



**ŞEBEKE KALKIŞLI DAİMİ MIKNATISLI SENKRON
MOTORUN SCADA ORTAMINDA DURUM İZLEMESİ
YOLUYLA RULMAN ARIZASI TESPİTİ**

SAADET GÜLSÜM GÖZÜOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

Dr. Öğr. Üyesi Zafer DOĞAN

Ocak - 2020

Her hakkı saklıdır

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞEBEKE KALKIŞLI DAİMİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN SCADA
ORTAMINDA DURUM İZLEMESİ YOLUYLA RULMAN ARIZASI TESPİTİ

SAADET GÜLSÜM GÖZÜOĞLU

TOKAT
Ocak - 2020

Her hakkı saklıdır



Bu tez çalışması;

**Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından
2018/59 nolu proje ile desteklenmiştir.**

Saadet Gülsüm GÖZÜOĞLU tarafından hazırlanan “**Şebeke Kalkışlı Daimi Miknatıslı Senkron Motorun SCADA Ortamında Durum İzlemesi Yoluyla Rulman Arızası Tespiti**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 22 OCAK 2020 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ Anabilim dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Zafer DOĞAN

Üye
Doç. Dr. Ünal KURT
Amasya Üniversitesi
Üye
Dr. Öğr. Üyesi Levent GÖKREM
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi



ONAY


Prof. Dr. Çetin ÇEKİÇ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

06/02/2020



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.

SAADET GÜLSÜM GÖZÜOĞLU

22 Ocak 2020

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞEBEKE KALKIŞLI DAİMİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN SCADA ORTAMINDA DURUM İZLEMESİ YOLUYLA RULMAN ARIZASI TESPİTİ

SAADET GÜLSÜM GÖZÜOĞLU

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ ZAFER DOĞAN)

Yüksek verim ve yüksek güç faktörü gibi avantajlara sahip Şebeke Kalkışlı Daimi Mıknatıslı Senkron Motor (ŞKDMSM) bant sistemleri, fan sistemleri vb. endüstriyel alanlarda günden güne asenkron motorların yerini almaktadır. ŞKDMSM'ler ağır işletme koşulları nedeniyle zamanla arızalanmaktadır. Bu motorların arızalanması üretim kayıpları oluşturmasının yanı sıra yüksek bakım ve onarım masraflarını da beraberinde getirir. Bu nedenle ŞKDMSM'de oluşacak arızaların hızlı bir şekilde tespiti çok önemlidir. Son yıllarda motorların çalışma durumlarının denetiminde online durum izlemesi yapılmaktadır. Bu çalışmada ŞKDMSM'nin çalışma durumunun uzaktan kontrol edilmesi, motora ait akım ve gerilim bilgilerinin bir merkezde toplanması ve bu bilgilerin analiz edilerek rulman arızası tespiti için, Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) tabanlı durum izleme otomasyonu gerçekleştirilmiştir. Önerilen arıza tespiti, motor akım sinyal bilgileri üzerinden istatistiksel süreç kontrol yöntemine dayalıdır. Durum izleme amacıyla gerçekleştirilen donanımsal bölüm merkezinde mikro denetleyici olarak Arduino Mega yer almaktadır. Kullanılan mikro denetleyicinin düşük maliyetli olarak seçilmesi herkes tarafından erişilebilir olmasını sağlarken düşük örnekleme frekansı (saniyede ~1000 örnek) bir dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır. Düşük frekans değerine sahip olan örnekleme değerlerinden arıza tespiti yapabilmek için Üstel Ağırlıklı Hareketli Ortalama (EWMA) grafik yöntemi kullanılmıştır. SCADA ara yüzünde görüntülenen ve veri tabanına kaydedilen tüm veriler sayesinde ŞKDMSM online durum izlemesi yoluyla başarılı bir şekilde rulman arızası tespit edilebilmektedir.

2020, 87 SAYFA

ANAHTAR KELİMELER: Şebeke kalkışlı daimi mıknatıslı senkron motor, Rulman arızası, EWMA grafik yöntemi, Scada, Online durum izleme, Arduino.

ABSTRACT

MASTER OF DEGREE THESIS

BEARING FAULT DETECTION OF LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR ON SCADA ENVIRONMENT BY USING ONLINE CONDITION MONITORING

SAADET GÜLSÜM GÖZÜOĞLU

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

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

SUPERVISOR: ASST. PROF. DR. ZAFER DOĞAN

Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor (LSPMSM) production line systems, fan systems with the advantages of high efficiency and high power-factor replace the asynchronous motors day by day in industrial areas. LSPMS motors with mains start-up fail over time due to severe operating conditions. Failure of these motors not only results in production losses but also high maintenance and repair costs. For this reason, it is very important to detect faults in the LSPMSM starting quickly. In recent years, online status monitoring has been carried out under the supervision of the operating status of the engines. In this study, Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) based state monitoring automation has been realized for remote control of the working status of the LSPMSM with network residual, collection of current and voltage information of the motor and analysis of this information in order to detect bearing fault. The proposed fault detection is based on the statistical process control method based on the motor current signal information. Arduino Mega is the microcontroller at the centre of the hardware department for the purpose of monitoring the situation. The low-cost selection of the microcontroller used makes it accessible to all, but a low sampling frequency (~ 1000 samples per second) is a disadvantage. Exponentially Weighted Moving Average (EWMA) graphing method was used in order to make fault detection from low frequency sampling values. All the data displayed in the SCADA interface and stored in the database can successfully detect bearing fault through online status monitoring of the LSPMSM with mains start.

2020, 87 PAGES

KEYWORDS: Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor, Bearing Fault, EWMA Graph Method, Scada, Online Condition Monitoring, Arduino.

ÖNSÖZ

Bu seminerin hazırlanmasında ilk olarak çalışmalarım boyunca her türlü konuda fikir ve yardımlarını benden esirgemeyen danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zafer DOĞAN' a, bana zaman ayıran, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan kıymetli eşim Sayın Öğr. Gör. Abdulkadir GÖZÜOĞLU' na ayrıca beni bugünlere getirmek için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan babama, anneme, kardeşlerime ve biricik oğlum Mehmet Zeki'ye sonsuz teşekkür ederim.

SAADET GÜLSÜM GÖZÜOĞLU
22 Ocak 2020

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.....	8
3.1. Şebeke Kalkışı Daimi Mıknatıslı Senkron Motorlar	8
3.1.1. Stator	9
3.1.2. Rotor.....	9
3.2. Şebeke Kalkışı Daimi Mıknatıslı Senkron Motorun Matematiksel Modeli.....	15
3.3. Şebeke Kalkışı Daimi Mıknatıslı Senkron Motorda Meydana Gelen Arızalar	17
3.3.1. Manyetik arızalar	18
3.3.2. Elektriksel arızalar	19
3.3.3. Mekaniksel arızalar	19
3.4. Şebeke Kalkışı Daimi Mıknatıslı Senkron Motorun Arıza Tespit Metotları	22
3.5. Arıza Tespitinde Kullanılan Sinyal İşleme Yöntemleri.....	26
3.5.1. İstatiksel süreç kontrol ve EWMA	27
3.6. SCADA Sistemi ve Uzak Terminal Birimi.....	33
3.6.1. SCADA programlama ortamı.....	38
3.6.2. Seri iletişim	39
3.6.3. Uzak terminal birimi (remote terminal unit, RTU).....	41
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve VERİ TOPLAMA.....	46
4.1. Deneysel Çalışmalar.....	47
4.1.1. Rulman arızalarının oluşturulması	54
4.2. Veri Toplama.....	55

5.	BULGULAR ve TARTIŞMA.....	62
6.	SONUÇ.....	79
7.	KAYNAKLAR	82
8.	ÖZGEÇMİŞ.....	87



SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler	Açıklamalar
d/d	Motor devir sayısı
f	Frekans
i_{ds}, i_{qs}, i_{0s}	Stator akımları
$i'_{qr}, i'_{dr}, i'_{0r}$	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}, v'_{dr}	Rotor gerilimleri
$\lambda_{qs}^r, \lambda_{ds}^r, \lambda_{0s}^r$	Stator akıları
$\lambda'_{qr}, \lambda'_{dr}, \lambda'_{0r}$	Rotor akıları
r_s	Stator direnci
r'_{qr}, r'_{dr}	Rotor direnci
L'_{lr}	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
K	Alt grup sayısı
N	Her bir alt grupta bulunan ölçüm sayısı
x_{ij}	i alt grubundaki j numaralı örnekleme değeri
x_i	Alt grubunun ortalaması
\bar{x}	Tüm alt grupların genel ortalaması
s_i	Her bir alt grubun standart sapma değeri
\bar{s}	Genel ortalama
Z_0	Genel ortalama

z_i	Grafikteki her bir nokta
L	Sabit değer
V	Volt
A	Amper
Σ	Standart sapma
f_{ab}	Dış bilezik arıza frekansı
Fr	Rotor frekansı
f_{ib}	İç bilezik arıza frekansı
f_{bi}	Bilye arıza frekansı
f_{ka}	Kafes arıza frekansı
Dc	Rulmanın dış çapı
Db	Bilye çapı
Nb	Bilye sayısı
β radyan	Temas açısı

Kısaltmalar

Açıklamalar

AA	Alternatif Akım
AKL	Alt Kontrol Limit
AlNiCo	Alüminyum-Nikel-Kobalt
ASM	Asenkron Motor
DA	Doğru Akım
DB	Dış Bilezik
DMSM	Daimi Mıknatıslı Senkron Motor
EWMA	Üstel Ağırlıklı Hareketli Ortalama
Gabor-MTA	Gabor Mertebe Takip Analizi
HB	Hasarlı Bilye
I2C	Seri Çevresel Ara yüzü
İB	İç Bilezik
İSK	İstatiksel Süreç Kontrol
KA	Kafes Arızası
LCD	Sıvı Kristal Ekran
LED	Işık Yayan Diyot
MÇ	Merkez Çizgi
MTA	Mertebe Takip Analizi
NdBF _e	Neodyum - Boron-Demir
NI	National Instruments
PLC	Programlanabilir Mantıksal Denetleyici
RÇK	Rotor Çubuk Kırığı
RTC	Gerçek Zaman Saati
RTU	Uzak Denetim Cihazı
RX	Alıcı
SCADA	Danışmalı Denetim ve Veri Toplama Sistemi
SmCo	Samaryum-Kobalt
ŞKDMSM	Şebeke kalkışlı Daimi Mıknatıslı Senkron Motor
TEK	Türkiye Elektrik Kurumu
TX	Verici
ÜKL	Üst Kontrol Limit

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1. ŞKDMSM'nin kesitsel şekli	8
Şekil 3.2. DMSM'de Rotor yüzeyine yerleştirilmiş mıknatıs görünümü.....	10
Şekil 3.3. DMSM'de Rotor gövdesine radyal yerleştirilmiş mıknatıs görünümü.....	11
Şekil 3.4. DMSM'de Rotora dairesel yerleştirilmiş mıknatıs görünümü	12
Şekil 3.5. Akı bariyerlerinin gösterimi	12
Şekil 3.6. Üç fazlı ŞKDMSM eşdeğer devresi	15
Şekil 3.7. ŞKDMSM'de meydana gelen arızalar	18
Şekil 3.8. Rulman Geometrisi.....	21
Şekil 3.9. Rulmanlardan akan deşarj akımları	21
Şekil 3.10 İSK Grafiği	31
Şekil 3.11. SCADA ara yüzü.....	34
Şekil 3.12. Processing.....	39
Şekil 3.13. Seri iletişim.....	40
Şekil 3.14. Arduino MEGA 2560 R3	42
Şekil 3.15. AA gerilim sensörü.....	43
Şekil 3.16. DS3231 - RTC modülü bağlantı şeması	45
Şekil 4.1. Sistemin genel çalışma algoritması	46
Şekil 4.2. SCADA için tasarlanan sistemin genel şeması.....	47
Şekil 4.3. Deney düzeneği eksenleme	47
Şekil 4.4. Deney düzeneği	48
Şekil 4.5. Donanımsal kontrol birimi genel yapısı	51
Şekil 4.6. SCADA ara yüzünde anlık sinyal görünümü	52
Şekil 4.7. SCADA ara yüzünde enerji metre ölçümleri.....	53
Şekil 4.8. Labview signal express ekran ara yüzü	54
Şekil 4.9. Rulman arızaları: a) DB arızalı b) İB arızalı c) HB arızalı d) Sağlam	55
Şekil 4.10. 500 rpm'de motorun % 100 yük durumundaki sağlam durum veri grafikleri	56
Şekil 4.11. 1500 rpm'de motorun % 100 yük durumundaki sağlam durum veri grafikleri	56
Şekil 4.12. Motorun 500 rpm'de % 100 yükleme durumunda DB arızası durumu veri grafikleri.....	58
Şekil 4.13. Motorun 1500 rpm'de % 100 yükleme durumunda DB arızası durumu veri grafikleri.....	58
Şekil 4.14. Motorun 1500 rpm'de % 100 yükleme durumunda İB arızası durumu veri grafikleri.....	59
Şekil 4.15. Motorun 500 rpm'de % 100 yükleme durumunda İB arızası durumu veri grafikleri.....	60
Şekil 4.16. Motorun 1500 rpm'de % 100 yükleme durumunda HB arıza durumu veri grafikleri.....	60
Şekil 4.17. Motorun 500 rpm'de % 100 yükleme durumunda HB arıza durumu veri grafikleri.....	61
Şekil 5.1. Motorun 1500 rpm devirde % 100 yüklü durumundaki SCADA ara yüzü....	63

Şekil 5.2. Deney-1'in 500 rpm'de, % 0 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri	64
Şekil 5.3. Deney-1'in 500 rpm'de % 100 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri	64
Şekil 5.4. Motorun 1500 rpm'de % 0 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri	65
Şekil 5.5. Motorun 1500 rpm'de % 100 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri	65
Şekil 5.6. Deney-2'nin 500 rpm'de % 100 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri	67
Şekil 5.7. Deney-2'nin 500 rpm'de % 0 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri	68
Şekil 5.8. Deney-2'nin 1500 rpm'de % 100 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri	69
Şekil 5.9. Deney-2'nin 1500rpm'de % 0 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri	70
Şekil 5.10. Deney-3'ün 500 rpm'de % 100 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri	71
Şekil 5.11. Deney-3'ün 500 rpm'de % 0 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri	72
Şekil 5.12. Deney-3'ün 1500 rpm'de % 100 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri	73
Şekil 5.13. Deney-3'ün 1500 rpm'de % 0 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri	74
Şekil 5.14. Deney-4'ün 500 rpm'de % 50 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri	75
Şekil 5.15. Deney-4'ün 500 rpm'de % 0 yük durumunda EWMA analiz sonuç grafikleri	76
Şekil 5.16. Deney-4'ün 1500 rpm'de % 100 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri	77
Şekil 5.17. Deney-4'ün 1500 rpm'de % 0 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri	78

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Akım sensörünün özellikleri.....	43
Çizelge 3.2. LCD ekranın pin bağlantıları	44
Çizelge 4.1. ŞKDMS motorun parametreleri.....	49
Çizelge 4.2. DA makineye ait çalışma parametreleri	49
Çizelge 4.3. ŞKDMSM sürücüsünün teknik bilgileri	50



1. GİRİŞ

Teknolojideki gelişmeler her alanda sürekli bir iyileşme ve hayatı kolaylaştırma olarak ortaya çıkmaktadır. Bu gelişmeler, endüstride çok yaygın olarak kullandığımız motorlarda da görülmektedir. Endüstriyel uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan tahrik elemanı Asenkron Motorlar (ASM) olarak görülmektedir (Alağaç ve Pınarbaşı, 2012; Bostan, 2010; Djmal ve ark., 2018; Fonseca ve ark., 2018; Orhan, 2011; Yu ve ark., 2017). ASM'nin tercih edilme nedenlerinden bazıları, yapısal olarak basit ve ekonomik olmaları, periyodik bakım gerektirmemeleri ve güvenilir olmalarıdır. Ancak bu önemli avantajlarının yanında hacimsel olarak büyüklükleri, verimlerinin senkron motora göre düşük olması, gürültülü çalışmaları ASM'lerin önemli dezavantajlarındandır.

ASM'lerin verimlerinin düşük olması, motor araştırmacılarını son yıllarda verimli motor arayışlarına yöneltmiştir. Yapılan çalışmalarda Daimi Mıknatıslı Senkron Motor (DMSM)'un rotor yapısına ASM'nin kafes sistemi eklenerek Şebeke Kalkışlı Daimi Mıknatıslı Senkron Motor (ŞKDMSM) elde edilmiştir. Eklenen bu yapı sayesinde ŞKDMSM'ler şebekeden direkt beslenerek kalkış yapabilmektedirler (Kim ve ark., 2009). ŞKDMSM'nin rotor yapısında bulunan mıknatıslar sayesinde sürekli haldeki performans artırılmıştır (Fırat, 2006). ŞKDMSM verim kapasitesi, boyut ve kütlesine göre oldukça fazla güç oluşturması, duyarlı ve ölçülü denetim imkânı, güçlü moment gibi birçok yararlarından dolayı endüstrinin birçok alanında en fazla tercih edilen motor türlerinden biri olmaya adaydır (Fırat, 2006).

Bütün elektrik makinalarındaki gibi ŞKDMSM'lerin de sağlamlık süresi doğru ve güvenilir çalışmalarına bağlıdır. Sanayinin birçok ortamında bulunan sıcaklık, nem, toz vb. çevresel etkiler, elektriksel, mekaniksel ve manyetik zorlamalar ŞKDMSM'lerde arızaların meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu arızalar genel olarak elektriksel, mekanik ve manyetik arızalar olarak gruplandırılmaktadır. Elektriksel arızalar; sargı arızaları, rotor çubuk kırığı arızası ve rotor çubuk halkası kırığı arızasıdır. Mekanik arızalar; eksenden kaçıklık ve rulman arızalarıdır. Manyetik arızalar ise demagnetizasyon arızası ve mıknatıs kırığı arızası olarak sınıflandırılabilir (Nandi ve ark., 2005). Kusurlu olan motorun sağlıklı çalışma süresi de kısadır. Sorunun daha ilk adımda iken belirlenmesi, bu soruna çözüm bulunması düzenin sürmesi ve motorun sağlıklı çalışma

süresi açısından çok mühim yere sahiptir (Ferhat, 2018). Günümüzde online durum izleme yoluyla motorların işletme koşullarındaki durumları denetlenmektedir. Online durum izleme sayesinde, motora ait arızalar önceden tespit edilebilmekte, arızanın sebep olacağı motorun tamamen kullanılamaz hale gelmesi durumunun önüne geçilebilmekte ve etkin bir koruma sağlanabilmektedir. ŞKDMSM'lerin online durum izlemelerinde birçok yöntem kullanılmaktadır: termal izlemeler, hava aralığı moment izleme, akustik ses ölçümü, titreşim izleme, motor akımlarının izlenmesi, manyetik akının izlenmesi, indüklenen gerilimin izlenmesi, kısmi deşarjın izlenmesi, gaz analizi, ani elektriksel gücün izlenmesi, ani açısal hızın izlenmesi, darbe testi ve gerilim izleme. Bu yöntemler içerisinde en pratik olan ve en yaygın kullanılan yöntem motor akımlarının izlenmesidir.

Arıza tespit amaçlı sinyal analizlerinin en önemli noktası özellik çıkarmadır. Özellik çıkarma işlemlerinde sinyalleri temsil eden en baskın özellikler hesaplanarak sinyaller sayısallaştırılır (Proakis ve Manolakis, 2007). Elektrik makinalarında oluşan arızaları temsil eden özellikleri elde etmede en çok kullanılan yöntemler frekans boyutunda analiz, zaman-frekans boyutunda analiz, zaman boyutunda analiz, model tabanlı analizler vb. olarak sınıflandırılmaktadır (Boashash, 1990). Bu analizler içerisinde zaman boyutunda analizler, en hızlı arıza tespiti yapması ve pratik olması yönleriyle diğerlerine nazaran daha çok kullanılmaktadır. Zaman boyutunda analiz yöntemlerinde, çoğunlukla sinyallerin istatistiksel özelliklerinin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç için kullanılan yöntemlerden biri de İstatistiksel Süreç Kontrol (İSK) yöntemidir. İSK, sinyallerin istatistiksel özellikleri yoluyla süreç takibi, arıza belirleme, kalite kontrol vb. uygulamalarda kullanılmaktadır (Alağaç ve Pınarbaşı, 2012; Bostan, 2010; Djmal ve ark., 2018). Yedi temel istatistiksel süreç kontrol yöntemi vardır. Bunlar; çetele tablosu, histogram, pareto analizi, sebep-sonuç diyagramı, hata yoğunluk diyagramı, serpilme diyagramı ve kontrol grafikleridir. Kontrol grafik yöntemlerinde, Türkçe yazılışı üstel ağırlıklı hareketli ortalama olan Exponentially Weighted Moving Average (EWMA) ve Çok Değişkenli Üstel Ağırlıklı Hareketli Ortalama (MEWMA) yöntemleri de bulunmaktadır.

Bu çalışmada ŞKDMSM'nin rulman arızası tespiti için SCADA tabanlı durum izleme otomasyonu gerçekleştirilmiştir. Önerilen arıza tespit yöntemi, ŞKDMSM stator akım sinyalleri üzerinden İSK yoluyla özellik çıkarmaya dayalıdır ve bu alandaki literatürde

bu motor için ilk kez kullanılmıştır. Durum izleme amacıyla gerçekleştirilen donanımsal bölüm merkezinde mikro denetleyici olarak Arduino Mega kullanılmıştır. Arduino Mega Uzak Kontrol Birimi, Remote Terminal Unit (RTU) gibi görev yapmaktadır. RTU; sensör verilerini toplayan, düzenleyen ve SCADA ara yüzüne aktaran yapıdır. Ayrıca SCADA ara yüzünden gelen komutları donanımsal bölümde uygun yere gönderilmesini sağlamaktadır. Donanımsal bölümden alınan akım sinyalleri SCADA ortamında izlenmekte ve EWMA tabanlı İSK yöntemi kullanılarak arıza tespiti yapılmaktadır.

Bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. 1. Bölüm giriş bölümüdür. Bu bölümde genel olarak ŞKDMSM'lere, bu makinada oluşan arızalara değinilip ayrıca tez çalışmasından bahsedilmiştir. 2. Bölümde kaynakça taramasına yer verilmiştir. Kaynakça taraması rulman arızası, ŞKDMSM, SCADA sistemi ve EWMA tabanlı İSK yöntemi konuları ön plana alınarak yapılmıştır. 3. Bölüm materyal ve yöntem bölümüdür. Bu bölümde ŞKDMSM'nin yapısı, çalışma ilkesi, avantaj ve dezavantajları, matematiksel modeli, ŞKDMSM'de oluşabilen arızalar ayrıntılı bir biçimde ifade edilmiştir. Ayrıca İSK yöntemlerinden biri olan EWMA hakkında bilgiler verilip, matematiksel modeli tanıtılmıştır. Bunlara ek olarak; EWMA analizi sırasında kullandığımız verileri elde etmek için oluşturulan RTU çalışma stiline sahip donanım bölümü ile görüntülemek ve kaydetmek için oluşturulan yazılım bölümleri ayrıntılı bir şekilde tanıtılmıştır. 4. Bölüm deneysel çalışmalar ve veri toplama bölümüdür. Bu bölümde sistemin genel çalışma algoritması verilerek kısaca anlatılmıştır. Ayrıca bu bölümde deney düzeneği, arıza oluşturma ve veri toplama ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. 5. Bölüm bulgular ve tartışma bölümüdür. Bu bölümde toplanan verilerin işlenmesi açıklanıp elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak ifade edilmiştir. 6. Bölüm sonuç bölümüdür. Bu bölümde çalışmanın sonuçları açıklanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde tez konusu ile ilgili daha önce yapılmış olan çalışmalar incelenerek anlatılmıştır. Yapılan çalışmalarda rulman arızası, ŞKDMSM, SCADA sistemi ve İSK yöntemi konuları ön plana alınarak araştırmalar yapılmıştır. Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar bu bölümde kısaca anlatılmıştır.

Şu ana kadar rulman arızası çalışmaları daha çok asenkron motor üzerinde yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları; Ayaz (2002), asenkron motorlarda öngörülü bakım amaçlı olarak rulman arıza gelişimi üzerine bir inceleme gerçekleştirmiştir. Rulman arızaları, hızlandırılmış eskitme süreçleri ile yapay olarak oluşturularak motor titreşim ve akım işaretlerini toplamış ve işaret tabanlı rulman arıza tanısını yapmıştır. Dalgacık analizi kullanılarak, rulman arızasına ilişkin özellik çıkarımı yapılmış ve ayrıca titreşim işaretlerinin istatistiksel analizini gerçekleştirilerek erken arıza tanısı için bir ölçüt geliştirmiştir. Yiakopoulos ve Antoniadis (2002) ise, her biri farklı ve tek bir hataya sahip üç ayrı rulman kullanarak arıza tespiti üzerine çalışan üç ayrı rulmanın, her birindeki arızayı tanımlamıştır. Bu arızaların her birinin farklı frekans değerlerinde olduğunu belirlemiştir. Bu frekansların hesaplanmasında ve tespit edilmesinde bilye sayısı, iç ve dış bilezik çapları önemlidir. Diğer bir çalışmada, Orhan (2011), bir petrol rafinerisinde karşılaşılan rulman arızası ve bir hidroelektrik santralinde pompada görülen balanssızlığı incelenmiştir. 985 d/d hızda çalışan temiz hava fanının rulmanında dış bilezik arızası, hasar frekansları oluşturarak kendini göstermiştir. 1485 d/d hızda çalışan elektrik motorunda ise eksenden kaçıklık arızası tespit edilmiştir.

Bu alandaki literatür incelendiğinde şimdiye kadar doğrudan ŞKDMSM'nin rulman arızası üzerine bir çalışma bulunmadığı görülmüştür. DMSM ve ASM üzerinde yapılan arıza çalışmaları yapısal benzerliklerinden dolayı bu motor içinde ışık tutmaktadır. Özçira (2007), DMSM'nin yapısı ve matematiksel modelini vermiş, kontrol yöntemlerini incelemiş ve endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan kontrol yöntemi olan doğrudan moment kontrolü metodu ile Matlab/Simulink simülasyonunu gerçekleştirmiştir. DMSM'nin analizi ile elektromanyetik moment değerindeki artışın, stator ve rotor manyetik akılarının arasında kalan açının artışı ile orantılı olduğunu görmüştür. Diğer bir çalışma ise Eker ve Akar (2016), DMSM'nin sağlam ve eksenden

kaçıklık arızalı durumlarında durağan ve durağan olmayan koşullar da farklı yük durumlarında rotor hızı ile birlikte motorda farklı eksenlerden alınan titreşim sinyallerini incelemiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında motorda arızaya ait net bilgiler içeren sinyallere ulaşmıştır. Tetik (2019), bu çalışmada da ŞKDMSM' de oluşan stator sargı arızalarının tespiti için Gabor-Mertebe Takip Analizi (Gabor-MTA) yoluyla zaman-frekans boyutunda işaret analizine dayalı yeni bir yöntem sunmuştur. Motorda stator sargı arızasını bir ayarlı direnç kullanılarak yapay olarak oluşturmuştur. 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 durumları için izlemiş ve bir bilgisayarda kayıt altına almıştır. Toplanan veriler MTA yöntemi ile analiz edilerek arıza harmoniklerinin frekans boyutunda mertebelerini hesaplamıştır. Arıza durumunun ve arıza seviyesinin tespiti için Gabor-MTA yoluyla 6. mertebe harmonik bileşeninin zaman boyutunda işaretini elde etmiştir. Bu işaret bileşeninin enerji seviyesi ve istatistiksel parametrelerini hesaplayarak arıza ve arıza seviyelerine ait özellikleri çıkarmıştır.

Arızaların analizi için doğru ve güvenilir motor verisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu verileri elde edebilmek için pek çok çalışmada SCADA ortamı kullanılmıştır. Köklükaya ve Bayrak (1998), SCADA sistemiyle enerji dağıtım sistemlerinde harmoniklerin ölçülmesi konusunu incelemiş ve ölçme yapılabilmesi için gerekli olan donanımların nasıl olması gerektiğini açıklamıştır. Örnek olarak seçilen üç fazlı kontrolsüz tam dalga doğrultucudan oluşan yükün dağıtım şebekesini besleyen transformatörden çektiği akımın dalga şekli ve harmonik spektrumunu bilgisayar benzetimiyle incelemiştir. Bu çalışmada ise; (Bektaş ve ark., 2007), Üç fazlı ASM'de meydana gelen arızaların tespit edilmesine ait PLC tabanlı bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Motorun çalışmasını normal sınırlar içinde sürdürdüğü durumlarda; fazlara ait akım-gerilim değerleri, motor devri ve sargı sıcaklığı gibi motora ait sayısal ve analog bilgiler Siemens S7 200 serisi PLC kullanılarak bilgisayara aktarılmıştır. Seri port üzerinden haberleştirilen PLC ve bilgisayar arıza algılanması durumunda geri besleme sinyali göndererek motoru durdurulabilmiştir. Yapılan çalışma sonunda geliştirilen koruma sisteminin, geleneksel koruma rölelerine göre elektromekanik elemanlardan arındırılmış, daha hassas, bakım gerektirmeyen bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.

SCADA ortamının kullanıcıya sağladığı yararlarından en önemlisi online çalışma ortamı sunmasıdır. Literatür incelendiğinde yapılan online çalışmalar; Colak ve ark. (2005), 1.5 kW gücünde bir elektrik motorunun online korumasını gerçekleştirmek için, motordan aldığı gerilim, akım, sıcaklık ve motor hızı bilgilerini kullanarak, gerçek zamanlı bir arıza uyarı sistemi gerçekleştirmiştir. Ferhat (2018), ise asenkron makinaların gerçek zamanlı arıza tespiti ve teşhisinde kullanılan yöntemleri incelemiş ve gelecekteki araştırma alanları tanımlamıştır. Fonseca ve ark. (2018), ŞKDMSM’de stator arızalarının oluşumunu incelemiştir. Online arıza tespiti için Matlab/Simulink’te dinamik bir model geliştirmiştir. Bu model ile ŞKDMSM’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.

Motorda alınan veriler doğrultusunda arıza tespitinde pek çok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biride İSK yöntemidir. Yapılan çalışmalara baktığımızda; Bostan (2010), askeri kuruluşa ait araçların motor yenileştirilmesi süreci üzerinde durmuştur. Kullanılan yöntem ile yenileştirme sürecinde hataların önlenmesi, işçilik ve malzeme kayıplarının düşürülmesi sağlanmıştır. Bir başka çalışmada ise Alağaç ve Pınarbaşı (2012), düz dişlilerdeki hataların sebep olduğu titreşimlerdeki değişimlerin incelenerek, farklı tipteki diş kusurlarından ve kusur tiplerinden elde edilen verilerin iki yönlü (x, y) analiz edilerek tespiti amaçlanmıştır. Bu verileri elde edebilmek dişliler üzerindeki aşınmayı ölçmek için kontrollü bir deney düzeneği oluşturmuştur. Deney düzeneğinden alınan iki yönlü titreşim sinyallerini dijital analog çeviricilerle bilgisayar ortamına aktarmıştır. Dişlinin hangi saat aralığında aşındığının tespiti için EWMA kontrol grafiğini oluşturmuş ve yorumlamıştır. Böylece, süreç ortalamasında ortaya çıkan değişimleri, söz konusu grafiğin eğimindeki değişim ile izlemiş ve bu değişime sebep olan kontrol dışı noktaları tespit ederek yok etmiştir. Böylece sağlam dişlinin ne zaman aşındığının tespitini grafiksel olarak göstermiştir. Eser (2018), ise ASM’nin arıza tespiti için İSK yönteminin kullanıldığı çalışma offline olarak değerlendirilmiştir. Veriler motordan

alındıktan sonra Matlab uygulaması kullanılarak arıza tespit edilmiştir. EWMA'yla ilgili yapılan bir diğer çalışma ise; Djmal ve ark. (2018), Optimize EWMA yöntemini kullanarak atık su arıtma tesisinde suların temizlenmesini kontrol etmişlerdir. Bu yöntem en ufak değişiklikleri ortaya çıkarabildiği için arıtma sürecindeki verimi arttırmıştır.

Literatür çalışmaları incelendiğinde SCADA ortamında ŞKDMSM'nin online olarak rulman arızası tespiti üzerine herhangi bir çalışma yapılmadığı görülmüştür. Bu motorla benzer stator yapısına sahip olan ASM ve DMSM gibi motorlarda günümüze kadar rulman arızası tespiti üzerine birçok çalışma yapılmıştır. İSK yönteminin kullanıldığı bu çalışmalarda araştırmacılar daha çok arıza tespiti için offline olarak değerlendirme yapmışlardır. Veriler motordan alındıktan sonra Matlab/Simulink simülasyonunu gerçekleştirilerek arıza tespiti yapılmıştır. Bu çalışmada ise ŞKDMSM'nin rulman arızası tespiti için SCADA tabanlı durum izleme otomasyonu gerçekleştirilmiştir. Önerilen arıza tespit yöntemi, ŞKDMSM stator akım sinyalleri üzerinden İSK yoluyla özellik çıkarmaya dayalıdır ve bu alandaki literatürde bu motor için ilk kez kullanılmıştır. Durum izleme amacıyla gerçekleştirilen donanımsal bölüm merkezinde mikro denetleyici olarak Arduino Mega kullanılmıştır. Arduino Mega RTU gibi görev yapmaktadır. RTU; sensör verilerini toplayan, düzenleyen ve SCADA ara yüzüne aktaran yapıdır. Ayrıca SCADA ara yüzünden gelen komutları donanımsal bölümde uygun yere gönderilmesini sağlamaktadır. Donanımsal bölümden alınan akım sinyalleri SCADA ortamında izlenmekte ve EWMA tabanlı İSK yöntemi kullanılarak arıza tespiti yapılmaktadır.

yapısı bulunmaktadır. Kalkış esnasında daimi 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 Osheiba, 1990; Stephens ve ark., 1998). Şaft çapı ise rotor gövdesinde motor kutuplarının yeterli alana yerleşmesi için ASM’de olduğundan daha küçüktür.

Evirici kullanmadan, doğrudan şebeke beslemeli senkron motorun kalkış yapabilmesi için rotoruna kafes yapısı eklenmiş ve ŞKDMSM yapısı elde edilmiştir (Isfahani ve Vaez-Zadeh, 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.

3.1.1. Stator

Stator, nüve ve sargı olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Stator nüvesi: Akan akının manyetik devreyi tamamlayabilmesi için demir gibi ferromanyetik malzemeden yapılmaktadır. Nüve malzemesi yüksek akı yoğunluğu değerlerine sahiptir. Bu sayede motor verimi yüksektir. Nüve birer yüzler silisli saçların paketlenmesiyle üretilir (Fırat, 2006).

Stator sargısı: Stator sargı yapısı ASM stator sargısının benzeridir. El tipi yarım kalıp, tam kalıp vb. sarımlar burada kullanılır. Bu sargıya uygulanan üç fazlı sinüzoidal gerilim yoluyla döner alan elde edilir.

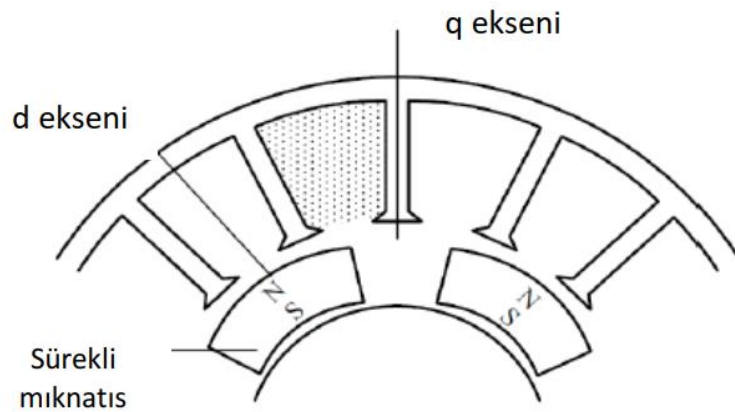
3.1.2. Rotor

Rotor ise; rotor kısa devre kafesi, mıknatıs ve nüveden oluşmaktadır. Bu kısımlar aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Rotor kısa devre kafesi, rotor kafes yapısı ASM'nin sincap kafesli rotor yapısına benzer. Sincap kafesli rotor yapısı, silis saçların preslenerek silindirik saç paket elde edilip, bu saçların üzerine rotorun mil eksenine açılı oluşturacak şekilde açılan kanallara iletken çubuklar yerleştirilerek üretilirler. Bu iletken çubuklar bakır, alüminyum vb. gibi iletkenlerden yapılır (Kara, 2017).

Mıknatıs, ŞKDMSM'nin sürekli çalışmasında rotor yapısındaki mıknatıslar önemli rol oynar. Kullanılan mıknatısın türü motor performansını direkt olarak etkiler.

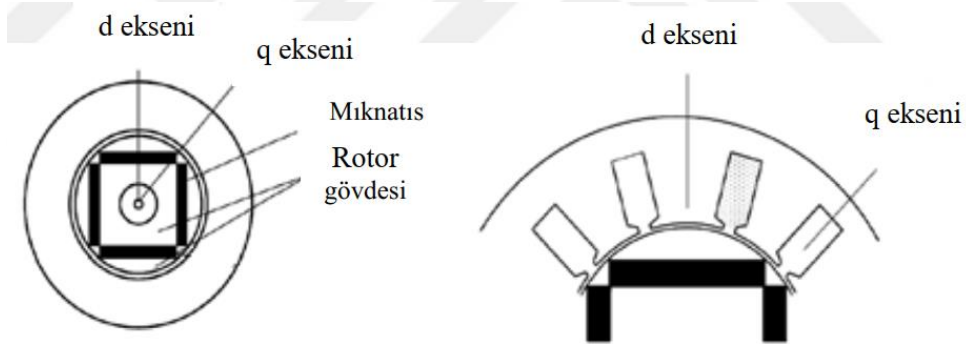
ŞKDMSM'de kullanılan mıknatıs türlerinin her birinin farklı karakteristik özellikleri vardır. Bu motorlarda AlNiCo, Ferrite, SmCo ve NdFeB gibi mıknatıslar kullanılmaktadır. ŞKDMSM'ler rotorlarında bulunan mıknatısların konumlarına göre farklı tiplerde tasarlanabilmektedir. Mıknatıslar temel anlamda 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 3.2'de gösterilen rotor yapısında mıknatıslar rotor yüzeyine yerleştirilmiştir. Bu tasarımda maliyet düşük ve üretim kolaydır. Ancak rotor hava aralığı etkisi ve rotor direnci yüksektir. Tasarımın, yüksek titreşimler oluşturması ve mıknatısların yüzeyden kopma riski gibi mahsurları bulunduğundan bu tip rotor yapıları düşük hız gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır.



Şekil 3.2. DMSM'de Rotor yüzeyine yerleştirilmiş mıknatıs görünümü (Eker, 2013)

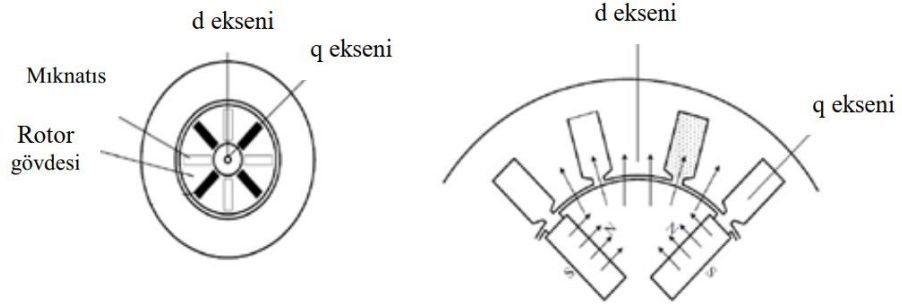
Rotor gövdesine gömülü mıknatıs yapıları mekanik sağlamlık, düşük ses ve titreşim, düşük kısa devre akım seviyesi ve yüksek verimlilik gibi faydalara sahiptir. Buna karşı rotor gövdesine oluklar açılıp mıknatısların yerleştirilmesi üretimin zorluğunu ve maliyetini artırmaktadır. Tasarım, merkezkaç kuvvetine karşı sağladığı yüksek dayanım sayesinde yüksek hız gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır (Eker, 2013; Kara, 2017).

Şekil 3.3’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.



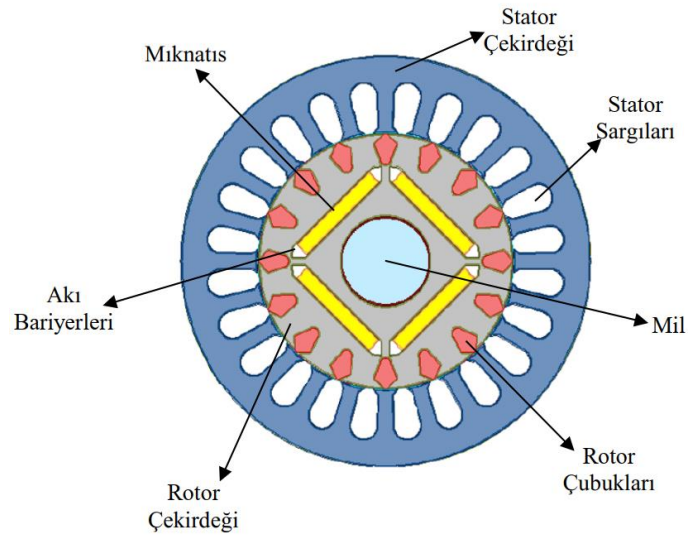
Şekil 3.3. DMSM’de Rotor gövdesine radyal yerleştirilmiş mıknatıs görünümü (Eker, 2013)

Şekil 3.4’de gösterilen rotor yapısında mıknatıslar rotor gövdesine 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 3.4. DMSM'de Rotor dairesel yerleştirilmiş mıknatıs görünümü (Eker, 2013)

Şekil 3.5'te gösterilen akı bariyerleri 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 3.5. Akı bariyerlerinin gösterimi (Karami ve ark., 2014)

Sürekli mıknatis malzemelerde ve yarı iletken elemanlardaki yeni gelişmeler, ŞKDMSM'nin klasik doğru akım motorunun üstünlükleri ile alternatif akım motorların sağlamlık ve güvenilirlik özelliklerini sağlayabilecek duruma getirmiştir. Mıknatıslı senkron motor ve diğer tahrik motorları ile tasarlanan sistemler karşılaştırıldığında aşağıdaki avantajlar sıralanabilir:

- Rotorunda sargı yerine mıknatısların bulunması verimini artırmaktadır. Rotorda sabit mıknatis bulunduğundan dolayı uyarma akısına gerek yoktur. Bu nedenle harici bir uyarma kaynağına ve uyarma gücüne gerek kalmamaktadır. Uyarma kayıpları söz konusu değildir. Böylece motorun verimi artmaktadır (Fırat, 2006).
- Özellikle doğru akım motorlarındaki fırça ve kolektör sistemi DMSM'de olmadığından bakım maliyeti azalmakta, ayrıca fırçalarda kayıplar meydana gelmediğinden verim artmaktadır (Fırat, 2006).
- Kolektör bulunmaması rotor boyunun kısılmasına, rotorda sargıların olmaması da ağırlığının dolayısıyla rotor ataletinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle atalet momenti düşük ve dinamik performansı iyidir (Kara, 2017).
- Asenkron motora göre güç faktörü yüksektir. Eviriciden beslenen sistemlerde güç katsayısının yüksek olması eviricinin gücünden verimli olarak faydalanabilmek açısından önem taşımaktadır (Kara, 2017).
- Vektör kontrollü asenkron motor sistemlerine göre denetimi daha basit ve parametre değişimlerinden etkilenmeyen bir şekilde gerçekleştirilebilir (Fırat, 2006).
- ŞKDMSM sürekli çalışmada birçok avantaja sahip iken motorun kalkış anında ortaya çıkan bazı dezavantajları da mevcuttur (Kara, 2017).
- Şebeke frekansına bağlı olarak sabit bir hızda çalışabilirler. Karmaşık kontrol sistemleri tasarlanmadan hızın değişimi söz konusu değildir. Uygulama alanları da sabit hızın gerektiği yerlerdir.
- Sabit mıknatıs ve stator alanı arasında senkronizasyon sağlayabilmek için rotor pozisyonunun bilinmesi gerekir. Rotor pozisyonu sensörlerle belirlenebilir fakat bu, maliyeti artırdığı ve güvenilirliği azalttığı için istenmez. Sensör kullanılmadan da moment üretmek mümkündür. Fakat bu tür bir uygulama düşük hızlarda

verimli olmamakta ve karmaşık bir denetim algoritması kullanmak gerekmektedir.

- Generatör çalışma durumunda, gerilim ayarı uyarma akımı olmadığından dolayı yapılamaz.
- Mıknatıs malzemelerin ısıl sınırlamaları ve demagnetizasyon riski sistem güvenilirliğini azaltmaktadır.
- Kullanılan mıknatıs malzemelerin, uygun seçilmemesi durumunda uzun vadede mıknatısların, çeşitli atmosferik ve termik etkilerin de sonucu mıknatıslık özelliği kaybetmeleri makina için olumsuz bir etkidir.
- Mıknatısların rotor yüzeyinde olduğu tasarımlarda yüksek hızlarda mıknatısların rotor yüzeyine tutturulması oldukça zordur ve her zaman kopma riski vardır.
- Bakım esnasında rotorun statordan çıkarılması durumunda eski çalışma noktası kayabilir.

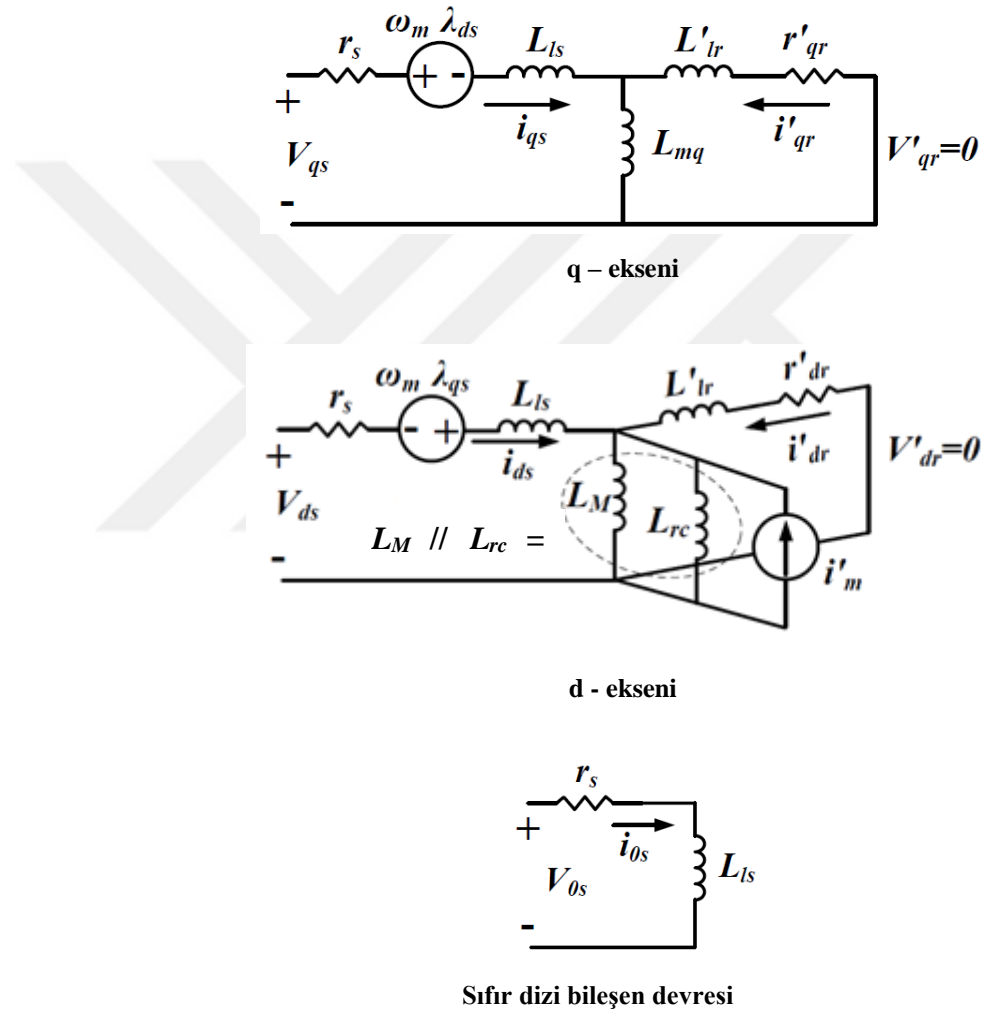
Yüksek pik moment, hassas hız kontrolü, yüksek verim ve uzun ömür gibi önemli özellikler DMSM'leri birçok uygulamalar için en iyi seçim durumuna getirmektedir (Özçira, 2007). Bu uygulamalar:

- Elektrik güç kontrolü,
- Robot uygulamaları,
- Servo sürücüler,
- Elektrik araçları,
- Buzdolabı, Klima, Fan vb. Ev aletleri,
- Gemi Motorları,
- Pompalama,
- Endüstriyel sürücüler,
- Elektrik jeneratörlerinde

DMSM'lar uygulanan gerilime çok hızlı tepki gösterirler. Bu durum rotorun düşük kütlelerinden kaynaklanmaktadır. Uygulama alanları genişledikçe, daha çok sayıda üretim yapılacak ve yüksek olan maliyeti klasik rakipleri ile rekabet edecek seviyeye düşecektir (Buzcu, 2005).

3.2. Şebeke Kalkışlı Daimi 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 3.6 'da ŞKDMSM'ye ait eşdeğer devreler gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Üç fazlı ŞKDMSM eşdeğer devresi (Soreshjani ve Haghparast, 2014)

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

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

ŞKDMSM’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} , stator kaçak indüktansı L_{ls} , açısal hız ω_m ve türev işlemi (p) ile ifade edilerek aşağıdaki denklemler elde edilmiştir (Soreshjani ve Haghparast, 2014).

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

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

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

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

$$\lambda_{0r}^{r'} = L'_{lr} i_{0r}^{r'}$$

Matematiksel modelin ve eşdeğer devre parametrelerinin mıknatısın dâhili 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 Haghparast, 2014).

ŞKDMSM'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.

$$T_e = \frac{3P}{2} [L_{md} i_{dr}^r i_{qs}^r - L_{mq} i_{qr}^r i_{ds}^r + \lambda_m^r i_{qs}^r + (L_{md} - L_{mq}) i_{ds}^r i_{qs}^r] \quad (3.6)$$

$$T_e = T_{ind} + T_{exc} + T_{rel}$$

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

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

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

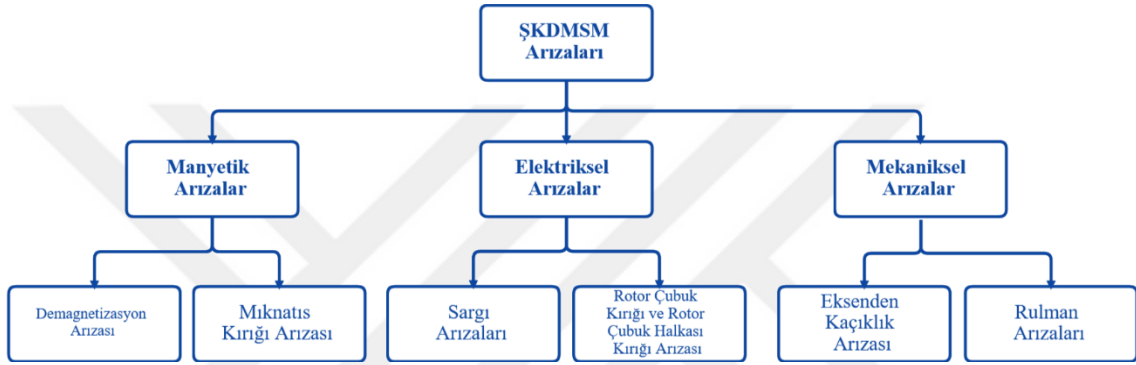
Bu ifadeler tork tahmininde de kullanılabilir (Soreshjani ve Haghparast, 2014).

3.3. Şebeke Kalkışı Daimi Mıknatıslı Senkron Motorda Meydana Gelen Arızalar

Elektrik makinaları çoğu zaman çalışmaları için uygun olmayan ortamlarda bulunurlar. Hatta birçok bozucu etkiye maruz kalabilirler. Ağır işletme koşulları ve dış ortamlardan kaynaklanan ısı, nem, toz vb. sebeplerden dolayı makinalarda arızalar meydana gelir (Kara, 2017).

Elektrik makine arızaları, bütünleşik bir sistemin başarımını etkileyen en mühim unsurlardan biridir. Sorunlu motorun sorununun daha ilk aşamada bulunup tedbir alınması, sistemlerin sürekliliği açısından çok önemlidir (Gözüoğlu ve Doğan, 2019).

Erken tespit edilemeyip geç kalınan bir arıza sonucu telafisi olmayan iktisadi kayıplar olabileceği gibi sistemin durması da söz konusu olabilmektedir. Zamanında arıza tespiti ile meydana gelebilecek sonuçların önceden belirlenip önlem alınması, iktisadi kayıpların da en aza indirilmesini sağlamaktadır. Bu gibi sebeplerden dolayı DMSM’de oluşan arızaların çeşitlerini ve nasıl meydana geldiklerini bilmek erken müdahalede en mühim unsur olabilecektir (Çıra, 2017). ŞKDMSM’lerde meydana gelen arızalar manyetik, elektriksel ve mekanik olarak üç gruba ayrılır. Şekil 3.7’de bu durum görülmektedir.



Şekil 3.7. ŞKDMSM’de meydana gelen arızalar

3.3.1. Manyetik arızalar

Manyetik arızalar demagnetizasyon arızası ve mıknatis kırığı çubuğu arızası olmak üzere iki çeşittir. Bu arızalar ayrıntılı bir şekilde aşağıda açıklanmıştır.

Demagnetizasyon arızası

Mıknatısta oluşan bölgesel demagnetizasyon arızası, uyumsuz manyetik çekme, manyetik harmonikler, yankılı ses ve salınım gibi pek çok olumsuz mekanik tesirlere sebep olmaktadır (Yu ve Tang, 2006). Bu arıza dolaylı olarak ŞKDMSM’nin mekanik mil momentinin düşmesine ve motor başarımının da olumsuz etkilenmesine sebep olmaktadır (Kim ve ark., 2006). Bölgesel demagnetizasyon arızasından dolayı, ŞKDMSM, arızasız durum ile benzer mil momentini oluşturabilmek için daha fazla bir stator akımına gereksinim duymaktadır. Bu akım artışı ŞKDMSM’nin stator sarımlarındaki sıcaklığı yükseltmekte, bu da daha yüksek bir demagnetizasyona ve stator akım yükselmesine sebep olmaktadır (Ruoho ve ark., 2009). Ayrıca sarımlar arası kısa

devre arızası da çok yüksek akımlara sebep olacağından, demagnetizasyon arızasını oluşturabilmektedir (Kim ve ark., 2006). Ortaya çıkabilecek en fena durum, armatür reaksiyonu en fazla miktarda olduğunda, yani motor haddinden fazla yüklerle çalıştırıldığında statorun tüm sargılarının kısa devre olması durumudur (Yu ve Tang, 2006). Stator sargılarının kısa devre olan niceliğinin artması arıza tesirlerini de artırır ve daimi mıknatısın çalışma noktasının geri dönüşü olmayan demagnetizasyon bölgesi noktasına kadar azalmasına sebep olabilir (Zheng ve ark., 2010).

3.3.2. Elektriksel arızalar

Elektriksel arızalar stator sargı arızası ve rotor çubuk kırığı arızası olmak üzere iki çeşittir. Bu arızalar ayrıntılı bir şekilde aşağıda anlatılmıştır.

Stator sargı arızaları

Stator sargılarında meydana gelen bu arızalar; tek faz sargı arızası, faz-faz kısa devre sargı arızası, sarım-sarım kısa devre arızası, faz-toprak kısa devre arızası olmak üzere 4 kısma ayrılır.

Rotor çubuk kırığı arızası

Kısa devre çubuklu rotorlar yapılırken kalıp döküm tekniği uygulandığından, rotor çubuğu ve kısa devre halkalarında döküm sonucunda asimetric durumlar ortaya çıkabilmektedir. Bu durum zamanla motorda belli noktalarda çatlamalar ya da kırılmalara neden olmaktadır. Bu durumda Rotor Çubuğu Kırığı (RÇK) arızası meydana gelir (Mehrijou ve ark., 2011). RÇK arızası meydana gelmesi halinde kırık olan çubuk ya da çubukların üzerinde akım akmayacağından manyetik alanda simetrisizlik meydana getirir. Bu durum hem de motorda kalıcı durumdaki akım dalga şeklinde de bozulmaya sebebiyet verir (Akar ve ark., 2011).

3.3.3. Mekaniksel arızalar

Mekaniksel arızalar eksenden kaçıklık arızası ve rulman arızası olmak üzere iki çeşittir. Bu arızalar ayrıntılı bir şekilde aşağıda anlatılmıştır.

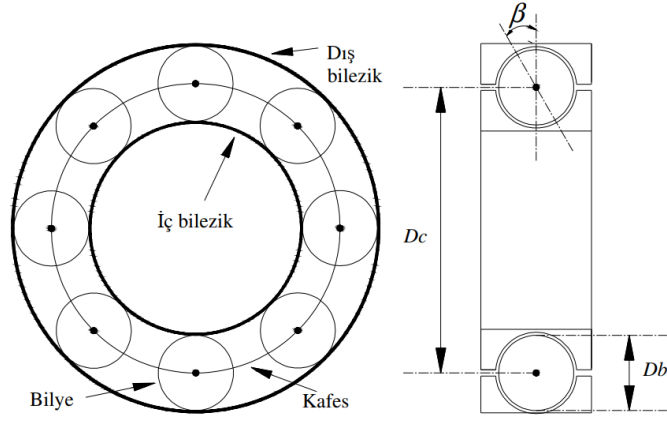
Eksenden kaçıklık arızası

Eksen kaçıklığı arızaları, mekanik arızalar içerisinde araştırılmaktadır. Eksen kaçıklığı düzensiz kütle, şaft burulması ve rulman toleransı gibi üretim yanlışlarından dolayı oluşmaktadır. Eksen kaçıklığı, moment vuruntusu, ses ve salınımlı çalışma gibi sorunlara sebep olabilir (Ebrahimi ve ark., 2009).

Eksen Kaçıklığı arızaları, elektrik makinalarında oluşan arızaların içerisinde önemli bir payı oluşturmaktadır. Dönen makinalardaki eksen kaçıklığı, stator ile rotor arasındaki hava mesafesinin dengesiz olması şeklinde açıklanmıştır (Nandi ve ark., 2005). İki tür hava mesafesi eksen kaçıklığı arızası vardır. Bunlar; dinamik ve statik eksen kaçıklığıdır. Statik eksen kaçıklığında hava mesafesi aralığı dengesizdir, fakat en az olan radyal uzunluk değişmez. Rotor şaftının odağı tam ortada olmadığı ve en az radyal uzunluk rotora bağlı değişim durumunda dinamik eksen kaçıklığı oluşmaktadır (Ebrahimi ve Faiz, 2010). Dinamik ve statik eksen kaçıklığı daha çok aynı zamanda oluşma meyilindedir. Üretiminden dolayı arızasız motorlarda da ufak ve makul görülebilir oranda statik eksen kaçıklığı bulunmaktadır (Çıra, 2017).

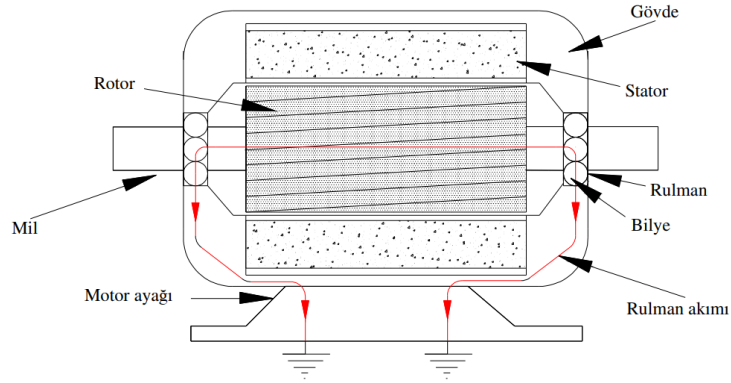
Rulman arızası

Motorların büyük bir kısmında rulman ve rulman içerisinde bilyeler bulunmaktadır. En basit şekliyle rulmanı oluşturan parçalar; dış bilezik, iç bilezik, bilye (yuvarlanma elemanı) ve kafesten oluşmaktadır. Bütün rulmanlar dışta ve içte olarak iki tane bilezikten oluşmaktadır. Dönüşü oluşturan bir grup bilye bu halka bileziklerin içerisinde bulunmaktadır. Motorlar orantılı yükleme, doğru sıralama vb. gibi uygun çalışma şartlarında çalıştırılrsa dahi rulmanlarda metal yorulması sebebiyle arızalar oluşabilir. Metal yorulması, rulmanların giderek pullanma ile dökülmesine ve ufak yarıklarla çatlamaya başlamasına sebep olabilmektedir. Bunlara ek olarak rulman akımları, tabii eksen kaçıklığı ve titreşim de rulman arızalarının nedeni olabilmektedir (Rosero ve ark., 2009). Rulman genel yapısı Şekil 3.8'de görülmektedir.



Şekil 3.8. Rulman Geometrisi (Doğan, 2012)

Kirlilik, paslanma, uygun olmayan yağlanma, montaj hatası ve asidik ortamlar rulmanların yapısını önemli ölçüde azaltırlar. Özellikle kirlilik durumu rulman arızaları için en önemli sorundur. Ayrıca, yüksek anahtarlama frekanslarında çalışan sürücüler ile sürülen motorlarda, mil üzerinde oluşan gerilimler Şekil 3.9'da görüldüğü gibi akan deşarj akımları rulmanlar üzerinde önemli korozyona neden olmaktadır.



Şekil 3.9. Rulmanlardan akan deşarj akımları (Doğan, 2012)

Rulman arızalarının her bir tipi karakteristik bir arıza frekansına sahiptir. Bu karakteristik frekanslar mekaniksel rotor frekansı f_r ve rulmanın geometrik fonksiyonlarına bağlıdır. Bu frekansların detaylı hesaplamaları, dış bilezik arızası için Eşitlik 3.8'de, iç bilezik arızası için Eşitlik 3.9'da, hasarlı bilye arızası için Eşitlik 3.10'da ve kafes arızası için Eşitlik 3.11'de verilmiştir (Bellini ve ark., 2008; Blödt ve ark., 2010).

$$f_{ab} = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \quad (3.8)$$

$$f_{ib} = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \quad (3.9)$$

$$f_{hb} = \frac{D_c}{D_b} f_r \left(1 - \frac{D_b^2}{D_c^2} \cos^2 \beta \right) \quad (3.10)$$

$$f_{ka} = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \quad (3.11)$$

Eşitliklerde kullanılan D_c rulmanın dış çapını, D_b bilye çapını, N_b bilye sayısını, β radyan olarak temas açısını ifade etmektedir.

3.4. Şebeke Kalkışlı Daimi Mıknatıslı Senkron Motorun Arıza Tespit Metotları

Güvenli çalışmanın önemli kabul edildiği alanlarda, alanın bir kesimindeki ufak bir hasar, önemli zararlara neden olabilecek seviyelere çıkabilmektedir (Yu ve ark., 2017). Bundan dolayı emniyetli çalışma, hasar dayanıklılığı ve güvenlik gibi mefhumların bu türlü alanlarda önemi fazladır. Sistemin güvenilirliğini arttırmak için meydana gelebilecek olası arızaları tespit edip giderebilen kontrol sistemlerini de kurmak lazımdır (Poure ve ark., 2009). Motorlarda arıza teşhisi amaçlı durum izlemelerinde genellikle manyetik, titreşim, termal, akustik, kimyasal ve elektriksel veriler kullanılmaktadır (Nandi ve ark., 2005). Bu veriler içerisinde en pratik olanı, elde edilmesinin kolay olması yönüyle elektriksel akım verileridir (Eker ve Akar, 2016).

Motorlar aktif kontrol ve robotik gibi sınıai uygulamalarda en mühim parçalardan biridir. Sanayide daha çabuk ve daha güvenilir makinalar ile üretime devam edilmesi büyük bir ehemmiyet arz etmektedir. Geride bıraktığımız 10 yıl içerisinde etkili güç gravitesi, duyarlı ve net dinamik başarımlar ve etkili verimlilik arzu edildiğinden farklı elektrik motor teknolojileri ve uyarlayıcı motor kontrol teknikleri daha fazla kullanılır olmuştur (Errouissi ve ark., 2011; Ortega ve ark., 2009).

DMSM, hassas ve kararlı kontrol imkânı, yüksek verim özelliği, yüksek moment, hacim ve ağırlığına göre yüksek güç sağlaması gibi birçok faydalarından ötürü tıp, uzay araçları, endüstri ve silah sistemlerinde en çok yeğlenen elektrik motor çeşitlerinden biridir. Döner şekilde hareket eden bütün motorlarda olduğu gibi DMSM'lerin de sağlıklı çalışma zamanları düzgün çalıştırılmalarına bağlıdır (Gözüoğlu ve Doğan, 2019). Hasarlı olan motorun sağlıklı çalışma süresi de uzun değildir. Hasarın daha ilk çalıştırma aşamasında iken belirlenmesi ve bu hasarın onarılması için araya girilmesi, sistemin devamlılığı ve motorun sağlıklı çalışma zamanı için fazlaca önemlidir (Çıra, 2017).

Elektrik makinalarının arıza tespitinde; radyo frekans emisyonu görüntüleme tekniği, sıcaklık ölçümü, ses ve titreşim izleme, motor momenti, rotor hızı, akustik ses ölçümü ve stator akım harmonik çözümlemesinin de yapıldığı çok çeşitli metot bulunmaktadır (Thomson ve Fenger, 2001). Bu metotlardan en fazla kullanılan eşsiz arıza örüntüsü oluşturması nedeniyle stator akım takip metodudur (Frosini ve Bassi, 2009). Stator akım takip metodu ile başka herhangi bir alet edevata gereksinim duyulmadan stator faz sargılarından alınan stator akımları değerlendirilir.

Hava aralığı momenti gözlemlene; hava aralığındaki moment akım ve akılardan üretilir. Arıza meydana geldiği zaman hava aralığı momentindeki özel frekanslarda yan bant oluşumu meydana gelir. Bu yöntem elektrik motorlarında genellikle sargı kısa devrelerinde ve RÇK arızasının tespitinde kullanılır (Hsu, 2015).

Titreşim izleme; elektrik makinaları çalışırken titreşim oluştururlar. Arıza olmadan çalışan motorlarda titreşim seviyesi en azdır. Eğer makinenin parçalarından birinde bozulma oluşmaya başlamış ise titreşim seviyesi artar. Titreşimler makineye monte edilen ivme sensörleri ile ölçülebilir (Mehrijou ve ark., 2011; Nandi ve ark., 2005; Tavner ve Penman, 1987). Bu ivme sensörleri çok pahalı bir donanım olduğundan bu şekilde arıza tespitinde önemli rol oynar.

Termal izleme; motorun ısısının ölçümüyle arıza analizi yapmak mümkündür. Bu yöntem ile yeni başlayan arıza ve zaten olan arızalar hakkında yorum yapılabilmektedir. Stator sargılarının aşırı akım çekmesi, rulman arızaları, gerilim dengesizlikleri gibi durumlar ısı

artışına sebep olmaktadır. Sıcaklık değişimleri ya tahmin yoluyla ya da ısı sensörleri kullanılarak belirlenmektedir (Bonnet ve Soukup, 1992; Rodríguez ve Arkkio, 2008).

Motor akımlarının izlenmesi; motorda oluşan üretim hataları ve besleme kaynağında oluşan harmoniklerden dolayı sinüzoidal sinyallerde bozulmalar meydana gelir. Bunların dışında motorda arıza durumu olursa stator akımlarında arızanın türüne bağlı olarak farklı türde bozulmalar meydana gelebilir. Arıza teşhisinde stator akımlarından faydalanılması en çok tercih edilen yöntemlerdendir (Gaeid ve Mohamed, 2010; Mehrjou ve ark., 2011; Vas, 1993; Verucchi ve ark., 2008). Çalışma imkânının rahat olmadığı ve tehlikeli yerlerde akım analizi en çok kullanılan yöntemdir. Akım analizinde farklı arızaların tespiti için akım sensörleri kullanılarak stator sargı akımı ölçülmektedir. Bu sensörlerin monte edilmesinin kolay olması ve sensörlerin ucuz olması önemli yararlarıdır. Ayrıca sürücü ile sürülen motorlarda ek bir sensöre gerek olmaması diğer bir yararlarıdır. Bu yararlarından dolayı bu tez çalışmasında akım bilgilerinden faydalanılarak tespit yapılmıştır.

Akustik ses ölçümü; elektrik makinalarında genelde rulman ve rotor arızalarının tespitinde kullanılır (Mehrjou ve ark., 2011). Oluşan gürültülerin sebebi dönen parçaların hava döngüsü üzerindeki etkisi ve elektromanyetik kuvvetlerin neden olduğu titreşimdir.

Manyetik akının izlenmesi; hava aralığında meydana gelen akının dağılımı sağlam olan motorda homojendir. Arıza durumunda ise bu homojen dağılım bozulur. Arıza durumunda meydana gelecek akının değişimi motor mili etrafına yerleştirilecek bobin ile yapılabilir (Mehrjou ve ark., 2011).

Kısmi deşarjın izlenmesi; sargılardaki yalıtımlarda bozulmalar sonucu oluşan küçük ölçekteki elektriksel boşalmalardır. Bu yöntem sargı arızalarında yalıtım etkisinin incelenmesinde ve sargı ömürlerinin tahmininde kullanılmaktadır. Sargılarda oluşan yalıtım bozulmalarında normal duruma göre 30 kat daha fazla boşalma olayı olmaktadır (Siddique ve ark., 2005).

Gaz analizi, ısı etkisi nedeniyle bozulan izolasyonlardan karbon monoksit gazı açığa çıkar. Bu gaz hava içerisinden soğuyup geçer ve kızılötesi soğurma ile teşhis edilir

(Siddique ve ark., 2005). Yüksek frekanslı kırıyıcı devrelerine sahip olan sürücüler tarafından sürülen motorların sargı yalıtımları yüksek gerilimden dolayı bozulur. Bunun sonucunda ozon gazı ortaya çıkar. Ozon gazı algılama teknikleriyle yalıtım analizleri yapılmaktadır (Siddique ve ark., 2005).

İndüklenen gerilimin izlenmesi; motorun enerjisi kesildiğinde stator akımları hızla sıfıra doğru gider. Stator sargılarında gerilim oluşmasına neden olacak tek kaynak rotor üzerinde akan akımlardır. Bu akımlar manyeto motor kuvveti oluşturur. Sağlam motorlarda bu kuvvet sinüzoidaldir. Arıza durumunda bu sinüzoidal durumlar bozulur. Bu bozulmalar analiz edilerek arıza tespiti yapılır (Mehrjou ve ark., 2011).

Ani açısal hızın izlenmesi; rotorun tek bir devri ile ortaya çıkan açısal hızın değişimidir. Elektrik motorlarında oluşan simetrik özellik göstermeyen arızaların çok büyük bir kısmı stator nüvesinde titreşim oluşturur. Titreşim sinyalleri analiz edildiği zaman kaynak frekansının iki katı frekansta bileşen içerdiği görülür. Bu tipte arızalar ani açısal hız tekniği kullanılarak titreşim sinyalleri izlenerek tespit edilir (Mehrjou ve ark., 2011; Siddique ve ark., 2005).

Ani elektriksel gücün izlenmesi; arıza durumu frekanslarının direk olarak gücün spektral bileşenlerinde görülmesi durumundan yararlanılarak arıza tespit parametresi olarak kullanılmaktadır (Siddique ve ark., 2005).

Motor devre analizi; elektromanyetik özellikler ölçülerek motor içerisindeki değişimler görülebilir. Bu teknikle basit bir şekilde direnç ve endüktans gibi büyüklükler test edilirken çok daha karmaşık olan direnç, empedans, faz açısı ve indüktans büyüklüklerinin testini kapsamaktadır. Bu yöntem ile motora düşük bir enerji uygulanarak ölçülen devre büyüklüklerinin durum analizi yapılmaktadır (Mehrjou ve ark., 2011; Siddique ve ark., 2005).

Darbe testi; sargı arızalarının teşhisinde kullanılan bir yöntemdir. Oluşan bir gerilim darbesi altında empedansın karşılaştırılması işlemi yapılır. Yüksek frekanslı iki özel gerilim palsi iki faz sargısına aynı anda uygulanıp üçüncü faz ise topraklanır. Osiloskop

yardımıyla dalga şekilleri karşılaştırılarak stator sargı arızasının yeri teşhis edilir (Siddique ve ark., 2005).

Gerilim izleme; RÇK, kısa devre halka kırığı gibi arızalar motorun karşılıklı olan endüktansında asimetrikliklere ve nötr geriliminde harmoniklerin artmasına neden olur. Bundan dolayı faz-nötr gerilimleri frekans domeninde analiz edilerek arıza tespit edilebilir (Mehrijou ve ark., 2011).

3.5. Arıza Tespitinde Kullanılan Sinyal İşleme Yöntemleri

Bir kişi veya malzemeyi tanımlamamız gerektiğinde ona ait olan renk, boy, ağırlık, vb. gibi özellikleri verilmektedir. Bu özellikler kişinin veya malzemenin karakteristik bilgileridir. Belirtilen özel bilgiler ile kişiyi veya malzemeyi tanımlama işlemi özellik çıkarma olarak adlandırılmaktadır (Proakis ve Manolakis, 2007).

Bir sistemin kendi içinde veya başka bir sistem ile etkileşimini sağlayan ve ölçülebilen büyüklüklere sinyal denmektedir. Elektriksel sinyaller akım, akı, gerilim, frekans vb. mekaniksel sinyaller ise titreşim, hız gibi büyüklükler ile sistemde etkileşimi sağlamaktadır. Özellik çıkarma yöntemi ile sistemde oluşacak sinyaller analiz edilmektedir. Bu analiz işlemi gerçekleştirilebilmek için sinyallerde yapılan özellik çıkarma işlemi sinyallerin sayısallaştırılmasıdır. Sinyaller sayısallaştırıldıktan sonra elektronik ortamda rahatça incelenebilir (Proakis ve Manolakis, 2007).

Elektrik makinaların da oluşan arızaları temsil eden özellik elde etmede en çok kullanılan yöntemler frekans boyutunda analiz, zaman-frekans boyutunda analiz, zaman boyutunda analiz, model tabanlı analizler vb. olarak sınıflandırılmaktadır (Boashash, 1990).

Frekans boyutunda analiz, fourier dönüşümü kullanarak frekans analizi yapmak gerçek zamanda durum izleme tekniklerinden en çok tercih edilen ve kullanım açısından kolay olan yöntemdir. Akım, gerilim, titreşim gibi sensörlerle ölçülen bilgilerin sağlam frekansları ile arızalı frekansları farklılık göstermektedir. Arızalardan kaynaklanan frekanstaki gürültüler belirli değerlerde oluşur ve buna bağlı olarak arıza türü tespit edilmektedir (Ferhat, 2018; Nandi ve ark., 2005).

Zaman-frekans boyutunda analiz, frekans boyutunda analiz işleminde fourier serisi örneklem zamanı süresince değişmemektedir. Bu nedenle frekans analizinde gerçekleşen olayın ne zaman meydana geldiği bilinmemektedir. Zaman-frekans analizinde zamanın kısmen sabit olduğu durumlar fourier serilerine açılarak bu sorun giderilir ve hata tespiti gerçekleştirilir (Benbouzid, 2000). Dalgacık dönüşümü yöntemi genellikle durağan olmayan sinyallerin analizinde kullanılmaktadır. Dalgacık adı verilen küçük zaman pencerelerinde özel salınımsal fonksiyonlar kullanılmaktadır (Ayaz, 2002).

Zaman boyutunda analiz, motor üzerinden sensörler yardımı ile alınacak bütün sinyaller zamanla karşılaştırılarak bir grafik oluşturmaktadır. Bu nedenle zaman boyutundaki sinyaller üzerinde yapılacak analizler en kolay ve en ucuz yöntemdir. Lineer olmayan yöntemlerde bile bu analiz yöntemi kolaylıkla uygulanabilir. Zaman boyutunda analiz işlemi yapılırken verinin karakteristiğine göre istatistiksel analiz yöntemleri kullanarak belirli parametreler oluşturarak sinyal değerlendirilmektedir. Bu kapsamda elektrik makinalarının arıza tespiti için literatürde birçok yöntem önerilmiş ve kullanılmıştır. Bu yöntemlerin en çok kullanılanları çarpıklık, basıklık, etkin değer, varyans, entropi, ortalama ve standart sapma vb. istatistiksel parametreler hesaplanarak sinyallerin analiz edilmesidir (Nandi ve ark., 2005). Bundan başka ayırıştırma, sinyallerde sıfır geçiş anının tespiti, sinyal kenar çizgilerinin incelenmesi vb. yöntemlerde zaman boyutunda arıza tespiti için kullanılan diğer yöntemlerdir (Doğan, 2012). Zaman boyutunda veri analizi amacıyla İSK yöntemleri endüstri mühendisliğinde üretim kalitesi izlenmesi ve süreç takibi, makine mühendisliğinde makine parçalarının durum izlenmesi süreçlerinde kullanılmaktadır. Daha önce farklı alanlarda kullanılan İSK yöntemi, bu çalışmada ŞKDMSM'nin rulman arızası tespiti için ilk defa kullanılmıştır.

3.5.1. İstatistiksel süreç kontrol ve EWMA

Üzerinde çalışılan konu ile ilgili sayısal verilerin, doğru olarak toplanması, özetlenmesi, konuyu tanıttak şekilde işlenmesi, bilinen faktörlere göre analizi, başka verilerle ilişkilerinin tespiti ile sonuçların yorumlanması ve genelleştirilmesi için yapılan bütün işlemler "İstatistiksel Metotlar" olarak bilinir (Bostan, 2010). İSK, bir ürünün en ekonomik ve en faydalı bir şekilde üretilmesini sağlamak, önceden belirlenmiş kalite durumlarına uygunluğunu ve standartlara bağlılılığı hedef almak, kusurlu ürün üretimini

en aza indirmek amacıyla istatistik ilke ve tekniklerin üretimin tüm evrelerinde kullanılmasıdır (Akın, 1996). İstatistik tekniklerin kullanımından önce verilerin doğru bir şekilde toplanması gerekmektedir. Doğru veri toplanması ancak, istatistik konusunda eğitilmiş personelce, belirli bir sistemle, ölçüm hatası olmayan cihazlarla yapılabilir. İSK'da, bir süreçteki hataları en aza indirmek ve toplam süreç verimliliğini artırmak için, hem sürecin ortalamasını hedef değere çekmek hem de değişkenliğini azaltmak gerekmektedir (Bostan, 2010). İSK süreç içerisinde oluşan en küçük farklılıklara bağlı olarak değişikliği ortaya çıkartan bir yöntemdir (Birgören, 2015; Maraş ve Arslan, 2014; Stapenhurst, 2013). Normal durum içerisinde hesaplanan değerler limit değerler içerisinde salınım yapmaktadır. Ancak limit değerlerini aşmaları, durumunda oluşan değişikliği bildirmektedir (Niezgoda, 2017; Şenol, 2012). Yedi temel istatistiksel yöntem vardır. Bu yöntemler aşağıda açıklanarak listelenmiştir.

Çetele Tablosu: İstatistiksel çözümlenme; ilk verilerin alınması, alınan verilerin incelenmesi ve düzene sokulması, düzenlenen verilerin açığa çıkarılması ve işlenmesi basamaklarından oluşmaktadır. Bu aşamada bilgiler toplanma biçimlerine göre; ölçerek, sıralayarak, okuyarak ve sayarak elde edilmektedirler (Akın, 1996).

Histogram: Histogram, farklılığın biçimini meydana çıkarmak, gelişen olay ve hareketler dizisi davranışları hakkında görmeye dayalı bir şekilde haberleşmek ve ıslah etme gayretleri üzerine yoğunlaşarak karar vermek maksatlı kullanılır. Histogramlar sıklıkla bir olayın olma zamanlarını göstermek ve belirlenen zaman mesafesinde ortaya konan sorunun daha aralıksız oluşup oluşmayacağını hesaplamak ve meydana gelen dağılım biçimini bilindik bir dağılım ile kıyaslamak maksadıyla kullanılmaktadır. Her bir histogram yalnızca bir niteliği ölçmektedir (Akın, 1996).

Pareto Analizi: Pareto çözümlenmesi için oluşturulan Pareto grafikleri, en fazla görülen kusur çeşidine en düşük görülen kusur çeşidine doğru düşerek giden bir dikdörtgenler serisi şeklindedir. Temel gaye önemli sorunları ve sebeplerini bulmak olan Pareto çözümlenmesinde aşağıdaki maddelere özen gösterilmelidir (Akın, 1996):

- Değişik sınıflandırmalara gidip değişik pareto grafikleri denenmelidir.

- “Diğerleri” grubunun yüzdesi ufak olmalıdır. Aksi takdirde gruplandırmanın doğru yapılmadığı bilinir.
- Bilgilere iktisadi anlamlar yükleyerek dikey çizgiye bu ölçüleri taşımak daha doğru neticeler verir.
- Herhangi bir sorun, tesiri ufak da olsa hızlı ve basit sonuca ulaştırılabiliyorsa, ilk o düşünölmelidir.

Sebep- Sonuç Diyagramı: Bu diyagram belirli bir sonuç ile olması ihtimal nedenlerin ilişkisini ve böylece hataların nedenlerini bulmak için hazırlanır ve bir süreci etkileyen faktörlerin bağlantılarını göstermek için çizilir. Ayrıntılı bir diyagram balık kılıçığı şeklindedir. Diyagram çizilirken, sorun ayrıntılı bir şekilde tanımlanır ve olması ihtimal nedenler ana başlıklar halinde yazılır.

Hata Yoğunluk Diyagramı: Hata yoğunluk diyagramı, meydana getirilen maddeyi değişik konumlardan gösteren bir resimdir. Meydana getirilenin zahiri kısımlarına ait resimlerini içeren bu diyagramın üstünde kusurların türleri belirlenir. Her bir üretilenin tek tek kontrolü sonucunda hataların nerelerde yoğunlaştığı görülür ve bu hatalar grafikte ilgili bölümlere yazılır (Akın, 1996).

Serpilme Diyagramı: Aralarında ilişki olduğu varsayılan iki seri, bağımsız değişken X ekseninde, bağımlı değişken Y ekseninde gösterilmek üzere grafik üzerinde işaretlendiği zaman, işaretlenen noktaların oluşturdukları şekil bir serpilme diyagramı olur. Eğer iki seri arasındaki ilişki çok kuvvetli ise serpilme diyagramındaki noktalar belli bir hareket çizgisi ya da yol etrafında yer alırlar. İlişki kuvvetli, fakat eksik ilişkiyi göstermektedir. Aradaki ilişkinin bulunması halinde ise, X ve Y değerlerinin kesişme noktaları, serpilme diyagramı üzerinde bir yol bulacak yerde doğrudan eğri ya da bir çizgi üzerinde sıralanırlar. İlişkinin hiç mevcut olmaması veya zayıf bulunması haline gelince, bu durumlarda X ve Y değerlerinin kesişme noktaları darmadağınaktır. Bu nedenle; noktaların ne serpilme diyagramı üzerinde bir yol buldukları ne de doğrudan eğri veya doğru bir çizgi üzerinde sıralandıkları söylenebilir (Akın, 1996).

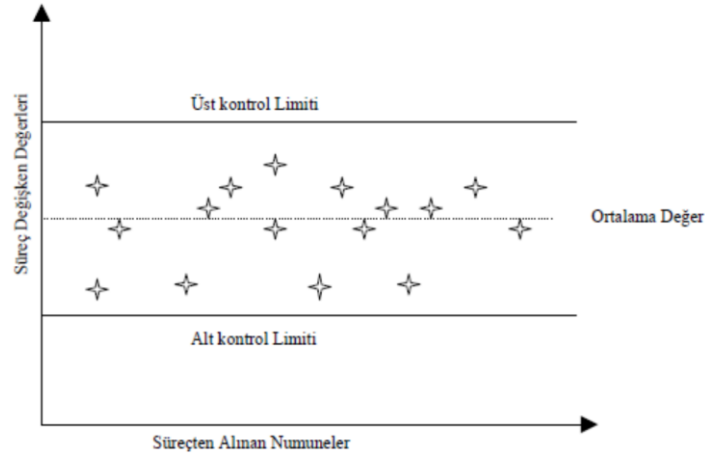
Kontrol Grafikleri: Doğal nedenlerden kaynaklanan süreç içerisindeki değişimler düzeltilememekle birlikte İSK limitleri arasında kalmaktadır. Özel nedenlerden dolayı

oluşan değişimler süreci olumsuz etkilemekte ve kontrol limitleri dışına sürecin çıkmasına sebep olmaktadır. Özel nedenler tespit edilebilmekte ve hatalar düzeltilebilmektedir (Nieżgoda, 2017; Şenol, 2012).

Walter A. Shewhart tarafından bulunan kontrol grafikleri 1920 yılında kullanıma sunulmuştur (Nieżgoda, 2017). Shewhart çizelgelerinin kullanım amacı aşağıda verilmiştir.

- Üretim sürecinin istatistiksel olarak kontrol altına alınıp alınamayacağını gösterir. Sürecin kaliteli çalışma aralığını belirler.
- Verinin analizini yapar ve değişimleri inceleyerek doğal olmayan durumları belirler.
- Süreç içerisinde oluşacak hataları önceden belirleyerek önlemler alınmasını sağlar.
- Kaliteyi artırmaya yardımcı olur.

Bir süreç kontrol çizelgesi genel olarak, bir merkezi hat olan süreç ortalaması ile bunun altına ve üstüne çizilen alt kontrol ve üst kontrol limitlerinden oluşmaktadır. Merkezi çizgi, karakteristiğın istenen değerini; limitlerle sınırlanmış alan ise izin verilen kontrollü çalışma ortamını göstermektedir. Süreç devam ettikçe elde edilen değerler çizelgeye işlenir ve sürecin kontrol altında olduğu veya olmadığı durumlara göre kalitesiz çalışma ya da arızalı çalışma belirlenmektedir. Örnek süreç kontrol grafiğı Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.10 İSK Grafiği (Maraş ve Arslan, 2014)

Bu tez çalışmasında İSK'nın kontrol grafikleri yöntemlerinden biri olan EWMA kullanılmıştır. EWMA'da merkez çizgi (MÇ) ile bunun altına ve üstüne çizilen, alt kontrol limit (AKL) ve üst kontrol limit (ÜKL) çizgileri bulunmaktadır. MÇ salınımın hangi düzlemde olması gerektiğini belirtirken AKL ve ÜKL çizgileri ise salınım alanını ifade etmektedir. Bu alan dışına çıkılması durumunda arıza veya normal olmayan durum teşhis edilmiş olur (Cruz ve Cardoso, 2001; Zerbato ve ark., 2017). EWMA kontrol çizelgelerinin arıza tespitindeki kullanışlılığı standart sapma, L ve λ 'nın seçimine bağlıdır. EWMA kontrol çizelgesinin tasarım parametreleri L ve λ 'dır. λ değeri, izlenen süreç hedeflerinin özelliklerini yansıtacak şekilde ayarlanmalıdır (Yang ve ark., 2018). Bu tez çalışmasında λ 0.2, L ise 3 alınmıştır.

Bölüm 3.5.1'de de belirttiğimiz gibi birçok İSK yöntemi bulunmaktadır. Biz kontrol grafik yöntemlerinden olan EWMA'yı tercih ettik. Bunun sebebi ise tek değişkene (akım) bağlı olarak arıza analizi yapmış olmamızdır. Hatanın birden fazla değişken içermesi muhtemeldir. Bu durumlarda da Çok Değişkenli Üstel Ağırlıklı Hareketli Ortalama yöntemini kullanmak daha doğru sonuçlar almamızı sağlayacaktır (Yang ve ark., 2018). EWMA grafik yönteminde kullanılan hesaplama aşamaları aşağıdaki formüllere göre yapılır.

k alt grup sayısı, n her bir alt grupta bulunan ölçüm sayısı, x_{ij} değeri i alt grubundaki j numaralı örnekleme değeri olmak üzere, alt grubunun ortalaması x_i Eşitlik 3.12'de gösterilmiştir.

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n} \quad (3.12)$$

Tüm alt grupların genel ortalaması aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^k \bar{x}_i}{k} \quad (3.13)$$

Her bir alt grubun standart sapma değeri (s_i) ve genel ortalaması Eşitlik 3.14 ve Eşitlik 3.15'teki ifadelerle hesaplanır.

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.14)$$

$$\bar{s} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i \quad (3.15)$$

Hesaplama sonucu grafikteki her bir nokta aşağıdaki şekilde elde edilir. z_0 değeri olarak genel ortalama değeri kullanılmıştır.

$$z_0 = \bar{\bar{x}} \quad (3.16)$$

$$z_i = \lambda \bar{x}_i + (1 - \lambda)z_{i-1} \quad (3.17)$$

Çalışmada EWMA grafik analizi gerçekleştirilirken sistemin AKL ve ÜKL'side belirlenmektedir. Eşitlik 3.18 ve Eşitlik 3.19'da belirtilen değerler bu limitleri aşarsa arıza tespit edilmiş olur. Bu denklemlerde L sabit değerdir.

$$AKL_i = \bar{\bar{x}} - (L\bar{s}) \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1-\lambda)^{2i}]} \quad (3.18)$$

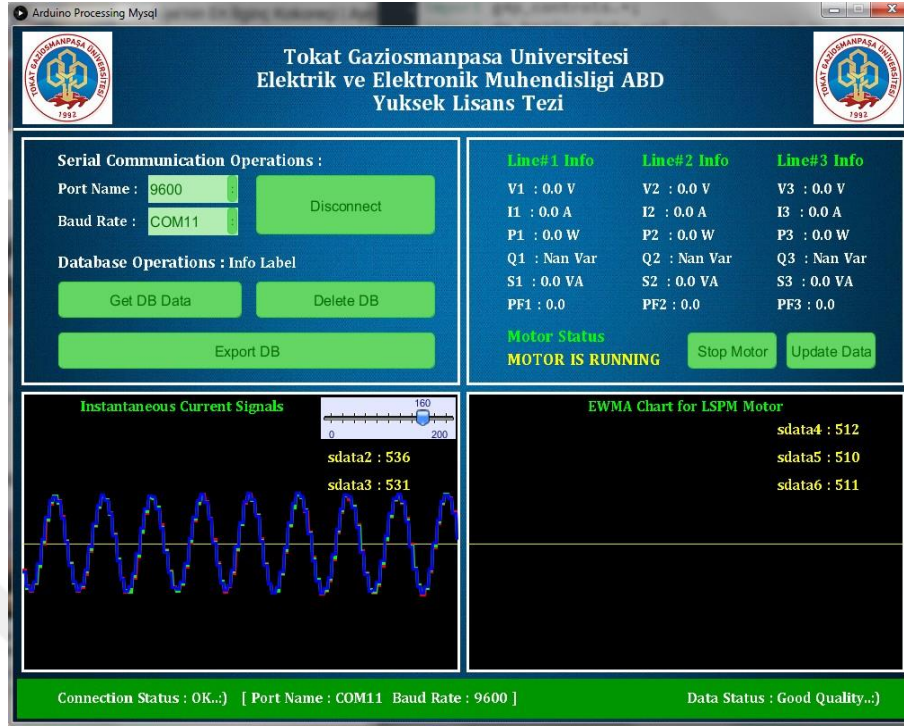
$$\ddot{U}KL_i = \bar{x} + (L\bar{s}) \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1-\lambda)^{2i}]} \quad (3.19)$$

3.6. SCADA Sistemi ve Uzak Terminal Birimi

SCADA terimi ‘‘Supervisory Control And Data Acquisition’’ kelimelerinin baş harflerinden oluşturulmuştur. Dilimize ‘‘Danışmalı Kontrol ve Veri Toplama Sistemi’’ veya ‘‘Uzaktan Kontrol ve Gözleme Sistemi’’ olarak çevrilebilir. SCADA sistemleri geniş alana yayılmış tesislerin tek bir merkezden bilgisayar, cep telefonu veya tablet gibi cihazlarla izlenebildiği bir sistemdir ve temel olarak bir yazılımdır. Tek bir cihazdan kullanabileceği gibi ađ bağlantılarıyla birden fazla bilgisayar ve taşınabilir cihazla kontrol ve izleme yapılabilir. SCADA sistemleri; grafik ara yüz, izleme sistemi, alarm sistemi, veri toplama, analiz ve raporlama sistemleri olarak nitelendirilebilir (Aydogmus, 2009).

Bu kısımda, elektronik ve mekanik parçalar arabirimlerle aynı zamanlı olarak iş yeri işlevlerini srdrrlenir. Kontrol emirleri bu seviyede kuruluşun çalışmasını sağlayan elektriksel verilere ve makine devinimlerine dönüşür. Bu dönüşümler elektronik sensörler vasıtasıyla toplanır. Alınan veriler elektrik sinyallerine dönüştürülerek SCADA ortamına devredilir. Tahrik motorları, lambalar, hız lu cihazları, sıcaklık, kuvvet, vanalar, yaklaşım detektörleri ve moment elektronik sensörleri bu kısımda bulunur. SCADA ara yüzünden verilen emirler, bu kısımda, elektrik sinyallerine dönüştürülerek, asıl dünyada beklenen devinimlerin oluşması sağlanır (ısıtıcılardan çalıştırılıp-durdurulması, vanaların açılıp-kapanması gibi) (Megep, 2006).

SCADA’nın temel mantığı tüm üretim aşamalarının tek merkezden gözlenmesi, denetlenmesi, veri toplanması- raporlanması ve ünitelerin kontrol edilebilmesidir. Sağladığı bu özelliklerden dolayı büyük kullanım alanına sahiptir (Aydogmus, 2009). rnek bir SCADA ara yüzü Şekil 3.11’de grlmektedir.



Şekil 3.11. SCADA ara yüzü

Sistemin çalıştırılmasında yalnız insan emeği dar kalmaktadır. Sistemde ortaya çıkabilecek olayların hızlıca belirlenmesi eski usuller ile mümkün olmamaktadır. Sistemin daha aktif işletilmesi için, daha güvenilir, daha iktisadi işletme için işletmede bilgisayar özdevimlerine ihtiyaç vardır. Bundan dolayı sistem denetleme ve takip yazılımları oluşturulmuştur (Megep, 2006). Özellikle sanayi bölgelerinde, sağlık merkezlerinde, büyük alışveriş merkezlerinde yaygın olarak kullanılmakta olan enerji yazılımları genel itibarıyla şebekedeki parametreleri takip etmek ve arşivlemek için kullanılmaktadır. Bu bağlamda, bir tesisin sadece elektrik enerji parametrelerini izleme ve raporlama değil aynı zamanda enerji yönetimi sağlamak, arıza tespiti, maliyet ve tüm sistemlerin verimli çalışması için önemlidir. Aynı zamanda tesislerdeki enerji tüketimini azaltmak için SCADA yazılımında rapor sayfaları oluşturularak tasarruf stratejileri oluşturmak maliyet ve şebeke kararlılığı açısından katkı sağlayabilir (Üstünsoy ve Sayan, 2018). SCADA işletme genelinde herkese, her zaman erişebilecekleri, gerçek zamanlı ve ayrıntılı bilgiyi sağlamalıdır.

Dinamik grafik çizim araçları kullanılarak izlenmesi istenen süreç gerçeğe çok yakın bir şekilde canlandırılabilen ve alarmlar çarpıcı hale getirilebilmektedirler. SCADA

yazılımları kendi bünyelerinde bulunan çekirdek yazılımları kullanılarak grafiklerle birlikte hareket, boyutlandırma, yanıp sönme ve doldurma, boşaltma gibi operatörlerin dikkatini çekip kullanım kolaylığı sunabilecek özellikleri içermektedirler. Operatörlerin görmesini kolaylaştıracak değişik renk, boyut ve şekillerde alarm hazırlamak ve alarm durumunda alınacak acil tedbirleri ekranda göstermek mümkün olmaktadır. Klasik denetleyicilerle olduğu gibi modern SCADA sistemlerini kullanım sırasında da elle kontrol yapabilmek için grafik tetikleyicileri olarak adlandırılan yazılım parçaları kullanılmaktadır (Megep, 2006).

SCADA sistemleri, gerçek zamanlı izleme – kontrol, güvenli çalışma, düşük işletme maliyeti, insan iş gücü gereksiniminin azaltılması ve esneklik gibi sağladığı birçok avantajdan dolayı endüstri uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu durum SCADA sistemleri üzerine yapılan çalışmaları cazip hale getirmektedir (Gozuoglu ve Ozgonenel, 2019). SCADA sisteminin görevleri aşağıdakiler olabilir:

- Takip (monitoring) işlevleri
- Denetim işlevleri
- Sinyal toplama
- Sinyallerin kaydedilmesi ve depolanması

SCADA sistemleri kullanarak uygulama yazılımı geliştirmek için haberleşme protokollerinin belirlenmesi ve işlenebilir bilgi ortamının içeriğinin tanımlanması gerekmektedir. Haberleşme protokolleri SCADA'nın işletmedeki temel bilgi olması vazifesini yapması için birbirleri ile haberleşmesi gerekli olan ünitelerin iletişimini gerçekleştirmektedir (Gozuoglu ve Ozgonenel, 2019).

SCADA sisteminin izlem ve kontrol işlevlerini üstüne alması için yapılan işleme ait çıkış ve giriş bilgileri bir veri tabanında tanımlanır (Megep, 2006). SCADA sistemleriyle aşağıda açıklanan veriler toplanır:

- Niteliğiyle İlgili Bilgiler: Katkı madde miktarları, işlem sıcaklığı, işlem süresi, basıncı vb.

- Üretim Performansı İlgili Bilgiler: Üretilen malzeme miktarı, toplam duruş süreleri, sebepleri, vb.
- Üretim Harcamaları İlgili Bilgiler: Üretimde kullanılan ham ve ara madde miktarları, enerji harcamaları, üretim zamanında oluşan harcamalar, vb.
- Bakım Nedenli Bilgiler: Üretim ağının toplam çalışma süreleri, üretim ağındaki makinaların motor vb. bölümlerin çalışma süreleri ve çalışma sayıları aynı zamanda lüzumlu akım ölçümleri ile makinalardaki anormal durumların bulunması.
- Çalışanların Denetimi: Üretim ağında çalışan işletmenlerin bulunması.
- Üretilen Ürünlerin İşaretlenmesi ile Geriye Dönük Bilgi Edinme: Üretilen ürünlerin ayrı ayrı tespit edilmesi ve ağla ilgili sinyallerin bu ürünler ile ilişkilendirilmesi.
- İstatistiksel Nedenli Bilgiler: Bozuk, kusurlu ürünlerin miktarları, hata sebepleri.

SCADA'nın temel mantığı tüm üretim aşamalarının tek merkezden gözlenmesi, denetlenmesi, veri toplanması-raporlanması ve ünitelerin kontrol edilebilmesidir (Gözüoğlu ve Doğan, 2019). Sağladığı bu özelliklerden dolayı büyük kullanım alanına sahiptir. SCADA'nın kullanım alanlarına baktığımızda:

- Nükleer Tesisler,
- Su Toplama- Arıtma- Dağıtım Tesisleri,
- Trafik Kontrol Sistemleri,
- Gıda Endüstrisi,
- Çimento endüstri,
- Kimya sanayisi,
- Petrol ve doğalgaz boru hatları,
- Petrokimya sanayisi,
- Demir-çelik endüstrisi,
- Elektrik üretim ve haberleşme sistemleri,
- Elektrik dağıtım işletmeleri,
- Su tahsil, temizleme ve dağıtım işletmeleri,
- Hava kirliliği denetimi,

- Otomotiv sanayisi,
- Bina otomasyonu

Türkiye’de pek çok SCADA uygulamasıyla karşılaşmak mümkündür. Örnek verecek olursak; İstanbul metrosundaki yangın bildirme ve himaye sistemleri, aydınlatma sistemi, yürüyen merdivenler, havalandırma pervaneleri ve enerji dağıtım sistemleri komple bilgisayarlarla gözlemlenebilmekte ve lüzumlu müdahaleler merkezi denetim biriminden yapılmaktadır. Bolu’daki deprem meskenlerinin elektrik dağıtım sistemlerinde de SCADA sistemi kullanılmıştır. Botaş’ın doğal gaz ağlarında, Türkiye Elektrik Kurumu (TEK) elektrik üretim ve dağıtımında, Ankara, İstanbul, Kayseri gibi bazı şehirlerde su ve lağım kontrollerinin su depolarında, pompa istasyonlarında ve ölçüm noktalarının denetiminde SCADA sistemleri kullanılmaktadır. İzmit’te 1999 Ağustos’unda meydana gelen depremde SCADA’nın yardımıyla doğalgaz ağında herhangi bir sorun görülmemiştir. SCADA denetim biriminden ağdaki esas çelik vanalar hızlıca otomatik kapatılmış, 27 adet bölge gerilim düzenleyicisi de aynı zamanlı olarak durdurulmuş ve vana odaları görevlilerince kapatma işlemlerinin denetimi de yapılarak bütün sistemin gaz akışı kesilmiştir (Megep, 2006). SCADA sistemlerinin kullanım avantajları aşağıdaki şekilde listelenmiştir:

- Zaman ve iş gücü kazancı,
- Sistemin enerji takibi ve tasarrufu,
- Cezalı durumları engellemesi (kompanzasyon vb.),
- Sahadaki durumdan haber alınması ve anında müdahale,
- Arıza riski olan bölgelerin tespit edilmesi,
- Sistemin işleyişi hakkında anında bilgi alınabilmesi (şalterlerin durumu vb.),
- Kullanıcı tarafından tanımlanmış işletmeye ait parametreler (seviye, sıcaklık, basınç, dijital sinyaller, vana ve motor durumları, sistem durumu vb.) vasıtasıyla işletmenin takibi,
- Reçete ekranları vasıtasıyla, üretim reçetelerinin girilmesi ve işleyen reçeteler hakkında operatörün bilgilendirilmesi,
- Parametre ekranları vasıtasıyla, sistem için gerekli olan limit değerlerin (set-point, alt ve üst alarm değerleri) girilmesi,

- P, I, D parametrelerinin girilebilmesi ve gözlenmesi,
- İşletme değerlerinin tarihsel ve gerçek zamanlı trendlerinin tutulması,
- Anlık ve periyodik raporların (üretim, reçete, stok vb.) alınması,
- Otomatik çalışan sisteme, SCADA ekranlarından manuel müdahale imkânı,
- Alarm ve durumların gösterilmesi ve yazıcıya ve/veya veri tabanına kayıt edilmesi,
- İleri düzeyde kalite kontrol (örneğin istatistiksel proses kontrol) desteği, gibi çok büyük avantajları bulunmaktadır (Gözüoğlu, 2018).

3.6.1. SCADA programlama ortamı

SCADA ara yüzleri çeşitli dillerin kullanıldığı ortamlarda hazırlanmaktadır. Bunlara örnek olarak C#, C++, Visual Basic, Java verilebilir. Bu tez çalışmasında ise SCADA ara yüzü Java tabanlı Processing 3 ortamında hazırlanmıştır.

Processing, görsel ağırlıklı bir programlama dili ve aynı zamanda geliştirme ortamıdır. Esnek kullanıma sahip olan Processing ile görsel zenginliğe sahip uygulamalar geliştirilebilir. Veri görselleştirme gibi alanlarda da Processing sıklıkla kullanılmaktadır (Gözüoğlu, 2018).

Zengin kütüphane desteği sayesinde değişik programları çok kolay bir şekilde ortaya çıkartmak mümkün. Processing’de programlara “sketch” yani “eskiz / şablon” adı veriliyor. Bu da programları hızlı bir şekilde prototip olarak ortaya çıkartma anlamına geliyor. Processing, Java tabanlı bir platform. Dolayısıyla Java’da yazılmış çeşitli kütüphaneleri de Processing içerisinde kullanmak mümkün (Gözüoğlu ve Doğan, 2019). Android işletim sistemi de Java destekli olduğundan, Processing içerisindeki Android modu kullanılarak Android uygulamaları da geliştirilebiliyor (Gözüoğlu, 2018).

Processing dili prototip amaçlı oluşturulduğu için klasik programlama dillerindeki yapı ikinci planda kalıyor. Ekstra hiçbir komut kullanmadan sadece hazır fonksiyon ve nesnelere kullanarak program yazabiliyorsunuz (Anonymous, 2012). Bu da öğrenme sürecini hızlandırıyor ve bilgisayar mimarisine girmeden temel programlamayı kavrayabilmenizi sağlıyor. Şekil 3.12’ te Processing 3 gösterilmiştir. Processing Java

tabanlı bir uygulama olduğu için esnek SCADA ara yüzlerinin oluşturulmasına imkân tanımaktadır. Çalışmamızda SCADA ara yüzü Processing ortamında hazırlanmıştır. Ortamın güçlü özellikleri sayesinde talep edilen çeşitli senaryoların oluşturulması mümkün olmuştur.



Şekil 3.12. Processing

3.6.2. Seri iletişim

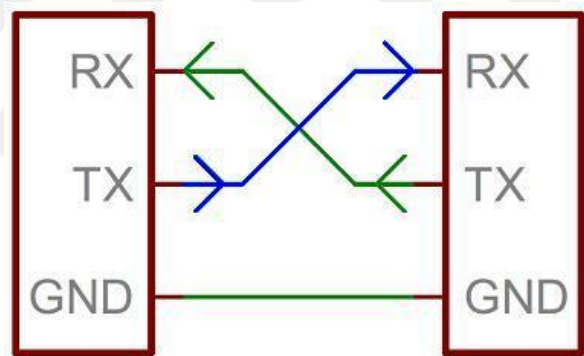
Seri veri iletimi, bir veri içindeki bitlerin aynı hat üzerinden art arda gönderilmesidir. Bilgisayar ağlarında kullanılan iletişim seri iletişimdir. Seri veri iletiminde, bir kerede bir karakterin sadece bir biti iletilir. Alıcı makine, doğru haberleşme için karakter uzunluğunu, başla-bitir (start-stop) bitlerini ve iletim hızını bilmek zorundadır (Karapınar ve Kaya, 2016). Seri iletişim asenkron seri iletişim ve senkron seri iletişim olmak üzere iki çeşittir:

Asenkron seri iletişim, herhangi bir zamanda veri gönderilebilir. Veri gönderilmediği zaman hat boşta kalır. Senkron seri iletişimden daha yavaştır. Her veri grubu ayrı olarak gönderilir. Gönderilen veri bir anda bir karakter olacak şekilde hatta bırakılır. Karakterin başına başlangıç ve sonunda hata sezmek için başka bir bit eklenir. Başlangıç için başla biti (0), veri iletişimini sonlandırmak için ise dur biti (1) kullanılır (Karapınar ve Kaya, 2016).

Senkron seri iletişim, senkron iletişim alıcı ve vericinin eş zamanlı çalışması anlamına gelir. Önce gönderici taraf belirli bir karakter gönderir. Bu her iki tarafça bilinen iletişime başlama karakteridir. Alıcı taraf bu karakteri okursa iletişim kurulur. Verici bilgileri gönderir. Transfer işlemi veri bloku tamamlanana ya da alıcı verici arasındaki eşleme kayboluncaya kadar devam eder (Karapınar ve Kaya, 2016).

Seri iletişim paralel iletişime göre daha yavaştır ancak daha ekonomiktir. Bilgisayar ağlarında kullanılan iletişim türü olan seri iletişim, uzak mesafelerdeki sistemlerin arasında verilerin aktarıldığı bir türdür (Karapınar ve Kaya, 2016).

Bir seri veri yolu sadece iki kablodan oluşur – biri veri göndermek için, diğeri almak için. Bu nedenle, seri aygıtların iki seri pini olmalıdır: alıcı, RX ve verici, TX. Aşağıdaki Şekil 3.13'te standart bir seri veri yolu bağlantısı gösterilmektedir.



Şekil 3.13. Seri iletişim

Buradaki her bir RX ve TX etiketlerinin cihazın kendisiyle ilgili olduğunu unutmamak önemlidir. Dolayısıyla bir cihazdaki RX, diğerrinin TX'sine gitmeli ve aynı şekilde TX de diğerrinin RX'ine gitmeli. Diğerr bir deyişle verici (TX), alıcıyla (RX) konuşmalı, başka bir vericiyle (TX) değil.

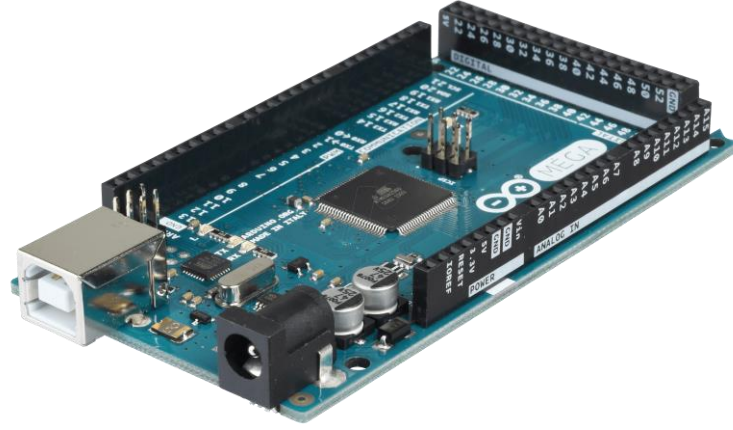
3.6.3. Uzak terminal birimi (remote terminal unit, RTU)

RTU, Remote Terminal Unit kelimelerinin kısaltılmış hali olarak ifade edilir. RTU, motora ait ölçülen tüm dijital ve analog ölçümlerin toplandığı, gerekli durumlarda düzenlendiği ve merkezi kontrol ünitesine gönderildiği cihaz olarak tanımlanabilir.

Buldukları yerde ölçüm ve denetleme işlevlerini yürüten birimler " uzak terminal birimi " (Remote Terminal Unit, RTU) olarak adlandırılır. SCADA sistemi içerisinde yerel ölçüm ve kumanda noktalarını oluşturan RTU'lar kendilerine bağlı olan donanımları kontrol edebilir ve gerekli duyulan ölçme ve değerlendirme işlemlerini yapabilir. Merkezi kumanda ve izlemeyi sağlamak için RTU'lar tüm ölçü sonuçları ile dağıtım sistemindeki donanımların çalışma durumlarını merkeze bildirir ve merkezden gelen komutları yerine getirir. Ayrıca bütün RTU'lar tüm ölçü sonuçlarını değerlendirebildiğinden, belirlenen sınırların dışındaki değerler için merkeze alarm komutu gönderir (Köklükaya ve Bayrak, 1998).

RTU'lar protokol dönüştürücü olarak da görev yapmaktadırlar. Motordan elde edilen bilgilerin cihazlar arasındaki transferi belirli bir protokole göre yapılmaktadır. Belirli protokolle RTU'ya ulaşan bilgilerin merkezi kontrol ünitesine transferinin farklı bir protokol ile yapılması gerekebilir. Tüm bu bilgilerin farklı protokollere dönüştürülmesi işini RTU gerçekleştirmektedir. RTU'lar yönetici gibi hareket etmektedir (Gözüoğlu, 2018).

Sensör kullanılarak yapılan uygulama veya deneysel çalışmalarda alınan ölçümlerin bilgisayara aktarılması için veri işleme kartlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür çalışmalarda kullanım kolaylığı açısından en çok tercih edilen platformlardan birisi de Arduino'dur. Çalışmamızda merkezinde Atmel firmasının ATmega2560 entegresi bulunan Arduino Mega 2560 R3 kartı kullanılmıştır. Açık kaynaklı bir geliştirme platformu olan Arduino'nun dijital ve analog girişleri sayesinde veriler okunup işlenebilmektedir (Çavuş ve ark., 2017). Arduino açık kaynak kodlu bir mikro denetleyici kartıdır. Kart düzeni Şekil 3.14'te görülmektedir. Açık kaynaklı demek, kullanıcı ile kaynak kodlarının paylaşıldığı ve değişiklik hakkının kullanıcıya verildiği anlamına gelir. Mikroişlemci bilgisi gerektirmez.



Şekil 3.14. Arduino MEGA 2560 R3

Arduino tek başına çalışan interaktif nesnelere geliştirmek için kullanılabileceği gibi bilgisayar üzerinde çalışan yazılımlara da (Macromedia Flash, Processing, Max/MSP, Pure Data, SuperCollider gibi) bağlanabilir (Çıkan, 2015).

Arduino'nun bu kadar çok tercih edilmesini sağlayan en önemli bileşen ise mikro denetleyici konusunda detaylı bilgi sahibi olmayı gerektirmeden herkesin programlama yapabilmesini sağlayan Arduino kütüphaneleridir. Arduino kütüphaneleri, geliştirme ortamı ile birlikte gelmekte ve "libraries" klasörünün altında bulunmaktadır. Kodları inceleyerek mikro denetleyicilerin nasıl programlandığını ve kütüphanelerin yapısını görmemiz mümkündür (Karapınar ve Kaya, 2016).

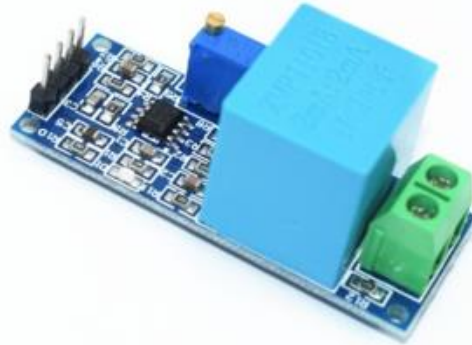
Arduino'nun 54 tane dijital giriş/çıkış pini vardır. Bunlardan 15 tanesi PWM çıkışı olarak kullanılabilir. Ayrıca 16 adet analog girişi, bir adet 16 MHz kristal osilatörü, USB bağlantısı, power jakı (2.1mm), ICSP başlığı ve reset butonu bulunmaktadır. Arduino bir mikro denetleyiciyi desteklemek için gerekli bileşenlerin hepsini içerir. Arduino'yu bir bilgisayara bağlayarak, bir adaptör ya da pil ile çalıştırabilirsiniz (Anonymous, 2019).

Çalışmada Zeming marka ZMCT103C model 5A rms ölçüm yapabilen akım sensörü kullanılmıştır. Aşağıdaki Çizelge 3.1'de ayrıntılı özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Akım sensörünün özellikleri

Dahili mikro-hassas akım trafosu	Örnekleme direnci
Modüller 5A, bir alternatif akımda, 5A / 5mA'ya karşılık gelen analog çıkış	Nominal giriş akımı: 5A
Nominal çıkış akımı: 5mA	Değişim: 1000: 1
Lineer Aralığı: 0 ~ 10A (100 ohm)	Doğrusallık: % 0.2
Hassas değerlendirme: 0.2	İzolasyon voltajını kullanma: 3000V ölçüm
Sızdırmazlık malzemesi: Epoksi reçine	Çalışma sıcaklığı: - 40 C ⁰ - + 70 C ⁰

Projede gerilim ölçümü için üç adet aktif tek fazlı gerilim trafosu modülü kullanılmıştır. Uygun op amp devresi ile dizayn edilmiş olan modül, düzgün örnekleme yapılmaya müsait bir ortam oluşturarak doğru ölçümlerin yapılabilmesini sağlamaktadır. Sensör Şekil 3.15'te görülmektedir. Tek bir sensörün ölçüm aralığı 250V AA'dır.



Şekil 3.15. AA gerilim sensörü

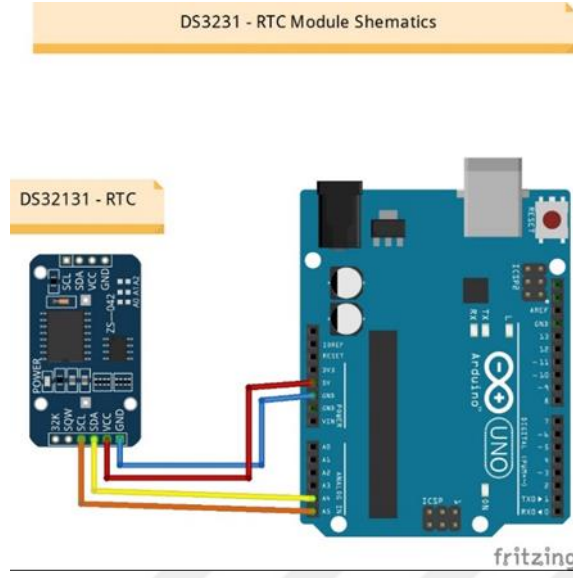
Çalışmanın donanım bölümünde bulunan ve özet bilgi amaçlı 16x2 LCD ekran kullanılmıştır. Arka LED aydınlatması mevcut olup 5V gerilim ile çalışmaktadır. LCD ekran I2C/IIC Dönüştürücü Kartı kullanarak seri arabirim üzerinden haberleşecek şekilde dönüştürülmüştür. Çizelge 3.3'te LCD ekranın pin bağlantılarıyla ilgili bilgilere yer verilmiştir. Özellikler:

- +5V ile çalışmaktadır.
- Back Lighting özelliğine sahiptir.
- LCD arka fon ışığı olmadan 4mA akım çekmektedir.
- Boyutları 80x36x9.4mm'dir
- Çalışma sıcaklığı -20 ile +70 derece arasındadır.

Çizelge 3.2. LCD ekranın pin bağlantıları

LCD Pin	Sembol	Bağlantı
1	Vss	GND
2	Vdd	+5V
3	Vo	Kontrast ayarı
4	RS	Register seçme pini
5	R/W	Data read/write pini.
6	E	Enable pini
7	DB0	Data Bus 0
8	DB1	Data Bus 1
9	DB2	Data Bus 2
10	DB3	Data Bus 3
11	DB4	Data Bus 4
12	DB5	Data Bus 5
13	DB6	Data Bus 6
14	DB7	Data Bus 7
15	A	LED arka ışık anot (+5V)
16	K	LED arka ışık katot (GND)

Verilerin SCADA ara yüzünde gözlemlenirken doğruluğunun teyit edilmesinde ve veri tabanına kaydedilmesi esnasında zaman bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. SCADA ara yüzü bilgisayar ortamında oluşturulup kullanıldığından dolayı zaman bilgisi bilgisayar üzerinden de alınabilmektedir. Ancak Akıllı Şebeke uygulamalarında zaman bilgisi genellikle RTU'dan alınmaktadır (Gözüoğlu, 2018). Bu durumu simüle edebilmek için donanım bölümünden bulunan I2C barasına DS3231 RTC modülü bağlanmıştır. DS3231 Arduino bağlantısı Şekil 3.16'da görülmektedir.



Şekil 3.16. DS3231 - RTC modülü bağlantı şeması

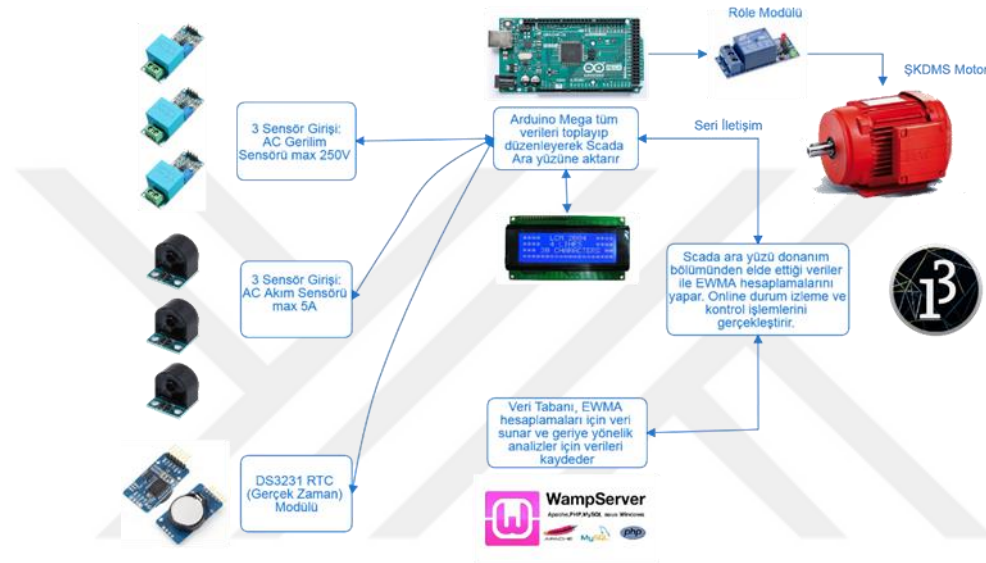
DS3231 düşük maliyetli, oldukça doğru I2C tabanlı gerçek zaman modülüdür. Devre kartı üzerinde bulunan düğme pil sayesinde kartın enerjisiz bulunduğu durumlarda dahi saat bilgisini hafızasında tutabilmekte ve böylece tekrar ayar gerekmemektedir. Bu modül sayesinde RTU donanım bölümünden topladığı verileri zaman etiketi ile etiketleyerek ara yüze gönderebilmektedir.

RTU tarafından ara yüze gönderilen zaman etiketi ilk olarak “Network Diagram” penceresinde görüntülenmektedir. Bu durum aradaki iletişim doğruluğu hakkında bilgi verirken gelen verilerin eski veri olmadığı yeni güncel bilgi olduğunu göstermektedir.

Zaman etiketi veri tabanına aktarılan verilerin bir düzen zaman bilgisi ile kaydedilmesini de sağlamaktadır. Zaman bilgisi verilerin hem belli bir düzene göre kaydedilmesini sağlarken geçmişe yönelik rapor ve analizleri için de büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

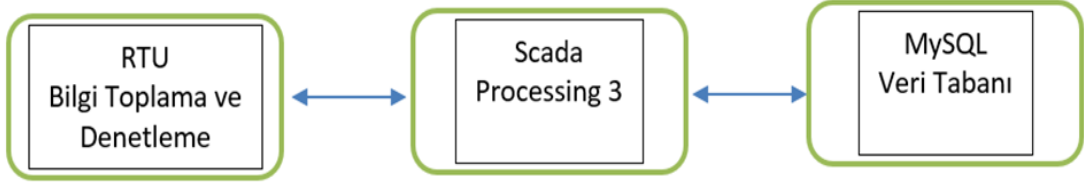
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve VERİ TOPLAMA

Burada ŞKDMSM'nin online durum izlemesi ve rulman arızaları tespiti için deneyler yapılmıştır. Önerilen sisteminin metodolojisi; durum izleme ve veri toplama, sinyal işleme ve arıza tespiti aşamalarından oluşmaktadır. Önerilen SCADA tabanlı online durum izleme ve arıza tespit sistemine ait blok şema Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1. Sistemin genel çalışma algoritması

Yukarıda görülen sistemin çalışması Arduino Mega'nın akım sensörlerini kullanarak akım sinyalini örnekleme ve pozitif tepe noktalarını tespit etmesiyle başlamaktadır. Sinyal tepe noktaları mikro denetleyicide uygun paketler şeklinde düzenlenip seri iletişim yolu ile SCADA ara yüzüne aktarılmaktadır. Ara yüz kendisiyle uyumlu olarak çalışan veri tabanına bu değerleri kaydetmektedir. EWMA grafik analizini gerçekleştirmek için kayıtlı olan bu verileri kullanmaktadır. Sistem, bilgileri toplayan RTU bölümünden, bilgilerin analiz edilmesini sağlayan SCADA ara yüzünden ve veri tabanından oluşmaktadır. Şekil 4.2'de SCADA için tasarlanan sisteminin genel şeması görülmektedir.



Şekil 4.2. SCADA için tasarlanan sistemin genel şeması

4.1. Deneysel Çalışmalar

Motor arızalarının tespitinde en önemli hususlardan biri, motor verilerinin güvenilir bir şekilde izlenmesidir. Bu nedenle iyi bir deney düzeneği oluşturulmalıdır. Burada kullanılan deney düzeneği Şekil 4.3 ve Şekil 4.4' te görülmektedir.



Şekil 4.3. Deney düzeneği eksenleme



Şekil 4.4. Deney düzeneği

Deney düzeneği; temelde motor ve yükten oluşmaktadır. Burada yük olarak DA makine kullanılmıştır. Motor ve yük arasındaki şaftın hizalanması için Shaftalign Os3 lazer şaft hizalama sistemi kullanılmıştır. Elektrik makinelerinde arıza tespiti için analizler yapılırken aynı anda birden fazla arızanın oluşma riski bulunmaktadır. Rulman arızası oluşturulurken aynı sırada eksenden kaçıklık arızasının oluşma riskini ortadan kaldırmak için çalışmada ŞKDMSM ve DA makine eksenlerinin düşey eksen ve yatay ekseninde kayma olmadan bir eksen üzerinde karşı karşıya bağlanması gerekmektedir. Bu durumun sağlanabilmesi için lazer eksenleme cihazı kullanılmıştır. Eksenleme işleminin yapılabilmesi için braketler motor ve DA 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. Böylece rulman arızası durumuna ait motor akım verisi şaft eksen kaçıklığı sorunu olmadan izlenebilmiştir. Çalışmada kullanılan motorun parametreleri Çizelge 4.1’de görülmektedir.

Çizelge 4.1. ŞKDMS motorun parametreleri

Güç	2,2Kw
Frekans	50Hz
Gerilim(Δ/Y)	230/400V
Akım(Δ/Y)	7,10/4,10A
Hız	1500d/d
Cos ϕ	0,85
Kutup Sayısı	4
% Verimi	91,2
Koruma Sınıfı	IP 54

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

Çizelge 4.2. DA makineye ait çalışma parametreleri

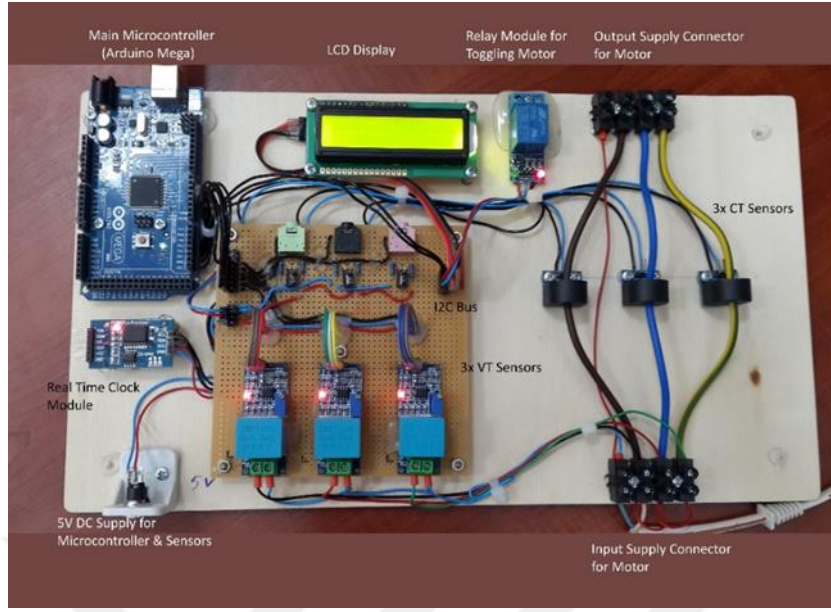
Güç	10	KW
Gerilim	400	V
Akım	20	A
Hız	2270	d/d
Uyartım gerilimi	200	V
Uyartım akımı	2.2	A
Çalışma sınıfı	S1	
Koruma Sınıfı	IP 23	

Burada yapılan deneylerde ŞKDMSM senkron hızda (1500 rpm) ve düşük hızda (500 rpm) çalıştırılmıştır. Senkron hız çalışmalarında motor şebekeden beslenirken düşük hız çalışmalarında ŞKDMSM sürücüsü kullanılarak çalıştırılmıştır. Çizelge 4.3'te ŞKDMSM sürücüsünün teknik bilgileri görülmektedir.

Çizelge 4.3. ŞKDMSM sürücüsünün teknik bilgileri

Sürücü tipi	Üç fazlı Line-Start Permanent Magnet Senkron Motor sürücüsü
Giriş Gerilimi V	3X380-500 +/-10%
Giriş Frekansı Hz	50-60 +/-5%
Giriş akımı (400V için)	5,0 A
Çıkış Gerilimi V	MAX.U/NETZ
Hız (1/min)	0 – 6000rpm
Çıkış akımı (400V için)	5,5 A
Motor gücü (sürekli)	2,20 KW
Motor gücü (squared)	3,00 KW
Bağlantı Protokolü	PROFIBUS DPV1

Bu çalışmada tasarlanan motor online durum izleme ve koruma sisteminin donanımsal bölümünün temelini Arduino Mega oluşturmaktadır. Sistemde kullanılan akım algılayıcı Zeming marka ZMCT103C model en fazla 5A rms ölçüm yapabilmektedir. Algılayıcı çalışma şekli 5A/5mA şeklinde olup çıkış pinlerine $R_B=200\Omega$ örnekleme direnci bağlanmıştır. Bu sayede hem akım trafosu açık uçlu kalmamış hem de algılayıcı çıkış işareti ölçümü değerlendirecek olan Arduino analog giriş yapısına uygun olarak gerilim biçimine dönüştürülmüştür. Gerilim algılayıcı olarak, ZMPT101B model en fazla 250V rms ölçüm yapabilen 2mA/2mA gerilim sensörü kullanılmıştır. Gerilim ölçümü üç fazlı sistemde faz-nötr arası gerçekleştirilmiştir. Donanımsal kontrol birimi Şekil 4.5'te görülmektedir.

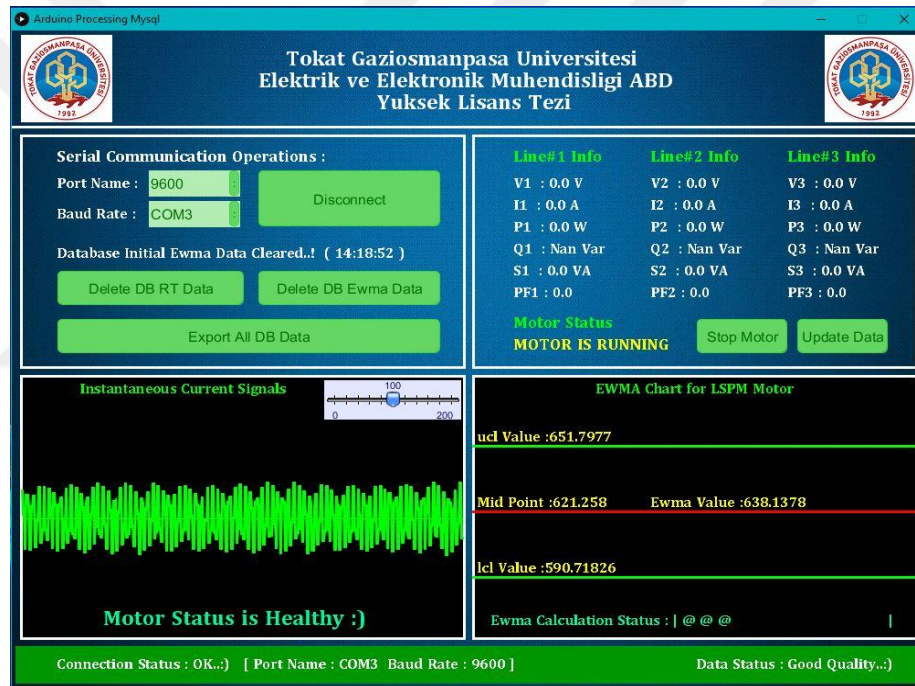


Şekil 4.5. Donanımsal kontrol birimi genel yapısı

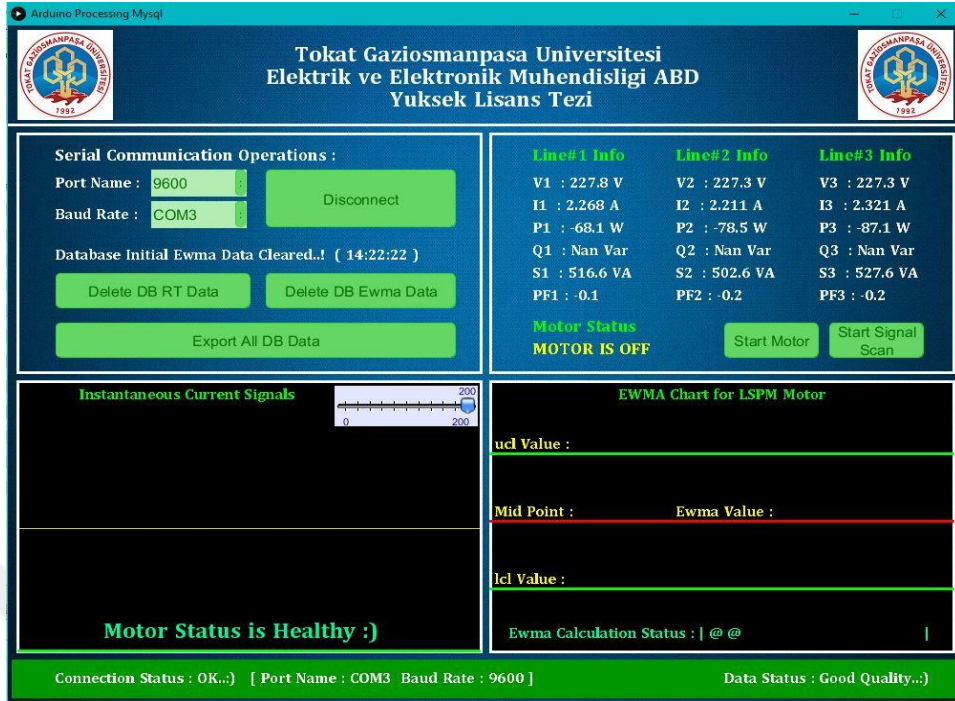
Donanımsal bölümde 16x2 LCD ekran, DS3231 gerçek zaman modülü ve röle modülü yer almaktadır. LCD ekran ölçüm ve değerlendirme sonuçlarının SCADA ara yüzünün yanı sıra donanımsal bölümde de görüntülenmesini sağlamaktadır. DS3231 Real Time Clock (RTC) modülü I2C iletişim protokolü kullanarak mikro denetleyici ile iletişim sağlamakta ve ara yüze gönderilen verilerin zaman etiketi ile aktarılmasını sağlamaktadır. Zaman ile ilgili uygulanabilecek senaryolarda bu modül kullanılabilir. Röle modülü mikro denetleyici dijital çıkışlarından birine bağlanmış durumdadır. Bu modül motor koruması sağlanırken gerekli durumda motorun enerjisiz kalmasını sağlamak için kullanılmıştır. Kullanmış olduğumuz kontrol yönteminde arızanın tespit edilmesine bağlı olarak motorun durdurulması gerektiğinde röle modülü bu görevi yerine getirmektedir.

Mikro denetleyici içerisinde yer alan yazılım iki formatta çalışmaktadır. Ara yüzden gelen talebe göre birinci çalışma modunda elde edilen örnekleme verilerini kullanarak pozitif tepe noktalarını yazılım ortamına gönderir ve EWMA kontrol yöntemi için veri sağlar. İkinci çalışma modunda ise yine örnekleme verilerini ve “Emonlib” kütüphanesini kullanarak akım, gerilim ve güç değerleri gibi sistemin anlık durumunu kullanıcıya sunmaktadır.

Çalışmanın yazılımsal bölümünde ise Processing 3 ve Wamp Server kullanılmıştır. Processing ortamı özellikle mikro denetleyici çalışmalarında entegreye gömülü halde bulunan kullanıcı tarafından görülemeyen verilerin kullanıcı tarafından görüntülenmesini ve kolay bir şekilde kontrol etmesini sağlayan Java tabanlı bir ortamdır. Çalışmada kullanılan SCADA ara yüzü seri iletişim yolu ile mikro denetleyiciden gelen veri paketlerini alıp değerlendirecek şekilde Processing ortamında hazırlanmıştır. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de görüldüğü gibi ara yüz uygun port adı ve baud rate seçilerek mikro denetleyici ile online olarak iletişimde olduğu gibi Wamp Server yazılımı kullanılarak MySQL veri tabanı ile iletişimini sağlamaktadır.



Şekil 4.6. SCADA ara yüzünde anlık sinyal görünümü



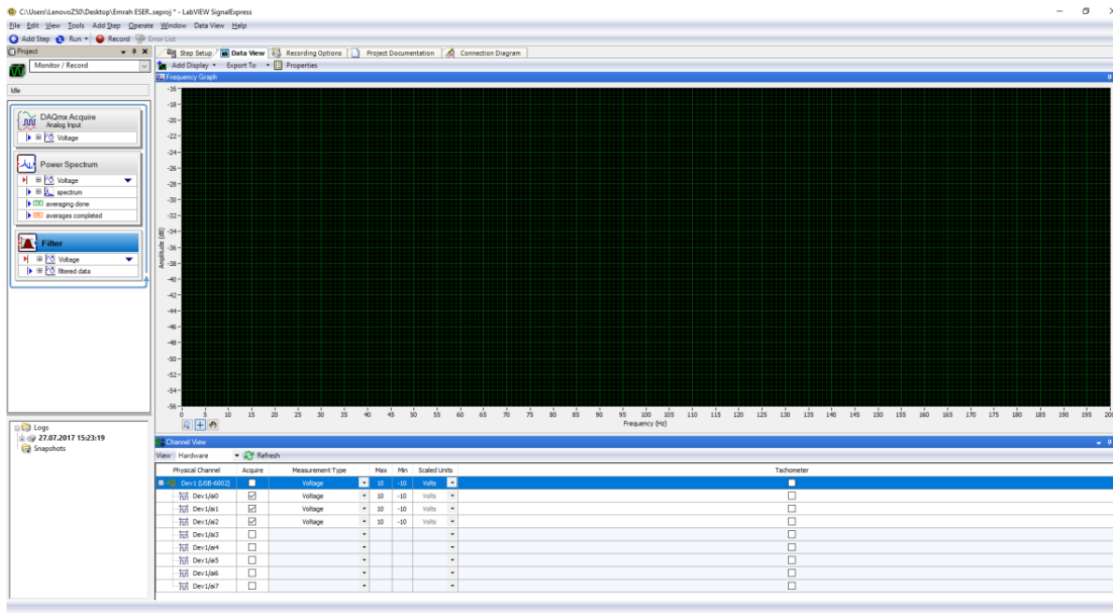
Şekil 4.7. SCADA ara yüzünde enerji metre ölçümleri

Processing ortamında hazırlanmış olan SCADA ara yüzünün, donanımsal bölümden verileri alabilmesi için belirli kurallar oluşturulmuştur. Port adı ve baud rate gibi seri iletişim parametrelerinin seçilmesinin ardından “Connect” butonuna basılmasıyla ara yüz mikro denetleyiciye başlama komutu göndermektedir. Bu komutu bekleyen Arduino veriyi doğrularak seri iletişimi başlatır. Ara yüzü String formatında “Data#” ile başlayan devamına sensör verilerinin virgül “,” karakteriyle art arda sıralanmış değerlerinin eklenmesiyle oluşan uzun bir veri aktarılır. Veri yapısı “Data#Sensor1,Sensor2,Sensor3,...” şeklindedir. Ara yüz, gelen verinin “Data#” ile başladığını onayladıktan sonra “Split” fonksiyonunu kullanarak tüm veri değerlerini virgül “,” karakterine göre ayırır. Önceden tanımlanmış bir dizi elemanları olarak atar. SCADA ara yüzü donanımsal bölümdeki yapılarda elde edilen verileri bu yolla güncellemiş olur.

Wamp Server kullanılarak oluşturulan MySQL veri tabanına ara yüzde ulaşan veriler kaydedilir. Kaydedilen bu veriler İSK yöntemi için giriş verisi olarak kullanılmaktadır. Veri tabanında oluşturulan tablolar giriş verilerinin kaydedilmesini sağladığı gibi

analizler sonucunda elde edilen karar değerlerinin de kaydedilmesini sağlamaktadır. Böylece geçmişe yönelik analizler ve raporlamalar da kolaylıkla yapılabilmektedir.

Bu tez çalışmasında verilerin yüksek çözünürlüklü örneklerinin görüntülenmesi için SCADA veri toplama sistemine ek olarak 50ks/sn örnekleme frekansı özelliğine sahip NI 6002 DAQ veri toplama kartı kullanılmıştır. Veri toplamada kullanılan bu cihaza uyumlu olarak LabVIEW SignalExpress programı ile veri kayıt altına alınmıştır. Şekil 4.8’de LabVIEW Signal Express ekran ara yüzü görülmektedir.



Şekil 4.8. Labview signal express ekran ara yüzü

4.1.1. Rulman arızalarının oluşturulması

Yapılan uygulamalarda 3 farklı tipte rulman arızası üzerinde çalışılmıştır: Dış Bilezik (DB) arızası, İç Bilezik (İB) arızası ve Hasarlı Bilye (HB) Arızasıdır. Bu arızalar özdeş üç rulmanda yapay olarak üretilmiştir. Şekil 4.9’da arızalı rulmanlara ait resimler görülmektedir.



(a) (b) (c) (d)

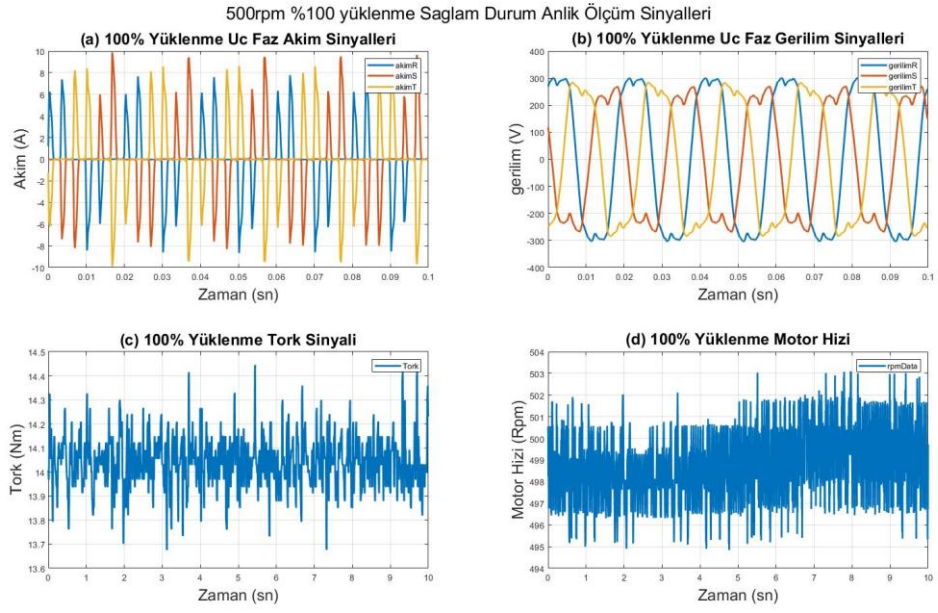
Şekil 4.9. Rulman arızaları: a) DB arızalı b) İB arızalı c) HB arızalı d) Sağlam

Her bir arıza için ayrı bir rulman (motorun 6269 kodlu orijinal rulmanı) kullanılmıştır. DB arızası, rulmanın dış bileziğinin merkezinden 6 mm çaplı matkap ucu ile delinerek üretilmiştir. İB arızası, rulmanın iç bileziğinin yan kenarından bileziğe dik olarak ve bileziğin yarı derinliğine kadar 6 mm çaplı matkap ucu ile delinerek oluşturulmuştur. HB arızası ise düşük gerilimli bir DA kaynağı kullanılarak rulman bilyelerinin birkaçının yüzeylerinde kısa süreli kısa devreler yapılarak elde edilmiştir.

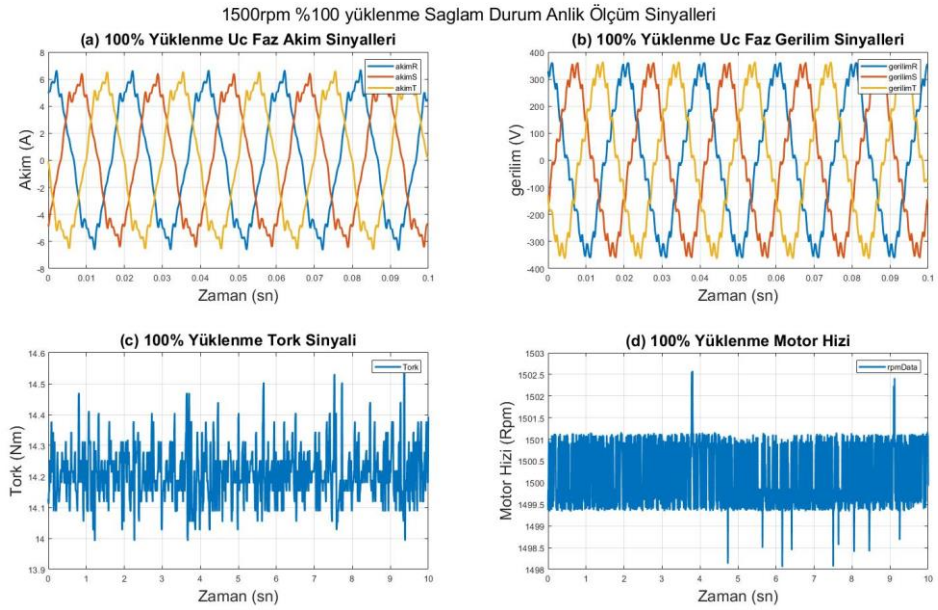
4.2. Veri Toplama

Motorlar yaklaşık olarak nominal çalışma sıcaklığına gelecek şekilde 20 dakika çalıştırıldıktan sonra motor akım sinyal verisi bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Önerilen yöntemde arıza analizi tespiti sağlam ve arızalı motor akım sinyal veri setlerinin karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Sağlam ŞKDMSM'den alınan akım sinyal verisi ile kaliteli çalışma aralığı oluşturulmakta ve motorun arızalı durumunda alınan veri sürecin devamına işlenerek arızanın varlığı tespit edilmektedir.

Stator akım sinyal verisi 2.2 kW'lık motorda sağlam durum için iki farklı (500 rpm, 1500 rpm) devirde farklı yük durumlarında (% 0, % 50, % 75, % 100, % 115) on farklı şekilde toplanmıştır. 1500 rpm devirde çalışırken motor şebekeden, 500 rpm'de çalışırken ise sürücünden beslenmiştir. Veriler, hem sinyallerin somut görselliğini sağlayabilmek için DAQ veri kartıyla toplanmış hem de motor durum izlemesi ve EWMA'yla arıza teşhisi yapabilmek için SCADA ortamında toplanmıştır. Sağlam motora ait tüm veriler bu şekilde elde edilmiştir. Toplanan veriler sonucunda, 500 rpm ve 1500 rpm devirde % 100'lük yük durumunda elde edilen grafiksel sonuçlar Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de sunulmuştur.



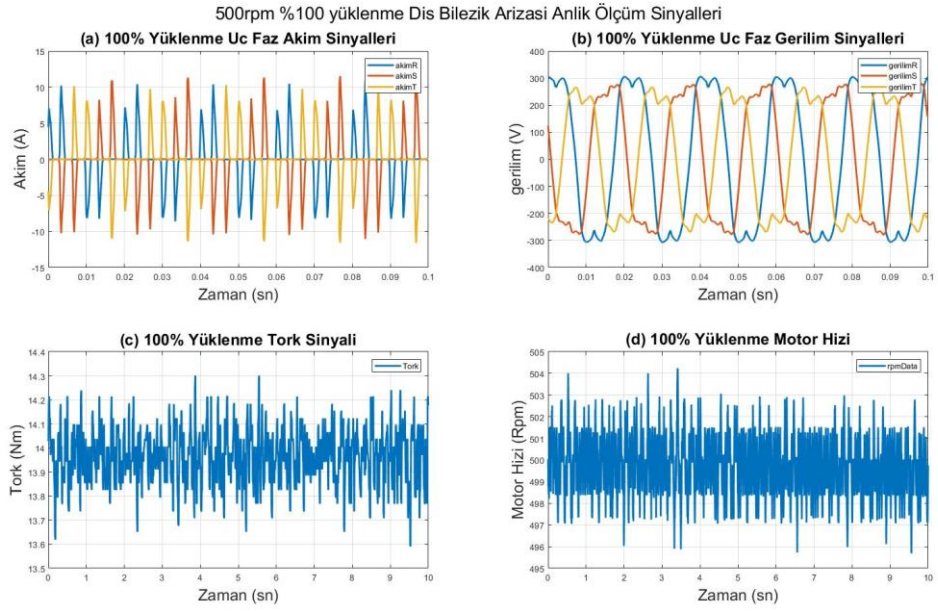
Şekil 4.10. 500 rpm'de motorun % 100 yük durumundaki sağlam durum veri grafikleri



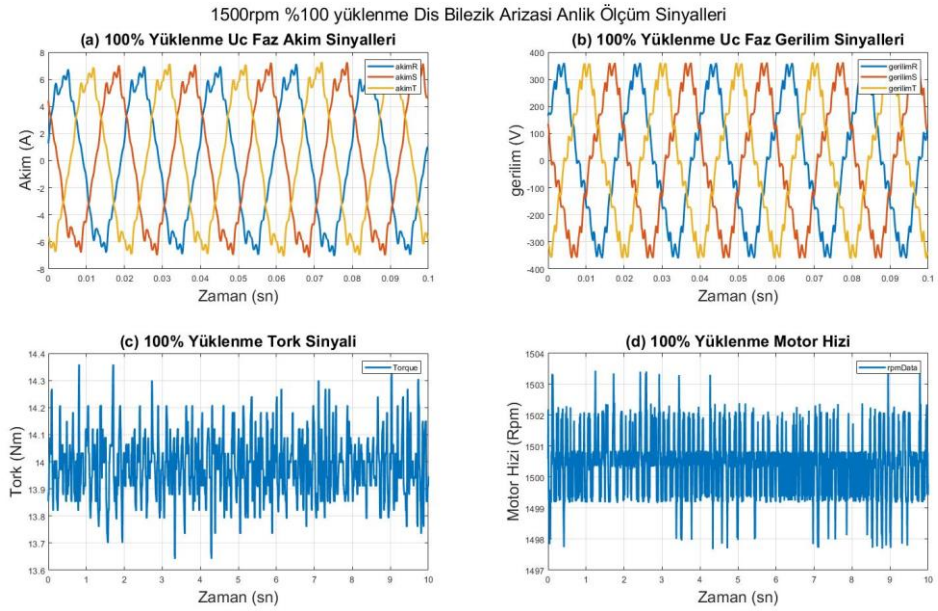
Şekil 4.11. 1500 rpm'de motorun % 100 yük durumundaki sağlam durum veri grafikleri

Motor şebekeden beslenerek senkron devir olan 1500 rpm sabit devrinde % 100 yüklü durumda yaklaşık 10 dakika çalıştırılarak veri toplanması işlemi yapılmıştır. ŞKDMSM'nin akım sinyalleri sinüzoidal dalga şeklinde olup bu sinyallerin 1 saniyelik periyodunda 50 adet tepe değeri bulunmaktadır. Örnekleme grupları 50 adet tepe değerden her bir grafik analizi için 10'ar adet oluşturulmuştur. Motor akımları yüke ve hıza bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla motor akım sinyalleri toplanırken bu durum dikkate alınarak, farklı yük koşulları ve iki farklı hız için veri toplama işlemi ayrı ayrı yapılmıştır. 1500 rpm sabit devri ve % 100 yük durumu için yapılan tüm işlemler, diğer verilerin (1500 rpm'de farklı yük durumları ve 500 rpm'de farklı yük durumları) toplanması içinde tekrarlanmıştır.

Sağlam motorda olduğu gibi stator akım sinyal verisi 2.2 kW'lık motorda arızalı durumlar (DB, İB ve HB) için iki farklı sabit devirde (1500 rpm, 500 rpm) farklı yük durumlarında (% 0, % 50, % 75, % 100, % 115) otuz farklı şekilde toplanmıştır. Bölüm 4.1.1'de bahsedildiği gibi bu arızalar her bir rulmanda yapay olarak üretilmiştir. Sağlam motor verileri alınırken yapılan tüm işlemler arızalı durum verileri alınırken de yapılmıştır. Elde edilen veriler sonucunda oluşturulan, motorun DB arızası % 100 yük durumundaki veri grafikleri Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te sunulmuştur.

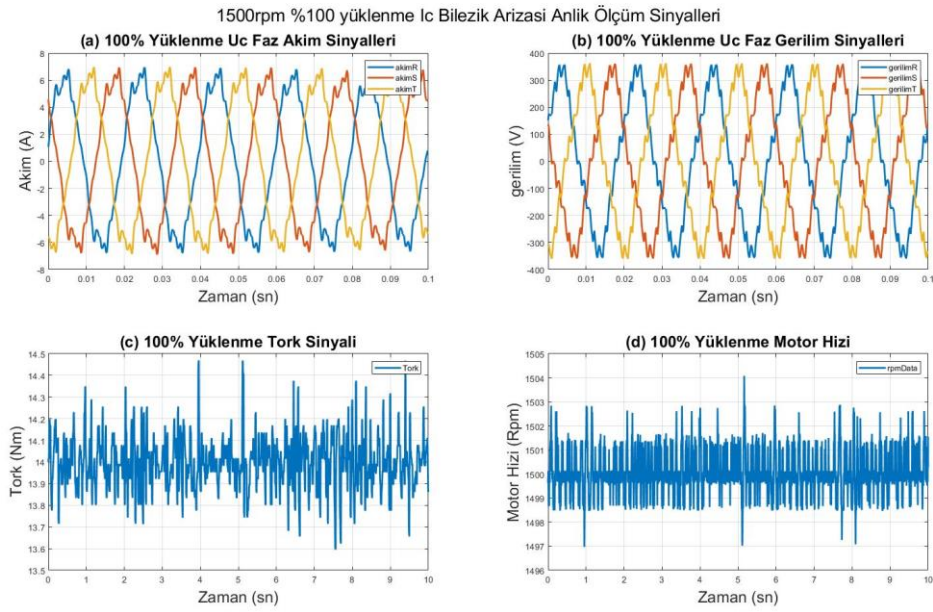


Şekil 4.12. Motorun 500 rpm’de % 100 yüklenme durumunda DB arızası durumu veri grafikleri

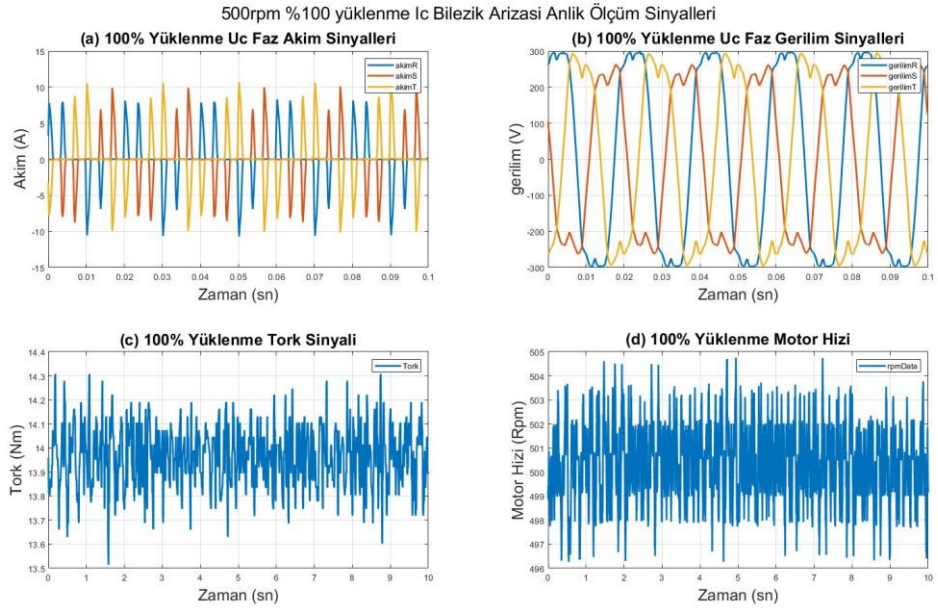


Şekil 4.13. Motorun 1500 rpm’de % 100 yüklenme durumunda DB arızası durumu veri grafikleri

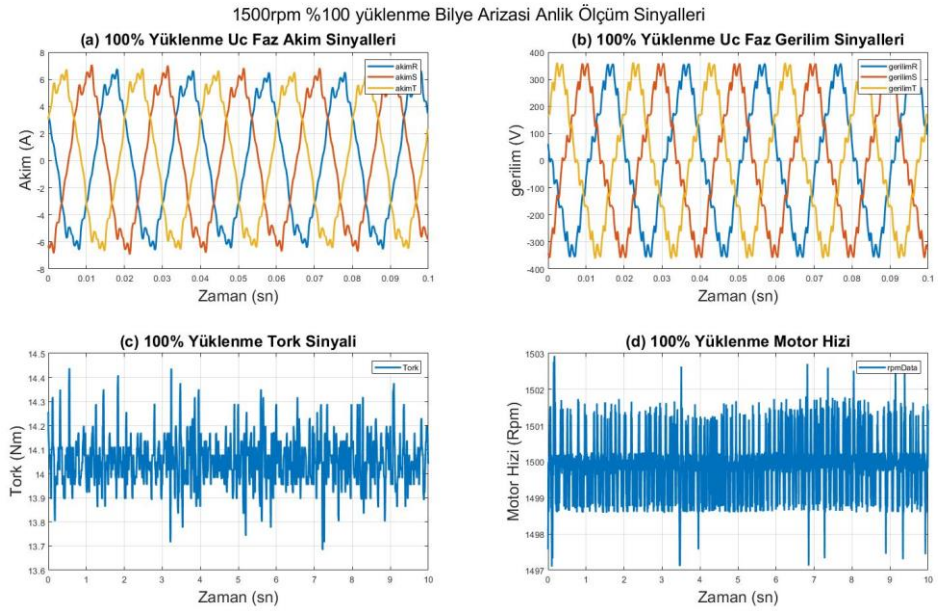
Motor 1500 rpm sabit devrinde % 100 yüklü durumda yaklaşık 10 dakika çalıştırılarak veri toplanması işlemi yapılmıştır. Farklı yük koşulları ve iki farklı hız için veri toplama işlemi ayrı ayrı yapılmıştır. 1500 rpm sabit devri ve % 100 yük durumu için yapılan tüm işlemler, diğer verilerin (1500 rpm’de farklı yük durumları ve 500 rpm’de farklı yük durumları) toplanması içinde yapılmıştır. Sağlam ve DB arızası motor verileri alınırken yapılan tüm işlemler diğer arızalı durum verileri (İB ve HB) alınırken de yapılmıştır. Elde edilen veriler sonucunda oluşturulan, motorun İB ve HB arızası % 100 yük durumundaki veri grafikleri Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de sunulmuştur.



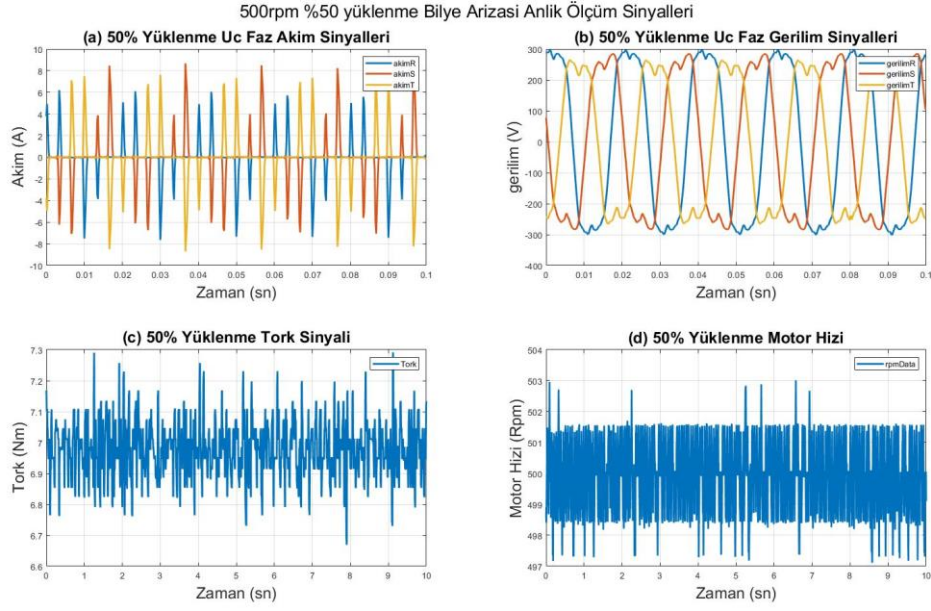
Şekil 4.14. Motorun 1500 rpm’de % 100 yükleme durumunda İB arızası durumu veri grafikleri



Şekil 4.15. Motorun 500 rpm'de % 100 yüklenme durumunda İB arızası durumu veri grafikleri



Şekil 4.16. Motorun 1500 rpm'de % 100 yüklenme durumunda HB arıza durumu veri grafikleri



Şekil 4.17. Motorun 500 rpm'de % 100 yüklenme durumunda HB arıza durumu veri grafikleri

Bu tez çalışmasında ŞKDMSM'nin rulman arızalarının teşhisi için 4 adet deneysel çalışma yapılmıştır.

Bu deneyler;

- Deney-1: farklı hız ve yük koşulları altında ŞKDMSM'nin sağlam durumu analizi,
- Deney-2: farklı hız ve yük koşulları altında ŞKDMSM'nin DB rulman arızası durumu analizi,
- Deney-3 farklı hız ve yük koşulları altında ŞKDMSM'nin İB rulman arızası durumu analizi,
- Deney-4 farklı hız ve yük koşulları altında ŞKDMSM'nin HB arıza durumu analizi,

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında önerilen EWMA yöntemi ile ŞKDMSM'nin arızalarının tespiti üzerinde çalışılmıştır. Önerilen yöntemde arıza analizi tespiti sağlam ve arızalı motor akım sinyal veri setlerinin karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Sağlam ŞKDMSM'den alınan akım sinyal verisi ile kaliteli çalışma aralığı oluşturulmakta ve motorun arızalı durumunda alınan veri sürecin devamına işlenerek arızanın varlığı tespit edilmektedir.

Çalışmada önerilen yöntemle ŞKDMSM'nin sağlam ve rulman arızalarının (DB, İB ve HB) tespiti için 4 farklı deney ile ŞKDMSM akım sinyalleri toplanmıştır. Yapılan 4 farklı deney çalışmasında 40 farklı durum ortamında çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar doğrultusunda elde edilen veriler EWMA analiz yöntemiyle işlenerek sağlam ve arıza durumları tespit edilmiştir.

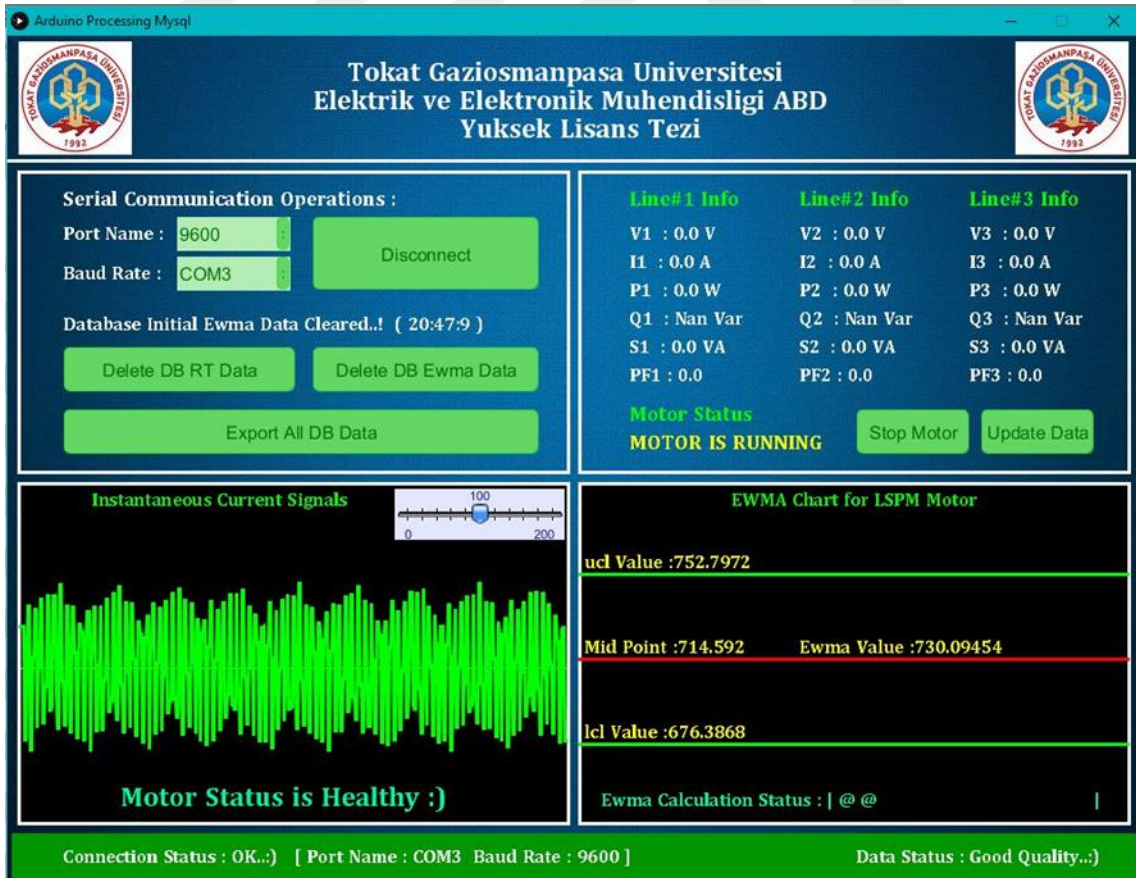
Deney-1; Bu deney sağlam durumdaki 2.2 kW'lık ŞKDMSM'nin farklı yük koşulları altında(% 0, % 50, % 75, % 100, % 115) ve iki farklı sabit devirde(500 rpm,1500 rpm) durum analizidir. Bu deneyin amacı 2.2 kW'lık ŞKDMSM'nin sabit devir ve farklı yük koşulları altında kaliteli çalışma aralıklarını belirlemek ve çalışma sürecini izlemektir.

Kaliteli çalışma aralığını oluşturabilmek için sağlam motorların akım sinyalleri kullanılmıştır. ŞKDMSM'nin akım sinyalleri sinüzoidal dalga şeklinde olup bu sinyallerin 1 saniyelik periyodun da 50 adet tepe değeri bulunmaktadır.

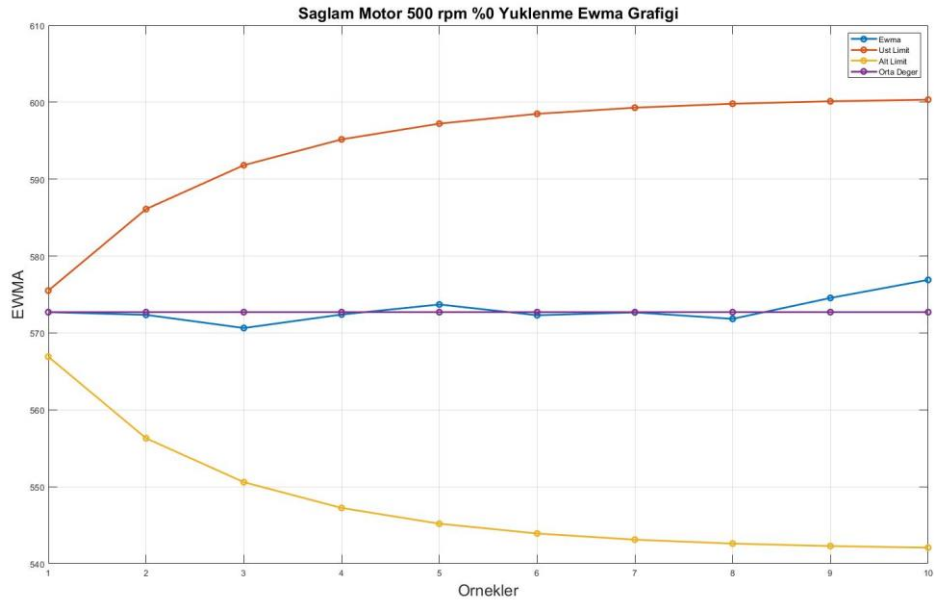
EWMA analizi için örneklem oluşturma işlemi tepe değerler üzerinden gerçekleştirilmektedir. Örneklem grupları 50 adet tepe değerden her bir grafik analizi için 10'ar adet oluşturulmuştur. Sağlam veriden oluşturulan örneklem grupları SCADA ara yüzünde analiz edilerek kaliteli çalışma aralığı için AKL, MÇ ve ÜKL noktaları hesaplanmıştır. Motor akımları yüke ve hıza bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla motor akım sinyalleri toplanırken bu durum dikkate alınarak, farklı yük koşulları için veri toplama işlemi ayrı ayrı yapılmıştır.

İlk olarak motorun 1500 rpm'de % 100 yüklü durumu için akım verisi 10 farklı zamanda 5'er saniye olacak şekilde kaydedilmiştir. % 100 yüklü çalışma koşulu için sağlam motor

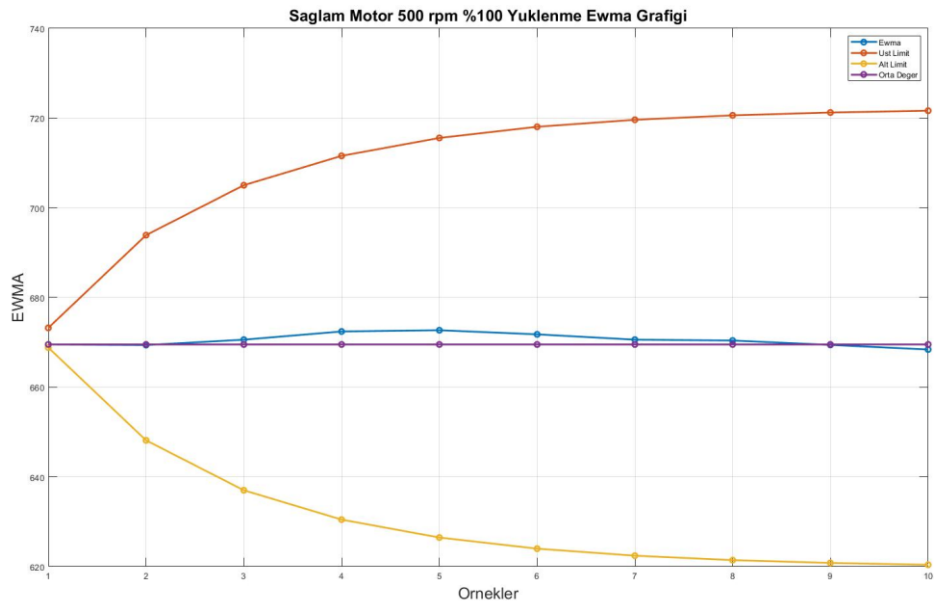
verisinden 500 veri oluşturulmuştur. Kontrol sınırlarını belirlemek, orta ortalama değerini bulmak ve EWMA değerlerini hesaplamak için sinüzoidal dalgada 1 periyotta elde edilen 50 örnek içinden 1 pozitif tepe değeri alınmıştır. Bu durum rastgele periyotlarda devam ettirilerek 50 adet veri listelenmiş ve 1.örneklem grubu elde edilmiştir. Veri toplama işlemi bu şekilde devam ettirilerek sağlam durumlar için 10'ar adet örneklem grupları oluşturulmuştur. SCADA ortamında % 100 yüklü çalışma koşulunda kaliteli çalışma aralığını belirleyebilmek için 500 adetlik bir veri seti hazırlanmıştır. İstatistiksel analiz yolu kullanılarak sağlam motorun sabit hızda (1500 rpm) ve % 100 yüklü durumu için oluşturulan 10 adet veri seti analiz edilmiştir. 1500 rpm hızda ve % 100 yük durumundaki işlemler sağlam durum için diğer hız değeri ve yük durumları içinde aynı sıra ile gerçekleştirilerek veriler alınmış ve EWMA analizleri yapılarak SCADA ara yüzleri oluşturulmuştur. Şekil 5.1'de 1500 rpm'de % 100 yüklenmiş sağlam motorun SCADA ara yüzü ve Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te ise farklı hız ve yüklerdeki sağlam motorun EWMA analizi sonuç grafikleri verilmiştir.



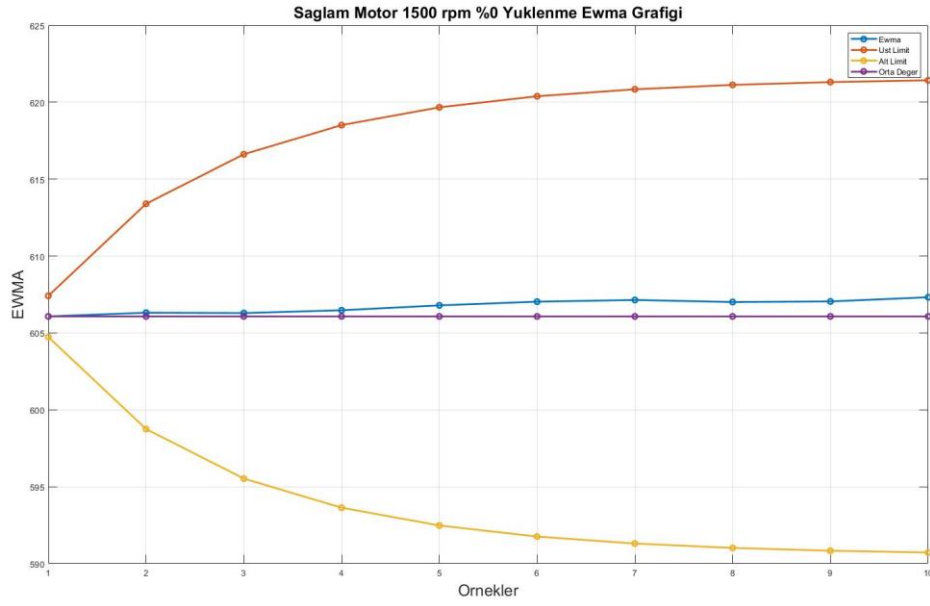
Şekil 5.1. Motorun 1500 rpm devirde % 100 yüklü durumundaki SCADA ara yüzü



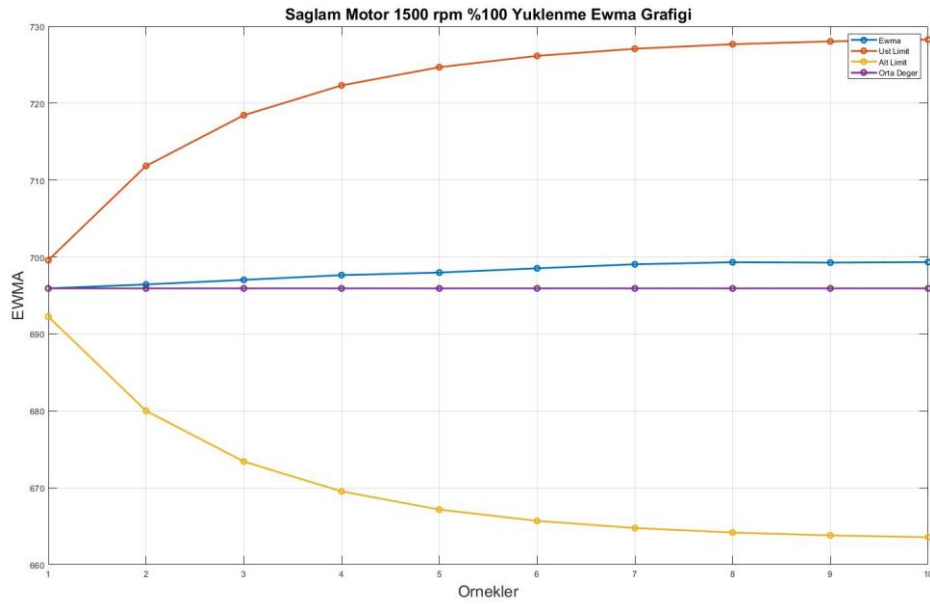
Şekil 5.2. Deney-1'in 500 rpm'de, % 0 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri



Şekil 5.3. Deney-1'in 500 rpm'de % 100 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri



Şekil 5.4. Motorun 1500 rpm'de % 0 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri



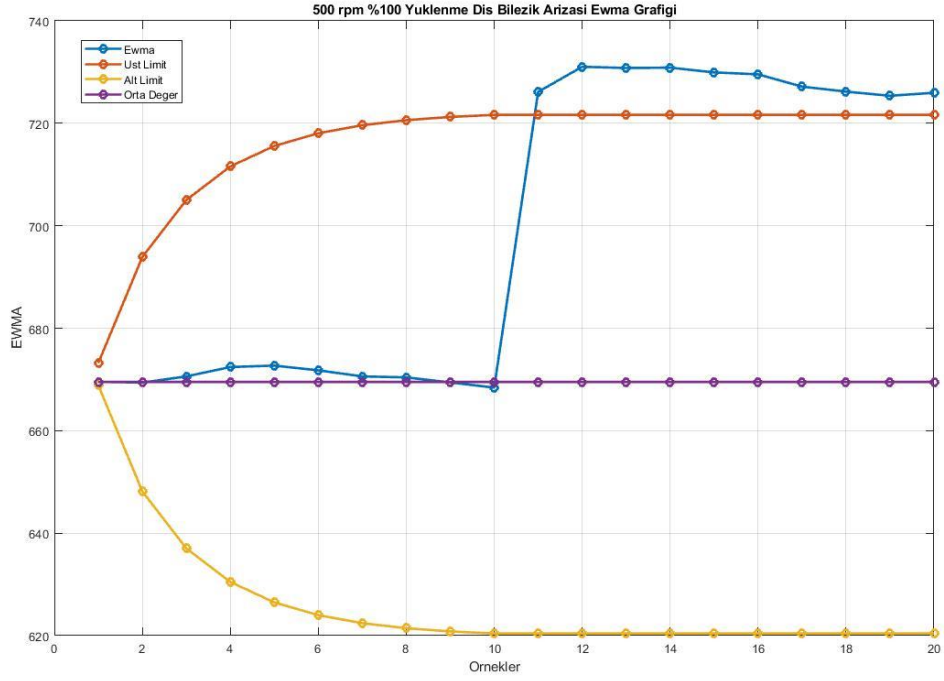
Şekil 5.5. Motorun 1500 rpm'de % 100 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri

Şekil 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 ve 5.5'teki EWMA sonuçları incelendiğinde elde edilen hesaplama sonuçlarına göre; EWMA değerleri hesaplanan MÇ civarlarında salınım yapmaktadır. Hesaplanan EWMA değerlerinin ÜKL veya AKL değerlerini aşması durumunda arıza

bulunduğu sonucuna varılır. Fakat yukarıdaki grafiklerde sürecin kaliteli çalışma aralığında devam etmekte olduğu, yani sürecin kontrol altında olduğu ve dolayısıyla ŞKDMSM'nin sağlam çalışma durumunun bozulmadığı görölmektedir.

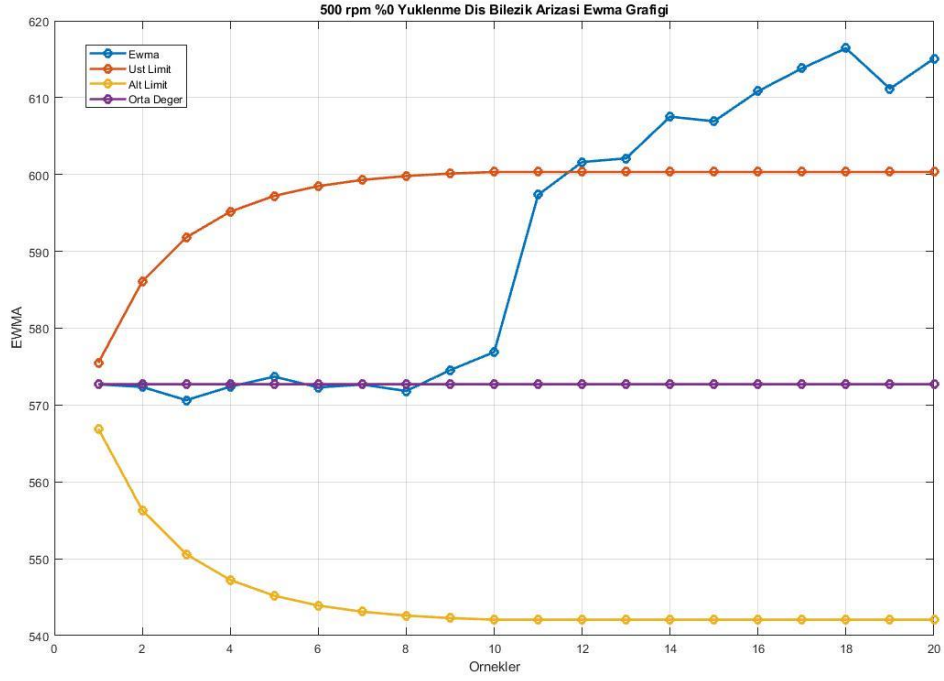
Deney-2; Bu deney farklı yük koşulları altında (% 0, % 50, % 75, % 100, % 115), iki farklı sabit devirde (500 rpm,1500 rpm), 2.2 kW'lık ŞKDMSM'nin DB rulman arızası durum analizi için yapılmıştır. Bu deneyin amacı dış bilezik arızalı 2.2 kW'lık ŞKDMSM'nin sabit devir ve farklı yük koşulları altında EWMA analiz yöntemi ile izlemek ve arıza durumunu tespit etmektir.

Bölüm 4.1.1'de bahsedildiği gibi üzerinde suni olarak oluşturulmuş DB arızalı ŞKDMSM'nin akım sinyal verisi arızalı faz üzerinden toplanarak Deney-1'in yüksüz % 50, % 75, % 100 yüklü ve % 115 yüklü durumlarında, farklı devirlerde (500 rpm,1500 rpm) yapıldığı gibi veri sinyalleri toplanmış İSK yöntemine göre analiz edilmiştir. Analizlerden sonra elde edilen sonuçlar sağlam süreçinde hesaplanan kaliteli çalışma aralıklarına göre kıyaslanarak EWMA değerleri oluşturulmuştur. Buna bağlı olarak da EWMA grafikleri elde edilmiştir. Şekil 5.6 ve 5.7'de Deney-2'nin 500 rpm'de % 100 yüklü ve yüksüz, Şekil 5.8 ve 5.9'da ise Deney-2'nin 1500 rpm'de % 100 yüklü ve yüksüz EWMA analiz grafikleri görölmektedir.



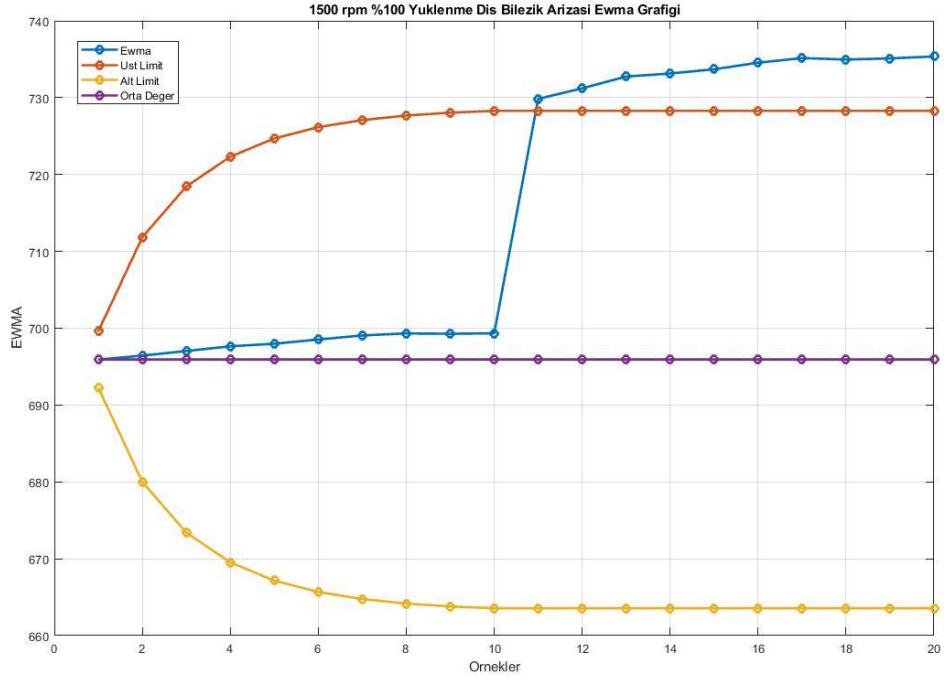
Şekil 5.6. Deney-2'nin 500 rpm'de % 100 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri

Şekil 5.6 incelendiğinde 10. örneğe kadar sürecin kaliteli çalışma aralığında yani ÜKL (720), AKL (620) ve MÇ (670) devam ettiği görülmektedir. 10. örnekten sonra ise ÜKL değerini aşır 730'lar civarına çıktığını görmekteyiz. Bu durum motorun normal çalışma durumunda olmadığını, bir arıza olduğunu göstermektedir.



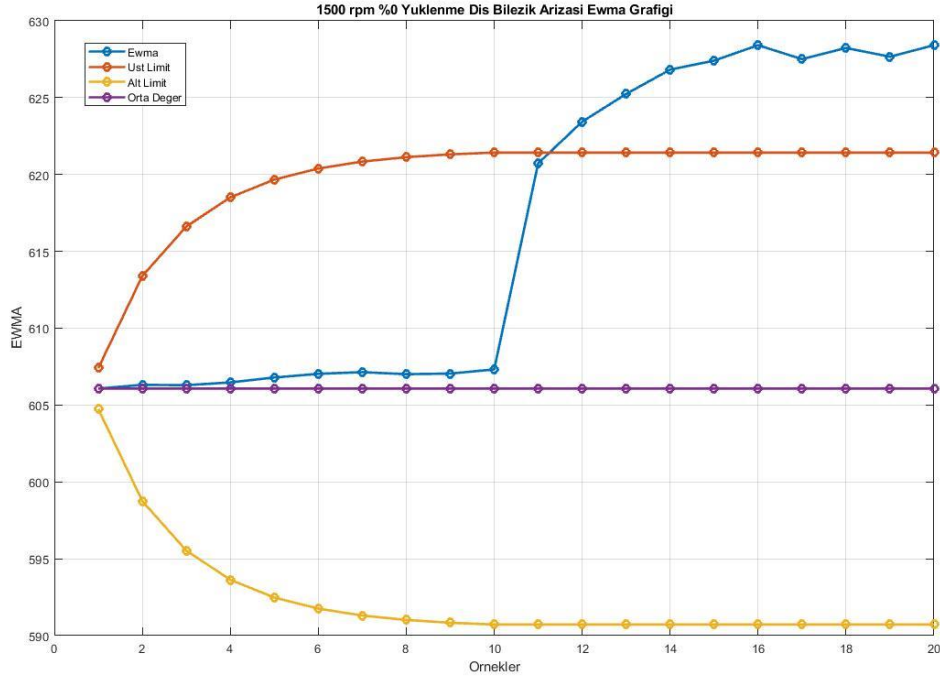
Şekil 5.7. Deney-2'nin 500 rpm'de % 0 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri

Şekil 5.7 incelendiğinde 10. örneğe kadar sürecin kaliteli çalışma aralığında yani ÜKL (600), AKL (542) ve MÇ (573) devam ettiği görülmektedir. 10. örnekten sonra ise ÜKL değerini aşıp sürekli artan bir grafik oluşturarak 615'ler civarına çıktığını görmekteyiz. Bu durum motorun normal çalışma durumunda olmadığını, bir arıza olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.8. Deney-2'nin 1500 rpm'de % 100 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri

Şekil 5.8 incelendiğinde 10. örneğe kadar sürecin kaliteli çalışma aralığında yani ÜKL (725), AKL (664) ve MÇ (696) devam ettiği görülmektedir. 10. örnekten sonra ise ÜKL değerini aşip sürekli artan bir grafik oluşturarak 735'ler civarına çıktığını görmekteyiz. Bu durum motorun normal çalışma durumunda olmadığını, bir arıza olduğunu göstermektedir.

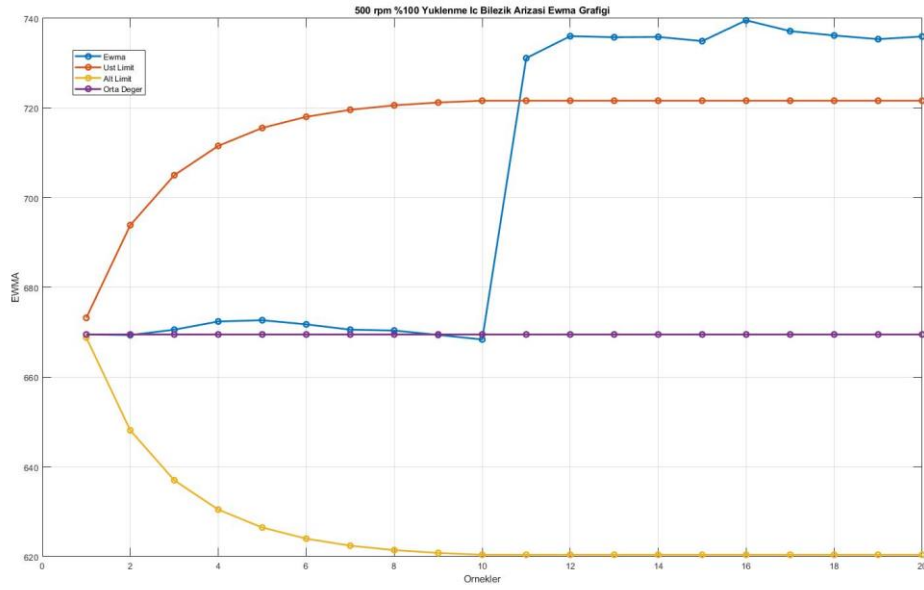


Şekil 5.9. Deney-2'nin 1500rpm'de % 0 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri

Şekil 5.6, 5.7, 5.8 ve 5.9'daki EWMA sonuçları incelendiğinde elde edilen hesaplama sonuçlarına göre EWMA değerleri hesaplanan MÇ civarlarında salınım yapmamaktadır. Hesaplanan EWMA değerlerinin ÜKL veya AKL değerlerini aşması durumunda arıza bulunduğu sonucuna varılır. Yukarıdaki grafiklerde de sürecin kaliteli çalışma aralığında devam etmediğini, 10. örnekten sonra üst limiti aştığı görülmektedir. Yani sürecin kontrol altında olmadığı ve dolayısıyla ŞKDMSM'nin arızalı çalışma durumunda olduğu görülmektedir.

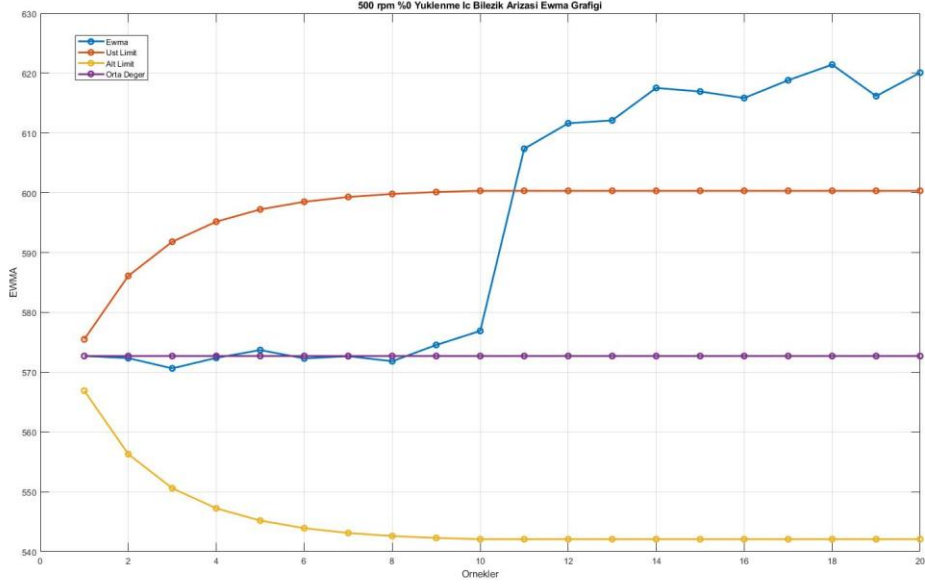
Deney-3 ve Deney-4'te de Deney-2'deki yapılan tüm işlemler benzer şekilde yapılmış ve elde edilen veri sinyalleri İSK yöntemi EWMA tarafından analiz edilerek arızalı EWMA sonuç grafikleri elde edilmiştir. Böylece sistemin İB arıza ve HB arıza durumunda olduğu tespit edilmiştir. Bölüm 4.1.1'de bahsedildiği gibi üzerinde suni olarak oluşturulmuş İB arızalı HB arızalı ŞKDMSM'nin akım sinyal verisi arızalı faz üzerinden toplanarak Deney-1'in yüksüz % 50, % 75, % 100 yüklü ve % 115 yüklü durumlarında, farklı devirlerde (500 rpm, 1500 rpm) yapıldığı gibi veri sinyalleri toplanmış İSK yöntemine göre analiz edilmiştir. Analizlerden sonra elde edilen sonuçlar sağlam sürecinde

hesaplanan kaliteli çalışma aralıklarına göre kıyaslanarak EWMA değerleri oluşturulmuştur. Buna bağlı olarak da EWMA grafikleri elde edilmiştir. Şekil 5.10 ve 5.11’de Deneş-3’ün 500 rpm’de % 100 yüklü ve yüksüz, Şekil 5.12 ve 5.13’te ise Deneş-3’ün 1500 rpm’de % 100 yüklü ve yüksüz EWMA analiz grafikleri görölmektedir. Şekil 5.14 ve 5.15’te Deneş-4’ün 500 rpm’de % 50 yüklü ve yüksüz, Şekil 5.16 ve 5.17’de ise Deneş-4’ün 1500 rpm’de % 100 yüklü ve yüksüz EWMA analiz grafikleri görölmektedir.



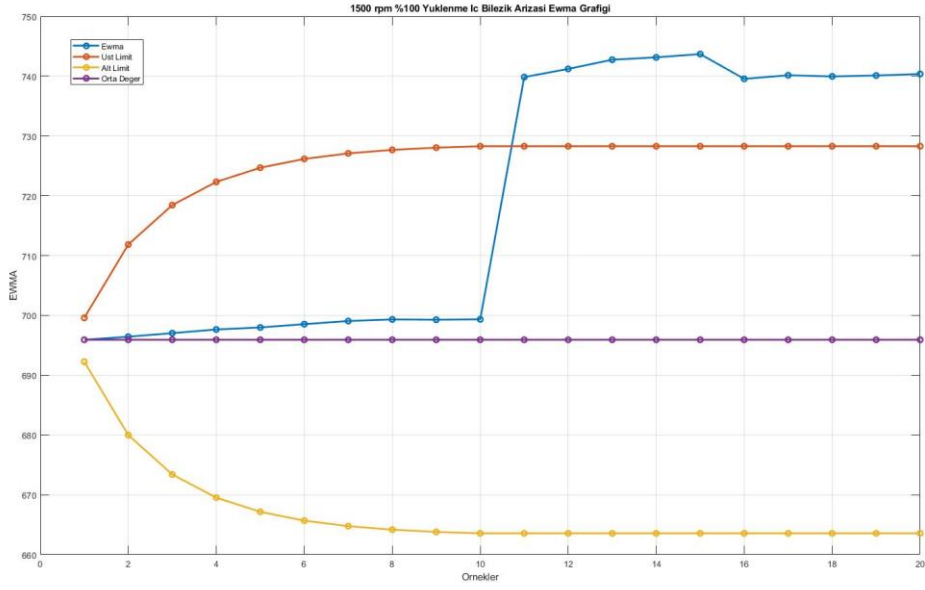
Şekil 5.10. Deneş-3'ün 500 rpm'de % 100 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri

Şekil 5.10 incelendiğinde 10. örneğe kadar sürecin kaliteli çalışma aralığında yani ÜKL (720), AKL (620) ve MÇ (670) devam ettiği görölmektedir. 10. örneğten sonra ise sürecin ÜKL değerini aşıp 735'ler civarına fırtığını görmekteyiz. Bu durum motorun normal çalışma durumunda olmadığını, bir arıza olduğunu göstermektedir.



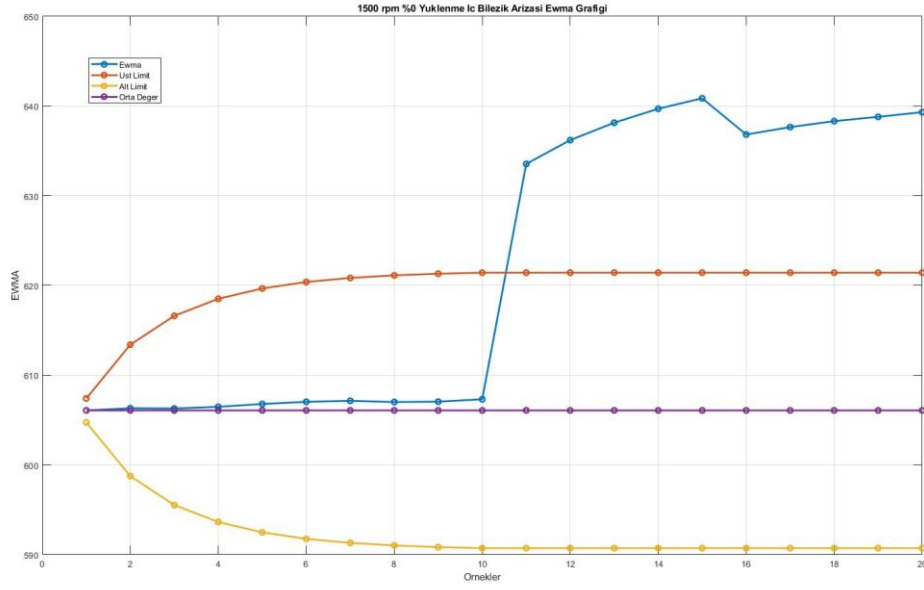
Şekil 5.11. Deney-3'ün 500 rpm'de % 0 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri

Şekil 5.11 incelendiğinde 10. örneğe kadar sürecin kaliteli çalışma aralığında yani ÜKL (600), AKL (542) ve MÇ (573) devam ettiği görülmektedir. 10. örnekten sonra ise sürecin ÜKL değerini aşıp 620'ler civarına çıktığını görmekteyiz. Bu durum motorun normal çalışma durumunda olmadığını, bir arıza olduğunu göstermektedir.



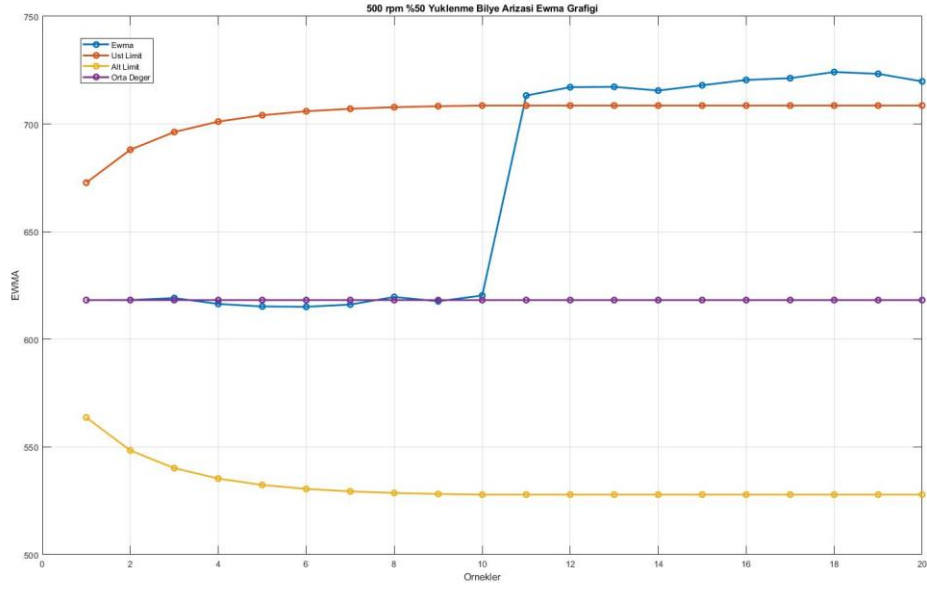
Şekil 5.12. Deney-3'ün 1500 rpm'de % 100 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri

Şekil 5.12 incelendiğinde 10. örneğe kadar sürecin kaliteli çalışma aralığında yani ÜKL (725), AKL (664) ve MÇ (696) devam ettiği görülmektedir. 10. örnekten sonra ise sürecin ÜKL değerini aşmış 745'ler civarına çıktığını görmekteyiz. Bu durum motorun normal çalışma durumunda olmadığını, bir arıza olduğunu göstermektedir.



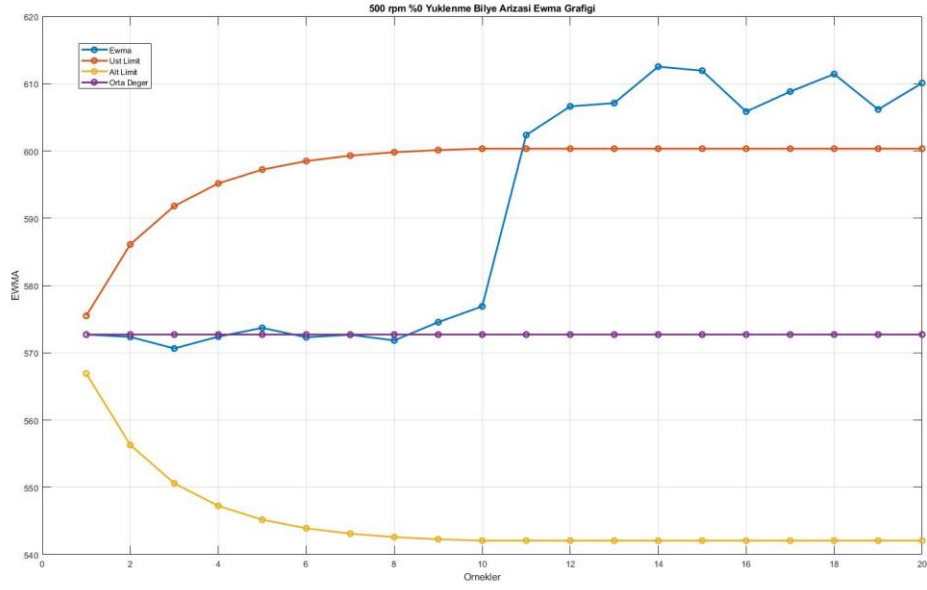
Şekil 5.13. Deney-3'ün 1500 rpm'de % 0 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri

Şekil 5.13 incelendiğinde 10. örneğe kadar sürecin kaliteli çalışma aralığında yani ÜKL (622), AKL (593) ve MÇ (606) devam ettiği görülmektedir. 10. örnekten sonra ise sürecin ÜKL değerini aşıp 641'ler civarına çıktığını görmekteyiz. Bu durum motorun normal çalışma durumunda olmadığını, bir arıza olduğunu göstermektedir.



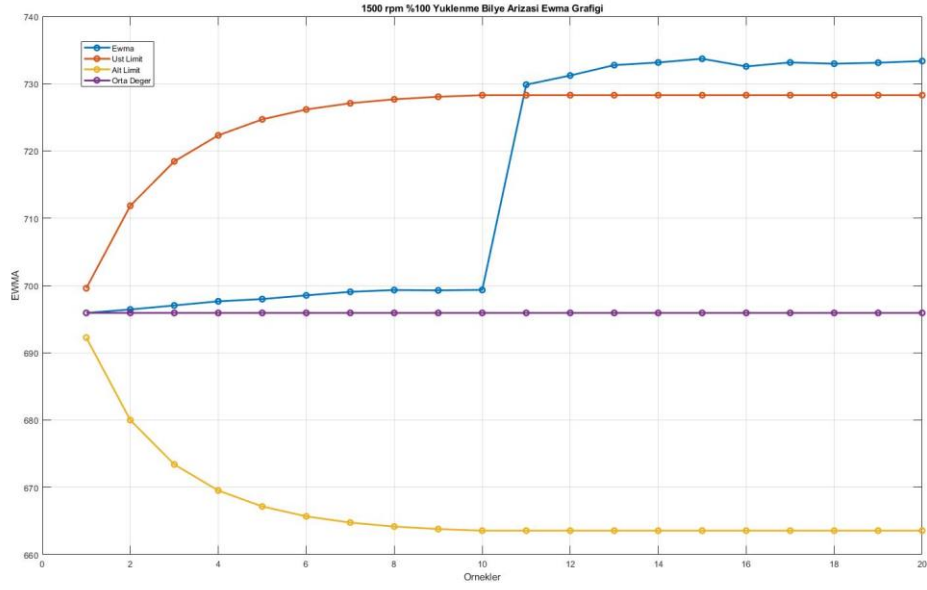
Şekil 5.14. Deney-4'ün 500 rpm'de % 50 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri

Şekil 5.14 incelendiğinde 10. örneğe kadar sürecin kaliteli çalışma aralığında yani ÜKL (705), AKL (530) ve MÇ (620) devam ettiği görülmektedir. 10. örnekten sonra ise sürecin ÜKL değerini aşp 712'ler civarına çıktığını görmekteyiz. Bu durum motorun normal çalışma durumunda olmadığını, bir arıza olduğunu göstermektedir.



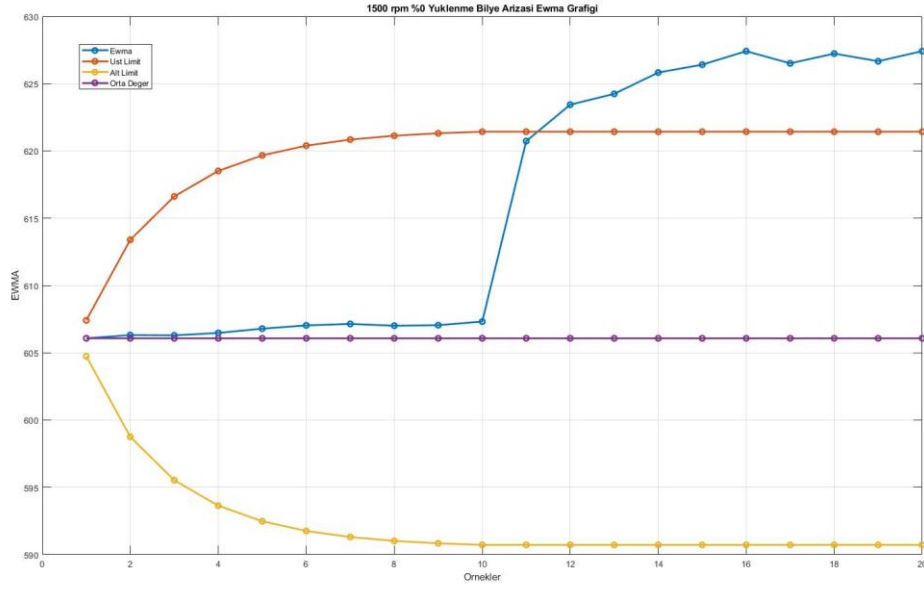
Şekil 5.15. Deney-4'ün 500 rpm'de % 0 yük durumunda EWMA analiz sonuç grafikleri

Şekil 5.15 incelendiğinde 10. örneğe kadar sürecin kaliteli çalışma aralığında yani ÜKL (600), AKL (542) ve MÇ (573) devam ettiği görülmektedir. 10. örnekten sonra ise sürecin ÜKL değerini aşıp 612'ler civarına çıktığını görmekteyiz. Bu durum motorun normal çalışma durumunda olmadığını, bir arıza olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.16. Deney-4'ün 1500 rpm'de % 100 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri

Şekil 5.16 incelendiğinde 10. örneğe kadar sürecin kaliteli çalışma aralığında yani ÜKL (725), AKL (664) ve MÇ (696) devam ettiği görülmektedir. 10. örnekten sonra ise sürecin ÜKL değerini aşmış 735'ler civarına çıktığını görmekteyiz. Bu durum motorun normal çalışma durumunda olmadığını, bir arıza olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.17. Deney-4'ün 1500 rpm'de % 0 yük durumunda EWMA analizi sonuç grafikleri

Şekil 5.17 incelendiğinde 10. örneğe kadar sürecin kaliteli çalışma aralığında yani ÜKL (622), AKL (593) ve MÇ (606) devam ettiği görülmektedir. 10. örnekten sonra ise sürecin ÜKL değerini aşıp 628'ler civarına çıktığını görmekteyiz. Bu durum motorun normal çalışma durumunda olmadığını, bir arıza olduğunu göstermektedir.

6. SONUÇ

Bütün elektrik makinalarındaki gibi ŞKDMSM'lerin de sağlamlık süresi doğru ve güvenilir çalışmalarına bağlıdır. Sanayinin birçok ortamında bulunan sıcaklık, nem, toz vb. etkiler ŞKDMSM'lerde arızaların meydana gelmesine neden olmaktadır. Kusurlu olan motorun sağlıklı çalışma süresi de kısadır. Sorunun daha ilk adımda iken belirlenmesi, bu soruna çözüm bulunması düzenin sürmesi ve motorun sağlıklı çalışma süresi açısından çok mühim yere sahiptir. Günümüzde online durum izleme yoluyla motorların işletme koşullarındaki durumları denetlenmektedir. Online durum izleme sayesinde, motora ait arızalar önceden tespit edilebilmekte, arızanın sebep olacağı motorun tamamen kullanılamaz hale gelmesi durumunun önüne geçilebilmekte ve etkin bir koruma sağlanabilmektedir.

Bu çalışmada ŞKDMSM'nin rulman arızası tespiti için SCADA tabanlı durum izleme otomasyonu gerçekleştirilmiştir. Önerilen arıza tespit yöntemi, ŞKDMSM stator akım sinyalleri üzerinden İSK yoluyla özellik çıkarmaya dayalıdır ve bu alandaki literatürde bu motor için ilk kez kullanılmıştır. Durum izleme amacıyla gerçekleştirilen donanımsal bölüm merkezinde mikro denetleyici olarak Arduino Mega kullanılmıştır. Arduino Mega RTU gibi görev yapmaktadır. RTU; sensör verilerini toplayan, düzenleyen ve SCADA ara yüzüne aktaran yapıdır. Ayrıca SCADA ara yüzünden gelen komutları donanımsal bölümde uygun yere gönderilmesini sağlamaktadır. Donanımsal bölümden alınan akım sinyalleri SCADA ortamında izlenmekte ve EWMA İSK yöntemi kullanılarak arıza tespiti yapılmaktadır. Bu çalışmada kullandığımız mikro denetleyicinin düşük maliyetli olması kolayca yeniden programlamaya müsaade etmesi ve esnek yazılımı, sistemin erişilebilir olmasını sağlamaktadır. Ancak düşük örnekleme frekansına sahip olmasından dolayı frekans boyutundaki analizlerde yetersiz kalabilmektedir. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için İSK yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem sinyaldeki çok küçük değişiklikleri dahi fark edebilmektedir. Böylece çok düşük seviyelerdeki örnekleme frekanslarında motor arızası tespit edilebilmekte ve gerekli önlemler alınabilmektedir.

Motorların sağlam ve arızalı durum verisini toplamak için çalışma şartlarına uygun deney düzeneği oluşturulmuştur. Sağlam verisi 2.2 kW'lık ŞKDMSM için 5 farklı yük durumunda (% 0, % 50, % 75, % 100, % 115) ve 2 farklı hız koşulunda (500 rpm,1500

rpm) 10 farklı şekilde toplanmıştır. Arıza verisi ise, 2.2 kW'lık motorda rulman arızaları (DB arızası, İB arızası, HB arızası) 5 farklı yük durumunda ve 2 farklı hız koşulunda olmak üzere akım sinyal verisi 30 farklı şekilde toplanmıştır. Veri toplama işlemleri NI 6002 DAQ kartı üzerinden LabVIEW programı Signal Express Tools ile 5000 Hz örnekleme frekansında yapılmıştır.

ŞKDMSM arızalarının tespiti yapılan 4 adet deney üzerinden gerçekleştirilmiştir. Deney-1'de farklı yük koşulları altında iki farklı sabit devirde 2.2 kW'lık ŞKDMSM'nin sağlam durumu analiz edilmiştir. ŞKDMSM'nin farklı yük koşullarındaki çalışma süreci izlenmiş ve kaliteli çalışma aralıkları belirlenmiştir. Motor sağlam olarak çalıştırıldığında beş farklı yük durumunda da kontrol altında olduğu ve süreç değişkenlerinin kaliteli çalışma aralığında devam ettiği görülmüştür.

Deney-2'de farklı yük koşulları altında iki farklı sabit devirde 2.2 kW'lık ŞKDMSM'nin DB arıza durumu İSK yöntemine göre analiz edilmiştir. Analizlerden sonra elde edilen sonuçlar sağlam sürecinde hesaplanan kaliteli çalışma aralıklarına göre kıyaslanarak EWMA değerleri oluşturulmuştur. EWMA sonuçları incelendiğinde elde edilen hesaplama sonuçlarına göre EWMA değerleri hesaplanan MÇ civarlarında salınım yapmamaktadır. Hesaplanan EWMA değerlerinin ÜKL veya AKL değerlerini aşması durumunda arıza bulunduğu sonucuna varılır. Grafiklere göre sürecin kaliteli çalışma aralığında devam etmediğini, 10. Örnekten sonra üst limiti aştığı görülmektedir. Yani sürecin kontrol altında olmadığı ve dolayısıyla ŞKDMSM'nin arızalı çalışma durumunda olduğu görülmektedir.

Deney-3 ve Deney-4'te de Deney-2'deki yapılan tüm işlemler benzer şekilde yapılmış ve elde edilen veri sinyalleri İSK yöntemi EWMA tarafından analiz edilerek arızalı EWMA sonuç grafikleri elde edilmiştir. Böylece sistemin İB arıza ve HB arızası durumunda olduğu tespit edilmiştir.

Hazırlanmış olduğumuz bu sistem düşük maliyetli mikro denetleyici ve ekipmanlar kullanarak motor arıza tespitinin yapılabileceğini göstermektedir. Dezavantaj olarak görünen düşük örnekleme frekansı ise uygulanan İSK yöntemiyle ortadan kaldırılmıştır. Kullanılan mikro denetleyicinin açık kaynak olması gelecekte ihtiyaç duyulabilecek yeni

uygulamalar için yeniden düzenleme imkânı tanımaktadır. SCADA ara yüzü ve veri tabanı da taleplere göre yeniden düzenlenebilir şekildedir. Talep edilen her türlü görüntüleme, analiz ve raporlama yazılım ile tekrardan düzenlenip oluşturulabilmektedir.

Çalışmamızda EWMA analizi için 10 grup veri kullanılmış, her bir grupta ise 50 veri yer almıştır. Toplamda beş yüz veri kullanılmıştır. Kullanılan mikro denetleyiciye bağlı olarak örnekleme frekansının düşük olması zaman-frekans boyutlu analizlerde arıza teşhisinin yetersiz olmasına neden olmuştur. Kullanılan İSK yöntemi çok küçük değişiklikleri tespit edebildiğinden dolayı rulman arızası başarılı bir şekilde tespit edilmiştir. Motorun normal çalışma durumunda elde edilen EWMA grafik sonuçları en büyük limit ve en küçük limit değerleri arasında salınım yaparken rulman arızası durumunda aşırı sapma yaparak arızayı net bir şekilde tespit edebilmiştir. Eğer talep edilirse donanım bölümünde yer alan röle modülü sayesinde motor kontaktör enerjisi kesilerek motor durdurulup daha fazla hasar görmesi engellenebilmektedir. Tüm bu işlemler gerçekleşirken SCADA ekranında online durum izleme yapılabilmektedir. Ayrıca tüm verilerin kaydedilmesine bağlı olarak geçmişe yönelik her türlü analiz ve raporlama yapılabilmektedir.

Hazırlanmış olan bu çalışmada mikro denetleyici olarak kullanılan Arduino Mega yeterli bir şekilde görevini yerine getirmiştir. Ancak daha kapsamlı analiz ve senaryolar için düşük maliyetli yüksek örnekleme frekansına sahip mikro denetleyiciler kullanılabilir. Bu durum sistemin daha karmaşık analizler yapabilmesini sağlarken düşük maliyetli özelliğini devam ettirebilmektedir.

Sonuç olarak elde edilen sonuçlar; tasarlanan SCADA tabanlı online durum izleme donanımlarıyla izlenen ŞKDMSM akım sinyallerinin, önerilen İSK tabanlı sinyal analizi yoluyla, rulman arızalarının başarılı bir şekilde tespit edilebileceğini göstermiştir. Gelecekte EWMA yöntemi bu motorun diğer arızalarının tespiti için kullanılabilir. Yine burada yapıldığı gibi diğer elektrik makinelerinde online durum izleme yapılarak İSK temelli arıza teşhisleri gerçekleştirilebilir.

7. KAYNAKLAR

- Akar, M., Fenercioğlu, A. ve Soyaslan, M., 2011. Asenkron Motorlarda Rotor Çubuğu Kırık Arızasının Elektromanyetik Tork ile Tespiti. İATS, 11, 142-146.
- Akın, B., 1996. ISO 9000 uygulamasında işletmelerde istatistik proses kontrol-İPK-teknikleri. Bilim teknik yayınevi, İstanbul.
- Alağaç, H. M. ve Pınarbaşı, M., 2012. Ewma Kontrol Grafikleri İle Düz Dişli Çarklarında İstatiksel Süreç Kontrolü. 13th International Conference on Econometrics, Operations Research, and Statics, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- Anonymous, 2012. Overview. A short introduction to the Processing software and projects from the community. Retrieved from <https://processing.org/overview/> - (16.12.2019).
- Anonymous, 2019. Arduino Mega 2560 R3 Documentation. Arduino Mega. Retrieved from <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3> - (05.01.2020).
- Ayaz, E., 2002. Elektrik motorlarında dalgacık analizi yaklaşımı ile rulman arıza tanısı ve yapay zeka tabanlı bir durum izleme sistemi. (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aydogmus, Z., 2009. Implementation of a fuzzy-based level control using SCADA. Expert Systems with Applications, 36:3, 6593-6597.
- 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, 2322, 5114.
- Bektaş, A., Bayındır, R. ve Çolak, İ., 2007. Asenkron motorların korunmasına yönelik plc tabanlı bir uygulama. Politeknik Dergisi, 10:2, 117-121.
- Bellini, A., Filippetti, F., Tassoni, C. ve Capolino, G.-A., 2008. Advances in diagnostic techniques for induction machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55:12, 4109-4126.
- Benbouzid, M. E. H., 2000. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 47:5, 984-993.
- Birgören, B., 2015. Nobel Akademik Yayıncılık, 95-111, Ankara.
- Blödt, M., Granjon, P., Raison, B. ve Regnier, J., 2010. Mechanical fault detection in induction motor drives through stator current monitoring-theory and application examples. Fault Detection, 451-488.
- Boashash, B., 1990. Time-Frequency Signal Analysis. Advances in Spectrum Estimation and Array Processing. Prentice- Hall, 418-517, New Jersey, USA.
- Bonnet, A. ve Soukup, G., 1992. Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in 3 Phase Squirrel Cage Induction Motors 921-937. IEEE Trans. Ind. Appl., 28:4, 197-204.
- Bostan, H., 2010. İstatistiksel proses kontrol tekniklerinin motor yenileştirme sürecinde kullanımı. (Yüksek Lisans Tezi), Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Buzcu, İ. E., 2005. Daimi mıknatıslı senkron motorun rotor alan yönlendirmeli kontrolü ve pasif filtre ile harmoniklerin azaltılması.
- Colak, I., Celik, H., Sefa, I. ve Demirbaş, Ş., 2005. On line protection systems for induction motors. Energy Conversion and Management, 46:17, 2773-2786.

- Cruz, S. M. ve Cardoso, A. M., 2001. Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37:5, 1227-1233.
- Çavuş, V., Tuna, R. ve Duran, İ. U., 2017. Arduino Devreleri için Kod Üretme ve Veri İşleme Uygulaması Tasarımı. *Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Mus Alparslan University Journal of Science*, 387.
- Çıkan, M., 2015. Arduino ile park sensörü uygulaması. *Fen ve Teknoloji Bilgi Paylaşım*.
- Çıra, F., 2017. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Stator Kısa Devre Arızasının Tespiti ve Arıza Şiddetinin Otomatik Olarak Belirlenmesi. *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*.
- Djmal, I. B., Mansouri, M., Nounou, M., Nounou, H. ve Hamida, A. B., 2018. Fault detection using UKF-based optimized EWMA method in wastewater treatment plant. 2018 4th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), 21-24 March 2018, 1-6.
- Doğan, Z., 2012. Ayrıklaştırma Yöntemleri ve Yapay Sinir Ağı Kullanarak Asenkron Motorlarda Arıza Teşhisi. (Doktora Tezi), Marmara Üniversitesi Elektrik Eğitimi ABD, İstanbul, Türkiye.
- Ebrahimi, B. ve Faiz, J., 2010. Diagnosis and performance analysis of three-phase permanent magnet synchronous motors with static, dynamic and mixed eccentricity. *IET electric power applications*, 4:1, 53-66.
- Ebrahimi, B. M., Faiz, J. ve Roshtkhari, M. J., 2009. Static-, dynamic-, and mixed-eccentricity fault diagnoses in permanent-magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56:11, 4727-4739.
- Eker, M., 2013. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Demagnetizasyon Arızasının Tespiti. (Yüksek Lisans Tezi), Gaziosmanpaşa Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği, Tokat, Türkiye.
- Eker, M. ve Akar, M., 2016. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Eksenden Kaçıklık Arızasının Titreşim Sinyali ile Tespiti. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*:13, 87-102.
- Errouissi, R., Ouhrouche, M., Chen, W.-H. ve Trzynadlowski, A. M., 2011. Robust cascaded nonlinear predictive control of a permanent magnet synchronous motor with antiwindup compensator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59:8, 3078-3088.
- Eser, E., 2018. Asenkron Motorlarda İstatistiksel Proses Kontrol Yöntemi İle Arıza Tespiti. (Yüksek Lisans Tezi), Gaziosmanpaşa Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Tokat, Türkiye.
- Ferhat, Ç., 2018. Asenkron Motorlarda Gerçek Zamanlı Durum İzleme ve Arıza Tespiti. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 7:1, 12-24.
- Fırat, A., 2006. Tek Fazlı Şebeke Kalkışlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Fonseca, D., Santos, C. M. ve Cardoso, A. J. M., 2018. On-Line Stator Fault Diagnosis in Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), IEEE, 1925-1931.
- Frosini, L. ve Bassi, E., 2009. Stator current and motor efficiency as indicators for different types of bearing faults in induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57:1, 244-251.

- Gaeid, K. S. ve Mohamed, H. A., 2010. Diagnosis and fault tolerant control of the induction motors techniques a review. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4:2, 227-246.
- Gozuoglu, A. ve Ozgonenel, O., 2019. Training Set Design for Smart Grids and Scada Co-Simulations. 2019 7th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG), 25-26 April 2019, 124-128.
- Gözüoğlu, A., 2018. Akıllı Şebekelerde Kullanılan Scada Sistemlerinin Yazılım ve Donanımsal Olarak Kullanılması. (Yüksek Lisans Tezi), Ondokuz Mayıs Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Samsun, Türkiye.
- Gözüoğlu, S. G. ve Doğan, Z., 2019. Şebeke Kalkışlı Daimi Mıknatıslı Senkron Motorun Scada Tabanlı Online Durum İzlemesi ve Rulman Arızası Tespiti. *TICMET 19*, 10-12 Ekim, 356-371, Gaziantep.
- Hsu, H., 2015. Sinyaller ve Sistemler. Nobel Yayıncılık, Ankara.
- Isfahani, A. H. ve Vaez-Zadeh, S., 2009. Line start permanent magnet synchronous motors: Challenges and opportunities. *Energy*, 34:11, 1755-1763.
- Kara, B., 2017. Şebeke kalkışlı daimi mıknatıslı senkron motorda eksenden kaçıklık arızası teşhisi. (Yüksek Lisans Tezi), Gaziosmanpaşa Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Tokat, Türkiye.
- Karami, M., Mariun, N., Mehrjou, M. R., Ab Kadir, M. Z. A., Misron, N. ve Radzi, M. A. M., 2014. Diagnosis of static eccentricity fault in line start permanent magnet synchronous motor. 2014 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), IEEE, 83-86.
- Karapınar, K. ve Kaya, E. F., 2016. Gömülü Sistemlerin Seri Haberleşmesi. (Lisans Tezi), Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Karabük.
- Kim, K.-C., Lim, S.-B., Koo, D.-H. ve Lee, J., 2006. The shape design of permanent magnet for permanent magnet synchronous motor considering partial demagnetization. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42:10, 3485-3487.
- Kim, K., Kim, K., Kim, H. J. ve Lee, J., 2009. Demagnetization Analysis of Permanent Magnets According to Rotor Types of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45:6, 2799-2802.
- Köklükaya, E. ve Bayrak, M., 1998. Scada Sistemi Yardımıyla Enerji Dağıtım Sistemlerinde Harmoniklerin Ölçülmesi. *Sakarya University Journal of Science*, 2:1, 15-20.
- Maraş, S. ve Arslan, H., 2014. Düz Dişli Çark Sistemindeki Aşınma Hatasının İstatistiksel Proses Kontrol Metodu İle Belirlenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20:1, 9-14.
- Megep, 2006. Megep (Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi). Halkla İlişkiler ve Organizasyon Hizmetleri, Reklam Ortamları, (Ankara: 2007).
- Mehrjou, M. R., Mariun, N., Marhaban, M. H. ve Misron, N., 2011. Rotor fault condition monitoring techniques for squirrel-cage induction machine-A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25:8, 2827-2848.
- Nandi, S., Toliyat, H. A. ve Li, X., 2005. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors-A Review. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20:4, 719-729.
- Niezgoda, J., 2017. The use of statistical process control tools for analysing financial statements. *Folia Oeconomica Stetinensia*, 17:1, 129-137.

- Orhan, S., 2011. Balansızlık ve Rulman Arızası Saha Örnekleri. V. Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi, 14-16 Ekim, Sakarya.
- Ortega, C., Arias, A., Caruana, C., Balcells, J. ve Asher, G. M., 2009. Improved waveform quality in the direct torque control of matrix-converter-fed PMSM drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57:6, 2101-2110.
- Özçıra, S., 2007. Sabit mıknatıslı senkron motorun kontrol yöntemleri ve endüstriyel uygulamaları. (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Poure, P., Weber, P., Theilliol, D. ve Saadate, S., 2009. Fault tolerant control of a three-phase three-wire shunt active filter system based on reliability analysis. *Electric Power Systems Research*, 79:2, 325-334.
- Proakis, J. G. ve Manolakis, D. G., 2007. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications*. Pentice Hall.
- Rahman, M. ve Osheiba, A., 1990. Performance of large line-start permanent magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 5:1, 211-217.
- Rodríguez, P. V. J. ve Arkkio, A., 2008. Detection of stator winding fault in induction motor using fuzzy logic. *Applied Soft Computing*, 8:2, 1112-1120.
- Rosero, J., Romeral, L., Rosero, E. ve Urresty, J., 2009. Fault Detection in dynamic conditions by means of Discrete Wavelet Decomposition for PMSM running under Bearing Damage. 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, IEEE, 951-956.
- Ruoho, S., Kolehmainen, J., Ikaheimo, J. ve Arkkio, A., 2009. Interdependence of demagnetization, loading, and temperature rise in a permanent-magnet synchronous motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46:3, 949-953.
- Siddique, A., Yadava, G. ve Singh, B., 2005. A review of stator fault monitoring techniques of induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20:1, 106-114.
- Soreshjani, M. H. 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.
- Stapenhurst, T., 2013. *Mastering statistical process control*. CRC Press Book, 456 pages, Routledge.
- Stephens, C. M., Kliman, G. B. ve Boyd, J., 1998. A line-start permanent magnet motor with gentle starting behavior. *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No. 98CH36242)*, IEEE, 371-379.
- Şenol, Ş., 2012. Nobel Akademik Yayıncılık, 69-176, Ankara.
- Tavner, P. J. ve Penman, J., 1987. *Condition monitoring of electrical machines*. Research Studies Press Letchworth.
- Tetik, K., 2019. Şebeke Kalkışlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorda Stator Sargı Arızası Teşhisi. Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
- Thomson, W. T. ve Fenger, M., 2001. Current signature analysis to detect induction motor faults. *IEEE Industry Applications Magazine*, 7:4, 26-34.
- Üstünsoy, F. ve Sayan, H. H., 2018. PLC Destekli SCADA ile Enerji Yönetimi İçin Örnek Laboratuvar Çalışması. *Politeknik Dergisi*, 21:4, 1007-1014.
- Vas, P., 1993. *Parameter estimation, condition monitoring, and diagnosis of electrical machines*. Oxford University Press, Oxford, UK.

- Verucchi, C., Acosta, G. ve Benger, F., 2008. A review on fault diagnosis of induction machines. *Latin American applied research*, 38:2, 113-121.
- Yang, H.-H., Huang, M.-L., Lai, C.-M. ve Jin, J.-R., 2018. An approach combining data mining and control charts-based model for fault detection in wind turbines. *Renewable energy*, 115, 808-816.
- Yiakopoulos, C. ve Antoniadis, I., 2002. Wavelet based demodulation of vibration signals generated by defects in rolling element bearings. *Shock and Vibration*, 9:6, 293-306.
- Yu, M., Tao, X., Xin, D. ve Xin, Z., 2017. Fault diagnosis and numerical simulation of broken rotor bars for small cage induction motors. 2017 Chinese Automation Congress (CAC), 20-22 Oct. 2017, 5355-5359.
- Yu, S. ve Tang, R., 2006. Electromagnetic and mechanical characterizations of noise and vibration in permanent magnet synchronous machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42:4, 1335-1338.
- Zerbato, C., Furlani, C. E., Silva, R. P. d., Voltarelli, M. A. ve Santos, A. F. D., 2017. Statistical control of processes applied for peanut mechanical digging in soil textural classes. *Engenharia Agrícola*, 37:2, 315-322.
- Zheng, P., Zhao, J., Liu, R., Tong, C. ve Wu, Q., 2010. Magnetic characteristics investigation of an axial-axial flux compound-structure PMSM used for HEVs. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46:6, 2191-2194.

8. ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Artvin’de doğdu. İlköğretim ve lise eğitimlerini Samsun’ da tamamladıktan sonra 2007 yılında Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünü kazandı. 2012 yılında üniversite eğitimini tamamladı. 2014’ te elektrik mühendisi olarak çalışmaya başladığı Samsun Altay Asansör firmasında halen çalışmaya devam etmektedir. 2015 yılında GOP Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı’nda başladığı Yüksek Lisans eğitimine devam ediyor. Evli ve bir çocuk annesidir.

