

**T.C.  
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**MUNZUR**  
ÜNİVERSİTESİ  
2008

**ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN  
KONUM ÖLÇERSİZ KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Ufuk KAYA**

**Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği**

**DANIŞMAN  
Dr. Öğr. Üyesi Zeki OMAÇ  
TUNCELİ – 2018**

**T.C.**  
**MUNZUR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN**  
**KONUM ÖLÇERSİZ KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ufuk KAYA**

**(142103103)**

**Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği**

**DANIŞMAN**

**Dr. Öğr. Üyesi Zeki OMAÇ**

**TUNCELİ – 2018**

Bu tez çalışması 113M090 nolu TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir.

**T.C.**  
**MUNZUR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN**  
**KONUM ÖLÇERSİZ KONTROLÜ**

**Ufuk KAYA**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu tez 16/07/2018 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği/oyçokluğu** ile kabul edilmiştir.

**İmza:.....**

**İmza:.....**

**İmza:.....**

Dr. Öğr. Üyesi Zeki OMAÇ  
(Munzur Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Düzgün  
AKMAZ (Munzur  
Üniversitesi)

Doç. Dr. Eyyüp  
ÖKSÜZTEPE  
(Fırat Üniversitesi)

**DANIŞMAN**

**ÜYE**

**ÜYE**

Bu tez, Enstitümüz Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Numan YILDIRIM  
Enstitü Müdürü  
İmza ve Mühür

Bu çalışma, Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

**Proje No:** YLTUB016-22

**NOT:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı "Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu"ndaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

Anahtarlamaalı Relüktans Motorlar, (ARM) basit yapıları ve düşük maliyetleri ile öne çıkan elektrik makineleridir. ARM'nin rotorunda ve statorunda mıknatıs bulunmazken sadece stator kutuplarında bakır sargılar bulunur. Bu yapıları ile ARM'ler adım motorlara benzerler.

ARM kontrolü iki şekilde yapılır. Bunlardan ilki konum ölçerli kontrol, ikincisi konum ölçersiz kontroldür. Konum ölçerli kontrolde rotor konumu bir konum ölçer ile tespit edilir ve buna göre uygun faz sargıları enerjilendirilir. Konum ölçersiz kontrolde ise tam rotor konumu bilinmez, ancak kestirimi yapılabilir. Bu amaçla konum ölçersiz kontrolde faz tetiklemeleri için ARM'nin kendine has manyetik ve endüktans eğrilerinden faydalanılır.

Bu çalışmada öncelikle literatür taraması yapılmış ardından ARM'ye ilişkin temel bilgiler verilmiştir. En çok kullanılan konum ölçersiz kontrol yöntemleri açıklanarak referans akı modeli ile kıyaslanmıştır. ANSYS/Maxwell programından elde edilen veriler kullanılarak, Mathworks MATLAB/Simulink programında ARM'nin elektriksel modeli oluşturulmuştur. Referans akı yöntemi algoritma bloklarının bu modele eklenmesiyle açık çevrim kontrol, hız kestirim algoritmalarının eklenmesiyle de kapalı çevrim kontrol gerçekleştirilmiştir. Son olarak da ARM deney düzeneği tasarlanmıştır. ARM deney düzeneği; ARM, yük motoru, trafo, DA güç kaynağı, IGBT sürme devresi, güç devresi, snubber devresi, filtreli gerilim bölücü devre ve FPGA'den oluşmaktadır.

Sonuç olarak, referans akı ile kontrol yönteminin özellikle maliyet odaklı açık çevrim uygulamalar için uygulanabilir pratik bir çözüm olduğu anlaşılmıştır. Kapalı çevrim uygulamalar için ise moment dalgalılığının azaltılması halinde yöntemin verimliliğinin artacağı öngörüsünde bulunulmuştur. Bu amaçla farklı kontrol algoritmalarının kullanılması gerektiği önerilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Anahtarlamaalı Relüktans Motor, Konum Ölçersiz Kontrol, Referans Akı Yöntemi, FPGA.

## ABSTRACT

### Position Sensorless Control of Switched Reluctance Motor

Switched Reluctance Motors (SRM) are electric machines which come to the fore with their simplicity and low cost. There isn't any magnets on stators and rotors of SRM, but only there is copper windings on stator poles. They resemble to step motors.

There are two ways of controlling SRM. First one is sensed control and the second one is sensorless control. In sensed control, position encoder determines rotor position and assists powering proper phase windings. In sensorless control, there is no way to find out exact rotor position. But estimation of position can be done. Therefore, unique magnetic charestics of SRM are using for phase triggering.

In this thesis firstly, literature research is achieved. Then basics of SRM are given. Reference flux method compared with most used sensorless control methods by explaining them. The electrical model of SRM is created in Mathworks MATLAB/Simulink software by using datas gathered from ANSYS Maxwell. By adding reference flux algorithm blocks to this model, open loop control is simulated. Then closed loop control simulated by adding angular velocity estimation algorithm. Finally, experimental setup of SRM is designed. The experimental setup of SRM consists of SRM, load motor, transformer, DC power source, IGBT driving circuit, power circuit, snubber circuit, filtered voltage divider and FPGA.

As a result, the reference flux based sensorless control method is practicable and cost effective solution for open loop applications especially. For closed loop applications, it is predicted that the efficiency of the method will increase when torque ripple is decreased. Therefore, it is suggested that different control algorithms must be used.

**Key Words:** Switched Reluctance Motor, Position Sensorless Control, Reference Flux Method, FPGA.

## TEŞEKKÜRLER

Tez çalışmamın her aşamasında değerli katkılarını benden esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Zeki OMAÇ'a, Fırat Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Uçak Elektrik-Elektronik bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Eyyüp ÖKSÜZTEPE'ye, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği öğretim üyesi Prof. Dr. Hasan KÜRÜM'e teşekkür ederim. Hayatımın her anında sevgi ve desteğini benden esirgemeyen canım anneme teşekkürlerimi sunarım.

Vermiş oldukları desteklerden dolayı TÜBİTAK'a (Proje No: 113M090) teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>TEŞEKKÜRLER</b> .....	<b>IV</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>V</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	<b>VII</b>
<b>TABLOLAR LİSTESİ</b> .....	<b>IX</b>
<b>RESİMLER LİSTESİ</b> .....	<b>X</b>
<b>SEMBOLLER LİSTESİ</b> .....	<b>XI</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>XII</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Genel Bilgi ve Tarihsel Gelişim .....	1
1.2. ARM Hakkında Yapılan Çalışmalar.....	2
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği .....	5
<b>2. MATERYAL ve METOT</b> .....	<b>6</b>
2.1. Giriş .....	6
2.2. Anahtarlamalı Relüktans Motorların Genel Yapısı .....	6
2.3. Anahtarlamalı Relüktans Motorların Üstünlükleri ve Zayıflıkları .....	8
2.4. Anahtarlamalı Relüktans Motorun Çalışma Prensipleri .....	9
2.5. Anahtarlamalı Relüktans Motorda Endüktans Değişimi .....	10
2.6. Anahtarlamalı Relüktans Motorda Moment Üretimi .....	12
2.7. Anahtarlamalı Relüktans Motorun Eşdeğer Devresi .....	14
2.8. Anahtarlamalı Relüktans Motorun Güç Devreleri.....	17
2.8.1. Klasik İki Anahtarlı Besleme Devresi .....	18
2.8.2. Boşalma Dirençli Besleme Devresi .....	19
2.8.3. Boşalma Kondansatörlü Besleme Devresi .....	20
2.8.4. İki Sargılı Besleme Devresi .....	21
2.8.5. Orta Nokta Bağlantılı İki DA Kaynaklı Besleme Devresi .....	21
2.8.6. Miller Besleme Devresi .....	22
2.9. ARM Deney Düzenliğinin Tasarımı .....	23
2.10. Baskı Devre Tasarımında EMU .....	23
2.11. IGBT Sürme Devresi .....	25
2.12. Akım ve Gerilim Algılama Devreleri .....	27
2.13. Güç Devresi .....	30
2.14. Snubber Devresi .....	32
2.15. Filtreli Gerilim Bölücü Devre .....	33
2.16. FPGA .....	34
2.17. ARM .....	35

<b>3. BULGULAR .....</b>	<b>39</b>
3.1. Giriş .....	39
3.2. Konum Ölçersiz Kontrol .....	39
3.3. Konum Ölçersiz Kontrol Yöntemleri .....	40
3.4. Referans Akı Kontrol İlkesi.....	41
3.5. Referans Akı Yöntemi MATLAB Benzetimi.....	44
3.5.1. ARM'nin Elektriksel Modeli.....	44
3.5.2. Güç Devresi .....	47
3.5.3. Akı Hesaplama Bloğu.....	48
3.5.4. Referans Akı Yöntemi ile Tetikleme Sinyallerinin Üretimi.....	48
3.5.5. Konum Ölçersiz Kontrolde İlk Hareket Problemi.....	49
3.5.6. Açık Çevrim Kontrol.....	50
3.5.7. Kapalı Çevrim Kontrol .....	55
3.5.8. Hız Kestirimi .....	56
3.5.9. PI Hız ve Akım Kontrol Blokları .....	57
3.5.10. Deneysel Sonuçlar .....	62
<b>4. TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER .....</b>	<b>80</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>82</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>86</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>87</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa No

Şekil 2.1. 12/8 kutuplu bir ARM'nin yapısı.....	7
Şekil 2.2. Stator ve rotor kutup sayılarına göre bazı ARM'ler .....	8
Şekil.2.3. 8/6 kutuplu dört fazlı bir ARM'nin A fazına ait sargı gösterimi .....	9
Şekil 2.4. Rotor konumuna bağlı olarak faz endüktansının değişimi.....	11
Şekil 2.5. Rotor konumuna bağlı olarak endüktans ve moment değişim grafiği .....	13
Şekil 2.6. ARM eşdeğer devresi.....	14
Şekil 2.7. Dört fazlı ARM için klasik iki anahtarlı besleme devresi.....	18
Şekil.2.8. Klasik iki anahtarlı ARM besleme devresinin bir fazı için akım akış durumları	19
Şekil 2.9. Dört fazlı ARM için boşalma dirençli besleme devresi .....	20
Şekil.2.10. Dört fazlı ARM için boşalma kondansatörlü besleme devresi.....	20
Şekil 2.11. Dört fazlı ARM için iki sargılı besleme devresi .....	21
Şekil 2.12. Dört fazlı ARM için orta nokta bağlantılı iki DA kaynaklı besleme devresi....	22
Şekil 2.13. Dört fazlı ARM için Miller besleme devresi.....	22
Şekil 2.14. IGBT kesiti.....	26
Şekil 2.15. VLA500-01R IGBT sürme devresi.....	27
Şekil 2.16. ARM stator ve rotor sacları.....	36
Şekil 3.1. Referans akı yöntemi akış diyagramı.....	42
Şekil 3.2. Manyetik akı-akım değişimi .....	43
Şekil 3.3. Referans akı-akım değişimi.....	44
Şekil 3.4. Moment-akım değişimi .....	45
Şekil 3.5. Bir faza karşılık gelen MATLAB/Simulink bloğu (elektriksel kısım) .....	45
Şekil 3.6. A, B ve C fazları için 25 Amperde manyetik akı değerleri.....	46
Şekil 3.7. A, B ve C fazları için 25 Amperde moment değerleri .....	46
Şekil 3.8. ARM modelinin fiziksel kısmı.....	47
Şekil 3.9. Güç devresi .....	47
Şekil 3.10. Akı hesaplama bloğu.....	48
Şekil 3.11. Referans akı yöntemi ile tetikleme sinyallerinin üretimi .....	49
Şekil 3.12. ARM ilk hareket tetikleme sinyalleri.....	50
Şekil 3.13. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolüne ait blok diyagram.....	51
Şekil 3.14. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için A fazına ait tetikleme sinyalleri .....	51
Şekil 3.15. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için B fazına ait tetikleme sinyalleri .....	52
Şekil 3.16. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için C fazına ait tetikleme sinyalleri .....	52
Şekil 3.17. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için faz akımları .....	53
Şekil 3.18. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için faz gerilimleri.....	53
Şekil 3.19. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için rotorun derece cinsinden aldığı toplam yol.....	54
Şekil 3.20. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için rotorun radyan cinsinden aldığı toplam yol.....	54
Şekil 3.21. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için açısal hız.....	55
Şekil 3.22. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için üretilen moment .....	55
Şekil 3.23. Hız kestirim bloğu.....	56

Şekil 3.24. PI hız ve akım kontrol blokları .....	57
Şekil 3.25. Kapalı çevrim konum ölçersiz ARM kontrolüne ait blok diyagram.....	57
Şekil 3.26. Kapalı çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için faz akımları.....	58
Şekil 3.27. Kapalı çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için anlık faz akımları.....	58
Şekil 3.28. Kapalı çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için faz gerilimleri .....	59
Şekil 3.29. Kapalı çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için anlık faz gerilimleri .....	59
Şekil 3.30. Kapalı çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için referans ve gerçek açısız hız değerleri .....	60
Şekil 3.31. Kapalı çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için referans ve kestirilmiş hız değerleri .....	61
Şekil 3.32. Kapalı çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için üretilen moment değerleri	61
Şekil 3.33. 30 rad/s referans açısız hız için faz akımları .....	62
Şekil 3.34. 30 rad/s referans açısız hız için faz gerilimleri .....	62
Şekil 3.35. 30 rad/s referans açısız hız için rotorun konum değişimi .....	63
Şekil 3.36. 30 rad/s referans açısız hız için gerçek açısız hız .....	63
Şekil 3.37. 30 rad/s referans açısız hız için tetikleme sinyalleri .....	64
Şekil 3.38. 40 rad/s referans açısız hız için faz akımları .....	64
Şekil 3.39. 40 rad/s referans açısız hız için faz gerilimleri .....	65
Şekil 3.40. 40 rad/s referans açısız hız için rotorun konum değişimi .....	65
Şekil 3.41. 40 rad/s referans açısız hız için gerçek açısız hız .....	66
Şekil 3.42. 40 rad/s referans açısız hız için tetikleme sinyalleri .....	66
Şekil 3.43. 50 rad/s referans açısız hız için faz akımları .....	67
Şekil 3.44. 50 rad/s referans açısız hız için faz gerilimleri .....	67
Şekil 3.45. 50 rad/s referans açısız hız için rotorun konum değişimi .....	68
Şekil 3.46. 50 rad/s referans açısız hız için gerçek açısız hız .....	68
Şekil 3.47. 50 rad/s referans açısız hız için tetikleme sinyalleri .....	69
Şekil 3.48. 70 rad/s referans açısız hız için faz akımları .....	69
Şekil 3.49. 70 rad/s referans açısız hız için faz gerilimleri .....	70
Şekil 3.50. 70 rad/s referans açısız hız için rotorun konum değişimi .....	70
Şekil 3.51. 70 rad/s referans açısız hız için gerçek açısız hız .....	71
Şekil 3.52. 70 rad/s referans açısız hız için tetikleme sinyalleri .....	71
Şekil 3.53. 70-80 rad/s referans açısız hız değişimi için faz akımları.....	72
Şekil 3.54. 70-80 rad/s referans açısız hız değişimi için faz gerilimleri .....	72
Şekil 3.55. 70-80 rad/s referans açısız hız değişimi için rotorun konum değişimi .....	73
Şekil 3.56. 70-80 rad/s referans açısız hız değişimi için gerçek açısız hız .....	73
Şekil 3.57. 70-80 rad/s referans açısız hız değişimi için tetikleme sinyalleri .....	74
Şekil 3.58. 80-30 rad/s referans açısız hız değişimi için faz akımları.....	74
Şekil 3.59. 80-30 rad/s referans açısız hız değişimi için faz gerilimleri .....	75
Şekil 3.60. 80-30 rad/s referans açısız hız değişimi için rotorun konum değişimi .....	75
Şekil 3.61. 80-30 rad/s referans açısız hız değişimi için gerçek açısız hız .....	76
Şekil 3.62. 80-30 rad/s referans açısız hız değişimi için tetikleme sinyalleri .....	76
Şekil 3.63. 30-80 rad/s referans açısız hız değişimi için faz akımları.....	77
Şekil 3.64. 30-80 rad/s referans açısız hız değişimi için faz gerilimleri .....	77
Şekil 3.65. 30-80 rad/s referans açısız hız değişimi için rotorun konum değişimi .....	78
Şekil 3.66. 30-80 rad/s referans açısız hız değişimi için gerçek açısız hız .....	78
Şekil 3.67. 30-80 rad/s referans açısız hız değişimi için tetikleme sinyalleri .....	79

## TABLolar LİSTESİ

### Sayfa No

**Tablo 2.1.** Deney düzeneğinde kullanılan bazı araç, gereç ve cihazlar..... 38



## RESİMLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
<b>Resim 2.1.</b> VLA500-01R IGBT sürme entegresi.....	26
<b>Resim 2.2.</b> Baskı devre üzerindeki IGBT sürme blokları .....	27
<b>Resim 2.3.</b> LA 200-P akım algılayıcı.....	28
<b>Resim 2.4.</b> LV 25-P gerilim algılayıcı .....	28
<b>Resim 2.5.</b> Baskı devre üzerinde akım algılayıcı blokları .....	29
<b>Resim 2.6.</b> Baskı devre .....	29
<b>Resim 2.7.</b> Baskı devrenin AutoDesk EAGLE Cad çizimi.....	30
<b>Resim 2.8.</b> CM600MA-24A model IGBT .....	31
<b>Resim 2.9.</b> MF300U12F2 model diyot .....	31
<b>Resim 2.10.</b> Güç devresi .....	32
<b>Resim 2.11.</b> Snubber modülü .....	33
<b>Resim 2.12.</b> Örtüşme-önler gerilim bölücü devre.....	34
<b>Resim 2.13.</b> Xilinx ZYNQ ZC702 .....	35
<b>Resim 2.14.</b> 18/12 kutuplu üç fazlı ters ARM .....	37
<b>Resim 2.15.</b> ARM ve akuple edilmiş indüksiyon motoru.....	37

## SEMBOLLER LİSTESİ

$\beta_s$	: Stator kutup yayı uzunluğu
$\beta_r$	: Rotor kutup yayı uzunluğu
$\alpha_r$	: Rotor kutup adımı
$L_{max}$	: Çakışık konum faz endüktansı
$L_{min}$	: Çakışık olmayan konum faz endüktansı
$q$	: Faz sayısı
$N_s$	: Stator kutup sayısı
$N_r$	: Rotor kutup sayısı
$I, i$	: Akım
$T$	: Moment
$T_l$	: Yük momenti
$\partial$	: Kısmi türev operatörü
$V$	: Gerilim
$L$	: Endüktans
$R$	: Direnç
$E$	: Zıt elektromotor kuvveti
$\Psi$	: Manyetik akı
$t$	: Zaman
$\omega$	: Açısal hız
$J$	: Eylemsizlik momenti
$B$	: Sürtünme katsayısı
$ED$	: Bir elektriksel döngü

## KISALTMALAR

<b>A</b>	: Amper
<b>ADD</b>	: Analog-Dijital Dönüştürücü
<b>ARM</b>	: Anahtarlama Relüktans Motor
<b>BM</b>	: Bulanık Mantık
<b>CPU</b>	: Central Processing Unit
<b>DA</b>	: Doğru Akım
<b>DSP</b>	: Digital Signal Processor
<b>EMU</b>	: Elektromanyetik Uyumluluk
<b>FET</b>	: Field Effect Transistor
<b>FPGA</b>	: Field Programmable Gate Array
<b>HDL</b>	: Hardware Description Language
<b>IGBT</b>	: Insulated Gate Bipolar Transistor
<b>kW</b>	: kiloWatt
<b>MOSFET</b>	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
<b>Nm</b>	: Newton.Metre
<b>PCB</b>	: Printed Circuit Board
<b>PI</b>	: Proportional-Integral
<b>rad/s</b>	: Radyan/saniye
<b>SE</b>	: Sonlu Elemanlar
<b>V</b>	: Volt
<b>VHDL</b>	: Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language
<b>Wb</b>	: Weber
<b>YSA</b>	: Yapay Sinir Ağları

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Genel Bilgi ve Tarihsel Gelişim

Anahtarlama Relüktans Motor (ARM), rotorunda sargı veya kalıcı mıknatıs bulunmayan, stator ve rotoru çıkık kutuptan oluşan, basit yapılı elektrik makinalarıdır. ARM'ler relüktans prensibinden yararlanarak elektriksel enerjiyi mekanik enerjiye çevirirler. Bir elektrik motorunun rotor hareketinin sürekliliği için sürekli moment üretimi şarttır. Rotor dönüş yönüne bağlı olarak, stator sargılarının doğru zaman ve sırada enerjilendirilmesiyle ARM'lerde moment sürekliliği sağlanır. ARM adını bu sıralı anahtarlama işleminden ve relüktans kuvvetinden alır.

ARM, ilk olarak 1838 yılında Davidson tarafından İskoçya'da bir lokomotif hareket ettirmek için kullanılmıştır. ARM'ler ile ilgili ilk patent ise 1840'lı yıllarda bu motorlar üzerine çalışmalar yapmış olan W. H. Taylor'a aittir. Ancak o yıllarda kontrol zorluğundan ve gerekli teknoloji yetersizliğinden ARM'ler yeterli kullanım alanı bulamamıştır. C. L. Walker tarafından bu günkü ARM'lere benzer özellikler taşıyan bir adım motoru geliştirilmiştir. Etkin ARM kontrolü ancak 1960'lı yıllara gelindiğinde güç elektroniğinde yaşanan gelişmeler sayesinde mümkün kılınmış ve ARM'lerin kullanımı hızla artış göstermiştir. 1971 ve 1972 de Bedford ve Hoft rotor konumuna eş zamanlı olarak stator sargı akımlarını anahtarlama yolunu geliştirmişlerdir. Bu sayede günümüz modern ARM'lerinin temelini atmışlardır. Ticari olarak üretilen ilk ARM'ler ise Oulton Switched Reluctance Drives Ltd. lisansı ile İngiliz Tasc Drives Ltd. UK tarafından 4-22 kW değerlerinde imal edilmeye başlanmıştır. ARM'lerin tarihsel gelişimine bakıldığında, özellikle 1980'li yıllardan itibaren ARM üzerine yapılan çalışmaların ivme kazandığı görülmektedir. Bu durumda, özellikle 1960'lı yıllardan sonra gelişimi hız kazanan yarı iletken teknolojisinin etkisi fazla olmuştur.

ARM'ler rotorunda sargı veya mıknatıs bulunmadığı için çok yüksek hızlara çıkabilen elektrik makinalarıdır. Diğer motorlarla kıyaslandığında ARM'ler; üretimi kolay, güvenilir ve kararlı, yüksek verimli, düşük maliyetli elektrik makinalarıdır (Ray ve ark., 1986). Bu avantajları sayesinde ARM'ler otomotiv, ev elektroniği, havacılık ve savunma sanayii gibi alanlar başta olmak üzere birçok farklı alanda etkin bir biçimde kullanılmaktadır. Buna rağmen her motor tipinde olduğu gibi ARM'lerin de bazı istenmeyen özellikleri vardır.

ARM'lerde karşılaşılabilecek sorunlardan ilki akustik gürültü problemidir. ARM'ler çıkık kutuplu makinalar oldukları için rotor hareketi sırasında, stator ve rotor kutupları arasındaki hava aralığı sürekli değişir. Bu durum rotor kutbuna etki eden radyal ve eksenel kuvvetlerin sürekli değişmesine neden olur. Özellikle radyal kuvvetlerdeki bu değişimler rulmanlarda titreşimlere ve dolayısıyla da akustik gürültüye neden olur. Ancak bu gürültü, motor tasarımında ve kontrolünde iyileştirilmeler yapılarak en aza indirilebilir. Örneğin son yıllarda yapılan bir çalışmada radyal kuvvet toplamındaki üçüncü harmoniklerin yok edilmesiyle, ARM'deki titreşim ve akustik gürültülerin minimize çalışılmıştır (Takiguchi ve ark., 2015). Akustik gürültünün bir diğer kaynağı da moment üretiminde yaşanan dalgalanmadır. Bu dalgalanmalar ARM kontrol prensibinden kaynaklanabildiği gibi, mekanik problemlerden de kaynaklanabilmektedir. Yapılan bir çalışmada araştırmacılar relüktans motorlardaki moment dalgalılığını azaltmak için moment dağıtım fonksiyonu önerisinde bulunmuşlardır (Ye ve ark., 2015). ARM'lerde karşılaşılan ikinci temel sorun ise motor konum tespitidir. Moment devamlılığının sağlanabilmesi için stator sargılarının doğru zaman ve sırada enerjilendirilmesi gerekmektedir. Bunu yapabilmek için rotor konumunun doğru ve etkin bir biçimde ölçülmesi gerekmektedir. Bu problemin çözümü için genelde iki yol önerilmektedir. İlki bir konum ölçer (encoder) kullanmak, diğeri konum ölçersiz kontrol yöntemlerinden faydalanmaktır.

Bu çalışmada ARM'nin konum ölçersiz kontrolü üzerine çalışılmıştır. Çalışma sırasıyla şu şekilde özetlenebilir:

1. Mathworks MATLAB/Simulink yazılımında ARM'nin konum ölçersiz benzetimi.
2. Autodesk EAGLE Cad programında ARM kontrol devresinin ve güç devresinin tasarımı ve baskı devresinin üretimi.
3. ARM kontrol algoritmalarının üretimi ve FPGA'ye (Field Programmable Gate Array) yüklenmesi.

## **1.2. ARM Hakkında Yapılan Çalışmalar**

ARM'ler gerek yapılarının basitliği ve dolayısıyla üretim kolaylıkları açısından, gerekse de kontrol mekaniğinin dinamikleri açısından akademik anlamda oldukça verimli elektrik makinalarıdır. Basit yapıları üretim kolaylığı ve avantajı sağlarken, buna karşılık kontrolde bazı zorluklar ortaya çıkmaktadır. Literatür incelendiğinde, ARM'ler üzerine

yapılan çalışmaların daha çok kontrol teknikleri ve bu tekniklerin iyileştirilmeleri üzerine yoğunlaştığı görülmektedir.

Kontrol tekniklerini temel olarak konum ölçerli ve konum ölçersiz teknikler olma üzere iki başlık altında incelenebilir. Konum ölçerli tekniklerde rotor konumu bir encoder tarafından anlık olarak tespit edilebildiği için, bu teknikler daha çok motor verimliliğini artırma üzerine yoğunlaşmıştır. Bir çalışmada araştırmacılar iletim ve kesim açılarını adaptif hesaplayarak belli hız değerleri için en uygun tetikleme açılarını hesaplamışlardır (Mademlis ve Kioskeridis, 2003). Aynı araştırmacılar bir başka çalışmada aynı yöntemle maksimum ARM verimliliği üzerine çalışmışlardır (Kioskeridis ve Mademlis, 2005). Bu çalışmalarla aynı gerilim değerlerinde daha yüksek hızlara, bir başka deyişle aynı hızlara daha düşük gerilim değerleri ile ulaşmayı amaçlamışlardır.

Konum ölçersiz kontrol tekniklerinde yapılan çalışmaların öncelikli hedefi, konum ölçer gereksinimini ortadan kaldıracak bir teknik geliştirmektir. Bir sonraki hedef ise bu tekniğin geliştirilerek kontrol verimliliğinin artırılmasıdır. Konum ölçersiz kontrol teknikleri kullanılan yöntem ve metotlara göre çeşitlilik göstermektedir. Bu tekniklerde amaç faz sargılarının doğru sırada enerjilendirilmesini sağlamaktır. Yapılan çalışmaların çoğunun temelinde, ARM'nin kendine özgü akı ve endüktans değişim eğrilerinin kullanımı yatmaktadır. ARM'de akı değerleri rotor konumuna ve faz akımına göre değişir. Dolayısıyla akım ve akı değerlerinin bilinmesi veya hesaplanabilmesi durumunda rotor konumu belirlenebilir. Aynı şekilde faz endüktans değerleri rotor konumuna göre değişir. Faz endüktans değerinin hesaplanabilmesi durumunda rotor konumunu tespit etmek mümkündür.

Akı değerleri ile konum ölçersiz kontrolün yapılabilmesi için öncelikle akım değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla da akım ve gerilim ölçerler kullanılmaktadır. Ancak konum ölçersiz tekniklerde amaç, maliyeti ve karmaşıklığı azaltmak olduğu için, öncelik sensör sayısını mümkün olduğu kadar azaltmaktır. Örneğin bir çalışmada, stator endüktansı bir analog elektronik tekniği ile hesaplanarak, konum ölçer ve akım ölçer gereksinimi ortadan kaldırılmıştır (Ehsani ve ark., 1992). Bir başka çalışmada ise araştırmacılar sadece bir adet akım ölçer kullanarak üç fazlı ARM için rotor konum tespiti yapmışlardır (Gan ve ark., 2016).

Akı temelli konum ölçersiz kontrol teknikleri, kullanılan kontrolör ve yöntemlere göre farklılıklar gösterir. Literatürde en çok kullanılan yöntemler şu şekilde sıralanır (Ehsani ve Fahimi, 2002): referans akı yöntemi, geliştirilmiş referans akı yöntemi, bulanık mantık

(BM), yapay sinir ağı (YSA), melez (hybrid) kontrol yöntemleri. Bu yöntemlerde akı değerleri anlık hesaplanarak kontrolöre verilir. Kontrolör bu değerlere göre konum tespitini yapar veya enerjilendirilecek en uygun fazı bulur. Xiang ve ark., (2018) yaptıkları çalışmada rotor konumunu kendi kendine tespit edebilen bir algoritma üzerinde çalışmışlardır. Bir başka çalışmada nümerik yöntemlerle konum ölçersiz ARM kontrolü yapılmıştır (Peng ve ark., 2017). Polat ve ark., (2016) da yaptıkları çalışmada sonlu elemanlar (SE) yöntemi ile elde ettikleri verileri YSN'da kullanarak konum ölçersiz kontrol yapmışlardır. 2016'da yapılan bir başka çalışmada doğrusal regresyon tekniklerini kullanarak ARM konum kestirimi yapılmıştır (Song ve ark., 2016). Mvungi (2006) konum ölçersiz komütasyon tekniği ile dört fazlı bir ARM'yi sürmüştür. Khalil ve ark., (2005) sliding-mode gözlemcisi içeren hibrid kontrol tekniği ile dört fazlı konum ölçersiz ARM kontrolünü yapmışlardır. BM ile ARM rotor konumu tespiti literatürde oldukça popüler olan konulardan biridir (Cheok ve Ertugrul, 2000). Bu kontrol yönteminde ölçülen akım ve hesaplanan akı değerleri kontrolöre giriş olarak verilir (Ertugrul ve Cheok, 2000). Önceden akı eğrisine göre tanımlanmış üyelik fonksiyonları yardımı ile açı kestirimi yapılır (Cheok ve Wang, 2005). Ancak çıkışlar işlenmemiş veri (crisp data) olduğu için hata düzeltme için ayrı bir BM bloğuna ihtiyaç duymaktadır (Gupta ve ark., 2010). Üç fazlı ARM kontrolünde; her bir faz için bir adet, hata düzeltme için bir adet ve en uygun faz seçimi için bir adet olmak üzere toplamda beş adet BM kontrolörüne gereksinim vardır (Cheok ve Ertugrul, 1996). Çeşitli SE analizi programları ile elde edilen veriler kullanılarak eğitilen YSA ile de konum kestirimi yapılabilmektedir (Hudson ve ark., 2008). Bu yöntemde de başarımlı YSA'nın ne kadar iyi eğitildiğine bağlıdır (Zhong ve ark., 2012).

Referans akı yöntemi yukarıda bahsedilen yöntemlere göre daha az hesaplama ihtiyacı duymakla beraber özellikle düşük maliyet gerektiren uygulamalar için uygundur. Bu yöntemde motor fazının kesime sokulması gereken ana ait akı değerlerinden faydalanılır (Cai ve Deng, 2014). Basit referans akı yöntemi (Tian ve Zhang, 2015; Chi ve ark., 2005) ve geliştirilmiş referans akı yöntemi (Koblara ve ark., 2010; Ma ve ark., 2014; Zhang ve ark., 2014) olmak üzere farklı varyasyonları mevcuttur. ARM'de akı değerleri akım değerlerine göre değişiklik gösterdiği için farklı akım değerleri için akı değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu değerler tablolarda (look-up table) tutulur. Son yıllarda yapılan bir çalışmada tablolar yerine akı değerlerini hesaplayan polinomlar kullanılmıştır (Wang ve ark., 2018). Düşük hızlardaki moment dalgalılığından dolayı referans akı yöntemi ile konum ölçersiz kontrol, daha çok yüksek hız gerektiren uygulamalar veya açık çevrim için

uygundur. Oldenkamp (1995), bir kontrol devresi ekleyerek açık çevrim kontrolde iyileştirmeler yapmaya çalışmıştır. Acarnley ve ark. (1995) önerdikleri yöntemde, histeresis bandında faz akımını referans akıma göre her iki yönde  $\Delta i/2$  kadar kıyarak kapalı çevrim akım kontrolü yapmışlardır. Reichard ve Weber (1989), yenileyici (rejeneratif) akım yöntemi ile konum ölçersiz kontrol yöntemini açıklamışlardır. Hendlund ve Lundberg (1991) endüktans artış bölgesinden seçilmiş bir referans endüktans değerine göre rotor konumunu tespit etmişlerdir. Bir başka çalışmada durum gözlemcilerinden yararlanılmıştır (Lumsdaine ve Lang, 1990). Drager ve ark. (1999) Kalman filtresi kullanarak rotor konum kestirimi yapmışlardır. Acarnley ve ark. (1985) moment üretmeyen fazlarda sinyal enjeksiyonu yönteminden yararlanarak bir düşük seviyeli akım kısıyıcı önermişlerdir. Vukosavic ve ark. (1995), sabit iletim açısı ve değişken komütasyon açısı kullanarak verimliliği artırmaya çalışmışlardır.

BM ve YSA ile konum ölçersiz kontrolde; hata düzeltme algoritmalarına duyulan ihtiyaç ve diğer hesaplama zorlukları karmaşıklığı artırdığı için bu tezde referans akı yöntemi kullanılmıştır.

### **1.3. Tezin Amacı ve İçeriği**

Bu tezin amacı, öngörülen tasarımın bilgisayar ortamında benzetimini yapmak ve en nihayetinde kontrol devresi ve güç devresinin tasarımı ile fiziksel sistem üzerinde test etmektir.

Birinci bölümde ARM'ler hakkında genel bilgi ve literatür taraması yapılmıştır. Birinci bölüm giriş bölümüdür. İkinci bölümde ARM'lerin genel yapıları, ARM eşdeğer devresi ve ARM güç devreleri hakkında bilgiler matematiksel ifadeler ile desteklenerek verilmektedir. Üçüncü bölüm öngörülen sistemin bilgisayar ortamında benzetimini içermektedir. Dördüncü bölümde kontrol devresi, güç devresi, snubber devresi, analog dijital dönüştürücü için filtreli gerilim bölücü devresi tasarımları verilmiştir. Beşinci bölüm ise sonuçlar ve önerilere ayrılmıştır.

## **2. MATERYAL ve METOT**

### **2.1. Giriş**

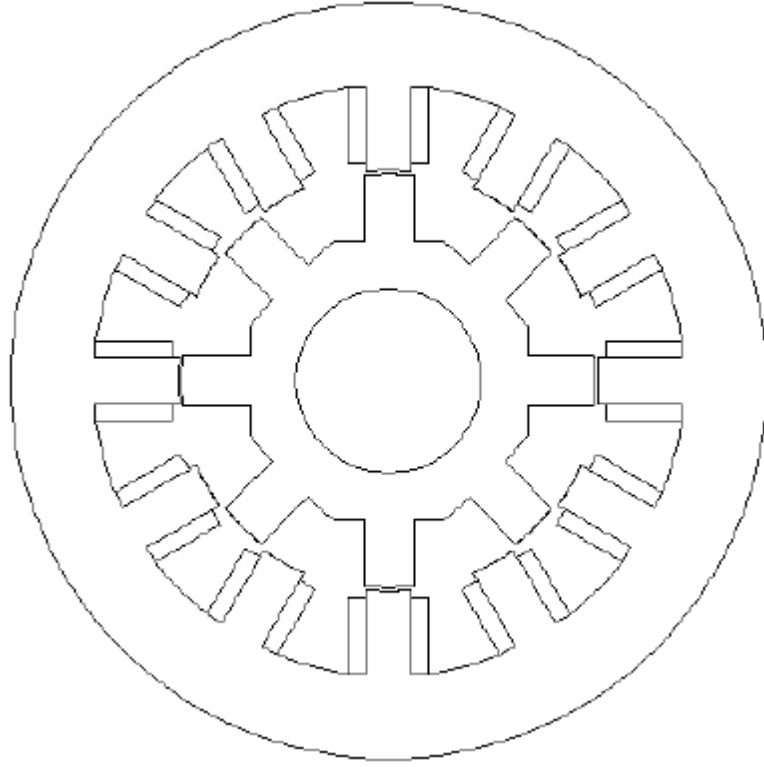
Bu bölümde ARM'nin genel yapısı, çalışma prensibi, eşdeğer devresi, üstünlükleri ve zayıf yönleri, sürme devreleri ve ARM deney düzeneği hakkında bilgi verilmiştir.

### **2.2. Anahtarlamalı Relüktans Motorların Genel Yapısı**

ARM, rotoru ve statoru çıkık kutuplu olan ve sadece statorunda sargı bulunan basit yapılı bir elektrik makinası çeşidi olup senkron makinalar grubuna dahildir. Asenkron motorlara ve DA motorlarına göre daha basit yapılı ve dayanıklıdır. Ayrıca sadece statorunda sargı bulunması, fırçasız olması vb. nedenlerden dolayı üretim maliyeti daha düşüktür. ARM'lerin stator ve rotorları çıkık kutuplu olduğundan değişken hava aralığına sahiptirler. Bu sebeple, rotor hareketi süresince rotor kutbu ile stator kutbunun oluşturduğu manyetik alan sürekli değişir. ARM'ler genellikle stator/rotor kutup sayılarına göre adlandırılır. Şekil 2.1.'de 12/8 kutuplu bir ARM'nin çıkık kutuplu yapısı ve kutuplar arasındaki hava boşlukları gösterilmiştir.

ARM'nin stator ve rotor paketleri ince ve lamine edilmiş silisyum saclardan imal edilir. Laminasyon işlemi genellikle lak adı verilen bir malzeme ile sacların yalnızca bir yüzünün kaplanması ile yapılır. Bu işlemin amacı stator ve rotor paketlerindeki demir kayıplarını azaltmaktır.

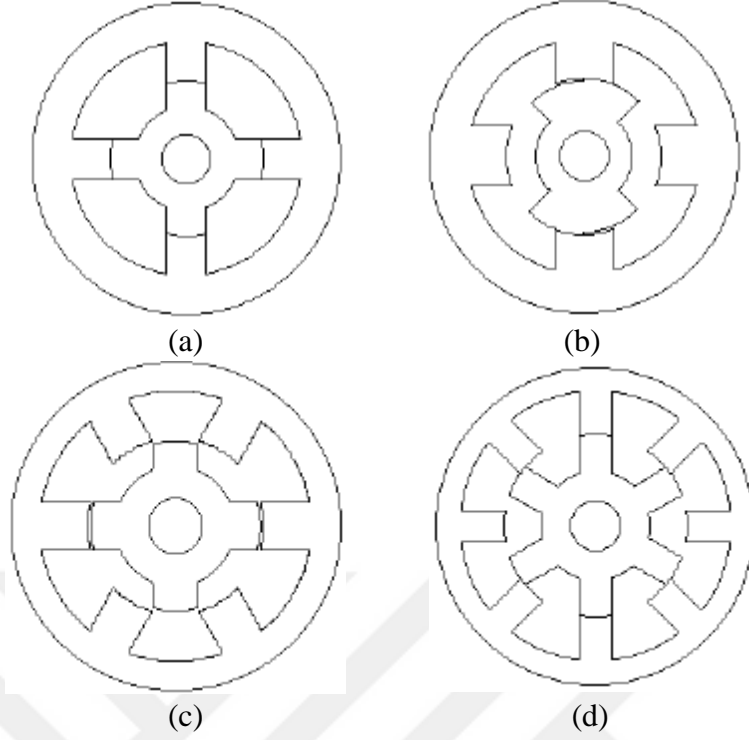
ARM'de stator sargıları manyetik alan şiddetinden azami fayda sağlamak amacıyla mümkün mertebede kalın bakır tellerle yapılır. Her bir faz sargıları, aynı faza ait kutup sargılarının birbirine seri bağlanmasıyla elde edilir. Bu sargılardan DA akıtılır. Bu sargıların enerjilendirilme sırası rotor dönüş yönünü belirler. Fazlar saat yönünde enerjilendirildiğinde rotor saat yönünün tersine; fazlar saat yönünün tersi yönde enerjilendirildiğinde ise rotor saat yönünde döner.



Şekil 2.1. 12/8 kutuplu bir ARM'nin yapısı

ARM'lerde rotorun kendiliğinden yol alabilmesi için stator kutup sayısının, rotor kutup sayısından fazla olması gerekir. Eğer yüksek hız isteniyorsa rotor kutup sayısı stator kutup sayısından çok küçük, yüksek moment isteniyorsa rotor kutup sayısı stator kutup sayısından küçük olmalıdır. Şekil 2.2.'de farklı stator ve rotor kutup sayılarına sahip ARM yapıları verilmiştir.

ARM'ler farklı amaç ve uygulamalar için genellikle tek fazlı, iki fazlı, üç fazlı ya da dört fazlı olarak üretilirler. Şekil 2.2. (a)'da tek fazlı ARM yapısı verilmiştir. Tek Fazlı ARM'ler yüksek hız gerektiren uygulamalar için iyi olmalarına karşın kendiliğinden yol alamazlar. Şekil 2.2. (b)'de verilen iki fazlı ARM'lerde ise yol alma problemi asimetrik kutup yapısıyla aşılmasına rağmen, moment dalgalanması çok fazladır. Şekil 2.2. (c)'de verilen üç fazlı ARM'lerde moment dalgalanması problemi daha az olmakla beraber halen devam eder. Şekil 2.2. (d)'de ise dört fazlı bir ARM yapısı verilmiştir. Dört ve beş fazlı ARM'ler moment dalgalanmasını azaltmak için iyi bir çözüm olabilirler. Ancak fazların anahtarlabilmesi için gereken bağlantı ve elektronik devre elemanı sayısı artar. Bu durum motor kontrolü için daha fazla işi ve maliyeti beraberinde getirir.



Şekil 2.2. Stator ve rotor kutup sayılarına göre bazı ARM'ler

### 2.3. Anahtarlamalı Relüktans Motorların Üstünlükleri ve Zayıflıkları

ARM'lerin diğer motorlara göre üstünlükleri genel olarak şöyle sıralanabilir (Krishnan, 2001).

- ARM daha basit yapılıdır. ARM'nin üretimi kolay olduğu gibi maliyeti de düşüktür.
- ARM'nin sadece statorunda sargı vardır. Rotorunda sargı yoktur. Dolayısıyla ARM rotoru daha az ısınır, rotor soğutmasına gerek duyulmaz. Dolayısıyla ARM'nin üretim ve çalışma maliyeti düşüktür.
- ARM, yapısında mıknatis bulunmadığı için çok yüksek hızlarda çalışabilir.
- ARM, çok düşük ve çok yüksek hızlarda çalışabildiğinden kullanım alanları oldukça geniştir.
- ARM'nin yapısında fırça bulunmadığından daha güvenlidir, bakım maliyeti daha düşüktür. Dolayısıyla patlayıcı veya yanıcı gaz içeren ortamlarda güvenle kullanılabilir.
- ARM düşük ataletli bir motordur. Daha verimlidir.
- ARM'de sargı kayıpları daha düşüktür.

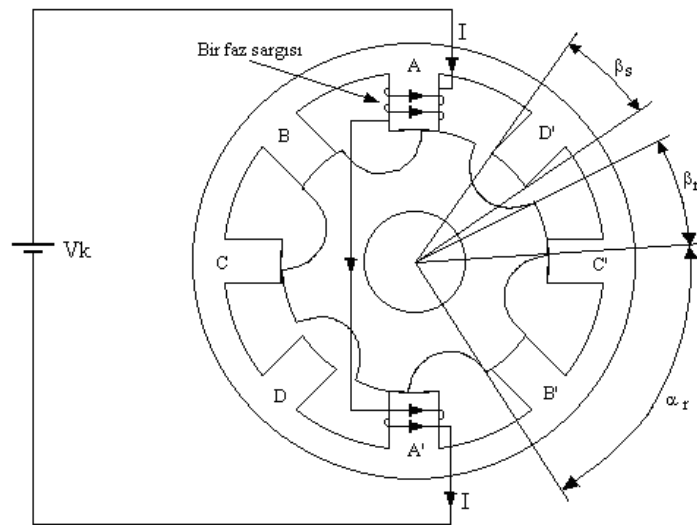
- ARM’de fazlar arasında herhangi bir fiziksel veya elektriksel bağlantı yoktur. Bu sebeple, fazların birinde arıza olması durumunda motor çalışmasını sürdürebilir.

ARM’lerin diğer motorlara göre zayıflıkları genel olarak şöyle sıralanabilir (Miller, 1993).

- ARM çıkık kutuplu bir yapıya sahiptir. Bu durum akustik gürültü, titreşim ve moment dalgalılığına sebep olur. Ayrıca yüksek hızlarda rüzgâr kayıpları yaşanır.
- ARM kontrolünde başlangıç konum tespiti ilk hareketin verilmesi açısından önemlidir.
- Rotor konum bilgisi için bir konum ölçer kullanılmalıdır veya konum ölçersiz kontrol yöntemlerinden birinden yararlanılmalıdır. İlk durum maliyeti, ikinci durum ise kontrol işleminin karmaşıklığını ve zorluğunu artırır.
- ARM kullanımı için bir motor sürücü devresi kullanılmalıdır.
- ARM’de sabit moment üretimi daha zordur.
- ARM’nin doğası ve yapısı gereği kontrolü daha zordur.

#### 2.4. Anahtarlama Relüktans Motorun Çalışma Prensibi

ARM’de her bir faz karşılıklı stator kutuplarına ait sargıların seri bağlanması ile oluşturulur. Şekil 2.3.’te 8/6 kutuplu bir dört fazlı bir ARM’nin A fazına ait sargı yapısı verilmiştir.



Şekil.2.3. 8/6 kutuplu dört fazlı bir ARM’nin A fazına ait sargı gösterimi

ARM'ye ait her bir kutup Şekil 2.3.'te verildiği gibi sarılır. A fazına ait sargılardan I akımı akıtıldığında, A fazının stator kutupları elektromıknatis özellik kazanır. Böylece bu stator kutupları, en yakın rotor kutuplarını kendisine doğru çeker ve rotor, çekilen rotor kutuplarına bağlı olarak belli bir yönde dönmeye başlar. Bu dönme hareketi, A fazına ait stator kutupları ile rotor kutupları aynı doğrultuda olana kadar devam eder. Stator kutupları ile rotor kutuplarının aynı doğrultuya ulaşmasına çakışık konum denir. Şekil 2.3.'te B fazına ait stator ve rotor kutupları çakışık konumdadır. Çakışık konumda relüktans en küçük değerdedir. Enerjilendirilen stator kutbu ile rotorun relüktansını minimum yapmak için yaptığı bu harekete relüktans prensibi denir. ARM relüktans prensibine göre çalışır. Şekil 2.3.'te kullanılan sembollerden,

$\beta_s$  = Stator kutup yayı uzunluğunu,

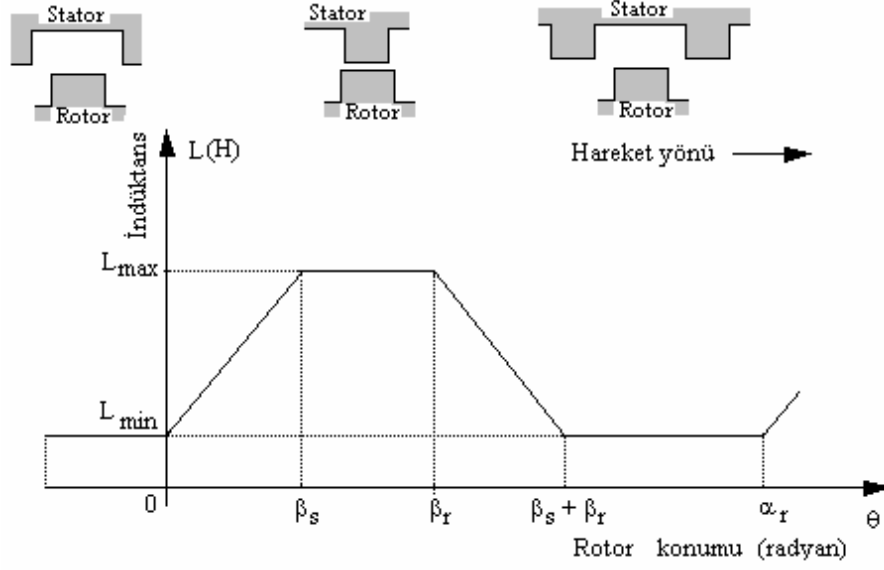
$\beta_r$  = Rotor kutup yayı uzunluğunu,

$\alpha_r$  = Rotor kutup adımını,

ifade etmektedir. Rotor hareketinin sürekliliği için hareket yönüne bağlı olarak uygun fazlar doğru sırayla enerjilendirilmelidir. Bunun için ise anahtarlama yapan bir güç devresine ihtiyaç vardır. En çok kullanılan güç devreleri “*Anahtarlama Relüktans Motor Güç Devreleri*” adlı alt bölümde verilmiştir.

## 2.5. Anahtarlama Relüktans Motorda Endüktans Değişimi

ARM'de endüktans değişimi büyük önem arz eder. Çünkü moment üretimi endüktansa bağlıdır. Eğer faz sargılarından geçen akımın değişmediği ve manyetik doyumun olmadığı kabul edilirse, faz endüktansı yalnızca rotor konumuna bağlı olarak değişir. Şekil 2.4.'te rotor konumuna bağlı olarak endüktans değişim grafiğinin doğrusallaştırılmış hali verilmiştir (Polat, 2010).



Şekil 2.4. Rotor konumuna bağlı olarak faz endüktansının değişimi

Şekil 2.4.'te de görülebildiği gibi faz endüktansı çakışık konumda en büyük, çakışık olmayan konumda ise en küçük değerini alır. Şekil 2.4.'de kullanılan sembollerin ifadeleri şu şekildedir:

$\theta$  = Rotor konumu (radyan)

$\beta_s$  = Stator kutup yayı uzunluğu

$\beta_r$  = Rotor kutup yayı uzunluğu

$\alpha_r$  = Rotor kutup adımı

$L_{max}$  = Çakışık konum faz endüktansı

$L_{min}$  = Çakışık olmayan konum faz endüktansı

ARM'nin endüktansı kosinüs fonksiyonu şeklinde değişiyorsa (2.1)'de verilen formül kullanılır (Polat, 2010). Denklem (2.2) ve (2.3)'te ise sırasıyla  $L_1$  ve  $L_2$  ifadeleri verilmiştir (Polat, 2010).

$$L_i = L_1 + L_2 \cdot \sum_{i=1}^n \cos \left[ N_r \cdot \theta - (i - 1) \cdot \frac{2 \cdot \pi}{q} \right] \quad (2.1)$$

$$L_1 = \frac{L_{max} + L_{min}}{2} \quad (2.2)$$

$$L_2 = \frac{L_{max} - L_{min}}{2} \quad (2.3)$$

Denklem (2.1)'de;  $i$  ifadesi fazları,  $q$  faz sayısını ve  $N_r$  rotor kutup sayısını belirtir. Burada  $q$  faz sayısının, stator kutup sayısının yarısı olduğuna dikkat edilmelidir. Denklem

(2.1), (2.2) ve (2.3)'ten yararlanarak dört fazlı bir ARM'nin A, B, C ve D fazlarına ait endüktans ifadeleri sırasıyla (2.4), (2.5), (2.6) ve (2.7)'de verilmiştir (Polat, 2010).

$$L_A = L_1 + L_2 \cdot \cos\left(60 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.4)$$

$$L_B = L_1 + L_2 \cdot \cos(60 + \pi) \quad (2.5)$$

$$L_C = L_1 + L_2 \cdot \cos\left(60 + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.6)$$

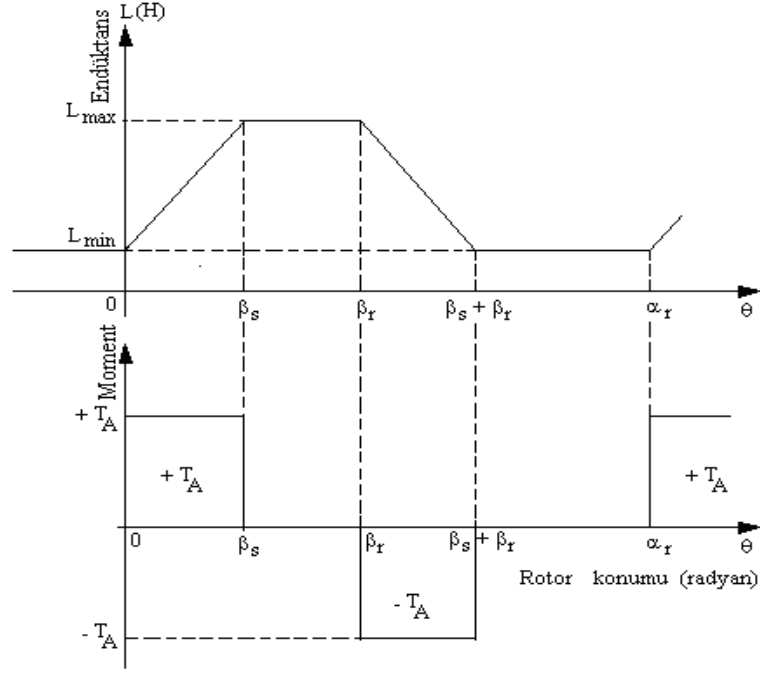
$$L_D = L_1 + L_2 \cdot \cos(60) \quad (2.7)$$

## 2.6. Anahtarlamalı Relüktans Motorda Moment Üretimi

Bir önceki bölümde ARM'de endüktansın rotor konumuna bağlı olarak değiştiği belirtilmişti. Şekil 2.4'ten yararlanarak endüktans değişim grafiğinin eğimine K dersek; K, denklem (2.8)'de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$K = \frac{L_{max} - L_{min}}{\beta_s} \quad (2.8)$$

ARM'de K eğiminin sıfırdan büyük olduğu yerlerde pozitif, eğimin sıfırdan küçük olduğu yerlerde negatif, değişmediği yerlerde ise sıfır moment üretilir. Buna göre rotor konumuna bağlı olarak endüktans ve moment değişimi Şekil 2.5.'te verilmiştir (Omaç, 2006).



Şekil 2.5. Rotor konumuna bağlı olarak endüktans ve moment değişim grafiği

Endüktansın doğrusal ve sadece rotor konumuna bağlı olarak değiştiği herhangi bir  $i$  fazı için ani moment (2.9)'da verildiği gibi ifade edilebilir (Polat, 2010).

$$T_i = \frac{1}{2} \cdot i_i^2 \cdot \frac{\partial L_i(\theta)}{\partial \theta} \quad (2.9)$$

Denklem (2.8) ve (2.9)'dan yararlanarak A fazı için rotor konumuna bağlı olarak endüktans ifadeleri (2.10)'da verilmiştir.

$$T_A = \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot K \cdot i_A^2 & 0 \leq \theta \leq \beta_s \\ 0 & \beta_s \leq \theta \leq \beta_r \\ -\frac{1}{2} \cdot K \cdot i_A^2 & \beta_r \leq \theta \leq \beta_s + \beta_r \\ 0 & \beta_s + \beta_r \leq \theta \leq \alpha_r \end{cases} \quad (2.10)$$

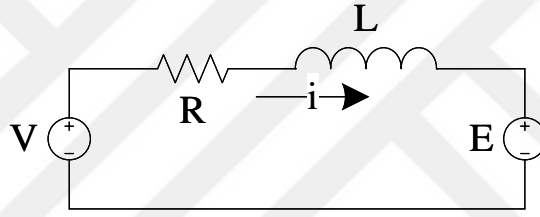
Buna göre ARM tarafından üretilen toplam ani moment, her bir fazın tek başına ürettiğini ani momentlerin toplamı kadar olacaktır. Denklem (2.11)'de bu toplam ani momentin matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$T_e(\theta, i_A, i_B, i_C, i_D) = \sum_{i=1}^q T_i = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^q i_i^2 \cdot \frac{\partial L_i}{\partial \theta} \quad (2.11)$$

Herhangi bir rotor konumunda ani momentin sıfır olmaması için stator kutup yayı uzunluğu ( $\beta_s$ ), ( $\alpha_r/q$ )'dan daha büyük seçilmelidir.

## 2.7. Anahtarlamalı Relüktans Motorun Eşdeğer Devresi

Eşdeğer devre çıkarımında fazlar arasındaki ortak endüktans ihmal edilmiştir. Ayrıca endüktansın akımla değişmediği ve manyetik doyumun olmadığı varsayılmıştır. ARM'nin her bir fazı, bu faza karşılık gelen bir direnç, bir endüktans ve bu sargıda oluşan zıt elektromotor kuvveti (EMK) olarak modellenilebilir. ARM'nin bir fazına ait eşdeğer devre Şekil.2.6.'da verilmiştir (Krishnan, 2001).



Şekil 2.6. ARM eşdeğer devresi

Şekil 2.6.'da verilen eşdeğer devreye göre ARM'nin bir fazındaki gerilim düşümü, sargı direnci üzerindeki gerilim düşümü ile sargıda endüklenen gerilimin toplamına eşittir. Bu ifade matematiksel olarak Şekil.2.6.'dan yararlanarak denklem (2.12)'de verilmiştir (Krishnan, 2001).

$$V = R \cdot i + \frac{\partial \Psi(\theta, i)}{\partial t} \quad (2.12)$$

Denklem (2.12)'de  $V$  sargı besleme gerilimi,  $R$  sargı direnci,  $i$  faz akımı,  $\Psi$  faz akısı,  $\theta$  rotor konumu ve  $t$  ise zamandır. Birim zamanda faz akısındaki değişim miktarı sargı üzerinde endüklenen gerilime eşittir. Faz akısı, rotor konumu ve faz akımına bağlı olarak değişen iki değişkenli bir fonksiyondur. Faz akısının rotor konumu ve faz akımına bağlı olarak kısmi türevi alınırsa (2.12)'den (2.13)'te verilen denklem elde edilir.

$$V = R \cdot i + \frac{\partial \Psi}{\partial i} \cdot \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.13)$$

Açısal hız  $\omega$  ile rotor konum  $\theta$  arasındaki matematiksel ilişki denklem (2.14)'te verilmiştir.

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.14)$$

Akı ile endüktans arasındaki ilişki (2.15)'te verilmiştir. Bu ilişkinin doğrusal olduğu kabul edilirse, (2.15)'te verilen denklem (2.16)'da olduğu gibi yazılabilir.

$$L = \frac{\partial \Psi}{\partial i} \quad (2.15)$$

$$\Psi = i \cdot L \quad (2.16)$$

Buna göre (2.14), (2.15) ve (2.16) ifadeleri (2.13)'te yerine yazılırsa, ARM'nin bir fazına ait gerilim düşüm denklemi (2.17)'deki halini alır.

$$V = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{dL}{d\theta} \cdot \omega \quad (2.17)$$

(2.17)'de verilen denklemin sağ tarafındaki  $(R \cdot i)$  ifadesi sargı direncinden dolayı bir fazda meydana gelen gerilim düşümünü,  $(L \cdot \frac{di}{dt})$  ifadesi sargının endüktansından kaynaklanan gerilim düşümünü ve  $(i \cdot \frac{dL}{d\theta} \cdot \omega)$  ifadesi ise motorun zıt EMK'sını ifade eder.

Dört fazlı bir ARM'nin A, B, C ve D her bir fazını göstermek üzere, bu ARM'nin fazlarına ait gerilim denklemleri sırasıyla (2.18), (2.19), (2.20) ve (2.21)'de verilmiştir.

$$V_A = R_A \cdot i_A + L_A \cdot \frac{di_A}{dt} + i_A \cdot \frac{dL_A}{d\theta} \cdot \omega \quad (2.18)$$

$$V_B = R_B \cdot i_B + L_B \cdot \frac{di_B}{dt} + i_B \cdot \frac{dL_B}{d\theta} \cdot \omega \quad (2.19)$$

$$V_C = R_C \cdot i_C + L_C \cdot \frac{di_C}{dt} + i_C \cdot \frac{dL_C}{d\theta} \cdot \omega \quad (2.20)$$

$$V_D = R_D \cdot i_D + L_D \cdot \frac{di_D}{dt} + i_D \cdot \frac{dL_D}{d\theta} \cdot \omega \quad (2.21)$$

Doğrusal çalışma şartlarında ARM'nin bir fazının ürettiği moment denklemi (2.22)'deki gibi ifade edilebilir.

$$T = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (2.22)$$

Denklem (2.22)'den hareketle her bir faz için moment denklemleri (2.23), (2.24), (2.25) ve (2.26)'daki gibi yazılabilir.

$$T_A(\theta, i_A) = \frac{1}{2} \cdot i_A^2 \cdot \frac{dL_A(\theta)}{d\theta} \quad (2.23)$$

$$T_B(\theta, i_B) = \frac{1}{2} \cdot i_B^2 \cdot \frac{dL_B(\theta)}{d\theta} \quad (2.24)$$

$$T_C(\theta, i_C) = \frac{1}{2} \cdot i_C^2 \cdot \frac{dL_C(\theta)}{d\theta} \quad (2.25)$$

$$T_D(\theta, i_D) = \frac{1}{2} \cdot i_D^2 \cdot \frac{dL_D(\theta)}{d\theta} \quad (2.26)$$

Dört fazlı bir ARM'nin fazları tarafından üretilen motorun toplam momenti (2.23), (2.24), (2.25) ve (2.26)'da verilen denklemler göz önünde bulundurularak, (2.27)'de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$T_e(\theta, i_A, i_B, i_C, i_D) = T_A(\theta, i_A) + T_B(\theta, i_B) + T_C(\theta, i_C) + T_D(\theta, i_D) \quad (2.27)$$

Denklem (2.27)'de  $T_e$  motor tarafından üretilen momenti ifade etmektedir. ARM tarafından üretilen moment, motorun hareket denklemine eşitlenirse (2.28)'de verilen ifade elde edilir.

$$T_e = J \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \cdot \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (2.28)$$

Denklem (2.28)'de  $J$  eylemsizlik momentini,  $B$  sürtünme katsayısını ve  $T_L$  yük momentini ifade eder. (2.14)'de verilen ifadeyi (2.28)'de yerine yazarsak, (2.29)'da verilen ifadeyi elde ederiz.

$$T_e = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega + T_L \quad (2.29)$$

Tüm bu bilgiler ışığında ARM'nin durum denklemleri yazılabilir. ARM'nin durum denklemlerine ait değişkenler, rotor hızı ve faz akımıdır. Fazlara ait gerilim ve moment denklemleri düzenlendiğinde elde edilen dört fazlı ARM için durum denklemleri aşağıda verilmiştir. Bu denklemlerden sırasıyla (2.30), (2.31), (2.32) ve (2.33) faz akımlarına, (2.34) açısal hıza ve (2.35) ise rotor konumuna ait durum denklemleridir (Polat, 2010).

$$\frac{di_A}{dt} = \frac{1}{L_A} \cdot \left[ V_A - R_A \cdot i_A - i_A \cdot \frac{dL_A}{d\theta} \cdot \omega \right] \quad (2.30)$$

$$\frac{di_B}{dt} = \frac{1}{L_B} \cdot \left[ V_B - R_B \cdot i_B - i_B \cdot \frac{dL_B}{d\theta} \cdot \omega \right] \quad (2.31)$$

$$\frac{di_C}{dt} = \frac{1}{L_C} \cdot \left[ V_C - R_C \cdot i_C - i_C \cdot \frac{dL_C}{d\theta} \cdot \omega \right] \quad (2.32)$$

$$\frac{di_D}{dt} = \frac{1}{L_D} \cdot \left[ V_D - R_D \cdot i_D - i_D \cdot \frac{dL_D}{d\theta} \cdot \omega \right] \quad (2.33)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot [T_e - B \cdot \omega - T_L] \quad (2.34)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (2.35)$$

## 2.8. Anahtarlamalı Relüktans Motorun Güç Devreleri

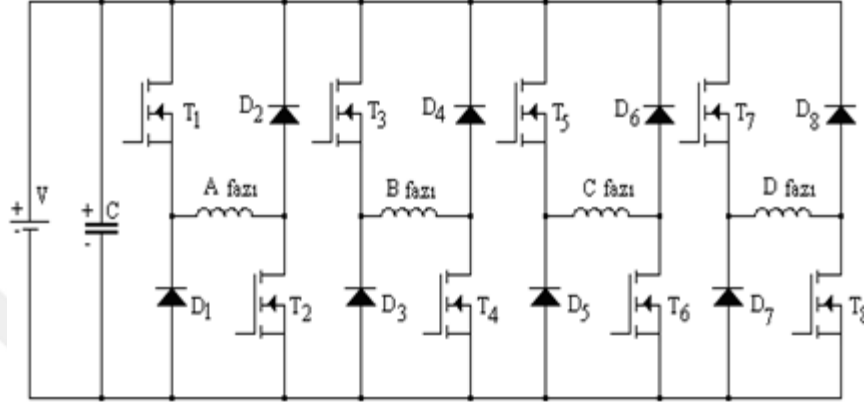
ARM'de bir fazı oluşturan sargılar karşılıklı stator kutupları üzerine sarılır ve birbirlerine seri bağlanır. Her bir fazın sargısı diğer fazların sargılarından bağımsızdır. ARM'nin bu yapısı ona büyük bir avantaj sağlar. Öyle ki motor hareketi sırasında fazlardan biri çalışmayı bıraksa bile diğer fazlar yardımıyla motor hareketine devam eder (Krishnan, 2001).

ARM'de üretilen momentin genel denklemi (2.22)'de verilmişti. Buradan görülebileceği üzere ARM'de moment üretimi akım yönünden bağımsızdır. Dolayısıyla ARM kontrolü için gereken besleme devresinde motor kontrolü için her bir faz bacağı için tek bir anahtarlama elemanı kullanmak yeterlidir.

ARM besleme devreleri genel olarak iki ana başlık altında sınıflandırılabilir. Bunlar akım kontrollü besleme devreleri ve gerilim kontrollü besleme devreleridir. Akım kontrollü devreler düşük hızlar için, gerilim kontrollü devreler ise yüksek hızlar için idealdir. ARM besleme işlemi için kullanılan besleme devreleri, aşağıdaki bölümlerde verilmiştir. Her bir devrenin kendine özel üstünlük ve zayıflıkları vardır.

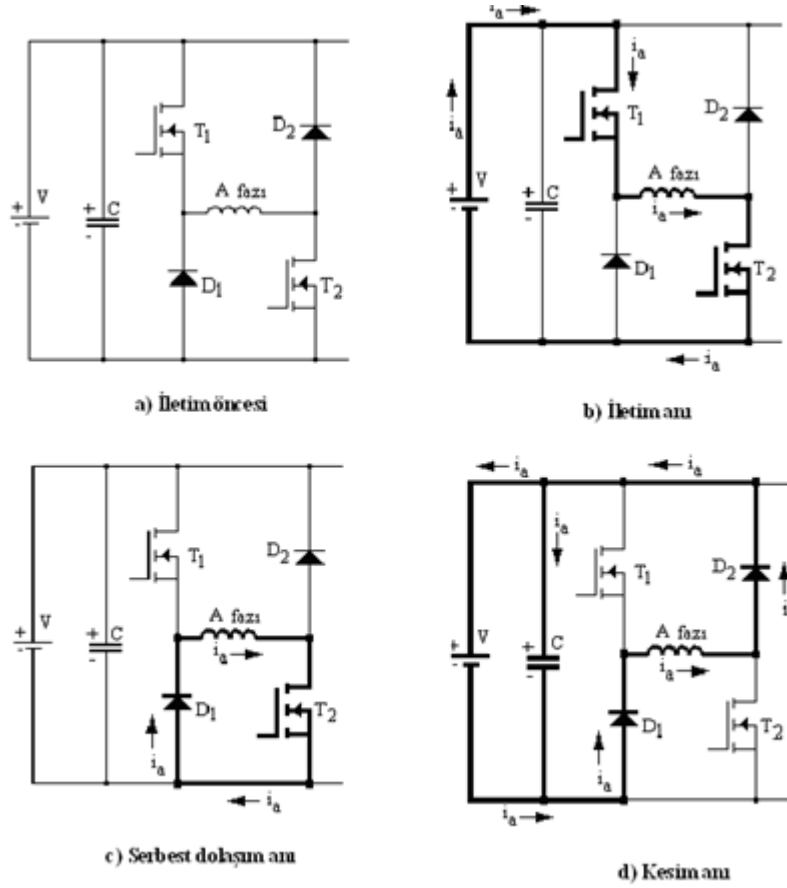
### 2.8.1. Klasik İki Anahtarlı Besleme Devresi

Bu besleme devresinde, ARM'nin her bir fazına ait sargıların giriş ve çıkış uçlarının her birine, bir adet anahtarlama elemanı takılır. Şekil 2.7.'de dört fazlı ARM için klasik iki anahtarlı besleme devresi verilmiştir (Krishnan, 2001).



Şekil 2.7. Dört fazlı ARM için klasik iki anahtarlı besleme devresi

Şekil.2.7'de  $V$  DA gerilim kaynağını,  $C$  kondansatörü,  $T_1, T_2, \dots, T_8$  anahtarlama elemanlarını ve  $D_1, D_2, \dots, D_8$  ise diyotları ifade etmektedir. Buna göre bu devreden akan akımlar anahtarın iletimde ve kesimde olması durumlarına göre sırasıyla; iletim öncesi, iletim anı, serbest dolaşım anı ve kesim anı olmak üzere Şekil.2.8.'de gösterilmiştir.

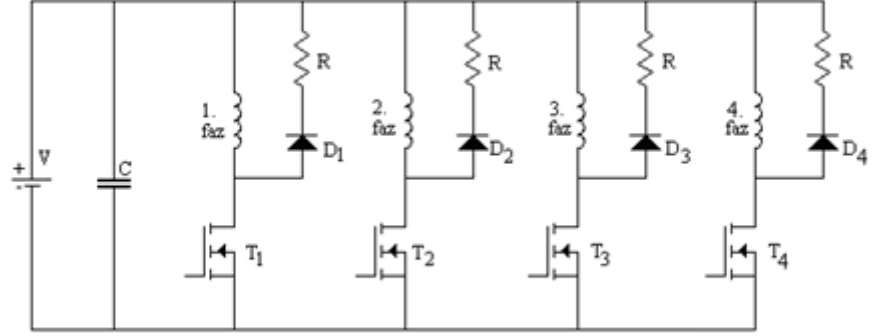


Şekil.2.8. Klasik iki anahtarlı ARM besleme devresinin bir fazı için akım akış durumları

Şekil.2.8.(a)'da gösterildiği gibi iletim öncesinde besleme devresinden ve sargılardan herhangi bir akım akmaz. Anahtarların ikisi aynı anda tetiklendiğinde yani iletim anında Şekil.2.8.(b), sırasıyla  $T_1$  anahtarı, A fazına ait sargı,  $T_2$  anahtarı üzerinden bir  $i_a$  akımını akar. Şekil.2.8.(c)'de ise serbest dolaşım anında sargı üzerindeki akım dolaşımını gösterilmiştir.  $T_1$  ve  $T_2$  anahtarlarının her ikisi de kesime geçtiğinde (Şekil.2.8.(c)), sargı üzerinde biriken enerji diyotlar üzerinden gerilim kaynağına akar (Krishnan, 2001).

## 2.8.2. Boşalma Dirençli Besleme Devresi

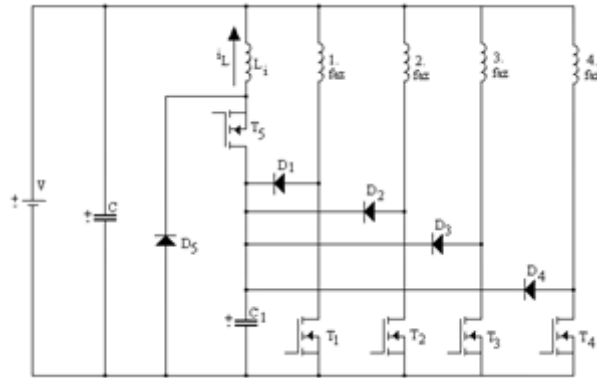
ARM besleme devreleri arasında en ekonomik ve basit olanıdır. Her bir fazın sargısına paralel olarak bir adet direnç ve diyot bağlanır. Bu besleme devresinde en önemli nokta, uygun direnç değerinin seçimidir. Direnç değerinin doğru seçilmemesi durumunda anahtarlama elemanlarında yüksek gerilim farklarının oluşması, güç kaybı ve güç verimliliğinde düşüşler görülür. Şekil.2.9.'da dört fazlı ARM için boşalma dirençli besleme devresi verilmiştir.



Şekil 2.9. Dört fazlı ARM için boşalma dirençli besleme devresi

### 2.8.3. Boşalma Kondansatörlü Besleme Devresi

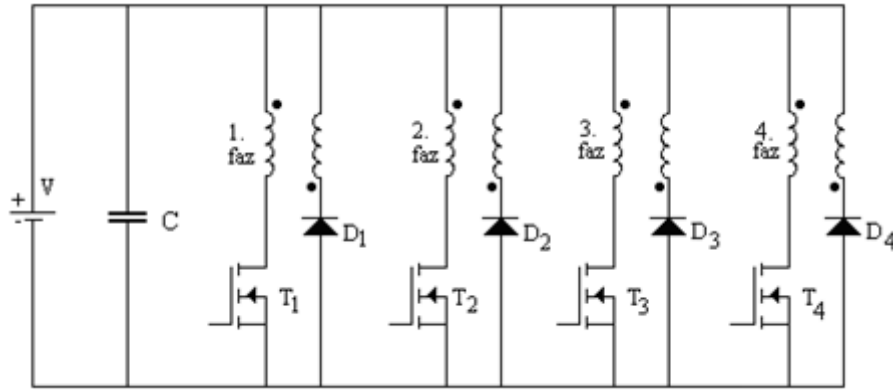
Bu besleme devresinde kesim anında sargılarda depolanan enerji doğrudan kaynağa gönderilmek yerine uygun kapasite ve gerilim değerindeki bir kondansatöre depolanır. Bunu gerçekleştirebilmek için fazladan bir adet kondansatör ve anahtarlama elemanı kullanılır. Anahtarlama elemanı yardımıyla sargılardaki enerjinin hangi zaman aralığında kondansatöre depolanacağına karar verilebilir. Şekil.2.10.'da dört fazlı ARM için boşalma kondansatörlü besleme devresi verilmiştir. Fazladan eleman kullanıldığı için devre maliyeti artar. Bu devreler verimlidirler ve düşük kesim süresine sahiptirler. Ancak bu devrelerin anahtarlarda yüksek gerilim, maliyet artımı gibi olumsuzlukları vardır (Krishnan, 2001).



Şekil.2.10. Dört fazlı ARM için boşalma kondansatörlü besleme devresi

## 2.8.4. İki Sargılı Besleme Devresi

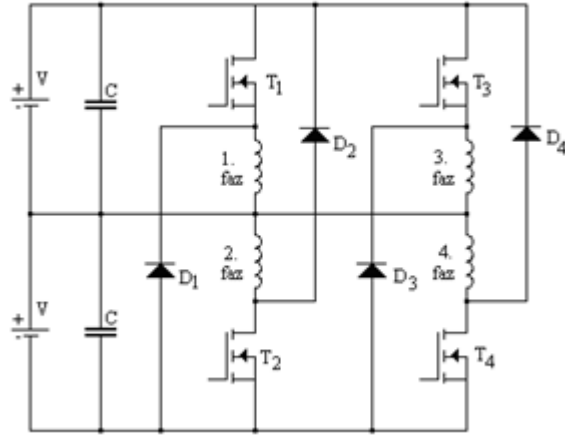
Bu besleme devresinde motor sargılarında biriken enerji bir sargı üzerinden kaynağa aktarılır. Bu durum maliyeti arttırdığı gibi beraberinde sargılar arası atlama, bağlantı sayısında artış vb. olumsuzluklara sahiptir. Şekil.2.11.'de dört fazlı ARM için iki sargılı besleme devresi verilmiştir (Krishnan, 2001).



Şekil 2.11. Dört fazlı ARM için iki sargılı besleme devresi

## 2.8.5. Orta Nokta Bağlantılı İki DA Kaynaklı Besleme Devresi

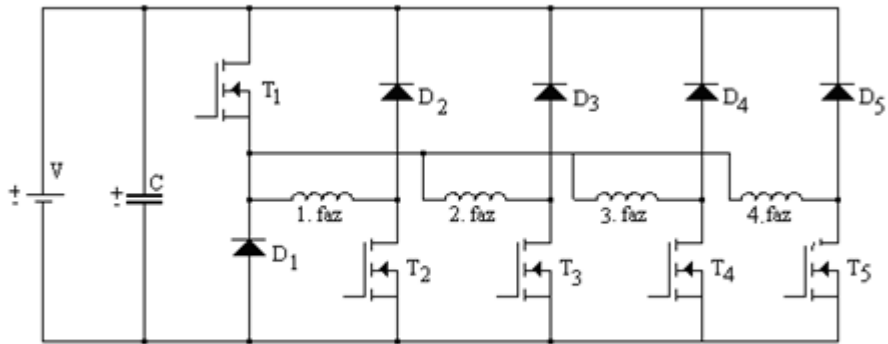
Bu besleme devresinde iki adet DA güç kaynağı kullanılır. Bu besleme devresinde alt ve üst fazların herhangi birisinde arıza meydana geldiğinde, diğer faz da bu durumdan etkilenir. Dolayısıyla bu besleme devresinde fazlar birbirinden tamamıyla bağımsız değildir. Şekil.2.12.'de dört fazlı ARM için orta nokta bağlantılı iki DA kaynaklı besleme devresi verilmiştir (Krishnan, 2001).



Şekil 2.12. Dört fazlı ARM için orta nokta bağlantılı iki DA kaynaklı besleme devresi

### 2.8.6. Miller Besleme Devresi

Bu besleme devresinde sargılarda biriken enerji bir anahtarlama elemanı ve diyot yardımıyla kaynağa gönderilir. Dolayısıyla bu anahtarlama elemanı ve diyotun çalışma gerilim-güç aralıkları fazlar için kullanılan elemanlardan daha yüksek olmalıdır. Yüksek güçlü elemanların maliyetinin yüksekliği miller besleme devresinin olumsuzluklarından biridir. Bir diğer olumsuzluğu ise fazların birbirinden tamamen bağımsız olmamasıdır (Krishnan, 2001). Şekil.2.13.'te dört fazlı ARM için Miller besleme devresi verilmiştir (Krishnan, 2001).



Şekil 2.13. Dört fazlı ARM için Miller besleme devresi

## 2.9. ARM Deney Düzeneğinin Tasarımı

Bu bölümde, önerilen ARM kontrol yönteminin gerçek bir sistem üzerinde denenebilmesi için gerekli olan ARM, baskı devre, FPGA gibi deney düzeneği elemanlarının tasarımlarına ve teknik detaylarına ilişkin bilgiler verilmektedir. Deney düzeneğinde kullanılan baskı devrelerin tamamı motora ve bu çalışmaya özgün olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Sadece işlem birimi olarak kullanılan FPGA ve ARM dışarıdan temin edilmiştir. Baskı devre tasarımında dikkat edilmesi gereken elektromanyetik uyumluluk (EMU) ve tasarım kuralları hakkında bilgi vermek amacıyla öncelikle bu kurallardan bahsedilmiştir. Daha sonra sırasıyla IGBT sürme devresi, akım ve gerilim algılama devreleri, güç devresi, snubber devresi, örtüşme-önler gerilim bölücü devre, FPGA ve ARM hakkında genel ve tasarıma özgün bilgiler verilmiştir.

## 2.10. Baskı Devre Tasarımında EMU

Baskı devreler tasarlanırken uyulması gereken birçok standart ve kural vardır. Bu kurallardan en önemli olanlar EMU kurallarıdır. Özellikle profesyonel ve ticari odaklı tasarımlarda EMU standartlarına uyma zorunluluğu vardır. Ancak her kural gibi bu kurallar da bazı önemli gerekliliklerden doğmuştur. Bu gereklilikler karşılaşılabilecek bazı önemli sinyal problemlerini önleyebildiği gibi, tasarıma bir standart kazandırmaktadır. Motor kontrol uygulamalarında olduğu gibi, yüksek akım ve gerilimlerin zayıf elektrik sinyalleri ile kontrol edildikleri uygulamalarda elektromanyetik bağışıklık ayrı bir önem kazanmaktadır. Bu sebeple baskı devre tasarımında dikkat edilmesi gereken kuralların belirlenmesine ve tasarımın buna göre yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu kurallar temel olarak şu şekilde sıralanabilir (Archambeault ve Drewniak, 2013).

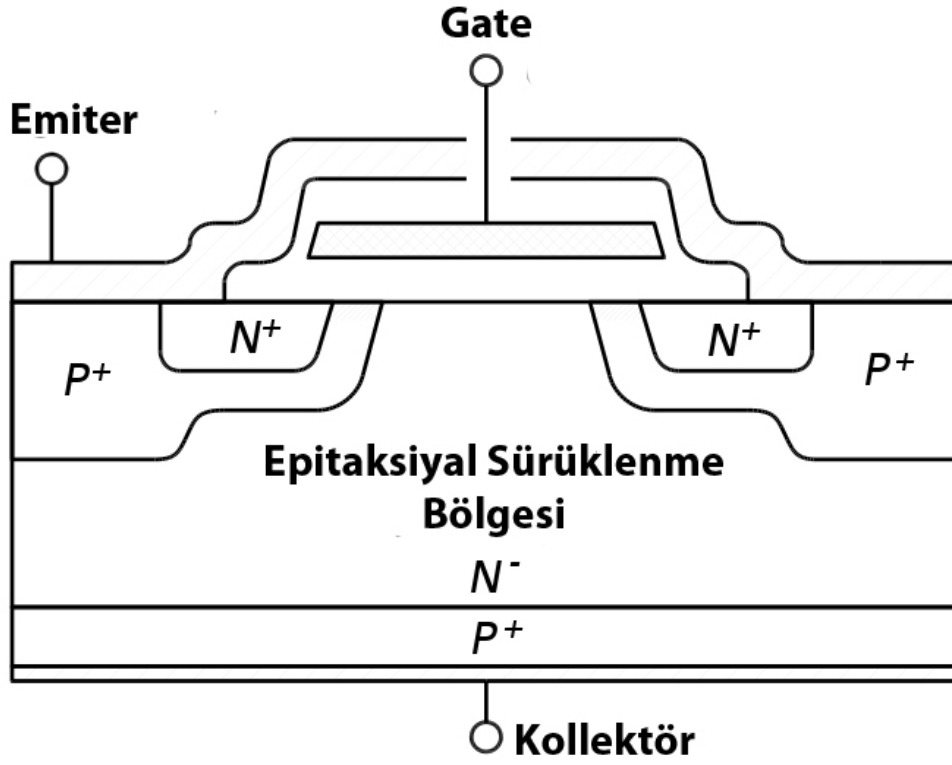
- Devre yolları çizilirken elektromanyetik girişime sebebiyet verecek 90° lik keskin dönüşlerden mümkün olduğunca kaçınılmalıdır.
- Yüksek frekansta çalışan elemanlar (cpu, quartz kristal vb.) mümkün olduğunca diğer devre elemanlarından yalıtılmalıdır.

- Mümkün olduğunca toprak yüzeyleri her bir elemanın ve bağlantılı olduğu yolların altına yerleştirilmelidir.
- PCB zerindeki toprak yüzeyi arttırmak için elemanların baskı devre üzerindeki konumları ve bağlantıları mümkün olduğunca iyi düzenlenmelidir.
- İki veya daha fazla katmanlı baskı devrelerde toprak yüzeyin yapılacağı yerlerde geçiş deliği kullanılarak diğer tabakaya geçilmelidir.
- Geçiş delikleri, aralarında en az 0.5 inch olacak şekilde yerleştirilmelidir. Bu delikler en az 0.4 mm kalınlıktaki yollarla birbirine bağlanmalıdır. Bu tasarım, bir Faraday kafesi gibi davranarak 5 Ghz'e kadar olan frekanslara karşı bağışıklık sağlar.
- Çok katlı devrelerde g ve toprak yolları birbirine komşu yapılmalı veya ayrı yüzlerde gruplandırılmalıdır.
- Yüksek alışma frekansına sahip entegre devrelerin altına mutlaka toprak döşenmelidir.
- Geçiş delikleri kullanılarak her bir yüzeyde toprak yüzeyleri birleştirilmelidir.
- Aynı devre yollarına ait toprak yüzeyleri birbirlerine düşük empedanslı elemanlarla bağlanmalıdır.
- Baskı devrede analog, dijital ve g sinyallerinin birbirlerinin devresine girmesi önlenmelidir. Böylelikle hem kullanılacak devre yolu konusunda hem de tasarımın gruplandırılması konusunda avantaj sağlanır.
- Devredeki toprak yollarını çalışılan dalga boyunun yirmide birinden kısa tutmak radyasyon yayılımının az olmasını ve düşük empedans sağlar.
- Toprak hattı tüm konnektörlerin olduğu yerlerin çevresine yerleştirilerek bir izolasyon duvarı sağlanmalıdır.
- Dijital sinyal yolları mümkün olduğunca kısa tutulmalı ve bir toprak hattı bunlara komşu yapılmalıdır. Tasarımlarda genel olarak en düşük değerlikli bit kullanıldığından toprak hattı bu bit değerinin taşıyan devre yoluna yakın olmalıdır.
- Toprak döngülerinden kaçınılmalıdır. Bu döngüler radyasyon yayım kaynağı olabilmektedir
- Toprak hattı olabildiğince g grubunun ve diğer elemanların altına yayılmalıdır.
- Güç kaynağı daima devrenin güç giriş noktasına yakın yerleştirilmeli ve g hatları olabildiğince kısa tutulmalıdır.

- Büyük kapasitelere daima bir veya iki yüksek frekanslı kondansatör paralel bağlanmalıdır.
- Seramik kondansatörler işlemciyi kuplajlamak için kullanılmalıdır ve işlemcinin güç bacağına olabildiğince yakın bir konuma yerleştirilmelidir.
- Hızlı anahtarlama akımlarını taşıyan devre yolları diğer yollardan mümkün mertebe uzak tutulmalı veya aralarından toprak yolları geçirilmelidir.
- Daima güç ve toprak hattı birbirine yakın ve paralel yapılmalıdır. Eğer tasarım çok katlı ise bir yüzeyden güç sinyali, diğer yüzeyden toprak götürülmelidir.
- Besleme akımlarını taşıyan anahtarlama sinyali taşıyan yollara paralel yapılmamalıdır.
- Mümkün mertebe devrenin ihtiyaç duyduğu güç ve frekans aralığında tasarım yapılmalı, bu sınırların dışına çıkılmamalıdır.
- Baskı devre üzerindeki tüm yollar olabildiğince kısa ve geniş tutulmalıdır.

### **2.11. IGBT Sürme Devresi**

IGBT'ler (Insulated Gate Bipolar Transistor) transistör, FET ve MOSFET gibi yarı iletken anahtarlama elemanlarıdır. Özellikle güç devrelerinde tercih edilirler. Farkları çok yüksek akım ve gerilimlerde yüksek hızlarda anahtarlama yapabilmeleridir. IGBT hem güç hem de çalışma frekansı aralığı için dengeli bir çözüm oluşturur. Gerilim kontrollü elemanlardır. Şekil 2.14.'te IGBT kesiti gösterilmektedir.

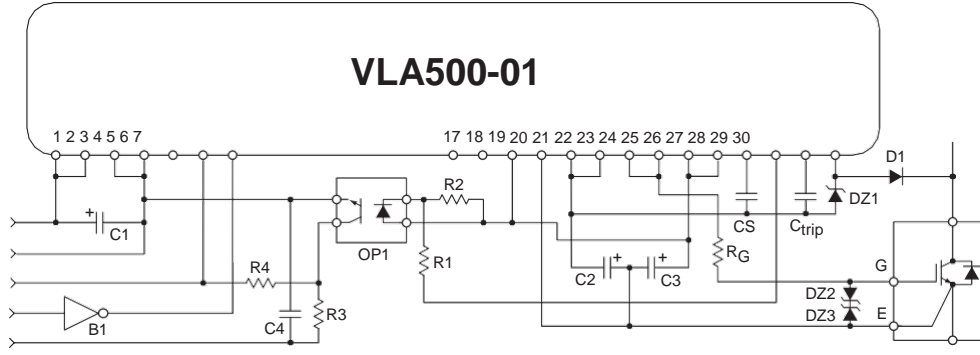


Şekil 2.14. IGBT kesiti

IGBT'ler için genel sürme devreleri mevcut olduğu gibi IGBT'ye has sürme devreleri de mevcuttur. Bu çalışmada Resim 2.1.'de gösterilen Fuji Electric firmasına ait VLA500-01R IGBT sürme entegre devresi kullanılmıştır. Şekil 2.15.'te bu entegreye ait sürme devresi yardımcı devre elemanları ile birlikte verilmiştir.

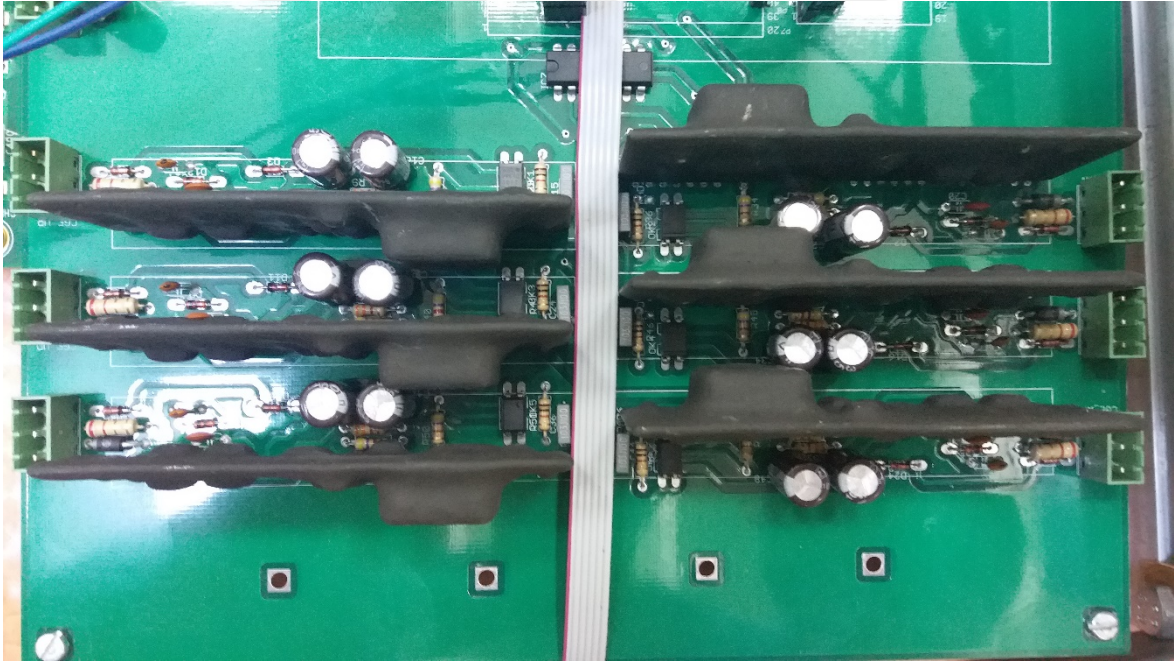


Resim 2.1. VLA500-01R IGBT sürme entegresi



Şekil 2.15. VLA500-01R IGBT sürme devresi

Baskı devre üzerindeki toplam 6 adet IGBT'ye ait sürme blokları Resim 2.2.'de gösterilmiştir.

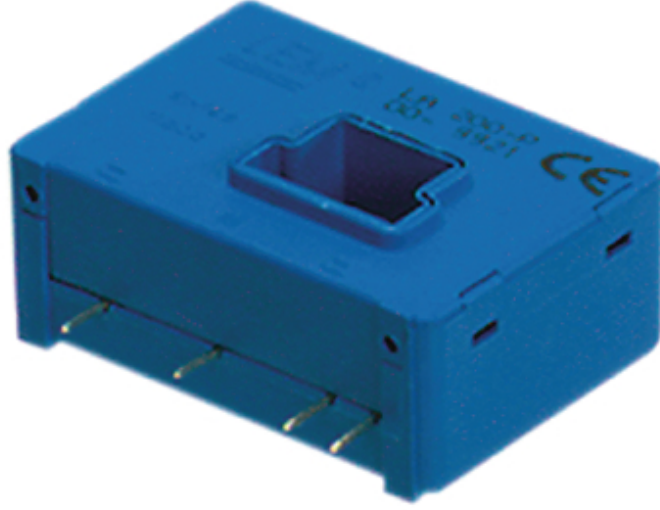


Resim 2.2. Baskı devre üzerindeki IGBT sürme blokları

## 2.12. Akım ve Gerilim Algılama Devreleri

Konum ölçsüz kontrolde algoritmanın doğası gereği anlık akım ve gerilim değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple akım ve gerilim ölçerlere ve bunların kalibrasyonu için de yardımcı devre elemanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Kullanılan akım

ölçerler LEM firmasına ait LA 200-P modeli olup Resim 2.3.'de gösterilmiştir. Gerilim ölçerler ise yine LEM firmasına ait LV 25-P modeli olup Resim 2.4.'de gösterilmiştir.

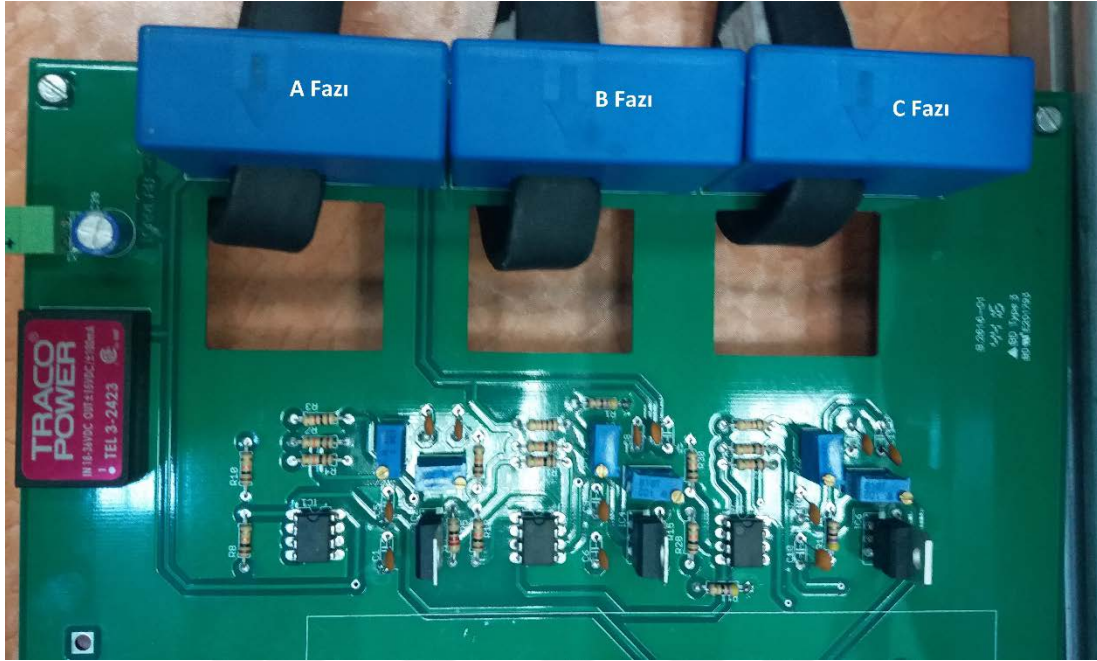


**Resim 2.3.** LA 200-P akım ölçer



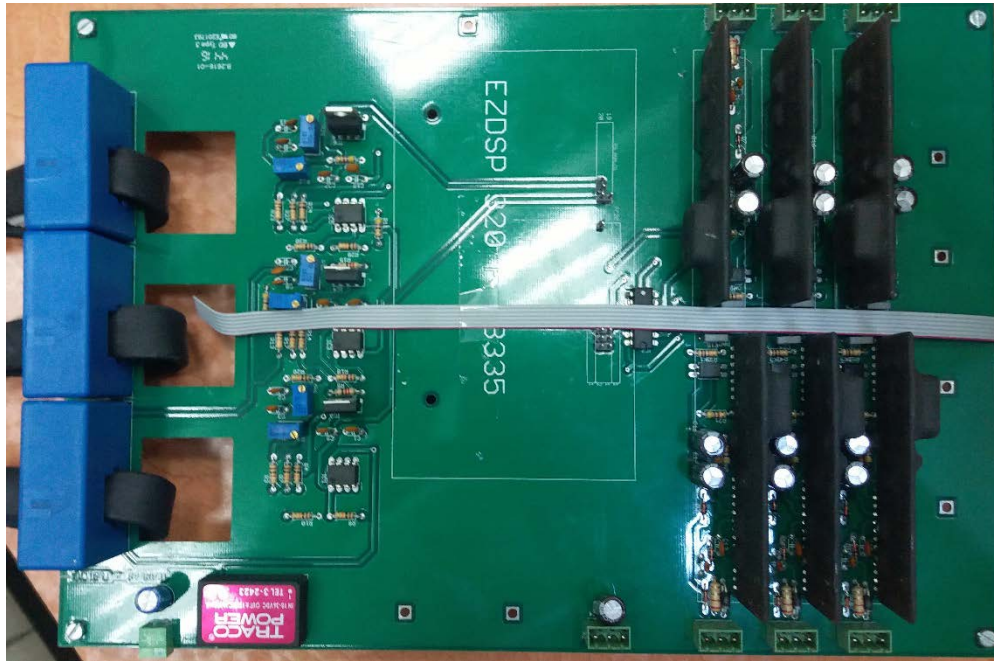
**Resim 2.4.** LV 25-P gerilim ölçer

Baskı devre üzerindeki akım ölçer bloğu Resim 2.5.'de gösterilmiştir.

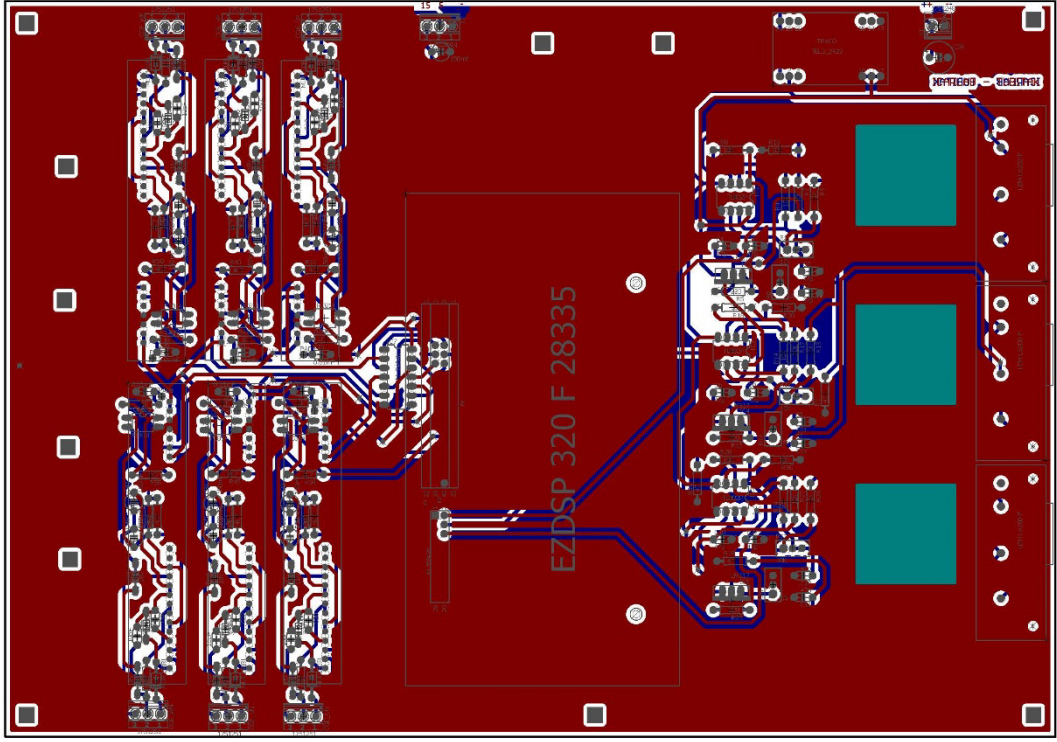


Resim 2.5. Baskı devre üzerinde akım ölçer blokları

Tasarlanan baskı devre Resim 2.6.'da gösterilmiştir. Resim 2.7.'de ise AutoDesk EAGLE Cad çizimi verilmiştir.



Resim 2.6. Baskı devre



Resim 2.7. Baskı devrenin AutoDesk EAGLE Cad çizimi

### 2.13. Güç Devresi

Güç devresi converter olarak da bilinir. Bu çalışmada klasik iki anahtarlı besleme devresi Resim 2.8.'de gösterilen Mitsubishi Electric Corporation firmasına ait CM600MA-24A model IGBT'ler ve Resim 2.9.'da gösterilen Micro Commercial Components firmasına ait MF300U12F2 model diyotlar kullanılarak tasarlanmıştır.

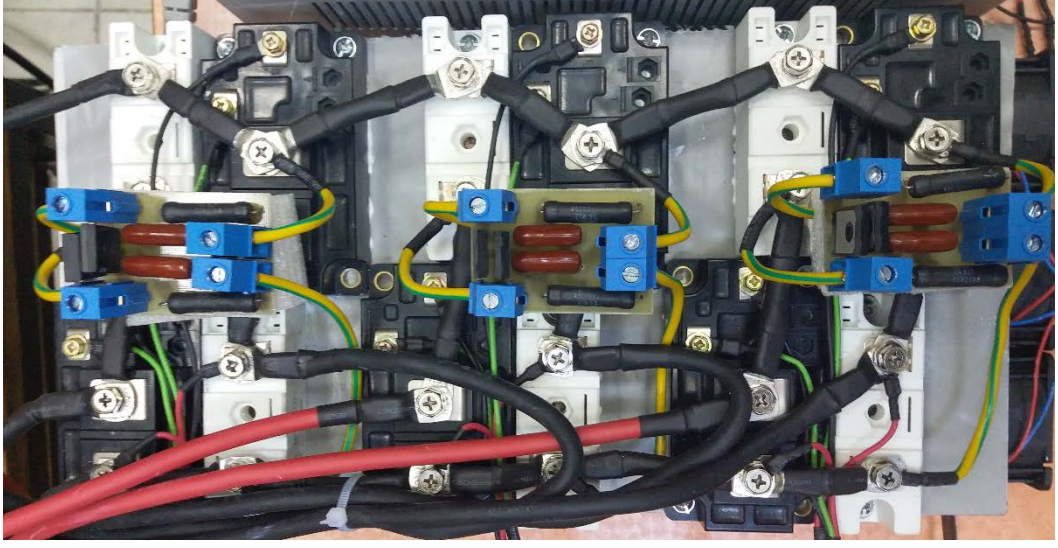


**Resim 2.8.** CM600MA-24A model IGBT



**Resim 2.9.** MF300U12F2 model diyot

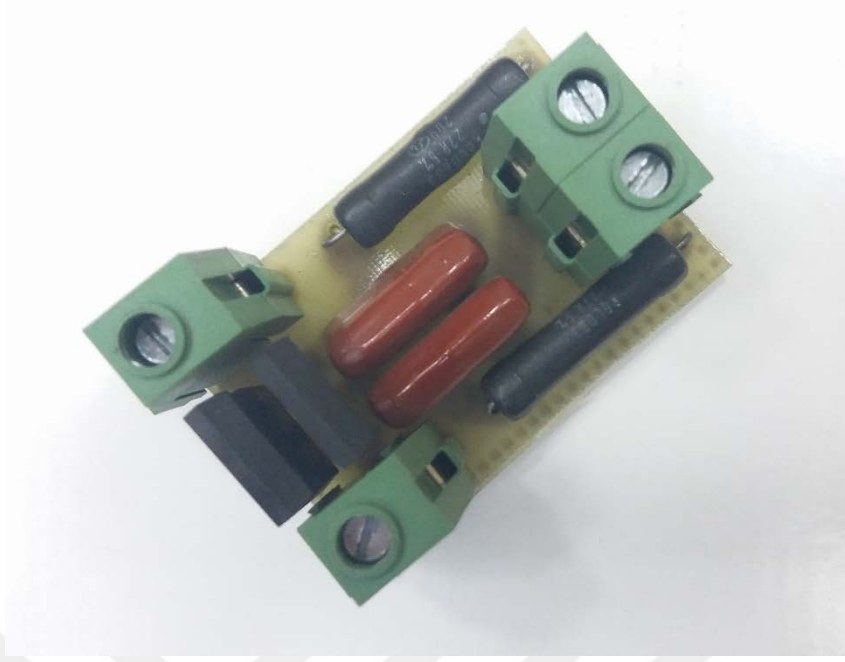
Güç devresi Resim 2.10.'da gösterilmiştir.



Resim 2.10. Güç devresi

## 2.14. Snubber Devresi

Snubber devreleri; koruma amaçlı kullanıldıkları gibi anahtarlama kayıplarını ve geçici rejim esnasındaki taşmaları azaltmak için de kullanılır. IGBT gibi anahtarlama elemanları, anahtar uçlarında kesime girerken hızlı bir gerilim yükselmesine ve ilettime girerken de hızlı bir akım yükselmesine maruz kalırlar. Bu etkileri azaltmak için ARM güç devresine her bir anahtar için bir direnç, bir kondansatör ve bir diyottan oluşan snubber devresi eklenmiştir. Bir faz için güç devresinde toplam iki adet IGBT kullanıldığından bir snubber modülü iki adet snubber devresinden oluşmaktadır. Resim 2.11.'de tasarlanan snubber modülü gösterilmiştir.

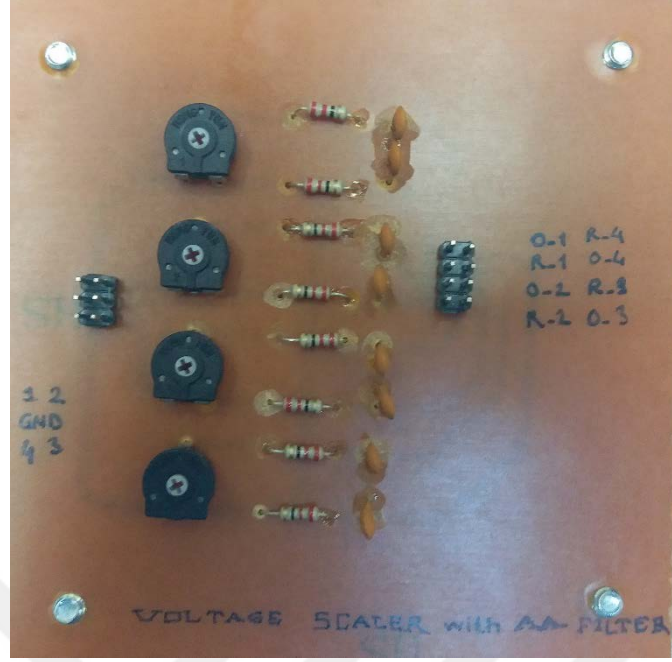


**Resim 2.11.** Snubber modülü

Snubber devresinde kullanılan diyotlar IXYS firmasına ait DSEI120-12A model diyotlardır.

### **2.15. Filtreli Gerilim Bölücü Devre**

Akım ve gerilim ölçerlerden analog-dijital çevirici devreler yardımıyla veri elde edilir. Her bir işlemci üreticisi ürettikleri geliştirme kartlarına ADD (Analog-Dijital Dönüştürücü) diye tabir edilen özel devre ve yazılım blokları yerleştirir. Geliştirme kartına göre bu ADD'lerin ölçebildikleri maksimum gerilim değeri değişebildiğinden, hem bu durumu bertaraf edebilmek için hem de ölçülecek olan sinyali dış etkilere karşı bağışık hale getirmek için bir adet dört girişli/çıkışlı filtreli gerilim bölücü devre tasarlanmıştır. Tasarlanan bu devrenin gerilim bölme oranı ayarlanabilir olarak tasarlanmıştır. Ayrıca bu devre, Xilinx FPGA'lerin maksimum 1 Volt ölçme kapasitesine sahip ADD'leri için uygun bir örtüşme-önler filtreye sahiptir. Tasarlanan devre Resim 2.12.'de gösterilmiştir.



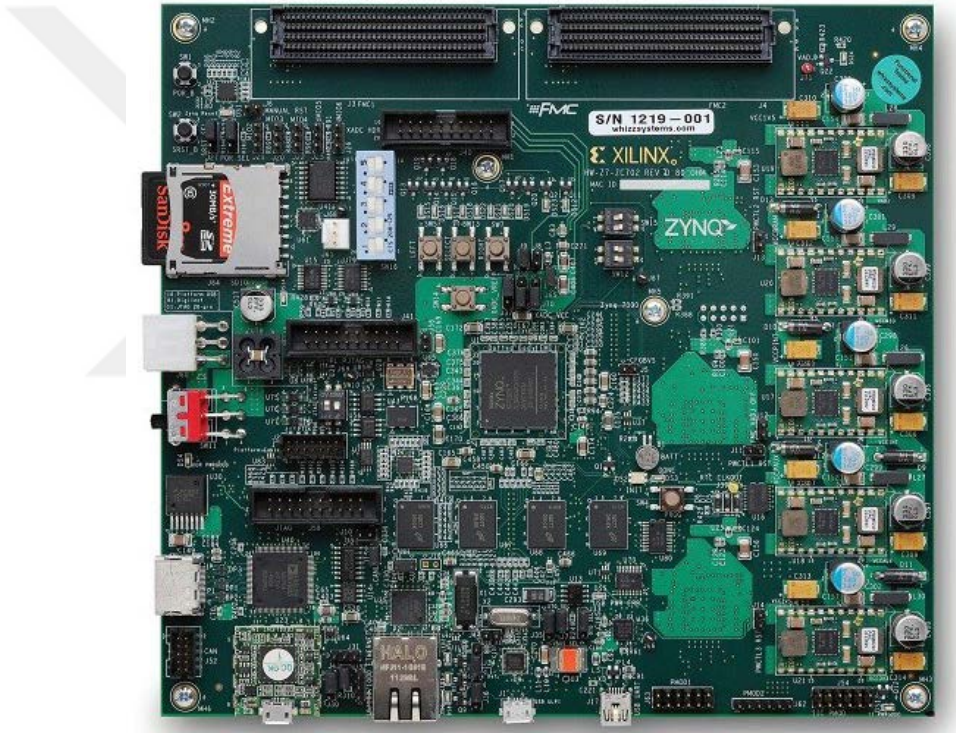
Resim 2.12. Örtüşme-önler gerilim bölücü devre

## 2.16. FPGA

FPGA, Field Programmable Gate Array ifadesinin kısaltması olup paralel işlem yapabilme kapasitesine sahip yüksek hızlı elektronik cihazdır. DSP'lerden en önemli farkı ve üstünlüğü paralel işlem yapabilme yeteneğidir. FPGA'ler buna ek olarak sahada programlanabilen, tekrarlı tasarımlara uygun ve hatta içine yazılımsal olarak işlemci gömülebilen gelişmiş kartlardır. Uzay ve savunma sanayii, endüstriyel otomasyon, kontrol sistemleri, elektrik makineleri, otomotiv, bilişim teknolojileri, depolama, kablolu ve kablosuz haberleşme uygulamaları, tıbbi elektronik, TV ve radyo yayıncılığı, test ve ölçüm uygulamaları, tüketici elektroniği, güvenlik ve şifreleme uygulamaları FPGA'lerin başlıca kullanım alanlarıdır.

FPGA üreten ve piyasanın tamamına yakınına domine eden başlıca iki büyük üretici vardır. Bunlar Xilinx Inc. ve Altera Corp. dir. Xilinx FPGA'yi ilk üreten şirkettir. Spartan, EasyPath, Artix, Kintex ve Virtex çip ailelerine sahiptir. Xilinx firmasının ürünleri; Vivado Design Suite, Xilinx ISE, MicroBlaze, PicoBlaze, Chipscope Pro gibi geliştirme yazılımlarını kullanılarak programlanır. Altera firması ise Quartus, ModelSim, DSP Builder yazılımlarını kullandığı gibi Arria, Stratix ve Cyclone çip ailelerine sahiptir.

FPGA'leri programlamak için HDL diye tabir edilen donanım tanımlama dilleri kullanılır. Kullanılan donanım tanımlama dillerinden ilki VHDL (Very High-Speed Integrated Circuit Hardware Description Language) 1970'lerin başında geliştirilmeye başlanmıştır ve 1993'te yeni bir standarda kavuşmuştur. Diğer bir donanım tanımlama dili de Verilog'tur. Hangi donanım tanımlama dili kullanılırsa kullansın, FPGA ile yapılan işin aslında bir programlamadan ziyade bir donanım tasarımı olduğu unutulmamalıdır. Bu sebeple geliştirici, programlama dilinin yanı sıra temel elektronik ve donanım bilgisi ile lojik mantık bilgisine de hâkim olmalıdır. Bu çalışmada Xilinx firmasının ZYNQ serisinden ZC702 FPGA geliştirme kiti kullanılmıştır. Resim 2.13.'te bu kit gösterilmiştir.

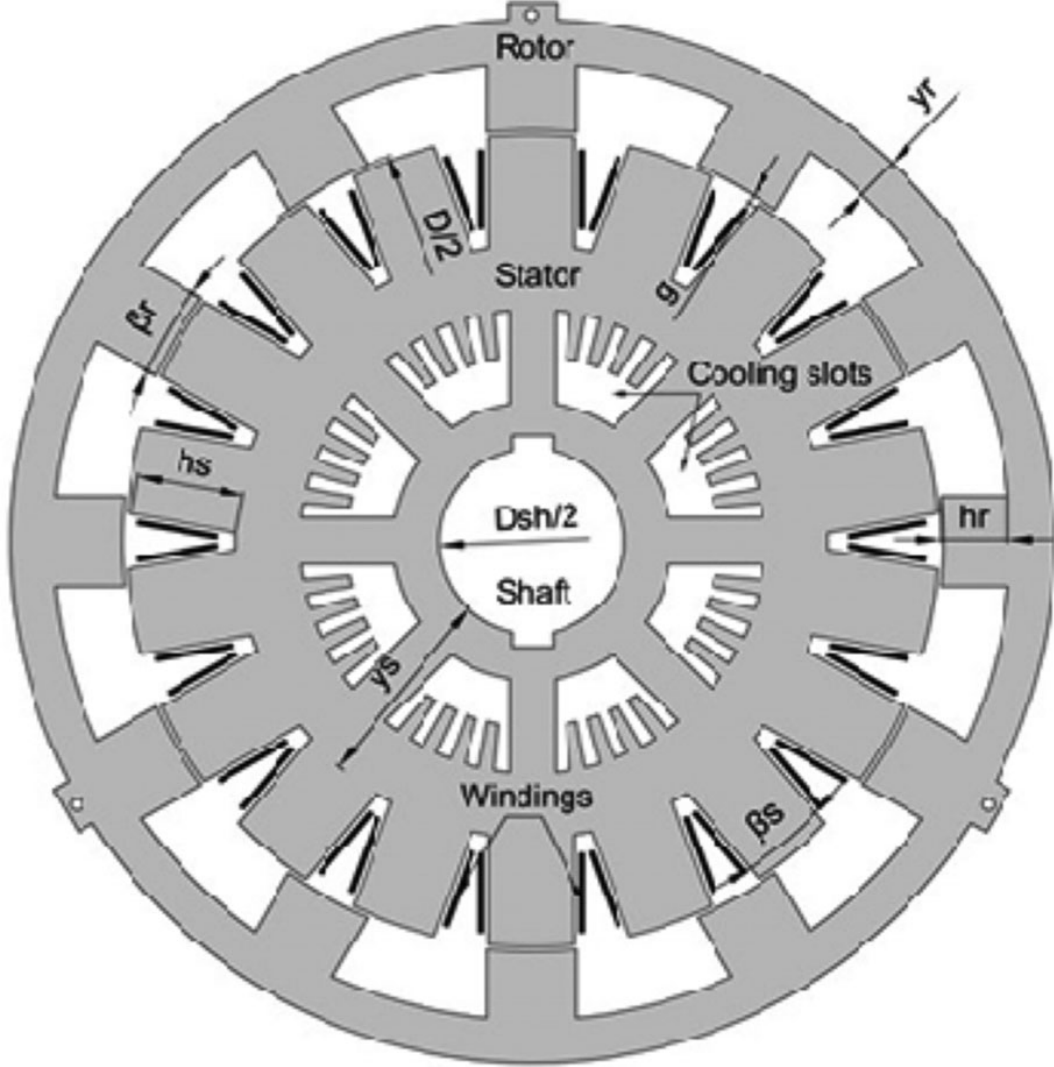


**Resim 2.13.** Xilinx ZYNQ ZC702

## 2.17. ARM

Bu çalışmada kullanılan motor 18/12 kutuplu üç fazlı ters ARM olup 4x4 bir elektrikli araç için tasarlanmıştır. Dolayısıyla rotoru dışarda statoru içerdedir. Stator ve rotor sacları Şekil 2.16.'da verilmiştir. Ayrıca motor içindeki faz sargıları Resim 2.14.'te gösterilmiştir. Kontrolde kullanılan elektromanyetik karakteristik değerleri bu motora ait

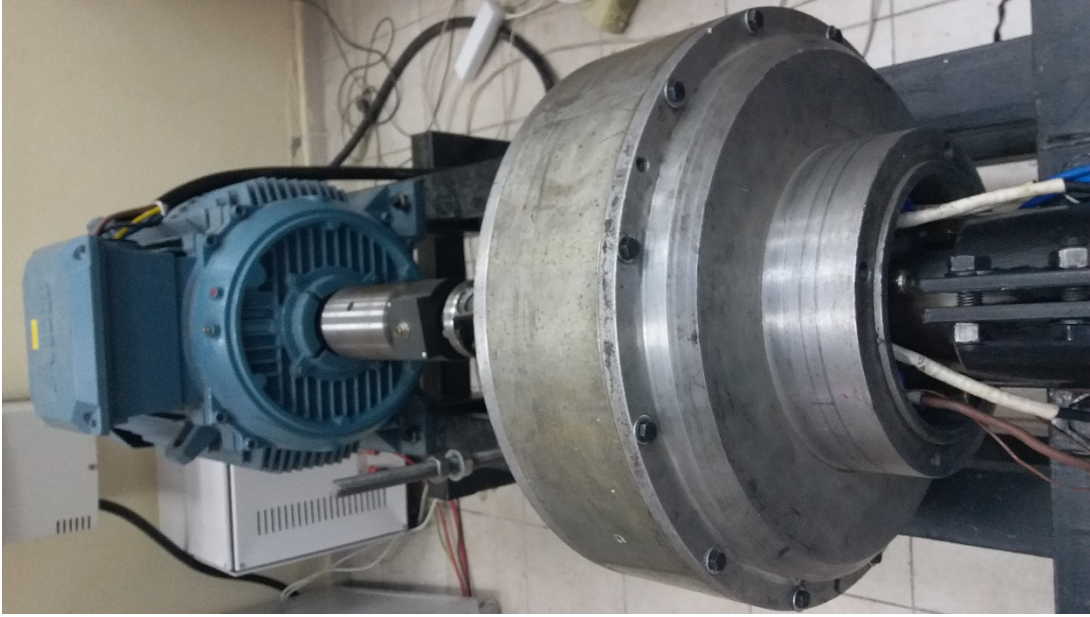
olup, ANSYS Maxwell yazılımında gerçekleştirilen SE benzetiminden elde edilmiştir. Resim 2.15.'te ise 37 kW'lık bir indüksiyon motoruna akuple edilmiş ARM görülmektedir.



Şekil 2.16. ARM stator ve rotor sacları



**Resim 2.14.** 18/12 kutuplu üç fazlı ters ARM



**Resim 2.15.** ARM ve akuple edilmiş indüksiyon motoru

Deney düzeneğinde kullanılan bazı araç, gereç ve cihazların listesi Tablo 2.1.'de verilmiştir.

**Tablo 2.1.** Deney düzeneğinde kullanılan bazı araç, gereç ve cihazlar

<b>Araç, gereç veya cihaz</b>	<b>Değeri</b>
ARM	18/12 üç fazlı
Yük motoru	37 kW indüksiyon motoru
FPGA	Xilinx ZYNQ ZC702
Güç kaynağı	24V DC Ayarlanabilir
Trafo	3x220 30 KVA
Üç fazlı doğrultucu	IXYS VUO 162-16
IGBT	CM600MA-24A
Güç diyodu	MF300U12F2
Snubber diyodu	DSEI120-12A
Akım ölçer	LA 200-P
Gerilim ölçer	LV 25-P
IGBT sürücü entegresi	VLA500-01R
Opticoupler	NEC 2501
DA-DA dönüştürücü	TRACO TEL 3-2423
Hex inverter entegre	24HC04
Ayarlanabilir voltaj regülatörü	LM317
Op-amp	TL082P
Direnç	Muhtelif
Kondansatör	Muhtelif

### **3. BULGULAR**

#### **3.1. Giriş**

Farklı uygulama amaçları için farklı özellik ve boyutlarda ARM'ler kullanılır. ARM seçimi motordan üretmesi beklenen moment, ulaşması gereken hız gibi değişkenlere bağlı olarak yapılır. Bu sebeple öncelikle uygun boyut ve özelliklerde bir ARM seçimi yapılır. Daha sonra seçilen ARM'nin etkin ve verimli şekilde kontrolünün yapılması gerekir. ARM kontrolünde, mekanik konum ölçer kullanmak yerine matematiksel veya elektronik bir yöntemden faydalanarak yapılan kontrole konum ölçersiz kontrol denir. Günümüzde literatürde birçok farklı konum ölçersiz kontrol yöntemi mevcuttur. Yıllar boyu teknikte yaşanan gelişme ve ilerlemelere rağmen, bu kontrol yöntemlerinin hiç biri konum ölçerli kontrol yöntemleri kadar yetkin kontrol imkânı sağlayamamaktadır. Bu bölümde mevcut konum ölçersiz kontrol yöntemleri, temel avantaj ve dezavantajları incelenmiş, referans akı yöntemi ile konum ölçersiz ARM kontrolünün MATLAB/Simulink benzetimi açıklanmıştır. Ek 1'de bu çalışmada kullanılan yazılımların genel listesi verilmiştir.

#### **3.2. Konum Ölçersiz Kontrol**

ARM'ler basit yapılarıyla, değişken hız gerektiren uygulamalarda fırçasız DA motorları ve indüksiyon motorlarına farklı bir alternatif olabilir. Ancak ARM'den maksimum performans alabilmek için faz uyarımlarının doğru sıra ve zamanda yapılması gerekmektedir. Dolayısıyla ARM kontrolünde rotor konumunun tespiti büyük önem arz etmektedir. Rotor konumunun tespitinde genellikle bir konum ölçer kullanılır. Optik konum ölçer, encoder, Hall sensörü bu amaçla kullanılan başlıca sensör tipleridir. Ancak özellikle son yıllarda, başlıca iki temel sebepten ötürü konum ölçersiz kontrole duyulan ilgi artmaktadır. Bunlar, maliyet ve zorlu koşullarda çalışma ihtiyacıdır.

Düşük maliyet gerektiren ARM sürücü tasarımlarında, konum ölçer sensörler önemli bir harcama kalemidir. Bu duruma ek olarak, motorun kullanılacağı çalışma koşullarının sertliği (yüksek basınç ve sıcaklık gibi) konum ölçer kullanımını

sıkıntıya sokabilmektedir. Ayrıca sınırlı çalışma alanı gerektiren uygulamalar, konum ölçer kullanımının ek kablolu ve bakım gerektirmesi gibi nedenler konum ölçersiz kontrole duyulan ihtiyacı artırmaktadır (Krishnan, 2001).

### 3.3. Konum Ölçersiz Kontrol Yöntemleri

Konum ölçersiz kontrol yöntemlerinin çoğunda temel prensip, ARM'nin manyetik karakteristik eğrilerinden faydalanılarak rotor konum tespitinin yapılmasıdır. ARM'nin manyetik karakteristiği lineer değildir. Ayrıca manyetik karakteristiği, stator ve rotor kutuplarındaki manyetik doyumdan etkilenir. ARM'nin manyetik akı eğrileri incelendiğinde çakışık olmayan konumda akı değerlerinin en düşük değerini, çakışık konumda ise en büyük değerlerini aldığı görülecektir. Konuma bağlı olarak karakteristik bir değişim gösteren bu akı eğrileri fazların uyarılmalarında bir referans olarak kullanılabilir. Konum ölçersiz kontrol yöntemleri şu şekilde sınıflandırılır (Krishnan, 2001).

1. Açık çevrim konum ölçersiz kontrol yöntemleri
2. Uyarılmış faz konum ölçersiz kontrol yöntemleri
3. Uyarılmamış faz konum ölçersiz kontrol yöntemleri

Birinci gruptaki yöntemlerde kesin açı değeri hesaplanmamakla beraber, ARM açık çevrim kontrolde bir adım motoru gibi çalışır. Motor devri besleme gerilimine ve tetikleme açısı, frekansı gibi değerlere bağlı olarak değişir. Miller ve Bass'a (1986) göre, maksimum moment üretimi iletim açısı ile orantılı olarak değişirken, motor verimliliği ters orantı olarak değişmektedir. Açık çevrim kontrol yöntemlerinde geri besleme sinyali olarak besleme akımı kullanılır. Akım değerine göre iletim açısı değiştirilerek sabit moment üretimi sağlanır. Açık çevrim konum ölçersiz kontrol yöntemlerinin temel avantajları düşük maliyet ve yüksek verimliliğidir. Temel dezavantajı ise değişken hız gerektiren uygulamalarda kullanıma uygun olmamasıdır. Ayrıca bu yöntemde rotor konumu kesin olarak bilinemez. Bir başka deyişle rotor konum açısı bilinemez.

İkinci grup yöntemlerde, uyarılan fazlarda moment üreten değişkenlere (akım, manyetik akı vb.) göre dolaylı açı kestirimi yapılır. Bu gruptaki yöntemler genel olarak düşük hızdaki ARM kontrol uygulamaları için uygundur. Bu gruptaki yöntemlerden biri olan manyetik akı ve akım gözlemcisi kullanarak rotor konumu kestirimi ile yüksek doğrulukta kestirim yapılabilir. Rotor konum kestirimi için gözlemciler ve integral alıcılar gibi

büyük işlem gerektiren bileşenlere ihtiyaç duyulması sebebiyle, kontrolde kullanılan işlemcinin hızı büyük önem arz etmektedir. Bu gruptaki yöntemler, literatürde en sık rastlanan konum ölçersiz kontrol yöntemleridir.

Üçüncü grup yöntemlerde ise uyarılmamış fazlara test sinyalleri enjekte edilerek konum tespiti yapılır. Bu gruptaki yöntemlerde temel amaç, enjekte edilen test sinyali yardımıyla faz endüktansını veya sinyale bağlı olarak manyetik akıdaki değişimi tespit etmektir. Faz tetiklemeleri arasında yeterli zaman olmadığı için bu gruptaki yöntemler, yüksek hız gerektiren uygulamalarda kullanıma uygun değildir. Ayrıca faz akımları arasındaki manyetik girişimler bu gruptaki yöntemlerin kullanım alanlarını sınırlamaktadır.

### **3.4. Referans Akı Kontrol İlkesi**

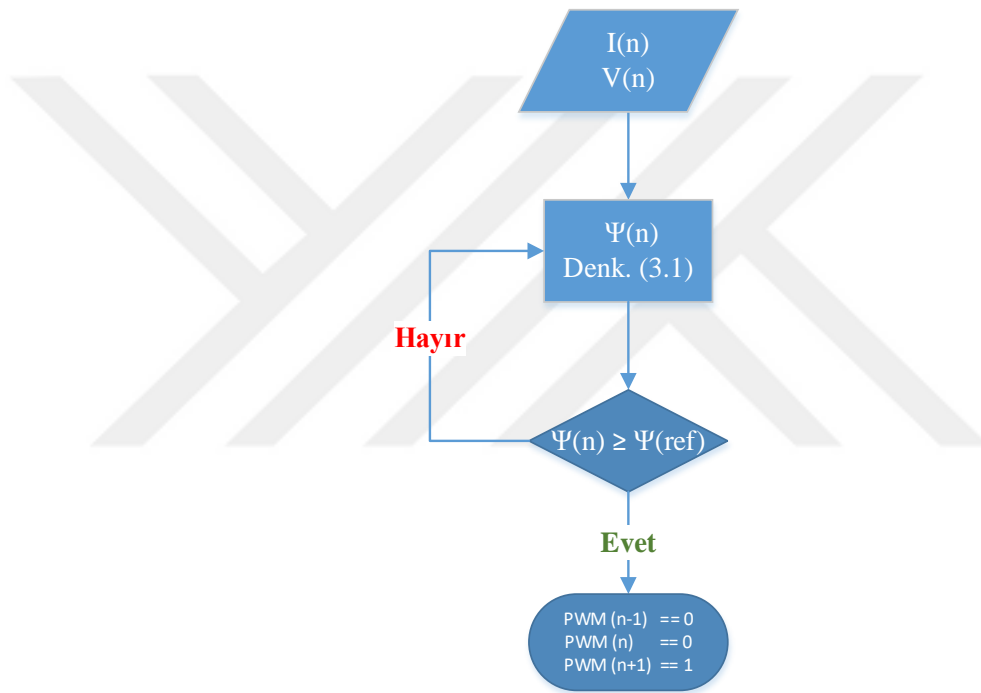
ARM kontrolü, her bir stator fazının doğru zamanlarda doğru sırayla uyarılması ilkesine dayanır. Rotor saat yönünde döndürülmek isteniyorsa stator sargıları saat yönünün tersi sırada uyarılmalıdır. Aynı şekilde rotor saat yönünün tersi yönünde döndürülmek isteniyorsa stator sargıları saat yönünde uyarılmalıdır. ARM sargıları ayrı zamanlı olarak uyarıldığı için motorun üreteceği moment de ayrı olacaktır. Bu durumda motorun üreteceği ortalama moment her bir fazın üreteceği anlık momentlerin toplamı kadar olur. Moment üretiminde yaşanan bu ayrıklık, moment dalgalanmasına neden olur. Klasik kontrolde (konum ölçerli kontrol) iletim açısını sabit tutmak ve akım genliğini değiştirmek bu dalgalanmayı azaltan yöntemlerden biridir (Omaç, 2006). Konum ölçersiz yöntemlerde ise moment dalgalılığı çok daha sık karşılaşılan bir sorundur. Referans akı ile konum ölçersiz kontrol yöntemi düşük hızlarda açık çevrim, yüksek hızlarda kapalı çevrim kontrol uygulamaları için daha uygundur. Dolayısıyla bu yöntemle hem düşük hem de yüksek hızlarda yetkin ARM kontrolü için, moment dalgalılığını azaltacak fazlardan algoritmalara gereksinim vardır. Ancak bu tezin konusu moment dalgalılığını azaltmayı kapsamadığından bu konuya değinilmeyecektir. Literatürde bu konu ile alakalı hali hazırda birçok çalışma mevcuttur (Shahabi ve ark., 2016; Husain, 2002).

Referans akı yöntemi ile konum ölçersiz kontrolde temel mantık, enerjilendirilen sargının manyetik akısını referans olarak belirlenmiş akı değeri ile anlık olarak karşılaştırmaktır. Bu karşılaştırmayı yapabilmek için motor sargılarından anlık olarak alınacak faz akım ve gerilim bilgilerine ihtiyaç duyulur. Her bir faz akısı, akım ve gerilim ölçer devreler yardımı ile ölçülen akım ve gerilim değerleri kullanılarak denklem (3.1)

yardımları ile hesaplanır. Burada  $\Psi$  manyetik akı,  $V$  faz gerilimi,  $I$  faz akımı ve  $R$  sargı direncidir (Krishnan, 2001).

$$\Psi = \int (V - I.R) dt \quad (3.1)$$

Elde edilen anlık akı değerleri önceden belirlenmiş referans akı değerleri ile karşılaştırılır. Eğer hesaplanan akı değeri, referans akı değerine eşit veya büyükse bir sonraki faz uyarılır (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Referans akı yöntemi akış diyagramı

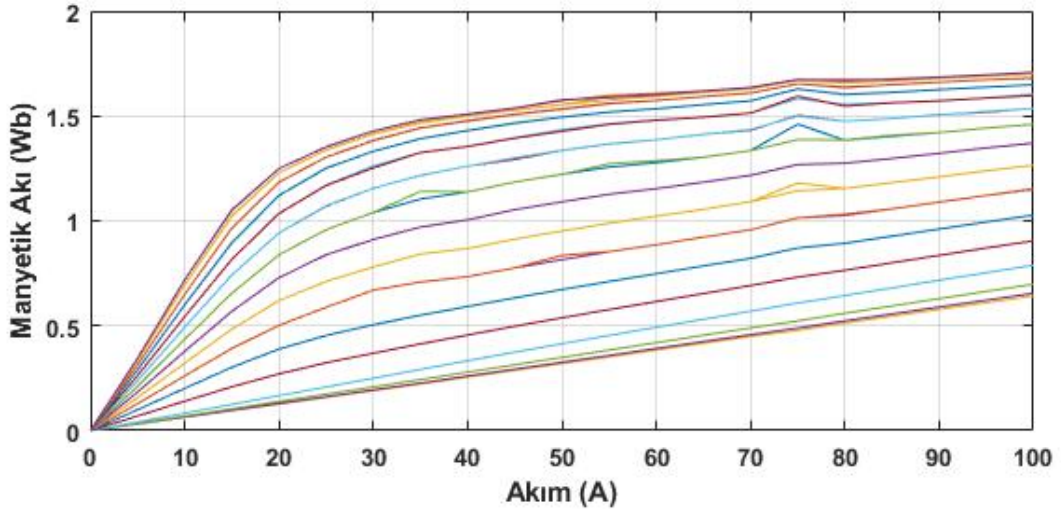
ARM’de sargı akılarının rotor konumuna, faz akımına ve faz gerilimine göre değişiklik gösterdiği denklem (3.1)’de açıkça görülmektedir. Dolayısıyla referans akı değerlerinin ARM çalışma aralığının tamamını kapsamaları gereklidir. Ayrıca yanlış referans seçimi motor hareketinin sürekliliğinin bozulmasına bir başka deyimle çakılmasına neden olur.

Klasik kontrolde ARM sargıları bir elektriksel döngü (electric cycle) boyunca uyarılır. Döngünün sonunda uyarılma sırası döngü başındaki faza gelir. Bir elektriksel döngü denklem (3.2) yardımıyla hesaplanır. Burada  $ED$  bir elektriksel döngüyü,  $Nr$  rotor kutup sayısını,  $Ns$  stator kutup sayısını ve  $q$  faz sayısını temsil eder.

$$ED = \left[ \frac{360}{N_r} - \frac{360}{N_s} \right] \cdot q \quad (3.2)$$

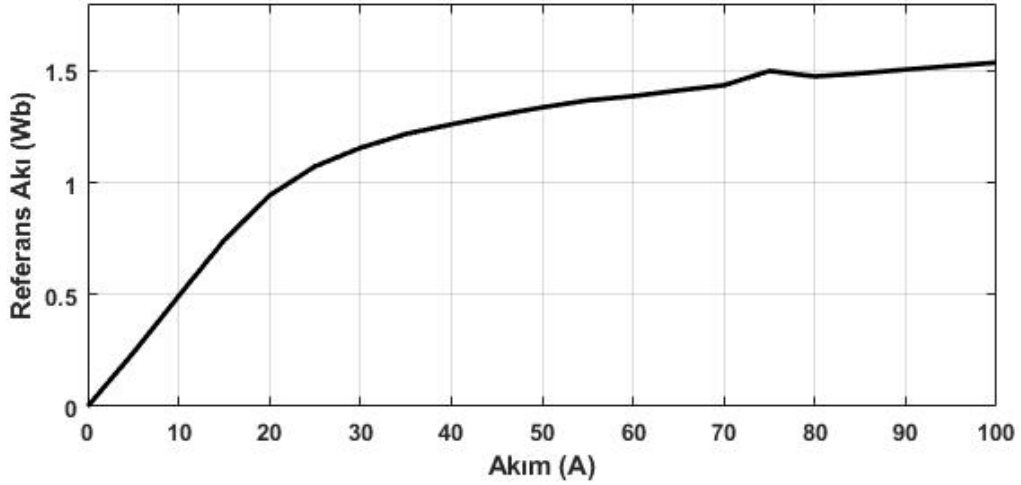
Bu tezde kontrolü yapılan üç fazlı ARM'nin rotorunda on iki, statorunda on sekiz kutup vardır. Dolayısıyla bu ARM için bir elektriksel döngü  $30^\circ$  dir. Her bir faz için düşünüldüğünde bu açı  $10^\circ$  ye karşılık gelmektedir. Referans akı belirlenirken çakışık konum elektriksel  $0^\circ$  kabul edildiğinde; ARM  $10^\circ$  yol aldığıında bir sonraki fazın uyartılması gerekir. Bu sebeple elektriksel  $10^\circ$  ye karşılık gelen akı değeri bizim referans akımız olur. Ancak bu referans akı değerinin akıma bağlı olarak değiştiği unutulmamalıdır.

ARM'nin kontrolü yapılırken ANSYS Maxwell yazılımından sonlu SE yöntemi ile elde edilen manyetik akı, endüktans ve akım değerleri kullanılmıştır. Şekil 3.2.'de bir faz için manyetik akının akıma göre farklı rotor açısı değerlerinde değişimi verilmiştir. Burada yatay eksen sargı akımını, dikey eksen faz akısını ifade etmektedir.



Şekil 3.2. Manyetik akı-akım değişimi

Kontrol için belirlenen referans akı değerlerinin akıma bağlı değişim grafiği ise Şekil 3.3.'te verilmiştir.



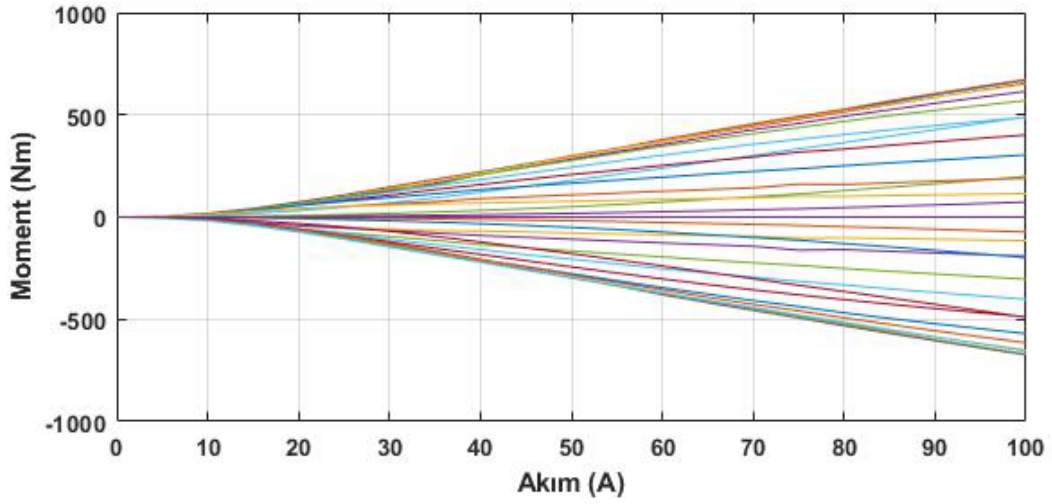
Şekil 3.3. Referans akı-akım değişimi

### 3.5. Referans Akı Yöntemi MATLAB Benzetimi

Bilgisayar benzetimi Mathworks şirketinin MATLAB/Simulink yazılımında yapılmıştır. Benzetimde öncelikle 18/12 kutuplu ARM'nin elektriksel modeli, daha sonrasında güç (converter) devresi yapılmıştır. Benzetime kontrol bloklarının eklenmesi ile önerilen yöntemin benzetimi tamamlanmıştır.

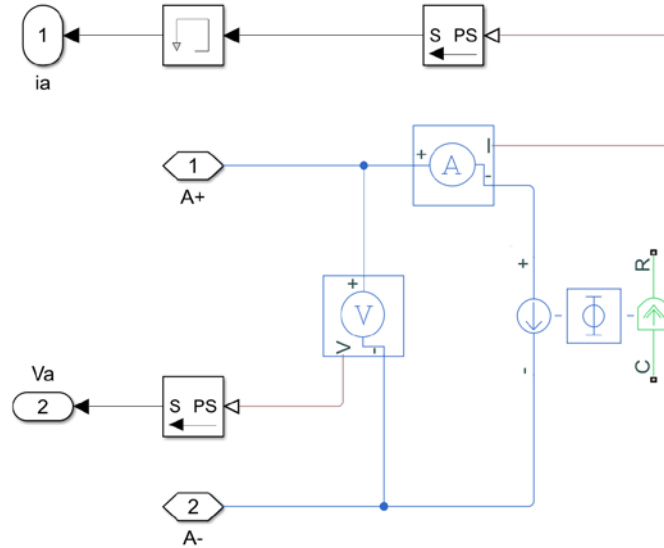
#### 3.5.1. ARM'nin Elektriksel Modeli

Yapılan yüksek lisans tez ve çalışmalarının çoğunda genellikle ARM'nin matematiksel modeli üzerinden çalışılmıştır. Ancak matematiksel model, kontrol modelindeki elektriksel bileşenlerin (IGBT, diyot vb.) davranışını tam olarak tanımlayamamakla beraber, ARM'nin kendine has akı/akım/moment karakteristiğini de yansıtamamaktadır. Bu sebeple ANSYS/Maxwell yazılımından elde edilen manyetik karakteristik değerlerini kullanarak, bir elektriksel ARM modeli tasarlanmıştır. Modelin kendisinden bahsetmeden önce, modelde kullanılan karakteristik değerleri vermek modelin yapısının anlaşılması açısından önem arz etmektedir. Şekil 3.2 de akım-akı grafiği verilmişti. Şekil 3.4'te akım-moment grafiği verilmiştir.



Şekil 3.4. Moment-akım değişimi

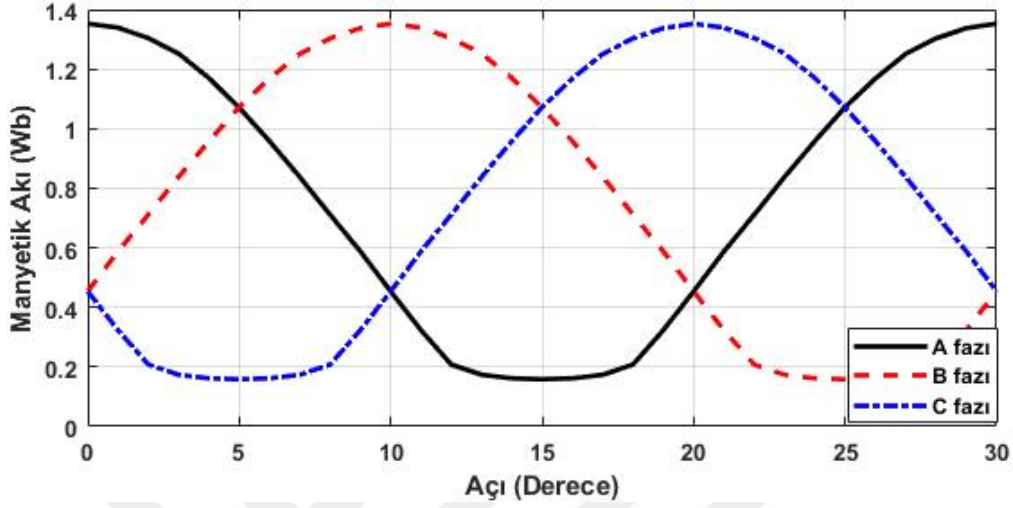
Elde edilen akı, akım ve moment değerleri açı değerleri ile beraber Şekil 3.5.'te verilen döner tahrik mekanizması bloğuna tanımlanmıştır. Bu bloktan her bir faz için bir adet olmak üzere toplamda üç adet vardır ve ARM modelinin elektriksel kısmını oluşturur. Şekil 3.5.'te  $i_a$  faz akımını,  $V_a$  faz gerilimini, A+ faz sargısının pozitif ucunu ve A- faz sargısının negatif ucunu temsil etmektedir.



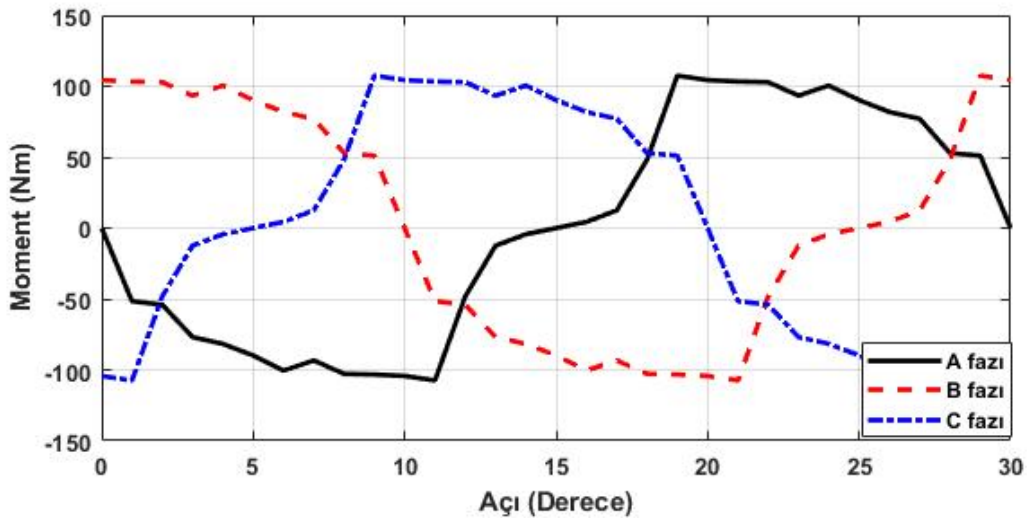
Şekil 3.5. Bir faza karşılık gelen MATLAB/Simulink bloğu (elektriksel kısım)

Şekil 3.5.'te verilen blok her bir faz için eşdeğer olup yalnızca manyetik karakteristik değerleri arasında açı farkı vardır. Örneğin 25 (A) için A, B ve C fazlarına ait akı eğrileri,

Şekil 3.6 da, moment eğrileri Şekil 3.7. de verilmiştir. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7. den de görüleceği üzere her bir faz arasında  $10^\circ$  faz farkı vardır.

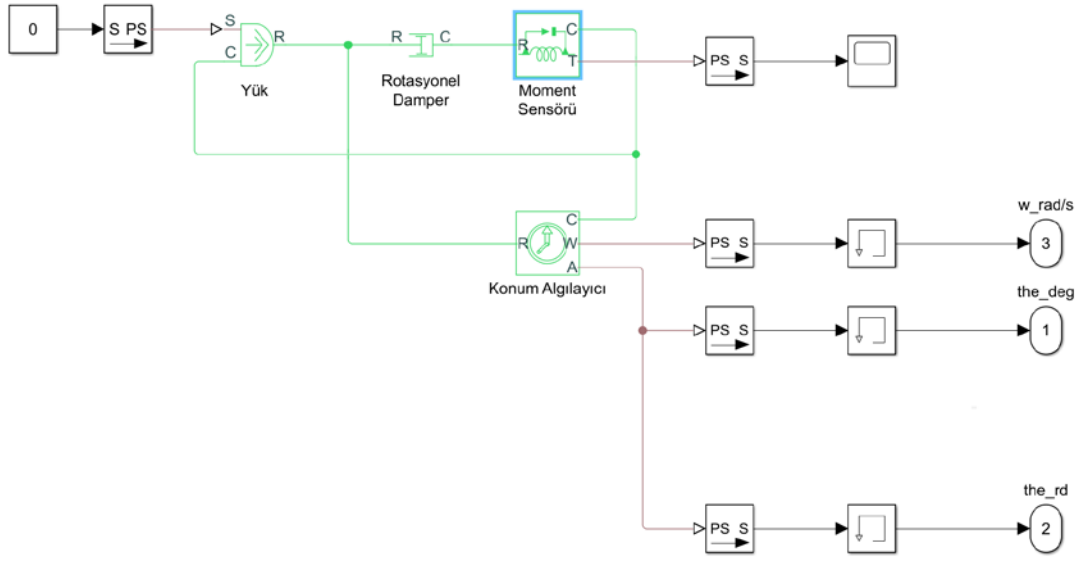


Şekil 3.6. A, B ve C fazları için 25 Amperde manyetik akı değerleri



Şekil 3.7. A, B ve C fazları için 25 Amperde moment değerleri

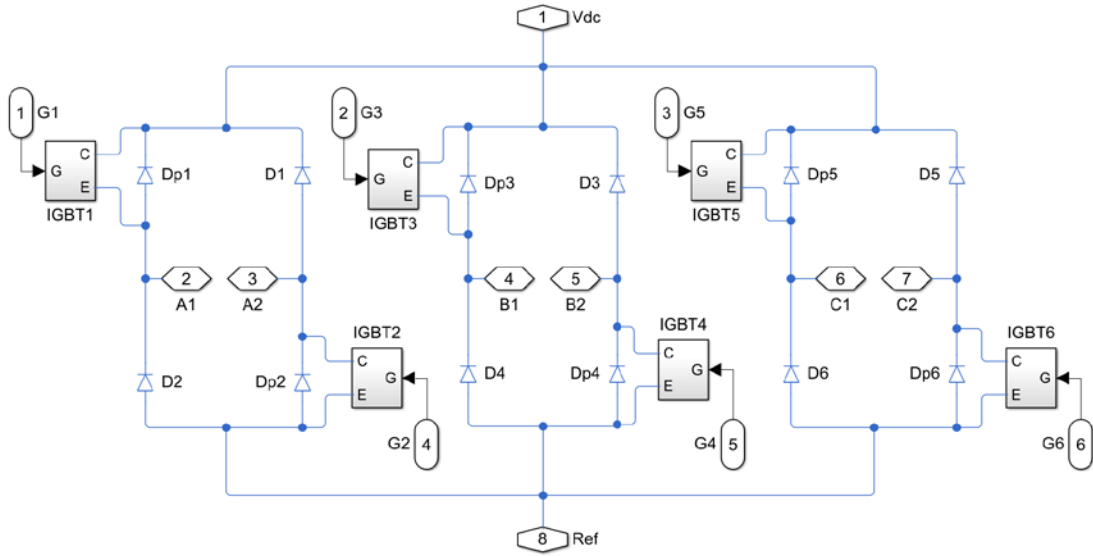
Böylelikle ARM'nin elektriksel kısmı tasarlanmış oldu. Fiziksel kısmı ise Şekil 3.8. de verildiği gibidir. Bu kısım; bir adet yük, bir adet açılmalı sönümleyici, bir adet moment ölçer ve doğrulama için bir adet konum ölçerden oluşmaktadır.



Şekil 3.8. ARM modelinin fiziksel kısmı

### 3.5.2. Güç Devresi

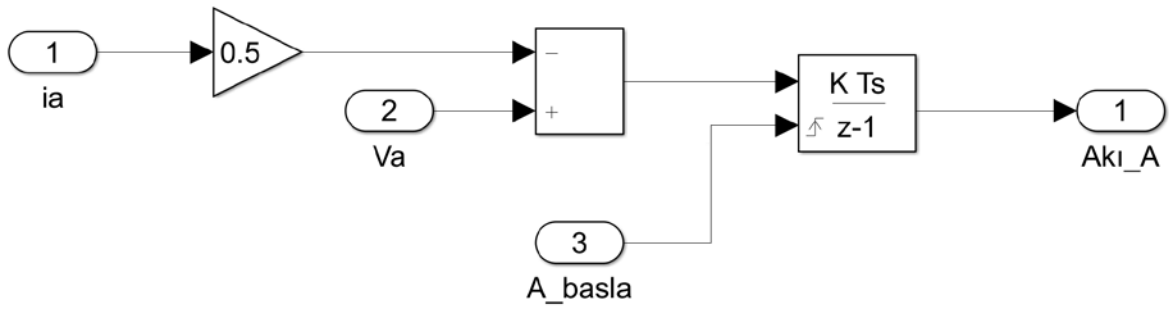
Tasarlanan ARM modelinde faz sargılarını beslemek için kullanılan güç devresi Şekil 3.9. da verilmiştir. Güç devresi toplamda 6 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ve 12 diyottan oluşmaktadır.



Şekil 3.9. Güç devresi

### 3.5.3. Akı Hesaplama Bloğu

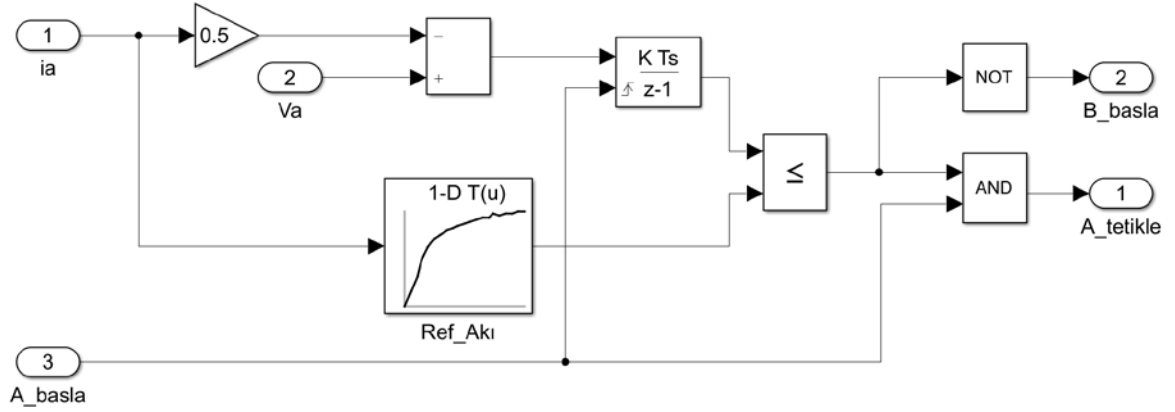
Akı hesaplama bloğu Şekil 3.10. da A fazı için verilmiştir. ARM modelinden okunan akım ve gerilim değerleri kullanılarak faz akısı hesaplanır. Burada  $i_a$  faz akımını,  $V_a$  faz gerilimini,  $A\_basla$  hesaplamaya başla sinyalinin,  $Akı\_A$  hesaplanan manyetik akıyı ve 0.5 değeri ise sargı direncini ifade etmektedir. Her bir faz için bu bloktan bir adet vardır.



Şekil 3.10. Akı hesaplama bloğu

### 3.5.4. Referans Akı Yöntemi ile Tetikleme Sinyallerinin Üretimi

Referans akı kontrolü için, Şekil 3.11.'de verilen bloktan her bir faz için birer adet olmak üzere toplamda üç adet gerekmektedir.  $A\_basla$  girişi ile A fazının aktif olduğu ve akı hesap bloğunun hesaplamaya başlayacağı emri verilir. Eğer A fazı aktif ve A fazının manyetik akısı referans akıdan küçük veya eşit ise A fazı tetiklenir.  $A\_tetikle$  çıkışı, A fazının tetikleme sinyali çıkışıdır. Referans akı değerleri ise  $Ref\_Akı$  tablosunda saklanmaktadır.



Şekil 3.11. Referans akı yöntemi ile tetikleme sinyallerinin üretimi

### 3.5.5. Konum Ölçersiz Kontrolde İlk Hareket Problemi

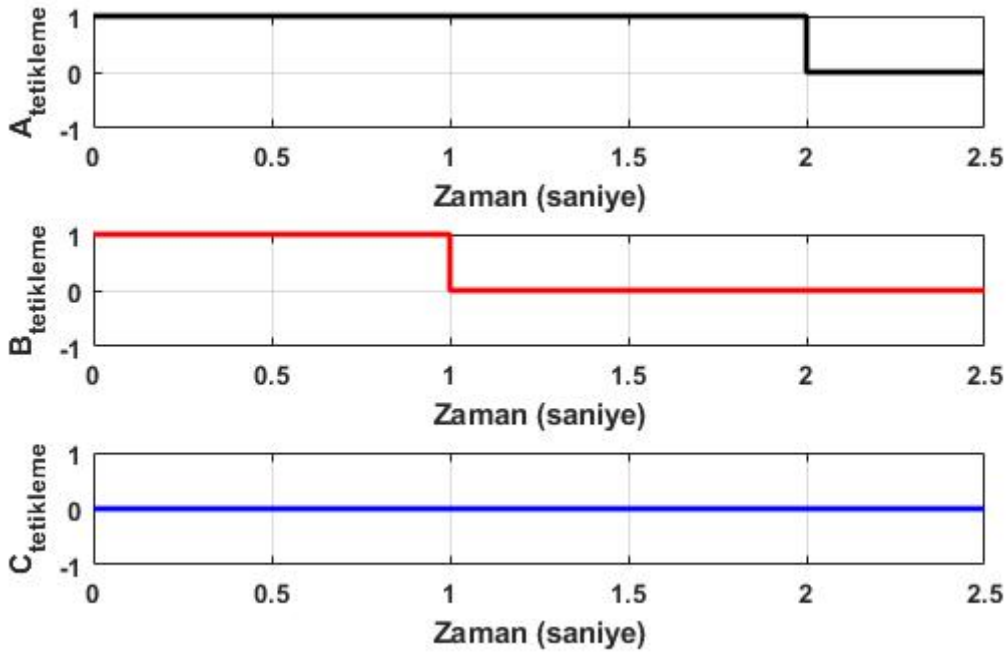
ARM kontrolünde stator sargılarının doğru sırada ve zamanda tetiklenmesi rotor hareketinin sürekliliği için önem arz etmektedir. Aynı şekilde tetiklenmelerin sırası ve zamanı rotor konumuna bağlı olduğundan rotor konum kestirimi şarttır. Bu kestirim kesin veya tahmini olabilir. Kesin konum tespiti konum ölçerli kontrol tekniklerinde kullanılırken, tahmini konum kestirimi konum ölçersiz kontrol tekniklerinde kullanılmaktadır. Konum ölçersiz kontrolde motor ilk hareketine başlatılırken, rotorun konumu bilinmediğinden dolayı rotorun bilinen bir konuma alınması gerekir. Literatürde bunu yapmanın farklı yöntemleri mevcuttur. Örneğin bir çalışmada, harekete başlamadan önce stator sargılarına kontrol akımları aynı anda uygulanarak akımların değerlerinin kıyaslanmasıyla rotor konum tespiti yapılmıştır (Bu ve Xu, 2001). Bilindiği üzere çakışık konumda stator sargıları maksimum akımı çeker. En yüksek akım hangi fazda ise rotor konumu o faza yakın konumdadır. Buna benzer akım, akı ve endüktans değerlerine göre ARM rotor ilk konum tespitinin yapıldığı birçok çalışma mevcuttur.

Bu çalışmada kullanılan yöntem literatürdeki yöntemlere kıyasla daha basit bir yöntemdir. Rotorun ilk konumunun tespit ve ayarı sırasıyla şu adımlar takip edilerek yapılır.

1. Herhangi komşu iki faz kısa süreliğine (1 veya 2 saniye) aynı anda tetiklenir. Böylece rotor bu iki komşu fazın ortasında bir konuma alınmış olur.

2. Daha önce belirlenen bu iki komşu fazdan sadece biri kısa süreliğine (1 veya 2 saniye) tetiklenir. Böylece rotor belirlenen bu faz için çakışık konuma gelmiş olur.

Bu adımlar ışığında, üç fazlı ARM için ilk konum A fazının çakışık olduğu konum olarak ayarlanmıştır. Bunu yapabilmek için A ve B fazları (1 saniye) aynı anda tetiklenmiştir. Daha sonrasında sadece A fazı tetiklenmiştir (1 saniye). Son adım olarak da faz sargılarındaki akımın düşebilmesi için 0.5 saniye boyunca hiçbir faza tetikleme verilmemiştir. Toplam 2.5 saniye süren bu ilk hareket protokolünden sonra normal tetiklemeler sırasıyla verilmiştir. İlk hareket protokolüne ait faz tetikleme sinyalleri Şekil 3.12.'de verilmiştir. Şekil 3.12. (a)'da A fazı için, Şekil 3.12. (b)'de B fazı için ve Şekil 3.12.'(c) de C fazı için ilk hareket sinyalleri verilmiştir.

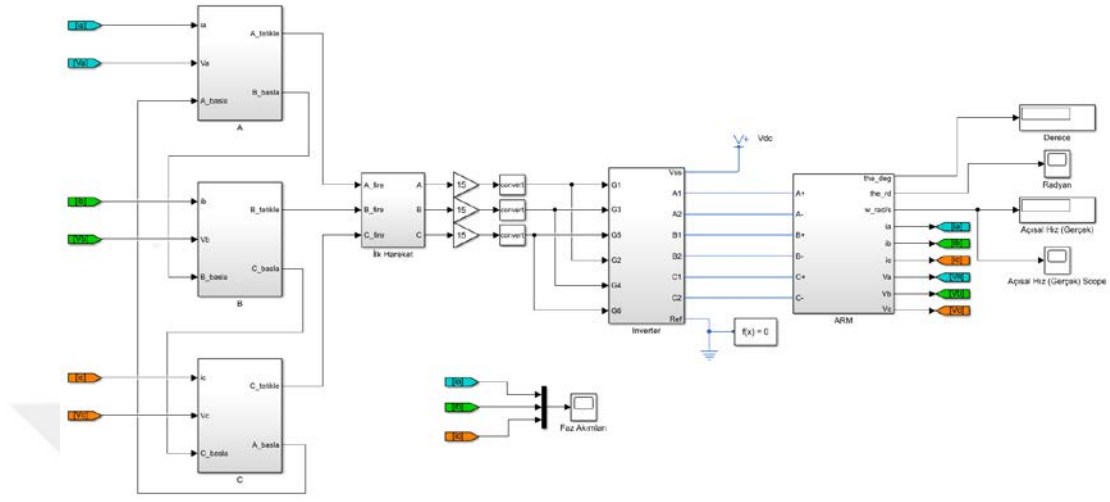


Şekil 3.12. ARM ilk hareket tetikleme sinyalleri

### 3.5.6. Açık Çevrim Kontrol

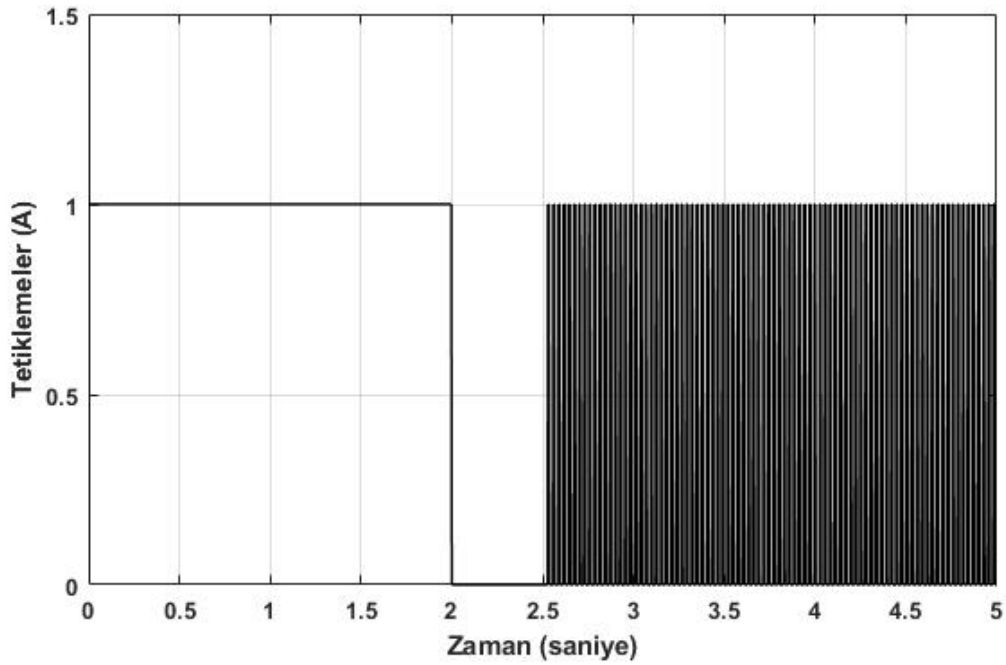
Referans akı yöntemi ile konum ölçersiz ARM kontrolü en iyi verimini açık çevrim kontrol uygulamalarında vermektedir. Dolayısıyla besleme geriliminin değişmediği, sabit hız istenen maliyet odaklı uygulamalar için bu yöntem iyi bir çözüm üretmektedir. Şekil

3.13'te Açık çevrim kontrol blok diyagramı verilmiştir. Bu alt bölüm içindeki tüm sonuçlar 100 V içindir.

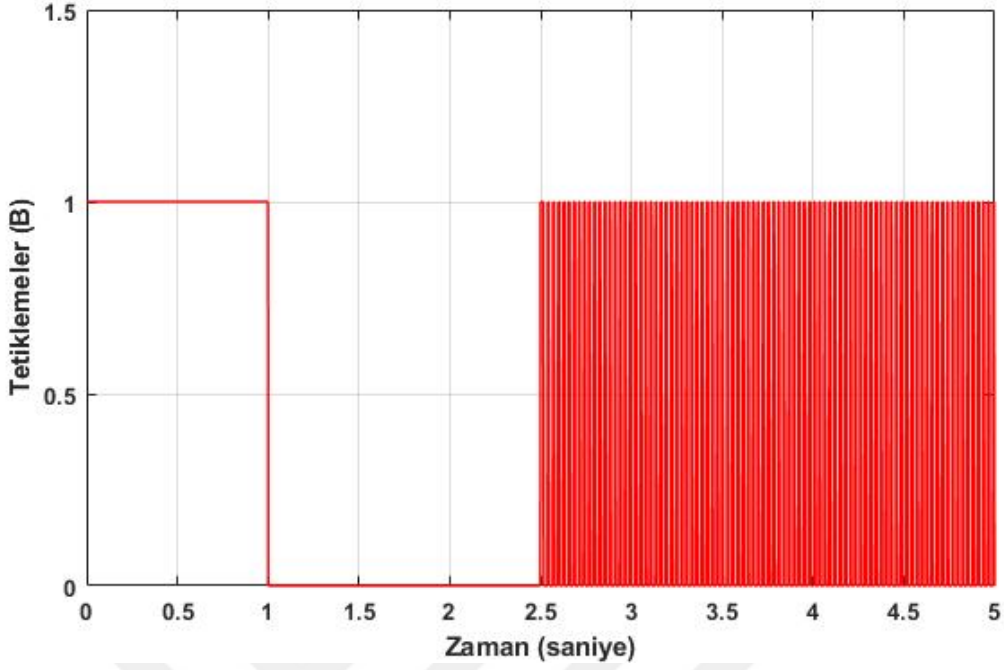


Şekil 3.13. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolüne ait blok diyagram

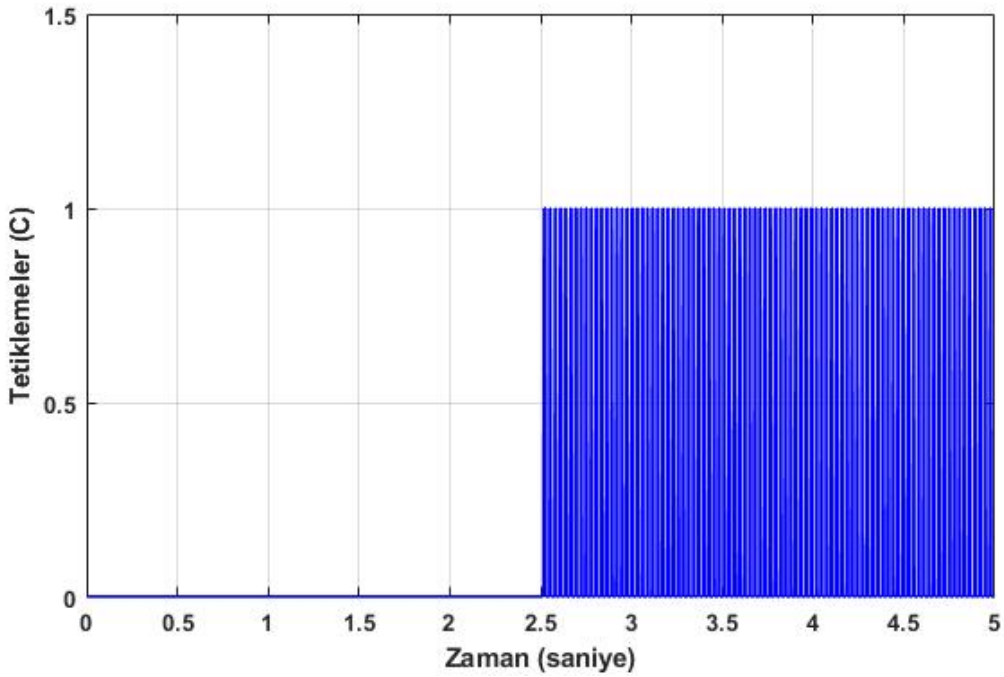
Sırasıyla Şekil 3.14.'de A fazının, Şekil 3.15.'de B fazının, Şekil 3.16.'da C fazının tetikleme sinyalleri verilmiştir.



Şekil 3.14. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için A fazına ait tetikleme sinyalleri



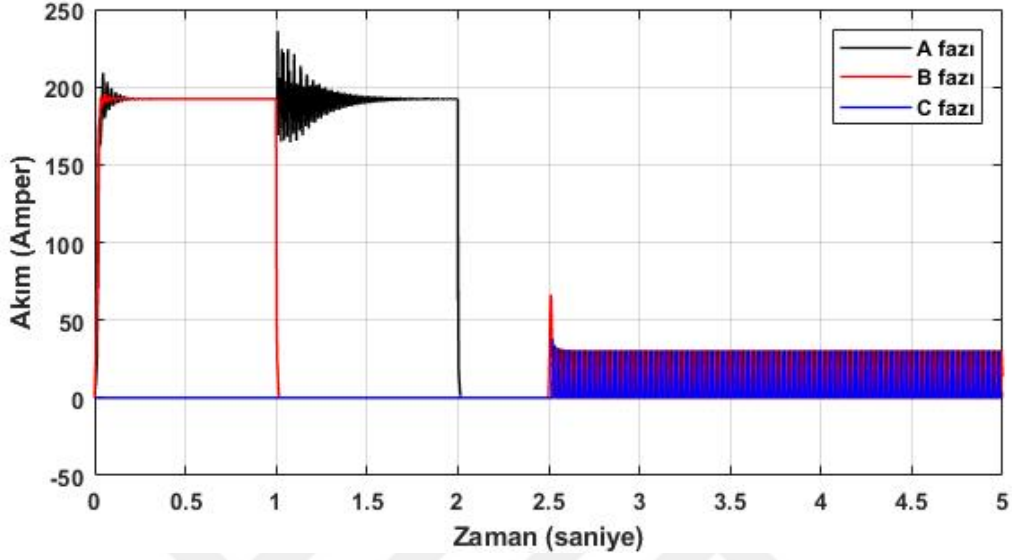
Şekil 3.15. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için B fazına ait tetikleme sinyalleri



Şekil 3.16. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için C fazına ait tetikleme sinyalleri

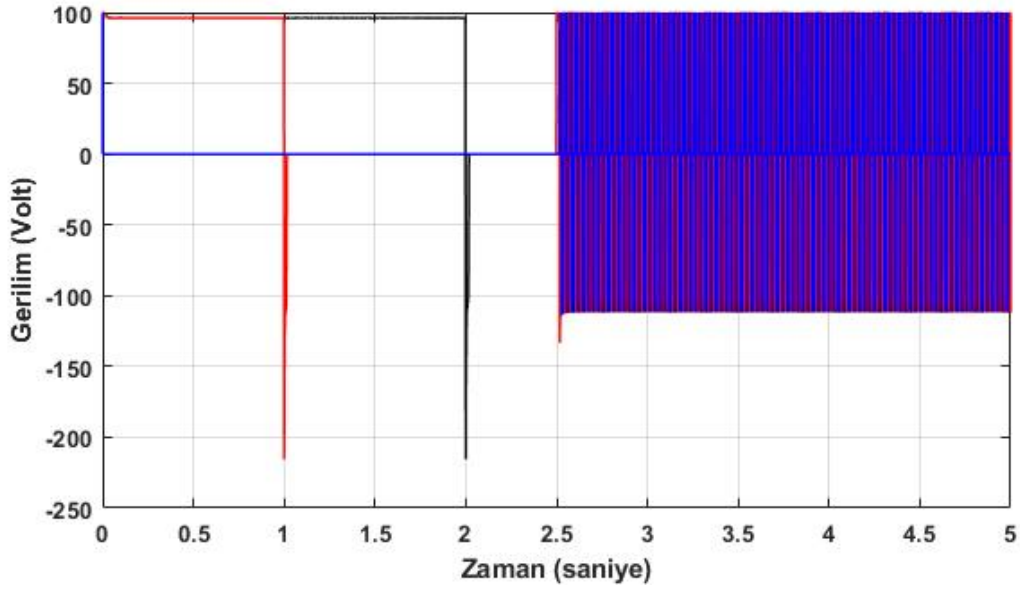
Şekil 3.14., Şekil 3.15. ve Şekil 3.16.'dan da görülebileceği üzere öncelikle ilk hareket protokolü uygulanmış, daha sonra uygun sırada faz tetiklemeleri sırasıyla sargılara uygulanmıştır. Fazlara ait sargı akımları ise Şekil 3.17.'de verilmiştir. İlk 3 saniye ilk hareket

protokolü esnasındaki akım değerlerini göstermektedir. Akım değerlerinin yüksek olması faz sargısının sürekli olarak tetiklenmesinden kaynaklanmaktadır.



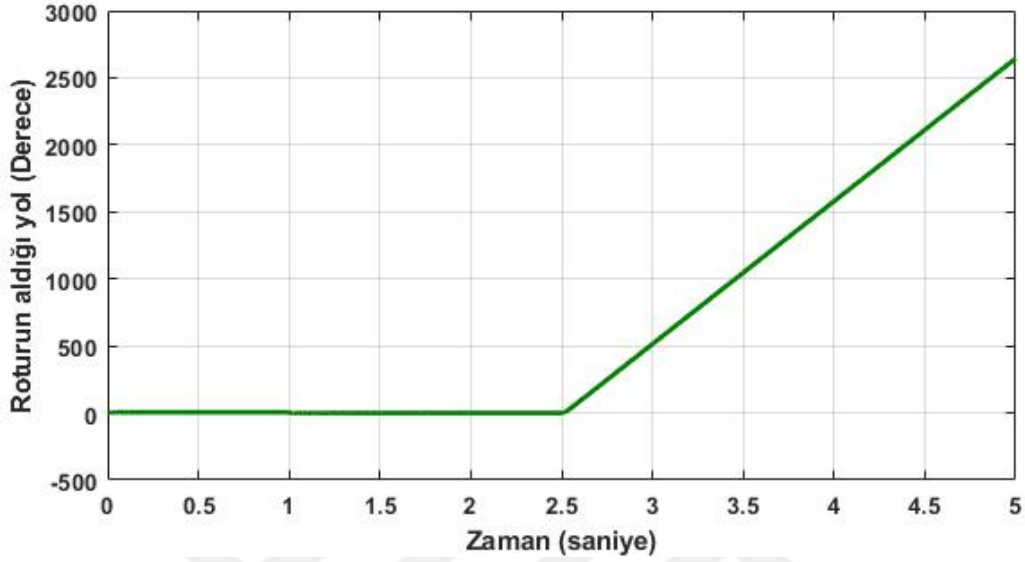
Şekil 3.17. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için faz akımları

Faz gerilimleri Şekil 3.18.'de verilmiştir. Siyah grafik A fazına, kırmızı B fazına, mavi C fazına aittir.

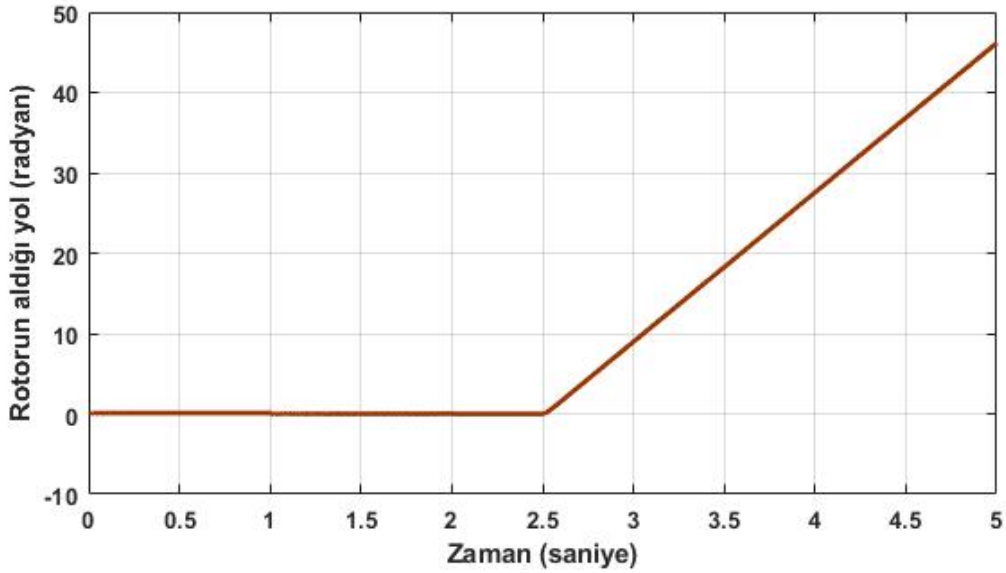


Şekil 3.18. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için faz gerilimleri

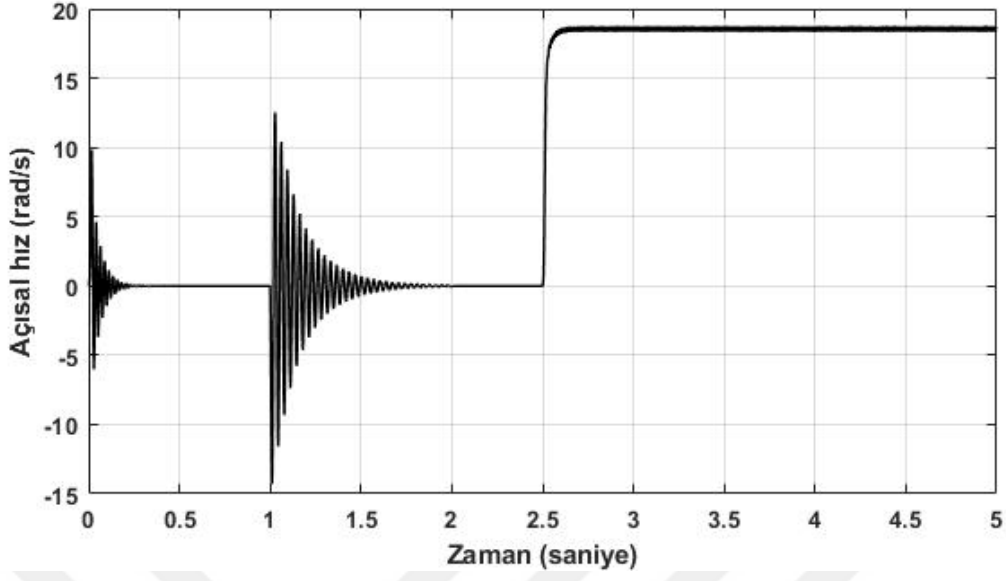
Toplam alınan yol derece Şekil 3.19.'da, radyan cinsinden Şekil 3.20.'de verilmiştir. Açısal hız ise radyan cinsinden Şekil 3.21.'de verilmiştir.



Şekil 3.19. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için rotorun derece cinsinden aldığı toplam yol

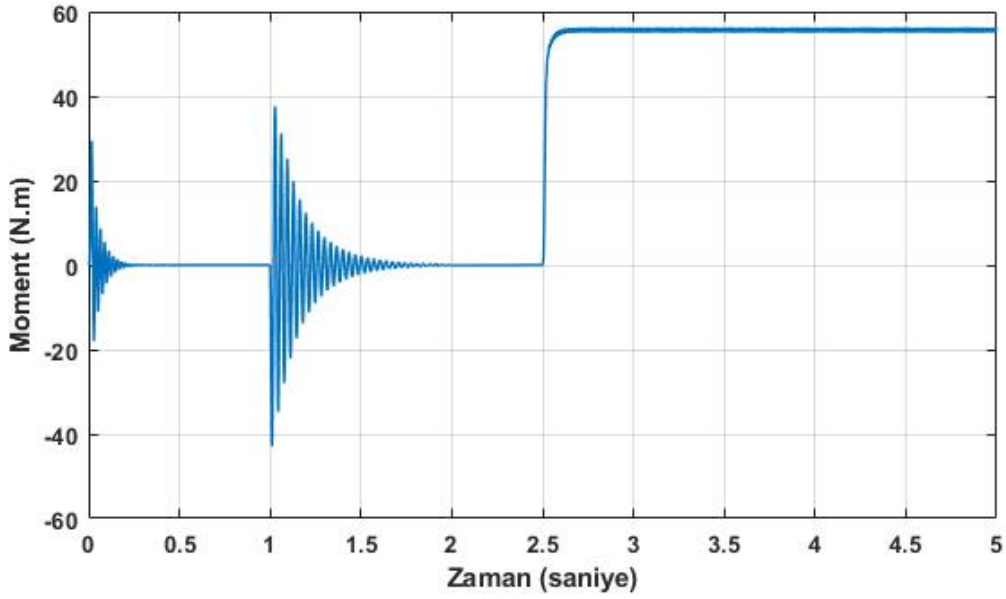


Şekil 3.20. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için rotorun radyan cinsinden aldığı toplam yol



Şekil 3.21. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için açısal hız

Toplam üretilen moment Şekil 3.22.'de verilmiştir.



Şekil 3.22. Açık çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için üretilen moment

### 3.5.7. Kapalı Çevrim Kontrol

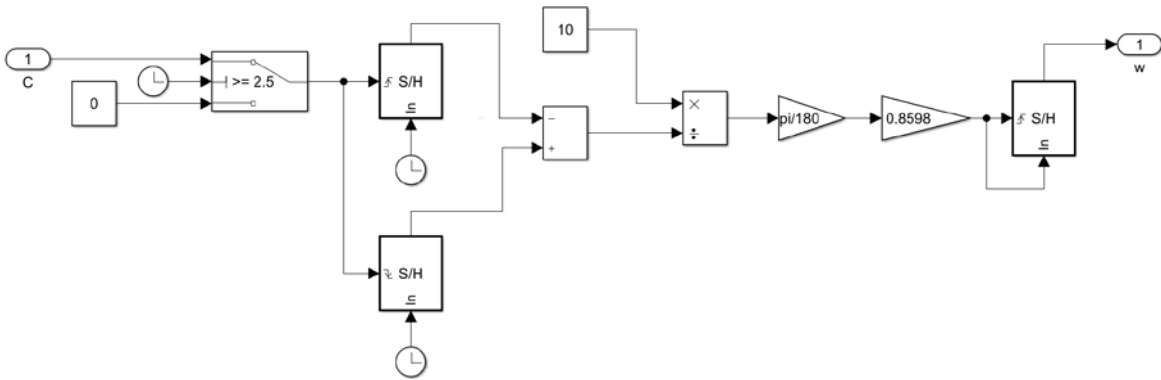
Referans akı yöntemi, her ne kadar kapalı çevrim uygulamalar için çok verimli olmasa da bu alt bölümde ARM'nin kapalı çevrimi anlatılmıştır. Kapalı çevrimde moment

dalgallığı yaşandığından dolayı, kapalı çevrim kontrolün verimini artırabilmek için kontrol bloklarına ek olarak moment kontrol blokları veya dalgallığı azaltacak yeni bir algoritma bloğu eklenmelidir. Ancak ARM moment dalgallığını azaltmak bu tezin konusu olmadığından dolayı böyle bir çalışmaya gerek duyulmamıştır.

Kapalı çevrim kontrol anlam olarak, tüm sistemin bir bütün halinde hız geri beslemeli kontrolüdür. Kapalı çevrimde rotor hız denetimi besleme gerilimine bağlı olarak yapılabilmektedir. Değişken hız gerektiren uygulamalar için kapalı çevrim kontrolün yapılması sistemin işlerliği, verimliliği ve bütünlüğü açısından önem arz eder.

### 3.5.8. Hız Kestirimi

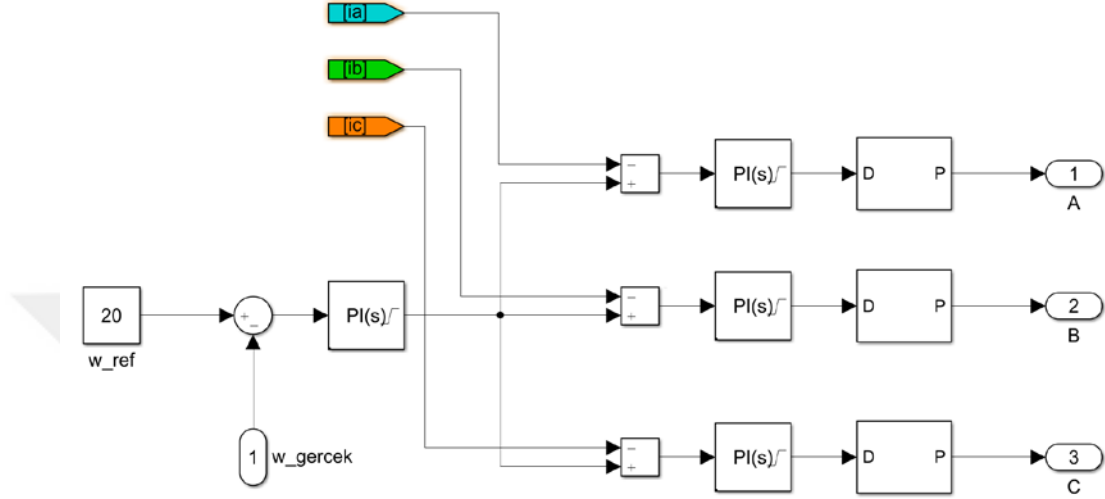
Konum ölçersiz kontrol tekniklerinde hız kestirimini yapmanın birkaç yolu vardır. Eğer açı veya radyan cinsinden konum tahmini veya kestirimi yapılıyorsa, anlık değişen rotor konumunun türevi hızı verir. Ancak bu çalışmada olduğu gibi tam konum kestirimi yapılmıyorsa uygulanacak yöntemlerin başında tetikleme sinyallerini izlemek gelir. Faz tetikleme sinyallerinden biri veya birkaçı kullanılarak hız kestirimi yapılabilmektedir. Bu çalışmada fazlardan sadece birinin (C fazı) tetikleme sinyalleri izlenmiştir. Tetikleme sinyalinin yükselme ve düşme zamanlarına bakılmıştır. Bir fazın tetiklenmesi ve kesilmesi arasında alınan yolun  $10^\circ$  olduğu bilindiğinden, bu değer geçen toplam süreye bölünerek anlık hız kestirimi yapılmıştır. Ancak ilk 2.5 saniye ilk hareket protokolüne ait zaman dilimi olduğundan bu zaman diliminde hız kestirimi yapılmamıştır. Şekil 3.23.'te hız kestirim bloğu verilmiştir.



Şekil 3.23. Hız kestirim bloğu

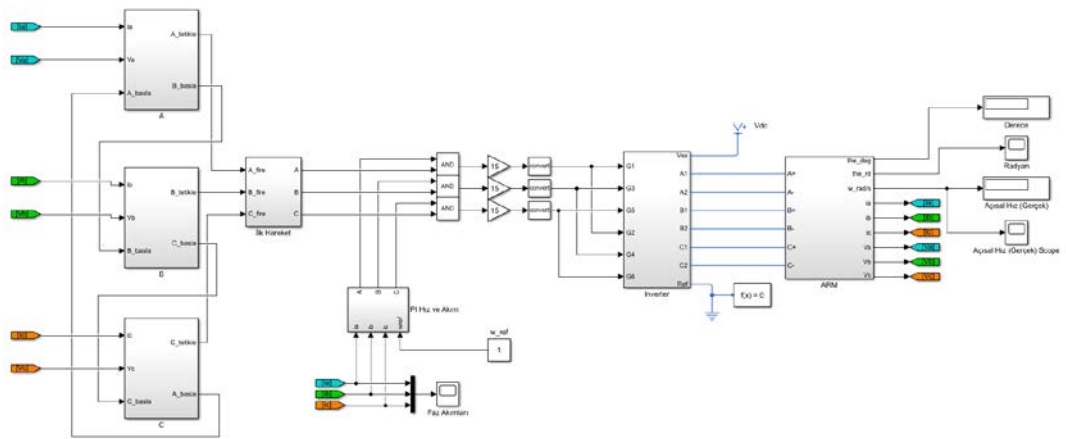
### 3.5.9. PI Hız ve Akım Kontrol Blokları

Hız ve akım kontrolü için PI kontrolörler ve PWM üretici bloklar kullanılmıştır. Bu bloklar Şekil 3.24.'te verilmiştir.



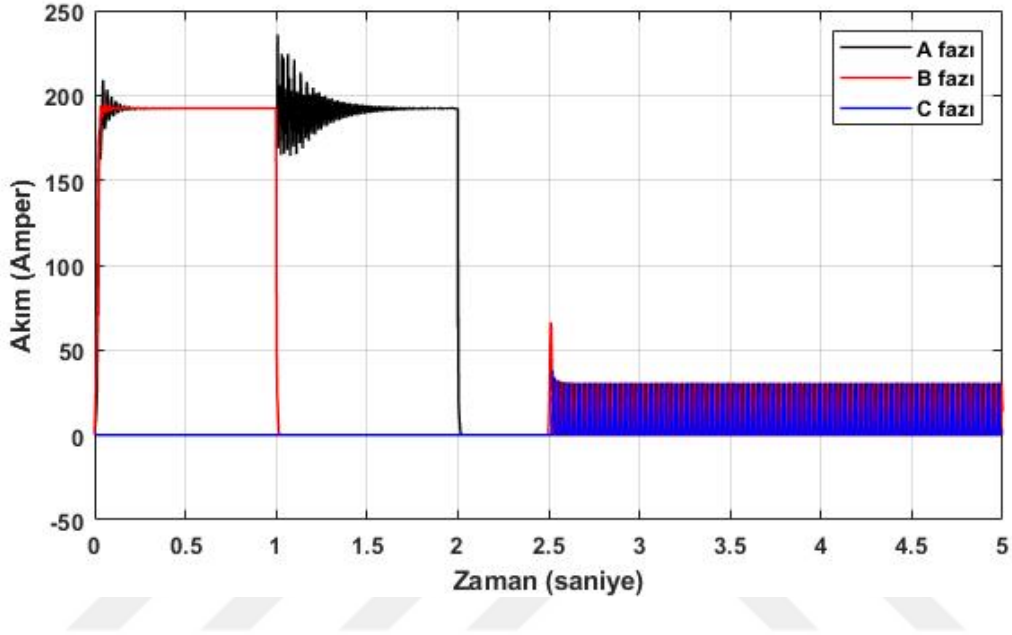
Şekil 3.24. PI hız ve akım kontrol blokları

Şekil 3.25.'de konum ölçersiz kapalı çevrim ARM kontrolüne ait blok diyagramı verilmiştir.

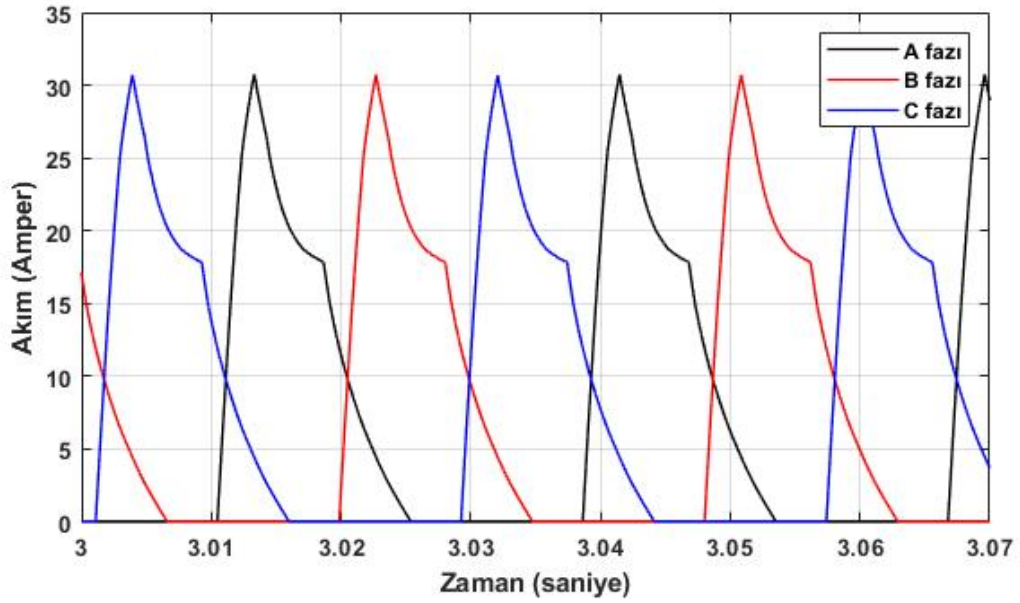


Şekil 3.25. Kapalı çevrim konum ölçersiz ARM kontrolüne ait blok diyagram

İlk hareket protokolü kapalı çevrim için de geçerli olduğundan tetikleme grafikleri burada verilmeyecektir. Fazlara ait sargı akımları ise Şekil 3.26.'da verilmiştir. İlk hareket protokolünden sonraki (3 ve 3.07 saniyeler arası) faz akımları faz akımlarının daha net anlaşılabilmesi için Şekil 3.27.'de verilmiştir.

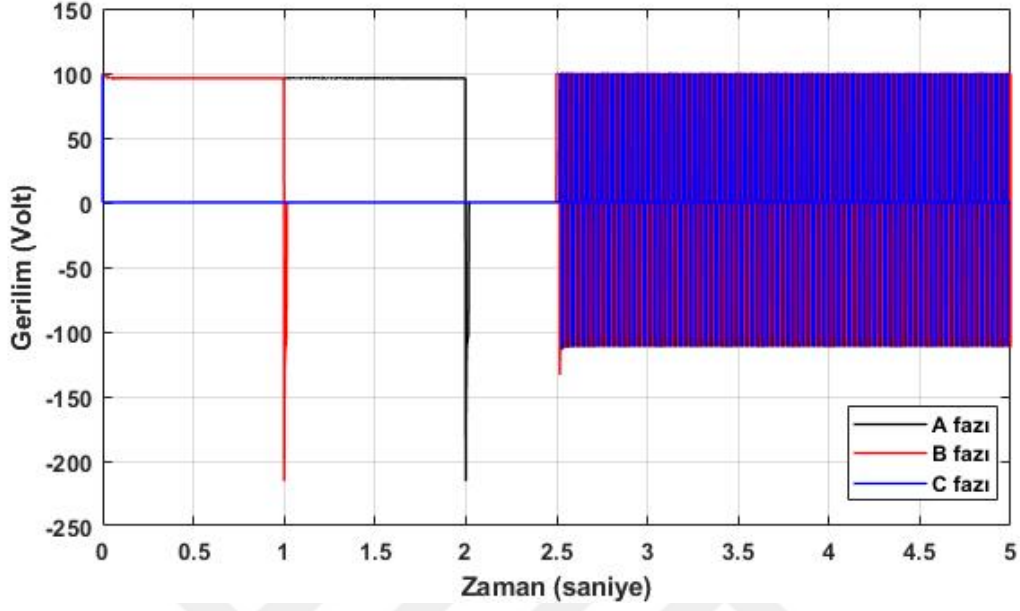


Şekil 3.26. Kapalı çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için faz akımları



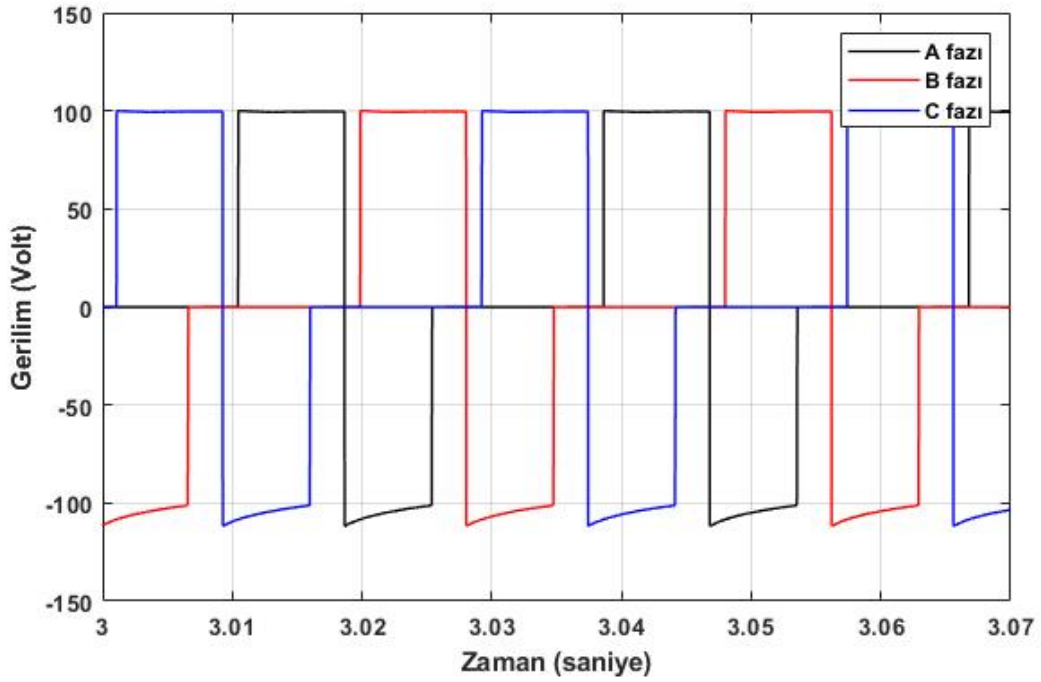
Şekil 3.27. Kapalı çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için anlık faz akımları

Faz gerilimleri Şekil 3.28.'de verilmiştir.



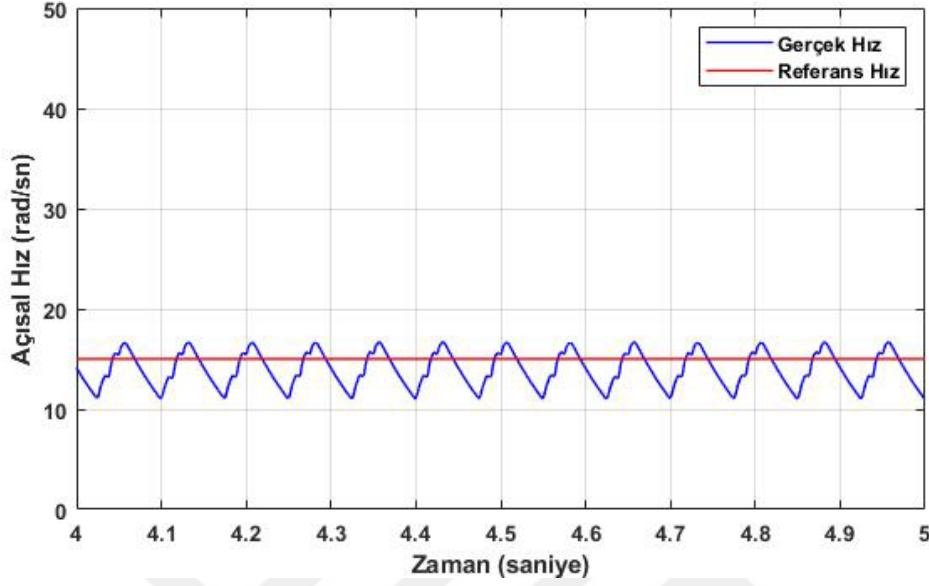
Şekil 3.28. Kapalı çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için faz gerilimleri

Anlık faz gerilimi grafikleri Şekil 3.29.'da verilmiştir.



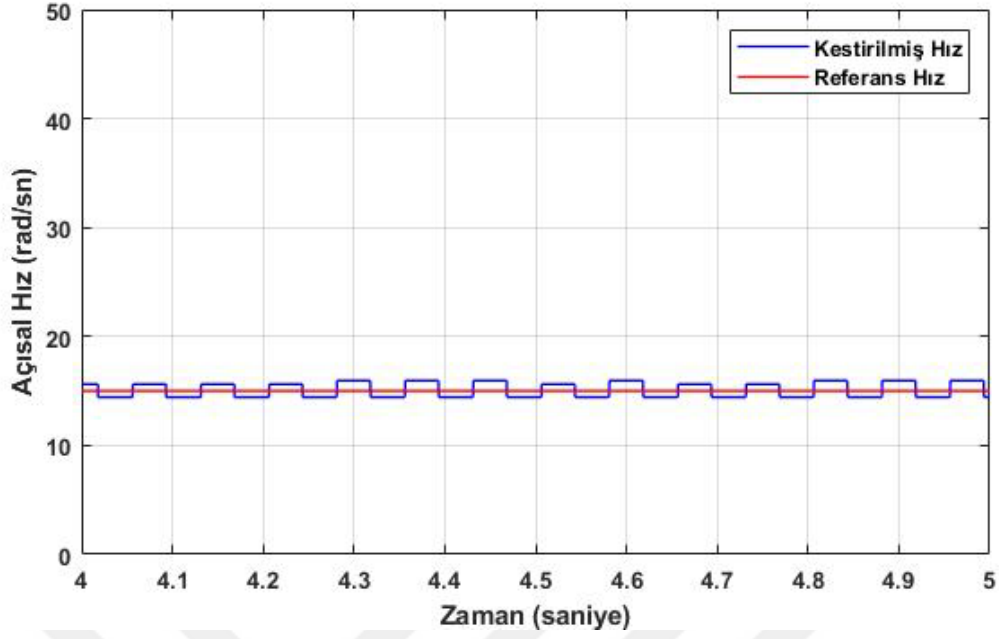
Şekil 3.29. Kapalı çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için anlık faz gerilimleri

Radyan cinsinden referans ve gerçek hız grafiği Şekil 3.30.'da verilmiştir.



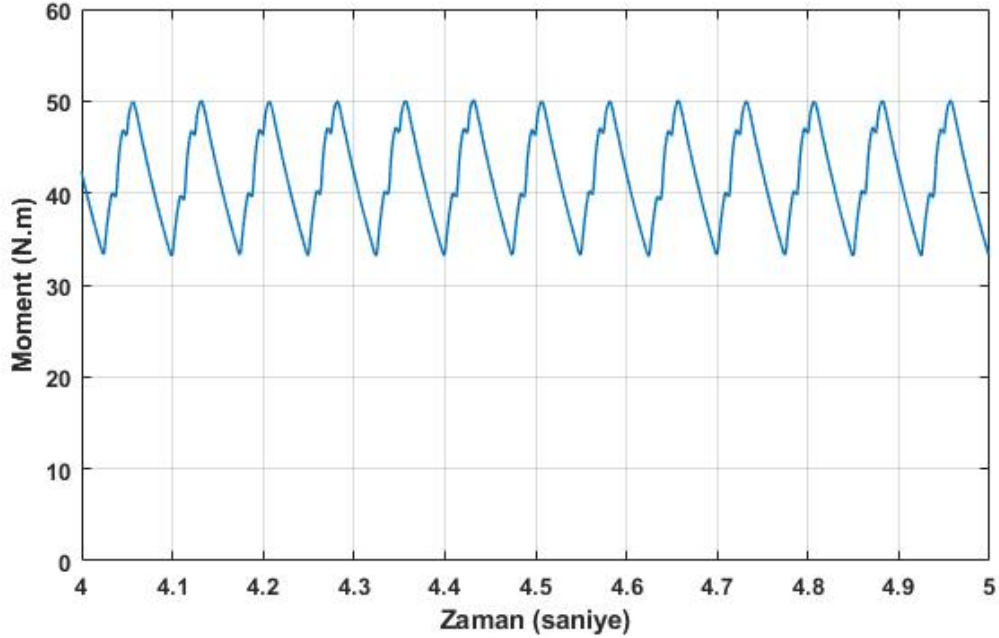
Şekil 3.30. Kapalı çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için referans ve gerçek açısal hız değerleri

Şekil 3.30.'dan referans hıza göre gerçek hızda bir dalgalanma olduğu görülmektedir. Bu durum PI katsayılarının iyileştirilmesi veya farklı bir kontrolör (PID, bulanık kontrolör vb.) kullanılarak düzeltilebilir. Şekil 3.31.'de ise referans hız ve kestirilmiş (hesaplanarak tahmin edilen) hız grafiği verilmiştir. Referans hız olarak PI kontrolöre 15 rad/sn değeri girilmiştir.



Şekil 3.31. Kapalı çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için referans ve kestirilmiş hız değerleri

ARM tarafından üretilen toplam moment Şekil 3.32.'de verilmiştir.

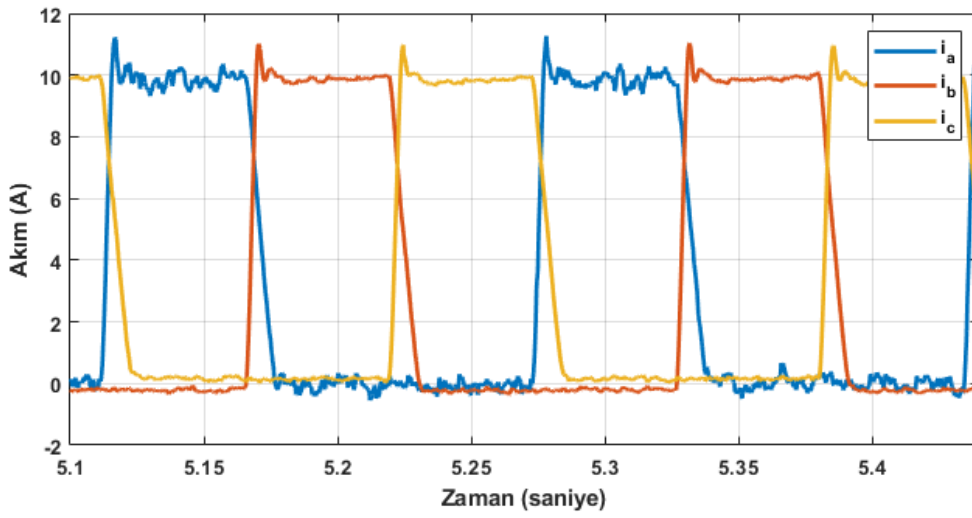


Şekil 3.32. Kapalı çevrim konum ölçersiz ARM kontrolü için üretilen moment değerleri

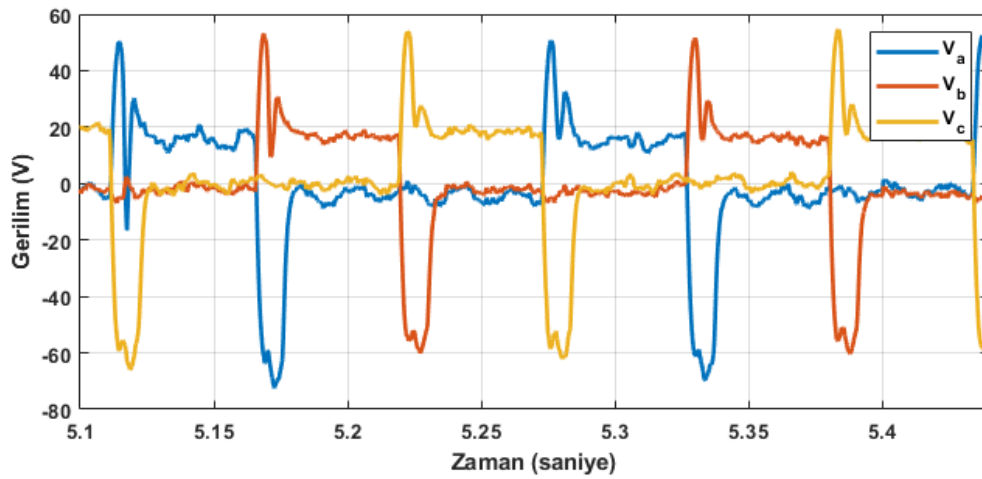
Şekil 3.31.'den de görüldüğü üzere kapalı çevrim konum ölçersiz kontrolde beklenildiği gibi moment dalgalılığı mevcuttur.

### 3.5.10. Deneysel Sonuçlar

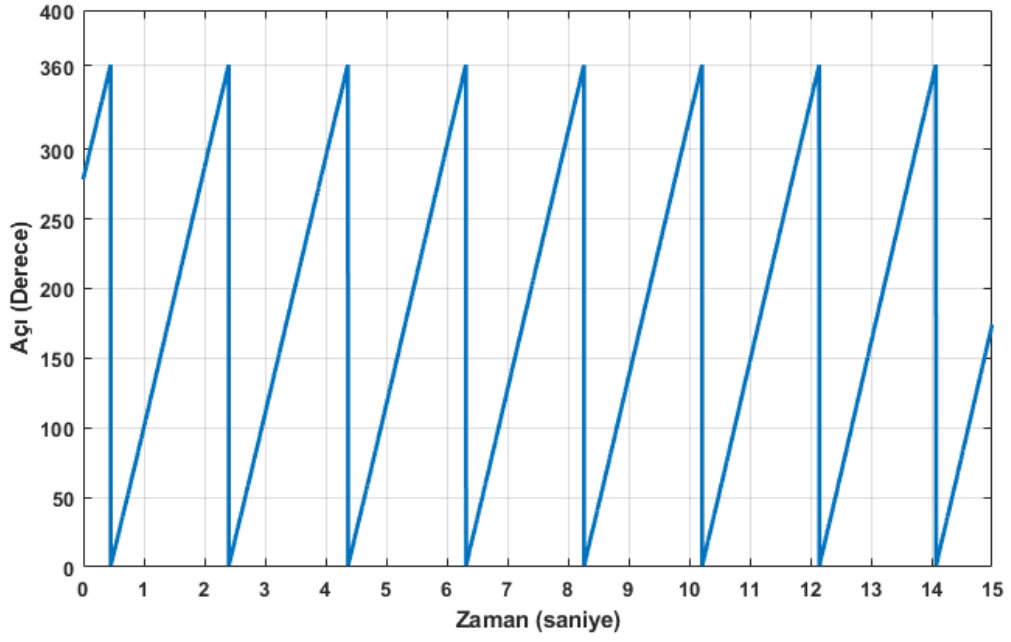
Deneysel sonuçlar tasarlanan ARM deney düzeneği ile kapalı çevrim kontrol için alınmıştır. İlk deneysel sonuçlar, 30 rad/s referans açısal hız için alınmıştır. şekil 3.33.'te faz akımları, şekil 3.34.'te faz gerilimleri, şekil 3.35.'te rotor konum değişimi, şekil 3.36.'da gerçek açısal hız ve şekil 3.37.'de tetikleme sinyalleri verilmiştir.



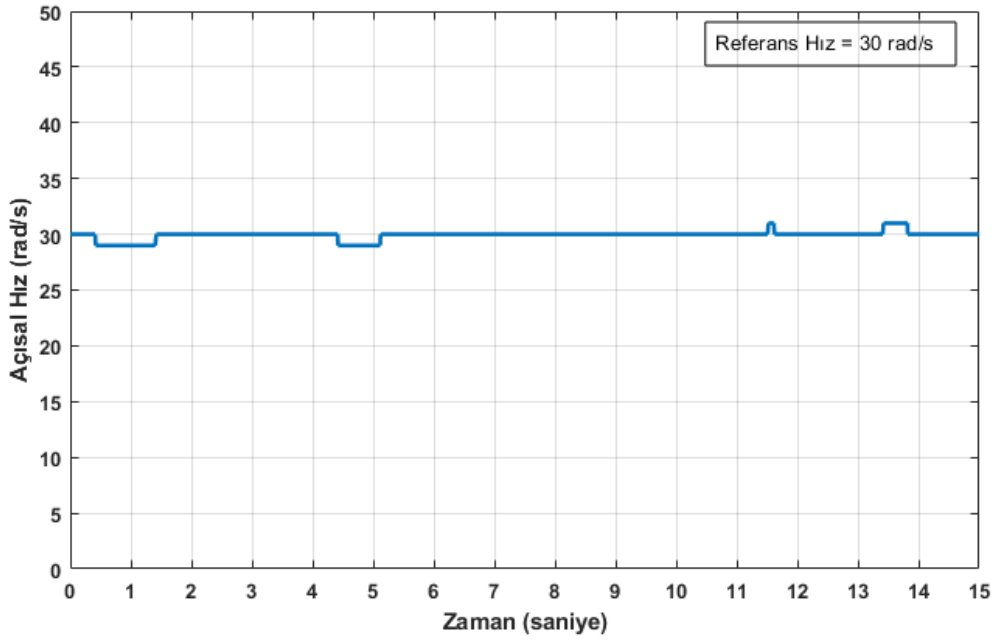
şekil 3.33. 30 rad/s referans açısal hız için faz akımları



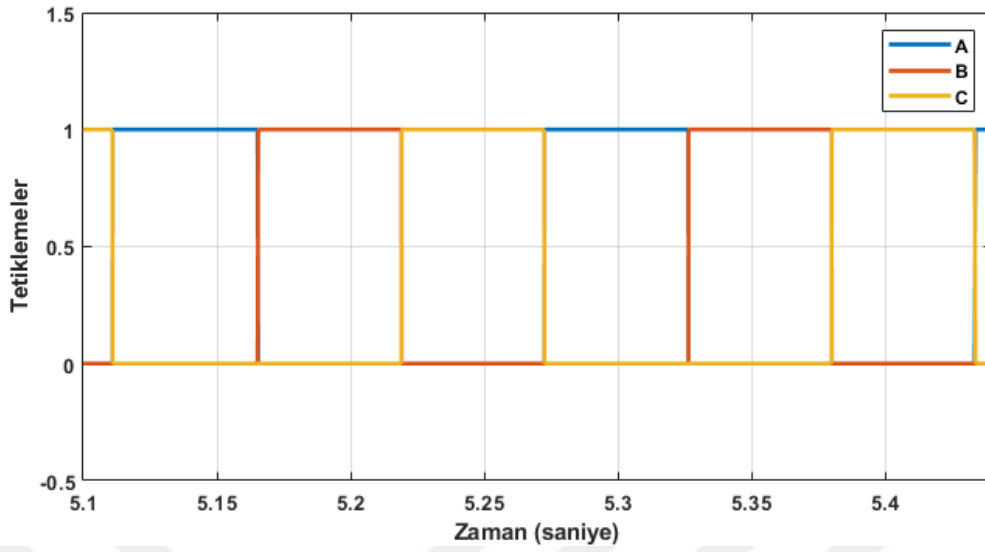
şekil 3.34. 30 rad/s referans açısal hız için faz gerilimleri



Şekil 3.35. 30 rad/s referans açısal hız için rotorun konum değişimi

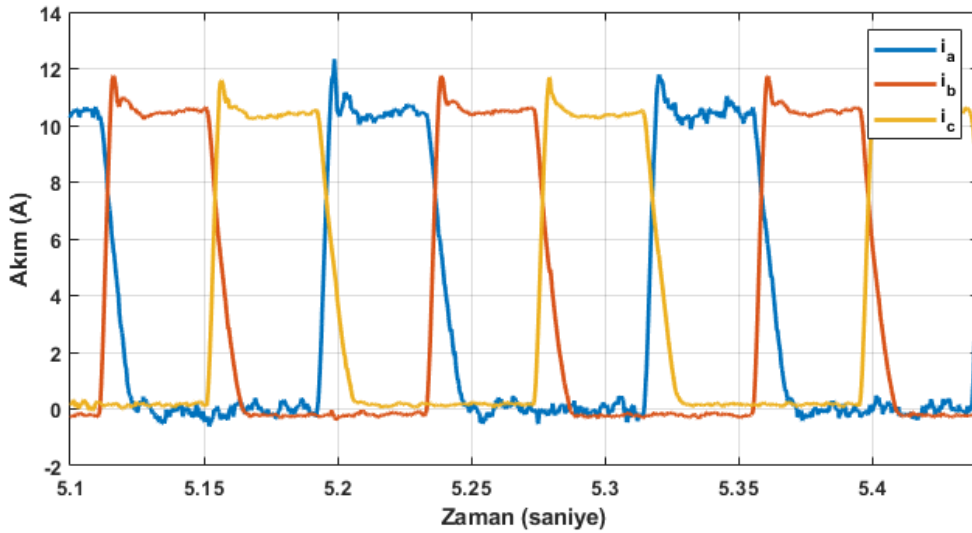


Şekil 3.36. 30 rad/s referans açısal hız için gerçek açısal hız

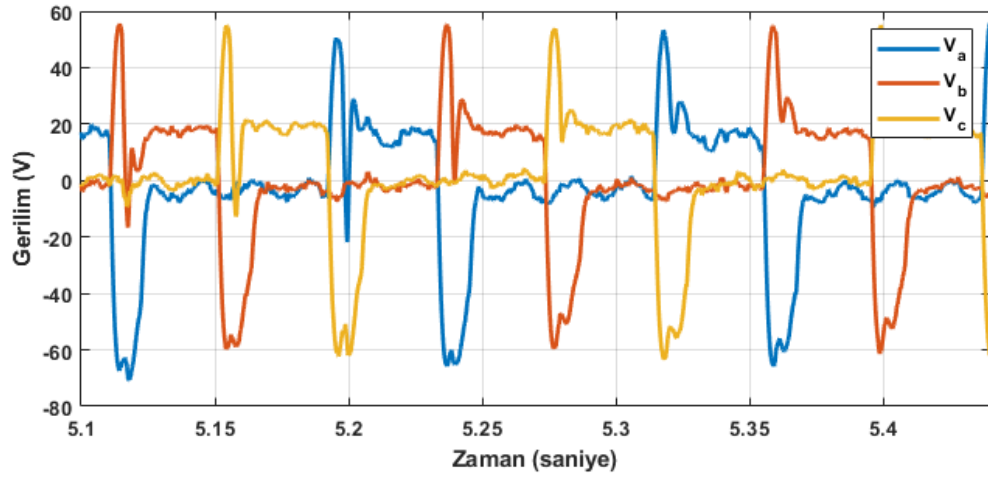


Şekil 3.37. 30 rad/s referans açısal hız için tetikleme sinyalleri

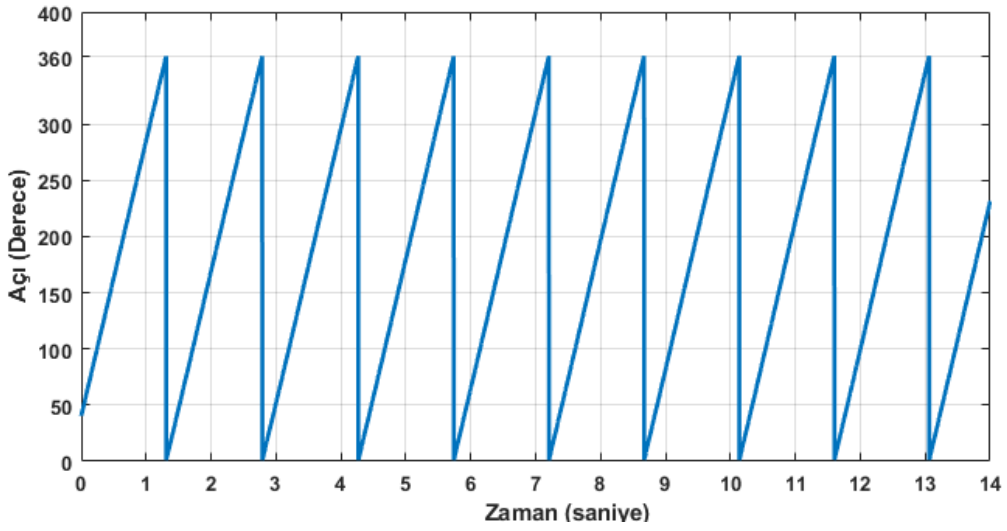
İkinci deneysel sonuçlar, 40 rad/s referans açısal hız için alınmıştır. Şekil 3.38.'de faz akımları, Şekil 3.39.'da faz gerilimleri, Şekil 3.40.'ta rotor konum değişimi, Şekil 3.41.'de gerçek açısal hız ve Şekil 3.42.'de tetikleme sinyalleri verilmiştir.



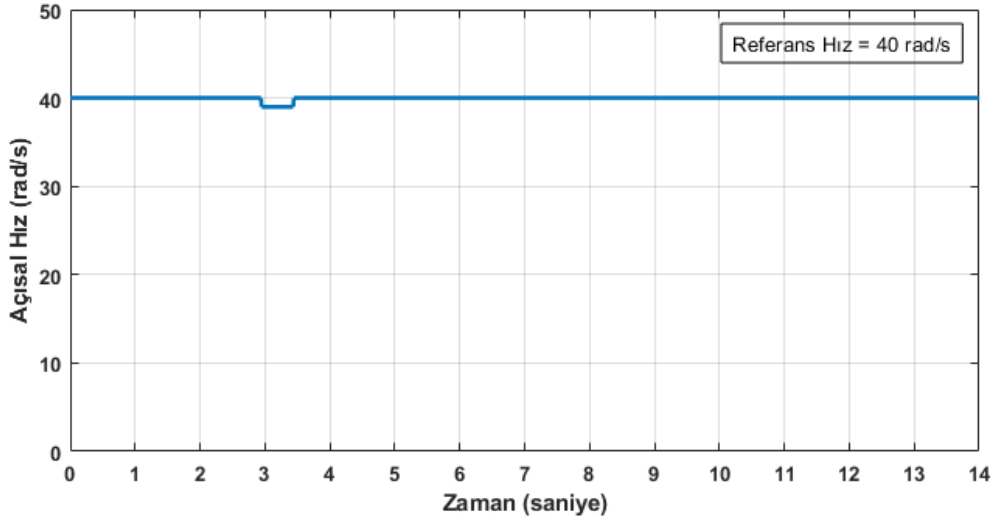
Şekil 3.38. 40 rad/s referans açısal hız için faz akımları



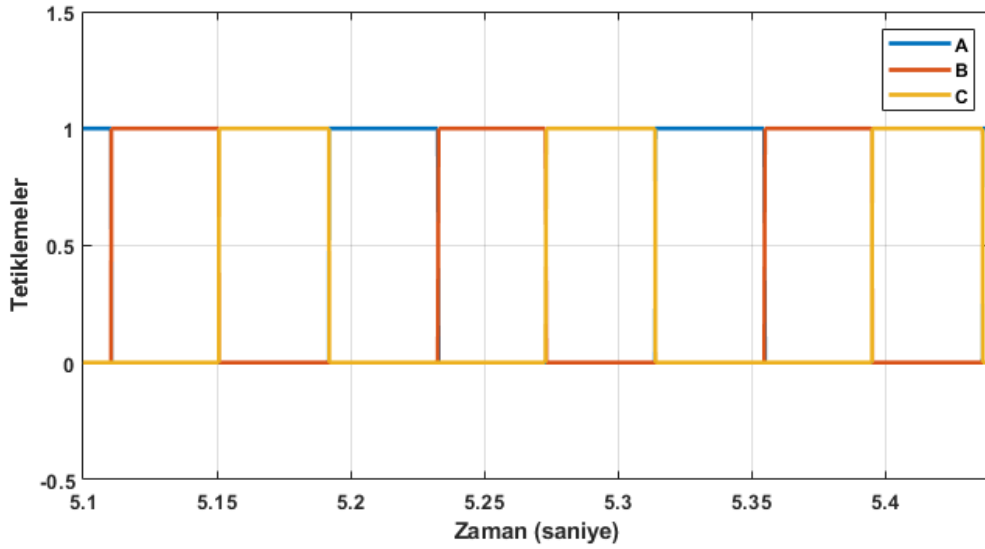
Şekil 3.39. 40 rad/s referans açısal hız için faz gerilimleri



Şekil 3.40. 40 rad/s referans açısal hız için rotorun konum değişimi

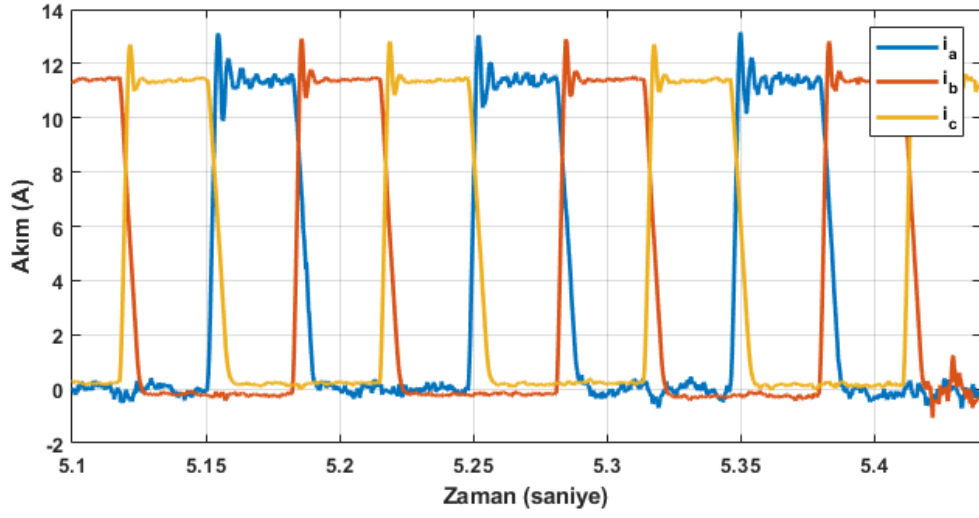


Şekil 3.41. 40 rad/s referans açısal hız için gerçek açısal hız

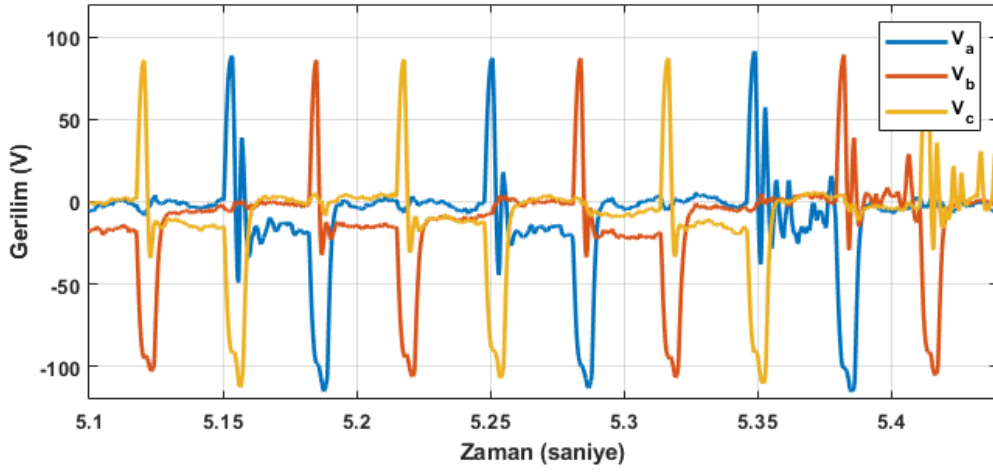


Şekil 3.42. 40 rad/s referans açısal hız için tetikleme sinyalleri

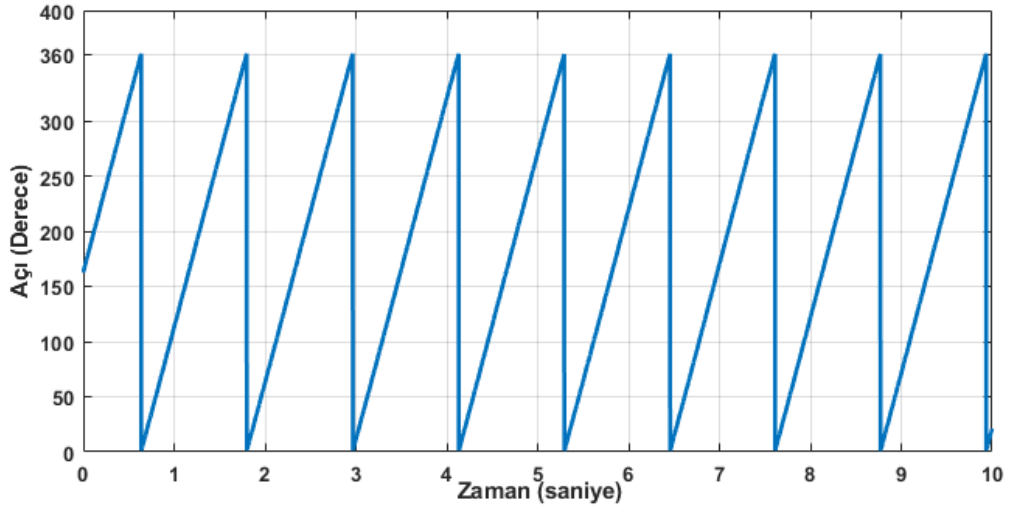
Üçüncü deneysel sonuçlar, 50 rad/s referans açısal hız için alınmıştır. Şekil 3.43.'te faz akımları, Şekil 3.44.'te faz gerilimleri, Şekil 3.45.'te rotor konum değişimi, Şekil 3.46.'da gerçek açısal hız ve Şekil 3.47.'de tetikleme sinyalleri verilmiştir.



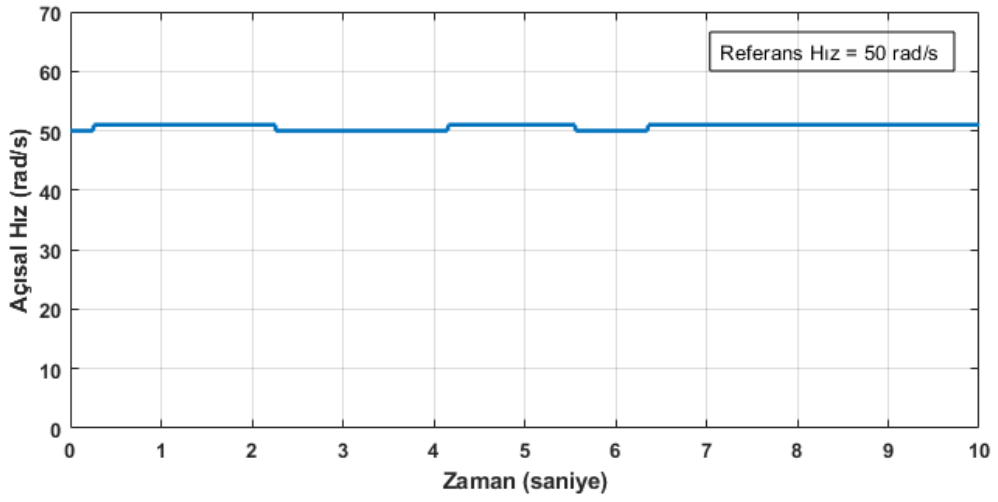
Şekil 3.43. 50 rad/s referans açısal hız için faz akımları



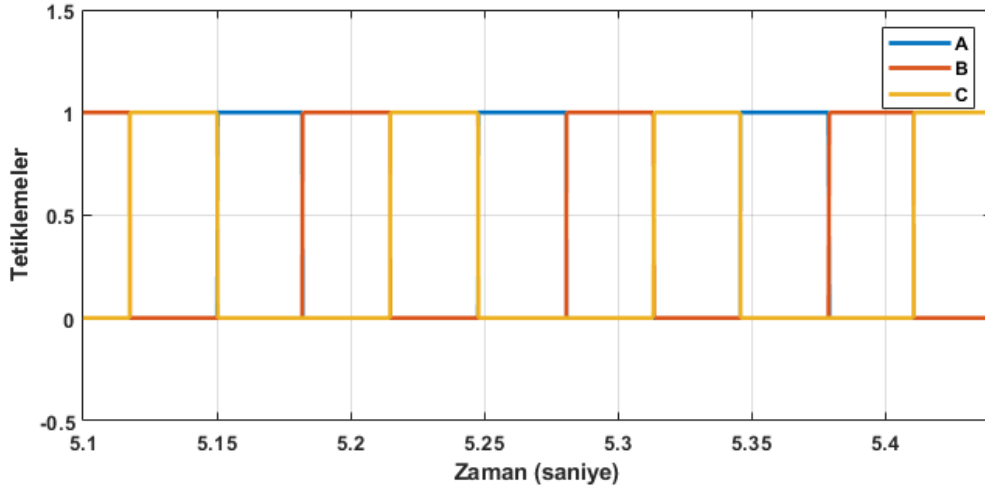
Şekil 3.44. 50 rad/s referans açısal hız için faz gerilimleri



Şekil 3.45. 50 rad/s referans açısal hız için rotorun konum değişimi

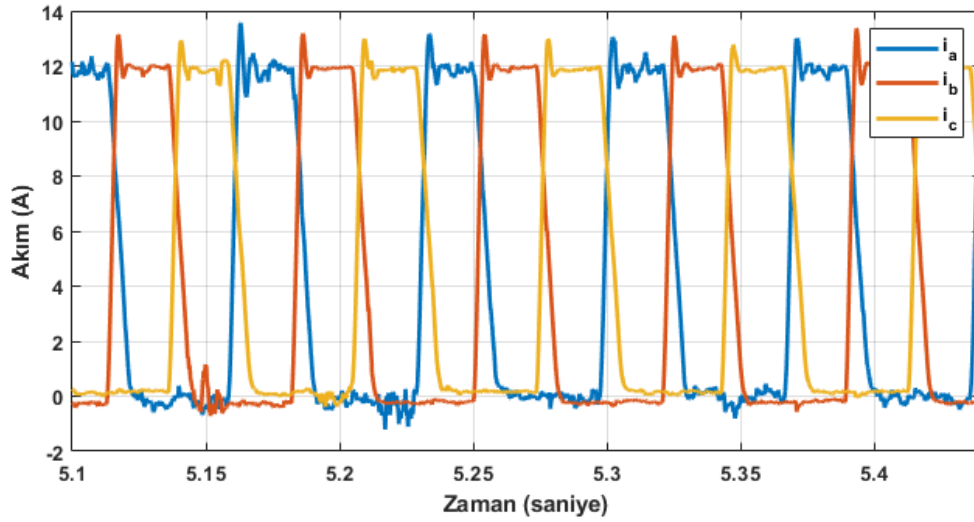


Şekil 3.46. 50 rad/s referans açısal hız için gerçek açısal hız

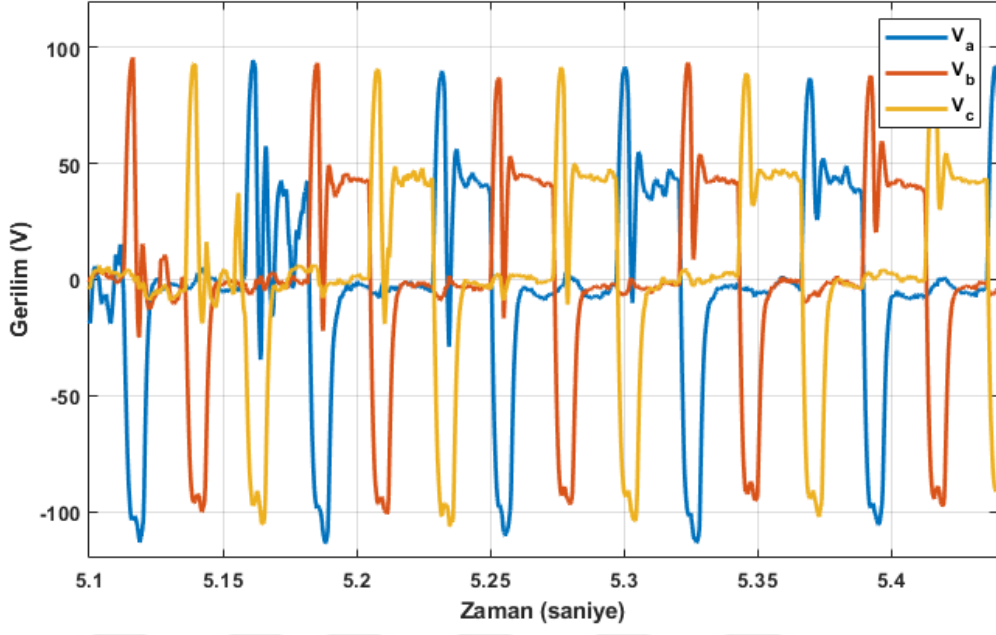


Şekil 3.47. 50 rad/s referans açısal hız için tetikleme sinyalleri

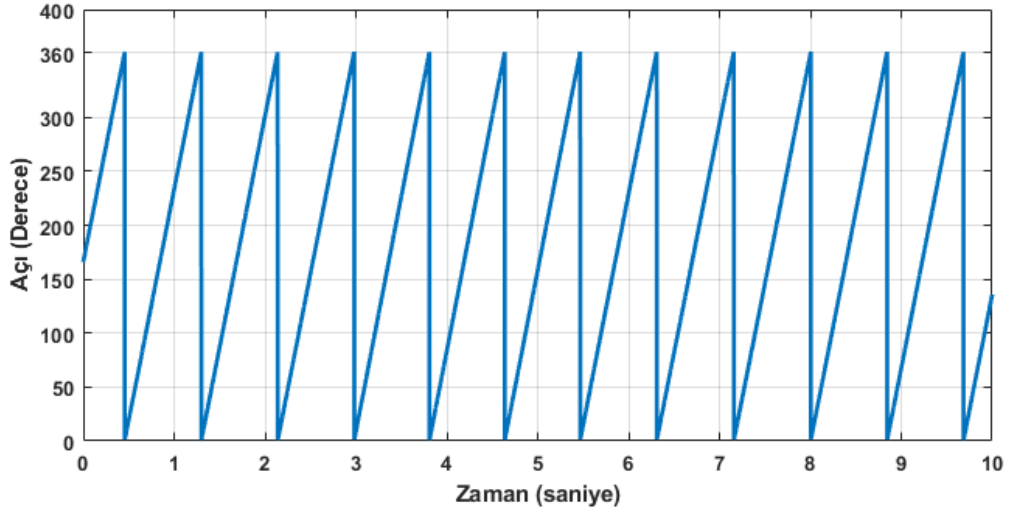
Dördüncü deneysel sonuçlar, 70 rad/s referans açısal hız için alınmıştır. Şekil 3.48.'de faz akımları, Şekil 3.49.'da faz gerilimleri, Şekil 3.50.'de rotor konum değişimi, Şekil 3.51.'de gerçek açısal hız ve Şekil 3.52.'de tetikleme sinyalleri verilmiştir.



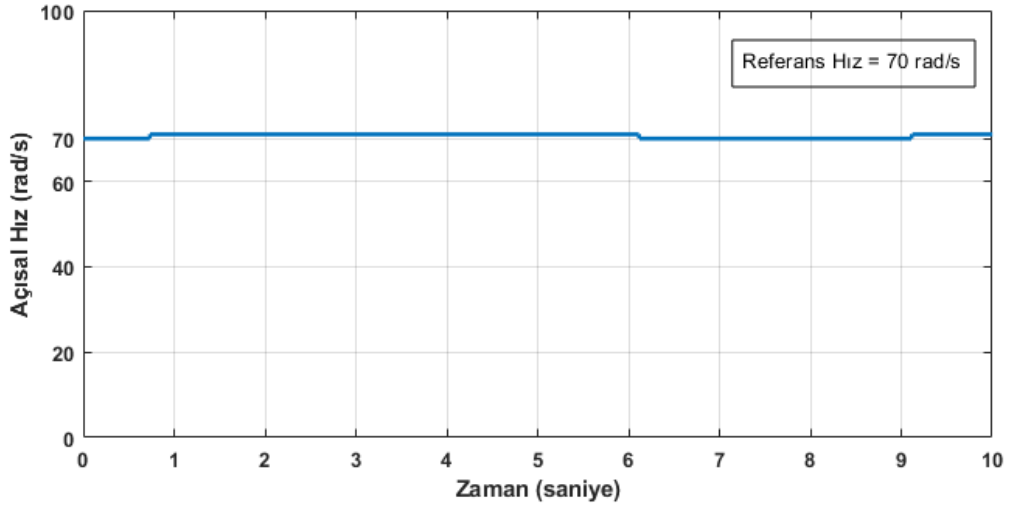
Şekil 3.48. 70 rad/s referans açısal hız için faz akımları



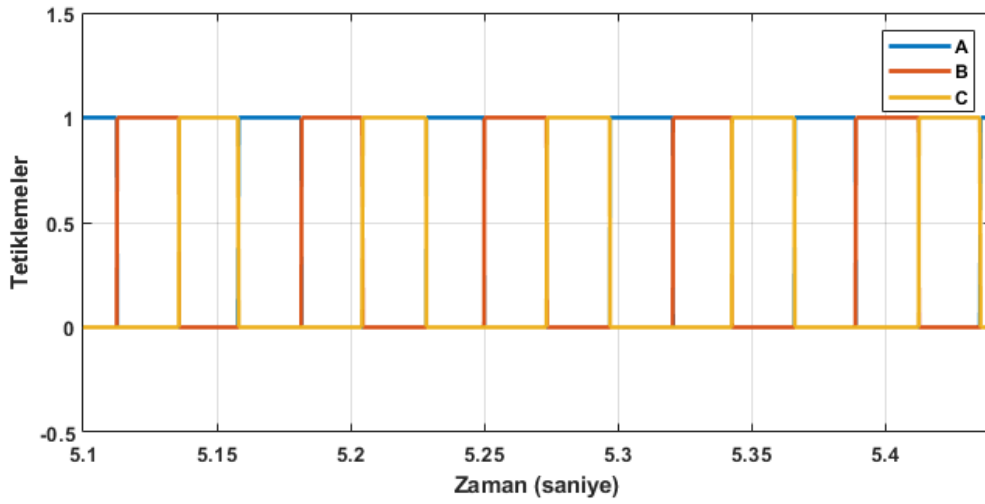
Şekil 3.49. 70 rad/s referans açısal hız için faz gerilimleri



Şekil 3.50. 70 rad/s referans açısal hız için rotorun konum değişimi

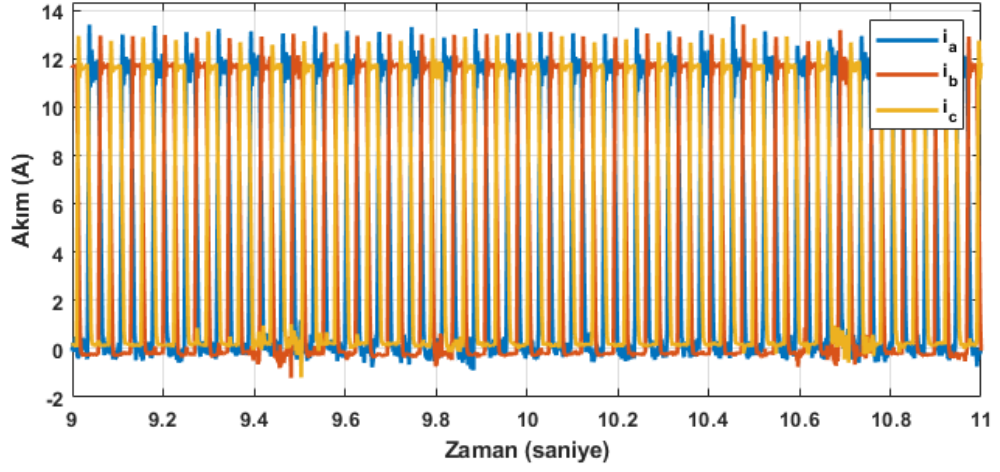


Şekil 3.51. 70 rad/s referans açısal hız için gerçek açısal hız

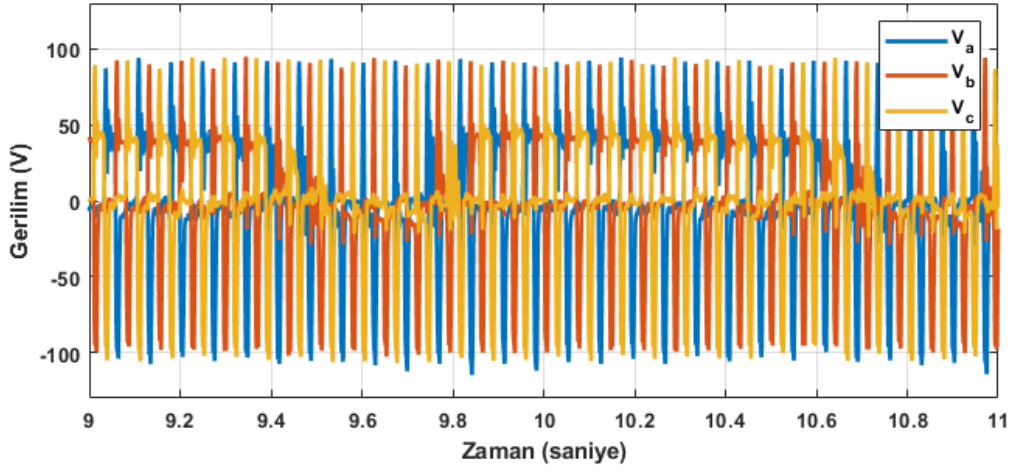


Şekil 3.52. 70 rad/s referans açısal hız için tetikleme sinyalleri

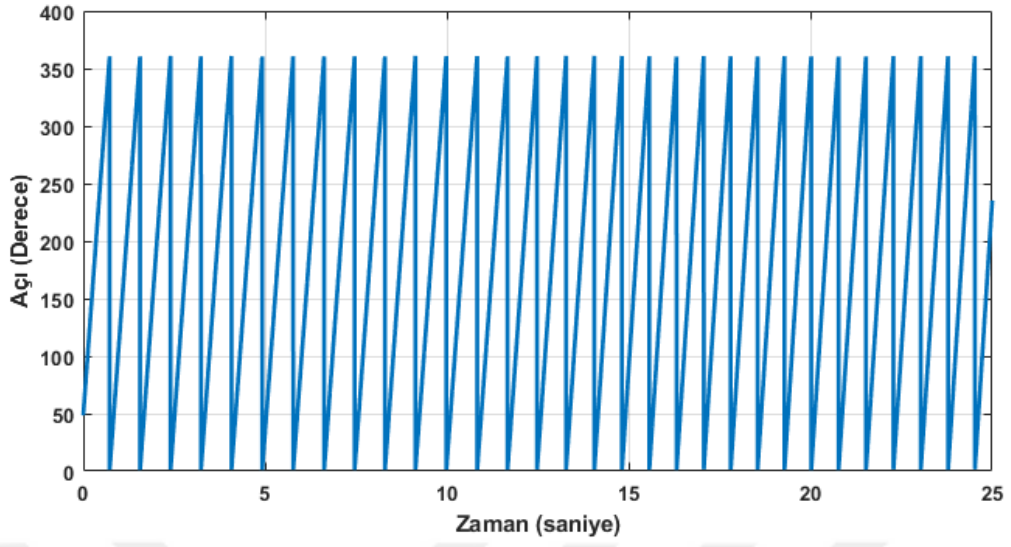
Beşinci deneysel sonuçlarda, referans açısal hız, 70 rad/s'den 80 rad/s'ye çıkarılmıştır. Buna göre Şekil 3.53.'te faz akımları, Şekil 3.54.'te faz gerilimleri, Şekil 3.55.'te rotor konum değişimi, Şekil 3.56.'da gerçek açısal hız ve Şekil 3.57.'de tetikleme sinyalleri verilmiştir.



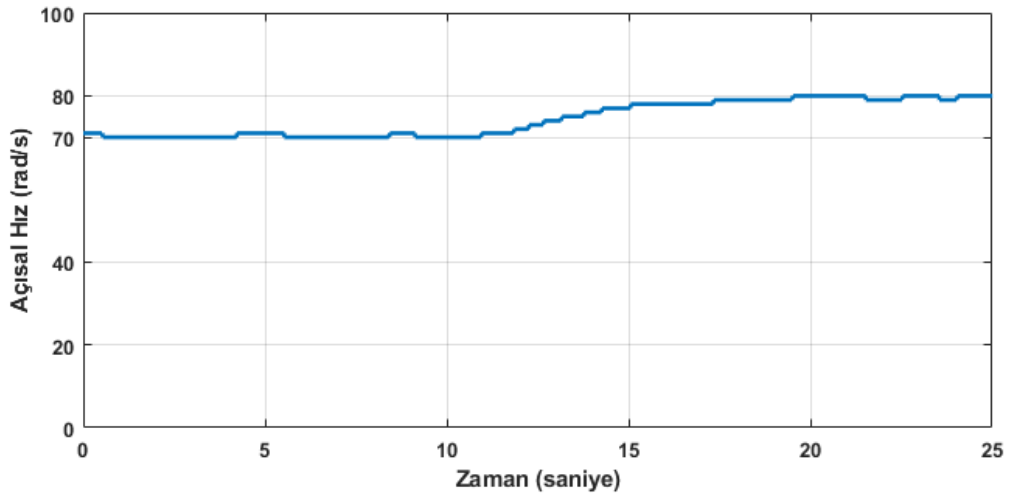
Şekil 3.53. 70-80 rad/s referans açısal hız değişimi için faz akımları



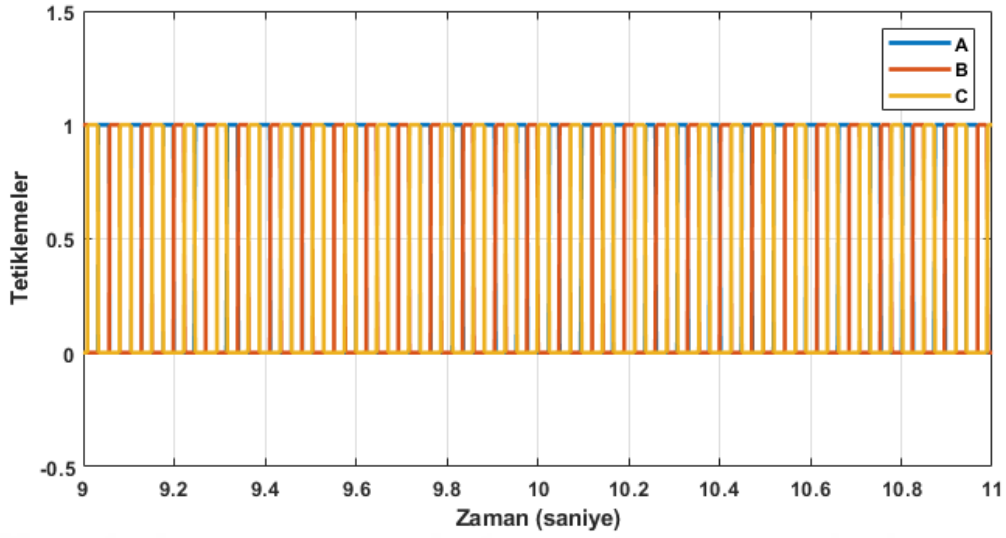
Şekil 3.54. 70-80 rad/s referans açısal hız değişimi için faz gerilimleri



Şekil 3.55. 70-80 rad/s referans açısal hız değişimi için rotorun konum değişimi

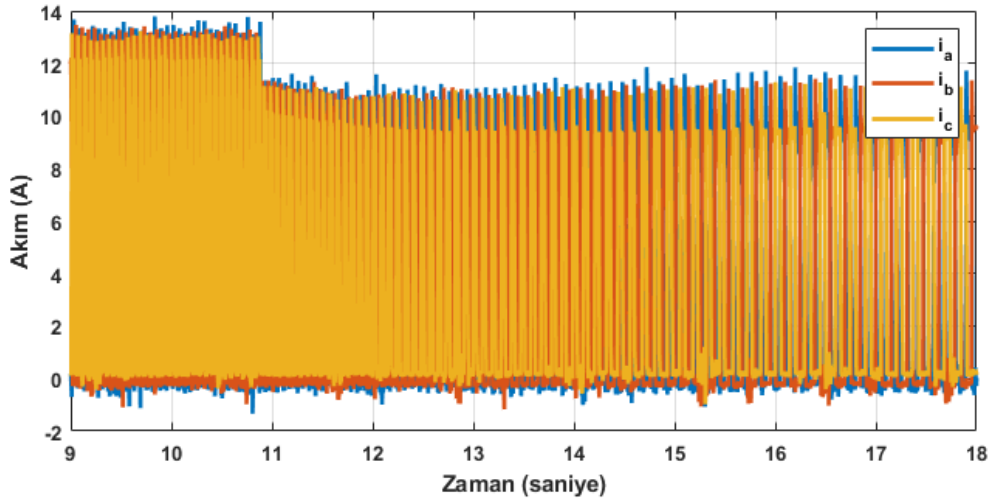


Şekil 3.56. 70-80 rad/s referans açısal hız değişimi için gerçek açısal hız

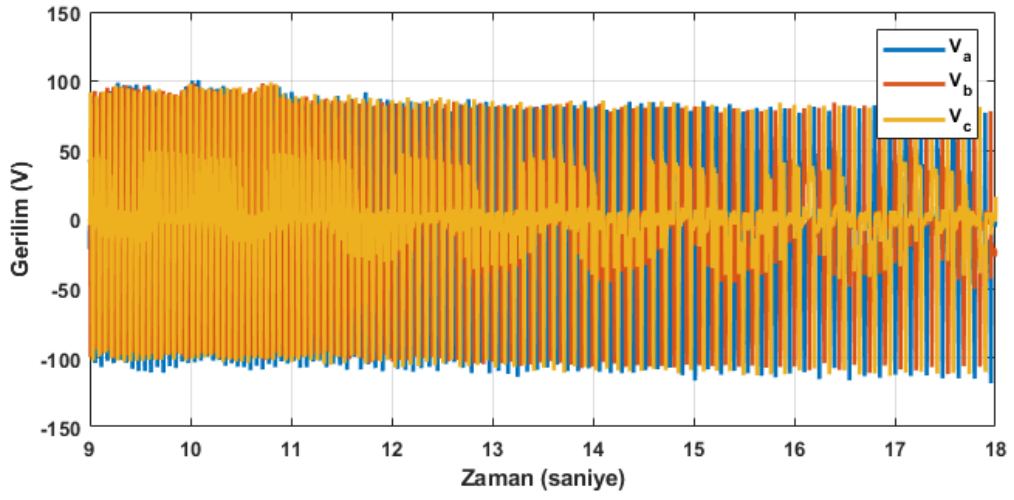


Şekil 3.57. 70-80 rad/s referans açısal hız değişimi için tetikleme sinyalleri

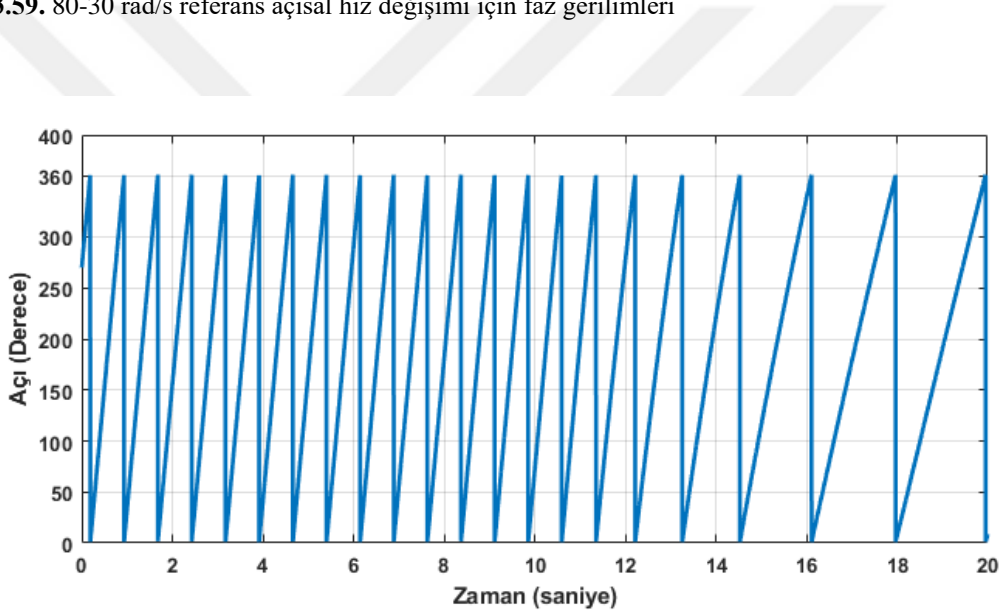
Altıncı deneysel sonuçlarda, referans açısal hız, 80 rad/s'den 30 rad/s'ye düşürülmüştür. Buna göre Şekil 3.58.'de faz akımları, Şekil 3.59.'da faz gerilimleri, Şekil 3.60.'ta rotor konum değişimi, Şekil 3.61.'de gerçek açısal hız ve Şekil 3.62.'de tetikleme sinyalleri verilmiştir.



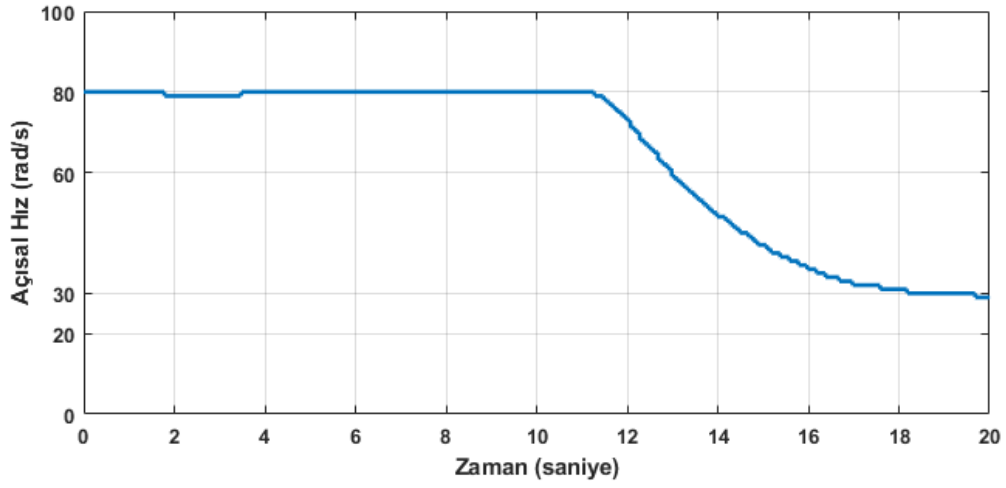
Şekil 3.58. 80-30 rad/s referans açısal hız değişimi için faz akımları



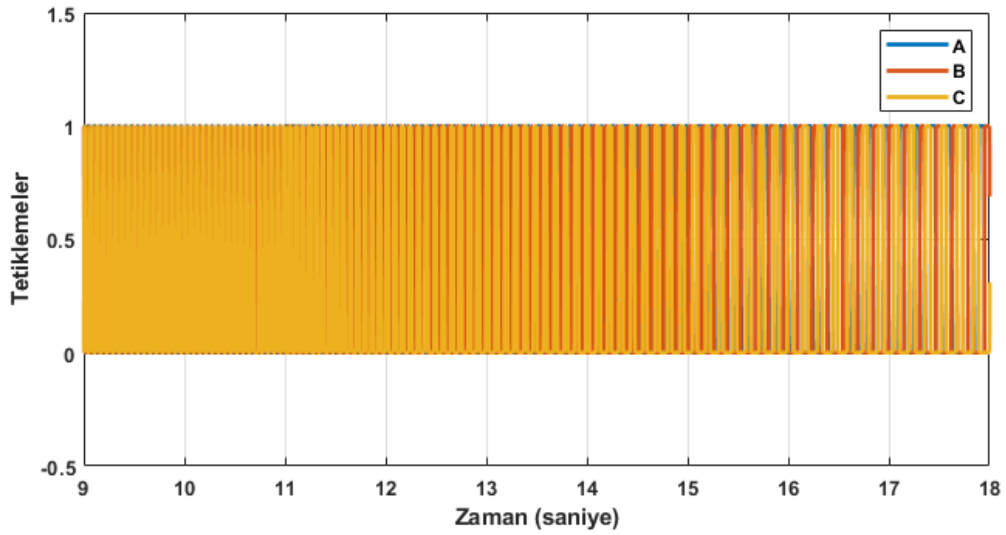
Şekil 3.59. 80-30 rad/s referans açısal hız değişimi için faz gerilimleri



Şekil 3.60. 80-30 rad/s referans açısal hız değişimi için rotorun konum değişimi

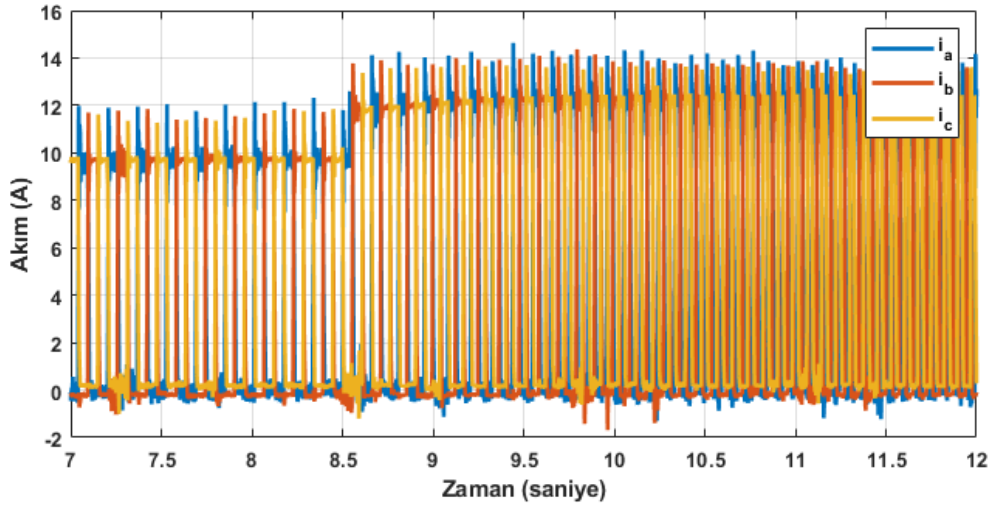


Şekil 3.61. 80-30 rad/s referans açısal hız değişimi için gerçek açısal hız

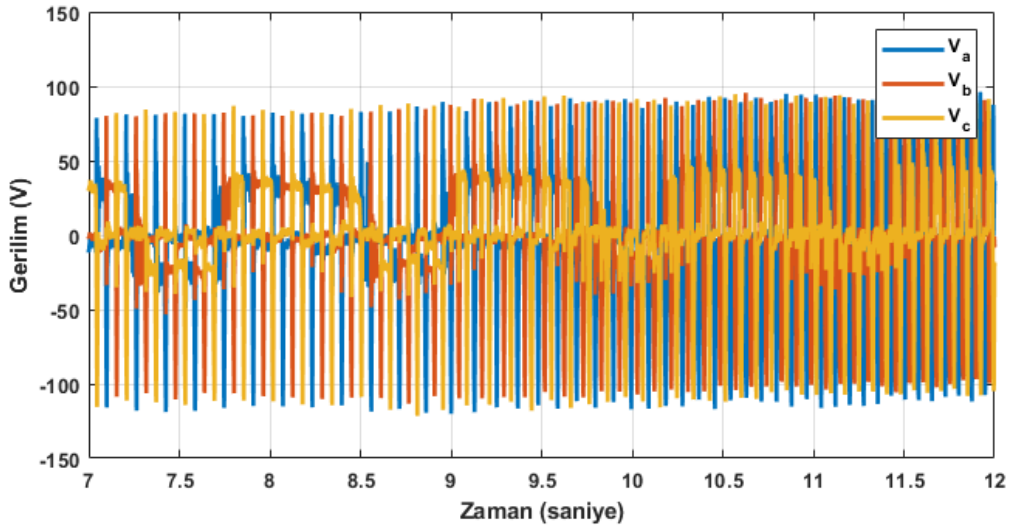


Şekil 3.62. 80-30 rad/s referans açısal hız değişimi için tetikleme sinyalleri

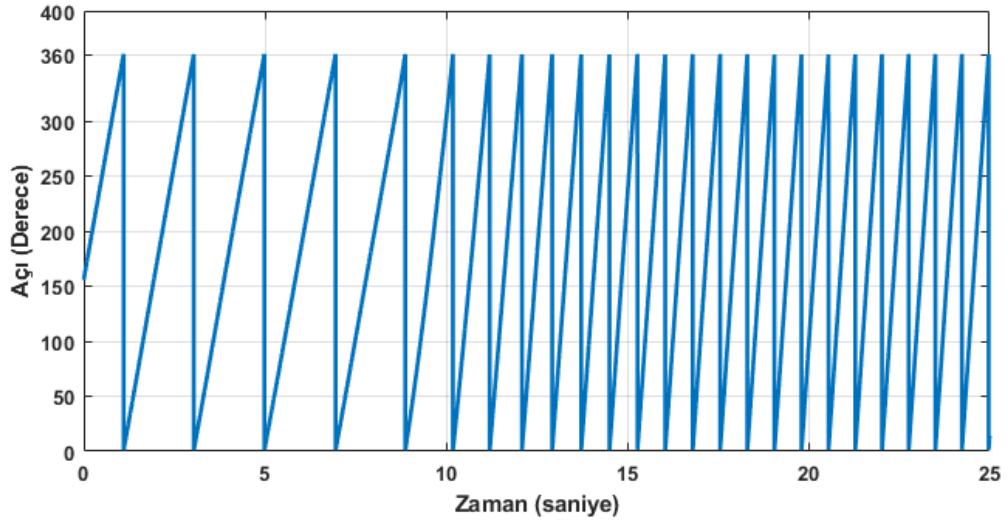
Yedinci deneysel sonuçlarda, referans açısal hız, 30 rad/s'den 80 rad/s'ye çıkarılmıştır. Buna göre Şekil 3.63.'te faz akımları, Şekil 3.64.'te faz gerilimleri, Şekil 3.65.'te rotor konum değişimi, Şekil 3.66.'da gerçek açısal hız ve Şekil 3.67.'de tetikleme sinyalleri verilmiştir.



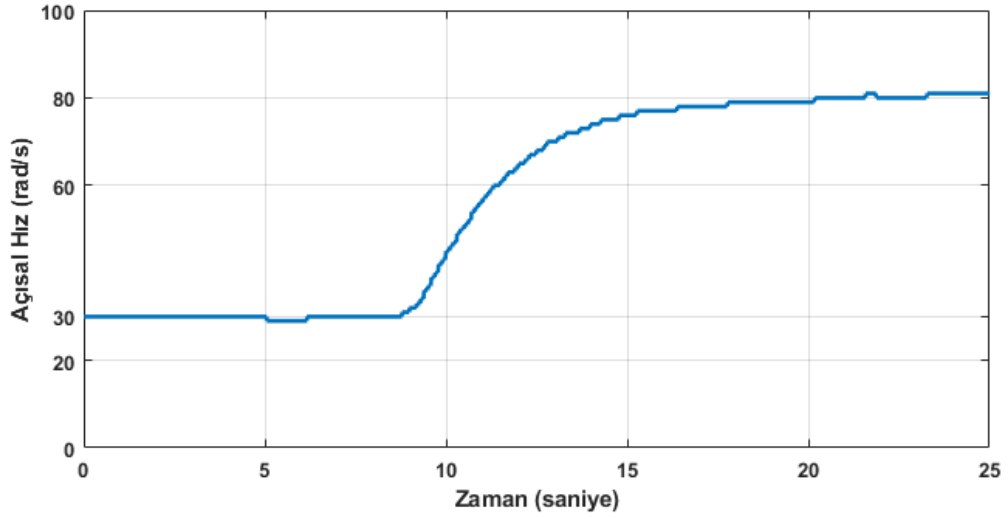
Şekil 3.63. 30-80 rad/s referans açısal hız değişimi için faz akımları



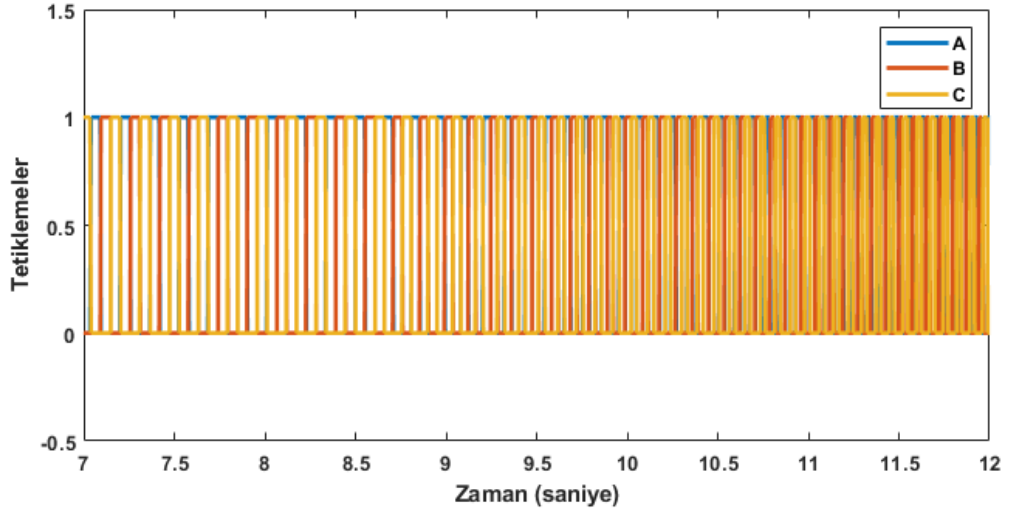
Şekil 3.64. 30-80 rad/s referans açısal hız değişimi için faz gerilimleri



Şekil 3.65. 30-80 rad/s referans açısal hız değişimi için rotorun konum değişimi



Şekil 3.66. 30-80 rad/s referans açısal hız değişimi için gerçek açısal hız



Şekil 3.67. 30-80 rad/s referans açısal hız değişimi için tetikleme sinyalleri

#### 4. TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada anahtarlamalı relüktans motorların, referans akı yöntemi ile konum ölçersiz kontrolü çalışılmıştır. Öncelikle literatür çalışması yapılmış daha sonra ARM'ye ilişkin temel bilgiler verilmiştir. Önerilen kontrol yönteminin mantığı açıklanmış, mevcut diğer konum ölçersiz kontrol metotları ile kıyas edilmiştir.

18/12 kutuplu üç fazlı ters ARM'ye ait elektromanyetik karakteristik verileri kullanılarak ARM'nin elektriksel modeli, Mathworks MATLAB/Simulink ortamında tasarlanmıştır. Tasarlanan modelin matematiksel modelden farklı olarak ARM'nin elektriksel ve fiziksel davranışını daha iyi ifade ettiği görülmüştür. Daha sonra bu ARM modeli için açık çevrim ve kapalı çevrim kontrol algoritmaları ile hız kestirim algoritması tasarlanmıştır. Açık çevrimde ilk hareket tetiklemeleri toplam 2.5 saniye boyunca uygulanmıştır. Bu süre boyunca çakışık konumdaki A fazının sargı akımı 236.5 A değerine çıkmıştır. Dolayısıyla ilk hareket süresinin daha kısa tutulması önerilmiştir. Açık çevrimde rotor 2.5 saniye süren hareketi sonunda toplam  $2627^\circ$  (45.85 radyan) yol almıştır. Rotorun ortalama gerçek açısal hızı 18.24 rad/s ve ortalama kestirilmiş açısal hızı 18.30 rad/s olmuştur. Bu değerlere göre ortalama açısal hız ile ortalama gerçek hız arasında %0.3279'luk bir hata görülmüştür. Üretilen ortalama moment ise 54.69 Nm olmuştur.

Kapalı çevrimde de ilk 2.5 saniye ilk hareket tetiklemeleri verilmiştir. Bu süre boyunca çakışık konumdaki A fazının sargı akımı 234.5 A değerine çıkmıştır. Referans hız olarak sisteme 15 rad/s verilmiştir. Rotor 2.5 saniyelik hareketi sonunda toplam  $1943^\circ$  (33.91 radyan) yol almıştır. Rotorun ortalama gerçek açısal hızı 15.45 rad/s ve ortalama kestirilmiş açısal hızı 15.80 rad/s olmuştur. Bu değerlere göre ortalama kestirilmiş açısal hız ile ortalama gerçek hız arasında %2.2152'lik bir hata görülmüştür. Referans hız ile ortalama kestirilmiş açısal hız arasında ise %5.0633'lük bir hata görülmüştür. Üretilen ortalama moment ise 41.8107 Nm olmuştur.

Açık çevrim ve kapalı çevrim için besleme gerilimi 100 V'tur. Dolayısıyla bu besleme geriliminde motor en fazla 18.24 rad/s açısal hıza çıkabilmekte ve 54.69 Nm moment oluşturabilmektedir. Daha yüksek hızlara çıkabilmek için fazların enerjilendirilme zamanlarını değiştirmek gereklidir. Bu amaçla referans akı değerleri değiştirilebilir. Kapalı çevrimde rotor gerçek hızını referans açısal hıza daha yakın tutabilmek için PI kontrolörün katsayıları değiştirilebilir. Açık çevrimde üretilen en küçük moment değeri 54.613 Nm'dir.

En büyük moment değeri ise 55.8754 Nm'dir. Kapalı çevrimde üretilen en küçük moment değeri 33.375 Nm'dir. En büyük moment değeri ise 50.2465 Nm'dir. Dolayısıyla kapalı çevrim kontrolde moment dalgalılığının yaşandığı görülmüştür. Bu durum hem ARM'nin yapısından ve kontrol tekniğinden hem de referans akı yönteminden kaynaklanmaktadır. Aynı yöntemi kullanacak araştırmacılara bu kontrol algoritmalarına ek olarak moment dalgalılığını azaltacak tedbirleri almaları veya moment dalgalılığı daha az olan diğer kontrol yöntemlerinden birini kullanmaları önerilmiştir.

Deneysel sonuçlar için yedi farklı ölçüm alınmıştır. Bu ölçümlerin her birinde, faz akımları, faz gerilimleri, rotor konumu, açısal hız ve tetikleme sinyalleri ölçülmüştür. Alınan ölçümler süresince ARM'ye 30 rad/s, 40 rad/s, 50 rad/s, 70 rad/s ve 80 rad/s referans açısal hızlar verilmiştir. ARM'nin akım ve gerilim değerleri gözlenmiştir. ARM küçük referans açısal hızlarda (Ör: 30 rad/s) küçük akımlar çekerken, daha büyük referans açısal hızlarda (Ör: 80 rad/s) daha büyük akımlar çekmiştir. Faz akımları tetiklemelerle beraber yükselmeye başlamış, akım PI'ndan gelen referans akım değerine ulaşınca sabitleşmiştir. ARM güç devresi trafo ile beslenmiştir. Akı hesaplama hatalarının azaltılması için ARM'nin batarya veya DA güç kaynağı ile beslenmesi önerilmiştir. ARM'nin değişen referans açısal hıza daha hızlı ulaşabilmesi için PI kontrolör katsayılarında iyileştirilme yapılması gerektiği önerilmiştir.

Referans akı yöntemi ile konum ölçersiz ARM kontrolünün maliyeti önemli ölçüde düşürdüğü, özellikle sabit hız gerektiren veya açık çevrim uygulamalar için uygulanabilir bir yöntem olduğu anlaşılmıştır. Kapalı çevrim uygulamalar için ise moment dalgalılığı iyileştirilmiş bir modelin kullanılması önerilmiştir.

## KAYNAKLAR

**Acarney, P.P., French, C.D., A1-Bahadly, I.H.,** 1995. Position estimation in switched-reluctance drives. *6th European Conference on Power Electronics and Applications*, Sevilla, Spain, 19-21 September 1995, pp. 3765-3770.

**Acarney, P.P., Hill, R.J., Hooper, C.W.,** 1985. Detection of rotor position in stepping and switched reluctance motors by monitoring of current waveforms. *IEEE Transactions*, Vol. IE-32, No. 3, pp. 215-222.

**Archambeault, B. R., & Drewniak, J.,** 2013. PCB design for real-world EMI control (Vol. 696), Springer Science & Business Media.

**Bu, J., & Xu, L.,** 2001. Eliminating starting hesitation for reliable sensorless control of switched reluctance motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37(1), 59-66.

**Cai, J., & Deng, Z.,** 2014. A Switching Flux-linkage Reference-based Sensorless Method for Switched Reluctance Motor Drives. *Electric Power Components and Systems*, 42(2), 227-237.

**Cheok, A., & Ertugrul, N.,** 1996. A model free fuzzy logic based rotor position sensorless switched reluctance motor drives. *Thirty-First IAS Annual Meeting*, San Diego, CA, USA, 6-10 Oct., pp. 76-83.

**Cheok, A. D., & Ertugrul, N.,** 2000. High robustness and reliability of fuzzy logic based position estimation for sensorless switched reluctance motor drives. *IEEE transactions on power electronics*, 15(2), 319-334.

**Cheok, A. D., & Wang, Z.,** 2005. Fuzzy logic rotor position estimation based switched reluctance motor DSP drive with accuracy enhancement. *IEEE transactions on power electronics*, 20(4), 908-921.

**Chi, H. P., Lin, R. L., & Chen, J. F.,** 2005. Simplified flux-linkage model for switched-reluctance motors. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 152(3), 577-583.

**Drager, B.T., Jones, S.R., Fordyce, G.T.,** 1999. Relative angle estimation apparatus for a sensorless switched reluctance machine system, *US Patent* No. 5867004 dated 2 February 1999.

**Ehsani, M., & Fahimi, B.,** 2002. Elimination of position sensors in switched reluctance motor drives: state of the art and future trends. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(1), 40-47.

**Ehsani, M., Husain, I., & Kulkarni, A. B.,** 1992. Elimination of discrete position sensor and current sensor in switched reluctance motor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(1), 128-135.

- Ertugrul, N., & Cheok, A. D.,** 2000. Indirect angle estimation in switched reluctance motor drive using fuzzy logic based motor model. *IEEE transactions on power electronics*, 15(6), 1029-1044.
- Gan, C., Wu, J., Hu, Y., Yang, S., Cao, W., & Kirtley, J. L.,** 2016. Online sensorless position estimation for switched reluctance motors using one current sensor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(10), 7248-7263.
- Gupta, R. A., Bishnoi, S. K., & Kumar, R.,** 2010. Sensorless control of switched reluctance motor drive with fuzzy logic based rotor position estimation. *International Journal of Computer Applications*, 1(22), 72-79.
- Hedlund, G., Lundberg, H.,** 1991. Energizing system for a variable reluctance motor, *US Patent* No. 5043643 dated 27 August 1991.
- Hudson, C. A., Lobo, N. S., & Krishnan, R.,** 2008. Sensorless control of single switch-based switched reluctance motor drive using neural network. *IEEE transactions on industrial electronics*, 55(1), 321-329.
- Husain, I.,** 2002. Minimization of torque ripple in SRM drives. *IEEE transactions on Industrial Electronics*, 49(1), 28-39.
- Khalil, A., Husain, I., Hossain, S. A., Gopalakrishnan, S., Omekanda, A. M., Lequesne, B., & Klode, H.,** 2005. A hybrid sensorless SRM drive with eight-and six-switch converter topologies. *IEEE transactions on industry applications*, 41(6), 1647-1655.
- Kioskeridis, I., & Mademlis, C.,** 2005. Maximum efficiency in single-pulse controlled switched reluctance motor drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(4), 809-817.
- Koblara, T., Sorandaru, C., Musuroi, S., & Svoboda, M.,** 2010. A low voltage sensorless switched reluctance motor drive using flux linkage method. *12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Basov, Romania, 20-22 May, pp. 665-672
- Krishnan, R.,** 2001. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. CRC press.
- Lumsdaine, A., Lang, J.H.,** 1990. State observers for variable-reluctance motors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. IE-37, No. 2, pp. 133-142.
- Lyons, J.P., MacMinn, S.R.,** 1992. Rotor position estimator for a switched reluctance machine, *US Patent* No. 5097190 dated 17 March 1992.
- Lyons, J.P., MacMinn, S.R., Preston, M.A.,** 1991. Flux-current methods for SRM rotor position estimation, *Industry Applications Society Annual Meeting*, Dearborn, MI, USA, 28 Sept.-4 Oct. 1991, pp. 482-487.

- Ma, Q. Q., Liang, W. H., Ferreira, F. J. T. E., Bi, D. Q., & Ge, B. M.,** 2014. Improved flux linkage method for position sensorless control of high-speed SRM. *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Berlin, Germany, 2-5 September, pp. 783-788
- Mademlis, C., & Kioskeridis, I.,** 2003. Performance optimization in switched reluctance motor drives with online commutation angle control. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 18(3), 448-457.
- Miller, T. J. E.,** 1993. *Switched Reluctance Motors and Their Control*, Clarendon Press.
- Miller, T.J.E., Bass, J.T.,** 1986. Switched reluctance motor drive operating without a shaft position sensor, *US Patent* No. 4611157 dated 9 September 1986.
- Mvungi, N. H.,** 2006. Sensorless commutation control of switched reluctance motor. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, Vol:1, No:1.
- Oldenkamp, J.L.,** 1995. Reversible switched reluctance motor operating without a shaft position sensor, *US Patent* No. 5440218 dated 8 August 1995.
- Omaç, Z.,** 2006. Yeni bir anahtarlı relüktans motorun tasarımı ve akım kontrolü. *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 141s.
- Peng, F., Ye, J., Emadi, A., & Huang, Y.,** 2017. Position sensorless control of switched reluctance motor drives based on numerical method. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(3), 2159-2168.
- Polat, M.,** 2010. Anahtarlmalı relüktans motorda sensörsüz konum kontrolü ve moment dalgalılığının azaltılması. *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 229s.
- Polat, M., Oksuztepe, E., & Kurum, H.,** 2016. Switched reluctance motor control without position sensor by using data obtained from finite element method in artificial neural network. *Electrical Engineering*, 98(1), 43-54.
- Ray, W. F., Lawrenson, P. J., Davis, R. M., Stephenson, J. M., Fulton, N. N., & Blake, R. J.,** 1986. High-performance switched reluctance brushless drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, (4), 722-730.
- Reichard, J.G., Weber, D.B.,** 1989. Switched reluctance electric motor with regeneration current commutation, *US Patent* No. 7566-2306 dated 23 May 1989.
- Shahabi, A., Rashidi, A., Afshoon, M., & NEJAD, S. M. S.,** 2016. Commutation angles adjustment in SRM drives to reduce torque ripple below the motor base speed. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24(2), 669-682.
- Song, S., Ge, L., & Zhang, Z.,** 2016. Accurate position estimation of SRM based on optimal interval selection and linear regression analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(6), 3467-3478.

**Takiguchi, M., Sugimoto, H., Kurihara, N., & Chiba, A.,** 2015. Acoustic noise and vibration reduction of SRM by elimination of third harmonic component in sum of radial forces. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(3), 883-891.

**Tian, Z., & Zhang Y.,** 2015. Study of the sensorless switched reluctance motor controller based the simplified flux method. *Electrical and Electronics Engineering: An International Journal*, Vol 4, No 4.

**Vukosavic, S., Peric, L., Levi, E., Vuckovic, V.,** 1990. Sensorless operation of the SR motor with constant dwell. *21st Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, San Antonio, TX, USA, 1990, pp. 451-554.

**Wang, T., Ding, W., Hu, Y., Yang, S., & Li, S.,** 2018. Sensorless control of switched reluctance motor drive using an improved simplified flux linkage model method. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, San Antonio, TX, USA, 4-8 March, pp. 2992-2998.

**Xiang, Q., Yuan, Y., Yu, Y., & Chen, K.,** 2018. Rotor position self-sensing of SRM using PSO-RVM. *Energies*, 11(1), 66.

**Ye, J., Bilgin, B., & Emadi, A.,** 2015. An offline torque sharing function for torque ripple reduction in switched reluctance motor drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(2), 726-735.

**Zhang, Y., Liu, C., & Zhang, L.,** 2014. Sensorless control of SRM based on improved simplified flux-linkage method. *17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Hangzhou, China, 22-25 Oct, pp. 722-726.

**Zhong, R., Wang, Y. B., & Xu, Y. Z.,** 2012. Position sensorless control of switched reluctance motors based on improved neural network. *IET electric power applications*, 6(2), 111-121.

## **EKLER**

### **EK 1: Kullanılan Programların Listesi**

- Mathworks MATLAB/Simulink
- ANSYS Maxwell
- AutoDesk Eagle Cad
- Vivado Design Suite



## ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Tunceli’de doğdu. 2003 yılında Munzur İlköğretim Okulu’ndan, 2007 yılında Erzincan İMKB Nevzat Ayaz Fen Lisesi’nden mezun oldu. 2008 yılında girdiği Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği bölümünden 2013 yılında “Haberleşme Sistemleri için Blok Serpiştirici Tasarımı ve VHDL ile Gerçeklenmesi” başlıklı bitirme tezi ile mezun oldu. 113M090 proje nolu “Ters Relüktans Motorlu Elektrikli Otomobilin Tasarımı, İmalatı ve Kontrolü” adlı TÜBİTAK projesinde bursiyer olarak çalıştı. 2016 yılından beri Fırat Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Uçak Elektrik-Elektronik bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. İlgili alanlarının başında relüktans motorlar, kontrol sistemleri, FPGA, VHDL, EMU ve baskı devre tasarımı gelmektedir.