



T.C

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORDA
DEMAGNETİZASYON ARIZASININ EVRİŞİMSEL SİNİR AĞI
İLE TESPİTİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Binnaz GÜNDOĞAN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa EKER

TOKAT - 2022

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Mustafa EKER danışmanlığında hazırlamış olduğum “Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorda Demagnetizasyon Arızasının Evrimsel Sinir Ağı İle Tespiti” adlı Yüksek Lisans tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

04/03/2022

Binnaz GÜNDOĞAN



ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında ilk olarak lisansüstü eğitim hayatım boyunca her türlü konuda benden yardımlarını esirgemeyen kıymetli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mustafa EKER'e tez çalışmama sağladığı katkılar için teşekkür ederim. Bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Özkan İnık'e ve çalışmamı destekleyen Mekatronik Mühendisliği Bölümü Hocalarıma teşekkür ederim. Her koşulda daima yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen sevgili annem Nihal GÜNDOĞAN'a ve sevgili babam Nevzat GÜNDOĞAN'a, bu süreç boyunca yanımda olan arkadaşlarım Merve GÜNDÜZ'e, Merve ŞEN'e ve Mustafa Rıdvan ÜNALAN'a teşekkür ederim.

Binnaz GÜNDOĞAN

Şubat, 2022

ÖZET

SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORDA DEMAGNETİZASYON ARIZASININ EVRİŞİMSEL SİNİR AĞI İLE TESPİTİ

Gündoğan, Binnaz

Yüksek Lisans Tezi Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa EKER

Mart 2022, x+ 52 Sayfa

Gelişen teknoloji ile birlikte elektrik motorları endüstride en yaygın kullanılan tahrik elemanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Motorların yaygın kullanılması bu elemanlarda meydana gelen arıza sayısında/çeşitlerinde artışa neden olmaktadır. Motorda meydana gelen bu arızalar bakım maliyetlerini yükseltmekte ve üretim kapasitesini düşürmektedir. İlk başlarda arızalar periyodik bakımlarla en aza indirgenmeye çalışılmış fakat meydana gelen arızalar sonucunda üretimde meydana gelen aksamaların engellenmesinde yeterli olamamıştır. Son zamanlarda elektrik motorlarında durum izleme yöntemleri periyodik bakımların yerini almıştır. Motor arıza tespitinde, durum izleme yöntemlerinde; makine öğrenmesinin bir alt dalı olan derin öğrenme yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Derin öğrenmenin en yaygın kullanılan mimarisi Evrişimsel Sinir Ağı (ESA) motor arıza tespitinde ön plana çıkan bir konu haline gelmiştir. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM); yüksek verim, yüksek güç-ağırlık oranı, gibi avantajlarından dolayı endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılan tez çalışmasında SMSM’de meydana gelen manyetiksel arıza türü olan demagnetizasyon arızasının tespiti için yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Arıza tespiti için sunulan yaklaşım özgün tasarlanmış ESA mimarisidir. Bu yaklaşım ile motor arıza tespitinde oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada durağan koşullarda çalıştırılan sağlam ve arızalı motorlardan alınan akım verileri kullanılarak demagnetizasyon arızası tespit edilmiştir. Yapılan bu tez çalışması sonucunda önerilen yaklaşımın SMSM’de meydana gelen demagnetizasyon arızasını tespit etmede % 99.92 oranında bir başarı sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: SMSM, Demagnetizasyon Arızası, Derin Öğrenme, ESA

ABSTRACT

DETECTION OF DEMAGNETIZATION FAULT IN PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR WITH CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

Gündoğan, Binnaz

Master's Thesis,

Department of Mechatronic Engineering

Advisor: Assit.Prof.Dr. Mustafa Eker

March 2022, x + 52 pages

With the developing technology, electric motors are the most used drive element in the industry. The widespread use of motors causes an increase in the number/types of malfunctions occurring in these elements. These malfunctions in the motor increase the maintenance costs and decrease the production capacity. At first, the malfunctions were tried to be minimized with periodic maintenance, but it was not enough to prevent the disruptions in production as a result of the malfunctions that occurred. Recently, condition monitoring methods in electric motors have replaced periodic maintenance. In condition monitoring methods in motor fault diagnosis; Deep learning method, which is a sub-branch of machine learning, is frequently used. The most widely used architecture of deep learning, Convolutional Neural Network (ESA), has become a prominent topic in motor fault diagnosis. Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM); It is widely used in industry due to its advantages such as high efficiency, high power-to-weight ratio. In the thesis study, a new approach is presented for the detection of demagnetization failure, which is the type of magnetic failure that occurs in PMSM. The approach presented for fault detection is the ESA architecture of deep learning. With this approach, very successful results have been obtained in motor fault detection. In this study, demagnetization failure was determined by using current data obtained from strong and faulty motors operated in stationary conditions. As a result of this thesis study, the proposed approach has achieved a success rate of 99.92 % in detecting the demagnetization failure in the PMSM.

Keywords: PMSM, Demagnetization Failure, Deep Learning, ESA

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK SÖZLEŞME.....	i
ÖNSÖZ	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	ix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÖZETİ.....	5
2.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Arızaları	5
2.1.1. Elektriksel arızalar.....	6
2.1.2. Manyetiksel arızalar	7
2.1.3. Mekaniksel arızalar	12
3. MATERYAL ve YÖNTEM	15
3.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor	15
3.1.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun yapısı	16
3.1.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun matematiksel modeli	19
3.2. Derin Öğrenme.....	26
3.2.1. Evrişimsel Sinir Ağı Mimarisi	27
3.2.2. Evrişimsel Sinir Ağı Mimarisini oluşturan katmanlar	28
3.3. Önerilen Yöntem.....	30
4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	32
4.1. Deney Düzenneği ve Veri Toplama	32

4.2. Demagnetizasyon Arızasının Oluşturulması.....	35
4.3. Verilerin Oluşturulması.....	35
4.4. Veri Temsilinin Oluşturulması.....	36
4.5. Önerilen Evrişimsel Sinir Ağı Modeli	39
4.5.1. Evrişimsel Sinir Ağı modelinin başarısı için performans kriterleri	41
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	43
6. KAYNAKLAR	47



TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1. Modüllerin teknik özellikleri	34
Tablo 4. 2. Tez kapsamında oluşturulan veri setine ait sınıflar ve her bir veri setindeki görüntü sayısı.....	38
Tablo 4. 3. Önerilen ESA modelinin parametre özellikleri	40



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1. SMSM arızaları.....	5
Şekil 2. 2. SMSM’de meydana gelen stator sarımlar arası kısa devre arızası (1-arıza bölgesi)	7
Şekil 2. 3. SMSM’lerde sürekli mıknatısların çalışma noktaları	9
Şekil 3. 1. SMSM’nin rotor ve stator modeli	15
Şekil 3. 2. SMSM kesiti	16
Şekil 3. 3. Yüzey yerleştirmeli SMSM	18
Şekil 3. 4. Gömülü mıknatıslı senkron motor	18
Şekil 3. 5. 2-Faz eksenleri.....	21
Şekil 3. 6. SMSM’nin d-q eşdeğer devresi	21
Şekil 3. 7. Klasik bir ESA mimarisi.....	28
Şekil 3. 8. Standart bir ESA’ya düğüm seyreltme (dropout) katmanının uygulanması.....	30
Şekil 3. 9. Önerilen yöntemin mimarisi	31
Şekil 4. 1. Deney düzeneği (1-motor, 2-yük, 3-yük sürücüsü, 4-güç kaynağı, 5-motor sürücüsü, 6-veri toplayıcı)	33
Şekil 4.2. cDAQ-9174 kabini ve örnek modül (NI9227)	34
Şekil 4. 3. ELde edilen akım verisinin 0-500 ms sinyal formundaki örnek gösterimi ...	36
Şekil 4. 4. 0-500 ms’deki verinin sinyal formundan görüntü formuna dönüştürülmesi ile elde edilen görüntü	37
Şekil 4. 5. Oluşturulan veri setinde seçilen bazı sınıflara ait örnek görüntüler	39
Şekil 4. 6. Yapılan tez çalışmasında önerilen ESA modelinin mimarisi	39
Şekil 4. 7. Karışıklık matrisi	41
Şekil 5. 1. ESA modelinin hazırlanan veri seti üzerinde elde ettiği yakınsama grafiği..	43
Şekil 5. 2. ESA modelinin test verisi üzerinde elde ettiği karışıklık matrisi	45

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler	Açıklamalar
B_m	: Makine Ve Döner Sistemin Sürtünme Katsayısı
L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}	: a, b, c Fazlarının Öz Endüktansı
$M_{ab}, M_{ba}, M_{ac}, M_{ca}, M_{bc}, M_{cb}$	: a,b,c Fazları Arasındaki Karşılıklı Endüktans
θ_e	: Rotorun Elektriksel Konumu
θ_r	: Rotorun Açısal Konumu
$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$	: Faz Sargılarının Toplam Akıları
φ_d, φ_q	: d-q Eksenli Stator Akıları
φ_m	: Sabit Mıknatısların Oluşturduğu Kalıcı Mıknatıs Sabiti
φ_s	: Stator Akısı
ω_e	: Elektriksel Açısal Hız
ω_r	: Mekaniksel Açısal Hız
L_d, L_q	: d-q Eksenli İndüktansları
L_s	: Stator İndüktansı
T_L	: Yük Momenti
T_e	: Elektriksel Moment
U_a, U_b, U_c	: 3 Faz Gerilimler
i_α, i_β	: α - β Eksenli Stator Akımları
i_d, i_q	: d-q Eksenli Stator Akımları
I_f	: Uyarım Akım
J	: Yüke Bağlı Atalet Momenti
p	: Motorun Çift Kutup Sayısı
R_a, R_b, R_c	: Stator Faz Sargıları Omik Direnç
R_s	: Stator Direnci
Ψ	: Akı Histerisiz Karşılaştırıcı
U_α, U_β	: α - β Eksenli Gerilimleri
U_d, U_q	: d-q Eksenli Gerilimleri

i_a, i_b, i_c : Stator Akımları

Kısaltmalar

Açıklamalar

°C	:	Derece, Sıcaklık
CPU	:	Merkezi İşlem Birimi
d/d	:	Dakikadaki Devir Sayısı
DA	:	Doğru Akım
DPD	:	Dalgacık Paket Dönüşümünü
ESA	:	Evrişimsel Sinir Ağı
FN	:	Yanlış Negatifler
FP	:	Yanlış Pozitifler
HFD	:	Hızlı Fourier Dönüşümü
HHD	:	Hilbert Huang Dönüşümü
Hz	:	Hertz
kW	:	Kilowatt
MA	:	Motor Aktif
MP	:	Motor Pasif
ms	:	Milisaniye
MTA	:	Mertebe Takip Analiz Yöntemi
MW	:	MegaWatt
Nd-Fe-B	:	Neodyum Demir Boron
Nm	:	Newton Metre
SEY	:	Sonlu Elemanlar Yöntemi
Sm ₂ Co ₁₇	:	Samaryum Kobalt
SMSM	:	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
TN	:	Gerçek Negatifler
TP	:	Gerçek Pozitifler
V	:	Volt
YSA	:	Yapay Sinir Ağı

1. GİRİŞ

Elektrik motoru elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren tahrik elamanı olarak tanımlanmaktadır. Elektrik motorları endüstride farklı alanlarda kullanılmaktadır. Teknolojinin gelişmesi ile son zamanlarda elektrik motorlarının kullanım alanları artmıştır (Açıkgöz, 2010). Endüstride, enerjinin büyük oranını elektrik motorları tüketmektedir (Bazurto ve ark., 2016). Bu sebepten enerji tasarrufu için endüstride farklı alanlarda kullanılan elektrik motorlarının sınıflandırılması, elektrik motorlarının verimlerinin belli periyotlar ile takip edilmesi, enerji tüketimi fazla olan motorların yerine daha az enerji tüketen motorların tercih edilmesi, motorun verimli çalışabilmesi için gerekli koşulların sağlanması gibi yöntemler uygulanmaktadır (Ruşen, 2019). SMSM yüksek verim, yüksek moment ve az bakıma ihtiyaç duymaları gibi avantajlarından dolayı endüstride büyük ölçüde gelişim göstermişlerdir (Öksüztepe, 2008).

Motorların endüstride kullanım alanlarının artmasıyla birlikte motorlarda meydana gelen arızalarda çeşitlilik göstermiştir. Bu arızalar temel olarak; elektriksel, manyetiksel ve mekaniksel arızalar olarak sınıflandırılmaktadır (Kumar ve ark., 2010). SMSM’de görülen bir manyetik arıza türü olan demagnetizasyon arızası; gürültü, titreşim, manyetik harmonikler gibi birden fazla istenmeyen durumlara neden olmaktadır. Demagnetizasyon arızası aynı zamanda SMSM’de mil torkunun azalmasının yanı sıra motorun performansını da olumsuz yönde etkilemektedir (Çıra, 2017a).

Elektrik motorlarındaki arızalardan kaynaklı olarak zaman kayıpları, üretim aksamaları, enerji kayıpları meydana gelmektedir. Meydana gelen bu olumsuzluklar arıza tespitinin önemini giderek artırmıştır (Akar ve Doğan, 2012). Motorlarda meydana gelen arızalar anlık müdahaleler ve periyodik bakımlarla engellenmeye çalışılmıştır. Yapılan bu periyodik bakımlar motorda meydana gelen arızaları engellemede yetersiz kalmıştır. Periyodik bakım ile arızaların meydana gelme süreleri artırılmıştır. Bu sebepten dolayı arıza tespitlerinde periyodik bakımın yerine kestirimci bakım tercih edilmektedir. Kestirimci bakım ile birlikte motorlarda durum izleme yöntemleri ön plana çıkmıştır (Nandi ve ark., 2005). Bu durum izleme yöntemleri; sıcaklık analizi, titreşim takibi, ses izleme, motor momenti, akustik ses inceleme, rotor hızını takip etme, stator akımının yapmış olduğu harmoniklerin izlenmesi vb. şeklindedir (Thomson ve Fenger, 2001).

Kestirimci bakımın iki farklı amacı vardır. Bunlardan birincisi; kullanılan ekipmanda çıkması öngörülen arızayı tespit etmek, ikincisi ise bu arızadan kaynaklı çıkabilecek problemlere kısa sürede müdahale etmektir (Gürsoy ve ark., 2019). Kestirimci bakımın bazı avantajları;

- Kullanılan ekipmanın uzun yıllar kullanılmasını sağlamaktadır.
- Ekipmanların güvenilirliğini artırmaktadır.
- Ekipmanın arızasını öngördüğü için kısa sürede ekipmana müdahale edilmesini sağlamaktadır. Böylelikle işletmedeki uzun süreli duruşların önüne geçmektedir.

Bu avantajların yanı sıra kestirimci bakımın birçok dezavantajı da vardır. Bunlardan bazıları (Wang ve ark., 2016).

- Aynı anda birçok kaynaktan veri erişimi gibi taleplerden dolayı sistemler arası veri aktarımı problemleri yaşanmaktadır.
- Verilerin endüstri alt yapısında depolanması ve saklanması sorunu ortaya çıkmaktadır.

Arıza tespitinin faydaları ise zaman kaybı olmadan ekipmanda meydana gelen arızaların nerede ve hangi sebeplerle ortaya çıktığını belirlemektedir ve belirli aralıklarla yapılan periyodik bakımları ortadan kaldırmaktadır.

Son zamanlarda elektrik motorlarında arıza tespitinde motordan gelen sinyallerin temelinde bir arızanın olup olmadığını otomatik olarak ayırt edebilen yöntemler esas alınmaktadır. Bu yöntemlerden birisi derin öğrenmedir (Minervini ve ark., 2021).

Derin öğrenme makine öğrenmesinin alt dalı olarak karşımıza çıkmaktadır. Görüntü işleme ve doğal dil işleme uygulamalarında kullanılan en yaygın yöntemdir (Sakhavi ve ark., 2018). Özellikleri çıkarmak ve dönüştürmek için birden fazla doğrusal olmayan işlem birimi katmanını kullanmaktadır. Ardışık olarak gelen her katman kendinden önceki katmanda bulunan çıktıyı girdi olarak kabul etmektedir (Şeker ve ark., 2017). Son zamanlar da derin öğrenmenin gelişmesi ile makine öğrenmesi ve yapay zekanın gelişimi de artmıştır. Genel olarak derin öğrenme karmaşık sorunları çözmek ve verilerin özelliklerini bulmak için çok katmanlı bir sinir ağı modeli kullanmaktadır (Wang ve ark., 2021).

Derin öğrenmenin birçok mimarisi bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın kullanılanı ise ESA'dır (Wang ve ark., 2021). ESA insan beyninden ilham alarak çok katmanlı bir yapı ortaya koymaktadır. ESA farklı özellikler hakkında bilgi edinilmesini ve edinilen bilgilere göre özelliklerin sınıflandırılmasını sağlayan, giriş verilerinden özelliklerin çıkarılması için iyi bir şekilde eğitilen derin öğrenme mimarisidir. ESA'nın yapısını oluşturan katmanlar; giriş katmanı, çıkış katmanı, evrişim katmanı, havuzlama katmanı, tam bağlantı katmanı, softmax katmanı ve sınıflandırma katmanıdır (Nandi ve ark., 2019). ESA görüntü tanıma, ses tanıma ve diğer karmaşık yapıları çözmede üst düzey başarı sağlamaktadır (Wang ve ark., 2021).

Yapılan bu çalışma ile durağan hız koşullarında SMSM'lerde meydana gelen demagnetizasyon arızasının tespiti derin öğrenmenin mimarisi olan ESA ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada, 3 adet özdeş motor kullanılmıştır. Bunların iki tanesi sağlam motor iken bir tanesi ise rotorunda bulunan mıknatısların belirli oranda demagnetize edilmesi ile arızalı hale getirilmiş motordur. Sağlam motorlardan bir tanesi motorların yüklenmesinde kullanılmıştır. Oluşturulan deney düzeneğinde sağlam motor ile rotordaki mıknatısların %12.5 ve %18.75 oranlarında mıknatisyet özelliğini kaybettirilmiş motorlar kullanılmıştır. Motorlar %0, %25, %50, %75, %100 ve %125 yük altında, 750, 1500, 3000 d/d durağan hız koşulları altında çalıştırılmıştır. Farklı hız ve yüklerde elde edilen sinyaller Matlab programında oluşturulan derin öğrenme yöntemi ile incelenerek sağlam ve demagnetizasyon arızalı durumdan elde edilen verilerle kıyaslanarak SMSM de arıza tespiti gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. 1.Bölüm "GİRİŞ" bölümüdür. Bu bölümde SMSM'lerden, meydana gelen motor arızalarından, motor arıza tespit yöntemlerinden, derin öğrenmeden ve ESA'dan bahsedilmiştir. 2. Bölüm "GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR" bölümüdür. Bu bölümde SMSM arızalarından ve derin öğrenmeden detaylı olarak bahsedilmiştir. Aynı zamanda bu bölümde konu ile ilgili benzer literatür çalışmalarına yer verilmiştir. 3. Bölüm "MATERYAL VE YÖNTEM" bölümüdür. Bu bölümde SMSM'ler anlatılarak bu motorların eşdeğer devreleri ve matematiksel modeli verilmiştir. Ayrıca 3. Bölümde arıza tespitinde kullanılan yöntem olan derin öğrenme ve ESA mimarisinden ayrıntılı bir şekilde bahsedilmiştir ve yapılan çalışmanın mantıksal şeması verilmiştir. 4. Bölüm "DENEYSEL ÇALIŞMA"

bölümüdür. Bu bölümde, çalışma da kullanılan test düzeneği ve ekipmanları, arızaların oluşturulma şekli ve veri alma işlemi anlatılmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen veriler ESA yöntemi ile karşılaştırılarak verilmiştir. 5. Bölüm ‘‘SONUÇ VE ÖNERİLER’’ bölümüdür. Bu bölümde ise SMSM’de meydana gelen demagnetizasyon arızasının tespitinde motor akım verileri kullanılarak ESA mimarisinin başarılı bir sonuç ortaya koyduğu ifade edilmiştir ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar önerilmiştir. 6. Bölüm ise KAYNAKÇA bölümüdür. Bu bölümde, yapılan çalışmada kullanılan kaynaklara yer verilmiştir.

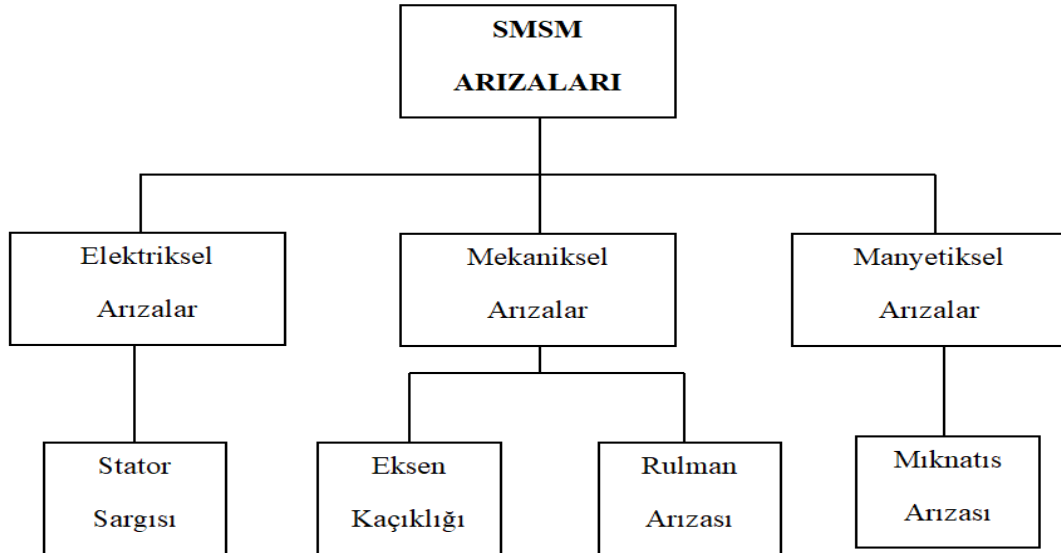


2. GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÖZETİ

Günümüzde endüstriyel alanlarda yüksek verimli motorlar tercih edilmektedir. Elektrik motorunun bir türü olan SMSM; yüksek verim, yüksek moment, yüksek güç yoğunluğu gibi avantajlardan dolayı son zamanlarda endüstride sıkça tercih edilmektedir (Akyazı ve ark., 2011). Endüstride yaygın bir şekilde kullanıldıkları için bu motorlarda arıza tespiti oldukça önemlidir. Arıza tespiti ile üretim de süreklilik, verim de artış ve zaman da tasarruf sağlanmaktadır. Bu sebeplerden dolayı SMSM’lerde meydana gelen arızalar üzerine yapılan çalışmalar oldukça artmıştır (Çıra, 2017a).

2.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Arızaları

SMSM’ler yüksek verimlilik, yüksek moment, yüksek hızlarda çalışmalarının yanı sıra uzun ömürlü olmalarından dolayı endüstride robot uygulamalarında, fan ve klima sistemlerinde elektrikli araçlarda silah sanayisinde ve daha birçok alanda kullanılmaktadırlar (Lale, 2018). Kullanım alanları arttıkça bu motorlarda meydana gelen arızalarda artmaktadır. Artan arızalar ile elektrik motorlarında durum izleme ve hata tespiti araştırmacılar için önemli bir konu haline gelmiştir (Nandi ve ark., 2005). Şekil 2.1’ de SMSM arızaları verilmiştir (Ebrahimi ve ark., 2009).



Şekil 2. 1. SMSM arızaları

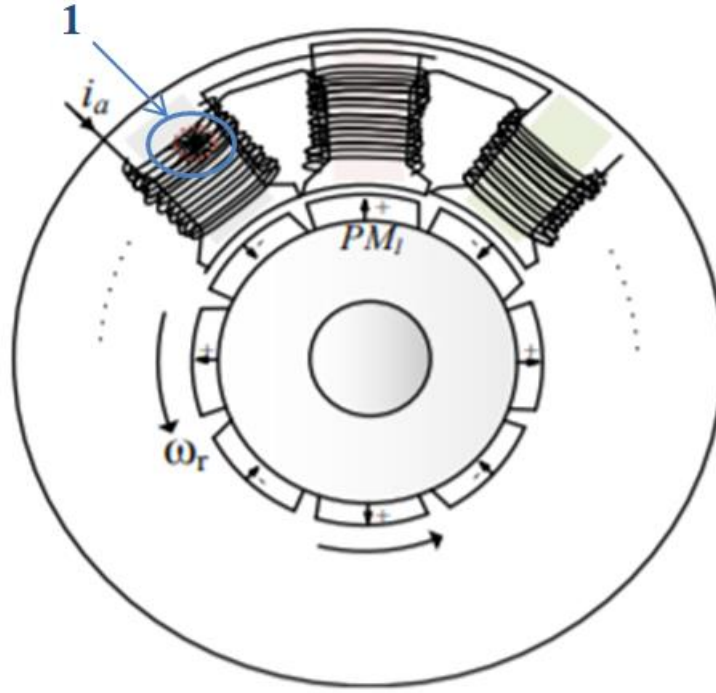
2.1.1. Elektriksel arızalar

SMSM’lerde meydana gelen elektriksel arızalar statordaki sargıların anormal bağlantısı, statordaki açık sarımlar ve stator sarımları arası kısa devre olarak sınıflandırılmaktadır. Motorda meydana gelen elektriksel arıza türlerinden en yaygını sarımlar arası kısa devre arızasıdır (Kim ve ark., 2006).

Sarımlar arası kısa devre arızası

Elektriksel arızaların meydana gelmesinin en büyük nedeni sargı yalıtımının bozulmasıdır. Motorda meydana gelen kısa devre arızası daha çok küçük boyutlarda iken sarımlarda ortaya çıkan yalıtım bozukluğu zamanla artarak arızanın büyümesine neden olmaktadır. Bununla birlikte sarımlar arası kısa devre arızası, kısa devre olan sarımda kilitlenmiş rotor akımının iki kat daha fazla ve sargıların aşırı derecede ısınmasına sebep olan bir kısa devre akımı ortaya çıkarmaktadır. Sarımlar arasında meydana gelen kısa devre yayılarak aynı fazdaki bütün sargıların kısa devre olmasına ve zamanla faz-faz arasında meydana gelen kısa devre arızasına neden olmaktadır. SMSM’de meydana gelen stator sarımlar arası kısa devre arızasına bağlı olarak statorda akımın aşırı indüklenmesi ve bununla birlikte rotor mıknatıslarının nötr akısına zıt bir manyetik akı oluşmaktadır. Oluşan bu zıt manyetik akı rotorda bulunan mıknatısların demagnetize olmasına neden olmaktadır (Çıra, 2017a). Sarımlar arası kısa devre arızası sonucunda faz-toprak kısa devre arızası meydana gelmektedir. Faz-toprak kısa devre arızası motorda çok büyük hasarlara yol açmaktadır (Grubic ve ark., 2008). Bu arıza, motor nüvesinde hasara yol açmaktadır ve motor kullanılamaz hale getirmektedir (Tallam ve ark., 2002).

Aşağıda verilen Şekil 2.2’de SMSM’ de meydana gelen sarımlar arası kısa devre arızası gösterilmektedir (Çıra, 2017b).



Şekil 2. 2. SMSM’de meydana gelen stator sarımlar arası kısa devre arızası (1-Arıza Bölgesi)

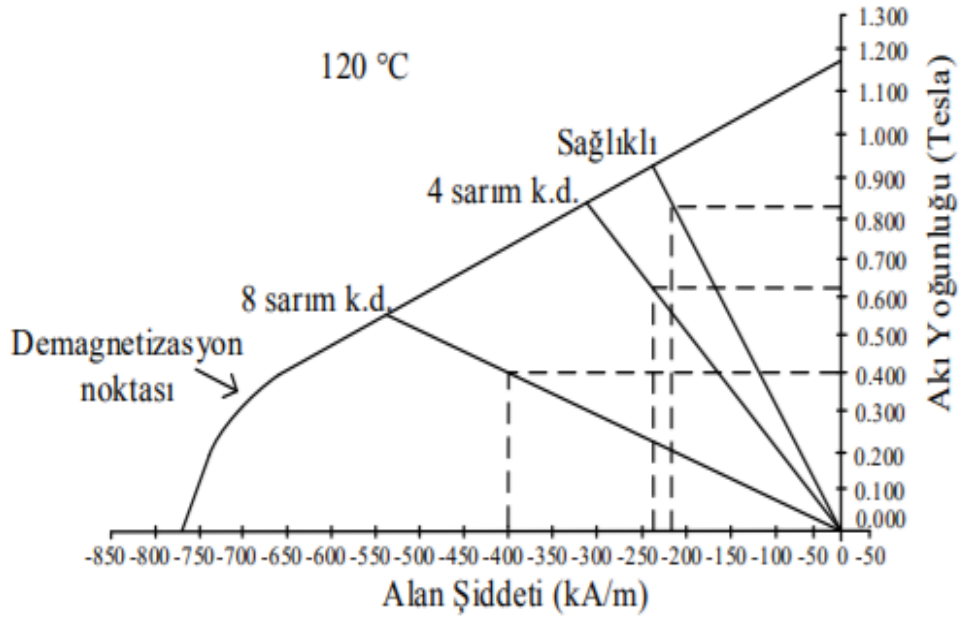
2.1.2. Manyetiksel arızalar

Demagnetizasyon arızası

Demagnetizasyon arızası motorlarda meydana gelen manyetiksel arıza türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Rotor da bulunan mıknatıslarda meydana gelen demagnetizasyon arızası motorun gürültülü ve titreşimli çalışmasına, manyetik harmoniklere, dengesiz manyetik çekme gibi birçok istenmeyen duruma neden olmaktadır. Bu arızanın meydana gelmesinde yüksek kalkış torkuna ihtiyaç duyulan yük durumları, sargılarda meydana gelen arızalarda açığa çıkan yüksek sıcaklıklar, durağan halde statordan geçen akımların oluşturduğu ters yöndeki manyetik alanlar, geçişler sırasında meydana gelen endüvi reaksiyonları etkili olmaktadır (Yu ve Tang, 2006). Demagnetizasyon arızasına bağlı olarak SMSM’nin mil momenti azalmakta ve böylelikle motor performansında olumsuz sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Demagnetizasyon arızalı SMSM, sağlam durumdaki SMSM ile aynı mil momentini üretebilmek için daha fazla stator akımına gereksinim duymaktadır. Stator akımında meydana gelen bu artış statorda bulunan sarımların sıcaklığını artırmakta ve

demagnetizasyonun artmasına neden olmaktadır (Çıra, 2017a). Demagnetizasyon arızası aynı zamanda sarımlar arası kısa devre arızası ile de meydana gelmektedir. Sarımlar arası kısa devre arızası aşırı akımlara neden olmaktadır. Bu aşırı akımlar sonucu ise demagnetizasyon arızası meydana gelmektedir (Kim ve ark., 2006). Statorda bulunan sargılarda kısa devre durumunun artması ile birlikte arızanın şiddeti de artmaktadır. Sürekli mıknatıslar belirli çalışma noktalarına sahiptir. Arızanın artışı sürekli mıknatısların çalışma noktasının geri dönülemez demagnetizasyon bölgesi noktasına kadar düşmesine sebep olabilmektedir (Çıra, 2017a).

Rotorda bulunan mıknatısların çalışma noktalarının demagnetizasyon bölgesinin altına düşmesinin başlıca sebepleri; statorda bulunan sargılarda ortaya çıkan kısa devre arızalarının sonucu oluşan kısa devre akımı ve aşırı yüklerden dolayı motorda ısınmanın meydana gelmesidir. Şekil 2.3’de 120 °C’lik çalışma sıcaklığındaki SMSM’nin sağlıklı, 4 ve 8 sarımının kısa devre olması durumları için demagnetizasyon eğrisi ve çalışma noktaları verilmiştir. Şekil 2.3’de demagnetizasyon eğrisi ile dış manyetik devrenin geçirgenliğine eşit olan lineer doğrunun kesiştiği nokta çalışma noktası olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.3’e göre demagnetizasyon eğrisinin sağa doğru yaklaşmasının sebebi sıcaklığın artmasıdır. Yani demagnetizasyon noktası lineer bölgeye yaklaştıkça mıknatıslarda meydana gelen demagnetize kalıcı ve geri dönülemez olur. Şekil 2.3’te SMSM’lerde sürekli mıknatısların çalışma noktaları verilmiştir. (Çıra, 2017a).



Şekil 2. 3. SMSM’lerde sürekli mıknatısların çalışma noktaları

Demagnetizasyon arızası birçok araştırmacının ilgi odağı olmuştur. Geçmişten günümüze birçok araştırmacı demagnetizasyon arızası tespiti üzerine çalışmalarda bulunmuştur. Genel olarak demagnetizasyon arızası üzerine yapılan çalışmalar aşağıdaki sıralanmıştır.

Rosu ve ark., (2005) Yüksek güce sahip, demagnetizasyon arızası meydana gelmiş SMSM’nin, yaygın olarak kullanılan bir yöntem olan Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile Histerisiz modelini ortaya koymuşlardır. Yaptıkları çalışma ile demagnetizasyonun iki faz kısa devreden sonra yüksüz voltajda küçük azalmalar ile ortaya çıktığını göstermişlerdir.

Rajagopalan ve ark., (2007) Motordan çekilen stator akımının farklı yükler altında davranışlarını araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada deneysel çalışmalara dayanarak ortaya koydukları sonuçlara göre motor akımının demagnetizasyon arızasının tespitinde başarılı sonuçlar ortaya koyduğunu ifade etmişlerdir.

Rosero ve ark., (2008) SMSM’de meydana gelecek arızaların tespiti ile birlikte demagnetizasyon arızasının da tespitini yapmaya çalışmışlardır. SMSM üzerine SEY’i uygulamışlardır. Daha sonra ise motorda meydana gelen stator akımını düşük, orta ve yüksek hızlar olmak üzere dinamik koşullar ve dinamik olmayan koşullar altında

Hilbert Huang Dönüşümü (HHD) yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmadan elde ettikleri sonuçlara göre çalışmada uyguladıkları yöntemin motorda meydana gelen demagnetizasyon arızasının başarılı bir şekilde tespit edildiğini ortaya koymuşlardır.

Ruiz ve ark., (2009) dinamik koşullar altında SMSM' de demagnetizasyon arızasını tespit etmek için Ayrık Dalgacık Dönüşümü ve Sürekli Dalgacık Dönüşümüne (SDD) bağlı bir yöntem uygulamışlardır. Motorda gözlemledikleri stator akımları ortaya koydukları Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) ile varsayımlarının doğruluğunu göstermiş olmalarına rağmen HFD yöntemi ile durağan olmayan koşullarda arıza tespitinde kesin sonuçlar vermediğini ifade etmişlerdir. HFD ile durağan sinyallerde demagnetizasyon arızasının tespitinin mümkün olduğunu ancak durağan olmayan sinyallerde bu arızanın tespitinin mümkün olmadığını göstermişlerdir.

Djerdi ve ark., (2010) SMSM'lerde en sık meydana gelen eksenden kaçıklık, demagnetizasyon ve kısa devre arızalarını analiz etmişlerdir. Kullanılan simülasyon sonuçları aracılığı ile SMSM'de bu arızaların genel olarak elektromanyetik ve mekanik işaretlerini kullanan ve tespit işlemlerinde faydalı olacak modeller ileri sürmüşlerdir.

Eker ve Akar, (2013) ortaya koydukları yeni bir yaklaşım ile SMSM'de demagnetizasyon arızasını başarılı bir şekilde tespit etmişlerdir. Önerilen yöntem ile mıknatısları rotor yüzeyine yerleştirilmiş SMSM'nin dinamik ve durağan çalışma koşulları altındaki motor faz gerilimi kullanılarak demagnetizasyon arızasının etkisini Mertebe Takip Analiz Yöntemi (MTA) ile incelemişlerdir. Önerdikleri yöntem ile SMSM'nin dinamik ve durağan çalışma koşulları altında demagnetizasyon arızasının tespitinde başarılı sonuç verdiğini ifade etmişlerdir.

Moosavi ve ark., (2015) yaptıkları çalışma ile SMSM' de meydana gelen demagnetizasyon arızasını tespit etmek için kullanılacak birçok yöntemin avantajlarını ve dezavantajlarını ortaya koymuşlardır. Elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda HFD'nin dinamik şartlarda kullanılmasının arıza tespitinde başarılı olmamasına rağmen durağan koşullarda bu yöntemin kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir.

Zafarani ve ark., (2015) yaptığı çalışma ile SMSM'de demagnetizasyon arızasının statora etkilerini incelemişlerdir. Bu etkileri incelemek için bölünmüş bir manyetik

eşdeğer devreye dayalı bir yaklaşım ileri sürmüşlerdir. Demagnetizasyon etkisini düzgün bir şekilde ortaya koymak için farklı sayı, konum ve sargı konfigürasyonlarına sahip arızalı mıknatısların durumlarını incelemişlerdir. Ortaya çıkan arızaları tam olarak karakterize etmek için farklı hız ve yük şartları altında deneysel çalışmalar yapmışlardır. Yaptığı deneysel çalışma sonucunda ileriye sürdüğü yaklaşımın demagnetizasyon hatasının tespitinde etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Wang ve ark., (2016) yaptıkları çalışma ile durağan olmayan koşullar altında çalışan SMSM'nin kısmi demagnetizasyon hatasını tespit etmek için Vold-Kalman fitresini kullanmışlardır. Bu filtreyi kullanarak stator akımının karakteristiğini izlemeye yönelik yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Deneysel sonuçlar çeşitli hız ve yük koşulları altında SMSM'nin kısmi demagnetizasyon arızasının tespitinde önerdikleri yöntemin büyük başarı sağladığını ifade etmişlerdir.

Ishikawa ve Igarashi, (2019) yaptıkları çalışma ile vektör kontrolü altındaki SMSM'de meydana gelen çok küçük orandaki demagnetizasyon arızasının tespitini araştırmışlardır. SMSM'de bulunan sürekli mıknatısların bir kısmını manyetik olmayan malzemeler ile değiştirmişlerdir. 3 boyutlu SEY kullanarak titreşim ve tork analizi yapmışlardır. Yaptıkları analizler sonucunda çok az yük altında çalışan motorlar haricinde titreşim ve tork analizlerinin demagnetizasyon arıza tespitinde başarılı sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır.

Chang ve ark., (2020) yaptıkları çalışmada ek sensörler olmadan motorda meydana gelen arızayı tespit etmek için servo sürücünden gelen sinyalleri kullanarak demagnetizasyon arızasının tespiti için bir yöntem geliştirmişlerdir. Servo sürücünden gelen sinyalleri kullanarak SMSM'lerin demagnetizasyon arızasının tespitinde otomatik kodlayıcı ve K-ortalama algoritma uygulamışlardır. Demagnetizasyon arızasının tespitini üç durumda gerçekleştirmişlerdir. Bu durumlar; normal, hafif ve yüksek demagnetizasyon arızasıdır. Elde edilen deneysel sonuçlar ile önerilen yöntemin SMSM'lerin demagnetizasyon hatasının tespiti için büyük doğruluk gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Wu ve ark., (2021) yaptıkları çalışma ile SMSM'de demagnetizasyon arızasını incelemek için SEY'i önermişlerdir. İleri sürdükleri bu yaklaşımla sürekli mıknatısların

düzenli olmayan demagnetizasyon simülasyonu sayesinde demagnetizasyon derecesi arttıkça çıkış torkunun genliğinin, radyal akı yoğunluğunun ve motorun geri elektromotor kuvvetinin azaldığını tespit etmişlerdir.

2.1.3.Mekaniksel arızalar

Eksenden kaçıklık

SMSM'ler de stator ile rotor arasında bulunan hava boşluğunun dengeli dağılmamasına eksenden kaçıklık arızası denir. Eksenden kaçıklık arızası dinamik eksenden kaçıklık, statik eksenden kaçıklık, karışık eksenden kaçıklık arızası olarak farklı şekillerde karşımıza çıkmaktadır. Eksenden kaçıklık arızasından dolayı düzensiz manyetik çekimler oluşmaktadır. Bu manyetik çekimler hava aralığının homojenliğini bozmakta ve bununla birlikte akı dağılımını da olumsuz etkilemektedir. Akı dağılımında meydana gelen bu olumsuz etki, indüklenen gerilim ve akımda harmonikler oluşmasına sebep olmaktadır (Eker ve Akar, 2016). Eksenden kaçıklık arızasının tespitinde durağan ve dinamik şartlar altında gözlemlenen akım, gerilim, tork gibi elektrik sinyalleri kullanılmaktadır (Torregrossa ve ark., 2012).

Rulman arızası

Rulmanlar elektrik motorlarının en önemli parçalarından biridir. Rulmanlar iç ve dış bilezik ve bu iki bilezik arasında yuvarlanan bilye ve makara benzeri parçalardan oluşmaktadır. Rulmanlar dönme hareketini en az sürtünme ile gerçekleştirmektedirler. Çalışma koşullarına bağlı olarak rulmanlar çok fazla mekanik etkilere maruz kalmaktadırlar. Bu mekanik etkilerden dolayı rulmanlarda aşınmalar meydana gelebilmekte ve rulmanların yapısını bozabilmektedir. Bununla birlikte yanlış montaj ve rulmanların kullanım amacına uygun kullanılmaması da rulmanlar da arızalar meydana getirebilmektedir. Meydana gelen bu arızalar tehlikeli sonuçlar oluşturmada ortadan kaldırılmalıdır (Koca ve Ünsal, 2017).

Son zamanlarda derin öğrenme başlığı adı altında derin öğrenmenin bir mimarisi olan ESA yardımıyla motorlarda birçok arıza tespiti yapılmıştır. Gelişen teknoloji ile yapılan bu çalışmaların sayısı artmıştır.

Jeong ve ark., (2018) yaptıkları çalışmada SMSM’de ESA modeli ile normal, sargı sonu dönüşler arası kısa devre arızası, demagnetizasyon arızası ve hibrit arızasının (sargı sonu dönüşler arası kısa devre arızası ve demagnetizasyon arızası) tespit edilmesi ve bu arızaların sınıflandırılmasını ortaya koymuşlardır. Bununla birlikte HFD modeli kullanılarak arıza türlerinin karakteristiklerini belirlemişlerdir. Faz akımlarının karakteristiklerini ise SEY ile tespit etmişlerdir. Kullandıkları eğitim ve set verilerini, deneylerden elde edilen üç fazlı akımları kullanarak çıkarmışlardır. Yaptıkları çalışmada önerilen yöntemin arıza tespitinde başarı sağladıklarını ortaya koymuşlardır.

Kao ve ark., (2019) yaptıkları çalışmada SMSM’de arıza tespiti için 1 boyutlu ESA kullanımını önermişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada iki tane özellik çıkarma yöntemi önermişlerdir. Birincisi; 1 boyutlu ESA ve Dalgacık Paket Dönüşümünü (DPD) içeren denetimsiz bir öğrenme tekniğidir. İkincisi ise SMSM’yi beş arıza durumunu sınıflandırmak için denetimli öğrenme ile softmax katmanını birleştiren yöntemdir. DeneySEL sonuçlardan ise kullandıkları yöntemlerin 1500-3000 d/d hızlarda çalışan beş tane farklı motor arıza durumunu etkin bir şekilde tespit edildiğini göstermişlerdir. Yaptıkları çalışmada 1 boyutlu ESA sonuçlarının daha iyi olduğunu ortaya koymuşlardır. Ortaya koydukları çalışmada %98.1 ve %98.8 oranında başarı sağlamışlardır.

Lee ve ark., (2019) Yaptıkları çalışma ile 1 boyutlu ESA kullanarak demagnetizasyon arızası, sargı sonu dönüşler arası kısa devre arızası ve bu iki arızayı kapsayan hibrit arıza tespitini sunmuşlardır. Yaptıkları deneyle birlikte sağlıklı, sargı sonu dönüşler arası kısa devre arızası, demagnetizasyon arızası ve hibrit arızanın SMSM’nin güncel verileri elde etmişler ve frekans alanında analizlerini yapmışlardır. Arızaların tespitini ve sınıflandırılmasını 1 boyutlu ESA kullanarak gerçekleştirmişlerdir. İki arıza birlikte geldiğinde de 1 boyutlu ESA’nın arızayı algıladığını göstermişlerdir. 1 boyutlu ESA’nın, var olan sinyallerden özellikleri otomatik olarak çıkardığını ortaya koymuşlardır. Önerdikleri yöntemin arızaları tespit etmede %99.29 oranında bir başarı sağladığını belirtmişlerdir. Aynı zamanda önerdikleri yöntemde sadece akım sinyallerini kullandıkları için ek olarak başka sensöre ihtiyaç duymamışlardır.

Maraaba ve ark., (2020) yaptıkları çalışma ile doğrudan yol vermeli SMSM’in stator dönüş arızasını tespit etmek için yeni bir yöntem ortaya koymuşlardır. Ortaya

koydukları bu yöntem arızayı tespit etmek için sabit durum boyunca stator akımının izlenmesi ile mümkün olmaktadır. ESA mimarisi bu çalışmada sabit durumdaki motor akımını motordaki sargıların durumu ile bağdaştırarak stator dönüş arızasını tespit etmek için önerilmiştir. Stator dönüş arızasını tespit etmek için 2 boyutlu altı aşamalı ESA tabanlı bir tespit aracı sunmuşlardır. Önerilen bu yöntemin arıza tespitinde yüksek bir başarı sağladığını ifade etmişlerdir.

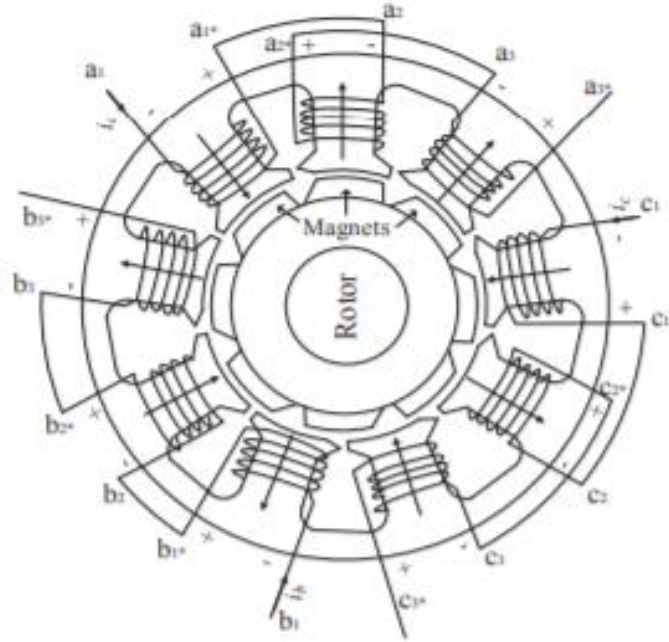
Karpat ve ark., (2021) yaptıkları çalışma ile rulman arızasını tespiti için titreşim verilerini kullanarak 1 boyutlu ESA modeli önermişlerdir. Önerdikleri bu modelin performansını değişken çalışma koşulları altında değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak önerdikleri modelin rulman arıza tespitinde %93.97 oranında başarı gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Kumar ve Hati, (2022) yaptıkları çalışma ile Sincap Kafesli Asenkron Motorlarda meydana gelen rulman arızaları ve kırık rotor çubuğu arızasının tespiti için ESA tabanlı bir model önermişlerdir. Kullandıkları birden fazla ivmeölçerden elde edilen 1 boyutlu titreşim sinyalini görüntülere dönüştürmek için sinyalden görüntüye dönüştürme tekniği ileri sürmüşlerdir. Önerdikleri bu yöntem ile %99.50 oranında bir başarı sağlamışlardır. Önerilen yöntemin başarısını göstermek için farklı ESA modelleri ile geleneksel makine öğrenme modellerini karşılaştırmışlardır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor

Senkron motorlar iki farklı bölümden meydana gelmektedirler. Bunlar; rotor ve statordur. Rotor kısmı motorun hareketli, stator kısmı ise motorun hareketsiz kısmıdır. Statordan ve rotorda gelen iki farklı akı sayesinde motorun hareketi sağlanmaktadır. Senkron motorların rotor sargılarının kalıcı mıknatıslarla değiştirilmesiyle elde edilen motorlara SMSM denir (Akar, 2009). SMSM'leri diğer motor türlerinden farklı kılan en önemli faktör rotorlarında kalıcı mıknatısların bulunmasıdır. Şekil 3.1'de SMSM'nin rotor ve stator modeli verilmiştir (Çıra, 2020).



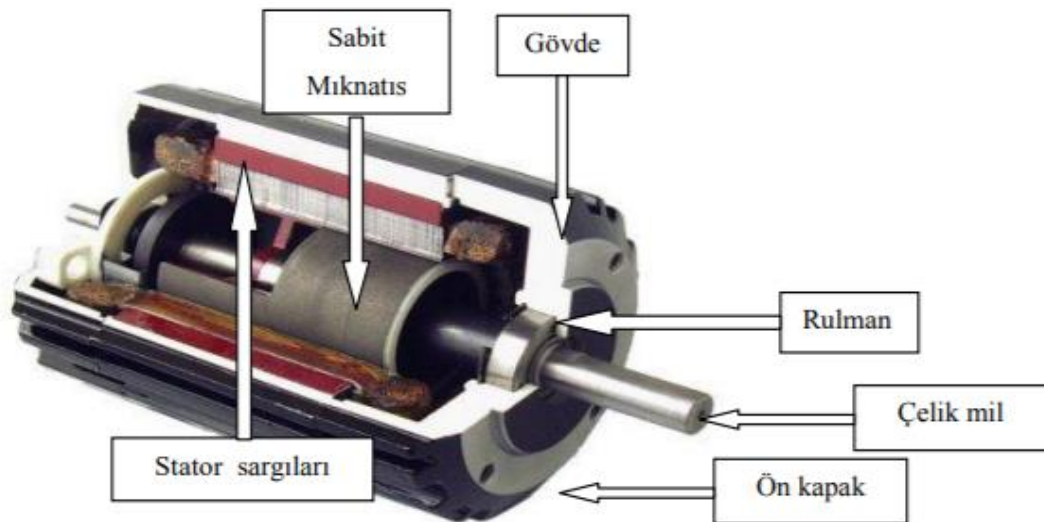
Şekil 3. 1. SMSM'nin rotor ve stator modeli

SMSM'lerin rotorunda sabit mıknatıslar vardır. Bu mıknatısların kutup sayıları motordan motora farklılık gösterir. Kutup sayılarındaki bu farklılığın sebebi ise motorlardan elde edilmek istenen moment büyüklüğünün farklı olmasıdır. Kutup sayısı ile moment doğru orantılıdır. Kutup sayısı arttıkça moment büyüklüğü de artmaktadır. Ancak belli bir noktadan sonra kutup sayısındaki artış momenti etkilememektedir (Sakarya, 2009).

Endüstride kullanılan SMSM'ler geniş güç aralıklarında kullanılmaktadırlar. Bu aralık birkaç Watt'tan başlayarak 1.1 MW kadar ulaşmaktadır (Nirowski, 1990). Gelişen teknoloji ile SMSM'ler sağladığı birçok avantajlardan dolayı endüstrinin farklı uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu avantajlar; yüksek ivmelenme, yapılan uygulamalarda moment geçişlerinin daha iyi olması, verimlerinin ve hızlarının yüksek olması, moment üretme kapasitelerinin yüksek olması, yüksek güç ve yüksek ağırlık oranı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu avantajların yanı sıra SMSM parçalarının maliyetli olması, kullanımlarının profesyonellik gerektirmesi gibi dezavantajları da mevcuttur. Bununla birlikte göstermiş oldukları manyetik karakteristiklerinin de zamanla değişimler göstermesi SMSM'lerde istenmeyen bir durumdur. SMSM'ler sahip oldukları dezavantajlara rağmen çok sayıda sağlamış oldukları avantajlardan dolayı otomotiv, robotik, taşıma teknolojisi gibi endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadır (Faten ve Lassaâd, 2010).

3.1.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun yapısı

SMSM'ler stator, rotor, konum algılayıcıları ve bunlara ilave olarak motor mili ve hava aralığından oluşmaktadır. (Hendershot ve Miller, 1994). Şekil 3.2'de SMSM'nin kesiti verilmiştir (Eker, 2013).



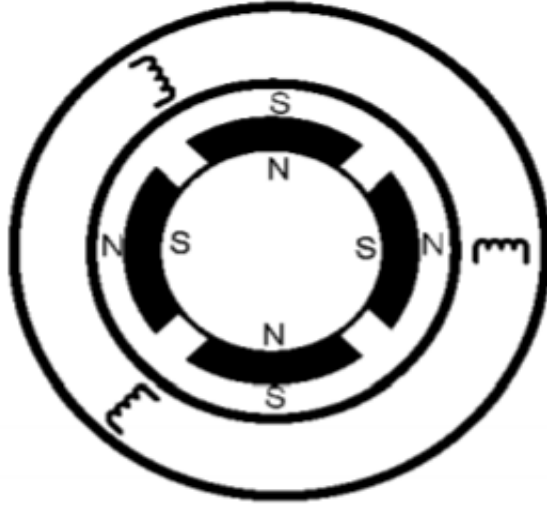
Şekil 3. 2. SMSM kesiti

Stator, sargıları üzerinde bulunduran hareketsiz kısımdır. Döner alanın oluşmasında temel görev almaktadır. Moment dağılımı açısından daha düzgün olan SMSM'lerde 120 derecelik açı ile yerleştirilmiş sargılar bulunmaktadır. Stator nüvesi manyetik geçirgenliği yüksek silisli saçlardan meydana gelmektedir (Öksüztepe, 2008).

Rotor, motorun hareketli kısmı olup üzerinde sürekli mıknatıslar bulunmaktadır. Rotor üzerinde bulunan bu mıknatıslar kutupları meydana getirmektedir. Mıknatıslar manyetik saçların demir mil üzerine yerleştirilmesiyle oluşmaktadır (Schmidt, 1997).

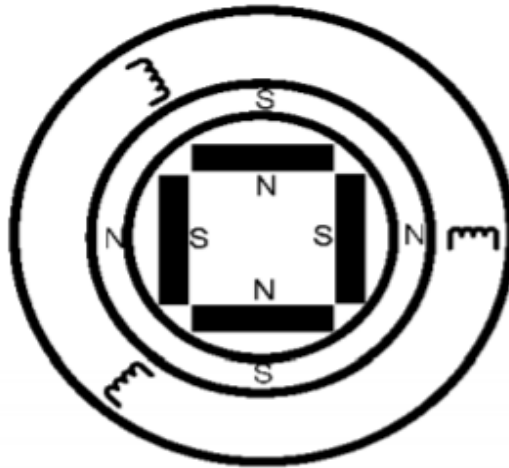
Motorda bulunan sabit mıknatıslar N-S kutbu oluşturacak şekilde sabitlenir. Bunun nedeni ise hava aralığında manyetik alan oluşturabilmektir. Bu manyetik alanı oluşturabilmek için birçok türde mıknatıs kullanılır (Akar, 2009). Rotorun tasarımında $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ veya Nd-Fe-B gibi enerjileri yüksek mıknatıslar kullanılmaktadır. Enerjileri yüksek mıknatısların kullanılması hava aralığı manyetik alanını diğer rotoru sarıli motor türlerinden daha yüksek değerlerde tutmaktadır. Bununla birlikte bakır kayıpları da olmadığından aynı güçteki senkron motorlardan verimleri daha yüksektir. Aynı zamanda motorlar ebat olarak daha çevik tasarlanmaktadır (Texas Instruments, 1997). Motorların rotorları tasarlanırken farklı yapılar kullanılmaktadır. Bunlardan en çok karşımıza çıkanları ise rotor yüzeyine monte edilen ve rotor nüvesinin içine gömülen mıknatıslarla oluşturulan yapılardır (Eker, 2013).

Yüzey yerleştirmeli mıknatıslı senkron motorların yapısında kullanılan yüksek enerjili mıknatıslardan dolayı bu motorlar endüstride çok yaygın kullanılmaktadır. Bu motorlarda bulunan mıknatıslar rotor yüzeyine yerleştirilmiştir. Motorda bulunan mıknatıslar hava aralığına dik ve yarıçap ekseninde bulunmaktadır (Kocabıyık, 2019). Şekil 3.3'te Yüzey yerleştirmeli SMSM verilmiştir (Öksüztepe, 2008).



Şekil 3. 3. Yüzey yerleştirmeli SMSM

Gömülü mıknatıslı senkron motorlarda rotorda bulunan oyuklarda mıknatıslar mevcuttur. Bu motorlar mekanik açıdan sağlam motorlar olup verimleri yüksektir. Bununla birlikte büyük hızlar gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Yapımlarının maliyetli olması ise en büyük dezavantajlarıdır (Kocabıyık, 2019). Şekil 3.4'te Gömülü Mıknatıslı Senkron Motor yapısı verilmiştir (Öksüztepe, 2008).



Şekil 3. 4. Gömülü mıknatıslı senkron motor

Konum ve hız algılayıcılarının görevi, stator alanı ile rotor alanının uyumlu çalışmasını sağlamaktır. Kullanılan bu algılayıcıların optik ve manyetik çeşitleri bulunmaktadır. Optik algılayıcıları ışık kaynağının türü olan ledler ve foto diyotlar oluşturmaktadır.

Ledler uygun konumda iken rotorun harekete geçebilmesi için foto diyotu ilettime geçirerek uygun sargının denetimini sağlayan güç anahtarını aktif hale geçirmektedir. Manyetik algılayıcılar ise kullanılan sargıda, rotorla hareket eden mıknatısların konumuna göre oluşturduğu gerilimle konum ve hız algılanmaktadır (Öksüztepe, 2008).

Hava aralığı ise rotor ile stator arasında meydana gelen boşluk olarak ifade edilir. Hava aralığı ile sabit mıknatısların ürettiği manyetik akı ters orantılıdır. Hava aralığı arttıkça manyetik akı azalır. Manyetik akıda meydana gelen bu değişimler motor da meydana gelen momenti etkilemektedir. Manyetik akının azalması ile motor da meydana gelen momentte azalır (Akar, 2009).

3.1.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun matematiksel modeli

SMSM'ye uygun sürücülerin tasarımının yapılabilmesi ve bu motorların kontrollerinin kolayca sağlanabilmesi için SMSM'nin matematiksel modelinin bilinmesi büyük önem taşımaktadır (Sakarya, 2009).

SMSM 3 çeşit matematiksel modele sahiptir. Bunlar sırasıyla; matematiksel model için kullanılacak parametrelerin stator düzleminde (3 faz model) gösterilmesi, parametrelerin rotor düzleminde (2 faz d-q model) gösterilmesi ve parametrelerin 2 faz sabit düzlemde (2 faz α - β model) gösterilmesi olarak gösterilebilir (Kocabıyık, 2019).

Uzay vektörü

SMSM çalışır durumda iken herhangi bir zamanda alınan stator 3 faz akımları i_a , i_b , i_c olduğuna göre;

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (3.1)$$

ifadesi elde edilir.

Stator akımı uzay vektörleri ise;

$$i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c = \vec{i}_s \quad (3.2)$$

Verilen bu ifade de $\alpha = e^{j2\pi/3}$ 'dir. i_s ifadesinin değeri de biliniyor ise faz akımlarının değerleri aşağıda verilen eşitlikler gibi olmaktadır.

$$i_a = \text{Re}[i_s], \quad i_b = \text{Re}[\alpha i_s], \quad i_c = \text{Re}[\alpha^2 i_s] \quad (3.3)$$

Stator uzay vektörünün tanımlanan reel kısmı enine eksen stator akım bileşeni olan $i_{s\alpha}$ ’ ya, imajiner olan kısmı da boyuna eksen stator akım bileşeni olan $i_{s\beta}$ ’ ye eşit olarak karşımıza çıkmaktadır. Elde edilen eşitlikler yardımı ile sabit olan stator ekseninde stator akımı uzay vektörünün tanımı yapılarak aşağıda verilen (3.4) denklemi ile ifade edilmektedir.

$$i_s = i_{s\alpha} + j i_{s\beta} \quad (3.4)$$

Akım için yukarıdaki denklemlerde yapılan tanımlamalar gerilim değerleri (3.5) ve akı değerleri (3.6) içinde yapılabilmektedir.

$$u_s = 2/3(u_a + a u_b + a^2 u_c) \quad (3.5)$$

$$\psi_s = 2/3(\psi_a + a \psi_b + a^2 \psi_c) \quad (3.6)$$

Motorda uygulayacağımız eksen dönüşümleri matematiksel modelin daha kolay ifade edilmesine olanak sağlamaktadır. Eksen dönüşümleri sırasıyla şu şekilde adlandırılmaktadır; Clarke dönüşümü, Ters Clarke dönüşümü, Park dönüşümü, Ters Park dönüşümü (Kocabıyık, 2019).

Clarke ve Ters Clarke dönüşümleri

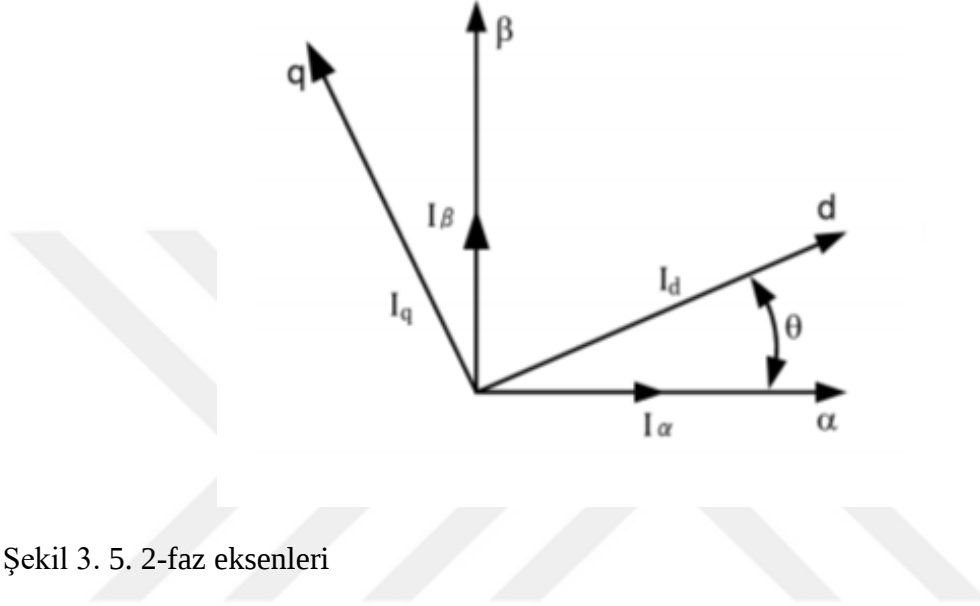
Aşağıda verilen (3.7), (3.8) denklemleri sırası ile Clarke dönüşümü, Ters-Clarke dönüşümlerinin matris olarak gösterilmiş durumlarıdır. Clarke dönüşümü üç faz sabit düzlemde iki faz sabit düzleme dönüş için kullanılırken Ters Clarke dönüşümü ise bu işlemin tersi için kullanılmaktadır (Kocabıyık, 2019).

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 0 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Park ve Ters Park dönüşümü

Park dönüşümü üç faz sabit düzlemden iki faz rotor düzlemine geçiştir. Ters Park dönüşümü ise bu işlemin tersidir. Aşağıdaki Şekil 3.5’ te 2-faz eksenleri verilmiştir (Kocabıyık, 2019).



Şekil 3. 5. 2-faz eksenleri

Buradaki fazör diyagramından yola çıkarak;

$$i_s = i_a + i_\beta \quad (3.9)$$

$$\vec{i}_s = i_s e^{-j\theta} = i_d + j i_q \quad (3.10)$$

Denklem (3.10)’da verilen θ açısı rotorun akı pozisyonunu ifade etmektedir.

Verilen (3.10) denklemini (3.9) denkleminde yerine koyarsak aşağıda verilen (3.11) denklemini elde edilmektedir.

$$\vec{i}_s = (i_a + j i_\beta) e^{-j\theta} \quad (3.11)$$

(3.11) ile (3.10) denklemlerinde verilen ifadeleri birbirine eşitlenirse aşağıda verilen (3.12) denklemi elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Elde edilen (3.12) denklemi açılırsa (3.13), (3.14) denklemleri elde edilmektedir.

$$i_d = i_a \cos \theta + i_\beta \sin \theta \quad (3.13)$$

$$i_q = i_a \sin \theta + i_\beta \cos \theta \quad (3.14)$$

Verilen denklemlerde rotor açısı yardımı ile akı bileşeni olan i_d ve moment bileşeni olan i_q belirlenmektedir. Denklem (3.15)' de Park dönüşümü matris olarak gösterilmektedir (Kocabıyık, 2019).

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Ters Park dönüşümü ise denklem (3.16)' da ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun 3 faz stator düzleminde matematiksel modeli

3 Faz Stator Düzleminde ileri sürülen matematiksel model de motor sabit mıknatıslı rotora sahip olmakla birlikte 3 fazlı, yıldız bağlı ve sargıları arasındaki açının 120 derece faz farkı ile yerleştirildiği ileri sürülmüştür. Bununla birlikte motorda meydana gelen kayıpların (demir ve bakır kayıpları) olmadığı kabul edilmiştir (Kocabıyık, 2019). Bu kriterler göz önünde bulundurularak SMSM'nin 3 faz stator düzleminde matematiksel modeli çıkarılmıştır.

Aşağıda (3.17), (3.18), (3.19) denklemlerinde SMSM'nin 3 faz stator düzleminde stator gerilim eşitlikleri verilmektedir.

$$u_a = R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \quad (3.17)$$

$$u_b = R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \quad (3.18)$$

$$u_c = R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \quad (3.19)$$

Verilen stator gerilim denklemlerinin matris şekli ise denklem (3.20)'deki gibidir.

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Denklem (3.20)'de verilen stator gerilimin matris şeklide ifade edilen ψ_a, ψ_b, ψ_c ifadeleri aşağıda verilen denklem (3.21)'de matris şeklinde tanımlanmaktadır.

Burada verilen ifadelerin karşılıkları; a, b, c fazlarının öz endüktansı sırasıyla L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} 'dir. a,b,c fazları arasındaki karşılıklı endüktans sırasıyla $M_{ab}, M_{ba}, M_{ac}, M_{ca}, M_{bc}, M_{cb}$ 'dir. Mıknatısların sargılarda meydana getirdiği akı ise $\psi_{Ma}(\theta), \psi_{Mb}(\theta), \psi_{Mc}(\theta)$ ' dir.

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{bc} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{Ma}(\theta) \\ \psi_{Mb}(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \psi_{Mc}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Denklem (3.20) ile denklem (3.21) birleştirilirse aşağıda verilen denklem (3.22) elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{bc} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{Ma}(\theta) \\ \psi_{Mb}(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \psi_{Mc}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Yukarıda verilen (3.22) denklemini genel bir ifade ile yazıldığında (3.23) denklemi elde edilmektedir.

$$[U_{abc}] = [R_{abc}][i_{abc}] + \frac{d}{dt} \{ [L_{abc}][i_{abc}] \} + \frac{d}{dt} M_{abc} \quad (3.23)$$

Yukarıda verilen (3.23) denkleminin kısmi türevi alınıp ifade düzenlenirse denklem (3.24) elde edilmektedir.

$$[U_{abc}] = [R_{abc}][i_{abc}] + \frac{\partial [L_{abc}]}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} [i_{abc}] + [L_{abc}] \frac{d[i_{abc}]}{dt} + \frac{\partial \psi_{Mabc}}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3.24)$$

Burada $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \omega$ ise bu ifade verilen (3.24) denkleminde yerine yazılır ve gerilim denklemi olan (3.25) elde edilmektedir.

$$[U_{abc}] = [R_{abc}][i_{abc}] + \frac{\partial [L_{abc}]}{\partial \theta} \omega [i_{abc}] + [L_{abc}] \frac{d[i_{abc}]}{dt} + \frac{\partial \psi_{Mabc}}{\partial \theta} \omega \quad (3.25)$$

Aşağıda verilen denklem (3.26)'da SMSM'nin genel elektromanyetik moment ifadesi verilmektedir.

$$T_e = p \left\{ \left[\frac{1}{2} [I]^T \right] \frac{\partial [L]}{\partial \theta_r} [I] + [I]^T \frac{\partial [\Psi_M]}{\partial \theta_r} \right\} \quad (3.26)$$

Verilen (3.26) denklemi 3 faza göre düzenlenirse (3.27) denklemi elde edilmektedir.

$$T_e = p \left\{ \left[\frac{1}{2} [I_{abc}]^T \right] \frac{\partial [L_{abc}]}{\partial \theta_r} [I_{abc}] + [I_{abc}]^T \frac{\partial [\Psi_{Mabc}]}{\partial \theta_r} \right\} \quad (3.27)$$

(3.28) denkleminde rotor hızı ile moment arasındaki ilişki verilmektedir.

$$T_e - T_L = \frac{j}{p} \frac{d\omega_e}{dt} + \frac{B_M}{p} \omega_e \quad (3.28)$$

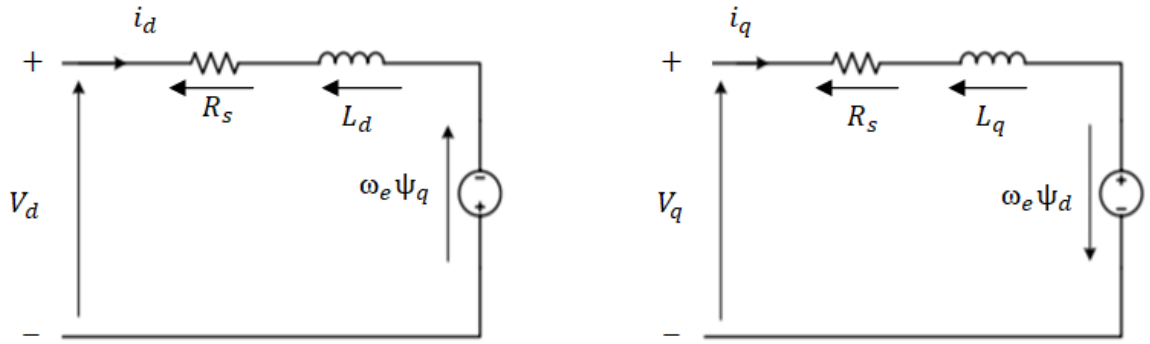
$$\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} \quad (3.29)$$

$$\theta_r = \frac{\theta_e}{p} \quad (3.30)$$

Denklem (3.28) verilen ifadeler şu şekildedir; T_e elektromanyetik moment, T_L yüke bağlı moment, B_M dönen sistemin sönüm katsayısını, j yüke bağlı atalet momentini, θ_r rotorun bulunduğu açısal konumunu, ω_e elektriksel açısal hızı ve θ_e rotorun elektriksel konumunu ifade etmektedir.

Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun rotor referans düzleminde (d-q) modellenmesi

Stator büyüklüklerini rotor referans düzlemine aktarmak ile parametre sayısı azaldığından sistemin anlaşılması kolaylaşır ve işlemler hızlı bir şekilde yapılır. Aşağıdaki Şekil 3.6'da SMSM'nin rotor referans düzleminde (d-q) modellenmesi verilmiştir (Kocabıyık, 2019).



Şekil 3. 6. SMSM'nin d-q eşdeğer devresi

Aşağıda verilen denklem (3.31)'de gerilim ifadesinin matris şekli verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} - \omega_r \begin{bmatrix} \varphi_q \\ \varphi_d \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Akı ifadesi ise denklem (3.31)'de verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varphi_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Verilen gerilim ve akı denklemleri birleştirilirse denklem (3.33) elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left[\begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varphi_m \\ 0 \end{bmatrix} \right] - \omega_r \begin{bmatrix} \varphi_q \\ \varphi_d \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Elde edilen denklemde $\varphi_{d,q} = L_{d,q} i_{d,q}$ olur. Bu eşitliğe göre yukarıdaki denklem(3.33) düzenlenirse gerilim denklemleri (3.34) ve (3.35) elde edilmektedir.

$$U_d = R i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega_r \varphi_q \quad (3.34)$$

$$U_q = R i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} - \omega_r \varphi_d \quad (3.35)$$

Akı denklemleri ise (3.36) ve (3.37)' de verilmektedir.

$$\varphi_d = L_d i_d + \varphi_m \quad (3.36)$$

$$\varphi_q = L_q i_q \quad (3.37)$$

d-q düzlemindeki moment denklemi ise denklem (3.38)'deki gibi olmaktadır.

$$T_e = \frac{3}{2} p [\varphi_d i_q - \varphi_q i_d] \quad (3.38)$$

(3.36), (3.37) ve (3.38) denklemleri kullanılarak moment denklemi düzenlenir ise denklem (3.39) elde edilmektedir.

$$T_e = \frac{3}{2}p[\varphi_m i_q - (L_q - L_d)i_q i_d] \quad (3.39)$$

Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun α - β düzlemindeki (iki faz sabit referans) modeli

Gerilim denklemi (3.40) ve (3.41) denklemlerinde verilmektedir.

$$U_a = RI_a + \frac{d\varphi_a}{dt} + \omega_e \varphi_m (-\sin \theta_e) \quad (3.40)$$

$$U_\beta = RI_\beta + \frac{d\varphi_\beta}{dt} + \omega_e \varphi_m (-\cos \theta_e) \quad (3.41)$$

Moment ifadesi ise denklem (3.42)'deki gibi olmaktadır.

$$T_e = \frac{3}{2}p\varphi_m[i_\beta \cos \theta_r - i_a \sin \theta_r] \quad (3.42)$$

Denklem (3.42)'deki $\theta_r = \frac{\theta_e}{p}$ 'dir.

Diğer bir moment denklemi ise denklem (3.43)'te verilmektedir.

$$T_e - T_l = \frac{j}{p} \frac{d\omega_e}{dt} + \frac{B_m}{p} \omega_e \quad (3.43)$$

Bu denklemde ise $\theta_r = \frac{\theta_e}{p}$, $\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt}$ 'dir.

Verilen bu denklemler ile SMSM'nin matematiksel modelleri ortaya koyulmuştur. Bu matematiksel modellerin SMSM'nin kullanılacağı uygulama alanlarının belirlenmesinde önemi büyüktür.

Yaptığımız çalışmada SMSM'de meydana gelen demagnetizasyon arızasını tespit etmek için kullanacağımız yöntem son zamanlarda birçok araştırmacının çalışılarda bulunduğu derin öğrenmenin ESA mimarisidir.

3.2. Derin Öğrenme

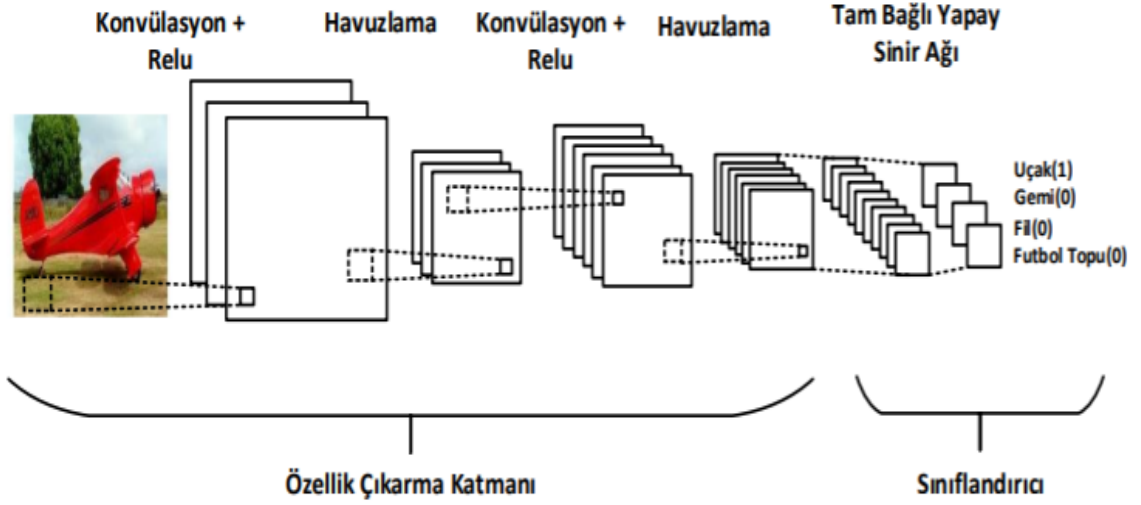
Derin öğrenme bir makine öğrenmesi sınıfı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sistem özellik çıkarma ve özellik dönüştürme için birden fazla doğrusal olmayan işlem birimi katmanını kullanmaktadır. Her katman kendinden önceki katmanda bulunan çıktıyı girdi olarak kabul etmektedir (Deng ve Yu 2013). Derin öğrenme, kullanılacak verilerin

birden çok özellik seviyelerinin öğrenilmesine dayanan bir yapıya sahiptir. Üst düzey özellikleri alt düzeydeki özelliklerden türeterek hiyerarşik bir düzen sağlamaktadır. Derin öğrenme bir yapay zeka alt dalı olduğu için her daim daha zeki sistemler geliştirmeyi hedeflemektedir (Bengio, 2009). Derin öğrenme yöntemleri; görüntü işleme, doğal dil işleme, ilaç keşfi gibi birçok alanda başarılar sağlamaktadır (LeCun ve ark., 2015).

3.2.1. Evrişimsel Sinir Ağı Mimarisi

ESA mimarisi son yıllarda derin öğrenmenin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Görüntü işlemeden ses tanımaya, doğal dil işlemeden nesne bulmaya kadar birçok alanda problemlerin çözümü için kullanılmaktadır (Albawi ve ark., 2017). ESA'lar en çok görüntü sınıflandırmada kullanılan Yapay Sinir Ağı (YSA) tabanlı bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (Akpınar, 2019).

ESA, derin öğrenmenin temel mimarisi olarak tanımlanmaktadır. ESA mimarisi; Giriş (Input) Katmanı, Evrişim (Convulation) Katmanı, Düzleştirilmiş Doğrusal Birim (Rectified Linear Units (ReLU)) Katmanı, Havuzlama (Pooling) Katmanı, Tam Bağlantılı (Fully Connected) Katman, Düşüm Seyreltme (DropOut) Katmanı, Sınıflandırma (Classification) katmanından oluşmaktadır. ESA'yı oluşturan bu katmanlar bir biri ardına yerleştirilmiş olup ve birçok eğitilebilir kısımlardan meydana gelmektedirler. ESA' da giriş verileri işleme alındıktan sonra her katman için ayrı eğitim süreci başlatılmaktadır. Bu işlemler gerçekleştirildikten sonra kesin doğru sonuç ile kıyaslama yapmak için bir çıktı verilmektedir. Bu iki sonuç arasındaki fark ise hata olarak tanımlanır. ESA'ların giriş verileri olarak ise video, ses, görüntü gibi sinyaller kullanılmaktadır (İnik ve Ülker, 2017). Şekil 3.7'de Klasik bir ESA mimarisi verilmiştir (Fırıldak ve Talu, 2019).



Şekil 3. 7. Klasik bir ESA mimarisi

3.2.2. Evrişimsel Sinir Ağı Mimarisini oluşturan katmanlar

Giriş (input) katmanı

Giriş Katmanı ESA'nın ilk katmanı olarak tanımlanmaktadır. Giriş katmanında veri, üzerinde herhangi bir işlem uygulanmadan ağı aktarılmaktadır. Bu aşamada verinin boyutu önemlidir. Çünkü verinin boyutu büyük seçilirse eğitim süresi ile veri başına düşen test süresini uzatabilmektedir. Veri boyutunun büyük olmasıyla birlikte ağ başarısı da artırılabilir. Bu işlemler sonucunda kullanılacak bellek ihtiyacı da artmaktadır. Giriş veri boyutunun küçük seçilmesi eğitim süresini kısaltmakla birlikte bellek ihtiyacını azaltmaktadır. Bununla birlikte ağın başarı sağlama oranı da düşük olabilmektedir. Bu faktörlerden dolayı veri boyutunun seçilirken dikkat edilmelidir (İnik ve Ülker, 2017).

Evrişim (convolution) katmanı

Evrişim katmanının diğer bir ismi de dönüşüm katmanıdır. Bu katman ESA'nın temelidir. Bu katmanda yapılan dönüşüm işlemi filtreler yardımıyla yapılmaktadır. Filtreler tüm görüntü üzerinde dolaştırılmaktadır. Katmanda kullanılan bu filtreler 2x2, 3x3, 5x5 gibi farklı ebatlarda olabilir. Filtrelerin bu katmandaki görevi ise bir önceki katmandan veri olarak gelen görüntüye evrişim işlemi uygulayarak çıkış verisini meydana getirmektir. Yapılan bu işlemler sonucunda özellik haritası oluşturulur. Özellik haritası ise filtrelerin sahip olduğu farklı özelliklerin belirlendiği kısımlardır

(İnik ve Ülker, 2017). Bu katmanda eğitim sırasında kullanılan her bir filtrenin katsayıları tüm adımlarda tekrarlanmaktadır. Yapılan bu işlem ile birlikte ağ üzerinde bulunan önemli bölgelerin yerleri belirlenmektedir. Elimizde 5x5 ebatlarında renkli bir görüntü olduğunu varsayarsak verilen bu boyuttaki görüntünün giriş matrisi 5x5x3 boyutunda olmaktadır. 3x3 boyutundaki bir filtre ile giriş görüntüsü üzerinde bulunan bütün kareler taranacak biçimde evrişim işlemi gerçekleştirilmektedir. Her bir renk kanalında bulunan değerler ile filtre katsayıları çarpılıp elde edilen değerlerin toplamı alındığında özellik haritası elde edilmektedir. (Tan, 2019).

Düzleştirilmiş doğrusal birim (Rectified Linear Units) katmanı

Evrişim katmanından hemen sonra düleştirilmiş doğrusal birim katmanı gelmektedir. Bu katmana diğer bir ifade ile aktiveleştirme katmanı da denilmektedir. İfade edilen bu katmanın yaptığı işlem kendinden önce gelen katmanda doğrusal olan yapıyı doğrusal olmayan yapıya çevirmektir. Böylece ağın öğrenimi hızlanmaktadır. Aşağıda verilen denklem (3.44) bu katmanın matematiksel olarak ifadesidir. Formülden yola çıkarak katmana etkisi elde olana negatif değerleri sıfıra getirmektir (Tan, 2019).

$$f(x)=\begin{cases} 0 & \text{eğer } x < 0 \\ x & \text{eğer } x > 0 \end{cases} \quad (3.44)$$

Havuzlama (pooling) katmanı

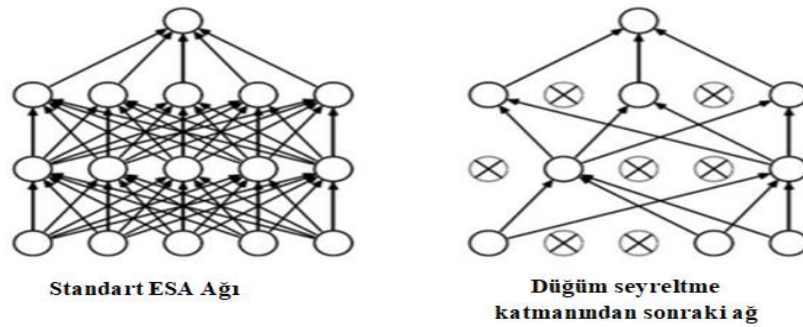
Havuzlama katmanının uygulanmasındaki temel amaç evrişim katmanında kullanılacak verinin boyutunu küçültmektir. Bu katman genel olarak düleştirilmiş doğrusal birim katmanından sonra uygulamaktadır. Bu katmanda meydana gelen işleme ‘‘Aşağı Örnekleme’’ de denir (İnik ve Ülker, 2017). Katman uygulandıktan sonra boyutunda bir küçülme meydana gelmektedir. Bu meydana gelen küçülme ile bilgi kaybı olmaktadır. Bu bilgi kaybı sayesinde bu katmandan sonra gelecek katmanlar için hesaplamalar azalacaktır ve bununla birlikte sistemin ezberlenmesi engellenecektir. Havuzlama katmanında yapılan işlemlerde bazı filtreler kullanılmaktadır. Kullanılan filtreler belli kurallarla görüntü üzerinde gezdirilir ve piksellerin maksimum değerlerini (maksimum havuzlama) ya da piksellerin değerlerinin ortalamasını (ortalama havuzlama) olarak işlemlerini gerçekleştirirler. Bu yapılan iki işlemten maksimum havuzlama daha başarılı sonuçlar verdiği için yaygın olarak kullanılmaktadır (Boureau ve ark., 2010).

Tam bağlantılı (fully connected) katman

ESA mimarisinde havuzlama katmanından hemen sonra tam bağlantılı katmanı gelmektedir. Tam bağlantılı katman kendinden önce gelen katmana tamamen bağlıdır. Mimariler değiştikçe bu katmanın sayısı da farklılık gösterebilmektedir (İnik ve Ülker, 2017).

Düğüm Seyreltme (dropout) katmanı

ESA eğitilirken yapılan eğitim sayılarının fazla olmasından dolayı ağ bazen ezberleme işlemi yapmaktadır. Bu katman ise bu ezberleme işlemini engellemek için kullanılmaktadır. Bu katmanın kullanılmasındaki amaç ise ağda meydana gelen bazı düğümlerin ortadan kaldırılmasıdır (Srivastava ve ark.,2014). Aşağıda verilen Şekil 3.8’de ESA’ya uygulanan düğüm seyreltme işlemi gösterilmiştir (İnik ve Ülker, 2017).



Şekil 3. 8. Standart bir ESA’ya düğüm seyreltme (DropOut) katmanının uygulanması

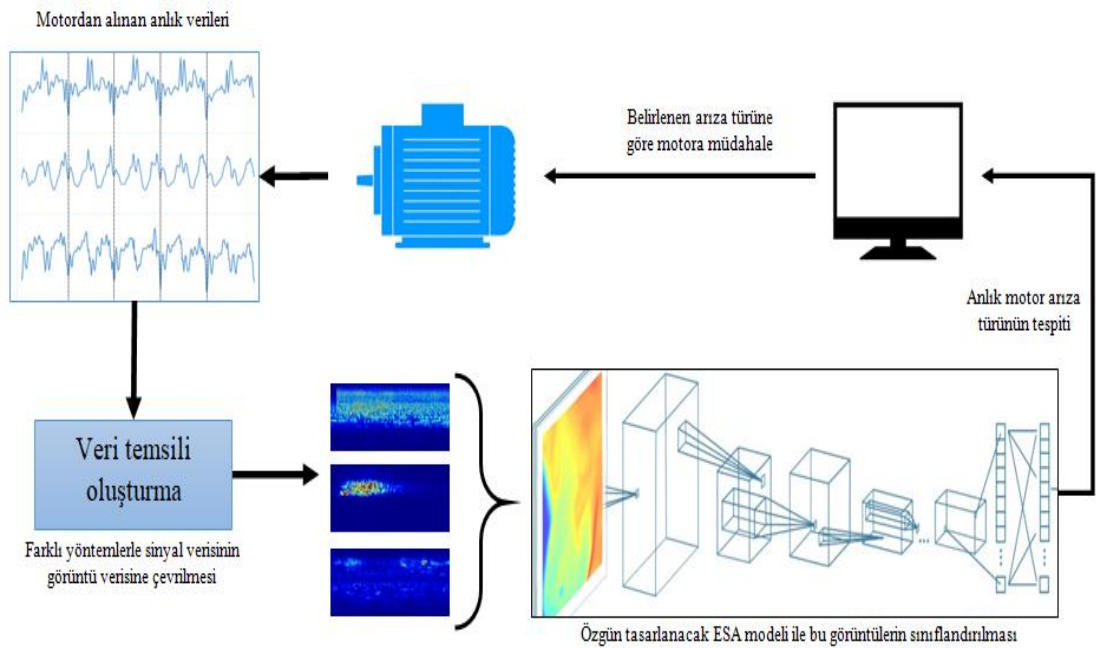
Sınıflandırma (classification) katmanı

ESA mimarisinin bu katmanında sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Sınıflandırma katmanı tam bağlantı katmanından hemen sonra gelmektedir. Sınıflandırma işleminin gerçekleştirileceği nesne sayısı bu katmanın çıkış değerini göstermektedir (İnik ve Ülker, 2017).

3.3. Önerilen Yöntem

Yapılan tez çalışmasında önerilen yöntemin mimarisi Şekil 3.9’da verilmiştir. Şekil 3.9’a bakıldığında ilk etapta motorun durağan çalışması durumunda sinyal verileri elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler belirli periyotlara bölünmüştür. Her bir periyottaki sinyal formundaki veriler görüntü formuna dönüştürülmüştür. Elde edilen görüntü

formundaki verilerden veri seti oluşturulmuştur. Daha sonra farklı katman yapılarından oluşan ESA modelleri tasarlanmıştır. Oluşturulan veri setine en uygun ESA modeli yapılan eğitimler sonucunda elde edilmiştir. Eğitimler Nvidia Geforce RTX 2080 Ti ekran kartlarındaki GPU işlemcileri ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan eğitim işlemlerinden sonra en uygun katman yapısı ve hiper parametrelere sahip ESA modeli elde edilip test aşamasında kullanılmak üzere kaydedilmiştir. Test aşamasında motordan gelen verilere göre bir arıza olması durumunda arızanın sınıf bilgisi elde edilmiştir. Önerilen yöntemin şematik gösterimi Şekil 3.9’da verilmiştir.



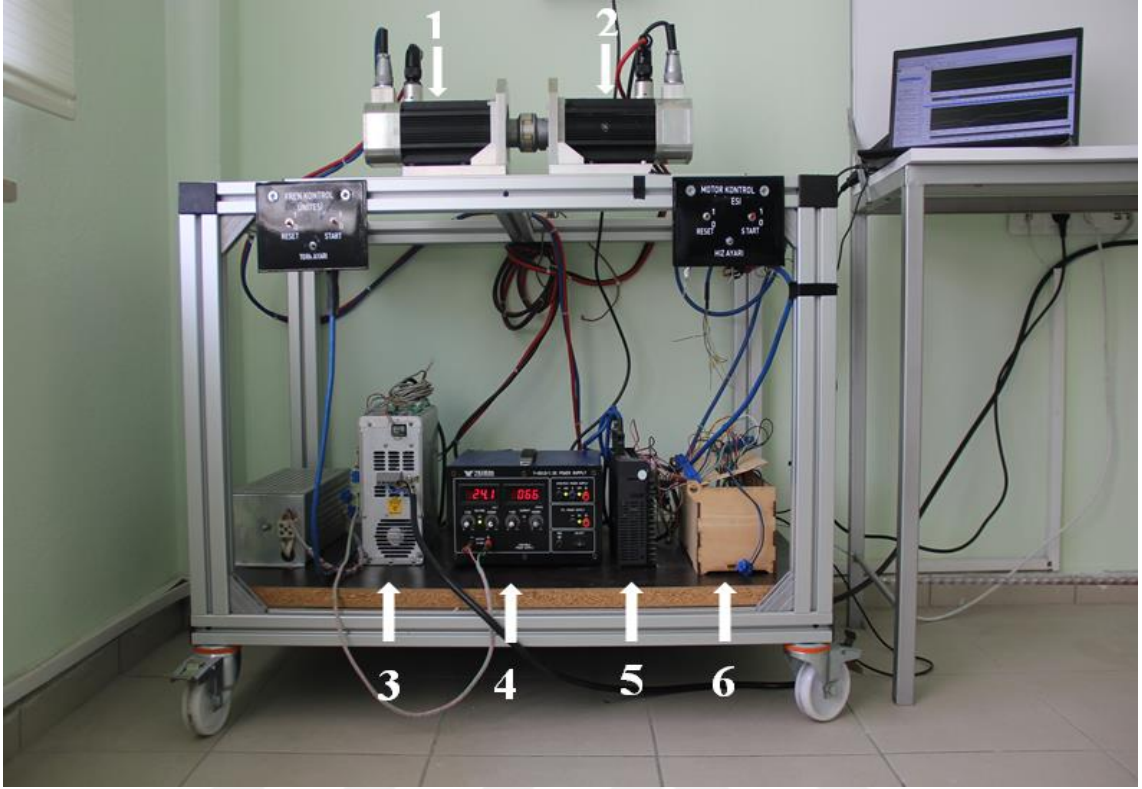
Şekil 3. 9. Önerilen yöntemin mimarisi

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yapılan bu tez çalışmasında; durağan koşullar altında demagnetizasyon arızasının SMSM faz akımına olan etkisi ESA yöntemi ile incelenmiştir. Bu kapsamda öncelikle deney düzeneği hazırlanmış ve motor arıza verileri alınmıştır. Daha sonra sağlıklı ve arızalı motor sinyal verilerinin sınıflandırılması için yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti, motorun zamana karşı akım sinyal verisinin 32x32x3 boyutunda görüntü formuna dönüştürülerek elde edilmiştir. Sınıflandırma işlemi için birden fazla ESA modeli tasarlanmış olup bunlar içerisinde en iyi performansı sergileyen model seçilmiştir. Bu ESA modellerinin eğitilmesi için MATLAB 2021Ra yazılımının derin öğrenme aracı kullanılmıştır. Yapılan tüm eğitim ve test işlemleri Nvidia GTX 2080Ti ekran kartına sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Modellerin başarı ölçütleri Karışıklık Matrisi (Confusion Matrixi) kullanılarak doğruluk değerlerine göre yapılmıştır. Bu bölümde deney düzeneği, veri toplama, demagnetizasyon arızasının oluşturulması, ESA modelinin eğitim aşamasındaki elde ettiği yakınsama grafiği ve test aşamasında elde ettiği karışıklık matrisi verilmiştir.

4.1. Deney Düzeneği ve Veri Toplama

Yapılan tez çalışmasında verilerin elde edilmesi için Şekil 4.1’de yer alan deney düzeneği kullanılmıştır. Deney düzeneğinde aynı anda 2 farklı motor kullanılmaktadır. Bu motorların mil yükseklikleri aynıdır ve aynı doğrultuda birbirlerine kolay akuple olmaktadır.



Şekil 4. 1. Deney düzeneği (1-Motor, 2-Yük, 3-Yük sürücüsü, 4-Güç kaynağı, 5-Motor sürücüsü, 6-Veri toplayıcı)

Deneyisel çalışma kısmında 3 adet özdeş motor kullanılmıştır. Kullanılan bu motorlar; 1,2 kW mil gücü, 8 kutuplu, nominal torku 4 Nm, 230 VAA ve nominal hızı 3000 d/d özelliklerine sahip motorlardır. Kullanılan bu motorlardan ikisi motor olarak kapalı çevrim hız kontrol modunda kullanılmıştır. Diğer motor ise sistemin yüklenmesinde kapalı çevrim tork kontrol modunda fren olarak kullanılmıştır. Fren kontrolünde TDE Macno firmasına ait OPD12 motor sürücüsü kullanılmıştır. Motor için ise FEMSAN 8 SS servo motor sürücü kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmada veri toplama işleminde National Instrument firmasına ait cDAQ-9174 kabini ve modülleri kullanılmıştır. Şekil 4.2’de cDAQ-9174 kabinive NI9229 örneği verilmiştir. Bu kabinde 4 adet slot bulunmaktadır.



Şekil 4.2. cDAQ-9174 kabini ve örnek modül (NI9227)

Deneysel olarak veri toplama işleminde akım ölçümünde NI9227 akım modülü, motor 3 faz gerilim değerleri ölçümünde NI9225 ve sürücü üzerinden 0-10V DA gerilim bilgisi olarak okunan hız, ve tork sensörlerinin çıkışının bağlı olduğu NI9234 gerilim modülü kullanılmıştır. Bu modüllerin teknik özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Modüllerin teknik özellikleri

Modül Adı	Voltaj Değeri	Kanal Sayısı	Örnekleme Hızı	Çözünürlük
NI9227 Akım Modülü	$\pm 5A$	4	50 s/ch	24 Bit
NI9225 Gerilim Modülü	300V	3	50 s/ch	24 Bit
NI9234 Gerilim Modülü	$\pm 5V$	4	50 s/ch	24 Bit

Veri toplama işleminde; motor durağan çalışma koşullarında 750 d/d, 1500 d/d, 3000 d/d olmak üzere farklı hızlarda ve ayrıca her hız durumu için motor boşta ve nominal

yükün %25, %50, %75, %100 ve %125 değerlerinde yüklenmesi ile her durum için 25600 Hz örnekleme frekansı ile her kanaldan eş zamanlı veri alacak şekilde çalıştırılmıştır. National Instrument firmasına ait cDAQ-9174 kabini ve modülleri kullanılarak motor akım, hız ve tork bilgileri elde edilmiştir.

4.2. Demagnetizasyon Arızasının Oluşturulması

Yapılan tezin deneysel çalışma kısmında mıknatısları rotor yüzeyine yerleştirilmiş rotor yapısına sahip 8 kutuplu motor kullanılmıştır. Rotor yapısında NIM-10000H kodlu NdFeB mıknatıslar kullanılmıştır. 2 adet mıknatıs ise 1 kutbu oluşturmaktadır. SMSM’de demagnetizasyon arızası 2 farklı oranda meydana getirilmiştir.

İlk olarak rotorda bir kutbu meydana getiren 2 tane mıknatıs 200 °C’de 5 saatlik bir süre ile ısıtılarak manyetik akı yoğunluğu 3,02 kGauss değerinden 0 kGauss değerine indirilmiş ve rotora monte yapılmıştır, böylelikle %12,5’lik bir demagnetizasyon arızası oluşturulmuştur.

Isıl işlem den önce ve sonra mıknatısların sahip olduğu akı yoğunluğu F.W.BELL firmasının Gauss/TeslaMeter (Model 5070) cihazı ile Standart Enine Prob kullanarak tespit edilmiştir.

İkinci olarak motorda yaklaşık %18.75’lik demagnetizasyon arızası oluşturulmuştur. Bu arıza rotorda ısıl bir işlem yapılarak demagnetize edilmiş kutba komşu olan kutbun 1 mıknatısı çıkarılmıştır ve rotora yeniden balans edilip yerine takılmıştır. Yapılan bu işlemle toplamda 1,5 kutup demagnetize edilerek motor 6.5 kutuba düşürülerek çalıştırılmıştır. Bu işlemle birlikte motorda yaklaşık %18.75’lik demagnetizasyon arızası oluşturulmuştur.

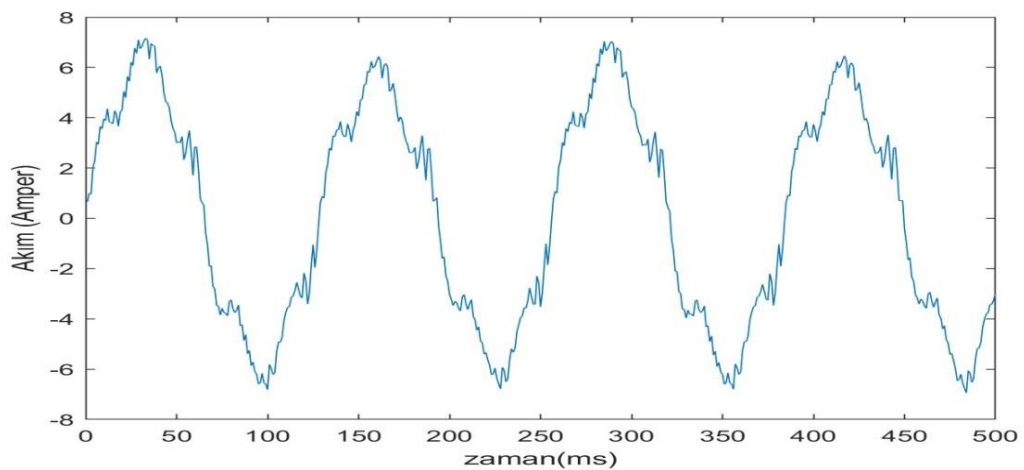
4.3. Verilerin Oluşturulması

Bu çalışmada SMSM’nin durağan çalışma koşullarında demagnetizasyon arızasının tespiti amaçlanmıştır. Bu amaçla 1,2 kW mil gücü, 8 kutuplu, nominal torku 4 Nm, 230 VAA ve nominal hızı 3000 d/d özelliklerine sahip özdeş motorlar kullanılmıştır. Bu motorların 2 tanesi veri alma işleminde diğer özdeş motor ise motorların yüklenmesinde kullanılmıştır. Motorlardan bir tanesi demagnetize edilmiş mıknatısların kullanılması ile yapay demagnetizasyon arızalı hale getirilmiştir. Motorlar veri alma işleminden önce 20-30 dakika arası normal yükünde çalıştırılarak termal rejime ulaştırılmıştır. Daha

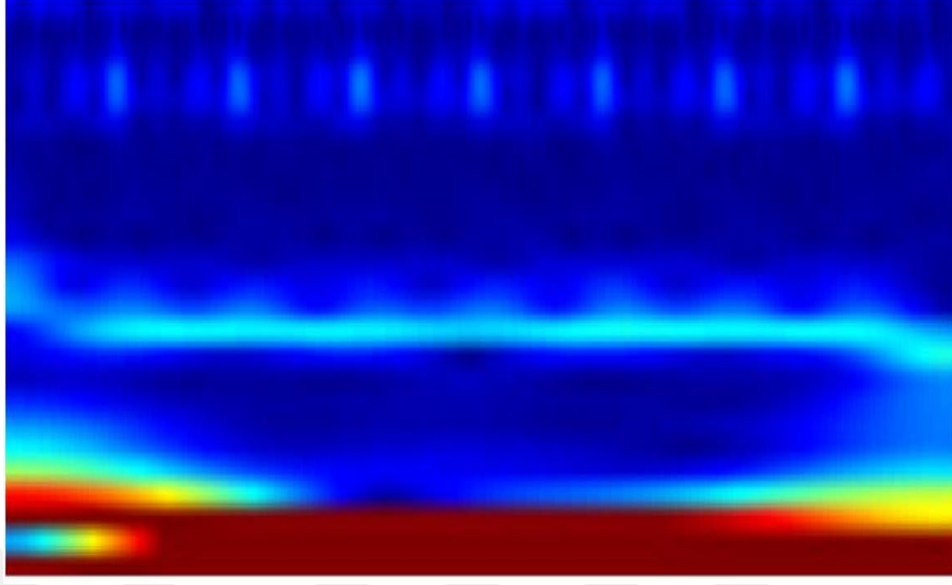
sonra sağlam ve arızalı motorlar farklı hız (750, 1500 ve 3000 d/d) ve yüklerde (boş, %25, %50, %75, %100 ve %125 nominal yükte) çalıştırılarak motorun 3 faz akımı veri toplama düzeneği ile kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veriler toplam 6 sınıftan oluşturulmuştur. Sınıflar, Motor Aktif 750 d/d (MA750), Motor Aktif 1500 d/d (MA1500), Motor Aktif 3000 d/d (MA3000), Motor Pasif 750 d/d (MP750), Motor Pasif 1500 d/d (MP1500), Motor Pasif 3000 d/d (MP3000) olarak isimlendirilmektedir. Bu her bir sınıfa ait sinyal verileri scalogram yöntemi ile görüntü tipine dönüştürülerek kullanılacaktır. Scolagram, bir sinyalin SDD'nin, zaman ve frekansın bir fonksiyonu olarak çizilen mutlak değeridir. Dönüştürme işlemi için ise Matlab R2020b yazılımının Wavelet Toolbox kullanılacaktır. Bu veri setinin dönüştürülmesi ile elde edilecek görüntü boyutu 32x32x3-227x227x3 aralığında uygun bir boyuta dönüştürülecektir. Veri setinin %80'i eğitim için %10'u doğrulama işlemi için geriye kalan %10 ise test işlemi için kullanılmıştır.

4.4. Veri Temsilinin Oluşturulması

Deneysel olarak elde edilen akım verileri MATLAB programında ara yüz oluşturularak eşdeğer ebatlarda/periyotlarda parçalara ayrılmıştır. Bu şekilde elde edilen 500 ms'lik sinyaller Matlab R2021a yazılımının scalogram yöntemi ile görüntü formuna çevrilmiştir. Şekil 4.3'de 0-500 ms aralığında zamana göre akım sinyali verilmiştir. Bu sinyalin scalogram yöntemi ile görüntüye dönüştürülmesi Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4. 3. Elde edilen akım verisinin 0-500 ms sinyal formundaki örnek gösterimi



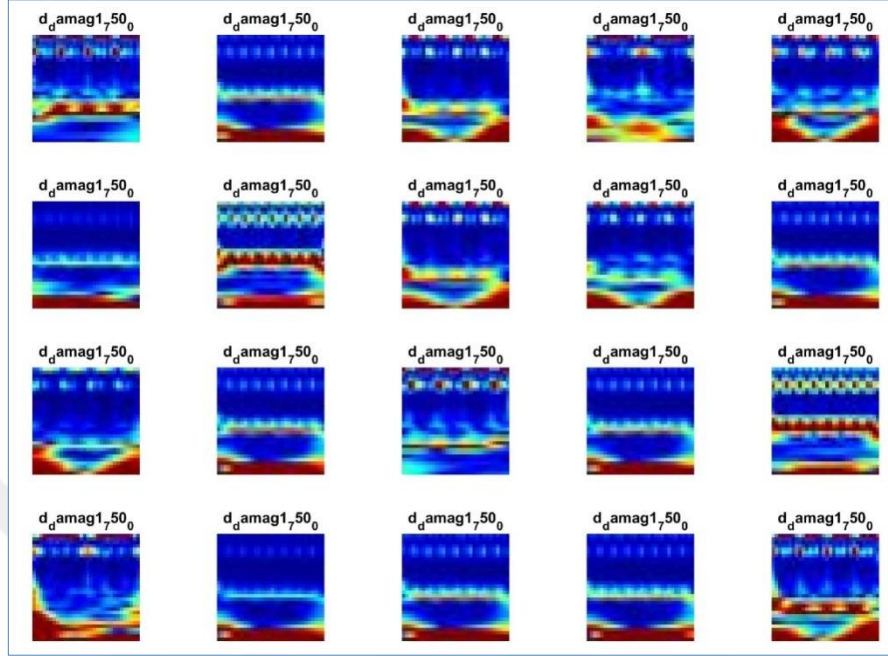
Şekil 4. 4. 0-500 ms'deki verinin sinyal formundan görüntü formuna dönüştürülmesi ile elde edilen görüntü

Şekil 4.4'te örnek gösterimi verilen görüntüde olduğu gibi toplam 63 sınıftan oluşan ve her bir sınıf ortalama 200 görüntüden oluşan bir veri seti elde edilmiştir. Bu veri setindeki sınıflar ve her bir sınıftaki görüntü sayısı Tablo 4.2'de verilmiştir

Tablo 4. 2. Tez kapsamında oluşturulan veri setine ait sınıflar ve her bir veri setindeki görüntü sayısı

Sınıf No	Sınıf Adı	Görüntü Sayısı	Sınıf No	Sınıf Adı	Görüntü Sayısı	Sınıf No	Sınıf Adı	Görüntü Sayısı
1	d_demag1_750_0	199	22	d_demag2_1500_0	199	43	d_saglam_1500_0	199
2	d_demag1_750_25	199	23	d_demag2_1500_100	199	44	d_saglam_1500_100	199
3	d_demag1_1500_0	199	24	d_demag2_1500_125	199	45	d_saglam_1500_125	199
4	d_demag1_1500_100	199	25	d_demag2_1500_25	199	46	d_saglam_1500_25	199
5	d_demag1_1500_125	199	26	d_demag2_1500_50	199	47	d_saglam_1500_50	199
6	d_demag1_1500_25	199	27	d_demag2_1500_75	199	48	d_saglam_1500_75	199
7	d_demag1_1500_50	199	28	d_demag2_3000_0	199	49	d_saglam_3000_0	199
8	d_demag1_1500_75	199	29	d_demag2_3000_100	199	50	d_saglam_3000_100	199
9	d_demag1_3000_0	199	30	d_demag2_3000_125	199	51	d_saglam_3000_125	199
10	d_demag1_3000_100	199	31	d_demag2_3000_25	199	52	d_saglam_3000_25	199
11	d_demag1_3000_125	199	32	d_demag2_3000_50	199	53	d_saglam_3000_50	199
12	d_demag1_3000_25	199	33	d_demag2_3000_75	199	54	d_saglam_3000_75	122
13	d_demag1_3000_50	199	34	d_demag2_750_0	199	55	d_saglam_750_0	199
14	d_demag1_3000_75	199	35	d_demag2_750_100	61	56	d_saglam_750_100	199
15	d_demag1_750_100	199	36	d_demag2_750_125	131	57	d_saglam_750_125	199
16	d_demag1_750_125	199	37	d_demag2_750_25	199	58	d_saglam_750_25	199
17	d_demag1_750_50	137	38	d_demag2_750_50	112	59	d_saglam_750_50	199
18	d_demag1_750_75	199	39	d_demag2_750_75	199	60	d_saglam_750_75	199
19	d_demag1_ayrik_1500	199	40	d_demag2_ayrik_1500	199	61	d_saglam_ayrik_1500	199
20	d_demag1_ayrik_3000	199	41	d_demag2_ayrik_3000	199	62	d_saglam_ayrik_3000	199
21	d_demag1_ayrik_750	199	42	d_demag2_ayrik_750	199	63	d_saglam_ayrik_750	199

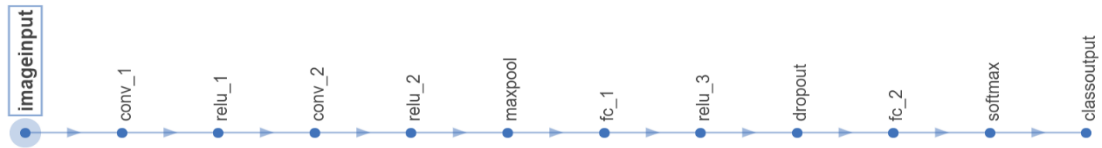
Tez kapsamında oluşturulan veri setindeki bazı sınıflardan alınan görüntülerin örnek bir gösterimi Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4. 5. Oluşturulan veri setinde seçilen bazı sınıflara ait örnek görüntüler

4.5. Önerilen Evrişimsel Sinir Ağı Modeli

Bu tez kapsamında önerilen ESA modelinin mimarisi Şekil 4.6' da verilmiştir. Şekil 4.6'ya bakıldığında modelin toplam 12 katmandan oluştuğu görülmektedir. Mimari temel olarak 2 tane evrişim katmanı 1 tane havuzlama katmanı ve 2 tane tam bağlantılı katmandan oluşmaktadır. Modelin her bir katmanında kullanılan parametreler ise Tablo 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4. 6. Yapılan tez çalışmasında önerilen ESA modelinin mimarisi

Tablo 4. 3. Önerilen ESA modelinin parametre özellikleri

Katman Sırası	Katman Adı	Boyut	Parametreler	Toplam Parametre Sayısı
1	Giriş Katmanı	32x32x3	-	0
2	Evrişim Katmanı_1	30x30x128	3x3x3x128+128	3584
3	ReLU Katmanı_1	28x28x128	-	0
4	Evrişim Katmanı_2	28x28x128	3x3x128x128+128	147584
5	ReLU Katmanı_2	28x28x128	-	0
6	Havuzlama Katmanı	14x14x128	-	0
7	Tam Bağlantı Katmanı_1	1x1x512	512x25088+512	12845568
8	ReLU Katmanı_3	1x1x512	-	0
9	Düğüm Seyreltme Katmanı	1x1x512	-	0
10	Tam Bağlantı Katmanı_2	1x1x63	63x512+63	32319
11	Softmax	1x1x63	-	0
12	Sınıflandırma Katmanı	1x1x63	-	0

4.5.1. Evrişimsel Sinir Ağı modelinin başarısı için performans kriterleri

Geliştirilen ESA modelinin performansı karışıklık matrisi kullanarak elde edilmiştir. Karışıklık matrisini kullanarak modelimizin başarısını yapmış olduğumuz işlem doğrultusunda ayrıntılı olarak değerlendirebiliriz. Kısacası karışıklık matrisi ile verileri düzenleyip bu veriler üzerinde hesaplamalar yapılabilir. Bu noktada performans kriterlerini doğru bir şekilde yorumlamamız gerekmektedir. Aşağıda karışıklık matrisi ile birlikte performans kriterleri ve denklemleri verilmiştir (Kulkarni ve Batarseh, 2020; Anonim, 2017).

KARIŞIKLIK MATRİSİ		TAHMİN EDİLEN DEĞER	
		Pozitif	Negatif
GERÇEK DEĞER	Pozitif	Doğru Pozitif (TP)	Yanlış Pozitif (FP)
	Negatif	Yanlış Negatif (FN)	Doğru Negatif (TN)

Şekil 4. 7. Karışıklık matrisi

Karışıklık matrisinde bazı ifadeler vardır. Bunlar; pozitif değerler (gerçek pozitif, yanlış pozitif), negatif değerler (gerçek negatif değerler, yanlış negatif değerler) olarak karşımıza çıkmaktadır.

Doğru pozitifler (TP): Geçek pozitifler tahmin edilen değer ve gerçek değer 1 olduğu durumlardır.

Doğru negatifler (TN): Gerçek negatifler tahmin edilen değer ve gerçek değer 0 olduğu durumdur.

Yanlış pozitifler (FP): Yanlış pozitifler gerçek değer 0, tahmin edilen değer 1 olduğu durumlardır.

Yanlış negatifler (FN): Yanlış negatifler gerçek değer 1 tahmin edilen değer 0 olduğu durumlardır.

Yapılan modelin performans kriterlerini hesaplamak için bazı ifadelerin bilinmesi gerekmektedir. Bunlar;

Doğruluk oranı (Accuracy Rate): Genel olarak doğruluk oranı ortaya koyulan sınıflayıcının doğru tahmininin ne sıklıkla olduğunu ifadesidir.

$$\text{Doğruluk oranı} = (TP+TN)/(TP+TN+FP+FN)$$

Hassasiyet (Precision): Oluşturulan bütün sınıflardan doğru olarak tahmin edilen değerlerin ölçüsüdür. Hassasiyet oldukça yüksek olmalıdır.

$$\text{Hassasiyet} = TP/TP+FP$$

F puanı (F Score): F puanı hassasiyetin ve gerçek pozitif değerlerin oranının harmonik ortalaması olarak ifade edilir. Elde edilen sınıflandırıcıların birbirleriyle kıyaslanmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Sınıflandırıcılarının performansın bir ölçüsüdür.

$$\text{F Puanı} = 2 * \text{Hassasiyet} * \text{Gerçek Pozitif Değerlerin Oranı} / \text{Hassasiyet} + \text{Gerçek Pozitif Değerlerin Oranı}$$

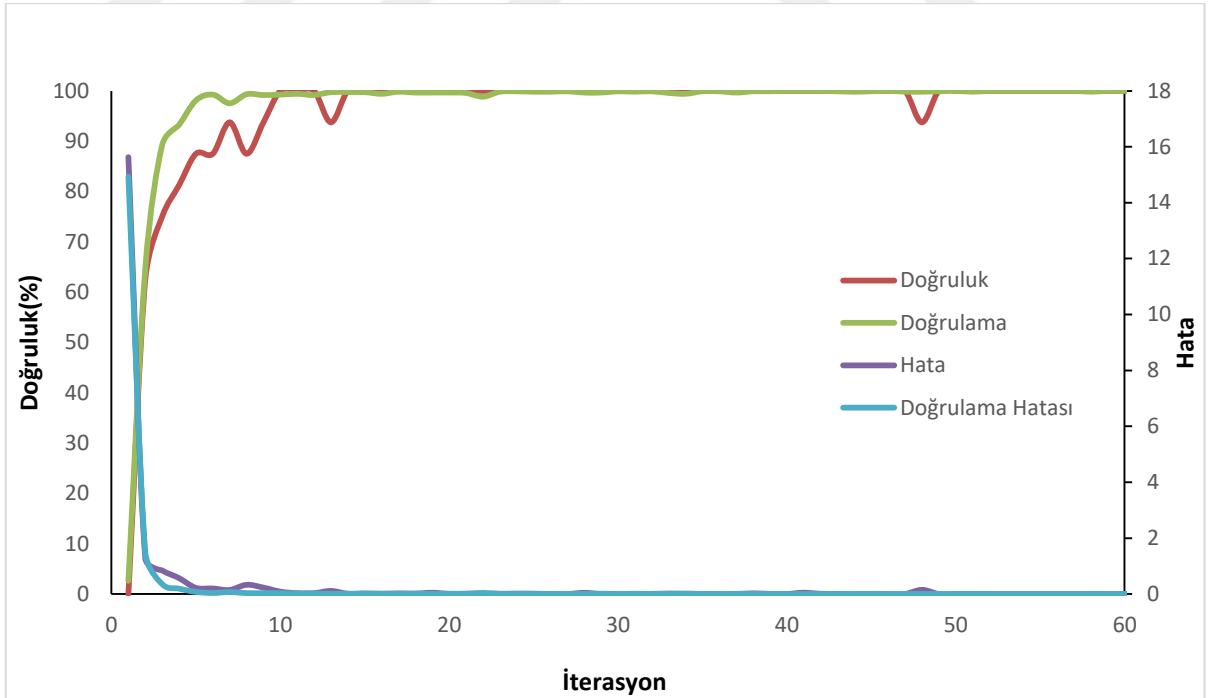
Yaygınlık (Prevalence): Yapılan tahminlerin sonucunda hangi sıklıkla 1 değerinin bulunma ölçüsünü ifade eder.

$$\text{Yaygınlık} = TP/(TP+TN+FP+FN)$$

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Elektrik motorlarında meydana gelen arızaların tespitinde birçok sinyal kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın kullanılanı akım ve gerilim sinyalleridir. Yapılan tez çalışmasında SMSM' meydana gelen demagnetizasyon arızası akım sinyali analiz edilerek derin öğrenme yönteminin de ESA mimarisi ile tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasında sağlam motor ile toplam kutbun %12.5 ve %18.75 oranlarında mıknasiyetlik özelliği kaybettirilmiş motorlar kullanılmıştır. Kullanılan bu motorlar farklı yüklenme koşulları ve hızlar altında çalıştırılmıştır. Sağlam motordan alınan veriler ile demagnetizasyon arızalı motordan alınan veriler ESA mimarisi ile karşılaştırılarak arıza tespiti gerçekleştirilmiştir.

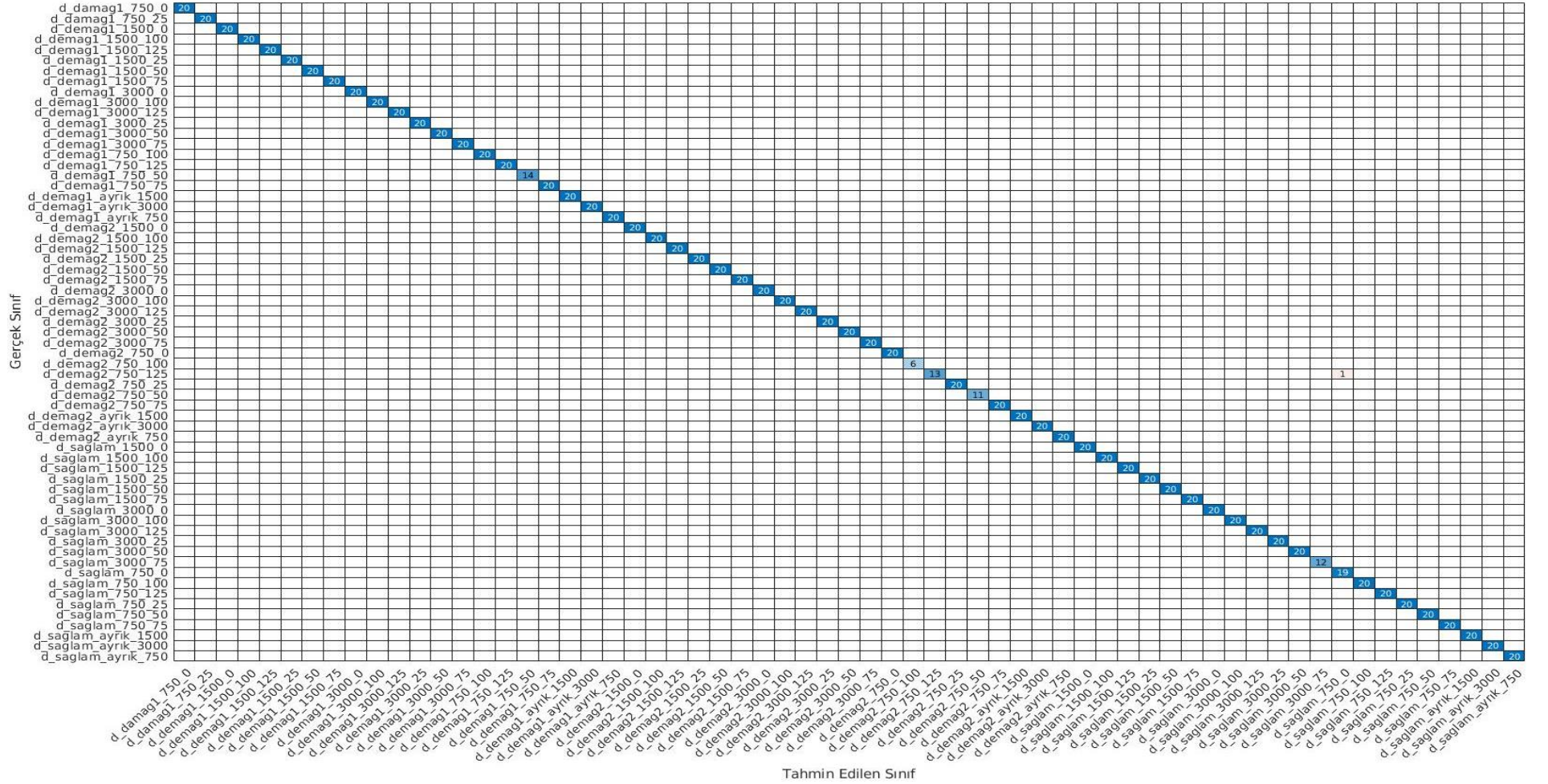
Tez kapsamında geliştirilen ESA modelinin hazırlanan veri seti üzerinde elde ettiği yakınsama grafiği Şekil 5.1'de verilmiştir. ESA modeli veri setinin %80'ni eğitim, %10'u doğrulama ve %10'u test verisi olarak kullanılmıştır. Şekil 5.1'e bakıldığında modelin 10'cu iterasyondan sonra optimum doğruluğa eriştiği görülmektedir.



Şekil 5. 1. ESA modelinin hazırlanan veri seti üzerinde elde ettiği yakınsama grafiği

ESA modelinin test verisi üzerinde elde ettiği karışıklık matrisi Şekil 5.2’de verilmiştir. Şekil 5.2’ye bakıldığında matrisin sol tarafı gerçek sınıfı alt tarafı ise tahmin edilen sınıfı ifade etmektedir. Karışıklık matrisine bakıldığında demag2_750_125 sınıfı dışındaki bütün sınıfları doğru bir şekilde etiketlediği görölmüştür. Modelin ortalama başarısı ise %99,92 olarak elde edilmiştir.





Şekil 5. 2. ESA modelinin test verisi üzerinde elde ettiği karışıklık matrisi

Özetle bu tez çalışmasında SMSM’de meydana gelen arızalardan demagnetizasyon arızasının tespiti gerçekleştirilmiştir. Arıza tespitinde ise motor akım verisi kullanılmıştır. SMSM’nin rotorda bulunan mıknatısların farklı oranlarda demagnetize edilmesi ile oluşturulan arızalı motorların verileri sağlam motor verileri ile kıyaslanmıştır. Sağlam ve arızalı motorlara ait akım verileri farklı yük ve farklı hız koşullarında elde edilmiştir. Veri toplama için Labview programında oluşturulan ara yüzden faydalanılmıştır. Verilerin işlenmesinde ise son zamanlarda arıza tespitinde sıklıkla tercih edilen derin öğrenmenin ESA mimarisi kullanılmıştır. Çalışma için yeni bir ESA modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen ESA modeli sadece 1 sınıfta hata yaparak %99,92 başarı ile hata tespitini gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar ESA modelinin iyi bir eğitim modeli ile elektrik motorlarında arıza tespitinde yüksek doğruluk oranı sağladığını göstermektedir.

İleriye yönelik yapılacak olan çalışmalarda ESA modeli kullanılarak durağan koşullara alternatif olarak dinamik çalışma koşulları altında çalışan SMSM’de demagnetizasyon arızası tespit edilebilir. Aynı zamanda ESA modeli ile gerilim, titreşim ve tork verileri kullanılarak da demagnetizasyon arızası tespiti yapılabilir. Ayrıca bu çalışma da önerilen yöntem sadece SMSM’ler için değil diğer motor tipleri içinde hata tespitinde kullanılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Açıkgöz, H., 2010. Vektör Denetim Yöntemi Ve Doğrudan Moment Denetim Yöntemi Uygulanan Bir Asenkron Motorda Hız Denetim Performanslarının Karşılaştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü/Elektrik Eğitimi, Elazığ.
- Akar, M. Ve Doğan, Z., 2012. Asenkron Motorlarda Akım ve Titreşim Verisine Dayalı Kestirimci Bakım. Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Sonuç Raporu, Tokat.
- Akar, M., 2009. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Yapay Zeka Yöntemleri ile Mekanik Hataların Teşhisi. (Doktora Tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü/Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi, Sakarya.
- Akpınar, B., 2019. Görüntü Sınıflandırma İçin Derin Öğrenme İle Bayeşçi Derin Öğrenme Yöntemlerinin Karşılaştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü/ İstatistik Anabilim Dalı, Afyonkarahisar.
- Akyazı, Ö., Küçükali, M., Akpınar, A. S., 2011. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Hız Denetiminin Farklı Bulanık Üyelik Fonksiyonları Kullanılarak Gerçekleştirilmesi. Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, Elazığ.
- Albawi, S., Mohammed, T.A., Al-Zawi, S., 2017. Understanding of a Convolutional Neural Network. International Engineering and Technology Conference, Antalya.
- Anonim, 2017. Karışıklık Matrisi (Confusion Matrix), <https://veribilimcisi.com/2017/07/18/karisiklik-matrisi-nedir/>-(28.12.2021).
- Bazurto, A.J., Quispe, E.C., Mendoza, R. C., 2016. Causes and Failures Classification of Industrial Electric Motor. IEEE Andescon, Peru.
- Bengio, Y., 2009. Learning Deep Architectures for AI. Montreal University, 1-130, Canada.
- Boureau, Y., Ponce, J., Lecun, Y., 2010. A Theoretical Analysis of Feature Pooling in Visual Recognition. Appearing in Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning, Israel
- Chang, L., Wang, S., Tsai, M., 2020. Demagnetization Fault Diagnosis of a PMSM Using Auto-Encoder and K-Means Clustering. Journal Of Energies, 13(17), 1-13.
- Çıra, F., 2017a. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Stator Kısa Devre Arızasının Tespiti Ve Arıza Şiddetinin Otomatik Olarak Belirlenmesi. (Doktora Tezi), İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü/ Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Malatya.
- Çıra, F., 2017b. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlarda Meydana Gelen Arızaların İncelenmesi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6 (1), 17-22.

- Çıra, F., 2020. Aşırı Öğrenme Makinası Yöntemi ile Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Moment Verileri Kullanılarak Sargı İzolasyonu Arızasının Tespiti. EMO Bilimsel Dergisi, 9(2), 7-15.
- Deng, L., Yu, D., 2013. Deep Learning: Methods and Applications. USA, 197-387, Redmond USA.
- Djerdir, A., Farooq, J., Rezig, A., Miraoui, A., 2010. Faults in Permanent Magnet Traction Motors: State of the Art and Modelling Approaches. IEEE Power and Energy Society General Meeting, ABD.
- Ebrahimi, B., Faiz, J., Roshtkhari, M., 2009. Static-, Dynamic-, and Mixed-Eccentricity Fault Diagnoses in Permanent-Magnet Synchronous Motors. IEEE Transactions On Industrial Electronics, 56(8), 4727-4739.
- Eker, M. ve Akar, M., 2013. A Novel Approach Demagnetization Fault Diagnosis In Permanent Magnet Synchronous Motor, Journal Of New Engineering And Natural Science, 1, 1-13.
- Eker, M., 2013. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Demagnetizasyon Ve Eksenden Kaçıklık Arızalarının Tespiti. (Yüksek Lisans Tezi), Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü/ Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Tokat.
- Eker, M., Akar, M., 2016. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Eksenden Kaçıklık Arızasının Titreşim Sinyali ile Tespiti. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 13, 87-102.
- Faten, G., Lassaad, S., 2010. Speed Sensorless IFOC of PMSM Based On Adaptive Luenberger Observer, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering, 4(8), 1256-1262.
- Fırıldak, K. ve Talu, M.F., 2019. Investigation of Transfer Learning Approaches Used Convolution Neural Networks. Anatolian Journal of Computer Science, 4(2), 88-9.
- Grubic, S., Aller, J.M., Lu, B., Habetler, T.G., 2008. A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems. IEEE Transactions On Industrial Electronics, 55(12), 4127-4136.
- Gürsoy, M.Ü., Çolak, U.C., Gökçe, H.M., Akkulak, C., Ötleş, S., 2019. Endüstri İçin Kestirimci Bakım, International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry, 3(1), 56-66.
- Hendershot, J.R., Miller, T.J.E., 1994 Design of Brushless Permanent Magnet Motors, Clarendon Press, Oxford,
- Ishikawa, T. ve Igarashi N., 2019. Failure Diagnosis of Demagnetization in Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Using Vibration Characteristics. Journal Of Applied Sciences, 9(15), 1-13.

- İnik, Ö. ve Ülker, E., 2017. Derin Öğrenme ve Görüntü Analizinde Kullanılan Derin Öğrenme Modelleri. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 6(3), 85-104.
- Jeong, H., Lee, H and Kim, S.W., 2018. Classification and Detection of Demagnetization and Inter-Turn Short Circuit Faults in IPMSMs by Using Convolutional Neural Networks. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, ABD.
- Kao, I., Wang, W., Lai, Y., Perng, J., 2019. Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor Fault Diagnosis Based on Learning, 68(2), 310-324.
- Karpat, F., Klay, O.C., Dirik, A.E., Doğan, O., Korcuklu, B., Yüce, C., 2021. Convolutional Neural Networks Based Rolling Bearing Fault Classification Under Variable Operating Conditions. *International Conference on Innovations in Intelligent Systems and Applications*, Türkiye.
- Kim, K., Lim, S., Koo, D., 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.
- Koca, Y.B., Ünsal, A., 2017. Asenkron Motorların Elektriksel ve Mekaniksel Arızalarının Değerlendirilmesi. *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 7(2), 37-46.
- Kocabıyık, H., 2019. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Uzay Vektör Modülasyonlu Alan Yönlendirme Ve Doğrudan Moment Kontrolünün Benzetim Ve Analizi. (Yüksek Lisans Tezi), Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü/Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.
- Kulkarni, A., Chong, D., Batarseh, F.A., 2020. 5 - Foundations Of Data İmbalance And Solutions For A Data Democracy. *Data Democracy*. 83-106.
- Kumar, K.V., Kumar, S.S., Praveena, B., John, J.P., Paul, J.E., 2010. Soft Computing Based Fault Diagnosis. *IEEE Second International conference on Computing, Communication and Networking Technologies*, Hindistan.
- Kumar, P. ve Hati, A.S., 2022. Dilated Convolutional Neural Network Based Model For Bearing Faults And Broken Rotor Bar Detection İn Squirrel Cage İnduction Motors. *Expert Systems With Applications*, 191, 1-12.
- Lale, T., 2018. Stator Kısa Devre Arızasının Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Performansına Etkilerinin Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü/ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır.
- LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. 2015. Deep Laerning, *Nature* 521, 436–444.
- Lee, H., Jeong, H., and Kim, S.W., 2019. Detection of Interturn Short-Circuit Fault and Demagnetization Fault in IPMSM by 1-D Convolutional Neural Network. *IEEE PES Asia - Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Çin.
- Maraaba, L.S., Milhem, A.S., Nemer, I.A., Al-Duwaish, H., Abıdo, M.A., 2020. Convolutional Neural Network-Based Inter-Turn Fault Diagnosis in LSPMSMs. *IEEE Jornal of Access*, 8.

- Minervini, M., Hausman, S., Frosini, L., 2021. Transfer Learning Technique for Automatic Bearing Fault Diagnosis in Induction Motors. IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, ABD.
- Moosavi, S.S., Djerdir, A., Amirat, Y.A., Haburi, D.A., 2015. Demagnetization Fault Diagnosis İn Permanent Magnet Synchronous Motors: A Review Of State-Of-the-Art. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 391, 203-212.
- Nandi, A., Biswas, S., Samanta, K., Roy, S.S., Chatterjee, S., 2019. Diagnosis of Induction Motor Faults Using Frequency Occurrence Image Plots—A Deep Learning Approach. IEEE International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering, Hindistan.
- Nandi, S., Toliyat, H.A. and Li, X., 2005. Condition Monitoring And Fault Diagnosis Of Electrical Machines-A Review. IEEE Transactions On Energy Conversion, 20 (4), 719-729.
- Nirowski, G., 1990. New permanent-field synchronous motor with integrated inverters. Rec. ICEM, MIT, Cambridge, Pt. 1, 124-131.
- Öksüztepe, E., 2008. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Algılayıcısız Kontrolü. (Doktora Tezi), Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü/Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ.
- Rajagopalan, S., Roux, W.L., Habetler, T. G. and Harley, R. G., 2007. Dynamic eccentricity and Demagnetized Rotor Magnet Detection İn Trapezoidal Flux (Brushless Dc) Motors Operating Under Different Load Conditions. IEEE Transactions On Power Electronics, 22(5), 2061-2069.
- Rosero, J., Romeral, L., Ortega, J.A., Urresty, J.C., 2008. Demagnetization Fault Detection By Means Of Hilbert Huang Transform Of The Stator Current Decomposition İn Pmsm. IEEE International Symposium, Birleşik Krallık.
- Rosu, M., Saitz, J., Akkio, A., 2005. Hysteresis Model for Finite-Element Analysis of Permanent-Magnet Demagnetization in a Large Synchronous Motor Under a Fault Condition. IEEE Transactions On Magnetics, 41(6), 2118-2123.
- Ruiz, J.R., Rosero, J.A., Espinosa, A.G., Romeral, L., 2009. Detection of Demagnetization Faults in Permanent-Magnet Synchronous Motors Under Nonstationary Conditions. IEEE Transactions On Magnetics, 45(7), 2961-2969.
- Ruşen, S.E., 2019. Elektrik Motorlarının Verimlilik ve CO2 Emisyon Analizi; Bir Gıda Fabrikası Örneği. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 17, 564-569.
- Sakarya, H., 2009. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar İçin Alan Yönlendirmeli Sürücü Düzeneği Tasarımı Ve Uygulaması. (Yüksek Lisans Tezi), Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü/ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.

- Sakhavi, S., Guan, C., Yan, S., 2018. Learning Temporal Information for Brain-Computer Interface Using Convolutional Neural Networks, *IEEE Transactions On Neural Networks And Learning Systems*, 29(11).
- Schmidt, P.B., Gasperi, M L., Ray, G. and Wijenayake, A.H., 1997. initial rotor angle detection of a nonsalient pole permanent magnetsynchronous machine. *IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS Apos;97.*, Conference Record of the 1997 IEEE, 1, 459-463.
- Srivastava, N., Hinton, G., Krizhevsky, A., Sutskever, I., Salakhutdinov, R., 2014. Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting. *Journal of Machine Learning Research*, 15, 1929-1958.
- Şeker, A., Diri, B., Balık, H.H., 2017. Derin Öğrenme Yöntemleri ve Uygulamaları Hakkında Bir İnceleme, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(3), 47-64.
- Tallam, R.M., Habetler, T.G., Harley, R.G., 2002. Transient Model for Induction Machines With Stator Winding Turn Faults. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 38(3), 632-637.
- Tan, Z., 2019. Derin Öğrenme Yardımıyla Araç Sınıflandırma. (Yüksek Lisans Tezi),Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü/Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ.
- Texas Instruments, 1997. Digital Signal Processing Solution for Permanent Magnet Synchronous Motor, Texas Instruments Application Note Literature Number: 044.
- Thomson, W.,Fenger, M., 2001. Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults, *IEEE Pulpan Paper Industry Conference*, Ontario.
- Torregrossa, D., Khoobroo, A., Fahimi, B., 2012. Prediction of Acoustic Noise and Torque Pulsation in PM Synchronous Machines With Static Eccentricity and Partial Demagnetization Using Field Reconstruction Method. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 59(2), 934-944.
- Wang C., Gong L., Li X., Yu Q., Wang A., Hung P., Zhou X., 2021. SOLAR: Services-Oriented Deep Learning Architectures-Deep Learning as a Service, *IEEE Transactions On Services Computing*, 14(1).
- Wang, C., Prieto, M.D., Romeral, L., Chen, Z., Blaabjerg, F., Liu, X., 2016. Detection of Partial Demagnetization Fault in PMSMs Operating Under Nonstationary Conditions. *IEEE Transactions On Magnetics*, 52(7).
- Wu,G.,Yu,Y.,Yang, J., Chen, Q., Zhou, S., 2021. Numerical Study on the Influence of Non-uniform Demagnetization of Permanent Magnet Synchronous Motor. *Journal of Physics : Conference Series*, Orlando.
- Yu,S. And Tang, R., 2006. Electromagnetic and Mechanical Characterizations of Noise and Vibration in Permanent Magnet Synchronous Machines. *IEEE Transactions On Magnetics* ,42(4), 1335-1338.

Zafarani, M., Göktaş, T., Akın, B., 2015. A Comprehensive Magnet Defect Fault Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors. IEEE Applied Power Electronics Conference and Expo, ABD.



