T.C

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STATOR KISA DEVRE ARIZASININ SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTOR PERFORMANSINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Timur LALE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR

Temmuz-2018

T.C

DİCLE UNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

DİYARBAKIR

Timur LALE tarafından yapılan "Stator Kısa Devre Arızasının Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Performansına Etkilerinin Araştırılması" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Ünvanı	Adı Soyadı
Başkan:	Dr. Öğr. Üyesi Abuzer ÇALIŞKAN
Üye :	Doç. Dr. Bilal GÜMÜŞ
Üye :	Dr. Öğr. Üyesi M. Ali ARSERİM

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 06/07/2018

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

.../...../20

Prof. Dr. Sevtap SÜMER EKER

ENSTİTÜ MÜDÜR V.

(MÜHÜR)

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince her anlamda yardımını, bilimsel katkılarını ve tecrübelerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Bilal GÜMÜŞ'e teşekkür ederim.

Tez çalışmasında karşılaşılan teknik problemlerde gerekli desteği veren Arş.Gör.Dr. Ferhat ÇIRA'ya teşekkür ederim.

Tez çalışmasında 2013/57 numaralı projedeki motorları kullanmama izin verdiği için İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine, laboratuvarlarında çalışma imkânı bulduğum Dicle Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü akademik ve idari personellerine teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

		Sayfa
TEŞEKKÜR……		I
İÇİNDEKİLER…….....		II
ÖZET…….....		IV
ABSTRACT…….....		V
ŞEKİL LİSTESİ…….....		VII
ÇİZELGE LİSTESİ…….		X
KISALTMA VE SİMGELER…….		XI
1.	**GİRİŞ**…….....	1
1.1.	Genel Bilgi……...	1
1.2.	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motordaki Arızalar…….	2
1.2.1.	Sarımlar Arası Kısa Devre Arızası ……..…….	4
1.2.2.	Demagnetize Arızası……	5
1.2.3.	Eksen Kaçıklığı……	6
1.2.4.	Rulman Hasarı……..	7
1.3.	Tezin Amacı…….	7
1.4.	Tezin Yapısı…….	8
2.	**KAYNAK ÖZETLERİ**……..	11
3.	**MATERYAL VE METOT**……	17
3.1.	Stator Sarımlar Arası Kısa Devre Arızalı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Matematiksel Modeli……...	17
3.1.1.	Sağlıklı Durumdaki Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Matematiksel Modeli……..	17
3.1.2.	Stator Sarımlar Arası Kısa Devre Arızası Durumundaki Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Matematiksel Modeli……..	19
3.2.	Stator Sarımlar Arası Kısa Devre Arızası Durumundaki Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Matlab/Simulink'te Benzetim Modelinin Oluşturulması…..	25
3.3.	Deneysel Devre Düzeneği……	30
3.3.1.	Veri Toplama Sistemi……..	30
3.3.2.	Motor ve Yükleme Sistemi……..	32

3.4. Deneylerin Yapılışı…….. 34

3.5. Sinyal İşleme ve Spektral Analiz ile Arıza Analizi……..... 34

3.5.1 Ayrık-Zamanlı Fourier Dönüşümü (DFT)…….... 35

3.5.2 Reel Sinyalin FFT'si…… 36

4. BULGULAR VE TARTIŞMA…….. 37

4.1. Benzetim Modelin Sonuçları..... 37

4.1.1. Sağlıklı Motorun Benzetim Sonuçları..... 37

4.1.2. Kısa Devre Oranı %2 olan Arızalı Motorun Benzetim Sonuçları..... 39

4.1.3. Kısa Devre Oranı %12.5 olan Arızalı Motorun Benzetim Sonuçları..... 40

4.1.4 Kısa Devre Oranı %25 olan Arızalı Motorun Benzetim Sonuçları..... 41

4.1.5. Benzetim Modelinden Elde edilen Moment Verisinin Frekans Düzleminde Analiz Edilmesi..... 46

4.2. Deneysel Düzenekten Elde Edilen sonuçlar..... 48

4.2.1. Sağlıklı SMSM'den Elde Edilen Sonuçlar..... 48

4.2.2. %2 Kısa Devre Arızalı SMSM'nin Deneysel Sonuçları..... 49

4.2.3. %12.5 Kısa Devre Arızalı SMSM'nin Deneysel Sonuçları..... 50

4.2.4. %25 Kısa Devre Arızalı SMSM'nin Deneysel Sonuçları..... 51

4.2.5. Deneysel Çalışmadan Elde edilen Moment Verisinin Frekans Düzleminde Analiz Edilmesi..... 54

5. SONUÇ VE ÖNERİLER……..... 63

6. KAYNAKLAR……..... 69

ÖZGEÇMİŞ……... 75

ÖZET

STATOR KISA DEVRE ARIZASININ SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTOR PERFORMANSINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Timur LALE

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2018

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) son yıllarda özellikle elektrikli araç uygulamalarında, endüstride ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kritik öneme sahip uygulamalarda kullanılan motorların çalışma ömürleri sağlıklı olarak çalışmasına bağlıdır. Motorlarda görülen arızaların önceden tespiti ve neden olduğu etkilerin bilinmesi oldukça önemlidir. Stator sargı yalıtım arızasından kaynaklanan kısa devre arızaları elektrik makinalarında sıkça görülen arıza türlerinden biridir. Özellikle hassas hız ve konum kontrolü gerektiren uygulamalarda sıkça kullanılan bir motor türü olan sürekli mıknatıslı senkron motorda, statorda meydana gelebilecek kısa devre arızaları, arızanın küçük oranlarda olması halinde fark edilemeyebilmektedir. Meydana gelen arızalar büyüyerek beklenmeyen sonuçlar da doğurabilecektir. Bu nedenle, SMSM'da kısa devre arızasının, motor performansı üzerindeki etkisinin analiz edilmesi oldukça kritik ve önemlidir.

Bu tez çalışmasında, vektör kontrollü yüzeysel Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun stator sarımlar arası kısa devre arızasının motorun performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla motorun arızalı ve sağlıklı durum denklemleri kullanılarak Matlab/Simulink ortamında arızalı ve sağlıklı benzetim modelleri oluşturulmuştur. Benzetim modelinde SMSM'nin statorunun tek fazında, sarımlar arasında %2, %12.5, %25 oranında kısa devre olması durumu için üç farklı arıza analizi yapılmıştır. Aynı motorun sağlıklı durumu için oluşturulan benzetim modelinden elde edilen sonuçlar ile üç farklı arızalı durumda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Benzetim modelinde, sarımlar arası kısa devre arızasının artmasına paralel olarak motorun moment verisindeki salınımların arttığı görülmüştür. Aynı şekilde kısa devre arızalı motorun arızalı faz akımı kısa devre arıza şiddetinin artmasına bağlı olarak artmıştır. Bu da SMSM'nin aynı yük altında şebekeden daha çok akım çekmesine neden olmaktadır.

Benzetim modelindeki aynı koşullar deneysel çalışmada da gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile benzetim modelinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmadan ve benzetim modelinden elde edilen sonuçlardan stator sarımlar arası kısa devre arızasının motor performansını düşürdüğü gözlenmiştir.

Hem benzetim modelinde hem de gerçek zamanlı uygulamada geniş bir hız ve yük aralığında moment verisine hızlı Fourier dönüşümü (fft) uygulanarak moment verisi frekans düzleminde analiz edilerek sarımlar arası kısa devre arızasına bağımlı harmonikler tespit edilmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sürekli mıknatıslı senkron motor, Stator kısa devre arızası, Arıza akım analizi

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF STATOR SHORT CIRCUIT FAULTS ON PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR PERFORMANCE

MSc THESIS

Timur LALE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF DICLE

2018

In recent years, permanent magnet synchronous motors (PMSM) have been widely used especially in electric vehicle applications, industrial and other fields. The operating life of motors used in such critical applications depend on running as healthy. It is very important that knowledge of the impact of faults in motors and early detection of faults. Short circuit faults that originated from stator winding insulation failure are one of the most frequent fault types in electrical machines. A type of motor that is commonly used especially in applications requiring precise speed and position control, permanent magnet synchronous motor, short circuit failures that may occur in the stator, may not be noticed if the fault is in small proportions. Failures that occur will grow and produce unexpected results. Therefore, analysis the effect of stator short circuit fault on motor performance is very critical and important.

In this thesis study, it has been investigated that the effects of stator winding inter-turn short circuit fault on vector controlled surface-mounted permanent magnet synchronous motor's performance. For this purpose, healty and faulty simulation models of motor were created in Matlab/Simulink software using the faulty and healthy state equations of the motor. The short-circuit failure severity of 2%, 12.5% and 25% in the single phase of the stator of the PMSM were generated via a simulation model that could be adjusted with respect to fault severity. The results obtained from the simulated model for the healthy condition of the same motor were compared with the results obtained in the case of the faulty. In the simulation model, it was observed that the oscillations in the torque of the motor increased in parallel with the increase of the short circuit fault severity. In the same way, the amplitude of the faulty phase current of the motor with a short circuit is increased due to the increase in the short circuit fault intensity. This causes PMSM to draw more current from the network under the same load.

The same conditions as in the simulated model were also carried out in the experimental work. The results obtained from the experimental work and the results obtained from the simulation model are compared. The results obtained from the experimental study and simulation model showed that inter-turn short-circuit failure reduced motor performance.

In both simulation model and real-time application, a fast Fourier transform (FFT) was applied to moment data in a wide range of speeds and loads, analyzing moment data in frequency plane, trying to detect harmonics dependent on inter-turn short-circuit failure.

Keywords: Permanent magnet synchronous motor, Stator short circuit fault, Fault current analysis

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No		Sayfa
Şekil 1.1.	SMSM'de sınıflandırılan arızalar	3
Şekil 1.2.	Büyük motorlarda meydana gelen arızalar için yapılan anketin sonuçları	3
Şekil 1.3.	SMSM'nin statorun bir fazında meydana gelen sarımlar arası kısa devre arızası	5
Şekil 1.4.	SMSM'lerde sürekli mıknatısların çalışma noktaları	6
Şekil 3.1.	Kısa devre arızasının gösterimi	19
Şekil 3.2.	İs,dq0 stator akımlarının ve İf kısa devre akımın elde edilmesi	26
Şekil 3.3.	Arızalı durumda id akımının elde edilmesi	27
Şekil 3.4.	Arızalı durumda iq akımının elde edilmesi	27
Şekil 3.5.	Arızalı durumda i0 akımının elde edilmesi	28
Şekil 3.6.	Arıza akımı if'nin elde edilmesi	28
Şekil 3.7.	Momentin elde edilmesi	29
Şekil 3.8.	Stator sarımlar arası kısa devre arızalı SMSM'nin gerilim kaynaklı evirici (VSI) sürücülü hız kontrol modelinin Matlab/Simulink benzetimi	29
Şekil 3.9.	(a) Gerilim algılama devresi (b) Akım algılama devresi	31
Şekil 3.10.	Deneysel sistemin şematik gösterimi	33
Şekil 3.11.	Deneysel düzeneğinin görüntüsü	34
Şekil 3.12.	Reel sinyalin FFT spektrumu	36
Şekil 4.1.	Stator gerilimleri (Vabc)	37
Şekil 4.2.	Stator akımları (iabc)	38
Şekil 4.3.	Kısa devre akımı (if)	38
Şekil 4.4.	(a) Geçici ve sürekli durumdaki motor momenti (b) Sürekli durumdaki motor momenti	38
Şekil 4.5.	Stator gerilimleri (Vabc)	39
Şekil 4.6.	Stator akımları (iabc)	39
Şekil 4.7.	Kısa devre akımı (if)	39

Şekil 4.8. (a) Sürekli ve geçici durumdaki motor momenti (b) Sürekli durumdaki motor momenti 40

Şekil 4.9. Stator gerilimleri (Vabc) 40

Şekil 4.10. Stator akımları (İabc) 40

Şekil 4.11. Kısa devre akımı(İf) 41

Şekil 4.12. (a) Sürekli ve geçici durumdaki motor momenti (b) Sürekli durumdaki motor momenti 41

Şekil 4.13. Stator gerilimleri (Vabc) 41

Şekil 4.14. Stator akımları (İabc) 42

Şekil 4.15. Kısa devre akımı(İf) 42

Şekil 4.16. (a) Sürekli ve geçici durumdaki motor momenti (b) Sürekli durumdaki motor momenti 42

Şekil 4.17. SMSM'nin Moment Değişimi (0<t<0.2 sağlıklı, 0.2<t<0.4 %2 kda, 0.4<t<0.6 %12.5 kda, 0.6<t<0.8 %25 kda) 43

Şekil 4.18. Kontrolör tasarımındaki iq ve id akımlarının kda şiddetine bağlı olarak değişimi (0<t<0.2 sağlıklı, 0.2<t<0.4 %2 kda, 0.4<t<0.6 %12.5 kda, 0.6<t<0.8 %25 kda) 44

Şekil 4.19. Rotor açısal hızının değişimi (0<t<0.2 sağlıklı, 0.2<t<0.4 %2 kda, 0.4<t<0.6 %12.5 kda, 0.6<t<0.8 %25 kda) 45

Şekil 4.20. (a) Sağlıklı SMSM, (b) %2 kda, (c) %12.5 kda, (d) %25 kda SMSM'nin benzetim modelinde elde edilen moment spektrumlarının karşılaştırılması 47

Şekil 4.21. Stator faz gerilimleri 48

Şekil 4.22. Stator faz akımları 49

Şekil 4.23. Motor momenti 49

Şekil 4.24. Stator faz gerilimleri 49

Şekil 4.25. Stator faz akımları 50

Şekil 4.26. Motor momenti 50

Şekil 4.27. Stator faz gerilimleri 50

Şekil 4.28. Stator faz akımları 51

Şekil 4.29. Motor momenti 51

Şekil 4.30. Stator faz gerilimleri 52

Şekil 4.31. Stator faz akımları 52

Şekil 4.32. Motor momenti 52

Şekil 4.33. Moment Değişimi (0<t<5 sağlıklı, 5<t<10 %2 kda, 10<t<15 %12.5 kda, 15<t<20 %25 kda) 53

Şekil 4.34. (a) Sağlıklı SMSM, (b) %2 kda, (c) %12.5 kda, (d) %25 kda SMSM'nin deneysel çalışmasından elde edilen moment spektrumlarının karşılaştırılması 56

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No		Sayfa
Çizelge 3.1.	Benzetim modelinde kullanılan SMSM'nin parametreleri	30
Çizelge 3.2.	SMSM parametreleri	33
Çizelge 4.1.	İq akımının değişimi	45
Çizelge 4.2.	1200 dev/dk yüksüz	57
Çizelge 4.3.	1200 dev/dk %25 yüklü (0.75 Nm)	58
Çizelge 4.4.	1200 dev/dk %50 yüklü (1.5 Nm)	58
Çizelge 4.5.	1200 dev/dk %75 yüklü (2.25 Nm)	58
Çizelge 4.6.	1200 dev/dk tam yüklü (3 Nm)	58
Çizelge 4.7.	1200 dev/dk %110 yüklü (3.3 Nm)	59
Çizelge 4.8.	800 dev/dk tam yüklü (3 Nm)	59
Çizelge 4.9.	1000 dev/dk tam yüklü (3 Nm)	59
Çizelge 4.10.	1400 dev/dk tam yüklü (3 Nm)	59
Çizelge 4.11.	1600 dev/dk tam yüklü (3 Nm)	60
Çizelge 4.12.	2000 dev/dk tam yüklü (3 Nm)	60
Çizelge 4.13.	2200 dev/dk tam yüklü (3 Nm)	60
Çizelge 5.1.	Moment salınımların değişimi	63
Çizelge 5.2.	Arızalı faz akımın genliğinin değişimi (kısa devre arızasının meydana geldiği faz)	64
Çizelge 5.3.	Arızalı faz gerilimin genliğinin değişimi	65
Çizelge 5.4.	Moment harmoniklerinin değişimi	66

KISALTMA VE SİMGELER

f_s : Besleme geriliminin temel frekansı

T_{load} : Yük momenti

f_{dmg} : Demagnetizasyon frekans harmonikleri

p : Kutup çifti sayısı

i_q : Rotor referans düzlemindeki q-ekseni akım bileşeni

v_q : Rotor referans düzlemindeki q-ekseni gerilim bileşeni

i_d : Rotor referans düzlemindeki d-ekseni akım bileşeni

v_d : Rotor referans düzlemindeki d-ekseni gerilim bileşeni

MCSA : Motor akım imza analizi

SMSM : Sürekli mıknatıslı senkron motor

kda : Kısa devre arızası

CCVSI : Akım kontrollü gerilim kaynaklı evirici

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgi

Elektrik motorları endüstriyel makinaların en önemli bileşenlerinden biridir, robotik ve hareket kontrolü gibi uygulamalarda belirleyici bir rol oynamaktadır. Endüstrinin sürekli olarak daha hızlı ve daha güvenilir üretim makinaları talep ettiği bilinmektedir. Son on yılda, farklı elektrikli motor teknolojileri popüler hale gelmiştir, çünkü yüksek güç yoğunluğu, tam dinamik performans ve yüksek verimlilik endüstriyel uygulamalarda talep edilmektedir. Ayrıca, adaptif motor kontrolü gibi çeşitli kontrol yöntemleri yaygın olmuştur (Beerten ve ark. 2010; Ortega ve ark. 2010; Errouissi ve ark. 2012).

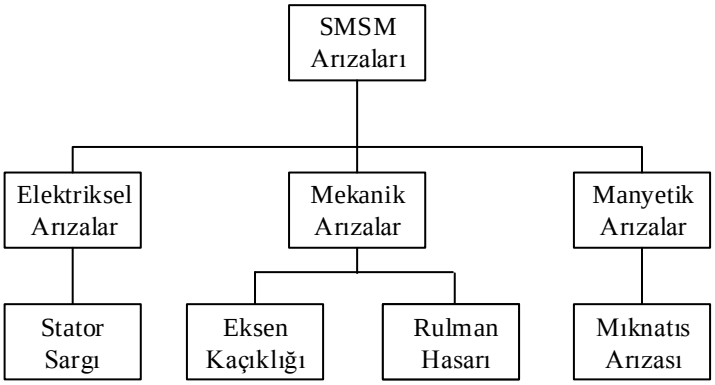
Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM), yüksek verim kabiliyeti, hacim ve ağırlığına göre yüksek güç sağlaması, hassas ve kararlı kontrol imkanı, yüksek moment gibi pek çok avantajlarından ötürü endüstri, elektrikli araç uygulamaları, tıp, uzay araçları ve silah sistemlerinde en fazla tercih edilen motor türlerinden biridir. Döner hareket yapan tüm motorlarda olduğu gibi SMSM'lerin de çalışma ömrü sağlıklı olarak çalışmalarına bağlıdır. Sağlıklı olmayan yani arızalı olan motorun çalışma ömrü de kısadır (Cira ve ark. 2016). SMSM'de görülen arızalar motorun performansını da etkilemektedir. Arızanın henüz başlangıç aşamasında iken analiz edilip ve buna müdahale edilmesi sistemin devamlılığı açısından ve motor çalışma ömrü açısından büyük öneme sahiptir.

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar yukarıda belirtilen üstün özellikleri, ayarlanabilir hızlarda sürülebilmesi, alternatif akım (AA) evirici sürücülerle uyumlu olması ve birçok işin üstesinden gelmesinden ötürü geniş bir kullanım alanına sahip olduğu için yoğun bir çalışma konusu haline gelmiştir (Raggl ve ark. 2009). SMSM'leri cazip hale getiren özellikleri arasında yüksek hızda çalışma, düşük hızda bile hassas moment kontrolü, yüksek güç - ağırlık oranı, kompakt tasarım ve yüksek verim bulunmaktadır (Ruiz ve ark. 2009). SM-Co ve Nd-Fe-B gibi nadir toprak mıknatıslarının geliştirilmesiyle, daha verimli ve kompakt SMSM'lerin ortaya çıkmasını mümkün kılmıştır. Ayrıca, SMSM'lerde verimlilik ve güç faktörü indüksiyon motorlarında olduğu gibi kutup sayısına ve hıza bağlı değildir. Tüm bu üstün özellikler SMSM'lerin otomotiv, robot ve havacılık sektörlerinde en çok tercih edilen motorlar arasında yer almasını sağlamıştır (Rajagopalan ve ark. 2007).

Diğer taraftan, güvenlik açısından kritik sistemler için bir bileşendeki küçük bir hatanın sonuçları felaket olabilir (Zhang ve Jiang 2008). Bu nedenle bu tarz kritik sistemlerde güvenilirlik talebi, güvenlik ve hata toleransı genellikle yüksektir. İstenilen bir performansı sağlamak güvenilirlik ve kullanılabilirlik geliştirmek için olası arızaları analiz ve teşhis edebilecek ve arızaya tolerans gösterebilecek kontrol sistemleri tasarlamak gereklidir (Poure ve ark. 2009). Elektrik motorlarının arıza analiz ve tespitinde sıcaklık ölçümü, radyo frekansı emisyon izleme, gürültü ve titreşim izleme, akustik gürültü ölçümleri, motor moment harmonik analizi, rotor hız analiz ve stator akım izleme gibi çok farklı teknikler vardır (Thomson ve Fenger 2001). Benzersiz arıza örüntüleri sağladığından stator akımları izleme en çok kullanılan yöntemdir (Frosini ve Bassi 2010). Stator akım izleme yöntemi ekstra bir ekipmana ihtiyaç duyulmaksızın stator sargılarından akım algılayıcılarla elde edilen stator akımlarının nümerik işlemini gerçekleştiren bir yöntemdir. Stator akım izleme yöntemi çeşitli matematiksel işleme tekniklerine dayanır. Bunlar arasında, motorun sürekli durum çalışma koşullarındaki uygulamalarda, Fourier dönüşümü tabanlı yöntemler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Andriamalala ve ark. 2008). Ancak, sürekli olmayan çalışma koşullarındaki uygulamalarda, zaman frekans tabanlı yöntemler hala tercih edilir (Ruiz ve ark. 2009). Arıza tespit yöntemleri yanında, bir motorun sağlıklı ve arızalı durumdaki performansının bilinmesi belirli büyüklüklere bakarak motorun arızası hakkında fikir sahibi olunmasını sağlayan en basit yöntemlerden biridir. Bu nedenle motorun arızalı durumda gösterdiği davranışın analizi gerekmektedir.

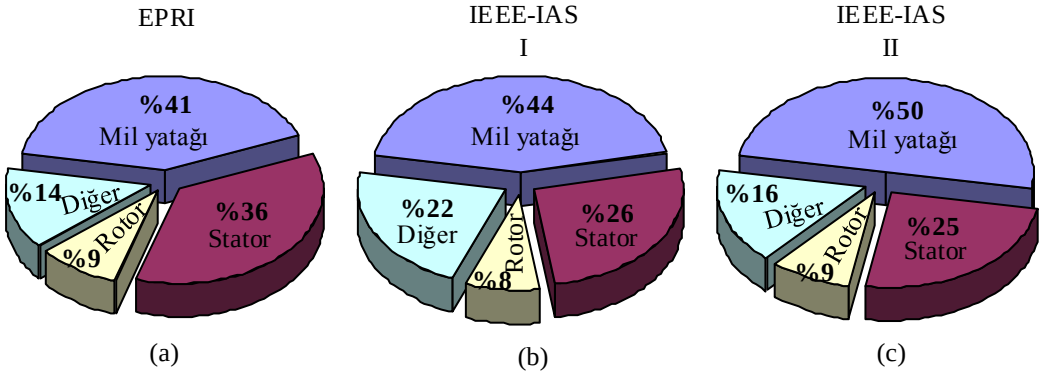
1.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motordaki Arızalar

SMSM'lerde arızalar Şekil 1.1.'de görüldüğü üzere elektrik, manyetik ve mekanik arızalar olarak özetlenebilir (Ebrahimi ve ark. 2009).



Şekil 1.1. SMSM'de sınıflandırılan arızalar (Ebrahimi ve ark. 2009)

Elektrik arızaları stator sargılarının anormal bağlantısı, statordaki açık sarımlar ve stator sarımlar arası kısa devre arızalarını içerir. Sargı yalıtımının bozulmasından kaynaklanan sarımlar arası kısa devre arızası üç fazlı motorlarda görülen en yaygın arıza türlerinden biridir. SMSM'lerde sarımlar arası kısa devre arızası, sürekli mıknatısın doğal akısına zıt bir manyetik akı oluşturan stator aşırı akımlarıyla sonuçlanabilir. Başka bir deyişle rotordaki kalıcı mıknatısların demagnetize olmasına yol açabilir (Kim ve ark. 2006). Mekanik arızalar, rulman ve eksen kaçıklığı arızalarını içerir. Eksen kaçıklığı arızaları statik, dinamik ve karışık eksen kaçıklığı arızalarından oluşur. Eksen kaçıklığı arızaları dengesiz kütle, şaft eğilmesi ve rulman toleransı gibi imalat hatasından kaynaklı oluşan arızalardır. Eksantriklik arızaları ek titreşimler, gürültü emisyonları ve moment titreşimleri ile manyetik ve dinamik sorunlara neden olabilir (Ebrahimi ve ark. 2009). Manyetik arızalar, rotor mıknatıslarının kısmi veya tam demagnetize olmasından oluşan arızalardır.



Şekil 1.2. Büyük motorlarda meydana gelen arızalar için yapılan anket sonuçları (Beerten ve ark. 2010; Errouissi ve ark. 2012; Cira ve ark. 2017)

Şekil 1.2'de EPRI ve IEEE tarafından büyük motorlarda meydana gelen arızalar için yapılan anketin sonuçlarında görüldüğü üzere mil yatağı ve stator arızaları baskın arıza tipleridir. Stator arızaların tüm arızaların içerindeki oranı yaklaşık olarak %30'dur.

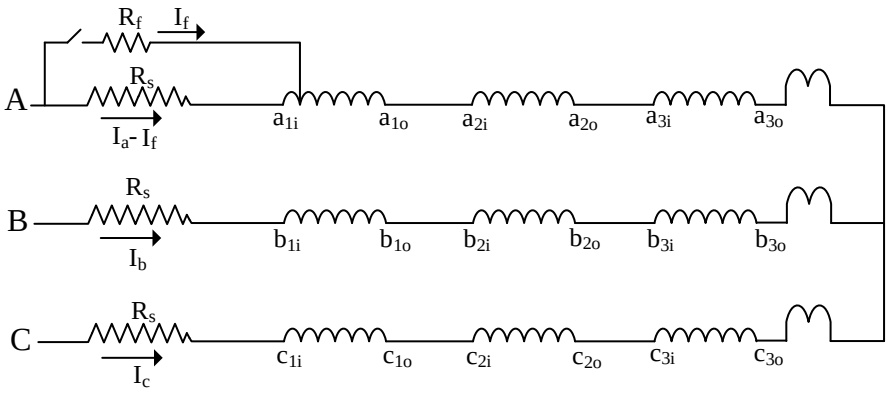
1.2.1 Sarımlar Arası Kısa Devre Arızası

Sarımlar arası kısa devre arızası SMSM'lerde görülen en yaygın arıza türlerinden biridir. Kısa devre arızası stator sargı yalıtımın bozulmasından kaynaklanan bir arızadır.

Elektrik arızalarına en çok neden olan problem sargı yalıtımın bozulmasıdır. Sarımlar arası kısa devre arızası henüz başlangıç aşamasında gerekli tedbirler alınmazsa daha ciddi yalıtım arızasıyla sonuçlanabilir. Yalıtım bozulmasından kaynaklı arızalar kısa devre olmuş sarımlarda aşırı sirkülasyon akımlarının akmasına neden olur. Bu aşırı sirkülasyon akımları da sargının sıcaklığını artırır ve sargı yalıtımının daha da bozulmasına neden olur. Stator kısa devre arızası zamanında analiz edilip tespit edilmezse önce arızanın meydana geldiği faz sargısındaki tüm sarımların kısa devre olmasına ve zamanla faz-faz arası kısa devre arızasına yol açmaktadır.

Ayrıca stator sarımlar arası kısa devre arızası zamanında analiz edilip tespit edilmezse makinadaki mıknatısların demagnetize olması gibi bir takım önemli problemlere de neden olabilmektedir (Kim ve ark. 2006).

Şekil 1.3.'te görüldüğü üzere stator sarımlar arası kısa devre olayından oluşan i_f kısa devre akımı, hava aralığındaki stator MMF dağılımını etkilemektedir. Stator faz sargısındaki kısa devre arızası, makina akısı üzerinde üç ana etkiye yol açmaktadır. İlk olarak, arızalı faz sargısındaki etkin sarım sayısı azaldığından daha az MMF üretir. Ayrıca kısa devre olmuş sarımlar lokal kaçak akının, özellikle oluk kaçak akısının artmasına yol açmaktadır; bu da statordaki saturasyon koşullarını değiştirir. Bu nedenle, kısa devre sarımların yakınındaki akı yoğunluğunda bir değişiklik olur. İkincisi kısa devre olmuş sarımlar bağımsız bir faz gibi hareket ederek arızalı faz sargısına zıt etkili kendi MMF'sini oluştururlar. Kısa devreli sarımlarda indüklenen akımlar ana hava aralığı akısına zıt kendi akılarını oluştururlar, bu da sarımlar arası kısa devre arızasının meydana geldiği sargıdaki ana akıyı azaltır (Romeral ve ark. 2011). Üçüncüsü kısa devreli sarımlardan geçen akım sargının sıcaklığını artırır ve sargı yalıtımını daha da bozabilir.



Şekil 1.3. SMSM'de statorun bir fazında meydana gelen sarımlar arası kısa devre arızası

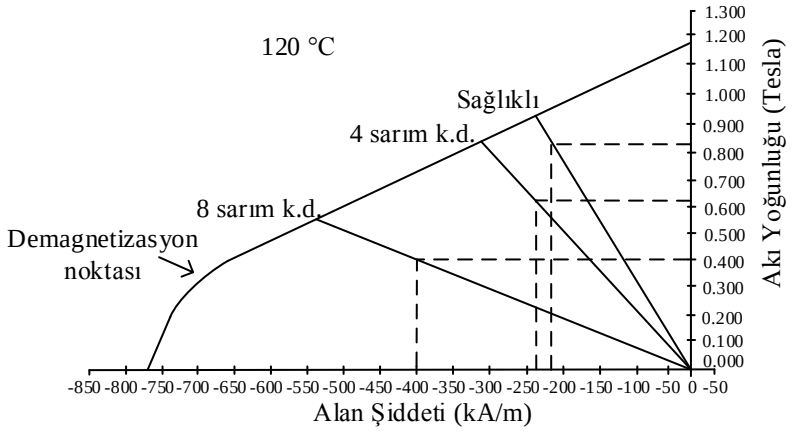
Sarımlar arası kısa devre arızası sonucu stator simetrisinin bozulması ile stator akımlarındaki tam sayılı harmoniklerde ciddi değişimlerin olması kısa devre olayının ciddi sonuçları arasında sayılabilir. Harmonik genliklerinin stator sarımlar arası kısa devre olayına bağlı değişim göstermesi bu harmoniklerin kısa devre arızasının analiz edilip ve bu arızanın tespitinde kullanılabileceğinin temelini oluşturmaktadır.

Diğer taraftan, üç fazlı motorlar faz dirençleri olabildiğince dengelidir. Endüstriyel uygulamalarda aşınma, paslanma ve kirlenme problemlerinden kaynaklı bağlantı dengesizlikleri sıklıkla meydana gelmektedir. Dahası titreşimli ve ısıl döngü işlemleri de bağlantı dengesizliklerine neden olabilmektedir (Romeral 2012). Sargıların zayıf bağlantısı, sarımlar arası açık devre ve sarımlar arası kısa devre gibi elektrik arızalarının yanı sıra aşırı lokal ısınma, dengesiz gerilimler ve akımlar oluşturabilir. Dengesiz durumlar motorun verim ve performansı üzerinde olumsuz bir etkisi olan negatif akım ve gerilim bileşenlerini oluşturur.

1.2.2. Demagnetize Arızası

Normal çalışma koşullarında çalıştırıldığında sürekli mıknatıslı makinaların rotor mıknatısı devam edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Aşırı yüksek sıcaklıklarda, stator arızaları tarafından oluşan aşırı kısa devre akımlarında ve motorun aşırı yük altında çalışması durumunda mıknatısların normal çalışma noktası demagnetizasyon eğrisinin altına düşebilir. Şekil 1.4.'te SMSM'nin sağlıklı, 4 ve 8 sarımın kısa devre olması durumları için 120 °C'lik çalışma sıcaklığındaki demagnetizasyon eğrisi ile çalışma noktaları görülmektedir. Mıknatısların çalışma noktası, dış manyetik devrenin

geçirgenliğini temsil eden düz bir çizgi ile demagnetizasyon eğrisinin kesişimiyle belirlenir (Romeral 2012).



Şekil 1.4. SMSM'lerde sürekli mıknatısların çalışma noktaları

Sıcaklıktaki artış demagnetizasyon noktasının sağa doğru kaymasına neden olabilir bu da sürekli mıknatısın geri döndürülemez demagnetizasyon bölgesine girmesine neden olabilir (Guoxin ve ark. 2010). Sürekli mıknatısın geri döndürülemez bölgesine düşerse geri dönüşü olmayan akı kaybına neden olur (Kang ve ark. 2003).

Demagnetizasyon sonucunda dağıtılmış manyeto motor kuvveti (MMF) sinüzoidal değildir. Eğer demagnetize arızası varsa, stator akımlarında demagnetizasyon frekans bileşenleri gözükür [5].

$$f_{dmg} = f_s \,|1 + k \,/\, p| \tag{1.1}$$

Burada f_s kaynağın frekansı, p kutup çifti sayısı ve k bir tam sayıdır.

1.2.3. Eksen Kaçıklığı

Eksen kaçıklığı arızaları elektrik motorlarındaki arızaların önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Makinadaki eksen kaçıklığı arızası, stator ve rotor arasında oluşan eşit olmayan hava aralığı arızasıdır (Nandi ve ark. 2005). Statik eksen kaçıklığı arızası ve dinamik eksen kaçıklığı arızası olmak üzere iki çeşit eksen kaçıklığı arızası vardır. Statik eksen kaçıklığı arızası durumunda minimum radyal hava boşluğu uzunluğunun konumu uzayda sabittir. Dinamik eksen kaçıklığı rotorun merkezi şaftın merkezinde olmadığı durumda ortaya çıkar ve minimum hava boşluğunun konumu rotor ile döner (Ebrahimi ve ark. 2009). Gerçekte statik ve dinamik eksen kaçıklığı aynı anda var olma

eğilimindedir. Sağlıklı makinalarda belli bir seviyede statik eksen kaçıklığı vardır. Dinamik eksen kaçıklığına bağlı arıza harmonik frekansları aşağıdaki denklemdeki gibi ifade edilebilir.

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

Buradaki f_e stator akımlarındaki arıza frekanslarını göstermektedir.

1.2.4. Rulman Hasarı

Elektrikli makinaların çoğunluğu bilyeli veya yuvarlanan elemanlı rulmanlar kullanır. Bu rulmanların her biri sırasıyla iç ve dış iki halkadan oluşur. Dönüşü sağlayan bir set bilye bu halka bileziklerinin içerisinde bulunmaktadır. Elektrik makinaları dengeli yük altında, iyi hizalama ile normal çalışma koşullarında çalıştırılsa bile rulmanlarda metal yorulması nedeniyle hasar meydana gelebilmektedir. Metal yorulması, küçük parçaların yataktan ayrılmasına neden olduğundan rulmanlarda pullanma veya dökülme meydana gelebilir. Normal dahili çalışma streslerinden ayrı olarak titreşim, doğal eksen kaçıklığı ve rulman akımları da rulman hasarlarının nedeni olabilmektedir (Rosero ve ark. 2009).

Bazen rulman arızaları, genellikle eksen kaçıklığıyla ilgili arızalar kategorisi altında sınıflandırılan rotor asimetri arızaları olarak ortaya çıkabilmektedir (Nandi ve ark. 2005). Rulman bilyeleriyle ilgili hasarlar iç rulman hasarları, dış rulman hasarları, bilye hasarları ve yatak hasarları olarak sınıflandırılabilir. Tüm bu mekanik hasarlar makine içindeki akı dağılımın bozulmasına neden olmasıyla stator akımlarında yeni harmoniklerin oluşmasına yol açmaktadır. Karakteristik arıza frekansları makinenin mutlak hareketinin (titreşimin) sonucudur (Wadhwani ve ark. 2008). Rulman arızası meydana geldiğinde, karakteristik arıza frekansları esasen elektrik besleme frekansı tarafından modüle edilir.

1.3. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı SMSM'nin stator kısa devresine maruz kalması halinde performansında görülen değişikliklerin tespit edilmesidir. Sağlıklı ve arızalı motorun davranışlarının, şebekeden çektiği akım, verim, moment değişimlerinin bilinmesi bir motorun arızalı olup olmayacağı konusundaki kararın verilmesi açısından oldukça önemlidir. Arıza tespit algoritmaları ayrıntılı işlemler sonucunda motorun arızalı olup

olmadığına karar verebilmektedir. Ancak bunun için ekstra donanım ve sensörler de gerekmektedir. Arıza etkisinin motor üzerindeki etkisinin bilinmesi, çalışma koşullarının değerlendirilerek motorun arızalı olup olmadığının kolaylıkla tespitine yardımcı olur. Bu nedenle motorun arızalı durumdaki performansının tespiti gerekmektedir. Bu amaçla bu tez çalışmasında yapılan çalışmalar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

i. Çok sayıdaki üstün yönleri ile gittikçe yaygınlaşan sürekli mıknatıslı senkron motorlarda meydana gelen stator sarımlar arası kısa devre arızasının motor performansı ve verimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır.
ii. Bu amaçla ilk önce Matlab/Simulink yazılımında motorun sağlıklı ve arızalı benzetim modeli oluşturulmuştur.
iii. Benzetim modelinde SMSM'nin tek fazında sarımlar arasında %2, %12.5 ve %25 oranında kısa devre olması için üç farklı arıza analizi yapılmıştır.
iv. Aynı motorun sağlıklı benzetim modelinden elde edilen sonuçlar ile üç farklı arızalı benzetim modelinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.
v. Benzetim modelindeki aynı şartlar deneysel çalışmada da gerçekleştirilmiştir.
vi. Deneysel çalışmadan aynı motorun sağlıklı durumdan elde edilen sonuçlar ile üç farklı arızalı durumundan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.
vii. Stator sarımlar arası kısa devre arızasının motorun akım, gerilim ve moment verileri üzerindeki etkisinin analiz edilmesi arıza tespit yöntemlerinde kullanılması açısından önemlidir.

1.4. Tezin Yapısı

Bu tez; Giriş, Kaynak Özetleri, Materyal ve Metot, Bulgular ve Tartışma, Sonuç ve Öneriler, Kaynaklar olmak üzere altı bölümden oluşmaktadır.

Giriş olarak verilen birinci bölümde sürekli mıknatıslı senkron motorlar, stator sarımlar arası kısa devre arızası ve diğer arızalar hakkında bilgiler verilmiştir.

Kaynak özetleri olarak verilen ikinci kısımda SMSM'deki stator sarımlar arası kısa devre arızası ile ilgili yapılan literatür araştırması yer almaktadır.

Materyal ve metot bölümünde, SMSM'nin sağlıklı ve arızalı durumları için matematiksel modeller elde edilerek, bilgisayar benzetimi modeli oluşturulmuştur.

Deneysel çalışmanın yapılabilmesi için deneysel devre düzeneği de bu bölümde anlatılmıştır.

Bulgular ve tartışma olarak adlandırılan dördüncü bölümde, SMSM'nin benzetim modelinden elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar sunulmuş ve karşılaştırılmıştır.

Sonuç ve öneriler kısmında yapılan çalışmaya ait sonuçlara yer verilmiş, önerilerde bulunulmuştur.

Kaynaklar olarak verilen altıncı bölümde ise tez içinde referans verilen kaynaklar sıralanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Elektrik motorlarındaki arızalar genellikle mekanik ve elektriksel arızalar olmak üzere iki ana başlık altında incelenmektedir. Motorun mekanik arızalarında, rulman, yatak, dişli, yağsızlık, dinamik ve statik eksen kaçıklığı gibi arızalar incelenmektedir. Elektriksel arızalarda ise stator sarımlar arası kısa devre, rotor sarımlar arası kısa devre, faz-toprak kısa devre, sargıların yanlış bağlantısı, yanlış toprak bağlantısı ve stator açık devre gibi arızalar incelenmektedir (Briz 2002, Awadallah and Morcos 2003, Ebrahimi and Faiz 2010).

Elektrik makinalarındaki sargıların yalıtımında kullanılan malzemeler aşırı ısınma, ani gerilim dalgalanmaları, çalışma ortamının kirliliği gibi bir takım zorlayıcı unsurlara maruz kalmaktadırlar. Bu unsurlar zamanla sargı yalıtımının bozulmasına neden olabilmektedir. Stator sargı yalıtımının bozulmasının ana nedenlerden biri aşırı ısınmadır. Sargı yalıtımının bozulmasına neden olan aşırı ısınmanın olası üç nedeni vardır. Bunlar; sargıların zamanla yaşlanması, aşırı yüklenme ve kısa devre akımıdır (Bonnett ve Soukup 1992). Sıcaklık limitlerinin üzerinde işletilen en iyi yalıtıma sahip sargı bile hızlıca bozulabilir. Kurala göre, çalışma sıcaklığı limitinden 10 °C üzerinde işletilen stator sargı yalıtımının ömrü %50 kısalabilir (Lipo 2004).

Stator kaynaklı arızaların, elektrik makinalarında meydana gelen arızalar içerisindeki payı %30-%40 arasındadır (El Hachemi Benbouzid 2000, Ye Zhongming ve Wu Bin 2000, Nandi ve ark. 2005, Siddique ve ark. 2005, Zhou ve ark. 2008, Wei Zhou ve ark. 2009). Sargılardaki kısa devre olayı aşırı ısınma nedeniyle stator oluklarındaki bobinin etrafındaki yalıtkanın özelliğini yitirmesi sonucu, iki veya daha fazla sarımın birbirine temas etmesi ile ortaya çıkan bir durumdur. Belli sayıdaki sarımın kısa devre olmasıyla sargının o bölümünde yüksek genlikli bir kısa devre akımı oluşur. Bunun yanı sıra faz sargısı üzerinde kısa devre üzerinden tamamlanan devre sonucunda sargı endüktansında bir dengesizlik meydana gelmektedir. Kısa devre olan sarım sayısının, faz sargısı içerisindeki payı, yüzde olarak sarımlar arası kısa devre arıza oranı ile ifade edilmektedir.

Elektrik makinalarının statorunda meydan gelen arızalarla ilgili çalışmalar aşağıda sunulmaktadır.

Elektrik makinalarının stator sarım arızası üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır (Briz ve ark. 2002, Tallam ve ark. 2003, Ebrahimi ve Faiz 2010, Nussbaumer ve ark. 2011). Bunlardan T.W. Thomson ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada asenkron motor arızalarını analiz ve tespit etmek için Motor Akım İmza Analizi (Motor Current Signature Analysing-MCSA) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem genellikle kısa devre sarım arızası, rotor çubuğu kırığı arızası, eksen kaçıklığı ve rulman gibi arızaları analiz ve tespit etmek için etkili durum izleme yöntemlerinden biridir (Thomson ve Fenger 2001). MCSA metodunun üstün özellikleri; uygulanan yükten ve diğer dengesizliklerden etkilenmiyor olması ve ayrıca meydana gelen elektriksel veya mekanik arızalar nedeniyle gerilim kaynağı frekansı etrafında oluşan harmonik bileşenlerinin daha görünür hale gelmesidir (Eftekhari ve ark. 2013, Allal ve Chetate 2016).

Stator sarımlar arası kısa devre arızası, bir makinada ortadan kaldırılması ve tespit edilmesi oldukça zor olan, en kritik ve önemli arıza çeşididir (Awadallah ve Morcos 2003). Stator kısa devre arızaları genellikle yalıtım arızasından kaynaklı arızalardır. Sarımlar arası kısa devre arızasının akım, gerilim, eksenel akı ve d-q gerilim ve akım bileşenlerinin üzerindeki etkisinin analiz edilip tespit edilmesiyle ilgili birçok yöntem vardır (Toliyat ve Lip 1995, Toliyat ve ark. 1998). Durağan olmayan sinyallerin harmonik bileşenlerinin analiz etmenin en iyi yolu bu amaçla geliştirilen çok sayıda zaman-frekans analizi yöntemlerini kullanmaktır (Arthur ve Penman 1998, J. rosero 2007). Güçlerin Ayrıştırılması Tekniği (Power Decomposition Technique-PDT) sinyallerin pozitif ve negatif bileşenleri ölçmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu bileşenlerin değişimi ile motorun dengesizlik durumlarının izlenmesi motoru analiz etmek için uygun bir yöntemdir (Cira 2017).

Kato ve ark. (2014), asenkron motorun stator kısa devre arızasının Park dönüşümü kullanılarak elde edilen uzay vektör akım ve gerilim negatif bileşenlerinden elde edilen admitanslarda dengesizliğe neden olduğu tespit etmiştir. Sağlıklı ve arızalı durumda elde edilen admitans matrisleri karşılaştırılarak arıza tespiti yapılabilmektedir.

Lai ve ark. (2014), sarımlar arası kısa devre arızasının sürekli mıknatıslı senkron motorun performansı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Motorun matematiksel modellerinden oluşturulan benzetim modelinden elde edilen sonuçlardan sarımlar arası kısa devre arızasının motor hızının salınımlarının üzerinde küçük bir etkisi vardır ancak

momentteki salınımları arttırdığı ve faz akımlarının dengesizliğine yol açtığı tespit edilmiştir.

Zhang ve Jiang (2008), sürekli mıknatıslı senkron makinalardaki stator kısa devre arızasını analiz etmiştir. Yüzeysel sürekli mıknatıslı senkron motorun benzetim modeli Ansoft Maxwell yazılımında sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulmuştur. Motorun sağlıklı ve arızalı durumlarındaki benzetim modelinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Arızalı durumdaki elde edilen veriler sağlıklı durumdaki elde edilen verilerle karşılaştırıldığında manyetik akı yoğunluğunun genliği azalmış ve manyetik akı yoğunluğunda yeni kısmi ve tam sayı harmonik bileşenlerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Arızalı durumdaki elektromanyetik momentin genliği ve salınımları sağlıklı duruma göre artmıştır. Sağlıklı ve arızalı durumdaki moment verisine hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanıp harmonik analizi yapılmıştır. Sağlıklı durumdaki moment spektrumunda 2'inci harmonik bileşeni içerirken, buna karşın arızalı durumda 3., 4., 5., ve 7. harmonik bileşenleri moment spektrumunda gözlenmiştir. Arızadan önce ve sonra diğer harmonikler az bir değişiklik gösterirken özellikle 2., 3., ve 4. harmoniklerde ciddi bir değişim gözlenmiştir. Kısa devre arızası meydana geldiğinde üç faz akımlarının genlikleri sağlıklı durumuna göre 4.72 kat arttığını tespit etmiştir. Ayrıca arızalı durumdaki faz akımlarına fft uyguladığında akımlardaki diğer harmonik bileşenler sağlıklı duruma göre az bir değişim gösterirken 5. harmoniğin genliğinde büyük bir değişimin meydana geldiği gözlenmiştir.

Yapılan bir diğer çalışmada stator kısa devre arızasının analiz edilmesi için SMSM'nin sağlıklı ve üç farklı arızalı (1 sarım, 3 sarım ve 5 sarım kısa devre arızaları) durumdaki benzetim modeli sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulmuştur. Benzetim modelindeki sonuçlardan motorun manyetik alanı ve diğer parametreleri kısa devre arıza şiddetinin artmasıyla sağlıklı duruma göre değişim göstermişler. Yapılan çalışmada gerçek zamanlı bir uygulama olmayıp sadece simülasyon sonuçları verilmiştir (Zhang ve ark. 2014).

Faiz ve ark. (2016), SMSM'de stator sarımlar arası kısa devre arızası başlangıç arızası olarak ve aynı zamanda bobin-bobin arası, faz-toprak arası, iki faz-toprak arası ve 3 faz toprak arası kısa devre arızaların motor sinyallerinin üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Motorun sağlıklı durumu ve sarımlar arası kısa devre oranı %6.8 ve %13.6 olan iki arızalı

durumu için analiz edilmiştir. Sarımlar arası kısa devre arıza oranı arttığında motorun momentindeki salınımların, sağlıklı durumdaki moment salınımlarıyla karşılaştırıldığında, kısa devre arıza şiddetine bağlı olarak ciddi bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Moment salınımların artması hızdaki salınımların artmasına neden olduğu bu da motordaki mekanik strese yol açtığı incelenmiştir. Yapılan çalışmada gerçek zamanlı bir uygulama olmayıp sadece simülasyon sonuçları verilmiştir.

Otava ve Buchta (2015), içsel SMSM'deki %15 sarımlar arası kısa devre arızası ve açık faz arızası çalışılmıştır. Motorun Matlab/Simulink'te benzetim modelinden elde edilen sonuçlarla deneysel düzenekten elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Benzetim modelinden elde edilen sonuçlarla deneysel çalışmadan elde edilen sonuçların örtüştüğü görülmüştür. Stator kısa devre arıza durumunda kısa devre akımın faz akımların iki katına çıktığı, arızalı durumdaki hız salınımların sağlıklı durumdaki hız salınımlarına göre arttığı tespit edilmiştir.

Tersigni ve Sebastian (2012), yüksek performanslı uygulamalarda kullanılan sürekli mıknatıslı senkron motorlarda sargı kısa devre arızası üzerine çalışma yapılmıştır. Kısa devre arızası durumunda SMSM'nin vuruntu momenti oluşturduğu incelenmiştir. Vuruntu momentin yüksek performanslı uygulamalarda kullanılan SMSM'nin performansını düşürdüğü gözlenmiştir. Kısa devre arızasının artmasıyla motordaki vuruntu momenti de kısa devre arıza şiddetine bağlı olarak artmıştır. Yapılan çalışmada hem benzetim modelinin sonuçları hem de deneysel çalışmanın sonuçları verilmiştir.

Fitouri ve ark. (2016), statorun tek fazında %50 ve %75 oranında iki farklı şiddetteki sarımlar arası kısa devre arızasının SMSM üzerindeki etkisi çalışılmıştır. Arızalı durumdaki ortalama moment sağlıklı durumdaki ortalama moment ile karşılaştırıldığında azalmış ve arızalı durumdaki moment dalgalanmaları artmıştır. Motorun arızalı faz sargısındaki akımın toplam harmonik bozunumu kısa devre arıza şiddetinin artmasına bağlı olarak, sağlıklı durumdaki akımın toplam harmonik bozunumuyla karşılaştırıldığında artmıştır.

Rosero ve ark. (2012), SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızası durumunda stator faz akımı frekans domeninde analiz edildiğinde akımın 5. ve 7. harmoniklerinde sağlıklı duruma göre önemli bir farklılık olduğu incelenmiştir.

Harmoniklerin bu değişimlerinden yola çıkılarak akımın 5. harmonik veya 5. ve 7. harmonikleri arıza tespitinde kullanılmıştır.

Ebrahimi ve ark. (2009), SMSM'de stator sarımlar arası kısa devre arızasının analiz ve tespiti için yapılan benzetim deneysel çalışmalar sonucunda kısa devre arızasının akım faz spektrumun 0.25, 0.75, 1.25, 1.75, 2.25 gibi yan bant frekans bileşenlerinin genliğinde artışa yol açtığı tespit edilmiştir. Aynı şekilde motorda kısa devre arızası sonucu lokal saturasyonun oluştuğu ve hava aralığı akı yoğunluğunun genliği artmıştır; bunun sonucunda manyetik akı yoğunluğunun dağıtımı bozulmuş ve manyetik akı yoğunluğunun spektrumunun yan bant harmoniklerinin genliklerinde artış olmuştur. Akı yoğunluğu spektrumun yan bant bileşenlerinin arıza tespitinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Saavedra ve ark. (2014), SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızasının farklı sargı konfigürasyonlarına bağlı olarak faz akım spektrumundaki 3., 5., 7., ve 9. harmoniklarinin genliklerinde artışa yol açmıştır. Yapılan çalışmada hem simülasyon sonuçları hem de deneysel sonuçlar verilmiştir.

Cira ve ark. (2016), vektör kontrollü yüzeysel SMSM'de stator sarımlar arası kısa devre arızasının örüntü tanımlı sistem aracılığıyla arıza şiddetinin otomatik olarak sınıflandırılması ve tespit edilmesiyle ilgili bir çalışma yapmıştır. Çalışmada üç farklı stator kısa devre arızalı durum ve sağlıklı durum için faz akımlarına FFT uygulanıp faz akımlarının harmonik değişimleri incelenmiştir. Arızalı durumlarındaki faz akımının 3. harmonik bileşenin genliği, sağlıklı durum ile karşılaştırıldığında, arıza şiddetine bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada hem benzetim modelinin sonuçları hem de deneysel çalışmanın sonuçları verilmiştir.

Bouchareb ve (Said 2015), stator kısa devre arızasının yüzeysel sürekli mıknatıslı senkron motor davranışı üzerindeki etkisinin araştırılması için Matlab/Simulink'te benzetim modeli oluşturulmuştur. İki farklı kısa devre arıza durumundaki motor verileriyle sağlıklı durumdaki motor verileri karşılaştırılmıştır. Kısa devre arıza şiddetinin artmasıyla faz akımlarındaki simetrinin bozulduğu, faz akımlarının genliğinin önemli derecede arttığı tespit edilmiştir. Aynı şekilde arıza şiddetinin artmasıyla motorun güç kaynağından çektiği güç artmıştır, bu motor performansını ve verimi düşürmektedir.

Arızalı durumlardaki motor moment değişimi sağlıklı durumdaki motor moment değişimiyle karşılaştırıldığında momentteki salınımların arttığı görülmüştür.

Taghipour-GorjiKolaie ve ark. (2011), yaptığı çalışmada, matematiksel model denklemleri kullanılarak elde edilen SMSM benzetim modeli sonuçlarına göre, sarımlar arası kısa devre arızasının motorun reaktif gücü üzerinde ciddi etkisi olduğu görülmüştür. Kısa devre arızasının meydana geldiği fazdaki reaktif güç genliği kısa devre arıza şiddetinin artmasıyla azalırken, sağlıklı fazlardaki reaktif güç genliği ise kısa devre arıza şiddetinin artmasıyla arttığı incelenmiştir. Kısa devre arızası durumunda motorun moment ve hız genliklerinde bir değişiklik olmamıştır fakat salınımlarında, kısa devre arıza şiddetinin artmasıyla, bir artış olmuştur.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, Matlab/Simulink'te oluşturulan yüzeysel sürekli mıknatıslı senkron motorun stator sarımlar arası kısa devre arızalı ve sağlıklı benzetim modelinin oluşturulması ve deneysel devre düzeneğinde kullanılan ekipmanlar anlatılacaktır.

3.1. Stator Sarımlar Arası Kısa Devre Arızalı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Matematiksel Modeli

Daha önceki çalışmalarda AC makinalarının stator sarımlar arası kısa devre arızasının analizi için çok sayıda model önerilmiştir. Bu bölümde, sağlıklı ve stator sarımlar arası kısa devre arızalı yüzeysel mıknatıslı SMSM'nin matematiksel modelinin çıkarılması anlatılmıştır.

3.1.1. Sağlıklı Durumdaki Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Matematiksel Modeli

Sağlıklı ve stator sargısı kısa devre arızası durumunda SMSM'nin dinamik davranışını analiz etmek için oluşturulan matematik modeller ile Matlab/Simulink'te SMSM'nin benzetim modeli geliştirilmiştir. Manyetik devre kayıplarının ve manyetik doymanın olmadığını varsayımıyla, sağlıklı bir SMSM'nin abc stator referans düzlemindeki toplu denklemi aşağıdaki gibi modellenebilir (Lai ve ark. 2014).

$$\mathbf{v}_{s,abc} = \mathbf{R}_s.\,\mathbf{i}_{s,abc} + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_{s,abc}}{dt} \tag{3.1}$$

Burada stator faz gerilim matrisi $\mathbf{v}_{s,abc} = [v_a\ v_b\ v_c]^T$, stator direnç matrisi $\mathbf{R}_s = \text{diag}\{R\ R\ R\}$, stator faz akımları $\mathbf{i}_{s,abc} = [i_a\ i_b\ i_c]^T$. Rotor kalıcı mıknatısları ve stator sargılarınca üretilen üç fazlı manyetik akı bağı denklemi, $\boldsymbol{\lambda}_{s,abc} = [\lambda_a\ \lambda_b\ \lambda_c]^T$ denklem (3.2)'de ifade edilmiştir.

$$\boldsymbol{\lambda}_{s,abc} = \mathbf{L}_s\mathbf{i}_{s,abc} + \boldsymbol{\lambda}_{PM,abc} \tag{3.2}$$

Burada $\boldsymbol{\lambda}_{PM,abc}$, rotordaki kalıcı mıknatıslar tarafından üretilen akıyı ifade eder ve $\boldsymbol{\lambda}_{PM,abc} = \lambda_{PM}[\cos\theta_a\ \cos\theta_b\ \cos\theta_c]^T$eşitliğinde görüldüğü gibi rotor konumuna bağlı olarak değişir. λ_{PM} rotor mıknatısın akısı, θ_a A fazının konumunu gösterir ve θ_a'nın elektriksel hız ω_e ve zamanın fonksiyonu olduğu $\theta_a = \omega_e t$, $\theta_b = \omega_e t - \frac{2\pi}{3}$, $\theta_c = \omega_e t +$

$\frac{2\pi}{3}$ açı eşitliklerinden görülebilmektedir. Endüktans matrisi denklem (3.3)'deki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

(3.3) nolu denklemdeki endüktanslar stator kaçak endüktansı L_{ls}, sargı mıknatıslanma endüktansı L_m, ve rotor çıkıklığından kaynaklı endüktans L_Δ olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Yüzeysel mıknatıslı makinalarda rotor çıkıklığından kaynaklı endüktans L_Δ sıfıra yakın olduğu için ihmal edilir.

Kontrolör tasarımını ve motor modelini basitleştirmek için park dönüşümü kullanılır (Lai ve ark. 2014). Park dönüşümü, aşağıdaki **P** ile gösterilen dönüşüm matrisi ile abc referans düzlemindeki değişkenleri dq0 referans düzlemine dönüştürür, $\mathbf{P^{-1}}$ ile gösterilen ters dönüşüm matrisi ise dq0 referans düzlemindeki değişkenleri abc referans düzlemindeki değişkenlere dönüştürür. Benzetim modelinde SMSM'nin vektör kontrollü modeli kullanıldığından hız kontrolü uygulanmıştır.

$$\mathbf{P} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\theta_a & \cos\theta_b & \cos\theta_c \\ -\sin\theta_a & -\sin\theta_b & -\sin\theta_c \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

$$\mathbf{P^{-1}} = \begin{bmatrix} \cos\theta_a & -\sin\theta_a & 1 \\ \cos\theta_b & -\sin\theta_b & 1 \\ \cos\theta_c & -\sin\theta_c & 1 \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

Sağlıklı motorun dq0 referans düzlemindeki gerilim ve akı bağı denklemi sırasıyla denklem (3.6) ve (3.7) ifade edildiği gibidir.

$$\mathbf{v}_{s,dq0} = \mathbf{P}.\mathbf{v}_{s,abc}$$

$$\mathbf{v}_{s,dq0} = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_{s,dq0} + \mathbf{P}\frac{d\lambda_{s,abc}}{dt} \tag{3.6}$$

$$\boldsymbol{\lambda}_{s,dq0} = \mathbf{P}\lambda_{s,abc} = \mathbf{L}_{dq0}\mathbf{i}_{s,dq0} + [\lambda_{PM}\ 0\ 0]^T \tag{3.7}$$

Elektromekanik kısım denklem (3.8)'teki gibi ifade edilir.

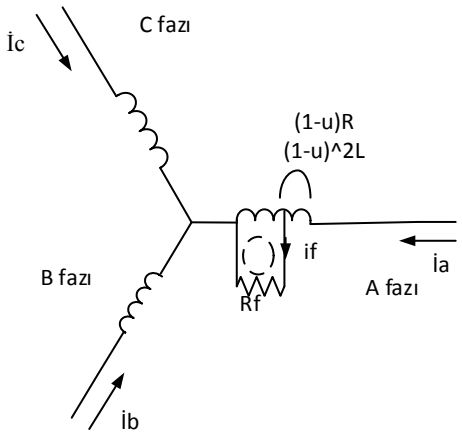
$$J\frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \tag{3.8}$$

Burada J sistemin ataletini, T_L yük momentini, T_e elektromekanik momentini, B sistemin sürtünme katsayısını, ω_m rotorun dönme hızını gösterir. $\omega_m = \frac{d\theta}{dt} = \frac{2\omega e}{N_p}$ burada N_p kutup çifti sayısını gösterir.

3.1.2. Stator Sarımlar Arası Kısa Devre Arızası Durumundaki Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Matematiksel Modeli

Bu çalışmada yıldız bağlı, statorunun her fazında N adet sarım bulunan ve yalnızca *a*-fazında n adet sarımı kısa devre edilmiş SMSM'nin arızalı ve diğer fazlarda oluşan etkilerini gösteren matematiksel eşitlikler aşağıda verilmektedir.

Stator kısa devre arızası meydana geldiğinde motor sargısındaki etkin sarım sayısı azalır. Bu durum, motorun armatür akımlarında asimetriye neden olur ve motor performansını düşürür. Stator sarımlar arası kısa devre arızası Şekil 3.1.'de gösterildiği gibi genellikle R_f gibi ekstra bir dirençle modellenir.



Şekil 3.1. Kısa devre arızasının gösterimi

Buna ek olarak R_f kısa devre arıza şiddetine bağlı olarak değişir, düşük değerli R_f değeri daha yüksek kısa devre arıza şiddetini gösterir (Urresty ve ark. 2012). A fazındaki toplam sarım sayısı N ve kısa devre sarım sayısı n olduğunu varsayalım, $u = \frac{n}{N}$ kısa devre sarım oranını gösterir. u aynı zamanda kısa devre arıza (kda) şiddetini göstermektedir. Arıza durumunda A fazındaki sargının etkin direnç ve endüktansı sırasıyla $R_{a-etkin} =$

$(1-\mathrm{u})\mathrm{R}$ ve $\mathrm{L_{a-etkin}} = (1-\mathrm{u})^2\mathrm{L}$ olur. Kısa devre olan sarımlardan i_f kısa devre arıza akımı geçtiğinden kısa devre olan sarımlar bir faz gibi işlev görür. Böylece motoru 4 faz şeklinde modellemek gerekir. Sonuç olarak arızalı durumundaki motorun modeli, abc stator referans düzleminde denklem (3.9)'daki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{v}_{\mathrm{sf,abc}} = \mathbf{R}_{\mathrm{sf}}\mathbf{i}_{\mathrm{sf,abc}} + \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{sf,abc}}}{\mathrm{dt}} \tag{3.9}$$

Burada $\mathbf{v}_{\mathrm{sf,abc}} = \left[\mathrm{v_a}\ \mathrm{v_b}\ \mathrm{v_c}\ v_f\right]^{\mathrm{T}}$gerilim vektör matrisi, $\mathbf{i}_{\mathrm{sf,abc}} = \left[\mathrm{i_a}\ \mathrm{i_b}\ \mathrm{i_c}\ i_f\right]^{\mathrm{T}}$akım vektör matrisidir, direnç matrisi denklem (3.10)'deki ifade edilir, akı bağıntıları $\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{sf,abc}} = [\lambda_{\mathrm{a}}\ \lambda_{\mathrm{b}}\ \lambda_{\mathrm{c}}\ \lambda_{\mathrm{f}}]^{\mathrm{T}}$denklem (3.11)'deki gibi elde edilir.

$$\mathbf{R}_{\mathrm{sf}} = \begin{bmatrix} \mathrm{R} & 0 & 0 & -\mathrm{uR} \\ 0 & \mathrm{R} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathrm{R} & 0 \\ \mathrm{uR} & 0 & 0 & -\mathrm{uR} - \mathrm{R_f} \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

$$\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{sf,abc}} = \mathbf{L}_{\mathrm{sf}}\mathbf{i}_{\mathrm{sf,abc}} + \boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{PMf,abc}} \tag{3.11}$$

Rotordaki sürekli mıknatıslar tarafından üretilen akı $\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{PMf,abc}} = \lambda_{\mathrm{PM}}[\cos\theta_{\mathrm{a}}\ \cos\theta_{\mathrm{b}}\ \cos\theta_{\mathrm{c}}\ \mathrm{u}\cos\theta_{\mathrm{a}}]^{\mathrm{T}}$ile ifade edilir. Endüktans matrisi denklem (3.12)'deki gibi değişir.

$$\mathbf{L}_{\mathrm{sf}} = \begin{bmatrix} \mathrm{L} & \mathrm{M} & \mathrm{M} & -\mathrm{uL} \\ \mathrm{M} & \mathrm{L} & \mathrm{M} & -\mathrm{uM} \\ \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{L} & -\mathrm{uM} \\ \mathrm{uL} & \mathrm{uM} & \mathrm{uM} & -\mathrm{u}^2\mathrm{L} \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

Gerilim ve akı bağıntıları aşağıda gösterildiği gibi sağlıklı ve arızalı olmak üzere iki kısma ayrılır. Denklem (3.13) ve (3.14)'te motorun sağlıklı kısmına ait gerilim ve akı bağıntı ifadeleri verilmektedir.

$$\mathbf{v}_{\mathrm{s,abc}} = \mathbf{R}_{\mathrm{s}}\mathbf{i}_{\mathrm{s,abc}} + \frac{\mathrm{d}\lambda_{\mathrm{s,abc}}}{\mathrm{dt}} - \mathrm{uR}[\mathrm{i_f}\ 0\ 0]^{\mathrm{T}} \tag{3.13}$$

$$\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{s,abc}} = \mathbf{L}_{\mathrm{s}}\mathbf{i}_{\mathrm{s,abc}} + \boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{PM,abc}} - \mathrm{u}[\mathrm{L\ M\ M}]^{\mathrm{T}}\mathrm{i_f} \tag{3.14}$$

Motorun arızalı kısmına ait denklemler (3.15) ve (3.16)'daki gibi ifade edilir.

$$0 = \mathrm{R_f}\mathrm{i_f} + \mathrm{uR}(\mathrm{i_f} - \mathrm{i_a}) - \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{f}}}{\mathrm{dt}} \tag{3.15}$$

$$\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{f}} = \mathrm{u}[\mathrm{L\ M\ M}]\mathrm{i}_{\mathrm{s,abc}} - \mathrm{u}^2\mathrm{L}\mathrm{i_f} + \mathrm{u}\lambda_{\mathrm{PM}}\cos\theta_{\mathrm{a}} \tag{3.16}$$

(3.13) numaralı denkleme Park dönüşümü uygulanarak motor modelinin sağlıklı kısmının $dq0$ referans düzlemindeki gerilim ve akı bağıntı ifadeleri sırasıyla denklem (3.17) ve (3.18)'deki gibi elde edilir.

$$\mathbf{v}_{s,dq0} = \mathbf{P}.\mathrm{v}_{s,abc} \;= \mathbf{R}_s \mathrm{i}_{s,dq0} + \mathbf{P}\frac{\mathrm{d}\lambda_{s,abc}}{\mathrm{dt}} - \frac{2}{3}\mathrm{uRi_f}\left[\cos\theta_a - \sin\theta_a \frac{1}{2}\right]^T \tag{3.17}$$

$$\boldsymbol{\lambda}_{s,dq0} = \mathbf{P}.\lambda_{s,abc} \;= \mathbf{L}_{dq0}\mathbf{i}_{s,dq0} + [\lambda_{PM}\ 0\ 0]^T - \frac{2}{3}\mathrm{ui_f}\left[\mathrm{L_d}\cos\theta_a - \mathrm{L_q}\sin\theta_a \frac{1}{2}\mathrm{L_{ls}}\right]^T \tag{3.18}$$

Endüktans matrisi detaylı olarak (3.19) numaralı denklemde gösterilen parametrelerden oluşur.

$$\mathrm{L_{dq}} = \mathrm{PL_s P^{-1}} = \mathrm{diag}\{\mathrm{L_d}\ \mathrm{L_q}\ \mathrm{L_{ls}}\} \tag{3.19}$$

(3.19) numaralı denklemde dq0 referans düzleminin d eksenindeki endüktans $\mathrm{L_d} = \mathrm{L_{ls}} + 1.5\mathrm{L_m} - 1.5\mathrm{L_\Delta}$, dq0 referans düzleminin q eksenindeki endüktan $\mathrm{L_q} = \mathrm{L_{ls}} + 1.5\mathrm{L_m} + 1.5\mathrm{L_\Delta}$ dir.

Türev kuralına göre;

$$\frac{\mathrm{d}\lambda_{s,dq0}}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{dP}}{\mathrm{dt}}\lambda_{s,abc} + \mathrm{P}\frac{\mathrm{d}\lambda_{s,abc}}{\mathrm{dt}} \tag{3.20}$$

Daha sonra (3.20)'deki ifade (3.21)'deki gibi yeniden organize edilir ise

$$\mathrm{P}\frac{\mathrm{d}\lambda_{s,abc}}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{d}\lambda_{s,dq0}}{\mathrm{dt}} + \mathrm{S}\lambda_{s,dq0} \tag{3.21}$$

olur.

Denklem (3.21)'deki $\mathrm{S} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e & 0 \\ \omega_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ eşittir.

(3.21)'deki verilen ifade (3.17)'de yazılırsa motorun dq0 rotor referans düzlemindeki sağlıklı kısma ait gerilim bileşenleri (3.22)'deki gibi ifade edilir.

$$\mathbf{v}_{s,dq0} = \mathbf{R}_s \mathrm{i}_{s,dq0} + -\frac{2}{3}\mathrm{uRi_f}\left[\cos\theta_a - \sin\theta_a \frac{1}{2}\right]^T + \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\lambda}_{s,dq0}}{\mathrm{dt}} + \mathrm{S}\boldsymbol{\lambda}_{s,dq0} \tag{3.22}$$

(3.22)'de dq0 eksenindeki gerilim matrisi $\mathbf{v}_{s,dq0} = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix}$, akım matrisi $\mathbf{i}_{s,dq0} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}$ eşittir. (3.22)'de verilen ifadedeki $\frac{d\boldsymbol{\lambda}_{s,dq0}}{dt}$ ve $S\boldsymbol{\lambda}_{s,dq0}$ ifadeleri sırasıyla (3.23) ve (3.24)'te ifade edilmiştir.

$$\frac{d\boldsymbol{\lambda}_{s,dq0}}{dt} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \frac{2}{3} u i_f \begin{bmatrix} \omega_e L_d \sin\theta_a \\ \omega_e L_q \cos\theta_a \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{2}{3} u \frac{di_f}{d_t} \begin{bmatrix} L_d \cos\theta_a \\ L_q \sin\theta_a \\ \frac{1}{2} L_{ls} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$S\boldsymbol{\lambda}_{s,dq0} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e L_q & 0 \\ \omega_e L_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \lambda_{PM} \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{2}{3} u i_f \begin{bmatrix} \omega_e L_q \sin\theta_a \\ \omega_e L_d \cos\theta_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

(3.23) ve (3.24)'teki ifadeler (3.22) numaralı ifadede yerine yazılırsa motorun sağlıklı kısmına ait dq0 referans düzlemindeki gerilim vektörü (3.25)'teki gibi olur.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} - \frac{2}{3} u R i_f \begin{bmatrix} \cos\theta_a \\ \sin\theta_a \\ \frac{1}{2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} +$$

$$\frac{2}{3} u i_f \begin{bmatrix} \omega_e L_d \sin\theta_a \\ \omega_e L_q \cos\theta_a \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{2}{3} u \frac{di_f}{d_t} \begin{bmatrix} L_d \cos\theta_a \\ L_q \sin\theta_a \\ \frac{1}{2} L_{ls} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e L_q & 0 \\ \omega_e L_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \lambda_{PM} \\ 0 \end{bmatrix} -$$

$$\frac{2}{3} u i_f \begin{bmatrix} \omega_e L_q \sin\theta_a \\ \omega_e L_d \cos\theta_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

(3.25)'teki motorun sağlıklı kısmına ait gerilim vektör matrisi (3.26)'daki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{v}_{s,dq0} = \begin{bmatrix} v_{d,abc} \\ v_{q,abc} \\ v_{0,abc} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Motorun sağlıklı kısmının d eksenin gerilim bileşeni $v_{d,abc}$,q eksenindeki gerilim bileşeni $v_{q,abc}$ ve 0'ıncı gerilim bileşeni $v_{0,abc}$, (3.25)'teki ifadeden elde edilmiş, sırasıyla denklem (3.27), (3.28) ve (3.29)'da verilmiştir.

$$v_{d,abc} = i_d R + i_f\left[-\frac{2}{3}uR\cos\theta_a - \frac{2}{3}u\omega_e L_q \sin\theta_a + \frac{2}{3}u\omega_e L_d \sin\theta_a\right] + \frac{di_d}{d_t}L_d + \frac{di_f}{dt}\left[-\frac{2}{3}uL_d\cos\theta_a\right] + i_q[-\omega_e L_q] \quad (3.27)$$

$$v_{q,abc} = i_q R + i_f\left[\frac{2}{3}uR\sin\theta_a - \frac{2}{3}u\omega_e L_d \cos\theta_a + \frac{2}{3}u\omega_e L_q \cos\theta_a\right] + \frac{di_q}{d_t}L_q + \frac{di_f}{dt}\left[\frac{2}{3}uL_q\sin\theta_a\right] + \omega_e\lambda_{PM} \quad (3.28)$$

$$v_{0,abc} = Ri_0 + i_f[-\frac{1}{3}uR] \quad (3.29)$$

Motor modelinin arızalı kısmına park dönüşüm uygulanmadan önce (3.15)'teki gerilim ve (3.16)'daki akı denklemi sırasıyla (3.30) ve(3.31)'daki gibi yeniden düzenlenir.

$$v_f = R_f i_f = [i_d(uR\cos\theta_a - u\omega_e L_d \sin\theta_a) + i_q\left(-uR\sin\theta_a - u\omega_e L_q\cos\theta_a\right) + \frac{di_d}{d_t}(uL_d\cos\theta_a) + \frac{di_q}{d_t}\left(-uL_q\sin\theta_a\right) + i_f(-uR) + \frac{di_f}{d_t}(-u^2L) - u\omega_e\lambda_{PM}\sin\theta_a] \quad (3.30)$$

$$\lambda_f = uL_{dq\theta}i_{s,dq0} - u^2Li_f + u\lambda_{PM}\cos\theta_a \quad (3.31)$$

(3.31)'deki endüktans vektörü $L_{dq\theta} = [L_d cos\theta_a \; - L_q sin\theta_a \; L_{ls}]$. (3.30)'daki sarımlar arası kısa devre arızasının etkisiyle oluşan gerilim bileşenlerinin dq0 eksenindeki ifadesi (3.32) gibi düzenlenir.

$$\begin{bmatrix} v_{d,f} \\ v_{q,f} \end{bmatrix} = \frac{2}{3}v_f\begin{bmatrix} \cos\theta_a \\ \sin\theta_a \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

(3.32)'deki ifade (3.30)'daki ifadeye uygulanarak sarımlar arası kısa devre arızanın oluşturduğu dq ekseninki gerilim bileşenleri $v_{d,f}$ ve $v_{q,f}$ sırasıyla (3.33) ve (3.34)'teki gibi elde edilir.

$$v_{d,f} = [i_d\left(\frac{2}{3}uR\cos^2\theta_a - \frac{2}{3}u\omega_e L_d\sin\theta_a\cos\theta_a\right) + \frac{di_d}{d_t}(\frac{2}{3}uL_d\cos^2\theta_a) + i_q(-\frac{2}{3}uR\sin\theta_a\cos\theta_a - \frac{2}{3}u\omega_e L_q\cos^2\theta_a) + \frac{di_q}{d_t}\left(-\frac{2}{3}uL_q\sin\theta_a\cos\theta_a\right) + i_f\left(-\frac{2}{3}uR\cos\theta_a\right) + \frac{di_f}{d_t}\left(-\frac{2}{3}u^2L\cos\theta_a\right) - \frac{2}{3}u\omega_e\lambda_{PM}\cos\theta_a\sin\theta_a] \quad (3.33)$$

$$v_{q,f} = [i_d(-\frac{2}{3}uR\cos\theta_a\sin\theta_a + \frac{2}{3}u\omega_e L_d \sin^2\theta_a) + \frac{di_d}{d_t}\left(-\frac{2}{3}uL_d\cos\theta_a\sin\theta_a\right) + i_q\left(\frac{2}{3}uR\sin^2\theta_a + \frac{2}{3}u\omega_e L_q\cos\theta_a\sin\theta_a\right) + \frac{di_q}{d_t}(\frac{2}{3}uL_q \sin^2\theta_a) + i_f\left(\frac{2}{3}uR\sin\theta_a\right) + \frac{di_f}{d_t}\left(\frac{2}{3}u^2L\sin\theta_a\right) + \frac{2}{3}u\omega_e\lambda_{PM}\sin^2\theta_a] \quad (3.34)$$

(3.26)'daki motorun sağlıklı kısmının gerilim bileşenleriyle (3.32)'deki kısa devre olmuş sarımlardaki gerilim bileşenleri birleştirilerek stator sarımlar arası kısa devre arızası durumunda dq-eksenindeki gerilim bileşenleri (3.35)'teki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{d,abc} \\ v_{q,abc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{d,f} \\ v_{q,f} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

(3.35)'teki gerekli matematiksel işlemler yapıldıktan sonra stator sarımlar arası kısa devre arızası durumunda sürekli mıknatıslı senkron motorun dq0 rotor referans düzlemindeki d- eksenindeki gerilim bileşeni v_d, q-ekseninki gerilim bileşeni v_q ve 0'ıncı gerilim bileşeni v_0 sırasıyla (3.36), (3.37) ve (3.38)'deki gibi elde edilir.

$$v_d = [i_d\left(R - \frac{2}{3}uR\cos^2\theta_a + \frac{2}{3}u\omega_e L_d\sin\theta_a\cos\theta_a\right) + \frac{di_d}{d_t}(L_d - \frac{2}{3}uL_d\cos^2\theta_a) + i_q(-\omega_e L_q + \frac{2}{3}uR\sin\theta_a\cos\theta_a + \frac{2}{3}u\omega_e L_q\cos^2\theta_a) + \frac{di_q}{d_t}\left(\frac{2}{3}uL_q\sin\theta_a\cos\theta_a\right) + i_f\left(-\frac{2}{3}u\omega_e L_q\sin\theta_a + \frac{2}{3}u\omega_e L_d\sin\theta_a\right) + \frac{di_f}{d_t}\left(-\frac{2}{3}uL_d\cos\theta_a + \frac{2}{3}u^2L\cos\theta_a\right) + \frac{2}{3}u\omega_e\lambda_{PM}\cos\theta_a\sin\theta_a] \quad (3.36)$$

$$v_q = [i_q\left(R - \frac{2}{3}uR\sin^2\theta_a - \frac{2}{3}u\omega_e L_q\cos\theta_a\sin\theta_a\right) + \frac{di_q}{d_t}(L_q - \frac{2}{3}uL_q\sin^2\theta_a) + i_d(\omega_e L_d + \frac{2}{3}uR\cos\theta_a\sin\theta_a - \frac{2}{3}u\omega_e L_d\sin^2\theta_a) + \frac{di_d}{d_t}\left(\frac{2}{3}uL_d\cos\theta_a\sin\theta_a\right) + i_f\left(-\frac{2}{3}u\omega_e L_d\cos\theta_a + \frac{2}{3}u\omega_e L_q\cos\theta_a\right) + \frac{di_f}{d_t}\left(\frac{2}{3}uL_q\sin\theta_a - \frac{2}{3}u^2L\sin\theta_a\right) + \omega_e\lambda_{PM} - \frac{2}{3}u\omega_e\lambda_{PM}\sin^2\theta_a] \quad (3.37)$$

$$v_0 = Ri_0 + i_f[-\frac{1}{3}uR] \quad (3.38)$$

Arızalı faz sargısındaki sirkülasyon (arıza) akımı (i_f) (3.39)'daki denklem uygulanarak elde edilir. Bu arıza akımının motor davranışı üzerindeki etkisi bir sonraki bölümdeki simülasyon sonuçları aracılığıyla analiz edilecektir.

$$v_f - R_f i_f = 0 \quad (3.39)$$

Sağlıklı durumda, SMSM tarafından üretilen elektromanyetik moment denklem (3.40) ile hesaplanabilir. Aynı prensibe göre stator kısa devre arızası durumunda, üretilen elektromanyetik moment denklem (3.41) ile hesaplanabilir.

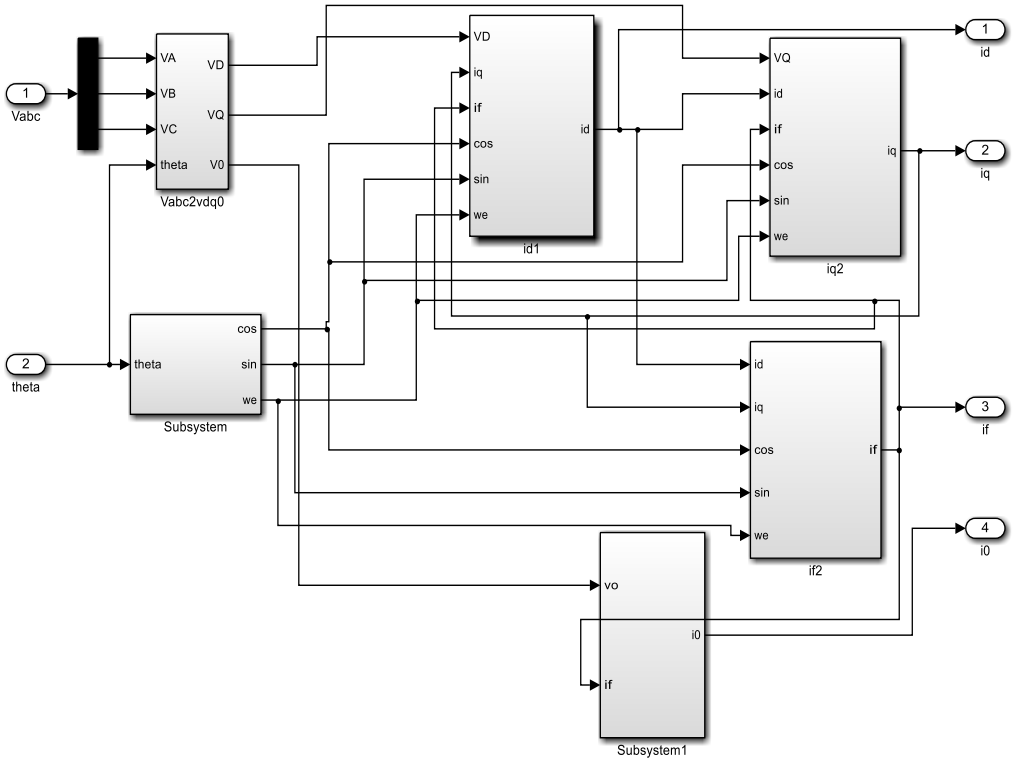
$$T_e = \frac{3}{4} N_p \left[i_q \lambda_{PM} + \left(L_d - L_q \right) i_d i_q \right] \tag{3.40}$$

$$T_{ef} = \frac{3}{4} N_p \left[i_q \lambda_{PM} + \left(L_d - L_q \right) i_d i_q \right] + \frac{1}{2} N_p u i_f \lambda_{PM} \sin\theta_a \tag{3.41}$$

3.2. Stator Sarımlar Arası Kısa Devre Arızası Durumundaki Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Matlab/Simulink'te Benzetim Modelinin Oluşturulması

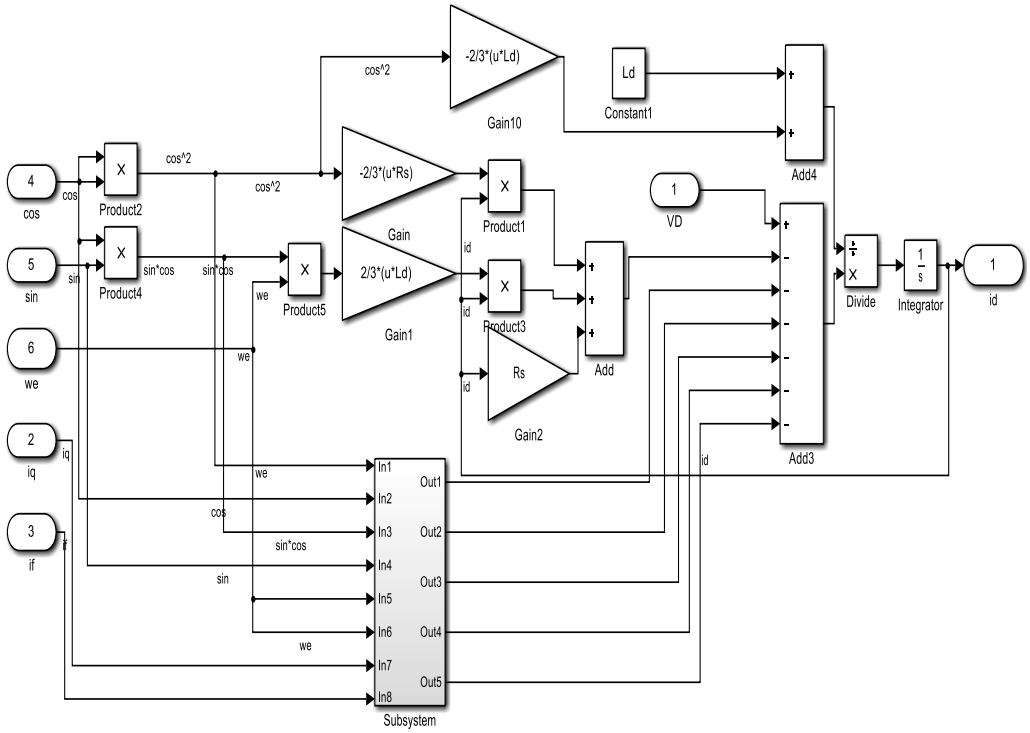
Bölüm 3.1'de sağlıklı durumda ve stator sarımlar arası kısa devre arıza durumunda vektör kontrollü üç fazlı yüzeysel sürekli mıknatıslı senkron motorun matematiksel model eşitlikleri kullanılarak SMSM'nin benzetim modeli Matlab/Simulink'te yazılımında gerçekleştirilmiş olup oluşturulan bloklar aşama aşama bu bölümde anlatılmaktadır.

Bilgisayar benzetim modeli oluşturulurken öncelikle SMSM'nin bazı parametrelerinin belirlenebilmesi gerekmektedir. Benzetim modelinin deneysel sisteme en yakın sonuçlar verebilmesi için deneysel sistemde kullanılan motor parametreleri benzetim modelinde kullanılmalıdır. Bu parametreler motordan ölçülebileceği gibi motorun kataloğundan da elde edilebilmektedir. Çizelge 3.1.'de benzetim modelinde kullanılan motor parametreleri verilmiştir. (3.35) numaralı eşitliğin benzetim bloğu aşağıda Şekil 3.2.'de verilmektedir.

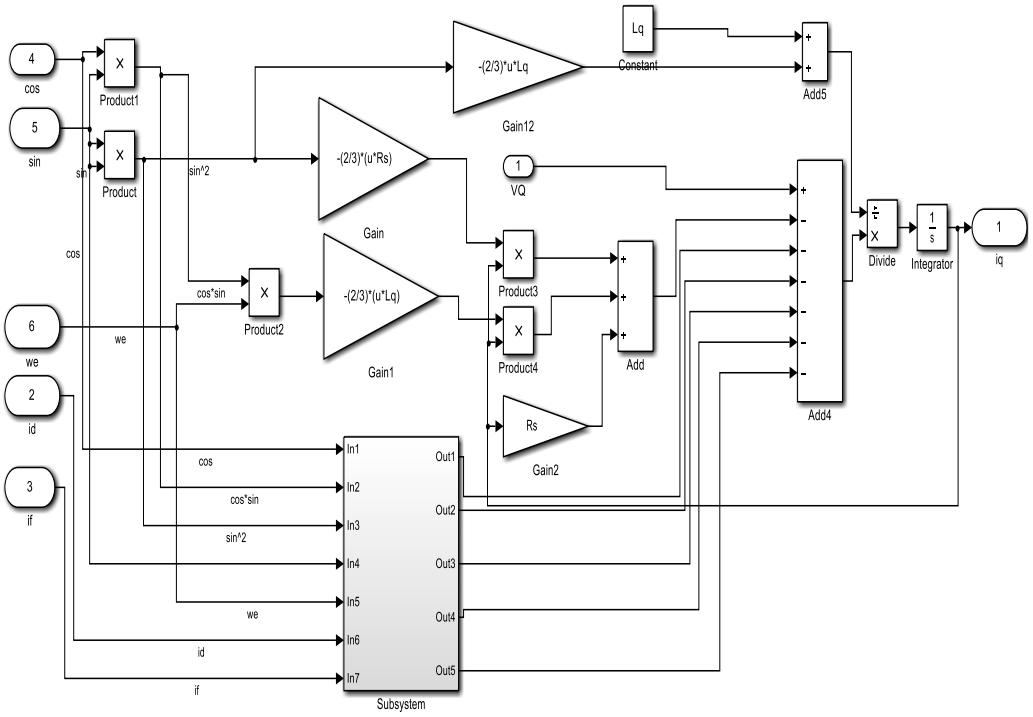


Şekil 3.2. $\dot{I}_{s,dq0}$ stator akımlarının ve i_f kısa devre akımın elde edilmesi

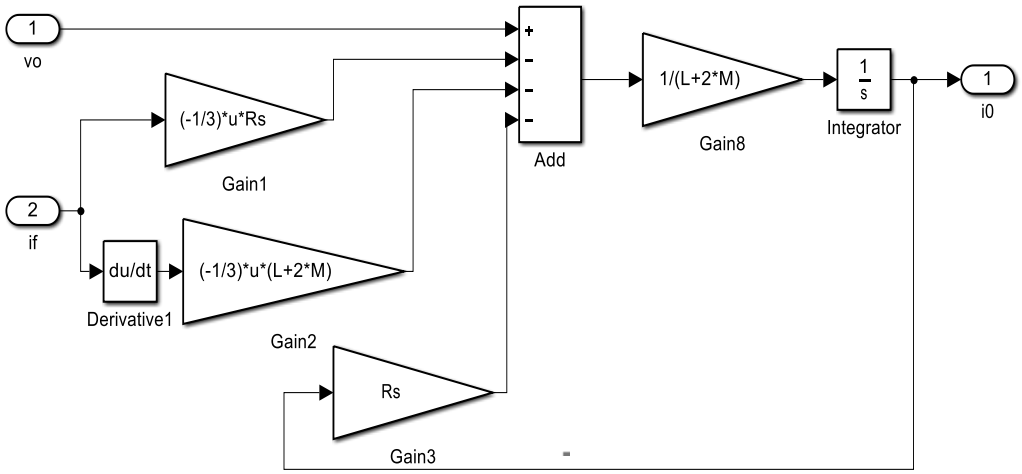
Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi arızalı durumundaki motorun rotor referans düzlemindeki $i_{s,dq0}$ ve arıza akımını i_f elde etmek için inverterde üretilen üç fazlı $V_{s,abc}$ gerilimlerinin uygulanması gerekmektedir. Burada $V_{s,abc}$ gerilimleri evirici bloğundan gelmektedir ve $V_{s,abc}$'ye denklem (3.4)'de ifade edilen park dönüşümü uygulanarak elde edilen $v_{s,dq0}$'nin dq0 eksenindeki $i_{s,dq0}$ akımları ve arıza akımının elde edilmesinde kullanılmıştır. Şekil 3.3.'de i_d akımın, Şekil 3.4'de i_q akımın, Şekil 3.5.'de i_0 akımın ve Şekil 3.6'da ise i_f arıza akımın elde edilişi gösterilmektedir.



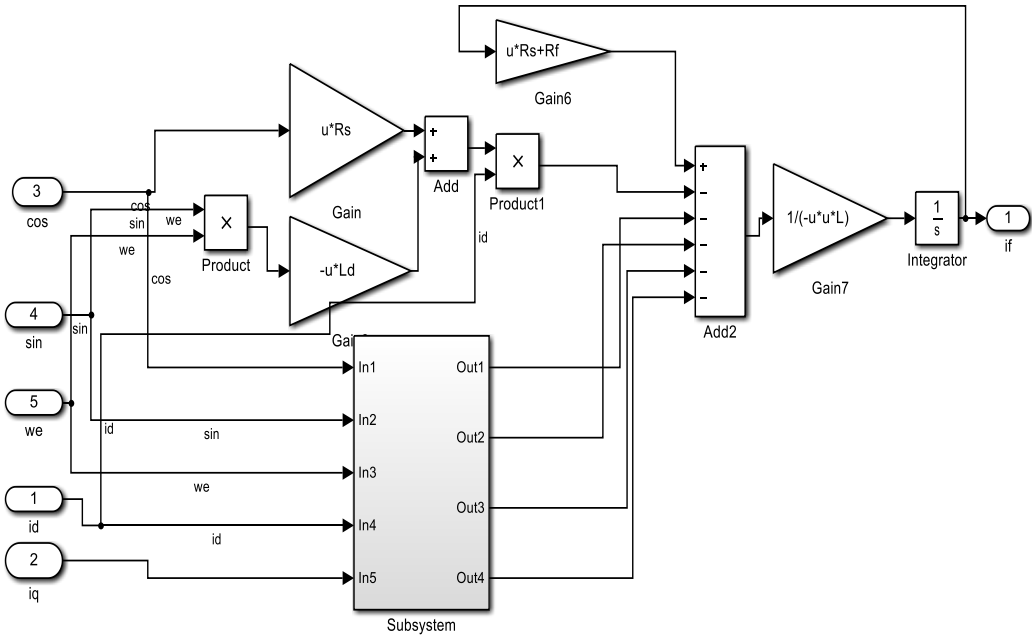
Şekil 3.3. Arızalı durumda i_d akımının elde edilmesi



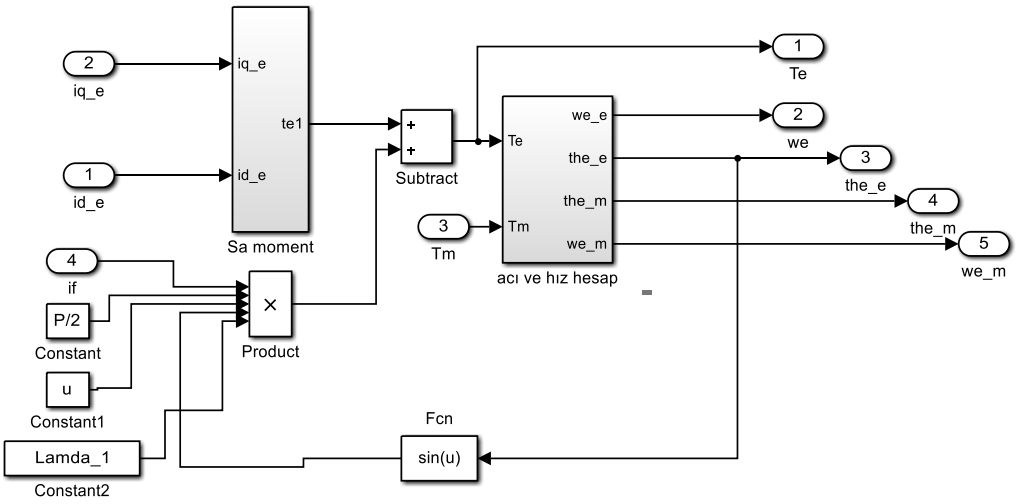
Şekil 3.4. Arızalı durumda i_q akımının elde edilmesi



Şekil 3.5. Arızalı durumda i_0 akımının elde edilmesi



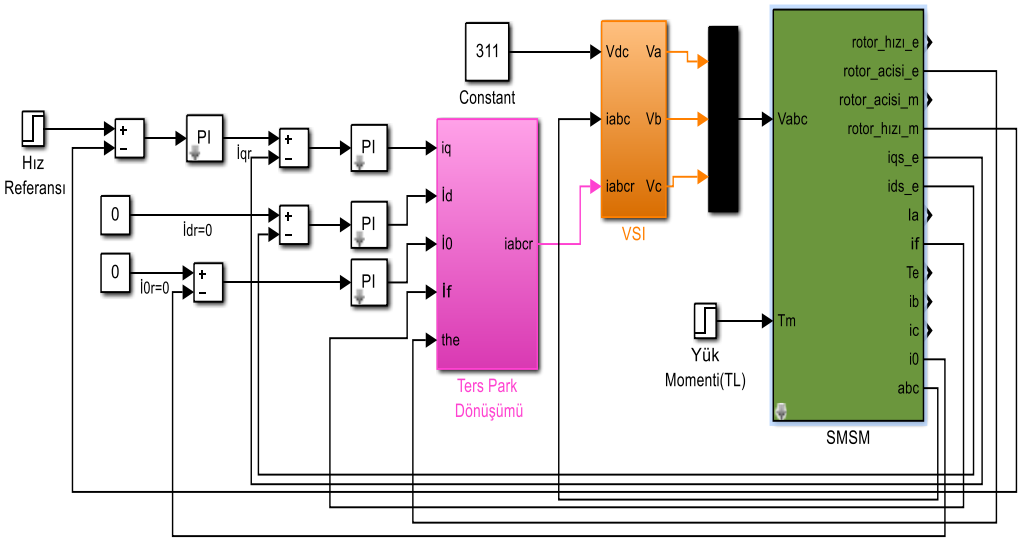
Şekil 3.6. Arıza akımı i_f'nin elde edilmesi



Şekil 3.7. Momentin elde edilmesi

Şekil 3.3.'deki i_d akımının benzetim bloğu (3.36) numaralı eşitlik kullanılarak, Şekil 3.4.'deki i_q akımının benzetim bloğu (3.37) numaralı eşitlik kullanılarak, Şekil 3.5.'teki i_0 akımın benzetim bloğu (3.38) numaralı eşitlikteki ifade kullanılarak, Şekil 3.6.'daki i_f arıza akımının benzetim bloğu (3.39)'daki ifade kullanılarak ve Şekil 3.7.'de moment benzetim bloğu ise (3.41)'deki ifade kullanılarak elde edilmiştir.

Yukarıdaki verilen benzetim blokları kullanılarak oluşturulan stator sarımlar arası kısa devre arızalı SMSM'nin gerilim kaynaklı inverterli (VSI) hız kontrol modelinin Matlab/Simulik benzetimi Şekil 3.8.'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Stator sarımlar arası kısa devre arızalı SMSM'nin gerilim kaynaklı evirici (VSI) sürücülü hız kontrol modelinin Matlab/Simulink benzetimi

Bu benzetim modelini kullanmanın en önemli avantajı istenilen değerde sarımlar arası kısa devre arıza oranı ile sonuç alabilmektir. Deneysel olarak farklı sarımlar arası kısa devre oranlarındaki SMSM'lerden veri almak için o oranda kısa devre oluşturulması ve her arıza şiddeti için ayrı ayrı motor imalatı gereklidir. Benzetim modelinin çalışmasında herhangi bir maliyet ve zaman harcamadan istenilen orandaki arıza şiddetine sahip motordan veri alabilme imkanı sağlanmaktadır. Benzetim modelinde kullanılan SMSM'nin motor parametreleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Benzetim modelinde kullanılan SMSM'nin parametreleri

Gücü	1 kW
Kutup Sayısı	8
PM akısı, λ	0.1852 Wb
Bobin İndüktansı, L	0.0116 H
Ortak İndüktans, M	0.00445 H
Ld=Lq	0.00715 H
Faz Direnci, R	7.6 Ω
Atalet momenti	0.0001854 kgm^2
Kısa Devre Oranı	u
Yük momenti, T_L	3 Nm
Rotor açısal hız	1800 dev/dk

Bu parametreler kullanılarak çalıştırılan benzetim modelinden elde edilen sonuçlar bölüm 4'te sunulmaktadır. Benzetim ile deney çalışmanın sonuçlarının ne oranda yakınsadığı ve örtüştüğü sonuçlar bölümünde verilecek grafikler ile daha iyi ortaya çıkacaktır. Yapılan benzetim çalışması deneysel sisteme en yakın sonuçlar verecek şekilde tasarlanmıştır.

3.3. Deneysel Devre Düzeneği

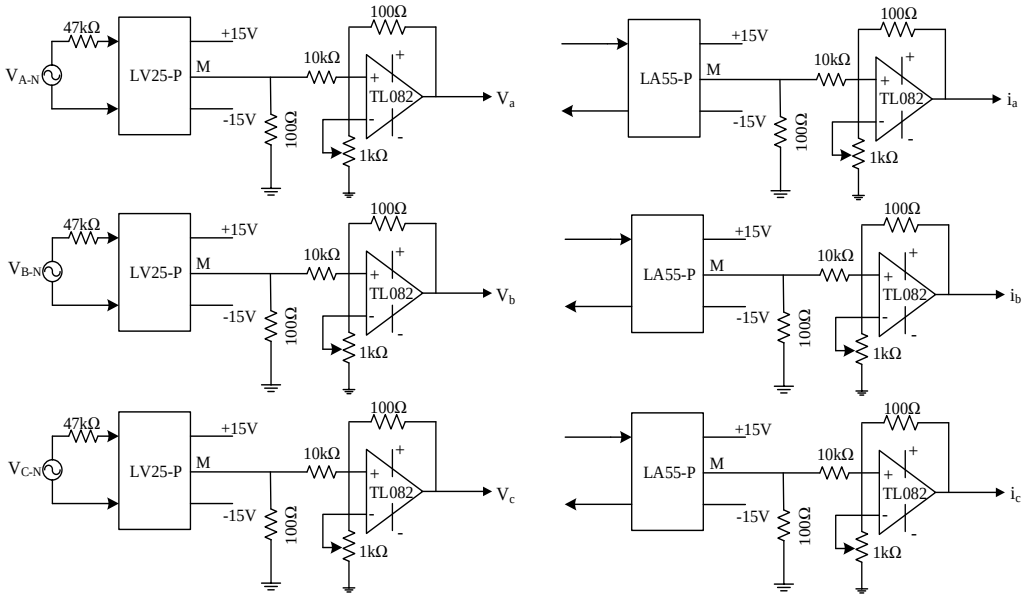
Bu bölümde ilk olarak SMSM'den elde edilen akım ve gerilim sinyallerini belli bir örnekleme frekansında kayıt etmeye imkan sağlayan veri toplama sistemi anlatılacaktır. Daha sonra SMSM'nin yükleme sistemi hakkında bilgi verilecektir.

3.3.1. Veri Toplama Sistemi

SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızasının analizi için geliştirilen algoritmalarda üç faz gerilim ve akımlar ve moment ölçülmektedir. Analog sinyallerin analog dijital dönüştürücüler (ADC) vasıtasıyla ölçülebilmesi için uygun forma

dönüştürülmesi gereklidir. Motor fazlarından gelen gerilim ve akım bilgilerini DAQ ile ölçmek için birer arayüz devresi kullanılmaktadır.

Deneysel devre düzeneğinde akım ve gerilim algılayıcıları olarak LEM firması tarafından üretilen LA55-P ve LV25-P modelleri kullanılmıştır. Akım algılayıcısının ölçme aralığı 0-50A, gerilim algılayıcısının ölçme aralığı ise 10-500V'tur. Şekil 3.9.a ve 3.9.b'de akım ve gerilim algılayıcı devrelerin şemaları gösterilmektedir. Bu şemalar kullanılarak basılan baskı devreler akım ve gerilim verilerini veri toplama kartına aktararak işlenmesine olanak vermektedir.



Şekil 3.9. (a) Gerilim algılama devresi (b) Akım algılama devresi

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

Motor faz gerilimleri LEM firmasının LV 25-P kodlu gerilim dönüştürücüsü kullanılarak ölçülmektedir. Sensörün nominal gerilim ölçüm aralığı 10-500 V arasındadır. Besleme gerilimi 12 V seçildiğinde % ±0.9 doğrulukla ölçüm yapabilmektedir. Çok hızlı tepki süresi olan bu sensörün ölçüm tepki süresi 40 μs'dir. LV

25-P gerilim sensörü sahip olduğu bu özellikleri ile durum izleme uygulamalarında çok tercih edilen bir sensördür.

Motoru sürmek için modeli 8 SS N 008 001 olan FEMSAN servo motor sürücüsü kullanılmıştır. Motor kontrol yöntemi Darbe Genişlik Modulasyonu (PWM) ile yapılmıştır. Akım ve gerilim algılayıcılarından elde edilen akım ve gerilimlerin sinüzoidal formları için akım ve gerilimlere alçak geçiren filtre uygulanmıştır.

Motor milindeki moment ETH messtechnik firması tarafından üretilen DRBK-20-n model moment algılayıcısıyla ölçülmüştür. Sensörün nominal moment ölçüm aralığı 0-20 Nm arasındadır. Besleme gerilimi 12 V seçildiğinde % $\pm$0.5 doğrulukla ölçüm yapabilmektedir. Sensörün hem gerilim çıkışı hem de akım çıkışı mevcuttur. Gerilim çıkışı 0$\pm$5 V arasındadır, akım çıkışı 10$\pm$8 mA arasındadır.

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

3.3.2. Motor ve Yükleme Sistemi

SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızasının motor performansı üzerindeki etkisini analiz etmek amacıyla tek fazında arıza şiddeti birbirinden farklı sarımlar arası kısa devre arızası bulunan, diğer yönlerden birbirine özdeş motor parametreleri Çizelge 3.2.'de verilen üç fazlı 1 kW, 3 Nm anma momentine sahip 3 adet SMSM imalatı yapılmıştır. Bu SMSM'lerden arıza şiddeti en düşük oranda olanının, tek fazında %2 oranında sarım kısa devre edilmiştir. Diğer ikisi sırasıyla tek fazında %12,5 ve %25 oranında kısa devre edilmiş sarıma sahip motorlar olarak imal edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan motorlar konfigürasyona bağlı olarak hem sağlıklı hem de arızalı motor verileri elde edilebilecek şekilde tasarlanmıştır.

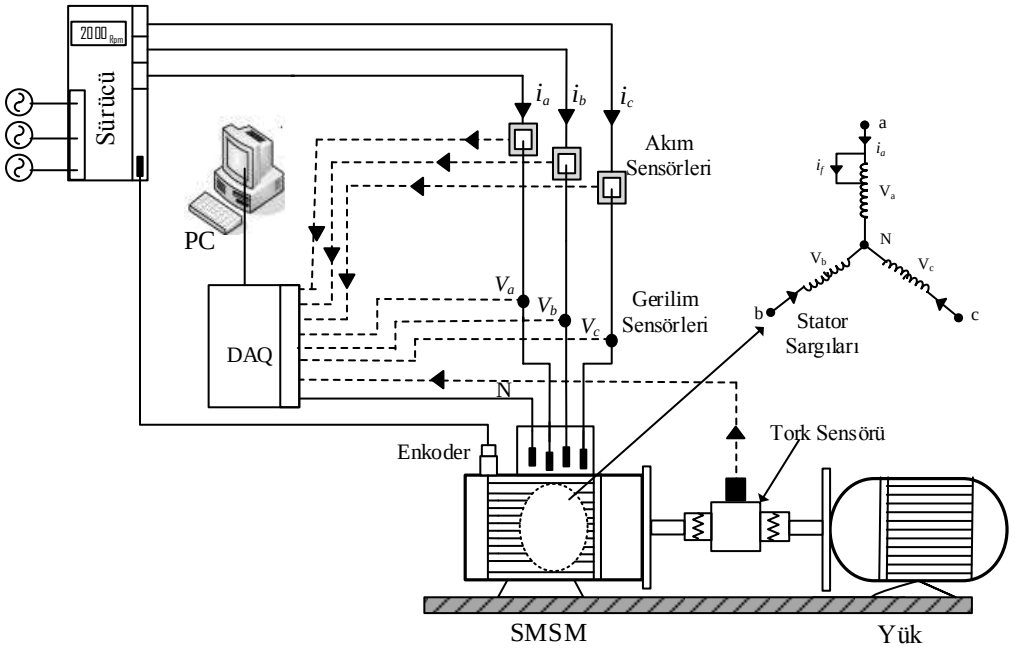
Motoru yüklemek amacıyla fuko freni kullanılmıştır. Fuko freninin besleme gerilim değeri değiştirilerek test edilen motorun yükleme miktarı ayarlanmıştır. Bu amaçla ayarlanabilir DC gerilim kaynağı kullanılmıştır. Böylece SMSM'yi istenilen

oranda yükleyerek farklı yüklenme koşullarındaki çalışma durumları için akım ve gerilim verileri kayıt edilmiştir.

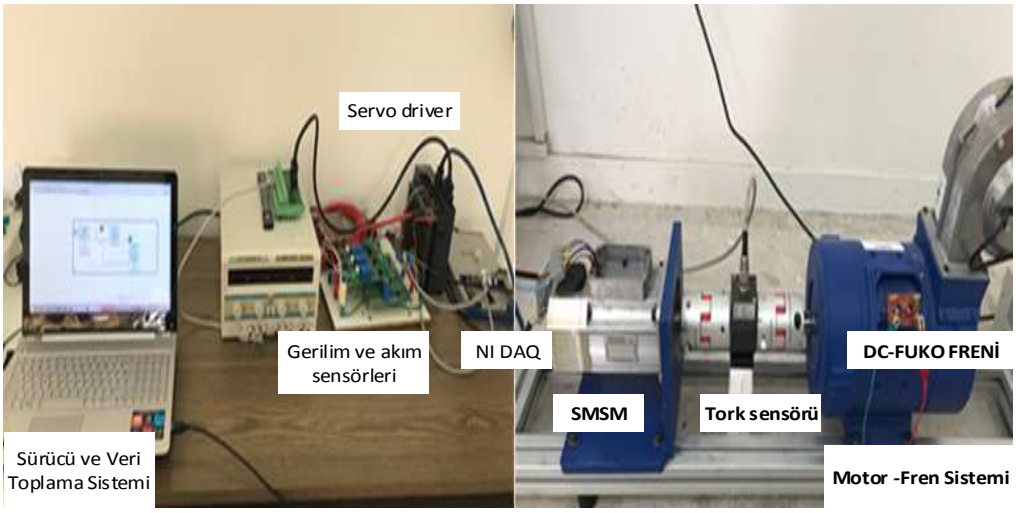
Çizelge 3.2. SMSM parametreleri

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

Deneysel düzeneğin şematik olarak gösterimi Şekil 3.10.'da ve deneysel düzeneğin görüntüsü ise Şekil 3.11.'de verilmektedir.



Şekil 3.10. Deneysel sistemin şematik gösterimi



Şekil 3.11. Deneysel düzeneğinin görüntüsü

3.4. Deneylerin Yapılışı

SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızasının motor performansı üzerindeki etkisinin araştırılması için deneysel düzenekten elde edilen stator üç faz akım ve gerilimleri ile motor milindeki moment verisi incelenmiştir. Bunun için çalışmanın deneysel tasarımında tek fazında %2, %12.5 ve %25 oranında kısa devre sarım arızasına sahip motorların hem sağlıklı hem de arızalı durumları için, 800 dev/dk -2200 dev/dk hız aralığındaki 8 farklı hız durumu ve %0-%110 yük aralığındaki 6 farklı yük durumu için, toplam 48 farklı durum için 10 kHz örnekleme frekansında 15 sn süresince stator üç faz akım ve gerilimleri ile moment verisi kayıt altına alınmıştır. Bu deneylerde farklı arıza şiddetine sahip motorların aynı yük ve hız durumundaki akım, gerilim ve moment verisinin değişimleri incelenmiştir. Aynı yük ve hız durumu için motorun arızalı durumundan elde edilen sonuçlar ile sağlıklı durumundan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçları bölüm 4'te sunulmaktadır.

3.5. Sinyal İşleme ve Spektral Analiz ile Arıza Analizi

Motorlardaki arızaların analizi ve tespiti genellikle MCSA ile yapılabilmektedir. Rulman arızası, rotor çubuğu kırığı arızası gibi çeşitli mekanik arızaları analiz ve tespit etmek için çok sayıda MCSA tabanlı yaklaşımlar önerilmiştir. Stator gerilim dengesizliği ve sarım kısa devre arızası analizi için de gelişmiş sinyal işleme teknikleri kullanılarak yine MCSA tabanlı yaklaşımlar önerilmektedir. Online stator akım izleme sistemi, motor arıza analiz ve tespiti için kullanılmaktadır. Arıza tespitinde kullanılan analiz

yöntemlerinin büyük çoğunluğu motor akım veya titreşim imza analizinde FFT tabanlı yöntemleri kullanmaktadır. FFT analiz edilen sinyalin içeriğinde barındırdığı farklı frekans bileşenlerini verir.

Bu tezde, çok sayıda frekans bileşeni içeren sinyalleri analiz etmede kullanılan ve stator sarım arızasının tespitinde başarılı sonuçlar veren FFT tekniği kullanılmıştır. Sinyalleri analiz etmek için kullanılan en basit ve geleneksel yöntem FFT'dir. FFT, bir sinyalin farklı frekanslardaki enerji dağılımını gözleyebilmek için o sinyale uygulanan Fourier dönüşümü ile ifade edilebilir (Bracale ve ark., 2004).

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

Bu tezde sürekli mıknatıslı senkron motorun sağlıklı durumda ve farklı şiddetteki arıza durumlarında moment harmoniklerinin genliklerindeki değişim detaylı şekilde incelenerek stator sarımlar arası kısa devre arızasına bağımlı arıza imzaları önerilmiştir.

3.5.1 Ayrık-Zamanlı Fourier Dönüşümü (DFT)

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

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nm/N} \tag{3.42}$$

olarak tanımlanır. Burada $x(n)$ analog zaman domeni sinyali $x(t)$'den örneklenen ayrık işareti, m (m=0,1,…….N-1) frekans domenindeki DFT çıkışının indisini, n (n=0,1,……..N-1) zaman domen indisini ve N giriş sinyalinin örnekleme sayısını ve DFT'deki frekans noktalarını belirtmektedir. DFT N tane örnekleme giriş sinyali için N tane eşit frekans noktası verir (Richard, 2004).

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

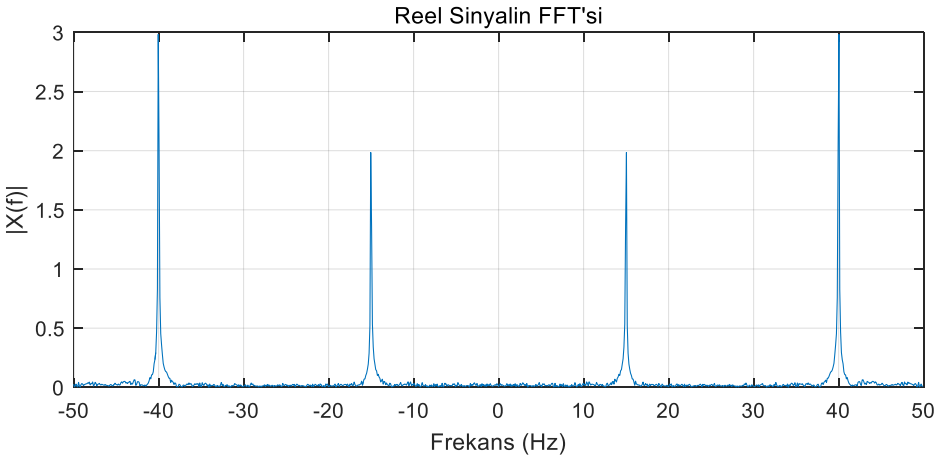
$$f(m) = \frac{mf_s}{N} \tag{3.43}$$

olur.

Denklem (3.42)'den görüldüğü gibi örnekleme sayısı N artıkça DFT hesaplaması verimli değildir. Uygulamada DFT yerine örnekleme sayısı 2'nin kuvveti olduğunda daha verimli bir yöntem olan Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) kullanılır. FFT aritmetik işlem sayısını büyük oranda azaltarak ($2N^2$'den $N \log_2 N$'e) gerçek hesaplamalarda avantaj sağlar.

3.5.2. Reel Sinyalin FFT'si

Şekil 3.2 $x(t) = 2\sin 2\pi 15t + 3\sin 2\pi 40t$ sinyalinin FFT'sini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi FFT spektrumu simetriktir. Bunun manası, eğer FFT N tane reel girişli sinyale uygulanırsa N tane farklı kompleks FFT çıkış terimi elde edilir. Ancak bunlardan ilk $N/2$ terim bağımsızdır. Yani negatif frekansta gösterilen terimler ($X(N/2+1)$'den $X(N-1)$ kadar olan terimler) ekstra bir bilgi içermezler (Richard, 2004).



Şekil 3.12. Reel sinyalin FFT spektrumu

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

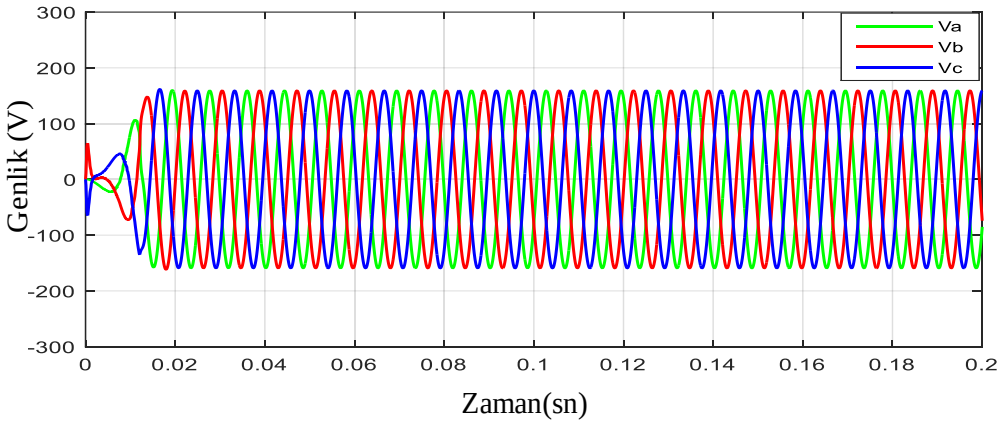
Bu bölümde, bölüm 3'te sağlıklı ve üç farklı stator sarımlar arası kısa devre arıza durumu için Matlab/Simulink'te oluşturulan benzetim modelinden elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

4.1. Benzetim Modelin Sonuçları

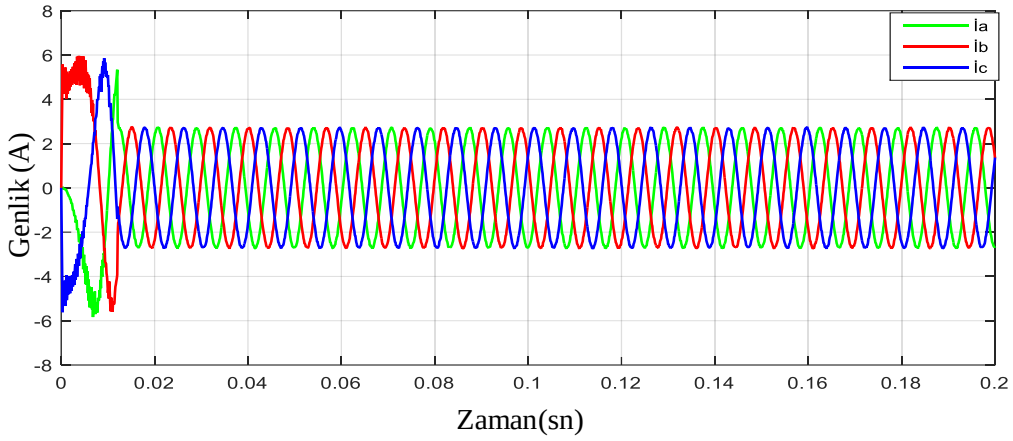
Çizelge 3.1.'de SMSM parametreleri kullanılarak bölüm 3'te oluşturulan SMSM'nin benzetim modeli çalıştırılarak elde edilen benzetim sonuçları aşağıda sunulmaktadır.

4.1.1. Sağlıklı Motorun Benzetim Sonuçları

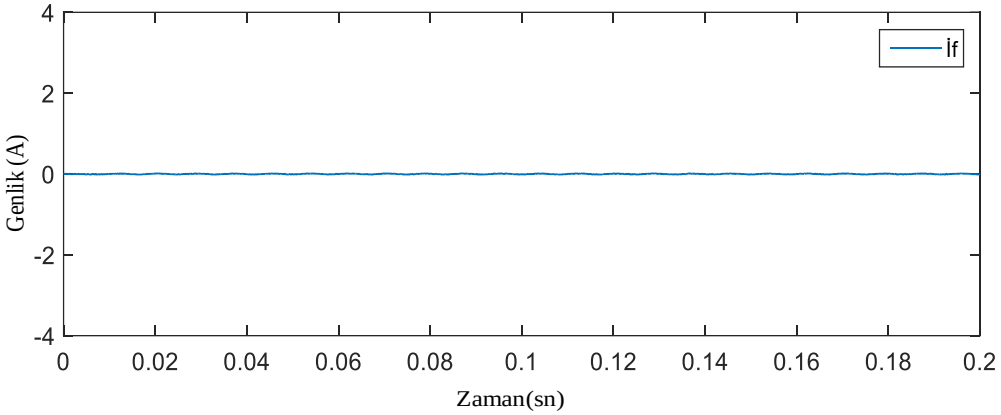
Herhangi bir fazında kısa devre olan sarımların bulunmadığı 1800 dev/dk hızda ve tam yüklü durumunda sağlıklı bir SMSM'nin stator üç faz akım ve gerilimleri ile kısa devre akımı ve moment verisinin grafikleri sırasıyla Şekil 4.1., Şekil 4.2., Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'te verildiği gibidir.



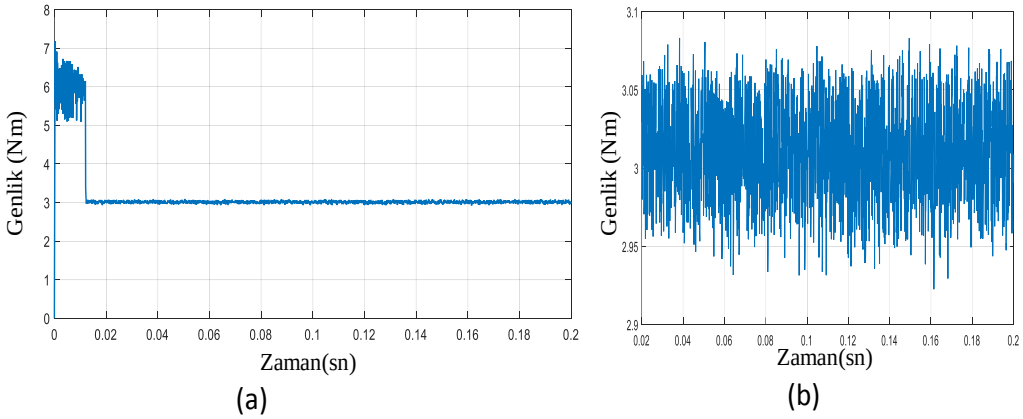
Şekil 4.1. Stator gerilimleri (Vabc)



Şekil 4.2. Stator akımları (iabc)



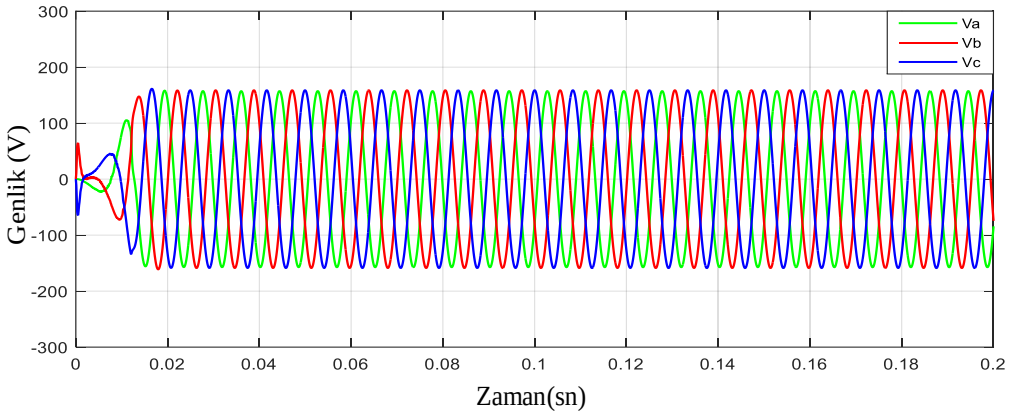
Şekil 4.3. Kısa devre akımı (if)



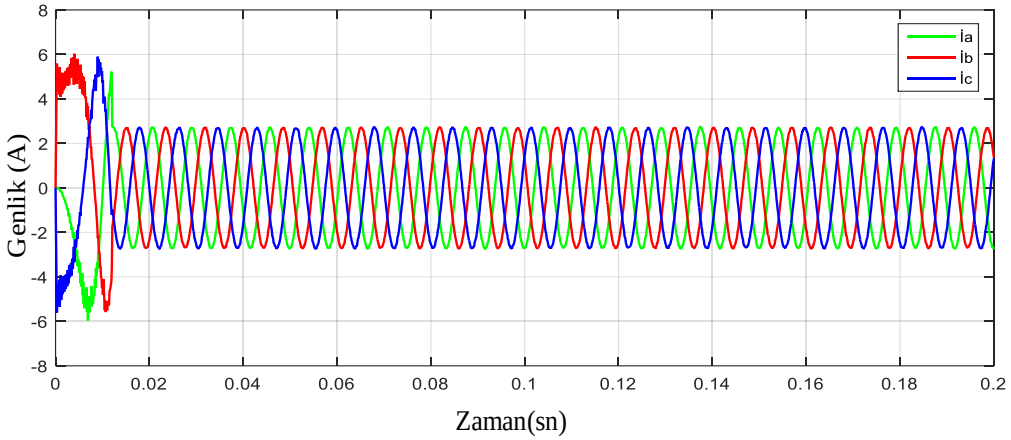
Şekil 4.4. (a) Geçici ve sürekli durumdaki motor momenti (b) Sürekli durumdaki motor momenti

4.1.2. Kısa Devre Oranı %2 olan Arızalı Motorun Benzetim Sonuçları

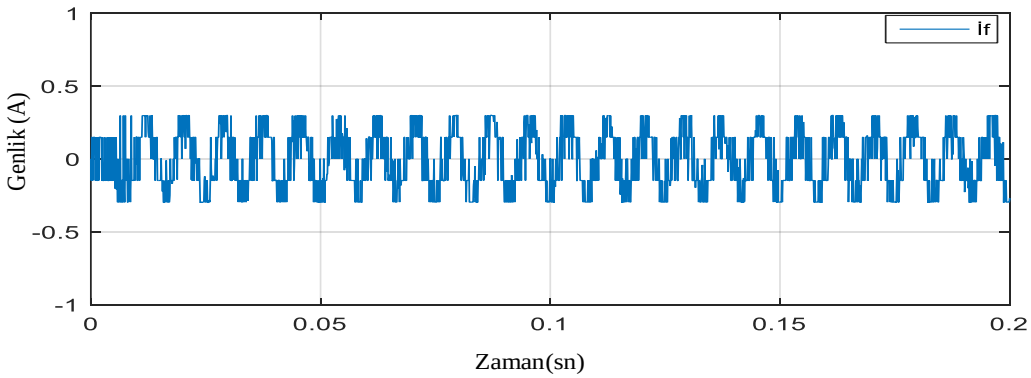
Tek fazında %2 stator sarımlar arası kısa devre arızasına sahip SMSM'nin stator üç faz gerilimleri ve akımları sırasıyla Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da, kısa devre akımı ve moment grafikleri sırasıyla Şekil 4.7. ve Şekil 4.8.'de verilmektedir.



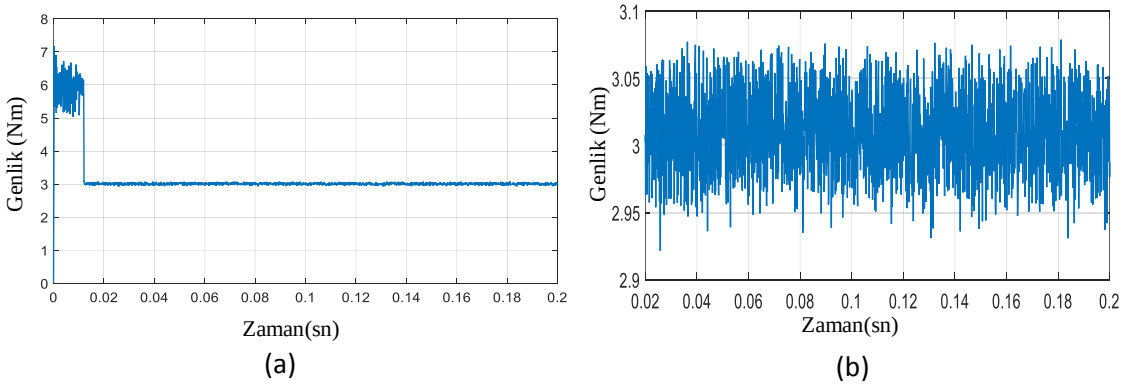
Şekil 4.5. Stator gerilimleri (Vabc)



Şekil 4.6. Stator akımları (iabc)



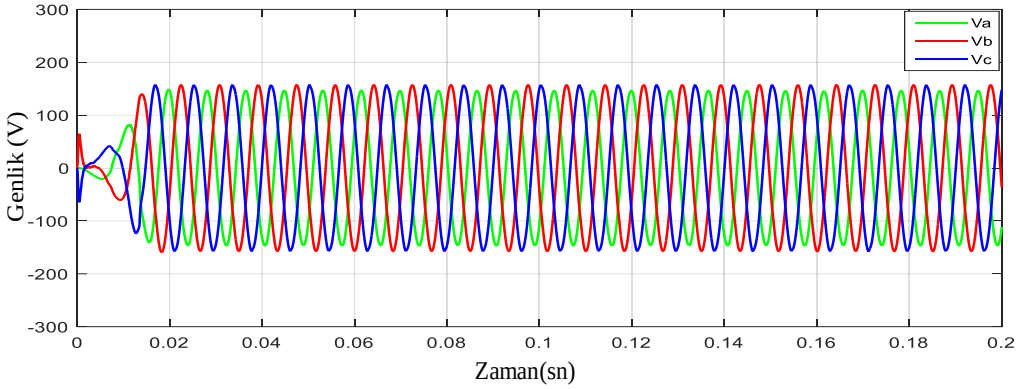
Şekil 4.7. Kısa devre akımı (if)



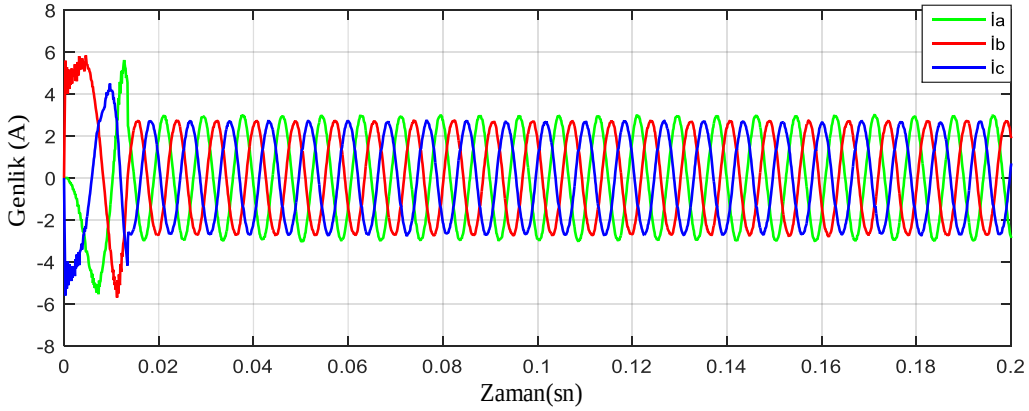
Şekil 4.8. (a) Sürekli ve geçici durumdaki motor momenti (b) Sürekli durumdaki motor momenti

4.1.3. Kısa Devre Oranı %12.5 olan Arızalı Motorun Benzetim Sonuçları

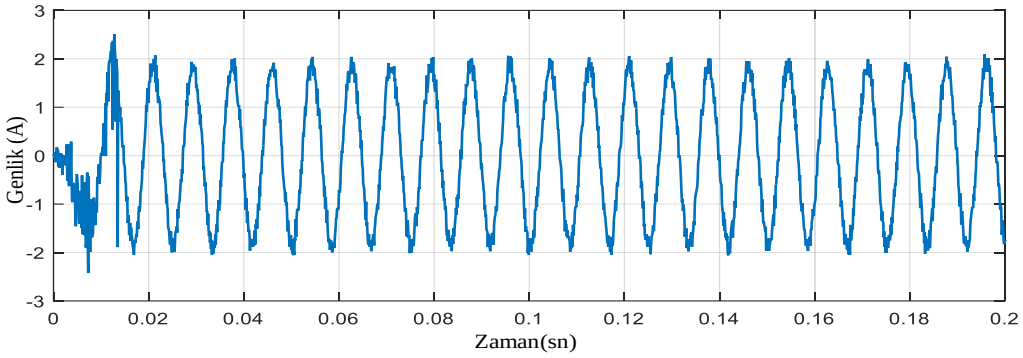
Tek fazında %12.5 sarımlar arası kısa devre arıza şiddetine sahip SMSM'nin stator üç faz gerilimleri ve akımları sırasıyla Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.'da, kısa devre akımı ve moment grafikleri sırasıyla Şekil 4.11. ve Şekil 4.12.'de verilmiştir.



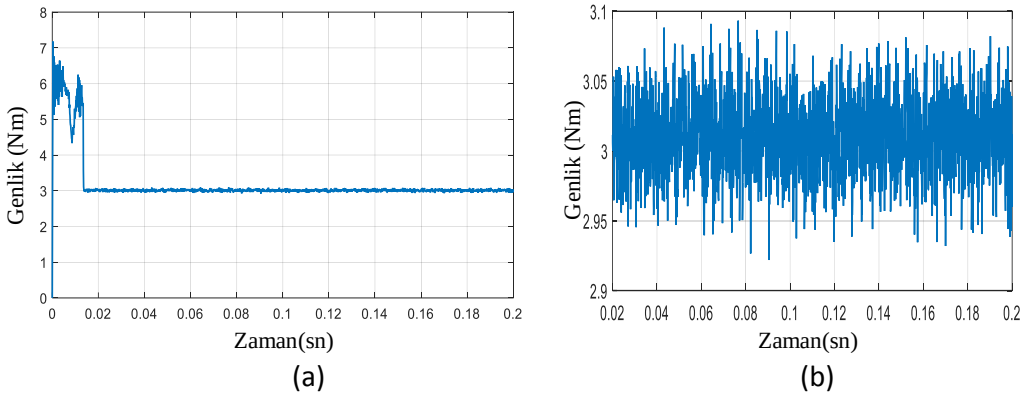
Şekil 4.9. Stator gerilimleri (Vabc)



Şekil 4.10. Stator akımları (İabc)



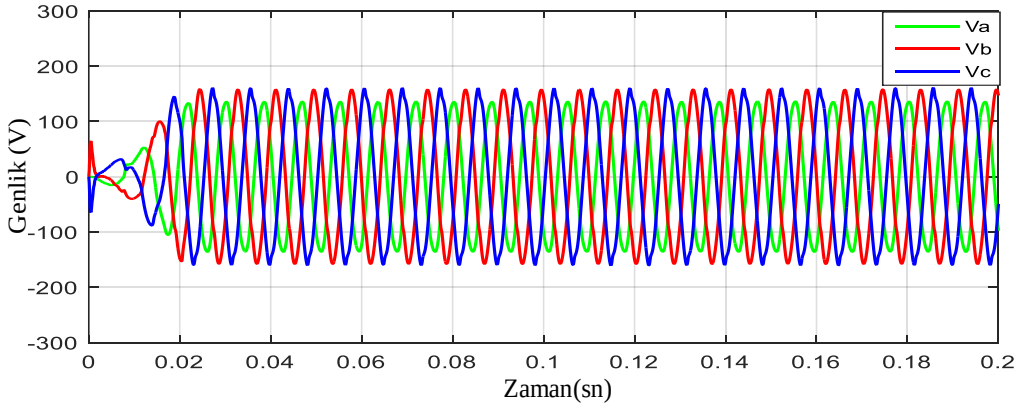
Şekil 4.11. Kısa devre akımı(İf)



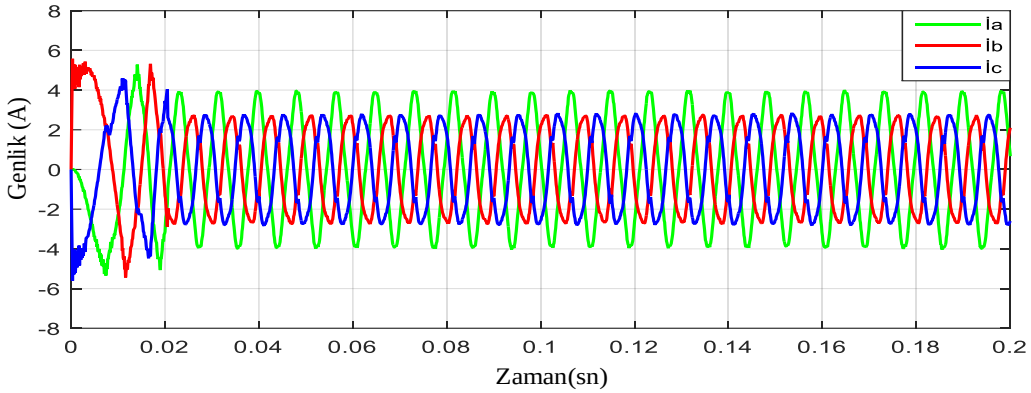
Şekil 4.12. (a) Sürekli ve geçici durumdaki motor momenti (b) Sürekli durumdaki motor momenti

4.1.4. Kısa Devre Oranı %25 olan Arızalı Motorun Benzetim Sonuçları

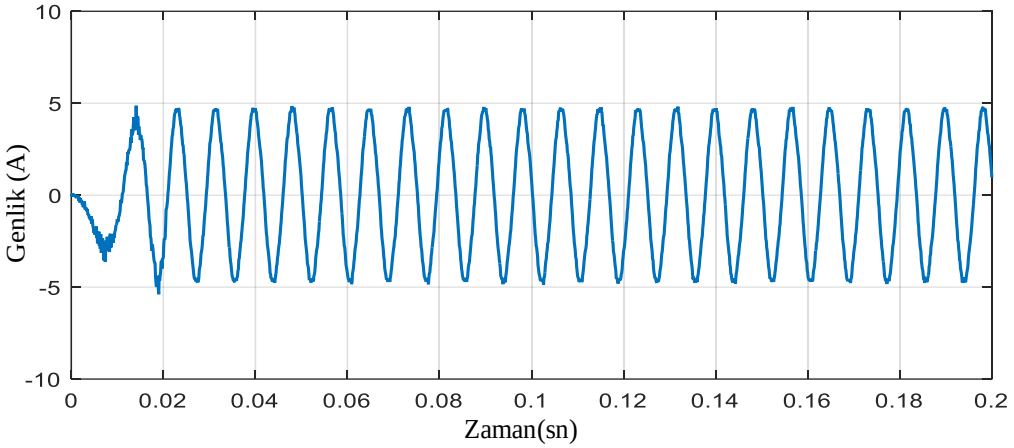
Tek fazında %25 stator sarımlar arası kısa devre arızasına sahip SMSM'nin stator faz gerilimleri ve akımları sırasıyla Şekil 4.13. ve Şekil 4.14.'de, kısa devre akımı ve moment grafikleri sırasıyla Şekil 4.15. ve Şekil 4.16.'da verilmektedir.



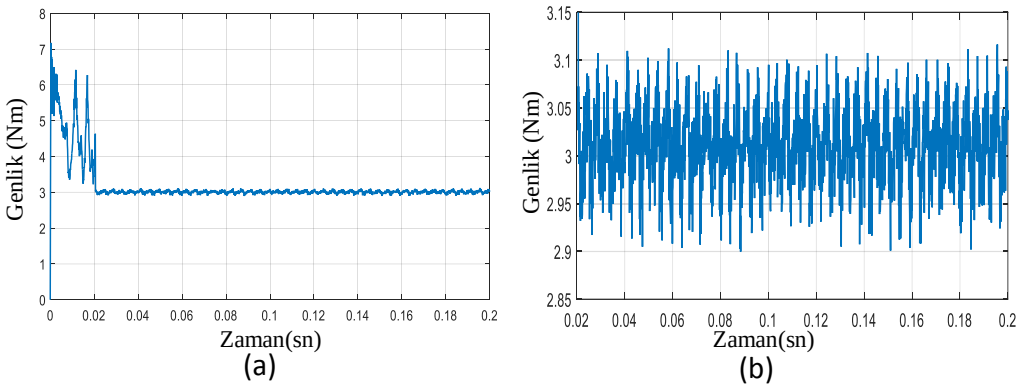
Şekil 4.13. Stator gerilimleri (Vabc)



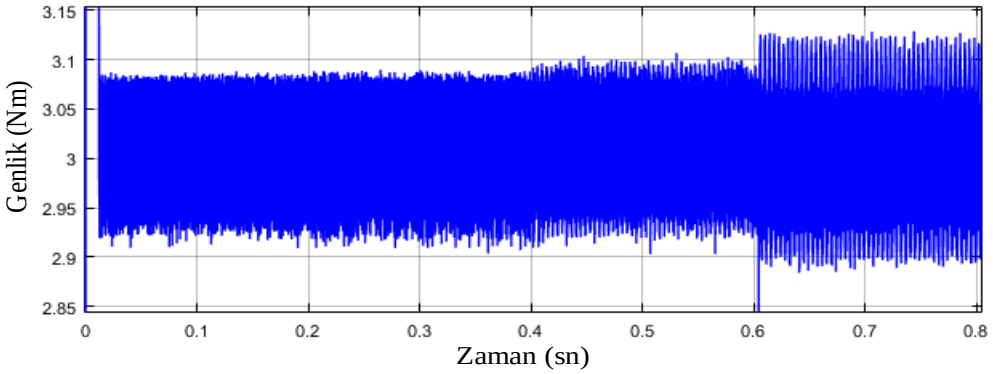
Şekil 4.14. Stator akımları (İabc)



Şekil 4.15. Kısa devre akımı(İf)



Şekil 4.16. (a) Sürekli ve geçici durumdaki motor momenti (b) Sürekli durumdaki motor momenti



Şekil 4.17. SMSM'nin Moment Değişimi (0<t<0.2 sağlıklı, 0.2<t<0.4 %2 kda, 0.4<t<0.6 %12.5 kda, 0.6<t<0.8 %25 kda)

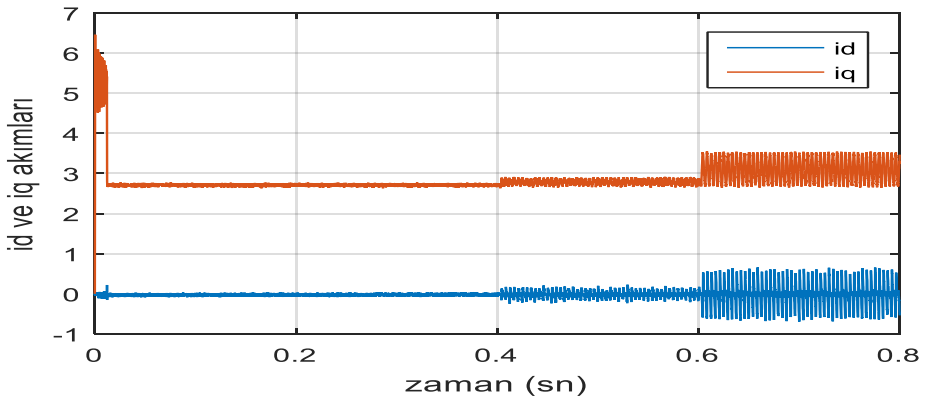
Sağlıklı SMSM'nin moment grafiği Şekil 4.4.'de, %2 kda durumunda moment grafiği Şekil 4.8'de, %12.5 kda durumunda Şekil 4.12'de ve %25 kda durumunda ise Şekil 4.16'da gösterilmektedir. Sağlıklı ve üç farklı arızalı durumda SMSM'nin moment verisindeki salınım değişimleri net olarak gözlemlemek için dört farklı durum Şekil 4.17.'de görüldüğü üzere aynı grafikte gösterilmiştir. Şekil 4.17'de görüldüğü üzere, aynı motorun sağlıklı ve üç farklı arızalı durumu için moment değişimleri karşılaştırıldığında; sağlıklı durumda motorun moment salınımlarının tepeden tepeye ortalama genlik değeri 0.15 Nm'dir, arıza şiddeti %2 olduğunda motor moment dalgalanmasında %2'lik bir artış olduğu, arıza şiddeti %12.5 olduğunda moment dalgalanmasında %13'lük bir artış olduğu, arıza şiddeti %25 olduğunda ise moment dalgalanmasında %65'lik bir artış olduğu görülmektedir. Momentteki salınımların artması motordaki titreşimlerin artmasına ve mekanik strese neden olmaktadır.

Sağlıklı, %2 kda, %12.5 kda ve %25 kda durumlarında SMSM'nin stator üç faz akımlarının değişimleri sırasıyla Şekil 4.2., Şekil 4.6., Şekil 4.10. ve Şekil 4.14.'te gösterilmektedir. Şekil 4.2.'de sağlıklı durumundaki SMSM'nin stator faz akımlarının düzgün ve simetrili olduğu a faz akımının genliği 2.70 A'dir. Şekil 4.6.'da %2 kda durumunda stator üç faz akımlarının simetrisini koruduğu ve stator sarımlar arası kısa devre arızasının meydan geldiği a faz akımının genliği 2.80 A olduğu, Şekil 4.10'da %12.5 kda durumunda üç faz akımlarının simetrisinin bozulduğu ve a faz akımının genliğinin 3.05 A'e yükseldiği, Şekil 4.14.'te %25 kda durumunda ise üç faz akımlarının simetrisinin daha da bozulduğu ve a faz akımının genliğinin 3.95 A'e yükseldiği görülmektedir. SMSM'nin sağlıklı b ve c fazlarındaki akımların da kontrol

tasarımındaki hızın referans yönde dönmesi için küçük artış olmuştur. Aynı yük altında çalıştırılan SMSM'nin stator sarımlar kısa devre arızasında şebekeden daha fazla akım çektiği benzetim modelinden elde edilen akım şekillerinde görülmektedir. Buda motordan beklenen performansı düşürür.

Sağlıklı, %2 kda, %12.5 kda ve %25 kda durumlarında SMSM'nin stator sargılarındaki kısa devre (sirkülasyon) akımın değişimi sırasıyla Şekil 4.3., Şekil 4.7., Şekil 4.11. ve Şekil 4.15.'te gösterilmektedir. Şekil 4.7.'de kda şiddeti %2 olduğunda kısa devre akımın genliği 0.3 A iken, Şekil 4.11.'de kda şiddeti %12.5 olduğunda kısa devre akımın genliğinin 1.99 A'e yükseldiği, Şekil 4.15.'te kda şiddetinin %25 olduğunda ise 4.83 A'e yükseldiği görülmektedir. Arıza akımının artması motor sargılarındaki sıcaklığın artmasına neden olur, bu da motorun stator sargılarındaki yalıtımın zamanla daha hızlı bozulmasına neden olur.

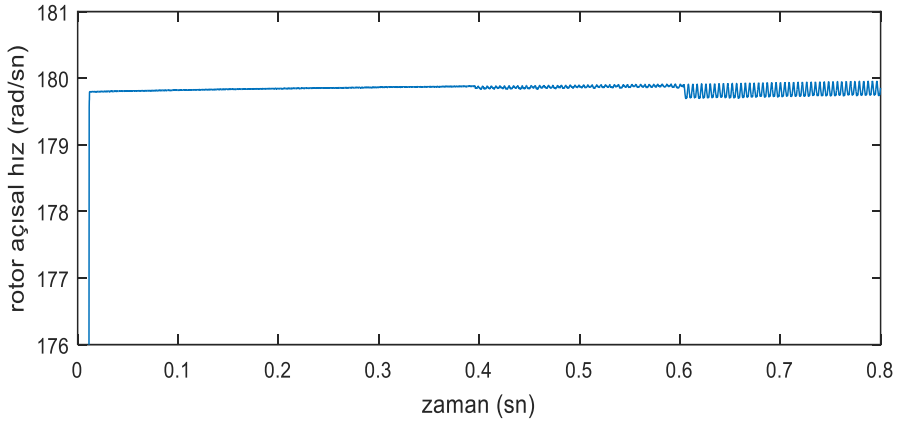
Sağlıklı, %2 kda, %12.5 kda ve %25 kda durumlarında SMSM'nin stator üç faz gerilimlerinin değişimleri sırasıyla Şekil 4.1., Şekil 4.5., Şekil 4.9. ve Şekil 4.13.'te verilmektedir. SMSM'nin benzetim modelinden elde edilen sağlıklı durumdaki stator üç faz gerilimleri ile üç farklı arızalı durumdan elde edilen stator üç faz gerilimleri karşılaştırıldığında, sağlıklı durumda SMSM'nin üç faz gerilimleri düzgün ve simetrili olduğu, stator sarımlar arası kısa devre arızası artıkça kısa devre arızasının meydana geldiği sargıdaki faz gerilimin genliğinde düşüş olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda SMSM'nin stator üç faz gerilimleri simetrisini kaybetmiştir.



Şekil 4.18. Kontrolör tasarımındaki iq ve id akımlarının kda şiddetine bağlı olarak değişimi (0<t<0.2 sağlıklı, 0.2<t<0.4 %2 kda, 0.4<t<0.6 %12.5 kda, 0.6<t<0.8 %25 kda)

Çizelge 4.1. İq akımının değişimi

1800 dev/dk 3 Nm	Sağlıklı	%2 kda	%12.5 kda	%25 kda
İq (A)	2.70	2.75	2.82	3.20



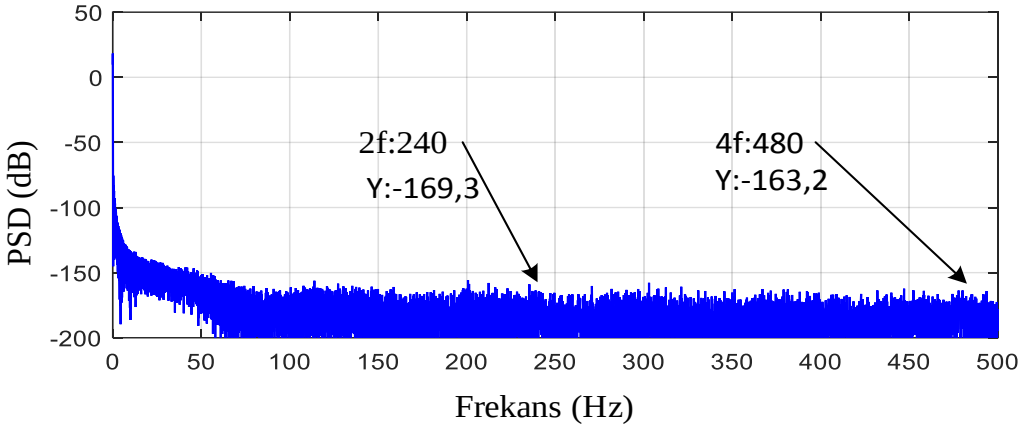
Şekil 4.19. Rotor açısal hızının değişimi (0<t<0.2 sağlıklı, 0.2<t<0.4 %2 kda, 0.4<t<0.6 %12.5 kda, 0.6<t<0.8 %25 kda)

Şekil 4.18.'de SMSM'nin rotor referans düzlemindeki id ve iq akımlarının stator kısa devre arızasına bağlı değişimi gösterilmektedir. Anma çalışma koşullarında SMSM'nin sağlıklı durumdaki iq akımın genlik değeri 2.70 A'dir, %2 kda durumunda iq akımının genliği 2.75 A yükseldiği, %12.5 kda durumunda iq akımın genliği 2.82 A'e ve %25 kda durumunda ise iq akımın genliği 3.20 A'e yükseldiği Şekil 4.18.'den elde edilen Çizelge 4.1.'de görülmektedir. Aynı yük altında SMSM'nin kda durumunda şebekeden daha çok akım çektiği Çizelge 4.1.'de görülmektedir. Kda şiddetimin artmasıyla iq ve id akımlarındaki salınımların artığı Şekil 4.18.'de görülmektedir. Aynı şekilde iq akımındaki salınımların kda şiddetine bağlı olarak artması Şekil 4.19.'da gösterildiği üzere rotor açısal hızdaki salınımların artmasına da neden olur. Motor hızındaki salınımların artması motordaki titreşim ve gürültünün artmasına neden olur.

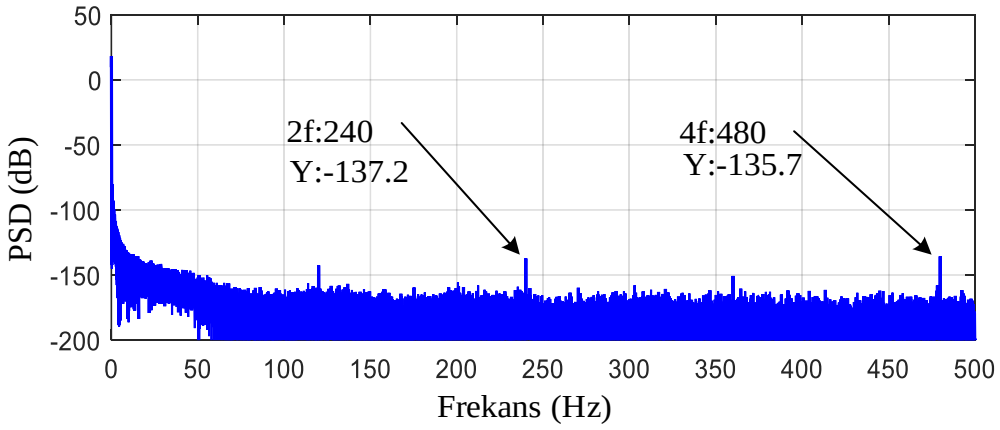
4.1.5. Benzetim Modelinden Elde edilen Moment Verisinin Frekans Düzleminde Analiz Edilmesi

Benzetim modelinde istenilen hızda ve yük koşulu altında farklı arıza şiddetine sahip SMSM'nin moment verisine FFT yöntemi uygulanarak moment verisi frekans

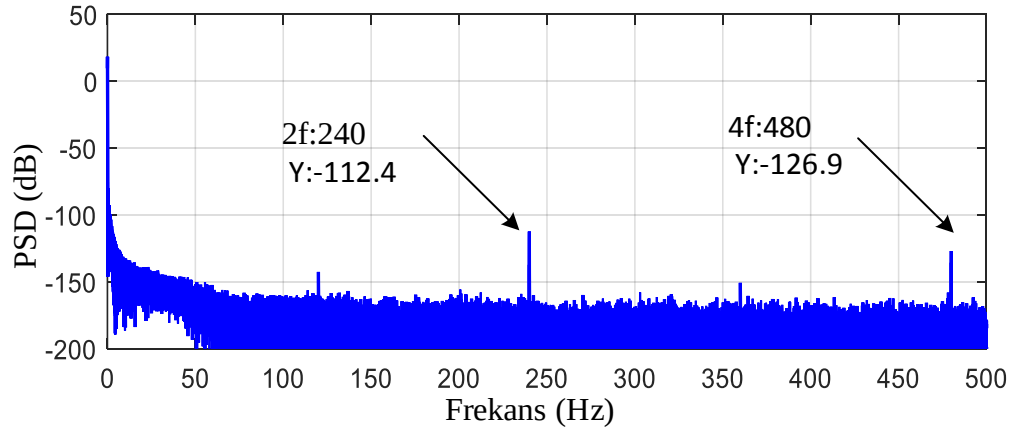
düzleminde izlenebilmektedir. Böylece çalışma koşulu ve arıza şiddeti değişimlerine göre moment harmoniklerinin genliklerindeki değişimler analiz edilerek stator sarımlar arası kısa devre arızasına bağımlı harmonikler bulunmaya çalışılmıştır. Bu bölümde 1800 dev/dk hızda, tam yüklü durumdaki SMSM'nin farklı arıza şiddetlerinde moment spektrumuna bakılmıştır.



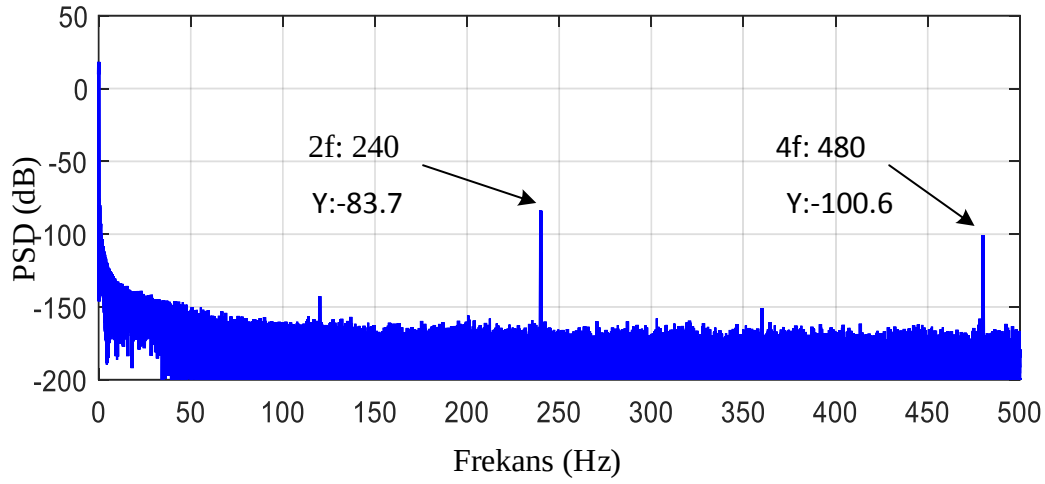
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.20. (a) Sağlıklı SMSM, (b) %2 kda, (c) %12.5 kda, (d) %25 kda SMSM'nin benzetim modelinde elde edilen moment spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 4.20.'de SMSM'nin sağlıklı ve stator sarımlar arası kısa devre arızalı benzetim modelinden elde edilen moment spektrumları görülmektedir. Bu grafiklerden anlaşıldığı üzere 1800 dev/dk hızda tam yükte sağlıklı ve üç farklı kısa devre arızalı durum için SMSM'nin her dört durum için moment spektrumları kıyaslandığında 2.harmonik ve 4.harmonik genlik değerlerinin arıza şiddetine bağlı olarak arttığı görülmektedir. Sağlıklı SMSM'nin moment spektrumunun 2.harmonik genlik değeri -170.2 dB iken, %2 kda şiddetinde 2.harmonik genlik değerinin -137.2 dB'ye yükseldiği, %12.5 kda durumunda -112.4 dB'ye ve %25 kda durumunda ise -83.7 dB'ye yükseldiği açıkça görülmektedir. Aynı şekilde sağlıklı SMSM'nin moment verisinin 4.harmonik genlik değeri -163.3 dB iken , %2 kda durumunda momentin 4.harmonik genliği -135.7 dB'ye yükseldiği, %12.5 kda durumunda -126.9 dB'ye ve %25 kda durumunda ise -

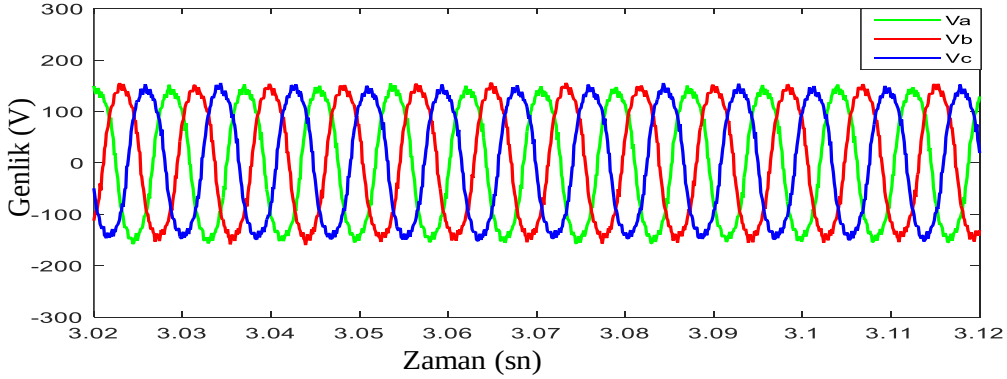
100.6 dB'ye yükseldiği Şekil 4.20.'de görülmektedir. Hazırlanan bu benzetim modeli ile farklı hız ve yükleme koşullarında alınan tüm sonuçlardan momentin 2. ve 4. harmoniklerinin genlik değerleri stator sarımlar arası kısa devre arızasına bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir.

4.2. Deneysel Düzenekten Elde Edilen sonuçlar

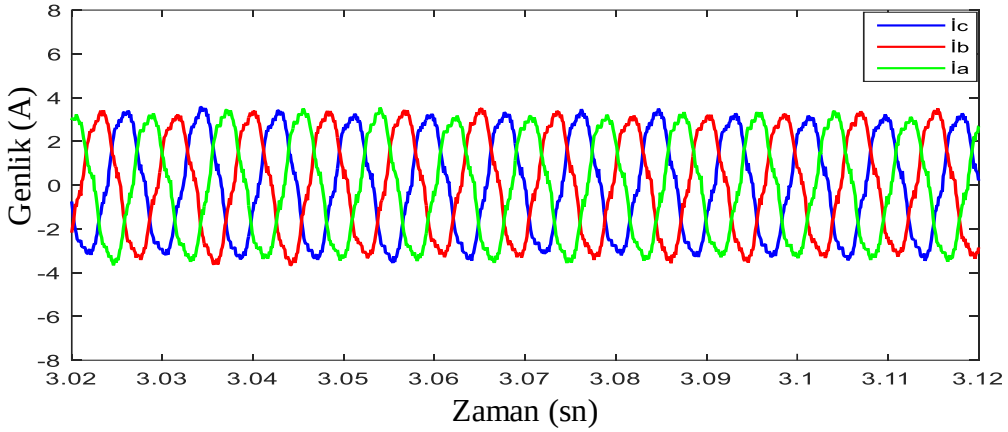
SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızasının analiz edilmesi için kurulan deneysel devre düzeneği ve bu düzenekten elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulacaktır. Deneysel çalışmada 10 kHz örnekleme frekansı ile sağlıklı ve tek fazında %2, %12.5 ve %25 oranında stator sarımlar arası kısa devre arıza oranına sahip motorlardan, 800-2200 dev/dk hız aralığında sekiz farklı hız durumu ve %0-%110 yük aralığında 6 farklı yük durumu olmak üzere toplam her bir motor için 48 farklı sağlıklı ve arızalı durum için deney yapılmıştır. Her bir deneyde SMSM'nin stator üç faz akımları ve stator üç faz gerilimleri ile motor milindeki moment Labview'de oluşturulan ara yüz programı vasıtasıyla kayıt altına alınmıştır. Bu deneylerde farklı arıza şiddetine sahip özdeş motorların aynı yük ve hız durumundaki stator üç faz akımları, stator üç faz gerilimleri ve moment verisi karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

4.2.1. Sağlıklı SMSM'den Elde Edilen Sonuçlar

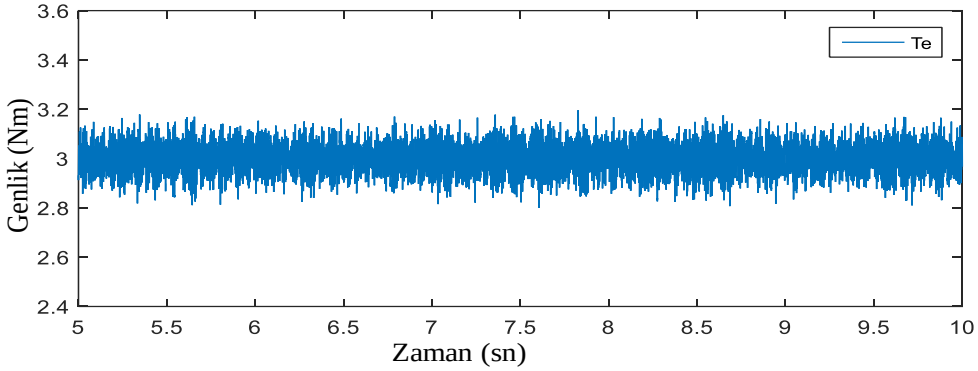
Herhangi bir fazında kısa devre sarımların bulunmadığı 1800 dev/dk ve nominal yük durumunda sağlıklı SMSM'den elde edilen stator faz gerilimleri, stator faz akımları ve motor milindeki moment sırasıyla Şekil 4.21., Şekil 4.22., ve Şekil 4.23.'de verilmiştir.



Şekil 4.21. Stator faz gerilimleri



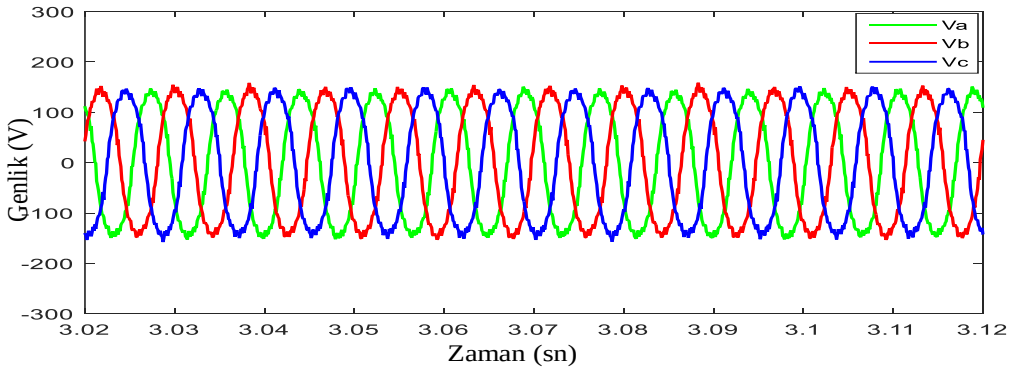
Şekil 4.22. Stator faz akımları



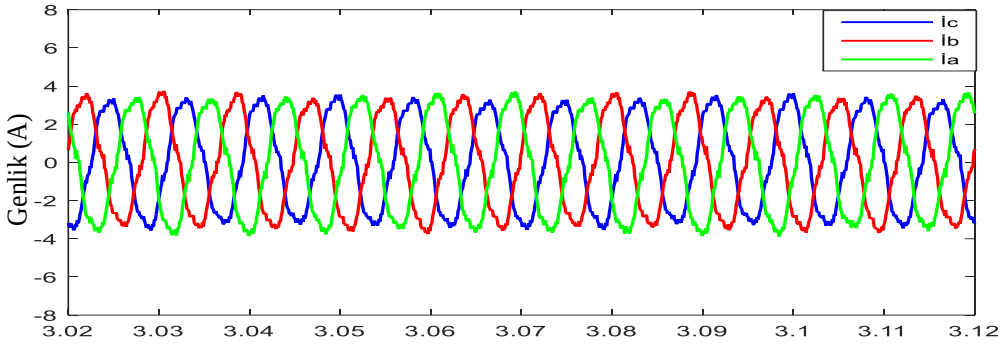
Şekil 4.23. Motor momenti

4.2.2. %2 Kısa Devre Arızalı SMSM'nin Deneysel Sonuçları

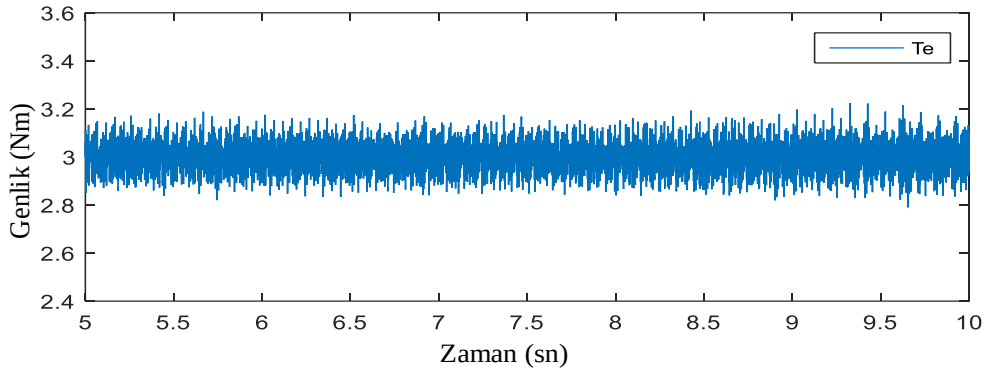
Tek fazında %2 oranında sarımlar arası kısa devre arızası olan 1800 dev/dk hızda ve nominal yükte SMSM'den elde edilen stator üç faz gerilimleri, stator üç faz akımları ve motor milindeki moment sırasıyla Şekil 4.24., Şekil 4.25., Şekil 4.26.'te verilmektedir.



Şekil 4.24. Stator faz gerilimleri



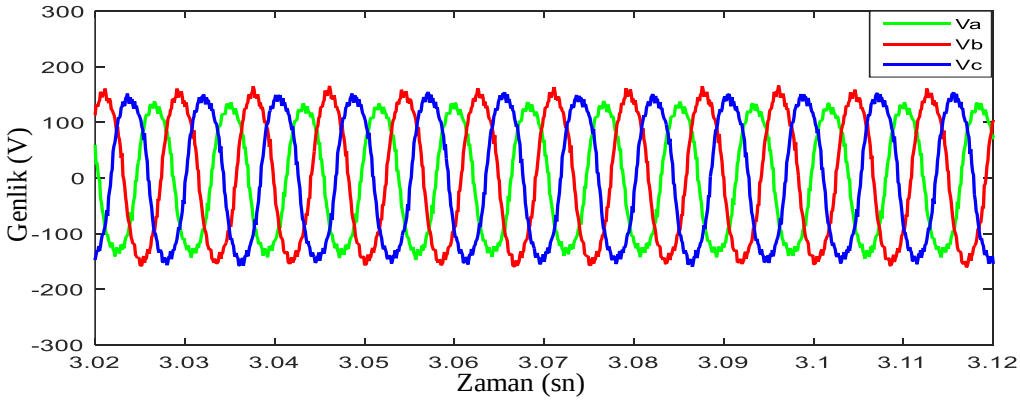
Şekil 4.25. Stator faz akımları



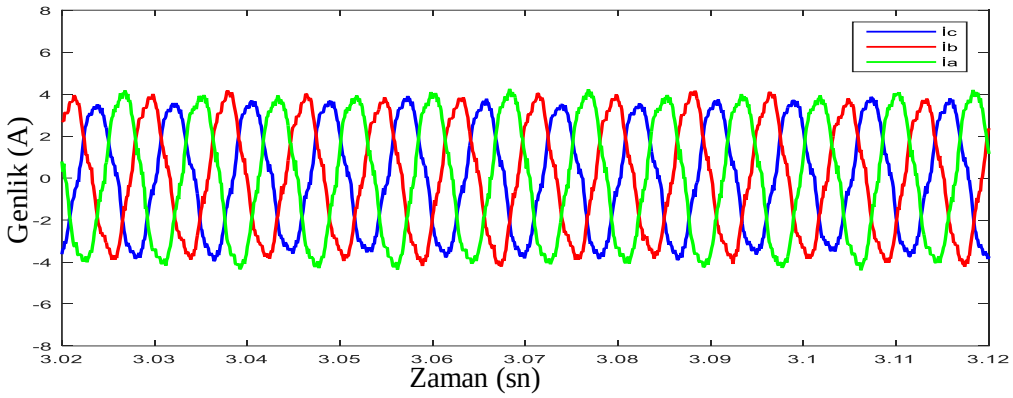
Şekil 4.26. Motor momenti

4.2.3. %12.5 Kısa Devre Arızalı SMSM'nin Deneysel Sonuçları

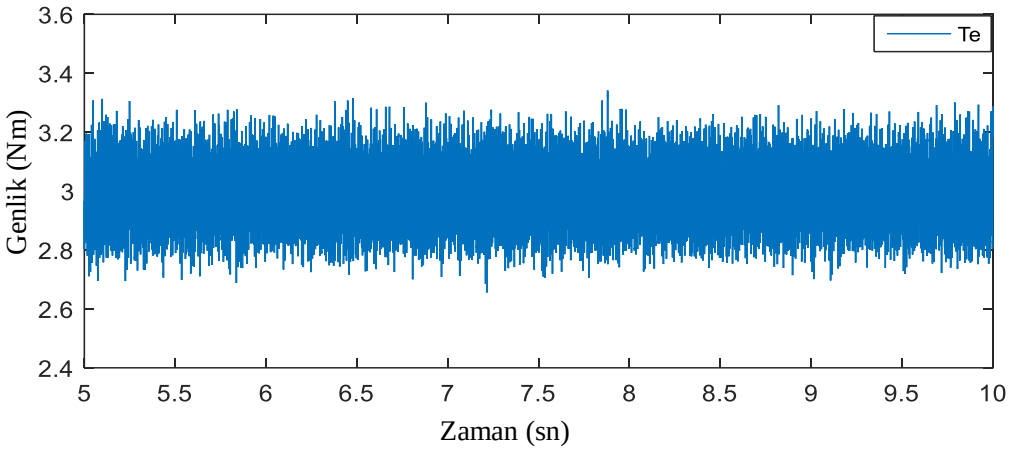
Tek fazında %12.5 oranında sarımlar arası kısa devre arızası olan 1800 dev/dk hız ve nominal yükte SMSM'den elde edilen stator üç faz gerilimleri, stator üç faz akımları ve motor milindeki moment sırasıyla Şekil 4.27., Şekil 4.28., Şekil 4.29.'da verilmektedir.



Şekil 4.27. Stator faz gerilimleri



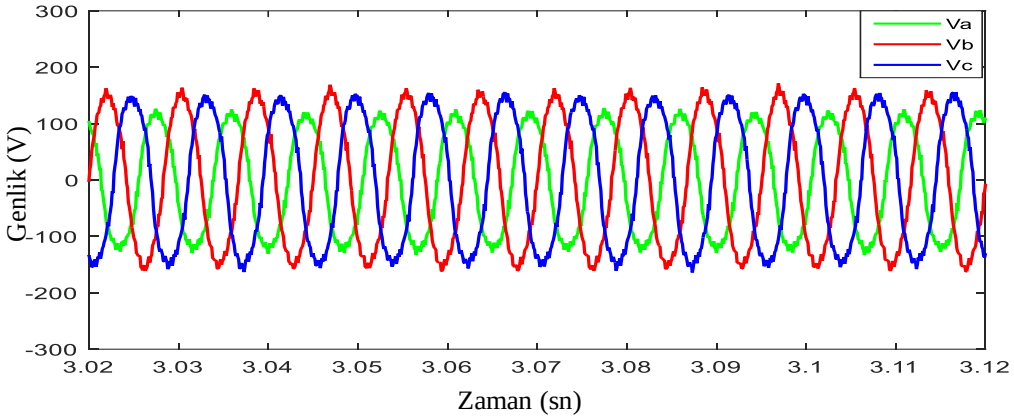
Şekil 4.28. Stator faz akımları



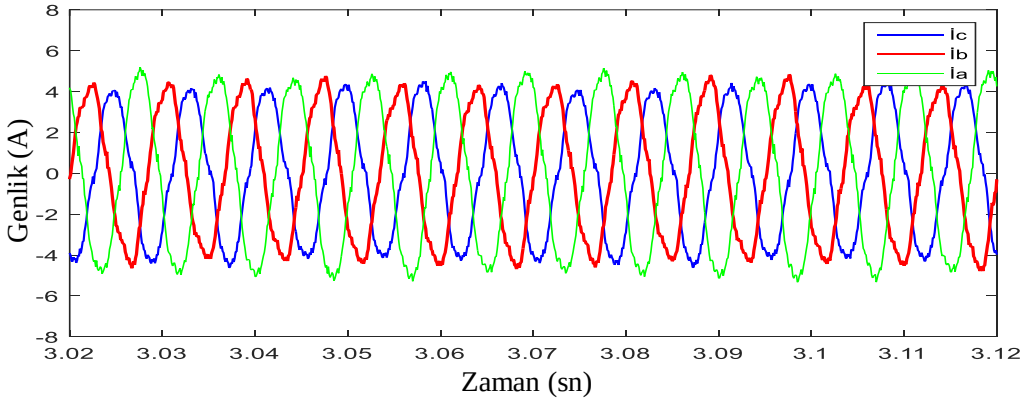
Şekil 4.29. Motor momenti

4.2.4. %25 Kısa Devre Arızalı SMSM'nin Deneysel Sonuçları

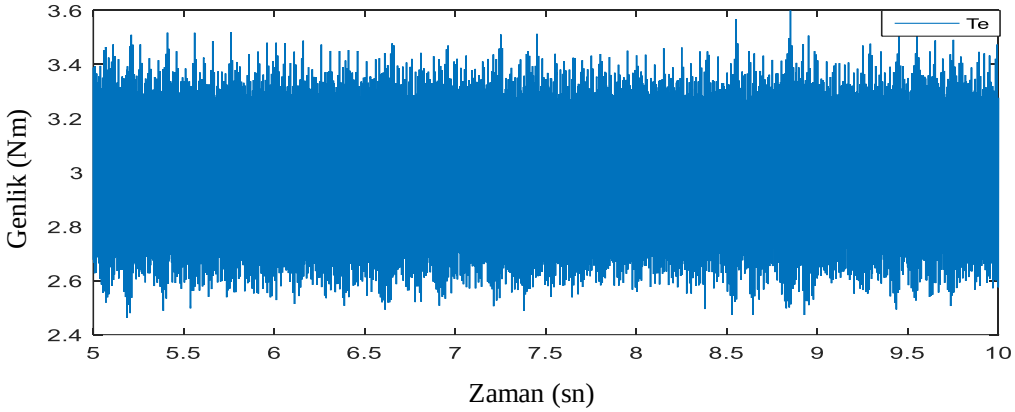
Tek fazında %25 oranında sarımlar arası kısa devre arızası olan 1800 dev/dk hızda ve nominal yükte SMSM'den elde edilen stator üç faz gerilimleri, stator üç faz akımları ve motor milindeki moment sırasıyla Şekil 4.30., Şekil 4.31., Şekil 4.32.'de verilmektedir.



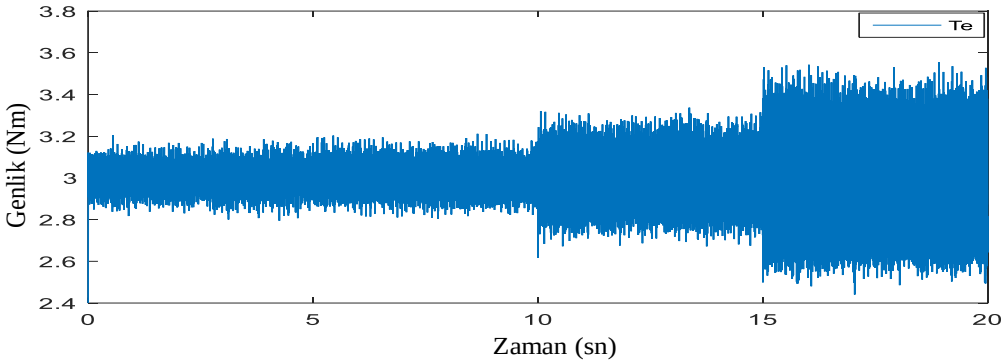
Şekil 4.30. Stator faz gerilimleri



Şekil 4.31. Stator faz akımları



Şekil 4.32. Motor momenti



Şekil 4.33. Moment Değişimi (0<t<5 sağlıklı, 5<t<10 %2 kda, 10<t<15 %12.5 kda, 15<t<20 %25 kda)

Sağlıklı durumdaki SMSM'nin stator faz gerilimleri Şekil 4.21.'de gösterildiği gibidir ve burada a faz gerilimin genlik değeri 154 volt iken, Şekil 4.24.'de SMSM'nin stator faz gerilimleri grafiğinde gösterildiği üzere %2 kısa devre arızası durumunda kısa devre arızasının meydana geldiği motorun a faz sargısının gerilimin genlik değeri 147.8 volt'a düşmüştür, %12.5 kısa devre arıza durumunda SMSM'nin a faz gerilimin genliği değeri 137.3 volt'a düştüğü Şekil 4.27.'de görülmektedir, Şekil 4.30.'da %25 kısa devre arıza şiddetinde ise a faz gerilimin genlik değeri 125.3 volt'ta düşmüştür. Sağlıklı durumda SMSM'nin stator üç faz gerilimleri dengeli ve simetri iken, stator sarımlar arası kısa devre arızasının artmasıyla stator faz gerilimlerin simetrisinin bozulduğu ve üç faz gerilimlerin dengesizleştiği Şekil 4.21., Şekil 4.24., Şekil 4.27. ve Şekil 4.30.'daki sırasıyla sağlıklı, %2 kda, %12.5 kda ve %25 kda durumlarındaki SMSM'nin stator faz gerilimleri karşılaştırıldığında görülmektedir. SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızasının meydana geldiği fazda etkin sarım sayısı azaldığı için kısa devre arıza şiddetinin artmasıyla arızalı fazın gerilimi azalmaktadır.

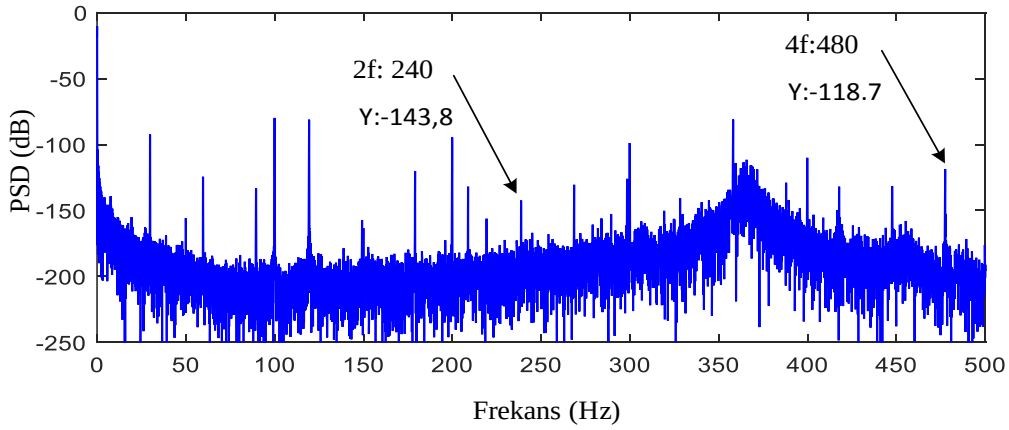
Şekil 4.22.'de sağlıklı, Şekil 4.25.'de %2 kısa devre arızalı, Şekil 4.28.'de %12.5 kısa devre arızalı ve Şekil 4.31.'de ise %25 kısa devre arızalı olmak üzere sağlıklı ve üç farklı arızalı durumlardaki SMSM'nin stator faz akımların değişimleri gösterilmektedir. Sağlıklı ve üç farklı arızalı durumlardaki SMSM'nin stator faz akımları karşılaştırıldığında sağlıklı durumdaki motorun a faz sargısındaki akımın genliği 3.44 A iken, %2 kda durumunda motorun arızalı a faz sargısındaki akımın genliği 3.53 A'e, %12.5 kda durumunda motorun arızalı faz sargısındaki akımın genliği 4.12 A'e, %25 kda durumunda ise arızalı faz sargısındaki akımın genliği 5.20 A'e yükselmiştir. Aynı

şekilde motorun b ve c faz sargısındaki akımlar da stator sarımlar arası kısa devre arızasının etkisiyle, kontrol sisteminin referans hızda çalışma yönündeki kontrolü nedeniyle artmıştır.

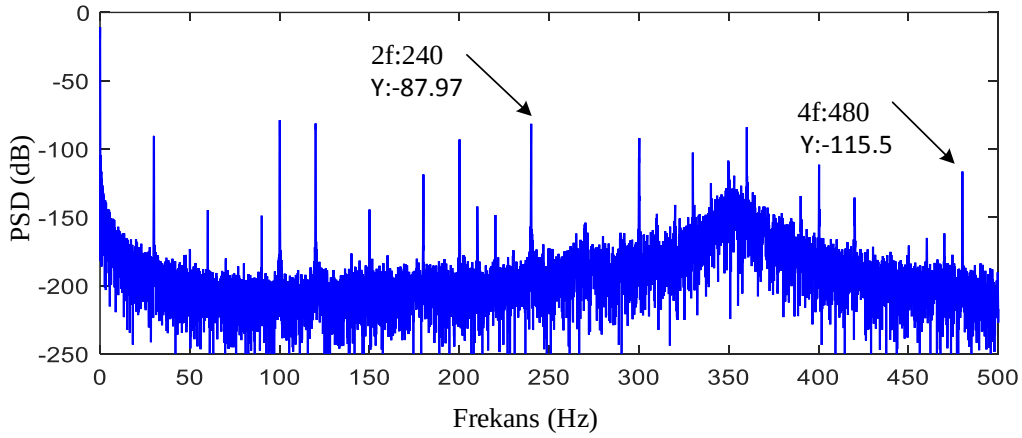
Şekil 4.23.'de sağlıklı, Şekil 4.26.'da %2 kısa devre arızalı, Şekil 4.29.'da %12.5 kısa devre arızalı ve Şekil 4.32.'de ise %25 kısa devre arızalı olmak üzere sağlıklı ve üç farklı arızalı durumlardaki SMSM'nin milindeki moment değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.33.'de ise SMSM'nin arıza şiddetine göre moment değişiminin net bir şekilde gözlenmesi için sağlıklı ve üç farklı arızalı durumdaki moment değişimi arka arkaya çizdirilmiştir. Aynı motorun sağlıklı ve üç farklı arızalı durumdaki moment salınımları karşılaştırıldığında; sağlıklı durumda moment salınımlarının tepeden tepeye ortalama genlik değeri 0.37 Nm'dir, stator arımlar arası kısa devre arıza şiddeti %2 olduğunda moment salınımlarının %8 arttığı, kda şiddeti %12.5 olduğunda moment salınımlarının %94 arttığı, kda şiddeti %25 olduğunda ise moment salınımlarının %214 arttığı ölçülmüştür. Moment salınımlarının artmasıyla motordaki titreşim ve gürültünün arttırdığı gözlenmiştir. Bu da motorda mekanik strese neden olmaktadır.

4.2.5. Deneysel Çalışmadan Elde edilen Moment Verisinin Frekans Düzleminde Analiz Edilmesi

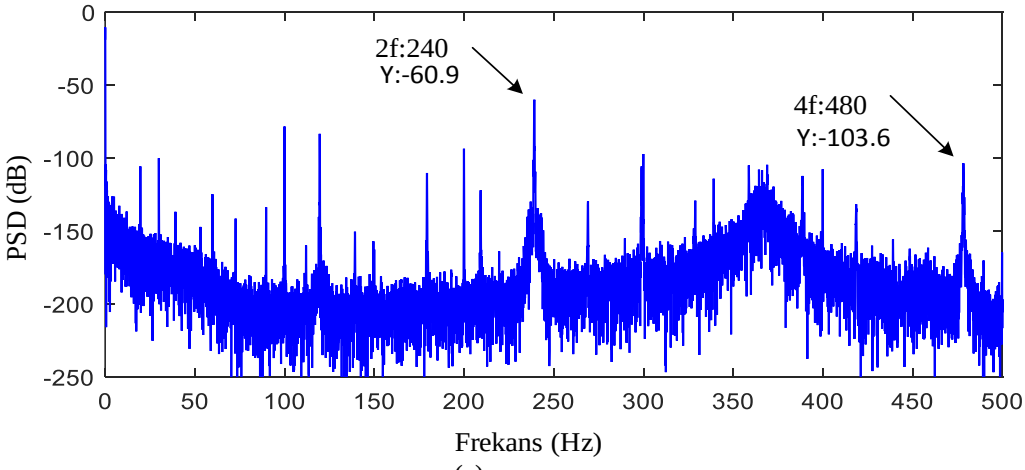
Deneysel çalışmada istenilen hızda ve yük koşulu altında farklı arıza şiddetine sahip SMSM'nin moment verisine FFT yöntemi kullanılarak frekans düzleminde izlenebilmektedir. Böylece çalışma koşulu ve arıza şiddeti değişimlerine karşı moment harmoniklerinin genliklerindeki değişimler analiz edilerek stator sarımlar arası kısa devre arızasına bağımlı harmonikler bulunmaya çalışılmıştır. 1800 dev/dk hızda, tam yüklü durumdaki SMSM'nin sağlıklı, %2 kısa devre arızalı, %12.5 kısa devre arızalı ve %25 kısa devre arızalı durumlarındaki moment spektrumları aşağıdaki Şekil 4.34.'de verilmiştir.


2f: 240
Y:-143,8
4f:480
Y:-118.7
PSD (dB)
Frekans (Hz)

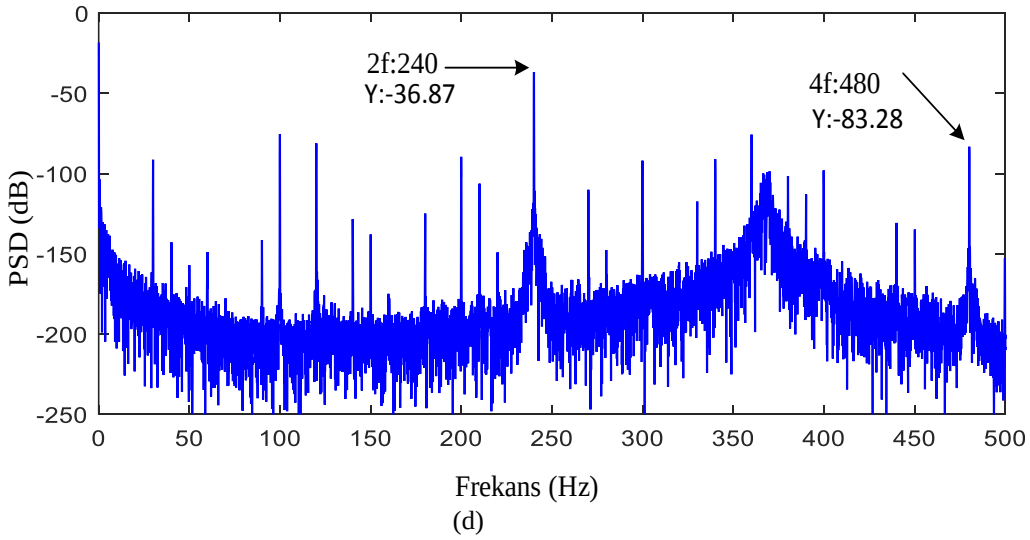
(a)


2f:240
Y:-87.97
4f:480
Y:-115.5
PSD (dB)
Frekans (Hz)

(b)


2f:240
Y:-60.9
4f:480
Y:-103.6
PSD (dB)
Frekans (Hz)

(c)



Şekil 4.34. (a) Sağlıklı SMSM, (b) %2 kda, (c) %12.5 kda, (d) %25 kda SMSM'nin deneysel çalışmasından elde edilen moment spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 4.34.'de SMSM'nin sağlıklı, %2 kda, %12.5 kda ve %25 kda olmak üzere dört farklı durumda elde edilen moment spektrumları görülmektedir. Bu grafiklerden anlaşıldığı üzere 1800 dev/dk hızda tam yükte sağlıklı ve üç farklı kısa devre arızalı durum için SMSM'nin her dört durum için moment spektrumları kıyaslandığında 2.harmonik ve 4.harmonik genlik değerlerinin arıza şiddetine bağlı olarak arttığı görülmektedir. Sağlıklı SMSM'nin moment spektrumunun 2. harmonik genlik değeri -143.8 dB iken, %2 sarımlar arası kısa devre arıza durumunda momentin 2. harmonik genlik değerinin -87.97 dB'ye yükseldiği, %12.5 kısa devre arıza durumunda -60.9 dB'ye ve %25 kısa devre arıza durumunda ise -36.87 dB'ye yükseldiği Şekil 3.34.'de görülmektedir. Aynı şekilde sağlıklı durumdaki SMSM'nin moment verisinin 4.harmonik genlik değeri -118.7 dB iken , %2 kısa devre arıza durumunda momentin 4.harmonik genliği -115.5 dB'ye yükseldiği, %12.5 kısa devre arızası durumunda -103.6 dB'ye ve %25 kısa devre arıza durumunda ise -83.28 dB'ye yükseldiği Şekil 4.34.'de görülmektedir. Deneysel çalışmadan farklı hız ve yüklerden elde edilen moment verisine fft uygulanarak alınan tüm sonuçlar benzerdir. Bunun sonucunda momentin 2. harmonik ve 4. harmonik bileşenlerinin SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızasına bağımlı olduğu tespit edilmiştir. Momentin 2. ve 4. harmonik bileşenlerin arıza tespitinde kullanılabilir yeni arıza imzalarıdır.

Momentin 2. ve 4. harmonik bileşenlerinin stator sarımlar arası kısa devre arızasının tespitinde yeni arıza imzaları olarak kullanılabilmesi için farklı hız ve yük durumlarında 2. ve 4. harmoniklerinin genlik değerleri sarımlar arası kısa devre arıza şiddetine bağlı olarak değişim göstermesi gerekir.

Aşağıda Çizelge 4.2., Çizelge 4.3., Çizelge 4.4., Çizelge 4.5., Çizelge 4.6. ve Çizelge 4.7.'da 1200 dev/dek hız ve sırasıyla %0, %25, %50, %75, %100 ve %110 olmak üzere 6 farklı yükleme durumundaki SMSM'nin moment verisine FFT uygulanarak 2. ve 4. harmonik bileşenlerinin değişimleri incelenmiştir. Çizelge 4.2.'de 1200 dev/dk hız ve yüksüz durumdaki sağlıklı SMSM'nin moment verisinin 2. harmonik bileşenin genlik değeri -127.5 dB iken , %2 kısa devre arıza durumunda momentin 2. harmoniğinin genlik değeri -94.27 dB'ye yükseldiği, %12.5 kda durumunda momentin 2. harmonik genlik değeri -64.53 dB'ye yükseldiği ve %25 kısa devre arızası durumunda ise 2. harmonik genlik değeri -47.2'ye yükselmiştir. Çizelge 4.2.'de SMSM'nin moment verisinin 4. harmonik genlik değeri incelendiğinde, sağlıklı durumda momentin 4. harmonik genlik değeri -100.4 dB iken, %2 kısa devre arızası durumunda momentin 4. harmonik genlik değeri -83.07 dB'ye yükseldiği, %12.5 kısa devre arızası durumunda momentin 4.harmonik genlik değeri-69.98 dB'ye ve %25 kısa devre arıza durumunda ise -63.99 dB'ye çıkmıştır. Aynı şekilde 1200 dev/dk hız ve %25, %50, %75, %100 ve %110 farklı yükleme durumlardaki SMSM'nin momentin 2. ve 4. harmonik genlik değerlerinin stator sarımlar arası kısa devre arazının artmasına bağlı olarak arttığı sırasıyla Çizelge 4.3., Çizelge 4.4., Çizelge 4.5., Çizelge 4.6. ve Çizelge 4.7.'de görülmektedir.

Çizelge 4.2. 1200 dev/dk yüksüz

1200 dev/dk		Sağlıklı	%2 Arızalı	%12.5 Arızalı	%25 Arızalı
Moment	2f	-127.5	-94.27	-64.53	-47.2
	4f	-100.4	-83.07	-69.98	-63.99

Çizelge 4.3. 1200 dev/dk %25 yüklü (0.75 Nm)

1200 dev/dk		Sağlıklı	%2 Arızalı	%12.5 Arızalı	%25 Arızalı
Moment	2f	-120.2	-92.56	-64.04	-46.62
	4f	-96.57	-84.39	-71.44	-61.71

Çizelge 4.4. 1200 dev/dk %50 yüklü (1.5 Nm)

1200 dev/dk		Sağlıklı	%2 Arızalı	%12.5 Arızalı	%25 Arızalı
Moment	2f	-117.16	-91.17	-62.48	-46.70
	4f	-97.27	-83.08	-71.00	-58.45

Çizelge 4.5. 1200 dev/dk %75 yüklü (2.25 Nm)

1200 dev/dk		Sağlıklı	%2 Arızalı	%12.5 Arızalı	%25 Arızalı
Moment	2f	-116.7	-90.87	-61.5	-45.97
	4f	-95.3	-83.55	-69.76	-56.14

Çizelge 4.6. 1200 dev/dk tam yüklü (3 Nm)

1200 dev/dk		Sağlıklı	%2 Arızalı	%12.5 Arızalı	%25 Arızalı
Moment	2f	-115.7	-90.41	-60.68	-44.37
	4f	-95.2	-83.17	-68.85	-56.06

Çizelge 4.7. 1200 dev/dk %110 yüklü (3.3 Nm)

1200 dev/dk		Sağlıklı	%2 Arızalı	%12.5 Arızalı	%25 Arızalı
Moment	2f	-115.1	-90.67	-60.82	-44.4
	4f	-95.9	-84.84	-68.49	-54.91

Çizelge 4.8. 800 dev/dk tam yüklü (3 Nm)

800 dev/dk		Sağlıklı	%2 Arızalı	%12.5 Arızalı	%25 Arızalı
Moment	2f	-120.6	-97.47	-68.59	-48.18
	4f	-117.1	-106.5	-99.98	-69.93

Çizelge 4.9. 1000 dev/dk tam yüklü (3 Nm)

1000 dev/dk		Sağlıklı	%2 Arızalı	%12.5 Arızalı	%25 Arızalı
Moment	2f	-119.7	-94.8	-63.18	-45.97
	4f	-110.7	-97.28	-80.69	-64.53

Çizelge 4.10. 1400 dev/dk tam yüklü (3 Nm)

1400 dev/dk		Sağlıklı	%2 Arızalı	%12.5 Arızalı	%25 Arızalı
Moment	2f	-111	-87.63	-58.49	-42.85
	4f	-82.9	-78.95	-31.2	-18.78

Çizelge 4.11. 1600 dev/dk tam yüklü (3 Nm)

1600 dev/dk		Sağlıklı	%2 Arızalı	%12.5 Arızalı	%25 Arızalı
Moment	2f	-116.1	-85.04	-53.7	-40.74
	4f	-106.9	-100.7	-76.87	-66.41

Çizelge 4.12. 2000 dev/dk tam yüklü (3 Nm)

2000 dev/dk		Sağlıklı	%2 Arızalı	%12.5 Arızalı	%25 Arızalı
Moment	2f	-118.4	-79.33	-47.4	-33.89
	4f	-128.5	-125.6	-104.2	-98.4

Çizelge 4.13. 2200 dev/dk tam yüklü (3 Nm)

2200 dev/dk		Sağlıklı	%2 Arızalı	%12.5 Arızalı	%25 Arızalı
Moment	2f	-103.2	-66.92	-41.75	-28.77
	4f	-137.6	-126.8	-121.8	-108.8

Yukarıdaki Çizelge 4.8.'de 800 dev/dk hız ve tam yüklü, Çizelge 4.9.'da 1000 dev/dk hız ve tam yüklü, Çizelge 4.10.'da 1400 dev/dk hız ve tam yüklü, Çizelge 4.11.'de 1600 dev/dk hız ve tam yüklü, Çizelge 4.12.'de 2000 dev/dk hız ve tam yüklü ve Çizelge 4.13.'de 2200 dev/dk hız ve tam yüklü durumlarındaki SMSM'nin moment verisine FFT uygulanarak momentin 2. ve 4. harmoniklerinin genlik değerlerinin stator sarımlar arası kısa devre arıza şiddeti bağlı değişimi incelenmiştir. Bu çizelgelerden aynı yük altında ve farklı hızlarda SMSM'de momentin 2. ve 4. harmonik bileşenlerinin

genlik değerlerinin stator sarımlar arası kısa devre arıza şiddetine bağlı olarak arttığı görülmektedir.

Yukarıdaki Çizelgelerden elde edilen sonuçlardan yapılan çok sayıda ölçüm, izleme ve karşılaştırmadan sonra aynı hız ve yük durumundaki özdeş, ancak farklı kısa devre arıza şiddetine sahip motorlarda momentin 2. ve 4. harmoniklerin genlik değerlerinin kısa devre arıza şiddetinin artmasına bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir. Buradan yola çıkılarak SMSM'de moment verisinin 2. ve 4. harmonik bileşenlerinin stator sarımlar arası kısa devre arıza tespitinde yeni arıza imzaları olarak kullanılabilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızasının motor performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla SMSM'nin sağlıklı ve stator sarımlar arası kısa devre arızalı benzetim modeli Matlab/Simulink'te oluşturulmuştur. Aynı motorun sağlıklı benzetim modelinden elde edilen sonuçlar ile üç farklı arızalı durumdaki benzetim modelinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Aynı şekilde deneysel çalışmada tek fazında sarımlar arasında %2 kda, %12.5 kda ve %25 kda olmak üzere üç farklı arızalı motorlardan elde edilen sonuçlar ile sağlıklı motordan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.1. Moment salınımların değişimi

1800 dev/dk 3 Nm	Sağlıklı	%2 kda	%12.5 kda	%25 kda
Benzetim	0.15 Nm	%2	%13	%65
Deneysel	0.37 Nm	%8	%94	%214

Çizelge 5.1.'de benzetim modelinde ve deneysel çalışmada üç farklı kda durumundaki motor moment salınımların sağlıklı durumdaki motor moment salınımlarına göre değişimi verilmiştir. Benzetim modelinde anma çalışma koşullarında sağlıklı SMSM'nin moment salınımların tepeden tepeye ortalama genlik değeri 0.15 Nm'dir. Benzetim modelinde üç farklı arızalı durumdaki SMSM'lerin moment salınımları sağlıklı durumdaki moment salınımlarıyla karşılaştırıldığında %2 kda durumunda moment salınımları %2 artmış, %12.5 kda durumunda moment salınımları %13 artarken %25 kda durumunda ise moment salınımlarında %65'lik bir artış olmuştur. Deneysel çalışma anma çalışma koşullarında sağlıklı SMSM'nin moment salınımlarının tepeden tepeye ortalama genlik değeri 0.37 Nm'dir. Deneysel çalışmada üç farklı arızalı durumdaki SMSM'lerin moment salınımları sağlıklı durumdaki SMSM'nin moment salınımlarıyla karşılaştırıldığında %2 kda durumunda moment salınımlarında %8'lik bir artış olmuş, %12.5 kda durumunda moment salınımlarında %94'lük bir artış olurken %25 kda durumunda ise moment salınımlarında %214 artış olduğu Çizelge 5.1.'de verilmiştir.

Momentteki salınımların artması motordaki gürültü ve titreşimlerin artmasına ve mekanik strese neden olmaktadır.

Çizelge 5.2. Arızalı faz akımın genliğinin değişimi (kısa devre arızasının meydana geldiği faz)

1800 dev/dk 3 Nm	Sağlıklı	%2 kda	%12.5 kda	%25 kda
Benzetim	2.70	%3.7	%11.2	%46.2
Deneysel	3.44	%2.6	%19.7	%51.2

Çizelge 5.2.'de benzetim modelinde ve deneysel çalışmada anma çalışma koşullarında üç farklı arızalı durumdaki SMSM'lerin arızalı faz akımın genliğinin sağlıklı durumdaki SMSM'nin faz akımının genliğine göre değişimi verilmiştir. Benzetim modelinde sağlıklı durumdaki SMSM'nin faz akımının genliği 2.70 A'dir. Üç farklı arızalı durumdaki SMSM'nin arızalı faz akımın genliğinin sağlıklı durumdaki SMSM'nin faz akımın genliğiyle karşılaştırıldığında %2 kda durumunda arızalı faz akımının genliği %3.7 artmış, %12.5 kda durumunda arızalı faz akımının genliği %11.2 artarken %25 kda durumunda ise arızalı faz akımının genliği %46.2 artmıştır. Deneysel çalışmada sağlıklı durumdaki SMSM'nin faz akımının genliği 3.44 A'dir. Üç farklı arızalı durumdaki SMSM'nin arızalı faz akımın genliğinin sağlıklı durumdaki SMSM'nin faz akımın genliğiyle karşılaştırıldığında %2 kda durumunda arızalı faz akımının genliği %2.6 artmış, %12.5 kda durumunda arızalı faz akımının genliği %19.7 artarken %25 kda durumunda ise arızalı faz akımının genliği %51.2 artmıştır. Kısa devre arızasının artmasıyla SMSM'nin arızalı faz akımın da kısa devre arızasının artmasına paralel olarak artmıştır. Aynı yük altında sarımlar arası kısa devre arızası durumunda SMSM'nin şebekeden daha çok akım çektiği tespit edilmiştir. Bu da motordan beklenen verimi ve performansı düşürür.

Çizelge 5.3. Arızalı faz gerilimin genliğinin değişimi

1800 dev/dk 3 Nm	Sağlıklı	%2 kda	%12.5 kda	%25 kda
Benzetim	150 volt	-%2.1	-%6.8	-%12.6
Deneysel	154 volt	-%4.1	-%10.8	-%18.6

Çizelge 5.3.'de benzetim modelinde ve deneysel çalışmada anma çalışma koşullarında üç farklı kda durumlarındaki SMSM'lerin arızalı faz gerilimin genliğinin sağlıklı durumdaki SMSM'nin faz gerilimin genliğine göre değişimi verilmektedir. Benzetim çalışmasında sağlıklı SMSM'nin faz geriliminin genliği 150 volt'tur. Benzetim modelinde üç farklı arızalı durumdaki SMSM'nin arızalı faz gerilimin genliğinin sağlıklı durumdaki SMSM'nin faz gerilimin genliğiyle karşılaştırıldığında %2 kda durumunda arızalı faz geriliminin genliği %2.1 azalmış, %12.5 kda durumunda arızalı faz geriliminin genliği %6.8 azalırken %25 kda durumunda ise arızalı faz geriliminin genliği %12.6 azalmıştır. Deneysel çalışmada sağlıklı durumdaki SMSM'nin faz geriliminin genliği 154 volt'dur. Deneysel çalışmada üç farklı arızalı durumdaki SMSM'nin arızalı faz gerilimin genliğinin sağlıklı durumdaki SMSM'nin faz gerilimin genliğiyle karşılaştırıldığında %2 kda durumunda arızalı faz geriliminin genliği %4.1 azalmış, %12.5 kda durumunda arızalı faz geriliminin genliği %10.8 azalırken %25 kda durumunda ise arızalı faz geriliminin genliği %18.6 azalmıştır. Stator sarımlar arası kısa devre arızası artığında SMSM'nin arızalı fazdaki etkin sarım sayısı azaldığından arızalı fazdaki gerilim genliğinde de düşüş olmuştur.

Sağlıklı ve üç farklı arızalı durumda hem benzetim modelinden hem de deneysel çalışmadan geniş hız ve yük aralığında elde edilen SMSM'nin moment verisine FFT yöntemi uygulanarak moment verisi frekans düzleminde harmonik analizi yapılarak stator sarımlar arası kısa devre arızasını bağımlı moment harmonik bileşenleri bulunmaya çalışılmıştır. Momentin 2. ve 4. harmoniklerin stator sarımlar arası kısa devre arıza şiddetine paralel olarak arttığı tespit edilmiştir. Momentin 2. ve 4. harmoniklerin SMSM'de stator sarımlar arası kısa devre arıza tespitinde kullanılabilecek yeni arıza imzaları olarak önerilmiştir.

Çizelge 5.4. Moment harmoniklerinin değişimi

1800 dev/dk 3 Nm		Sağlıklı	%2 kda	%12.5 kda	%25 kda
Benzetim	2f	-169.3 dB	%18.9	%33.6	%50.5
Deneysel	2f	-143.8 dB	%38	%57.64	%74.36
Benzetim	4f	-163.2 dB	%16.85	%22.24	%38.35
Deneysel	4f	-118.7 dB	%3.2	%12.7	%29.33

Çizelge 5.4.'de benzetim modelinde ve deneysel çalışmada anma çalışma koşullarında üç farklı arızalı durumdaki SMSM'lerin momentin 2. ve 4. harmoniklerinin sağlıklı durumdaki SMSM'nin momentin 2. ve 4. harmoniklerine göre değişimi verilmektedir. Benzetim modelinde sağlıklı durumdaki SMSM momentinin 2. harmoniğinin genliği -169.3 dB'dir. Benzetim modelinde üç farklı arızalı durumdaki SMSM'lerin momentin 2. harmoniğinin genliği sağlıklı durumdaki SMSM'nin momentin 2. harmoniğinin genliğiyle karşılaştırıldığında % 2 kda durumunda momentinin 2. harmoniğinin genliği %18.9 artmış, %12.5 kda durumunda momentin 2. harmoniğinin genliği %33.6 artarken %25 kda durumda ise momentin 2. harmoniğinin genliği %50.5 artmıştır. Deneysel çalışmada ise sağlıklı durumdaki SMSM'nin momentinin 2.harmoniğinin genliği -143.8 dB'dir. Deneysel çalışmada üç farklı arızalı durumdaki SMSM'lerin momentinin 2. harmoniğinin genliği sağlıklı durumdaki SMSM'nin momentin 2. harmoniğinin genliğiyle karşılaştırıldığında % 2 kda durumunda momentinin 2. harmonik genliği %38 artmış, %12.5 kda durumunda momentin 2. harmonik genliği %57.64 artmışken %25 kda durumda ise momentin 2.harmonik genliği %74.36 artmıştır. Benzetim modelinde sağlıklı SMSM'nin momentin 4.harmonik genliği -163.2 dB'dir. Benzetim modelinde üç farklı arızalı durumdaki SMSM'lerin momentin 4. harmoniğinin sağlıklı durumdaki SMSM'nin momentinin 4. harmoniğiyle karşılaştırıldığında %2 kda durumunda momentin 4. harmoniğinin genliği %16.85 artmış, %12.5 kda durumunda momentin 4. harmoniğinin genliği %22.24 artarken %25 kda durumunda ise momentin 4. harmoniğinin genliği %38.35 artmıştır. Deneysel çalışmada sağlıklı durumdaki SMSM'nin momentinin 4. harmonik genliğinin değeri -118.7 dB'dir.

Deneysel çalışmada üç farklı arızalı durumdaki SMSM'lerin momentlerinin 4. harmoniklerinin genlikleri sağlıklı durumdaki SMSM'nin momentinin 4. harmoniğin genliğiyle karşılaştırıldığında %2 kda durumunda momentin 4. harmoniğinin genliği %3.2 artmıştır, %12.5 kda durumunda momentinin 4. genliği %12.7 artarken %25 kda durumunda ise momentinin 4. harmoniğinin genliği %29.33 arttığı Çizelge 5.4.'de verilmiştir.

Benzetim modelinden elde edilen sonuçlar ile deneysel düzenekten elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında şekilsel olarak örtüştüğü ama nümerik olarak tam uyuşmadığı görülmektedir. Nümerik olarak tam uyuşmaması benzetim modeli oluşturulurken manyetik devre kayıplarının ve manyetik doymanın olmadığı gibi varsayımlardan kaynaklanmıştır. Bunun yanında deneysel düzenekte akım, gerilim, moment ölçümlerindeki hatalar ve parazitler de sonuçların farklılaşmasına neden olabilmektedir.

Kısa devre arızası durumunda motorun faz sargılarındaki simetrinin bozulduğu, motorun aynı yük altında şebekeden daha fazla akım çektiği tespit edilmiştir. Bu durum motordan beklenen performansı ve verimi düşürmektedir. Motorda var olan stator sarımlar arası kısa devre arızasının etkilerinin bilinmesi, motorun arızalı olduğunun tespiti açısından kullanıcılar için önemli bir yol gösterici olacaktır. Bu nedenle etkilerin performans üzerindeki tespiti oldukça önemlidir.

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

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

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

6. KAYNAKLAR

Allal, A. and Chetate, B. (2016) 'A new and best approach for early detection of rotor and stator faults in induction motors coupled to variable loads', Frontiers in Energy, 10(2), pp. 176–191. doi: 10.1007/s11708-015-0386-2.

Andriamalala, R. N. et al. (2008) 'Eccentricity fault diagnosis of a dual-stator winding induction machine drive considering the slotting effects', ***IEEE Transactions on Industrial Electronics***, 55(12), pp. 4238–4251. doi: 10.1109/TIE.2008.2004664.

Awadallah, M. A. and Morcos, M. M. (2003) 'Application of AI tools in fault diagnosis of electrical machines and drives - An overview', ***IEEE Transactions on Energy Conversion***, 18(2), pp. 245–251. doi: 10.1109/TEC.2003.811739.

Arthur, N. and Penman, J. (1998) 'Condition monitoring with non-linear signal processing', IEE Colloquium on Non-Linear Signal and Image Processing, 1998, pp. 4–4. doi: 10.1049/ic:19980439.

Bracale, A. *et al.* (2004) 'On some spectrum estimation methods for analysis of nonstationary signals in power systems. Part II. Numerical applications', in *2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power (IEEE Cat. No.04EX951)*. IEEE, pp. 260–265. doi: 10.1109/ICHQP.2004.1409364.

Bouchareb, C. and Said, M. S. N. (2015) 'PMSM model with inter-turn fault', in 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE). IEEE, pp. 1–5. doi: 10.1109/INTEE.2015.7416712.

'By Julio César Urresty Betancourt Advisers : José Luis Romeral Martínez Jordi-Roger Riba Ruiz Department of Electronic Engineering Terrassa Barcelona , Spain' (2012).

Beerten, J., Verveckken, J. and Driesen, J. (2010) 'Predictive Direct Torque Control for Flux and Torque Ripple Reduction', ***IEEE Transactions on Industrial Electronics***, 57(1), pp. 404–412. doi: 10.1109/TIE.2009.2033487.

Briz, F. et al. (2002) 'On-Line Stator Winding Fault Diagnosis in Inverter-Fed AC Machines Using High Frequency Signal Injection', 39(4), pp. 2094–2101.

Bonnett, A. H. and Soukup, G. C. (1992) 'Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors', ***IEEE Transactions on Industry Applications***, 28(4), pp. 921–937. doi: 10.1109/28.148460.

Cira (2017) 'Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Stator Kısa Devre Arızasının Tespiti Ve Arıza Şiddetinin Otomatik Olarak Belirlenmesi.' İnönü University.

Cira, F., Arkan, M. and Gumus, B. (2016) 'Detection of Stator Winding Inter-Turn Short Circuit Faults in Permanent Magnet Synchronous Motors and Automatic Classification of Fault Severity via a Pattern Recognition System', ***Journal of Electrical Engineering and Technology***, 11(2), pp. 416–424. doi: 10.5370/JEET.2016.11.2.416.

Eftekhari, M. et al. (2013) 'A novel indicator of stator winding inter-turn fault in induction motor using infrared thermal imaging', Infrared Physics & Technology. Elsevier B.V., 61, pp. 330–336. doi: 10.1016/j.infrared.2013.10.001.

Errouissi, R. . et al. (2012) 'Robust cascaded nonlinear predictive control of a permanent magnet synchronous motor with antiwindup compensator', ***IEEE Transactions on Industrial Electronics***, 59(8), pp. 3078–3088. doi: 10.1109/TIE.2011.2167109.

Ebrahimi, B. M. and Faiz, J. (2010) 'Diagnosis and performance analysis of three-phase permanent magnet synchronous motors with static, dynamic and mixed eccentricity', IET Electric Power Applications, 4(1), p. 53. doi: 10.1049/iet-epa.2008.0308.

Ebrahimi, B. M., Faiz, J. and Roshtkhari, M. J. (2009) 'Static-, dynamic-, and mixed-eccentricity fault diagnoses in permanent-magnet synchronous motors'***, IEEE Transactions on Industrial Electronics***, 56(11), pp. 4727–4739. doi: 10.1109/TIE.2009.2029577.

El Hachemi Benbouzid, M. (2000) 'A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection'***, IEEE Transactions on Industrial Electronics***, 47(5), pp. 984–993. doi: 10.1109/41.873206.

Faiz, J., Member, S. and Exiri, A. H. (2016) 'Simulation of permanent magnet synchronous motors under short circuit', Melecon 2016, (April), pp. 18–20.

Fitouri, M., Bensalem, Y. and Abdelkrim, M. N. (2016) 'Modeling and detection of the short-circuit fault in PMSM using Finite Element Analysis', IFAC-PapersOnLine. Elsevier B.V., 49(12), pp. 1418–1423. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.07.769.

Frosini, L. and Bassi, E. (2010) 'Stator Current and Motor Efficiency as Indicators for Different Types of Bearing Faults in Induction Motors', ***IEEE Transactions on Industrial Electronics***, 57(1), pp. 244–251. doi: 10.1109/TIE.2009.2026770.

Guoxin, Z. et al. (2010) 'Demagnetization Analysis of Permanent Magnet Synchronous Machines under Short Circuit Fault', Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific, pp. 1–4. doi: 10.1109/appeec.2010.5448459.

J. Rosero, J. C. (2007) 'Broken bearings fault detection for a permanent magnet synchronous motor under non-constant working conditions by means of a joint time frequency analysis', 00, pp. 3415–3419.

Kato, T., Inoue, K. and Yoshida, K. (2014) 'Diagnosis of Stator-Winding-Turn Faults of Induction Motor by Direct Detection of Negative Sequence Currents', 186(3), pp. 1346–1353. doi: 10.1002/eej.22350.

Kim, K. C. et al. (2006) 'The shape design of permanent magnet for permanent magnet synchronous motor considering partial demagnetization', ***IEEE Transactions on Magnetics***, 42(10), pp. 3485–3487. doi: 10.1109/TMAG.2006.879077.

Kang, G. H. et al. (2003) 'Analysis of irreversible magnet demagnetization in line-start motors based on the finite-element method', ***IEEE Transactions on Magnetics***, 39(3 I), pp. 1488–1491. doi: 10.1109/TMAG.2003.810330.

Lai, C. et al. (2014) ‘Analysis of stator winding inter-turn short-circuit fault in interior and surface mounted permanent magnet traction machines’, 2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), pp. 1–6. doi: 10.1109/ITEC.2014.6861775.

Lipo, T. A. (2004) Intorduction to AC Machine Design. Wisconsin Power Electronics Research Center.

Nussbaumer, P., Mitteregger, A. and Wolbank, T. M. (2011) ‘Online Detection of Insulation Degradation in Inverter Fed Drive Systems Based on High Frequency Current Sampling’, Proceedings of the 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IECON, pp. 1954–1959.

Nandi, S., Toliyat, H. A. and Li, X. (2005) ‘Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors - A review’, ***IEEE Transactions on Energy Conversion***, 20(4), pp. 719–729. doi: 10.1109/TEC.2005.847955.

Otava, L. and Buchta, L. (2015) ‘PMSM stator winding faults modelling and measurement’, in 2015 7th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). IEEE, pp. 138–143. doi: 10.1109/ICUMT.2015.7382418.

Ortega, C. et al. (2010) ‘Improved waveform quality in the direct torque control of matrix-converter-fed PMSM drives’, ***IEEE Transactions on Industrial Electronics***, 57(6), pp. 2101–2110. doi: 10.1109/TIE.2009.2033084.

Poure, P. et al. (2009) ‘Fault tolerant control of a three-phase three-wire shunt active filter system based on reliability analysis’, Electric Power Systems Research, 79(2), pp. 325–334. doi: 10.1016/j.epsr.2008.07.003.

Romeral, L. et al. (2011) ‘Modeling of surface-mounted permanent magnet synchronous motors with stator winding interturn faults’**,** ***IEEE Transactions on Industrial Electronics***, 58(5), pp. 1576–1585. doi: 10.1109/TIE.2010.2062480.

Rosero, J. et al. (2010) ‘Fault detection by means of Hubert Huang Transform of the stator current in a PMSM with demagnetization DAth’, October, 25(2), pp. 312–318.

Raggl, K. et al. (2009) ‘Robust Angle-Sensorless Control of a PMSM Bearingless Pump’, ***IEEE Transactions on Industrial Electronics***, 56(6), pp. 2076–2085. doi: 10.1109/TIE.2009.2014745.

Rosero, J. et al. (2009) ‘Fault Detection in dynamic conditions by means of Discrete Wavelet Decomposition for PMSM running under Bearing Damage’, ***2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition***, pp. 951–956. doi: 10.1109/APEC.2009.4802777.

Richard G. Lyons, *Understanding Digital Signal Processing*. United States: Pearson Education Inc., 2004

Ruiz, J.-R. R. et al. (2009) ‘Detection of Demagnetization Faults in Permanent-Magnet Synchronous Motors Under Nonstationary Conditions’, **IEEE Transactions on Magnetics**, 45(7), pp. 2961–2969. doi: 10.1109/TMAG.2009.2015942.

Rajagopalan, S. et al. (2007) 'Dynamic Eccentricity and Demagnetized Rotor Magnet Detection in Trapezoidal Flux (Brushless DC) Motors Operating Under Different Load Conditions', ***IEEE Transactions on Power Electronics***, 22(5), pp. 2061–2069. doi: 10.1109/TPEL.2007.904183.

Saavedra, H. et al. (2014) 'Detection of interturn faults in PMSMs with different winding configurations', Energy Conversion and Management. Elsevier Ltd, 79, pp. 534–542. doi: 10.1016/j.enconman.2013.12.059.

Tersigni, J. and Sebastian, T. (2012) 'Inter Winding Short Circuit Faults in Permanent Magnet Synchronous Motors used for High Performance Applications .', 2, pp. 1291–1298.

Taghipour-GorjiKolaie, M. et al. (2011) 'Inter-turn stator winding fault detection in PMSM using magnitude of reactive power', ICCAIE 2011 - 2011 IEEE Conference on Computer Applications and Industrial Electronics, (Iccaie), pp. 256–261. doi: 10.1109/ICCAIE.2011.6162141.

Siddique, A., Yadava, G. S. and Singh, B. (2005) 'A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors', ***IEEE Transactions on Energy Conversion***, 20(1), pp. 106–114. doi: 10.1109/TEC.2004.837304.

Tallam, R. M., Habetler, T. G. and Harley, R. G. (2003) 'Stator winding turn-fault detection for closed-loop induction motor drives', ***IEEE Transactions on Industry Applications***, 39(3), pp. 720–724. doi: 10.1109/TIA.2003.811784.

Thomson, W. T. and Fenger, M. (2001) 'Current signature analysis to detect induction motor faults', IEEE Industry Applications Magazine, 7(4), pp. 26–34. doi: 10.1109/2943.930988.

Toliyat, H. A., Waikar, S. P. and Lipo, T. A. (1998) 'Analysis and simulation of five-phase synchronous reluctance machines including third harmonic of airgap MMF', ***IEEE Transactions on Industry Applications***, 34(2), pp. 332–339. doi: 10.1109/28.663476.

Toliyat, H. A. and Lip, T. A. (1995) 'of Cage', 10(2), pp. 241–247.

Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), pp. 1–6. doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6940913.

Urresty, J. C., Riba, J. R. and Romeral, L. (2012) 'Application of the zero-sequence voltage component to detect stator winding inter-turn faults in PMSMs', Electric Power Systems Research. Elsevier B.V., 89, pp. 38–44. doi: 10.1016/j.epsr.2012.02.012.

Wei Zhou et al. (2009) 'Incipient Bearing Fault Detection via Motor Stator Current Noise Cancellation Using Wiener Filter', ***IEEE Transactions on Industry Applications***, 45(4), pp. 1309–1317. doi: 10.1109/TIA.2009.2023566.

Wadhwani, S., Gupta, S. and Kumar, V. (2008) 'Fault classification for rolling element bearing in electric machines', ***IETE Journal of Research***, 54(4), p. 264. doi: 10.4103/0377-2063.44230.

Zhang, Y. and Jiang, J. (2008) 'Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems', Annual Reviews in Control, 32(2), pp. 229–252. doi: 10.1016/j.arcontrol.2008.03.008.

Zhang, C. et al. (2014) ‘Analysis of stator winding inter-turn short circuit fault of PMSM for electric vehicle based on finite element simulation’, 2014 IEEE Conference and Expo Zhang,

Zhou, W., Habetler, T. G. and Harley, R. G. (2008) ‘Bearing fault detection via stator current noise cancellation and statistical control’***, IEEE Transactions on Industrial Electronics***, 55(12), pp. 4260–4269. doi: 10.1109/TIE.2008.2005018.

Ye Zhongming and Wu Bin (2000) ‘A review on induction motor online fault diagnosis’, in Proceedings IPEMC 2000. Third International Power Electronics and Motion Control Conference (IEEE Cat. No.00EX435). Int. Acad. Publishers, pp. 1353–1358. doi: 10.1109/IPEMC.2000.883050.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Timur LALE

Doğum Yeri ve Tarihi: DİYARBAKIR / 03.07.1989

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

DİYARBAKIR

Lisans:

(2006-2012) Ömer Halis Demir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans:

(2016-Devam) Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Makinaları Anabilim Dalı

Mesleki Deneyim:

(2013-2014) Dicle Hidroelektrik Santrali (HES), Diyarbakır

(2014-2015) Türk Silahlı Kuvvetler (TSK), Ankara

(2016-Devam) Araştırma Görevlisi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü DİYARBAKIR

T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI İNTİHAL RAPORU FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
ADI VE SOYADI	TİMUR LALE
ÖĞRENCİ NO	15805010
EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI	2017-2018
YARIYIL	☐ Güz ☒ Bahar
ANABİLİM DALI	ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
PROGRAM	Yüksek Lisans
TEZ KONUSU	STATOR KISA DEVRE ARIZASININ SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTOR PERFORMANSINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI
İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ	
RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma Sınavı Sonrası
SAYFA SAYISI	88
BENZERLİK ORANI	% 14
RAPORLAMA TARİHİ	10/08/ 2018

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam 88 sayfalık kısmına ilişkin, 10/08/2018 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 14'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- ☐ Kabul/Onay sayfaları hariç,
- ☐ Kaynakça hariç
- ☐ Alıntılar hariç/dâhil
- ☐ Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

(İmza)
Timur LALE

10/08/2018
Doç. Dr. Bilal GÜMÜŞ
Tez Danışmanı

(İmza)
10/08/2018
Prof. Dr. İbrahim Kaya
Anabilim Dalı Başkanı