



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



BEŞ-FAZLI ASENKRON MOTOR SÜRÜCÜLERİNİN KONTROL YÖNTEMİ VE ARIZA TOLERANSI ÇALIŞMASI

Yüksek Lisans Tezi

Galdi HYSA

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir
2021

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**BEŞ-FAZLI ASENKRON MOTOR SÜRÜCÜLERİNİN
KONTROL YÖNTEMİ VE ARIZA TOLERANSI
ÇALIŞMASI**

Galdi HYSA

Danışman : Prof. Dr. Erkan MEŞE

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir
2021

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Beş-Fazlı Asenkron Motor Sürücülerinin Kontrol Yöntemi ve Arıza Toleransı Çalışması” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

08 / 09 / 2021

Galdi HYSA

ÖZET**BEŞ-FAZLI ASENKRON MOTOR SÜRÜCÜLERİNİN KONTROL
YÖNTEMİ VE ARIZA TOLERANSI ÇALIŞMASI**

HYSA, Galdi

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erkan MEŞE

Eylül 2021, 57 sayfa

Çok-fazlı elektrik motorlar, arızalı durumlarda kullanılabilmesi, yüksek sistem güvenilirliği, faz başına göre güç azaltma, azaltılmış moment dalgalanması avantajları gibi nedeniyle üç-fazlı motorlarla karşılaştırıldığında daha cazip bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Bu tezde beş-fazlı asenkron motor sürücü sistemi incelenmiştir. Çok-fazlı asenkron motorların endüstrinin farklı alanlarındaki uygulamalarda tercih edilmesi, bu araştırma çalışmasının önemini net bir şekilde göstermektedir. Son yıllarda bu konuyla ilgili birçok bilimsel araştırma yapılmaktadır.

Tezin metodolojisi temelde analitik ve karşılaştırmalı olmaktadır. İlk olarak beş-fazlı asenkron motrun matematiksel modeli ve beş-fazlı gerilim beslemeli inverter (Voltage Source Inverter - VSI) modeli incelenmiştir. MATLAB/Simulink'te beş-fazlı asenkron motorun alan yönelimli kontrol (Field Oriented Control - FOC) yöntemi oluşmaktadır. Simulink modeline göre, beş-fazlı asenkron motorun performansını analiz etmek amacıyla normal modunda ve arızalı çalışması durumlarda beş-fazlı elektrik sürücünün simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Dengesiz gerilim sisteminden etkilenen farklı arıza durumları için simülasyonlar yapılmıştır ve elde edilen stator faz akımları, rotorun hızı ve elektromanyetik moment sonuçları detaylı olarak analiz edilmiştir.

Ayrıca, beş-fazlı asenkron motorla karşılaştırmak amacıyla üç-fazlı asenkron motor sürücüsü incelenmiştir. Bu araştırma çalışmasının temel amacı, üç-fazlı asenkron motordan daha iyi arıza tolerans kabiliyetine sahiptir ve daha güvenilir olan beş-fazlı asenkron motorun avantajlarını sunmaktır.

Anahtar sözcükler: beş-fazlı asenkron motor, çok-fazlı elektrik sürücü, alan yönelimli kontrol (FOC) yöntemi, MATLAB/Simulink.



ABSTRACT**CONTROL METHOD AND FAULT TOLERANCE OPERATION OF FIVE-PHASE INDUCTION MOTOR DRIVE**

HYSA, Galdi

MSc in Electric-Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Erkan MEŞE

September 2021, 57 pages

The multi-phase electrical machines are recognized like an interesting alternative comparing to conventional three-phase machines due to their advantages, such as the ability of using these machines in faulty conditions, high overall system reliability, the reduction in the total power per phase and reduced torque pulsations. In this thesis, it is studied five-phase induction motor drive system. The importance of this research study is related to the fact that multi-phase induction motors are preferred in applications in different fields of industry. In recent years, many scientific studies have been carried out on this subject.

The methodology of the thesis is mainly analytical and comparative. Firstly, it was studied the mathematical model of five-phase induction motor and the model of five-phase voltage source inverter (VSI). The field oriented control (FOC) method of five-phase induction motor was designed in MATLAB/Simulink. Based on the Simulink model, the simulation of five-phase electric drive was realized in normal mode and faulty conditions operation in order to analyze the performance of the five-phase induction motor. Simulations have been performed for different cases of faulty conditions effected by unbalanced voltage system and the obtained results of stator phase's currents, rotor speed and electromagnetic torque were analyzed in detail.

Furthermore, three-phase induction motor drive was examined in order to compare it with five-phase induction motor. The main goal of this research work is to present the advantages of five-phase induction motor, which has better fault tolerance capability and it is more reliable than three-phase induction motor.

Keywords: five-phase induction motor, multi-phase electrical drive, field oriented control (FOC) method, MATLAB/Simulink.

ÖNSÖZ

Bu tez, Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde Yüksek Lisans programının tamamlanması olarak yapılmıştır. Bu tezin konusu elektrik motorlar ve sürücüler alanı ile ilgilidir. Aynı zamanda, bu konu benim özveri ve araştırma çalışmalarımın önemli bir sonucudur.

Akademik olarak birkaç kişinin katkısı bulundu, ancak tüm yüksek lisans dönemi boyunca verdiği tavsiyeleri, yönlendirmeleri ve değerli desteği için özellikle benim danışmanım Prof. Dr. Erkan MEŞE'ye teşekkürlerimi sunarım.

İZMİR

08/09/2021

Galdi HYSA



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
İÇ KAPAK	ii
KABUL ONAY SAYFASI	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
TABLolar DİZİNİ.....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Çok-Fazlı Elektrik Motorlar Kullanmanın Önemi ve Uygulamaları.....	3
1.2 Çok-Fazlı Elektrik Motoru Sürücülerinde Arıza Tipleri	4
2. BEŞ-FAZLI ASENKRON MOTORUN MATEMATİKSEL MODELİ	7
2.1 Faz-Değişken Formunda Beş-Fazlı Motorun Matematiksel Modeli	7

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.2 Clarke ve Park'ın Dönüşümleri ve İsteğe Bağlı Referans Sisteminde Beş-Fazlı Motorun Modeli	10
3. BEŞ-FAZLI İNVERTER MODELİ	15
3.1 Beş-Fazlı Gerilim Beslemeli İnverterin Topolojisi.....	15
3.2 Beş-Fazlı Gerilim Beslemeli İnverterin Çalışma Prensibi.....	16
4. BEŞ-FAZLI ASENKRON MOTORUN VEKTÖR KONTROLÜ	22
4.1 Beş-Fazlı Asenkron Motorun Alan Yönelimli Kontrolü	22
4.2 Beş-Fazlı Asenkron Motor Sürücüsünün Alan Yönelimli Kontrolünün Simulink Modeli	25
5. SİMÜLASYONLARIN SONUÇLARI	30
5.1 Beş-Fazlı Asenkron Motorun Normal Çalışması Modu	30
5.2 Beş-Fazlı Asenkron Motorun Arızalı Çalışması Durumları	33
5.3 Beş-Fazlı Asenkron Motorun Üç-Fazlı Asenkron Motorla Karşılaştırılması..	37
6. SONUÇ	47
KAYNAKLAR DİZİNİ	50
TEŞEKKÜR.....	56
ÖZGEÇMİŞ	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Çok-fazlı elektrik motorların uygulama alanları	4
1.2 Beş-fazlı elektrik motoru sürücüsündeki arıza tipleri.....	5
2.1 Asenkron motorun kesiti ve $d-q$ eksen seti.....	13
3.1 Beş-fazlı asenkron motor sürücü sistemi.....	15
3.2 Beş-fazlı gerilim beslemeli inverterin topolojisi	16
3.3 On-adımlı çalışma modunda beş-fazlı inverterin kapı sinyalleri.....	16
3.4 On-adımlı çalışma modunda beş-fazlı inverterin faz gerilimleri.....	17
3.5 On-adımlı çalışma modunda beş-fazlı inverterin hat gerilimleri.....	19
4.1 Beş-fazlı asenkron motorun alan yönelimli kontrol şeması	23
4.2 Beş-fazlı asenkron motor sürücüsünün alan yönelimli kontrol şeması	24
4.3 Beş-fazlı asenkron motor sürücüsünün alan yönelimli kontrolünün Simulink modeli.....	25
4.4 Beş-fazlı asenkron motorun vektör kontrolör bloğunun Simulink modeli	27
4.5 Beş-fazlı gerilim beslemeli inverterin Simulink modeli.....	28
4.6 Beş-fazlı asenkron motorun Simulink modeli	29
5.1 Stator “ a ” fazının akımı	30
5.2 Stator fazının akımları	31

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.3 Rotorun hızı.....	31
5.4 Elektromanyetik momenti.....	31
5.5 Stator akımlarının α - β bileşenleri.....	32
5.6 Elektromanyetik momenti ve rotorun hızı	32
5.7 Normal çalışması modunda ve %60 düşük-gerilimde stator “a” fazının akımı.....	33
5.8 Normal çalışması modunda ve %100 düşük-gerilimde stator “a” fazının akımı.....	34
5.9 Normal çalışması modunda ve stator “a” fazının %60, %80, %100 düşük gerilimde rotorun hızı	34
5.10 Normal çalışması modunda ve stator “a” fazının %40 düşük-gerilimde elektromanyetik momenti.....	35
5.11 Normal çalışması modunda ve stator “a” fazının %60 düşük-gerilimde elektromanyetik momenti.....	35
5.12 Normal çalışması modunda ve stator “a” fazının %60, %80, %100 düşük-gerilimde elektromanyetik momenti	36
5.13 Üç-fazlı asenkron motor sürücüsünün alan yönelimli kontrol şeması	37

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.14 Üç-fazlı asenkron motor sürücüsünün alan yönelimli kontrolünün Simulink modeli.....	38
5.15 Üç-fazlı asenkron motorun vektör kontrolör bloğunun Simulink modeli	39
5.16 Akım regülatörünün Simulink modeli	41
5.17 Stator fazının akımları	42
5.18 Rotorun hızı	42
5.19 Elektromanyetik momenti	42
5.20 Stator fazının akımları, rotorun hızı and elektromanyetik moment üzerinde yakınlaştırma	43
5.21 Normal çalışması modunda ve stator “a” fazının %20, %40 düşük-gerilimde rotorun hızı	44
5.22 Normal çalışması modunda ve stator “a” fazının %20, %40 düşük-gerilimde elektromanyetik momenti.....	44
5.23 Normal çalışması modunda ve stator “a” fazının %60, %80, %100 düşük-gerilimde rotorun hızı.....	45
5.24 Normal çalışması modunda ve stator “a” fazının %60, %80, %100 düşük-gerilimde elektromanyetik momenti	45

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Beş-fazlı inverterin faz gerilimleri	18
3.2 Beş-fazlı inverterin hat gerilimleri	19
4.1 Beş-fazlı asenkron motorun parametreleri	26
5.1 Arızalı çalışması durumlarında beş-fazlı asenkron motorun elektromanyetik moment dalgalanması değerleri	36
5.2 Üç-fazlı fazlı asenkron motorun parametreleri	39
5.3 Arızalı çalışması durumlarında üç-fazlı asenkron motorun elektromanyetik moment dalgalanması değerleri	46

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$v_s v_r$	Stator/rotor faz gerilimi
$i_s i_r$	Stator/rotor faz akımı
$R_s R_r$	Stator/rotor faz direnci
$\lambda_s \lambda_r$	Stator/rotor fazın halkalanan akısı
$L_s L_r$	Stator/rotor öz-endüktansı
$L_{ls} L_{lr}$	Stator/rotor kaçak endüktansı
$[L_{sr}]$	Statordan rotora karşıt endüktans matrisi
$[L_{rs}]$	Rotordan statora karşıt endüktans matrisi
L_m	Mıknatıslanma endüktansı
M	Statordan rotora karşıt endüktansın maksimum değeri
α	Fazlar arasındaki açısı
θ	Stator fazı “a” eksenine göre rotor fazı “a” ekseninin açısı
T_e	Elektromanyetik momenti
T_L	Yük momenti
J	Eylemsizlik momenti
k	Sürtünme katsayısı
ω_m	Mekanik açısal hız

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
ω	Elektriksel açısal hız
[C]	Clarke'ın dönüşüm matrisi
[P]	Park'ın dönüşüm matrisi
p	Manyetik kutup çifti sayısı
θ_s	Stator fazı "a" eksenine göre referans sisteminin d -ekseninin açısı
θ_r	Rotor fazı "a" eksenine göre referans sisteminin d -ekseninin açısı
ω_a	Referans sisteminin isteğe bağlı hızı
$v_{ds} v_{qs}$	Direct-quadrature stator gerilimi bileşenleri
$v_{dr} v_{qr}$	Direct-quadrature rotor gerilimi bileşenleri
$i_{ds} i_{qs}$	Direct-quadrature stator akımı bileşenleri
$i_{dr} i_{qr}$	Direct-quadrature rotor akımı bileşenleri
$\lambda_{ds} \lambda_{qs}$	Direct-quadrature statorun halkalanan akı bileşenleri
$\lambda_{dr} \lambda_{qr}$	Direct-quadrature rotorun halkalanan akı bileşenleri
$v_a v_b v_c v_d v_e$	Faz gerilimleri
$V_A V_B V_C V_D V_E$	İnverter ayak (leg) gerilimleri
S_k	İnverter ayağının (leg) anahtarlama durumu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
V_{DC}	DC-link gerilimi
i_{ds}^*	d -ekseni akım referansı
i_{qs}^*	q -ekseni akım referansı
θ_e	Rotorun manyetik akı pozisyonu
ω_{sl}	Rotorun kayma frekansı
<u>Kısaltmalar</u>	
AC	Alternatif akım
DC	Doğru akım
FOC	Alan yönelimli kontrol (field oriented control)
DTC	Doğrudan moment kontrol (direct torque control)
IGBT	İzole kapılı bipolar transistor (insulated-gate bipolar transistor)
MOSFET	Metal oksit yarı iletken alan-etki transistörü (metal oxide semiconductor field-effect transistor)
VSI	Gerilim beslemeli inverter (voltage source inverter)
PI	Oransal integral kontrolör (proportional integral controller)



1. GİRİŞ

AC elektrik makinaları genelde asenkron makinalar ve senkron makinalar olarak sınıflandırılabilir. Yüzyıldan fazla bir süredir AC motorlar modern endüstriyel uygulamalarda çok önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle asenkron motorlar, az bakım gerektirmeleri, basit yapıda olmaları, uygun maliyetli üretilebilmeleri, mekanik olarak sağlam olmaları, yüksek hızlı çalışma kabiliyetleri ve bir AC gücüne doğrudan bağlantı ile çalıştırılabilmeleri gibi bazı avantajları nedeniyle en çok kullanılan elektrikli makine türüdür (Iqbal et al., 2010). Asenkron motorlar imalat, nakliye, madencilik ve taş ocakçılığı gibi farklı endüstrilerde çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır.

Elektrik motorunun tarihi, 1831’de motoru ilk kez çalıştırmada ve aynı anda laboratuvar deneylerinde başarılı olan Michael Faraday ve Joseph Henry tarafından başlatılmıştır. Yıllar sonra 1888’de de AC motorların icadı Nikola Tesla tarafından gerçekleştirilmiştir. Tesla’nın büyük icadından sonraki yıllarda, üç-fazlı güç kaynağı, dağıtılmış stator sargısı ve motorların diğer bazı yapısal parçaları sürekli geliştirilmiştir. Üç-fazlı asenkron motor, on dokuzuncu yüzyılın son yıllarında ticari kullanıma sunulmuştur (Kim, 2017).

Çok-fazlı motor sürücüsünün ilk teklif tipi, asenkron motor sürücüsüne besleyen beş-fazlı bir gerilim beslemeli invertörünün önerildiği 1969’da gerçekleşmiştir (Ward and Harer, 1969). Sonraki yıllarda, bu tür motorlar üzerine yapılan araştırmalar 1990 yılının sonuna kadar sabit kaldı (Levi et al., 2007). Geçen yüzyılın başından beri, çok-fazlı elektrik motorlar, geleneksel üç-fazlı motorlarla karşılaştırıldığında gerçekten daha cazip bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Güç anahtarlama cihazlarının ve güç elektroniği dönüştürücülerinin geliştirilmesi nedeniyle çok-fazlı elektrikli sürücülerine olan ilgi artmıştır (Smith, 2002). Eviricinin ayak (legs) sayısı artırılarak aynı zamanda çıkış fazlarının sayısı da artırılmıştır. İnverterin çıkış fazlarının sayısının artması, üçten fazla fazlı elektrik motor sürücülerinin geliştirilmesinde büyük bir etkisi olmuştur. Çok-fazlı motorların önemi, sistemin yüksek güvenilirliği, faz başına göre güç azaltma ve bu motorları arızalı durumlarda kullanabilmesi gibi diğer bazı avantajları nedeniyle çeşitli uygulamalardaki kullanılabilirlikleriyle ilgilidir. Elektrik ve hibrit araçlar,

elektrikli uçaklar, demiryollarında kullanılan lokomotifler, elektrikli gemiler ve rüzgar enerjisi üretim sistemleri gibi birçok uygulamada arıza toleransı çalışmanın avantajı önemlidir (Levi et al., 2007; Jin et al., 2015; Parsa and Toliyat, 2007). H. A. Toliyat ve T. A. Lipo gibi farklı araştırma çalışmalarda statik güç dönüştürücülerle çalışması sırasında çok-fazlı asenkron motorların performansı analiz edilmiştir (Toliyat et al., 1991). Bu çalışmalarda beş-fazlı motoru, geleneksel üç-fazlı motorlarla karşılaştırıldığında daha yüksek çıkış torku/hacim oranına sahip olabileceği sonucuna varılmıştır. Beş-fazlı asenkron motorların önemli bir avantajı, çıkış momentini artırmak için hava aralığı akı yoğunluğunun üçüncü harmonik bileşenini kullanma olasılığıdır. Birçok araştırma çalışmasında beş-fazlı elektrik motoru en çok dikkate alınanlardan biridir. Fakat güçlü elektronik mikroişlemcilerin geliştirilmesi nedeniyle son birkaç yılda kullanılan başka çok-fazlı motorlar da vardır (Gregor Recalde, 2015; Tani et al., 2012; Chen et al., 2014).

Günümüzde değişken hızlı elektrik sürücüler, ev aletleri gibi temel cihazlardan başlayarak elektrikli uçaklar veya elektrikli yolcu gemileri gibi en karmaşık tiplere kadar farklı uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Uygulama tipine göre, kontrol değişkeni rotorun hızı, motorun elektromanyetik momenti veya rotor milinin pozisyonu olabilir. Elektrik motorlarının kontrol teknikleri skaler kontrol (Scharlau et al., 2008) ve vektör kontrol (Xu et al., 2002) olmak üzere iki temel grupta sınıflandırılmaktadır. Çok-fazlı asenkron motorun hız kontrol yöntemleri prensip olarak üç-fazlı asenkron motorla aynıdır. Skaler kontrol yöntemi kararlı rejim performansı ilişkisine dayanır ve sadece gerilim, akım, halkalanan akının büyüklüğü ve frekansı kontrol edilmektedir. Bu yöntem geçici rejim sırasında uzay vektörlerinin pozisyonunu kontrol etmediği için düşük performanslı bir kontrol tekniği olarak kabul edilmektedir. Buna karşılık vektör kontrol yöntemi sadece büyüklük ve frekansın değil, ancak aynı zamanda uzay vektörlerinin gerilim, akım ve halkalanan akının pozisyonun da kontrol edildiği dinamik durumların ilişkisine de dayanır. Kararlı ve geçici rejimler sırasında bu yöntem uzay vektörlerinin pozisyonu kontrol eder ve kapalı çevrim bir sistemde uygulanan yüksek performanslı bir kontrol tekniği olarak kabul edilmektedir. Sabit gerilim/frekans (v/f) kontrol yöntemi gibi skaler kontrol gerçekten az ilgi çekicidir. Çünkü daha karmaşık kontrol algoritmalarının uygulanmasının maliyeti çok-fazlı güç elektroniği bileşenlerinin ve çok-fazlı motorun kendisinin maliyeti ile

karşılaştırıldığında ihmal edilebilmektedir (Levi, 2008). Alan yönelimli kontrol (field oriented control - FOC), doğrudan moment kontrolü (direct torque control - DTC) ve varyantları gibi yüksek performanslı vektör kontrol yöntemlerine odaklanılır. Çünkü bunlar avantajları nedeniyle piyasada yaygın olarak sunulmaktadır ve uygulama alanları sürekli genişlemektedir (Singh et al., 2005; Abdel-Khalik et al., 2013; Bermudez et al., 2017; Bojoi et al., 2005).

1.1 Çok-Fazlı Elektrik Motorlar Kullanmanın Önemi ve Uygulamaları

Çok-fazlı asenkron motorlar çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Geleneksel üç-fazlı asenkron motorlarla karşılaştırıldığında bu geniş uygulama yelpazesi çok-fazlı motorların birçok avantajının nedenidir (Levi et al., 2007). Çok-fazlı motorların temel avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Daha iyi arıza toleransı çalışması (Tian et al., 2018),
- İnverter ayağı (legs) başına göre toplam güç azaltma (daha düşük güçte yarı iletken anahtarların kullanılmasını sağlamaktadır) (Parsa and Toliyat, 2005),
- Üç-fazlı motorlarla karşılaştırıldığında daha yüksek verimlilik (manyetik akının düşük uzay-harmonik içeriği) (Levi et al., 2007),
- Daha yüksek moment yoğunluğu (Lyra and Lipo, 2002),
- Azaltılmış düşük-frekanslı moment dalgalanması (Williamson and Smith, 2003),
- Gürültü özelliklerinin iyileştirilmesi.

Arıza toleransı kabiliyeti, muhtemelen çok-fazlı motorların en ilginç özelliğidir. Bu önemli avantaj, üç-fazlı motorlar için incelenmiştir ve güç dönüştürücünün maliyetini ve karmaşıklığını artırarak, ek elektrik donanım masrafı ile arıza toleransı çalışması elde edilebilmektedir. Bu durum, çok-fazlı elektrik sürücülerde tamamen farklıdır. Çünkü arızalı durumlarda çok-fazlı elektrik motorlar güvenli çalışmaya devam etmek için ek bir donanıma gerek yoktur (Guzman et al., 2014). Çok-fazlı makineler ve özellikle beş-fazlı asenkron motorlar, hibrit ve elektrikli araçlar, elektrikli gemi tahriki (Parsa and Toliyat, 2005; Williamson et al., 2004), elektrikli uçaklar (Cao et al., 2012) ve demiryollarında

kullanılan lokomotifler (Barrero and Duran, 2016) gibi çeşitli önemli uygulamalarda kullanılmaktadır. Şekil 1.1’de geniş uygulama yelpazesi daha detaylı gösterilmektedir.

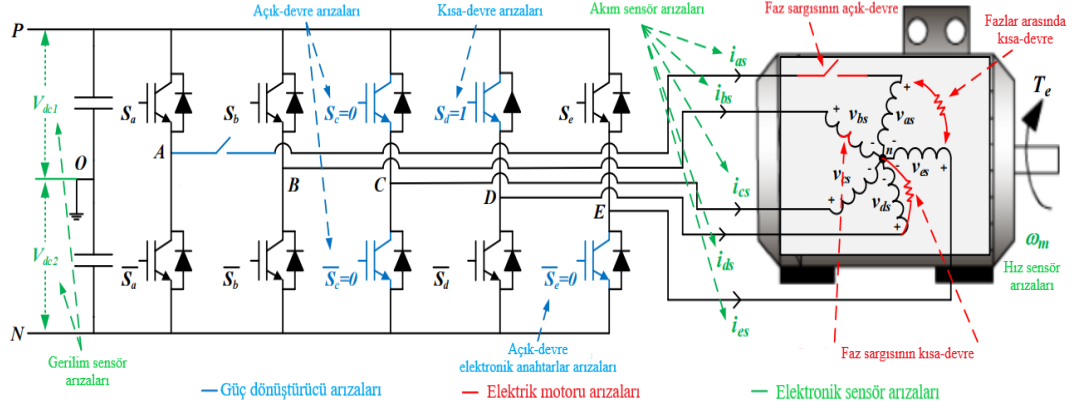


Şekil 1.1. Çok-fazlı elektrik motorlarının uygulama alanları.

Bu motorlar, daha iyi arıza toleransı sağlamak ve faz başına göre toplam güç azaltma sağlamak amacıyla elektrikli gemi tahriki, elektrik enerjisi üretim sistemleri ve pompa sistemleri gibi yüksek güçlü uygulamalarda da kullanılmaktadır. Çok-fazlı elektrik sürücüler çekiş motorları, yüksek hızlı asansörler ve genel havacılık uygulamaları gibi bazı güvenlik açısından kritik uygulamalarda favori bir seçimdir. Çünkü arızalı durumda çalışma kabiliyeti ve yüksek genel sistem güvenilirliği gibi temel avantajları vardır (Levi, 2008).

1.2 Çok-Fazlı Elektrik Motoru Sürücülerinde Arıza Tipleri

Elektrik sürücülerde farklı tipte arızalar oluşabilir ve bu nedenle arıza toleransı kabiliyeti çok-fazlı elektrik motorlarının en önemli özelliklerinden biridir (Duran and Barrero, 2016). Genel sistem üzerindeki pozisyona ve elektrikselsel veya mekanik problem olabilecek niteliklerine göre arızalar birkaç grupta sınıflandırılabilir. Çok-fazlı bir elektrik sürücüdeki arızalar güç dönüştürücü arızaları, elektronik sensör arızaları ve elektrik motoru arızaları olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılır (Gregor Recalde, 2015). Şekil 1.2’de bu tip arızalar gösterilmektedir ve sınıflandırmaları aşağıda daha detaylı anlatılmaktadır.



Şekil 1.2. Beş-fazlı elektrik motoru sürücüsündeki arıza tipleri.

- Güç dönüştürücü arızaları.

Elektrik sürücülerdeki arızaların çoğu güç elektroniği bileşenlerinin arızalanması nedeniyle oluşmaktadır (Duran and Barrero, 2016; Guzman et al., 2015). Bu tür arızalar çoğunlukla yarı iletkenlerin yanması veya yarı iletken sürücü arızası nedeniyle oluşmaktadır. Sonuç olarak, elektronik güç dönüştürücü tamamen bir faz kaybedebilir veya çalışmaya devam edebilir, ancak kontrol yeteneklerini kaybeder.

- Elektronik sensör arızaları.

Elektrik sürücülerde sensörlerin kullanılmasının önemi, koruma amaçlı ve uygun kontrol tekniğinin sağlanmasıdır. Bir sensör arızası durumunda, mevcut olmayan veya yanlış sinyaller, tüm sistem üzerinde olumsuz etkilerin nedeni veya tam sürücü arızasının nedeni olabilir (Gregor Recalde, 2015). Çalışmamızda beş-fazlı asenkron motor sürücü ve diğer elektrik sürücülerde hız ve akım sensörlerinin çok önemli olduğu hız ve akım kapalı çevrim kontrolörleri esas alınmıştır.

- Elektrik motoru arızaları.

Bu tür arızalar elektriksel veya mekanik problemlerden kaynaklanır. Ayrıca, bunlar birkaç grupta sınıflandırılabilir (Gregor Recalde, 2015):

- Stator arızaları. Bu tür arızalar bir veya daha fazla stator faz sargısının kısa-devre (Barcaro, et al., 2011) veya açık devre olmasından kaynaklanır

(Abdel-Khalik et al., 2014; Bianchi et al., 2013; Chiricozzi and Villani, 2008). Açık devre faz sargıları, sargının kendisinde veya bağlı olduğu konvertör bacağına bir arıza nedeni olabilir. Kısa-devre arızaları ise bir faz içinde, fazlar arasında veya faz ile çerçeve arasında oluşmaktadır (Apsley and Williamson, 2006). Bu arızalar, düşük- veya aşırı-gerilimde çalışması, dengesiz stator gerilimi, başlangıç stresleri ve stator sargılarında yüksek sıcaklık gibi izolasyon sorunları veya elektrik motorun uzun süreli çalışma durumlarından kaynaklanır.

- Rotor arızaları. Bu tür arızaları kısa-devre rotor faz sargıları, çatlamış rotor uç halkaları ve kırılmış rotor çubuklarından dolayı olabilir (Nandi et al., 2005). Bu arızalar, elektrik motorun aşırı yük veya dengesiz yük koşulları altında çalışması, elektromanyetik stres, çevre koşulları ve üretim sorunlarından kaynaklanır.
- Hava aralığı arızaları. Bu tür arızalar motorun yapım ve imalat hatalarından kaynaklanır. Bunlar elektrik motorun stator ve rotor arasındaki dengesiz hava aralığının sebebidir.
- Bükülmüş mil (bent shaft) arızaları. Bu arızalar çoğunlukla kuvvetin dengesiz olduğu durumlarda ortaya çıkar ve motorun titreşimlerinin ve gürültüsünün nedeni sayılmaktadır.
- Rulman arızaları (bearing faults). Bu arızalar milin zorlanması sonucu titreşimlerine neden olan montaj hatalarından kaynaklanmaktadır.

İstatistiklere ve farklı araştırmalara göre, elektrik motorlarda en çok görülen arızalar stator sargı arızaları, kırılmış rotor çubukları, çatlamış rotor uç halkaları, rulman arızaları, mil arızaları ve hava aralığı düzensizlikleridir (Gregor Recalde, 2015). Her türlü arıza, elektrik motorun performansını olumsuz etkiler ve verimliliğini azaltmaktadır. Bu arızalar sistemdeki dengesiz gerilimlerin ve stator akımlarının, elektromanyetik momentin azalmasının, faz akımlarında yüksek-düzyer harmoniklerin oluşmasının, artan gürültü seviyesinin, titreşimin ve elektrik motorun aşırı-ısınmalarının nedeni sayılmaktadır.

2. BEŞ-FAZLI ASENKRON MOTORUN MATEMATİKSEL MODELİ

2.1 Faz-Değişken Formunda Beş-Fazlı Motorun Matematiksel Modeli

Diğer elektrik motorlar gibi aynı yapıda olan beş-fazlı asenkron motoru da stator ve rotor olmak üzere iki ana parçaya sahiptir. Bu ana yapısal parçaların her birinde beş-fazlı sargılar vardır ve fazlar arasındaki mekanik açısı tam olarak 72° veya $2\pi/5$ radyandır. Stator veya rotorun herhangi bir fazının gerilim denge denklemi aynı forma sahiptir. Ek endeksler s ve r sırasıyla stator ve rotoru tanımlar. Ayrıca, v , i , R ve λ , sırasıyla terminal fazdan nötr gerilime, faz akımı, faz sargı direnci ve halkalanan akımın anlık değerlerini sembolize eder. Beş-fazlı asenkron motoru modeli, matris kompakt formda aşağıdaki gerilim denge denklemleri ve halkalanan akı denklemleri ile yazılabilir (Wilamowski and Irwin, 2011; Meşe, 2021):

$$[v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d[\lambda_s]}{dt}$$

$$[v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d[\lambda_r]}{dt}$$

$$[\lambda_s] = [L_s][i_s] + [L_{sr}][i_r]$$

$$[\lambda_r] = [L_{rs}][i_s] + [L_r][i_r]$$

$$[v_s] = [v_{as} \quad v_{bs} \quad v_{cs} \quad v_{ds} \quad v_{es}]^T$$

$$[i_s] = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs} \quad i_{ds} \quad i_{es}]^T$$

$$[\lambda_s] = [\lambda_{as} \quad \lambda_{bs} \quad \lambda_{cs} \quad \lambda_{ds} \quad \lambda_{es}]^T$$

$$[v_r] = [v_{ar} \quad v_{br} \quad v_{cr} \quad v_{dr} \quad v_{er}]^T$$

$$[i_r] = [i_{ar} \quad i_{br} \quad i_{cr} \quad i_{dr} \quad i_{er}]^T$$

$$[\lambda_r] = [\lambda_{ar} \quad \lambda_{br} \quad \lambda_{cr} \quad \lambda_{dr} \quad \lambda_{er}]^T$$

Stator ve rotor dirençleri 5x5 diyagonal matrisler olarak tanımlanır:

$$[R_s] = \text{diag}(R_s \ R_s \ R_s \ R_s \ R_s)$$

$$[R_r] = \text{diag}(R_r \ R_r \ R_r \ R_r \ R_r)$$

$[L_s]$ ve $[L_r]$ sırasıyla stator sargısının ve rotor sargısının endüktans matrisleridir. Bu matrisler stator ve rotorun varsayılan silindirik yapısından dolayı sadece sabit katsayılara sahiptir. Fazlar arasındaki mekanik açı $\alpha = 2\pi/5 = 72^\circ$. $L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_{ee} = L_{dd}$ stator ve rotor sargı fazlarının öz endüktanslarıdır. L_{ls} ve L_{lr} sırasıyla stator ve rotor sargıları için kaçak endüktans ve M ise mıknatıslanma endüktansdır (Levi et al., 2004; Hussain et al., 2008).

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aas} & L_{abs} & L_{acs} & L_{ads} & L_{aes} \\ L_{bas} & L_{bbs} & L_{bcs} & L_{bds} & L_{bes} \\ L_{cas} & L_{cbs} & L_{ccs} & L_{cds} & L_{ces} \\ L_{das} & L_{dbs} & L_{dcs} & L_{dds} & L_{des} \\ L_{eas} & L_{ebs} & L_{ecs} & L_{eds} & L_{ees} \end{bmatrix}$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{ls} + M & M \cos \alpha & M \cos 2\alpha & M \cos 2\alpha & M \cos \alpha \\ M \cos \alpha & L_{ls} + M & M \cos \alpha & M \cos 2\alpha & M \cos 2\alpha \\ M \cos 2\alpha & M \cos \alpha & L_{ls} + M & M \cos \alpha & M \cos 2\alpha \\ M \cos 2\alpha & M \cos 2\alpha & M \cos \alpha & L_{ls} + M & M \cos \alpha \\ M \cos \alpha & M \cos 2\alpha & M \cos 2\alpha & M \cos \alpha & L_{ls} + M \end{bmatrix}$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{aar} & L_{abr} & L_{acr} & L_{adr} & L_{aer} \\ L_{bar} & L_{bbr} & L_{bcr} & L_{bdr} & L_{ber} \\ L_{car} & L_{cbr} & L_{ccr} & L_{cdr} & L_{cer} \\ L_{dar} & L_{dbr} & L_{dcr} & L_{ddr} & L_{der} \\ L_{ear} & L_{ebr} & L_{ecr} & L_{edr} & L_{eer} \end{bmatrix}$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{lr} + M & M \cos \alpha & M \cos 2\alpha & M \cos 2\alpha & M \cos \alpha \\ M \cos \alpha & L_{lr} + M & M \cos \alpha & M \cos 2\alpha & M \cos 2\alpha \\ M \cos 2\alpha & M \cos \alpha & L_{lr} + M & M \cos \alpha & M \cos 2\alpha \\ M \cos 2\alpha & M \cos 2\alpha & M \cos \alpha & L_{lr} + M & M \cos \alpha \\ M \cos \alpha & M \cos 2\alpha & M \cos 2\alpha & M \cos \alpha & L_{lr} + M \end{bmatrix}$$

$[L_{sr}]$ ve $[L_{rs}]$ sırasıyla statordan rotora karşıt endüktansların ve rotordan statora karşıt endüktansların matrislerini sembolize eder. Karşıt endüktans matrisleri, rotorun dönmesi nedeniyle zamanla değişen katsayılara sahiptir. Çünkü herhangi bir rotor faz sargısının manyetik eksen pozisyonu, herhangi bir stator faz

sargısının manyetik eksenine göre değişmektedir. θ açısı, “ a ” stator fazının manyetik eksenine göre “ a ” rotor fazının manyetik ekseninin anlık pozisyonudur (Wilamowski and Irwin, 2011; Levi et al., 2004).

$$[L_{sr}] =$$

$$= M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \alpha) & \cos(\theta + 2\alpha) & \cos(\theta - 2\alpha) & \cos(\theta - \alpha) \\ \cos(\theta - \alpha) & \cos \theta & \cos(\theta + \alpha) & \cos(\theta + 2\alpha) & \cos(\theta - 2\alpha) \\ \cos(\theta - 2\alpha) & \cos(\theta - \alpha) & \cos \theta & \cos(\theta + \alpha) & \cos(\theta + 2\alpha) \\ \cos(\theta + 2\alpha) & \cos(\theta - 2\alpha) & \cos(\theta - \alpha) & \cos \theta & \cos(\theta + \alpha) \\ \cos(\theta + \alpha) & \cos(\theta + 2\alpha) & \cos(\theta - 2\alpha) & \cos(\theta - \alpha) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$[L_{rs}] = [L_{sr}]^T$$

Rotor hareketinin bir derecesi vardır ve bu nedenle mekanik hareket aşağıdaki denklem ile tanımlanmaktadır:

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + k\omega_m$$

T_e elektrik motoru tarafından geliştirilen elektromanyetik momenti, T_L yük momenti, J eylemsizlik momenti (inertia), k sürtünme (friction) katsayısı ve ω_m mekanik açısal hızdır. Ayrıca, mekanik hareket denklemini elektriksel açısal hız (ω) cinsinden de yazılabilir. Elektriksel açısal hızın, asenkron motorun manyetik kutup çiftlerinin (p) sayısı aracılığıyla mekanik açısal hız ile ilişkisi vardır (Wilamowski and Irwin, 2011):

$$\omega = p\omega_m$$

$$T_e - T_L = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{p} k\omega$$

Elektromanyetik moment aşağıdaki gibi denklemlerle tanımlanmaktadır (Hussain et al., 2008):

$$T_e = \frac{1}{2} p [i]^T \frac{d[L]}{d\theta} [i]$$

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix}$$

$$[i] = [[i_s]^T \quad [i_r]^T]^T$$

Stator ve rotorun endüktans matrislerinde rotor pozisyonuna bağlı katsayılar yoktur. Bu nedenle elektromanyetik moment denklemi başka bir basit forma indirgenebilir. Yeni denklemin anlamı, düzgün hava-aralığına sahip elektrik motorların elektromanyetik momentinin sadece stator ve rotor sargılarının manyetik alanının etkileşimi ile oluşturulmasıdır (Wilamowski and Irwin, 2011; Hussain et al., 2008):

$$T_e = p [i_s]^T \frac{d[L_{sr}]}{d\theta} [i_r]$$

2.2 Clarke ve Park'ın Dönüşümleri ve İsteğe Bağlı Referans Sisteminde Beş-Fazlı Motorun Modeli

Elektrik motorun matematiksel modelini basitleştirmek için koordinat dönüşümünü kullanmak gerekir (Meşe, 2021). İlk olarak, faz-değişken formdaki elektrik motoru modeli, Clarke'ın dönüşüm matrisi kullanılarak dönüştürülmektedir. Clarke'ın dönüşümü, orijinal faz-değişkenleri setini yeni bir n değişken seti ile değiştirmektedir. Ayrıca, beş-fazlı motorun orijinal vektör uzayı iki düzlem artı bir tek-boyutlu niceliğe ayrıştırılır. Bu dönüşümün temel amacı, yeni iki-boyutlu alt uzayların birbirine dik olmasıdır. Her bir alt uzayda birbirine dik olan iki eksen boyunca konumlanmış bir çift nicelik vardır. Orijinal değişkenler seti ile yeni değişkenler seti arasındaki ilişki aşağıdaki gibi gösterilmektedir (Wilamowski and Irwin, 2011; Meşe, 2021).

$$[f_{\alpha\beta xy0}] = [C][f_{abcde}]$$

$[f_{\alpha\beta xy0}]$ dönüşümden sonra hem stator hem de rotordaki gerilim, akım ve halkalanan akımın sütun matrisidir. $[f_{abcde}]$ orijinal faz-değişken biçimine karşılık gelen sütun matrisidir. $[C]$ Clarke'ın dönüşüm matrisidir ve hem stator hem de rotor için aynıdır (Levi et al., 2007).

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{5}} \begin{bmatrix} 1 & \cos \alpha & \cos 2\alpha & \cos 2\alpha & \cos \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \sin 2\alpha & -\sin 2\alpha & -\sin \alpha \\ 1 & \cos 2\alpha & \cos 4\alpha & \cos 4\alpha & \cos 2\alpha \\ 0 & \sin 2\alpha & \sin 4\alpha & -\sin 4\alpha & -\sin 2\alpha \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

α - β bileşenleri matrisin ilk iki satırı tarafından tanımlanmaktadır. Bu bileşenler çok önemlidir. Çünkü elektromanyetik moment, stator ve rotor α - β akım bileşenlerinin etkileşimi nedeniyle geliştirilmektedir. Elektrik motorun hava aralığı çevresinde manyetik akının sinüzoidal dağılımı varsayıldığında, x - y akımı bileşenleri elektromanyetik moment üretimine katkıda bulunmaz. Ayrıca, sıfır-dizi bileşeni tüm faz miktarlarının toplamı ile hesaplanmaktadır. Araştırma çalışmamızdaki gibi çok-fazlı motorların tek faz sayıları için nötr iletken olmayan yıldız-bağlı çok-fazlı sistemde sıfır-dizi bileşeni yoktur. Bu dönüşümün basitleştirilmesi toplam denklem sayısı ile ilgilidir. Çünkü beş-fazlı motorun faz-değişken modelinde on denklem yerine sadece dört diferansiyel denklem vardır.

Elektrik motorun matematiksel modelinde zamanla değişen endüktans terimlerinden kurtulmak amacıyla gerekli bir dönüşüm daha vardır. Bu dönüşüm Park'ın dönüşümü olarak bilinmektedir. Yeni stator ve rotor sargıları seti, referans sisteminin hızı olan aynı açısal hızda döner. Stator ve rotor sargıları arasındaki relatif hareketten kurtulması elektrik motorun modelini basitleştirmeyi mümkün kılar. Çünkü sabit katsayılarla yeni bir diferansiyel denklem seti sağlar. Referans sisteminin isteğe bağlı hızı (ω_a), stator fazı “ a ” eksenine göre seçilen referans sisteminin d -ekseninin açısal pozisyonunu (θ_s) tanımlar. Aynı zamanda, rotorun kendi hızı (ω) ile döner ve rotor fazı “ a ” eksenine göre seçilen referans sisteminin d -ekseninin açısal pozisyonu (θ_r) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Wilamowski and Irwin, 2011):

$$\theta_s = \int \omega_a dt$$

$$\theta_r = \theta_s - \theta = \int (\omega_a - \omega) dt$$

Referans sisteminin d -ekseni ve q -ekseni, birbirine diktir. Park'ın stator [P_s] ve rotorun [P_r] dönüşüm matrisleri aşağıdaki gibi gösterilmektedir:

$$[P_s] = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \sin \theta_s & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_s & \cos \theta_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[P_r] = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Clarke ve Park'ın dönüşümlerini $[T]$ olarak tanımlanan tek bir dönüşüm matrisi olarak ifade etmek mümkündür. (Sarwer et al., 2019). Bu matris, orijinal faz-değişkenler modelinden $d-q$ referans sistemine dönüşümünü gerçekleştirmektedir (Zheng et al., 2008).

$$[T] = [P][C]$$

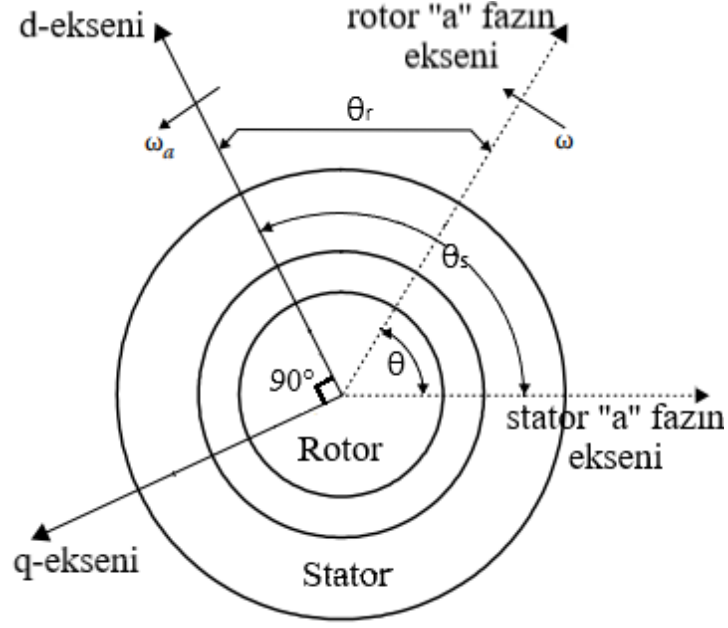
$$[f_{dqxy0}] = [T][f_{abcde}]$$

$$[T_s] =$$

$$= \sqrt{\frac{2}{5}} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - \alpha) & \cos(\theta_s - 2\alpha) & \cos(\theta_s + 2\alpha) & \cos(\theta_s + \alpha) \\ -\sin \theta_s & -\sin(\theta_s - \alpha) & -\sin(\theta_s - 2\alpha) & -\sin(\theta_s + 2\alpha) & -\sin(\theta_s + \alpha) \\ 1 & \cos 2\alpha & \cos 4\alpha & \cos 4\alpha & \cos 2\alpha \\ 0 & \sin 2\alpha & \sin 4\alpha & -\sin 4\alpha & -\sin 2\alpha \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$[T_r] =$$

$$= \sqrt{\frac{2}{5}} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \alpha) & \cos(\theta_r - 2\alpha) & \cos(\theta_r + 2\alpha) & \cos(\theta_r + \alpha) \\ -\sin \theta_r & -\sin(\theta_r - \alpha) & -\sin(\theta_r - 2\alpha) & -\sin(\theta_r + 2\alpha) & -\sin(\theta_r + \alpha) \\ 1 & \cos 2\alpha & \cos 4\alpha & \cos 4\alpha & \cos 2\alpha \\ 0 & \sin 2\alpha & \sin 4\alpha & -\sin 4\alpha & -\sin 2\alpha \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$



Şekil 2.1. Asenkron motorun kesiti ve d - q eksen seti.

Şekil 2.1'de beş-fazlı asenkron motorun ve d - q eksen setinin şematik çizimi gösterilmektedir. Ayrıca, gerilim denge denklemleri ve halkalanan akı denklemleri de dahil olmak üzere d - q referans sistemindeki elektrik motorun yeni modeli aşağıdaki formda elde edilmektedir (Iqbal et al., 2010):

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_a \lambda_{qs} \quad v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega) \lambda_{qr}$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_a \lambda_{ds} \quad v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + (\omega_a - \omega) \lambda_{dr}$$

$$v_{xs} = R_s i_{xs} + \frac{d\lambda_{xs}}{dt} \quad v_{xr} = R_r i_{xr} + \frac{d\lambda_{xr}}{dt}$$

$$v_{ys} = R_s i_{ys} + \frac{d\lambda_{ys}}{dt} \quad v_{yr} = R_r i_{yr} + \frac{d\lambda_{yr}}{dt}$$

$$v_{0s} = R_s i_{0s} + \frac{d\lambda_{0s}}{dt} \quad v_{0r} = R_r i_{0r} + \frac{d\lambda_{0r}}{dt}$$

d - q set sistemindeki halkalanan akı denklemleri aşağıda gibi gösterilmektedir:

$$\lambda_{ds} = (L_{ls} + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr} \quad \lambda_{dr} = (L_{lr} + L_m) i_{dr} + L_m i_{ds}$$

$$\lambda_{qs} = (L_{ls} + L_m) i_{qs} + L_m i_{qr} \quad \lambda_{qr} = (L_{lr} + L_m) i_{qr} + L_m i_{qs}$$

$$\lambda_{xs} = L_{ls}i_{xs}$$

$$\lambda_{xr} = L_{lr}i_{xr}$$

$$\lambda_{ys} = L_{ls}i_{ys}$$

$$\lambda_{yr} = L_{lr}i_{yr}$$

$$\lambda_{0s} = L_{ls}i_{0s}$$

$$\lambda_{0r} = L_{lr}i_{0r}$$

Mıknatıslanma endüktansı $L_m = (n/2)M = (5/2)M'$ ye eşitlenir. Burada M sembolü statordan rotora karşıt endüktansın maksimum değerini tanımlar. Dönüşüm gerçekleştirildikten sonra elektromanyetik momentin yeni denklemi elde edilmektedir (Levi et al., 2007).

$$T_e = \frac{5M}{2}p[i_{dr}i_{qs} - i_{ds}i_{qr}] = pL_m[i_{dr}i_{qs} - i_{ds}i_{qr}]$$

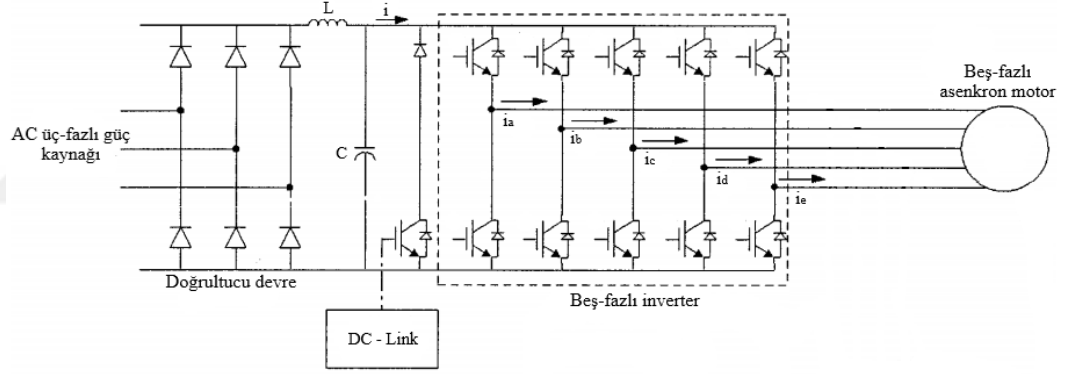
d - q bileşen sistemindeki beş-fazlı motorun model denklemleri ve elektromanyetik moment, üç-fazlı asenkron motor ile aynıdır. Tek fark, beş-fazlı asenkron motoru modelinde x - y bileşen denklemlerinin varlığıdır. Elektrik motoru simetrik ve dengeli bir gerilim sistemi tarafından besleniyorsa faz numarasından bağımsız olarak x - y bileşenlerinin stator gerilimlerinin tümü sıfırdır. Bu koşullar altında beş-fazlı motorun analizi sadece d - q denklem seti kullanılarak üç-fazlı bir motoru benzer bir şekilde gerçekleştirilebilir (Iqbal et al., 2010).

Ayrıca, stator ve rotor parçasının d - q gerilim denge denklemleri, faz-değişken formdaki model denklemleriyle aynı değildir. d - q denklem setinin ek bir bileşeni vardır ve bu bileşen referans sisteminin açısal hızının ve karşılık gelen bir halkalanan akı bileşeninin ürünüdür. Dönel dönüşüm nedeniyle yeni ek bileşenler elde edilmektedir. Yeni bileşenler stator ve rotor parçasının d - q sargılarında dönme kaynaklı elektromotor kuvvetleri sunmaktadır (Levi et al., 2007).

3. BEŞ-FAZLI İNVERTER MODELİ

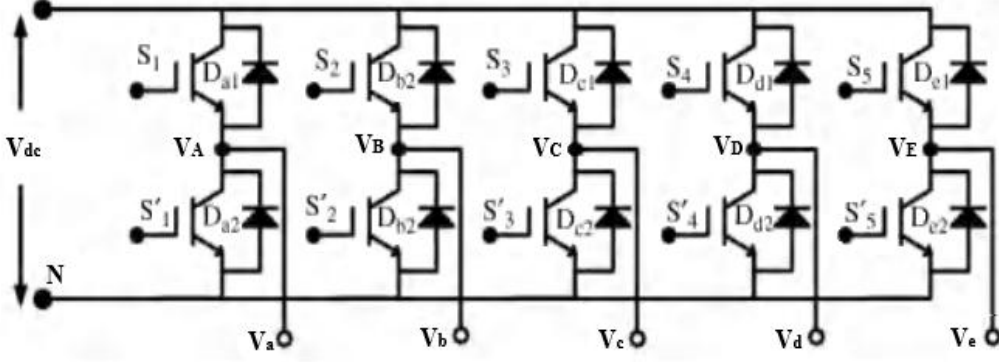
3.1 Beş-Fazlı Gerilim Beslemeli İnverterin Topolojisi

Şekil 3.1’de gösterildiği gibi beş-fazlı elektrik sürücünün ana bileşenleri asenkron motoru, elektronik dönüştürücü, kontrol bloğu ve güç kaynağıdır. Öncelikle üç-fazlı simetrik güç kaynağı gerilimi bir doğrultucu (rectifier) devre kullanılarak DC gerilime dönüştürülmektedir. Çıkış DC geriliminin dalgalanmasını yok etmek amacıyla doğrultucunun çıkışı filtrelenmektedir. Doğrultulmuş ve filtrelenmiş olan DC gerilimi, inverter bloğunu beslemektedir. Asenkron motor sürücüsünü beslemek için kontrol edilebilir frekans ve beş-fazlı kontrol edilebilir gerilim kaynağı sağlamak için elektrikli sürücünün önemli bir bileşeni olan beş-fazlı invertör gereklidir (Prasad Rao et al., 2011).



Şekil 3.1. Beş-fazlı asenkron motor sürücü sistemi.

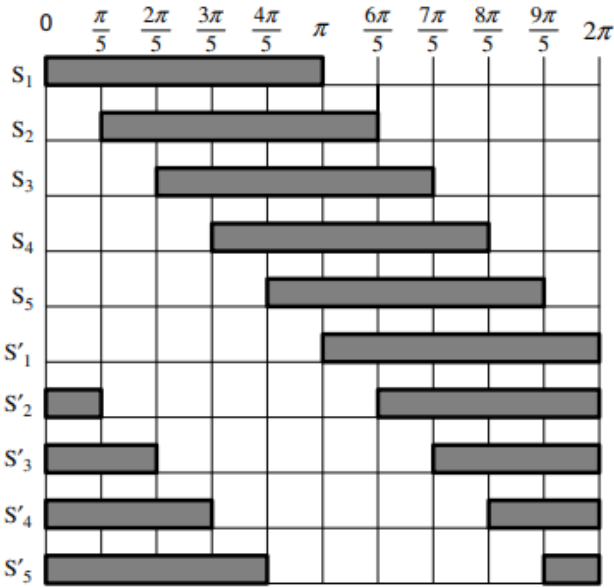
Beş-fazlı evirici, üç-fazlı evirici gibi benzer bir topolojiye sahiptir, ancak Şekil 3.2’de gösterildiği gibi üç-fazlı eviriciden iki ek ayağa (legs) sahiptir (Sharma and Rangari, 2013). İnverterin elektronik anahtarları birbirine anti-paralel olarak bağlanmış iki yarı iletken yapılmıştır (Prasad Rao et al., 2012). İlk eleman, IGBT veya MOSFET transistör olan kontrol edilebilir bir yarı iletken devre elemanıdır. İkinci eleman ise kontrol edilemeyen yarı iletken bir devre elemanı olan diyottur (Boztepe, 2021). Elektrik sürücünün çıkış terminali ile yükün nötr noktası arasındaki gerilim faz gerilimi olarak belirlenmektedir. İnverterin iki çıkış terminali arasındaki gerilim hat gerilimi olarak belirlenmektedir.



Şekil 3.2. Beş-fazlı gerilim beslemeli inverterin topolojisi.

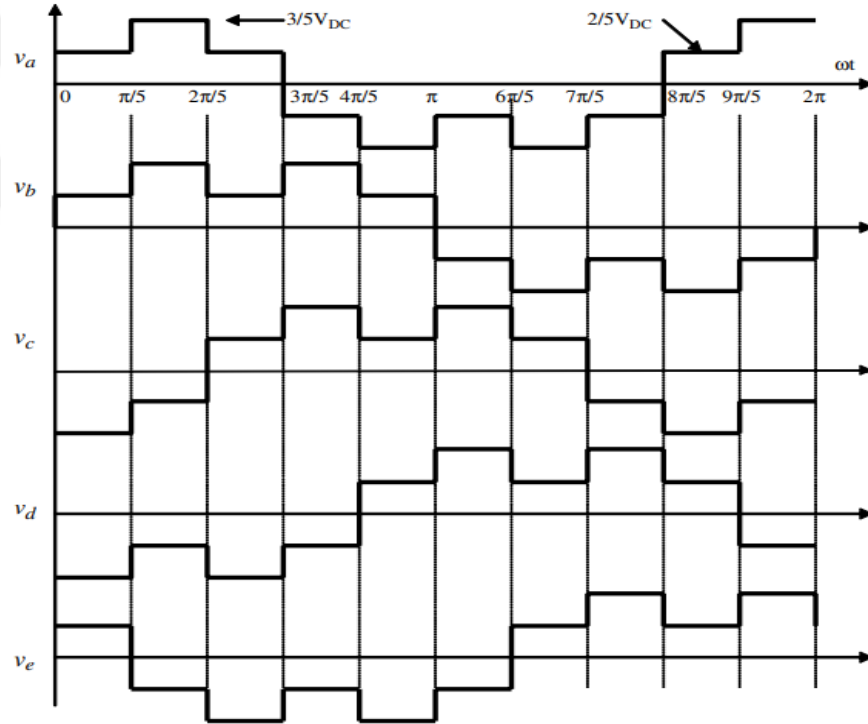
3.2 Beş-Fazlı Gerilim Beslemeli İverterin Çalışma Prensibi

Beş-fazlı inverterin çalışma prensibi aynı inverter ayağının üst ve alt elektronik anahtarlarının zıt çalışmasına dayanmaktadır. Böylece üst elektronik anahtar açık ise alt anahtar kapatılmalıdır veya tam tersi üst elektronik anahtar kapalı ise alt anahtar açılmalıdır. Üst ve alt elektronik anahtarlara 180° faz kaydırılmış bir kapı sürücü sinyali sağlanarak güç elektroniği anahtarlarının çalışması elde edilmektedir. Şekil 3.3'te kapı sinyalleri daha açık bir şekilde gösterilmektedir. DC-link gerilim beslemesinde kısa devreyi önlemek için bu çalışma prensibi gerçekleştirilmiştir (Prasad Rao et al., 2011).



Şekil 3.3. On-adımlı çalışmada beş-fazlı inverterin kapı sinyalleri.

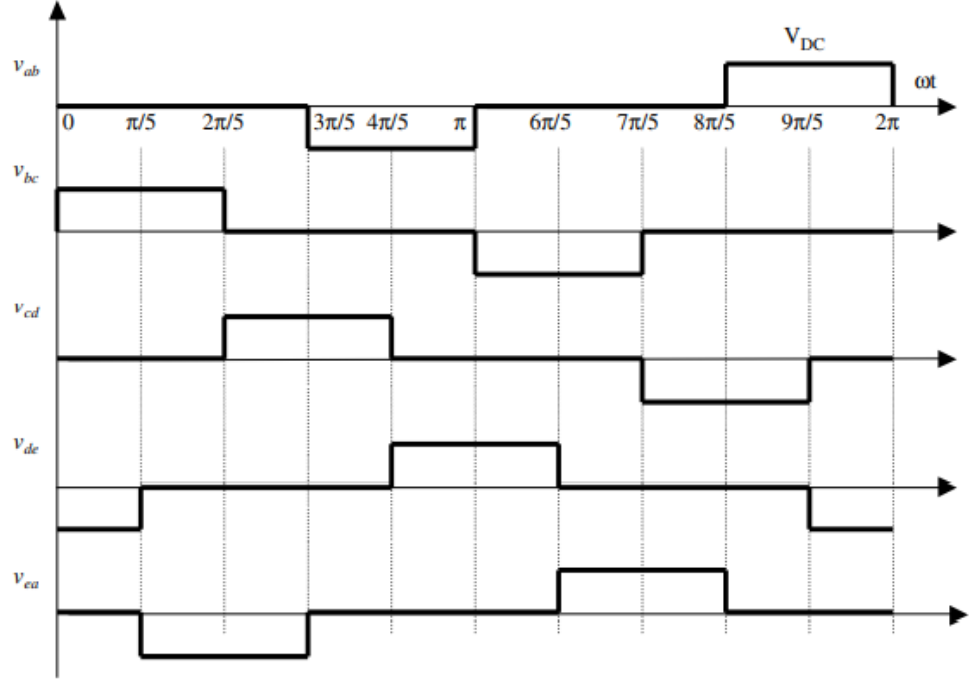
Beş-fazlı inverter için yaygın olarak kullanılan bir çalışma modu, on-adımlı çalışma modudur. Çıkış fazı gerilimi on farklı değere ulaştığı için on-adımlı mod olarak bilinmektedir. Tam bir zaman döngüsü boyunca inverterin her bir elektronik anahtarı sadece bir kez açılır ve kapatılır. Bu çalışma modunu kullanarak anahtarlama kayıpları minimuma indirilir. Ancak çıkış parametrelerinin önemli miktarda düşük-düzye harmonikleri vardır ve bu da inverterin performansı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. On-adımlı çalışma modunda iki ardışık faz arasında $\pi/5$ 'e eşit bir gecikme sağlamak için elektronik anahtarlara kapı sinyalleri gerçekleştirilmektedir. Sırasıyla Şekil 3.4'te ve Şekil 3.5'te yıldız-bağlantılı bir yük için faz gerilimleri ve hat gerilimleri gösterilmektedir (Prasad Rao et al., 2012). On-adımlı çalışma modu için faz gerilimlerinin değerleri Tablo 3.1'de ve hat gerilimlerinin değerleri Tablo 3.2'de listelenmiştir.



Şekil 3.4. On-adımlı çalışma modunda beş-fazlı inverterin faz gerilimleri.

Tablo 3.1. Beş-fazlı inverterin faz gerilimleri.

Mod	Anahtar- lar ON	v_a	v_b	v_c	v_d	v_e
1	$S_1, S_2, S_3',$ S_4', S_5	$2/5 V_{dc}$	$2/5 V_{dc}$	$-3/5 V_{dc}$	$-3/5 V_{dc}$	$2/5 V_{dc}$
2	$S_1, S_2, S_3',$ S_4', S_5'	$3/5 V_{dc}$	$3/5 V_{dc}$	$-2/5 V_{dc}$	$-2/5 V_{dc}$	$-2/5 V_{dc}$
3	$S_1, S_2, S_3,$ S_4', S_5	$2/5 V_{dc}$	$2/5 V_{dc}$	$2/5 V_{dc}$	$-3/5 V_{dc}$	$-3/5 V_{dc}$
4	$S_1', S_2, S_3,$ S_4', S_5'	$-2/5 V_{dc}$	$3/5 V_{dc}$	$3/5 V_{dc}$	$-2/5 V_{dc}$	$-2/5 V_{dc}$
5	$S_1', S_2, S_3,$ S_4, S_5'	$-3/5 V_{dc}$	$2/5 V_{dc}$	$2/5 V_{dc}$	$2/5 V_{dc}$	$-3/5 V_{dc}$
6	$S_1', S_2',$ S_3, S_4, S_5'	$-2/5 V_{dc}$	$-2/5 V_{dc}$	$3/5 V_{dc}$	$3/5 V_{dc}$	$-2/5 V_{dc}$
7	$S_1', S_2',$ S_3, S_4, S_5	$-3/5 V_{dc}$	$-3/5 V_{dc}$	$2/5 V_{dc}$	$2/5 V_{dc}$	$2/5 V_{dc}$
8	$S_1', S_2',$ S_3', S_4, S_5	$-2/5 V_{dc}$	$-2/5 V_{dc}$	$-2/5 V_{dc}$	$3/5 V_{dc}$	$3/5 V_{dc}$
9	$S_1, S_2',$ S_3', S_4, S_5	$2/5 V_{dc}$	$-3/5 V_{dc}$	$-3/5 V_{dc}$	$2/5 V_{dc}$	$2/5 V_{dc}$
10	$S_1, S_2', S_3',$ S_4', S_5	$3/5 V_{dc}$	$-2/5 V_{dc}$	$-2/5 V_{dc}$	$-2/5 V_{dc}$	$3/5 V_{dc}$



Şekil 3.5. On-adımlı çalışma modunda beş-fazlı inverterin hat gerilimleri.

Tablo 3.2. Beş-fazlı inverterin hat gerilimleri.

Mod	Anahtarlar ON	V_{ab}	V_{bc}	V_{cd}	V_{de}	V_{ea}
1	$S_1, S_2, S_3', S_4', S_5$	0	V_{dc}	0	$-V_{dc}$	0
2	$S_1, S_2, S_3', S_4', S_5'$	0	V_{dc}	0	0	$-V_{dc}$
3	S_1, S_2, S_3, S_4', S_5	0	0	V_{dc}	0	$-V_{dc}$
4	$S_1', S_2, S_3, S_4', S_5'$	$-V_{dc}$	0	V_{dc}	0	0
5	$S_1', S_2, S_3, S_4, S_5'$	$-V_{dc}$	0	0	V_{dc}	0
6	$S_1', S_2', S_3, S_4, S_5'$	0	$-V_{dc}$	0	V_{dc}	0
7	$S_1', S_2', S_3, S_4, S_5$	0	$-V_{dc}$	0	0	V_{dc}
8	$S_1', S_2', S_3', S_4, S_5$	0	0	$-V_{dc}$	0	V_{dc}
9	$S_1, S_2', S_3', S_4, S_5$	V_{dc}	0	$-V_{dc}$	0	0
10	$S_1, S_2', S_3', S_4', S_5$	V_{dc}	0	0	$-V_{dc}$	0

Evirici bloğu faz gerilimlerinin matematiksel denklemlerine dayanmaktadır (Iqbal et al., 2010). Faz gerilimleri (v_a, v_b, v_c, v_d, v_e) küçük harflerle ve inverterin ayak gerilimleri (V_A, V_B, V_C, V_D, V_E) büyük harflerle sembolize edilir. Bizim çalışmamızda beş-fazlı yıldız-bağlantılı bir yük analiz edilmiştir. İnverterin faz gerilimi ile ayak gerilimi arasındaki ilişki “a” fazı için gösterilmektedir ve bu ilişkiler diğer fazlar için de benzerdir (Jacobina et al., 2004).

$$V_A = v_a + v_{nN}$$

v_{nN} , yıldız-bağlantılı yükün (n) noktası ile DC-link geriliminin negatif terminali (N) arasındaki voltaj farkıdır. Her zaman anlık toplamı sıfır olan dengeli bir beş-fazlı gerilim sistemi varsayılarak, v_{nN} aşağıdaki ifadeyle elde edilmektedir:

$$v_{nN} = \left(\frac{1}{5}\right) (V_A + V_B + V_C + V_D + V_E)$$

Faz gerilimlerinin matematiksel denklemleri aşağıdaki gibi gösterilmektedir (Iqbal et al., 2010):

$$v_a = \left(\frac{4}{5}\right) V_A - \left(\frac{1}{5}\right) (V_B + V_C + V_D + V_E)$$

$$v_b = \left(\frac{4}{5}\right) V_B - \left(\frac{1}{5}\right) (V_A + V_C + V_D + V_E)$$

$$v_c = \left(\frac{4}{5}\right) V_C - \left(\frac{1}{5}\right) (V_A + V_B + V_D + V_E)$$

$$v_d = \left(\frac{4}{5}\right) V_D - \left(\frac{1}{5}\right) (V_A + V_B + V_C + V_E)$$

$$v_e = \left(\frac{4}{5}\right) V_E - \left(\frac{1}{5}\right) (V_A + V_B + V_C + V_D)$$

Bu denklemler, $S_k = 1$ (inverter ayağının üst elektronik anahtarı açık) veya $S_k = 0$ (inverter ayağının alt elektronik anahtarı açık) olabilen anahtarlama fonksiyonu kullanılarak başka bir biçimde yazılabilir (Ojo et al., 2006).

$$v_a = \left(\frac{V_{dc}}{5}\right) (4S_A - S_B - S_C - S_D - S_E)$$

$$v_b = \left(\frac{V_{dc}}{5}\right) (4S_B - S_A - S_C - S_D - S_E)$$

$$v_c = \left(\frac{V_{dc}}{5}\right) (4S_C - S_A - S_B - S_D - S_E)$$

$$v_d = \left(\frac{V_{dc}}{5}\right) (4S_D - S_A - S_B - S_C - S_E)$$

$$v_e = \left(\frac{V_{dc}}{5}\right) (4S_E - S_A - S_B - S_C - S_D)$$



4. BEŞ-FAZLI ASENKRON MOTORUN VEKTÖR KONTROLÜ

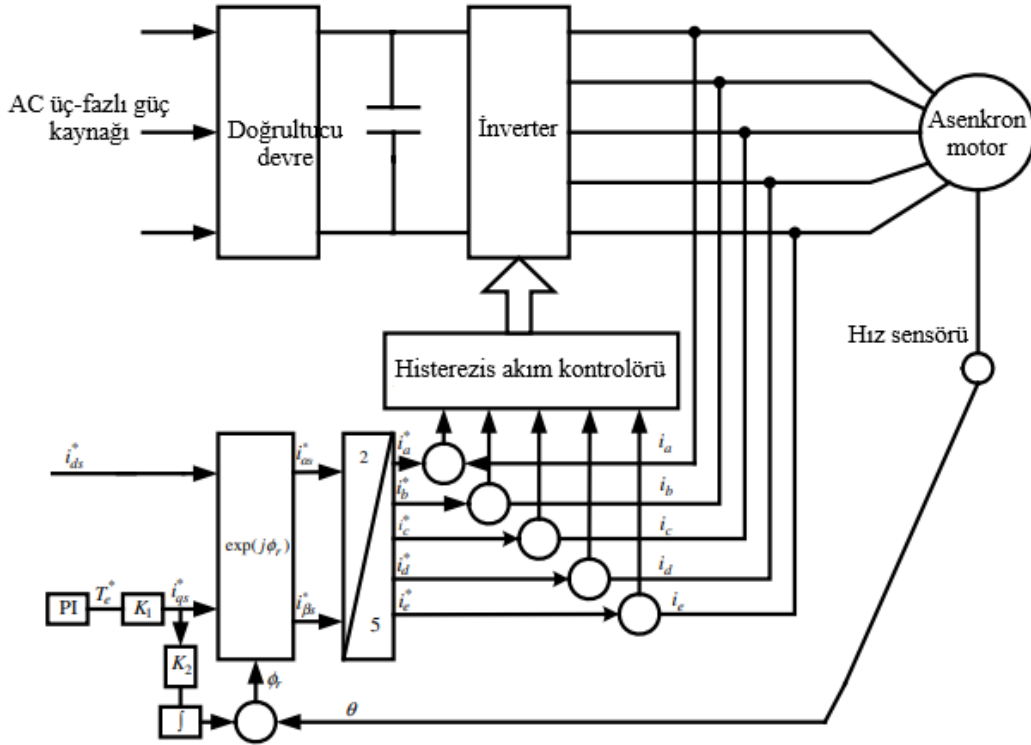
Değişken hızlı elektrik sürücüler birçok farklı uygulamada kullanılmaktadır ve uygulama tipine göre kontrol değişkeni rotorun hızı, motorun elektromanyetik momenti veya rotor milinin pozisyonu olabilir. Elektrik motorlarının kontrol teknikleri skaler kontrol ve vektör kontrol olmak üzere iki temel grupta sınıflandırılmaktadır (Scharlau et al., 2008; Xu et al., 2002). Çok-fazlı asenkron motorun hız kontrol yöntemleri prensip olarak üç-fazlı asenkron motorla aynıdır. Skaler kontrol yöntemi kararlı rejim performansı ilişkisine dayanır ve sadece gerilim, akım, halkalanan akımın büyüklüğü ve frekansı kontrol edilmektedir. Bu yöntem geçici rejim sırasında uzay vektörlerinin pozisyonunu kontrol etmediği için düşük performanslı bir kontrol tekniği olarak kabul edilmektedir. Buna karşılık vektör kontrol yöntemi sadece büyüklük ve frekansın değil, ancak aynı zamanda uzay vektörlerinin gerilim, akım ve halkalanan akımın pozisyonun da kontrol edildiği dinamik durumların ilişkisine de dayanır. Kararlı ve geçici rejimler sırasında bu yöntem uzay vektörlerinin pozisyonu kontrol eder ve kapalı çevrim bir sistemde uygulanan yüksek performanslı bir kontrol tekniği olarak kabul edilmektedir. Sabit gerilim/frekans (v/f) kontrol yöntemi gibi skaler kontrol gerçekten az ilgi çekicidir. Çünkü daha karmaşık kontrol algoritmalarının uygulanmasının maliyeti çok-fazlı güç elektroniği bileşenlerinin ve çok-fazlı motorun kendisinin maliyeti ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilmektedir (Levi, 2008). Alan yönelimli kontrol (field oriented control - FOC), doğrudan moment kontrolü (direct torque control - DTC) ve varyantları gibi yüksek performanslı vektör kontrol yöntemlerine odaklanılır. Çünkü bunlar avantajları nedeniyle piyasada yaygın olarak sunulmaktadır ve uygulama alanları sürekli genişlemektedir (Singh et al., 2005; Bojoi et al., 2005).

4.1 Beş-Fazlı Asenkron Motorun Alan Yönelimli Kontrolü

Alan yönelimli kontrol veya vektör kontrolü olarak da bilinen önemli bir tekniktir çünkü bu yöntemde stator akımı uzay vektörü kontrol edilmektedir. Beş-fazlı asenkron motoru simetrikse ve sinüzoidal dağıtılmış stator sargılarına sahipse faz sayısından bağımsız olarak elektromanyetik moment üretmek için gereken sadece iki akımın bileşeni vardır (Levi, 2008). d -ekseni akımının bileşeni elektrik

akımının bileşeninin sabit katsayısı (K_2) ile çarpılmasıyla belirlenmektedir (Levi et al., 2007).

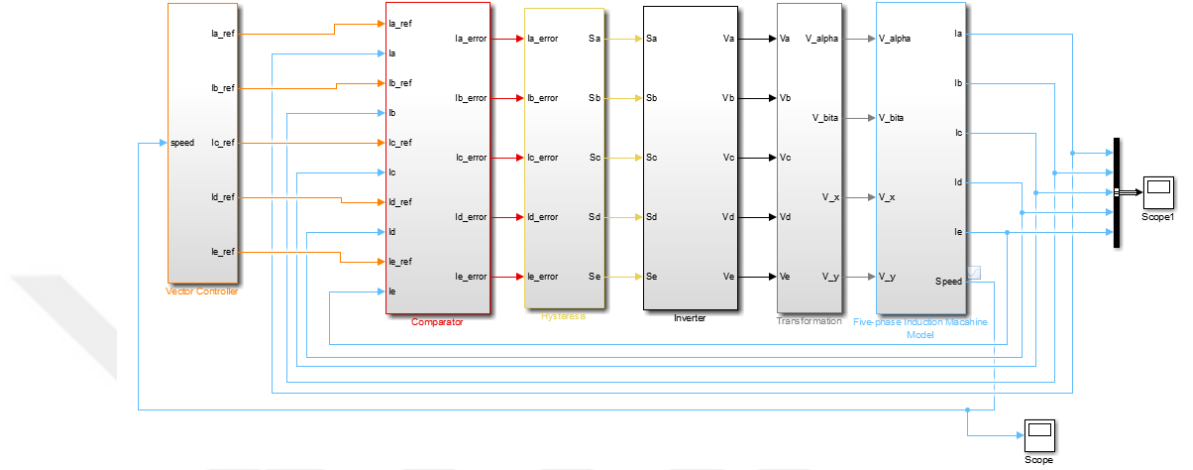
Rotorun mekanik pozisyonu θ açısı ile tanımlanmaktadır ve bu açı, rotorun elektriksel pozisyonunu belirlemek için asenkron motorun kutup çiftlerinin sayısı ile çarpılmaktadır. Rotorun pozisyon değeri entegre kayma hızı değerine eklenir ve bu toplam rotorun manyetik akı pozisyonunu göstermektedir. İlk olarak, $d-q$ eksenini akımının bileşenleri vektör döndürücü bloğu j^{ϕ_r} kullanılarak sabit $\alpha-\beta$ eksenini akımının bileşenlerine dönüştürülür ve sonunda bunlar, referans beş-fazlı akımlara dönüştürülür (Levi et al., 2007). Kontrol yönteminden oluşturulan referans beş-fazlı akımlar ile gerçek beş-fazlı stator akımları karşılaştırılmaktadır ve histerezis akım kontrolörü kullanılarak kontrolü gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.2’de beş-fazlı asenkron motor sürücüsünün alan yönelimli kontrol şeması daha detaylı gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Beş-fazlı asenkron motor sürücüsünün alan yönelimli kontrol şeması.

4.2 Beş-Fazlı Asenkron Motor Sürücüsünün Alan Yönelimli Kontrolünün Simulink Modeli

Beş-fazlı asenkron motorun alan yönelimli kontrol yöntemi Şekil 4.3'te gösterildiği gibi MATLAB/Simulink'te tasarlanmıştır.



Şekil 4.3. Beş-fazlı asenkron motor sürücüsünün alan yönelimli kontrolünün Simulink modeli.

Bu Simulink modelinin temel blokları aşağıda gösterilmektedir:

- Vektör kontrol bloğu,
- Karşılaştırıcı blok,
- Histerezis akım kontrolörü bloğu,
- Beş-fazlı gerilim beslemeli invertör modeli,
- Dönüşüm bloğu,
- Beş-fazlı asenkron motor modeli.

Alan yönelimli kontrol bloğu, beş-fazlı elektrik sürücünün en önemli elemanlarından biridir. Kontrol bloğunun girişleri rotorun manyetik akı referans komutu, kumandalı referans hızı ve asenkron motorun gerçek hızıdır. Vektör kontrol bloğu çıkış olarak beş-fazlı referans akımlarını oluşturmaktadır ve bu akım bileşenleri karşılaştırıcı bloktaki gerçek stator akımlarıyla karşılaştırılmaktadır. Oluşturulan akım hataları beş-fazlı gerilim beslemeli invertörünün kapı sinyallerini oluşturmak amacıyla histerezis akım kontrol bloğuna gönderilmektedir. Faz gerilimleri beş-fazlı invertör tarafından sağlanmaktadır ve dönüşüm bloğunda α - β

ve x - y bileşenlerine dönüştürülmektedir. Bu bileşenler beş-fazlı asenkron motor modeline giriş olarak verilmektedir.

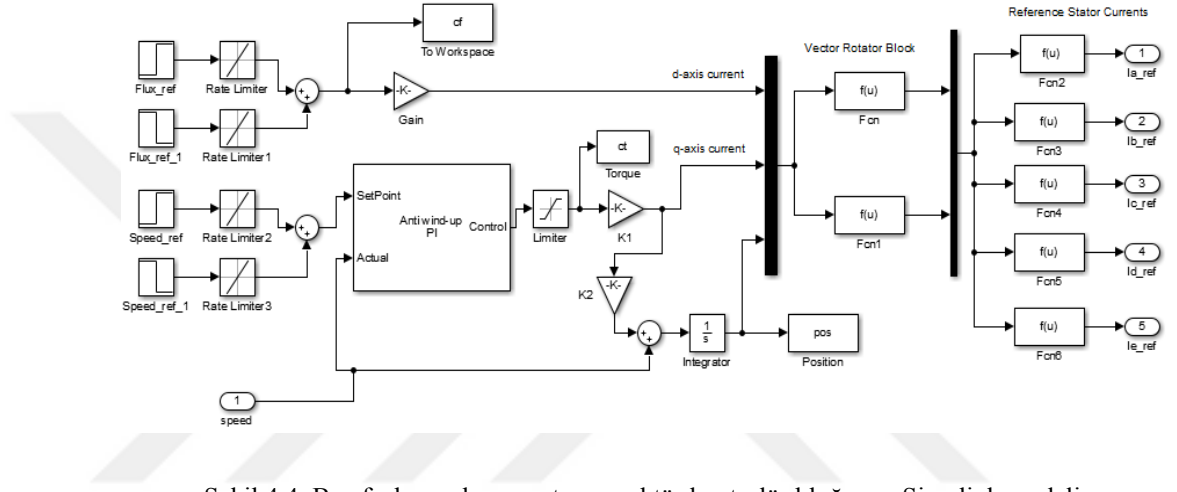
MATLAB/Simulink'teki model, beş-fazlı asenkron motorun faz başına eşdeğer devre parametrelerine göre tasarlanmıştır. Frekans 50 Hz , eylemsizlik momenti $0,03\text{ kg.m}^2$ ve motorun kutup çifti sayısı 2 'dir. Stator ve rotor faz direnci $R_s = 10\Omega$ ve $R_r = 6,3\Omega$ 'dur. Stator ve rotor kaçak endüktansı $L_{ls} = L_{lr} = 0,04\text{H}$ ve karşılıklı endüktans değeri $L_m = 0,42\text{H}$. Ayrıca, nominal faz akımı ve faz gerilimi sırasıyla $2,1\text{A}$ ve 220V 'dir (Iqbal et al., 2010). Beş-fazlı asenkron motorun parametreleri Tablo 4.1'de gösterilmektedir.

Tablo 4.1. Beş-fazlı asenkron motorun parametreleri.

Beş-fazlı asenkron motorun parametreleri	Parametre değerleri
V	220 V (faz-nötr gerilimi)
i	2,1 A (faz akımı)
n_s	1500 devir/dakika
f	50 Hz
p	2 kutup çifti
J	0,03 kg.m ²
R_s	10 Ω
R_r	6,3 Ω
L_{ls}	0,04 H
L_{lr}	0,04 H
L_m	0,42 H

Vektör kontrol bloğu beş-fazlı asenkron motorun çalışmasını kontrol etmesi nedeniyle beş-fazlı elektrik sürücünün en önemli elemanlarından biridir. Kontrol bloğunun girişi, asenkron motorun gerçek hızı, referans hızı ve rotorun manyetik

akı referans komutudur. Aynı zamanda kontrol bloğun çıkışı, statorun referans beş-fazlı akımlarıdır. Hız hatasını hesaplamak amacıyla referans hız ve motorun gerçek hızı birbiriyle karşılaştırılır. Referans elektromanyetik momentini sağlamak için hız hatasının değeri, PI denetleyicide işlenir. Ayrıca, q -ekseni referans akımı sağlamak için referans momenti sabit bir katsayı ile çarpılır (Singh et al., 2005). Statorun q -ekseni referans akımı, kumandalı referans momentinden hesaplanır ve statorun d -ekseni referans akımı, rotorun manyetik akı referansından hesaplanır (Levi et al., 2007). Şekil 4.4'te vektör kontrol bloğu daha detaylı gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Beş-fazlı asenkron motorun vektör kontrolör bloğunun Simulink modeli.

İnverter bloğu beş-fazlı elektrik sürücünün bir başka önemli elemanıdır. İnverter bloğunun denklemleri önceki bölümde daha detaylı anlatılmıştır ve anahtarlama fonksiyonu kullanılarak başka bir biçimde ifade edilmiştir (Jacobina et al., 2004). Faz gerilimleri küçük harflerle sembolize edilmektedir (Ojo et al., 2006).

$$v_a = \left(\frac{V_{dc}}{5}\right) (4S_A - S_B - S_C - S_D - S_E)$$

$$v_b = \left(\frac{V_{dc}}{5}\right) (4S_B - S_A - S_C - S_D - S_E)$$

$$v_c = \left(\frac{V_{dc}}{5}\right) (4S_C - S_A - S_B - S_D - S_E)$$

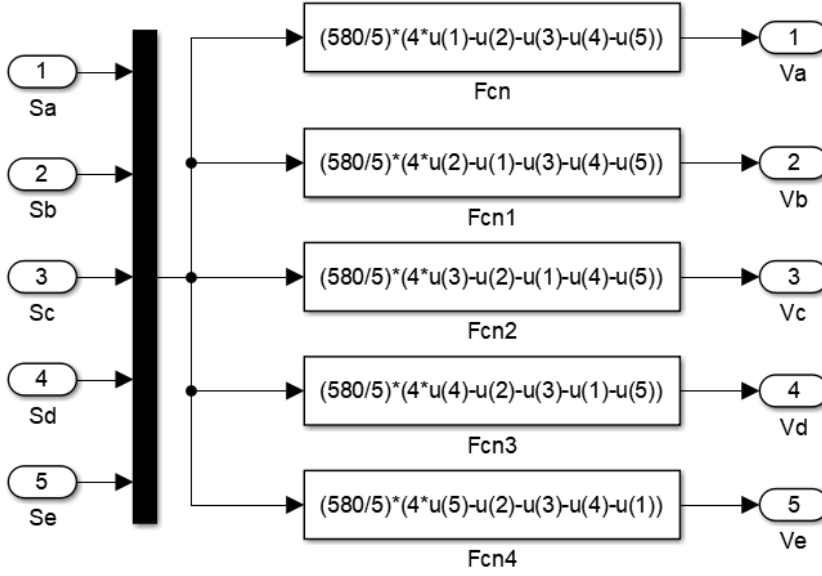
$$v_d = \left(\frac{V_{dc}}{5}\right) (4S_D - S_A - S_B - S_C - S_E)$$

$$v_e = \left(\frac{V_{dc}}{5}\right) (4S_E - S_A - S_B - S_C - S_D)$$

V_{DC} , DC-link gerilimidir ve değeri önceki faz gerilimi denklemlerine eklenmektedir:

$$V_{DC} = 580 V$$

İnverterinin Simulink modeli, Şekil 4.5'te gösterildiği gibi faz gerilimlerini tanımlayan matematiksel denklemlere dayanmaktadır (Iqbal et al., 2010).



Şekil 4.5. Beş-fazlı gerilim beslemeli inverterin Simulink modeli.

Beş-fazlı asenkron motor modeli elektrik sürücünün bir başka önemli bloğudur. Faz gerilimleri inverter bloğu tarafından sağlanmaktadır. Asenkron motor modelinin hareketsiz referans sisteminde olması nedeniyle faz gerilimleri, dönüşüm matrisi kullanılarak $\alpha\beta$ ve $x-y$ bileşenlerine dönüştürülmektedir (Iqbal et al., 2010).

Dönüşüm matrisi gerçekleştirildikten sonra beş-fazlı asenkron motor modeline giriş olarak $\alpha\beta$ ve $x-y$ geriliminin bileşenleri verilmiştir. Bu modelin çıkışı olarak beş-fazlı akımlar, rotorun hızı ve elektromanyetik moment alınmıştır. Asenkron motorun Simulink modeli hareketsiz referans sistemindeki matematiksel model denklemlerine dayanmaktadır ve ayrıca Şekil 4.6'da daha detaylı

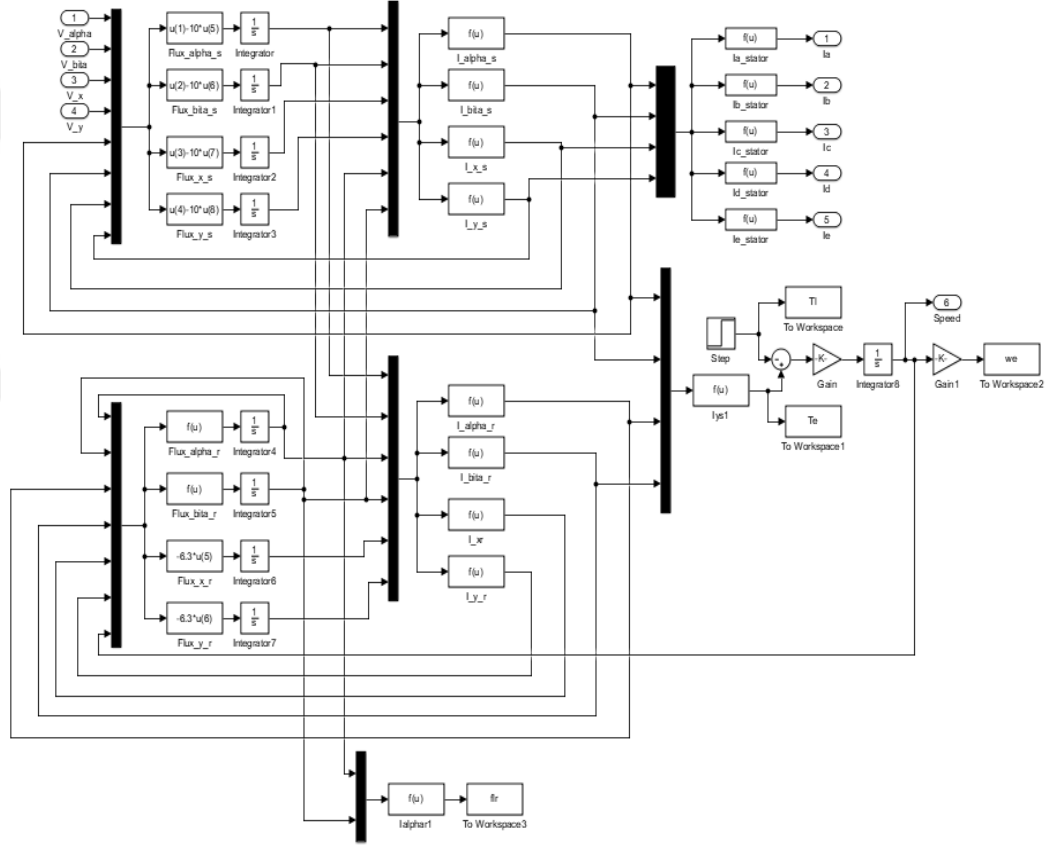
gösterilmektedir (Iqbal et al., 2010). Halkalanan akı denklemleri aşağıdaki gibi gerilim denge denklemlerinden hesaplanmaktadır (Jasim et al., 2011):

$$\frac{d\lambda_{ds}}{dt} = v_{ds} - R_s i_{ds} + \omega_a \lambda_{qs} \quad \frac{d\lambda_{dr}}{dt} = v_{dr} - R_r i_{dr} + (\omega_a - \omega) \lambda_{qr}$$

$$\frac{d\lambda_{qs}}{dt} = v_{qs} - R_s i_{qs} - \omega_a \lambda_{ds} \quad \frac{d\lambda_{qr}}{dt} = v_{qr} - R_r i_{qr} - (\omega_a - \omega) \lambda_{dr}$$

$$\frac{d\lambda_{xs}}{dt} = v_{xs} - R_s i_{xs} \quad \frac{d\lambda_{xr}}{dt} = v_{xr} - R_r i_{xr}$$

$$\frac{d\lambda_{ys}}{dt} = v_{ys} - R_s i_{ys} \quad \frac{d\lambda_{yr}}{dt} = v_{yr} - R_r i_{yr}$$



Şekil 4.6. Beş-fazlı asenkron motorun Simulink modeli.

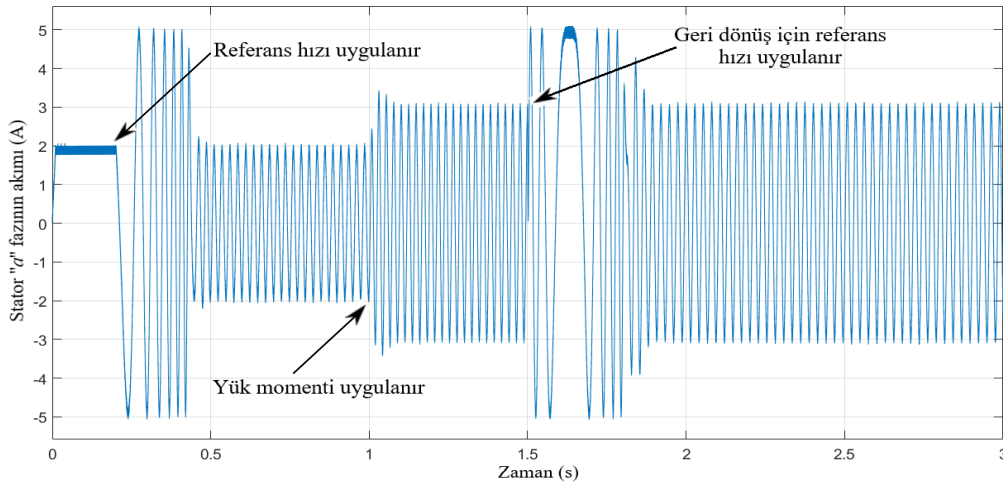
5. SİMÜLASYONLARIN SONUÇLARI

Simulink modeline göre beş-fazlı asenkron motorun performansını analiz etmek amacıyla beş-fazlı sürücü sisteminin simülasyonu farklı çalışma modlarında gerçekleştirilmiştir. Normal çalışması modunda ve arızalı çalışması durumlarında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar ilgili şekillerle gösterilmiştir.

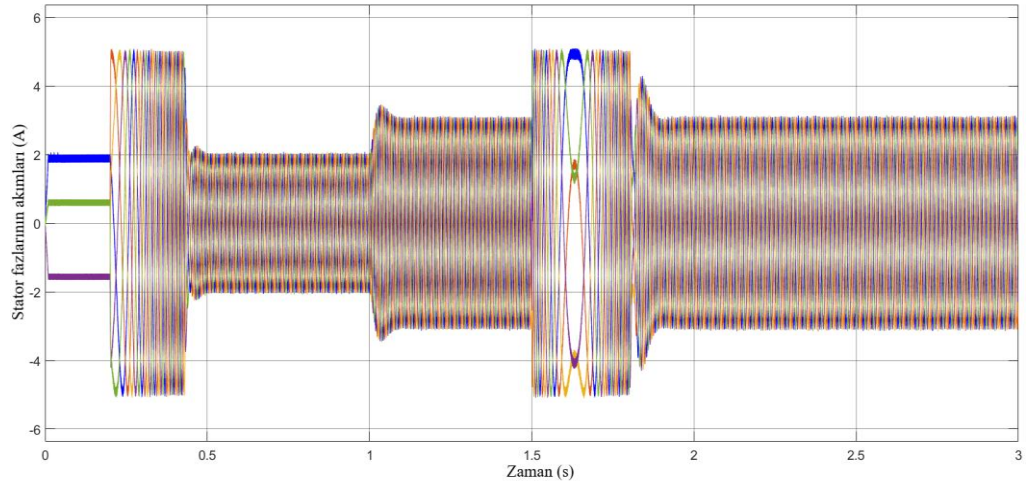
5.1 Beş-Fazlı Asenkron Motorun Normal Çalışması Modu

İlk olarak, beş-fazlı asenkron motor sürücüsünün çalışması yüksüz şartlar altında gerçekleşir, ardından belirli bir zamanda yükleme yapılır ve en sonunda tersine çevrilir. $t = 0,2s$ anında 1200 rpm kumandalı referans hız verilir ve çalışma sırasında sabit tutulur. $t = 1s$ anında yük momenti uygulanır ve rotor hızındaki küçük düşüşün nedeni budur. Yaklaşık $t = 100 - 150 \text{ ms}$ süresinden sonra motorun momenti, küçük hız düşüşünü telafi ederek kumandalı referans momentini hemen takip eder. $t = 1,5s$ anında geri dönüş için referans hızı uygulanır ve gerçek elektromanyetik moment neredeyse referans momentini takip eder.

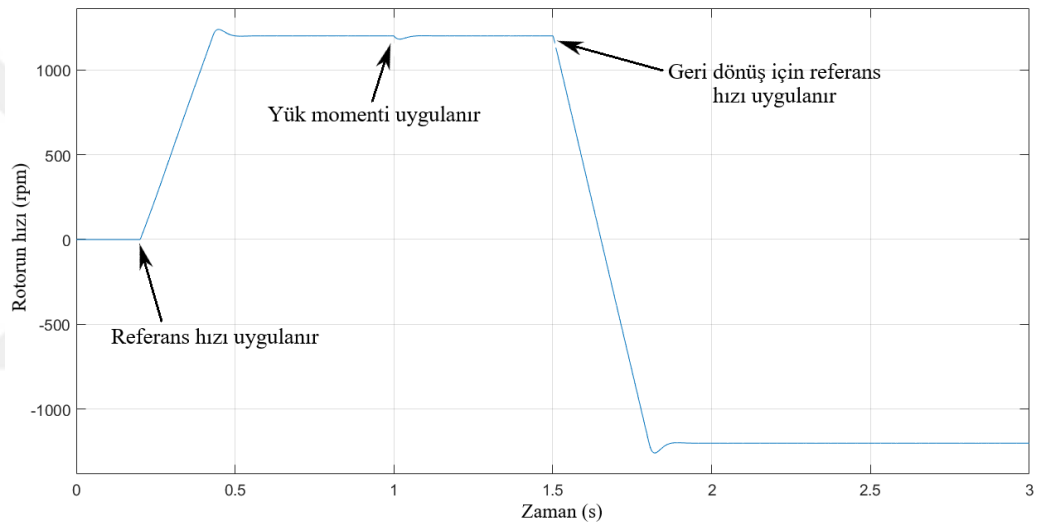
Normal çalışması modunda beş-fazlı asenkron motorun simülasyonu Simulink'te gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5'te gösterildiği gibi beş-fazlı elektrik motorun performansını değerlendirmek amacıyla stator fazının akımları, rotorun hızı ve elektromanyetik moment parametreleri seçilmiştir.



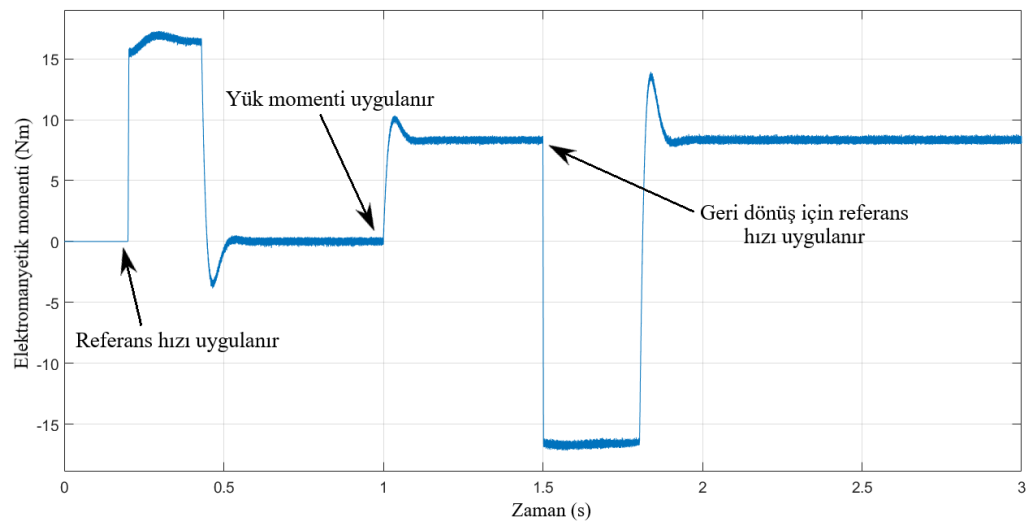
Şekil 5.1. Stator "a" fazının akımı.



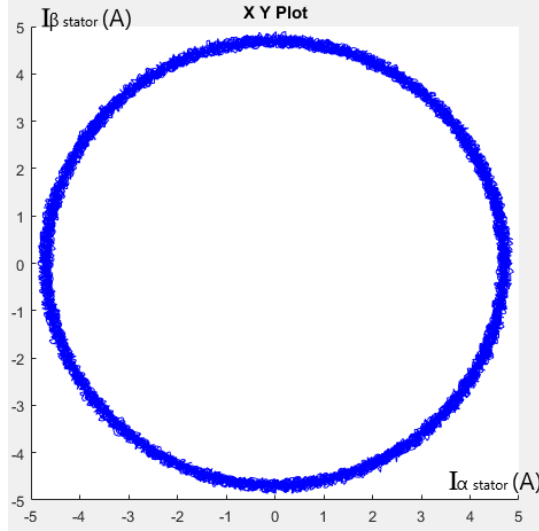
Şekil 5.2. Stator fazının akımları.



Şekil 5.3. Rotorun hızı.



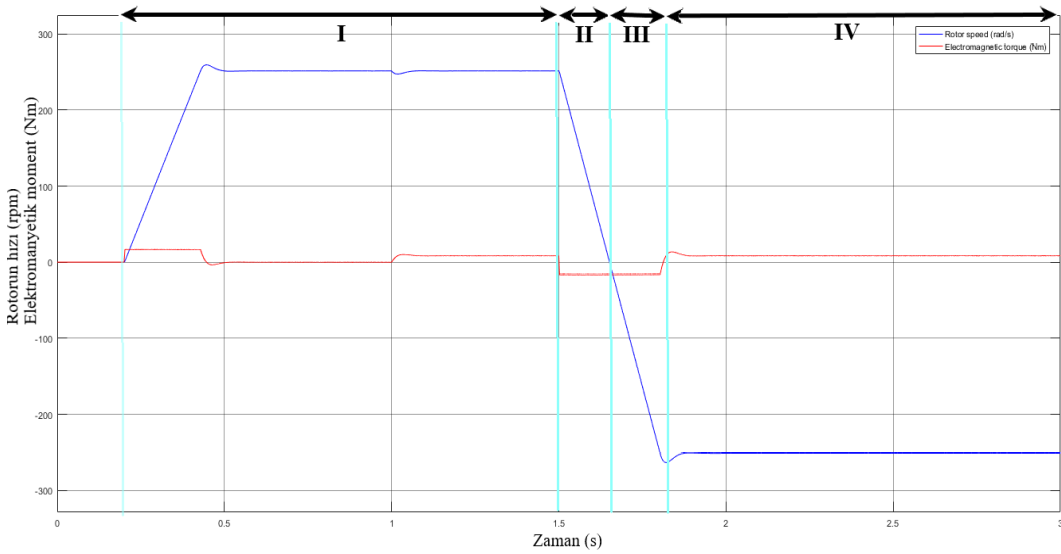
Şekil 5.4. Elektromanyetik momenti.



Şekil 5.5. Stator akımlarının α - β bileşenleri.

Dört bölgede beş-fazlı asenkron makinanın çalışmasını daha iyi anlamak için elektromanyetik moment ve rotorun hızı aynı grafikte gösterilmektedir. Bu bölgelerdeki asenkron makinanın çalışması, Şekil 5.6'da daha detaylı analiz edilmektedir.

- Bölge I ($T_e > 0$ and $\omega > 0$)
- Bölge II ($T_e < 0$ and $\omega > 0$)
- Bölge III ($T_e < 0$ and $\omega < 0$)
- Bölge IV ($T_e > 0$ and $\omega < 0$)



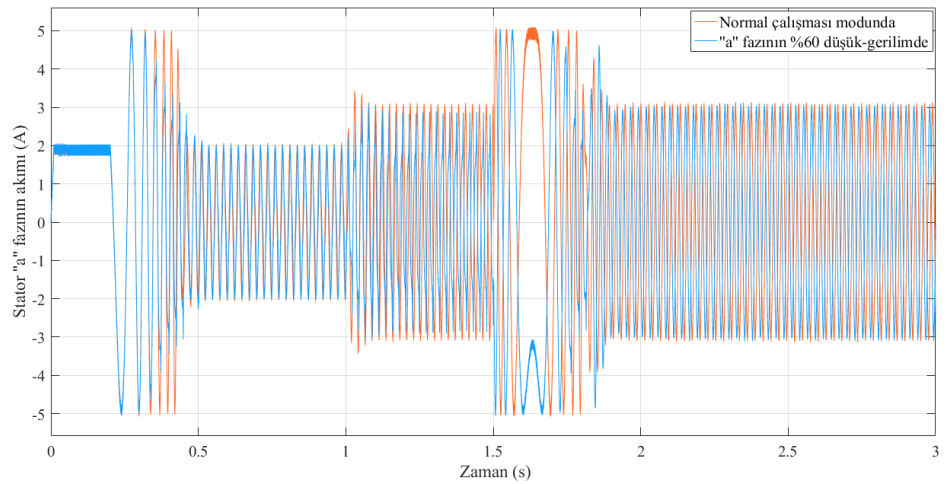
Şekil 5.6. Elektromanyetik momenti ve rotorun hızı.

5.2 Beş-Fazlı Asenkron Motorun Arızalı Çalışması Durumları

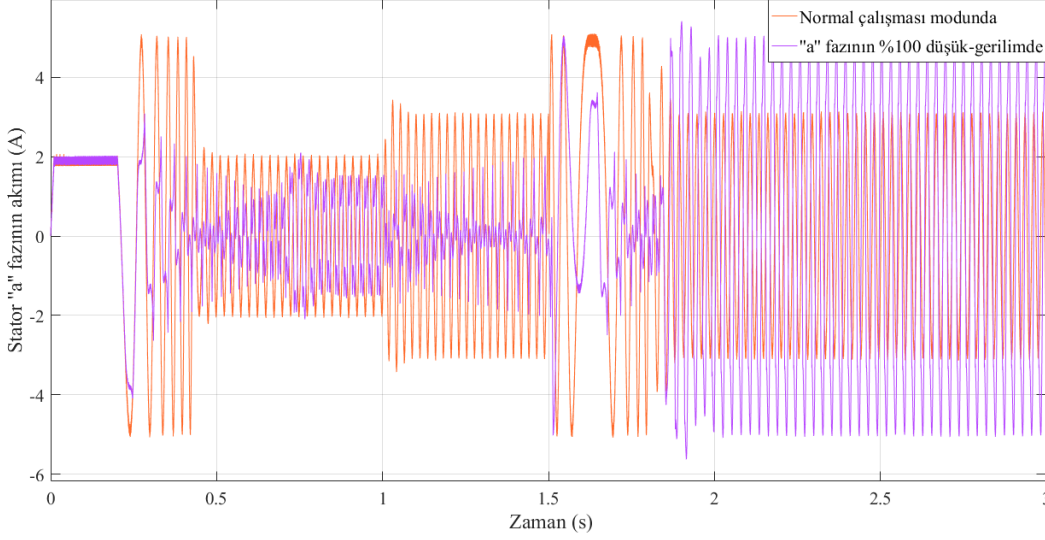
Elektrik sürücülerde farklı tipte arızalar oluşabilir ve bu nedenle arıza toleransı kabiliyeti, çok-fazlı elektrik motorlarının en önemli ve faydalı özelliklerinden biridir (Duran and Barrero, 2016). Bu arızalar sistemdeki dengesiz gerilimlerin ve stator akımlarının, elektromanyetik momentin azalmasının, faz akımlarında yüksek-düzyer harmoniklerin oluşmasının, artan gürültü seviyesinin, titreşimin ve elektrik motorun aşırı-ısınmasının nedeni sayılmaktadır (Gregor Recalde, 2015). Her türlü arıza çok-fazlı elektrik motorun performansını olumsuz etkiler, ancak aynı zamanda arızalı durumlarda çalışmaya devam edebilme avantajı çok önemlidir.

Arızalı çalışması durumlarında beş-fazlı asenkron motorun simülasyonu Simulink'te gerçekleştirilmiştir. Araştırma çalışmamızda inverterin "a" fazında oluşan dengesiz gerilim sisteminden etkilenen arızalı durumu incelenmiştir. Sadece bir fazın %20, %40, %60, %80 ve %100 düşük-gerilimi dahil olmak üzere dengesiz gerilim sisteminde farklı durumları analiz edilmiştir. Bu arızalı durumlarında beş-fazlı asenkron motorun performansını değerlendirmek amacıyla stator fazının akımları, rotorun hızı ve elektromanyetik moment parametreleri seçilmiştir.

Öncelikle normal çalışması modu ve %60 (mavi), %100 (mor) düşük-gerilimi arasındaki stator "a" faz akımının değişimleri sırasıyla Şekil 5.7'de ve Şekil 5.8'de gösterilmektedir.

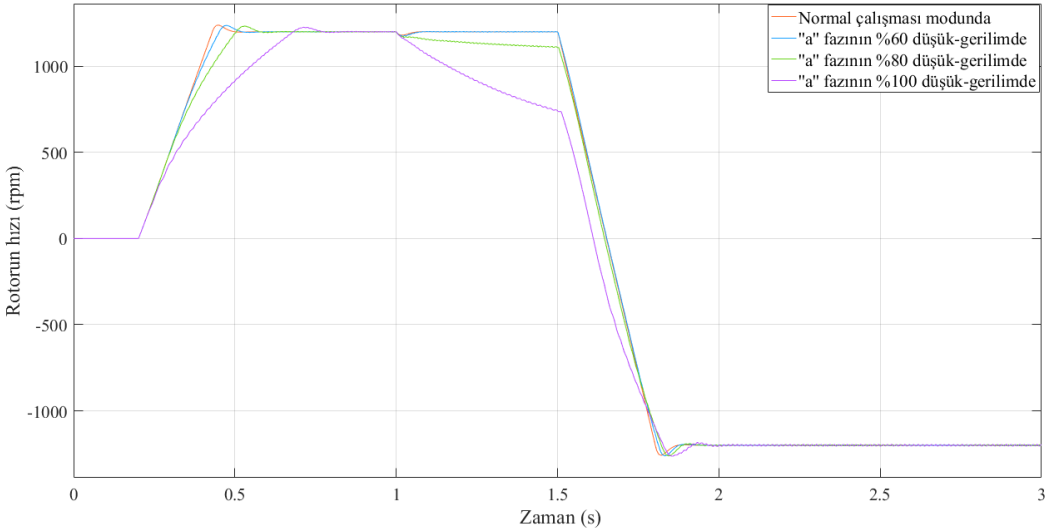


Şekil 5.7. Normal çalışması modunda ve %60 düşük-gerilimde stator "a" fazının akımı.



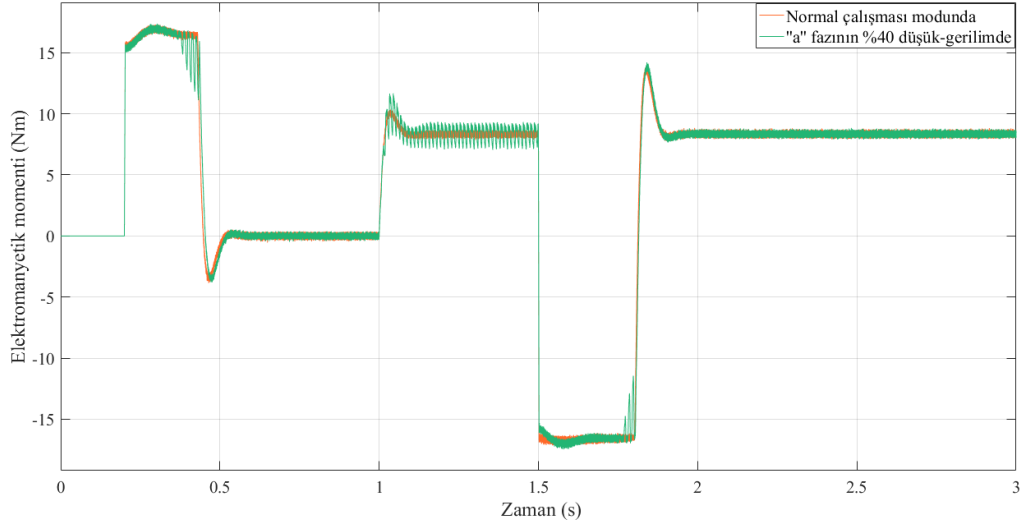
Şekil 5.8. Normal çalışması modunda ve %100 düşük-gerilimde stator "a" fazının akımı.

Normal çalışması modunda (turuncu) ve stator "a" fazının %60 (mavi), %80 (yeşil) ve %100 (mor) düşük-gerilim dahil arızalı durumlarında rotor hızının sonuçları Şekil 5.9'da gösterilmektedir.

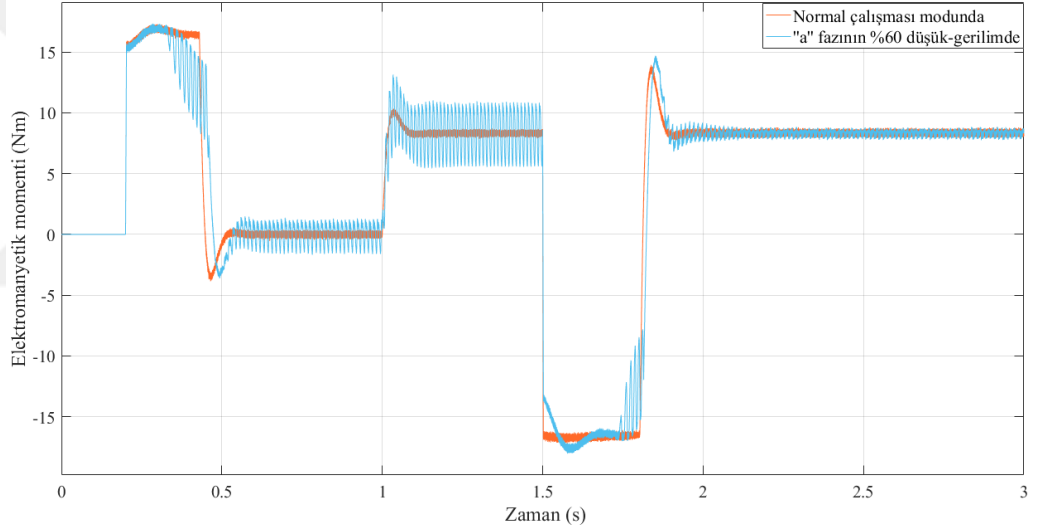


Şekil 5.9. Normal çalışması modunda ve stator "a" fazının %60, %80, %100 düşük-gerilimde rotorun hızı.

Ayrıca, yukarıda belirtilen arızalı durumların her biri için beş-fazlı asenkron motorun elektromanyetik momenti de analiz edilmiştir. Normal çalışması modunda ve stator "a" fazının %40 (yeşil), %60 (mavi) düşük-gerilim durumlarında elektromanyetik momentin sonuçları sırasıyla Şekil 5.10'da ve Şekil 5.11'de gösterilmektedir.

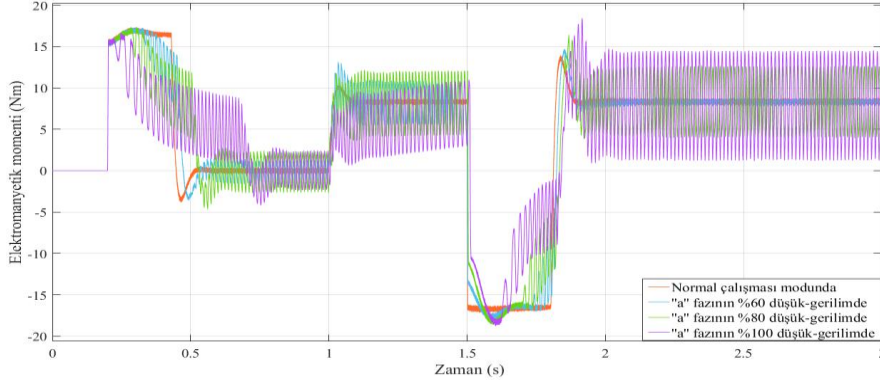


Şekil 5.10. Normal çalışması modunda ve stator “a” fazının %40 düşük-gerilimde elektromanyetik momenti.



Şekil 5.11. Normal çalışması modunda ve stator “a” fazının %60 düşük-gerilimde elektromanyetik momenti.

Simülasyon sonuçlarındaki değişiklikleri net olarak görebilmek amacıyla normal çalışması modunda (turuncu) ve stator “a” fazının %60 (mavi), %80 (yeşil) ve %100 (mor) düşük-gerilim durumlarında elektromanyetik momenti Şekil 5.12’de gösterilmektedir.



Şekil 5.12. Normal çalışması modunda ve stator “a” fazının %60, %80, %100 düşük-gerilimde elektromanyetik momentini.

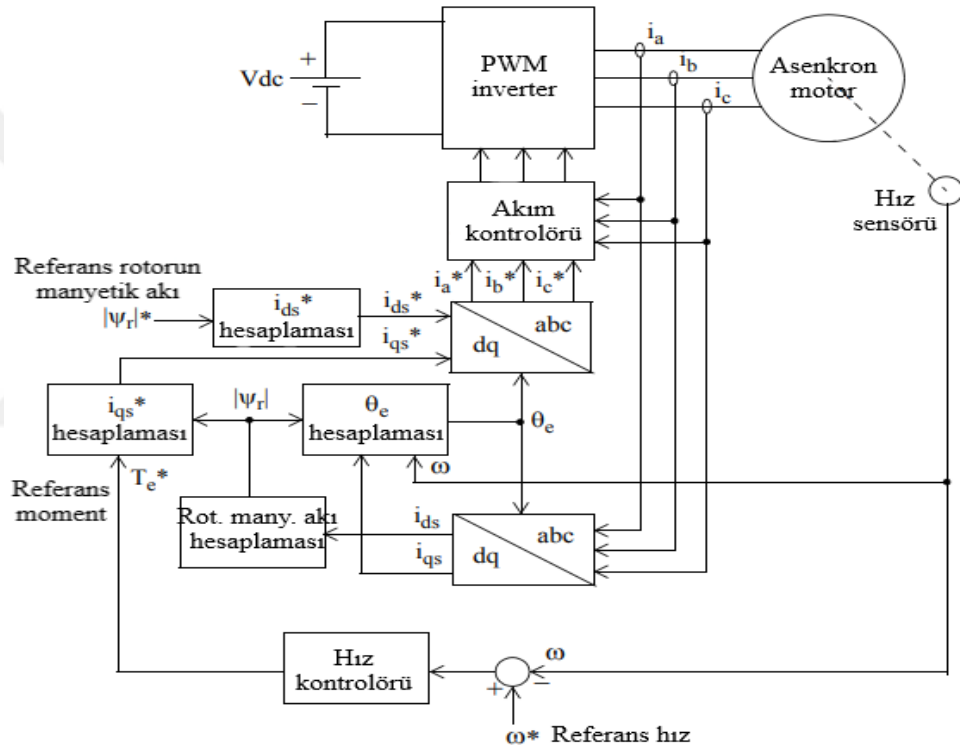
Seçilen parametrelerin dengesiz gerilim sisteminden çok az etkilendiğini anlamak için beş-fazlı asenkron motorun elde edilen simülasyon sonuçları çok önemlidir. Stator “a” fazının %20 ve %40 düşük-gerilimi için arızalı çalışması durumlarında rotor hızı, elektromanyetik momentini ve statorun faz akımlarının sonuçları, normal çalışması modunun sonuçlarıyla benzerdir. Dengesiz seviyeyi “a” fazının %100 düşük-gerilimine kadar artırarak, bahsedilen parametreler önceki durumlardan daha fazla değişmiştir ve motorun performansında olumsuz etki sağlamıştır. Fakat arızalı durumlara rağmen beş-fazlı asenkron motoru çalışmaya devam edebilmiştir. Bu özellik, çok-fazlı elektrik motorlarının en önemli avantajlarından biridir. Ayrıca, stator “a” fazının her düşük-gerilim durumu için elektromanyetik moment dalgalanması değerleri Tablo 5.1’de gösterilmektedir.

Tablo 5.1. Arızalı çalışması durumlarında beş-fazlı asenkron motorun elektromanyetik moment dalgalanması değerleri.

Stator “a” fazının düşük-gerilim seviyesi	Beş-fazlı asenkron motorun elektromanyetik moment dalgalanması
0 %	±3,60 %
20 %	±4,22 %
40 %	±12,65 %
60 %	±31,33 %
80 %	±45,78 %
100 %	±74,70 %

5.3 Beş-Fazlı Asenkron Motorun Üç-Fazlı Asenkron Motorla Karşılaştırması

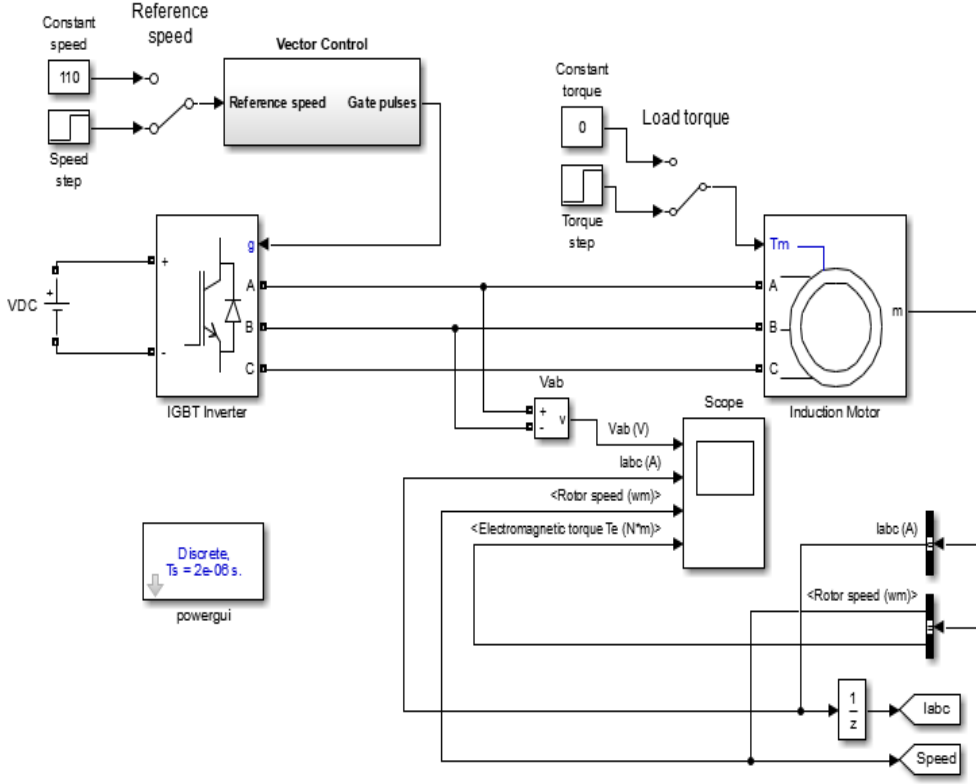
Birinci bölümde bahsedildiği gibi çok-fazlı elektrik motorlar bazı avantajları nedeniyle geleneksel üç-fazlı motorlarla karşılaştırıldığında daha cazip bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Bu bölümde bu iki tip elektrik motorun karşılaştırılması nedeniyle üç-fazlı asenkron motor sürücüsü incelenmiştir. Üç-fazlı asenkron motorun alan yönelimli kontrolü daha detaylı analiz edilmiştir ve şeması Şekil 5.13'te gösterilmektedir (Bose, 2006).



Şekil 5.13. Üç-fazlı asenkron motor sürücüsünün alan yönelimli kontrol şeması.

Üç-fazlı elektrik sürücü de MATLAB/Simulink'te tasarlanmıştır ve Şekil 5.14'te gösterildiği gibi modeli birkaç bloktan yapılmıştır. Bu sürücünün ana blokları üç-fazlı invertör, üç-fazlı asenkron motor ve vektör kontrol bloğudur. İlk önce bu elektrik sürücünün DC-link giriş gerilimi 780V'a eşit bir DC gerilim kaynağı ile temsil edilmiştir. DC-link gerilimi, üç-fazlı invertör bloğunun girişidir. Üç-fazlı invertör, asenkron motoru beslemek için faz gerilimleri sağlar ve Simulink

kütüphanelerinden seçilen bir blok (universal bridge block) ile modellenmiştir. İnverterinin elektronik anahtar seçeneği IGBT/Diyot olarak seçilmiştir.

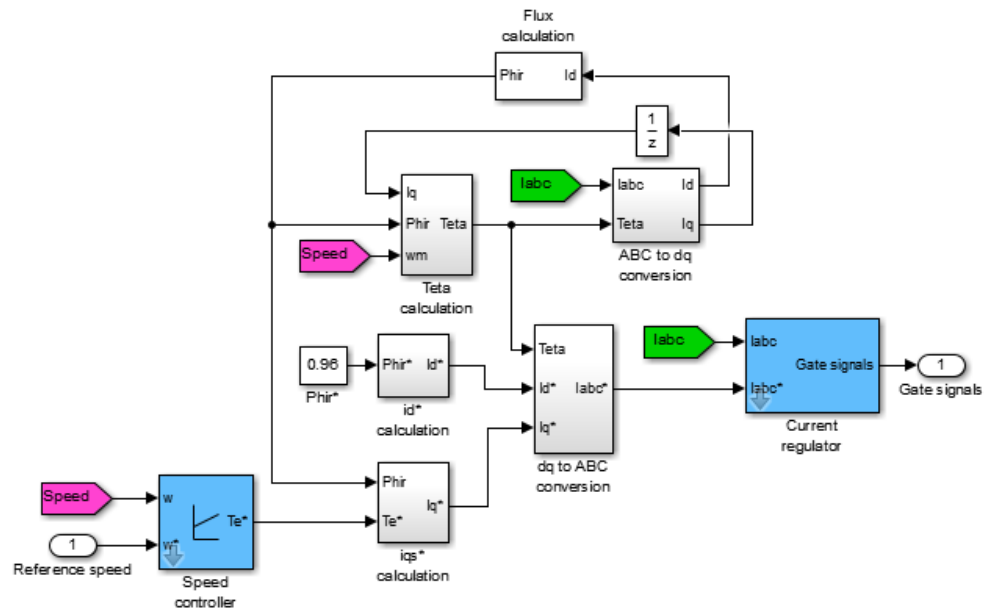


Şekil 5.14. Üç-fazlı asenkron motor sürücüsünün alan yönelimli kontrolünün Simulink modeli.

Üç-fazlı asenkron motor, yine Simulink kütüphanelerinden seçilen bir asenkron makine bloğu (asynchronous machine block) ile modellenmiştir. Asenkron motorun rotor tipi sincap kafesli olup, kutup çifti sayısı 2' dir. Motorun nominal faz-faz gerilimi 460V, eylemsizlik momenti 1,66kg.m² ve çalışma frekansı 50Hz' dir. Stator ve rotor faz direnci $R_s = 2,087\Omega$ ve $R_r = 0,228\Omega$ ' dir. Stator ve rotor kaçak endüktansı $L_{ls} = L_{lr} = 0,8mH$ ve karşılıklı endüktans değeri $L_m = 34,7mH$ ' dir (Bose, 2006). Üç-fazlı asenkron motorun parametreleri Tablo 5.2' de gösterilmektedir.

Tablo 5.2. Üç-fazlı asenkron motorun parametreleri.

Üç-fazlı asenkron motorun parametreleri	Parametre değerleri
V	460 V (faz-faz gerilimi)
i	82 A (faz akımı)
f	50 Hz
n_s	1500 devir/dakika
p	2 kutup çifti
J	1,66 kg.m ²
R_s	2,087 Ω
R_r	0,228 Ω
L_{ls}	0,8 mH
L_{lr}	0,8 mH
L_m	34,7 mH



Şekil 5.15. Üç-fazlı asenkron motorun vektör kontrolör bloğunun Simulink modeli.

Vektör kontrol bloğu, üç-fazlı asenkron motorun çalışmasını kontrol etmesi nedeniyle elektrik sürücünün en önemli elemanlarından biridir. Şekil 5.15'te gösterildiği gibi kontrol bloğu birkaç küçük bloklardan yapılmıştır (Bose, 2006). Hız hatasını hesaplamak amacıyla referans hız ve motorun gerçek hızı birbiriyle karşılaştırılır. Referans elektromanyetik momentini sağlamak için hız hatasının değeri PI denetleyicide işlenir. Ayrıca, q -ekseni referans akımı sağlamak için referans momenti, sabit bir katsayı ile çarpılır. Statorun q -ekseni referans akımı, kumandalı referans momentinden hesaplanır ve aynı zamanda statorun d -ekseni referans akımı, rotorun manyetik akı referansından hesaplanır. Ayrıca, d -ekseni referans akımı (i_{ds}^*), q -ekseni referans akımı (i_{qs}^*), rotorun manyetik akı pozisyonu (θ_e) ve rotorun kayma frekansı (ω_{sl}), Simulink modelinde aşağıdaki matematiksel denklemlerle hesaplanmaktadır.

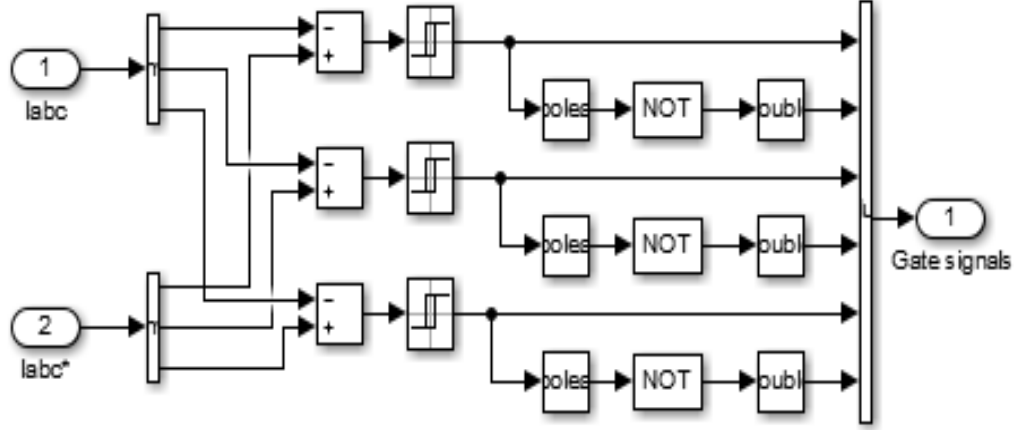
$$i_{qs}^* = \frac{2}{3} \frac{L_r}{P L_m} \frac{T_e^*}{|\lambda_r|}$$

$$i_{ds}^* = \frac{|\lambda_r|^*}{L_m}$$

$$\theta_e = \int (\omega_r + \omega_{sl}) dt$$

$$\omega_{sl} = \frac{L_m R_r}{|\lambda_r| L_r} i_{qs}^*$$

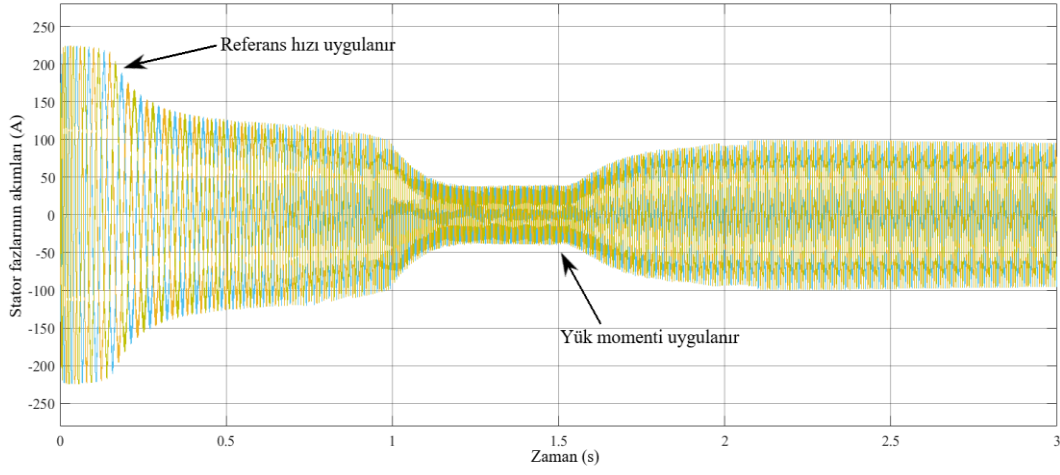
Statorun d - q eksenli akımının bileşenleri referans üç-fazlı akımlarına dönüştürülmüştür. Ondan sonra referans üç-fazlı akımlar, gerçek stator akımlarıyla karşılaştırılmıştır. Oluşturulan akım hataları, Şekil 5.16'da gösterildiği gibi üç-fazlı inverterinin kapı sinyallerini oluşturmak için histerezis kontrolörüne gönderilir. Kararlı rejimde rotorun gerçek hızını referans hıza eşit tutması ve geçici rejimde iyi bir dinamik performans sağlaması nedeniyle hız kontrol bloğu çok önemlidir (Bose, 2006).



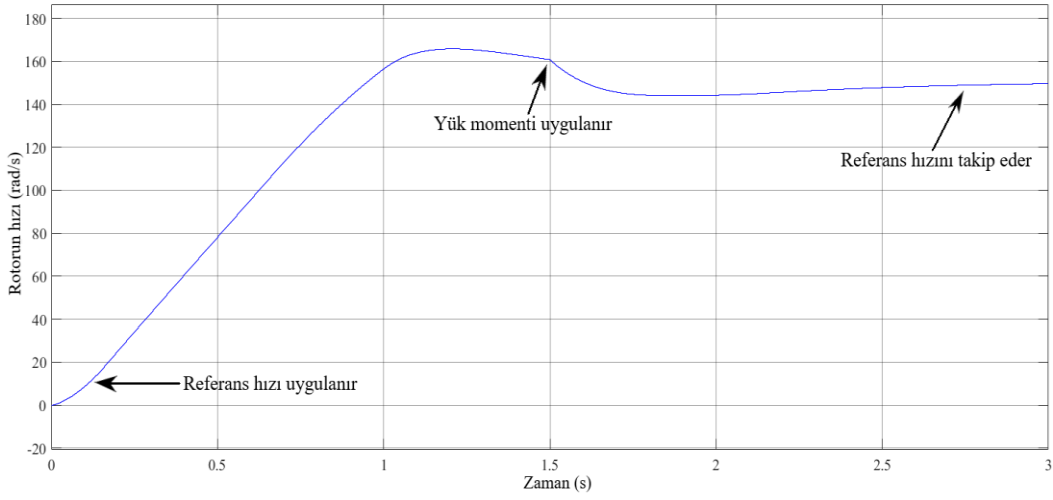
Şekil 5.16. Akım regülatörünün Simulink modeli.

Simulink modeline göre, üç-fazlı asenkron motorun performansının analiz edilmesi nedeniyle üç-fazlı sürücü sisteminin simülasyonu normal çalışması modunda ve arızalı çalışması durumlarında gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda arızalı çalışması durumlarında üç-fazlı motor ile beş-fazlı motor arasındaki simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması temel amaçtır.

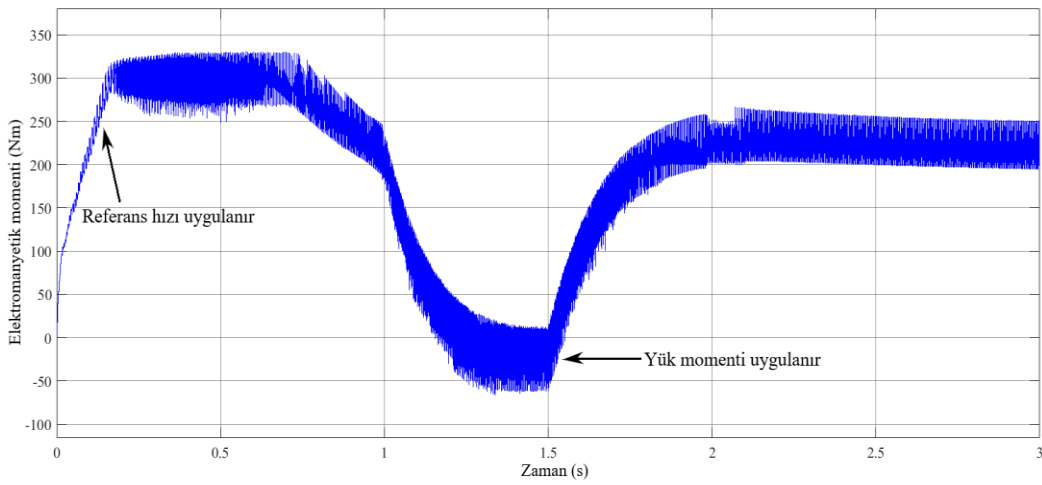
İlk olarak, normal modunda üç-fazlı asenkron motor sürücüsünün çalışması yüksüz şartlar altında gerçekleşir, ardından belirli bir zamanda yükleme yapılır. $t = 0,2s$ anında 150 rad/s 'lik kumandalı referans hız verilir ve çalışma sırasında sabit tutulur. $t = 1,5s$ anında 200 Nm 'ye eşit yük momenti uygulanır ve rotor hızındaki küçük düşüşün nedeni budur. Yaklaşık $t = 300 - 500ms$ süresinden sonra motorun momenti, küçük hız düşüşünü telafi ederek kumandalı referans momentini hemen takip eder. Normal çalışması modunda üç-fazlı asenkron motorun simülasyonu Simulink'te gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.17, 5.18, 5.19, 5.20'de gösterildiği gibi elektrik motorun performansını değerlendirmek amacıyla stator fazının akımları, rotorun hızı ve elektromanyetik moment parametreleri seçilmiştir.



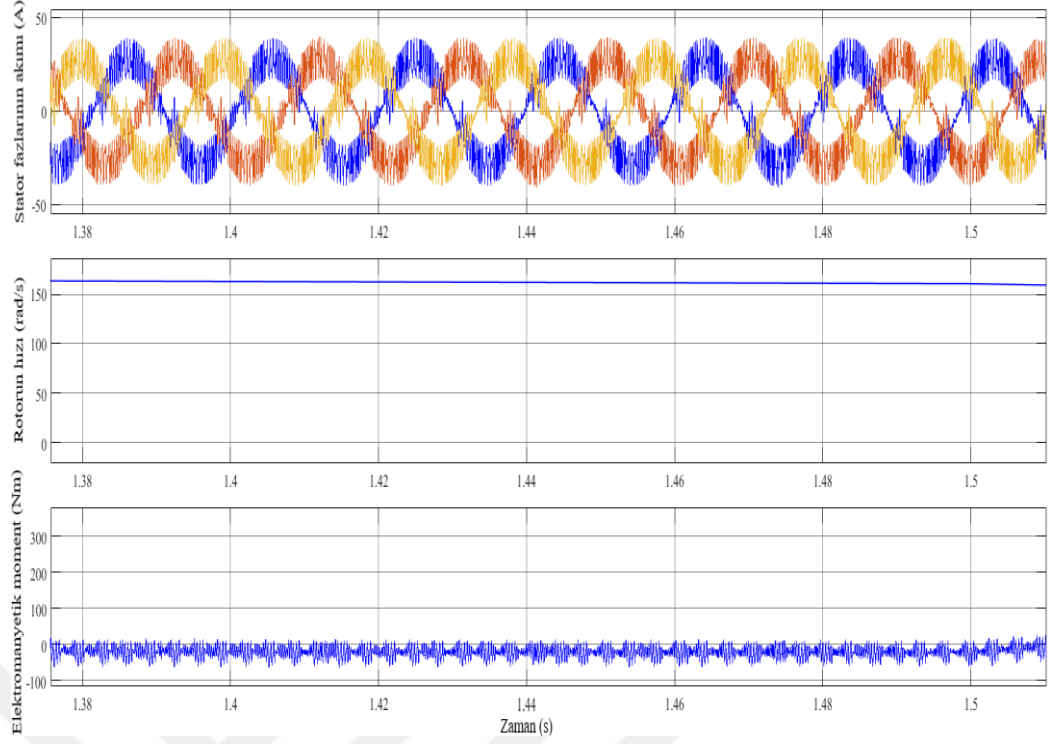
Şekil 5.17. Stator fazının akımları.



Şekil 5.18. Rotorun hızı.



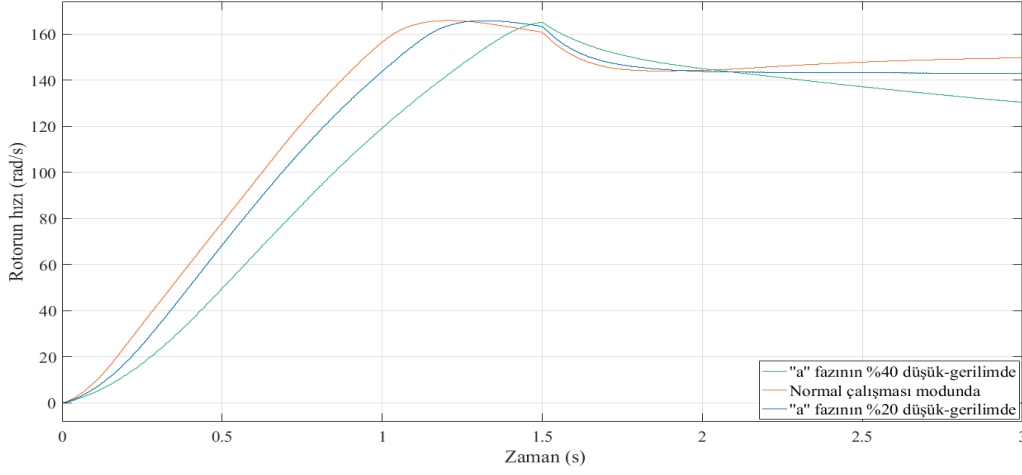
Şekil 5.19. Elektromanyetik momenti.



Şekil 5.20. Stator fazının akımları, rotorun hızı and elektromanyetik moment üzerinde yakınlaştırma.

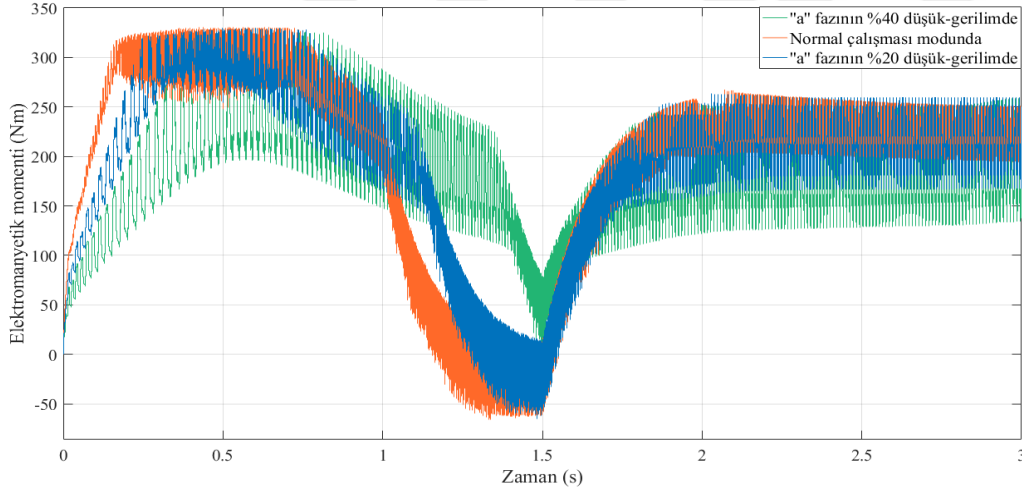
Ayrıca, arızalı çalışması durumlarında üç-fazlı asenkron motorun simülasyonu Simulink'te gerçekleştirilmiştir. Beş-fazlı asenkron motorda olduğu gibi inverterin “a” fazında oluşan dengesiz gerilim sisteminden etkilenen arızalı durumu incelenmiştir. Sadece bir fazın %20, %40, %60, %80 ve %100 düşük-gerilimi dahil olmak üzere farklı dengesiz gerilim sistemi durumları analiz edilmiştir. Bu arızalı durumlarında üç-fazlı asenkron motorun performansını değerlendirmek amacıyla stator fazının akımları, rotorun hızı ve elektromanyetik moment parametreleri seçilmiştir.

Normal çalışması modu (turuncu) ve stator “a” fazının %20 (mavi), %40 (yeşil) düşük-gerilimi arasındaki rotor hızının değişimleri Şekil 5.21’de gösterilmektedir.



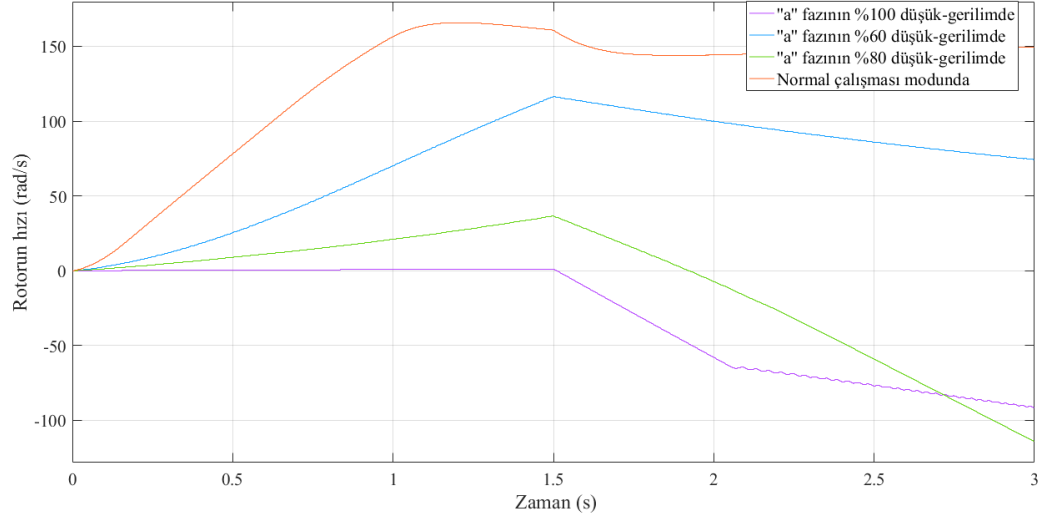
Şekil 5.21. Normal çalışması modunda ve stator “a” fazının %20, %40 düşük-gerilimde rotorun hızı.

Ayrıca, yukarıda belirtilen arızalı durumların her biri için üç-fazlı asenkron motorun elektromanyetik momenti de analiz edilmiştir. Normal çalışması modunda (turuncu) ve stator “a” fazının %20 (mavi), %40 (yeşil) düşük-gerilim durumlarında elektromanyetik momentin sonuçları Şekil 5.22’de gösterilmektedir.

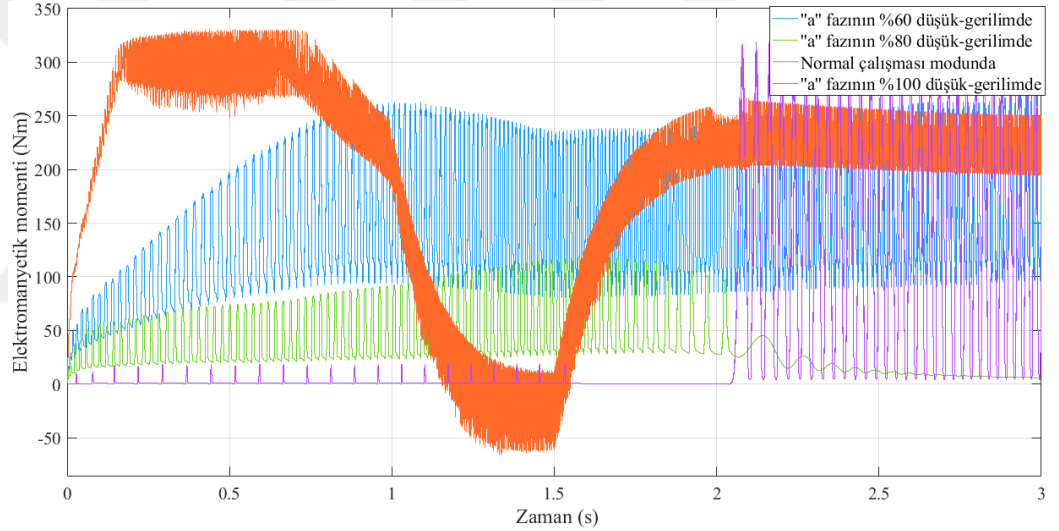


Şekil 5.22. Normal çalışması modunda ve stator “a” fazının %20, %40 düşük-gerilimde elektromanyetik momenti.

Simülasyon sonuçlarındaki değişiklikleri net olarak görebilmek amacıyla normal çalışması modunda (turuncu) ve stator “a” fazının %60 (mavi), %80 (yeşil) ve %100 (mor) düşük-gerilim durumlarında rotorun hızı ve elektromanyetik momenti sırasıyla Şekil 5.23’te ve Şekil 5.24’te gösterilmektedir.



Şekil 5.23. Normal çalışması modunda ve stator "a" fazının %60, %80, %100 düşük-gerilimde rotorun hızı.



Şekil 5.24. Normal çalışması modunda ve stator "a" fazının %60, %80, %100 düşük-gerilimde elektromanyetik momenti.

Beş-fazlı asenkron motor ve üç-fazlı asenkron motorun arızalı çalışması durumları arasındaki farkı anlamak için simülasyon sonuçları çok önemli ve faydalıdır. Beş-fazlı asenkron motorun "a" fazının %20 ve %40 düşük-gerilimi için arızalı çalışması durumlarında statorun faz akımları, rotorun hızı ve elektromanyetik momentin sonuçları, normal çalışması modunun sonuçlarıyla benzerdir. Ancak, bu sonuçlar üç-fazlı asenkron motor için aynı değildir. Çünkü aynı dengesiz gerilim sistem durumlarında beş-fazlı motor ile karşılaştırıldığında üç-fazlı motorun parametre değerleri çok daha fazla değişmiştir.

Statorun “a” fazının %60 düşük-gerilimden %100 düşük-gerilimine kadar dengesiz seviye artırılarak önceki başlangıç arızalı durumlarından beş-fazlı asenkron motorun elektriksel parametreleri daha fazla değişmiştir ve motorun performansı üzerinde olumsuz etki sağlamıştır. Fakat beş-fazlı motoru yine de çalışmaya devam edebilmiştir. Üç-fazlı motorun aynı arıza durumlarında, özellikle “a” fazının %80’den fazla düşük-gerilim için rotor hızı ve moment dalgalanmasının çok yüksek ve kabul edilmeyen değerleri elde edilmiştir. Bu arızalı durumdan dolayı üç-fazlı asenkron motor çalışmaya devam edemez. Ayrıca, stator “a” fazının her düşük-gerilim durumu için elektromanyetik moment dalgalanması değerleri Tablo 5.3’te gösterilmektedir.

Tablo 5.3. Arızalı çalışması durumlarında üç-fazlı asenkron motorun elektromanyetik moment dalgalanması değerleri.

Stator “a” fazının düşük-gerilim seviyesi	Üç-fazlı asenkron motorun elektromanyetik moment dalgalanması
0 %	±12,5 %
20 %	±22,5 %
40 %	±31 %
60 %	±44 %
80 %	> ±100 %
100 %	> ±100 %

Genel olarak, teorik ve simülasyon sonuçlarına göre, beş-fazlı asenkron motor daha güvenilirdir ve daha iyi arıza toleransı kabiliyetine sahiptir. Çünkü, beş-fazlı motor, gerilim dengesizliğinden çok fazla etkilenmez.

6. SONUÇ

Bu tezde beş-fazlı asenkron motor sürücü sistemi üzerine bir araştırma çalışması sunulmuştur. Beş-fazlı asenkron motoru, beş-fazlı inverter ve kontrol bloğu dahil elektrik sürücünün temel elemanları detaylı analiz edilmiştir. Bu çalışmada, faz-değişken (a, b, c, d, e) formunda ve isteğe bağlı referans ($d-q-x-y$) sisteminde beş-fazlı asenkron motorun matematiksel modeli incelenmiştir. Ayrıca, beş-fazlı gerilim beslemeli inverterin topolojisi ve modeli detaylı analiz edilmiştir. MATLAB/Simulink'te beş-fazlı asenkron motor sürücüsünün alan yönelimli kontrolü tasarlanmış ve simülasyonu yapılmıştır. Bu çalışmanın son bölümünde ise beş-fazlı asenkron motor ile üç-fazlı asenkron motor arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu tezde temel kişisel katkı, literatür taraması ve incelemesi, elektrik sürücü sisteminin modellenmesi ve analizi, MATLAB/Simulink'te normal ve arızalı çalışması durumlarında beş-fazlı asenkron motor sürücüsünün simülasyonu, üç-fazlı asenkron motor ile beş-fazlı asenkron motor arasındaki simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Son olarak, tezin sonuçları aşağıdaki gibi listelenmiştir:

- Çok-fazlı elektrik motorlar arızalı durumlarda kullanılabilmesi, yüksek sistem güvenilirliği, faz başına göre güç azaltma ve azaltılmış moment dalgalanması avantajları gibi nedeniyle üç-fazlı motorlarla karşılaştırıldığında daha cazip bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Çok-fazlı motorlar ve özellikle beş-fazlı asenkron motorlar, hibrit ve elektrikli araçlar, elektrikli uçaklar, elektrikli gemi tahriki ve demiryollarında kullanılan lokomotifler gibi farklı önemli uygulamalarda kullanılmaktadır.
- Arıza toleransı kabiliyeti, çok-fazlı elektrik motorların en ilginç özelliğidir. Bu önemli avantaj, üç-fazlı motorlar için incelenmiştir ve güç dönüştürücünün maliyetini ve karmaşıklığını artırarak, ek elektrik donanım masrafı ile arıza toleransı çalışması elde edilebilmektedir. Bu durum, çok-fazlı elektrik sürücülerde tamamen farklıdır. Çünkü arızalı durumlarda elektrik motorlar güvenli çalışmaya devam etmek için ek bir donanıma gerek yoktur.

- Beş-fazlı asenkron motorun alan yönelimli kontrol yöntemi, MATLAB/Simulink'te tasarlanmıştır. Bu Simulink modelinin temel blokları, vektör kontrol bloğu, karşılaştırıcı bloğu, histerezis akım kontrolörü bloğu, beş-fazlı gerilim beslemeli inverter modeli, dönüşüm bloğu ve beş-fazlı asenkron motor modelidir.
- Simulink modeline göre, beş-fazlı asenkron motorun performansını analiz etmek amacıyla beş-fazlı sürücü sisteminin simülasyonu farklı çalışma modlarında gerçekleştirilmiştir. Normal çalışması modunda ve arızalı çalışması durumlarında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elektrik motorun performansını değerlendirmek için stator fazının akımları, rotorun hızı ve elektromanyetik moment parametreleri seçilmiştir.
- Beş-fazlı asenkron motor sürücüsünde inverterin “a” fazında oluşan dengesiz gerilim sisteminden etkilenen arızalı durumu incelenmiştir. Sadece bir fazın %20, %40, %60, %80 ve %100 düşük-gerilimi dahil olmak üzere dengesiz gerilim sisteminde farklı durumları analiz edilmiştir.
- Çok-fazlı elektrik motorlar, bazı avantajları nedeniyle geleneksel üç-fazlı motorlar ile karşılaştırıldığında daha cazip bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Böylece bu iki tip elektrik motoru karşılaştırmak amacıyla üç-fazlı asenkron motor sürücüsünün alan yönelimli kontrol yöntemi analiz edilmiştir ve MATLAB/Simulink'te simülasyonu yapılmıştır.
- Beş-fazlı asenkron motor ve üç-fazlı asenkron motorun arızalı çalışması durumları arasındaki farkı anlamak amacıyla simülasyon sonuçları çok önemlidir. Beş-fazlı asenkron motorun “a” fazının %20 ve %40 düşük-gerilimi için arızalı çalışması durumlarında statorun faz akımları, rotorun hızı ve elektromanyetik momentin sonuçları, normal çalışması modunun sonuçlarıyla benzerdir. Ancak, bu sonuçlar üç-fazlı asenkron motor için aynı değildir. Çünkü aynı dengesiz gerilim sistem durumlarında beş-fazlı motor ile karşılaştırıldığında üç-fazlı motorun parametre değerleri çok daha fazla değişmiştir.
- Statorun “a” fazının %60 düşük-gerilimden %100 düşük-gerilimine kadar dengesiz seviye artırılarak önceki başlangıç arızalı durumlarından beş-

fazlı asenkron motorun elektriksel parametreleri daha fazla değişmiştir ve motoru performansı üzerinde olumsuz etki sağlamıştır. Fakat beş-fazlı motoru yine de çalışmaya devam edebilmiştir. Üç-fazlı motorun aynı arıza durumlarında, özellikle “a” fazının %80’den fazla düşük-gerilim için rotor hızı ve moment dalgalanmasının çok yüksek ve kabul edilmeyen değerleri elde edilmiştir. Bu arızalı durumdan dolayı üç-fazlı asenkron motor çalışmaya devam edemez. Teorik ve simülasyon sonuçlarına göre, beş-fazlı asenkron motor daha güvenilirdir ve daha iyi arıza toleransı kabiliyetine sahiptir. Çünkü, beş-fazlı motor, gerilim dengesizliğinden çok fazla etkilenmez.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abdel-Khalik, A.S., Elserougi, A., Ahmed, S. and Massoud, A.**, 2013, Vector Control of Multiphase Induction Machine Under Open-Circuit Phase Faults, 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, DOI:10.1109/PowerEng.2013.6635611.
- Abdel-Khalik, A.S., Masoud, M.I., Ahmed, S. and Massoud, A.M.**, 2014, Calculation of Derating Factors Based on Steady-State Unbalanced Multiphase Induction Machine Model Under Open Phase(s) and Optimal Winding Currents, Electric Power Systems Research, 106: 214-225 pp., DOI:10.1016/j.epsr.2013.08.015.
- Apsley, J. and Williamson S.**, 2006, Analysis of Multiphase Induction Machines with Winding Faults, IEEE Transactions on Industry Applications, 42(2): 465-472 pp., DOI:10.1109/TIA.2005.863915.
- Barcaro, M., Bianchi, N. and Magnussen, F.**, 2011, Faulty Operations of a PM Fractional-Slot Machine With a Dual Three-Phase Winding, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 58(9): 3825-3832 pp., DOI:10.1109/TIE.2010.2087300.
- Barrero, F. and Duran, M.J.**, 2016, Recent Advances in the Design, Modelling and Control of Multiphase Machines – Part 1, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 63(1): 449-458 pp., DOI:10.1109/TIE.2015.2447733.
- Bermudez, M., Prieto, I.G., Barrero, F., Guzman, H., Duran, M.J. and Kestelyn, X.**, 2017, Open-Phase Fault-Tolerant Direct Torque Control Technique for Five-Phase Induction Motor Drives, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64(2): 902-911 pp., DOI:10.1109/TIE.2016.2610941.
- Bianchi, N., Fornasiero, E. and Bolognani, S.**, 2013, Thermal Analysis of a Five-Phase Motor under Faulty Operations, IEEE Transaction on Industry Applications, 49(4): 1531-1538 pp., DOI:10.1109/TIA.2013.2258452.
- Bojoi, R., Farina, F., Griva, G., Profumo, F. and Tenconi, A.**, 2005, Direct Torque Control for Dual Three-Phase Induction Motor Drives, IEEE Transactions on Industry Applications, 41(6): 1627-1636 pp., DOI:10.1109/TIA.2005.858281.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bose, B.K.**, 2006, Power Electronics and Motor Drives, CRC Press, Elsevier Inc., ISBN-13: 978-0-12-088405-6, USA.
- Boztepe, M.**, “Power Electronics”, <https://sites.google.com/site/mutluboztepe/ee328> (Access date: 4 June 2021).
- Cao, W., Mecrow, B.C., Atkinson, G.J., Bennett, J.W. and Atkinson, D.J.**, 2012, Overview of Electric Motor Technologies Used for More Electric Aircraft (MEA), IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59(9): 3523-3531 pp., DOI:10.1109/TIE.2011.2165453.
- Chen, H.C., Hsu, C.H. and Chang, D.K.**, 2014, Position Sensorless Control for Five-Phase Permanent-Magnet Synchronous Motors, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, DOI:10.1109/AIM.2014.6878176.
- Chiricozzi, E. and Villani, M.**, 2008, Analysis of Fault-Tolerant Five-Phase IPM Synchronous Motor, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, DOI:10.1109/ISIE.2008.4676949.
- Duran, M.J. and Barrero, F.**, 2016, Recent Advances in the Design, Modelling and Control of Multiphase Machines – Part 2, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 63(1): 459-468 pp., DOI:10.1109/TIE.2015.2448211.
- Gregor Recalde, R.I.**, 2015, Induction Motors: Applications, Control and Fault Diagnostics, AvE4EvA, ISBN-10: 953-51-2207-X.
- Guzman, H., Barrero, F. and Duran, M.J.**, 2015, IGBT-Gating Failure Effect on a Fault-Tolerant Predictive Current-Controlled Five-Phase Induction Motor Drive, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62(1): 15-20 pp., DOI:10.1109/TIE.2014.2331019.
- Guzman, H., Duran, M.J., Barrero, F., Bogado, B. and Toral, S.**, 2014, Speed Control of Five-Phase Induction Motors With Integrated Open-Phase Fault Operation Using Model-Based Predictive Current Control Techniques, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61(9), DOI:10.1109/TIE.2013.2289882.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hussain, T., Ahmed, S.K., Iqbal, A. and Khan, M.R.**, 2008, Five-Phase Induction Motor Behaviour under Faulted Conditions, Annual IEEE India Conference, DOI:10.1109/INDCON.2008.4768776.
- Iqbal, A., Ahmed, M., Khan, A., Khan, R. and Abu-Rub, H.**, 2010, Modeling, Simulation and Implementation of a Five-Phase Induction Motor Drive System, International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems IEEE, DOI:10.1109/PEDES.2010.5712373, New Dehli, India.
- Jacobina, C.B., Freitas, I.S., Oliveira, T.M., Silva, E.R.C. and Lima, A.M.N.**, 2004, Fault Tolerant Control of Five-Phase AC Motor Drive, IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, DOI:10.1109/PESC.2004.1355091.
- Jasim, O., Sumner, M., Gerada, C. and Arellano-Padilla, J.**, 2011, Development of a New Fault-Tolerant Induction Motor Control Strategy Using an Enhanced Equivalent Circuit Model, IET Electric Power Applications, 5(8): 618-627 pp., DOI:10.1049/iet-epa.2010.0235.
- Jin, L., Norrga, S., Zhang, H. and Wallmark, O.**, 2015, Evaluation of a Multiphase Drive System in EV and HEV Applications, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 941-945 pp., DOI:10.1109/IEMDC.2015.7409174.
- Kim, S.H.**, 2017, Electric Motor Control, Elsevier Science, United Kingdom, ISBN– eBook: 978-0-12-812319-5.
- Levi, E.**, 2008, Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 55(5): 1893-1909 pp., DOI:10.1109/TIE.2008.918488.
- Levi, E., Bojoi, R., Profumo, F., Toliyat, H.A. and Williamson S.**, 2007, Multiphase Induction Motor Drives – A Technology Status Review, IET Electric Power Application, 1: 489-516 pp., DOI:10.1049/iet-epa:20060342.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Levi, E., Jones, M., Vukosavic, S.N. and Toliyat, H.A.**, 2004, A Novel Concept of a Multihase, Multimotor Vector Controlled Drive System Supplied from a Single Voltage Source Inverter, IEEE Transactions on Power Electronics, 19(2): 320-335 pp., DOI:10.1109/TPEL.2003.823241.
- Lyra, R.O.C. and Lipo, T.A.**, 2002, Torque Density Improvement in a Six-Phase Induction Motor With Third Harmonic Current Injection, IEEE Transactions on Industry Applications, 38(5): 1351-1360 pp., DOI:10.1109/TIA.2002.802938.
- Meşe, E.**, “Advanced Electric Machine Theory”, <https://sites.google.com/view/erkanmese/eğitim> (Access date: 4 June 2021).
- 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): 719-729 pp., DOI:10.1109/TEC.2005.847955.
- Ojo, O., Dong, G. and Wu, Z.**, 2006, Pulse-Width Modulation for Five-Phase Converters Based on Device Turn-on Times, IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, FL, USA, DOI:10.1109/IAS.2006.256592.
- Parsa, L. and Toliyat, H.A.**, 2005, Five-Phase Permanent Magnet Motor Drives for Ship Propulsion Applications, IEEE Electric Ship Technologies Symposium, DOI:10.1109/ESTS.2005.1524702.
- Parsa, L. and Toliyat, H.A.**, 2007, Fault-Tolerant Interior-Permanent-Magnet Machines for Hybrid Electric Vehicle Applications, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 56(4): 1546-1552 pp., DOI:10.1109/TVT.2007.896978.
- Prasad Rao, K.P., Jyothi, B. and Surekha, V.N.**, 2011, Comparison of Specially Connected Transformer Scheme and Five Leg Inverter for Five Phase Supply, Annual IEEE India Conference, Engineering Sustainable Solutions, DOI:10.1109/INDCON.2011.6139560.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Prasad Rao, K.P., Krishna Veni, B. and Ravithej, D.**, 2012, Five-Leg Inverter for Five-Phase Supply, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 3(2), ISSN: 2231-5381. <http://www.internationaljournalsrg.org>
- Sarwer, Z., Sartaj, M., Khan, M.R., Zaid, M. and Shahajhani, U.**, 2019, Comparative Performance Study of Five-Phase Induction Motor, *IEEE Innovations in Power and Advanced Computing Technologies*, DOI:10.1109/i-PACT44901.2019.8960232.
- Scharlau, C.C., Pereira, L.F., Pereira, L.A. and Haffner S.**, 2008, Performance of a Five-Phase Induction Machine with Optimized Air Gap Field under Open Loop V/f Control, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(4): 1046-1056 pp., DOI:10.1109/TEC.2008.2001437.
- Sharma, P.G. and Rangari, S.**, 2013, Simulation of Inverter Fed Five Phase Induction Motor, *International Journal of Science and Research*, 2(2): 127-132 pp., ISSN: 2319-7064.
- Singh, G.K., Nam, K. and Lim, S.K.**, 2005, A Simple Indirect Field-Oriented Control Scheme For Multiphase Induction Machine, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 52(4): 1893-1909 pp., DOI:10.1109/TIE.2005.851593.
- Smith, S.**, 2002, Developments in Power Electronics, Machines and Drives, *Power Engineering Journal*, 16(1): 13-17 pp., DOI:10.1049/pe:20020102.
- Tani, A., Mengoni, M., Zarri, L., Serra, G. and Casadei, D.**, 2012, Control of Multiphase Induction Motors with an Odd Number of Phases under Open-Circuit Phase Faults, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(2): 565-577 pp., DOI:10.1109/TPEL.2011.2140334.
- Tian, B., Mirzaeva, G., An, Q., Sun, L. and Semenov, D.**, 2018, Fault-Tolerant Control of a Five-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor for Industry Applications, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 54(4): 3943-3952 pp., DOI:10.1109/TIA.2018.2820060.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Toliyat, H.A., Lipo, T.A. and White, J.C.**, 1991, Analysis of a Concentrated Winding Induction Machine for Adjustable Speed Drive Applications (Parts I and II), IEEE Transactions on Energy Conversion, 6(4): 679-683 pp., DOI:10.1109/60.103641.
- Ward, E.E. and Harer, H.**, 1969, Preliminary Investigation of an Inverter Fed 5-Phase Induction Motor, Proceedings of the Institution of Electrical Engineering, 116(6): 980-984 pp., DOI:10.1049/piee.1969.0182.
- Wilamowski, B.M. and Irwin, J.D.**, 2011, The Industrial Electronics Handbook: Power Electronics and Motor Drives, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, USA, ISBN: 978-1-4398-0285-4.
- Williamson, S. and Smith, S.**, 2003, Pulsating Torque and Losses in Multiphase Induction Machines, IEEE Transactions on Industry Applications, 39(4): 986-993 pp., DOI:10.1109/TIA.2003.813722.
- Williamson, S., Smith, S. and Hodge, C.**, 2004, Fault Tolerance in Multiphase Propulsion Motors, Journal of Marine Engineering and Technology, 3(1): 3-7 pp., DOI:10.1080/20464177.2004.11020174.
- Xu, H., Toliyat, H.A. and Petersen, L.J.**, 2002, Five-Phase Induction Motor Drives with DSP-Based Control System, IEEE Transactions on Power Electronics, 17(4): 524-533 pp., DOI:10.1109/TPEL.2002.800983.
- Zheng, L., Fletcher, J.E., Williams, B.W. and He, X.**, 2008, Dual-Plane Vector Control of a Five-Phase Induction Machine for an Improved Flux Pattern, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(5): 1996-2005 pp., DOI:10.1109/TIE.2008.918464.

TEŞEKKÜR

Öncelikle tüm yüksek lisans dönemi boyunca verdiği tavsiyeleri, yönlendirmeleri, ve değerli desteği için danışmanım Prof. Dr. Erkan MEŞE'ye teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda, Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'ne ve tüm öğretim üyelerine teşekkür ederim. Ayrıca, eğitim hayatım boyunca daima desteklerini esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.

08 / 09 / 2021

Galdi HYSA

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı: Galdi Hysa

Eğitim Durumu

Lisans: Elektrik Mühendisliği, Polytechnic University of Tirana (2014-2017)

Yüksek Lisans: Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Ege Üniversitesi (2019-2021)

Yabancı Dil Bilgisi

İngilizce (C1), Türkçe (C1)

Akademik Çalışmalar

- G. HYSA, E. MEŞE. On the behavior of five-phase induction motor drive under normal and faulty conditions. *International Journal of Innovative Technology and Interdisciplinary Sciences IJITIS*, Estonya, 27 Ağustos 2021.
- G. HYSA. The analyzing of total harmonic distortion due to variation of carrier signal frequency in PWM H-bridge inverter. *6th International Student Symposium UDEF*, Türkiye, 6 Aralık 2020.
- G. HYSA, L. DHAMO, S. AUTSOU. Losses components and control strategies of permanent magnet assisted synchronous reluctance machine. *2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference together with Symposium of Electrical Engineering and Mechatronics - IEEE Xplore database*, Kardla, Estonya, 12-15 Haziran 2019.
- G. HYSA. An overview of losses and control technique of permanent magnet assisted synchronous reluctance machine. *18th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering" and "Doctoral School of Energy and Geotechnology III"*, Toila, Estonya, 14-18 Ocak 2019.