlıklarını ve $x(t)$ ağırlıklı harmoniklerin toplamıyla elde edilen işareti temsil etmektedir. Fourier serilerinden Fourier dönüşümüne geçişte Sürekli Zamanlı Fourier Dönüşüm (SZFD) denklemleri kullanılmaktadır. Bu denklemler eşitlik 3.38 ve 3.39'de ifade edilmiştir.

$$X(w) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-jw t} dt \quad (3.38)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(w) e^{jw t} dw \quad (3.39)$$

İfade edilen eşitliklerde de görüldüğü gibi Fourier serisi ve dönüşümü arasındaki tek fark analizi gerçekleştirilen işaretin sürekli olmasıdır.

İşaretlerin Fourier dönüşümü ile analizlerinde, işaretle bazı karakteristik özelliklerin kaybolduğu görülmektedir. Bunun nedeni frekans tanım bölgesine dönüşüm yapılırken zaman bilgisinin taşınmıyor olmasıdır. Zaman bilgisi içermediği için, frekans boyutunda bir olayın ne zaman gerçekleştiği bilinemez. Bu durum Fourier dönüşümünün önemli bir dezavantajıdır. Bu nedenle Fourier dönüşümü durağan işaretlerde başarılı sonuçlar verirken, dinamik işaretlerde yetersiz kalmaktadır. Bu probleme 1946 yılında Denis Gabor tarafından ortaya atılan Kısa Zaman Fourier Dönüşümü (KZFD) yöntemi çözüm olmuştur.

KZFD yöntemi dinamik işareti zamanda durağan kabul edilebilecek küçük parçalara böler ve elde edilen her bir parça üzerinde Fourier dönüşümü uygulayarak analiz eder. İşareti küçük parçalara bölmek için çeşitli pencereleme fonksiyonları kullanılmaktadır. Uygulanan pencereleme fonksiyonlarında işaretin frekans dönüşümü yapılmadan önceki orijinal işaretin, ayrılmış her bir dalgadan tam olarak yalıtılması sağlanır. Pencere içerisindeki her bir dalga durağan kabul edilir. Pencereleme için genellikle “dikdörtgen”, “üçgen”, “bartlett”, “blackman-harris”, “hamming”, “gauss”, “hann” ve “kaiser” fonksiyonları kullanılır. KZFD yöntemi spektrogram olarak da adlandırılmaktadır. KZFD’nin matematiksel denklemi eşitlik 3.40’da ifade edilmiştir (Çankaya ve Vatansever, 2002).

$$X(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) w(t - \tau) e^{-jft} dt \quad (3.40)$$

Burada t zamanı, $x(t)$ orijinal işareti, τ orijinal işaret üzerinde pencere öteleme değerini, $w(t-\tau)$ pencere işaretini, f frekansı ve e^{-jft} frekans boyutundaki işareti inceleyen karmaşık sinüzoidal terimi göstermektedir. Orijinal işaretin kısa zamanlı parçalara pencerelenmesinde pencere fonksiyonu uzunluğunun seçimi çok önemlidir. Bu uzunluğun dar seçilmesi Fourier dönüşümü ile elde edilemeyen çözünürlüğü artırırken, geniş seçilmesi ise frekans çözünürlüğünü artırır. Buna karşın zaman çözünürlüğü azalacaktır. Pencere işaretinin ideal uzunluğu, işaretin durağan kabul edilebileceği miktar olmalıdır. Ayrıca işaretin tamamı için aynı uzunluktaki pencere kullanılması tüm frekanslar için aynı çözünürlüğü üretecektir. Bu çok uygun olmayan bir durumdur. Bu

nedenele uygulamada işaretler için pencere uzunluğunun esnek seçilebilmesi gereklidir (Doğan, 2012).

Elektrik motorlarında arıza tespiti amacıyla kullanılan işaretler belirli zaman aralığında sınırlı sayıda örnek içermektedir. Bu durumda sonsuz toplama işlemi ortadan kalkar. Bu nedenle sonsuz dönüşüm denklemleri yerine Ayrık Fourier Dönüşümü (AFD) kullanılır. Eşitlik 3.41 ve 3.42’de AFD ve ters dönüşüm ifadeleri verilmiştir. İfadelerde N belirli bir sayıda örnek içeren x işaretinin uzunluğunu göstermektedir.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi\frac{k}{N}n} \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (3.41)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi\frac{k}{N}n} \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (3.42)$$

1965 yılında Cooley ve Tukey tarafından geliştirilen HFD algoritmasıyla ayrık işaretlerin Fourier dönüşümü ve günümüzde spektrum analiz, kovülasyon ve ilinti işlemleri yoluyla motorlarda arıza tespitleri başarılı bir şekilde yapılmaktadır.

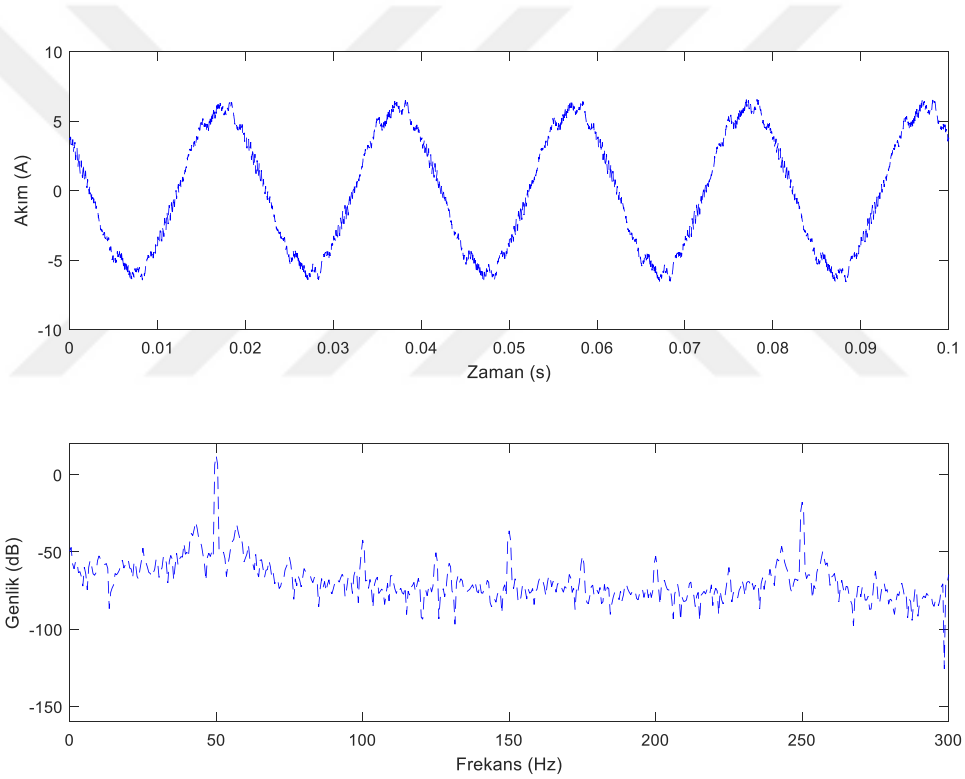
HFD mekaniksel ve elektriksel arızaların tespitinde yaygın olarak kullanılmaktadır. HFD, bir işaretin farklı frekanslardaki enerji dağılımını gözlemleyebilmek için o işarete uygulanan Fourier dönüşümü olarak ifade edilebilir. Zaman boyutundaki bir faz akımına HFD fonksiyonu uygulanarak frekans boyutundaki motor akım spektrumu hesaplanır. Elde edilen spektrumda değişimler, ana frekans ve harmonikler gözlemlenerek arıza tespiti yapılmaktadır. Birçok araştırmacı motor arızası tespiti için HFD’yi kullanarak motor akım ve gerilim işaretlerinin içeriğindeki harmonik bileşenlerinin frekans düzleminde genliklerindeki değişimini detaylı incelemiş ve motorun sağlıklı durumda ve farklı şiddetteki arıza durumlarında gösterdiği değişim miktarı ile motorun arıza şiddetini belirleyebilmişlerdir (Çıra, 2017).

Uygulamalarda Fourier dönüşümü ile çıkarılan özellikler genellikle güç spektrum yoğunluğu kullanılarak hesaplanmaktadır. Güç spektrum yoğunluğu, ayrık Fourier dönüşümünü kullanarak işareti frekans eksenine taşır (Arabacı ve ark., 2004).

Eşitlik 3.40’da ifade edilen N örnekli işaretin AFD ile elde edilen güç spektrum yoğunluğunun nasıl hesaplandığı eşitlik 3.43’de ifade edilmiştir.

$$S_{xx}(k) = \frac{1}{N} |X(k)|^2 \quad (3.43)$$

Şekil 3.15’de ŞKSMSM’den alınmış akım işareti ve bu işaretin HFD spektrum grafiği görülmektedir.



Şekil 3.15. Akım spektrum grafiği

Şekil 3.15’de ŞKSMSM’de sağlam çalışma durumu için 50 kHz örnekleme frekansı ile kaydedilmiş bir faz motor akımının zaman boyutundaki ve “Hanning” pencereleme fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş güç spektrum dönüşümünün 0-300 Hz aralığı verilmiştir. Çalışma frekansımız 50 Hz (fs) olduğu için temel frekans 50 Hz’de çıkmıştır. 75 Hz (3fs/2), 100 Hz (2fs), 150 Hz (3fs), 250 Hz (5fs), vb. frekanslarda ise temel frekansın harmoniklerinin oluştuğu görülmüştür.

3.6.2. Gabor mertebe takip analiz yöntemi

MTA döner makinelerin titreşim analizinde en sık kullanılan yöntemlerden birisidir. Diğer titreşim analiz yöntemlerine göre MTA yönteminin en büyük üstünlüğü genliği ve frekansı zamana bağlı olarak değişen durağan olmayan işaretlerde arıza tespitini yapmaya izin veren etkili sonuçlar sağlamasıdır (Akar, 2012; National Instruments, 2005). Mertebe, mil hızı tarafından normalize edilmiş frekans olarak tanımlanmaktadır (Saavedra ve Rodriguez, 2005). Bu tanımda da görüldüğü gibi MTA ile durağan işaretlere hız bilgisi gibi ek bilgiler dâhil edilerek durağan olmayan işaretlerin analizi sağlanmaktadır. Bu durumda da motor hız bilgisinin encoder üzerinden doğru bir şekilde alınması gerekmektedir (Blough ve Brown, 1997).

Birçok araştırmacı farklı MTA yöntemleriyle arıza tespit çalışmaları yapmıştır. En temelde MTA HFD'ye dayanmaktadır. HFD'ye dayalı MTA sabit bir delta-t ile örneklenmiş zaman ekseni verileri gerektirir. Zamanda ilgili mertebenin tam frekansının hesaplanması için doğru bir takometre işaretine ihtiyaç vardır. Daha çok hız değişimi olmayan ya da değişimin çok az olduğu sistemlerde mertebe tespit etmede kullanılmaktadır. Bu yöntemin olumsuzluğu durağan olmayan işaretlerde başarılı sonuçlar sağlayamamasıdır (Blough ve Brown, 1997).

Vold Kalman Filtre tabanlı MTA (VKF-MTA) yöntemiyle değişken hız şartları altında SMSM'de sargı arızası teşhisi yapılmıştır. MTA'nın bu yönteminde zaman ekseninde çalışırken analiz edilen mertebelerin hem faz hem de genlik bilgilerinin zaman içindeki değişimini incelemek mümkündür. Ayrıca bu yöntemin diğer MTA yöntemlerinden bir diğer üstünlüğü de geniş bir hız aralığında çalışan motorun yakın ve kesişen mertebelerini doğru bir şekilde belirlemeyi sağlamasıdır (Urresty ve ark., 2013).

Yeniden Örnekleme Tabanlı MTA (YÖT-MTA) yöntemi ise sabit örnekleme hızıyla eşzamanlı olarak izlenen ve kaydedilen titreşim ve hız işaretlerinden, titreşim işaretinin hız işaretine göre tekrar örneklenmesi ilkesine dayanmaktadır (Akar, 2012).

Gabor MTA yöntemi ise her işaretin zaman ve frekans fonksiyonlarının ağırlıklı toplamı olarak ifade edilebileceği ilkesine dayanır. Bu yöntem spektrum hesaplandıktan sonra Gabor açılımı aracılığıyla istenilen mertebeye ait dalga şeklinin yeniden hesaplanmasını mümkün kılar (Guercioni ve ark., 2015).

HFD'nin dinamik işaretlerdeki yetersizliğinden dolayı, araştırmalarda genellikle dönen makinelerin mertebelerini görselleştirmek için KZFD kullanılmaktadır. Zaman veya frekans ekseninde işaretleri ayrı ayrı tanımlayan klasik HFD'nin aksine, KZFD işaretin genlik ve fazını eş zamanlı olarak zaman ve frekans ekseninde karakterize eder. Fakat KZFD genellikle tersine çevrilebilir değildir. Bir başka deyişle, KZFD'si verilen bir işaretten belirli bir mertebenin zaman dalga formu çekilemez. Ancak, Gabor açılımıyla düzenlenmiş KZFD aracılığıyla bir zaman dalga formu elde edilebilir (Qian, 2003). Gabor MTA doğrusal ters zaman-frekans dönüşümlerinden birisi olarak, analiz edilen işaretin zamanla değişen davranışlarına dair bir fikir edinmeyi ve ters dönüşüm aracılığıyla belirli mertebe bileşenlerine ait dalga formunun yeniden yapılandırılmasını mümkün kılmaktadır (National Instruments, 2005; Pan ve Chiu, 2006). 1946 yılında Dennis Gabor tarafından ortaya atılan Gabor açılımı, mertebe analizi gibi uygulamalarda frekans içeriği zamanla geliştirilmiş işaretleri işlemek için kullanılmaktadır (Qian, 2003). Gabor dönüşüm çifti, Gabor dönüşümü ve ters Gabor dönüşümü veya Gabor açılımından oluşur. Bir $s(t)$ işareti için Gabor açılımı eşitlik 3.44'de ifade edilmiştir. (Qian, 2003).

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_{m,n} h_{m,n}(t) \quad (3.44)$$

Burada $c_{m,n}$ Gabor katsayısı olarak adlandırılır ve $h_{m,n}(t)$ Gabor temel fonksiyonu ise eşitlik 3.45 ile ifade edilmiştir.

$$h_{m,n}(t) = h(t - mT)e^{jn\Omega t} \quad , \quad m,n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (3.45)$$

Burada T ve Ω sırasıyla zaman ve frekans örnekleme adımlarını göstermektedir. $h(t)$ işlevi bir Gauss fonksiyonundan her ne kadar başka biçimlerde olsa da $h_{m,n}(t)$ fonksiyonu $h(t)$ Gauss fonksiyonunun zaman ve frekans kaydırılmış versiyonu olarak eşitlik 3.46'da ifade edilmektedir.

$$h(t) = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} e^{-\left(\frac{\alpha}{2}\right)t^2} \quad (3.46)$$

Burada α , uygulamalara göre zaman ve frekans çözümlenmesi arasında bir denge sağlamak için kullanılabilen ayarlanabilir bir parametredir. Gabor açılımı ortaya atıldıktan sonra Gabor katsayısının hesaplanması neredeyse yarım yüzyıl kadar uzun bir süre çözümlenmeden kalmıştır. 1980'lerde Bastiaans tarafından KZFD ve Gabor katsayısı arasındaki ilişki keşfedilmiştir. Eşitlik 3.47'de örneklendirilmiş KZFD olan Gabor katsayısının, Gabor dönüşümü olarak bilinen ifade ile nasıl hesaplanacağı gösterilmiştir (Pan ve ark., 2007).

$$c_{m,n} = KZFD[mT, n\Omega] = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \gamma_{m,n}^*(t) e^{-jn\Omega t} dt \quad (3.47)$$

$h(t)$ 'nin çift fonksiyonu $\gamma(t)$ 'nin zaman ve frekans kaydırılmış versiyonu eşitlik 3.48'de verilmiştir.

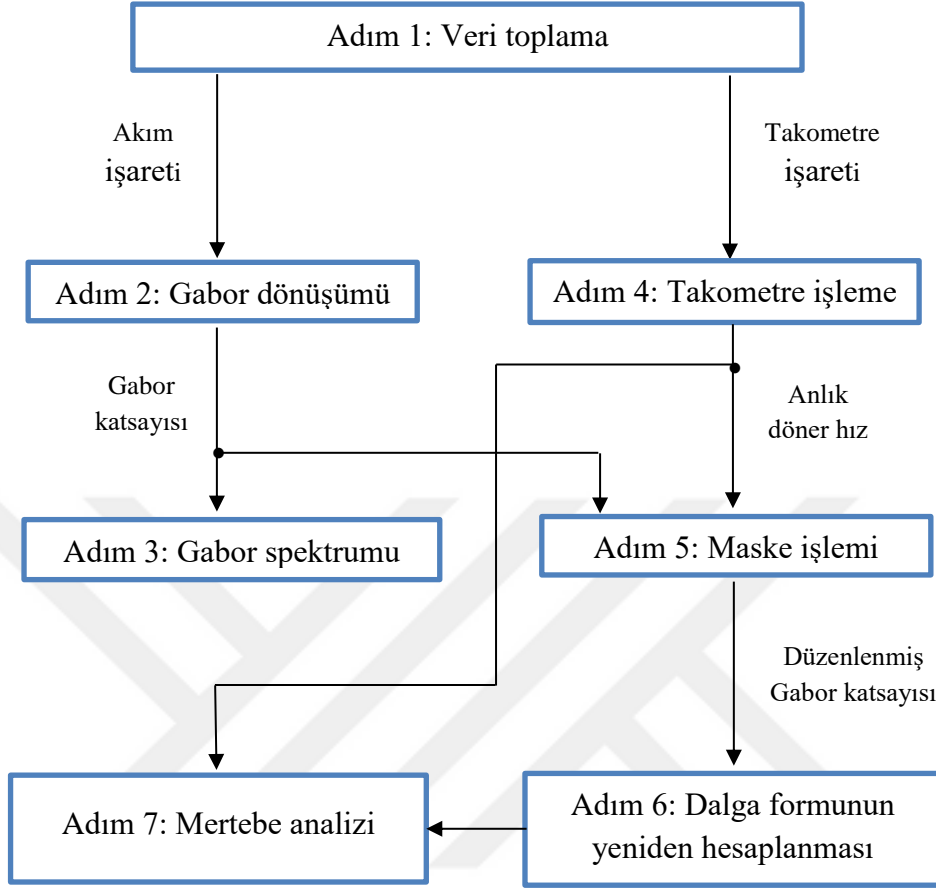
$$\gamma_{m,n}(t) = \gamma(t - mT) e^{jn\Omega t}, \quad m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (3.48)$$

Burada * karmaşık eşleniği temsil ederken eşitlik 3.49'da $h(t)$ ve $\gamma(t)$ arasındaki ilişki ifade edilmiştir.

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_{m,n} \gamma_{m,n}^*(\tau) = \delta(t - \tau) \quad (3.49)$$

Burada $\delta(t)$ Dirac δ fonksiyonunu ifade etmektedir. Eşitlik 3.44 ve 3.47 Gabor dönüşüm çiftini oluşturmaktadır.

Gabor açılımının en ilgi çekici uygulamalarından birisi değişen zamanda filtrelemedir ve belirli mertebe bileşenlerinin dalga biçimlerinin yeniden hesaplanmasını gerçekleştirmek için kullanılır. Dönen makinelerin arıza teşhisi ve durum izlemesi için Gabor MTA'nın işleyişine ait ana adımlar Şekil 3.16'da gösterilmiştir (Guo ve Tan, 2009).



Şekil 3.16. Gabor MTA işleyiş diyagramı

Adım 1: Veri toplama. Sabit bir örnekleme hızında takometre ve akım kanalını eş zamanlı olarak elde ettikten sonra takometre veri serisi $p[k]$ ve akım veri serisi $s[k]$ artık hazır durumdadır.

Adım 2: Gabor dönüşümü. İlk Gabor katsayısı $c_{m,n}$, Gabor dönüşümünün bir sürümü olan eşitlik 3.50’de verilen Ayrık Gabor Dönüşümü (AGD) ile hesaplanmaktadır.

$$C_{m,n} = \sum_{k=0}^{L-1} \hat{s}[k] \gamma^*[k - m\Delta M] e^{-\frac{j2\pi nk}{N}}, \quad 0 \leq m < M, \quad 0 \leq n < N \quad (3.50)$$

Burada ΔM örnekleme zaman aralığını, M zaman noktalarının sayısını ve N toplam frekansı ifade etmektedir. Bu yüzden Gabor katsayılarının sayısı MN ’ye eşittir. $\hat{s}[k]$ ise eşitlik 3.51’de açıklanan akım veri serisi $s[k]$ ’nin periyodik uzantısını belirtmektedir.

$$\hat{s}[k + iL] = \begin{cases} s[k], & 0 \leq k < Ls \\ 0, & Ls \leq k < L \end{cases} \quad i = \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (3.51)$$

Burada L , $\hat{s}[k]$ veri serisinin periyodunu, Ls ise $s[k]$ veri serisinin uzunluğunu göstermektedir. L 'nin Ls 'den daha büyük veya eşit olan en küçük tamsayı olduğu ve örnekleme zaman aralığı ΔM ve frekans toplam sayısı ile tam olarak bölünebilir olması gerektiği unutulmamalıdır. Yani, $M = L / \Delta M$ ve $N = L / \Delta N$ 'dir. ΔN örnekleme frekans aralığını göstermektedir.

Adım 3: Gabor spektrumu. Gabor katsayı dizisini 2D görüntüye eşleyerek Gabor spektrogramı oluşturulur. Gabor spektrumu $M \times N$ zaman-frekans kafesinden oluşur. Görüntüdeki her kafesin yoğunluğu, belirli bir zaman noktası m ve belirli bir frekans noktası n 'de $c_{m,n}$ 'nin genliğini temsil eder.

Adım 4: Takometre işleme. Açısal hız $\omega(t)$ takometre işaretinden $\omega(t_i) = d\theta(t_i) / dt |_{t=t_i}$ ile hesaplanır. Burada t_i kümülatif dönme açısına karşılık gelen varış süresini gösterir ve $\omega(t_i)$. $\theta(t_i)$ uygulamalarda kullanılan takometre ile belirlenir. Örneğin, takometre devir başına bir darbe sağlıyorsa $\theta(t_i) = 2\pi \times i$, $i = 0, 1, 2, \dots, i$ burada i . takometre darbesini gösterir. Uygulamalarda, t_i takometre serisi $p[k]$ için belirli bir tetikleme seviyesi ile belirlenir. Örneğin, tetikleme seviyesi olarak 5V seçilirse takometre işaretinin bir darbesinde $p[k]$ 5V seviyesini geçtiği ilk anda t_i 'yi, anlık zaman olarak düşünebiliriz. Daha doğru bir dönme hızı elde etmek için dijital bir ayırıcı kullanılır. Ayrıca, döner hız RPM, $RPM = \omega(t) / 2\pi \times 60$ (devir/dakika) ile hesaplanır.

Adım 5: Maske işlemi. Başlangıç Gabor katsayı dizisi üzerine döner hız RPM ve belirli bir mertebe l ile bir maske işlemi gerçekleştirilir. İlk olarak, l . bileşenin konum indeksi eşitlik 3.52 ile Gabor zaman frekans kafesleri üzerinde bulunur.

$$index = round \left(\frac{RPM}{60} \times \frac{N}{f_s} \times l \right) \quad (3.52)$$

Burada N , Gabor zaman frekans kafeslerinin frekans sayısını, f_s örnekleme frekansını gösterir ve round, tamamlanan devri temsil eder. Daha sonra Gabor katsayı dizisi $c_{m,n}$ ile aynı boyuta sahip, değeri 0 veya 1 ile sınırlı bir $w_{m,n}$ maske dizisi oluşturulur. $w_{m,n} = 1$ olduğunda $c_{m,n}$ 'yi koruyarak, $w_{m,n} = 0$ olduğunda $c_{m,n}$ 'yi kaldırarak bir maske olarak davranır.

$w_{m,n}=1$ 'e karşılık gelen katsayılar, $l \times \text{RPM} / 60 \pm \Delta f / 2$ sınırları ile belirlenen maske bölgesini oluşturur. Burada Δf ayarlanabilir bant genişliğidir. Δf 5Hz gibi sabit bir değere veya $r \times \text{RPM} / 60$ gibi sabit mertebe bant genişliğine ayarlanabilir. Sonuç olarak modifiye edilmiş Gabor katsayı dizisi $\hat{c}_{m,n}$ eşitlik 3.53 ile gösterilmiştir.

$$\hat{c}_{m,n} = \begin{cases} c_{m,n} & w_{m,n} = 1 \\ 0 & w_{m,n} = 0 \end{cases} \quad (3.53)$$

Adım 6: Dalga formunun yeniden hesaplanması. AGD ile düzenlenmiş Gabor katsayı dizisi $\hat{c}_{m,n}$ 'den belirli mertebe l 'nin zaman geçmişi eşitlik 3.54 ile yeniden hesaplanır.

$$s_l[k] = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \hat{c}_{m,n} h[k - m\Delta M] e^{\frac{j2\pi nk}{N}} \quad (3.54)$$

Burada $s_l[k]$, l x bileşenin yeniden hesaplanmış veri serisini temsil etmektedir. Gabor örnekleme oranı için $Q = N/\Delta M$ ifadesi tanımlıdır. $Q = 1$ için kritik örnekleme mevcuttur. Bu durumda $c_{m,n}$ Gabor katsayılarının sayısı, $s[k]$ orijinal veri örnekleri sayısı ile eşittir. $Q > 1$ olduğunda aşırı örnekleme ve $Q < 1$ olduğunda örnekleme altı durum söz konusudur. Genel olarak, güvenilir bir dalga biçiminin yeniden elde edilmesi için $Q \geq 1$ gereklidir.

Adım 7: Mertebe analizi. Seçilen mertebe bileşenlerinin genlik ve dalga formu, hızın bir fonksiyonu olarak hesaplanır (Guo ve Tan, 2009).

Hesaplanan herhangi bir mertebenin frekans eksenindeki yeri eşitlik 3.55 ile ifade edilmektedir. Eşitlikte kullanılan n_r rotor hızını temsil etmektedir.

$$\text{Mertebe} = \frac{(\text{Frekans} \cdot 60)}{n_r} \quad (3.55)$$

3.6.3. Özellik çıkartmak için kullanılan istatistiksel analiz yöntemleri

İstatistiksel parametreler kullanılarak makine işaretlerinin ortalama özellikleri belirlenebilir ve zaman boyutunda kolaylıkla özellikleri çıkarılabilir. Zaman boyutunda analiz ile üç fazlı ŞKSMSM'nin arıza tespiti için güçlü bir araç olarak kullanılabilir. Önerilen birçok yöntem olsa da elektrik motorlarında arıza tespiti için en çok kullanılan parametreler çerçeve enerjisi, en büyük, en küçük, çarpıklık, basıklık, etkin değer, varyans, entropi, ortalama ve standart sapmadır (Doğan, 2012).

Bu tez çalışmasında istatistiksel parametre olarak standart sapma ve varyans kullanılmıştır. Varyans; ortalama değere olan uzaklığın karesinin aritmetik ortalaması olarak tanımlanır (Sönmez, 2013). Ortalama değer; veri kümesine bağlı olarak veri dağılım eğrisinin yerini belirlemek amacıyla yapılan öncelikli hesaplamadır. Eşitlik 3.56'da varyans ifadesi verilmiştir. İfadede yer alan ζ ortalamayı temsil ederken x_i , i . veriyi, N toplam veri sayısını ifade etmektedir.

$$\zeta = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N x_i$$

$$\sigma^2 = \left(\frac{1}{N-1}\right) \sum_{i=1}^N (x_i - \zeta)^2 \quad (3.56)$$

Standart sapma; verilerin ortalamasından dağılmasının bir ölçüsüdür. Veri noktaları ortalamadan daha ileri seviyedeysen, veri kümesinde daha yüksek sapma var demektir. Standart sapma, ortalamaya göre her veri noktası arasındaki değişimi belirleyerek varyansın karekök değeri olarak hesaplanır (Karatoprak ve ark., 2007). Eşitlik 3.57'de standart sapma ifadesi verilmiştir

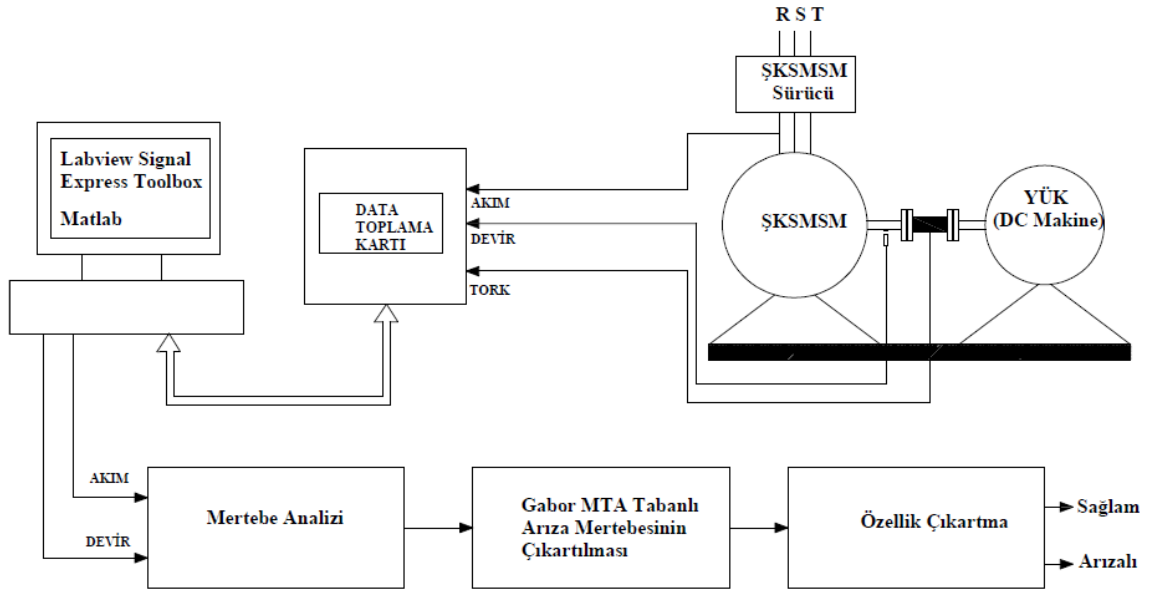
$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N (x_i - \zeta)^2} \quad (3.57)$$

Burada σ , standart sapmayı ifade ederken σ^2 , varyansı ifade etmektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında; durağan çalışma koşulu olan sabit hız sabit yük ve dinamik çalışma koşulları olan değişken hız sabit yük ile değişken yük sabit hız koşullarında ŞKSMSM faz akımı üzerinde, stator sargı arızasının etkisi Gabor-MTA'ya dayalı yeni bir yöntem ile incelenmiştir. Önerilen arıza tespit yönteminin blok diyagramı Şekil 4.1'de görülmektedir. Önerilen yöntemin adımları aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

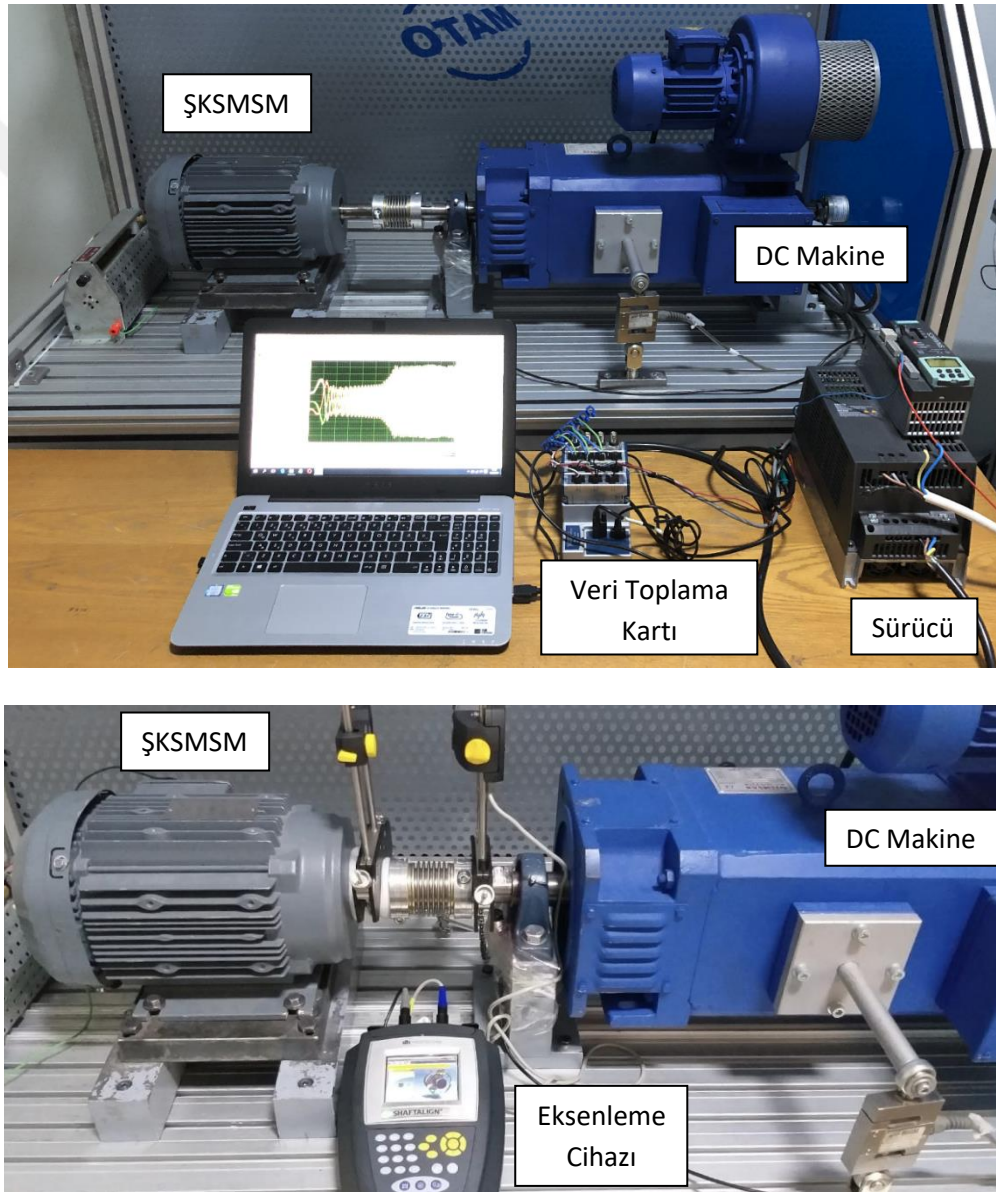
1. Adım. Sağlam ve Arızalı ŞKSMSM'lerin akım, hız ve tork bilgilerinin toplanması
2. Adım. Akım ve sayısal hız verilerinden motorun hız profilinin belirlenmesi
3. Adım. Motorun MTA yoluyla motor akım işaretlerinin mertebe spektrumlarının elde edilmesi
4. Adım. Gabor MTA yoluyla arıza mertebesinin zaman işaretlerinin elde edilmesi
5. Adım. Arıza mertebe zaman işaretinin enerji seviyesi, standart sapma ve varyans değerleri üzerinden işaret özelliklerinin çıkarılması
6. Adım. Elde edilen özelliklere bağlı olarak arıza tespiti.



Şekil 4.1. Önerilen arıza tespit yönteminin öbek çizelgesi

4.1. Deney Düzenegi ve Veri Toplama

Elde edilecek deney sonuçlarının güvenilir olması için ilk olarak deney verilerinin doğru bir şekilde toplanması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda Şekil 4.2'de verilen deney düzenegi kullanılarak ŞKSMSM'nin akım, tork ve sayısal hız verileri toplanmıştır. Deney düzenegi; ŞKDMSM, DC makine, eksenleme cihazı ve veri toplama kartından oluşmuştur.



Şekil 4.2. Deney düzenegi

Verilerin toplanması işleminde iki adet özdeş ŞKSMSM kullanılmıştır. Bu motorlardan bir tanesi sağlam durum verilerinin alınması için kullanılmıştır. Diğer motor ise arızalı durumların verilerinin toplanması için kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan ŞKSMSM'nin parametreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. ŞKSMSM parametreleri

Güç	2.2	kW
Frekans	50	Hz
Gerilim (Δ/Y)	230/400	V
Akım (Δ/Y)	7.1/4.4	A
Hız	1500	d/d
Cos Φ	0.85	
Kutup Sayısı	4	
% Verim	91.2	
Koruma Sınıfı	IP 54	

ŞKSMSM' nin yüklü çalışma koşulları DC makine ile oluşturulmuştur. Yük olarak kullanılan DC makineye ait çalışma parametreleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. DC makine çalışma parametreleri

Güç	10	kW
Gerilim	400	V
Akım	20	A
Hız	2270	d/d
Uyartım gerilimi	200	V
Uyartım akımı	2.2	A
Çalışma sınıfı	S1	
Koruma Sınıfı	IP 23	

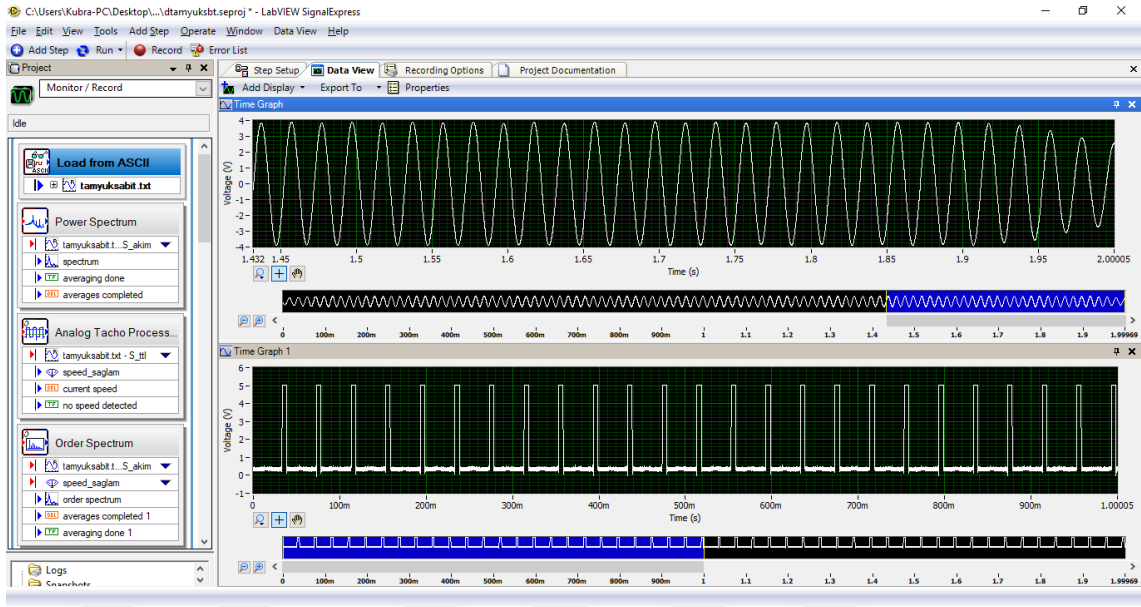
Elektrik makinelerinde arıza tespiti için analizler yapılırken aynı anda birden fazla arızanın oluşma riski bulunmaktadır. Stator sargı arızası oluşturulurken aynı sırada eksenden kaçıklık arızasının oluşma riskini ortadan kaldırmak için çalışmada ŞKSMSM

ve DC makine eksenlerinin düşey eksen ve yatay eksen de kayma olmadan bir eksen üzerinde karşı karşıya bağlanması gerekmektedir. Bu durumun sağlanabilmesi için lazer eksenleme cihazı kullanılmıştır. Eksenleme işleminin yapılabilmesi için braketler motor ve DC makine miline bağlanmıştır. Daha sonra braketlerin üzerine lazer ve reflektör braketleri takılmıştır. Reflektör hizalama yapılacak tarafa yani motor tarafına takılmıştır. Cihaz açıldığında açılan ekranda makinelerin boyutları girilerek eksenleme işlemi yapılmıştır.

Deney düzeneğinde Veri Toplama Modülü olarak NI 9174 compact DAQ ve NI 9227 akım modülleri kullanılmıştır. DAQ kart ve NI 9227 akım modülü 24-bit çözünürlükte, 50ks/sn örnekleme hızıyla eşzamanlı veri ölçümüne imkân sağlamaktadır. DAQ kart içerisinde donanımsal olarak bulunan Noch filtresi makineden ölçülen işaret üzerindeki bir kısım harmonikleri ortadan kaldırmaktadır. Deney düzeneğinde yukarıda bahsedilen donanımların dışında motor stator sargı direncinin ölçülmesi, güç ve diğer ölçümler için LCRmetre, Multimetre, Wattmetre gibi çeşitli ölçü aletleri kullanılmıştır.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında motor akım ve sayısal hız bilgisi kullanılarak ŞKSMSM'de stator sargı arızası tespiti için veri toplama işleminde, motor 3 faz akımına ilaveten, sürücü üzerinden hız ve elektromanyetik tork işaretleri izlenmiştir. Ayrıca motor sürücü üzerinde bulunan enkoder çıkış soketi üzerinden ölçülen hız bilgisi TTL işaret olarak da izlenmiştir.

Veri toplama işlemi 50 ks/sn örnekleme frekansı ile her kanaldan eş zamanlı veri alacak şekilde 9 sn boyunca motorun sağlam ve arızalı durumları için ayrı ayrı olmak kaydıyla motor verisi beş farklı yük koşulunda (%0-50-75-100-115), durağan ve dinamik çalışma koşulları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Algılayıcılardan alınan işaretler DAQ kart üzerinden bir bilgisayar ortamında kurulmuş, gerçek zamanlı veri toplama ve analiz için uygun bir program olan LabVIEW Signal Express Toolbox ortamına taşınmış ve Excel formatında bilgisayarda kayıt altına alınmıştır (National Instruments, 2005). Kaydedilen veriler Matlab ortamında grafikleştirilmiştir (Matlab, 2018). Şekil 4.3'de LabVIEW Signal Express Toolbox'da veri toplama işlemleri için oluşturulmuş programın görüntüsü görülmektedir.



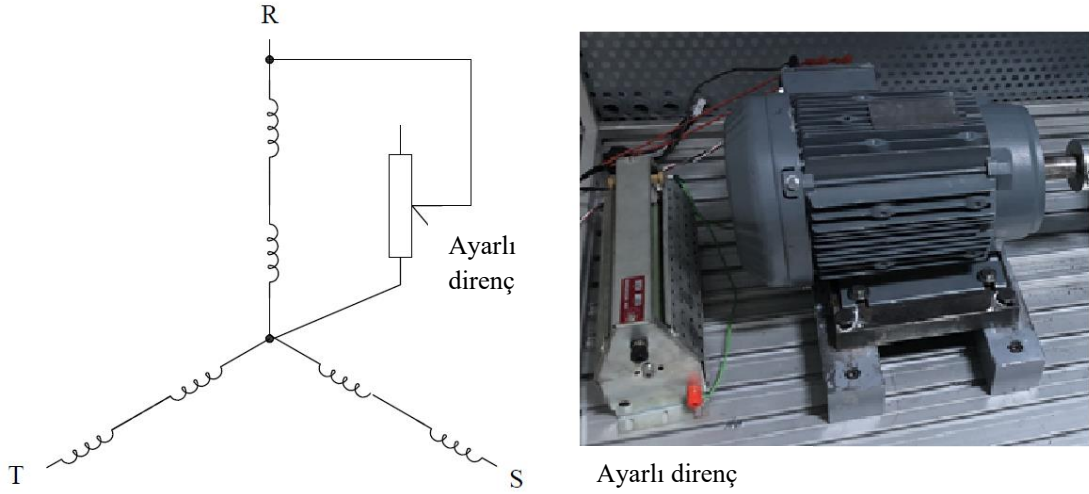
Şekil 4.3. Veri toplama işlemleri için oluşturulmuş program görüntüsü

Toplanan işaretler Excel formatında bilgisayarda kayıt altına alındıktan sonra Matlab aracılığıyla txt formatına dönüştürülerek LabVIEW Signal Express ortamına yüklenmiştir.

Zaman boyutunda izlenen işaretlerin işlenmesinde ilk adım olarak; HFD dönüşümleri yapılmıştır. HFD dönüşümlerinde hanning pencereleme fonksiyonu kullanılarak güç spektral yoğunlukları elde edilmiştir. Hız profilinin belirleneceği ikinci adım MTA yöntemi için oldukça önemlidir. Çünkü yöntemin başarısı hız bilgisinin doğru bir şekilde ölçülmesine bağlıdır. Bu adım ile indüktif hız sensöründen alınan sayısal hız işaretleri ile hız bilgisi hesaplanır ve MTA yöntemi için hız profili belirlenir. Burada kullanılan MTA HFD'ye dayalıdır. Doğru hız profili belirlendikten sonra mertbe spektrumu yoluyla hız profiline bağlı olarak mertbe dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Arıza mertbesi Eşitlik 3.55 ile belirlenmiştir. Daha sonra dördüncü adımda Gabor dönüşümlerinden yararlanılarak zaman-frekans boyutunda mertbelerin dalga şekilleri analiz edilmiştir. Burada Gabor-MTA ile istenilen arıza harmoniğine ait mertbe işareti diğer mertbelerden çıkarılmıştır. Son olarak beşinci kısımda elde edilen arıza mertbe işaretinin zaman-frekans boyutunda enerji seviyesi ve zaman boyutunda istatistiksel parametreleri hesaplanarak işaret özellikleri çıkartılmıştır.

4.2. Stator Sargı Arızasının Oluşturulması

ŞKSMSM’de stator sargı arızası üzerinde 2 farklı seviye için arıza çalışması yapılmıştır. Bu arızalar stator sargı direncine paralel olarak eklenen 50 ohm’luk dirençle oluşturulan A1 arızası ve stator sargı direncine paralel olarak eklenen 100 ohm’luk dirençle oluşturulan A2 arızasından oluşmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan ŞKSMSM'nin bir faz stator sargı direnci 2.2 ohm’dur. A1 arızası durumunda statorun eş değer sargı direnci 2.1072 ohm ve A2 arızası durumunda statorun eş değer sargı direnci 2.1526 ohm olmaktadır. Bu durumda % 4.22 ile A1 arızası büyük arıza seviyesini, % 2.16 ile A2 arızası da daha küçük arıza seviyesini ifade etmektedir. Sargı direncine paralel direnç ekleme yoluyla stator sargı arızasını oluşturmak için kullanılan ayarlanabilir direnç Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



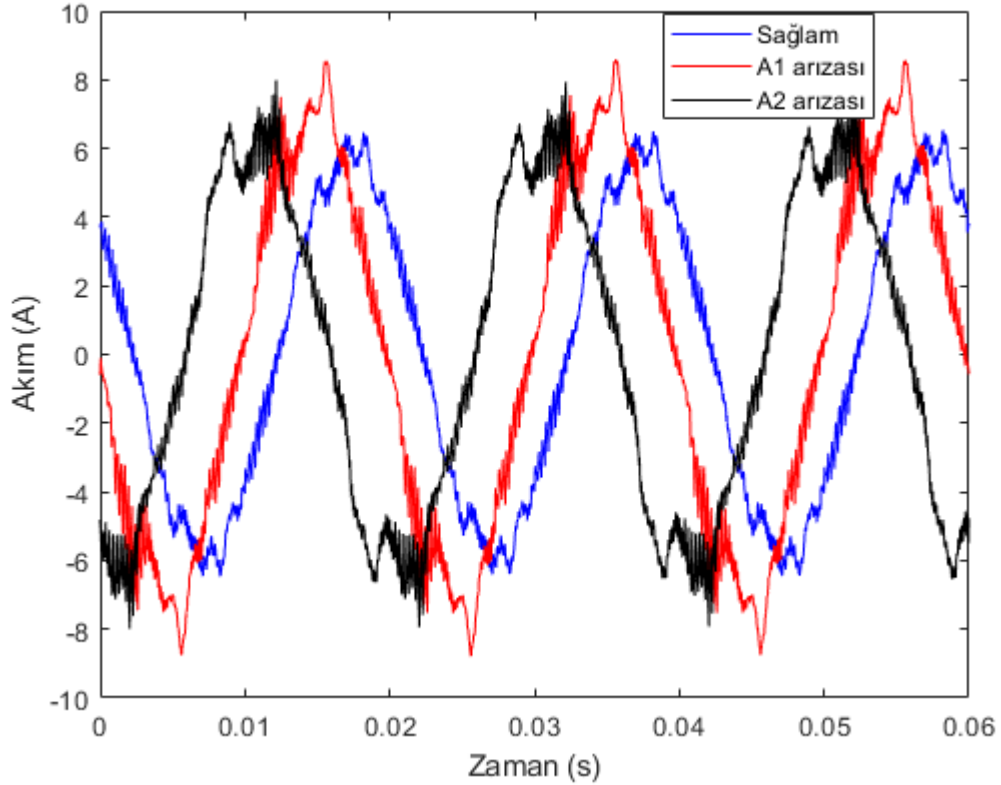
Şekil 4.4. Sargı arızası oluşumu

4.3. Stator Sargı Arızasının Arızalı Fazda Analizi

Bu kısımda ŞKSMSM’de oluşturulan farklı seviyelerdeki stator sargı arızalarının durağan ve dinamik çalışma koşullarında motor akımında meydana getirdiği değişiklikler HFD ve Gabor-MTA yöntemiyle incelenerek sağlam motor verileriyle karşılaştırılmış, elde edilen sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur.

4.3.1. Durağan çalışmada stator sargı arızasının tespiti

Bölüm 4.2'de açıklandığı gibi şKSMSM'de stator sargı arızası A1 ve A2 olmak üzere iki seviyede gerçekleştirilmiştir. Arıza sonucunda azalan sargı direnciyle birlikte makine nominal akımından daha yüksek bir akım çekecektir. Bu artışın yük artışı ile daha net değişeceği beklenmektedir. Durağan çalışmada sağlam şKSMSM nominal hızı olan 1500 d/d çalışma hızlarında 9 sn boyunca %0, %50, %75, %100 ve %115 yük altında çalıştırılarak 50 ks/sn örnekleme frekansı ile veri toplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Aynı işlemler A1 ve A2 arıza durumları için tekrarlanmıştır. 1500 d/d hız ve %100 yük altında çalışan şKSMSM'nin faz akımının sağlam, A1 ve A2 arıza durumları için üç periyotluk değişimleri şekil 4.5'de yer almaktadır.



şekil 4.5. Motor akım zaman grafiği (1500 d/d, %100 yüklü)

Şekil 4.5 incelendiğinde arıza miktarının artmasıyla akımın genlik değerinde de bir artış olduğu görülecektir. Bu değişimin daha net anlaşılabilmesi için motor akımı etkin değerinin yük durumuna göre değişimi Çizelge 4.3.'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Yük durumuna göre sargı arızası halinde motor akım etkin değerleri

	Sağlam	A1 Arızalı Durum	A2 Arızalı Durum
Boşta Çalışma	2.55 A	3.51 A	3.31 A
%50 Yüklü Çalışma	2.94 A	4.53 A	3.80 A
%75 Yüklü Çalışma	3.72 A	5.37 A	4.92 A
%100 Yüklü Çalışma	4.60 A	6.35 A	6.09 A
%115 Yüklü Çalışma	5.04 A	6.52 A	6.24 A

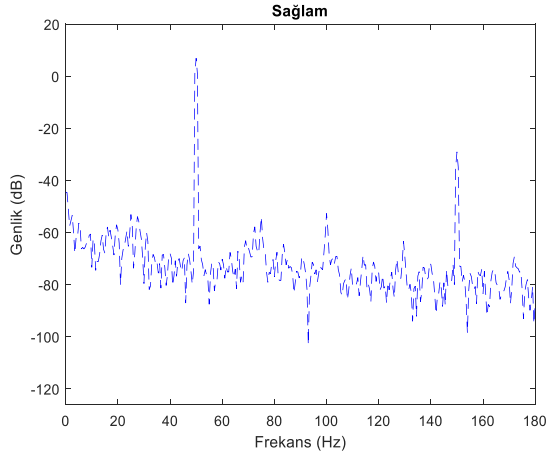
Çizelge 4.3'de görüldüğü gibi ŞKSMSM'nin sağlam, A1 ve A2 arıza durumları için çektiği akımın genlik etkin değerlerinde değişimler olduğu görülmektedir. Arıza miktarının artışı ile akımın etkin değerinde bir artış görülmektedir. Ayrıca akım genlik değerindeki bu artışın yük artışı ile doğrudan artış gösterdiği çok net bir şekilde gözlemlenmiştir.

ŞKSMSM'nin durağan koşulda boşta çalışma durumunda faz akımı HFD ve mertebe spektrumları Şekil 4.6'da sunulmuştur. Şekil 4.6 a,b,c motor akım frekans spektrumlarını temsil etmektedir. İlgili frekans spektrumları incelendiğinde daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi sargı arızalı stator akımlarının 3. harmoniğinin ($3f_s$) arıza ile ilgili bilgiler içerdiği görülmektedir. Şekil incelendiğinde hem ana frekans 50 Hz hem de 3. harmonik 150 Hz frekansta genlik değişimleri sırasıyla şu şekildedir: Sağlam durum için 6.94 dB ve -29.02 dB, A1 arıza durumu için 9.57 dB ve -13.35 dB ve son olarak A2 arıza durumu için 8.59 dB ve -15.72 dB'dir. Bu durumda Şekil 4.6'nın incelenmesi sonucunda beklenen frekans değerlerinde arıza ile birlikte genlik değişiminin olduğu ve arıza miktarının artışı ile birlikte genlik değerinde de artış olduğu görülmüştür.

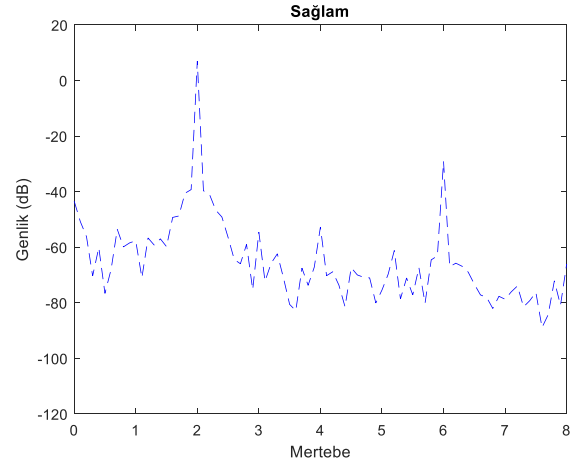
İlgili frekanslara karşılık gelen mertebeler Eşitlik 3.55 ile hesaplanarak çizelge 4.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Frekans-mertebe denklikleri

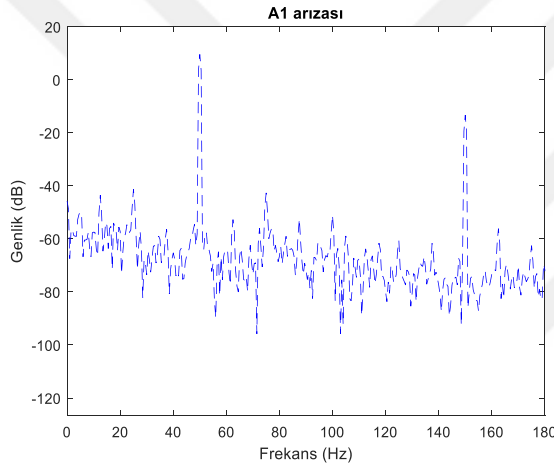
Mertebe	1	2	3	4	5	6	7	8
Frekans	25	50	75	100	125	150	175	200



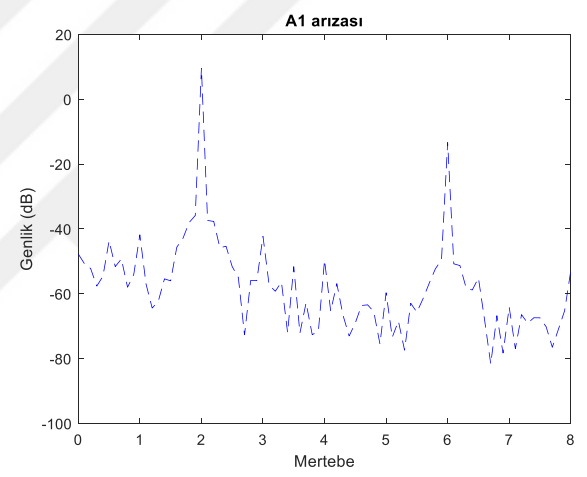
a)



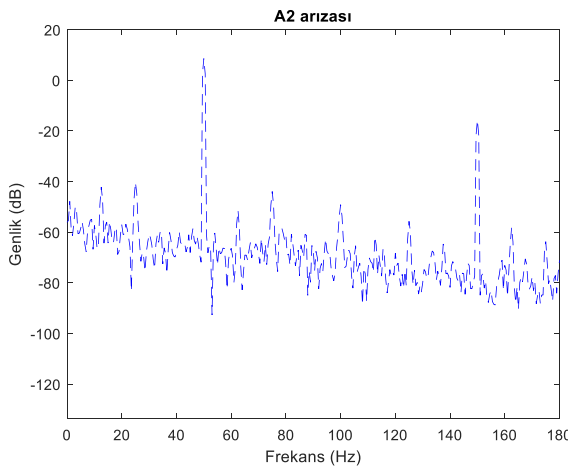
d)



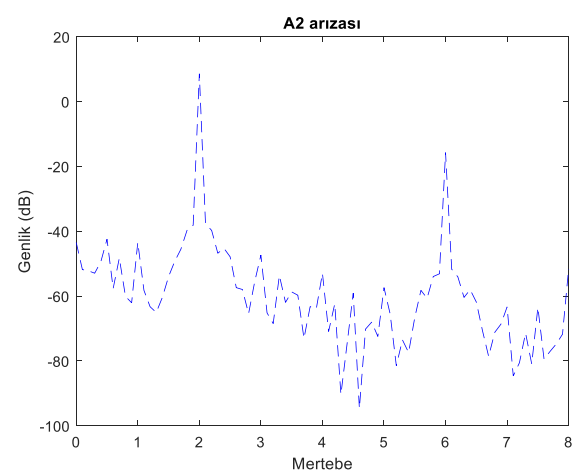
b)



e)



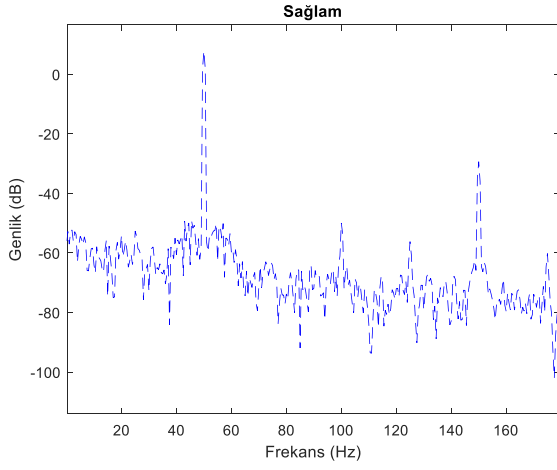
c)



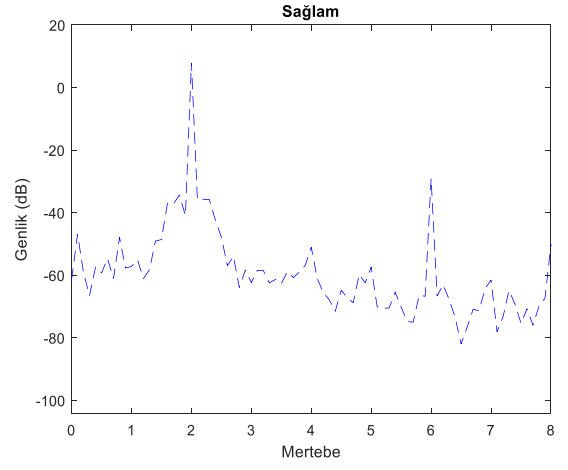
f)

Şekil 4.6. Durağan koşula boşa çalışma HFD ve mertebe spektrumları

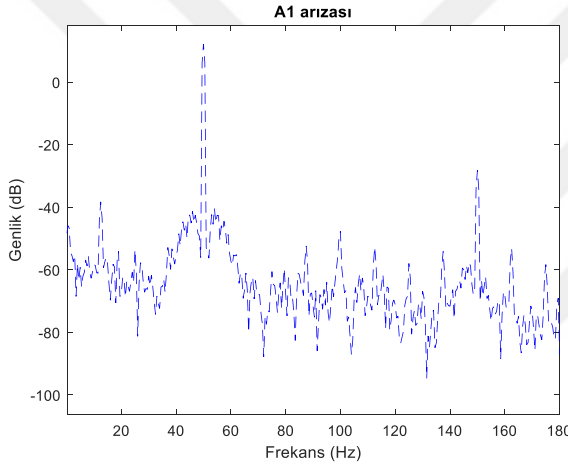
Şekil 4.6 d,e,f ise 1500 d/d hız ve boşta çalışma durumunda elde edilen motor faz akımı merteye spektrumlarıdır. Frekans spektrumunda herhangi bir frekans bileşenin yeri merteye spektrumunda Eşitlik 3.55 ile bulunmaktadır. Eşitlik gereğince temel besleme frekansı merteye spektrumunda 2. merteye seviyesinde, sargı arızası sebebiyle oluşması beklenen arıza bileşen ise 6. merteye seviyesindedir. Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da sırası ile boşta, %50, %75, %100 ve %115 yüklü koşullarda ŞKSMSM'nin 1500 d/d sabit hızda HFD ve merteye spektrumları yer almaktadır. İlgili şekilleri sırayla incelendiğinde hem ana frekans mertebesi 2 hem de 3. harmonikte oluşan arıza bileşeni frekans mertebesi 6 'daki genlik değişimleri sırasıyla verilmiştir. Boşta çalışma koşulunda sağlam durum için 6.95 dB ve -29.15 dB, A1 arıza durumu için 9.56 dB ve -13.32 dB ve son olarak A2 arıza durumu için 8.58 dB ve -15.72 dB'dir. %50 yüklü çalışma koşulunda sağlam durum için 7.87 dB ve -29.1 dB, A1 arıza durumu için 12.15 dB ve -28.1 dB ve A2 arıza durumu için 11.39 dB ve -31.25 dB'dir. %75 yüklü çalışma koşulunda sağlam durum için 10.04 dB ve -34.9 dB, A1 arıza durumu için 13.84 dB ve -19.43 dB ve A2 arıza durumu için 12.9 dB ve -25.36 dB'dir. %100 yüklü çalışma koşulunda sağlam durum için 12.45 dB ve -36 dB, A1 arıza durumu için 15.6 dB ve -13.4 dB ve A2 arıza durumu için 14.71 dB ve -19.3 dB'dir. %115 yüklü çalışma koşulunda sağlam durum için 13.05 dB ve -37.7 dB, A1 arıza durumu için 15.98 dB ve -13.75 dB ve A2 arıza durumu için 15.1 dB ve -16.7 dB'dir. Detaylı inceleme sonucunda beklendiği gibi ilgili mertebede arıza bileşeninin olduğu ve bu bileşendeki genlik değişiminin frekans spektrumu ile tutarlı olduğu görülmektedir. Ayrıca ilgili merteye değerlerinde arıza ile birlikte genlik değişiminin olduğu, arıza miktarının artışı ile birlikte bu genlik değişiminde de artış olduğu ve makinenin yüklenme durumu arttıkça ilgili mertebelerde genlik artışı tespit edilmiştir.



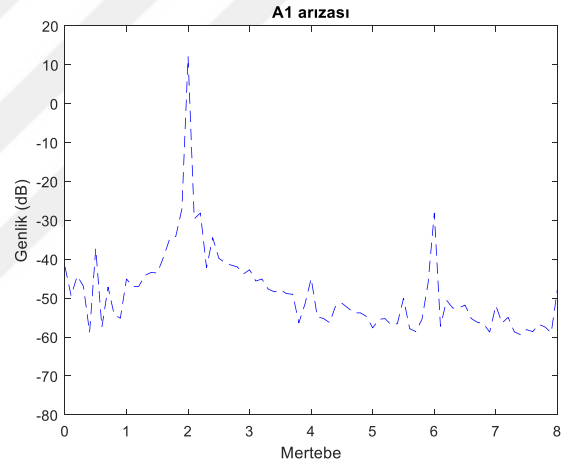
a)



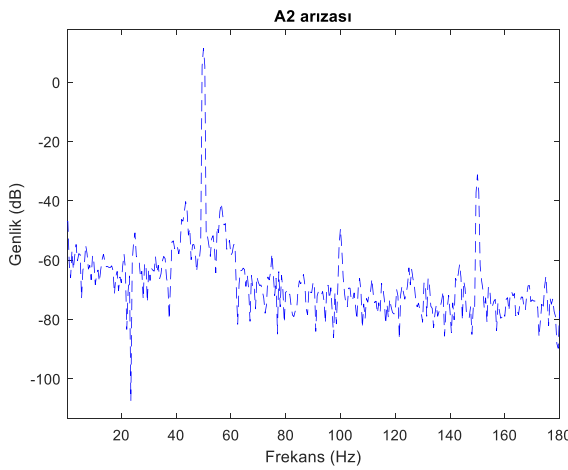
d)



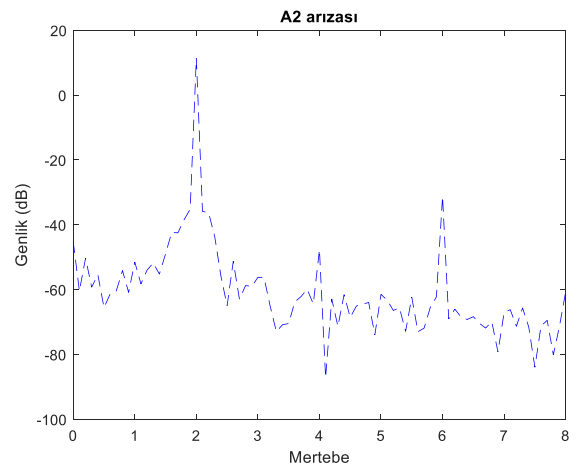
b)



e)

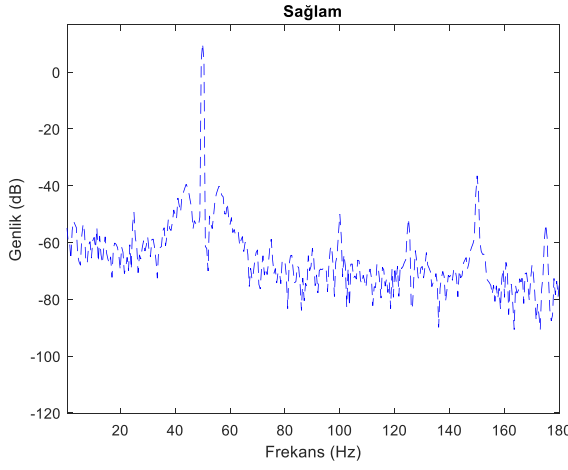


c)

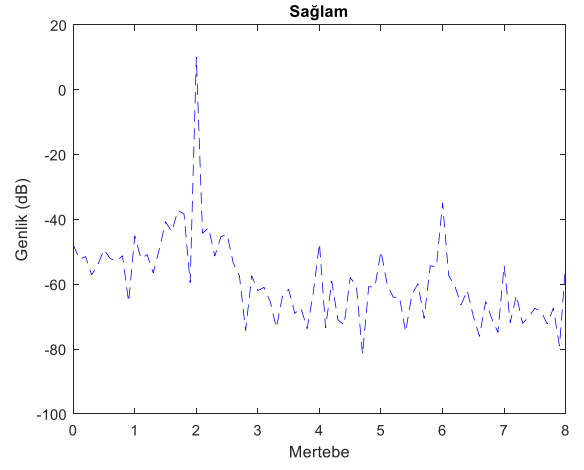


f)

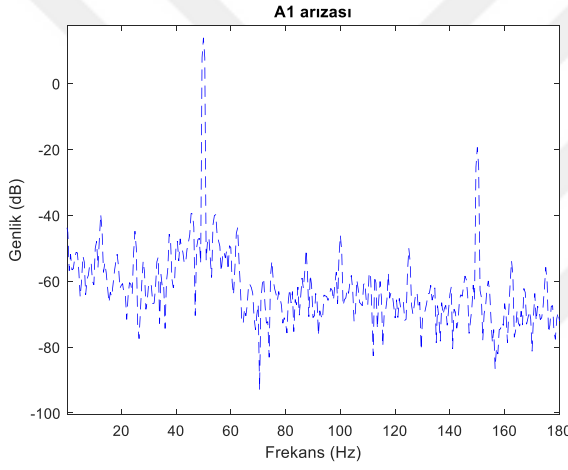
Şekil 4.7. Durağan koşullarda %50 yüklü çalışma HFD ve mertebe spektrumları



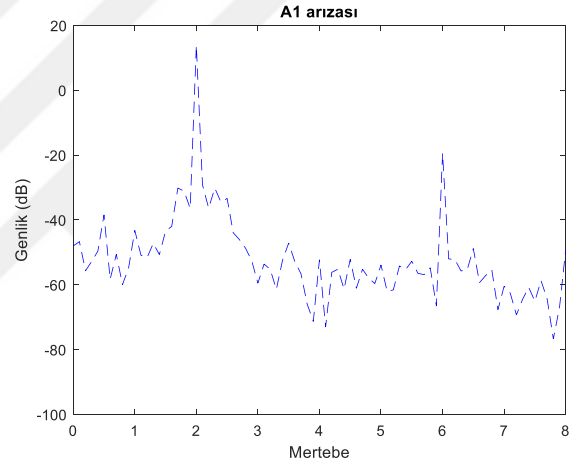
a)



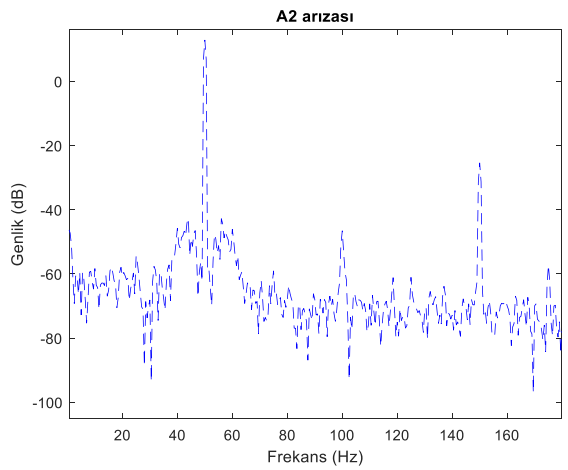
d)



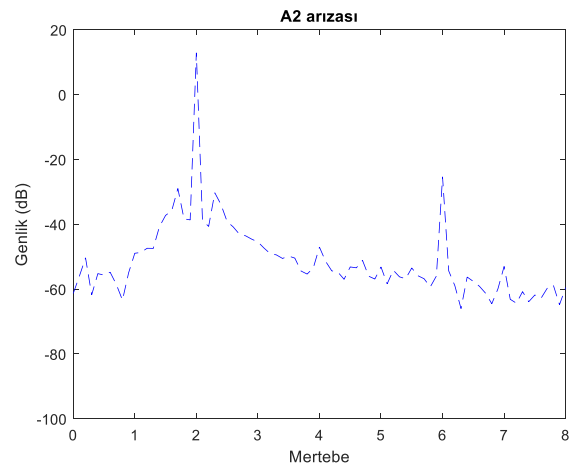
b)



e)

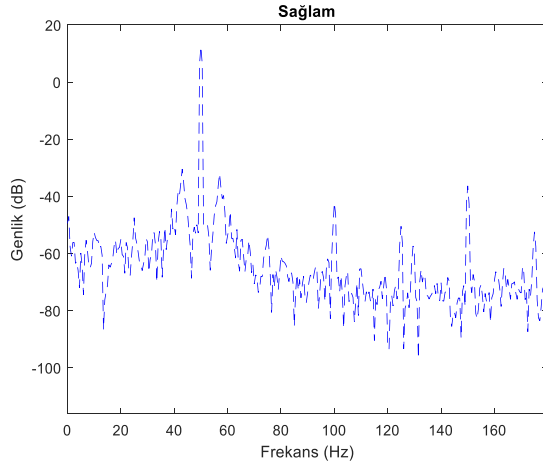


c)

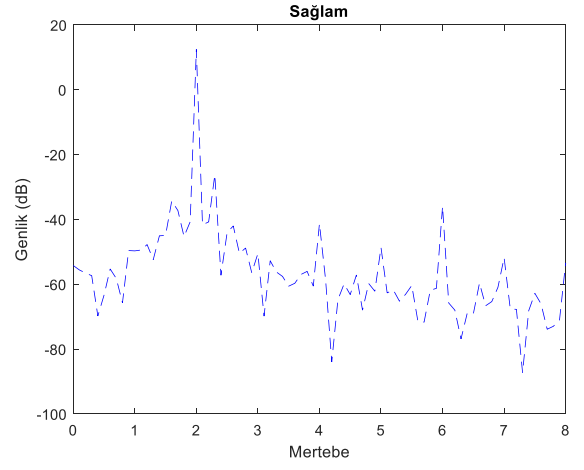


f)

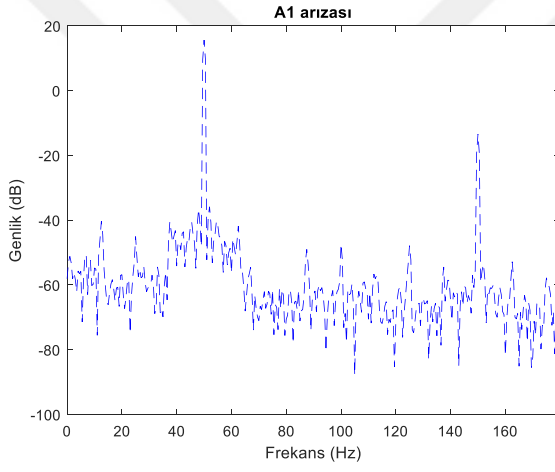
Şekil 4.8. Durağan koşullarda %75 yüklü çalışma HFD ve mertebe spektrumları



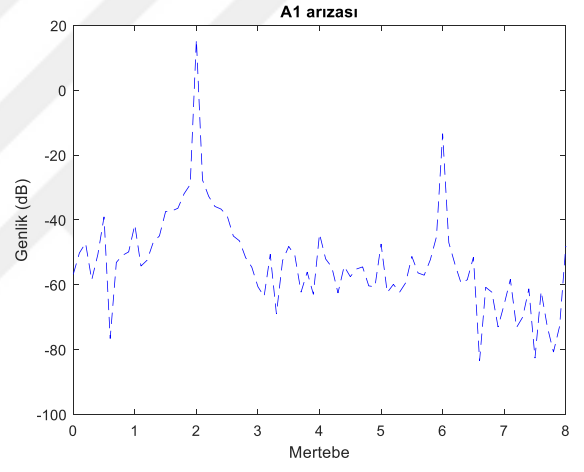
a)



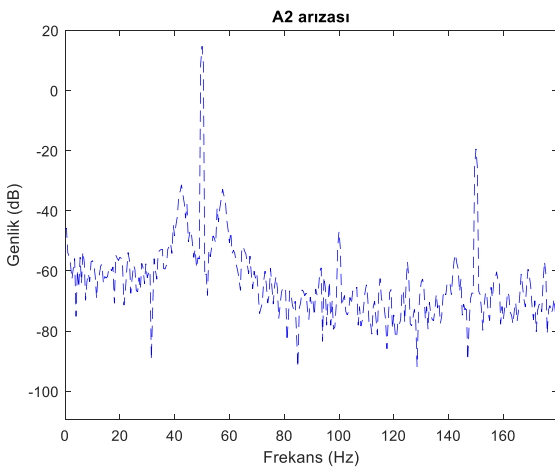
d)



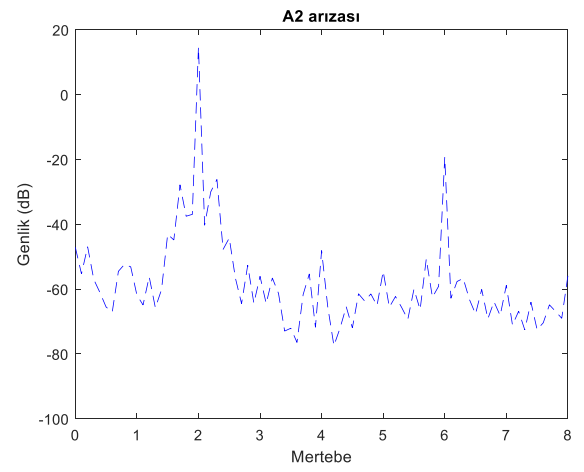
b)



e)

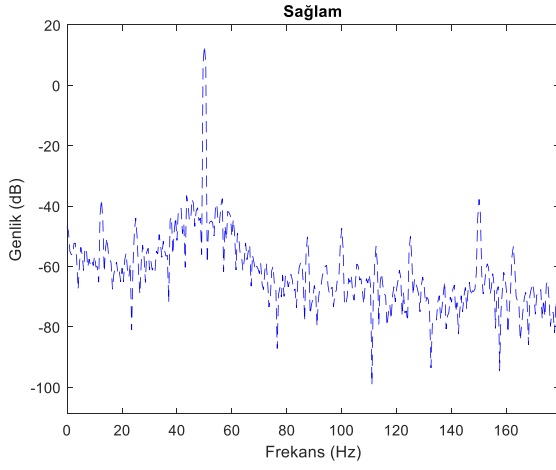


c)

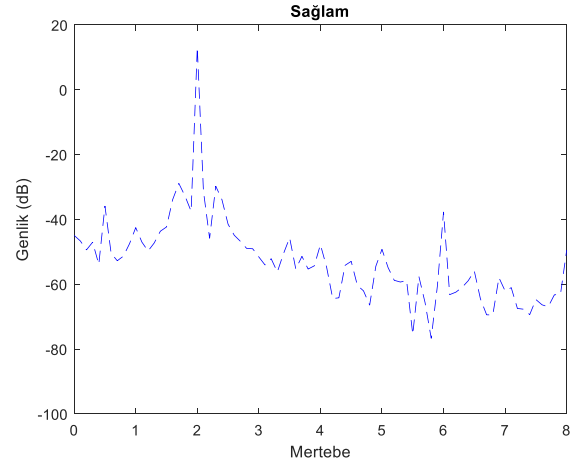


f)

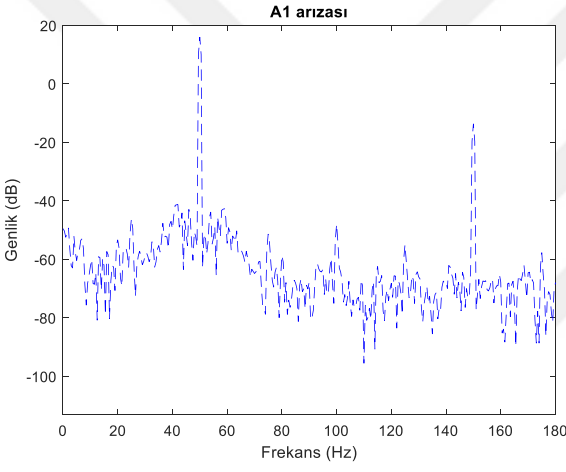
Şekil 4.9. Durağan koşullarda %100 yüklü çalışma HFD ve mertebe spektrumları



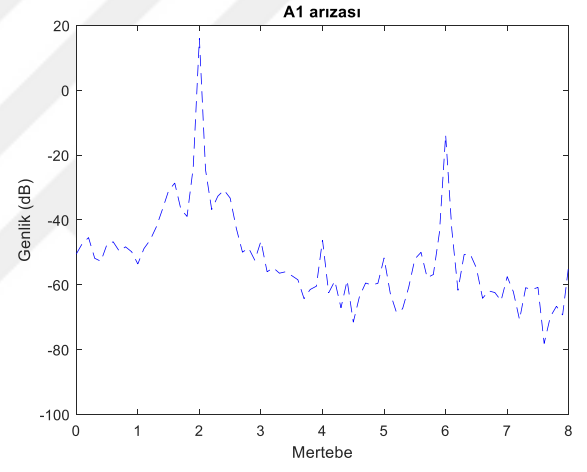
a)



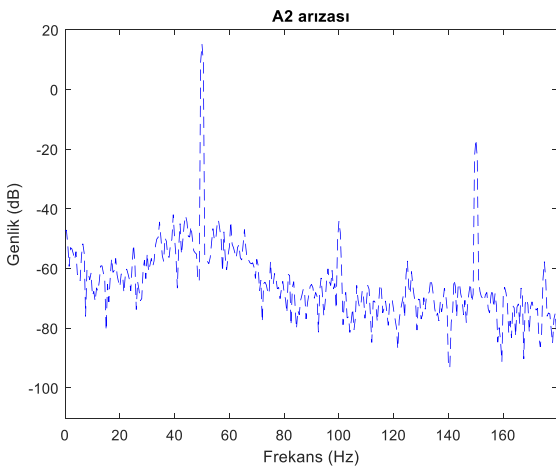
d)



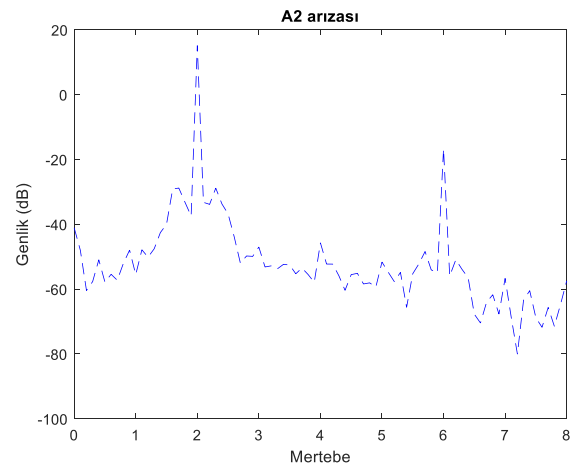
b)



e)



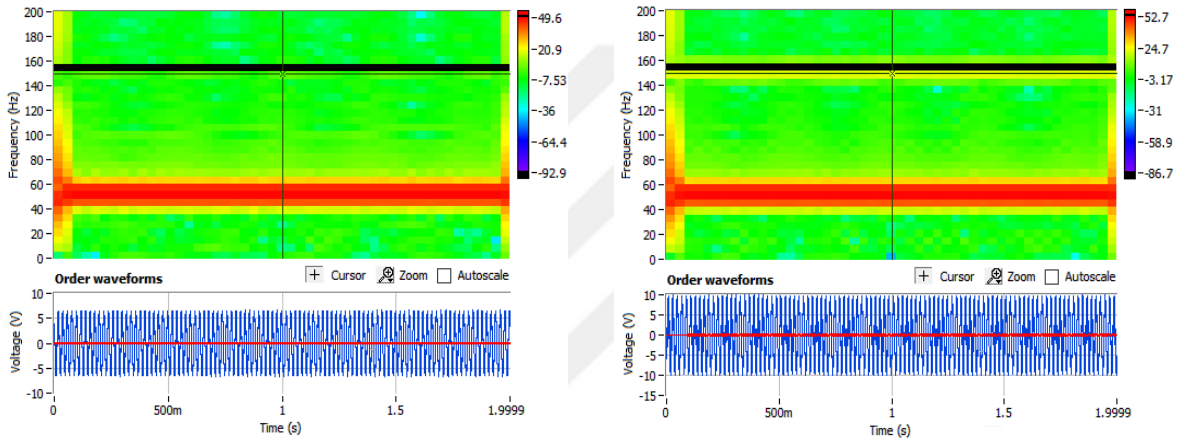
c)



f)

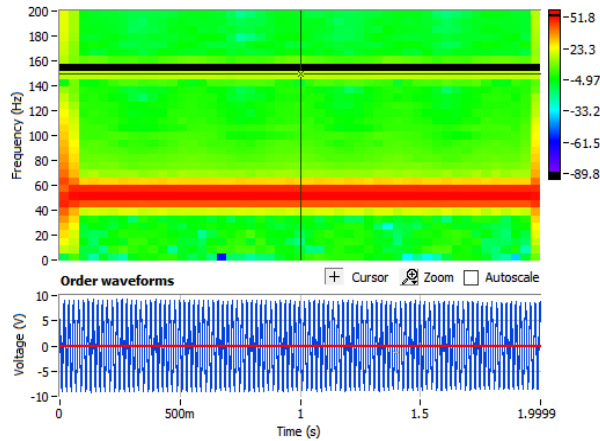
Şekil 4.10. Durağan koşulda %115 yüklü çalışma HFD ve mertebe spektrumları

Gabor MTA doğrusal ters zaman-frekans dönüşümlerinden birisi olarak, analiz edilen işaretin zamanla değişen davranışlarına dair bir fikir edinmeyi ve ters dönüşüm aracılığıyla belirli mertebe bileşenlerine ait dalga formunun yeniden yapılandırılmasını mümkün kılmaktadır. Gabor dönüşümlerinden yararlanarak hesaplanan 6. mertebenin zaman dalga şekli Labview Signal Express Toolbox'ta elde edilmiştir. Durağan koşulda %100 yüklü çalışmada makineye ait sağlam, A1 ve A2 arızalı durumlar için elde edilen 6. mertebe dalga şekilleri Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



a)

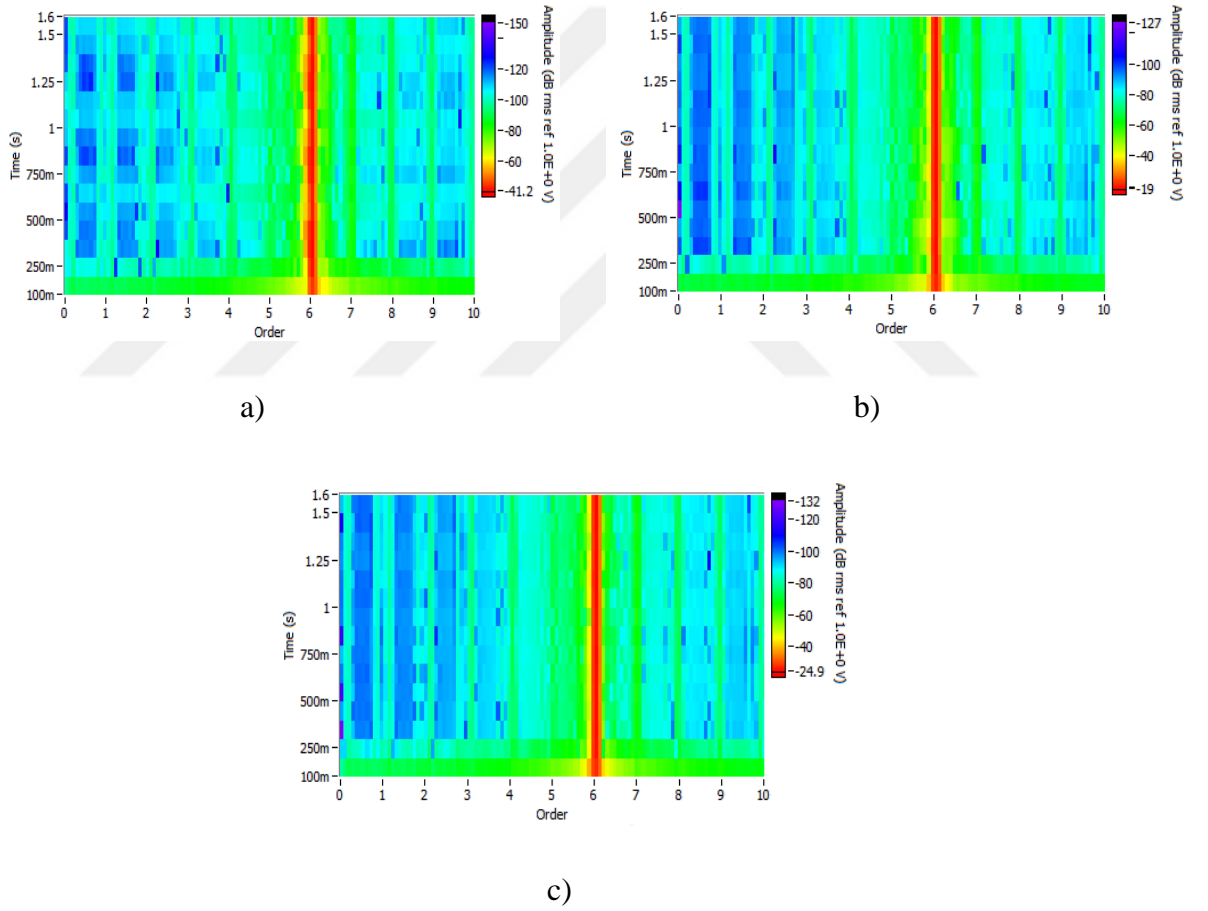
b)



c)

Şekil 4.11. Durağan koşulda % 100 yüklü çalışma 6. mertebe dalga şekilleri: a)Sağlam, b)A1 arızası, c)A2 arızası

HFD ve mertebe spektrumlarında ilgili frekans ve mertebelerde genlik artışı ile arıza tespiti mümkün olsa da farklı yükleme koşullarına bağlı olarak bazı deneylerde arıza seviyeleri arasında çok az genlik farkı olmasından dolayı arıza seviyelerini ayırt etmek güç hale gelmektedir. Bu sebeple çalışmada Gabor dönüşümlerinden yararlanılarak elde edilen arızaya ait 6. mertebenin işaret bileşeni diğer mertebelerden çıkarılarak enerji seviyesi incelenmiştir. Tüm koşullarda farklı yükler için çıkarılan 6. mertebenin enerji seviyesi incelenmiş olup sabit 1500 d/d hız %100 yüklü koşulda makineye ait sağlam, A1 ve A2 arızalı durumlar için elde edilen 6. mertebe enerji seviyeleri Şekil 4.12’de gösterilmiştir.

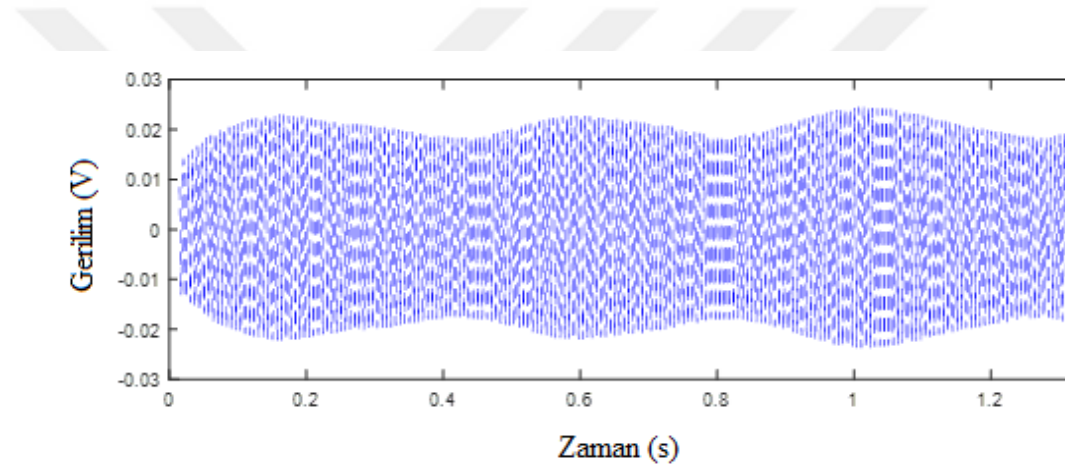


Şekil 4.12. Durağan koşulda % 100 yüklü çalışma 6. mertebe enerji seviyeleri şekilleri:
a)Sağlam, b)A1 arızası, c)A2 arızası

Şekiller detaylı incelendiğinde durağan koşulda %100 yüklü çalışma durumu için 6. mertebe enerji seviye değerleri sağlam durumda -41.2 dB, A1 arızası durumunda -19 dB ve A2 arızası durumunda -24.9 dB’dir. Sabit hız koşulunda diğer yükleme durumları için

de 6. mertebe enerji seviyeleri ayrı ayrı incelenmiş olup aynı doğrultuda sonuçlar elde edilmiştir. Görüldüğü gibi arızaya ait 6.mertebe enerji seviyesi incelendiğinde ŞKSMSM’de arıza durumunun kolaylıkla ayırt edilebildiği, arıza seviyesi arttıkça enerji değerlerinin de belirgin bir şekilde arttığı görülmüştür.

Bu çalışmada arıza seviyelerini daha belirgin ayırt etmek amacıyla ilgili arıza mertebesine ait işaret verilerinin istatistiksel parametreleri kullanılarak işaret özellikleri çıkartılmıştır. Bu istatistiksel parametreler standart sapma ve varyans parametreleridir. Gabor dönüşümlerinden yararlanılarak elde edilen arızaya ait 6. mertebe işaret bileşeninin zaman boyutundaki görüntüsü Şekil 4.13’de verilmiştir.

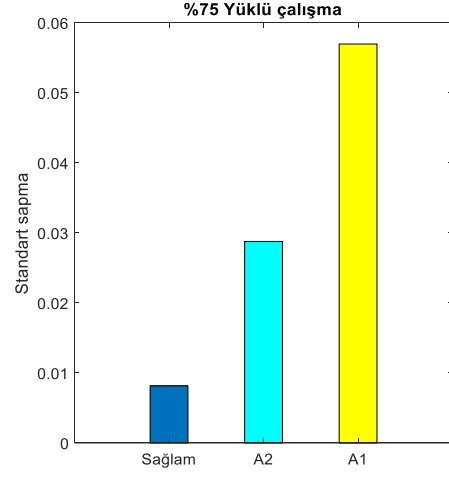
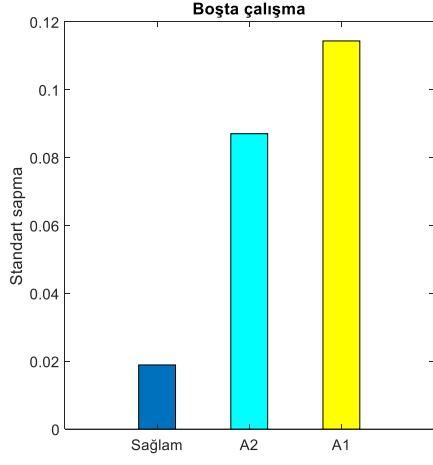


Şekil 4.13. 6. mertebe işaret grafiği

Şekil 4.13’de verilen işaretin İstatistik adımında standart sapma ve varyans parametreleri daha önceki kısımlarda bahsedilen Eşitlik 3.56 ve 3.57 aracılığıyla hesaplanmıştır. Hesaplanan bu parametreler her biri kendi çalışma koşulları içerisinde arıza durumlarına göre sınıflandırma sağlayacak biçimde Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de histogramlar haline getirilmiştir (Matlab, 2014).

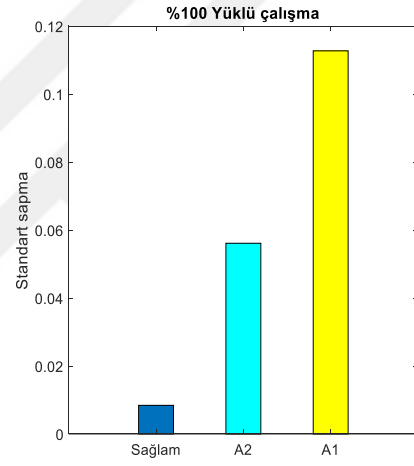
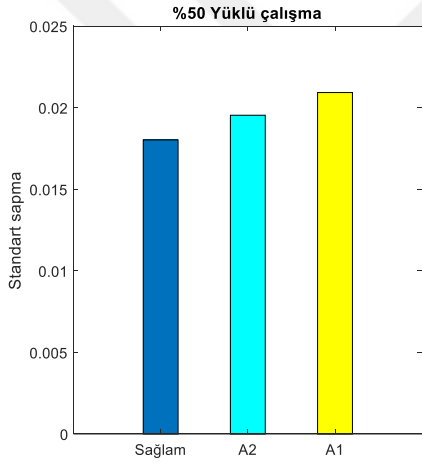
Şekiller detaylı olarak incelendiğinde durağan koşulda boşa çalışma durumu için standart sapma ve varyans değerleri sağlam durumda sırasıyla 0.0189091 ve 0.000357554, A1 arızası durumunda 0.114363 ve 0.013079 ve A2 arızası durumunda 0.0870258 ve 0.00757349 ’dir. Durağan koşulda %50 yüklü çalışma durumu için standart sapma ve varyans değerleri sağlam durumda sırasıyla 0.0180246 ve 0.000324886, A1 arızası durumunda 0.0209287 ve 0.000438012 ve A2 arızası durumunda 0.0195383 ve 0.000411363’dir. Durağan koşulda %75 yüklü çalışma durumu için standart sapma ve

varyans değerleri sağlam durumda sırasıyla 0.00814534 ve 6.63E-05, A1 arızası durumunda 0.0569599 ve 0.00324443 ve A2 arızası durumunda 0.0287762 ve 0.000828069'dir. Durağan koşulda %100 yüklü çalışma durumu için standart sapma ve varyans değerleri sağlam durumda sırasıyla 0.00842581 ve 7.10E-05, A1 arızası durumunda 0.112735 ve 0.0127092 ve A2 arızası durumunda 0.0561131 ve 0.00314868'dir. Durağan koşulda %115 yüklü çalışma durumu için standart sapma ve varyans değerleri sağlam durumda sırasıyla 0.00723951 ve 5.24E-05, A1 arızası durumunda 0.109999 ve 0.0120998 ve A2 arızası durumunda 0.0775761 ve 0.00601805'dir. Görüldüğü gibi arızaya ait 6. mertebenin zaman boyutunda analizi ile standart sapma ve varyans gibi istatistiksel verilerle de ŞKSMSM'de arıza tespitinin kolaylıkla yapılabildiği, arıza seviyesi arttıkça standart sapma ve varyans değerlerinin de arttığı görülmüştür.



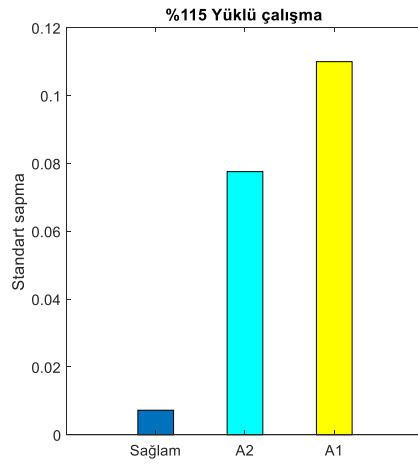
a)

c)



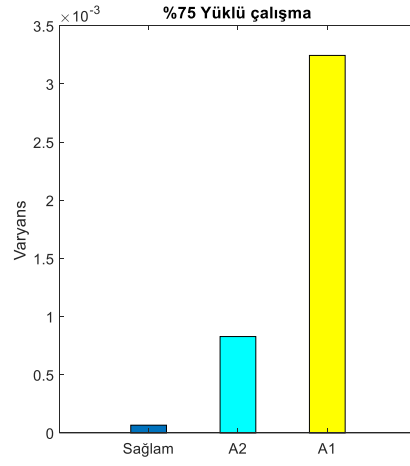
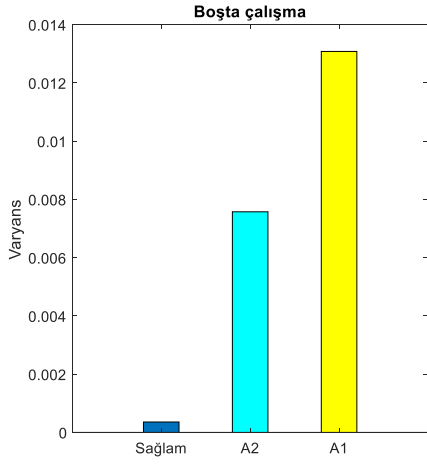
b)

d)



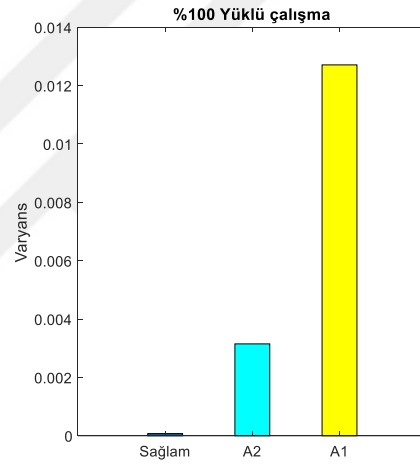
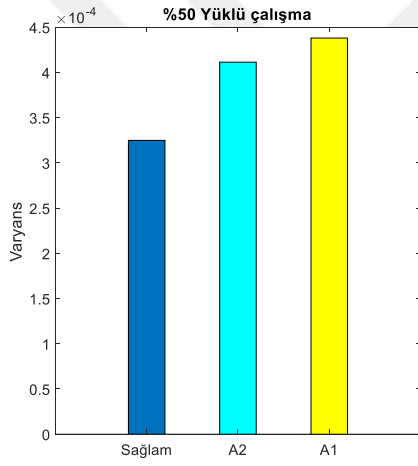
e)

Şekil 4.14. Durağan koşulda 6. mertebeye ait standart sapma histogramları (a.) Boşta çalışma, b) %50 yüklü, c) %75 yüklü, d) %100 yüklü, e)%115 yüklü çalışma)



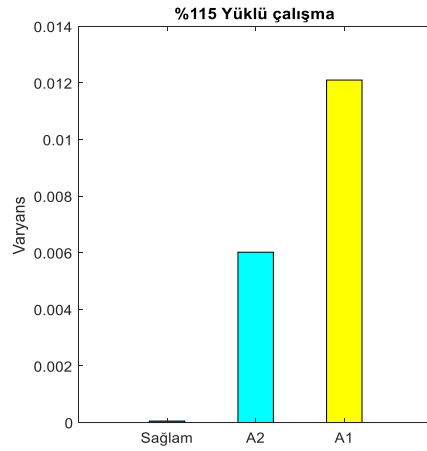
a)

c)



b)

d)



e)

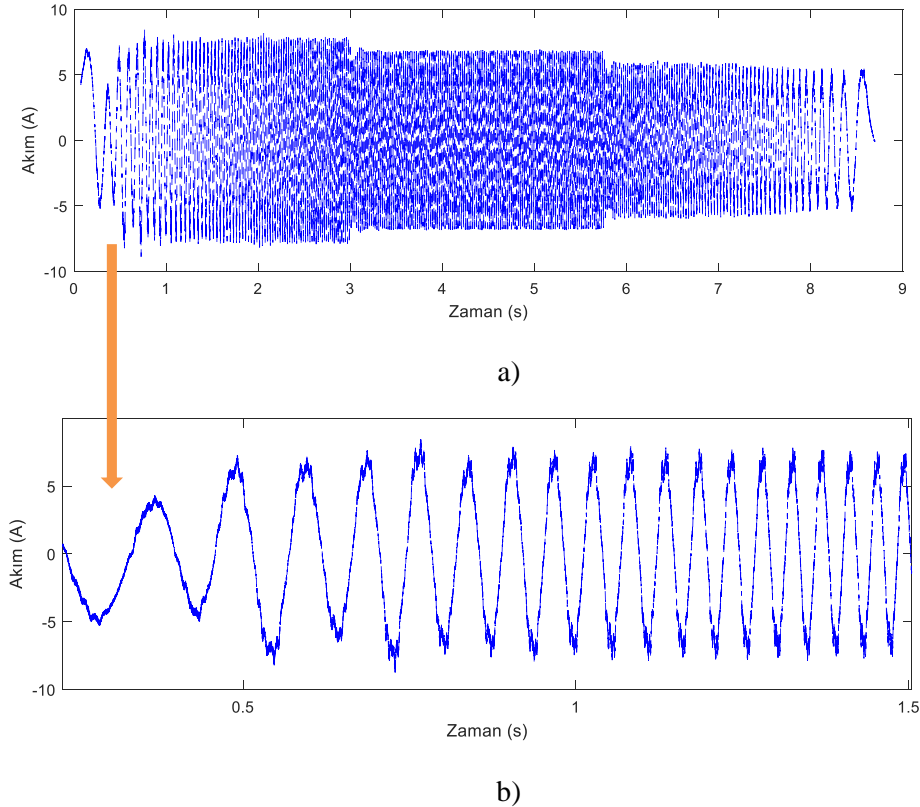
Şekil 4.15. Durağan koşulda 6. mertebeye ait varyans histogramları (a.) Boşta çalışma, b) %50 yüklü, c) %75 yüklü, d) %100 yüklü, e) %115 yüklü çalışma)

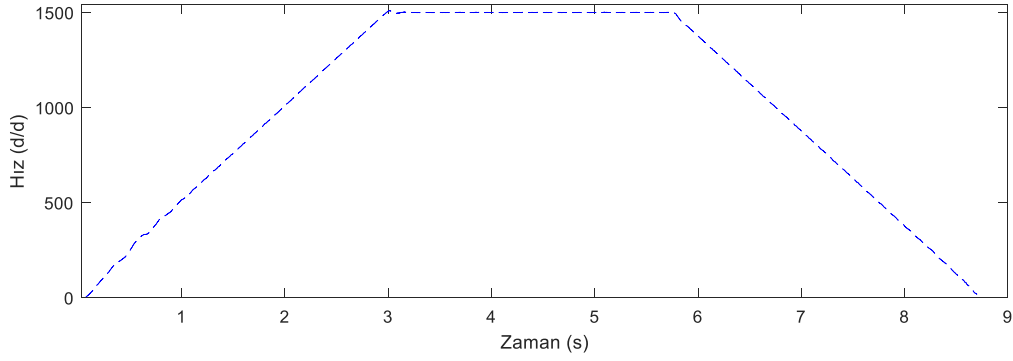
4.3.2. Dinamik çalışmada stator sargı arızasının tespiti

ŞKSMSM'ler buldukları sistem içerisinde sabit hız gerektiren uygulamalarda kullanılsa da yükselme ve yavaşlama referans rampaları veya değişken yük gibi dinamik koşullarda da çalıştırılmaktadır. Bu durumda motor uçlarına uygulanan gerilim, motor sargıları tarafından çekilen akım ve motor hızı da dinamik yapıdadır. HFD yöntemi arıza tespitinde en çok kullanılan yöntemdir. Yöntem durağan işaretlerde arızalara ait belirli frekans bileşenlerinin tespitinde başarılı olmasına rağmen zamana bağlı olarak değişen dinamik işaretlerde; temel besleme frekansı ve arızaya ait diğer frekans bileşenlerinin bant genişliği durağan çalışmaya göre daha büyük bir hal alır. Bu durumda sağlıklı bir arıza tespiti yapmak mümkün olmaz. Yapılan çalışmada dinamik koşullar değişken hız sabit yük ve değişken yük sabit hız olarak iki biçimde oluşturulmuştur.

Değişken hız sabit yük çalışma koşulunda arıza tespiti

Şekil 4.16'da 0-1500-0 d/d, %100 yüklü dinamik çalışmada akım/zaman ve hız/zaman grafiği yer almaktadır. Şekil 4.16'da görüldüğü gibi hızlanma (0-3.sn), durağan hızda çalışma (3-6.sn) ve yavaşlama (6-9.sn) olmak üzere tanımlanan hız eğrisine göre bu bölgelerde çekilen akımın hem genliği hem de frekansı birbirinden farklıdır.

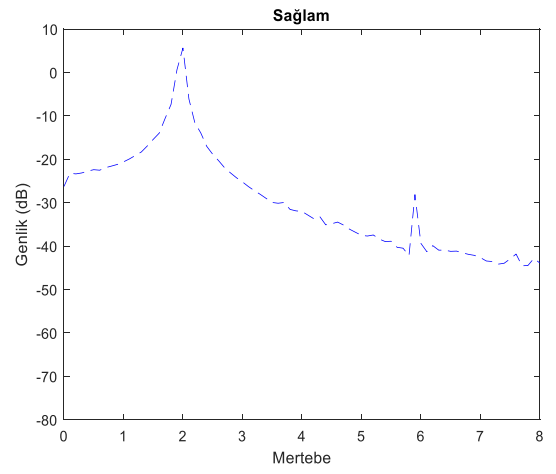
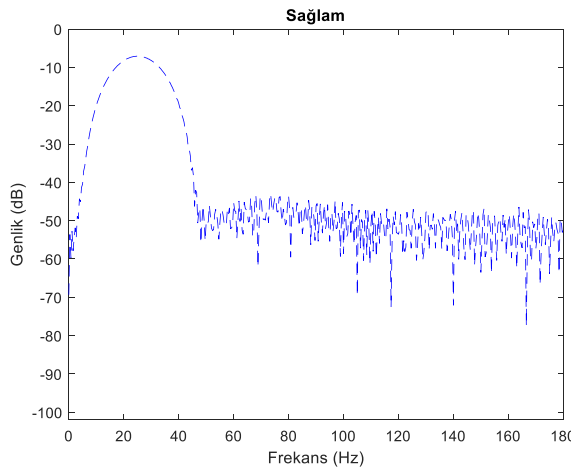




c)

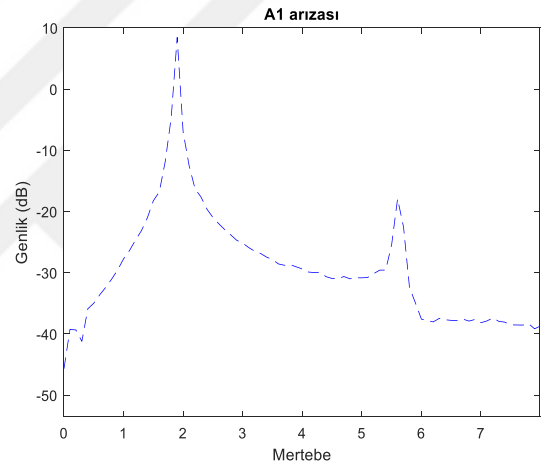
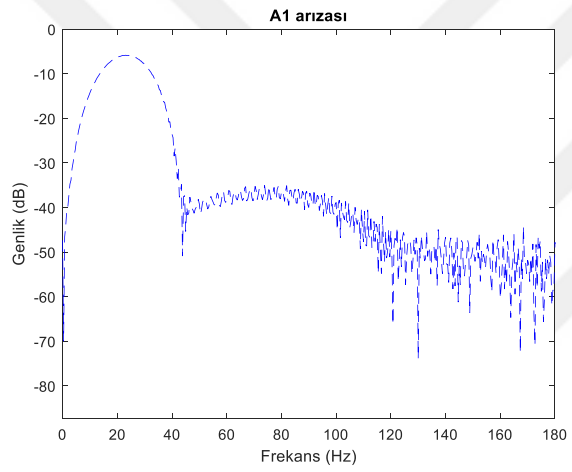
Şekil 4.16. 0-1500-0 d/d, %100 yüklü dinamik çalışma a-b) akım/zaman, c) hız/zaman grafiği

Bu hız profili ile çalışma şartlarında %0, %50, %75, %100 ve %115 yüklü durumlarda elde edilen HFD ve mertbe grafikleri Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de sunulmuştur. Dinamik koşulda boşa çalışma HFD grafikleri Şekil 4.17 a,b,c incelendiğinde stator sargı arızası sebebiyle akımların 3.harmoniğinde ($3f_s$) yani 150 Hz'de görülmesi gereken frekans bileşeninin görülemediği tespit edilmiştir. Aynı zamanda yapılan analizde temel besleme frekansı 50 Hz'nin dahi tespit edilemediği görülmüştür. Bu durumun sebebi motorun ilk 3 saniye hızlanma anında sürekli değişen frekansıdır. Frekans sürekli kaydığı için HFD doğru dönüşümü yakalayamamıştır. Dinamik çalışmada 150 Hz'de genlik değişiminin olmaması arızaya dair net bilgiler vermemektedir. MTA yönteminin HFD'ye göre başarısı ve üstünlükleri dinamik işaretlerde daha net ortaya çıkmaktadır. Çünkü yöntemin temeli izlenen dinamik akım işaretini, dinamik hız işaretine göre mertbe boyutunda durağan hale getirmektir. Şekil 4.17 d,e,f'den de görüleceği üzere elde edilen mertbe değerleri durağan çalışmada elde edilen sonuçlara benzerdir. 2. ve 6. mertbe seviyelerinde arızaya bağlı olarak genlik değişimleri görülmektedir. Bu mertbe seviyelerindeki genlik değişimleri sırasıyla şu şekildedir: Boşa çalışma koşulunda sağlam durum için 3.309 dB ve -32.8 dB, A1 arıza durumu için 8.46 dB ve -17.93 dB ve son olarak A2 arıza durumu için 7.81 dB ve -20.35 dB'dir.



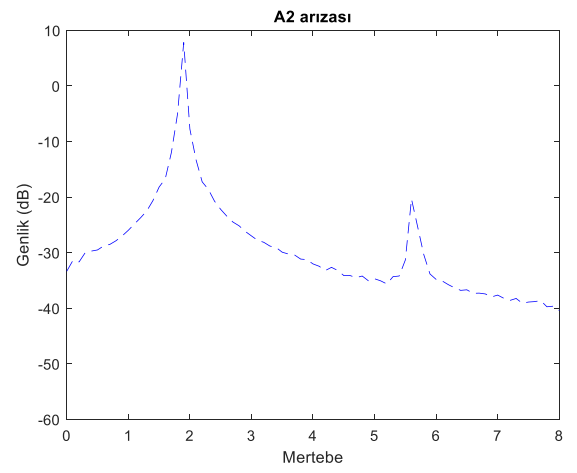
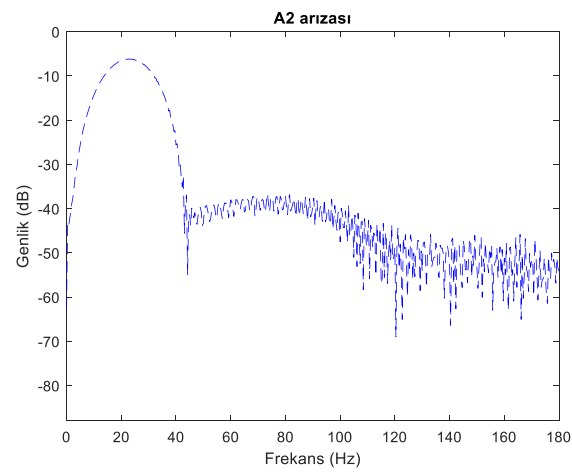
a)

d)



b)

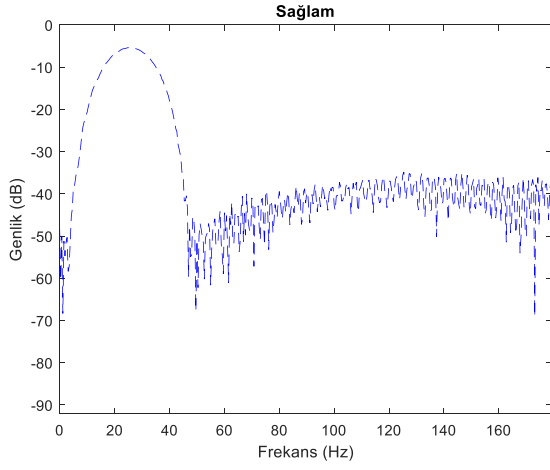
e)



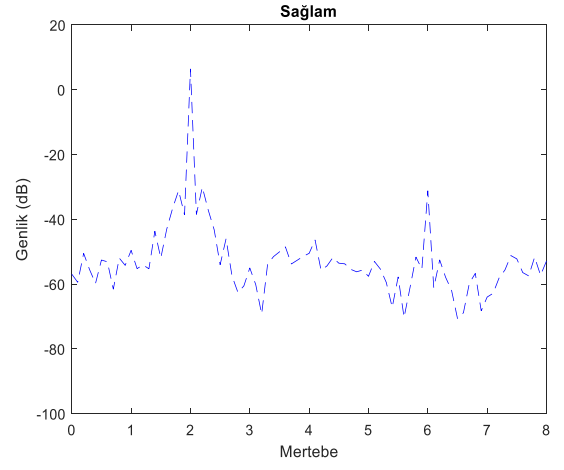
c)

f)

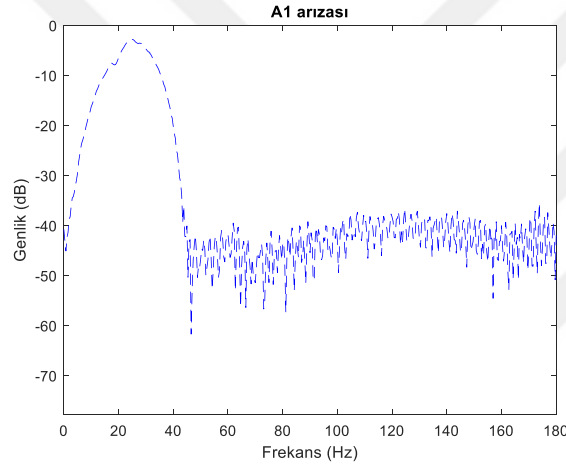
Şekil 4.17. Dinamik koşulda boştaki çalışma HFD ve mertebe spektrumları



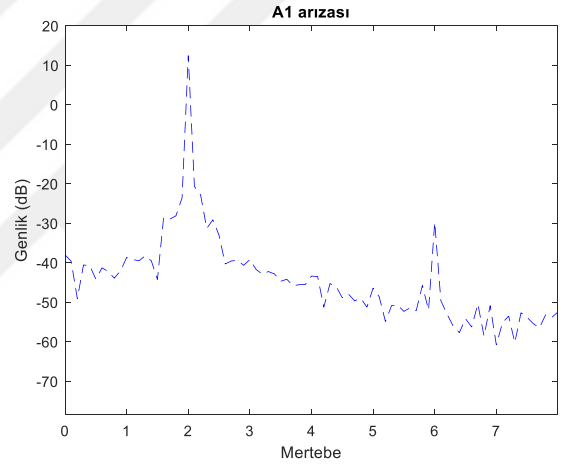
a)



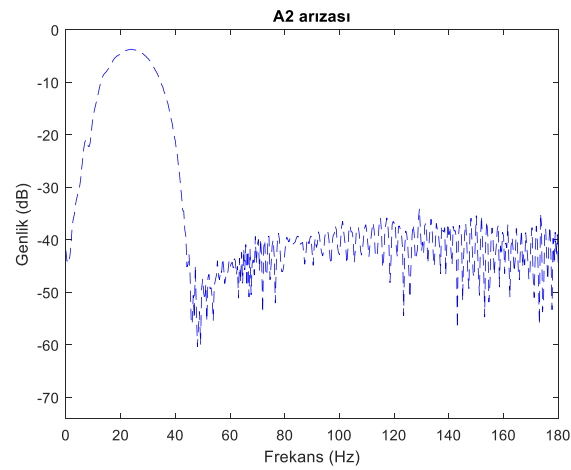
d)



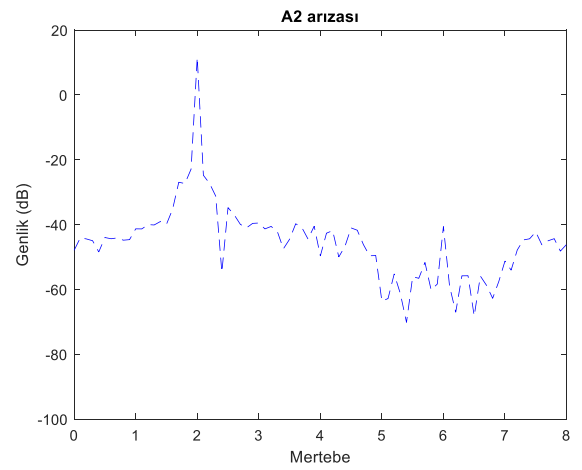
b)



e)

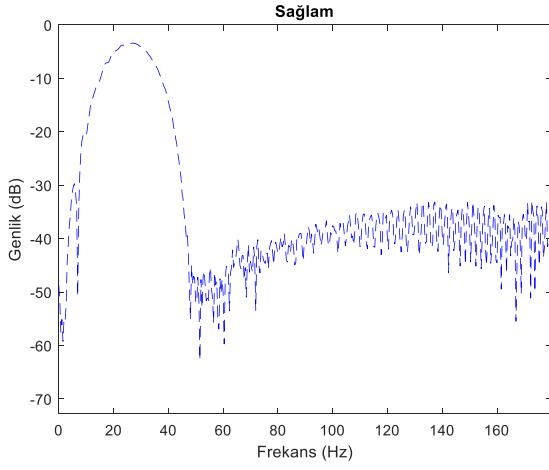


c)

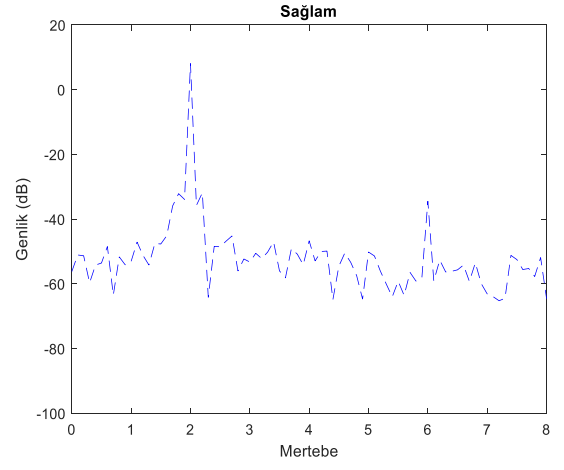


f)

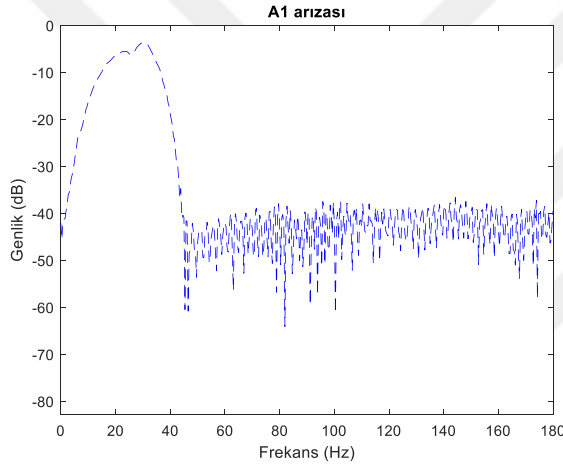
Şekil 4.18. Dinamik koşulda %50 yüklü çalışma HFD ve mertebe spektrumları



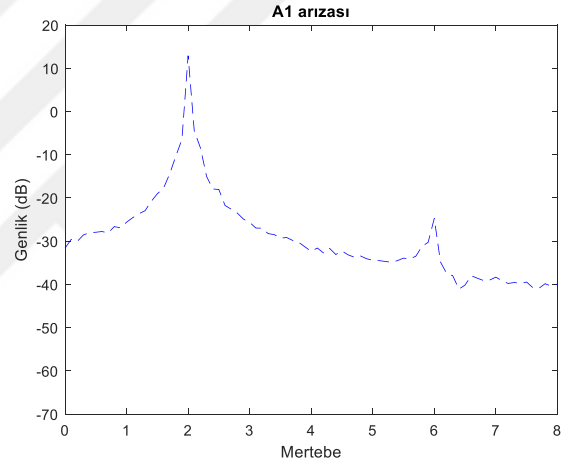
a)



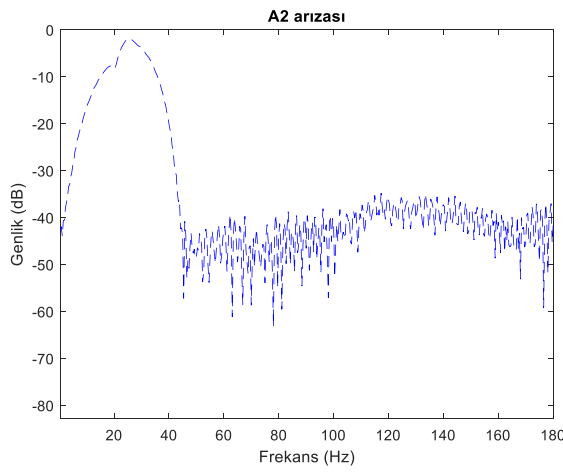
d)



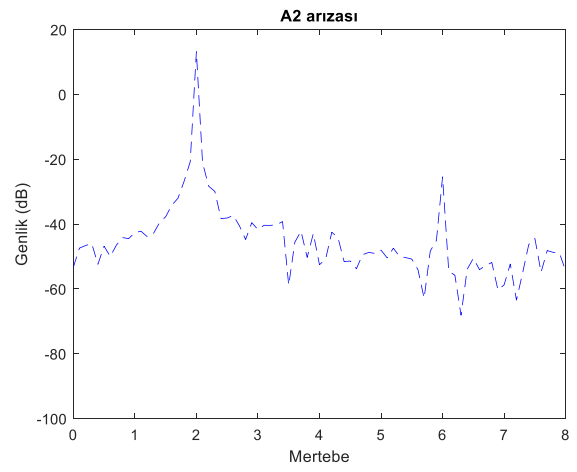
b)



e)

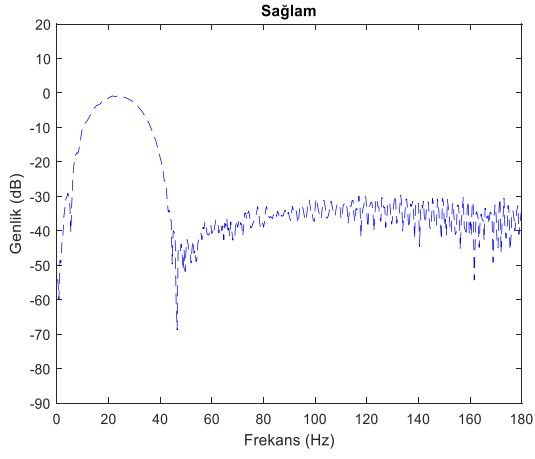


c)

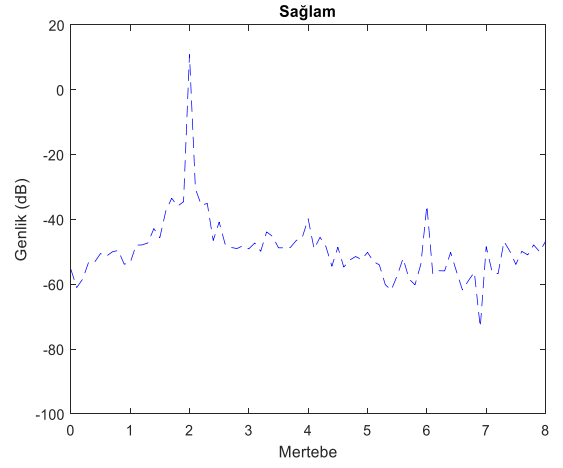


f)

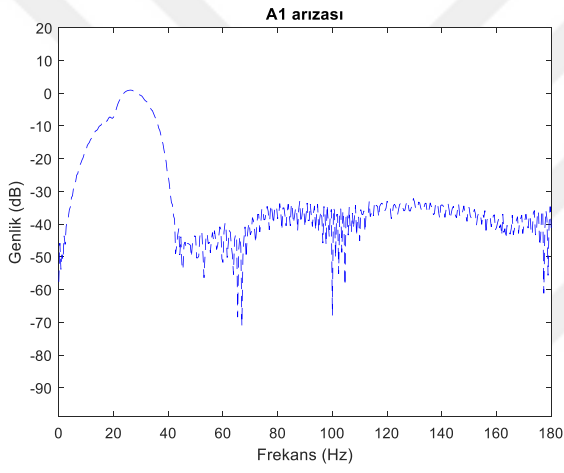
Şekil 4.19. Dinamik koşulda %75 yüklü çalışma HFD ve mertebe spektrumları



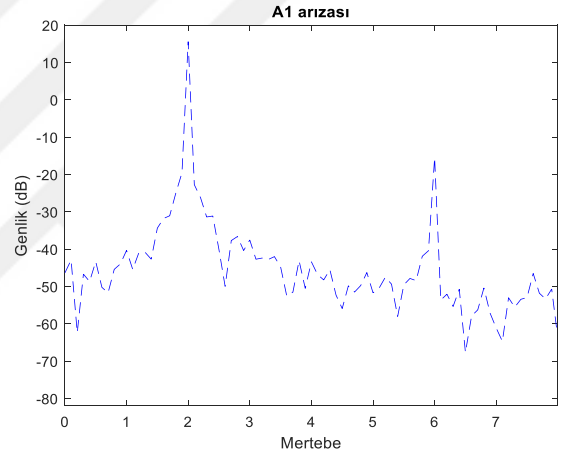
a)



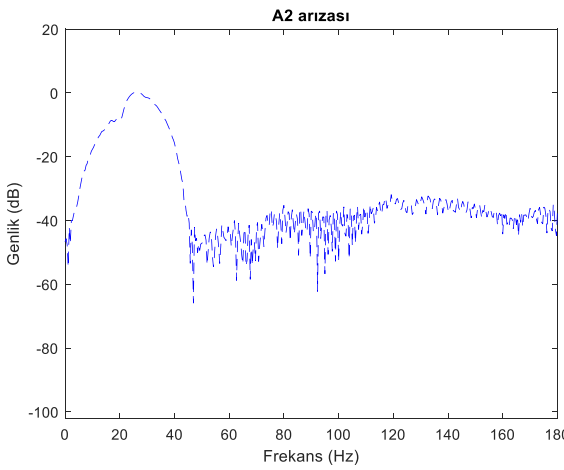
d)



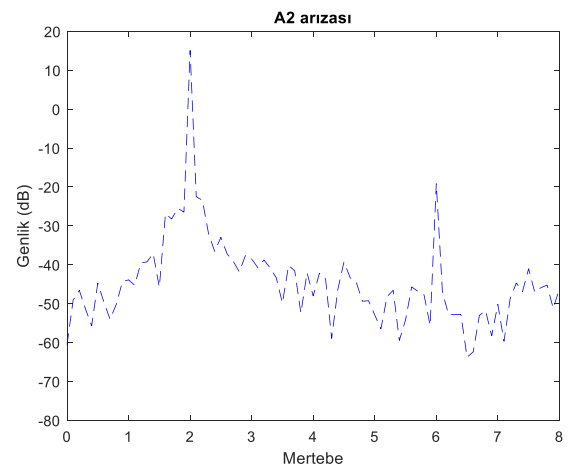
b)



e)

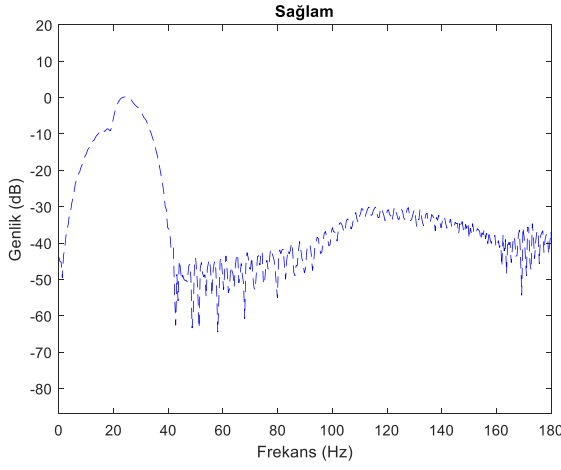


c)

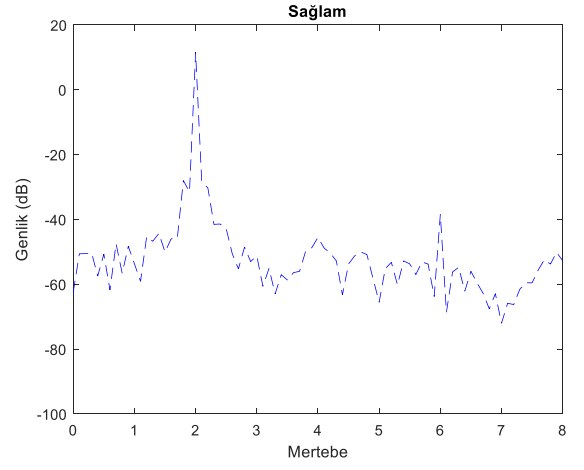


f)

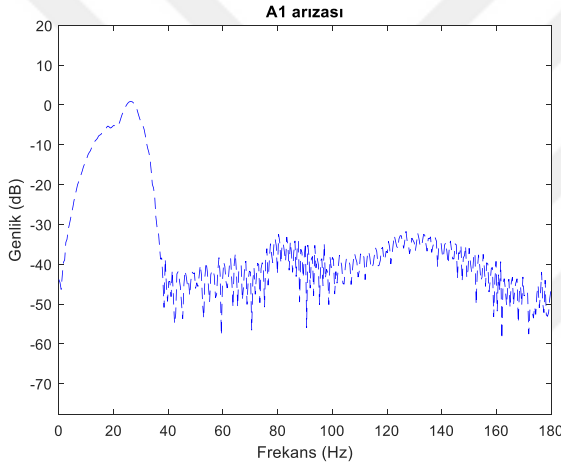
Şekil 4.20. Dinamik koşulda %100 yüklü çalışma HFD ve mertebe spektrumları



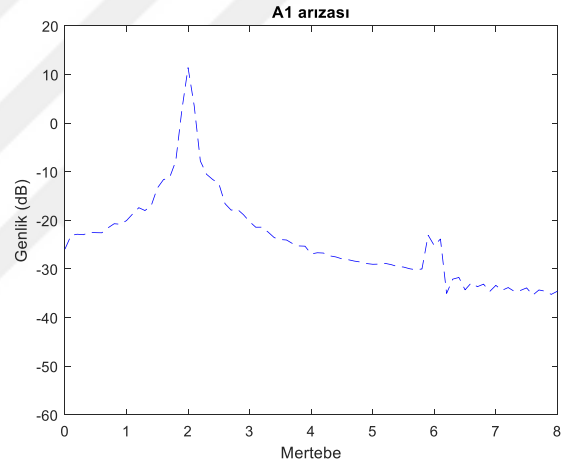
a)



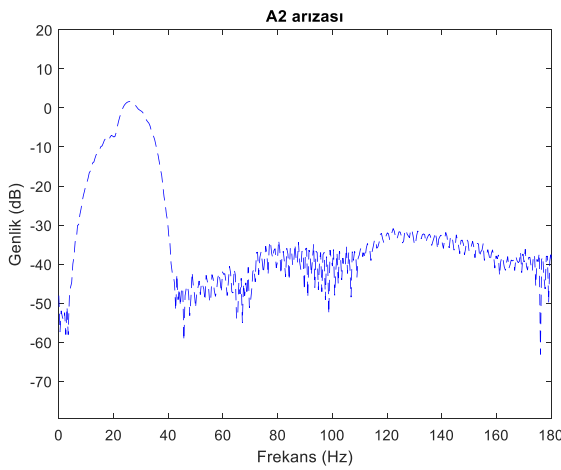
d)



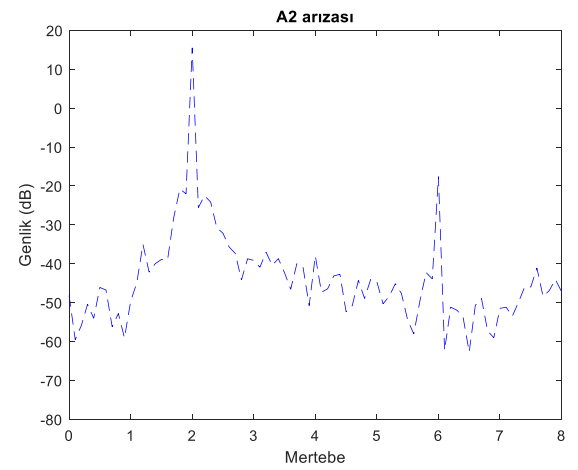
b)



e)



c)

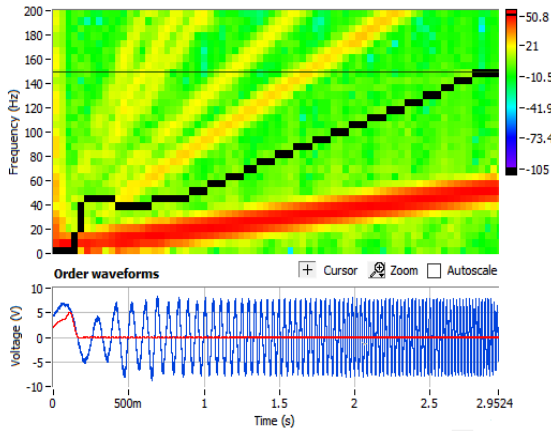


f)

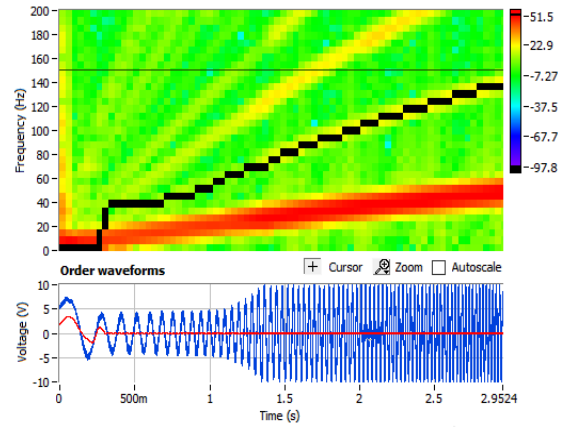
Şekil 4.21. Dinamik koşulda %115 yüklü çalışma HFD ve mertebe spektrumları

Nominal hız için tanımlanan hızlanma-yavaşlanma akımından elde edilen HFD ve merteye spektrumları Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de 0-1500-0 d/d için verilmiştir. Merteye spektrumundan elde edilen değerlere göre durağan çalışmada olduğu gibi 2. ve 6. merteye seviyelerinde genlik değişimi mevcuttur. Bu merteye seviyelerindeki genlik değişimleri sırasıyla şu şekildedir: Dinamik koşulda %50 yüklü çalışma sağlam durum için 8.48 dB ve -37.36 dB, A1 arıza durumu için 12.39 dB ve -29.78 dB ve son olarak A2 arıza durumu için 11.55 dB ve -41.65 dB'dir. Dinamik koşulda %75 yüklü çalışma sağlam durum için 10.42 dB ve -36.35 dB, A1 arıza durumu için 12.906 dB ve -24.72 dB ve son olarak A2 arıza durumu için 13.2 dB ve -25.43 dB'dir. Dinamik koşulda %100 yüklü çalışma sağlam durum için 12.98 dB ve -48 dB, A1 arıza durumu için 15,58 dB ve -15.52 dB ve son olarak A2 arıza durumu için 15.1 dB ve -19.15 dB'dir. Dinamik koşulda %115 yüklü çalışma sağlam durum için 13.25 dB ve -38.05 dB, A1 arıza durumu için 16.41 dB ve -25.2 dB ve son olarak A2 arıza durumu için 15.5 dB ve -17.61 dB'dir. Değişken hız sabit yük koşulu olan dinamik çalışmada ŞKSMSM akım işaretinin 2. ve 6. merteye seviyelerindeki yük ve hız durumuna göre spektrum genlik değişimi A1 ve A2 stator sargı arıza durumları için ilgili şekillerde sunulmuştur. HFD yöntemiyle yapılan analizde ise arıza ile birlikte durağan çalışmada temel frekans genliğinde de değişimler olduğu görülmüştür. Dinamik çalışmada ise HFD yönteminin dinamik işaretlerdeki başarısızlığından dolayı yetersiz kaldığı ve arızaya dair net bilgiler içermediği görülmüştür. MTA yöntemi sonuçları hem durağan hem de değişken hız sabit yük koşulu olan dinamik çalışmada stator sargı arızasının net bir şekilde tespit edilebileceğini göstermiştir.

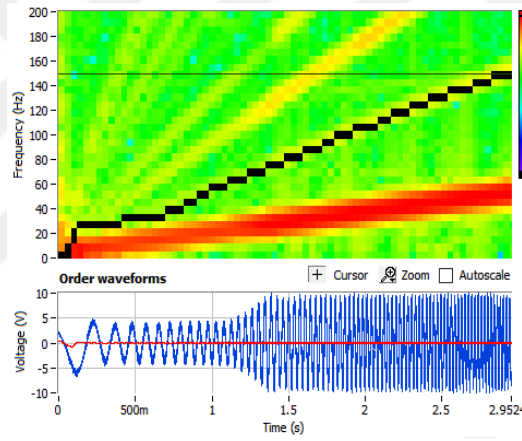
Gabor MTA doğrusal ters zaman-frekans dönüşümlerinden birisi olarak, analiz edilen işaretin zamanla değişen davranışlarına dair bir fikir edinmeyi ve ters dönüşüm aracılığıyla belirli merteye bileşenlerine ait dalga formunun yeniden yapılandırılmasını mümkün kılmaktadır. Gabor dönüşümlerinden yararlanarak hesaplanan 6. mertebenin zaman dalga şekli Labview Signal Express Toolbox'ta elde edilmiştir. Dinamik koşulda %100 yüklü çalışmada makineye ait sağlam, A1 ve A2 arızalı durumlar için elde edilen 6. merteye dalga şekilleri Şekil 4.22'de gösterilmiştir.



a)



b)

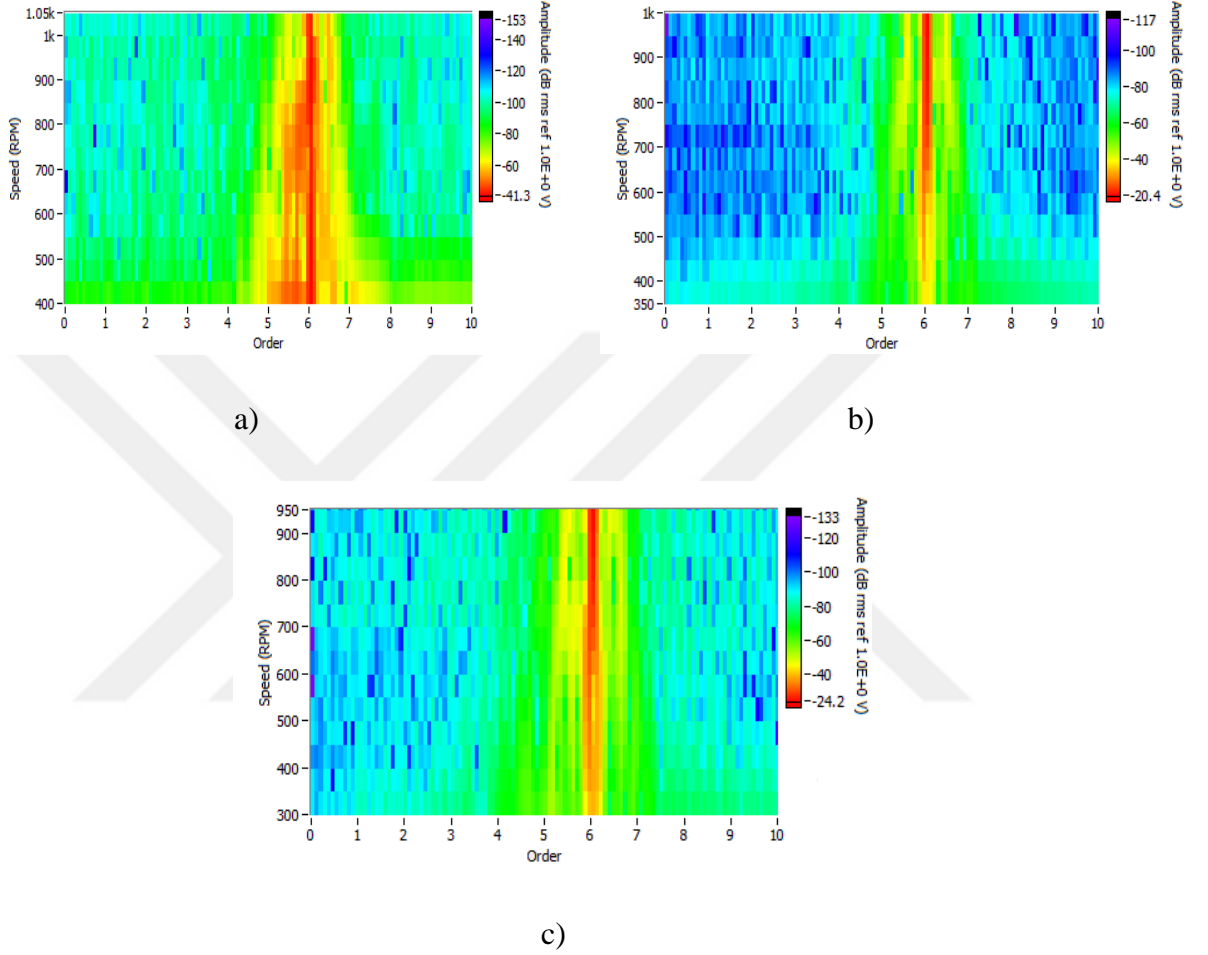


c)

Şekil 4.22. Dinamik koşulda %100 yüklü çalışma 6. mertebe dalga şekilleri: a)Sağlam, b)A1 arızası, c)A2 arızası

Dinamik çalışma koşullarında durağan çalışmada olduğu gibi HFD ve mertebe spektrumlarında ilgili frekans ve mertebelerde genlik artışı ile arıza tespiti mümkün olsa da farklı yükleme koşullarına bağlı olarak bazı deneylerde arıza seviyeleri arasında çok az genlik farkı olmasından dolayı arıza seviyelerini ayırt etmek güç hale gelmektedir. Bu sebeple çalışmada Gabor dönüşümlerinden yararlanılarak elde edilen arızaya ait 6. mertebenin işaret bileşeni diğer mertebelerden çıkarılarak enerji seviyesi incelenmiştir. Tüm koşullarda farklı yükler için 6. mertebenin enerji seviyesi incelenmiş olup dinamik

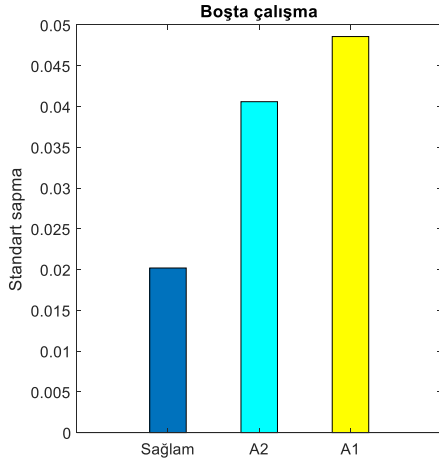
koşulda %100 yüklü çalışmada makineye ait sağlam, A1 ve A2 arızalı durumlar için elde edilen 6. mertebe enerji seviyeleri Şekil 4.23’de gösterilmiştir.



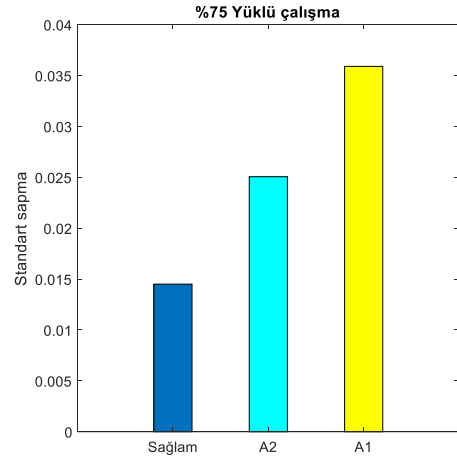
Şekil 4.23. Dinamik koşulda %100 yüklü çalışma 6. mertebe enerji seviyeleri: a)Sağlam, b)A1 arızası, c)A2 arızası

Şekiller detaylı incelendiğinde dinamik koşulda %100 yüklü çalışma durumu için 6. mertebe enerji seviye değerleri sağlam durumda -41.3 dB, A1 arızası durumunda -20.4 dB ve A2 arızası durumunda -24.2 dB’dir. Dinamik koşulda diğer yükleme durumları için de 6. mertebe enerji seviyeleri ayrı ayrı incelenmiş olup aynı doğrultuda sonuçlar elde edilmiştir. Görüldüğü gibi arızaya ait 6.mertebe enerji seviyesi incelendiğinde ŞKSMSM’de arıza durumunun kolaylıkla ayırt edilebildiği, arıza seviyesi arttıkça enerji değerlerinin belirgin biçimde arttığı görülmüştür.

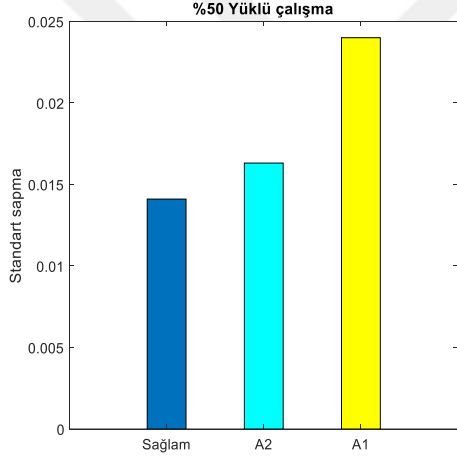
Bu çalışmada arıza seviyelerini daha belirgin ayırt etmek amacıyla enerji seviyesi incelemeye ilaveten ilgili arıza mertebesine ait verilerin istatistiksel parametreleri kullanılarak işaret özellikleri de çıkarılmıştır. Gabor dönüşümleri aracılığıyla elde edilen arızaya ait 6. mertebenin işaret bileşeni çıkarılıp zaman boyutunda 6.mertebe verilerinin yine standart sapma ve varyans parametreleri daha önceki kısımlarda bahsedildiği gibi Eşitlik 3.53 ve 3.54 aracılığıyla hesaplanmıştır. Hesaplanan bu parametreler her biri kendi çalışma koşulları içerisinde arıza durumlarına göre sınıflandırma sağlayacak biçimde Şekil 4.24 ve Şekil 4.25’de histogramlar haline getirilmiştir. Şekiller ayrıntılı olarak incelendiğinde dinamik koşulda boşta çalışma durumu için standart sapma ve varyans değerleri sağlam durumda sırasıyla 0.0201897 ve 0.000407625, A1 arızası durumunda 0.0485777 ve 0.00235979ve A2 arızası durumunda 0.0405875 ve 0.00164734’dır. Dinamik koşulda %50 yüklü çalışma durumu için standart sapma ve varyans değerleri sağlam durumda sırasıyla 0.0141039 ve 0.00019892, A1 arızası durumunda 0.024002 ve 0.000576094 ve A2 arızası durumunda 0.0163132 ve 0.000266122’dır. Dinamik koşulda %75 yüklü çalışma durumu için standart sapma ve varyans değerleri sağlam durumda sırasıyla 0.0145043 ve 0.000210376, A1 arızası durumunda 0.0358999 ve 0.0012888 ve A2 arızası durumunda 0.025059 ve 0.000627954’dır. Dinamik koşulda %100 yüklü çalışma durumu için standart sapma ve varyans değerleri sağlam durumda sırasıyla 0.0166802 ve 0.00027823, A1 arızası durumunda 0.0705544 ve 0.00497793 ve A2 arızası durumunda 0.0455182 ve 0.0020719’dır. Dinamik koşulda %115 yüklü çalışma durumu için standart sapma ve varyans değerleri sağlam durumda sırasıyla 0.0108209 ve 0.000117092, A1 arızası durumunda 0.0600877 ve 0.00361053 ve A2 arızası durumunda 0.050299 ve 0.00252999’dır. Görüldüğü gibi arızaya ait 6. mertebenin zaman boyutunda analizi ile standart sapma ve varyans gibi istatistiksel verilerle de ŞKSMSM’de arıza tespitinin kolaylıkla yapılabildiği, arıza seviyesi arttıkça standart sapma ve varyans değerlerinin de arttığı görülmüştür.



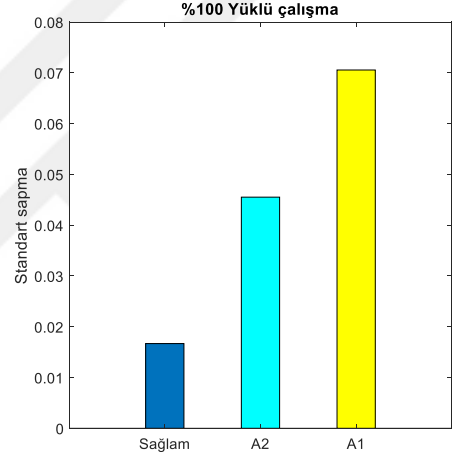
a)



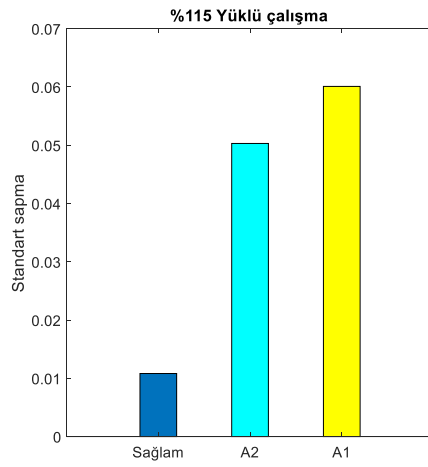
c)



b)

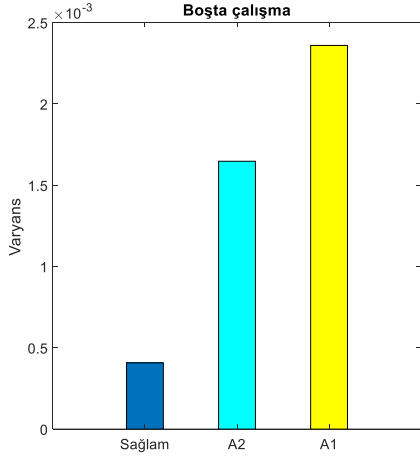


d)

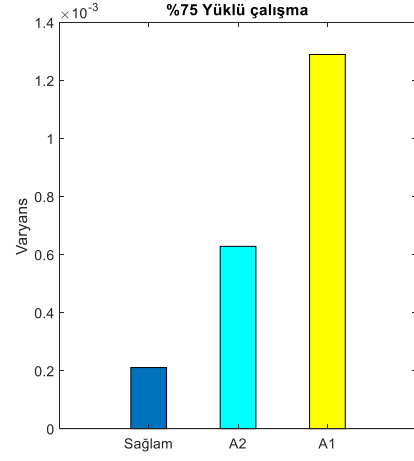


e)

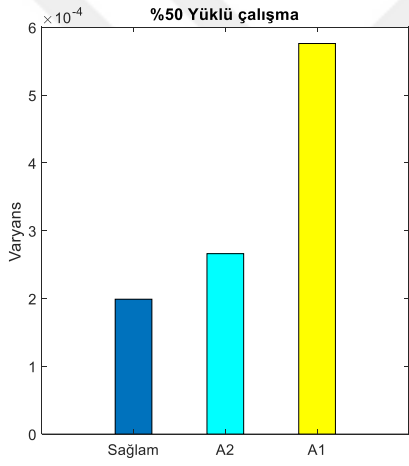
Şekil 4.24. Dinamik koşulda 6. mertebeye ait standart sapma histogramları (a.) Boşta çalışma, b) %50 yüklü, c) %75 yüklü, d) %100 yüklü, e)%115 yüklü çalışma)



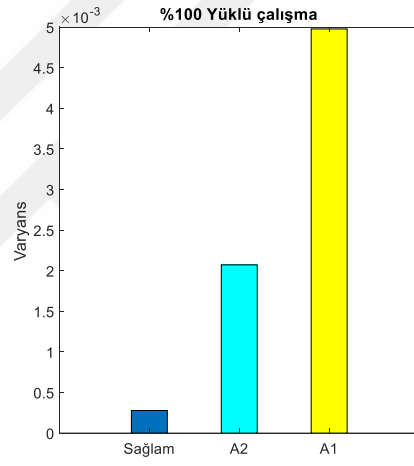
a)



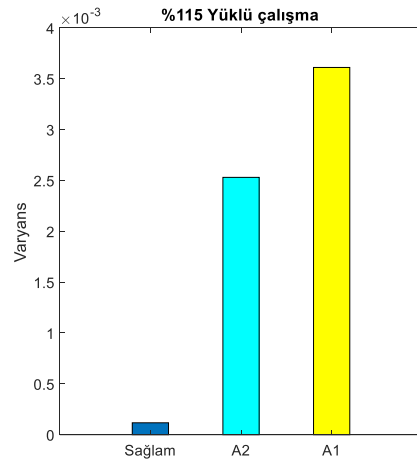
c)



b)



d)

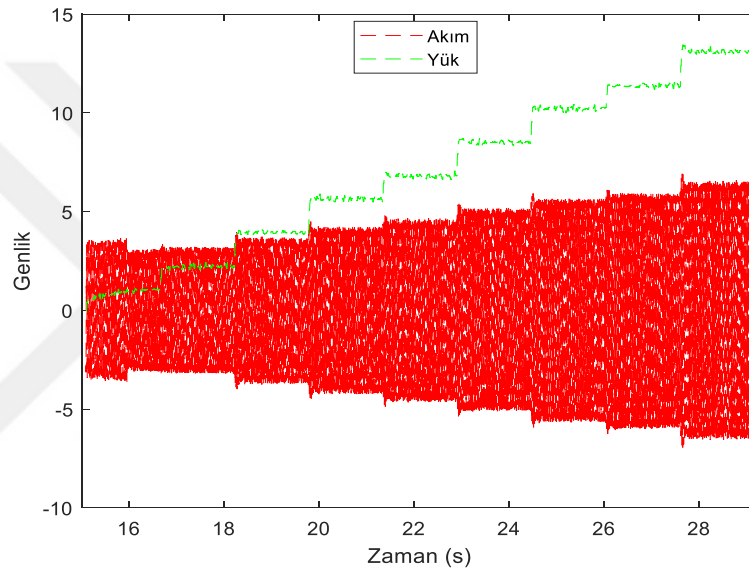


e)

Şekil 4.25. Dinamik koşulda 6. mertebeye ait varyans histogramları (a.) Boşta çalışma, b) %50 yüklü, c) %75 yüklü, d) %100 yüklü, e) %115 yüklü çalışma)

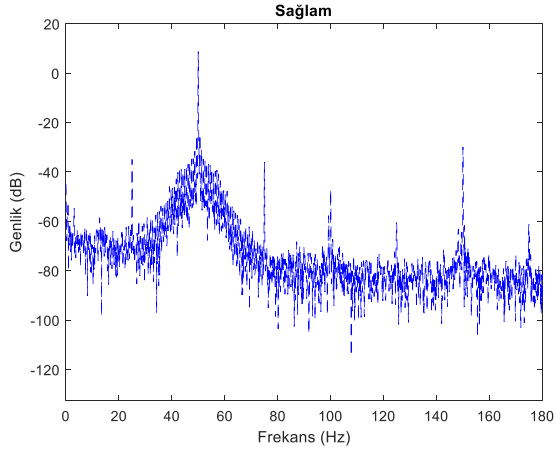
Değişken yük sabit hız çalışma koşulunda arıza tespiti

Değişken yük sabit hız çalışmada sağlam ŞKSMSM nominal hızı olan 1500 d/d çalışma hızında yaklaşık 30 sn boyunca %0 dan %115'e kadar değişen dinamik bir yük profili altında çalıştırılarak sağlam, A1 ve A2 arıza durumlarında 25 ks/sn örnekleme frekansı ile veri toplama işlemi gerçekleştirilmiştir. 1500 d/d sabit hız ve zamanla değişen yük altında çalışan ŞKSMSM'nin sağlam faz akımı ve değişken yük profili Şekil 4.26'da yer almaktadır. Donanımsal sıkıntılardan dolayı sistemin ayarlanması gecikme yaratmıştır. Bu sebeple şekildeki veri 15.s'den sonra değerlendirmeye alınmıştır.

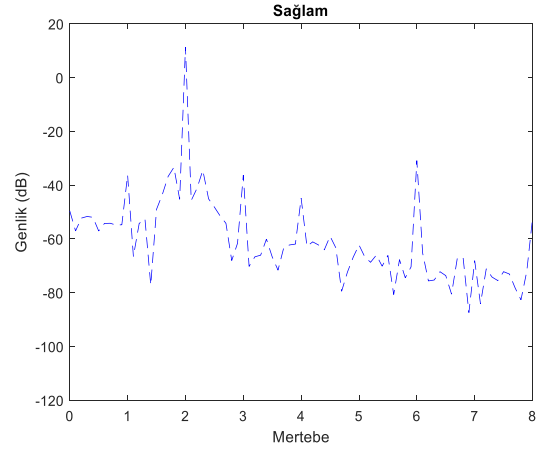


Şekil 4.26. 1500d/d sabit hız değişken yükte çalışma

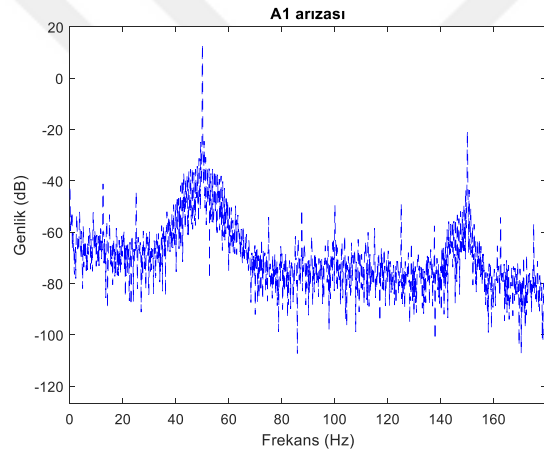
Değişken yük sabit hız şeklinde dinamik bir profil oluşturularak bir önceki kısımda anlatılan diğer dinamik koşulda olduğu gibi durağan olmayan işaretler için bir çalışma yapılması amaçlanmıştır. Fakat yük doğrusal olmayıp kademeli arttığı için durağan bir sistem gibi işaret sonuçları vermiştir. Şekil 4.27'de işaretlerin HFD ve mertebe spektrumları verilmiştir. Tıpkı durağan işaretlerde anlatıldığı gibi burada da arıza tespiti hem HFD hem de MTA ile yapılabilmiştir. Şekil incelendiğinde ana frekans 50 Hz ve 3. harmonik 150 Hz frekans ile 2. ve 6. mertebelerdeki genlik değişimleri sırasıyla şu şekildedir: Sağlam durum için 8.78 dB ve -29.88 dB, A1 arıza durumu için 13.43 dB ve -20.5 dB ve A2 arıza durumu için 12.08 dB ve -28.66 dB iken mertebe genlikleri Sağlam durum için 8.97 dB ve -29.65 dB, A1 arıza durumu için 15.3 dB ve -13.53 dB ve A2 arıza durumu için 14.25 dB ve -21.63 dB'dir.



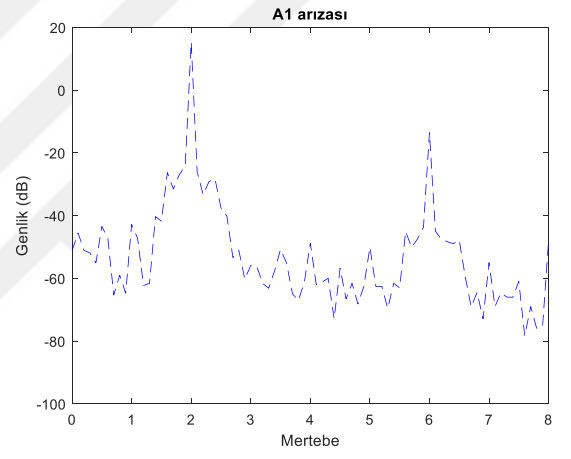
a)



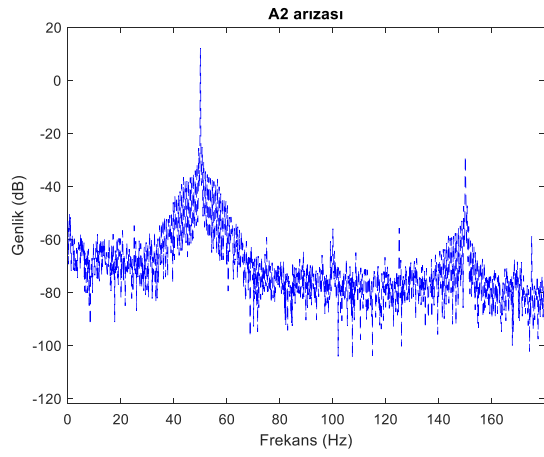
d)



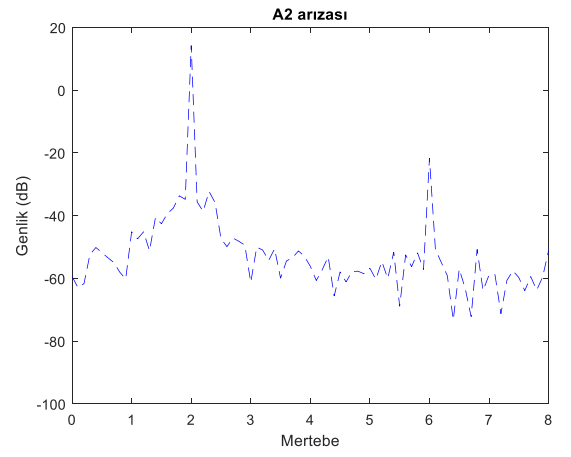
b)



e)



c)

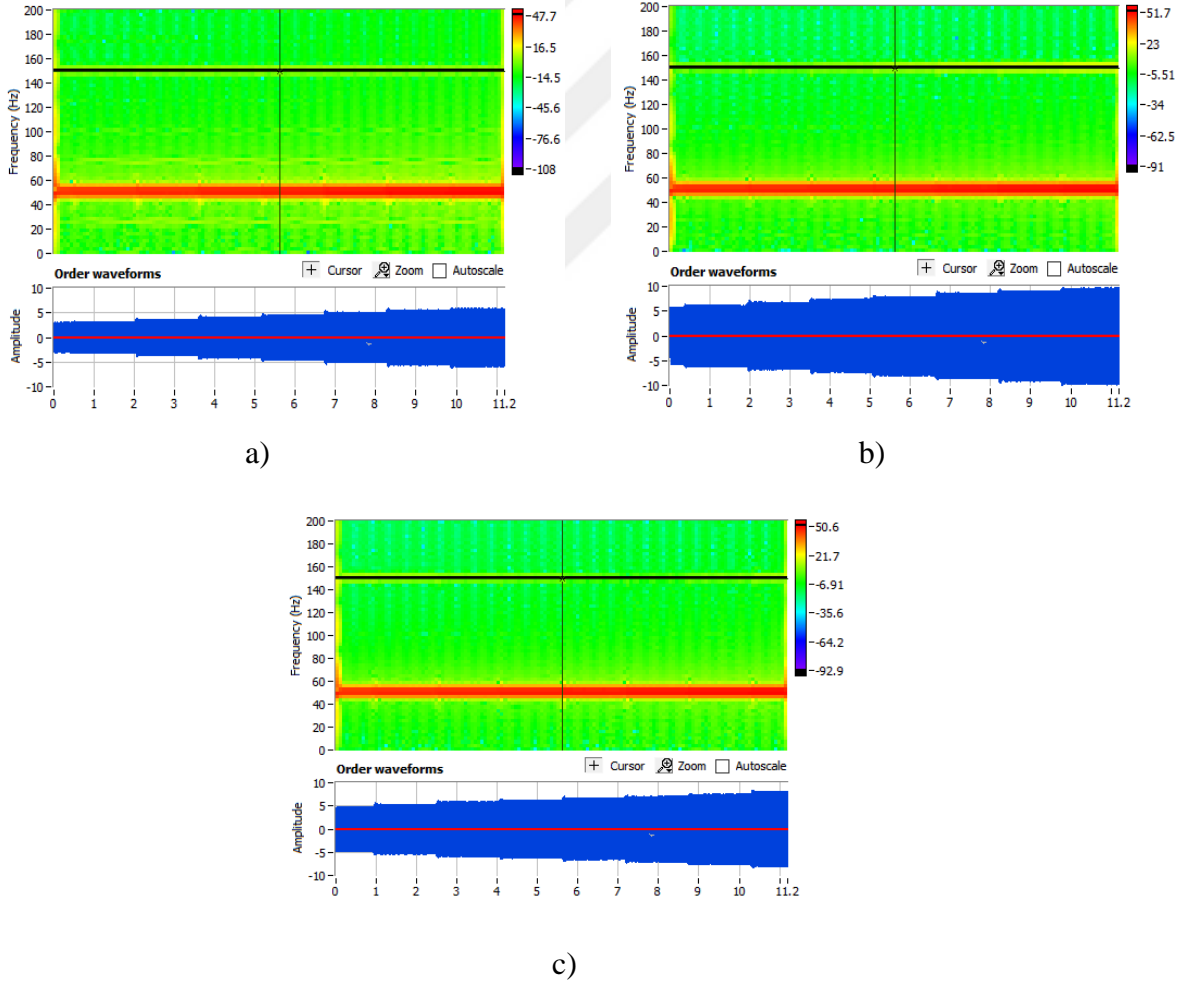


f)

Şekil 4.27. Dinamik koşulda 1500 d/d hızlı çalışma HFD ve mertebe spektrumları

Amaçlanan çalışma koşulunda hem HFD hem de MTA arıza tespitinin doğru bir şekilde yapılabileceği görülmüştür. Ancak şekiller detaylı incelendiğinde ilgili frekans ve mertebelerdeki genlik değişimleri farklı oranlarda gerçekleşmiştir. Örneğin A1 arızası durumunda HFD ile işaret analizinde 3. harmonik için 9.38 dB'lik bir genlik artışı varken mertebe ile analizinde 6.mertebe için 16.12 dB'lik bir genlik artışı tespit edilmiştir. Bu durumda HFD her ne kadar arızaya ait net bilgiler verse de MTA'nın HFD'ye göre üstün bir yöntem olduğu tekrar görülmektedir.

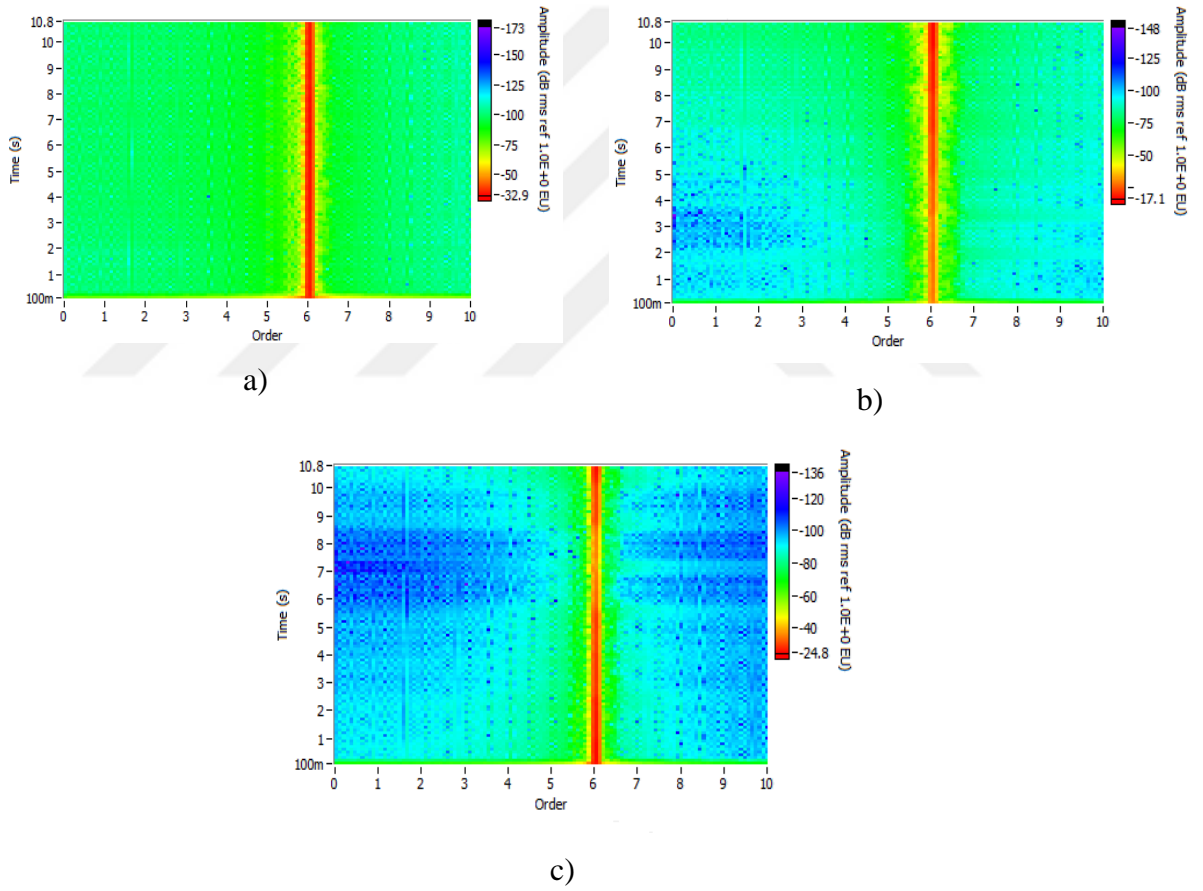
Gabor dönüşümlerinden yararlanarak hesaplanan 6.mertebe nin zaman dalga şekli Labview Signal Express'te elde edilmiştir. Dinamik koşulda 1500 d/d hızlı çalışmada makineye ait sağlam, A1 ve A2 arızalı durumlar için elde edilen 6. mertebe dalga şekilleri Şekil 4.28'de gösterilmiştir.



Şekil 4.28. Dinamik koşulda 1500 d/d hızlı çalışmada 6. mertebe dalga şekilleri:

a)Sağlam, b)A1 arızası, c)A2 arızası

Diğer çalışmalarda olduğu gibi HFD ve mertebe spektrumlarında ilgili frekans ve mertebelerde genlik artışı ile arıza tespiti mümkün olsa da farklı yükleme koşullarına bağlı olarak bazı deneylerde arıza seviyeleri arasında çok az genlik farkı olmasından dolayı arıza seviyelerini ayırt etmek güç hale gelmektedir. Bu sebeple çalışmada Gabor dönüşümlerinden yararlanılarak elde edilen arızaya ait 6. mertebenin işaret bileşeni diğer mertebelerden çıkarılarak enerji seviyesi incelenmiştir. Dinamik koşulda 1500 d/d hızlı çalışmada makineye ait sağlam, A1 ve A2 arızalı durumlar için elde edilen 6. Mertebe enerji seviyeleri Şekil 4.29’da gösterilmiştir.

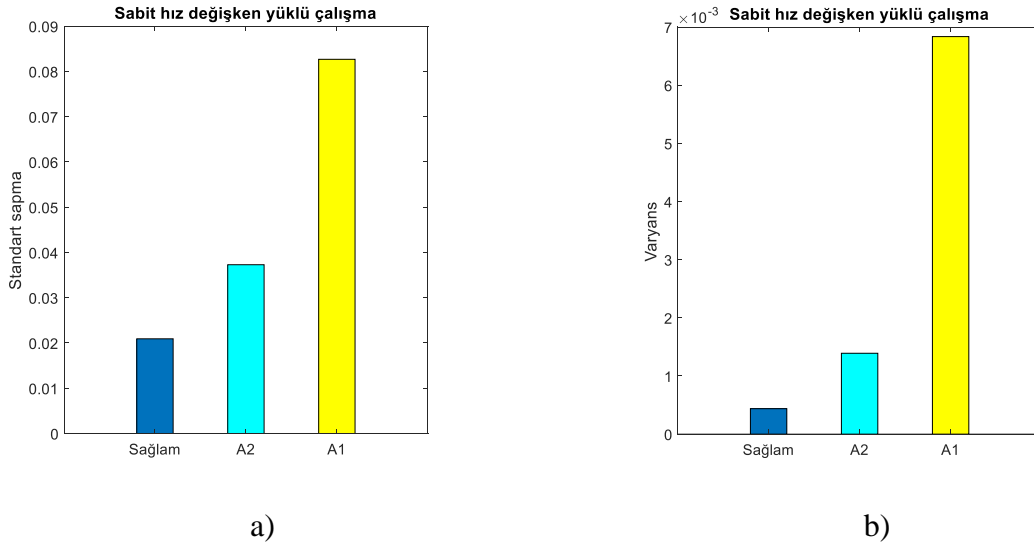


Şekil 4.29. Dinamik koşulda 1500 d/d hızlı çalışmada 6. mertebe enerji seviyeleri a)Sağlam, b)A1 arızası, c)A2 arızası

Şekil detaylı incelendiğinde dinamik koşulda nominal hızı olan 1500 d/d çalışma durumu için 6. mertebe enerji seviye değerleri sağlam durumda -32.9 dB, A1 arızası durumunda -17.1 dB ve A2 arızası durumunda -24.8 dB’dir. Görüldüğü gibi arızaya ait 6. mertebenin enerji seviyesi incelendiğinde ŞKSMSM’de arıza durumunun kolaylıkla ayırt

edilebildiği, arıza seviyesi arttıkça enerji değerlerinin belirgin biçimde arttığı görülmüştür.

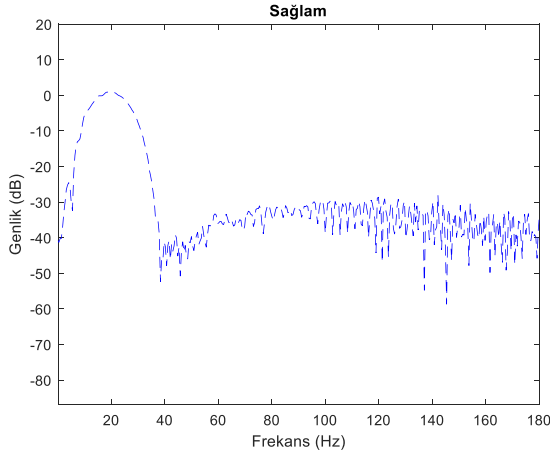
Önceki çalışmalarda olduğu gibi arıza seviyelerini daha belirgin ayırt etmek amacıyla enerji seviyesi incelemesine ek olarak sabit hız değişken yüklü dinamik çalışma koşulunda da ilgili arıza mertebesine ait verilerin istatistiksel parametreleri kullanılarak işaret özellikleri çıkartılmıştır. Gabor dönüşümüyle zaman boyutunda elde edilen 6. mertebe verilerinin yine standart sapma ve varyans parametreleri daha önceki kısımlarda bahsedildiği gibi Eşitlik 3.53 ve 3.54 aracılığıyla hesaplanmıştır. Hesaplanan bu parametreler çalışma koşulları içerisinde arıza durumlarına göre sınıflandırma sağlayacak biçimde Şekil 4.30'da histogramlar haline getirilmiştir. Şekiller detaylı olarak incelendiğinde sabit hız değişken yüklü koşulda standart sapma ve varyans değerleri sağlam durumda sırasıyla 0.0209247 ve 4.38E-04, A1 arızası durumunda 0.082679 ve 0.00683581 ve A2 arızası durumunda 0.0372928 ve 0.00139075'dir. Görüldüğü gibi arızaya ait 6. mertebenin zaman boyutunda analizi ile standart sapma ve varyans gibi istatistiksel verilerle de ŞKSMSM'de arıza tespitinin kolaylıkla yapılabildiği, arıza seviyesi arttıkça standart sapma ve varyans değerlerinin de arttığı görülmüştür.



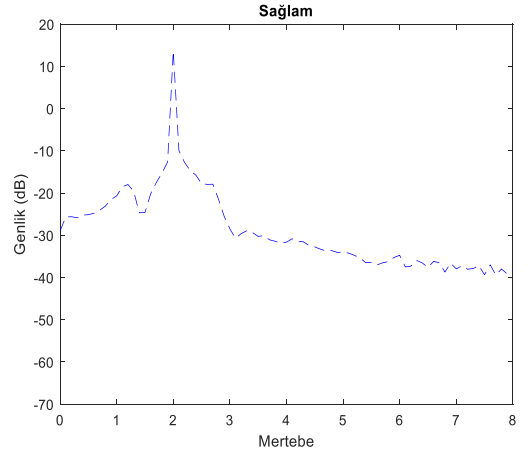
Şekil 4.30. Dinamik koşulda 1500 d/d hızlı çalışmada 6. mertebeye ait a) standart sapma, b) varyans histogramları

4.4. Stator Sargı Arızasının Sağlam Fazda Analizi

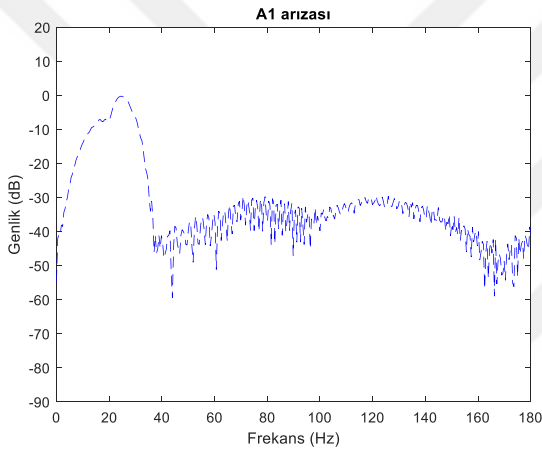
Bu kısımda 3 fazlı ŞKSMSM'nin bir fazında oluşturulan stator sargı arızasının makinenin sağlam fazında yarattığı etki incelenmiştir. Bu inceleme sadece dinamik hız koşulu için nominal şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Arızalı fazda yapılan analizlerde olduğu gibi oluşturulan farklı seviyelerdeki stator sargı arızalarının dinamik hız koşulu ile %100 yük altında motor akımında meydana getirdiği değişiklikler HFD ve MTA yöntemiyle incelenerek sağlam motor verileriyle karşılaştırılmış, elde edilen sonuçlar grafiksel olarak Şekil 4.31'de sunulmuştur. İlgili frekans ve merteye değerlerinde arıza ile birlikte genlik değişiminin arızalı fazda olduğundan daha düşük bir seviyede olması beklenmektedir. Nitekim Şekil 4.31 incelendiğinde beklendiği gibi arıza oluştuğunda sağlam fazda daha düşük bir etki oluşmuştur. Ana frekans 50 Hz ve 3. harmonik 150 Hz frekans ile 2. ve 6. mertebelerdeki genlik değişimleri sırasıyla şu şekildedir: Sağlam durum için -38.9 dB ve -37.2 dB, A1 arıza durumu için -41 dB ve -37.6 dB ve A2 arıza durumu için -45 dB ve -37.5 dB iken merteye genlikleri sağlam durum için 9.07 dB ve -28.3 dB, A1 arıza durumu için 10.8 dB ve -17.6 dB ve A2 arıza durumu için 9.6 dB ve -22 dB'dir. Sağlam fazda arıza seviyesine göre artan genliğin, arızalı fazdaki artışa göre çok daha küçük olduğu görülmektedir. Örneğin arızalı fazda inceleme yaparken dinamik hız koşulunda nominal çalışmada sağlam durum ile A1 arızası durumu oluştuğunda 2.mertebede genlik farkı 2.6 dB ve 6.mertebede genlik farkı 32.48 dB iken sağlam fazda inceleme yapıldığında 2.mertebede genlik farkı 1.73 dB ve 6.mertebede genlik farkı 10.7 dB olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak motorun bir fazında oluşan arızanın, motorun sağlam fazında stator akımlarının 3.harmoniğinde ($3f_s$) ve bu frekansa ilgili eşitlikçe denk gelen 6. mertebesinde arıza ile ilgili bileşenleri, arızalı fazda olduğundan daha düşük genlikte oluşturduğu görülmektedir.



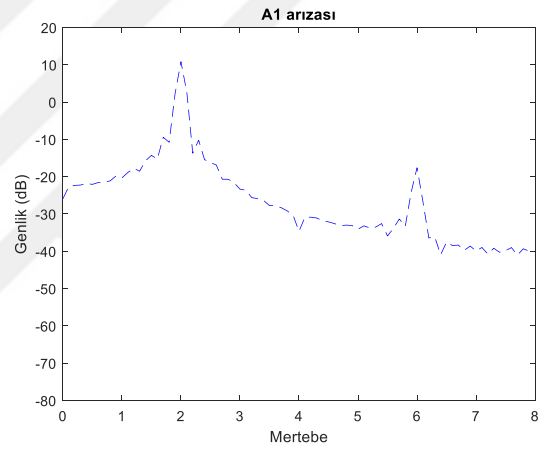
a)



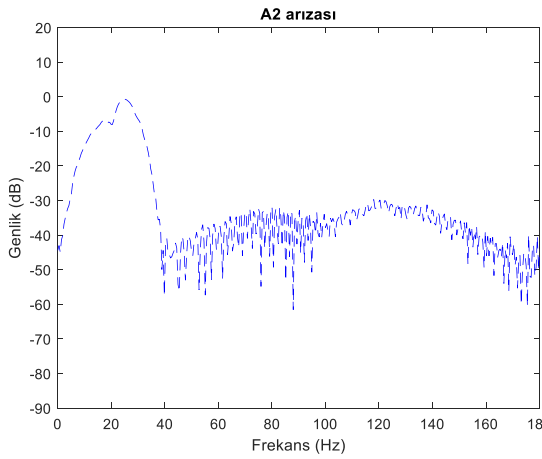
d)



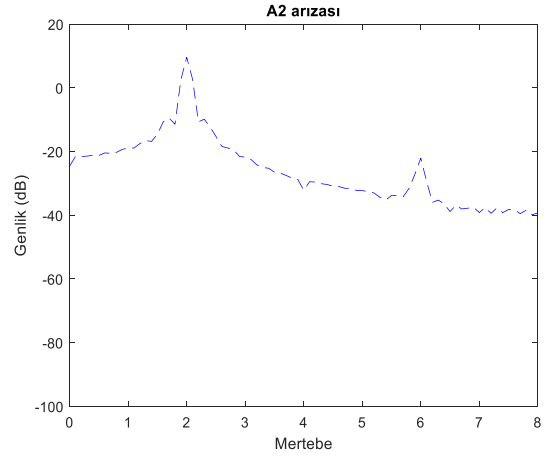
b)



e)



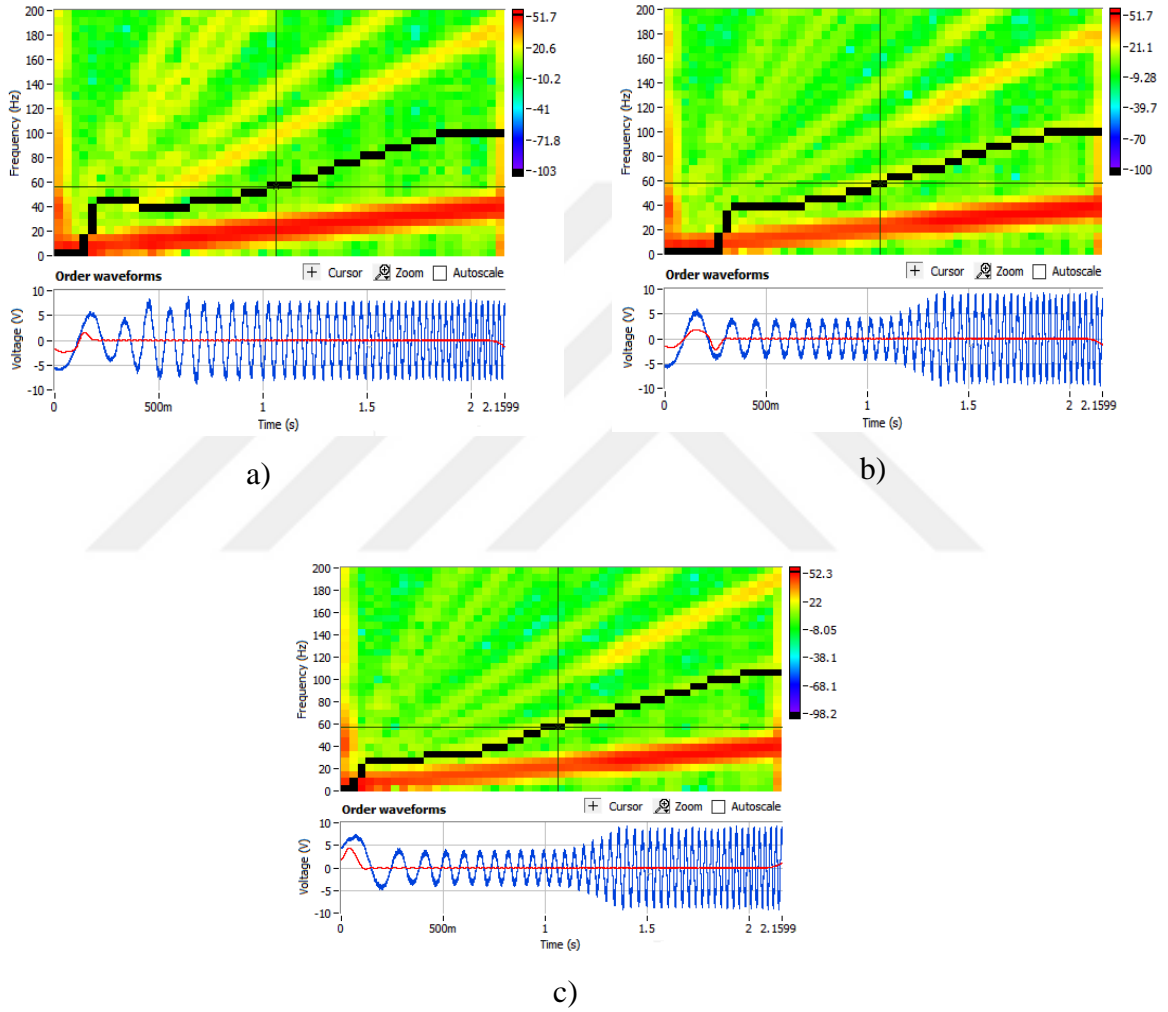
c)



f)

Şekil 4.31. Dinamik koşulda %100 yüklü çalışma sağlam fazda HFD ve mertebe spektrumları

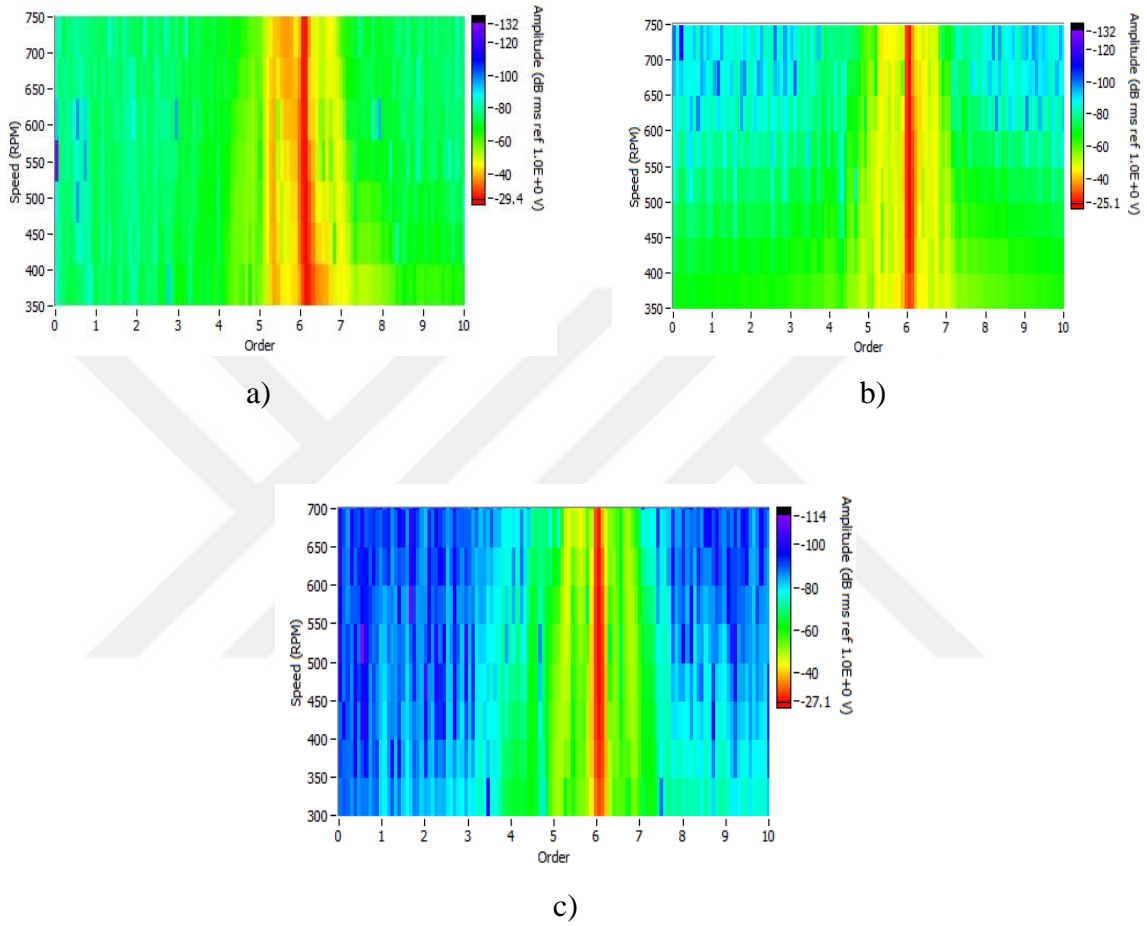
Sağlam fazda arıza etkisini incelerken diğer çalışmalarda olduğu gibi zaman işaretlerini geri kazanma yeteneği bulunan Gabor dönüşümlerinden yararlanarak hesaplanan 6. mertebenin zaman dalga şekli Labview Signal Express'te elde edilmiştir. Dinamik koşulda %100 yüklü çalışmada makineye ait sağlam, A1 ve A2 arızalı durumlar için elde edilen 6. mertebe dalga şekilleri Şekil 4.32'de gösterilmiştir.



Şekil 4.32. Dinamik koşulda %100 yüklü çalışma sağlam faz 6. mertebe dalga şekilleri: a)Sağlam, b)A1 arızası, c)A2 arızası

Diğer çalışmalarda olduğu gibi HFD ve mertebe spektrumlarında ilgili frekans ve mertebelerde genlik artışı ile arıza tespiti mümkün olsa da farklı yükleme koşullarına bağlı olarak bazı deneylerde arıza seviyeleri arasında çok az genlik farkı olmasından dolayı arıza seviyelerini ayırt etmek güç hale gelmektedir. Bu sebeple çalışmada Gabor

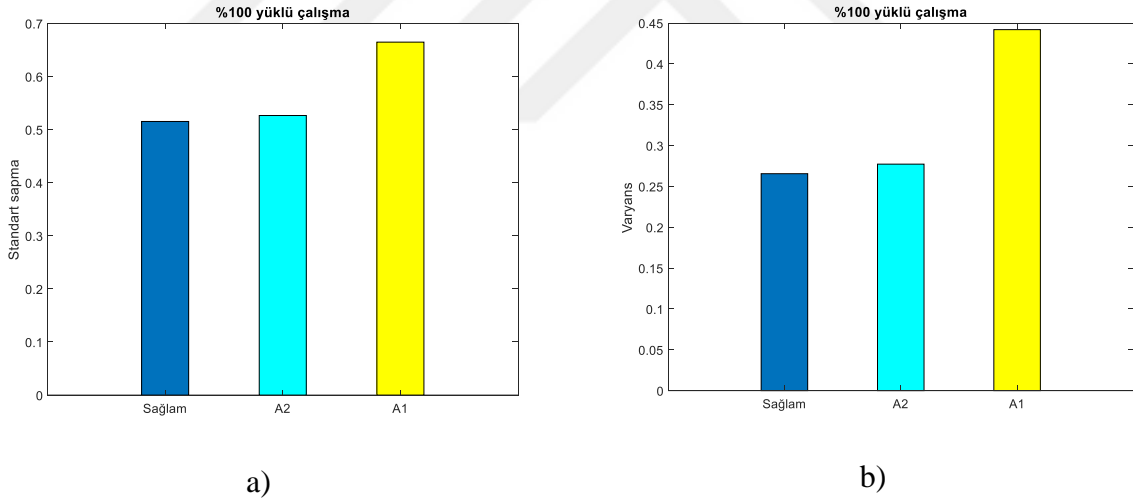
dönüşümleriyle elde edilen arızaya ait 6. mertebenin işaret bileşeni diğer mertebelerden çıkarılarak enerji seviyesi incelenmiştir. Dinamik koşulda %100 yüklü çalışmada makineye ait sağlam, A1 ve A2 arızalı durumlar için elde edilen 6. mertebe enerji seviyeleri Şekil 4.33’de gösterilmiştir.



Şekil 4.33. Dinamik koşulda %100 yüklü çalışma sağlam faz 6. mertebe enerji seviyeleri a)Sağlam, b)A1 arızası, c)A2 arızası

Şekil detaylı incelendiğinde %100 yüklenme koşulunda dinamik çalışma durumu için 6. mertebe enerji seviye değerleri sağlam durumda -29.4 dB, A1 arızası durumunda -25.1 dB ve A2 arızası durumunda -27.1 dB’dir. Görüldüğü gibi arızaya ait 6.mertebenin enerji seviyesi incelendiğinde ŞKSMSM’de sağlam faz için arıza durumunun kolaylıkla ayırt edilebildiği, arıza seviyesi arttıkça enerji de arttığı görülmüştür.

Arızalı fazda incelemek yaparken olduğu gibi sağlam fazda da arıza seviyelerini daha belirgin ayırt etmek amacıyla enerji seviyelerini incelemenin yanı sıra ilgili arıza mertebesine ait verilerin istatistiksel parametreleri kullanılarak işaret özellikleri çıkartılmıştır. 6.mertebe verilerinin yine standart sapma ve varyans parametreleri daha önceki kısımlarda bahsedildiği gibi Eşitlik 3.56 ve 3.57 aracılığıyla hesaplanmıştır. Hesaplanan bu parametreler çalışma koşulları içerisinde arıza durumlarına göre sınıflandırma sağlayacak biçimde Şekil 4.34’de histogramlar haline getirilmiştir. Şekiller detaylı olarak incelendiğinde standart sapma ve varyans değerleri sağlam durumda sırasıyla 0.51534 ve 0.265575, A1 arızası durumunda 0.664774 ve 0.441925 ve A2 arızası durumunda 0.52656 ve 0.277265’dir. Görüldüğü gibi arızaya ait 6. mertebenin zaman boyutunda analizi ile standart sapma ve varyans gibi istatistiksel verilerle de ŞKSMSM’de arıza tespitinin kolaylıkla yapılabildiği, arıza seviyesi arttıkça standart sapma ve varyans değerlerinin de arttığı görülmüştür.



Şekil 4.34. Sağlam fazda 6. mertebeye ait a) standart sapma, b) varyans histogramları

5. SONUÇ

Elektrik makinelerinde oluşan arızaların en kısa sürede tespitiyle hem üretim kayıplarının hem de artan işletme maliyetlerinin önüne geçilmesi mümkündür. Bu nedenle elektrik makinelerinin sürekli izlenmesi ciddi önem taşımaktadır. Arıza tespiti için izlenen işaretlerin başında akım işaretleri gelmektedir. Akım işaretlerinin zaman, frekans, zaman-frekans, mertbe boyutlarında analizi yapılarak arızaya dair karakteristik özellikleri elde edilmektedir.

Yapılan tez çalışmasında zaman, frekans ve zaman-frekans boyutunda analizler yapılmıştır. Frekans boyutunda analiz için en çok tercih edilen HFD yöntemiyle sağlam, A1 ve A2 stator sargı arızalarının motor akımında ürettiği harmonik bileşenlerinin durağan çalışma koşulu olan sabit hız sabit yük ve dinamik çalışma koşulları olan değişken hız sabit yük ile değişken yük sabit hız koşullarında analizi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde izlenen işaretin spektrum değerleri hesaplanarak ilgili frekans bileşenlerinde arıza ile birlikte genlik değişimi incelenmiştir. Durağan çalışmada yapılan analizlerde stator sargı arızaları için ilgili eşitlikler gereğince temel frekansın 3. harmoniğinde ($3f_s$) ilave frekans bileşenleri görülmüştür. Bu frekans bileşenlerinin genlik değerleri arıza miktarına bağlı olarak artmıştır. ŞKSMSM'de rotor hızının besleme frekansıyla doğru orantılı olarak değişmesi arızaya dair frekans bileşenlerinin de yerinin sürekli değişmesine neden olmaktadır. Değişken hız sabit yük olan dinamik çalışmada bu durum arıza tespitinin net bir şekilde yapılamaması anlamına gelmektedir. HFD yönteminin değişken hız sabit yük olan dinamik çalışmada elde edilen sonuçları incelendiğinde; motor akımının genlik ve frekansının özellikle hızlanma bölgelerinde sürekli değişmesi HFD yönteminin değişken hız sabit yük olan dinamik işaretlerdeki arıza tespitinde başarısız olduğunu göstermiştir.

Dinamik koşullarda çalışan döner makinelerin izlenmesi ve arızaların tespitinde en çok tercih edilen yöntemlerden biri MTA yöntemleridir. İncelediğimiz stator sargı arızası için kullanıldığımız MTA yönteminin temeli dinamik titreşim işaretinin dinamik hız işaretine göre hesaplanması ilkesine dayanmaktadır. Sunulan bu tez çalışmasında yöntem titreşim işaretine değil motor akım işaretine uygulanmıştır. Durağan çalışmada yapılan analizlerde; temel besleme frekansının 2. mertbe seviyesinde çıktığı, stator sargı arıza

frekans bileşeninin ise 6. mertebe seviyelerinde çıktığı görülmüştür. Arızaya bağlı olarak bu mertebe seviyelerindeki genlik değişimi HFD sonuçları ile uyumludur. MTA yönteminin durağan çalışmada kullanıcıya getirdiği en büyük fayda motor hızı ve dolayısıyla besleme frekansı ne olursa olsun arızaya dair bileşenlerin hep aynı mertebede sabit kalmasıdır. 6. mertebe seviyelerindeki genlik değişiminin izlenmesiyle arıza tespiti yapılmıştır.

MTA yönteminin HFD yöntemine göre asıl üstünlüğü dinamik işaretlerde ortaya çıkmıştır. MTA yöntemi frekansı ve genliği hıza bağlı olarak değişen akım işaretini hıza göre hesaplayarak zaman boyutunda dinamik olan işareti mertebe boyutunda durağan hale getirmektedir. Mertebe boyutundaki işaretin spektrum değerleri hesaplandığında HFD yönteminin yetersizliği ortadan kalkmakta ve durağan çalışmada olduğu gibi arızaya dair net bilgiler içermektedir. Deneysel çalışmada ŞKSMSM durağan çalışma koşulu olan 1500 d/d sabit hız sabit yük ve dinamik çalışma koşulları olan değişken hız sabit yük ile değişken yük sabit hız koşullarında incelenmiştir. MTA yöntemi sonuçları durağan, dinamik hız ve dinamik yük çalışma koşullarında stator sargı arızasının net bir şekilde tespit edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca bu yöntemde makinenin yüklenme koşulunun artması ile birlikte daha büyük genlik değişimi olduğu ve bu genlik değişiminin arıza miktarı ile de arttığı sonucuna varılmıştır. Ancak arızanın varlığı tespit edilebilse de arıza seviyelerinin genlikleri arasındaki yakınlık arıza seviyelerini birbirinden ayırt etmeyi zorlaştırmıştır. Bu nedenle tez çalışmasında durağan ve dinamik çalışma koşullarında zaman-frekans işaretlerini geri kazanma yeteneği bulunan Gabor dönüşümlerinden yararlanarak yeniden hesaplanan 6. mertebenin zaman dalga şekli elde edilmiştir. Gabor dönüşümleriyle elde edilen arızaya ait 6. mertebenin işaret bileşeni diğer mertebelerden çıkarılarak enerji seviyesi incelenmiştir. Tüm koşullarda farklı yükler için 6. mertebenin enerji seviyesi incelenmiş olup aynı doğrultuda sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen enerji seviyesi grafikleri arıza durumlarına göre karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Stator sargı arızasına ait 6. mertebenin enerji seviyesi incelendiğinde ŞKSMSM’de arıza durumunun kolaylıkla ayırt edilebildiği, arıza seviyesi arttıkça enerji değerlerinin de belirgin bir farkla arttığı görülmüştür.

Bu tez çalışmasında enerji seviyesi incelemelerine ek olarak, ŞKSMSM’de arıza seviyelerini daha net bir biçimde ayırt etmek amacıyla Gabor dönüşümleriyle elde edilen arızaya ait 6. mertebenin işaret bileşeni diğer mertebelerden çıkarılarak zaman boyutunda işareti elde edilmiştir. Elde edilen verilerin istatistiksel parametreleri kullanılarak işaret özellikleri çıkartılmıştır. İstatistiksel özellikleri çıkartmak için standart sapma ve varyans parametreleri tercih edilmiştir. Zaman boyutunda yapılan istatistiksel analizlerde yüksek başarılar elde edilmiş, alınan sonuçlar histogramlar haline getirilerek arıza ve arıza seviyelerinin açık bir şekilde ayırt edilebilir olduğu gösterilmiştir.

Tez çalışmasında ŞKSMSM’de oluşan sargı arızasının sağlam fazda yarattığı etkiyi incelemek amacıyla, gerçekleştirilen tüm analizler; HFD, MTA, Gabor dönüşümleriyle mertebe dalga şekli incelemesi, 6. mertebeye ait enerji seviye incelemesi ve son olarak arızaya ait 6. mertebe işaretinin istatistiksel özelliklerinin çıkarımı sağlam fazda dinamik koşulda %100 yüklü çalışmada yinelenmiştir. Sonuç olarak motorun bir fazında oluşan arızanın, motorun sağlam fazında stator akımlarının 3. harmoniğinde ($3f_s$) ve bu frekansa ilgili eşitlikçe denk gelen 6. mertebesinde arıza ile ilgili bileşenleri, arızalı fazda olduğundan daha düşük genlikte oluşturduğu görülmüştür.

Bu tez çalışmasının özgün yanları ve ŞKSMSM arıza literatürüne yapabileceği katkılar şu şekilde sıralanabilir:

- ŞKSMSM’nin sargı arızası tespitinde ilk kez Gabor-MTA yöntemi kullanılmıştır.
- Gabor-MTA yöntemlerinin literatürde genel olarak titreşim işaretine uygulanmasının aksine, bu yöntemin akım işaretine uygulanarak da arıza tespitinin mümkün olduğu gösterilmiştir.
- Arıza tespiti durağan ve dinamik koşullarda gerçekleştirilebilmiştir.
- Üç fazlı bir ŞKSMSM’nin bir fazında arıza oluşması durumunda sadece arızalı fazda inceleme yapılarak değil motorun sağlam fazında inceleme yapılarak da arıza tespitinin olası olduğu gösterilmiştir.
- Arızaya ait ilgili mertebe bileşeninin enerji seviyesi izlenerek arızanın varlığı ve seviyeleri hakkında bilgi verebileceği tespit edilmiştir.

- Arızaya ait ilgili mertebeye bileşenin istatistiksel olarak incelenmesiyle varyans ve standart sapma değerleri hesaplanmış, arıza ve arıza seviyeleri açık bir şekilde ayırt edilebilmiştir.

Gelecekte zaman-frekans boyutunda sinyal işleme yöntemlerinden biri olan, Gabor MTA kullanılarak bu motorda eksenden kaçıklık arızaları, rulman arızaları, mıknatıs arızaları ve rotor çubuk kırığı arızası tespiti üzerine çalışmalar yapılabilir.



6. KAYNAKLAR

- Akar, M., 2005. Bulanık Mantık Yöntemiyle Bir Servo Motorun Kontrolü ve Geleneksel Yöntemlerle Karşılaştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akar, M., 2009. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Yapay Zekâ Yöntemleri İle Mekanik Hataların Teşhisi. (Doktora Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Akar, M., 2012. Detection of a static eccentricity fault in a closed loop driven induction motor by using the angular domain order tracking analysis method. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 34 (2013) 173–182.
- Anonim, 2014. Asenkron Motorlar. <http://www.elektrikrehberiniz.com/elektrik-motorlari/asenkron-motorlar-9480/> (24.12.2018).
- Arabacı, H., Bilgin, O., Ceylan, M. ve Ceylan, R., Asenkron Motorlarda Kırık Rotor Çubuğu Arızalarının Yapay Sinir Ağları ile Teşhisi, ELECO'2004 Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 2004, Bursa.
- Behbahanifard, H. ve Sadoughi, A., 2015. Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor Performance and Design; a Review. *Journal of World's Electrical Engineering and Technology*, 4(2): 58-66.
- Blánquez, F., Platero, C. ve Rebollo, E., 2015. Field-winding fault detection in synchronous machines with static excitation through frequency response analysis. *Electrical Power and Energy Systems*, 73, 229-239.
- Blough, J.R. ve Brown, D.L., 1997. The Time Variant Discrete Fourier Transform as an Order Tracking Method. <https://www.researchgate.net/publication/255580329>.
- Blough, J.R., 2003, Development and Analysis of Time Variant Discrete Fourier Transform Order Tracking. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.17, 1185-1199.
- Çankaya, D. ve Vatansver, F., 2002. Fourier ve Dalgacık Dönüşümünün Karşılaştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6, 3, 14-24.
- Çevik, Ç., 2016. Üç fazlı Asenkron Motorlar. <https://medium.com/@cagincevik/%C3%BC%C3%A7-fazlı-C4%B1-asekron-motorlar-95b853ce05b6> (24.12.2018).
- Çıra, F., 2017. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Stator Kısa Devre Arızasının Tespiti ve Arıza Şiddetinin Otomatik Olarak Belirlenmesi. (Doktora Tezi), İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Doppelbauer, M. IEC Motor Efficiency Classes from IE1 to IE5. Karlsruhe Institute of Technology (KIT) Institute of Electrical Engineering (ETI) Hybrid Electrical Vehicles (HEV). Convenor IEC TC2 WG31.
- Doğan, Z., 2012. Ayırıklaştırma Yöntemleri ve Yapay Sinir Ağı Kullanarak Asenkron Motorlarda Arıza Teşhisi. (Doktora Tezi), Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Eker, M., 2013. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Demagnetizasyon Arızasının Tespiti. (Yüksek Lisans Tezi), Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği ABD, Tokat.
- Emsa, 2014. Policy Guidelines for Electric Motor Systems Part 2: Toolkit for Policy Makers, 2014b. https://www.motorsystems.org/files/otherfiles/0000/0173/policy_guidelines_oct2014.pdf (14.03.2019).

- Feng, X., Liu, L., Kang, J. ve Zhang, Y., 2010. Super Premium Efficient Line Start-up Permanent Magnet Synchronous Motor, XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM 2010, Rome.
- Fırat, A., 2006. Tek fazlı şebeke kalkışlı sürekli mıknatıslı senkron motor. (Yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Foncesa, D., Santos, C. ve Cardoso, A., 2018. On-Line Stator Fault Diagnosis in Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors. IEEE 978-1-5386-2477-7/18.
- Foster, S., Cintron-Rivera, J. ve Strangas, E., 2015. Detection of incipient stator winding faults in PMSMs with single-layer fractional slot concentrated windings. Electric Power Systems Research, 131, 231-243.
- Gu, B., 2016. Study of IPMSM Interturn Faults Part I Development and Analysis of Models With Series and Parallel Winding Connections. IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 31, No. 8, 5931-5943.
- Guercioni, G., Galvagno, E. ve Vigliani, A., 2015. An alternative method for order tracking using autopower spectrum. Advances in Mechanical Engineering, Vol. 7(11) 1-14.
- Gunal, S., Ece, D. ve Gerek, O.N., 2009. Zaman Bölgesinde Akım Analiziyle İndüksiyon Motorun Hata Tespiti, Signal Processing and Communications Applications Conference, Antalya, (2009) 488-491.
- Guo, Y. ve Tan, K., 2009. Order-crossing removal in Gabor order tracking by independent component analysis. Journal of Sound and Vibration, 325, 471–488.
- Gülçin, E.A., 2018. Tek Fazlı Şebeke Kalkışlı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı, (Yüksek lisans tezi), Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Tokat.
- Hatık, G., İnceç, E. ve Akar, M., 2014. Doğrudan Yol vermeli Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Rotor Çubuk Arızasının İncelenmesi, ISITES2014 Karabük, Türkiye.
- Hussein, I., Al-Hamouz, Z., Abido, M ve Milhem, A., 2018. On the Mathematical Modeling of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors under Static Eccentricity. Energies 2018, 11, 197.
- Isfahani, A. ve Vaez-Zadeh, S., 2009. Line start permanent magnet synchronous motors: Challenges and opportunities. Elsevier Energy, 34, 1755–1763.
- Isfahani, A., Vaez-Zadeh, S. ve Hasanzadeh, S., 2011. An Educational Toolbox for Performance Analysis of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors. Wiley Periodicals, Inc., 452-462.
- Kara, B., 2017. Şebeke Kalkışlı Daimi Mıknatıslı Senkron Motorda Eksenden Kaçıklık Arızası Teşhisi. (Yüksek Lisans Tezi), Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- Karami, M., Mariun, N., Mehrjou, M., Ab Kadir, M., Mison, N. ve Radzi, M., 2014. Diagnosis of Static Eccentricity Fault in Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor, IEEE International Conference Power & Energy (PECON), 83-86.
- Karatoprak, E., Senguler, T., Ayaz, E., Caglar, R. ve Şeker, S., 2007. Spectral and statistical based modeling for bearing damage in induction motors. IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, pp.66-71, Cracow, Poland.
- Kim, B.T., Kim, Y.K., Kim, D.J., 2004. Analysis of squirrel cage effect in single phase lspm. IEEE International Transactions on EMECs, 4-B,190-195.

- Liu, W., Liu, L., Chung, Y., Cartes, D. ve Zhang, W., 2012. Modeling and detecting the stator winding fault of permanent magnet synchronous motors. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 27, 1-16.
- Maraaba, L., Al-Hamouz, Z., Milhem, A. ve Abido, M., 2017. Modelling of interior-mount LSPMSM under asymmetrical stator winding. *IET Electric Power Applications*, Vol. 12, Iss. 5, 693-700.
- Maraaba, L., Al-Hamouz, ve Abido, M., 2018. Mathematical Modeling, Simulation and Experimental Testing of Interior-mount LSPMSM under Stator Inter-Turn Fault. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, pp(99):1-1.
- Matlab, 2014. Histogram çizimleri. https://ch.mathworks.com/matlabcentral/answers/126996-how-to-implement-colormap-into-bar-plot?s_tid=srchtitle (01.03.2019).
- Matlab, 2018. Grafik oluşturma. <https://www.mathworks.com/help/matlab/2-and-3d-plots.html> (15.02.2019).
- Mehrijou, M., Mariun, N., Marhaban, M. ve Misron, N., 2011. Rotor fault condition monitoring techniques for squirrel-cage induction machine A review, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 25, Issue. 8, 2827-2848.
- Merrill, FW., 1955. Permanent magnet excited synchronous motors. *AIEE Trans*,74:1754–60.
- Moosavi, S., Djerdir, A., Amirat, Y. ve Khaburi, D., 2015. ANN based fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor under stator winding shorted turn. *Electric Power Systems Research*, 125, 67-82.
- Mutize, C. ve Wang, R., 2013. Performance Comparison of Induction Motor and Line Start Pm Motor For Cooling Fan Applications. *Proceedings of Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC) 2013*.
- Nandi, S., Toliyat, H.A. and Li, X., 2005. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines-A Review. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.20, (4), 719-729.
- National Instruments, 2005. LabVIEW Order Analysis Toolkit User Manual. Part number 372879C-01.
- Nyanteh, Y., Srivastava, S., Edrington, C. ve Cartes, D., 2013. Application of artificial intelligence to stator winding fault diagnosis in Permanent Magnet Synchronous Machines. *Electric Power Systems Research*, 103, 201-213.
- Obeid, N., Battiston, A., Boileau, T. ve Mobarakeh, B., 2017. Early Intermittent Interturn Fault Detection and Localization for a Permanent Magnet Synchronous Motor of Electrical Vehicles Using Wavelet Transform. *IEEE Transactions On Transportation Electrification*, Vol. 3, (3), 694-702.
- Qian, S., 2003. Gabor Expansion for Order Tracking. *National Instruments Corporation, Sound And Vibration*, 18-22.
- Qian, H., Guo, H. ve Ding, X., 2016. Modeling and Analysis of Interturn Short Fault in Permanent Magnet Synchronous Motors With Multistrands Windings. *IEEE Transactions On Power Electronics*, Vol. 31, No. 3, 2496-2509.
- Pan, M. ve Chiu, C., 2006. Investigation on improved Gabor order tracking technique and its applications. *Journal of Sound and Vibration*, 295, 810–826.
- Pan, M., Liao, S. ve Chiu, C., 2007. Improvement on Gabor order tracking and objective comparison with Vold–Kalman filtering order tracking. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21, 653–667.
- Prieto, M. D., Espinosa, A. G., Ruiz, J. R., Urresty, J. C. and Ortega, J.A., 2011. Feature extraction of demagnetization faults in permanent-magnet synchronous motors

- based on box-counting fractal dimension. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, (5), 1594-1605.
- Rahman, M.A. and Osheiba, O.M.: 1990. Performance of large line-start permanent magnet synchronous motors, *IEEE Trans. Energy Conversion*, 5, 211-217.
- Saavedra, P. ve Rodrigue, C., 2006. Accurate assessment of computed order tracking, *Shock and Vibration*, 13,13–32.
- Saavedra, H., Urresty, J., Riba, J. ve Romeral, L., 2014. Detection of interturn faults in PMSMs with different winding configurations. *Energy Conversion and Management*, 79, 534-542.
- Shenbo, Y. and Renyuan, T., 2006. Electromagnetic and mechanical characterizations of noise and vibration in permanent magnet synchronous machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.42, (4), 1335-1338.
- Soreshjani, M. ve Haghparast, M., 2014. Classical Direct Torque Control performance of Line Start PM Synchronous Motor for different conditions. *International Transactions On Electrical Energy Systems*, 25, 2595–2620.
- Soreshjani, M., Ghafari, A. ve Haghparast, M., 2014. Direct Torque and Flux Controlled Space Vector Modulated (DTFC-SVM) Based on Fuzzy Logic Controller for Line-Start Permanent Magnet Synchronous and Permanent Magnet Synchronous Machines, *Control Engineering And Applied Informatics*, Vol.16, No.3, 75-83.
- Sorgdrager, A., 2014. Development of a line-start permanent-magnet synchronous machine. (Master Thesis), University of North West Electrical, Electronic and Computer Engineering, Potchefstroom, South Africa.
- Sönmez, D., 2013. Asenkron Motor Rulman Arızasının Titreşim İşaretleri Üzerinden Entropi Tabanlı Analizi. (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Stephens, C.M., Kliman, G.B. and Boyd, J.: 1998. A line-start permanent magnet motor with gentle starting behavior, *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting*, 371-379.
- Tetik, K. ve Doğan, Z., 2016. The Effect Of Eccentricity Fault On The Performance of Doubly Fed Induction Generators, *Journal of New Results in Science*, (12), 9-17.
- Tetik, K. ve Doğan, Z., 2016. Çift Beslemeli Asenkron Generatörlerde Eksenden Kaçıklık Arızasının Analizi. *EEB 2016 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, 11-13 Mayıs, 2016, Tokat.
- Urresty, J., Riba, J. ve Romeral, L., 2013. Diagnosis of Interturn Faults in PMSMs Operating Under Nonstationary Conditions by Applying Order Tracking Filtering, *IEEE Transactions On Power Electronics*, Vol. 28, No. 1, 507-515.

7. ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı: Kübra TETİK

Doğum Tarihi ve Yeri: 18.10.1992 - Tokat

Yabancı Dili: İngilizce

e-mail: kubratetik00@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Bilgisi	Mezuniyet Yılı
Lisans	Ondokuz Mayıs Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2015

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-2018	Tokat Teknopark A.Ş.	Ar-Ge Mühendisi
2018-Devam ediyor	Tarım ve Kırsal Kalkınmayı Destekleme Kurumu - Tokat İl Koordinatörlüğü	Uzman

Yayımlar

1. Tetik, K. ve Doğan, Z., 2016. The Effect of Eccentricity Fault on The Performance of Doubly Fed Induction Generators, Journal of New Results In Science, (12), 9-17.
2. Tetik, K. ve Doğan, Z., 2016. Çift Beslemeli Asenkron Generatörlerde Eksenden Kaçıklık Arızasının Analizi. EEB 2016 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, 11-13 Mayıs, 2016, Tokat.