

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



MUNZUR
ÜNİVERSİTESİ
2008

**ANAHTARLAMALI RELÜKTANS GENERATÖRÜN MODELLENMESİ VE
KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ceren CEVAHİR**

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği

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

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

**ANAHTARLAMALI RELÜKTANS GENERATÖRÜN MODELLENMESİ VE
KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ceren CEVAHİR
(151103102)**

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği

**DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Zeki OMAÇ**

TUNCELİ – 2018

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ANAHTARLAMALI RELÜKTANS GENERATÖRÜN MODELLENMESİ VE
KONTROLÜ**

Ceren CEVAHİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 19/06/2018 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği/oyçokluğu** ile kabul edilmiştir.

İmza:.....

İmza:.....

İmza:.....

Dr. Öğr. Üyesi
Zeki OMAÇ
(Munzur Üniversitesi)

Doç. Dr.
(Munzur Üniversitesi)

Doç. Dr.
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

ÜYE

ÜYE

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

Doç. Dr. Numan YILDIRIM
Enstitü Müdürü
İmza ve Mühür

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

Anahtarlamalı relüktans makinalar basit yapısı, sadece statorda sargı bulundurması, güvenilirliği, yüksek hata toleransına sahip olması ve geniş hız aralığı içerisinde çalışabilme imkânı sağlaması yönü ile diğer elektrik makinaları içerisinde öne çıkmaktadır.

Anahtarlamalı relüktans makinalar motor olarak kullanıldıkları gibi tetikleme açıları değiştirilerek generatör olarak da kullanılabilirler. Özellikle değişken hız aralığında çalışabilme özelliğinden ötürü rüzgâr güç santrallerinde kullanılan bu generatörlerin diğer kullanım alanları havacılık çalışmaları ve elektrikli otomobillerdir. Motor olarak kullanıldıkları uygulamalarda, sistem için gereken elektrik enerjisi üretimi için farklı bir kaynağa ihtiyaç duyulmaması bu makinaların en büyük avantajlarından birisidir.

Bu tez çalışmasında anahtarlamalı relüktans generatörün (ARG) kontrolü gerçekleştirilmiştir. İncelenen ARG sürücüsünün Matlab/Simulink'te gerçek zamanlı bir benzetimi gerçekleştirilmiş ve ARG'nin performansını belirlemek amacıyla DS1103 Ace kit sayısal sinyal işlemcisi kullanılmıştır. ARG'nin çıkış gerilimi, PI gerilim denetleyici ile kontrol edilmiştir.

Çalışmanın sonunda farklı parametrelere göre ARG faz akımında meydana gelen değişim grafikleri elde edilmiştir. Deneysel ve benzetim sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçların birbiriyle örtüştüğü gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Anahtarlamalı Relüktans Generatör, PI Gerilim Kontrol, Sayısal Sinyal İşlemci.

ABSTRACT

Modeling and Control of Switched Reluctance Generator

Switched reluctance machines stand out among other electric machines in that they have simple structures featuring, only winding in the stator, reliability, high fault tolerance and the ability to operate within wide speed range.

Switched reluctance machines can be used as generators by changing triggering angles as they are used as motors. These generators are used in other applications such as in wind power plants, aeronautics and electric automobiles, especially due to their ability to operate in a variable speed range. One of the biggest advantages of these machines is that they do not need a different source of electrical energy for the system they use as a motor.

In this thesis, the control of a switched reluctance generator (SRG) was performed. A real-time simulation of the SRG driver was carried out in Matlab/Simulink and the DS1103 Ace kit digital signal processor was used to determine the performance of the SRG. The output voltage of the SRG was controlled by using a PI voltage controller.

At the end of the study, change graphs were obtained for SRG phase current according to different parameters. Experimental and simulation results were compared and the results were observed to coincide with each other.

Key Words: Digital Signal Processor, PI Voltage Control, Switched Reluctance Generator.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitiminin esnasında derin bilgi birikimi ve tecrübesiyle çalışmalarımı destekleyen ve yönlendiren değerli danışman hocam **Dr. Öğr. Üyesi Zeki OMAÇ**'a en içten teşekkür ederim.

Tez çalışmamın deneysel aşamasına sunduğu katkılardan dolayı **Araş. Gör. Ufuk KAYA**'ya teşekkür ederim.

Ceren CEVAHİR

TUNCELİ-2018



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	II
ABSTRACT	III
TEŞEKKÜR	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	X
SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ	1
1.1. ARG'lerin Tarihi Gelişimi.....	1
1.2. ARG Üzerine Yapılmış Çalışmalar.....	3
1.3. Tezin Amacı.....	9
1.4. Tezin İçeriği.....	10
2. MATERYAL ve METOT	11
2.1. ARG'nin Yapısı ve Çalışma Prensipleri.....	11
2.1.1. ARG'nin Yapısı.....	13
2.1.2. ARG'lerin Çalışma İlkesi.....	16
2.1.3. ARG'de Endüktans Değişimi.....	22
2.1.4. ARG Eşdeğer Devresi ve Moment Değişimi.....	24
2.1.5. ARG'de Manyetik Enerji Hesaplama.....	34
2.1.6. ARG Besleme Devresi.....	36
2.1.6.1. Klasik İki Diyotlu Besleme Devresi	37
2.1.7. ARG'lerin Üstünlükleri.....	38
2.1.8. ARG'lerin Sakıncaları.....	39
3. BULGULAR ve TARTIŞMA	40
3.1. ARG'nin Kontrolü.....	40
3.1.1. ARG için Denetleyici Tasarımı.....	42
3.1.2. Rotor Konum Sensörü Bloğu.....	44
3.1.3. ARG Dönüştürücü Tasarımı.....	45
3.1.4. ARG Sargı Bloğu.....	46
3.1.5. ARG Moment Ölçümü.....	49
3.1.6. ARG Çıkış Gerilimi Kontrolü.....	50
3.2. ARG'nin Kontrolünde Kullanılan Donanım ve Yazılım.....	51
3.2.1. Dört Fazlı Sürücü ve Anahtarlama Kartı.....	52
3.2.1.1. Sürücü Devresi.....	52
3.2.1.2. Anahtarlama Devresi.....	53
3.2.1.3. Akım ve Gerilim Sensörleri.....	55
3.2.2. Konum Okuyucu.....	57
3.2.3. dSPACE DS1103 Denetleyici Kartı.....	57
3.2.4. Yazılım.....	60
3.3. ARG'nin Kontrolüne İlişkin Sonuçlar.....	62
3.3.1. Faz Akımını Etkileyen ARG Parametreleri.....	72
3.3.1.1. Tetikleme Açısının Etkisi.....	72
3.3.1.2. Hızın Etkisi.....	74
3.3.1.3. Faz Direncinin Etkisi.....	75
3.3.1.4. Besleme Geriliminin Etkisi.....	76

4. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	78
KAYNAKLAR.....	80
ÖZGEÇMİŞ.....	86



SEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Taylor'un 1840 yılında oluşturduğu makina.....	3
Şekil 2.1. Anahtarlamalı relüktans makina rotor ve statoru.....	13
Şekil 2.2. 8/6 kutuplu ve 4 fazlı bir ARG'nin ön kesit görünüşü.....	14
Şekil 2.3. Stator kutup sayısı ve rotor kutup sayısına göre ARG çeşitleri: a) bir fazlı 4/4 kutuplu ARG, b)iki Fazlı 4/2 kutuplu ARG.....	15
Şekil 2.4. Stator kutup sayısı ve rotor kutup sayısına göre ARG çeşitleri: c) üç fazlı 6/4 kutuplu ARG, d) dört fazlı 8/6 kutuplu ARG.....	16
Şekil 2.5. 8/6 kutuplu bir ARG'ye ait bazı büyüklükler	17
Şekil 2.6. 8/6 kutuplu ARG için kullanılan besleme devresi.....	17
Şekil 2.7. 8/6 kutuplu dört fazlı bir ARG'de bir fazın iletimi ile kesimi arasında akımın akış yolu.....	18
Şekil 2.8. Tek faz için sisteme dahil edilen yükün gösterilişi.....	18
Şekil 2.9. a)ARG terminal gerilimi, b) faz akımı, c) motor akımı, d) generatör akımı.....	19
Şekil 2.10. ARG'nin bir faz endüktansının rotor konumuna bağlı değişim grafiği...	22
Şekil 2.11. 8/6 kutuplu ARG'nin cos bağıntısından elde edilen dört faz endüktansının elektriksel konum açısına bağlı değişim grafiği.....	23
Şekil 2.12. Anahtarlamalı relüktans makinanın bir faz eşdeğer devresi.....	25
Şekil 2.13. Tek fazı beslenen 8/6 kutuplu anahtarlamalı relüktans makina.....	29
Şekil 2.14. Stator ve rotor kutuplarının çakışık olduğu durum.....	30
Şekil 2.15. Stator ve rotor kutuplarının ayrılmaya başladığı durum.....	30
Şekil 2.16. Stator ve rotor kutuplarının ayrık olduğu durum.....	31
Şekil 2.17. İdeal endüktans eğrisi–rotor/stator konumları.....	31
Şekil 2.18. İdeal endüktans eğrisi–rotor/stator konumlarına göre motor akımı grafiği.....	32
Şekil 2.19. İdeal endüktans eğrisi–rotor/stator konumlarına göre generatör akımı grafiği.....	32
Şekil 2.20. Anahtarlamalı relüktans makinanın endüktans değişimine bağlı moment üretimi.....	33
Şekil 2.21. Kutupların çakışık olduğu konumdaki manyetik enerji grafiği.....	34
Şekil 2.22. Kutupların birbirinden ayrılmaya başladığı konumda oluşan manyetik enerji grafiği.....	35
Şekil 2.23. Kutupların ayrık olduğu konumda kaynağa geri dönen manyetik enerji grafiği.....	35
Şekil 2.24. ARG'de manyetik enerjinin non-lineer dönüşümü.....	36
Şekil 2.25. Klasik iki diyotlu besleme devresi.....	37
Şekil 2.26. Besleme devresinin tek faz için iletim durumu.....	37
Şekil 2.27. Besleme devresinin tek faz için serbest dolaşım anı.....	38
Şekil 2.28. Besleme devresinin tek faz için kesim durumu.....	38
Şekil 3.1. ARG'de faz akımı, faz gerilimi ve faz endüktansının rotor konumuna göre değişimi.....	40
Şekil 3.2. ARG genel şeması.....	41
Şekil 3.3. Anahtarlamalı relüktans generatörün Matlab/Simulink modeli.....	41
Şekil 3.4. ARG'nin iletim ve kesim açılarının belirlenmesi ve akım kontrol bloğu...	42
Şekil 3.5. Uygun tetikleme açılarında çalışmayı sağlayan konum sensör bloğu.....	43

Şekil 3.6. ARG'nin 4 fazı için konum sensörü çıkış sinyalleri.....	44
Şekil 3.7. 4 Fazlı ARG için rotor konum bloğu.....	44
Şekil 3.8. Tek faz için kullanılan 2 diyotlu dönüştürücü devresi.....	45
Şekil 3.9. 4 Fazlı ARG dönüştürücü devresi bloğu.....	46
Şekil 3.10. ARG'nin faz sargılarını gösteren blok.....	47
Şekil 3.11. ARG'nin endüktans eğrilerini oluşturmak için kullanılan konum bloğu..	47
Şekil 3.12. ARG'nin A fazı bloğu.....	48
Şekil 3.13. ARG'nin A fazına ait sargı bloğu.....	48
Şekil 3.14. ARG'nin tek fazına ait endüktans bloğu.....	48
Şekil 3.15. 4 Fazlı ARG'nin momentini ölçen Matlab bloğu.....	49
Şekil 3.16. ARG'de çıkış geriliminin kontrolü.....	50
Şekil 3.17. ARG'nin deneysel şeması.....	51
Şekil 3.18. ARG, DA motor ve sürücü ve anahtarlama kartı.....	52
Şekil 3.19. ACPL 333J sürücü devresi.....	53
Şekil 3.20. Anahtarlama devresi elemanları (a) AUIRGPS4067D1 IGBT, (b) DSEI 120-12A toparlama diyotu.....	54
Şekil 3.21. Anahtarlama ve snubber devresi.....	54
Şekil 3.22. LA 55-P akım sensörü.....	55
Şekil 3.23. LV 25-P gerilim sensörü.....	55
Şekil 3.24. (a) TEL-3-2423 (b) VLA128-24153QR DA-DA izoleli gerilim kaynakları.....	56
Şekil 3.25. Akım sensörü devresi.....	56
Şekil 3.26. Konum okuyucu.....	57
Şekil 3.27. dSPACE Ace kit kartı.....	58
Şekil 3.28. DS1103 iç mimarisi	58
Şekil 3.29. DS1103 Master PPC Real-Time kütüphane blokları.....	59
Şekil 3.30. DS1103 Ace kit ve ARG deney şeması genel görünümü.....	60
Şekil 3.31. ARG-DSP bağlantı şeması.....	61
Şekil 3.32. ARG kontrol modeli.....	61
Şekil 3.33. İncelenen ARG'nin rotor konumuna bağlı endüktanslarının değişim grafığı.....	63
Şekil 3.34. ARG sargılarının uyarılmasını sağlayan tetikleme sinyal grafığı.....	63
Şekil 3.35. A fazının endüktans eğrisine bağlı olarak oluşan tetikleme sinyalleri.....	64
Şekil 3.36. A fazının endüktans ve akım grafığı.....	64
Şekil 3.37. A fazının endüktans, akım ve gerilim grafığı	65
Şekil 3.38. ARG'nin akı değişim grafığı.....	65
Şekil 3.39. ARG'nin yüksüz $n = 1000$ d/dak hızda $V = 30$ V'ta benzetim sonucunda elde edilen faz akımlarının değişim grafığı.....	66
Şekil 3.40. ARG'nin yüksüz $n = 1000$ d/dak hızda $V = 30$ V'ta deneysel ölçülen faz akımlarının değişim grafığı.....	66
Şekil 3.41. ARG'nin $V = 15$ V'ta benzetim sonucunda elde edilen faz akımlarının değişim grafığı.....	67
Şekil 3.42. ARG'nin $V = 15$ V'ta deneysel ölçülen faz akımlarının değişim grafığı.	67
Şekil 3.43. ARG'nin $V = 25$ V'ta benzetim sonucunda elde edilen faz akımlarının değişim grafığı.....	68
Şekil 3.44. ARG'nin $V = 25$ V'ta deneysel ölçülen faz akımlarının değişim grafığı	68
Şekil 3.45. ARG'nin $V = 30$ V'ta benzetim sonucunda elde edilen faz akımlarının değişim grafığı.....	69
Şekil 3.46. ARG'nin $V = 30$ V'ta deneysel ölçülen faz akımlarının değişim grafığı	69

Şekil 3.47. ARG, yük ve besleme kaynakları.....	70
Şekil 3.48. ARG'nin $V = 15 \text{ V}$ 'ta benzetim sonucunda elde edilen çıkış gerilimi grafiği.....	70
Şekil 3.49. ARG'nin $V = 15 \text{ V}$ 'ta deneysel ölçülen çıkış gerilimi grafiği.....	71
Şekil 3.50. ARG'nin $V = 25 \text{ V}$ 'ta benzetim sonucunda elde edilen çıkış gerilimi grafiği.....	71
Şekil 3.51. ARG'nin $V = 25 \text{ V}$ 'ta deneysel ölçülen çıkış gerilimi grafiği.....	71
Şekil 3.52. ARG'nin $V = 30 \text{ V}$ 'ta benzetim sonucunda elde edilen çıkış gerilimi grafiği.....	72
Şekil 3.53. ARG'nin $V = 30 \text{ V}$ 'ta deneysel ölçülen çıkış gerilimi grafiği.....	72
Şekil 3.54. A fazının farklı kesim açılarına göre akım grafiği.....	73
Şekil 3.55. A fazının farklı iletim açılarına göre akım grafiği.....	74
Şekil 3.56. A fazının farklı hızlara göre akım grafiği.....	74
Şekil 3.57. A fazının farklı stator direnci değerlerine göre akım grafiği.....	75
Şekil 3.58. A fazının farklı besleme gerilimlerine göre akım grafiği.....	76

TABLolar LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. ARG eşitleri ve stator/rotor kutupları sayısı.....	15
Tablo 3.1. $N_s/N_r=8/6$ ARG parametreleri.....	62



SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AA	:Alternatif Akım
ARG	:Anahtarlama Relüktans Generatör
ARM	:Anahtarlama Relüktans Motor
BJT	:Çift Kutuplu Jonksiyonlu Transistor (Bipolar Junction Transistor)
DA	:Doğru Akım
DSP	:Sayısal Sinyal İşlemci (Digital Signal Processing)
EMK	:Elektromotor Kuvveti
FKD	:Faz Kilitli Döngü
FPGA	:Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Array)
IGBT	:Yalıtılmış Kapılı Çift Kutuplu Transistor (Isolated Gate Bipolar Transistor)
LVRT	:Alçak Gerilimde Şebekede Kalabilme (Low Voltage Ride Through)
MOSFET	:Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistor (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
PI	:Oransal- İntegral (Proportional-Integral)
PWM	:Darbeli Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
SDRAM	:Eşzamanlı Dinamik Rastgele Erişimli Bellek (Synchronous Dynamic Random Access Memory)
SSC	:Akıllı Araştırma Kontrolü (Smart Search Control)
WEC	:Dalga Enerji Dönüştürücüsü (Wave Energy Converter)
α_r	:Rotor kutup adımı
β_r	:Rotor kutup yayı uzunluğu
β_s	:Stator kutup yayı uzunluğu
B	:Sürtünme katsayısı
C_{sn}	:Sönümlendirme kondansatörü
D_1, D_2, \dots	:Dönüştürücü devre diyotları
E	:Zıt emk
θ	:Rotor konumu
θ_i	:İletim açısı
θ_k	:Kesim açısı
I_{ort}	:Ortalama akım
I_{rms}	:Etkin akım değeri
I_{uyr}	:Anlık uyarılma akımı
i	:Faz akımı
i_{gen}	:Anlık generatör akımı
J	:Eylemsizlik momenti
K	:Endüktansın artığı bölgede endüktansın eğimi
K_i	:İntegral kontrol katsayısı
K_p	:Oransal kontrol katsayısı
L_{aa}, L_{bb}, \dots	:Öz-endüktans
L_{ab}, L_{ac}, \dots	:Karşılıklı endüktans
L_{max}	:Çakışık konum faz endüktansı
L_{min}	:Çakışık olmayan konum faz endüktansı
N_r	:Rotor kutup sayısı
N_s	:Stator kutup sayısı
$P_{bakır}$:Bakır kayıpları

P_{demir}	:Demir kayıpları
$P_{\text{diğer}}$:Sürtünme ve vantilasyon kaybı gibi diğer kayıplar
P_{gen}	:Makinanın generatör olarak çalışma modunda sahip olduğu güç
$P_{\text{kayıp}}$:Toplam kayıp
P_{mek}	:Mekanik kayıplar
P_{ort}	:Ortalama güç
P_{uyr}	:Uyarılma anında makinanın gücü
$P_{\text{yarıiletken}}$:Yarı iletken kayıpları
q	:Faz sayısı
R	:Faz direnci
R_{sn}	:Sönümlendirme direnci
$S_1, S_2 \dots$:Dönüştürücü devre anahtarları
T_e	:Üretilen toplam moment
T_{emag}	:Elektromanyetik moment
T_m	:Mekanik moment
V	:Şebeke gerilimi
V_{Csn}	:Sönümlendirme kondansatörü gerilimi
v_{gen}	:Anlık generatör gerilimi
V_o	:Yük gerilimi
V_{ort}	:Ortalama gerilim
V_{ref}	:Referans gerilim
V_{uyr}	:Anlık uyarılma gerilimi
ω	:Açısal hız
W_1	:Kutupların çakışık olduğu konumdaki manyetik enerji
W_2	:Kutupların birbirinden ayrılmaya başladığı konumda oluşan manyetik enerji
W_3	:Kutupların ayrık olduğu konumda kaynağa geri dönen manyetik enerji
W_{co}	:Ko-enerji (eşlenik enerji)
W_{toplam}	:Toplam enerji
Ψ	:Faz akısı

1. GİRİŞ

Anahtarlamaalı relüktans makinalar son zamanlarda farklı alanlarda kullanımı hızla artmaya başlayan makinalardır. Bu artışta, teknolojiadaki gelişmelerin payı büyüktür. Özellikle yarı iletkenler ve güç elektroniğindeki gelişmeler bu makinalara ait bir takım dezavantajları ortadan kaldırmış ve onun zamanla diğer elektrik makinaları arasında iyi bir konuma gelmesini sağlamıştır (Yeksan ve Ergene, 2014). Anahtarlamaalı relüktans makinalar, yapı olarak senkron makinalara benzerler ancak çalışma ve kontrol yönüyle geleneksel elektrik makinalarından ayrılırlar (Darie ve ark., 2004). Motor olarak kullanıldıkları gibi tetikleme açıları değiştirilerek generatör olarak da kullanılabilirler.

Anahtarlamaalı relüktans generatörler (ARG), mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren makinalardır. Yapı itibarıyla rotorlarında sargı ya da mıknatıs içermezler. Yalnızca statorlarında sargıları vardır. Bu sebeple ısı kayıpları büyük oranda statorda gerçekleşir. Bu yönü, kolay soğutmayı ve yüksek sıcaklık ve hızlarda çalışabilmeyi mümkün kılar (Ivanov ve ark., 2017). Ayrıca düşük maliyetli ve güvenilir olması, bakım-onarım masrafının az olması ve en önemlisi geniş bir hız aralığı içerisinde çalışabilme özelliğine sahip olmasından ötürü bu makinalar bilim insanlarının dikkatini çekmiştir (Lawrenson ve ark., 1980). ARG'lere ait çalışmalar son dönemde artış göstermiştir. Özellikle havacılık çalışmalarında, uzay araçlarının gaz türbinlerinde ve arabalarda starter/generator olarak kullanımında, batarya yüklemeye, otomotiv ve rüzgâr güç santralleri gibi alanlarda adından sıkça bahsettirmeyi başarmıştır.

1.1. Anahtarlamaalı Relüktans Generatörlerin Tarihi Gelişimi

Yapılan uzun çalışmalar sonucunda 1838'de ABD'de W. H. Taylor tarafından anahtarlamaalı relüktans makina icat edilmiştir. Bu makina için patent ise İngiltere'de Mayıs 1840'ta alınmıştır (Bowers, 2001). Bu makina, Şekil 1.1'de gösterildiği üzere, yüzeyinde çevreye eşit mesafede yedi adet yumuşak demir bulunan bir ahşap tekerlekten oluşmaktaydı (Zai-Pain ve ark., 2004). Bu tekerlek, dört elektromıknatısın monte edildiği

bir çerçevede serbestçe dönebilme yetisine sahipti. Elektromıknatıslar, tekerleğin mili üzerindeki mekanik bir anahtarlama düzeneğiyle bir aküye bağlanmıştı. Bu sayede bir elektromıknatısın uyarılması en yakın demir parçasını çekip tekerleği döndürecek ve harekete devam etmek için bir sonraki elektromıknatısa enerji verebilme imkânı sağlayacaktı. 19. yüzyılın ilk yarısında, dünyanın dört bir yanındaki bilim insanları tarafından makinanın bu özelliği kullanılarak sürekli bir elektriksel hareket üretilmeye çalışılmıştır. Ancak bu makinaların bazı sakıncalarından ötürü bu çalışmalara bir müddet ara verilip farklı elektrik makinaları üzerine yoğunlaşmıştır (Nassereddine, 2011). Yaklaşık 140 yıllık bir zaman diliminden sonra, uygun teknolojinin gelişmesiyle birlikte elektronik güç anahtarlarının ortaya çıkması, bilim insanlarının dikkatini tekrardan bu makinalar üzerine çekmiştir. Makina tasarımındaki gelişmeler, anahtarlama relüktans makinanın değişken hız aralığında çalışabilme özelliği, basit mekanik yapısı, ekonomik bir yapıda ve özellikle de güvenilir bir çalışma ortamına sahip olması bu alanda yapılan çalışmalarda gözle görülür bir artış meydana getirmiştir. Anahtarlama relüktans makinalarda, faz sargılarının tek kutuplu akım gereksinimleri basit ve güvenilir bir güç dönüştürücü devresini yeterli kılar (Miller, 2001). 1960'larda, yarı iletken ve güç anahtarlama teknolojisinde ileri düzeyde yaşanan gelişmeler, değişken hız sürücülerinin başarılı bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Geçtiğimiz birkaç on yıl içinde, çok sayıda anahtarlama relüktans makina ve anahtarlama yöntemi hem teorik hem de deneysel olarak incelenmiştir. 1976'dan önce, anahtarlama relüktans makinalar üzerine 67 patent yayınlanmış ve 1976-1999 yılları arasında 1755 patent yayınlanmıştır (Nassereddine, 2011). 19. yüzyılda, elektromanyetik makinaların birçok türü ve şekli üzerine çalışmalar yapılmaya devam edilmiştir.

Elektronik piyasasında anahtarlama relüktans generatörler üzerine yapılan çalışmalarda artış, özellikle 1960'lı yıllarda kendini göstermeye başlamıştır. Güç transistörlerinin/geliştiricilerinin, özellikle de bipolar jonksiyonların, güç MOSFET'lerinin ve IGBT'lerin (Insulated gate bipolar transistor, yalıtılmış kapılı iki kutuplu transistör) geliştirilmesi, komütasyon ve anahtarlama mekanizmasını tasarlamayı kolaylaştırmıştır (Mataray, 2012). Bu cihazlar, akım regülatörlerini çok yüksek frekanslarda modüle etmek için darbeli genişlik modülasyonu (DGM) üreterek çalışırlar ve dolayısıyla tristörün yerini alırlar. Mikroişlemcilerdeki gelişmeler ve kontrol algoritmalarını uygulama becerileri, sonlu elemanlar/analizler yapmak için bilgisayar kullanımı gibi gelişmeler anahtarlama relüktans makinalarında daha iyi tasarım ve performans sağlamıştır. Geçtiğimiz on yılda

başta Avrupa, ABD ve Japonya'da olmak üzere birçok ülkede önemli oranda anahtarlamalı relüktans makina patentlerinde artış olmuştur. Ayrıca, elektrikli makina ve anahtarlamalı iletim teknolojileri üzerine konferanslarda sunulan çok sayıda akademik makale de bulunmaktadır. Bütün bu faktörler, bilim insanlarının, anahtarlamalı relüktans makinalarının sistemini keşfetmesini ve geliştirmesini daha kolay kılmıştır.



Şekil 1.1. Taylor'un 1840 yılında oluşturduğu makina (Robertson, 1840).

1.2. Anahtarlamalı Relüktans Generatörler Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Sawata ve ark. (1999) çalışmasında anahtarlamalı relüktans generatörlere ait detaylı incelemelerde bulunmuştur. Yapılan çalışmada ARG'lerin matematiksel denklemlerine, güç dönüştürücülerine ve bu generatörlerin elektronik olarak kontrol edilebilmesi için yapılan araştırmalara yer verilmiştir.

Darie ve ark. (2004) anahtarlamalı relüktans generatörlerin kontrol çalışmaları üzerine yoğunlaşmışlardır. Yaptıkları çalışmada ARG'lerin kontrol yöntemleriyle geleneksel alternatif akım sürücülerinin kontrolünü kıyaslamışlardır.

Sözer ve Torrey (2004) yaptıkları çalışmada ARG'nin yüksek hızlı uygulamaları için uyarma parametrelerinin kontrolüne ilişkin yeni bir yaklaşım sunmayı amaçlamışlardır. Elektrik enerjisi üretimini kontrol edebilmek için kullandıkları parametreler iletim ve kesim açılarıdır. En etkili iletim açısının, güç seviyesine bağlı bir fonksiyon olması durumunda elde edilebileceğini çalışmalarında sunmuşlardır.

Lobato ve ark. (2005) anahtarlamalı relüktans generatör kullanarak rüzgâr güç uygulamaları üzerine bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada, ARG'lerin bu alanda kullanılmaya uygun olduğu ve en iyi sonucun alınabilmesi için momentteki dalgalanmanın azaltılması gerektiği belirtilmiştir.

Emadi ve ark. (2007) tristöre dayalı rezonans akım kontrollü bir ARG üzerine çalışmışlardır. Yapılan incelemeler sonucunda rezonans dönüştürücülerinin yüksek akım ve gerilimleri işleme özelliğine sahip olduğunu görmüşlerdir. Bu nedenle bu dönüştürücülerin özellikle 1 MW veya daha yüksek güç aralığındaki uygulamalar için uygun olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Song ve Liu (2010), elektriksel sistemlerdeki yükleri üç temel gruba ayırmışlardır. Bunlar geleneksel, özel ve sabit güç yükleridir. Yaptıkları çalışmada, uçaklarda, farklı yük gruplarının anahtarlamalı relüktans generatörler üzerindeki etkisini gözlemlemişlerdir.

Susitra ve ark. (2010) tarafından ARG'lerin modellenmesi, tasarımı, simülasyonu, analizi ve kontrolü üzerine detaylı bir çalışma yapılmıştır. Ayrıca, çalışmada ARG'lerin rüzgâr güç santralleri için iyi birer alternatif olduğu gözlemlenmiştir.

Fleury ve ark. (2010) kırsal ve az nüfuslu yerleşim yerleri için rüzgâr enerjili bir anahtarlamalı relüktans generatör üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada rüzgâr enerji potansiyeli, güç denklemleri ve anahtarlamalı relüktans generatörün matematiksel denklemleri kullanılmış ve generatörden elde edilen gerilim ve güç değerlerine ilişkin bilgisayar destekli çıkarımlarda bulunulmuştur.

Al-Bahadly (2011) orta ve düşük ölçekteki hız uygulamaları için anahtarlamalı relüktans generatörler üzerine çalışmış, bu generatörleri modellerken tez fazlı bir ARG kullanmıştır.

Arifin ve ark. (2012) rüzgâr güç uygulamaları için orta ve düşük hız ölçekli uygulamalara göre ARG performanslarını incelemiştir. Bu çalışmadaki asıl amaç kapalı çevrim kontrollü bir ARG için en uygun kontrol parametrelerini hesaplamak olmuştur.

Mukhopadhyay ve ark. (2012) anahtarlamalı relüktans generatörler hakkında yapılmış son gelişmeler üzerine kapsamlı bir araştırma yapmışlardır. ARG'lerden düşük ve yüksek hızlı uygulamalarda elde edilebilecek sonuçlara ait grafiklere çalışmalarında yer vermişlerdir.

Afjei ve Asgar (2012), anahtarlamalı relüktans generatörler üzerine yaptıkları çalışmalar sonucunda bir takım bağıntılar elde etmiş ve bu bağıntılar neticesinde bu

makinalarda, hızın artışına bağlı olarak, elde edilecek faz akımında bir düşüş gözlemleneceğini ileri sürmüşlerdir.

Hrabovcova ve ark. (2013) ARG'lerde kullanılmak üzere farklı tipte dönüştürücü devreleri üzerine çalışmış ve bunları kıyaslamışlardır. Çalışmada farklı dönüştürücüler kullanılarak ARG'den elde edilen güçler grafiğe aktarılmış ve matematiksel modellemeler yapılmıştır.

Benalla ve ark. (2013) rüzgâr güç uygulamaları için 4 fazlı anahtarlama relüktans generatörünün benzetim çalışmasını yapmış ve lineer olmayan modellemesini gerçekleştirmişlerdir.

Kaliyappan ve Padmanabhan (2013), ARG üzerine yaptıkları incelemelerde oransal-integratör (PI) ve akım kısıyıcı kontrol modelini kullanmışlardır.

Prabhu ve Rajini (2013), elektrikli hibrid uygulamalar üzerine çalışmıştır. Yapılan çalışmada, akım kontrollü anahtarlama relüktans motorların ve gerilim kontrollü anahtarlama relüktans generatörlerin performans sorunu araştırılmış ve en iyi şekilde verim alabilmek için iletim ve kesim açılarının en uygun şekilde belirlenmesi gerektiği savunulmuştur.

Jayapragash (2014) bir hibrid çoklu hücreli dönüştürücü kullanarak maksimum güç elde edebileceği bir anahtarlama relüktans generatör üzerine çalışmıştır. Modelleme çalışması için Matlab/Simulink ve MagNet yazılımı makinanın sonlu elemanlar analizinde kullanılmıştır.

Messai ve ark. (2014) ARG'ler üzerine detaylı açıklamalarda bulunmuş ve farklı kontrol stratejileri üzerinde durmuşlardır. Yapılan çalışmada, lineer çalışma şekli bütün parametreler için geçerli olmayacağından ötürü non-lineer bir benzetim çalışması yapılmıştır.

Divya ve Kalpathi (2014), ARG kullanarak faydalı frenleme sistemi üzerine çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada 6/4 kutuplu anahtarlama relüktans generatörünün Matlab benzetimine yer verilmiştir.

Valdivia ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada ARG'nin uçak güç sistemlerindeki kullanımına ilişkin modelleme çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir ve bu çalışmanın var olan tekniklerin aksine daha basit olduğunu ileri sürmüşlerdir. Bu sistemde kullanılan parametreler bir takım basit testler sonucunda elde edilmiştir.

Feyrouz (2014) yapmış olduğu doktora çalışmasında ARG'lerin detaylı incelemesini gerçekleştirmiş, dönüştürücü devreleri, endüktans değişimi, üretilen akım ve

gerilimlere ilişkin veriler sunmuştur. Ayrıca çalışmasında 3 fazlı bir ARG'nin benzetimine yer vermiştir.

Bouchoucha ve ark. (2014) çalışmalarında 4 kW'lık ve 1500 d/dak devirde çalışan bir ARG'nin rüzgâr güç santrallerinde kullanılmak üzere en yüksek verimde çalışmasını sağlayacak tetikleme açısını bulmaya çalışmışlardır.

Xia ve ark. (2015) tarafından yapılan araştırmada bulanık mantık denetimli bir ARG incelenmiş ve çıkışta elde edilen gerilimdeki dalgalanmanın azaltılması amaçlanmıştır.

Hu ve ark. (2015) akım kontrollü bir darbe genişlik modülasyonunu kullanarak rüzgâr türbinleri için ARG geliştirmişlerdir.

Lobato ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada farklı ölçekte düşük hızlı anahtarlama relüktans generatörler üzerinde durmuştur. Bu amaçla, çıkıştaki güç değerini gözlemleyebilmek için 20 kW gücünde ve 100 rpm'de çalışan bir generatör kullanılmıştır.

Urase ve ark. (2015) elektrikli hibrid araçlar için bir anahtarlama relüktans generatör üzerine çalışmıştır. Bu çalışma neticesinde ARG'ler ve sürekli mıknatıslı generatörler kıyaslanmış ve ARG'lerin enerji veriminin yüksek hızlı sürücülerde, sürekli mıknatıslı generatörlere yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Radun (2015) tarafından 6/4 kutuplu bir anahtarlama relüktans generatörü incelenmiş ve klasik iki diyotlu dönüştürücü ile ARG kontrol edilmiştir.

Jebaseeli ve ark. (2015) split DA (doğru akım) dönüştürücü devresi kullanarak bir ARG tasarlamıştır. Yaptıkları çalışmada farklı faz sayılarına sahip ARG'ler kıyaslanmıştır. ARG'lerde her faz birbirinden bağımsız olduğu için oluşacak hata diğerlerini etkilemeyeceğinden ötürü çoğu elektrik makinasına oranla daha avantajlı olduklarını dile getirmişlerdir.

Liu ve ark. (2015) rüzgâr güç santrallerinde kullanılan anahtarlama relüktans generatörlerin uyartım karakteristiği üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi ile sistem modellenmiştir. İletim ve kesim açılarının belirlenmesinin makinanın performansını arttıracığı söylenmiş ve rotor kutup uzunluğunun sisteme olan etkileri üzerine deneyler yapılmıştır.

Sartori (2015) 6/4 kutuplu 3 fazlı bir anahtarlama relüktans generatörün incelemesini gerçekleştirmiş ve çalışmasının neticesinde generatör akım-gerilim ve güçlerine ilişkin grafikler sunmuştur.

Hasanien ve ark. (2016) çalışmalarında şebeke bağlantılı bir anahtarlama relüktans generatörde, LVRT (Low voltage ride through, alçak gerilimde şebekede kalabilme) özelliğini sağlamak için bir kontrol stratejisi geliştirmiştir.

Sridharan ve Sudha (2016), yüksek verimli bir ARG için yüksek frekanslı anahtarlama düzeneği tasarlamış ve bazı değerlendirmeler yapmışlardır. Tasarladıkları düzeneğin düşük hızlı rüzgâr güç uygulamalarında kullanılabileceği belirtilmiş ve bazı gerçek zamanlı uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

Yuvaraja ve Ramya (2016), ARG'yi oluştururken maksimum oranda çıkış gücü elde edebilecekleri sistem için geçerli olan parametreleri bulmaya çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada faz akımı kontrol parametresi olarak belirlenmiş, endüktans modeline dayalı temel faz gerilim denklemi kullanılmış sonra faz akımının optimum şeklini belirlemek için faz akımı ve enerji dönüşüm ilişkilerinin özellikleri analiz edilmiştir.

Iturbe ve ark. (2016) kendinden uyartımlı bir anahtarlama relüktans generatör kullanarak makinede gerçekleşen enerji dönüşümlerini gözlemlemiştir.

Li ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada doymuş şartlar altında çalışan bir motorun parametrelerini belirlemek için kullanılan bir yöntem aracılığıyla geleneksel anahtarlama relüktans makineler ve diğerleri arasındaki moment üretimini kıyaslamışlardır.

Uddin ve ark. (2016) hibrid arazi araçları için anahtarlama relüktans makina tasarlamışlardır. Bu çalışmada en iyi verimi alabilecek şekilde en uygun hız aralığının hangisi olduğu belirlenmeye çalışılmıştır.

Alnajjar ve Gerling (2016) yaptıkları çalışmada rüzgâr türbinleri için IGBT kullanarak FPGA tabanlı 2 MW'lık orta hızlı bir anahtarlama relüktans generatör tasarlamışlardır.

Martin ve ark. (2016) yaptıkları araştırmada üç fazlı bir evirici tarafından sürülen 6 fazlı bir anahtarlama relüktans makinaya ilişkin elektromanyetik gözlemler yapmışlardır.

Vujičić ve ark. (2016) anahtarlama relüktans generatörün faz sargılarındaki akımı sürekli ve süreksiz olarak incelemiş, bu iki farklı yöntem sonucu elde ettiği verileri birbiriyle kıyaslamıştır. Ayrıca bu çalışmada, anahtarlama relüktans generatörün yüksek hızlı uygulamaları için sensörsüz bir kontrol mekanizması geliştirilmiştir.

Lebsir ve ark. (2016) ARG'lerde kalıcı mıknatısların yok edilmesi ve direkt sürüş işlemleri için araştırmalar yapmış, bir takım yapılandırmalar sunmuşlardır. Sunulan bu yapılandırmanın klasik rüzgâr türbin sistemlerinin çoğuna kıyasla daha sağlam, kolay kontrol edilebilir ve verimli olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Ju ve Byung (2016) çapraz akı tipli anahtarlama relüktans generatörlerin modellenmesi ve tasarımı üzerine çalışmalar yürütmüşlerdir. Bu generatör modelinde bir ana bir de kalıcı mıknatıslı yardımcı kutuplar yer almaktadır.

Fernandes ve ark. (2016) tarafından rüzgâr enerji sistemleri için anahtarlama relüktans generatörlerin nasıl kontrol edilebileceği üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada, çıkış DA gerilim değerini nominal değerde tutabilmek için kısıyıcı kontrollü bir direnç kullanılmış ve sistem Matlab/Simulink programı kullanılarak modellenmiştir.

Rasakannu ve Chinnagounder (2016), sonlu elemanlar yöntemini kullanarak küçük ölçekli bir rüzgâr güç santrali için 4 fazlı bir anahtarlama relüktans generatör modellenmesi yapmışlardır. Benzetim çalışması sonucunda alınan verilere göre, bu makinanın performans açısından rüzgâr güç santrali için kullanılmasının uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Wang ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada 12/8'lik bir anahtarlama relüktans generatör tasarlamış ve farklı kontrol deneyleri ile ARG'yi gözlemlemiştir. Kontrol parametresi olarak akım ve rotor konum açısı kullanılmıştır.

Bartolo ve ark. (2017) uzay uygulamaları için yüksek hızda çalışan 45 kW'lık bir anahtarlama relüktans makinanın tasarımını gerçekleştirmiştir. Anahtarlama relüktans generatör bu çalışmada alternatif bir starter/generatör olarak sunulmuştur.

Wang ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada anahtarlama relüktans generatörler için bir çift döngülü kontrol stratejisi geliştirmişlerdir. Çıkış gücünü arttırmak için, açılı-gerilim kontrollü bir sistemin kullanılması gerektiğini, iletim açısını en uygun şekilde seçmenin yine bu çıkış gücünü arttıracaklarını savunmuşlardır.

Calasan ve Vujicic (2017), sürekli iletimle çalışan anahtarlama relüktans generatörlerin dönüştürücü topolojileri üzerine çalışmışlardır. Kendi isimlerini verdikleri Vujicic-Calasan dönüştürücüsünü tasarlamış ve ARG uygulamaları için etkili sonuçlar elde ettiklerini ileri sürmüşlerdir.

Dranca ve ark. (2017) tarafından üç fazlı düşük hızda çalışan anahtarlama relüktans generatörlerin geçici rejim analizi ve modellenmesi üzerine çalışılmıştır. Çalışmalarında ARG'lerin performansının elektromanyetik momentteki dalgalanmaların azalmasını sağlayacak bir kontrol mekanizmasına bağlı olduğunu, bu sebeple güç dönüştürücülerinde bulunan anahtarların açılıp-kapanma durumlarının en uygun şekilde ayarlanması gerektiği vurgulanmıştır.

Benamimour ve ark. (2017) tarafından yazılımsal bir program kullanılarak ARG'ye ait akı, moment ve endüktans değerlerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Sonrasında buradan elde edilen veriler Matlab/Simulink programına aktarılarak rüzgâr güç sistemleri için bir modelleme yapılmıştır.

Roshandel ve ark. (2017) akıllı araştırma kontrol (SSC, Smart Search Control) yöntemiyle batarya depolamada minimum akım dalgalanması ve maksimum güç sağlayacak bir ARG tasarlamışlardır.

Barros ve ark. (2017) anahtarlamalı relüktans generatörde direkt güç kontrolü ve değişmeli bir sistem üzerine çalışmışlar ve bir takım testler gerçekleştirmişlerdir.

Reis ve ark. (2017) ARG'nin verimini arttırmak için uygun bir yöntem bulmaya çalışmışlardır. Bunu gerçekleştirmek için 1 kW'lık bir anahtarlamalı relüktans makina kullanmışlardır. Uygun tetikleme açısının bulunmasıyla en iyi sonucun alınacağını gözlenmiştir.

Al-Bahadly (2018) yaptığı çalışmada Yeni Zelanda'da kullanılmak üzere rüzgâr ve hidro güç sistemlerinin birlikte olduğu bir sistem tasarlamıştır. Bu çalışma için 12/8 kutuplu bir ARG kullanılmıştır.

Fang ve ark. (2018) çalışmalarında WEC (wave energy converter, dalga enerji dönüştürücü) kullanarak ARG ile bir güç üretim sistemi kurmayı amaçlamışlardır. Yavaş hızda çalışan bu sistemde iletim ve kesim açıları sabit tutularak dönüştürücünün anlık değişimlere hızlı yanıt vermesi planlanmıştır.

1.3. Tezin Amacı

Anahtarlamalı relüktans generatörlerin kullanımı son dönemde artış göstermiştir. Özellikle güç elektroniğindeki gelişmelere bağlı olarak meydana gelen bu artış, çoğu alanda anahtarlamalı relüktans generatörlerin kullanımını mümkün kılmıştır. Günümüzde temiz ve sürdürülebilir enerjiye olan ilgiye paralel olarak artan rüzgâr enerji santrallerinde relüktans generatörlerin kullanımı ve bu alanda yapılan araştırmaların sayısı artmıştır. ARG'lerin kullanıldığı diğer alanlara uzay çalışmaları, uçaklar ve otomotiv sektöründe starter/generator olarak kullanım örnek gösterilebilir. Bu tezin amacı $N_s/N_r=8/6$ kutuplu $n=4$ fazlı anahtarlamalı relüktans generatöre ait bir Matlab/Simulink benzetim çalışması gerçekleştirmek ve buradan elde edilen değerleri laboratuvar ortamında elde edilen verilerle kıyaslamaktır.

1.4. Tezin İÇeriği

1. Bölümde anahtarlamalı relüktans generatörlerin kısa bir tarihi geçmiği özetlendi. ARG üzerine yapılmış çalışmalar ve uygulamalara ilişkin araştırmalar derlendi. Tezin üzerinde durduğu konular kısaca değinildi. Tezin amacı açıklandı.

2. Bölümde ARG'nin yapısı, çalışma prensibi, endüktans değişimi, moment üretimi, besleme devreleri, eş değer devreye ilişkin matematiksel denklemler, akım ve enerji üretimi anlatıldı.

3. Bölümde 4 fazlı 8/6 kutuplu ARG'nin kontrol prensibi açıklandı ve Matlab/Simulink modelinin Őemalarına yer verildi. Deneysel aşamada kullanılan donanımlar ve yazılım hakkında bilgi verildi. Deneysel ve benzetim çalışmasının sonuçları grafiksel olarak elde edildi. Farklı parametrelere göre faz akımındaki değişim gözlemlendi.

4. Bölümde, elde edilen deneysel sonuçlar ve benzetim çalışması sonuçları açıklandı ve öneriler sunuldu.

2. MATERYAL ve METOT

2.1. Anahtarlama Relüktans Generatörün Yapısı ve Çalışma Prensipleri

Anahtarlama relüktans generatör sistemi yapı itibarıyla, bir çift çıkık kutuplu değişken relüktanslı makina, güç elektroniği dönüştürücü devresi, bir rotor konum algılayıcı sensörü ve kontrol elemanından oluşur.

Günümüzde relüktans makinalar, basit yapıları, bakım ve onarımının ucuz olması, kararlı bir yapıya sahip olması ve hemen hemen çalışma ortamından bağımsız olmaları sebebiyle sanayide sıkça kullanılmaktadırlar (Polat ve ark., 2011). Ancak bu makinaların en büyük dezavantajları düşük hızlarda oluşan moment dalgalanmaları ve bu bozukluk sebebiyle ortaya çıkan akustik gürültüdür (Omaç, 2006). Bu dezavantajı en aza indirmek için çok gelişmiş bilgisayar destekli relüktans makina tasarımları ve düşük maliyetli pratik güç elektroniği devreleri kullanılmaktadır.

Anahtarlama relüktans makinalar, tetikleme açısının değişmesiyle birlikte motor olarak kullanılabilecekleri gibi generatör olarak da kullanılabilirler. Bu makinalar, basit ve dayanıklı yapısı, ucuz imalatı, düşük ataleti, yüksek hızı ve verimi ile değişken hız uygulamalarında, diğer makinalar arasında güçlü bir aday haline gelmiştir (Lobato ve ark., 2005). Uygulama alanları arasında ofis araçları, uzay araçları, elektrikli otomobiller, radarlar, madencilik teknolojileri, otomatik kapı sistemleri, su pompaları ve elektrikli ev cihazları sayılabilir. Relüktans makinalarda manyetik devre doğrusal yapıda değildir. Bunun sebebi rotorun konumu ve değişken akımın genliğidir (Lawrenson ve ark., 1980). Bu yüzden anahtarlama relüktans makinanın manyetik akısını gerçeğe en yakın şekilde modellemek, yüksek bir performansı beraberinde getirir.

Anahtarlama relüktans makina, stator ve rotoru çıkık kutuptan oluşmuş ve rotorunda sargı olmayan basit yapıya sahip bir elektrik makinasıdır. Anahtarlama relüktans generatörde sargı akımları (L endüktans, θ rotor açısı olmak üzere) $\partial\theta/\partial L < 0$ bölgesinde aktığı zaman bir negatif moment oluşur ve bu durumda anahtarlama relüktans makina generatör olarak çalışır ve rotor milinden aldığı mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür.

Anahtarlama relüktans generatörlerin elektrik enerjisi üretiminde geleneksel alternatif akım makinalarına göre bir takım avantajlar taşıdığı ve endüstriyel uygulamalar

için potansiyel bir aday olduğu ortaya çıkmıştır (Lobato ve ark., 2005). Anahtarlama relüktans generatörler rotorunda sürekli mıknatıs ve sargı içermemesi nedeniyle hem yüksek hızlarda hem de yüksek sıcaklıklarda sorunsuz çalışabilir. Ayrıca rotorda sargı olmaması nedeniyle kayıpların çoğunun statorda olmasını sağlar ve generatör kolaylıkla soğutulabilir (Yang ve ark., 2016). Generatörün anahtarlama yapısı değişken hızlı çalışma gerektiren uygulamaları olanaklı kılar. Sağlam yapısı ve ucuz olması nedeniyle, özellikle değişken hızlı rüzgâr enerjisi uygulamalarında tercih edilmektedirler. Uyarım için uygun güç elektroniği dönüştürücülerinin kullanılması gerekir.

Anahtarlama relüktans makinalardaki çalışmalar uzunca bir dönem motorlu çalışma üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak bu makinaların tersinirlik özelliğinden ötürü bazı bilim insanları motor özelliğinin yanı sıra elektrik üretme özelliğine de dikkat çekmişlerdir. Bu durumdan ötürü elektrik enerjisine dünya çapında artan taleple doğru orantılı olarak araştırmacıların da anahtarlama relüktans generatörlere olan ilgisi artmıştır. Geleneksel generatörlerdeki eksiklikler araştırmacıların dikkatini, bir generatörün istenen özelliklerini sergileyen, daha basit ve değişken hız ayarlamalı anahtarlama relüktans generatörler üzerine yönelmesini sağlamıştır.

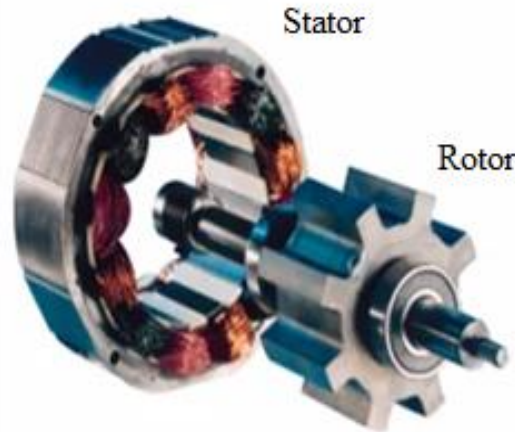
Anahtarlama relüktans makinaların motor olarak kullanımı yaklaşık olarak 150 yıllık bir geçmişe sahiptir. Anahtarlama relüktans makinalar hakkındaki ilk çalışmalar 1800'lü yıllarda başlamasına rağmen, ancak 1960'lı yılların başında güç elektroniğindeki gelişmelere bağlı olarak ivme kazanmış ve bu makinaların sürülmesi mümkün hale gelmiştir (Omaç, 2006). Anahtarlama relüktans makinalarda generatör sargıları herhangi bir AA (alternatif akım)-DA (doğru akım) gerilim kaynağına bağlı olduğunda rotorun şebekeden beslenerek sürekli hareketini sağlamak oldukça zordur (Taşdemir, 2008). Bu sebeple uygun yapıda güç elektroniği devresi kullanılmak zorundadır. Geçmişe eskiye dayanan bir makina olmasına rağmen özellikle generatör alanında yapılan uygulamalar ve araştırmalar oldukça yenidir. Güç elektroniğindeki gelişmeler ve mikrobilgisayarların ortaya çıkmasına bağlı olarak bilim insanlarının anahtarlama relüktans generatörler üzerine yaptıkları çalışmaların sayısı artmıştır.

1980'lerin sonlarından itibaren ABD'de bu generatörler, motorları çalıştırmak için ve uçaklarda yüksek gerilim DA besleme kaynağı olarak kullanılmaya başlandı. Ayrıca bilim insanları tarafından bu generatörlerin kullanıldığı birçok araştırma yapılmıştır. Yapılan bir çalışmada bir AA kendinden uyarımlı anahtarlama relüktans generatör, bir pil şarj cihazı olarak incelenmiş, başka bir çalışmada ise hafif, yüksek hızda ve yüksek

güçteki askeri uygulamalara ve diğer hibrid araçlara en iyi metodolojilerden biri olarak sunulmuştur (Susitra ve ark., 2010). Son zamanlarda anahtarlamalı relüktans generatörler, özellikle, rüzgâr enerjisiyle çalışan sistemlerde sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca anahtarlamalı relüktans makinaların, hem motor hem de generatör olarak kullanıldığı uygulamalarda, var olan sistemde elektrik enerjisi üretimi için farklı bir kaynağa ihtiyaç duyulmaması bu makinaların en büyük avantajlarından biridir.

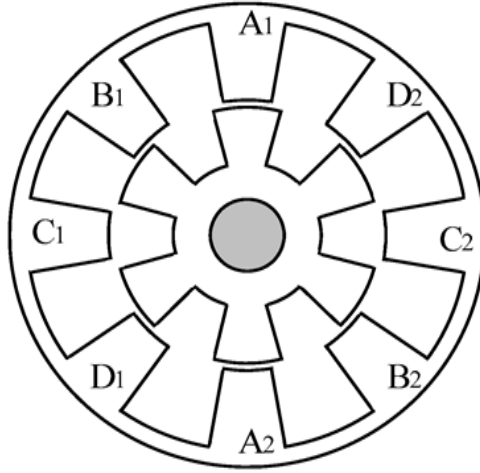
2.1.1. Anahtarlamalı Relüktans Generatörün Yapısı

Anahtarlamalı relüktans generatörler iki temel yapıdan oluşurlar. Bunlar dönen (rotor) ve sabit (stator) kısımlardır.



Şekil 2.1. Anahtarlamalı relüktans makina rotor ve statoru

Şekil 2.1’de gösterildiği üzere, rotor ve stator, çıkık kutuplu bir yapıya sahiptir. ARG’lerde tüm sargı stator üzerindedir. Makinanın uyarılması, stator üzerinde bulunan sargılardan akım geçirilmesiyle sağlanır. Rotor, üzerinde sargı ya da mıknatis özelliği içeren herhangi bir parça taşımaz. Bu sebeple ısı kayıplarının büyük bir bölümü stator üzerinde gerçekleşir. Bu, ARG’lerin en büyük avantajlarından biridir. Statordan akım geçirilmesiyle birlikte rotorun kutupları mıknatislik özelliği kazanarak dönmeye başlar.



Şekil 2.2. 8/6 kutuplu ve 4 fazlı bir ARG'nin ön kesit görünüşü

Şekil 2.2'de gösterildiği üzere anahtarlamalı relüktans generatörde, stator ve rotor kutupları arasında boşluklar bulunmaktadır. Bu boşluklar, kutupların birbirine en yakın olduğu noktada en küçük, en uzak olduğu noktada ise en büyük konumdadır. Makina dönmeye başladığı zaman rotor ve stator kutuplarının birbirine olan uzaklıkları değişir. Bu sebeple kutuplar arasında akan akım, hava geçirgenlik katsayısından ötürü her aşamada farklı olur.

Stator ve rotor kutuplarının yüz yüze olduğu konumda aradaki boşluk azalacağından ötürü, geçirgenlik artar ve kutuplar arasında akan akım maksimum düzeye erişir. Bu durumda manyetik akı artar, moment oluşmaz. Çakışık konumdayken relüktans minimum seviyededir ve sargılardaki akım artacağından ötürü endüktans en büyük değerini alır.

Stator sargılarının enerjilendirilmesi neticesinde harekete geçen rotor, stator kutbu ile karşı karşıya geldikten sonra eylemsizlik prensibinden ötürü yoluna devam etmek ister. Kutuplar arasında oluşan bu negatif momenti yok etmek için kutuplar ayrılıyorken akımı kesmek gerekir. Anahtarlamalı relüktans generatörlerin daha iyi çalışabilmesi için rotor hareketiyle senkronize olan seri bir akım darbesi verilmelidir (Polat, 2010). Özelleştirilmiş bir akım sinyalinin gerekliliği, direkt olarak şebekenin kullanımını imkânsız hale getirir. Bu durum güç elektroniğindeki gelişmelerle birlikte mümkün hale gelmiştir.

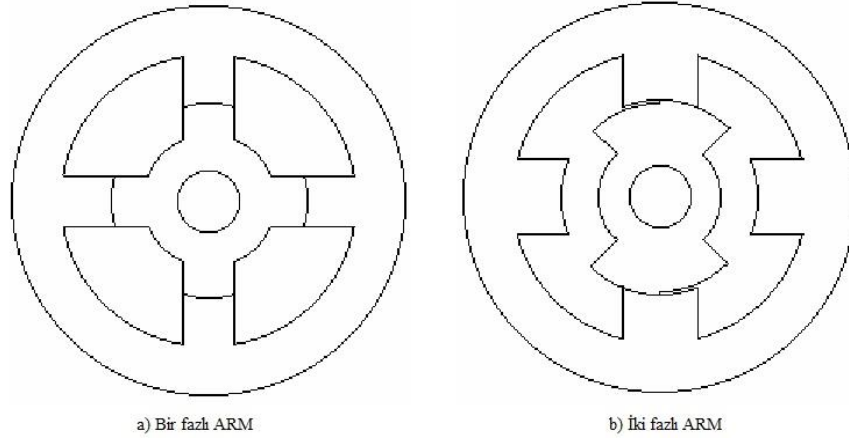
Anahtarlamalı relüktans makinalarda, her seferinde farklı stator sargıları uyarılarak rotor kutuplarının stator kutuplarına yaklaşması ve uzaklaşması sağlanır. Böylelikle rotorun hareketi devam eder ve sürekli bir moment üretimi sağlanır.

Çok farklı tipte anahtarlamalı relüktans generatörler mevcuttur. Faz sayıları, stator ve rotor kutup sayıları farklı olan anahtarlamalı relüktans generatörler görmek mümkündür. Bunlardan bazılarının stator ve kutup sayıları Tablo 2.1’de verilmiştir.

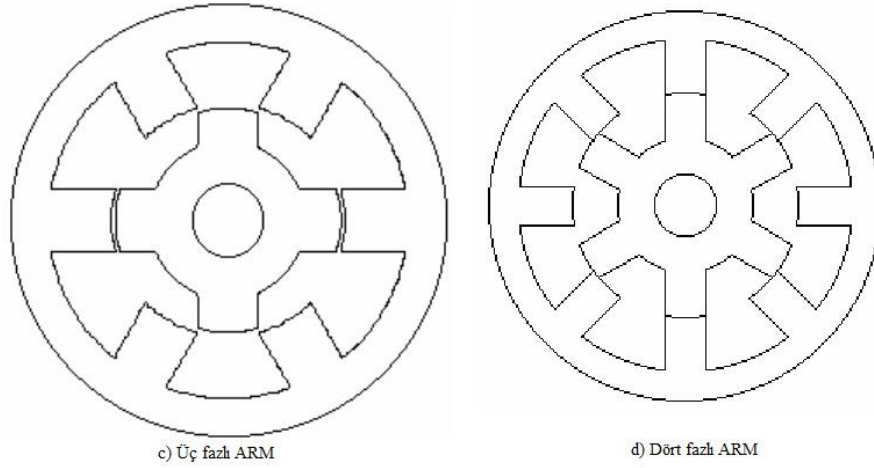
Tablo 2.1. ARG çeşitleri ve stator/rotor kutupları sayısı

ARG Tipi	Stator Kutup Sayısı	Rotor Kutup Sayısı
4/2	4	2
4/4	4	4
6/4	6	4
8/6	8	6
10/8	10	8
12/8	12	8
18/12	18	12

Faz değerlerine göre gruplandırılan bazı anahtarlamalı relüktans makinalar Şekil 2.3 ve 2.4’te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Stator kutup sayısı ve rotor kutup sayısına göre ARG çeşitleri: a) bir fazlı 4/4 kutuplu ARG, b) iki fazlı 4/2 kutuplu ARG



Şekil 2.4. Stator kutup sayısı ve rotor kutup sayısına göre ARG çeşitleri: c) üç fazlı 6/4 kutuplu ARG, d) dört fazlı 8/6 kutuplu ARG

2.1.2. Anahtarlamalı Relüktans Generatörlerin Çalışma İlkesi

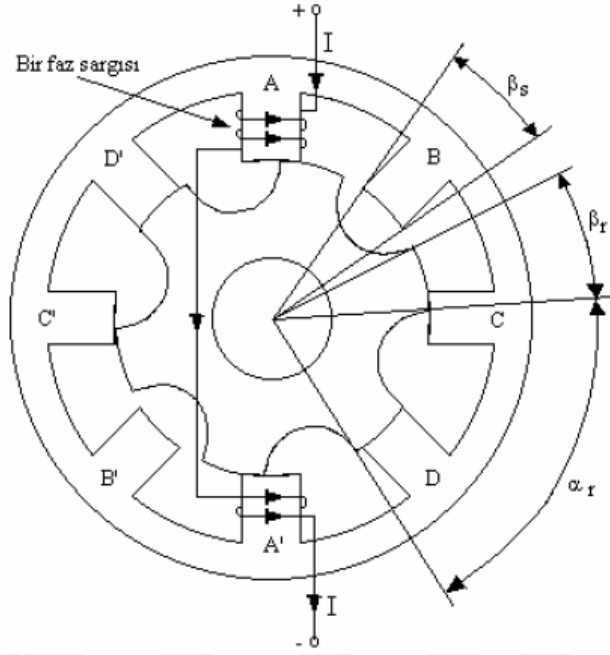
Şekil 2.5'te 8/6 kutuplu bir anahtarlamalı relüktans generatörün tek fazı için sağlanan akıma yönelik devre gösterilmiştir. Dört fazlı bu generatörde A fazı için statordaki sargılara I akımı verildiğinde stator mıknatıslanma özelliği kazanır ve bu özellik sayesinde rotoru kendine çekmeye başlar. Şekil 2.5'te gösterildiği üzere A fazına en yakın rotor kutbu iki stator kutbu arasında yer almaktadır. Bu konum çakışık olmayan konum olarak adlandırılır. Bu konumda endüktans en küçük değerini alır ve relüktans ise maksimumdur. Relüktans prensibine göre bu değeri minimum yapabilmek için sargılara akım verilerek stator enerjilendirilir. Rotor harekete geçer ve bir stator kutbu yayı uzunluğu (β_s) kadar yol alır. Bu durum stator ve rotor kutbu karşı karşıya gelene kadar devam eder. Çakışık konum gerçekleştiği anda endüktans değeri maksimum, relüktans ise minimum değerine ulaşır. Bu anda sisteme verilen akımın kesilmesi gerekmektedir. Bu işlemi gerçekleştirebilmek ancak uygun bir dönüştürücü devresi kullanmak ile mümkündür. Çünkü direkt şebekeden sağlanan akım kaynağı uygun anahtarlama sistemine ve özelleşmiş bir akım sinyaline sahip olmadığından ötürü bu işlemi gerçekleştirmekte yetersizdir. Güç elektroniğindeki gelişmelere bağlı olarak ortaya çıkan bazı güç dönüştürücüleri bu makinaları kullanmayı kolaylaştırmıştır.

Şekil 2.5'te yer alan anahtarlamalı relüktans generatörde;

β_s = Stator kutup yayı uzunluğu,

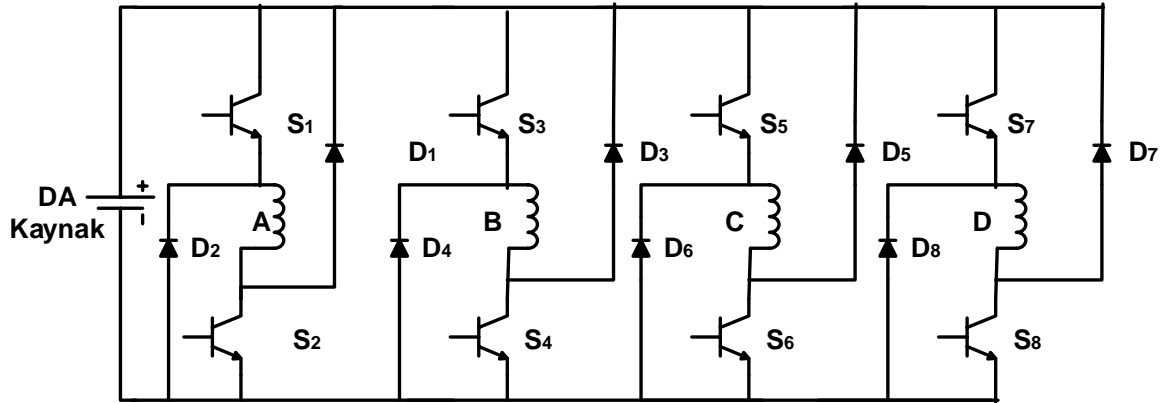
β_r = Rotor kutup yayı uzunluğu,

α_r = Rotor kutup adımını ifade etmektedir.



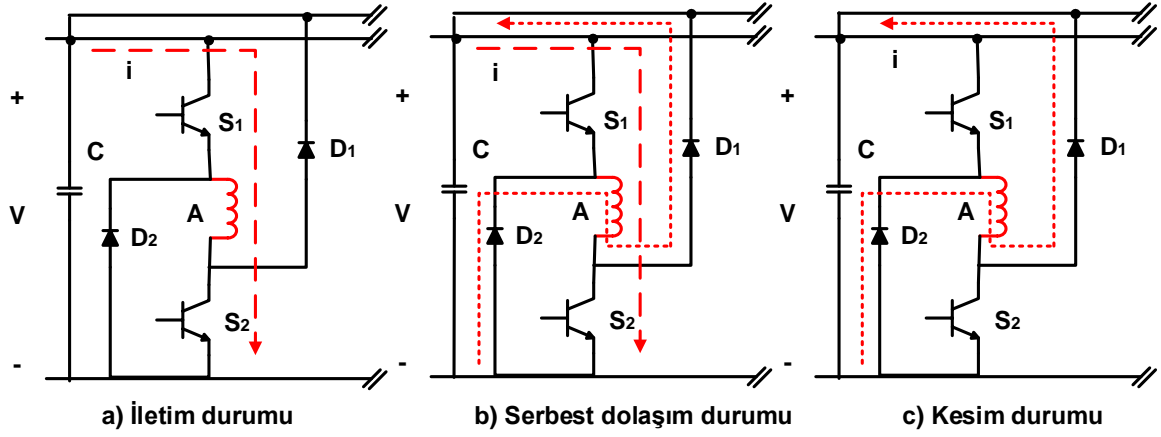
Şekil 2.5. 8/6 kutuplu bir ARG'ye ait bazı büyüklükler

Bu çalışmada anahtarlamalı relüktans generatöre uygun akım sinyalinin sağlayacak besleme devresi Şekil 2.6'da yer almaktadır.



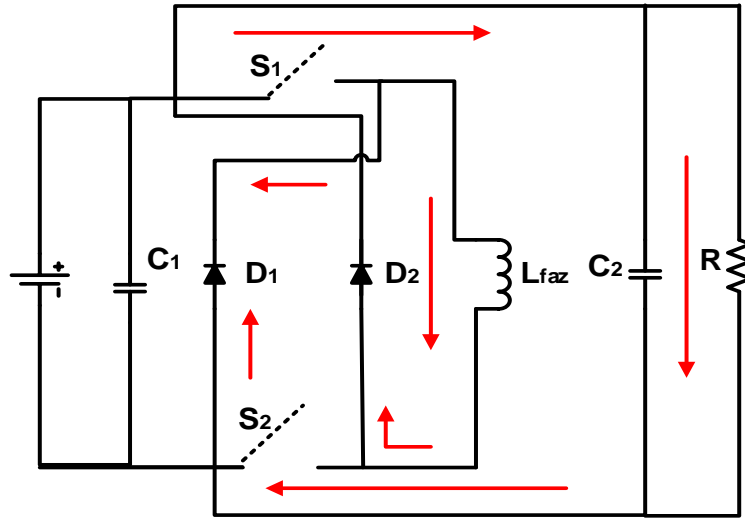
Şekil 2.6. 8/6 kutuplu ARG için kullanılan besleme devresi

Dört faz için özelleşmiş bu besleme devresinde, faz başına iki diyot ve iki anahtar yer almaktadır. Bu devrede anahtar görevinin gören elemanlar IGBT'lerdir. Uygun anahtarlama tekniğiyle sargıların enerjilendirilmesi sağlanır.



Şekil 2.7. 8/6 kutuplu dört fazlı bir ARG'de bir fazın iletimi ile kesimi arasında akımın akış yolu

Şekil 2.7.a'da gösterilen devrede S_1 ve S_2 transistörleri anahtar görevi görür. Bu aşama iletim aşamasıdır. Bu esnada transistörler akımı iletme durumundadır. Gerilim kaynağından sağlanan akım ok yönünde ilerleyerek endüktans üzerinden akar ve diyotlara uğramadan döngüsünü tamamlamış olur. Bu esnada endüktans değeri yükselir ve enerjilenen stator kutbu, rotor kutbunu kendine çeker. Bu aşamada momentin değeri pozitifdir. Şekil 2.7.b'de gösterilen anahtarlardan birinin açık diğerinin kapalı olduğu aşama ise serbest dolaşım anıdır. S_1 ve S_2 anahtarlarının kapalı olduğu, Şekil 2.7.c'de gösterilen kesim anında kutuplar birbirinden ayrılmaya başlar. Endüktans üzerinde biriken akım yoluna devam etmek ister ve diyotlar üzerinden gerilim kaynağına doğru yol alır. Bu aşamada endüktansın değeri azalır ve generatör akımı üretilmeye başlanır.



Şekil 2.8. Tek faz için sisteme dâhil edilen yükün gösterilişi

Şekil 2.8’de tek faz için besleme devresine bağlanan bir kondansatör ve direnç elemanı gösterilmiştir. Kesim anında S_1 ve S_2 anahtarları kapandığından ötürü endüktans üzerinde biriken akım diyotlar üzerinden bir yük devresine gönderilir. Kondansatör şarj olmaya başlar ve yükleme tamamlanınca iletimi keser. Aşırı yüklemenin zararlarından korunmak amacıyla devreye bir direnç bağlanır.

Şekil 2.8’de gösterilen devre için S_1 ve S_2 anahtarları iletim durumundayken gerilim pozitif olur.

$$V - i \cdot \omega \cdot \frac{dL}{d\theta} = R \cdot i + L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

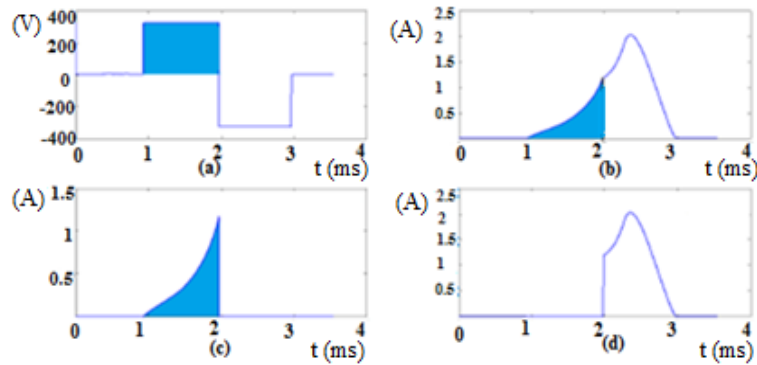
S_1 ve S_2 anahtarlarından biri iletim durumunda ve diğeri kapalı konumdayken (serbest dolaşım anı) gerilim sıfır olur.

$$-i \cdot \omega \cdot \frac{dL}{d\theta} = R \cdot i + L \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

S_1 ve S_2 anahtarları akımı iletmez konumdayken gerilim negatif olur.

$$-V - i \cdot \omega \cdot \frac{dL}{d\theta} = R \cdot i + L \frac{di}{dt} \quad (2.3)$$

Bu bağıntılarda V , i , ω , L ve R sırasıyla indüklenen gerilim (V), faz akımı (A), açısal hız (rad/s), endüktans (H) ve faz direncini (Ω) göstermektedir.



Şekil 2.9. a) ARG terminal gerilimi, b) faz akımı, c) motor akımı, d) generatör akımı

Şekil 2.9'da anahtarlama relüktans makinesinin çalışması esnasında indüklenen gerilim Şekil 2.9.a'da, faz sargılarından elde edilen akım grafiği ise Şekil 2.9.b'de gösterilmiştir. Şekil 2.9.b'de gösterilen faz akımı grafiği, makinesinin hem generatör hem de motor olarak çalışırken ürettiği akımları içerir. Makinesinin endüktans eğrisinin arttığı alanda ürettiği motor akımı Şekil 2.9.c'de, rotor ve stator kutuplarının birbirinden ayrılmaya başlayıp endüktansın azaldığı aşamada ürettiği generatör akımı ise Şekil 2.9.d'de gösterilmektedir.

P_{ort} = ortalama güç (W),

V_{ort} = ortalama gerilim (V),

I_{ort} = ortalama akım (A)

olmak üzere anahtarlama relüktans makinesinin ortalama gücünü hesaplamak için denklem (2.4)'teki bağıntı kullanılır.

$$P_{ort} = V_{ort} \times I_{ort} \quad (2.4)$$

Ortalama akımı bulmak için anlık akım değeri kullanılır. Bu bağıntı (2.5)'te gösterilmektedir.

$$I_{ort} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt \quad (2.5)$$

i sargıdaki faz akımını, T ise faz akımının bir periyodunu ifade etmektedir. Sistemin ürettiği enerjinin formülü (2.6)'da yer almaktadır.

$$Enerji = \frac{1}{T} \int_0^T v \cdot i dt \quad (2.6)$$

Anahtarlama relüktans generatörünün ortalama elektriksel gücü her fazın bir devirdeki gücünün ayrı ayrı toplanmasıyla elde edilir. Bu bağıntı (2.7)'de gösterilmektedir.

$$P_{ort} = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^m \int_0^T v_j \cdot i_j dt = \frac{m}{T} \int_0^T v_j \cdot i_j dt \quad (2.7)$$

Bu ifadedeki m, j, T sırasıyla faz sayısını, faz sırasını ve bir fazın iletim periyodunu göstermektedir.

Anahtarlama relüktans makina çalışırken hem motor akımı hem de generatör akımı üretir. v_{uyr} , anlık uyarılma gerilimi (V), i_{uyr} anlık uyarılma akımı (A) olmak üzere, uyarılma anında makinanın gücünü (P_{uyr}) veren bağıntı (2.8)'de gösterilmektedir.

$$P_{uyr} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{uyr} \cdot i_{uyr} dt \quad (2.8)$$

v_{gen} , anlık generatör gerilimi (V), i_{gen} anlık generatör akımı (A) olmak üzere, makinanın generatör olarak çalışma modunda sahip olduğu gücü (P_{gen}) veren ifade bağıntı (2.9)'da gösterilmektedir.

$$P_{gen} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{gen} \cdot i_{gen} dt \quad (2.9)$$

Anahtarlama relüktans generatörün performansını gösteren denklem (2.10)'da yer almaktadır.

$$\%P_{gen} = \frac{v_{gen} \cdot i_{gen}}{v_{gen} \cdot i_{gen} + v_{uyr} \cdot i_{uyr}} \times 100 \quad (2.10)$$

Bu hesaplamalar yapılırken kayıplar ihmal edilmiştir. Anahtarlama relüktans generatörün toplam ortalama çıkış gücü, mekanik giriş gücü ve sistemdeki toplam kaybın arasındaki farka eşittir. ARG'deki belli başlı kayıplar yarı iletken kayıpları ($P_{yariletken}$), bakır kayıpları ($P_{bakır}$), demir kayıpları (P_{demir}), mekanik kayıplar (P_{mek}), sürtünme ve vantilasyon kaybı gibi diğer kayıplardır ($P_{diğer}$). Sistemdeki toplam kaybı ($P_{kayıp}$) veren bağıntı (2.11)'de gösterilmektedir.

$$P_{kayıp} = P_{yariletken} + P_{bakır} + P_{demir} + P_{mek} + P_{diğer} \quad (2.11)$$

Yarı iletken kayıpları dönüştürücü devresindeki anahtarlar ve diyotlardan kaynaklı kayıplardır. Bakır kayıpları, faz akımı ve sargı direnci yüzünden meydana gelen sargı

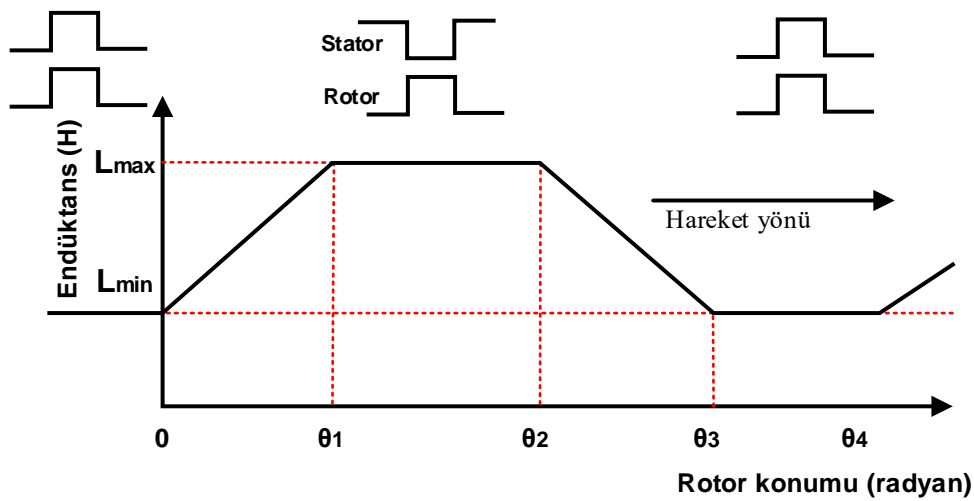
kayıplarıdır. Anahtarlama relüktans generatörde manyetik akımın yönünün ve değerinin değişmesiyle birlikte, manyetik malzeme histerezis etkisinden dolayı ısınır. Meydana gelen kayıplar demir kayıplarını oluşturur.

m faz sayısı, I_{rms} etkin akım değeri (A) ve R faz direnci (Ω) olmak üzere bakır kaybını veren bağıntı (2.12)'de yer almaktadır.

$$P_{bakır} = m \cdot I_{rms}^2 \cdot R \quad (2.12)$$

2.1.3. Anahtarlama Relüktans Generatörde Endüktans Değişimi

Anahtarlama relüktans generatörlerde endüktans değişimi büyük öneme sahiptir. Endüktansın rotor konumuna bağlı olarak değişmesi makinanın motor-generatör olarak çalışmasını mümkün kılarken, yine moment oluşumu endüktansa bağlıdır. Stator ve rotor çakışık konumdayken endüktans en büyük değerini alır. Kutuplar birbirinden ayrılmaya başladıkları anda endüktans azalır ve çakışık olmayan konumda ise endüktans en küçük değerine ulaşır. Endüktansın artmaya başladığı noktada anahtarlama relüktans makina motor olarak çalışma modundadır ve bu aşamada üretilen moment pozitif bir değere sahiptir. Endüktansın azalmaya başladığı yerde stator sargıları uyarılırsa makina generatör olarak çalışmaya başlar ve generatör akımı üretilir. Bu aşamada oluşan moment ise negatif bir değer alır.



Şekil 2.10. ARG'nin bir faz endüktansının rotor konumuna bağlı değişim grafiği

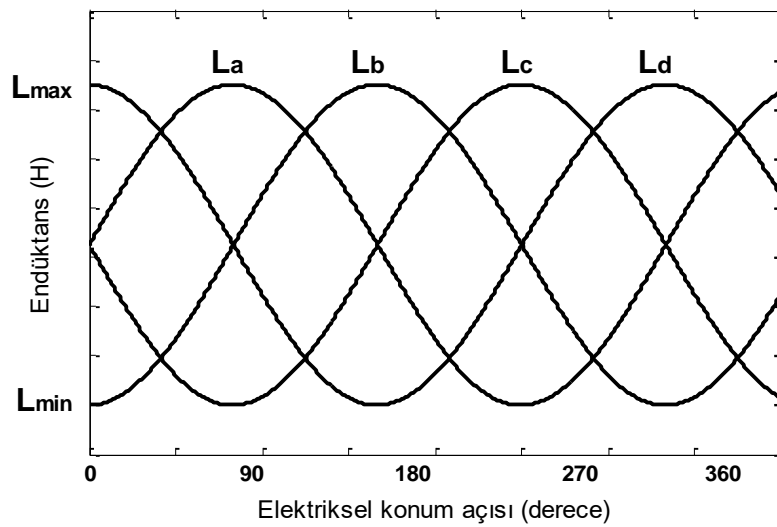
Şekil 2.10’da rotor konumunun 0 olduğu noktada endüktans minimumdur (L_{min}). Bu durumda stator ve rotor ayırık konumdadır. Rotor hareket ederken θ_1 ve θ_2 arasında stator ile yüz yüze konuma erişir ve geçirgenliğinin artması sonucu kutuplar arası akım maksimum oranda akar. Bu sebeple endüktans en büyük değerini alır (L_{max}). θ_3 konumuna doğru kutuplar birbirinden ayrılmaya başlar ve endüktansın değeri bu sebeple azalır. Rotor θ_4 ’e yaklaşırken stator ile tamamen ayrı konumlardadırlar. Rotor konumunun değişimine göre endüktansın alabileceği değerlere ilişkin bağıntı (2.13)’te yer almaktadır.

$$L(\theta) = \begin{cases} L_{min} + K\theta, & 0 \leq \theta \leq \theta_1 \\ L_{max}, & \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \\ L_{min} - K(\theta - \theta_1 - \theta_2), & \theta_2 \leq \theta \leq \theta_3 \\ L_{min}, & \theta_3 \leq \theta \leq \theta_4 \end{cases} \quad (2.13)$$

Bu bağıntıda K değerini veren ifade (2.14)’te gösterilmektedir.

$$K = \frac{L_{max} - L_{min}}{\theta_1} \quad (2.14)$$

Bu çalışmada kullanılan 8/6 kutuplu 4 fazlı anahtarlamalı relüktans generatör için her faza ait endüktans değişiminin rotorun elektriksel konum açısına bağlı değişim grafiği Şekil 2.11’de gösterilmektedir.



Şekil 2.11. 8/6 kutuplu ARG'nin cos bağıntısından elde edilen dört faz endüktansının elektriksel konum açısına bağlı değişim grafiği

$$L_1 = \frac{L_{max} + L_{min}}{2} \quad (2.15)$$

$$L_2 = \frac{L_{max} - L_{min}}{2} \quad (2.16)$$

olmak üzere manyetik doyum ve non-lineerite dikkate alındığında ARG'nin endüktans bağıntısı için denklem (2.17)'deki kosinüs formülü kullanılır.

$$L_j = L_1 + L_2 \sum_{j=1}^4 \cos \left[N_r \theta - (j - 1) \frac{2\pi}{q} \right] \quad (2.17)$$

Bu denklemde j sırasıyla fazları, θ rotor konumunu, q ise faz sayısını göstermektedir.

$$q = \frac{N_s}{2} \quad (2.18)$$

Bu çalışmada 8/6 kutuplu bir anahtarlama relüktans generatör kullanıldığından ötürü faz sayısı, $q = 4$ 'tür.

Denklem (2.17)'nin dört faz için ayrı ayrı gösterildiği bağıntılar (2.19), (2.20), (2.21) ve (2.22)'de yer almaktadır.

$$L_a = L_1 + L_2 \cos \left(6\theta - \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.19)$$

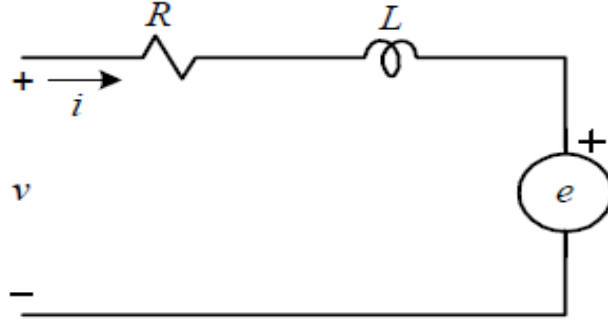
$$L_b = L_1 + L_2 \cos(6\theta + \pi) \quad (2.20)$$

$$L_c = L_1 + L_2 \cos \left(6\theta + \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.21)$$

$$L_d = L_1 + L_2 \cos(6\theta) \quad (2.22)$$

2.1.4. Anahtarlama Relüktans Generatör Eşdeğer Devresi ve Moment Değişimi

Şekil 2.12'de tek fazlı bir anahtarlama relüktans makinanın eş değer devresi gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Anahtarlamalı relüktans makinanın bir faz eşdeğer devresi

ARG'nin bir faz gerilimini veren bağıntı (2.23)'te gösterilmiştir.

$$V = R \cdot i + \frac{d\Psi}{dt} \quad (2.23)$$

$$\Psi = L(i, \theta) \cdot i \quad (2.24)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.25)$$

Bu bağıntılarda, V indüklenen gerilim (V), i faz akımını (A), R faz direncini (Ω), L faz endüktansını (H), θ rotor konumunu (rad), Ψ manyetik akıyı (Wb) ifade etmektedir.

e zıt elektromotor kuvveti (emk) (V) ve ω açısal hız (rad/s) olmak üzere tek fazlı bir anahtarlamalı relüktans makinanın gerilim denklemi (2.26) ve (2.27)'de yer almaktadır.

$$V = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \frac{dL}{d\theta} \quad (2.26)$$

$$V = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + i \cdot \omega \frac{dL}{d\theta} \quad (2.27)$$

$$e = \omega \cdot i \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (2.28)$$

$$V = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + e \quad (2.29)$$

Bu çalışmada kullanılan anahtarlamalı relüktans generatör 8/6 kutuplu 4 fazlı bir makinadır. Bu makinanın her fazı için gerilim bağıntıları (2.30), (2.31) (2.32) ve (2.33)'te yer almaktadır.

$$V_a = R_a \cdot i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + i_a \omega \frac{dL_a}{d\theta} \quad (2.30)$$

$$V_b = R_b \cdot i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + i_b \omega \frac{dL_b}{d\theta} \quad (2.31)$$

$$V_c = R_c \cdot i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + i_c \omega \frac{dL_c}{d\theta} \quad (2.32)$$

$$V_d = R_d \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} + i_d \omega \frac{dL_d}{d\theta} \quad (2.33)$$

Anahtarlamalı relüktans makinalarda doğrusal çalışma şartları altında bir fazın ürettiği moment:

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (2.34)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Bu çalışmada kullanılan 4 fazlı generatörün her fazı için moment değerleri (2.35), (2.36), (2.37) ve (2.38)'de yer almaktadır.

$$T_a(\theta, i_a) = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a(\theta)}{d\theta} \quad (2.35)$$

$$T_b(\theta, i_b) = \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b(\theta)}{d\theta} \quad (2.36)$$

$$T_c(\theta, i_c) = \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_c(\theta)}{d\theta} \quad (2.37)$$

$$T_d(\theta, i_d) = \frac{1}{2} i_d^2 \frac{dL_d(\theta)}{d\theta} \quad (2.38)$$

Anahtarlamalı relüktans makinalarda, moment motor olarak çalışırken pozitif, generatör olarak çalışırken negatif değer alır.

Toplam moment dört fazın ayrı ayrı ürettiği momentlerin toplamına eşittir. Toplam momenti gösteren eşitlik (2.39)'da gösterilmektedir.

$$T_e(\theta, i_a, i_b, i_c, i_d) = T_a(\theta, i_a) + T_b(\theta, i_b) + T_c(\theta, i_c) + T_d(\theta, i_d) \quad (2.39)$$

T_m , T_e , J ve B sırasıyla, mekanik moment (N.m), elektromanyetik moment (N.m), eylemsizlik momenti (kg.m^2) ve sürtünme katsayısı olmak üzere anahtarlamalı relüktans generatör için dinamik mekanik denklem (2.40)'ta gösterilmektedir.

$$T_e = T_m - J \frac{d\omega}{dt} - B\omega \quad (2.40)$$

Bu denklemde anahtarlamalı relüktans generatör için elektromanyetik moment değeri negatif bir büyüklüğe sahip olur.

Her faza ait gerilim denklemleri öz-endüktans (L_{aa} , L_{bb} , L_{cc} , L_{dd}) ve karşılıklı endüktanslar (L_{ab} , L_{ac} , L_{ad} ...) kullanılarak genişletilirse elde edilecek bağıntılar (2.41), (2.42), (2.43) ve (2.44)'te yer almaktadır.

$$V_a = R_a i_a + \frac{d\theta}{dt} \left(L_{aa} \frac{di_a}{d\theta} + L_{ab} \frac{di_b}{d\theta} + L_{ac} \frac{di_c}{d\theta} + L_{ad} \frac{di_d}{d\theta} \right) + \frac{d\theta}{dt} \left(\frac{\partial L_{aa}}{\partial \theta} i_a + \frac{\partial L_{ab}}{\partial \theta} i_b + \frac{\partial L_{ac}}{\partial \theta} i_c + \frac{\partial L_{ad}}{\partial \theta} i_d \right) \quad (2.41)$$

$$V_b = R_b i_b + \frac{d\theta}{dt} \left(L_{ba} \frac{di_a}{d\theta} + L_{bb} \frac{di_b}{d\theta} + L_{bc} \frac{di_c}{d\theta} + L_{bd} \frac{di_d}{d\theta} \right) + \frac{d\theta}{dt} \left(\frac{\partial L_{ba}}{\partial \theta} i_a + \frac{\partial L_{bb}}{\partial \theta} i_b + \frac{\partial L_{bc}}{\partial \theta} i_c + \frac{\partial L_{bd}}{\partial \theta} i_d \right) \quad (2.42)$$

$$V_c = R_c i_c + \frac{d\theta}{dt} \left(L_{ca} \frac{di_a}{d\theta} + L_{cb} \frac{di_b}{d\theta} + L_{cc} \frac{di_c}{d\theta} + L_{cd} \frac{di_d}{d\theta} \right) + \frac{d\theta}{dt} \left(\frac{\partial L_{ca}}{\partial \theta} i_a + \frac{\partial L_{cb}}{\partial \theta} i_b + \frac{\partial L_{cc}}{\partial \theta} i_c + \frac{\partial L_{cd}}{\partial \theta} i_d \right) \quad (2.43)$$

$$V_d = R_d i_d + \frac{d\theta}{dt} \left(L_{da} \frac{di_a}{d\theta} + L_{db} \frac{di_b}{d\theta} + L_{dc} \frac{di_c}{d\theta} + L_{dd} \frac{di_d}{d\theta} \right) + \frac{d\theta}{dt} \left(\frac{\partial L_{da}}{\partial \theta} i_a + \frac{\partial L_{db}}{\partial \theta} i_b + \frac{\partial L_{dc}}{\partial \theta} i_c + \frac{\partial L_{dd}}{\partial \theta} i_d \right) \quad (2.44)$$

Bu denklemlerde tek faz için elektromotor kuvveti (e) (2.45)'te yer almaktadır.

$$e = \frac{d\theta}{dt} \left(\frac{\partial L_{aa}}{\partial \theta} i_a + \frac{\partial L_{ab}}{\partial \theta} i_b + \frac{\partial L_{ac}}{\partial \theta} i_c + \frac{\partial L_{ad}}{\partial \theta} i_d \right) \quad (2.45)$$

Bu makinanın ko-enerji (eşlenik enerji) (W_{co}) bağıntısı (2.46)'da gösterilmektedir.

$$W_{co} = \int_0^i \Psi di \quad (\Psi = \text{manyetik akı}) \quad (2.46)$$

Dört fazlı bir anahtarlama relüktans generatör için elektromanyetik moment denkleminin ko-enerji bağıntısı kullanılarak gösterimi (2.47)'de gösterilmektedir.

$$T_e = \sum_{x=1}^i \frac{\partial W_{co_x}}{\partial \theta} \quad (2.47)$$

Ortak endüktans değerlerinin sisteme dâhil edilmesi sonucu her faz için gerilim değerleri ve mekanik moment değeri (2.48)'de gösterilen matris ile elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_d \\ T_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & \omega \frac{\partial L_{ab}}{\partial \theta} & \omega \frac{\partial L_{ac}}{\partial \theta} & \omega \frac{\partial L_{ad}}{\partial \theta} & 0 & 0 \\ \omega \frac{\partial L_{ba}}{\partial \theta} & R_b & \omega \frac{\partial L_{bc}}{\partial \theta} & \omega \frac{\partial L_{bd}}{\partial \theta} & 0 & 0 \\ \omega \frac{\partial L_{ca}}{\partial \theta} & \omega \frac{\partial L_{cb}}{\partial \theta} & R_c & \omega \frac{\partial L_{cd}}{\partial \theta} & 0 & 0 \\ \omega \frac{\partial L_{da}}{\partial \theta} & \omega \frac{\partial L_{db}}{\partial \theta} & \omega \frac{\partial L_{dc}}{\partial \theta} & R_d & 0 & 0 \\ -\frac{\partial W_{co_a}}{\partial \theta} & -\frac{\partial W_{co_b}}{\partial \theta} & -\frac{\partial W_{co_c}}{\partial \theta} & -\frac{\partial W_{co_d}}{\partial \theta} & B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{ad} & 0 & i_a \frac{\partial L_{aa}}{\partial \theta} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bd} & 0 & i_b \frac{\partial L_{bb}}{\partial \theta} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cd} & 0 & i_c \frac{\partial L_{cc}}{\partial \theta} \\ L_{da} & L_{db} & L_{dc} & L_{dd} & 0 & i_d \frac{\partial L_{dd}}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

$$[i] = [L]^{-1}[V] - [L]^{-1}[R][I] \quad (2.49)$$

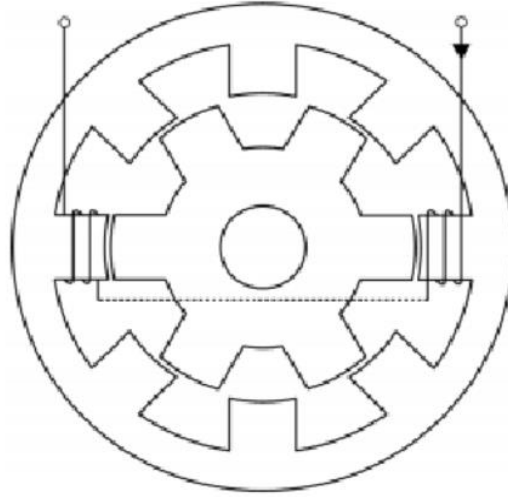
Anahtarlamalı relüktans makinalar tetikleme açısına göre motor ya da generatör olarak kullanılabilirler. Anahtarlamalı relüktans makina $dL/d\theta > 0$ iken motor, $dL/d\theta < 0$ iken generatör özelliği gösterir.

Tek kutuplu akımlarda i daima pozitif değer alacağından ötürü, denklem (2.28)'de gösterildiği üzere zıt emk (e)'nin işareti $dL/d\theta$ 'ye bağlıdır. $dL/d\theta > 0$ durumundayken zıt emk (e) pozitif olur ve indüklenen gerilime karşı bir gerilim üreterek akımı azaltacak bir akım üretmeye çalışır. Böylelikle elektriksel güç bir anlamda mekanik güce dönüşmüş olur. Bu aşamada anahtarlamalı relüktans makina motor olarak çalışmaktadır.

$dL/d\theta < 0$ olduğu durumda ise zıt emk (e) negatif olur ve indüklenen gerilime (V) doğru bir akım oluşur. Bu aşamada relüktans makina generatör konumundadır. Burada akımın davranışını belirleyen e ve V arasındaki ilişkidir ve emk (e) 'nin büyüklüğü rotor hızına bağlıdır.

Anahtarlamalı relüktans generatörler çalışırken rotor ve stator kutuplarının birbirine göre olan konumlarına bağlı olarak akım iletimi, manyetik akı, endüktans, relüktans değerlerinde birtakım değişimler gözlenir.

Şekil 2.13'te bir anahtarlamalı relüktans makina gösterilmiştir. Rotor kutuplarının sayısı N_r , stator kutuplarının sayısı N_s olmak üzere;

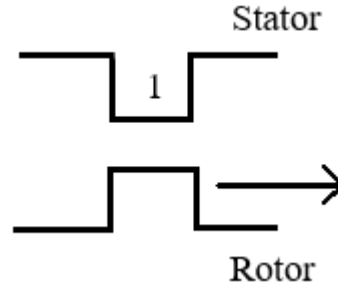


Şekil 2.13. Tek fazlı beslenen 8/6 kutuplu anahtarlamalı relüktans makina

$N_s/N_r=8/6$ 'dır.

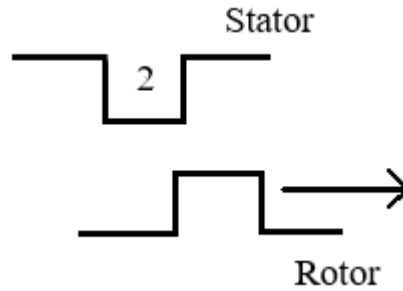
$$Adım\ açısı = \frac{360}{faz \times N_r} = \frac{360}{4 \times 6} = 15^\circ \quad (2.50)$$

olur. Bu ARG için bir fazın çakışık olmayan durumdan bir sonraki çakışık olmayan duruma kadar olan dönüş açısı 60° mekanik veya 360° elektrikseldir. Stator ve rotor kutuplarının birbirine göre durumları ayrı ayrı incelendiğinde:



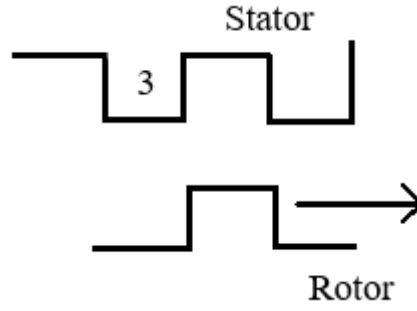
Şekil 2.14. Stator ve rotor kutuplarının çakışık olduğu durum

Şekil 2.14'te gösterilen birinci durum, stator ve rotor kutuplarının çakışık olduğu durumdur. Statordaki sargılara alternatif akım uygulandığında bir sinüs dalgası oluşur ve manyetik akı meydana gelir. Bu etap hava boşluğunun en az olduğu konumdur. Stator ve rotor kutuplarının birbirine en yakın olduğu bu durumda kutuplar arası akım maksimum oranda akar. Statordan akım aksa dahi moment üretilmez. Bu konumda hava aralığı minimum olduğundan manyetik geçirgenlik maksimum olur dolayısıyla relüktans minimum ve endüktans maksimum düzeydedir.



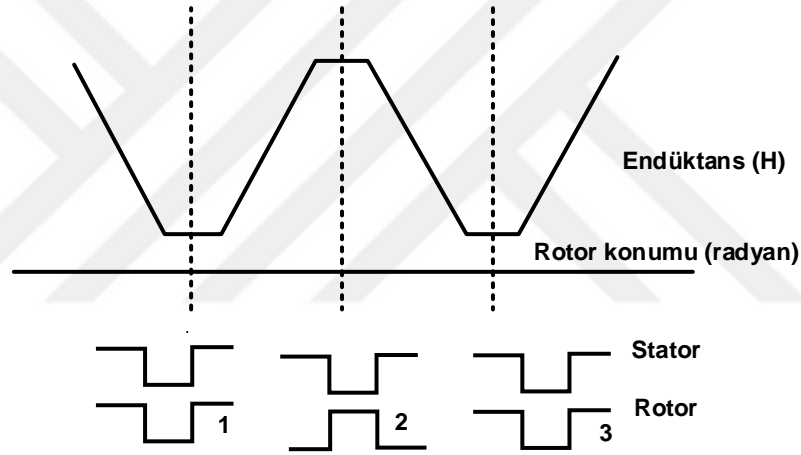
Şekil 2.15. Stator ve rotor kutuplarının ayrılmaya başladığı durum

Şekil 2.15'te gösterilen ikinci durum rotor ve stator kutuplarının birbirinden ayrılmaya başladığı evredir. Bu durumda endüktans azalmaya başlar. Rotor konumuna bağlı endüktansın değişiminin negatif olması, akımı arttırıcı yönde rol oynar ve makina generator olarak akım üretmeye başlar.



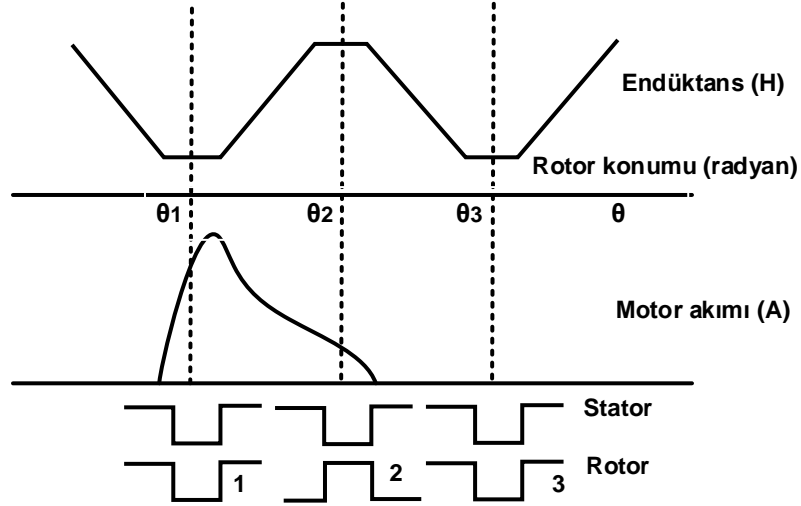
Şekil 2.16. Stator ve rotor kutuplarının ayrıık olduğu durum

Rotor hareket etmeye devam ettikçe Şekil 2.16'daki üçüncü durumda rotor ve stator arasındaki hava boşluğu maksimum düzeye çıkar. Bu durumda hava direnci maksimum olduğundan ötürü akım ve endüktans değeri en düşük seviyededir.



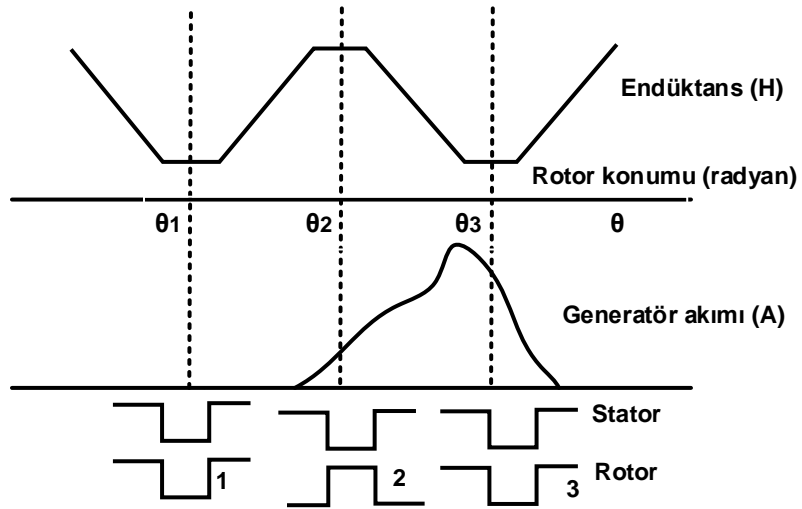
Şekil 2.17. İdeal endüktans eğrisi–rotor/stator konumları

Şekil 2.17'de gösterilen grafikte ideal bir endüktans eğrisinin, stator ve rotor kutuplarının birbirine göre konumlarıyla birlikte aldığı değerleri gösterilmiştir. Rotor ve stator θ_1 'de birbirinden ayrı konumlardayken, rotor θ_2 'ye yaklaştıkça statorla yüz yüze konumuna da yaklaşmış olur. Bu aralıkta kutuplar birbirine yaklaştığı için endüktans artacağından ötürü endüktans eğrisinin yükseldiği gözlemlenir. Rotor açısına bağlı endüktans değerindeki değişim ($dL/d\theta$) sıfırdan büyük olduğu için makina motor olarak çalışmaktadır. Bu aralıkta fazdaki motor akımının grafiği Şekil 2.18'de yer almaktadır.



Şekil 2.18. İdeal endüktans eğrisi-rotor/stator konumlarına göre motor akımı grafiği

θ_2 ve θ_3 aralığında ise kutuplar tekrardan birbirinden ayrılmaktadır. Bu aralıkta endüktans azalacağından ötürü rotor konumuna bağlı endüktans değişimi ($dL/d\theta$) negatiftir. Bu aralıkta endüktans eğrisinde düşüş gözlemlenmektedir. $dL/d\theta < 0$ olduğu için bu aralıkta makina generatör olarak çalışır ve generatör akımı üretilir. Generatör akımına ait grafik Şekil 2.19’da gösterilmektedir.



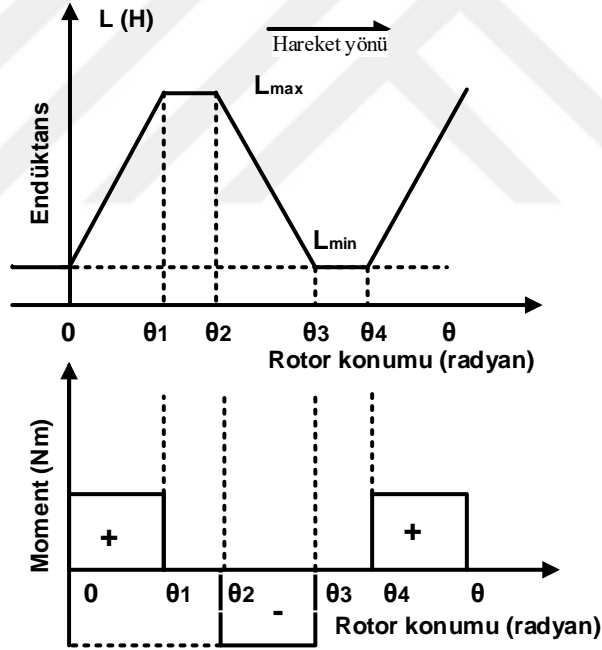
Şekil 2.19. İdeal endüktans eğrisi-rotor/stator konumlarına göre generatör akımı grafiği

Rotor ve stator karşı karşıya geldikten sonra eylemsizlik prensibinden ötürü rotor yoluna devam etmek ister ancak kutuplar arasında bu durumu kısıtlayan bir frenleme momenti oluşur. Bu negatif momentin yok edilmesi için akımın kesilmesi gerekmektedir. Bu sebeple statordaki sargıları beslerken kullanılan akım, senkronize bir grup darbe

sinyalinden oluşur. Her seferinde farklı stator sargıları uyarılarak rotor kutuplarının stator kutuplarına yaklaşması sağlanır. Böylelikle rotorun hareketi ve moment üretimi sürekli hale gelir.

Frenleme oluşturan kutupların birbirinden ayrılması sırasında sargılar uyarılır. Özelleştirilmiş bir akım sinyalinin gerekliliği, direkt olarak şebekenin kullanımını imkânsız hale getirir. Bu yüzden rotor konumunu kontrol eden bir güç elektroniği devresi gerekir.

Denklem (2.34)'te verilen moment bağıntısına göre akımın işareti her zaman pozitif olduğundan ötürü momentin yönü $dL/d\theta$ 'ye yani endüktansın rotor konumuna bağlı değişimine bağlıdır. Bu sebeple aynı işareti alırlar. Endüktans eğrisinin düşüşe geçtiği aralıklarda $dL/d\theta$ 'nin değeri 0'dan küçüktür. Makina generatör modunda çalışmaktadır. Bu aralıkta momentin değeri de negatif olur. Anahtarlamalı relüktans makinalardaki endüktans (H) ve moment (N.m) arasındaki ilişki Şekil 2.20'de gösterilmiştir.



Şekil 2.20. Anahtarlamalı relüktans makinasının endüktans değişimine bağlı moment üretimi

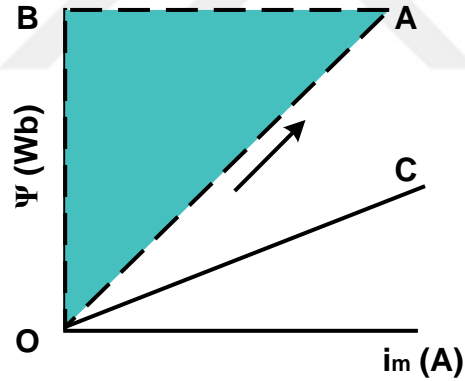
Bu şekilde görüldüğü üzere endüktans eğrisinin azalıp $dL/d\theta$ 'nin negatif olduğu generatör durumunda moment negatiftir. Stator ve rotor kutuplarının birbirine yaklaşp endüktansın arttığı $dL/d\theta > 0$ aralığında moment de pozitif olur. Stator ve rotor kutuplarının karşı karşıya geldiği durumda ise akan akım maksimum olsa dahi moment

oluşmayacağından sıfır değerini alır. Rotor konumuna bağlı moment değerini veren bağıntı (2.51)'de yer almaktadır.

$$T = \begin{cases} \frac{1}{2}i^2 \frac{dL}{d\theta}, & 0 \leq \theta \leq \theta_1 \\ 0, & \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \\ -\frac{1}{2}i^2 \frac{dL}{d\theta}, & \theta_2 \leq \theta \leq \theta_3 \\ 0, & \theta_3 \leq \theta \leq \theta_4 \end{cases} \quad (2.51)$$

2.1.5. ARG'de Manyetik Enerji Hesaplama

Manyetik enerji hesaplanırken akı ve akım değerleri dikkate alınır. Bu değerler Şekil 2.21'deki gibi lineer olarak kabul edilirse kutupların çakışık ve endüktans değerinin maksimum olduğu uyartım anında depolanan manyetik enerjiyi (W_1) veren bağıntı (2.52)'de gösterilmektedir.

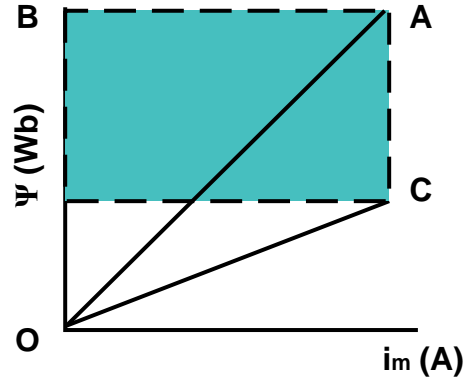


Şekil 2.21. Kutupların çakışık olduğu konumdaki manyetik enerji grafiği

$$W_1 = \int_0^{i_m} i d\Psi = \frac{1}{2} i_m^2 L_a \quad (2.52)$$

Bu bağıntıda Ψ , i_m , L_a sırasıyla akı, akım ve çakışık konumdaki öz endüktansı ifade etmektedir. Burada endüktans değeri, akı ve akım arasındaki eğime eşittir.

Rotor stator kutbundan uzaklaşmaya başladığı anda endüktans azalmaya başlar. Bu durum rotorun kesim açısına ulaşmaya başlamasına kadar devam eder. Bu aşamada, artık ana kaynaktan enerji çekilemez ve Şekil 2.22'de gösterilen W_2 enerjisi kaynağa geri döner.



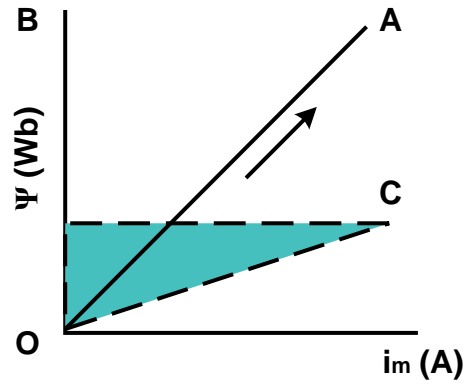
Şekil 2.22. Kutupların birbirinden ayrılmaya başladığı durumda oluşan manyetik enerji grafiği

Kaynağa dönen enerji miktarı (2.53)'te gösterilen bağıntı ile hesaplanabilir.

$$W_2 = i_m^2 (L_b - L_a) \quad (2.53)$$

Bu ifadede L_b stator ve rotorun çakışık olmayan konumundaki öz-endüktans değerini verir. Bu aşamadaki akı ve akımın oranına eşittir.

Çakışık olmayan konumda ise moment sıfırdır. Şekil 2.23'te gösterilen arta kalan depolanmış enerji (W_3) kaynağa gider. Bu ifadeyi veren bağıntı (2.54)'te gösterilmektedir.



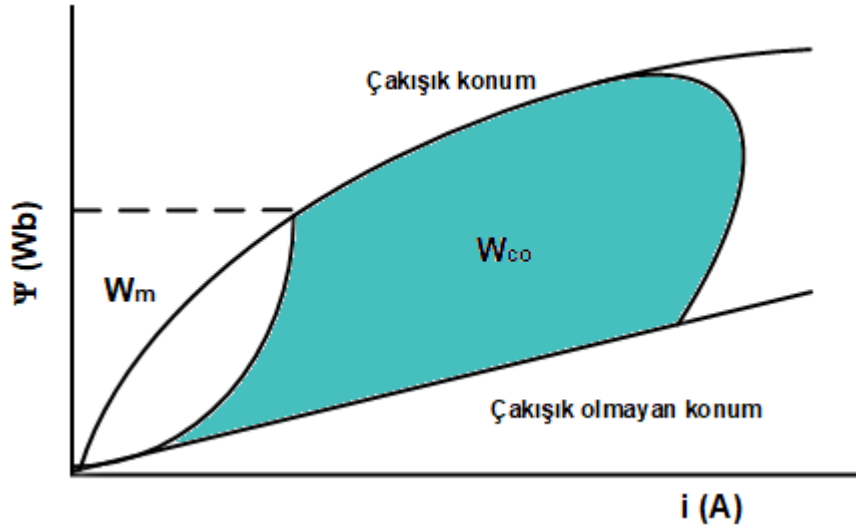
Şekil 2.23. Kutupların ayrık olduğu konumda kaynağa geri dönen manyetik enerji grafiği

$$W_3 = \int_{i_m}^0 i d\Psi = -\frac{1}{2} i_m^2 L_b \quad (2.54)$$

Toplam enerji bütün alanların toplamına eşittir. Toplam enerjiyi veren bağıntı (2.55)'te yer almaktadır.

$$W_T = W_1 + W_2 + W_3 = \frac{1}{2} i_m^2 (L_b - L_a) \quad (2.55)$$

Satürasyon dikkate alındığı zaman depolanan manyetik enerji (W_m) ve ko-enerjiyi (W_{co}) gösteren grafik Şekil 2.24'teki gibi olur. Anahtarlamalı relüktans generatörde üretilen ortalama çıkış gücü çakışık ve çakışık olmayan konumlardaki eğrilerin oranına eşittir. Ko-enerjiyi veren ifade (2.56)'da yer almaktadır.



Şekil 2.24. ARG'de manyetik enerjinin non-lineer dönüşümü

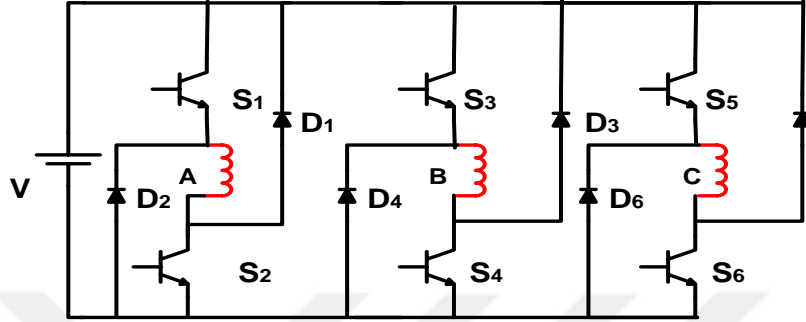
$$W_{co} = \int_0^i \Psi di \quad (2.56)$$

2.1.6. Anahtarlamalı Relüktans Generatör Besleme Devresi

Elektrik makinaları hem motor hem de generatör olarak kullanılabilirler. Anahtarlamalı relüktans makinada da bu durum tetikleme açıklarının uygun şekilde ayarlanması ve uygun bir besleme devresi kullanılması sayesinde sağlanır. Bu çalışmada klasik iki diyotlu besleme devresi kullanılmıştır.

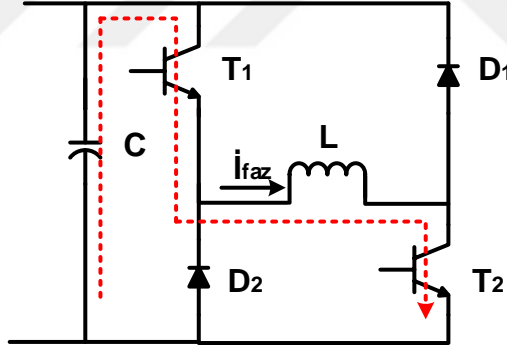
2.1.6.1. Klasik İki Diyotlu Besleme Devresi

Şekil 2.25'te 3 fazlı bir makina için kullanılan klasik iki diyotlu besleme devresi yer almaktadır. Şekilde görüldüğü üzere faz başına iki transistör ve iki diyot bulunmaktadır.



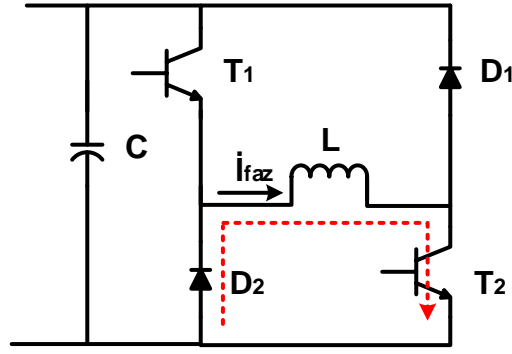
Şekil 2.25. Klasik iki diyotlu besleme devresi

Bu besleme devresinde akımın iletim işlemi üç şekilde gerçekleşir. Bu aşamalar iletim, serbest dolaşım ve kesim anıdır.



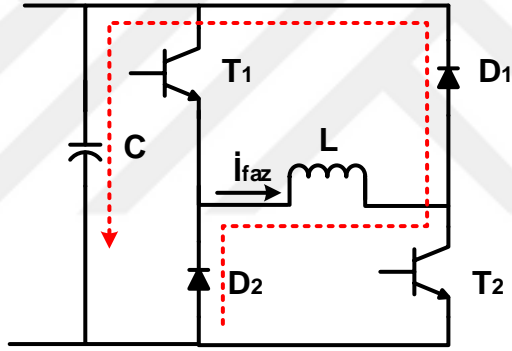
Şekil 2.26. Besleme devresinin tek faz için iletim durumu

Mıknatıslanma aşamasında transistörler anahtar görevi görür ve bu anahtarlar açık konumdadır. DA gerilim kaynağından gelen akım, Şekil 2.26'daki konumu izleyerek yol alır. Bu sırada endüktans değeri yükselir. Bu aşama, makinanın motor olarak çalıştığı aşamadır.



Şekil 2.27. Besleme devresinin tek faz için serbest dolaşım anı

Serbest dolaşım anında anahtarlardan biri açık diğeri kapalı konumdadır. Endüktans üzerinde biriken akım Şekil 2.27'deki gibi yol alır.



Şekil 2.28. Besleme devresinin tek faz için kesim durumu

Şekil 2.28'de anahtarlar kapalı konumdadır. Endüktans üzerinden akan akım bu isteğini sürdürme eğilimindedir. Bu sebeple akım diyotlar üzerinden yoluna devam eder. Buradan akan akım, güç kaynağına doğru yol alır. Endüktansın değeri azalmaya başlar. Bu aşama makinanın generator olarak çalıştığı aşamadır.

2.1.7. Anahtarlama Relüktans Generatörlerin Üstünlükleri

Anahtarlama relüktans generatörlerin kullanımı yıllar geçtikçe sahip olduğu avantajlardan ötürü artış göstermektedir. Özellikle son 30-40 yıl içerisinde bu alanda yapılan araştırmalar ve bu generatörlerin kullanıldığı alanlar artmıştır. Bunun en önemli nedenlerinin başında güç elektroniğindeki gelişmeler yer almaktadır. Teknolojideki

gelişmeler anahtarlamalı relüktans makinaların kontrolünü kolaylaştırmıştır. Anahtarlamalı relüktans generatörlerin belli başlı üstünlükleri şunlardır:

1. ARG'ler yalnızca statorlarında sargı içerirler. Rotorlarında herhangi bir sargı veya mıknatıs yoktur. Bu özelliğinden ötürü ısı kayıplarının çoğunluğunun stator üzerinden gerçekleşir.
2. Yüksek sıcaklıklara dayanıklıdırlar ve kolayca soğutulabilir.
3. Geniş bir hız yelpazesi içerisinde çalışabilirler. Bu özelliklerinden ötürü rüzgâr güç uygulamaları için iyi bir alternatif olmuşlardır.
4. Düşük maliyetlidirler.
5. Dayanıklı ve uzun ömürlüdürler.
6. Her fazı birbirinden bağımsız olduğu için bir fazda meydana gelen arıza diğer fazları etkilemez.
7. Hata toleransı yüksektir.
8. Mıknatıs içermediği için ARG'nin izin verilen rotor sıcaklığı fırçasız sabit mıknatıslı DA motordan daha yüksektir.

2.1.8. Anahtarlamalı Relüktans Generatörlerin Sakıncaları

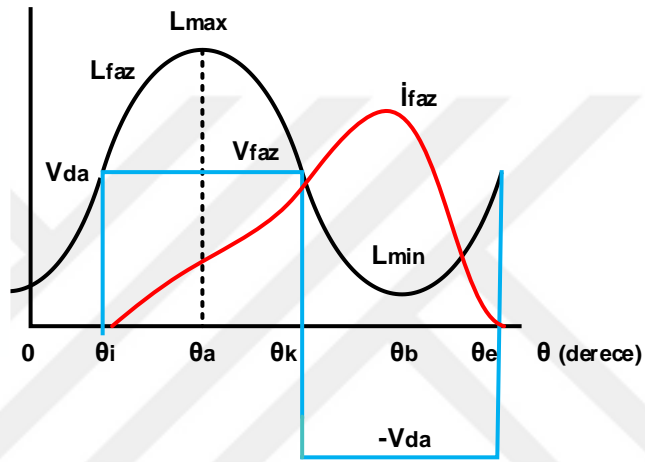
Anahtarlamalı relüktans generatörler sahip olduğu avantajların yanında bir takım dezavantajlara da sahiptir. Her ne kadar gelişen teknolojiyle birlikte bu olumsuz özellikler azalmaya başlamış olsa da, anahtarlamalı relüktans generatörün süregelen sakıncaları şunlardır:

1. ARG'lerde her faz için ayrı ayrı akım sağlamak için rotor konumunun belirlenmesi gerekir. Bu durum, rotor konum sensörünü kullanmayı zorunlu kılar.
2. Moment dalgalanması ve akustik gürültü gözlemlenebilir.
3. Yüksek hız uygulamalarında büyük oranda güç düşüşü yaşanır.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. Anahtarlama Relüktans Generatörün Kontrolü

Anahtarlama relüktans makinanın generatör olarak çalışabilmesi için sargıların, kutupların ayrılmaya başladığı sırada uyarılması gerekir

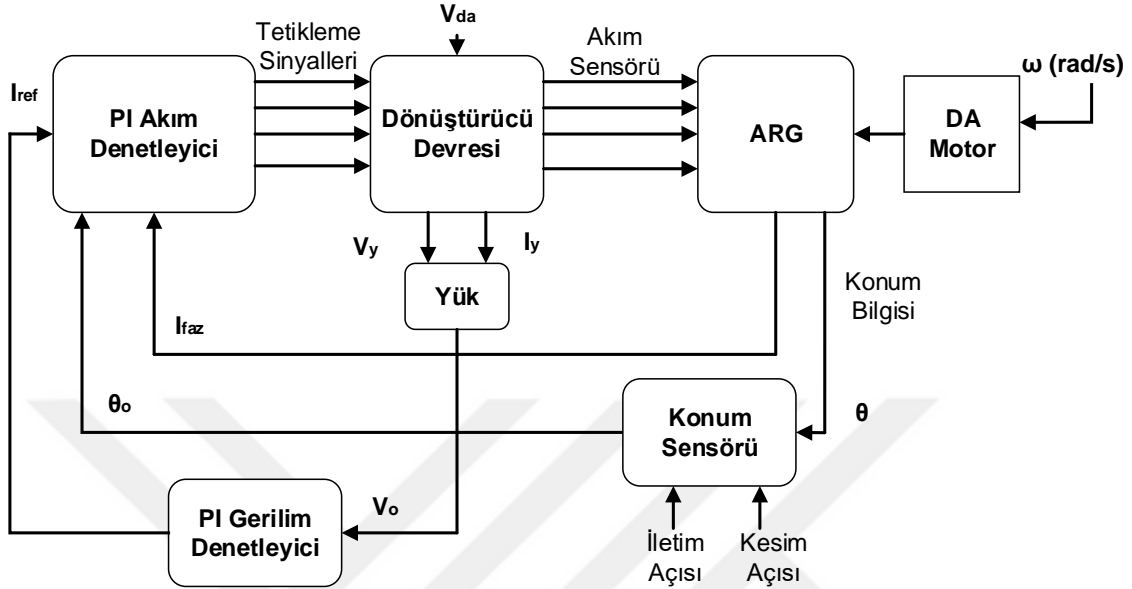


Şekil 3.1. ARG'de faz akımı, faz gerilimi ve faz endüktansının rotor konumuna göre değişimi

Şekil 3.1'de yer alan grafikte faz endüktansı (L_{faz}) ve farklı rotor konumlarına bağlı faz akımının ve faz geriliminin (V_{faz}) değişimi gösterilmektedir. θ_i (iletim açısı)'de S_1 ve S_2 anahtarları açıktır ve faz akımı (i_{faz}) akmaya başlar. Endüktansın maksimum değerine ulaştığı nokta olan θ_a 'da kutuplar çakışmıştır. Çakışık konumdan önce anahtarların açılması akımı arttırıcı yönde etki eder (Arifin, 2013). θ_k (kesim açısı)'da anahtarlar kapanır ve diyotlar iletime geçer. Makina generatör olarak çalışır. Üretim akımı (i_{gen}) diyotlar üzerinden yüke doğru akar. θ_b 'de kutuplar ayırık konumdadır. Zıt emk (e) 0'dır. Bu yüzden faz akımı, θ_e 'ye yaklaştıkça sifira ulaşır. Eğer faz akımı sifira düşmezse ($dL/d\theta > 0$ 'dan önce) motor momenti oluşabilir (Fernandes ve ark., 2016).

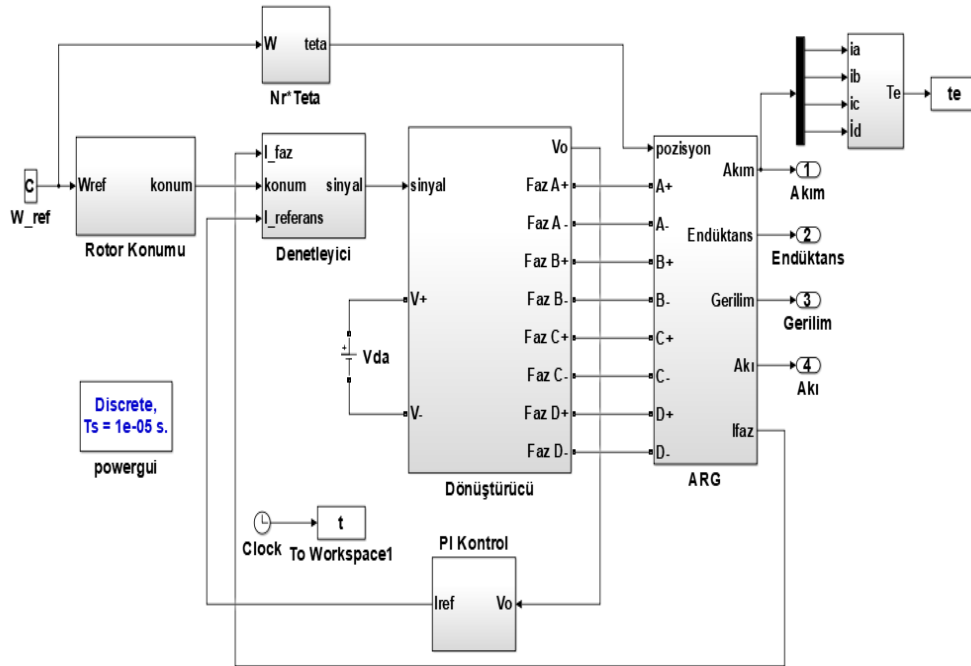
Anahtarlama relüktans generatörde yüksek oranda verim alabilmek için kontrol sisteminin en iyi şekilde tasarlanmış olması gerekir. İletim ve kesim açılarının belirlenmesi, sistemdeki dönüştürücü devresini tetikleyecek uygun bir sistemin

tasarlanması gerekmektedir. Şekil 3.2’de 8/6 kutuplu ve 4 fazlı bir anahtarlamalı relüktans generatör için tasarlanan kontrol sisteminin genel şeması yer almaktadır.



Şekil 3.2. ARG genel şeması

Bu çalışmada kullanılan ARG'nin Matlab/Simulink yazılımında oluşturulan modeli Şekil 3.3'te verilmiştir.

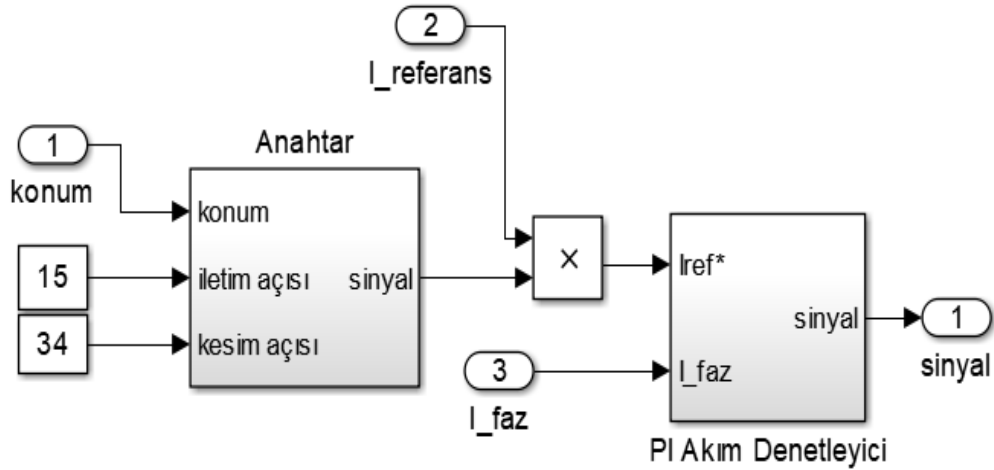


Şekil 3.3. Anahtarlamalı relüktans generatörün Matlab/Simulink modeli

Bu çalışmada kullanılan Matlab/Simulink benzetim modelinde 8/6 kutuplu 4 fazlı bir ARG modeli oluşturulmuştur. Referans hızın, rotor konum bilgisine dönüşmesini sağlayacak bir rotor konum bloğu, bir denetleyici sistem, makinanın istenilen rotor konumu aralığında çalışmasını sağlayan bir anahtarlama bloğu, buradan elde edilen sinyalin ARG için uygun hale getirilmesini sağlayan bir dönüştürücü blok bu benzetim çalışmasında yer almaktadır. Çıkışta elde edilen akı, akım, moment, endüktans ve gerilim sinyallerini gözlemleyebilmek için sisteme bir sinyal gösterici dâhil edilir. Dönüştürücü devresini beslemek için bir DA gerilim kaynağı bağlanmıştır.

3.1.1. ARG için Denetleyici Tasarımı

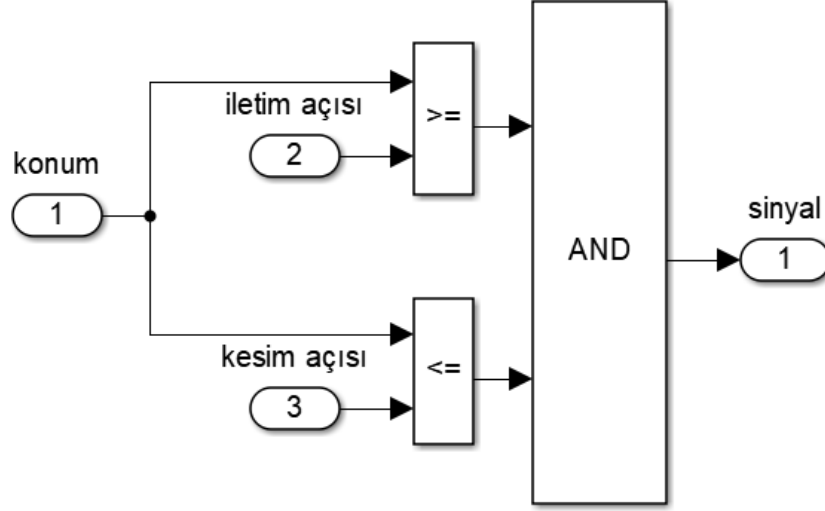
Şekil 3.4'te ARG'nin iletim ve kesim açılarının belirlendiği blok verilmiştir.



Şekil 3.4. ARG'nin iletim ve kesim açılarının belirlenmesi ve akım kontrol bloğu

Bu blokta iletim ve kesim açıları belirlenir. İstenilen rotor konumu aralığında çalışmayı sağlayan tetikleme sinyalleri üretilir. Faz akımını kontrol etmek için referans akımı kullanılır. Referans akımı, ARG'nin çıkış gerilimini istenen değerde tutmak için tasarlanan bir oransal-integral (PI) denetleyiciden elde edilir. Buradan elde edilen referans akımı, faz akımının istenen değerde tutulabilmesi için makinanın çıkışındaki gerçek faz akım değeri ile kıyaslanır. Buradaki hata, PI Akım denetleyici ile kontrol edilir. Bu bloktan alınan sinyal akım değerini arttırmak/azaltmak için transistöre açma/kapama komutu yollar. Anahtar açıkken akım artmaya başlar. Anahtar kapandığında faz akımı azalmaya başlar. Bu sayede dönüştürücü bloğundaki transistörlerin kapıları sürekli kontrol edilir.

Makinanın generatör olarak çalışabilmesi için stator sargılarını, endüktans eğrisinin rotor konumuna göre azaldığı yerde enerjilendirmek gerekir. İstenilen rotor konumu aralığında çalışmayı sağlayan Matlab/Simulink bloğu Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



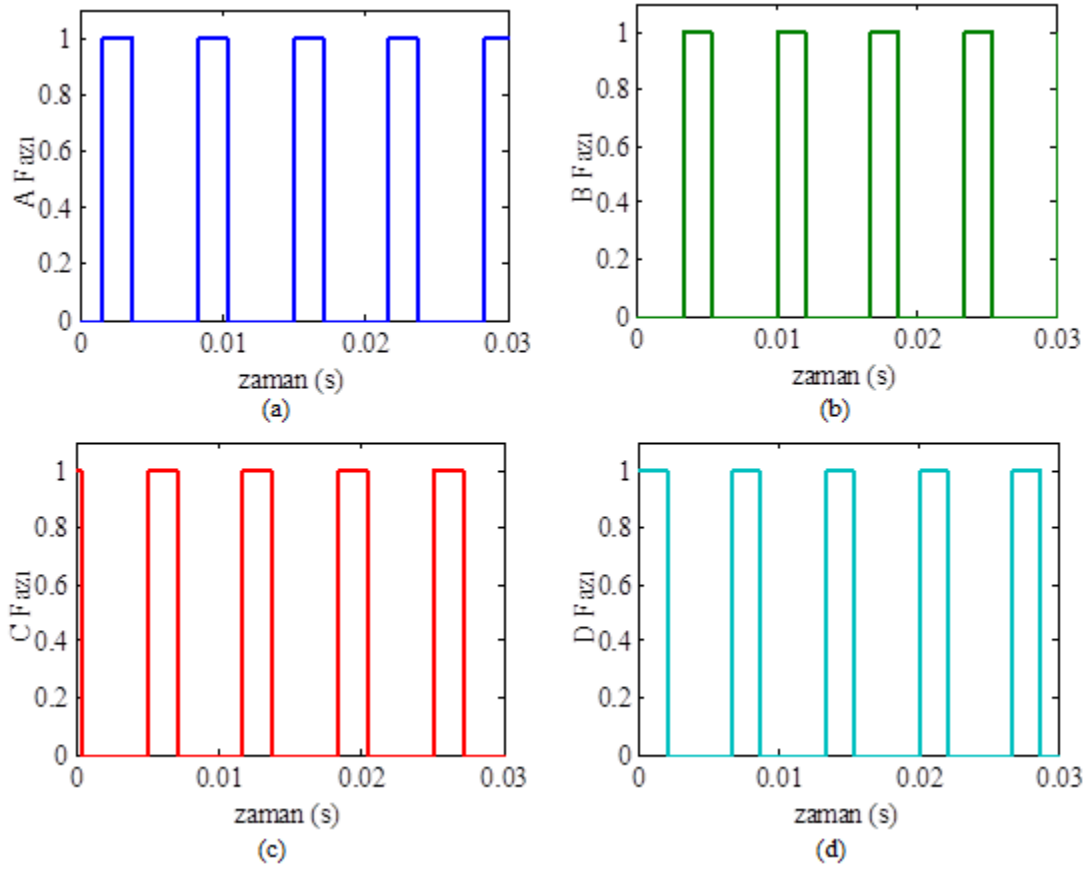
Şekil 3.5. Uygun tetikleme açılarında çalışmayı sağlayan konum sensör bloğu

Şekil 3.5'teki blokta konum bilgisi, kullanıcı tarafından belirlenen iletim ve kesim açıları ile kıyaslanır. Elde edilen sinyale ilişkin bağıntı (3.1)'de yer almaktadır. θ , rotor konumunu ifade etmektedir.

$$Sinyal = \begin{cases} 0, & \theta < \text{iletim açısı} \\ 1, & \text{iletim açısı} \leq \theta \leq \text{kesim açısı} \\ 0, & \theta > \text{kesim açısı} \end{cases} \quad (3.1)$$

Bu bağıntı sayesinde, generatör akımı istenilen rotor konumu aralığında elde edilebilir. Maksimum oranda güç elde edebilmek için bu iletim ve kesim açılarının değerlerinin seçimi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada farklı rotor konumlarına ait faz akımı değerleri kıyaslanmıştır. Her faz için elde edilen konum sensörü çıktısı Şekil 3.6'da gösterilmektedir.

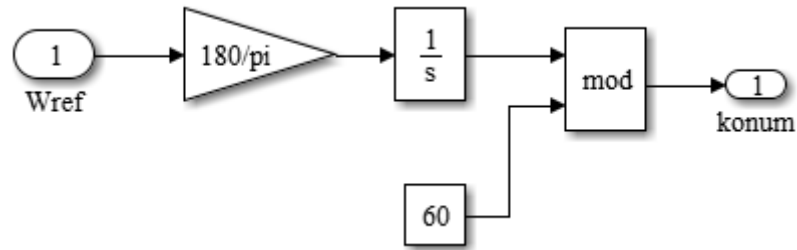
Konum sensör bloğundan elde edilen sinyaller, denetleyici devresinde faz akımını ayarlamak için kullanılmıştır.



Şekil 3.6. ARG'nin 4 fazı için konum sensörü çıkış sinyalleri

3.1.2. Rotor Konum Sensörü Bloğu

ARG'nin rotor konumuna ilişkin blok Şekil 3.7'de yer almaktadır.



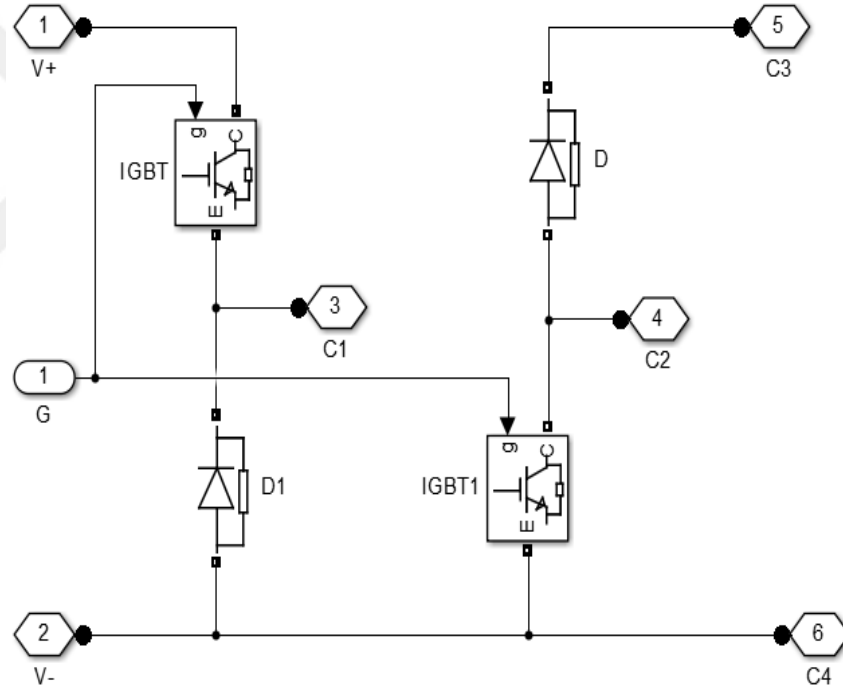
Şekil 3.7. 4 Fazlı ARG için rotor konum bloğu

Şekil 3.7'de referans hız değeri $180/\pi$ ile çarpılarak radyan değerinden dereceye çevrilir. Elde edilen sinyal Matlab hazır bloğu olan integral bloğundan geçerek rotor konum değerine dönüştürülür. Yapılan çalışmada 4 fazlı bir ARG kullanıldığı için integral bloğunun başlangıç şartları 0, -15, -30, -45 derece olarak belirlenmiştir. Bu değerlerle

birlikte ilk fazın sonucuna göre diğer faz sinyalleri 15'er derece fark ile sisteme işlenir. Rotor açısı ile 60 derecenin modu alınarak elde edilen değer, gerçekte makinanın rotor konumuna en yakın değeri olarak kabul edilir. Buradan elde edilen sonuç, kullanıcı tarafından belirlenen iletim ve kesim açıları ile kıyaslanarak istenilen aralıkta çalışmayı mümkün kılar.

3.1.3. ARG Dönüştürücü Tasarımı

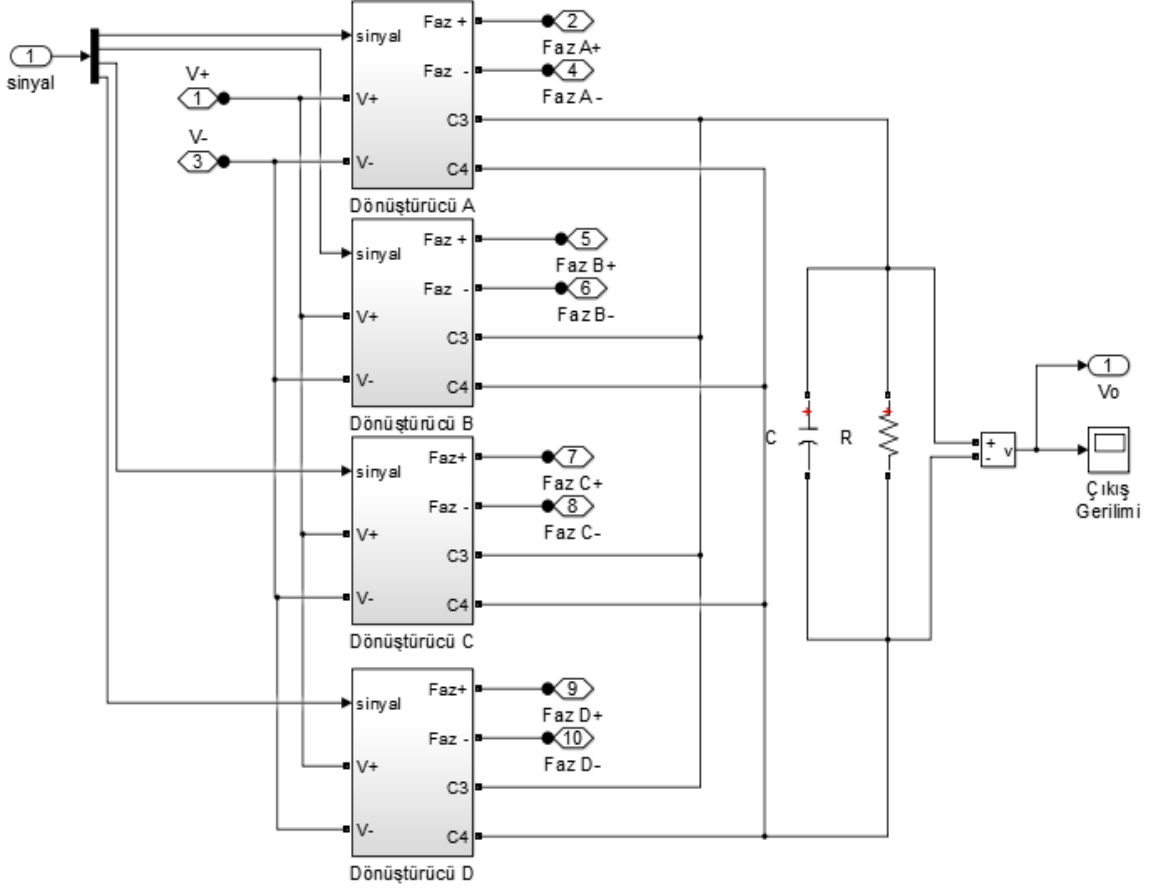
ARG sargılarını besleyen akım değerini ayarlamak için sisteme bir dönüştürücü devresi eklenir. Şekil 3.8'de her faz için ayrı ayrı kullanılan dönüştürücü devresi yer almaktadır.



Şekil 3.8. Tek faz için kullanılan 2 diyotlu dönüştürücü devresi

Dönüştürücüye gelen sinyal iletim durumundaysa IGBT'ler aktif hale gelir ve stator sargısının olduğu C_1 ve C_2 portları arasında endüktans artmaya başlar. Sinyalin kesime gittiği durumda C_1 - C_2 portları arasında akan akım bu eylemini sürdürme eğilimi gösterir bu sebeple akım C_3 portu üzerinden yüke doğru akar. Bu esnada oluşan akım generatör akımıdır. Bu akım, endüktansın rotor konumuna göre değişiminin negatif olduğu alanda meydana gelir. Uygun bir filtre kondansatörü ve kondansatörün aşırı yüklenmesini

önleyecek bir yük direncinin sisteme bağlanmasıyla bu işlem gerçekleştirilir. Kondansatör şarj olduğunda akım otomatikman kesilecektir.

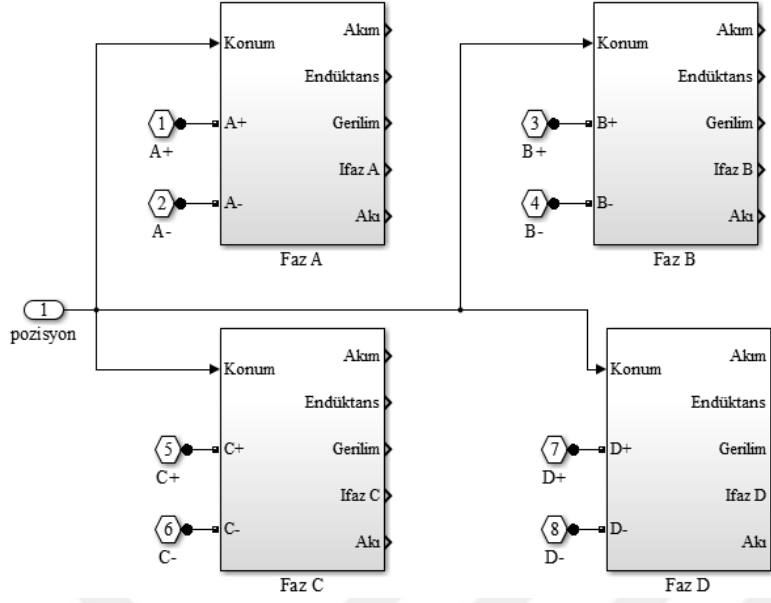


Şekil 3.9. 4 Fazlı ARG dönüştürücü devresi bloğu

ARG'nin dönüştürücü devresi Şekil 3.9'da yer almaktadır. Anahtarlamayı sağlayan denetleyici devreden gelen sinyal bilgisi 4 fazlı ARG'nin tetikleme noktalarına gider. Ayrıca V^+ ve V^- besleme gerilimlerine uygun DA gerilim kaynağı bağlanır.

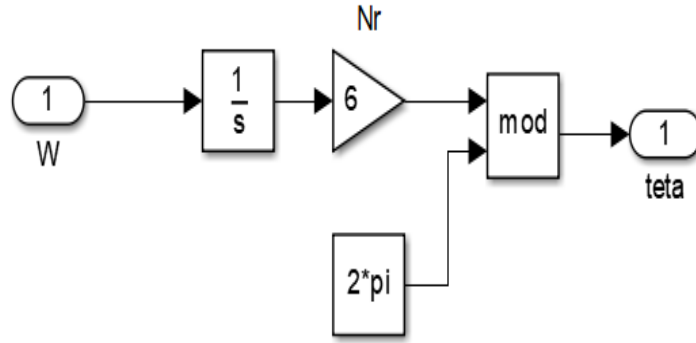
3.1.4. ARG Sargı Bloğu

Uygun besleme devresinden elde edilen akımın ARG'nin sargılarını beslediği ve makinaya ait akım, akı, gerilim, endüktans değerlerinin elde edildiği faz sargısının Matlab/Simulink bloğu Şekil 3.10'da yer almaktadır.



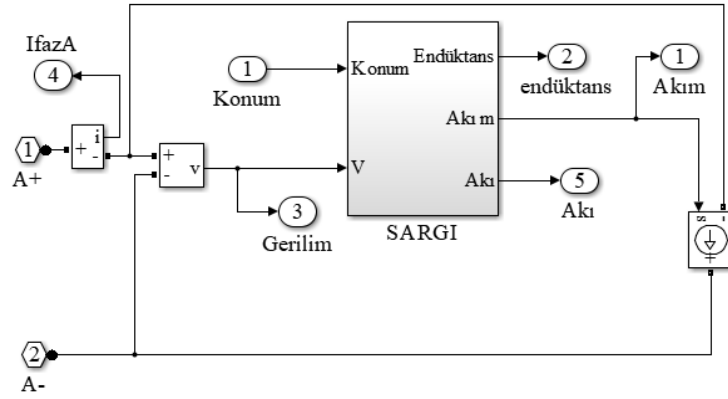
Şekil 3.10. ARG'nin faz sargılarını gösteren blok

Dönüştürücü çıkışından elde edilen gerilimler uygun faz gerilim portlarına bağlanır ve akım, endüktans ve akı bilgisine ulaşmak için gerekli olan konum bilgisi sisteme dâhil edilir. Konum bloğuna ait görüntü Şekil 3.11'de yer almaktadır.



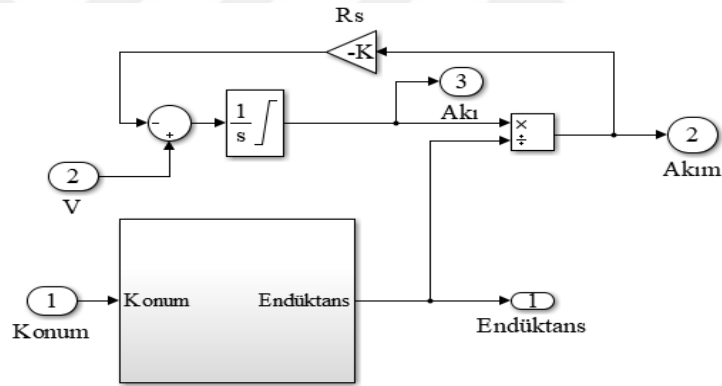
Şekil 3.11. ARG'nin endüktans eğrilerini oluşturmak için kullanılan konum bloğu

Şekil 3.11'de açısal hız değeri integral bloğundan geçerek rotor konumuna dönüşür. Bu çalışmada $N_r=6$ olduğundan ötürü 60 değeri bu blok üzerinden hesaplanıp endüktans değerini bulmak için kullanılır. Şekil 3.12'de A fazı sargısının Matlab/Simulink içeriği gösterilmektedir.



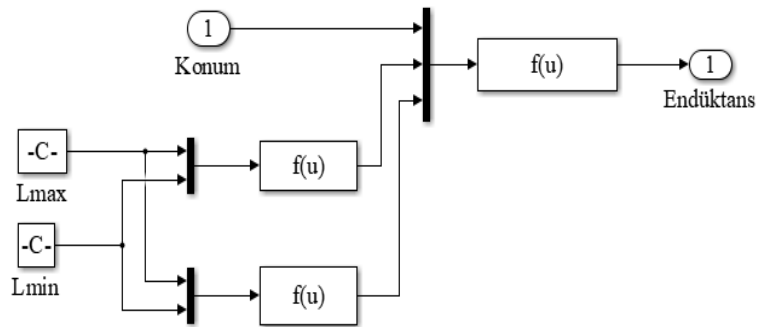
Şekil 3.12. ARG'nin A fazı bloğu

Şekil 3.12'de gösterilen sistemde, dönüştürücü devresinde endüktans sargıları üzerinden akan akım ARG sargılarını beslemek için kullanılır. Şekil 3.13'te her faza ait akım ve akı değerini gösteren Matlab benzetim bloğu gösterilmektedir.



Şekil 3.13. ARG'nin A fazına ait sargı bloğu

A fazı için konum bilgisi kullanılarak endüktansın elde edildiği blok Şekil 3.14'te yer almaktadır.

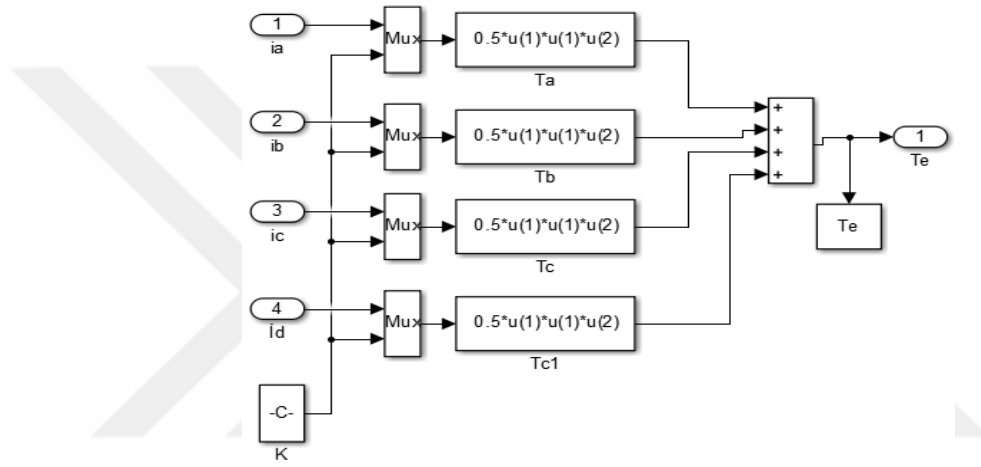


Şekil 3.14. ARG'nin tek fazına ait endüktans bloğu

Bu çalışmada kullanılan ARG'nin bir fazının maksimum (L_{\max}) ve minimum (L_{\min}) endüktans değerleri LCR metre ile ölçülmüştür. L_{\max} ve L_{\min} değeri sırasıyla 0.75 mH ve 0.1 mH'dir

3.1.5. ARG Moment Ölçümü

ARG'in moment değerini veren Matlab/Simulink bloğu Şekil 3.15'tedir. Bu blokta her faza ait moment değerleri ayrı ayrı toplanmıştır.



Şekil 3.15. 4 Fazlı ARG'nin momentini ölçen Matlab bloğu

Şekil 3.15'te T_e generatörün toplam momentini göstermektedir. Bu değeri bulmak için kullanılan bağıntı (3.2)'de yer almaktadır.

$$T_e = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_c(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_d^2 \frac{dL_d(\theta)}{d\theta} \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte endüktansın rotor konumuna göre değişimi sabit kabul edilir ve K olarak alınır;

$$K = \frac{dL_a(\theta)}{d\theta} = \frac{dL_b(\theta)}{d\theta} = \frac{dL_c(\theta)}{d\theta} = \frac{dL_d(\theta)}{d\theta} \quad (3.3)$$

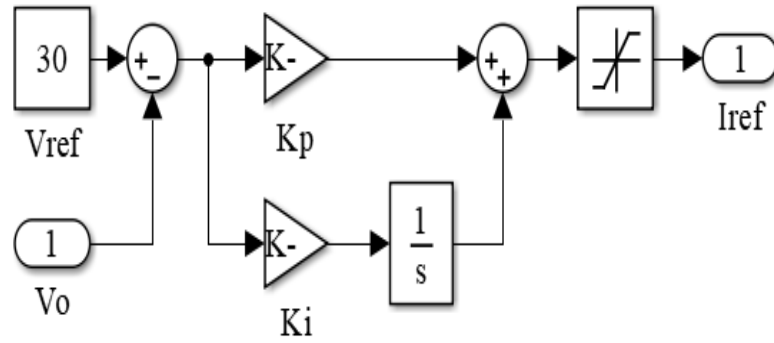
elde edilir. Yeni ifade (3.2)' de yerine yazılırsa yeni toplam momentin değerini veren bağıntı;

$$T_e = \frac{1}{2}K(i_a^2 + i_b^2 + i_c^2 + i_d^2) \quad (3.4)$$

olur. Anahtarlama relüktans generatörde $dL/d\theta < 0$ olduğundan ötürü K değeri negatif olur.

3.1.6. ARG Çıkış Gerilimi Kontrolü

Bu çalışmada anahtarlama relüktans generatörün kontrolü, ARG'nin çıkış gerilimini istenen değerde tutabilmek üzerine tasarlanmıştır. Bunun için referans gerilim değeri ile ARG çıkış gerilimini kıyaslayan bir oransal-integral (PI) denetleyici kullanılmıştır. Bu denetleyiciye ait Matlab görüntüsü Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. ARG'de çıkış geriliminin kontrolü

Bu blokta, referans gerilim değeri (V_{ref}) ile ARG çıkış gerilimi (V_o) arasındaki fark bir PI denetleyicisi kullanılarak referans akım değerine çevrilmiştir. Bu referans akımı ise faz akımını kontrol etmek amacıyla kullanılmıştır. Bu blokta referans akımını (I_{ref}) veren bağıntı (3.5)'tedir. Bu bağıntıda K_p oransal kontrol katsayısı, K_i integral kontrol katsayısıdır.

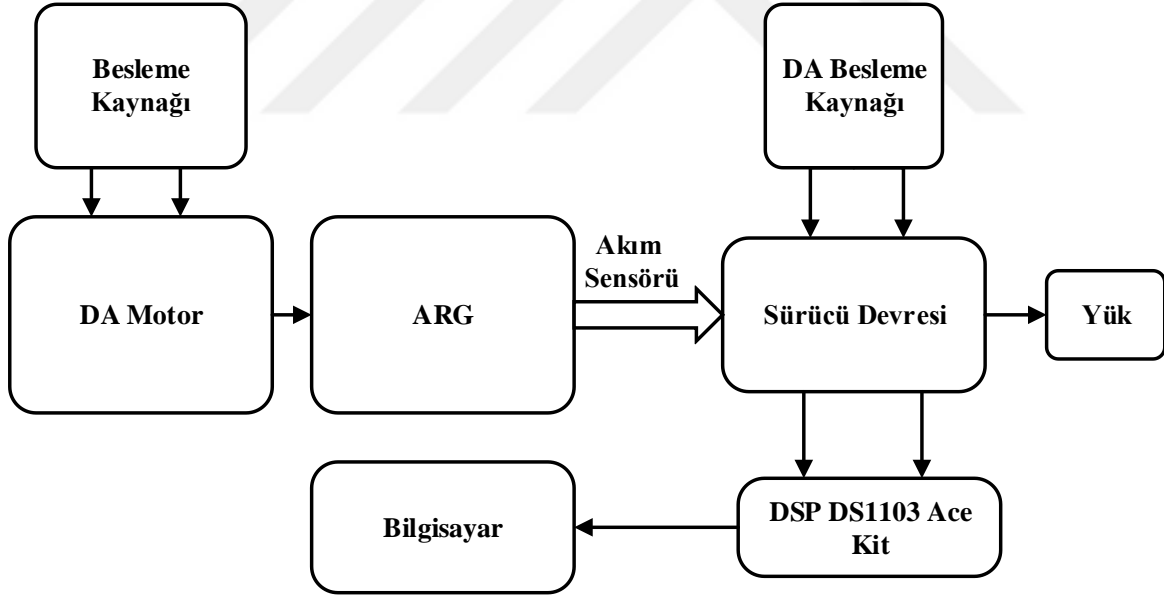
$$I_{ref} = K_p(V_{ref} - V_o) + K_i \int (V_{ref} - V_o) dt \quad (3.5)$$

(3.5)'te yer alan bağıntıya göre referans akım değerini bulmak için referans gerilim değerinden ARG çıkış gerilimi çıkarılır. Buradan elde edilen gerilim hatası bir PI denetleyiciden geçirilir ve faz akımıyla kıyaslanacak bir referans akımı elde edilir.

3.2. Anahtarlamalı Relüktans Generatörün Kontrolünde Kullanılan Donanım ve Yazılım

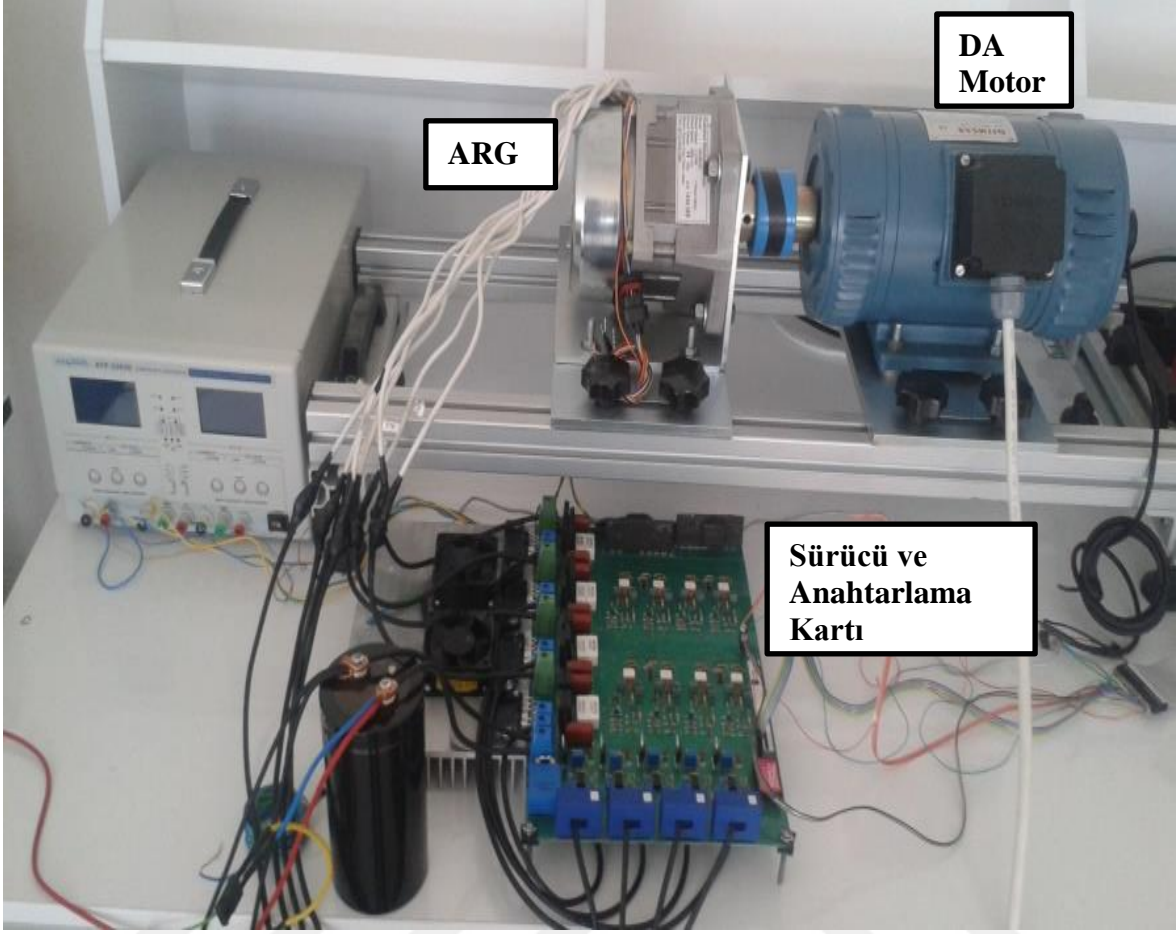
Anahtarlamalı relüktans generatörün gerilim ve akım kontrolünü yapmak için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu bölümde laboratuvarında kullanılan donanımlar ve yazılım hakkında bilgi verilmiştir.

ARG deney seti blok şeması Şekil 3.17’de gösterilmektedir. DA motor ARG’yi döndürmek için kullanılmıştır. Sürücü devresini beslemek amacıyla bir DA besleme kaynağı kullanılmıştır. Sürücü devresine bağlanan yük direnci ile ARG’nin çıkış gerilimi gözlenmiştir. Bilgisayarda gerçekleştirilen programlama ve bir DSP (Digital Signal Processing, Sayısal Sinyal İşlemci) aracılığıyla sürücü devresi ve bilgisayar arasında iletişim sağlanmıştır. Uygun yazılım ve kontrol parametreleri kullanılarak elde edilen sinyaller, bilgisayar aracılığıyla istenilen rotor konumu aralığında çalışmayı, gerilim ve akım kontrolü işlemini gerçekleştirmeyi sağlamıştır.



Şekil 3.17. ARG'nin deneysel şeması

DA motor, IGBT anahtarlarının sürücü devresi ve sayısal sinyal işlemcili kart, hızın ve akımların ölçülmesi, deneysel çalışmanın donanım kısmını meydana getirir. Hız, gerilim ve faz akımı bilgilerinin bilgisayara işlenmesi, uygun DGM sinyallerinin üretilmesi ise deneysel çalışmanın yazılım kısmını oluşturur. Şekil 3.18’de ARG kontrolünde kullanılan sürücü ve anahtarlama kartı yer almaktadır.



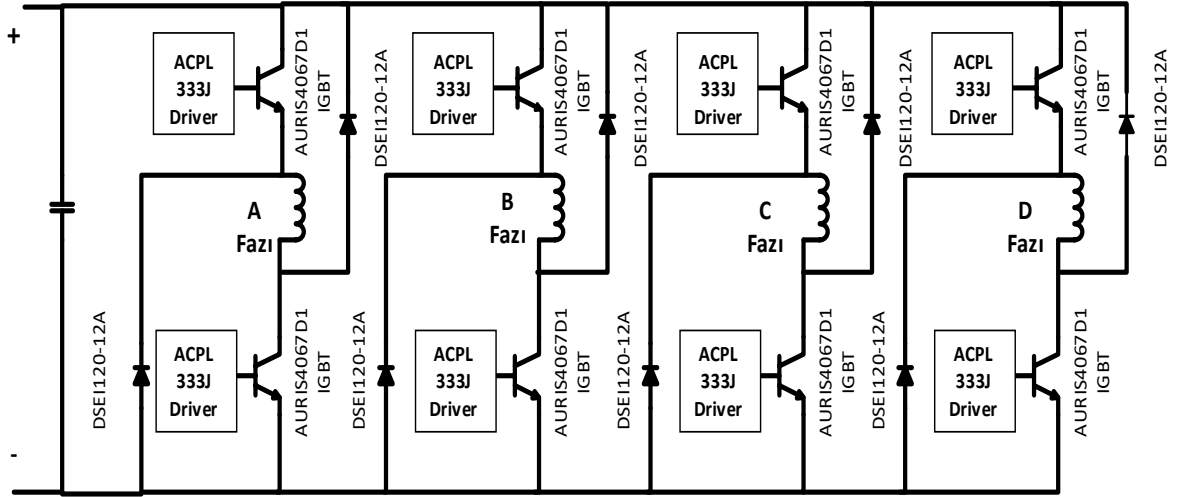
Şekil 3.18. ARG, DA motor ve sürücü ve anahtarlama kartı

3.2.1. Dört Fazlı Sürücü ve Anahtarlama Kartı

Bu kartta, ARG sürücü ve anahtarlama devresi, faz akımı ve gerilimini ölçen sensörler, devreyi yüksek gerilimin etkilerinden koruyan bir söndürme devresi yer almaktadır.

3.2.1.1. Sürücü Devresi

Bu çalışmada IGBT anahtarlarının sürülmesinde ACPL 333J entegresi kullanılmıştır. ACPL 333J içerdiği opto-koplör sayesinde sinyal işlemci ile ARG sürücüsü, birbirinden elektriksel olarak yalıtılmıştır. ACPL 333J, çıkış akımı 2.5 A olan, kullanımı kolay, IGBT için hata koruması sağlayan akıllı kapı sürücülerine sahip, uygun maliyetli bir sürücü entegresidir. Bu sürücünün genel gösterimine ait şema Şekil 3.19'da yer almaktadır.



Şekil 3.19. ACPL 333J sürücü entegresi

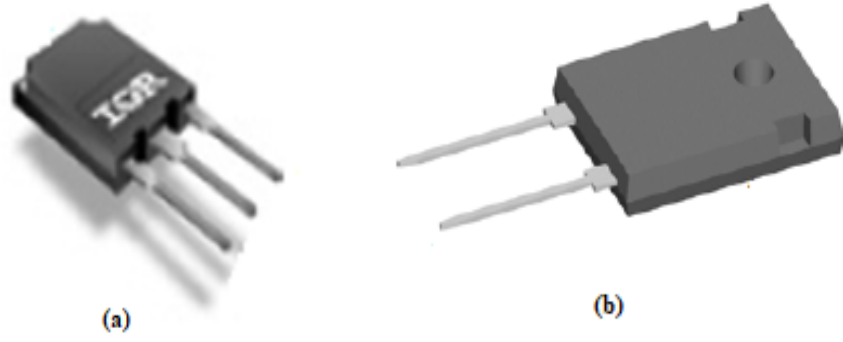
Bu sürücü entegresinin başlıca özellikleri şunlardır:

- 1- 2.5 A'lik maksimum, 2 A'lik minimum tepe çıkış akımı,
- 2- Kısa devre koruma,
- 3- Histeresisli düşük gerilim kilit koruması,
- 4- Yumuşak IGBT kesimi,
- 5- İzole açık kollektör hata geri bildirimi,
- 6- -40° 'den 105° 'ye kadar geniş çalışma sıcaklığı aralığı,
- 7- Maksimum $I_{CC} < 5$ mA besleme akımı,
- 8- $V_{CC1} = 4.5$ ile 5.5 V arası pozitif besleme gerilimi ile çalışmasıdır.

3.2.1.2. Anahtarlama Devresi

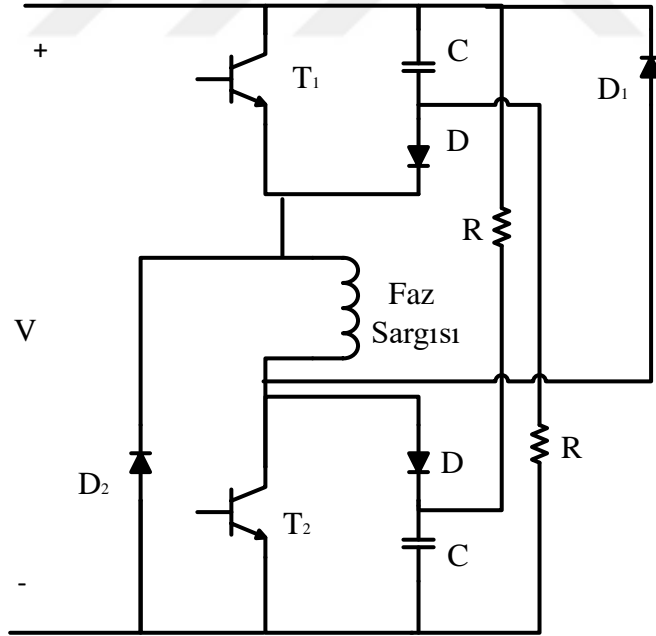
ARG'nin kontrolünde, güç anahtarı olarak Şekil 3.20 (a)'da gösterilen AUIRGPS4067D1 IGBT kullanılmıştır. Bu anahtar, çok hızlı bir diyotla çalışan yalıtılmış çift kapılı bir transistördür. Avantajlarından biri düşük anahtarlama kaybına sahip olmasıdır. Bu transistörün çalışma gerilimi $V_{CES}=600$ V'tur. Çalışma akımı ise $T_c=100^{\circ}\text{C}$ 'de $I_c = 160$ A'dir. $V_{CE(on)}=1.7$ V'luk bir gerilim düşümüne sahiptir.

Anahtarlama devresinde Şekil 3.20 (b)'de gösterilen TO-247 AD kılıfında üretilen DSEI 120-12A toparlama diyotu kullanılmıştır. Bu diyotun toparlama zamanı $t_{rr}=40$ ns, taşıyabileceği maksimum akım $I_{FAVM}=109$ A'dir. Ters yönde üzerinde taşıyabileceği maksimum gerilim miktarı ise $V_{RRM}=1200$ V'tur.



Şekil 3.20. Anahtarlama devresi elemanları (a) AUIRGPS4067D1 IGBT, (b) DSEI 120-12A toparlama diyotu

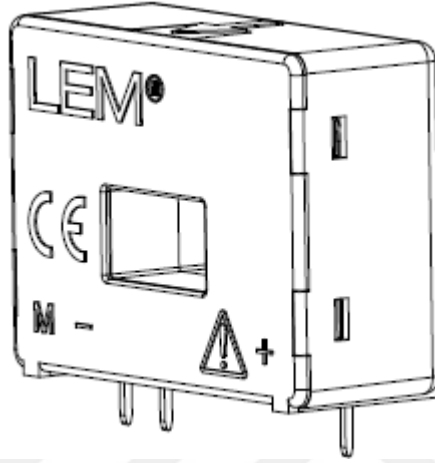
Anahtarlar kesime giderken aşırı gerilime maruz kalmaması için bir söndürme (snubber) devresine ihtiyaç duyulur. Bu çalışmada kullanılan söndürme devresi Şekil 3.21’de gösterilmiştir. Bu devrede, T_1 ve T_2 anahtarları D_1 ve D_2 toparlama diyotlarını göstermektedir. Söndürme direnci, $R=27 \Omega$, $P_R=27 \text{ W}$ ve söndürme kondansatörü, $C=0.47 \mu\text{F}$ ve $V_C=630 \text{ V}$ ’tur.



Şekil 3.21. Anahtarlama ve snubber devresi

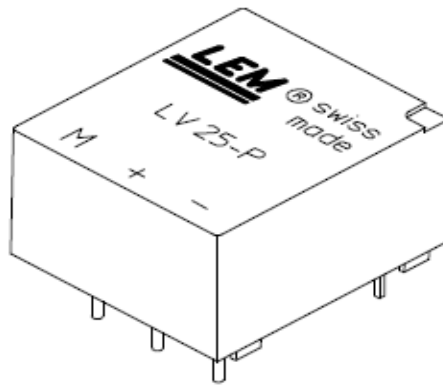
3.2.1.3. Akım ve Gerilim Sensörleri

Bu çalışmada akım sensörü olarak Şekil 3.22’de gösterilen LA 55-P kullanılmıştır. Bu sensör, hall etkisini kullanarak akımı ölçen bir elektronik ayardır. Hall etkisi, manyetik alan içerisinde bulunan ve üzerinden akım geçen bir iletken boyunca gerilim oluşması olayıdır. Bu sensör 0-50 A arasındaki akımların algılanmasında kullanılmaktadır.



Şekil 3.22. LA 55-P akım sensörü

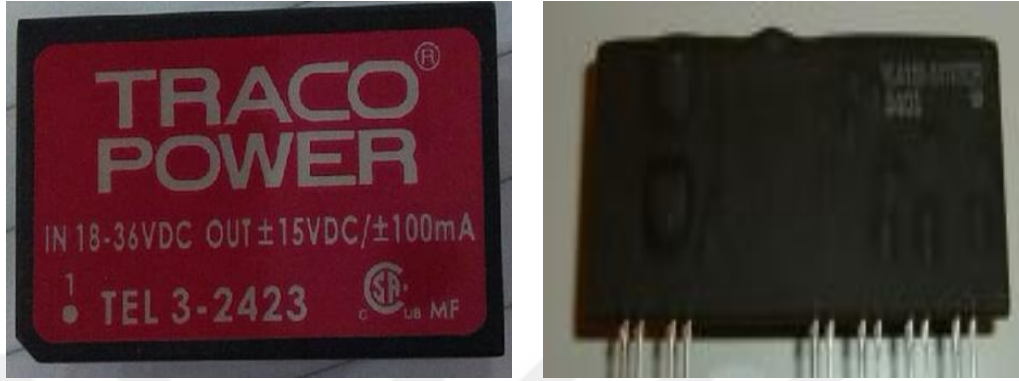
Gerilim sensörü olarak Şekil 3.23’te yer alan LV 25-P kullanılmıştır. Bu sensör 0-500 V arası gerilimlerin ölçülmesinde kullanılır.



Şekil 3.23. LV 25-P gerilim sensörü

ARG’nin sürücüsünde izoleli gerilim kaynağı olarak Şekil 3.24’te gösterilen TEL-3-2423 ve VLA128-24153QR kullanılmıştır. TEL-3-242’nin giriş gerilimi 24 V, çıkış

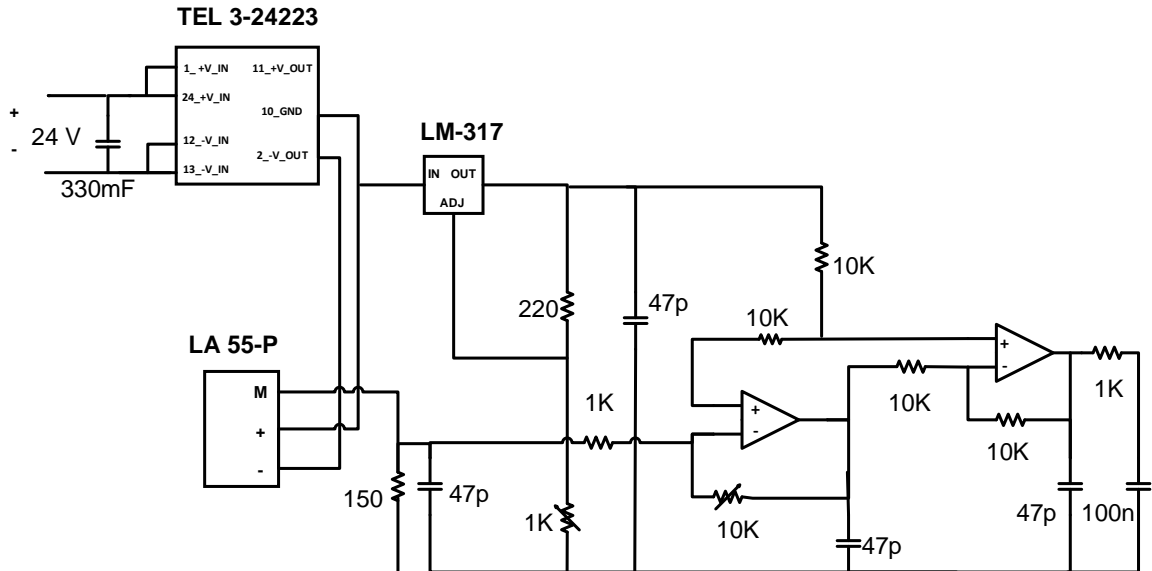
gerilimi ise ± 15 V'tur. Çıkış akımı ± 100 mA'dir. VLA128-24153QR izoleli çıkışa sahip bir dönüştürücüdür. Giriş gerilimi 24 V, çıkış gerilimi ise 15 V ($50 \text{ mA} \times 3$) ve 15 V ($120 \text{ mA} \times 1$)'dir.



Şekil 2.52. (a) TEL-3-2423 (b) VLA128-24153QR DA-DA izoleli gerilim kaynakları

Pozitif gerilim regülatörü olarak LM317T kullanılmıştır. LM317T ayarlanabilir üç terminalli bir regülatördür. 1.5 A'e kadar akım sağlayabilir. Çıkış gerilimi 1.25 V ve 37 V arasında ayarlanabilir.

Şekil 3.25'te bu çalışmada kullanılan akım sensörü devresi gösterilmektedir.



Şekil 3.25. Akım sensörü devresi

3.2.2. Konum Okuyucu

Konum okuyucu (enkoder), bağılı olduğu motor milinin dönmesi ile beraber kare dalgalar üreten bir algılayıcıdır. Bu enkoderler bağılı oldukları milin mevcut konumlarını izler ve geri bildirim sağlarlar. Bu çalışmada ARG rotor konumunu belirlemek için E40H12-5000-6-L-5 kodlu artımlı enkoder kullanılmıştır.



3.26. Konum okuyucu

Şekil 3.26’da yer alan konum okuyucu Autonics E40 Serisinden artımlı dairesel hareketli silindirik bir enkoderdir. Besleme gerilimi 5 V’tur. Oyuk tip bir konum okuyucudur. Bir devirde 5000 darbe üretir. Gövde çapı 40 mm, milin çapı ise 12 mm’dir. Çıkış fazları; A, B, Z, \bar{A} , \bar{B} , \bar{Z} ’dir.

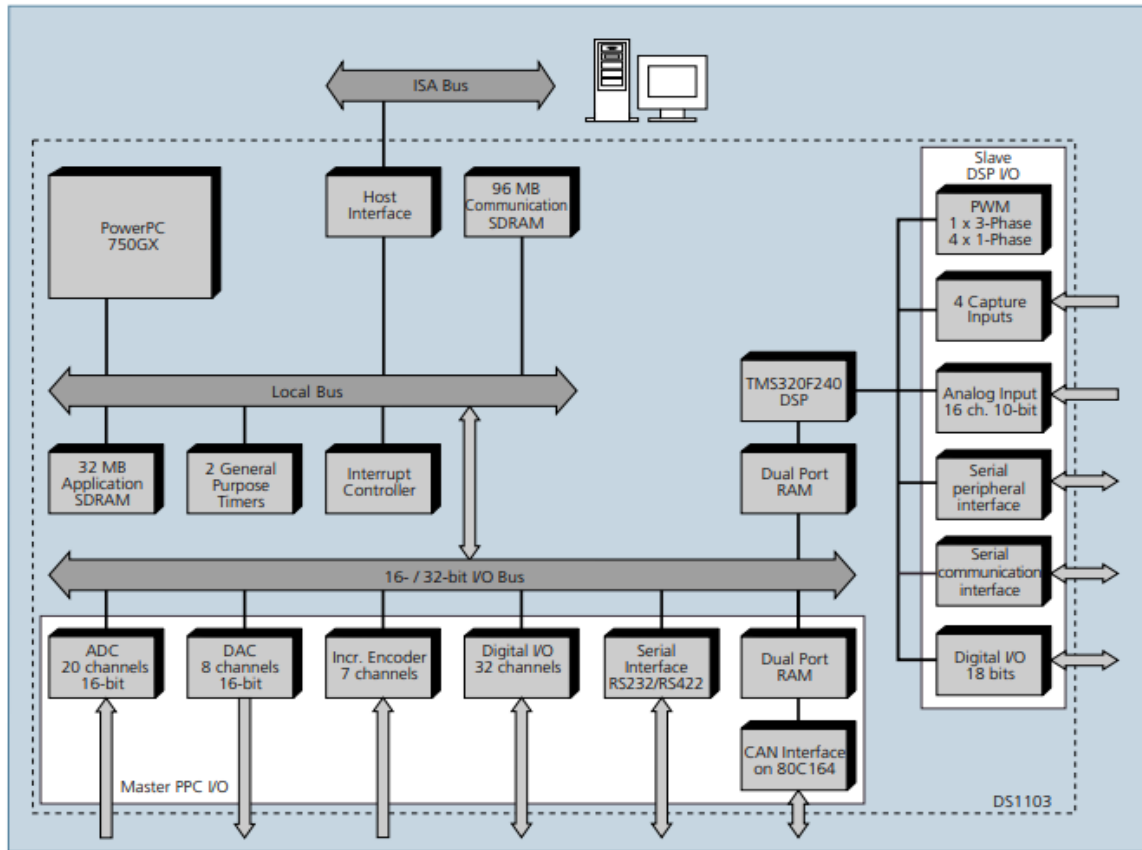
3.2.3. dSPACE DS1103 Denetleyici Kartı

Teknolojiyle birlikte mikroişlemcilerdeki gelişme, karmaşık kontrol algoritmalarının çözümünü kolaylaştırmıştır. DSP’ler, mikroişlemcilerin yüksek hızına ve aynı kart üzerinde birden fazla sayıda bulunan işlemcilere rağmen karışık algoritmaları kolaylıkla çözebilmektedirler. Ayrıca DSP’ler bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının gerçek zamanlı uygulamalarını gerçekleştirebilirler. Bu tez çalışmasında denetleyici olarak Şekil 3.27’de gösterilen DS1103 dSPACE kartı kullanılmıştır.



Şekil 3.27. dSPACE Ace kit kartı

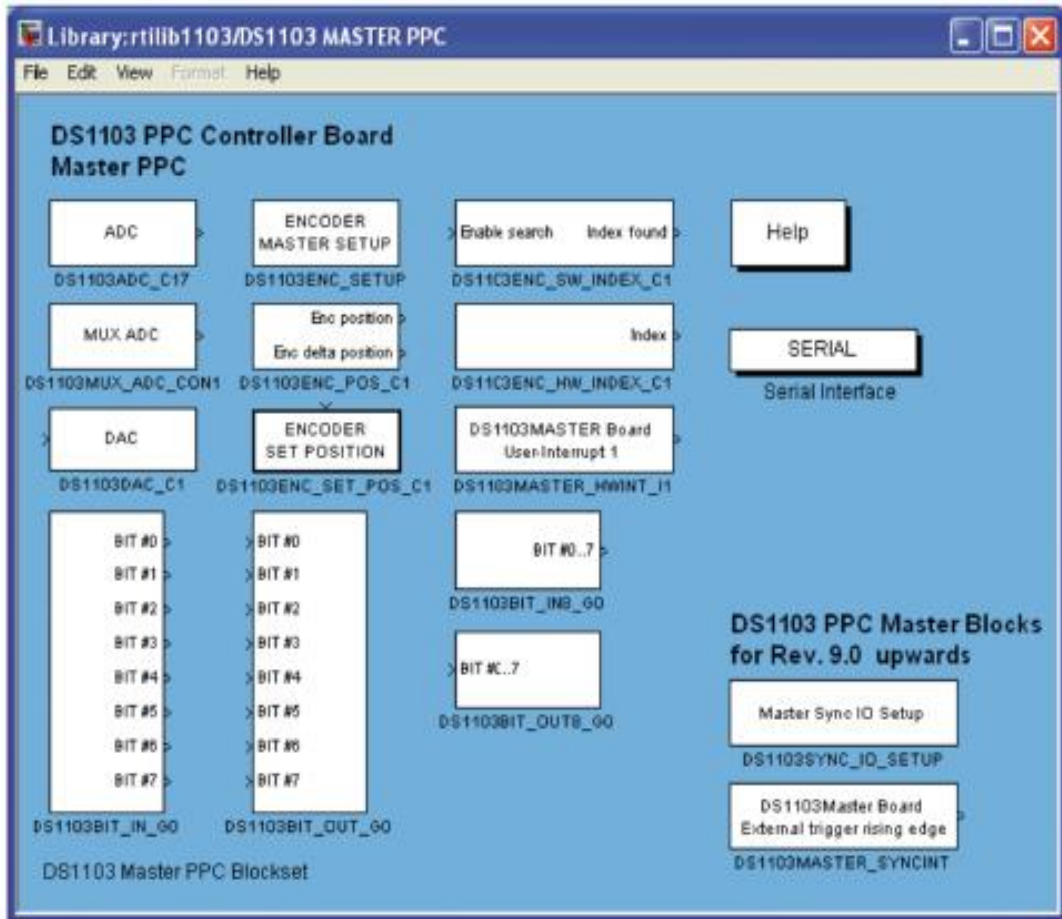
Deneysel aşamada kullanılan dSPACE'in DS1103 Ace Kit kartı, modern hızlı kontrol işlemlerini gerçekleştirmek üzere tasarlanmıştır. DS1103 Ace Kit elektrik motoru sürücülerinin kontrolünde kullanılan gelişmiş bir denetleyicidir. Gerçek zamanlı arayüz aracılığıyla Matlab/Simulink programı kullanılarak programlanabilir. Şekil 3.28'de bu kartın iç mimarisini gösteren blok yer almaktadır.



Şekil 3.28. DS1103 iç mimarisi

dSPACE 1103 Ace Kit üzerinde bulunan sinyal işlemciler TMS320F240 ve PowerPC 750GX'tir. TMS320F240 işlemcisi 20 MHz çalışma frekansına sahiptir. PowerPC 750GX'in işlemci frekansı 1 GHz'tir. 32 MB'lık uygulama SDRAM belleğine sahiptir. Bu modülde 32 bit I/O portu, 16 bit A/D dönüştürücü, konum ve hız algılayıcı girişleri bulunmaktadır.

dSPACE 1103 Ace kit kullanılarak Matlab/Simulink'te istenilen kontrol algoritmaları oluşturulabilir. Bu algoritmaları gerçek zamanlı koda dönüştürmek için "Simulink Real-Time Workshop" yazılımı kullanılır. "Real-Time Interface" yazılımı ile dönüştürülen kodlar DS1103'e yüklenir. "Control Desk Developer" yazılımı kullanılarak DS1103 kartı ile hesaplanan ve ölçülen parametreler grafiksel olarak incelenebilir. Denetleyici kartın gerçek zamanlı kütüphane bloklarını gösteren şema Şekil 3.29'da yer almaktadır.



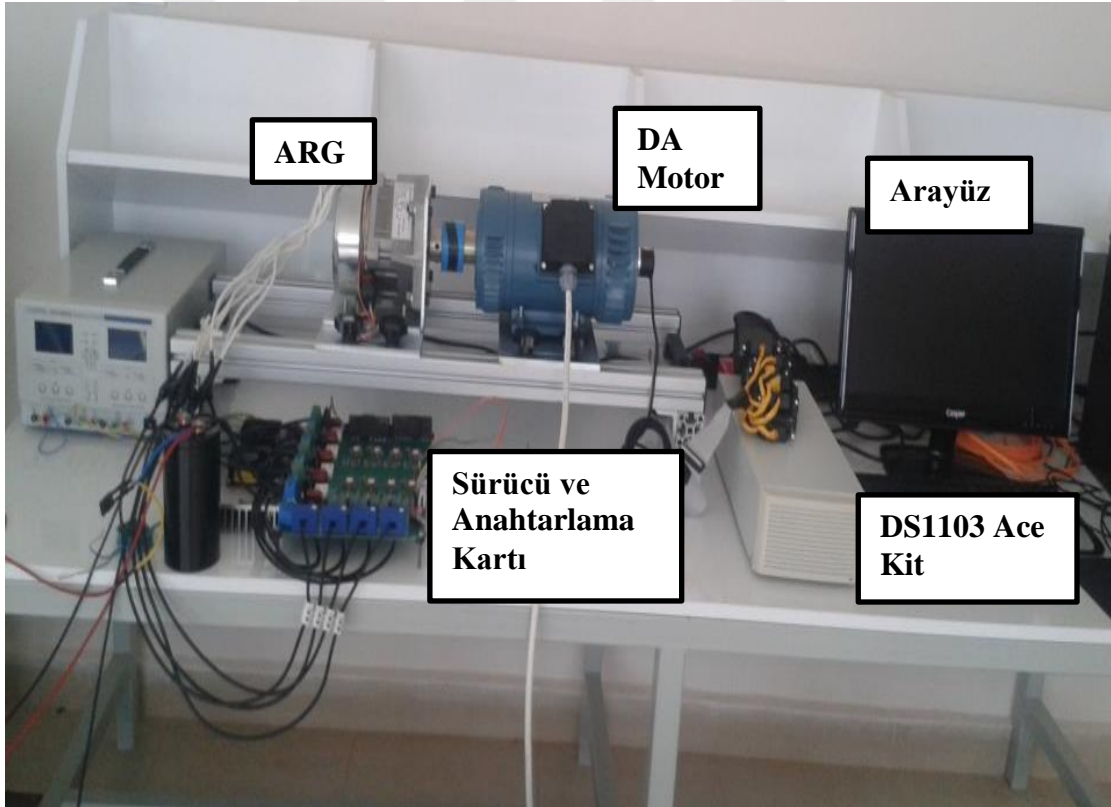
Şekil 3.29. DS1103 Master PPC Real-Time kütüphane blokları

3.2.4. Yazılım

DS1103 Ace kitinin programlanabilmesi için Matlab/Simulink'te bir kontrol algoritması oluşturulup çalıştırılır. Bu derleme işlemi, DS1103'ün kullanacağı kod dosyasını çalışır hale getirir. Bu tez çalışmasında ARG'nin çıkış geriliminin kontrolü için Matlab/Simulink kullanılarak bir yazılım oluşturulmuş ve bu yazılım DS1103 ile bilgisayar arasında haberleşmeyi sağlayan fiber optik bağlantı kablosu sayesinde DS1103'e aktarılmıştır.

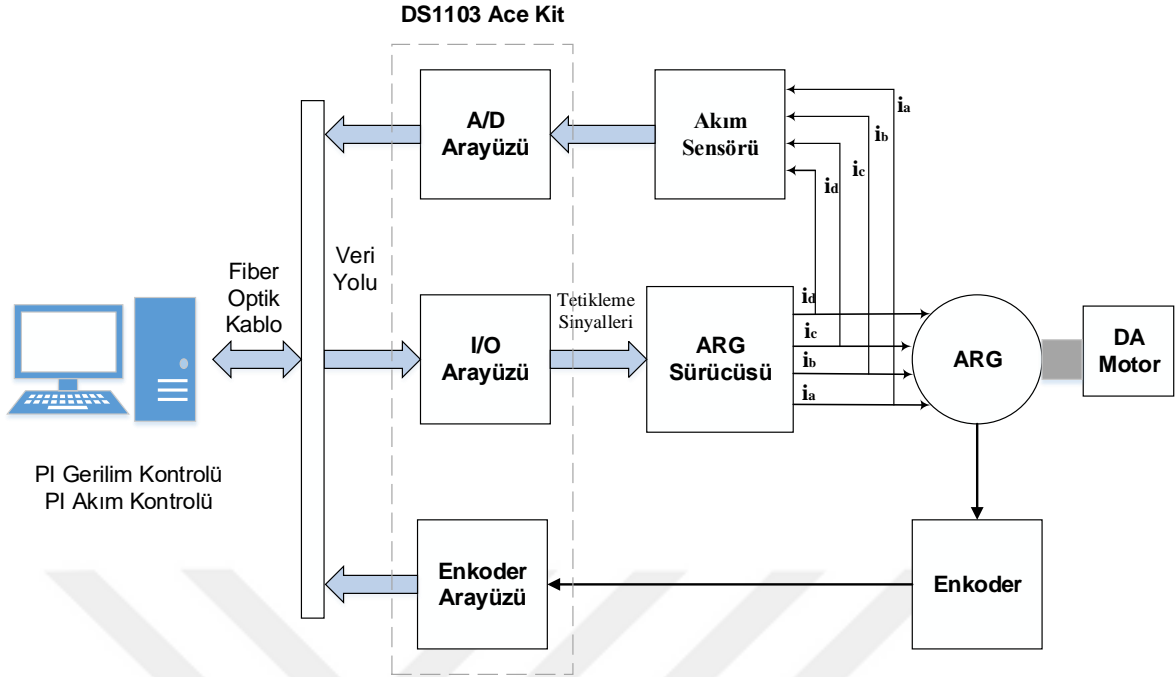
DS1103 Ace Kit, Matlab/Simulink ile kullanılmaya uygundur. DSP'ye ait parametreler Matlab/Simulink programına aktarılarak kullanılabilir. Bu sayede benzetim programı kullanılarak DSP içerisindeki modüller Matlab yazılımına aktarılabilir.

Şekil 3.30'da DSP'nin ve deney setinin gösterildiği görüntü yer almaktadır.



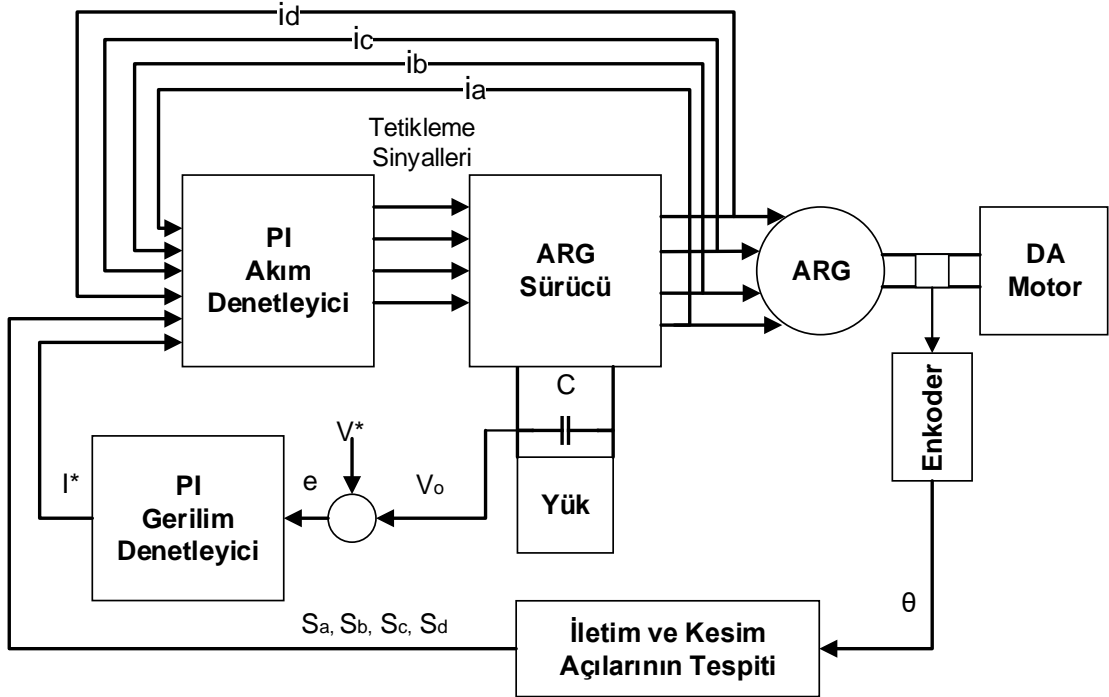
Şekil 3.30. DS1103 Ace kit ve ARG deney şeması genel görünümü

Şekil 3.31'de DS1103 Ace kit kullanılarak ARG'nin çıkış geriliminin kontrolünü gösteren bir blok şema gösterilmektedir.



Şekil 3.31. ARG-DSP bağlantı şeması

Şekil 3.32’de deneysel ve benzetim sonuçların alınmasında kullanılan kontrol modeli gösterilmektedir.



Şekil 3.32. ARG kontrol modeli

3.3. Anahtarlama Relüktans Generatörün Kontrolüne İlişkin Sonuçlar

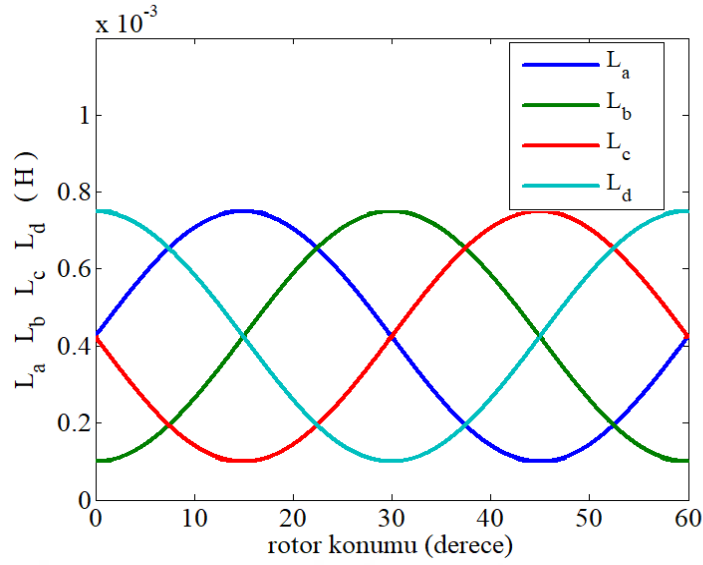
Bu çalışmada $N_s/N_r=8/6$ kutuplu 4 fazlı bir anahtarlama relüktans generatörün benzetim sonuçlarının elde edilmesinde Matlab/Simulink programı kullanılmıştır. Bu çalışmada laboratuvar ortamında kullanılan ARG'ye ait parametreler Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Bu bölümde ARG'nin deneysel ve benzetim sonuçlarına yer verilmiştir.

Bu çalışmada ARG kontrolü yapılırken ARG'nin çıkış gerilimi, istenilen değerde tutulmaya çalışılmıştır. Bu amaçla, deneysel sonuçlar ve benzetim sonuçlarının alınmasında oransal-integral (PI) gerilim denetleyicisi kullanılmıştır. Farklı besleme gerilimleri, çalışma hızları, faz dirençlerinin ve tetikleme açılarının faz akımı üzerindeki etkinliği gözlenmiştir.

Tablo 3.1. $N_s/N_r=8/6$ ARG parametreleri

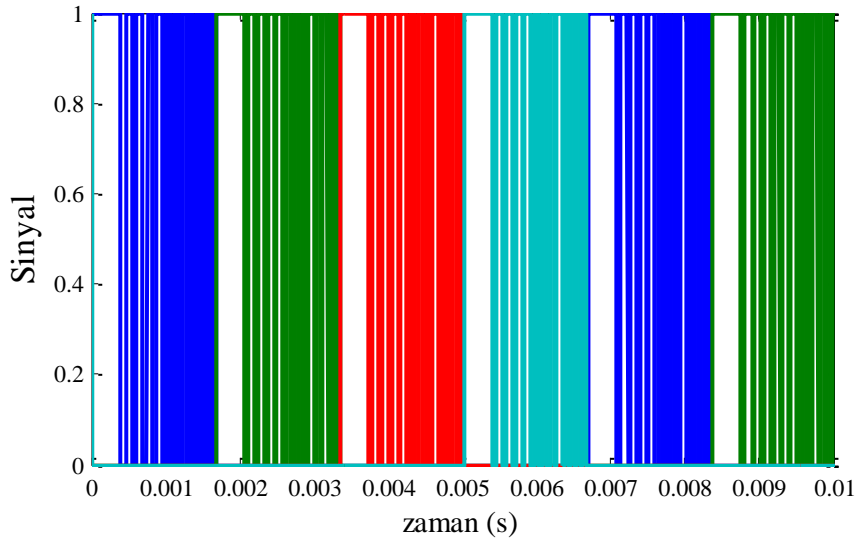
Nominal güç	1.13 kW
Nominal gerilim	48 V
Nominal akım	20 A
Nominal hız	6000 d/dak
Stator bir faz sargısı direnci	0.5 Ω
Eylemsizlik	0.0017 kg.m.m
Sürtünme katsayısı	0.001 N.m.s
Çakışık konum endüktansı	0.75 mH
Çakışık olmayan konum endüktansı	0.1 mH

4 fazlı ARG'nin endüktans eğrilerinin rotor konumuna göre değişim grafiği Şekil 3.33'te gösterilmektedir. $L_{max} = 0.75$ mH, $L_{min} = 0.1$ mH olarak ölçülmüştür.



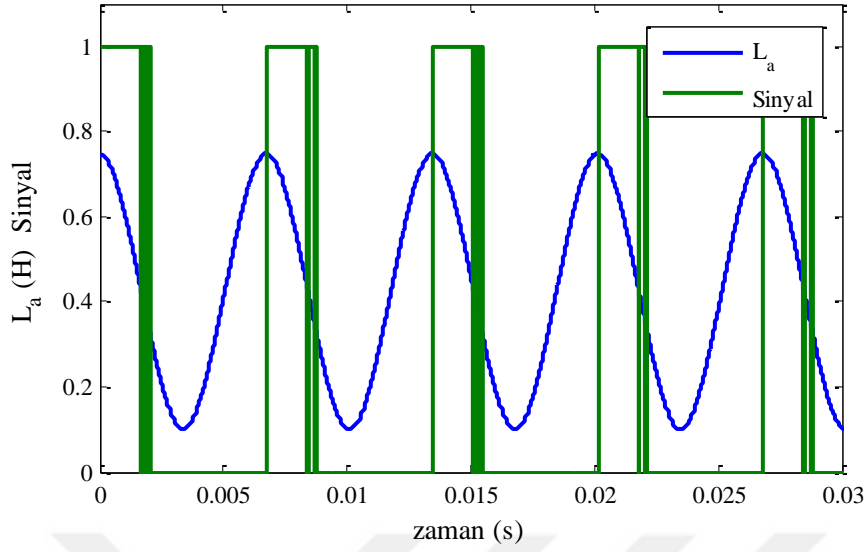
Şekil 3.33. İncelenen ARG'nin rotor konumuna bağlı endüktanslarının değişim grafiği

Anahtarlamalı relüktans makinanın generatör olarak çalıştırılabilmesi için stator sargılarının rotor ve stator kutuplarının birbirinden ayrıldığı anda uyarılması gerekir. Şekil 3.34'te 1500 d/dak'da ARG sürücüsünün anahtarlarının uygun zamanda uyarılmasını sağlayan tetikleme sinyallerinin görüntüsü yer almaktadır.



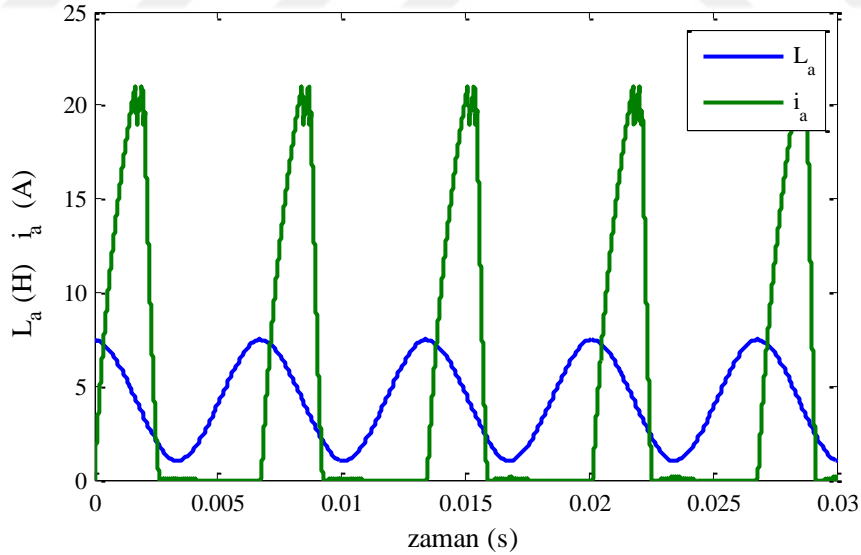
Şekil 3.34. ARG sargılarının uyarılmasını sağlayan tetikleme sinyal grafiği

Şekil 3.35'te A fazının endüktans eğrisine göre tetikleme sinyalinin grafiği yer almaktadır. ARG'de üretilen akım $dL/d\theta < 0$ olduğu yerde oluşur.



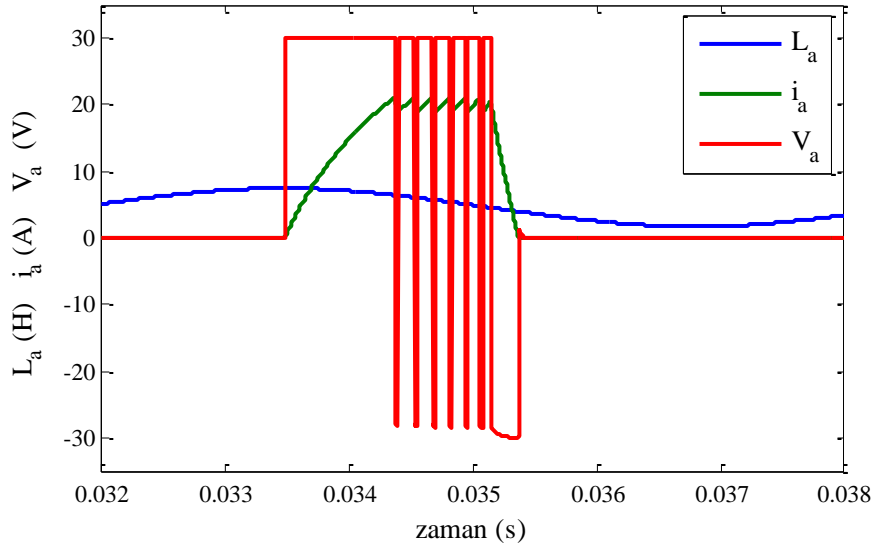
Şekil 3.35. A fazının endüktans eğrisine bağlı olarak oluşan tetikleme sinyalleri

Şekil 3.36'da A fazının endüktans ve faz akımı grafiği gösterilmiştir. ARG'de faz akımı, endüktansın azaldığı bölgede oluşur. Uygun tetikleme açıları belirlenerek faz akımının bu bölgede akması sağlanmıştır.



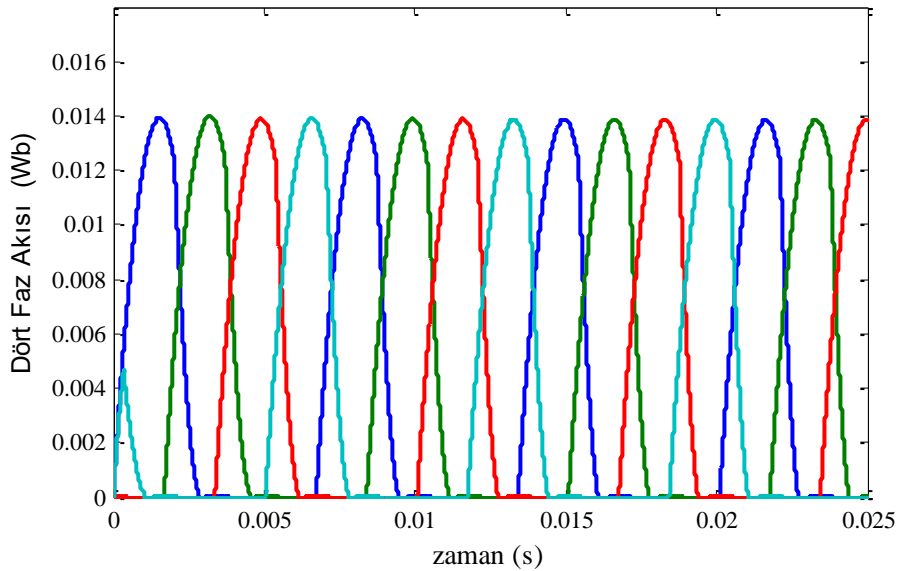
Şekil 3.36. A fazının endüktans ve akım grafiği

Şekil 3.37'de ARG'nin, $\theta_i=15^\circ$ ve $\theta_k=30^\circ$ 'de, 30 V besleme gerilimiyle 1500 d/dak'da gerçekleştirilen benzetim çalışmasına ait A fazının endüktans, akım ve gerilim grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 3.37. A fazının endüktans, akım ve gerilim grafiği

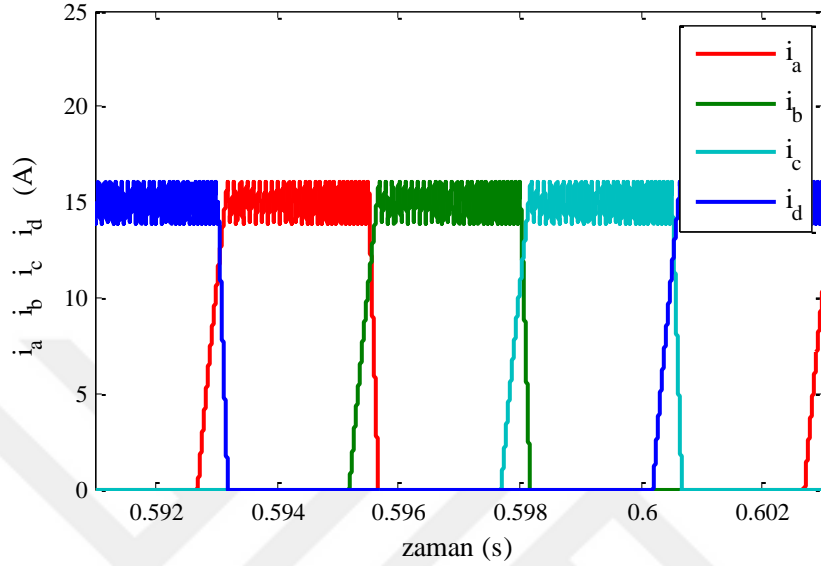
Bu grafikte endüktansın azaldığı yerde faz akımının oluştuğu görülmektedir. Faz gerilimi ise akımın arttığı yerlerde pozitif (+V), akımın azalmaya başladığı yerde negatif (-V) besleme gerilimi değerindedir. Faz geriliminin pozitif olduğu yerde anahtarlamalı relüktans makina, motor olarak çalışırken, faz geriliminin negatif olduğu alanlarda generatör olarak çalışır. Bu aralıkta üretilen akım yedek bir batarya aracılığıyla depolanabilir. ARG'nin akı grafiği Şekil 3.38'de yer almaktadır.



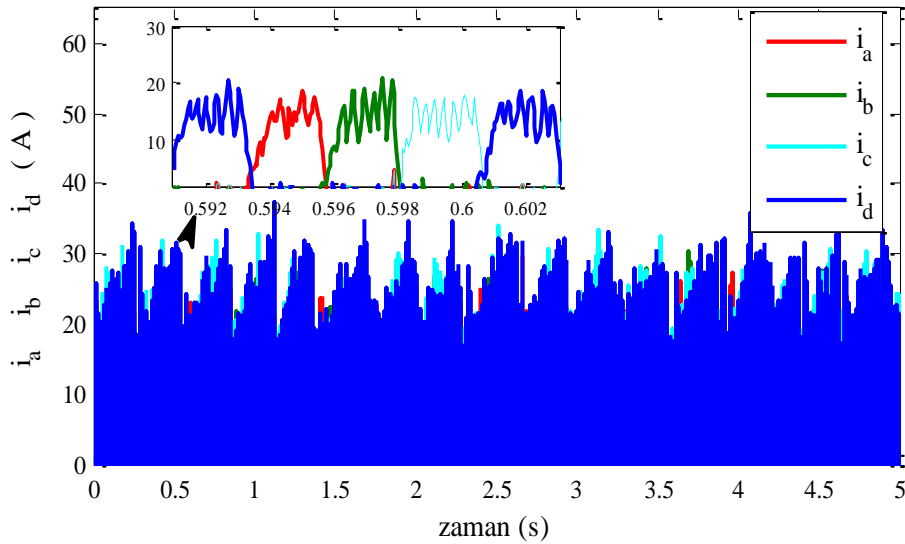
Şekil 3.38. ARG'nin akı değişim grafiği

Bu çalışmada, ARG'nin laboratuvarından ve Matlab/Simulink programından elde edilen sonuçları kullanılarak farklı hız ve gerilim değerlerine göre faz akımlarının değişim

grafikleri gösterilmiştir. 30 V besleme gerilimiyle 1000 d/dak'da çalıştırılan ARG'nin faz akımının Matlab/Simulink benzetim çalışması kullanılarak elde edilen grafiği Şekil 3.39'da, deneysel ölçülen değişim grafiği Şekil 3.40'ta yer almaktadır.



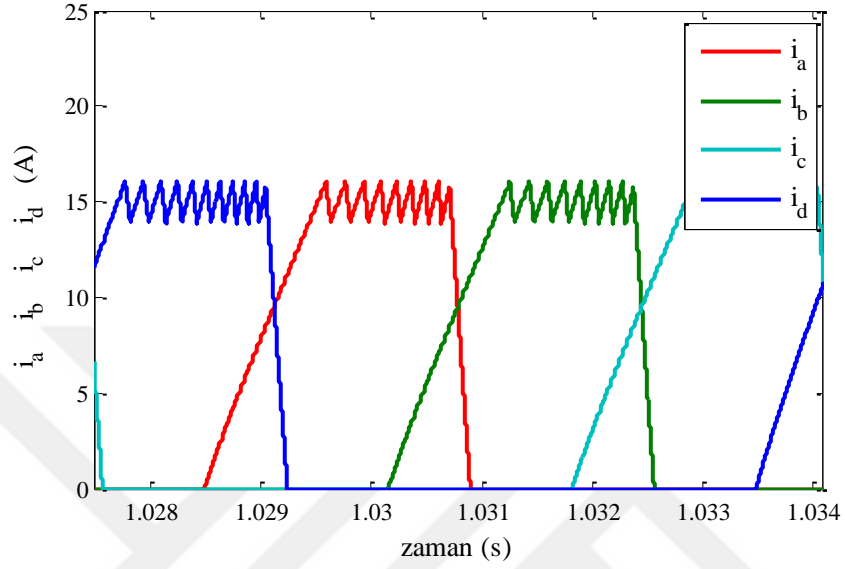
Şekil 3.39. ARG'nin yüksüz $n=1000$ d/dak hızda $V=30$ V'ta benzetim sonucunda elde edilen faz akımlarının değişim grafiği



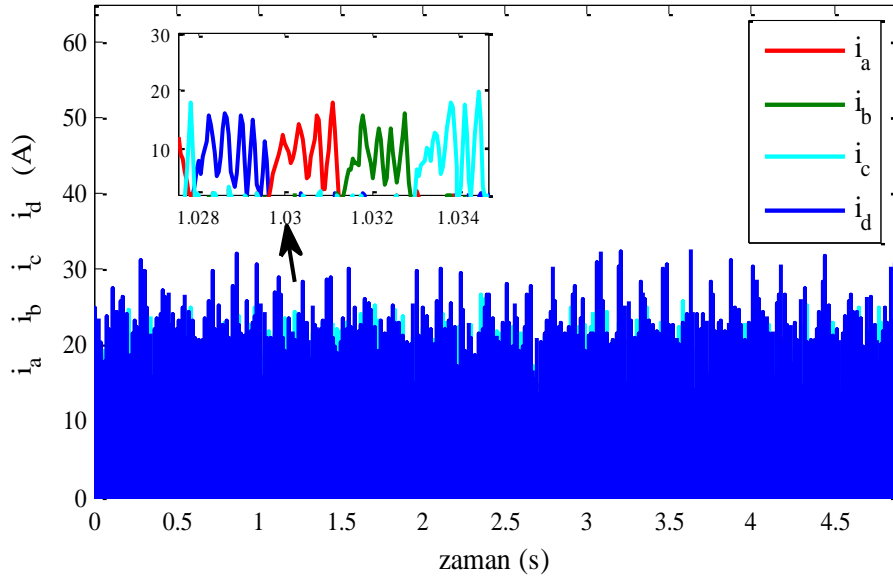
Şekil 3.40. ARG'nin yüksüz $n=1000$ d/dak hızda $V=30$ V'ta deneysel ölçülen faz akımlarının değişim grafiği

Bu bölümde 1500 d/dak'da farklı besleme gerilimlerine bağlı olarak ölçülen faz akımı değişim grafikleri yer almaktadır. Aynı çalışma hızı şartlarında ARG 15 V, 25 V ve

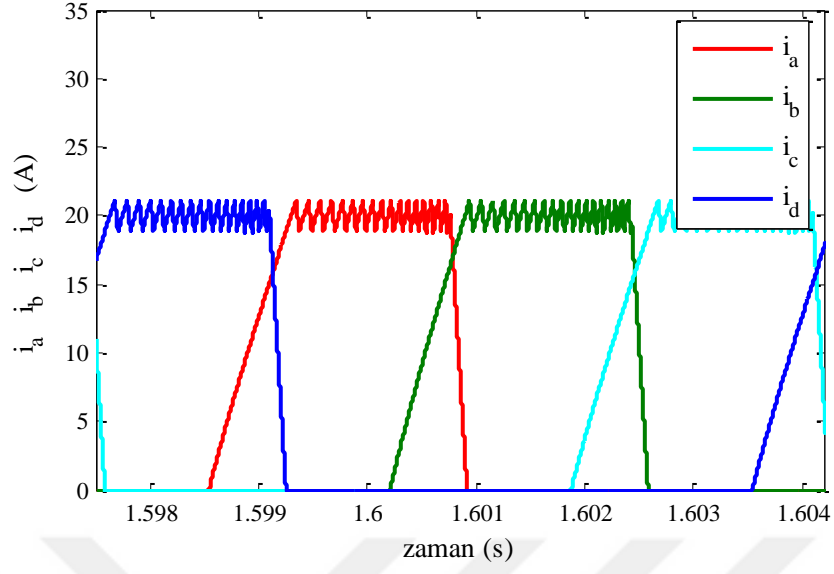
30 V gerilim ile beslenmiştir. Benzetim neticesinde elde edilen faz akımı grafikleri Şekil 3.41, Şekil 3.43 ve Şekil 3.45'te, deneysel ölçülen faz akımı grafikleri ise Şekil 3.42, Şekil 3.44 ve Şekil 3.46'da yer almaktadır.



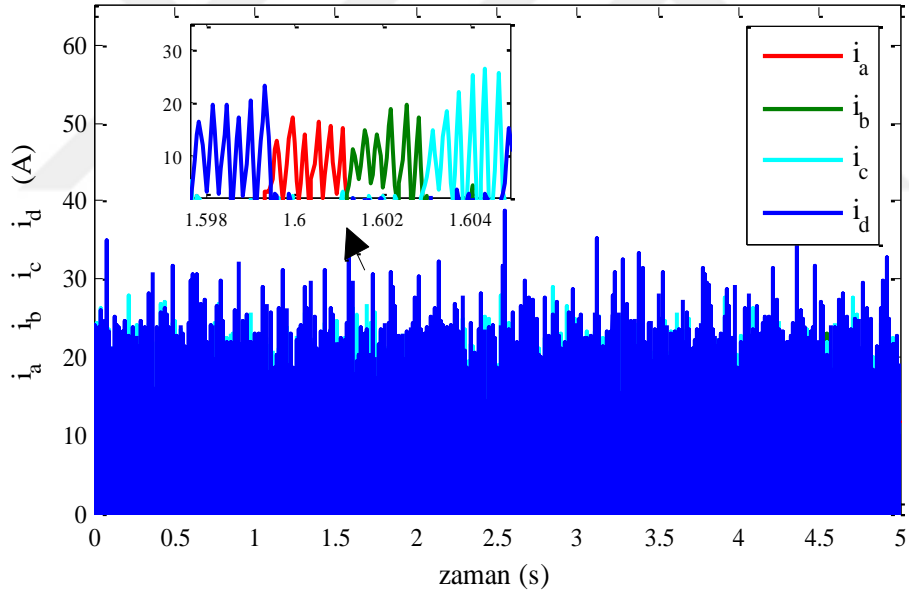
Şekil 3.41. ARG'nin $V = 15$ V'ta benzetim sonucunda elde edilen faz akımlarının değişim grafiği



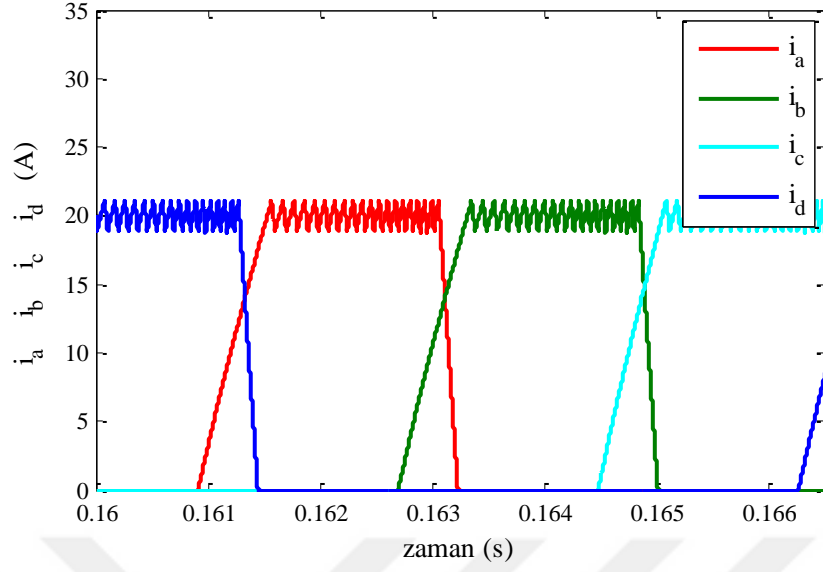
Şekil 3.42. ARG'nin $V = 15$ V'ta deneysel ölçülen faz akımlarının değişim grafiği



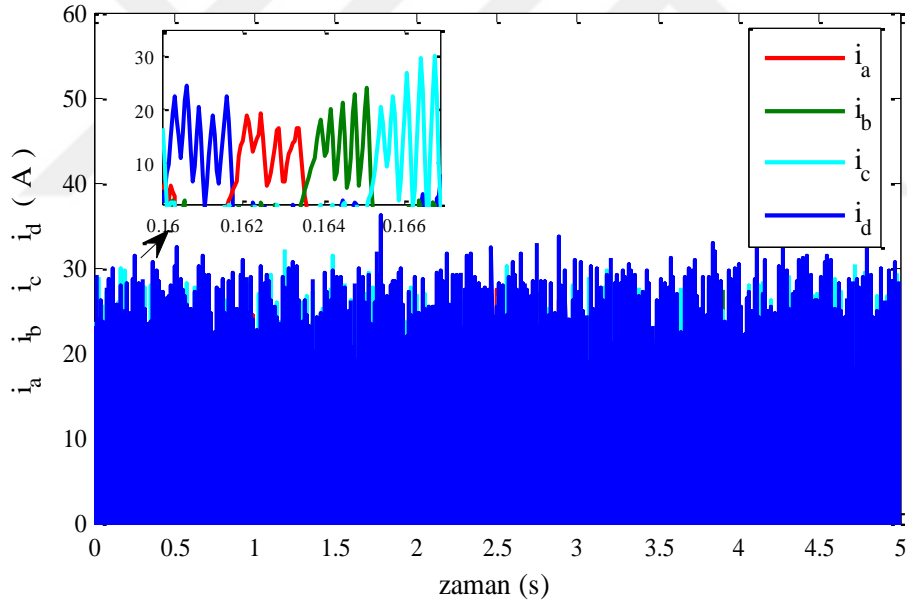
Şekil 3.43. ARG'nin $V = 25$ V'ta benzetim sonucunda elde edilen faz akımlarının değişim grafiği



Şekil 3.44. ARG'nin $V = 25$ V'ta deneysel ölçülen faz akımlarının değişim grafiği

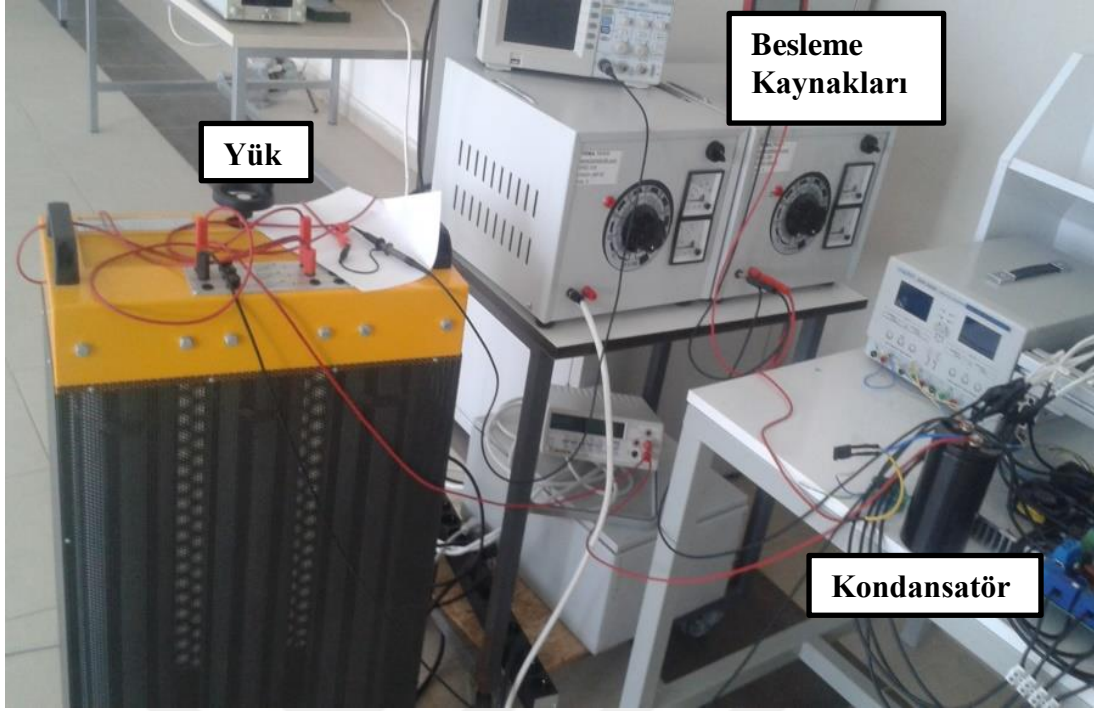


Şekil 3.45. ARG'nin $V=30$ V'ta benzetim sonucunda elde edilen faz akımlarının değişim grafiği



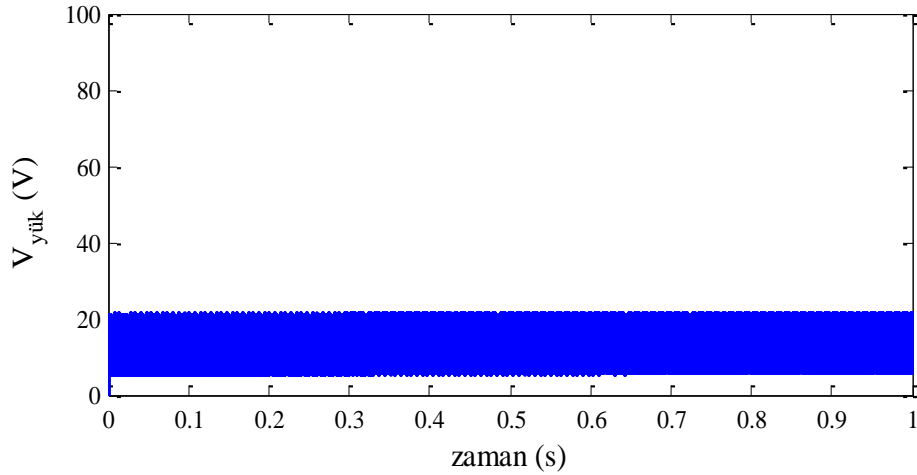
Şekil 3.46. ARG'nin $V=30$ V'ta deneysel ölçülen faz akımlarının değişim grafiği

Bu çalışmada ARG sürücüsüne 6.5Ω 'luk bir yük direnci bağlanmıştır. Gerilimdeki dalgalanmayı filtre etmek amacıyla generatör çıkışına $2200 \mu\text{F}$ 'lık bir kondansatör bağlanmıştır. Şekil 3.47'de ARG'ye bağlanan yük gösterilmektedir.

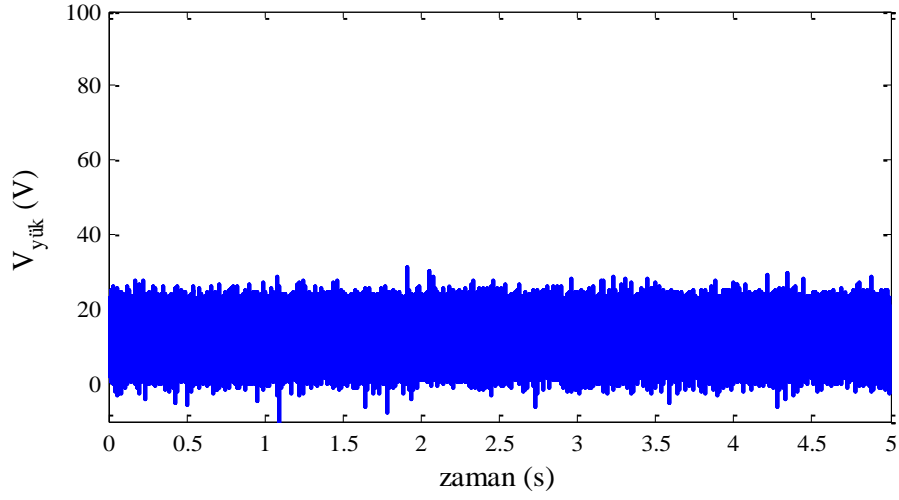


Şekil 3.47. ARG, yük ve besleme kaynakları

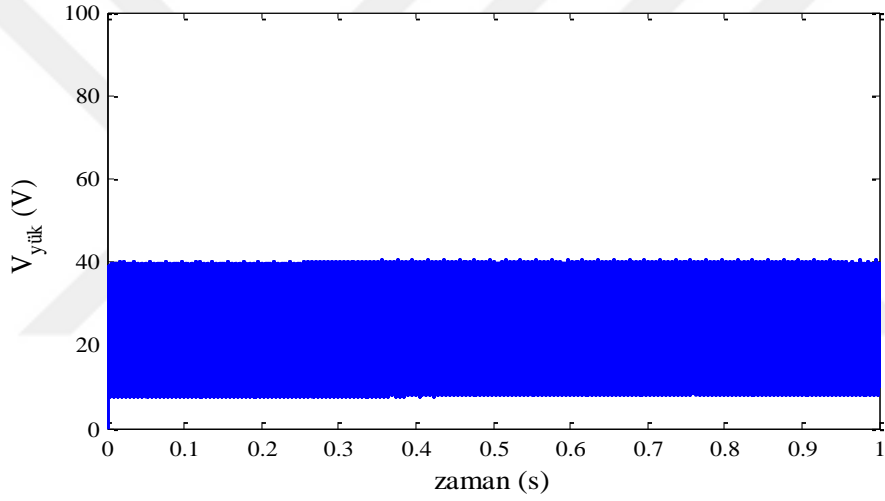
Farklı besleme gerilimleri kullanılarak ARG'nin çıkış gerilimi incelenmiştir. 1500 d/dak'da 15 V, 25 V ve 30 V besleme gerilimlerine bağlı olarak oluşan çıkış gerilimlerinin benzetim sonucu elde edilen grafikleri Şekil 3.48, Şekil 3.50 ve Şekil 3.52'de, deneysel grafikleri ise Şekil 3.49, Şekil 3.51 ve Şekil 3.53'te yer almaktadır.



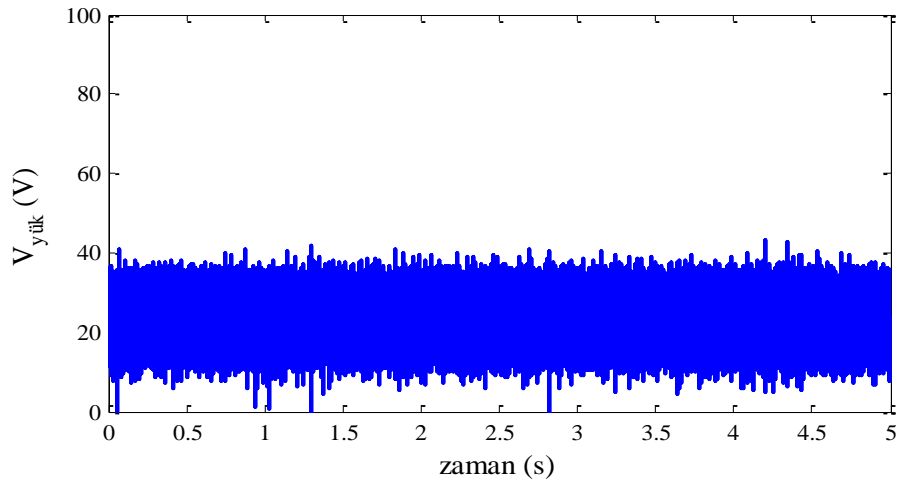
Şekil 3.48. ARG'nin $V = 15$ V'ta benzetim sonucunda elde edilen çıkış gerilimi grafiği



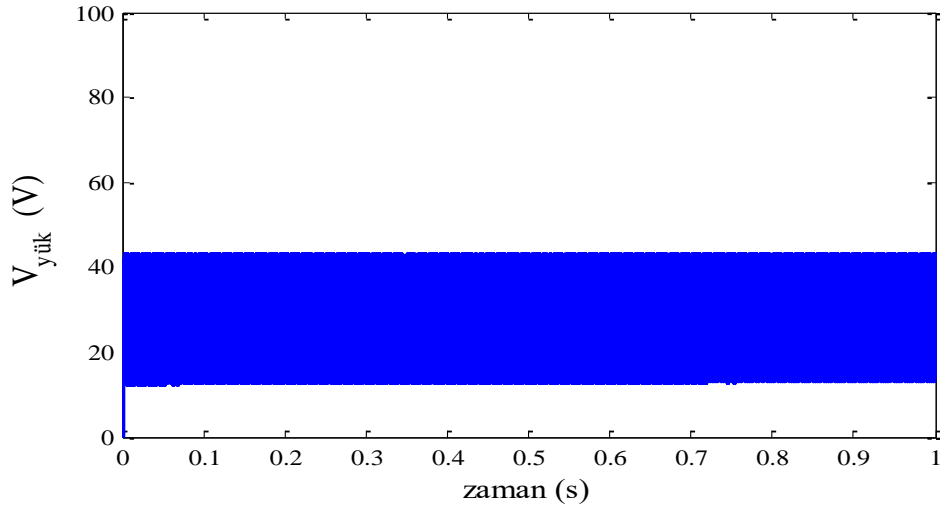
Şekil 3.49. ARG'nin $V = 15$ V'ta deneysel ölçülen çıkış gerilimi grafiği



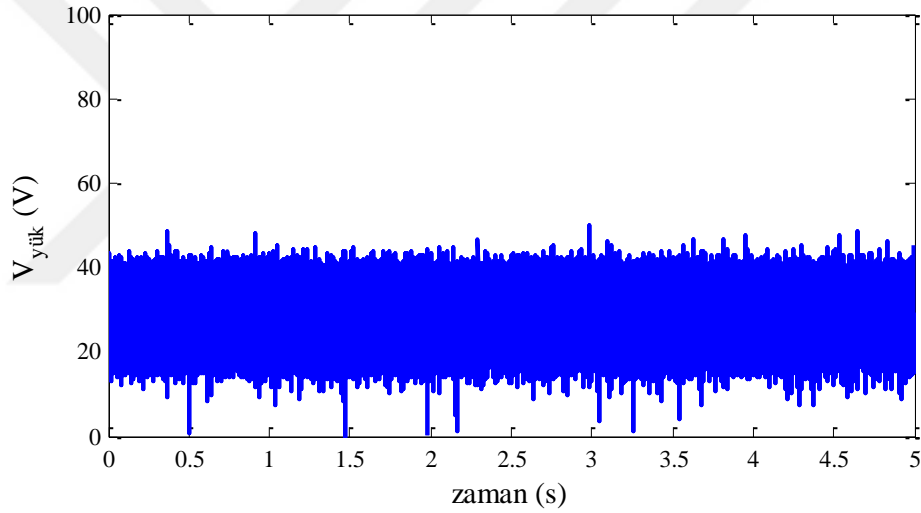
Şekil 3.50. ARG'nin $V = 25$ V'ta benzetim sonucunda elde edilen çıkış gerilimi grafiği



Şekil 3.51. ARG'nin $V = 25$ V'ta deneysel ölçülen çıkış gerilimi grafiği



Şekil 3.52. ARG'nin $V = 30$ V'ta benzetim sonucunda elde edilen çıkış gerilimi grafiği



Şekil 3.53. ARG'nin $V = 30$ V'ta deneysel ölçülen çıkış gerilimi grafiği

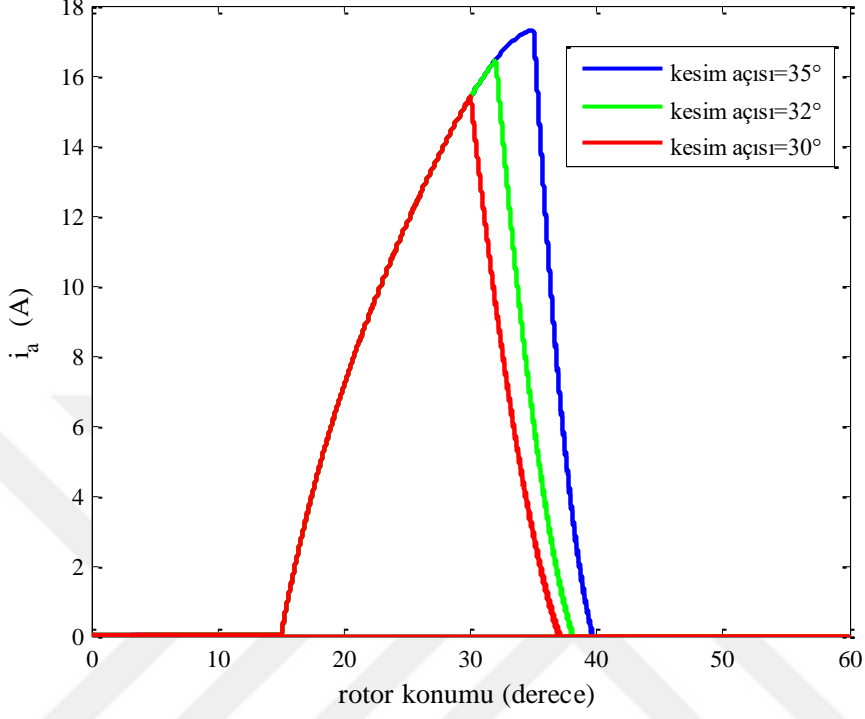
3.3.1. Faz Akımını Etkileyen ARG Parametreleri

Bu bölümde ARG'nin faz akımlarını etkileyen parametreler incelenmiştir. Bu parametreler besleme gerilimi, faz direnci, tetikleme açıları ve hız olarak belirlenmiştir.

3.3.1.1. Tetikleme Açısının Etkisi

Bu çalışma için gerçekleştirilen benzetimde, farklı iletim ve kesim açıları kullanılarak faz akımının değişimi gözlenmiştir. Şekil 3.54'te 1500 d/dak'da 15 V besleme

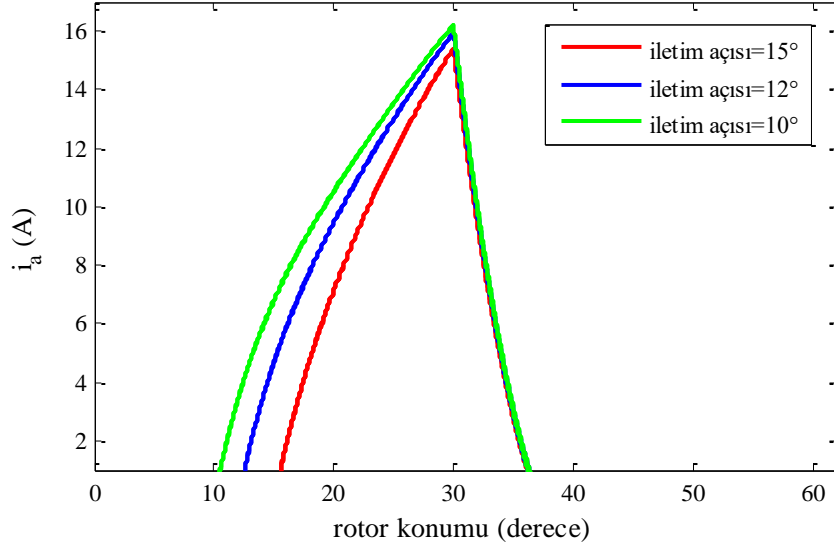
gerilimiyle sabit bir iletim açısına ($\theta_i=15^\circ$) karşılık farklı kesim açılarının faz akımı üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 3.54. A fazının farklı kesim açılara göre akım grafiği

Şekil 3.54'e göre kesim açısının faz akımı üzerinde büyük bir öneme sahip olduğu görülmüştür. Stator ve rotor kutuplarının çakışık konumdan uzaklaştıkları konumdan sonra seçilecek uygun bir kesim açısı büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada çakışık konumdan daha uzakta seçilecek bir kesim açısının faz akımını daha yüksek bir değere ulaştıracağı görülmüştür. Seçilecek kesim açısı, makinanın pozitif moment üretmeye başladığı rotor konumundan önce seçilmelidir. Aksi takdirde makina motor olarak çalışmaya başlayacaktır.

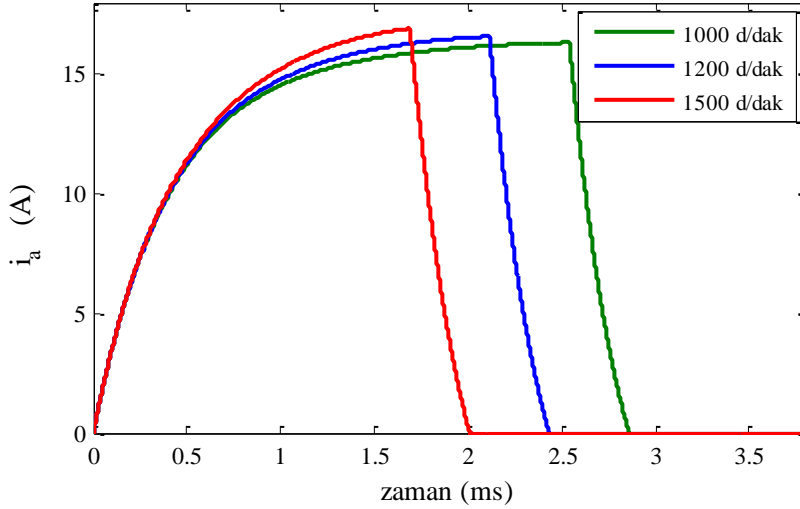
Şekil 3.55'te aynı şartlar altında kesim açısı ($\theta_k=30^\circ$) sabit tutulmuş ve iletim açısı değiştirilmiştir. Bu sayede iletim açısının faz akımı üzerindeki etkisi gözlemlenmeye çalışılmıştır. Şekil 3.55'e göre iletim açısının belirlenmesi de faz akımı üzerinde öneme sahiptir. Ancak Şekil 3.54 ve Şekil 3.55'te görüleceği üzere iletim açısının farklı değerleri, kesim açısının farklı değerleri kadar akım üzerinde çok büyük değişikliklere neden olmamaktadır. Yapılan incelemeler neticesinde iletim açısının, kutuplarının çakışık konuma henüz ulaşmadığı bir rotor konumundan seçilmesi gerektiği görülmüştür. Bu durum faz akımını arttırıcı yönde etki eder.



Şekil 3.55. A fazının farklı iletim açılarına göre akım grafiği

3.3.1.2. Hızın Etkisi

ARG'nin stator sargılarını besleyen sabit bir referans akımıyla birlikte farklı makina hızlarına göre faz akımının değişimini gösteren benzetim grafiği Şekil 3.56'da yer almaktadır.



Şekil 3.56. A fazının farklı hızlara göre akım grafiği

Bu çalışma, makinanın 1000, 1200 ve 1500 d/dak'lık hızları için 15 V'ta gerçekleştirilmiştir. İletim açısı 15° ve kesim açısı 30° olarak belirlenmiştir. Hız, zıt emk

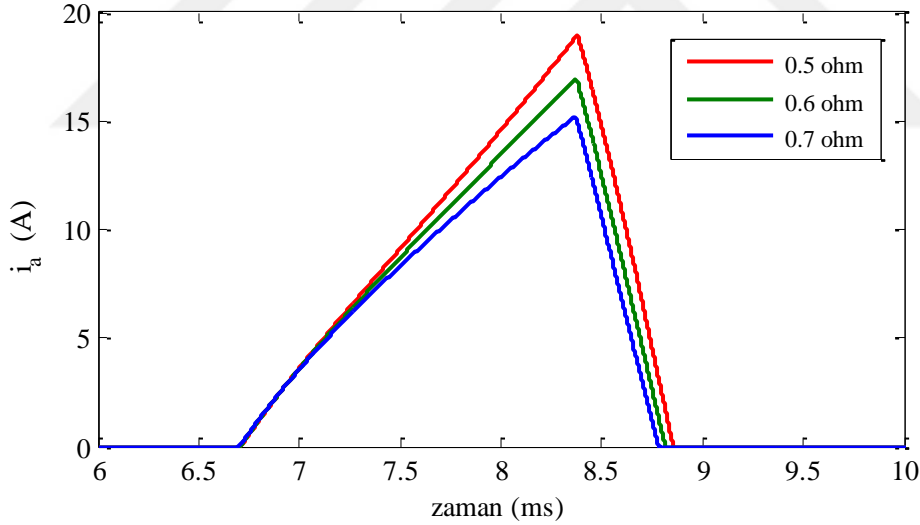
(e) üzerinde bir etkiye sahiptir. Bağntı (3.6)'da hız ve zıt emk arasındaki ilişki gösterilmektedir.

$$e = \omega \cdot i \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (3.6)$$

Bu bağntıya göre hızdaki artış zıt emk'yı artırır. Düşük hızlarda e, faz geriliminden (V) küçük olur. Orta ve yüksek hızlarda e faz geriliminden büyük olur. e'nin V'den büyük olduğu uygulamalarda faz akımı artık V'ye bağlı değildir.

3.3.1.3. Faz Direncinin Etkisi

Bu bölümde, stator sargılarının faz direncinin akım üzerine olan etkisi gözlenmeye çalışılmıştır. 0.5, 0.6 ve 0.7 Ω faz sargı dirençlerine göre üretilen faz akımlarının benzetimden elde edilen grafiği 3.57'de yer almaktadır.



Şekil 3.57. A fazının farklı stator direnci değerlerine göre akım grafiği

Bu çalışma $\theta_i=15^\circ$ ve $\theta_k=30^\circ$ için 30 V besleme gerilimiyle 1500 d/dak'da yapılmıştır. Şekil 3.57'ye göre faz direnci arttıkça faz akımı azalır. Faz direncinin büyük olması generatörde bakır kayıplarını artırır. Tek faz için, I etkin akım değeri (A) ve R faz direnci (Ω) olmak üzere bakır kaybını veren bağntı (3.7)'dedir.

$$P_{bakır} = I^2 \cdot R \quad (3.7)$$

Bu sebeple ARG'ler oluşturulurken faz direnci mümkün olduğunda küçük değer olarak ayarlanmaya çalışılır. Bu çalışmada kullanılan ARG'nin bir fazının stator sargısının direnci 0.5Ω 'dur.

3.3.1.4. Besleme Geriliminin Etkisi

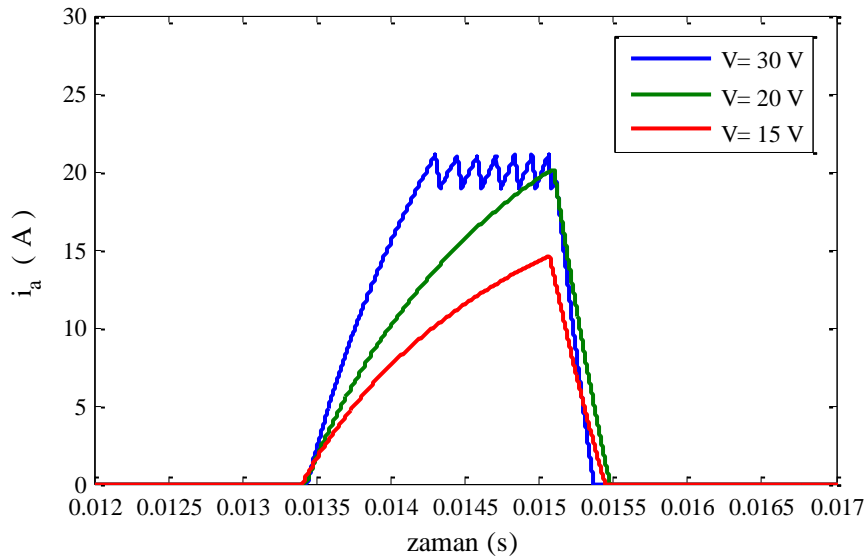
ARG'nin tek faz için indüklenen gerilim bağıntısı (3.8)'dedir.

$$\pm V = Ri + L \frac{di}{dt} + \omega i \frac{dL}{d\theta} \quad (3.8)$$

Bu bağıntıya göre faz akımını veren bağıntı;

$$i = \frac{\pm V}{L + \left(R + \omega \left(\pm \frac{dL}{d\theta} \right) t \right)} \quad (3.9)$$

ile ifade edilir. Bu bağıntıya göre besleme gerilimindeki artış, zıt emk'nın besleme geriliminden küçük olduğu uygulamalarda faz akımını arttırıcı yönde etki eder.



Şekil 3.58. A fazının farklı besleme gerilimlerine göre akım grafiği

Şekil 3.58'de ARG'yi besleyen farklı gerilim değerlerine göre faz akımı değişiminin benzetimden elde edilen grafiği yer almaktadır. Bu çalışma, 1000 d/dak'da $\theta_i=15^\circ$ ve $\theta_k=30^\circ$ tetikleme açılarıyla yapılmıştır. Besleme gerilimi azaldıkça faz akımı da azalmaktadır.



4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada dört fazlı 8/6 kutuplu bir anahtarlama relüktans generatörün kontrolü yapılmıştır. Faz akımı, akısı, gerilimi, hızı, endüktans eğrileri, ARG çıkış gerilimi gözlenmiştir.

Anahtarlama relüktans generatörün kontrolünün benzetim şeması MATLAB/Simulink'te oluşturulmuştur. Farklı besleme gerilimlerine bağlı olarak ARG'nin faz akımları ve ARG çıkış gerilimlerinin benzetim sonuçları alınmıştır. Kontrol sistemi tasarlanırken ARG'nin çıkış geriliminin istenilen değerde tutulması amaçlanmıştır. Bu amaçla bir oransal-integral denetleyici kullanılmıştır. Bu denetleyiciden elde edilen referans akımına göre faz akımları kontrol edilmiştir.

Deneysel aşamada bir ARG sürücüsü kullanılmış ve kontrol işlemini gerçekleştirmek için DS1103 Ace kit ile ARG'nin çıkış gerilimi denetimi yapılmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçlarının ve benzetim çalışmasının sonuçlarının birbiriyle örtüştüğü görülmüştür.

Deneysel çalışmalarda DS1103 Ace kiti kullanılmıştır. Programlama işlemi Matlab kullanılarak gerçekleştirilmiştir. DS1103 Ace kit içerdiği gerçek zamanlı kütüphane blokları aracılığıyla MATLAB/Simulinkte kullanımı mümkündür. Bilgisayarda gerçekleştirilen kontrol işlemleri sonucunda faz akımlarının endüktans eğrisinin azalmaya başladığı yerde oluşması ve anahtarlama relüktans makinanın generatör olarak çalışması sağlanmıştır. Buradan alınan sinyaller dSPACE Control Desk Developer aracılığıyla grafiksel olarak gözlenmiştir.

Çalışma sonucunda benzetim ve deneysel sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Farklı parametrelere bağlı olarak ARG'nin faz akımında meydana gelen değişimler gözlenmiştir. Tetikleme açılarının faz akımını etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğu görülmüştür. İletim açısının rotor kutuplarının çakışık konumundan önce, kesim açısının ise rotor kutuplarının birbirinden ayrılmaya başladığı konumdan sonra ve pozitif bir moment oluşmadan önce seçilmesi gerektiği görülmüştür. Bu şartlarda makinanın generatör modunda çalışması sağlanır. Stator sargılarının direncinin en küçük değerde olması faz akımını artırıcı yönde etki eder ve sargılarda meydana gelen bakır kayıplarını en düşük seviyeye getirir. Hızın zıt emk'yı etkilediği gözlenmiştir. Hızdaki artışın, indüklenen gerilimin zıt emk'dan büyük olduğu yerlerde faz akımını arttırdığı ve

tezde ARG'yi çalıştırmak için kullanılan sabit çalışma hızlarının faz akımı üzerinde büyük bir değişim meydana getirmediği görülmüştür. Besleme geriliminde meydana gelen artışın faz akımını arttırıcı yönde etki ettiği gözlemlenmiştir.

Sonradan yapılacak çalışmalar için öneriler şu şekildedir:

1. Bu çalışmada ARG, sabit iletim ve kesim açıları ile kontrol edilmiştir. Sonradan yapılacak çalışmalarda maksimum güç çıkışı için iletim veya kesim açısını belirleyen bir kontrol sistemi tasarlanabilir.

2. Bu çalışmada ARG'nin çıkış gerilimi ve faz akımlarının kontrolü için oransal-integral denetleyici kullanılmıştır. Bu denetleyici parametre değişimi ve bozulardan etkilenir. Bu değişimlerden etkilenmeyen yapay sinir ağları ve bulanık denetleyiciler gibi bazı denetleyiciler ile ARG'nin kontrolü sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Afjei, E., Asgar, M.,** 2012. Automatic Phase Advancing in a Stand-Alone Switched Reluctance Generator at Different High Speeds for Desired Output Voltage. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, 8(2):146-153.
- Al-Bahadly, I.,** 2011. Switched Reluctance Generator for Variable Speed Wind Energy Applications. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2:27-36.
- Al-Bahadly, I.,** 2018. An Integrated Wind and Hydro Power System Using Switched Reluctance Generator. *Journal of Power and Energy Engineering*, 6(02):1-19.
- Alnajjar, M., Gerling, D.,** 2016. Synchronous Reluctance Generator with FPGA Control of Three-Level Neutral-Point-Clamped Converter for Wind Power Application. *In Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), IEEE International*, September 2016, pp. 498-504.
- Arifin, A., Al-Bahadly, I. H., Mukhopadhyay, S. C.,** 2012. Simulation of Switched Reluctance Generator in Low and Medium Speed Operations for Wind Energy Application. *ISRN Renewable Energy*, Article ID 327296, 1-13.
- Arifin, A., Al-Bahadly, I., Mukhopadhyay, S. C.,** 2012. State of the Art of Switched Reluctance Generator. *Energy and Power Engineering*, pp. 447-458.
- Arifin, A.,** 2013. Switched Reluctance Generator Drive in the Low and Medium Speed Operation: Modelling and Analysis. *Phd Thesis*, Massey University, Manawatu, New Zealand, 112s.
- Barros, T. A., Neto, P. J., Filho, P. S. N., Moreira, A. B., Filho, E. R.,** 2017. An Approach for Switched Reluctance Generator in Wind Generation System With Wide Range of Operation Speed. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(11):8277-8292.
- Bartolo, J. B., Degano, M., Espina, J., Gerada, C.,** 2017. Design and Initial Testing of a High-Speed 45-kW Switched Reluctance Drive for Aerospace Application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(2):988-997.
- Benalla, H., Messai, F, Makhlof, M., Messai, A., Nabti, K.,** 2013. Nonlinear Modeling and Simulation of a Four-phase Switched Reluctance Generator for Wind Energy Applications. *Journal of Clean Energy Technologies*, 1(2):127-131.
- Bentounsi, A., Benamimour, T., Djeghloud, H.,** 2017. Study of Wind Turbine Based Variable Reluctance Generator Using Hybrid FEMM-MATLAB. *Modeling. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 7(1):31-41.

- Bouchoucha, K., Yahia, H., and Mansouri, M. N.,** 2014. Particle Swarm Optimization of Switched Reluctance Generator based Distributed Wind Generation. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, 1(4):107-113.
- Bowers, B.,** 2001. Sir Charles Wheatstone FRS: 1802-1875. IEE History of Technology Series 29, London, 86s.
- Calasan, M. P., Vujicic, V. P.,** 2017. SRG Converter Topologies for Continuous Conduction Operation: A Comparative Evaluation. *IET Electric Power Applications*, 11(6):1032-1042.
- Darie, E., and Darie, E.,** 2004. The Control of Switched Reluctance Drives. *Rev. Roum. Sci. Techn.–Électrotechn. et Énerg.* 49(4):1-8.
- Divya, G., Kalpathi, R.,** 2014. Regenerative Braking Using Switched Reluctance Generator. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 5(4):136-141.
- Dranca, M. A., Zaharia, M. V., Radulescu, M. M.,** 2017. Modelling and Transient Analysis of a Three-Phase Low-Speed Switched Reluctance Micro-Wind Generator. *In Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 10th International Symposium*, March, Bucharest, Romania, pp. 196-200.
- Durak, B., Yeksan, A. Y., Ergene, L. T.,** 2014. Anahtarlamalı Relüktans Motorlarda Sürücü Devrelerinin Karşılaştırılması. *Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Kasım, s. 282-287, 27-29.
- Emadi, A., Patel, Y. P., Fahimi, B.,** 2007. Thyristor-Based Resonant Current Controlled Switched Reluctance Generator for Distributed Generation. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2(1):68-80.
- Fang, H., Tao, Y., Zhang, S., Xiao, Z.,** 2018. Design and Analysis of Bidirectional Driven Float-Type Wave Power Generation System. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* , 6(1):50–60.
- Fernandes, N., Bindu, R., George, S.,** 2016. Control of Switched Reluctance Generator in Wind Energy System, *Green Engineering and Technologies (IC-GET), Online International Conference on. IEEE*, p. 1-7.
- Feyrouz, M.,** 2014. Contrôle Optimal D'une Chaîne de Conversion D'énergie Utilisant des Générateurs Innovants Associés à des Convertisseurs Statiques : Application à L'éolien. *Doctorat These*, Université Constantine Faculté des Sciences de la Technologie Département D'électrotechnique. 3s.
- Fleury, A., Andrade, D. A., Silveira, A. W. F. V., Ribeiro, P. H. F., Melo, F. S. L. F., Migliorini, L. A. G., and Oliveira, J. I.,** 2010. Wind Powered Switched Reluctance Generator for Rural Properties and Small Communities.

In International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 1(8):1392-1397.

- Hasanien, H. M., Muyeen, S. M., and Al-Durra, A.**, 2016. Adaptive Control Strategy for Low Voltage Ride Through Capability Enhancement of a Grid-Connected Switched Reluctance Wind Generator. *5th IET International Conference on Renewable Power Generation (RPG)*, 74-6.
- Hrabovcov, V., Rafajdus, P., Liptak, M., Szabo, L.**, 2013. Performance of Converters Suitable for Switched Reluctance Generator (SRG) Operation. *Journal of Electrical Engineering*, 64(4):2010-2011.
- Hu, K. W., Wang, J. C., Lin, T. S., and Liaw, C. M.**, 2015. A Switched-Reluctance Generator with Interleaved Interface DC-DC Converter. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(1):273-284.
- Ivanov, A. S., Kalanchin, I. Y., Pugacheva, E. E.**, 2017, Control System of Mutually Coupled Switched Reluctance Motor Drive of Mining Machines in Generator Mode. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 84 (2017) 012031.
- Jayapragash, R.**, 2014. Grid-Connected Switched Reluctance Generator Based Wind Energy Conversion System through Hybrid Multicell Converter. *International Journal of Applied Engineering Research*, 9(24):8070-8075.
- Jebaseeli, E. A. E., Susitra, D., Abirami, P.**, 2015. Analysis of Converter Circuits for Switched Reluctance Generator in Wind Energy Conversion Systems. *Indian Journal of Science and Technology*, 8(28):1-4.
- Kaliyappan, K., Padmanabhan, S.**, 2013. PI-CCC Based Switched Reluctance Generator Applications for Wind Power Generation Using Matlab/Simulink. *Journal of Electrical Engineering Technology*, 8(2):230-237.
- Lawrenson, P. J., Stephenson, J. M., Blenkinsop, P. T., Corda, J., Fulton, N. N.**, 1980. Variable Speed Switched Reluctance Motors, *IEE Proc.*, 127(4):253-265.
- Lebsir, A., Benbouzid, M., Bentounsi, A., Salah, I. B.**, 2016. Switched Reluctance Generator Models for Wind Turbine Systems. *Electromotion*, 23:3-9.
- Li, G. J., Zhu, Z. Q., Ma, X. Y., and Jewell, G. W.**, 2016. Comparative Study of Torque Production in Conventional and Mutually Coupled SRMs Using Frozen Permeability. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(6):1-9.
- Liu, X., Wang, C., Chen, Z.**, 2015. Characteristics Analysis of an Excitation Assistance Switched Reluctance Wind Power Generator. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11):1-4.

- Lobato, P., Cruz, A., Silva, J., and Pires, A.,** 2005. The Switched Reluctance Generator for Wind Power Conversion. *9th Spanish Portuguese Congress on Electrical Engineering*, Marbella, SPAIN, 30 June-2 July.
- Lobato, P., Dente, J. A., Martins, J. F., and Pires, A. J.,** 2015. Scale Models Formulation of Switched Reluctance Generators for Low Speed Energy Converters. *IET Electric Power Applications*, 9(9): 652-659.
- Martin, R., Widmer, J. D., Mecrow, B. C., Kimiabeigi, M., Mebarki, A., and Brown, N. L.,** 2016. Electromagnetic Considerations for a Six-Phase Switched Reluctance Motor Driven by a Three-Phase Inverter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(5):3783-3791.
- Martinez-Iturbe, A., Perez-Cebolla, F. J., Martín-del-Brío, B., Bernal, C., and Bono-Nuez, A.,** 2016. Energy Transformations in a Self-Excited Switched Reluctance Generator, *Energies*, 9(5):321.
- Mataray, M.,** 2012. Modern Power Semiconductor Devices (A Review). (*IJCSIT*) *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 3 (4):4571 – 4574.
- Messai, F., Makhoulf, M., Benalla, H., Messai, A.,** 2014. Double Salient Switched Reluctance Generator for Wind Energy Application. *Revue des Energies Renouvelables*, 17(1):71-82.
- Miller, T. J. E.,** 2001. Electronic Control of Switched Reluctance Machines-The Switched Reluctance Generator, *Newnes Power Engineering Series*, 1s.
- Nassereddine, M.,** 2011. Switched Reluctance Generator for Wind Power Applications. *Master Thesis*. School of Engineering University of Western Sydney, Australia, 18s.
- Oh, J. H., Kwon, B. I.,** 2016. Design, Optimization, and Prototyping of a Transverse Flux-Type-Switched Reluctance Generator With an Integrated Rotor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31(4):1521-1529.
- Omaç, Z.,** 2006. Yeni Bir Anahtarlı Relüktans Motorun Tasarımı ve Akım Kontrolü. *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 8s.
- Polat, K.,** 2010. Anahtarlamalı Relüktans Motor için Mikrodenetleyici ile Ekonomik Bir Sürücü Gerçekleştirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, 37s.
- Polat, M., Öksüztepe, E., Kürüm, H.,** 2011. Sonlu Elemanlar Yönteminden Elde Edilen Endüktans Eğrileri Kullanılarak 8/6 Dalgıç Pompa Tipi Anahtarlamalı Relüktans Motorun Modellenmesi ve Kapalı Çevrim Hız ve Akım Kontrolü. *e-Journal of New World Sciences Academy*, 6(1):20-40.

- Radun, A. V.**, 2015. Switched Reluctance Generators and Their Control. University of Kentucky, September, DOI: 10.13140/RG.2.1.4714.5448.
- Rajini, V., Prabhu, V.**, 2013. Switched Reluctance Motor/Generator With Optimum Turn-on and Turn-off Controller for Hybrid Electric Vehicle Application. *Journal of Electrical Engineering*, 13(1):28-33.
- Rasakannu, J., Chinnagounder, C.**, 2016. Design and Implementation of Small Power Switched Reluctance Generator-Based Wind Energy Conversion System, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24:3228 – 3239.
- 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 Transaction on Industry Applications*, Vol. IA-22, No. 4, 722–730, July/August.
- Reis, M. R. C., Araújo, W. R. H., and Calixto, W. P.**, 2017. Efficiency Improvement of Switched Reluctance Generator Using Optimization Techniques. *Transactions on Environment and Electrical Engineering*, 2(1): ISSN 2450-5730.
- Robertson, J. C.**, 1840. The Mechanic's Magazine, Museum, Register, Journal and Gazette, London, Vol 32, pp 693.
- Roshandel, E., Namazi, M. M., Rashidi, A., Saghaian-Nejad, S. M., Ahn, J. W.**, 2017. SSC Strategy for SRG to Achieve Maximum Power with Minimum Current Ripple in Battery Charging. *IET Electric Power Applications*, 11(7):1205-1213.
- Sartori, S.**, 2016. Simulation and Analysis of Switched Reluctance Generator for Renewable Energy Applications, *Thesis of Master*, Dublin Institute of Technology, Ireland, 55s.
- Sawata, T., Kjaer, P. C., Cossar, C., Hayashi, Y.**, 1999. Fault-Tolerant Operation of Single – Phase SR Generators. *IEEE Transactions Industry Applications*, 35(4):774-781.
- Song, S., Liu, W.**, 2010. Load Effect on Switched Reluctance Starter/Generator System in Aircraft. *International Journal of Electrical and Power Engineering*, 4(1):19-26.
- Sozer, Y., Torrey, D.**, 2004. Closed Loop Control of Excitation Parameters for High Speed Switched-Reluctance Generators. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(2):355-362.
- Sridharan, S., Sudha, S.**, 2016. High Frequency Charging Techniques-Grid Connected Power Generation Using Switched Reluctance Generator. *Circuits and Systems*, 7:4308-4321.
- Susitra, D., Jebaseeli, E. A. E., Paramasivam, S.**, 2010. Switched Reluctance Generator-Modeling, Design, Simulation, Analysis and Control a Comprehensive Review. *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)*, 1(2):10-16.

- Taşdemir A.**, 2008. Anahtarlamalı Relüktans Motorlarında Bulanık Mantık ve Yapay Sinir Ağları ile Konum Algılayıcısız Denetim. *Doktora Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 8s.
- Uddin, W., Husain, T., Sozer, Y., and Husain, I.**, 2016. Design Methodology of a Switched Reluctance Machine for Off-Road Vehicle Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(3):2138-2147.
- Uruse, K., Yabu, N., Kiyota, K., Sugimoto, H., Chiba, A., Takemoto, M., and Hoshi, N.**, 2015. Energy Efficiency of SR and IPM Generators for Hybrid Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(4):2874-2883.
- Valdivia, V., Todd, R., Bryan, F. J., Barrado, A., Lazaro, A., and Forsyth, A. J.**, 2014. Behavioral Modeling of a Switched Reluctance Generator for Aircraft Power Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(6):2690-2699.
- Vujičić, V. P., Čalasan, M. P.**, 2016. Simple Sensorless Control for High-Speed Operation of Switched Reluctance Generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31(4):1325-1335.
- Wang, Q., Chen, H., Zhao, R.**, 2017. Double-Loop Control Strategy for SRGs. *IET Electric Power Applications*, 11(1):29-40.
- Wang, W., Chen, H., Wang, Q., Dou, Y., Yan, S., Liu, Z., and He, D.**, 2017. Control System of Switched Reluctance Generator. In *Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)*, 2017 IEEE Conference of Russian, February, pp. 1064-1069.
- Xia, F., Xia, Z., Huang, X., and Wang, Y.**, 2015. Switched Reluctance Generator Output Voltage Ripple Reduction Based on Fuzzy Sliding Mode. In *MATEC Web of Conferences EDP Sciences*, Vol. 25, January.
- Yang, Y., Schofield, N., and Emadi, A.**, 2016. Double-Rotor Switched Reluctance Machine Design, Simulations, and Validations. *IET Electrical Systems in Transportation*, 6(2):117-125.
- Yuvaraja, T., Ramya, K.**, 2016. Implementation of Control Variables to Exploit Output Power for Switched Reluctance Generators in Single Pulse Mode Operation. *IJE Transactions A: Basics*, 29(4):505-513.
- Zai-pain, P., Jin, Y., and Zhang, H.**, 2004. Study on Switch Reluctance Generator. *Journal of Zhejiang University SCIENCE*, 5(5):594-602.

ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Tunceli’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Tunceli’de tamamladı. 2010 yılında Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği (İng.) Bölümü’nde yükseköğrenime başladı. 2015 yılında Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl Munzur Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans programına başladı.

