

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**KARŞIT KUPLAJLI ANAHTARLAMALI RELÜKTANS
MAKİNASININ TASARIMI, ANALİZİ VE SIFIR AKIM GEÇİŞ
SÜRÜCÜ UYGULAMASI**

CİHAN ŞAHİN

KOCAELİ 2014

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

KARŞIT KUPLAJLI ANAHTARLAMALI RELÜKTANS
MAKİNASININ TASARIMI, ANALİZİ VE SIFIR AKIM GEÇİŞ
SÜRÜCÜ UYGULAMASI

CİHAN ŞAHİN

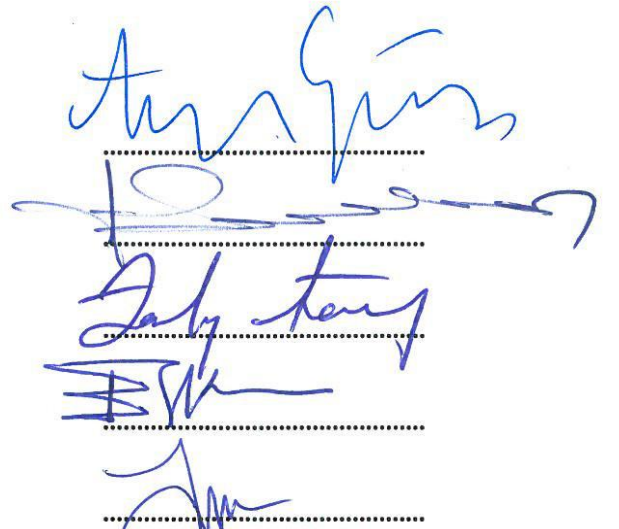
Doç.Dr. Ayşe Ergün AMAÇ
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. A. Fevzi BABA
Jüri Üyesi, Marmara Üniv.

Prof.Dr. Faruk ARAS
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr.ERCÜMENT KARAKAŞ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. H. Tarık DURU
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.


.....
.....
.....
.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 18.02.2014

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Globalleşen dünyada enerji ihtiyacı sürekli artarak devam etmektedir. Bu da sınırlı enerji kaynaklarının mümkün olduğunca verimli kullanılmasını gerektirmektedir. Özellikle son yıllarda her alanda, az enerji tüketen, verimi yüksek sistemler üzerinde araştırmalar yapılmaktadır. Bu alanlardan biri de otomotiv sektörüdür. Şu anda dünyada popüler olan, hem elektrik enerjisini hem de petrol türevlerini yakıt olarak kullanabilen hibrit araçlarda yüksek güçlü elektrik makinalarına gereksinim duyulmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak için pek çok araştırma yapılmış ve Anahtarlama Relüktans Makinası (ARM)'nin hibrit araçlarda tercih edilebilecek elektrik makinalarından biri olduğu ortaya konulmuştur. Aynı zamanda ARM'ler yüksek moment üretmeleri ve hızlı olmaları nedeniyle çeşitli ev aletlerinde, vakum jeneratörlerinde ve iş makinalarında da kullanılacak motorlardır. ARM'nin sargı yapısı değiştirilerek elde edilen Karşıt Kuplajlı Anahtarlama Relüktans Makinası (KKARM); aynı anda devrede olan iki fazın arasında oluşan karşıt kuplaj sayesinde moment üreten bir makinedir. Bu nedenle KKARM, klasik ARM'den daha yüksek moment üretebilmektedir. Fakat KKARM sürücüsünün kontrolünün klasik ARM'ninkine göre daha karmaşıktır. Bu nedenle KKARM'nin sürüş katında anahtarlama kayıpları da yüksektir. Bu da makinaya aktarılan gücün azalmasına neden olmaktadır. Bu tez çalışmada KKARM'nin en büyük dezavantajlarından biri olan ve sürüş katında meydana gelen bu anahtar kayıplarını en aza indirmek için, sıfır akım geçişli (Zero-Current-Transition-ZCT) sürücü uygulaması gerçekleştirilmiştir. Böylece KKARM'nin bir dezavantajı ortadan kaldırılmış ve daha yaygın olarak kullanılması yönünde bir adım atılmıştır.

Doktora tez çalışmamı bu konuda yapmama izin veren, çalışmalarına yön veren ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Ayşe ERGÜN AMAÇ'a, görüşleri ile çalışmalarına katkıda bulunan değerli hocalarım Doç. Dr. Ercüment KARAKAŞ ve Doç. Dr. Tarık DURU'ya, uygulamalar sırasında değerli tecrübelerini paylaşan Yard. Doç. Dr. Satılmış ÜRGÜN ve Yard. Doç. Dr. Tarık ERFİDAN'a, bilgilerini esirgemeyen hocalarım Dr. Nasır ÇORUH ve Selçuk AYTIN'a, manevi desteklerinden dolayı hocalarım Murat ÜNLÜ ve Kenan KELEŞ'e, uzun yıllar boyunca öğrencisi olduğum Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünün her daim güler yüz gösteren yönetimi ve idari personeline, akademik ve manevi desteğini her daim benden eksik etmeyen sevgili hocam ve değerli dostum Yard. Doç. Dr. Mevlüt KARAÇOR'a, bu yolda bana güç veren en büyük destekçilerim Annem Ayten, Ağabeyim Deniz, Ablam Derya, kardeşim Semra ve beni uzaklardan sadece izleyebilen sevgili babam Mustafa ŞAHİN'e teşekkürlerimi borç bilirim.

Şubat-2014

Cihan ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLOLAR DİZİNİ	vii
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR	viii
ÖZET.....	x
ABSTRACT	xi
GİRİŞ	1
1. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MAKİNALARI	8
1.1. Klasik ARM ve Çalışma Prensibi	8
1.1.1. ARM eşdeğer devresi.....	10
1.1.2. Klasik ARM’de moment üretimi	12
1.1.3. Klasik ARM’de moment dalgalılığı-kalıplama ilişkisi	16
1.2. KKARM ve Çalışma Prensibi	24
1.2.1. KKARM uyarma yöntemleri	27
1.2.1.1. KKARM’nin tek yönlü uyarılması	27
1.2.1.2. KKARM’nin çift yönlü uyarılması	28
1.2.1.3. KKARM’nin çift yönlü üç fazlı	29
1.2.2. KKARM’de moment dalgalılığı-kalıplama ilişkisi	30
1.3. Prototip KKARM	35
1.3.1. Mekanik tasarım	36
1.3.2. Analiz	37
1.3.3. Sonuçlar	39
2. ARM DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİ	41
2.1. Faz Başına Çift-Anahtarlı Dönüştürücü	41
2.1.1. Asimetrik köprü dönüştürücü	42
2.1.2. Alternatif asimetrik köprü dönüştürücü	43
2.2. Faz Başına Tek Anahtarlı Dönüştürücüler	44
2.2.1. R-dump dönüştürücü	44
2.2.2. Çift-telli dönüştürücü	45
2.2.3. Bölünmüş-DA-kaynaklı dönüştürücü	45
2.2.4. Tek anahtar-çift diyot dönüştürücü	46
2.2.5. Bağımsız faz akım kontrollü tek anahtar-çift diyot dönüştürücü	47
2.3. (q+1) Anahtar ve Diyot Konfigürasyonlu Dönüştürücüler	48
2.3.1. Eşit paylaşımlı dönüştürücü	48
2.3.2. C-dump dönüştürücü.....	49
2.3.3. Serbest geçişli C-dump dönüştürücü.....	50
2.3.4. Tek ortak anahtar konfigürasyonlu dönüştürücü.....	51
2.3.5. Değişken dc baralı minimum anahtar dönüştürücü.....	51
2.3.5.1. Azaltan dönüştürücü.....	51
2.3.5.2. Azaltan-yükselten dönüştürücü.....	52
2.4. Faz başına 1.5 anahtarlı dönüştürücü	53

2.5. İki katmanlı güç dönüştürücüsü	54
3. KKARM İÇİN YUMUŞAK ANAHTARLAMALI SÜRÜCÜ TOPOLOJİSİ.....	55
3.1. Yumuşak Anahtarlama Tanımı	55
3.2. Yumuşak Anahtarlama Teknikleri.....	56
3.2.1. Sıfır akımda anahtarlama (ZCS).....	57
3.2.2. Sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS).....	58
3.2.3. Sıfır akımda geçiş (ZCT).....	60
3.2.4. Sıfır gerilimde geçiş (ZVT).....	60
3.3. Prototip KKARM Sürücüsü	60
3.3.1. Devrenin çalışma aralıkları	61
4. UYGULAMA.....	69
4.1. Prototip KKARM Mekanığı	70
4.2. Güç Katı ve Bastırma hücreleri.....	71
4.3. Denetleyici Katı	73
4.3.1. Denetleyici programı.....	74
4.4. Ana Anahtar Sürücü Katı	78
4.5. Yardımcı Anahtar Sürücü Katı.....	79
4.6. Akım Ölçüm Katı.....	80
4.7. Gerilim Ölçüm Katı	81
4.8. Besleme Devreleri.....	82
4.9. Sonuçlar.....	83
4.10. Anahtarlama Kayıplarının Karşılaştırılması.....	87
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	89
KAYNAKLAR	92
EKLER.....	96
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	103
ÖZGEÇMİŞ	104

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Klasik ARM yapısı	9
Şekil 1.2. ARM tek faz eşdeğer devresi	11
Şekil 1.3. Manyetik alanda akı-akım değişimi	14
Şekil 1.4. Rotor perçin durumları; a) Rotor perçinleri arası uzaklık, b) Rotor saçları ve perçin noktaları	17
Şekil 1.5. Rotor ve Stator kutuplarının açılı konumları; a) Çakışık konum, b) Maksimum açılı konum	18
Şekil 1.6. M19 saç malzemeye ait B-H karakteristiği.....	19
Şekil 1.7. ARM Model-1'in moment eğrisi	19
Şekil 1.8. ARM Model-1'in akı eğrisi	20
Şekil 1.9. ARM Model-1'in self endüktans eğrisi	20
Şekil 1.10. ARM Model-1'in 10 amperde akı dağılımı	20
Şekil 1.11. ARM Model-1'in 10 amperde moment dalgalılığı	21
Şekil 1.12. ARM Model-2'nin moment eğrisi	22
Şekil 1.13. ARM Model-2'nin akı eğrisi	22
Şekil 1.14. ARM Model-2'nin self endüktans eğrisi	22
Şekil 1.15. ARM Model-2'nin 10 amperde akı dağılımı	23
Şekil 1.16. ARM Model-2'in 10 amperde moment dalgalılığı	23
Şekil 1.17. 6/4 kutuplu KKARM genel geometrik yapısı	24
Şekil 1.18. 6/4 kutuplu KKARM üç boyutlu sargı yapısı	24
Şekil 1.19. Stator-rotor kesişen kutup başları	26
Şekil 1.20. Akı üretimi; a) Klasik ARM, b) KKARM	27
Şekil 1.21. Tek yönlü uyarılan KKARM'nin akım ve karşılıklı endüktans profili	28
Şekil 1.22. Çift yönlü uyarılan KKARM'nin akım ve karşılıklı endüktans profili	29
Şekil 1.23. Çift yönlü, üç fazlı uyarılan, KKARM akım-karşıtlık endüktans profili	30
Şekil 1.24. KKARM Model-1'in moment eğrisi	31
Şekil 1.25. KKARM Model-1'in akı eğrisi.....	32
Şekil 1.26. KKARM Model-1'in karşıtlık endüktans eğrisi	32
Şekil 1.27. KKARM Model-1'in 6 amperde akı dağılımı	32
Şekil 1.28. KKARM Model-1'in 6 amperde moment dalgalılığı	33
Şekil 1.29. KKARM Model-2'nin moment eğrisi	33
Şekil 1.30. KKARM Model-2'nin akı eğrisi	33
Şekil 1.31. KKARM Model-2'nin karşıtlık endüktans eğrisi	34
Şekil 1.32. KKARM Model-2'nin 6 amperde akı dağılımı	34
Şekil 1.33. KKARM Model-2'in 6 amperde moment dalgalılığı	34
Şekil 1.34. Prototip KKARM'nin geometrik ölçüleri.....	36
Şekil 1.35. KKARM ağ yapısı	38
Şekil 1.36. Prototip KKARM'nin moment eğrisi	39
Şekil 1.37. Prototip KKARM'nin akı eğrisi	39
Şekil 1.38. Prototip KKARM'nin karşıtlık endüktans eğrisi	40

Şekil 1.39. Prototip KKARM'nin 6 amperde akı dağılımı	40
Şekil 2.1. ARM güç dönüştürücülerinin sınıflandırılması	41
Şekil 2.2. Üç fazlı asimetrik köprü dönüştürücü	42
Şekil 2.3. Sert kıyım stratejisi	43
Şekil 2.4. Alternatif asimetrik dönüştürücü	43
Şekil 2.5. R-dump dönüştürücü	44
Şekil 2.6. Üç fazlı çift-telli dönüştürücü	45
Şekil 2.7. Bölünmüş DA kaynaklı dönüştürücü	46
Şekil 2.8. Tek anahtar-çift diyot dönüştürücü	47
Şekil 2.9. Tek anahtar ve çift diyot/faz dönüştürücü	48
Şekil 2.10. Eşit paylaşımlı dönüştürücü	49
Şekil 2.11. Enerji geri kazanımlı C-dump dönüştürücü	49
Şekil 2.12. Serbest geçişli C-dump dönüştürücü	50
Şekil 2.13. Tek ortak anahtarlı dönüştürücü	51
Şekil 2.14. Değişken DA baralı minimum anahtarlı azaltan dönüştürücü	52
Şekil 2.15. Değişken DA baralı minimum anahtar azaltan-yükselten dönüştürücü	53
Şekil 2.16. 1.5 anahtar/faz dönüştürücü	53
Şekil 2.17. İki katmanlı güç dönüştürücü	54
Şekil 3.1. (a) Anahtarlama elemanı denetim sinyali, (b) Sert anahtarlama dalga şekli, (c) ZCS ve ZVS dalga şekli, (d) ZCT ve ZVT dalga şekli	57
Şekil 3.2. Klasik seri ZCS bastırma hücresi	58
Şekil 3.3. Klasik paralel ZVS bastırma hücresi	59
Şekil 3.4. 1 fazlı sıfır akım geçişli asimetrik H tipi köprü dönüştürücü	61
Şekil 3.5. 3 fazlı sıfır akım geçişli asimetrik H tipi köprü dönüştürücü	62
Şekil 3.6. Sıfır akım geçişli Asimetrik H tipi köprü dönüştürücünün çalışma aralıkları a) Aralık 1 [t0-t1], b) Aralık 2 [t1-t2], c) Aralık 3 [t2-t3], d) Aralık 4 [t3-t4], e) Aralık 5 [t4-t5], f) Aralık 6 [t5-t6], g) Aralık 7 [t6-t0]	65
Şekil 3.7. Sıfır akım geçişli Asimetrik H tipi köprü dönüştürücü temel dalga şekilleri	66
Şekil 4.1. Test sistemi blok şeması	69
Şekil 4.2. Test sistemi	70
Şekil 4.3. KKARM mekaniği	71
Şekil 4.4. 360 Darbeli enkoder	71
Şekil 4.5. Sıfır akım geçişli asimetrik köprü dönüştürücü; a) Bir faz teorik devre, b) Uygulama devresi	72
Şekil 4.6. DSPIC denetleyici; a) Teorik şema, b) Uygulama devresi	73
Şekil 4.7. MPLAB ekran görüntüsü	74
Şekil 4.8. Ana denetim algoritması	75
Şekil 4.9. Zamanlayıcı denetim algoritması	76
Şekil 4.10. Enkoder denetim algoritması	76
Şekil 4.11. Analog bilginin sayısal veriye dönüşüm algoritması	77
Şekil 4.12. Zamanlayıcı kesmesinin denetim algoritması	77
Şekil 4.13. Ana anahtarlar sürücü katı; a) Teorik şema, b) Uygulama devresi	78
Şekil 4.14. Yardımcı anahtarlar sürücü katı; a) Teorik şema, b) Uygulama	

devresi	79
Şekil 4.15. Akım ölçüm katı; a) Uygulama devresi, b) Teorik şema.....	80
Şekil 4.16. Gerilim ölçüm katı; a) Teorik şema, b) Uygulama devresi	81
Şekil 4.17. Besleme devreleri; a) Sürücü devreleri besleme geriliminin üretilmesi, b) Kontrol devresi besleme geriliminin üretilmesi.....	82
Şekil 4.18. KKARM ana anahtar akım-gerilim grafikleri. 10V/Kare ve 2,5A/Kare ölçeklidir; a) Sert anahtarlama tam periyot, b) Sert anahtarlama detay, c) Sıfır akım geçişli tam periyot, d) Sıfır akım geçişli anahtarlama detay	83
Şekil 4.19. Yardımcı anahtar akım-gerilim grafikleri. 50V/Kare ve 10A/Kare ölçeklidir; a) Yardımcı anahtar gerilim, b) Yardımcı anahtar akım/gerilim, c) Yardımcı anahtar akım/gerilim detay	85
Şekil 4.20. DS1 akım-gerilim grafikleri. 50V/Kare ve 10A/Kare ölçeklidir; a) DS1 akım/gerilim (100u saniye), b) DS1 akım/gerilim (25u saniye)	85
Şekil 4.21. CS1 akım-gerilim grafikleri. 50V/Kare ve 10A/Kare ölçeklidir	86
Şekil 4.22. Sert anahtarlama ana hat akım-gerilim grafikleri. 20V/Kare ve 5A/Kare ölçeklidir	86
Şekil 4.23. Sıfır akım geçişli yumuşak anahtarlama ana hat akım gerilim grafikleri. 50V/Kare ve 5A/Kare ölçeklidir.....	86
Şekil 4.24. Sert anahtarlama sürücüsünde ana anahtar kayıpları	87
Şekil 4.25. Sıfır akım geçişli sürücüsünde ana ve yardımcı anahtar kayıpları	87
Şekil 4.26. KKARM sürücüsünün sert ve sıfır akım geçişli anahtarlama verimi	88

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Teorik ARM'nin geometrik ölçüleri	16
Tablo 1.2. ARM Model-1 ve Model-2 moment dalgalılık karşılaştırılması	23
Tablo 1.3. KKARM Model-1 ve Model-2 moment dalgalılık karşılaştırılması	35
Tablo 1.4. Prototip KKARM'nin geometrik ölçüleri ve parametreler	37
Tablo 4.1. Yarı iletken elemanlar ve nominal değerleri.....	73
Tablo 4.2. Ana anahtar sürücü entegrenin karakteristik özellikleri	78
Tablo 4.3. Yardımcı anahtar sürücü entegrenin karakteristik özellikleri	80

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

\mathfrak{R}	: Relüktans, (1/H)
F	: Magneto motor kuvveti, (Amper Sarım)
Φ	: Manyetik akı, (Wb)
B	: Manyetik akı yoğunluğu, (Wb/m ² , T)
H	: Manyetik alan şiddeti, (Amper Sarım/m)
S	: Manyetik yolun kesit alanını, (m ²)
l	: Manyetik yolun uzunluğunu, (m)
L	: Endüktans (H)
Ψ	: Halkalanma akısı (Wb)
i	: Faz akımını (Amper)
N	: Faza ait sarım sayısı (Sipir)
R_s	: Faz sargısı direncini (Ohm)
Λ	: Stator sargısının halkaladığı akıyı (Wb)
e	: Zıt elektromotor kuvveti, (Volt)
K_b	: Elektromotor kuvvet sabiti
ω	: Açısal hız, (Radyan/ Saniye)
P_i	: Devrenin ani giriş gücü, (Watt)
P_{cu}	: Sargıda oluşan bakır kayıpları, (Watt)
p_a	: Hava aralığı gücü, (Watt)
T_e	: Makinadan elde edilen elektriksel moment, (Nm)
R_m	: Motor sargı direnci (Ohm)
θ	: Rotorun açısal konumu, (Derece °)
W_m	: Mekanik enerji, (Joule)
W_f	: Manyetik alan enerjisini, (Joule)
W_c	: Ko-enerji, (Joule)
i_a	: A fazına ait akım, (Amper)
i_b	: B fazına ait akım, (Amper)
i_c	: C fazına ait akım, (Amper)
L_i	: Kaçak endüktans, (Henry)
α	: Makine aksiyal uzunluğu,
G	: Hava aralığı uzunluğunu, (m)
β_L	: Akı yolu stator ve rotor kutup örtüşme uzunluğunu, (Radyan)
β_M	: Akı yolu stator ve rotor kutup örtüşme farkını, (Radyan)
D_s	: Stator çapı, (m)
D_r	: Rotor çapı, (m)
L_d	: Motor derinliği, (m)
t_s	: Stator kutup genişliği, (m)
t_r	: Rotor kutup genişliği, (m)
d_r	: Rotor kutup yüksekliği, (m)
y_s	: Stator boyunduruk kalınlığı, (m)
y_r	: Rotor boyunduruk kalınlığı, (m)
r_o	: Rotor boyunduruk yarıçapı, (m)
r_l	: Rotor kutup yarıçapı, (m)

r_2	: Stator iç boyunduruk yarıçapı, (m)
r_3	: Stator dış boyunduruk yarıçapı, (m)
r_{sh}	: Motor mil yarıçapı, (m)
β_s	: Stator kutup açısı, (Derece)
β_r	: Rotor kutup açısı, (Derece)
θ_s	: Rotor Adım açısının, (Derece)
N_s	: Stator kutup sayısı
t_{d1}	: Çeyrek rezonans süresi
T_r	: Rezonans süresi
Z_r	: Rezonans empedansı

Kısaltmalar

AA	: Alternatif Akım
AC/DC	: Alternating Current/ Direct Current (Alternatif Akım/ Doğru Akım)
ARM	: Anahtarlama Relüktans Makinası
DA	: Doğru Akım
DSP	: Digital Signal Processing (Dijital Sinyal İşleme)
EMI	: Elektro Magnetic Interference (Elektromanyetik Girişim)
GND	: Ground (Şase)
HS	: Hard Switching (Sert Anahtarlama)
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor (Yalıtılmış Kapılı Bipolar Transistör)
KKARM	: Karşıt Kuplajlı Anahtarlama Relüktans Makinası
KW	: KiloWatt
MOSFET	: Metal Oxide Field Effect Transistor (Metal Oksit Alan Etkili Transistör)
PI	: Proportional, Integral (Oransal, İntegral)
SCR	: Silicon-Controlled Rectifier (Silisyum Kontrollü Doğrultucu)
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SS	: Soft Switching (Yumuşak anahtarlama)
ZCS	: Zero Current Switching (Sıfır Akımda Anahtarlama)
ZVS	: Zero Voltage Switching (Sıfır Gerilimde Anahtarlama)
ZCT	: Zero Current Transition (Sıfır Akımda Geçiş)
ZVT	: Zero Voltage Transition (Sıfır Gerilimde Geçiş)

KARŞIT KUPLAJLI ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MAKİNASININ TASARIMI, ANALİZİ VE SIFIR AKIM GEÇİŞ SÜRÜCÜ UYGULAMASI

ÖZET

Bu tez çalışmasında KKARM için sıfır akım geçişli sürücü uygulaması gerçekleştirilmiştir. KKARM'ler klasik ARM'lere göre daha yüksek moment üretebilme yeteneğine sahip makinalardır. Sargı yapısı ve kontrol yöntemi klasik ARM'lerden farklıdır. KKARM'lerde aynı anda iki fazın devrede olması nedeniyle sürücü üzerinde meydana gelen anahtar kayıpları klasik ARM'lerden daha yüksektir. Bu nedenle makine daha yüksek moment üretmesine rağmen yaygın olarak kullanılamamaktadır. Gerçekleştirilen sıfır akım geçişli sürücü uygulamasıyla bu kayıplar iyileştirilmiştir.

Çalışmanın giriş bölümünde KKARM ile ilgili literatüre yer verilmiştir. Burada güç elektroniğinde önemli bir yeri olan yumuşak anahtarlama tekniklerinin KKARM'nin sürülmesinde hiç kullanılmadığı ortaya konmuştur. Birinci bölümde, ARM ve KKARM'ler hakkında genel bilgiler verilmiş, KKARM'nin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi gerçekleştirilmiştir. Bölüm sonunda analiz sonuçları değerlendirilmiş, motor kalıplama yönteminin moment dalgalılığı üzerine etkisine değinilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde ARM'lerin genel sürüş modelleri hakkında literatür bilgisi verilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde yumuşak anahtarlama tekniklerine değinilmiştir. KKARM'ye uygulanan sıfır akım geçişli metod tanıtılmış çalışma aralıkları açıklanmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise sıfır akım geçişli asimetrik H tipi sürücü uygulaması gerçekleştirilmiş alınan sonuçlar verilmiştir. Uygulanan bu yeni teknik sayesinde KKARM sürücüsünün anahtarlama kayıplarının azaldığı ve veriminin %94-%95,5'lere yükseldiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Anahtarlama Relüktans Makinası (ARM), Karşit Kuplajlı Anahtarlama Relüktans Makinası (KKARM), Sıfır Akımda Geçiş (ZCT).

DESIGN, ANALYSIS AND DRIVE APPLICATION WITH ZERO CURRENT TRANSITION OF MUTUALLY COUPLED SWITCHED RELUCTANCE MACHINE

ABSTRACT

Drive application with Zero Current Transition (ZCT) technique for Mutually Coupled Switched Reluctance Machine (MCSRМ) is realized in this thesis. As a well known fact that MCSRМ produces higher torque more than classical Switched Reluctance Machine (SRM). The winding structure and control of MCSRМ are different from SRM. Since two phases of MCSRМ are online at simultaneously, drive losses are higher than the classical SRM's. Therefore, MCSRМ can not be used widely, still it produces higher torque than classical SRM. Thanks to realized ZCT drive for MCSRМ, these losses are minimized in this thesis.

MCSRМ literature is given in introduction of the study. It has been searched out that soft switching techniques have not been applied to MCSRМ drivers before. General information about classical SRM and MCSRМ are given and MCSRМ is analysed via Finite Element Method (FEM) in the first section of the study. Analysis results are evaluated at the end of the section and also affects of motor moulding methods on torque ripple are discussed in this part. In second part of the study, SRM drive models are mentioned. Soft switching techniques are investigated in the third section and intervals of ZCT drive for applied MCSRМ are explained comprehensively. Asymmetric H-bridge ZCT drive for MCSRМ is realized and the results are given in the last section of the thesis. Thanks to this new technique, switching losses of the MCSRМ drive are reduced. It is also observed that the efficiency of the drive is in between 94% and 95.5% for this prototype MCSRМ.

Keywords: Switched Reluctance Machine, (SRM), Mutually Coupled Switched Reluctance Machine, (MCSRМ), Zero Current Transition, (ZCT).

GİRİŞ

İlk Anahtarlama Relüktans Makinası (ARM) 1838 yılında yapılmasına rağmen, kontrolünün zor olması nedeniyle 1970'li yılların sonlarına kadar yaygınlaşmamıştır. 1960'lı yıllardan itibaren güç elektroniği ve yarıiletken anahtarların gelişmesi, ARM'nin kontrolünü kolaylaştırmış ve ARM sürücülerine olan ilginin artmasına neden olmuştur [1]. ARM'ler oldukça basit bir yapıya sahiptir. Sadece statorunda sargı bulunan ARM'lerin, rotorunda sargı ya da mıknatıs yoktur. ARM'ler üzerine son yıllarda çok fazla çalışma yapılmasının en önemli nedeni, yapısının basit ve maliyetinin düşük olmasıdır [2]. ARM'ler, otomotiv endüstrisi, havacılık endüstrisi, demiryolu ve hafif raylı sistem araçlarının tahriği, ev aletleri (süpürgeler, beyaz eşyalar...vb), genel amaçlı endüstriyel sürücüler, servo sistemler, robot uygulamaları, özellikle dış rotorlu yapısıyla kompresör, fan, pompa, santrifüj tahriği gibi geniş bir kullanım alanına sahiptirler [3]. Ayrıca ARM'nin alternatif enerji kaynakları ile çalışan taşıtlarda da kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Diğer elektrik makinelerinde olduğu gibi ARM'lerden de yüksek moment beklenir. Bu noktada Anahtarlama Relüktans Makinasının farklı bir türü olan ve daha yüksek moment üretme kapasitesine sahip Karşıt Kuplajlı Anahtarlama Relüktans Makinası (KKARM) bir adım öne çıkmaktadır. ARM'ler kısa adımlı sarılırken, KKARM'ler tam adım olarak sarılmaktadır. Bu tezde kısa adım sarılan ARM'ler 'Klasik ARM' olarak isimlendirilmiştir. ARM'nin en büyük dezavantajı; AA ve DA kaynaklardan doğrudan beslenememesi ve elektronik olarak anahtarlanmasıdır [2]. Pek çok alanda uygulaması olan ARM'lerin klasik elektrik makinelerine göre bazı üstünlükleri de vardır. Bunlar;

- Rotorunda sargı yoktur. Bu nedenle üretimi kolay ve ucuz, kayıpları düşük, verimi aynı güçteki diğer makinalara göre yüksektir. Genelde küçük güçlerdeki ARM %80 verimle çalışır.
- Sargılardan geçen akımın yönünden dolayı kutup polarizasyonu önemli değildir. Bu nedenle sürülmesi kolaydır.

- Stator fazları birbirinden bağımsız olarak denetlenebilir. Fazlardan herhangi birinde sorun olduğunda makina diğer fazların yardımıyla daha düşük performansla çalışmasını sürdürebilir.
- Çok yüksek hızlarda çalışabilir. Bu uygulamalar için (elektrikli otomobil vb) önemli bir avantajdır.
- Moment/Eylemsizlik oranı yüksek olduğundan başlangıç momenti yüksektir [3].

Literatür çalışmasında ARM ile ilgili pek çok yayın incelenmiştir. Çeşitli indeksler tarafından taranan dergilerde Klasik ARM ile ilgili çalışmaların oldukça fazla olduğu görülmüştür. Oysa aynı dergilerde KKARM üzerine yapılan yayınların sınırlı sayıda olduğu tespit edilmiştir. Yapılan literatür taraması aşağıda özetlenmiştir.

Mecrow, 1993 yılında ilk KKARM'nin temellerini, çalışma ilkesini ve karakteristiğini ortaya koymuştur. Mecrow farklı uyarma durumlarında makinanın performansını incelenmiş ve pozitif momentin elde edilmesini açıklamıştır. Önerilen makinanın çıkış momentinin farklı uyarım durumlarında, klasik ARM'den en az %25 daha fazla olduğu sonucunu elde etmiştir. Böylece KKARM'nin ortalama çıkış momentinin Klasik ARM'ye nazaran daha yüksek olduğu Mecrow tarafından deneysel olarak bu çalışma ile ispatlanmıştır [4].

Barrass, Mecrow ve Clothier tarafından 1994 yılında gerçekleştirilen çalışmada, KKARM için geliştirilmiş sürücünün deneysel sonuçları verilmiştir. Tek yönlü akım uygulandığında, karşıt endüktansın artış gösterdiği bölgede, KKARM'nin pozitif moment ürettiği gözlenmiştir. Aynı çalışmada, önerilen sürücünün performansı da araştırılmıştır. Düşük hızlarda sürücünün akım denetiminin klasik ARM ve KKARM için benzer olduğu; yüksek hızlarda ise sürücünün gerilim denetiminin Klasik ARM ve KKARM için farklı olduğu gözlenmiştir [5].

Barrass, Mecrow ve Clothier, 1995 yılında yaptıkları çalışma ile çift yönlü (bipolar) uyarımda KKARM'nin davranışını ayrıntılı olarak analiz etmişlerdir. 7.5 kW, 1500 d/dak lık bir KKARM'nin, tek yönlü (unipolar), çift yönlü (bipolar), kare dalga ve sinüzoidal uyarma durumlarında verdiği cevaplar karşılaştırılmıştır. Her bir durum için KKARM'den elde edilen moment değerleri, genlik ve dalgalanma oranı bakımından karşılaştırılmıştır. Tek yönlü ve çift yönlü uyarma arasında bir fark olmadığı gözlemlenmiştir [6].

Mecrow 1996'da eşit bakır kayıpları şartlarında klasik ARM ve KKARM'nin ortalama çıkış momentleri karşılaştırmıştır. Her iki makina için statik moment eğrilerini çıkarmıştır. Ayrıca KKARM'nin modellemesinde basit bir katsayı matrisi önermiştir. Bu matris sayesinde klasik ARM faz akım değerleri KKARM değerlerine dönüştürülebilmektedir [7].

Wale ve Pollock, 1996 yılında yapmış oldukları çalışmada üç ve iki fazlı KKARM'ler için farklı sürücü devreleri araştırmış ve denemişlerdir [8].

Mecrow, Clothier ve Barrass tarafından 1998 yılında gerçekleştirilen çalışmada klasik ARM sürücülerinin, KKARM'de kayıpları artırdığı tespit edilmiştir. Aynı çalışmada yeni bir sürücü önerilmiştir. Bu sürücü devresiyle kayıpların azaldığı ve komütasyon sorununun giderildiği ispatlanmıştır [9].

Clothier ve Mecrow tarafından 1999 yılında gerçekleştirilen araştırmada tüm elektrik makinalarında sürücü olarak kullanılabilen üç fazlı köprü eviriciler incelenmiştir. Aynı çalışmada Klasik ARM, KKARM ve Asenkron Motor; verim ve maliyet bakımından karşılaştırılmıştır. Ayrıca konum algılayıcı sensör sayısının, akımı algılama ve denetleme üzerine etkisi araştırılmıştır [10].

Kosaka ve Matsui 2000 yılında KKARM'nin konum algılayıcısız denetimi üzerine çalışmıştır. Çalışmada Bulanık Mantık tabanlı bir algoritma önerilmiştir. Burada makinanın akı halkalanması ve akımları kullanılarak, rotorunun konumu belirlenmiştir. Bu algoritma, 400 W, 3000 d/dak., 12/8 stator ve rotor kutup yapısına sahip KKARM'de uygulanmış ve oldukça iyi sonuçlar vermiştir [11].

Ashour, Reay ve Williams, 2000 yılında yaptıkları çalışmayla çift çıkıntılı 8/6 kutuplu kaydırılmış KKARM'nin performansını araştırmışlardır. Bilindiği üzere bir motorun performansında en önemli unsur momenttir. KKARM'de moment üretimini etkileyen en temel etkenler ise karşıt ve öz endüktanslardır. Bu çalışmada; karşıt ve öz endüktansların kısa ve tam adım sargı yapılarına göre değişimi deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada bir AA/DA IGBT dönüştürücü ve akım denetim kapasitesi geliştirilmiş bir DA gerilim yükseltici tasarlanmış ve analizleri yapılmıştır. Ayrıca çalışmada, iki anahtar kullanılarak tasarlanan KKARM sürücüsü üzerine tartışılmıştır [12].

Kokernak ve Torrey, 2000 yılında yapmış oldukları çalışmada KKARM için bir manyetik devre modeli geliştirmişlerdir. Bu model KKARM'nin performans tahmini için önerilmiştir. Modelde, faz akımları kullanılarak makinanın akısı hesaplanmıştır. C++ programlama diliyle oluşturulan model, sonlu elemanlar yöntemiyle de gerçekleştirilmiştir [13].

Kosaka ve Matsui, 2001 yılında yaptıkları çalışmada, endüktansın hesaplanması prensibine dayanan ve manyetik devre ve akım analizlerini içeren bir metottan yola çıkarak; KKARM için en uygun gerilim iletim açısını tespit etmişlerdir [14].

Mecrow, Weiner ve Clothier, 2001'de yaptıkları çalışmada KKARM'nin modellenmesinde karşılaşılan zorlukları yenmeyi amaçlamışlardır. KKARM'deki akı halkalanması tüm faz akımlarına ve rotorun konumuna bağlı, doğrusal olmayan bir fonksiyondur. Bu durum KKARM'nin modellenmesini güçleştirmektedir. Yapılan çalışmada akı halkalanması ve akımlar; stator dişi başına akı ve magnetomotor kuvvet olarak ayrıştırılmıştır. Ayrıştırılan bu değerler basit bir look-up tablosu ile modele dahil edilmiştir. Çalışmada bu yöntemle oluşturulan modelin geçerliliği ispatlanmıştır [15].

Ashour ve Williams, 2001 yılında, kaydırılmış KKARM'nin kayan kipli hız denetimini; C167, 16 bit mikro denetleyici ile deneysel olarak gerçekleştirmiştir. Çalışmada hız denetim ve hızlanma tahmin metotları da tartışılmıştır. Hız basamak değişimi, hız izleme, ters yönde dönme ve yük dalgalanmasının olduğu durumlarda; sistemin, PI (oransal ve integral) ve kayan kipli hız denetimine verdiği cevaplar karşılaştırılmıştır. Kayan kipli denetimde, sistem cevabının daha kararlı olduğu görülmüştür. PI denetimde ise hız tepe değerinin daha düşük olduğu deneysel sonuçlarla gözlemlenmiştir [16].

Garip, Özoglu ve Mese, 2002 de yaptıkları çalışmada, Klasik ARM'nin kutup başlarında geometrik değişiklikler yaparak yeni tasarımlar elde etmişlerdir. Bu sayede makinanın moment dalgalanmasının %37,2 lerden %13,7'lere kadar indiğini tespit etmişlerdir [17].

Ghoneim, Fletcher ve Williams, 2002 yılında yaptıkları çalışmada relüktans makinalarının analizinde gerekli olan; moment, akı ve gerilim matrisi

oluşturulmuştur. Elde edilen çözümün, farklı faz ve sargı sayılı, farklı bobin adımlı, farklı bağlantı tipli, simetrik ve asimetrik sargı yapıları için de ihtiyacı karşıladığı gösterilmiştir [18].

Xu ve Torrey, 2002 yılında yaptıkları çalışmada, KKARM'nin elektromanyetik karakteristiğini araştırmışlardır. Çalışmada farklı uyartım ve çalışma durumları için makinanın denetim prensipleri geliştirilmiştir. Testler 11KW'lık KKARM üzerinde yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir [19].

Lopez ve Krefta 2003 yılında yaptıkları çalışmada 3 fazlı, 48/32 kutuplu, 15KW'lık KKARM'nin performansını araştırmışlardır. Bunu tek ve çift yönlü iletim akımının 120° ve 180° 'de testlerini yaparak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, SEY sonucunda KKARM'nin doğrusal olmayan bir davranış gösterdiği tespit edilmiştir. 120° tek yönlü akımla çalışıldığında makineden en iyi performansın alındığı deneysel sonuçlarla ispatlanmıştır [20].

Özoğlu, Garip ve Meşe, makinanın rotor kutup başında geometrik düzenlemeler yapmışlardır. 2004 yılında yapılan çalışmada, yapılan bu düzenlemenin farklı akımlarda Klasik ARM ve KKARM moment dalgalılığı üzerine etkileri incelenmiştir. Klasik ARM'de dalgalılık %24.1 KKARM'de ise, % 22.6 azaltılmıştır [21].

Karaçor, Yılmaz ve Kuyumcu tarafından 2007 yılında gerçekleştirilen araştırmada KKARM modeli ileri beslemeli yapay sinir ağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modellemede, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) analizi sonucunda elde edilen açı, akım, akı ve moment bilgileri kullanılmıştır. Oluşturulan model kabul edilebilir bir akım-moment profili sergilemiştir [22].

Yılmaz ve Meşe tarafından 2008 yılında gerçekleştirilen çalışmada Klasik ARM ve KKARM'nin eşit bakır kayıpları altında performans analizleri sunulmuştur. Her iki motor için faz başına bakır sargı hacmi ve faz direnci, tasarım programları ile hesaplanmıştır. Böylece imalatından önce makinanın faz direnci yüksek doğrulukta tahmin edilmiştir [23].

Literatür araştırmasından da anlaşılacağı gibi; KKARM üzerine yapılan çalışmalar makinanın kontrolü üzerine yoğunlaşmıştır. Literatürden, KKARM için sürücüler üzerine de çalışıldığı anlaşılmaktadır. Bu araştırmaların ortak amacı hem KKARM'nin performansını artırmak hem de kontrolünü kolaylaştırmak olmuştur. Bu tez çalışmasının yönü de bu noktadaki eksiklikler görülerek ve güç elektroniğinde son yıllardaki gelişmeler göz önüne alınarak belirlenmiştir.

Bilindiği gibi güç elektroniği dünyasında anahtarların iletim ve kesim durumundaki kayıpları her zaman önemli bir sorun olmuştur. Bu kayıpların en aza indirilmesi için çalışmalar devam etmektedir. Güç elektroniği anahtarlarının; klasik şekilde (ek bir düzene gerektirmeden) kullanılmasına “sert anahtarlama” denir. Sert anahtarlama durumunda akım ve gerilimin kesiştiği anda büyük güç kaybı olur. Yumuşak anahtarlama teknikleri, bu kayıpların en aza indirilmesi için yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Ancak literatürde, KKARM denetiminde yumuşak anahtarlama yöntemlerinin kullanılmadığı görülmüştür. Bunun nedeni, makinanın denetiminin zor olması ve momentindeki dalgalanmalardır. Fakat son yıllarda KKARM moment dalgalanmasının azaltılmasıyla ilgili çalışmalar artmış ve literatür özetinde değinildiği gibi olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bu bağlamda yapılacak olan yumuşak anahtarlama KKARM'nin bu alanda çalışanlara ve literatüre önemli bir katkı sağlayacağı öngörülmüştür. Bu tez çalışmada yumuşak anahtarlama KKARM sürücüsünde anahtarlama kayıpların iyileştirilmesi, dolayısıyla KKARM'nin performansının artırılması hedeflenmiştir.

Tez çalışmasının giriş bölümünde KKARM ile ilgili ayrıntılı literatür taramasına yer verilmiştir. Böylece yapılan çalışmanın literatürdeki önemi vurgulanmıştır.

Birinci bölümde; ARM hakkında genel bilgiler verilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan prototip KKARM'nin tasarımı anlatılmış ve makinanın analizinden elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

İkinci bölümde, ARM sürücü sistemleri hakkında genel bilgiler verilmiş ve yaygın olarak kullanılan sürücü türlerine değinilmiştir.

Üçüncü bölümde, genel olarak yumuşak anahtarlama tekniklerine değinilmiş ve prototip KKARM'de kullanılan yumuşak anahtarlama modeli ayrıntılarıyla

açıklanmıştır. Prototipte gerçekleştirilen yumuşak anahtarlama sürücünün çalışma prensibi anlatılmış ve kararlı durum analizleri verilmiştir.

Dördüncü bölümde, öncelikle deney düzeneğinde kullanılan devreler verilmiştir. Prototip KKARM'nin sert ve yumuşak anahtarlama teknikleri kullanılarak kontrol edilen sürücüsünde; her iki teknik için anahtarlama kayıpları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar grafiklerle açıklanmıştır.

Beşinci bölümde, yapılan çalışma özetlenmiş, literatüre kattığı katkı irdelenmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

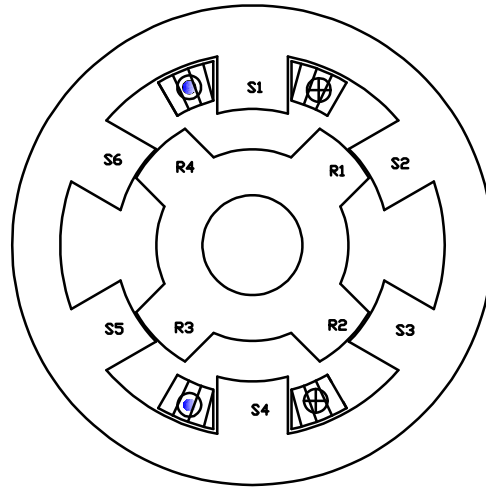
1. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MAKİNALARI

Anahtarlama Relüktans Makinaları (ARM) teknolojideki ilerlemelere paralel olarak gelişimlerini sürdürerek, günümüz elektrik makinaları arasında önemli bir yer edinmiştir. Güç elektroniğini alanındaki ilerlemeler sayesinde ARM'lerin denetiminin kolaylaşması da bu yeri sağlamlaştırmıştır. Ayrıca ARM'nin geometik yapısında yapılan bazı düzenlemelerle makinanın performansı da yükseltilmiştir. Bilindiği gibi ARM sargıları stator kutup başı etrafına sarılmakta ve kısa kutup adımlı olarak yerleştirilmektedir. Bu sargı yapısı, Mecrow'un ARM performansını arttırmak amacıyla yaptığı çalışmalarla farklı bir boyut kazanmıştır. Mecrow çalışmasında ilave sargı kullanmaksızın makina sargılarında basit değişiklikler yapmıştır. Kısa adım olarak sarılan sargılar tam adım olarak değiştirilmiştir. Bu değişikliklerle makinanın pozitif moment üretimi arttırılmıştır. Yapılan bu değişiklikle moment, fazlar arasında oluşan karşıt kuplajın rotor konumuna göre değişimiyle elde edilmiştir. Mecrow tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada ortalama çıkış momenti klasik ARM'lere göre %20-30 daha fazladır. Mecrow'un gerçekleştirdiği bu ARM modeli Tam Kutup Adımlı ARM (Fully Pitched SRM) veya Karşıt Kuplajlı ARM (Mutually Coupled SRM) (KKARM) olarak adlandırılmıştır [24]. Tezin bu bölümünde Klasik ARM'ler ve KKARM'ler çalışma prensipleri, moment üretimleri, moment dalgalılıkları bakımından ayrıntılarıyla incelenmiş, teorik olarak analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

1.1. Klasik ARM ve Çalışma Prensibi

Klasik ARM'ler tüm geleneksel elektrik makinalarında olduğu gibi rotor ve statordan oluşmaktadır. Temel farklılık klasik ARM'nin rotor ve statorunda çıkıntılarının bulunmasıdır. Bu nedenle çıkıklı veya çift çıkıklı makine olarak da bilinmektedirler. Rotor üzerinde mıknatıs, sargı veya kısa devre halkası gibi parçalar bulunmamaktadır. Stator ve rotor çıkık kutup sayıları, stator kutup sayısı/rotor kutup sayısı şeklinde ifade edilmektedir. Örneğin 6/4, 6 stator/4 rotor çıkık kutuplu bir

ARM'yi ifade etmektedir [25]. ARM'lerin dönebilmesi için stator ve rotor kutup sayılarının farklı olması gerekmektedir. Genellikle de stator kutup sayısı rotor kutup sayısından fazla; 6/4, 8/6 vb. imal edilirler. Bunun nedeni yüksek hız yerine yüksek moment elde etme isteğidir [26]. Stator kutup sayısı N_s , rotor kutup sayısı da N_r ile ifade edilirler. ARM'de, statorda karşılıklı kutuplar üzerinde bulunan sargılar seri bağlanarak makinanın bir fazını oluştururlar [27]. ARM'de uygun olan faz doğru gerilim ile uyarıldığında, hareketli olan rotor, manyetik devrenin relüktansını azaltacak yönde dönmeye başlar. Fazların sıra ile devreye girip çıkmasıyla hareket süreklilik kazanır. Şekil 1.1 de 3 fazlı, 6/4 kutuplu, klasik ARM'nin stator-rotor yapısı görülmektedir.



Şekil 1.1. Klasik ARM yapısı

Relüktans, elektrik devresindeki direncin manyetik devredeki karşılığı olarak düşünülebilir. Elektrik devresinde direnç akıma karşı gösterilen zorluk ise, relüktans; manyetik devrede akının dolaşımına karşı gösterilen zorluktur. ARM bir manyetik devre olarak modellenirse, bu modelde yer alan stator, rotor ve aralarındaki hava boşluğu "relüktans" adını alır. Stator, rotor ve gövde relüktansları sabit olmasına rağmen hava aralığının relüktansı değişkendir [25, 28]. ARM'lerde stator ve rotor kutup başları arasındaki hava aralığı büyüdükçe manyetik devrenin relüktansı da büyümektedir. Makina yapısı gereği bu yüksek relüktansı azaltma eğilimi göstermekte ve bunun için de moment üretmektedir. Üretilen momentle stator ve rotor kutupları birbirine yaklaşmakta bunun sonucunda da manyetik devrenin relüktansı azalmaktadır [28]. Bu relüktansı azaltma isteği makinanın momentinin

sürekliliğini sağlamaktadır. Manyetik devre relüktansı Denklem (1.1) ile ifade edilmektedir [25, 28].

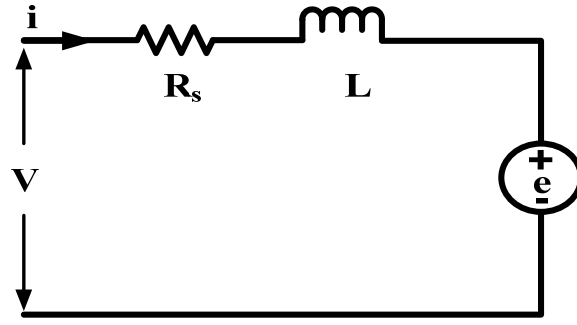
$$\mathfrak{R} = \frac{F}{\phi} = \frac{Hl}{BS} = \frac{l}{\mu S} \quad (1.1)$$

Denklem (1.1)'de \mathfrak{R} Relüktansı, F magneto motor kuvvetini (mmk), ϕ akıyı, l manyetik yolun uzunluğunu, B manyetik akı yoğunluğu, H manyetik alan şiddeti, S manyetik yolun kesit alanını ve μ ise manyetik malzemenin manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir. Rotorun açısai değişimi ile birlikte l , μ ve S parametreleri devre relüktansının değişimine neden olmaktadır. Stator ve rotor kutupları çakışık olmadıkları pozisyonda μ çok küçük bir değerde olmakta ve bundan dolayı, ortalanmış konumda relüktans değeri maksimum değerde olmaktadır. Rotor ve stator kutuplarının çakışık pozisyon konumuna yaklaşımları durumunda artan kesişim S alanıyla birlikte geçirgenlik değeri de hızlı bir şekilde artmakta ve relüktans değeri azalmaktadır. Rotor ve stator kutupları tamamen çakışık konuma bulunduğu durumda ise kesişim alanı maksimum olmakta ve manyetik geçirgenlik maksimum değerine ulaşmakta bundan dolayı relüktans minimum değeri almaktadır. ARM'lerde relüktans yerine daha çok endüktans değeri kriter olarak kullanılmaktadır. Endüktans (L) ve Relüktans (\mathfrak{R}) arasındaki ilişki, ψ halkalanma akısı, i faz akımını ve N ise faza ait sarım sayısı olarak olmak üzere Denklem (1.2) deki şekilde ifade edilir. [25, 28].

$$L = \frac{\psi}{i} = \frac{N\phi}{i} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \quad (1.2)$$

1.1.1. ARM eşdeğer devresi

Şekil 1.2'de ARM tek faz devre şeması görülmektedir. Klasik ARM'lerde karşılıklı endüktans değeri çok düşük değerlerde olduğundan dolayı ihmal edilmiştir [29]. Devrede R_s faz sargısı direncini, L faz sargısı endüktans değerini ifade etmektedir [29].



Şekil 1.2. ARM tek faz eşdeğer devresi [29]

Denklem (1.3)'de faz uçlarındaki gerilim (V) değeri verilmektedir. λ stator sargısının halkaladığı akıyı ifade etmekte olup ve Denklem (1.4)'de verilmektedir [29].

$$V = R_s i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (1.3)$$

$$\lambda = L(\theta, i)i \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned} V &= R_s i + \frac{d\{L(\theta, i)i\}}{dt} = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \\ &= R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m i \end{aligned} \quad (1.5)$$

Giriş gerilimi, direnç üzerine düşen gerilim, bobin üzerine düşen gerilim ve sargıda endüklenen emk (elektromotor kuvveti) toplamına eşittir. Emk Denklem (1.6)'da verilen eşitlikle ifade edilmektedir.

$$e = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m i = K_b \omega_m i \quad (1.6)$$

K_b elektromotor kuvvet sabiti olup Denklem (1.7)'de ifade edilmektedir.

$$K_b = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (1.7)$$

Devrenin giriş gücü Denklem (1.8)'de verilen eşitlikle ifade edilmektedir.

$$P_i = V.i = R_s i^2 + i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} + L(\theta, i)i \frac{di}{dt} \quad (1.8)$$

Devrenin ani giriş gücü (P_i), Denklem (1.9)'da verilen ifadenin Denklem (1.8)'de yerine konmasıyla elde edilmektedir. Elde edilen sonuç Denklem (1.10)'da ifade edilmektedir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) = L(\theta, i) i \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (1.9)$$

$$P_i = R_s i^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (1.10)$$

P_i , sargıda oluşan bakır kayıpları P_{cu} , alan enerji değişim oranı ve hava aralığı gücü (p_a) toplamından oluşmaktadır.

$$P_{cu} = R_s i^2 \quad (1.11)$$

$$\text{Alan enerji değişim oranı} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) \quad (1.12)$$

$$p_a = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (1.13)$$

$$p_a = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \omega_m \quad (1.14)$$

Hava aralığı gücü elektomekanik moment ve makina hızı arasındaki bağıntısıyla verilirse Denklem (1.15)'deki eşitliği almaktadır.

$$p_a = \omega_m T_e \quad (1.15)$$

Sonuç olarak Denklem (1.15) Denklem (1.14)'de yerine yazılırsa makinaya ait elektriksel moment eşitliği Denklem (1.16)'daki şekilde ifade edilebilmektedir.

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (1.16)$$

1.1.2. Klasik ARM'de moment üretimi

ARM sargı uçlarındaki gerilim Faraday Yasası'na göre, R_m motor sargı direnci, N sargı spir sayısı olmak üzere Denklem (1.17)'de ifade edilmektedir [2, 3].

$$V = i.R_m + N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (1.17)$$

$$\psi = N \cdot \phi \quad (1.18)$$

Denklem (1.18)'de verilen akı eşitliği, Denklem (1.17)'de yerine yazıldığında Denklem (1.19)'daki eşitliğe dönüşmektedir.

$$V = i.R_m + \frac{d\psi}{dt} \quad (1.19)$$

ARM faz sargısında oluşan akı, makinanın çift çıkık kutuplu yapısı ve manyetik doyma etkileri sebebiyle, rotor konum açısı (θ) ve motor akımının (i), fonksiyonu olarak değişmektedir [2, 3].

$$V = i.R_m + \frac{\partial \psi}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (1.20)$$

Denklem (1.20)'de verilen ifadede

$$\frac{\partial \psi}{\partial i} = L(\theta, i) \text{ Artan endüktansı}$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \theta} = K_b(\theta, i) \text{ Anlık zıt elektromotor kuvvetini ifade etmektedir.}$$

Denklem (1.19)'un her iki tarafı faz akımı ile çarpılarak Denklem (1.21)'de verilen anlık güç denklemi bulunur.

Anlık güç, sargılardaki omik kayıplar, toplam mekanik güç çıkışı ve manyetik alanda biriken enerjinin toplamına eşittir. Bu durumda Denklem (1.22)'deki ifade yazılabilmektedir.

$$V \cdot i = i^2 R_m + i \cdot \frac{d\psi}{dt} \quad (1.21)$$

$$i \cdot \frac{d\psi}{dt} = \frac{dW_m}{dt} + \frac{dW_f}{dt} \quad (1.22)$$

W_m , mekanik gücü, W_f manyetik alan enerjisini ifade etmektedir. Mekanik güç, moment ve hızın çarpımı olarak Denklem (1.23)'de ifade edilmektedir [2, 3].

$$\frac{dW_m}{dt} = T \cdot \omega \quad (1.23)$$

$$\frac{dW_m}{dt} = T \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (1.24)$$

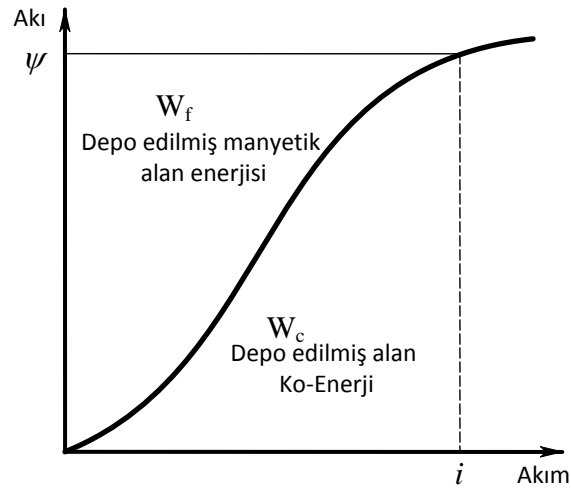
Denklem (1.24), Denklem (1.22)'de yerine yazılması durumunda Denklem (1.25)'de verilen eşitlik elde edilmektedir. Denklem çözülmesi durumunda moment Denklem (1.26)'daki şekilde ifade edilebilmektedir. Sabit akı durumunda moment eşitliği Denklem (1.27)'de verilen ifadeye dönüşmektedir.

$$i \cdot \frac{d\psi}{dt} = T \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{dW_f}{dt} \quad (1.25)$$

$$T(\theta, \psi) = i(\theta, \psi) \frac{d\psi}{dt} - \frac{dW_f(\theta, \psi)}{dt} \quad (1.26)$$

$$T = - \frac{dW_f}{dt} \quad (1.27)$$

Momentin Ko-Enerji cinsinden ifade edilebilmesi için Şekil 1.3'de verilen manyetik alanda akı-akım değişimi grafiğinin yorumlanması gerekmektedir. Sabit mil açısı için, $d\theta/dt = 0$, manyetik alan enerjisi Denklem (1.25)'den elde edilerek Denklem (1.28)'de ifade edilmektedir [2, 3].



Şekil 1.3. Manyetik alan akı-akım değişimi

$$W_f = \int_0^{\psi} i(\theta, \psi) d\psi \quad (1.28)$$

Sabit rotor açısı için, mıknatıslanma eğrisi, akıyı akımın bir fonksiyonu olarak tanımlamaktadır. Böylece akı, akım değişimi ile elde edilmektedir. Sabit rotor açısı için, eğrinin altında kalan alan manyetik alan ko-enerjisi olarak tanımlanmaktadır ve Denklem (1.29) ile ifade edilmektedir [2, 3].

$$W_c = \int_0^i \psi(\theta, i) di \quad (1.29)$$

$$W_c + W_f = i \cdot \psi \quad (1.30)$$

Her iki tarafın da türevi alınması durumunda,

$$dW_c + dW_f = \psi di + i d\psi \quad (1.31)$$

Denklem (1.31)'deki ifadenin diferansiyel çözümü Denklem (1.26)'da yerine konmasıyla Denklem (1.32)'de verilen moment ifadesi elde edilmektedir.

$$T = \frac{id\psi - (\psi di + i d\psi - dW_c(\theta, i))}{d\theta} \quad (1.32)$$

Denklem (1.32) genellikle sabit akım değerlerine göre sadeleştirilir. Diferansiyel ko-enerji kısmi türevlerine göre Denklem (1.33)'deki gibi yazılır. Bu durumda sabit akım da moment, Ko-Enerji cinsinden Denklem (1.34) de ifade edilmektedir.

$$dW_c(\theta, i) = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial W_c}{\partial i} di \quad (1.33)$$

$$T = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} \quad (1.34)$$

Makinanın çalışma esnasında doymanın ihmal edilmesi durumunda, akı ile akım arasındaki ilişki Denklem (1.35)'de ifade edilmektedir [2, 3].

$$\psi = L(\theta) \cdot i \quad (1.35)$$

Denklem (1.35)'de verilen eşitlik Denklem (1.29)'da yerine konmasıyla ko-enerji Denklem (1.36)'da verilen ifadeye eşit olmaktadır.

$$W_c = \frac{i^2}{2} L(\theta) \quad (1.36)$$

Denklem (1.36), Denklem (1.34)'de yerine yazılmasıyla moment ifadesi Denklem (1.16) ifadeye eşit olmaktadır.

1.1.3. Klasik ARM'de moment dalgalılığı-kalıplama ilişkisi

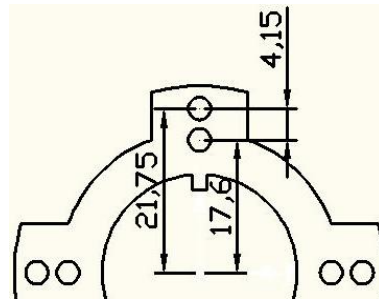
Şimdiye kadar literatürde gerçekleştirilen Klasik ARM analizlerinde rotor ve stator saçlarının kalıplama perçinlerine yer verilmemiştir. Oysa motorun kalıplanmasında kullanılan yöntemin, motorun momentini doğrudan etkilediği bilinmektedir. Analiz sonucu olumlu olan motorun, imalatında rastgele yapılan kalıplama nedeniyle elde edilen bu olumlu sonuçlar bozulabilir. Bu tez çalışmasında, rotor perçinlerinin ARM'lerin moment dalgalılığı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla tasarlanmış olan ARM'ye ait geometrik ölçüler Tablo 1.1'de verilmiştir. Makinanın genel ölçüleri "Matlab GUI Based SRM Design Program" ile elde edilmiştir [30].

Tablo 1.1. Teorik ARM'nin geometrik ölçüleri

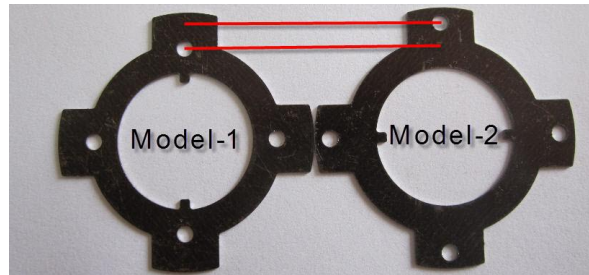
Sembolü	Değeri	Sembolü	Değeri
r_0	18.75 mm	y_s	13 mm
r_1	24.5 mm	y_r	5.75 mm
r_2	37 mm	d_s	12.00 mm
r_3	50 mm	d_r	5.75 mm
t_s	13.05 mm	β_r	30°
t_r	13.05 mm	β_s	30°
g	0.5 mm	Ld	40 mm

Bilindiği gibi manyetik alan problemlerinin çözümünde farklı sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Literatürde; Sonlu Elemanlar Yöntemi, Sonlu Farklar Yöntemi, Monte Carlo Yöntemi, Sınır Elemanları Yöntemi, Yük Benzetim Yöntemi gibi pek çok analiz yöntemi mevcuttur [31]. Yapılan araştırmada görülmüştür ki Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), en fazla kullanılan ve tercih edilen yöntemdir. Bunun nedeni; SEY ile gerçek motor parametreleri kullanılarak oluşturulan modeller üzerinde analizler yapılabilmesidir. Bu analizlerle motorun olası davranışı ve karakteristiği hakkında bilgi edinilebilmektedir [24].

Tez çalışmasında rotor kalıplamada perçin yerinin önemini ortaya koymak amacıyla, teorik olarak farklı kalıplama yerlerine sahip iki ARM modeli tasarlanmıştır. Bu iki model, rotor kutuplarındaki perçin yerlerinin rotor milinin sıfır noktasından rotor kutup başına kadar belirli adımlarla değiştirilmesiyle elde edilmiştir. SEY ile, her bir adımda ARM'nin akı dağılımları incelenmiştir. Akı dağılımlarının en uygun olduğu iki nokta seçilmiştir. Model-1 ve Model-2 olarak adlandırılan bu iki ARM farklı akımlarda analiz edilmiştir. Bu iki modele ait rotor perçin noktaları Şekil 1.4'de gösterilmektedir.



a)



b)

Şekil 1.4. Rotor perçin durumları; a) Rotor perçinleri arası uzaklık, b) Rotor saçları ve perçin noktaları

Analizler için öncelikle SEY’de ihtiyaç duyulan maksimum açı, akım değerleri ve bu değerlerin artış miktarları belirlenmelidir. Burada ilk aşama rotor adım açısının (θ_s) belirlenmesidir. Bu açıyla, mekanik olarak bir rotor kutup adımında her bir fazın iletimde kaldığı süre belirlenir [2-3].

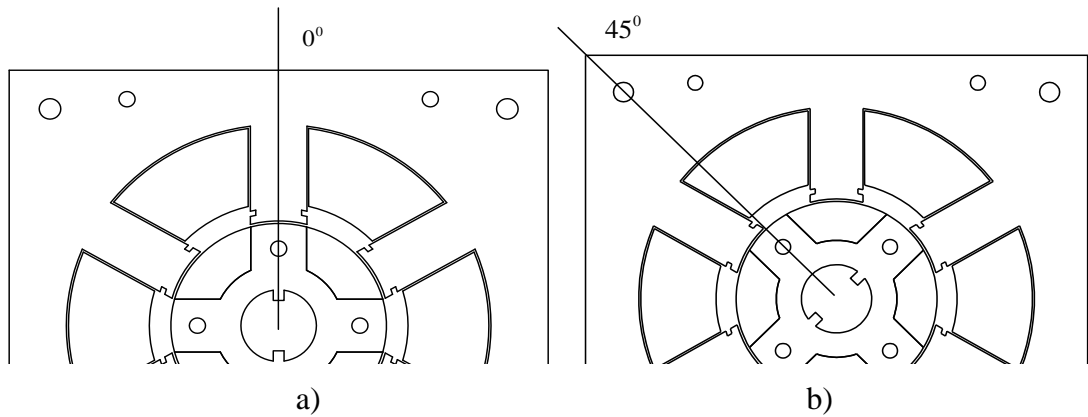
$$\theta_s = \frac{2\pi(N_s - N_r)}{N_s N_r} \quad (1.37)$$

Denklem (1.37)’deki ifadede değerler yerine konularak makineye ait her bir fazın 30° iletimde kalacağı tespit edilmiştir.

SEY analizi gerçekleştirilmeden önce akım, ve rotor konum açılarının belirlenmesi gerekmektedir. Rotor ve stator kutupları arasındaki maksimum açı Denklem (1.38)’de verilen ifade ile hesaplanmıştır. Maksimum açı, oluşturulan geometriye uygun olarak hesaplandığında 45° olarak elde edilmektedir.

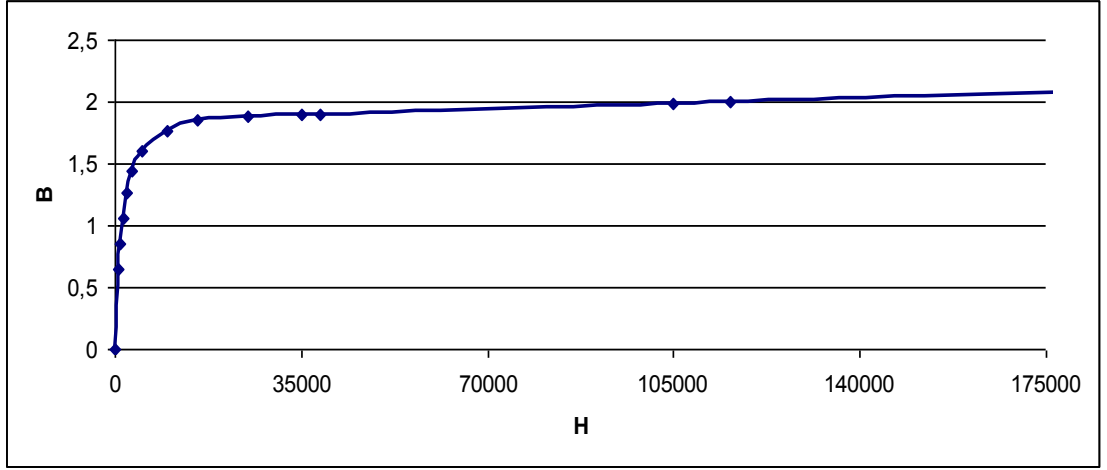
$$\text{Maksimum açı} = \frac{360}{2N_r} \quad (1.38)$$

Şekil 1.5-a’da rotor ve stator kutuplarının çakışık olduğu konum, Şekil 1.5-b’de rotor ve stator kutupları arasında maksimum açı olması durumundaki konum görülmektedir.



Şekil 1.5. Rotor ve Stator kutuplarının açı konumları; a) Çakışık konum, b) Maksimum açı konum

SEY analizlerinde kullanılan M19 saç malzemeye ait B-H karakteristiği Şekil 1.6’da gösterilmiştir.



Şekil 1.6. M19 saç malzemeye ait B-H karakteristiği

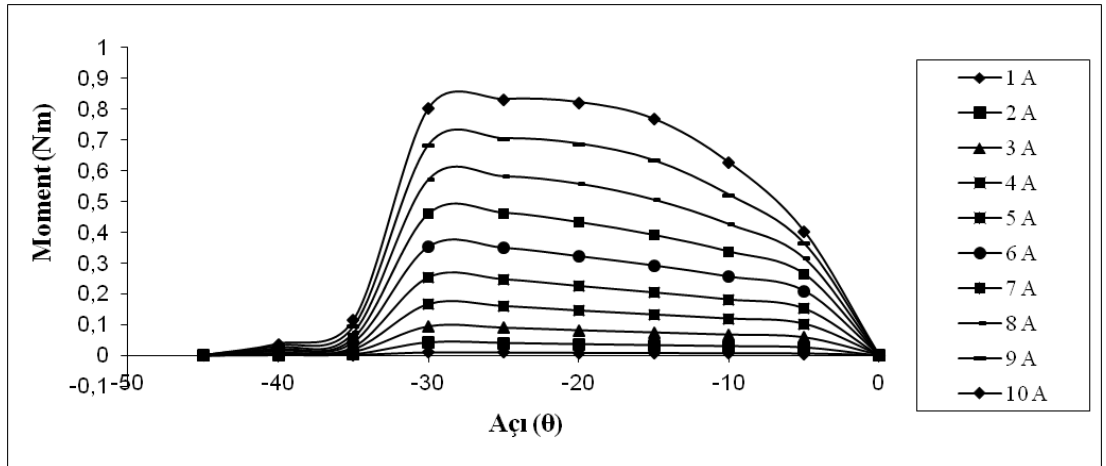
Analizlerden elde edilen değerlerin, motor derinliğine ve sargı spir sayısına göre dönüştürülmeleri gerekir. Dönüştürme işleminde kullanılan matematiksel formüller Denklem (1.39), Denklem (1.40) ve Denklem (1.41)'de verilmektedir [28].

$$\text{Moment (SEY)} = \text{Moment(Maxwell)Motor(Derinlik)} \quad (1.39)$$

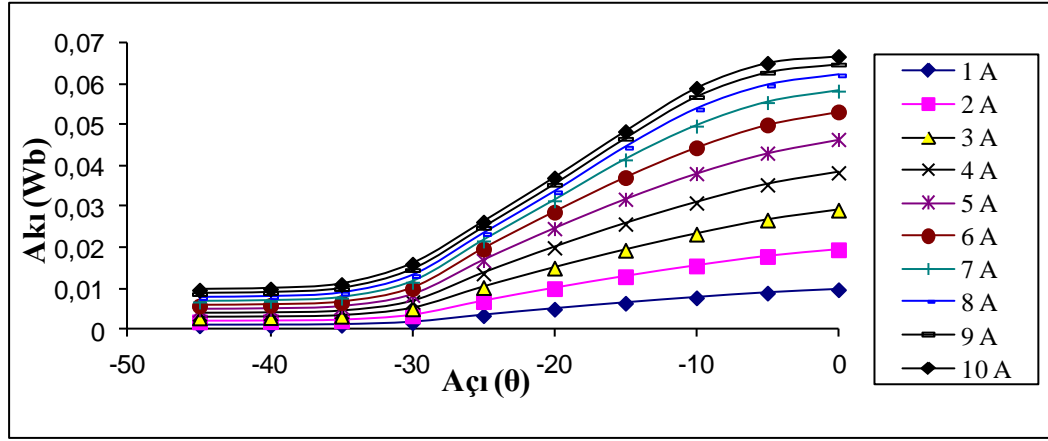
$$\text{Akı (SEY)} = \text{Akı (Maxwell)Motor(Derinlik)N}^2 \quad (1.40)$$

$$\text{Endüktans (SEY)} = \text{Endüktans(Maxwell)Motor(Derinlik)2N}^2 \quad (1.41)$$

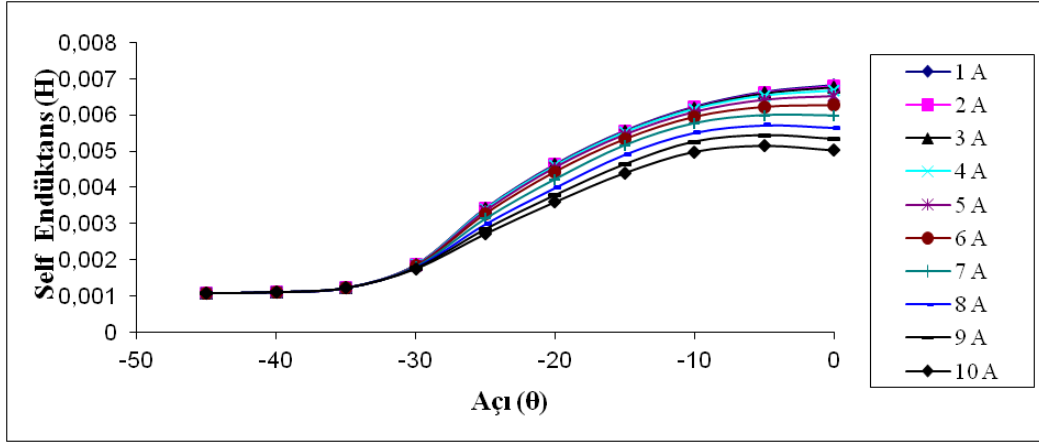
Önerilen ARM Model-1 için yapılan analizlerden elde edilen moment, akı, self endüktans eğrileri sırasıyla Şekil 1.7, Şekil 1.8, Şekil 1.9 ve Şekil 1.10'da görülmektedir. Şekil 1.11'de Model-1 e ait 10 Amper değerdeki akı dağılımı görülmektedir.



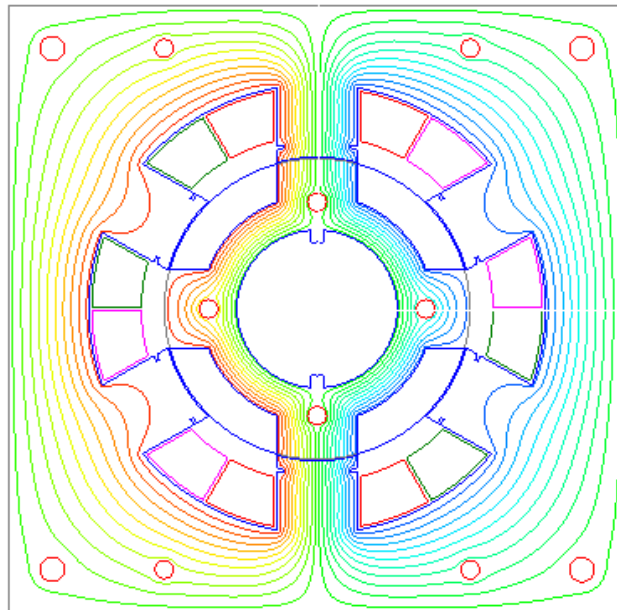
Şekil 1.7. ARM Model-1'in moment eğrisi



Şekil 1.8. ARM Model-1'in akı eğrisi



Şekil 1.9. ARM Model-1'in self endüktans eğrisi



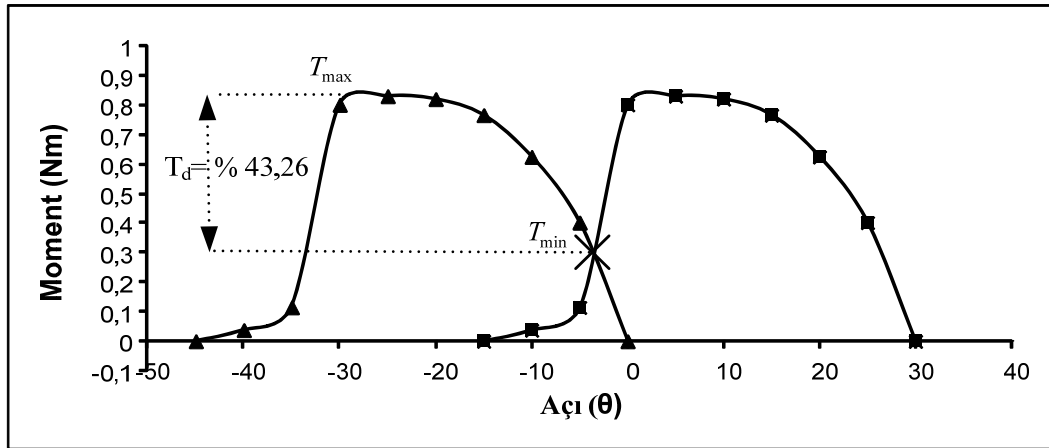
Şekil 1.10. ARM Model-1'in 10 amperde akı dağılımı

Moment dalgalılığı T_d oranı anlık moment değerinin maksimum ve minimum değerleri arasındaki farkın ortalama değere oranıyla bulunmaktadır [32-33]. Moment dalgalılık eşitliği Denklem (1.42)'de verilmektedir. Ortalama moment değeri Denklem (1.43)'de verilmektedir.

$$T_d = \frac{T_{ani(max)} - T_{ani(min)}}{T_{ort}} 100\% \quad (1.42)$$

$$T_{ort} = \frac{1}{T} \int_0^T T_{ani} . dt. \quad (1.43)$$

Şekil 1.11'de ARM Model-1'in 10 Amper akımdaki moment eğrisi görülmektedir. Moment dalgalılığı Denklem (1.42) ve Denklem (1.43)'de çözülmesiyle % 43,26 olarak elde edilmektedir.

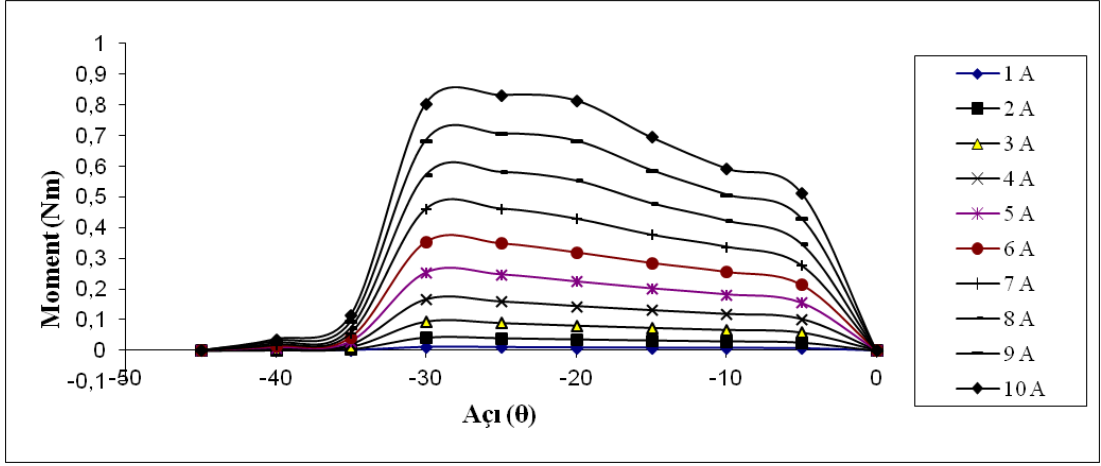


Şekil 1.11. ARM Model-1'in 10 amperde moment dalgalılığı

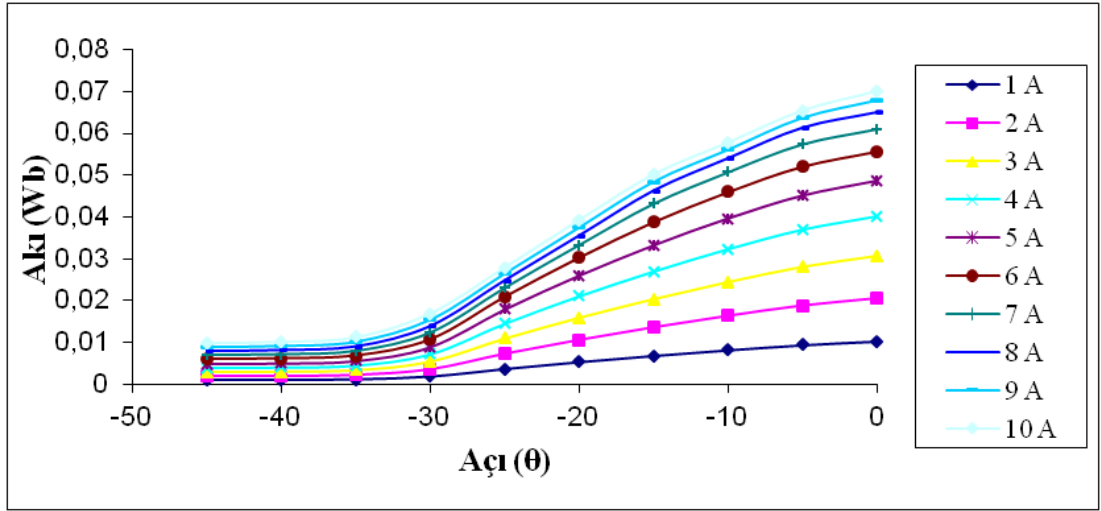
Önerilen ARM Model-2 için yapılan analizlerden elde edilen moment, akı, self endüktans eğrileri sırasıyla Şekil 1.12, Şekil 1.13 ve Şekil 1.14'de görülmektedir. Şekil 1.15'de Model-2 e ait 10 Amper değerdeki akı dağılımı görülmektedir.

Şekil 1.16'da ARM Model-2'in 10 Amper akımdaki moment eğrisi görülmektedir. Moment dalgalılığı Denklem (1.42) ve Denklem (1.43)'de çözülmesiyle % 40,7 olarak elde edilmektedir.

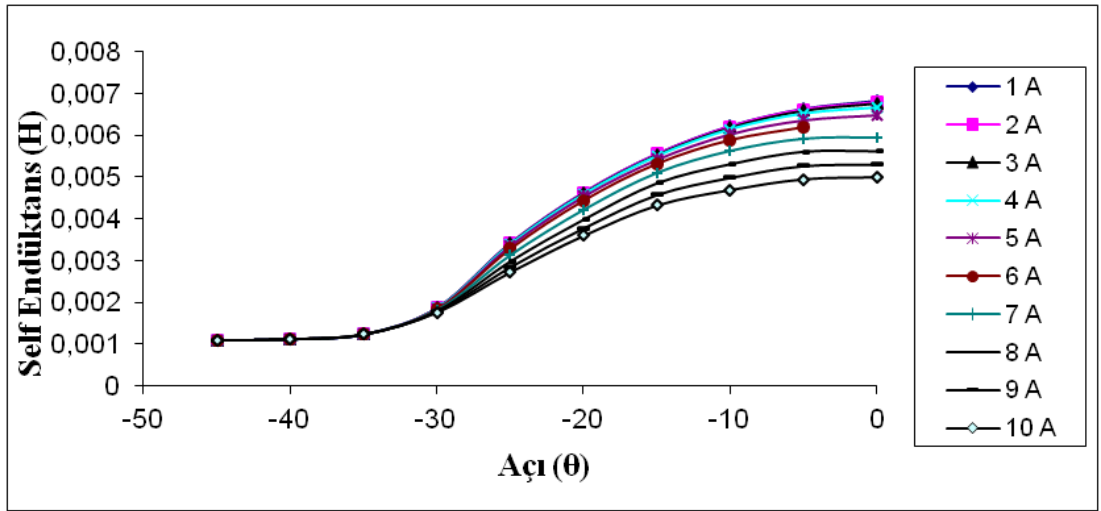
ARM Model-1 ve Model-2 için farklı akımlarda elde edilen sonuçlar ve iyileşme oranları Tablo 1.2'de görülmektedir.



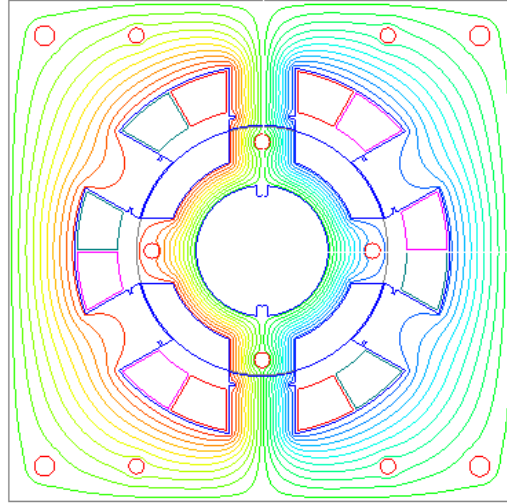
Şekil 1.12. ARM Model-2'nin moment eğrisi



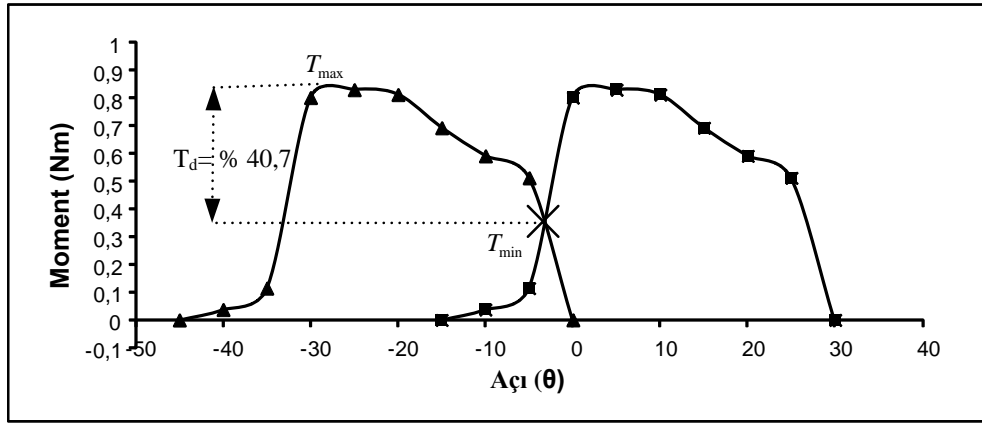
Şekil 1.13. ARM Model-2'nin akı eğrisi



Şekil 1.14. ARM Model-2'nin self endüktans eğrisi



Şekil 1.15. ARM Model-2'nin 10 amperde akı dağılımı



Şekil 1.16. ARM Model-2'in 10 amperde moment dalgalılığı

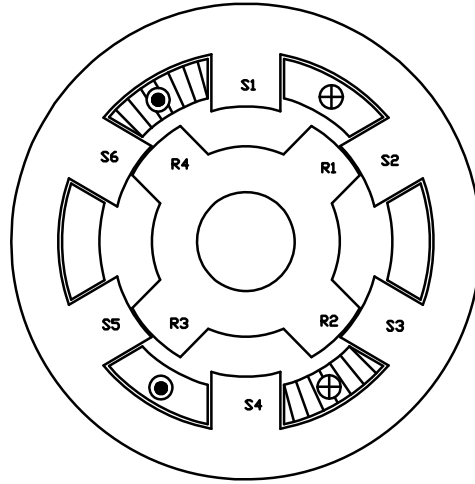
Tablo 1.2. ARM Model-1 ve Model-2 moment dalgalılık karşılaştırılması

Akım (Amper)	Model-1 % (T_d)	Model-2 % (T_d)	Moment dalgalılık iyileşme $\Delta \% T_d$
2	40,6	40,2	0,4
4	41,3	40,7	0,6
6	41,8	41,1	0,7
8	44,1	43,2	0,9
10	43,2	40,7	2,5

Analiz sonuçlarından Klasik ARM moment dalgalılığının, rotor kalıplama perçinlerinin rotor kutup başına yaklaştıkça daha düşük seviyelerde seyrettiği gözlenmiştir. Analizi yapılan Klasik ARM'nin akım değerine göre moment dalgalılığında %0,4 ila %2,5 arasında azalma olduğu tespit edilmiştir.

1.2. KKARM ve Çalışma Prensibi

KKARM'de sargılar; klasik ARM'deki kısa adım yerine tam adımlı olarak sarılarak oluşturulmaktadır. Başka bir deyişle faz sargıları, kutup boşluklarına, tam adım meydana getirecek şekilde yerleştirilmektedir. Bu sayede klasik ARM'nin tüm avantajlarına sahip olan KKARM daha fazla moment üretme yetisini de elde etmektedir [28]. Şekil 1.17 ve Şekil 1.18'de sırasıyla 6/4 KKARM'nin genel geometrisi, ve üç boyutlu sargı yapısı görülmektedir.



Şekil 1.17. 6/4 kutuplu KKARM genel geometrik yapısı



Şekil 1.18. 6/4 kutuplu KKARM üç boyutlu sargı yapısı [34]

KKARM'de moment; aktif olan fazların birbirine olan etkisi nedeniyle meydana gelen karşılıklı endüktansa bağlı olarak üretilmektedir [35]. Her bir fazın KKARM'nin ürettiği toplam momente katkısı 2/3 oranındadır. Bunun nedeni her bir fazın, elektriksel periyodun 2/3'ü oranında iletimde kalmasıdır [23]. Oysa Klasik ARM'de her bir faz üretilen momente 1/3 oranında katkıda bulunmaktadır. O halde KKARM elektriksel devreden Klasik ARM'ye nazaran iki kat daha fazla faydalanmaktadır [28]. Üç fazlı anahtarlamalı relüktans makinaları için genel moment ifadesi Denklem (1.44)'de verilmiştir [4].

$$T = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{\partial L_a}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{\partial L_b}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{\partial L_c}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_a i_b \frac{\partial M_{ab}}{\partial \theta} + i_b i_c \frac{\partial M_{bc}}{\partial \theta} + i_c i_a \frac{\partial M_{ca}}{\partial \theta} \quad (1.44)$$

KKARM'de moment, fazlar arasında değişen karşılıklı endüktansa bağlı olarak üretildiği için, özendüktanslar ihmal edilir [4]. Sonuç olarak KKARM'de moment Denklem (1.45) ile ifade edilir.

$$T = \frac{1}{2} i_a i_b \frac{\partial M_{ab}}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_b i_c \frac{\partial M_{bc}}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_c i_a \frac{\partial M_{ca}}{\partial \theta} \quad (1.45)$$

KKRAM'de çalışma prensibi gereği iki faz aynı anda devrede olacağından (a ve b fazlarının aktif olduğu varsayılınsın, i_a ve i_b aktif, i_c pasif olsun) KKARM için moment ifadesi Denklem (1.46)'daki şeklini alır.

$$T = \frac{1}{2} i_a i_b \frac{\partial M_{ab}}{\partial \theta} \quad (1.46)$$

Klasik ARM'de ise moment; sadece aktif olan fazın öz endüktansı sayesinde üretilmekte ve makinanın elektriksel devresinden daha az faydalanılmaktadır. Karşıt endüktansların ihmal edilmesiyle klasik ARM'ler için genel moment ifadesi Denklem (1.47) deki şekilde ifade edilmektedir.

$$T = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{\partial L_a}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{\partial L_b}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{\partial L_c}{\partial \theta} \quad (1.47)$$

Fazlara ait self endüktans (L) Denklem (1.48) ile ifade edilmektedir. Burada L_i kaçak endüktans, N her bir faza ait sarım sayısı, α makine aksiyal uzunluğu, G hava aralığı

uzunluğunu ve β_L akımın akacağı fazın oluşturacağı akı yolu üzerindeki stator ve rotor kutup örtüşme uzunluğunu ifade etmektedir [4, 24].

$$L_{faz} = L_l + \mu_0 \frac{N^2 \alpha \beta_L}{2G} \quad (1.48)$$

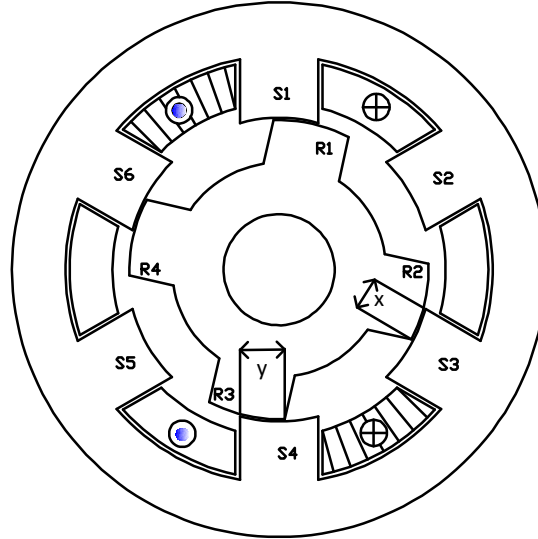
Fazlar arasında oluşan karşılıklı endüktans öz endüktansla benzer olarak Denklem (1.49) ifade edilmektedir.

$$M_{ab} = \mu_0 \frac{N^2 \alpha \beta_M}{2G} \quad (1.49)$$

β_M akımın akacağı fazın oluşturacağı akı yolu üzerindeki stator ve rotor kutup örtüşme farkını ifade etmektedir Şekil 1.19'da self ve karşıt endüktans hesaplanması yaklaşık örtüşen dış uzunluğu verilmektedir. Denklem (1.50)'de β_M , Denklem (1.51)'de β_L ifadeleri verilmektedir.

$$\beta_L = x + y \quad (1.50)$$

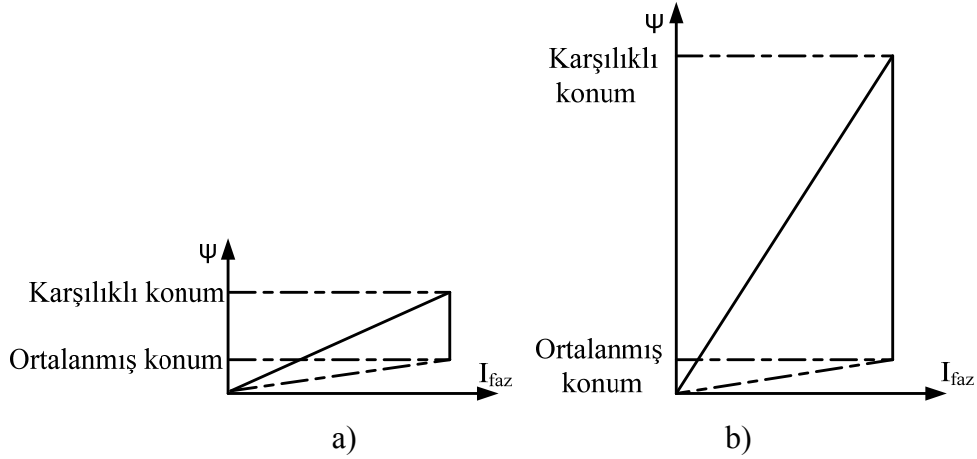
$$\beta_M = x - y \quad (1.51)$$



Şekil 1.19. Stator-rotor kesişen kutup başları

Makine tarafından üretilen moment, akı ile de doğrudan orantılıdır. Şekil 1.20'de Klasik ARM ve KKARM'nin ürettiği akıların karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 1.20'den anlaşıldığı üzere KKARM, Klasik ARM'nin etkin fazı tarafından üretilen

akımın dört katını üretmektedir. Eşit şartlarda karşılaştırma yapılabilmesi için bu akı üretiminin eşit bakır kayıplarında karşılaştırılması gerekmektedir. Bu durumda KKARM'nin, Klasik ARM'den iki kat daha fazla akı ürettiği görülmektedir. Fakat manyetik doyum sebebiyle moment üretimindeki artış %20-%30 oranlarında kalmaktadır [28, 4].



Şekil 1.20. Akı üretimi; a) Klasik ARM, b) KKARM [4]

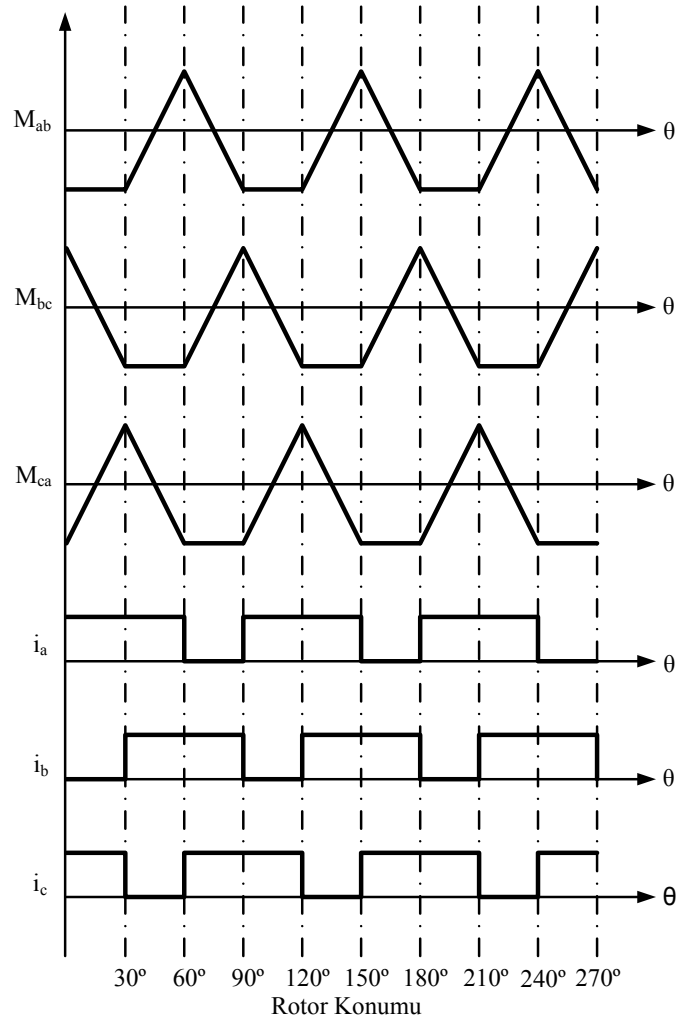
1.2.1. KKARM uyarma yöntemleri

Literatüre göre KKARM'lerin uyarılmasında üç farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler tek yönlü uyarma, çift yönlü uyarma ve çift yönlü, üç fazlı uyarıdır. Uyarma yöntemine göre KKARM'nin ürettiği moment ve ortalama çıkış momenti değişmektedir.

1.2.1.1. KKARM'nin tek yönlü uyarılması

Şekil 1.21'de tek yönlü uyarılan KKARM'nin akım ve karşılıklı endüktans profili verilmiştir.

6/4 kutuplu KKARM'de adım açısı 30° 'dir. Her bir faz 60° iletimde 30° kesimde kalmaktadır. Diğer bir ifadeyle her bir faz, periyodunun $2/3$ 'ü kadar süre devrede kalmaktadır. Tek yönlü uyarımda herhangi bir anda KKARM'deki faz akımları aynı yönlüdür. O halde Denklem (1.46)'a istinaden pozitif moment üretmek için, karşılıklı endüktansın rotor konumuna göre türevi pozitif olmalıdır. Bu nedenle tek yönlü uyarılan KKARM'nin pozitif moment üretimi, karşılıklı endüktansın yükseldiği bölgede meydana gelmektedir [4, 24].



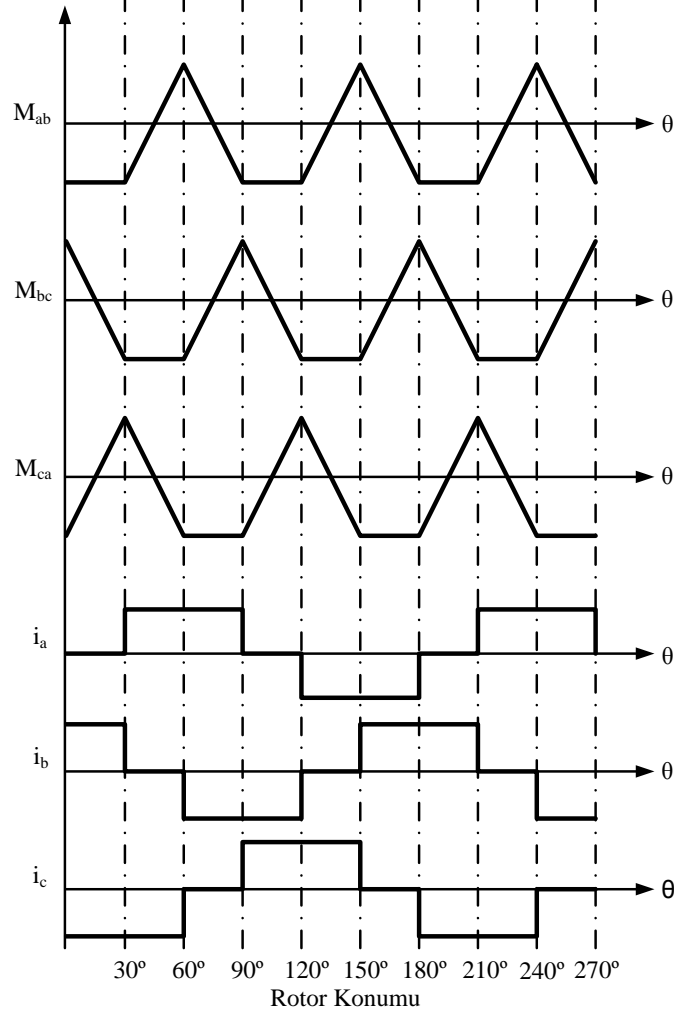
Şekil 1.21. Tek yönlü uyarılan KKARM'nin akım ve karşılıklı endüktans profili [7]

1.2.1.2. KKARM'nin çift yönlü uyarılması

Şekil 1.22'de çift yönlü uyarılan KKARM'nin, akım ve karşıt endüktans profili verilmiştir.

Her bir faz 60° iletimde, 30° kesimde ve 60° ters polariteli olarak periyodunu tamamlamaktadır. Çift yönlü uyarımda herhangi bir anda KKARM'deki faz akımları farklı yönlüdür. İletimde olan fazlardan biri pozitif diğeri negatif akım taşımaktadır. O halde Denklem (1.46)'a istinaden pozitif moment üretmek için karşılıklı endüktansın rotor konumuna göre türevi negatif olmalıdır. Çift yönlü uyarılan

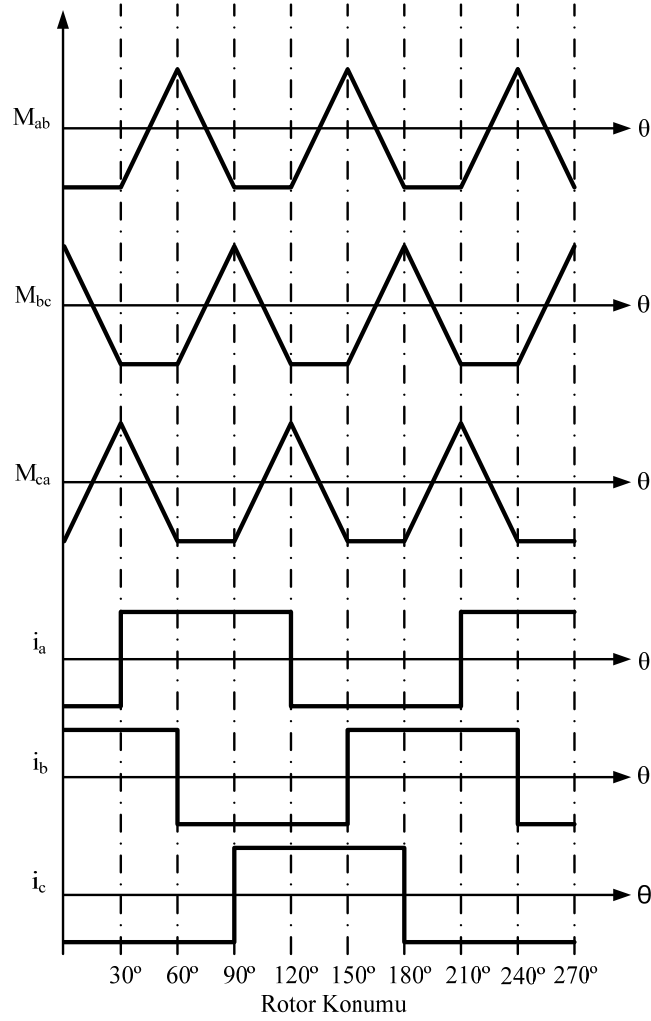
KKARM'nin pozitif moment üretimi, karşılıklı endüktansın azaldığı bölgede meydana gelmektedir [4, 24].



Şekil 1.22. Çift yönlü uyarılan KKARM'nin akım ve karşılıklı endüktans profili [7]

1.2.1.3. KKARM çift yönlü üç fazlı uyarılması

Şekil 1.23'de çift yönlü, üç fazlı uyarılan KKARM'nin akım ve karşıt endüktans profili verilmiştir. Her bir faz 90° pozitif 90° negatif polariteli olarak periyodunu tamamlamaktadır. Çift yönlü, üç fazlı uyarda herhangi bir anda KKARM'deki faz akımları üç faz da aktif olduğundan moment üretimine birlikte katkıda bulunur. Pozitif moment üretimi karşılıklı endüktansın rotor konumuna göre türevinin hem negatif hem pozitif olduğu durumda da elde edilebilmektedir [4].



Şekil 1.23. Çift yönlü, üç fazlı uyarılan, KKARM akım-karşı endüktans profili [7]

1.2.2. KKARM’de moment dalgalılığı-kalıplama ilişkisi

Bu kısımda, KKARM’de moment dalgalılığının rotor perçin yerlerine göre oldukça değiştiğini; bu yerlerin motorun verimi üzerine doğrudan etki yaptığını ispatı amacıyla, daha önce Klasik ARM için gerçekleştirilen teorik çalışma KKARM için de gerçekleştirilmiştir. Daha önce Tablo 1.1’de ölçüleri verilen Klasik ARM, motorun geometrik yapısı aynı kalmak şartıyla, sargılarında yapılan bir değişikliklerle KKARM’ye dönüştürülmüştür. Klasik ARM’de kullanılan rotor perçin yerlerinin farklı olduğu iki model KKARM için de analiz edilmiştir.

Burada analizler yapılırken dikkat edilmesi gereken bir nokta mevcuttur. KKARM’de her zaman en az iki faz iletimde olduğundan, bakır kayıpları Klasik ARM’ye göre daha yüksektir. Klasik ARM ile KKARM’nin moment dalgalılıklarını

analiz ederken eşit bakır kaybı şartları oluşturulmalıdır. Bu nedenle KKARM'nin bakır kayıp denklemlerinde düzenlemeler yapmak gerekir [21]. Klasik ARM ve KKARM için bakır kayıpları sırasıyla Denklem (1.52) ve Denklem (1.53)'de gösterilmiştir. Klasik ARM 'k' (klasik) KKARM ise 'kk' (karşıt kuplaj) olarak sembolize edilmiştir [21].

$$P_k = \frac{1}{3} i_k^2 R_k \quad (1.52)$$

$$P_{kk} = \frac{2}{3} i_{kk}^2 R_{kk} \quad (1.53)$$

KKARM nin faz direncinin, klasik ARM'nin faz direncinden %60 oranında daha yüksek olduğu bilinmektedir.

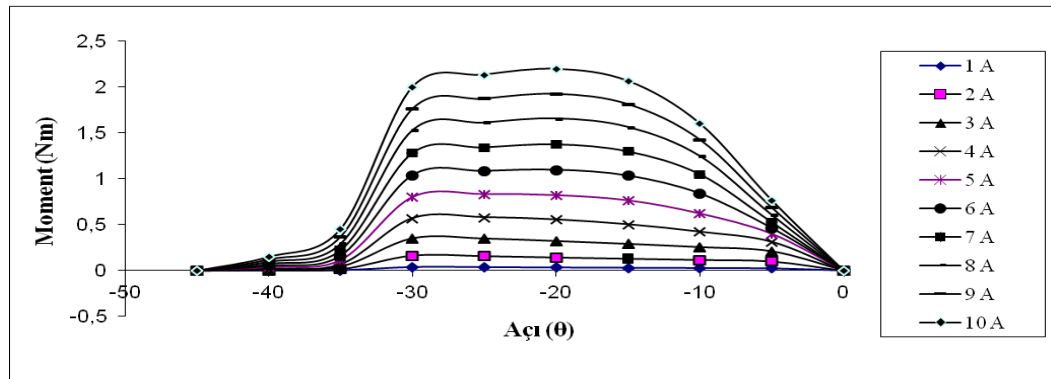
$$R_{kk} = 1,62R_k \quad (1.54)$$

Buradan Klasik ARM ve KKARM'nin eşit bakır kayıplarında karşılaştırılabilmesi için gerekli eşitlik elde edilmiş, Denklem (1.55)'de verilmiştir [21].

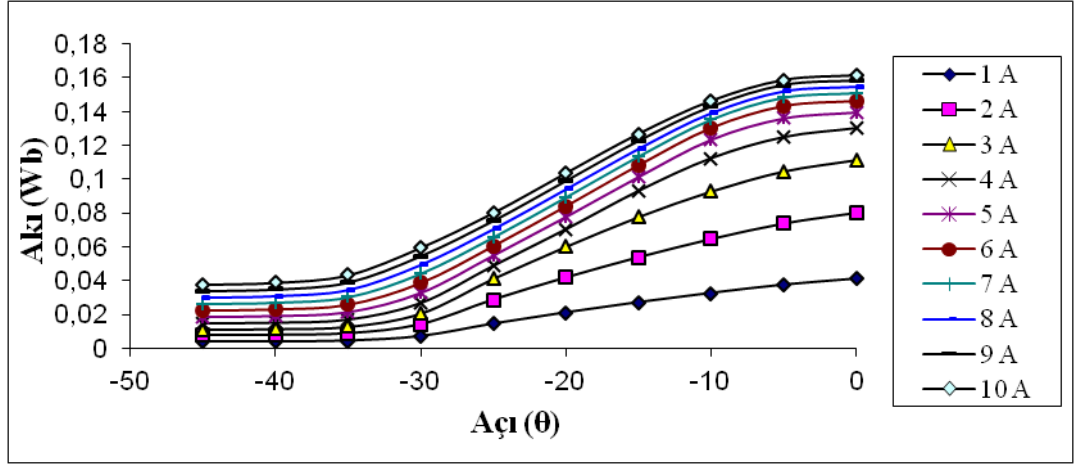
$$i_{kk} = 0,559i_k \quad (1.55)$$

Şekil 1.24, Şekil 1.25 ve Şekil 1.26'de sırasıyla Model-1 analizinden elde edilen KKARM moment, akı, karşılıklı endüktans eğrileri görülmektedir. Şekil 1.27'de Model-1 e ait 6 Amper değerdeki akı dağılımı görülmektedir.

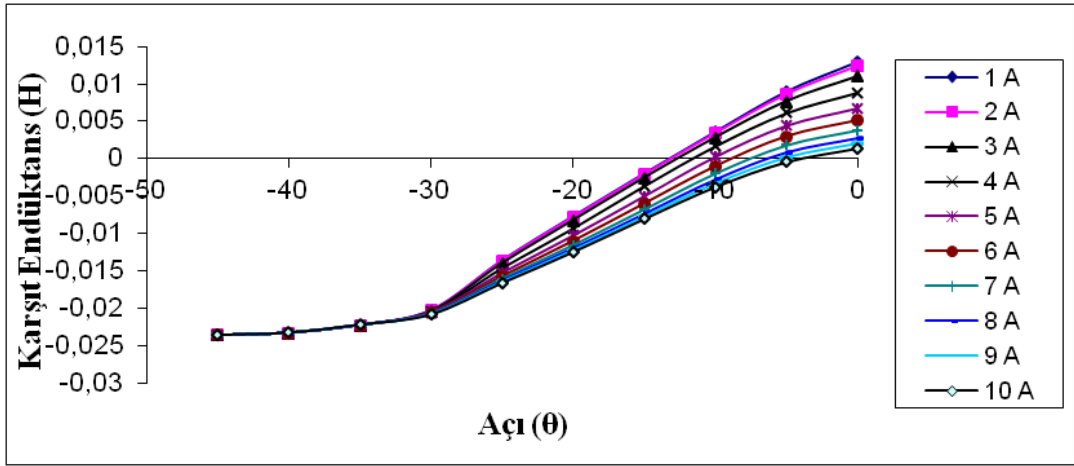
Analizlerden elde edilen ham sonuçlar Denklem (1.39), Denklem (1.40) ve Denklem (1.41)'e göre işlemden geçirildiğine dikkat edilmelidir.



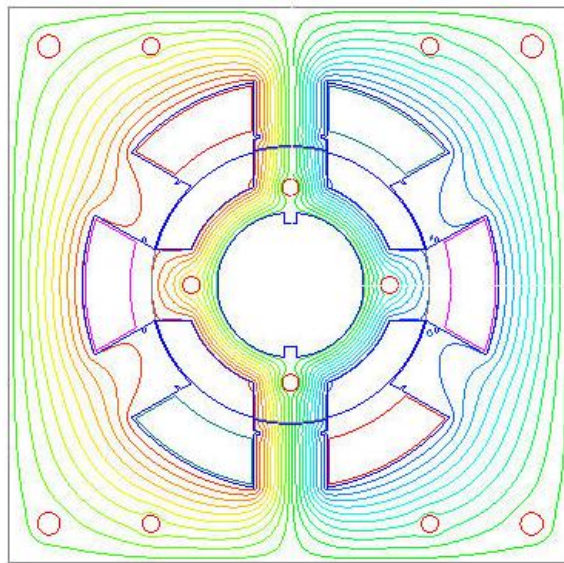
Şekil 1.24. KKARM Model-1'in moment eğrisi



Şekil 1.25. KKARM Model-1'in akı eğrisi

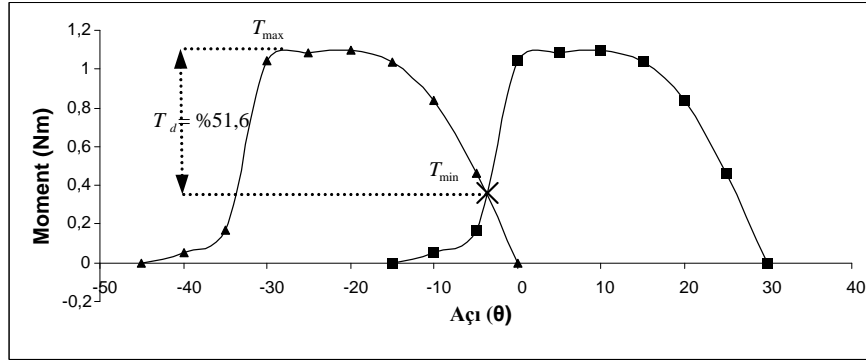


Şekil 1.26. KKARM Model-1'in karşıt endüktans eğrisi



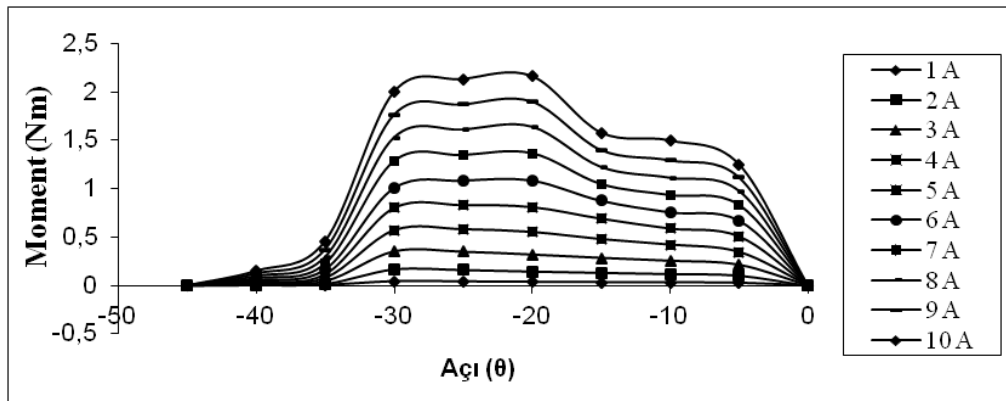
Şekil 1.27. KKARM Model-1'in 6 amperde akı dağılımı

Şekil 1.28’de KKARM Model-1’in 6 Amper moment eğrisi görülmektedir. Moment dalgalılığı Denklem (1.42) ve Denklem (1.43)’de çözülmesiyle % 51,6 olarak elde edilmektedir.

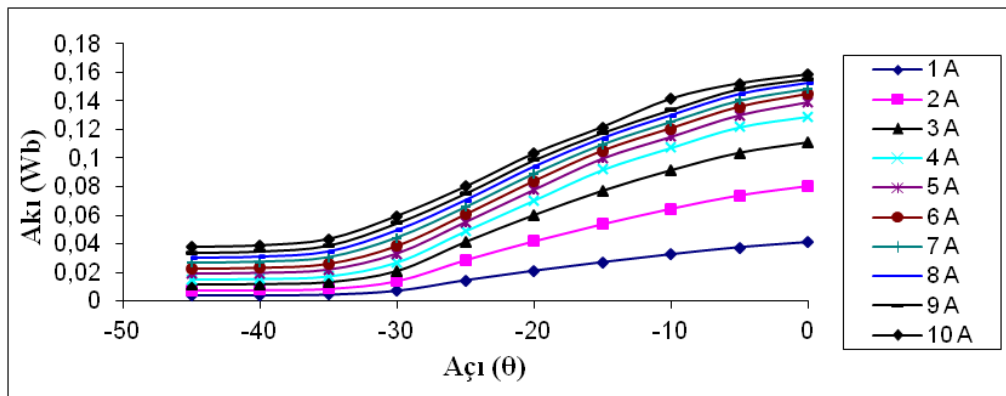


Şekil 1.28. KKARM Model-1'in 6 amperde moment dalgalılığı

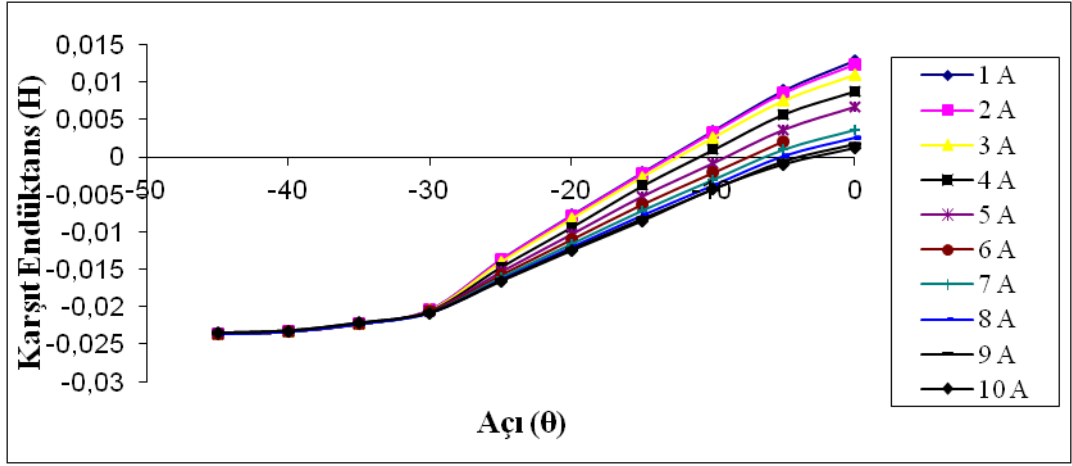
Önerilen Model-2 için yapılan analizlerden elde edilen moment, akı, karşılıklı endüktans eğrileri sırasıyla Şekil 1.29, Şekil 1.30 ve Şekil 1.31’de görülmektedir. Şekil 1.32’de Model-2 e ait 6 Amper değerdeki akı dağılımı görülmektedir.



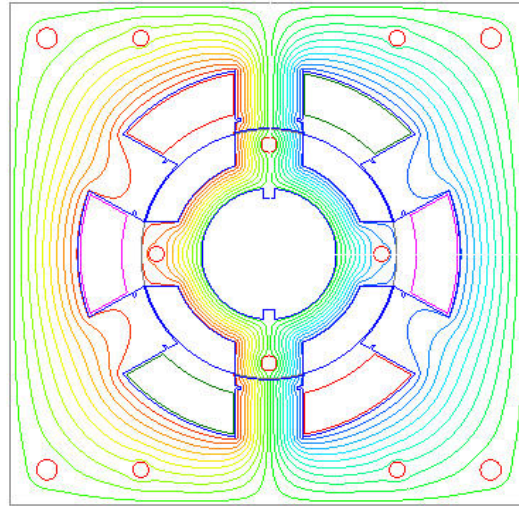
Şekil 1.29. KKARM Model-2'nin moment eğrisi



Şekil 1.30. KKARM Model-2'nin akı eğrisi

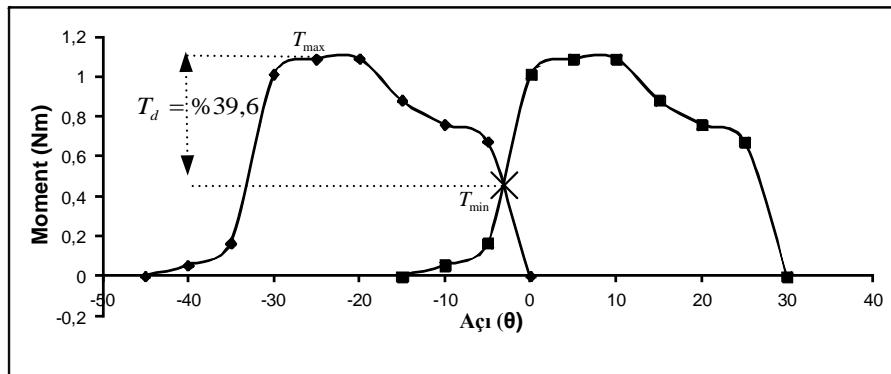


Şekil 1.31. KKARM Model-2'nin karşıt endüktans eğrisi



Şekil 1.32. KKARM Model-2'nin 6 amperde akı dağılımı

Şekil 1.33'da KKARM Model-2'in 6 Amper akımdaki moment dalgalılığı Denklem (1.42) ve Denklem (1.43)'de çözülmesiyle % 39,6 olarak elde edilmektedir.



Şekil 1.33. KKARM Model-2'in 6 amperde moment dalgalılığı

Model-1 ve Model-2'nin statorları tamamen aynı yapıdadır. Sadece rotor perçin noktaları değiştirilmiştir. Şekil 1.4'de perçin merkezleri arasındaki uzaklık 4,15 mm dir. Sonuç olarak Model 1 ve Model 2 nin moment tepe değerlerinde çok büyük bir değişiklik olmadığı söylenebilir. Ancak Model-2 de moment eğrisinde düşme anında bozulmalar olduğu açıktır. Bununla birlikte moment sürekliliği durumunda bu düşüş önemli değildir. Moment dalgalılığı Model 1 de % 51,6 iken Model 2 de % 39,6 a düşmüştür. Perçinlerin rotor kutup başına yaklaştırılmasıyla moment dalgalılığında % 12 azalma gerçekleşmiştir. Tablo 1.3'de de KKARM için farklı akımlarda elde edilen sonuçlar ve iyileşme oranları görülmektedir.

Tablo 1.3. KKARM Model-1 ve Model-2 moment dalgalılık karşılaştırılması

Akım (Amper)	Model-1 % (T_d)	Model-2 % (T_d)	Moment dalgalılık iyileşme $\Delta \% T_d$
2	39,5	36,4	3,1
4	42,6	37,4	5,2
6	51,6	39,6	12,0
8	57,2	40,1	17,1
10	52,6	38,4	14,2

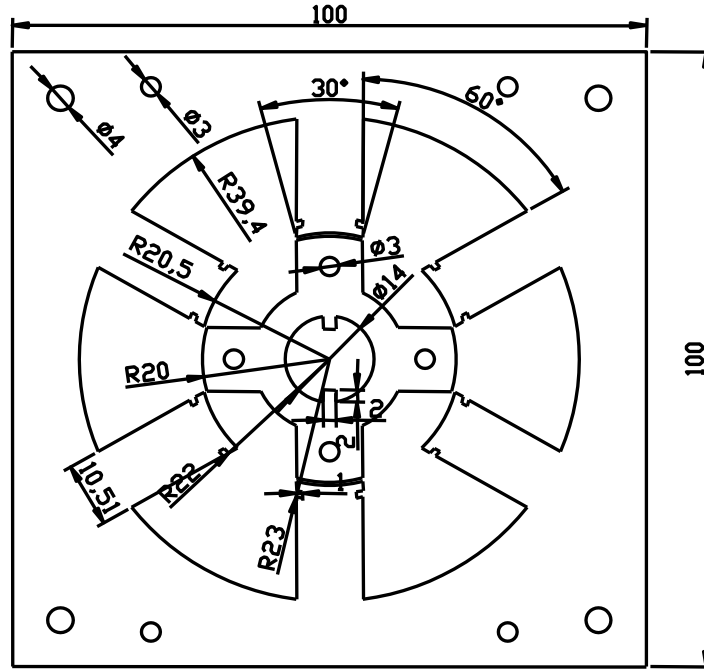
Analiz sonuçlarından KKARM moment dalgalılığının, tıpkı Klasik ARM'de olduğu gibi, rotor kalıplama perçinlerinin rotor kutup başına yaklaştıkça daha düşük seviyelerde seyrettiği gözlenmiştir. Analizi yapılan KKARM'nin akım değerine göre moment dalgalılığında %3,1 ila %17,1 arasında azalma olduğu tespit edilmiştir. KKARM'nin moment dalgalılığında iyileşmenin; Klasik ARM'ye oranla yüksek olduğu analizler sonucunda gözlenmiştir. Elde edilen dikkate değer sonuçlar literatürde kabul görmüş ve yayınlanmıştır [36, 37].

1.3. Prototip KKARM

Bu kısımda tez çalışmasında kullanılan prototip KKARM'nin mekanik tasarım ve analizi açıklanmıştır.

1.3.1. Mekanik tasarım

KKARM ve ARM aynı geometrik yapıya sahiptir. Şekil 1.34'de prototip KKARM'ye ait geometrik yapısı ve ölçülendirme görülmektedir. Makinanın genel ölçüleri "Matlab GUI Based SRM Design Program" ile elde edilmiştir [30].



Şekil 1.34. Prototip KKARM'nin geometrik ölçüleri

Tez çalışmasında kullanılan makinenin geometrik parametreleri tablo 1.4'de verilmektedir. Ölçülendirmede SI (Uluslararası Ölçüm Sistemi) birim sistemi kullanılmıştır. Mekanik tasarımda, sargılar yerleştirilmeden önce klasik ARM-KKARM ayrımı yapılamaz. Ancak makinenin analizinde sargılar çizilmiş ve gerekli tanımlamalar yapılmış artık makine KKARM'ye dönüştürülmüştür. Analizlerden gerçeğe en yakın sonuçların alınabilmesi için rotor ve stator üzerinde bazı modifikasyonlara ihtiyaç duyulmuştur. Bunlar; stator ve rotor saçlarının paketlenmesi için perçinlerin eklenmesi, sargı kapakları için yuvaların açılması, statorun gövde içine montajı için tutma kanallarının belirlenmesi vb. düzenlemelerdir. Literatürden tespit edildiği üzere bu düzenlemeler pek çok çalışmada ihmal edilmiştir. Tez kapsamında; bu ayrıntıların moment performansına etkileri incelenmiş, böyle bir makinenin analizinde bunların büyük öneme sahip olabileceği tespit edilmiştir.

Tablo 1.4. Prototip KKARM'nin geometrik ölçüleri ve parametreler

Parametrenin Adı	Sembolü	Değeri
Stator çapı	D_s	100 mm
Rotor çapı	D_r	20 mm
Motor derinliği	L_d	40 mm
Hava aralığı	g	0.5 mm
Stator kutup genişliği	t_s	10.51 mm
Rotor kutup genişliği	t_r	10.35 mm
Stator kutup yüksekliği	d_s	18,9 mm
Rotor kutup yüksekliği	d_r	8,5 mm
Stator boyunduruk kalınlığı	y_s	10.6 mm
Rotor boyunduruk kalınlığı	y_r	4.5 mm
Rotor boyunduruk yarıçapı	r_0	12 mm
Rotor kutup yarıçapı	r_1	20 mm
Stator iç boyunduruk yarıçapı	r_2	39,4 mm
Stator dış boyunduruk yarıçapı	r_3	50 mm
Motor mil yarıçapı	r_{sh}	7 mm
Stator kutup açısı	β_s	30^0
Rotor kutup açısı	β_r	30^0

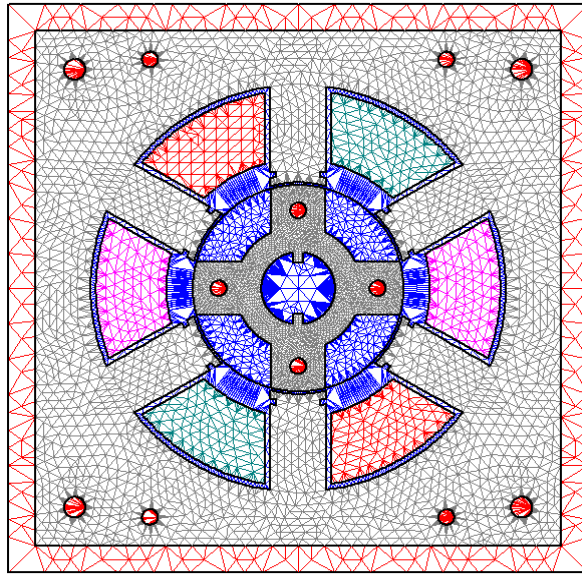
1.3.2. Analiz

Bu tez çalışmasında, prototip KKARM'nin farklı akımlarda, moment, akı ve endüktans değişimleri SEY yardımıyla incelenmiştir.

Tablo 1.5. SEY analizinde kullanılan akım ve rotor konum değerleri

KKARM		
Değişken	Rotor Konum (Derece)	Akım (Amper)
Minimum	0	0
Maksimum	45	10
Artış	5	1
İterasyon	10	10
Toplam	100	100

Şekil 1.35'te prototip KKARM'nin analizi için oluşturulan ağ (mesh) yapısı görülmektedir. Burada, SEY ile magnetik akı yoğunlunun sayısal çözümünü elde etmek için oluşturulan bölgeler, sonlu küçük elemanlardan oluşan ağ ile örülmüştür. Bu yöntemde, bölgenin sonlu bölünmesinde kullanılan elemanların boyutları ve biçimleri değişkenlik gösterebilir. İki boyutlu problemlerde sonlu bölünme; üçgen, kare veya dikdörtgen ile gerçekleştirilmektedir [24].



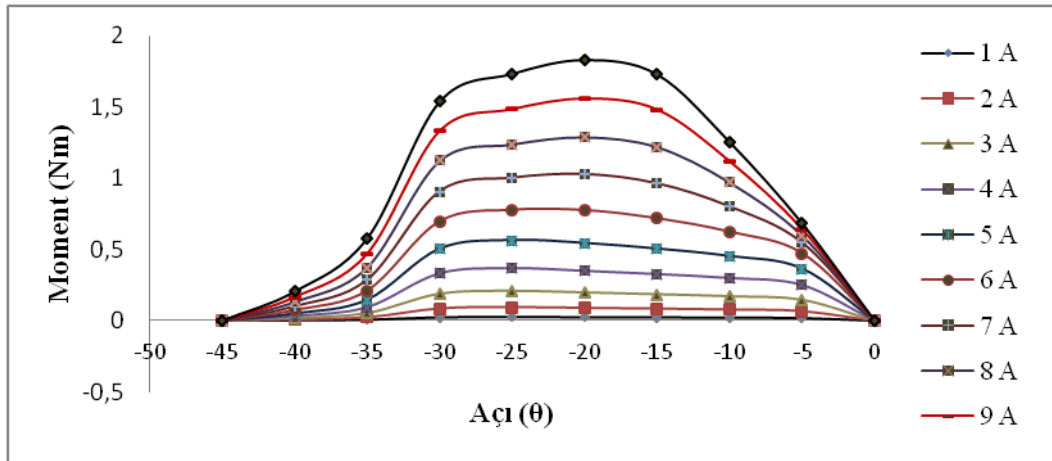
Şekil 1.35. KKARM ağ yapısı

Bu çalışmada ağ, üçgen elemanlarla örülmüştür. Ağ örülürken manyetik akı çizgilerinin yoğun olduğu bölgelerin iyi modellenmesi gereklidir. Bu nedenle stator kutup başı ve rotor üzerinde bölünmeler artmaktadır. Şekil 1.35’de bu noktadaki elemanların çok sayıda ve sık oldukları görülmektedir.

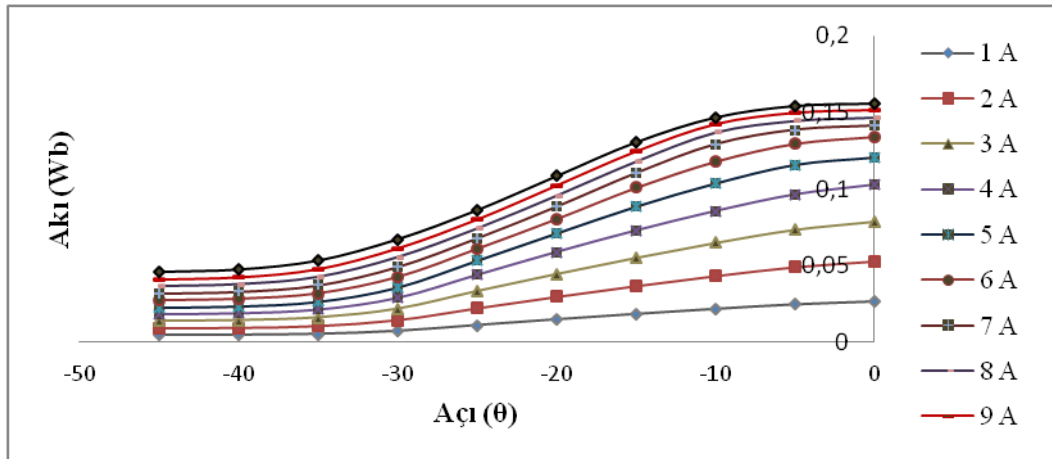
1.3.3. Sonuçlar

Analizden elde edilen değerlerin, motor derinliğine ve sargı spir sayısına göre dönüştürülmeleri gerekir. Dönüştürme işleminde kullanılan matematiksel formüller Denklem (1.39), Denklem (1.40) ve Denklem (1.41)’de verilmektedir [28].

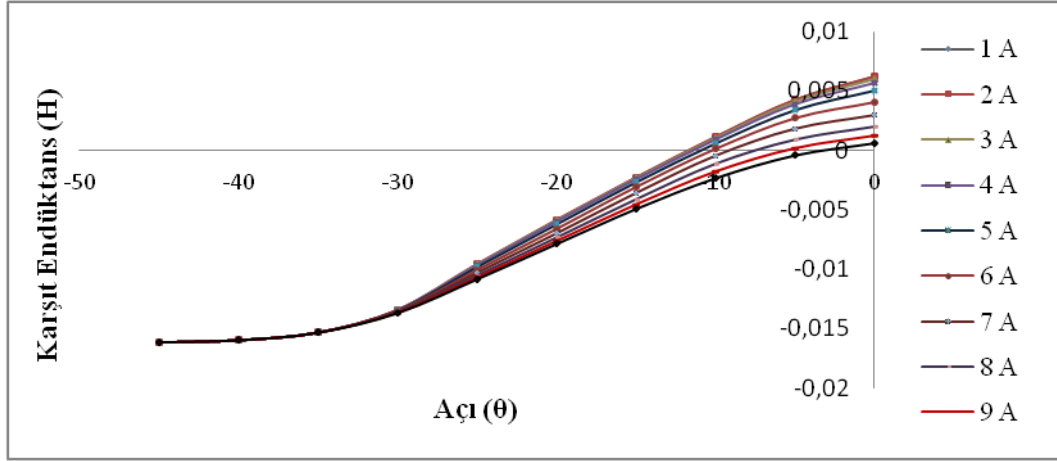
Şekil 1.36, Şekil 1.37 ve Şekil 1.38’de sırasıyla analizden elde edilen moment, akı, karşıt endüktans eğrileri görülmektedir. Şekil 1.39’da prototip KKARM’nin 6 amperde akı dağılımı görülmektedir.



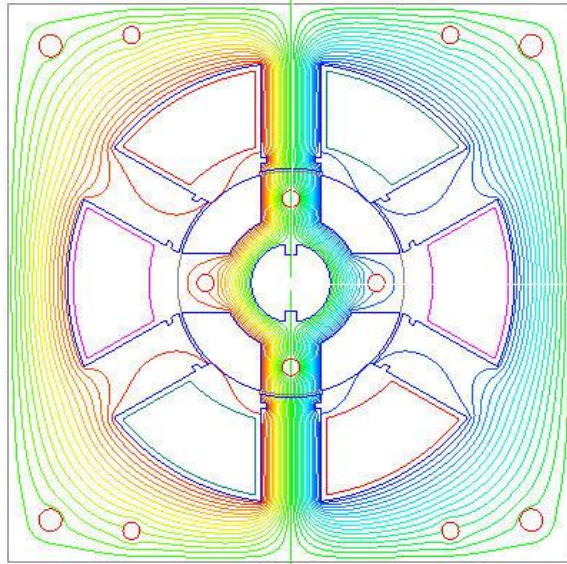
Şekil 1.36. Prototip KKARM'nin moment eğrisi



Şekil 1.37. Prototip KKARM'nin akı eğrisi



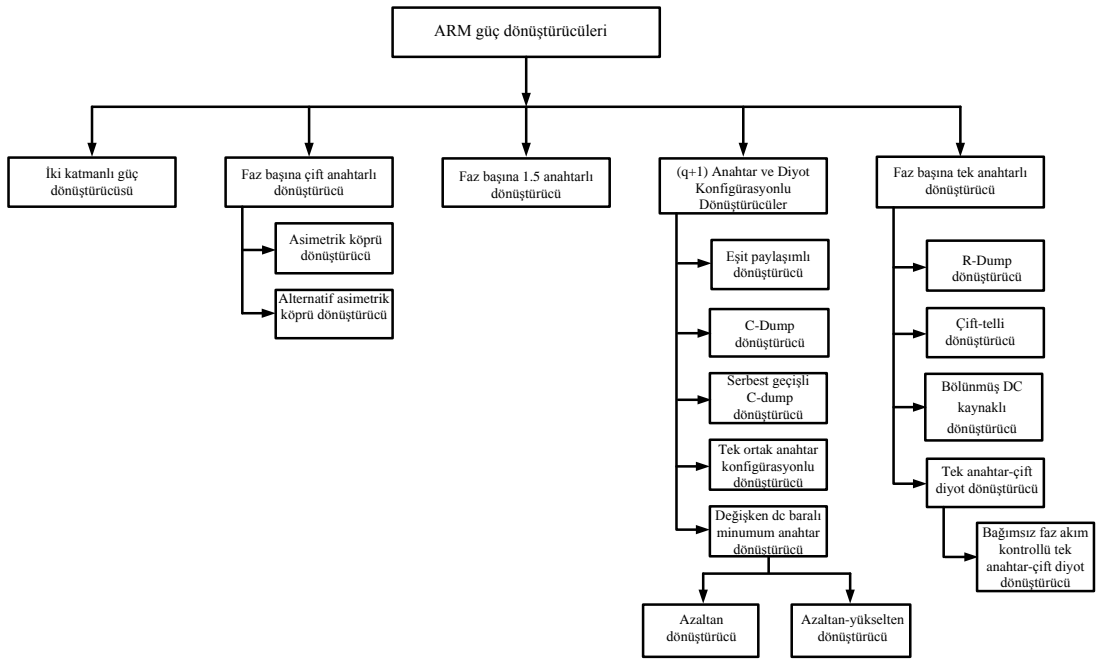
Şekil 1.38. Prototip KKARM'nin karşıt endüktans eğrisi



Şekil 1.39. Prototip KKARM'nin 6 amperde akı dağılımı

2. ARM DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİ

ARM'nin denetim yöntemini belirlemeleri nedeniyle, güç dönüştürücüleri araştırılması gereken önemli bir unsurdur. KKARM sargı yapısı bakımından Klasik ARM'den farklı olduğu için, Klasik ARM'den farklı bir kontrol yöntemleriyle sürülür. Ancak yapısal olarak iki ARM de aynı olduğundan; aynı dönüştürücü topolojileriyle sürülmeleri olanaklıdır Aralarındaki fark; aynı anda iletimde bulunan faz sayısı ve her bir fazın devrede kalma süresidir. ARM için literatürde çeşitli dönüştürücü topolojileri önerilmiştir. Şekil 2.1'de 'q' faz sayısı olmak üzere ARM güç dönüştürücülerinin sınıflandırılması görülmektedir [29].



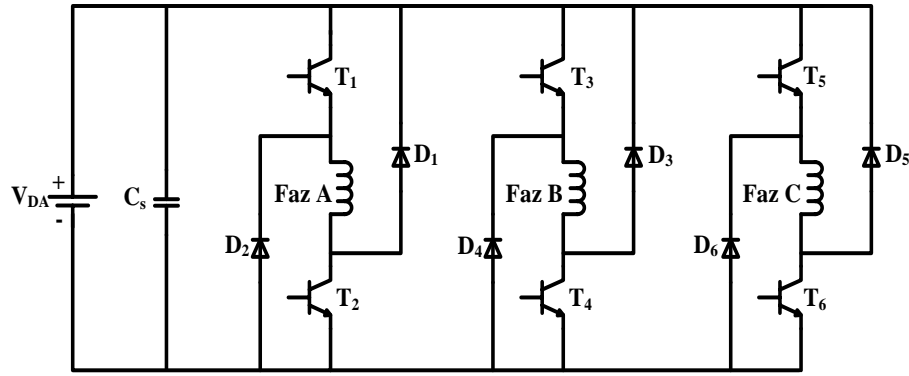
Şekil 2.1. ARM güç dönüştürücülerinin sınıflandırılması [29]

2.1. Faz Başına Çift-Anahtarlı Dönüştürücü

Çift-anahtar/faz dönüştürücüleri, asimetrik köprü ve alternatif asimetrik köprü olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [29].

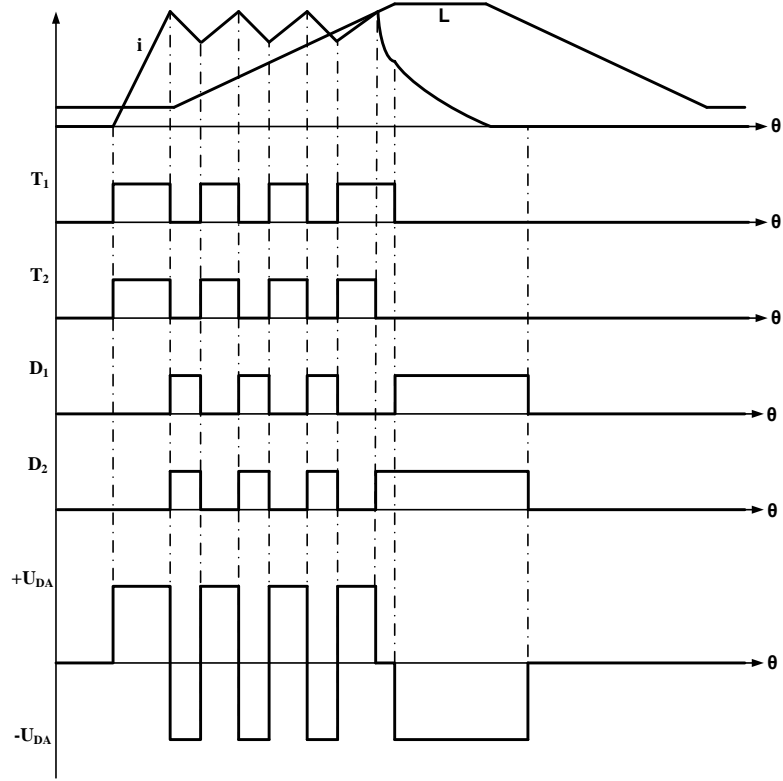
2.1.1. Asimetrik köprü dönüştürücü

Şekil 2.2’de üç fazlı asimetrik köprü dönüştürücü görülmektedir. Üç çalışma moduna sahip olan dönüştürücüde her bir faz sargısı iki anahtar ve iki diyot tarafından denetlenmektedir. A fazı için anahtarların aldığı konum incelenirse; pozitif gerilim döngüsünde T_1 - T_2 iletimdedir ve faz akımı hızlı bir şekilde yükselir. Sıfır gerilim döngüsünde, T_1 kesimde T_2 iletimdedir. Faz akımı T_2 - D_2 üzerinden akmaya devam eder. Negatif gerilim döngüsünde T_1 - T_2 kesimdedir. Sargı üzerinde depolanan enerji D_1 - D_2 üzerinden kaynağa geri verilir [3, 28, 29].



Şekil 2.2. Üç fazlı asimetrik köprü dönüştürücü [38]

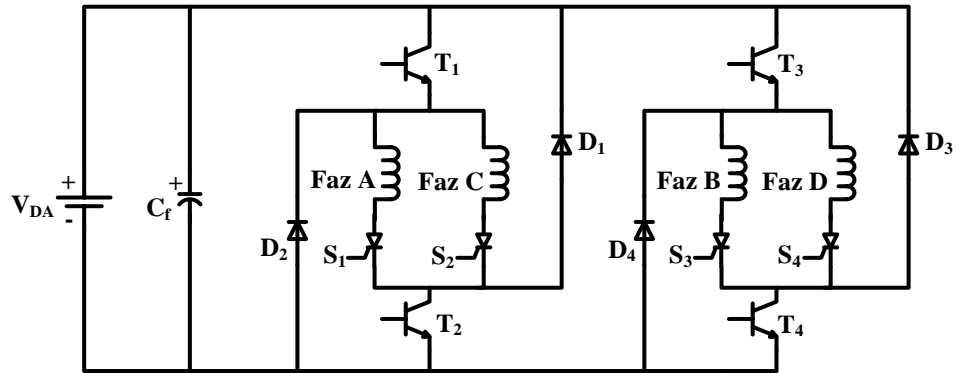
Şekil 2.3’de asimetrik köprü dönüştürücünün sert kıyım (anahtarın açılıp kapanması) stratejisi görülmektedir. Bu yöntemde, T_1 - T_2 anahtarları iletime sokularak A fazından akım geçirilir. Faz akımı istenen değerin üzerine çıktığında, T_1 - T_2 anahtarları kesime götürülür. Faz sargısında depolanan akım D_1 - D_2 serbest geçiş diyotları üzerinden kaynağa döner. Bu anda faz akımı referans değerin altına iner ve faz gerilimi negatif değere düşer. Bu aralıkta, kaynak ve sargı arasında tekrarlanan bir enerji alışverişi olmaktadır. Bu denetim stratejisine sert kıyım denir. Bu yöntemin bazı dezavantajları vardır. T_1 ve T_2 ’nin iletim ve kesime girmesi anında, sargı üzerinde besleme geriliminin iki katı görülür. Bu durum sargı yalıtımına zarar verir. Aynı nedenle hat kondansatörü üzerinde de daha büyük bir gerilim dalgalanması meydana gelir. Bu durum kapasitenin ömrünün azalmasına ve aynı zamanda anahtarlama kayıplarının artmasına neden olur [3, 28].



Şekil 2.3. Sert kıyım stratejisi [28]

2.1.2. Alternatif asimetrik köprü dönüştürücü

Şekil 2.4’de alternatif asimetrik dönüştürücü görülmektedir. Bilindiği gibi SCR’ler kontrol amaçlı kullanıldıklarında yardımcı bir komütasyon devresine ihtiyaç duyarlar. Bu da devrede kullanılan eleman sayısını, devrenin maliyetini ve boyutunu artıran bir unsurdur. Ancak bu topolojide kullanılan SCR’ler kontrol için değil sadece ilgili fazlarda akımı yönlendirmek amacıyla kullanılmıştır [29].



Şekil 2.4. Alternatif asimetrik dönüştürücü [29]

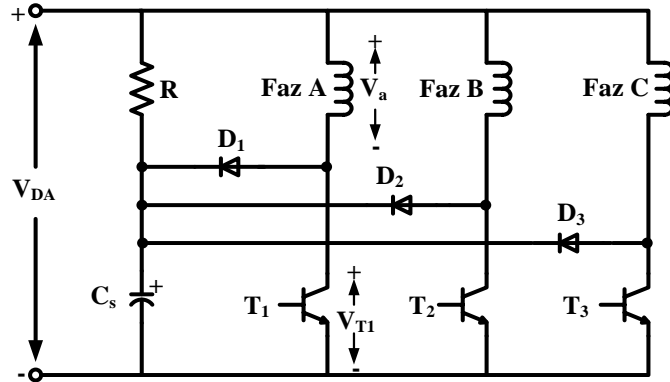
A fazından akım geçirmek için T_1 - T_2 - S_1 iletme sokulur. Faz akımı, referans akım değerine ulaşıncaya T_1 kesime götürülür. Bu durumda akım, S_2 - T_2 - D_2 yolunu takip eder. Negatif gerilim döngüsünde ise T_1 - T_2 kesimde, D_1 - D_2 iletimdedir. Bu sürücünün en önemli dezavantajı SCR'nin daima akım iletimi yolunda olmasıdır. Bu nedenle dönüştürücüde kayıplar artar ve SCR için daha büyük bir soğutucuya ihtiyaç duyulur. Bu da özellikle düşük güçlü SRM sürücülerinde sistem verimini çok olumsuz etkiler [29].

2.2. Faz Başına Tek Anahtarlı Dönüştürücüler

Tek-anahtar/faz dönüştürücülerin; R-dump, çift-telli, bölünmüş-DA-kaynaklı tek anahtar-çift diyotlu, bağımsız faz-akım-kontrollü tek anahtar-çift diyotlu vb. topolojileri mevcuttur [29].

2.2.1. R-dump dönüştürücü

Şekil 2.5'te bir R-dump dönüştürücü görülmektedir. Her bir faz için bir anahtar ve bir diyot bulunmaktadır. Örneğin A fazı iletimde olsun. Faz akımı, T_1 anahtarının kesime gitmesiyle önce D_1 serbest geçiş diyotu üzerinden C_s kondansatörünü şarj eder. Daha sonra harici R direnci üzerinden akar. Burada R direnci, faz sargısı üzerine depo edilen enerjiyi kısmen harcamaktadır. Bu durum bazı dezavantajları beraberinde getirir. Burada faz akımının sönümü, yeniden şarj olan kaynakla karşılaştırıldığında daha uzun sürer. Ayrıca enerjinin direnç üzerinde harcanmasından dolayı sürücünün genel veriminde düşüş olur.

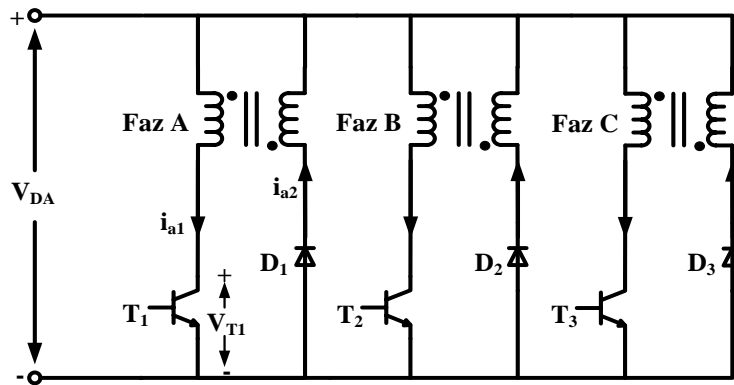


Şekil 2.5. R-dump dönüştürücü [29]

Dönüştürücüde dikkat edilecek diğer bir nokta da R direncinin seçimidir. R direncinin değeri hem üzerinde harcanmak istenen güce, hem de anahtar gerilimine bağlıdır. Düşük değerli R, akımın sönüm süresini uzatabilir. Ama eğer akımın değeri, faz endüktansının negatif eğim bölgesinin altına düşerse, negatif moment üretilir. Bu durum ortalama çıkış momentinde düşmeye neden olur. Yüksek değerli R ise sargı ve dolayısıyla da T_1 anahtarı üzerine düşen gerilimi artırır.

2.2.2. Çift-telli dönüştürücü

Şekil 2.6’da 3 fazlı çift-telli dönüştürücü devre şeması görülmektedir. A fazından akım akması için T_1 anahtarı ilettime geçirilir. T_1 ’in ilettime girmesiyle birlikte primer sargıda akım oluşur. Akım akışı primerden sekondere doğrudur. T1 kesime sokulduğunda faz akımı kesilir. Sargıda depolanan emk D1 diyodunu pozitif yönde kutuplar. Bu da akımın, D1 diyodu ve çift-telli ikincil sargı üzerinden kaynağa geri dönmesine neden olur. Böylece enerji makine sargısından kaynağa doğru transfer edilmiş olur. Kesim durumunda sekonder sargıdaki gerilim DA bara gerilimine eşittir. Çift-telli dönüştürücünün dezavantajı ise serbest-geçişin kıyım (anahtarın açılıp kapanması) sırasında mümkün olmamasıdır. Bu da kıyım sırasında akımda ve dolayısıyla momentte yüksek dalgalanmaya neden olur. [3, 29, 38]

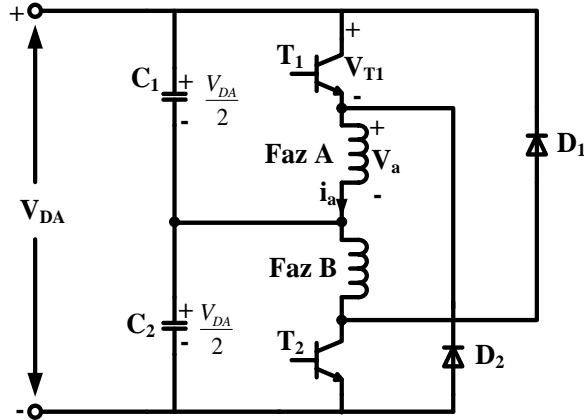


Şekil 2.6. Üç fazlı çift-telli dönüştürücü [29]

2.2.3. Bölünmüş-DA-kaynaklı dönüştürücü

Şekil 2.7’de bölünmüş-DA-kaynaklı dönüştürücünün iki faz şeması görülmektedir. A fazından akım geçirilebilmesi için T_1 anahtarı ilettime sokulur. Faz akımı; T_1 , faz sargısı ve C_1 yolunu takip eder. T_1 anahtarının kesime girmesiyle faz akımı, faz sargısı, C_2 ve D_2 diyotu üzerinden devresini tamamlar. Bu süre içerisinde C_2

kondansatörü şarj olmakta ve A fazı üzerindeki depolanan enerji çok hızlı bir şekilde tükenmektedir. T_1 iletimdeyken faz sargı gerilimi ($V_{DA}/2$), T_1 kesimdeyken faz sargı gerilimi ($-V_{DA}/2$)'dir [29]. Bu dönüştürücünün en önemli avantajı az sayıda anahtarın kullanılması ve daha hızlı demagnetizasyondur. Bu dönüştürücünün en önemli dezavantajları ise serbest geçişin olmamasıdır. Ayrıca bu dönüştürücünün çalışma prensibi faz sayısının sadece çift olmasına olanak vermektedir [38].



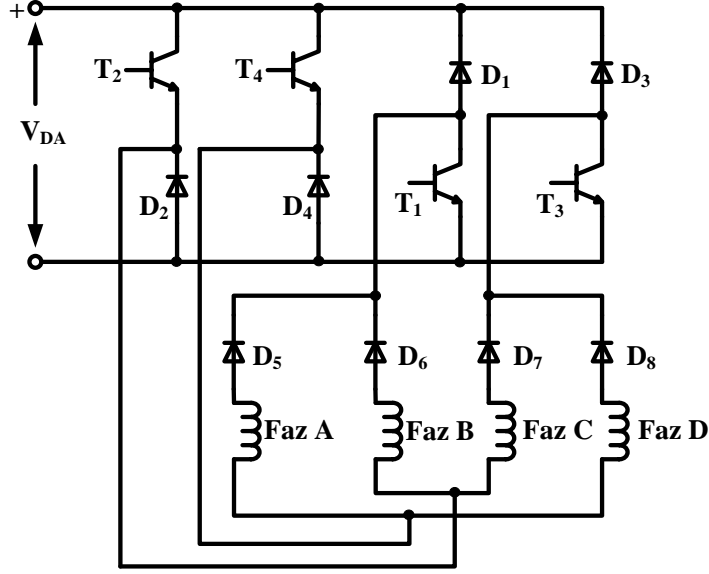
Şekil 2.7. Bölünmüş DA kaynaklı dönüştürücü [29]

2.2.4. Tek anahtar-çift diyot dönüştürücü

Şekil 2.8'de tek anahtar ve iki diyot dönüştürücü şeması görülmektedir. D_1 , D_2 , D_3 ve D_4 yüksek; D_5 , D_6 , D_7 ve D_8 düşük hızlı diyotlardır. A fazından akım akabilmesi için, T_4 - T_1 iletime geçirilir. Faz akımı referans akım değerine ulaştığında T_4 - T_1 kesime sokulur. Bu anda D_1 - D_4 diyotları iletime geçerek faz akımı için yeni bir yol oluşturur; böylece akımın kaynağa dönmesini sağlarlar. Bu anda sargı üzerindeki gerilim ($-V_{DA}$)'dir. Bu sayede faz akımı hızlı bir şekilde sıfıra düşer [29].

Alternatif olarak tek bir anahtar kesime götürülerek de sargı akımı düşürülebilir. Akımın düşürülmesi için bir anahtarlama döngüsü için T_4 iletime geçirilir, T_1 kesime götürülür. Bir sonraki anahtarlama döngüsünde ise anahtarların üzerindeki etkin değer (akım, gerilim) oranını azaltmak ve eşitliği sağlamak için tam tersi işlem yapılır. Yani T_4 kesime götürülür, T_1 iletime geçirilir. Bu durumunda bir anahtar, iki diyot ve faz sargısı seri bağlanmış olur. B fazından akım geçirilmesi için T_2 ve T_1 iletime sokulur. T_1 'in iletime girmesiyle D_1 kesime gider. Böylece düşen faz A akımı

D_5 diyotu, T_1 anahtarı ve D_4 serbest geçiş diyotu üzerinden yolunu tamamlar. Sonunda A fazı akımı sıfıra düşer [29].



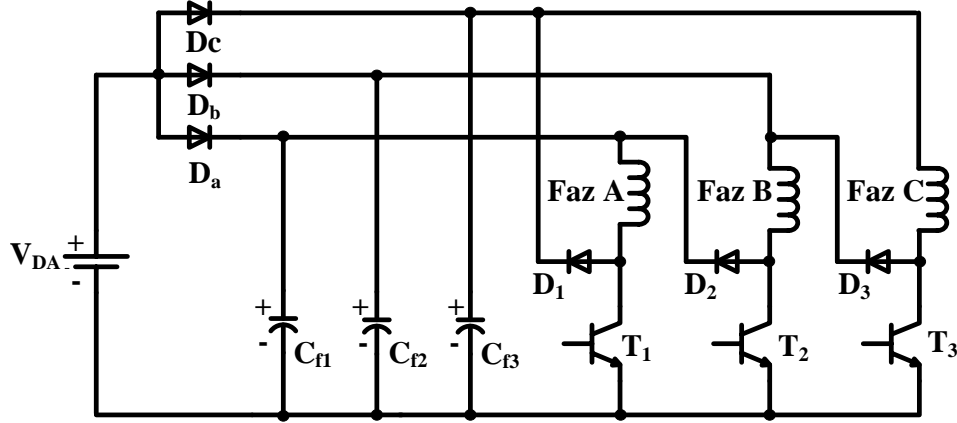
Şekil 2.8. Tek anahtar-çift diyot dönüştürücü [29]

2.2.5. Bağımsız faz akım kontrollü tek anahtar-çift diyot dönüştürücü

Şimdiye kadar tanıtılan tek anahtar/faz dönüştürücüleri, değiştirilmiş/özel çift-telli sargılara ve makinaı beslemek için yarıya indirgenmiş DA-hat gerilimine ihtiyaç duymaktadırlar. Üstelik buna rağmen daha yüksek kayıp ve daha düşük verimle çalışmaktadırlar. Oysa Şekil 2.9'da verilen bağımsız faz-akım kontrollü tek anahtar-çift diyot dönüştürücüde bu dezavantajlar bertaraf edilmiştir. Burada D_a, D_b, D_c diyotları düşük hızlı diyotlardır. Bu diyotlar her bir faz için DA bara kaynak gerilimi oluşturmak amacıyla kullanılmıştır. A fazından akım geçirilebilmesi için T_1 anahtarı ilettime sokulur. Faz akımı referans akım değerine ulaştığında T_1 anahtarı kesime götürülür. Faz akımı D_1 ve C_{f3} üzerinden yolunu tamamlar. Böylece A fazında depo edilen enerji C_{f3} üzerine aktarılmış olur. Bu sırada C_{f3} gerilimi kaynak geriliminin iki katıdır. T_1 kesimdeyken A fazı üzerindeki gerilim düşümü negatiftir ve kaynak gerilimi ile C_{f3} geriliminin farkına eşittir.

C_{f3} üzerine depo edilen enerji C fazı enerjilendiğinde harcanır. Bunun nedeni C_{f3} geriliminin kaynak geriliminden daha büyük olmasıdır. Bundan dolayı D_c diyotu da ters polarıma altındadır. C_{f3} gerilim değerinin kaynak geriliminden büyük olması nedeniyle C faz akımı devrede hızlı bir şekilde yükselir. Bu durum da faz C için daha

küçük bir ileri açı ve daha yüksek verimli bir makina anlamına gelir. C_{f3} gerilimi kaynak geriliminden düşük olduğunda, faz C enerjisi doğrudan kaynağın kendisinden çeker [29].



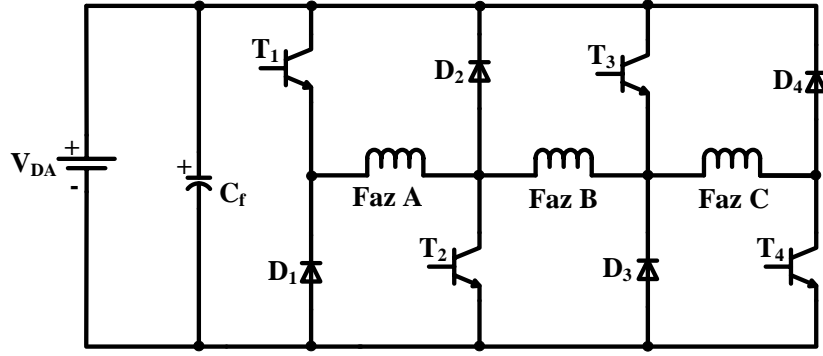
Şekil 2.9. Tek anahtar ve çift diyot/faz dönüştürücü [29]

2.3. (q+1) Anahtar ve Diyot Konfigürasyonlu Dönüştürücüler

Farklı anahtar ve diyot konfigürasyonlu dönüştürücüler; eşit paylaşımlı, C-Dump,, serbest geçişli C-Dump, tek ortak anahtar konfigürasyonlu, değişken V_{DA} hatlı minimum anahtar topolojili dönüştürücülerden oluşmaktadır [29].

2.3.1. Eşit paylaşımlı dönüştürücü

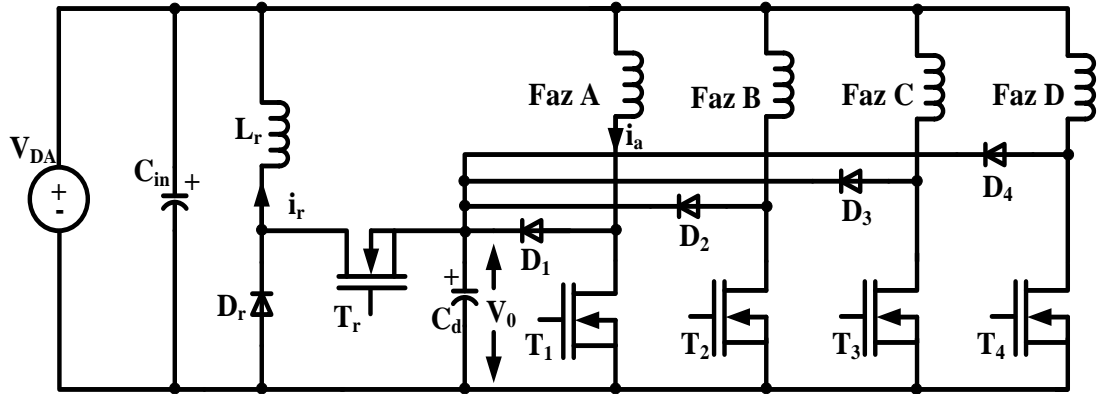
Şekil 2.10'da (q+1) dönüştürücü konfigürasyonu görülmektedir. A fazının enerjilendirilmesi için T_1 ve T_2 anahtarları ilettime sokulur. A faz akımı referans akım değerine ulaştığında T_1 veya T_2 anahtarlarından biri kesime götürülür. Seçime göre akım D_1 - T_2 veya D_2 - T_1 üzerinden yolunu tamamlar. Bunun sonucunda A fazı üzerindeki gerilim sıfıra düşer. İkinci seçenekte ise T_1 - T_2 anahtarlarının her ikisi birden kesime götürülür. Böylece sargı üzerindeki gerilim ($-V_{DA}$) olur ve akımın düşmesi sağlanır. Benzer şekilde B fazı için T_2 , T_3 , D_2 ve D_3 , C fazı için T_3 , T_4 , D_3 ve D_4 elemanları kullanılmaktadır. Burada T_2 , T_3 , D_2 ve D_3 elemanları iki faz akımını taşımaktadır. Bu nedenle elemanların akım oranları yükselir. Ayrıca bu durum özellikle üst üste binmiş faz akımlı çalışmada bağımsız akım kontrolü yapılan ARM fazları üzerinde bir baskı oluşturur [29].



Şekil 2.10. Eşit paylaşımlı dönüştürücü [29]

2.3.2. C-dump dönüştürücü

Şekil 2.11 de enerji geri kazanımlı C-dump dönüştürücü görülmektedir. Depolanan manyetik enerji kısmi olarak C_d kondansatörüne dağıtılmıştır. Bu C_d kondansatörüne verilen enerji T_r , L_r , ve D_r 'den oluşan bir quadrant kırıyıcı tarafından geri kazanılmak ve DA kaynağına gönderilmektedir.



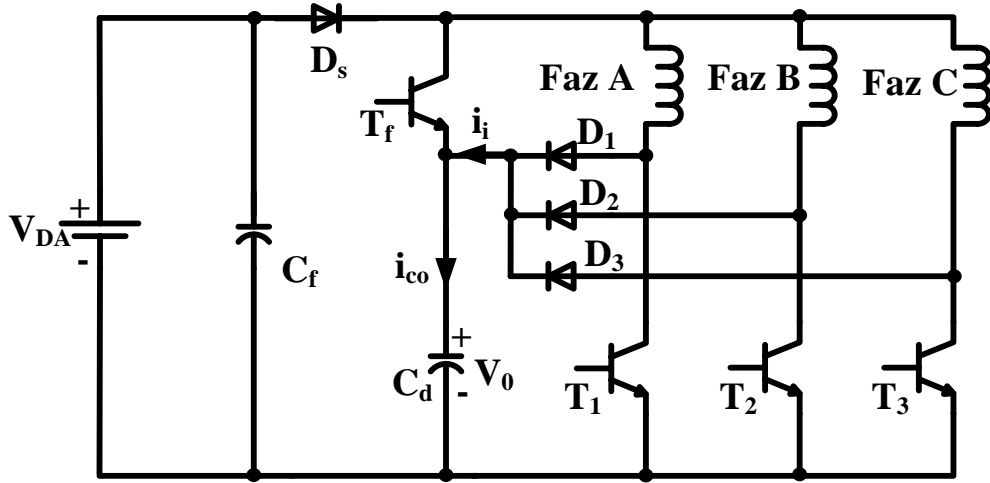
Şekil 2.11. Enerji geri kazanımlı C-dump dönüştürücü [29]

T_1 anahtarının ilettime sokulmasıyla A fazı enerjilenir ve faz akımı referans akım değerine ulaştığında anahtar kesime götürülür. T_1 anahtarının kesime gitmesiyle D_1 diyotu ilettime geçer. Böylece faz akımı C_d kondansatörü üzerinden yolunu tamamlar. B fazının ilettime girmesiyle A fazına bağlı sargı üzerinde birikmiş olan manyetik enerji 'C-dump kondansatörü' C_d üzerine transfer edilir. Dönüştürücünün avantajı minimum anahtarla bağımsız akım kontrolünü mümkün kılmasıdır. Dezavantajı ise akım komütasyonunun; C_d kondansatörü üzerine düşen gerilim (V_0) ve DA hat gerilimi (V_{DA}) arasındaki fark ile sınırlanmış olmasıdır. Akımların hızlı komütasyonu daha büyük V_0 gerektirir ve bu da güç aygıtlarının gerilim oranlarının artmasına

neden olur. Ayrıca C_d ve DA hat arasındaki enerji döngüsü ek kayıplara neden olur. T_r , L_r ve D_r de dönüştürücü verimini düşürür [29].

2.3.3. Serbest geçişli C-dump dönüştürücü

Şekil 2.12 de Serbest geçişli C-dump dönüştürücü görülmektedir. C-dump dönüştürücü; devrede sıfır gerilim düşümünü sağlayamaz. Böylece de ARM'nin kontrolündeki ek serbestlik derecesini yok eder. Bu da akustik gürültüde ciddi bir artışa neden olur. Ayrıca makina fazları ya DA kaynak gerilimine ya da DA kaynak ve C-dump kondansatör gerilimi arasındaki fark gerilimine maruz kalır. Bu, faz sargılarının çok kısa bir sürede DA kaynağın hemen hemen iki katı büyüklüğünde bir gerilim düşümüyle karşılaşması anlamına gelir. Bu durum sargıların yalıtım ömrünü olumsuz etkiler ve ek kayıplara neden olur.

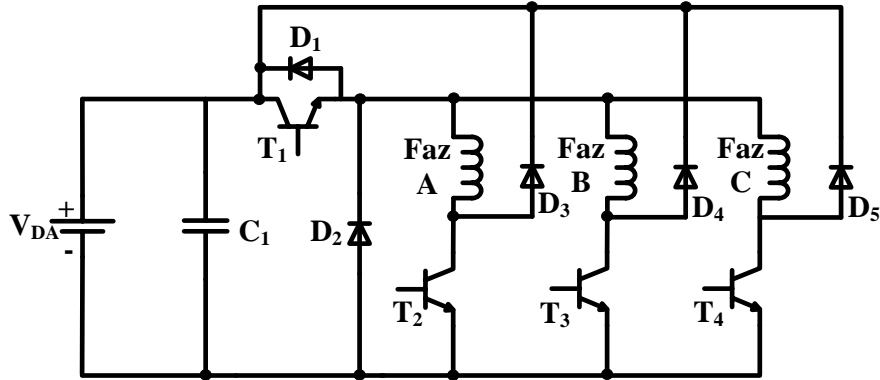


Şekil 2.12. Serbest geçişli C-dump dönüştürücü [29]

Bu problemler T_f serbest geçiş transistörü kullanılarak giderilir. A fazının enerjilenmesi için T_1 iletme sokulur. Faz akımı istenen değere ulaştığında T_1 kesime; T_f iletme geçirilir. C_d kondansatörü şarj olmaya başlar. C_d geriliminin kaynak gerilimine eşitlenmesiyle, faz akımı, D_1 diyodu ve T_f üzerinden devresini tamamlar. T_f 'nin iletimden çıkması faz üzerindeki enerjinin C_d kondansatörü üzerine transferine neden olur. C_d üzerinde depo edilmiş olan enerji T_f anahtarı yardımıyla iletme giren diğer faz üzerinde harcanır. Burada D_s diyodu ters polarma durumundaki C-dump (V_0) geriliminin, iletimde olan faza aktarılmasına yardımcı olur [29].

2.3.4. Tek ortak anahtar konfigürasyonlu dönüştürücü

Şekil 2.13'te tek ortak anahtar konfigürasyonlu dönüştürücü görülmektedir. Burada T_1 anahtarı faz A, faz B ve faz C'yi ortak olarak izole etmekte ve enerjinin C kondansatörüne transferini sağlamaktadır. A fazının enerjilenmesi için T_1 - T_2 iletime sokulur. Faz akımı referans akım değerine ulaştığında T_1 - T_2 birlikte ya da herhangi biri kesime götürülür. Her iki anahtarın da kesime sokulması durumunda faz akımı D_3 , C ve D_2 üzerinden devresini tamamlar. Bu dönüştürücünün dezavantajı aynı anda iki fazın iletime girememesidir. Bu dönüştürücüde üç farklı anahtarlama yöntemi uygulanabilir. A fazı için örnek verilirse: İlk yöntemde, T_1 ortak anahtarı iletimde, T_3 faz anahtarı akım kısıyıcı olarak iletim veya kesimdedir. İkinci yöntemde, T_3 faz anahtarı iletimde T_1 ortak anahtarı akım kısıyıcı olarak iletim veya kesimdedir. Üçüncü yöntemde, T_1 ortak anahtarı ve T_3 faz anahtarı birlikte iletim veya kesimdedir [29].



Şekil 2.13. Tek ortak anahtarlı dönüştürücü [29]

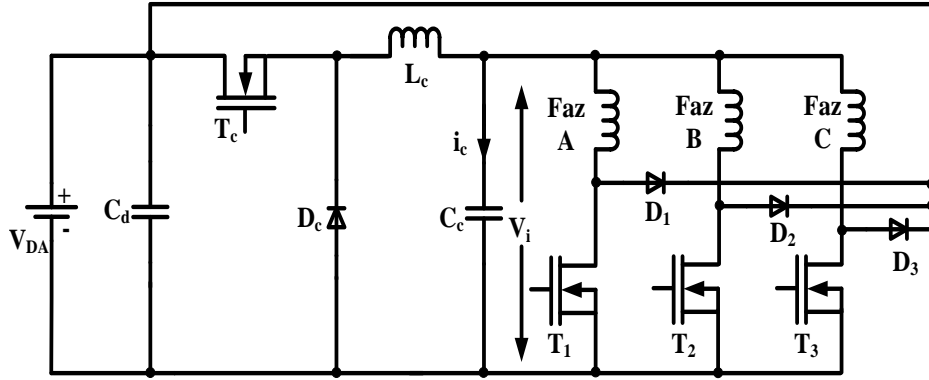
2.3.5. Değişken DA baralı minimum anahtar dönüştürücü

Değişken DA baralı minimum anahtar topolojili dönüştürücüler; azaltan ve azaltan-artıran dönüştürücülerden oluşmaktadır.

2.3.5.1. Azaltan dönüştürücü

Şekil 2.14'de değişken DA baralı minimum anahtarlı azaltan dönüştürücü görülmektedir. Azaltan dönüştürücünün güç katı T_c anahtarı, D_c diyotu, L_c bobini ve C_c kondansatöründen oluşur. Bu kat makine sargılarının ihtiyaç duyduğu giriş gerilimini elde edebilmek için V_{DA} kaynak gerilimini V_i 'ye dönüştürür. Burada

ayrıca anahtarlamaı minimize etmek ve hem ARM dönüştürücüsünün faz anahtarlarındaki kayıpları ve hem de makine sargılarındaki çekirdek kayıplarını azaltmak için tek-darbe gerilim anahtarlamaı yapılır. Bunlara ek olarak, bu kat, DA kaynak gerilimi için tüm güç aygıtlarının gerilim oranını sınırlarken; aynı zamanda akımın daha hızlı komütasyonu için gerekli yalıtımı da gerçekleştirir. Böylece C-dump topolojide olduğu üzere bir anahtarın DA kaynak barasının iki katı gerilim taşımasını gerektiren durum da ortadan kalkmış olur.



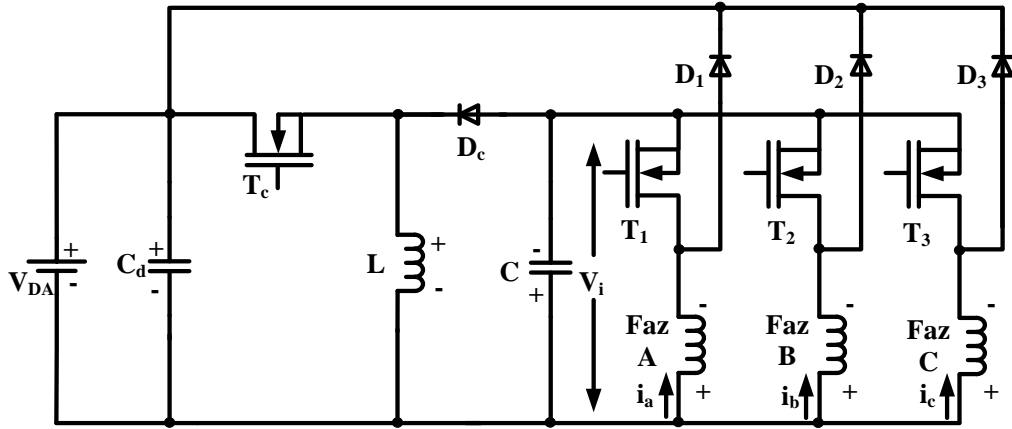
Şekil 2.14. Değişken DA baralı minimum anahtarlı azaltan dönüştürücü [29]

T_1 anahtarının iletme girmesiyle A fazı V_i gerilimi ile enerjilenir. T_1 'in kesime gitmesiyle D_1 diyotu iletme girerek sargı üzerindeki enerjiyi kaynağa ve C_d kondansatörüne aktarır. Bu zaman aralığında T_c anahtarı kesim durumundadır. Bu anda makine sargısına, kaynak gerilimi (V_{DA}) ve V_i gerilimi arasındaki farka eşit bir negatif gerilim uygulanmış olur. T_c anahtarının kesimde olduğu süre boyunca, C_c kondansatöründeki enerji sıradaki fazı (örneğin B fazı) iletme hazırlar. Böylece farklı makine fazları arasındaki bağımsızlık sürdürülür.

2.3.5.2 Azaltan-yükselten dönüştürücü

Şekil 2.15 de değişken DA baralı minimum anahtarlı azaltan-yükselten dönüştürücü görülmektedir. Bu konfigürasyonda her faz kendisine seri bağlı tek bir anahtar ile denetlenmektedir. T_c anahtarı, D_c diyotu, L bobini ve C kondansatörü azaltan-yükselten dönüştürücünün güç katını oluşturmaktadırlar. Bu kat sayesinde V_i arzu edilen şekilde ayarlanabilmektedir. Üstelik bu kat, sabit kaynak gerilimi (V_{DA}) ile akımın daha hızlı komütasyonu için gerekli yalıtımı sağlamaktadır.

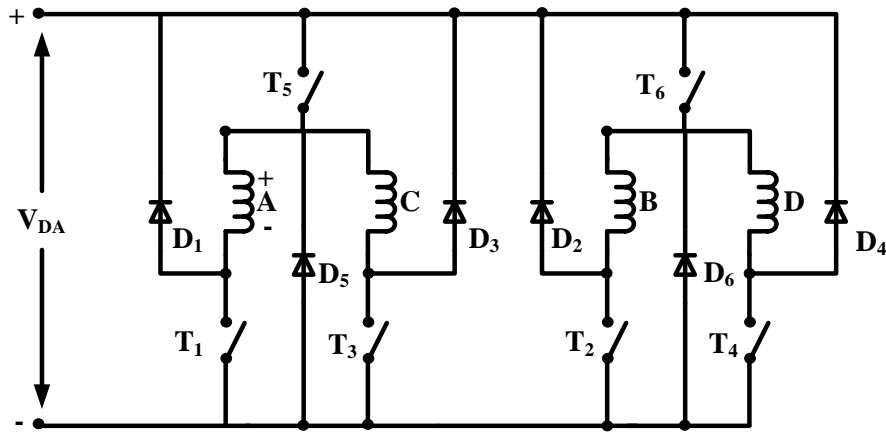
T_1 iletime geçirilir ve A fazından akım akmaya başlar. Faz akımı referans akımı geçtiğinde T_1 kesime sokulur. T_1 'in kesime gitmesiyle, T_c 'nin iletimde veya kesimde olması fark etmeksizin, D_1 iletime girer. Faz akımı D_1 üzerinden kaynağa döner. Aynı zamanda C_d şarj olmaya başlar. Bu anda makine faz sargısı üzerinde sabit bir negatif DA kaynak gerilimi ($-V_{DA}$) görülür. T_c anahtarının kesimde olduğu süre boyunca, C çıkış kondansatöründeki enerji sıradaki fazı (örneğin B fazı) iletime hazırlar. Böylece farklı makine fazları arasındaki bağımsızlık sürdürülür.



Şekil 2.15. Değişken DA baralı minimum anahtar azaltan-yükselten dönüştürücü [29]

2.4. Faz başına 1.5 anahtarlı dönüştürücü

Şekil 2.16'da 1.5 anahtar/faz dönüştürücü görülmektedir. Bu konfigürasyonda iki faz için üç anahtar ve üç serbest geçiş diyotu gerekmektedir.

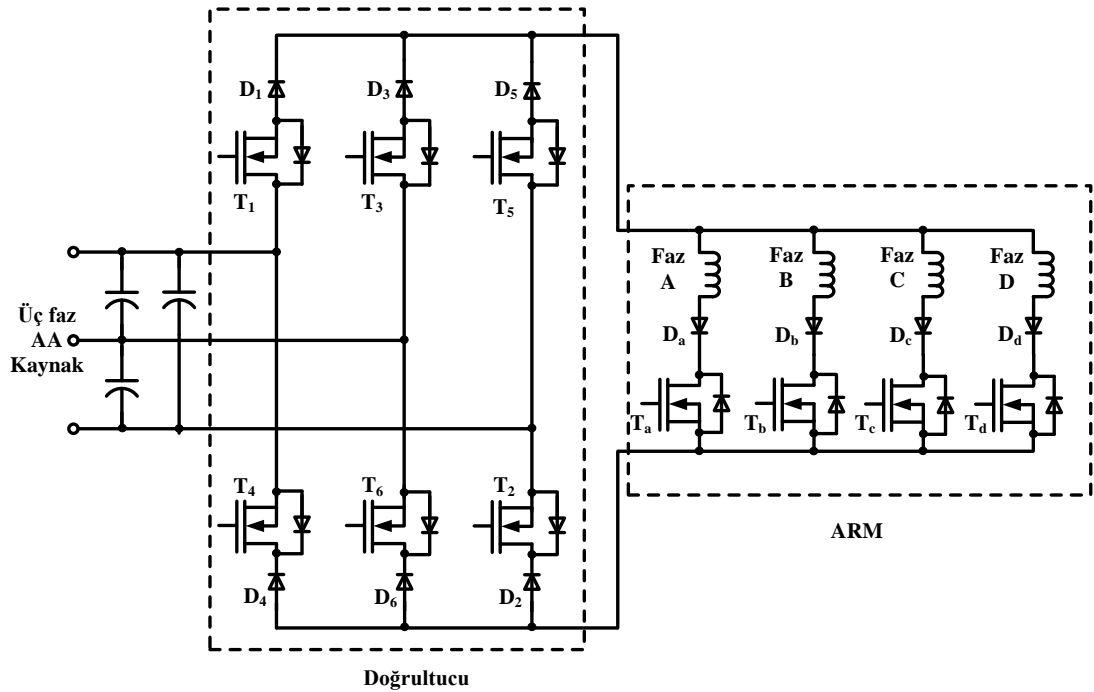


Şekil 2.16. 1.5 anahtar/faz dönüştürücü [29]

T_5 ve T_6 anahtarları bir periyot boyunca iki fazın akımını taşımaktadır. Bu toolojide sargı gruplamalarının önceki dönüştürücü konfigürasyonlarından farklı olduğuna dikkat edilmelidir. Bu şekilde gruplama; iletim sırasında olmayan iki fazın kendi akımlarının bağımsız denetlenmesini garantiler [29].

2.5. İki katmanlı güç dönüştürücüsü

Şekil 2.17’de iki katmanlı güç dönüştürücüsü görülmektedir. Şebekeye doğrudan bağlanan dönüştürücü, doğrultucu ve makina katı olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır.



Şekil 2.17. İki katmanlı güç dönüştürücü [29]

ARM sürücülerinin pek çoğu, batarya-kaynaklı durumlar hariç, enerjinin makinadan kaynağa dönüşünü doğrudan gerçekleştiremez. Bunun nedeni, diyot köprüsü ve elektrolitik güç kondansatörünün akım sınırlılıklarıdır. Bu durumda dönen enerjinin sadece çok sınırlı bir miktarı kondansatörlerde depolanır ve yeniden kullanılır. Sonuç olarak DA hatta gerilim artışını sınırlamak için, kondansatöre paralel bir dump direnci gibi ekstra bir devreye ihtiyaç duyulabilir. Bu durum da yüksek kayıplara ve dolayısıyla düşük verime neden olur. Bu tür dönüştürücüler genelde değişken hız ve sabit frekansa ihtiyaç duyulan rüzgar enerjisi alanında kullanıma uygundur [29].

3. KKARM İÇİN YUMUŞAK ANAHTARLAMALI SÜRÜCÜ TOPOLOJİSİ

Bu bölümde yumuşak anahtarlama kavramı tanımlanmış; daha sonra tez çalışmasında prototip KKARM'yi sürmek amacıyla seçilen sürücüde uygulanan yumuşak anahtarlama tekniği ayrıntılarıyla açıklanmıştır.

3.1. Yumuşak Anahtarlama Tanımı

1960'lı yıllardan itibaren güç elektroniği ve yarıiletken anahtarların gelişmesi, sürücü sistemlerinde devrim gerçekleştirmiş, makinaların denetimini kolaylaştırmıştır. Fakat bu gelişim bazı dezavantajları da beraberinde getirmiştir. Bu dezavantajlar bilim insanlarına yeni araştırma ve çalışma alanları yaratmıştır. Bunların en başında hiç kuşkusuz anahtarlama sırasında meydana gelen kayıplar yer alır. Güç anahtarlarının iletme geçirilmesi ve kesime sokulması sırasında akım ve gerilimin üst üste binmesi nedeniyle kayıplar meydana gelir. Ayrıca güç diyotunun ters toparlanma kayıpları ve güç anahtarı parazitik kondansatörünün deşarj kayıpları da dikkate alınması gereken ve genel olarak sistemin performansını olumsuz etkileyen faktörlerdir [39]. Bu yüksek kayıplar, güç elemanı soğutma sistemlerinin, hem maliyet hem de hacim bakımından artmasına neden olmaktadır. Bu da sistemin toplam maliyetinde artışa, güç yoğunluğunda düşüşe zemin hazırlamaktadır [40]. Bu tip enerji kayıplarının olduğu dönüştürücüler literatürde “sert anahtarlama dönüştürücüler” olarak adlandırılmaktadır [40-41].

Devrede ek bir düzenek olmadan gerçekleştirilen anahtarlama “sert anahtarlama (Hard Switching-HS)” tekniğidir. Sürücü devrelerde sert anahtarlama tekniğinin kullanılması yüksek anahtarlama kayıplarına ve elektromanyetik girişim (Elektro Magnetic Interference-EMI) gürültülerine neden olmaktadır [42, 43]. Yumuşak anahtarlama (Soft Switching-SS) ise, kayıpların ve EMI gürültülerinin özel düzenekler yardımıyla sistemden emilmesi veya en aza indirilmesidir. Bu amaçla geliştirilen ve dönüştürücülerin temel parçası olmayan ek düzenekler “bastırma hücreleri” adını alır. Bastırma hücreleri, sistemin ana anahtar ve ana diyotu üzerinde ek akım ve gerilim streslerine; dolayısıyla ek kayıplara neden olabilir. Bu ek kayıplar

yok edilmeli veya en düşük seviyede tutulmalıdır [39, 40, 44]. Yumuşak anahtarlama tekniği kullanılarak güç anahtarı üzerindeki akım ve gerilimin düşme ve yükselme durumları denetlenebilir. Bu yöntemle gerilim değişimi (dv/dt) ve akım değişimi (di/dt) denetlenir [45].

Bastırma hücrelerinin asıl amacının, devrenin güç aktarımının artırılması olduğu göz önünde tutulmalıdır. Bastırma hücresi; sağladığı yumuşak anahtarlama yararları ve neden olabileceği ek külfetler iyice araştırılarak ve karşılaştırılarak seçilmelidir [39, 40, 44].

Yumuşak anahtarlama beklenen fonksiyonlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

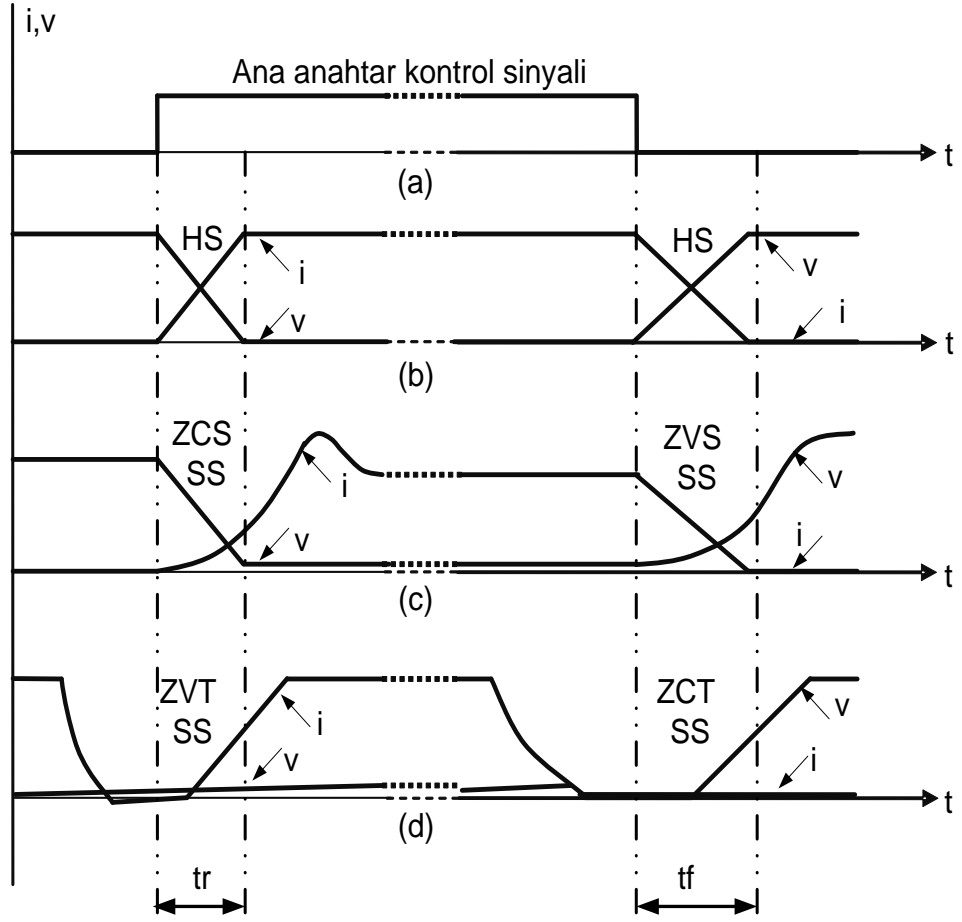
- Anahtar geçişlerinde akım ve gerilimin üst üste binmesini azaltmak.
- Akım ve gerilimin yükselme hızını sınırlamak.
- Yük hattı akım ve gerilim değişimlerini düzenlemek.
- Anahtarlama enerji kayıplarını azaltmak ve EMI gürültülerini bastırmak.
- Anahtarlama enerjilerini geri kazanmak.
- Çalışma frekansını yükseltmek.
- Periyodun büyük bir kısmında PWM çalışmayı korumak.
- Hafif yüklerde de yumuşak anahtarlama sürdürmek.
- Devrenin boyut ve maliyetini düşürmek.
- Devrenin verimini ve güç aktarımını arttırmak.
- Moment ve akım dalgalanma oranını düşürmek [39, 40, 44, 46].

3.2. Yumuşak Anahtarlama Teknikleri

Literatürde yumuşak anahtarlama teknikleri;

- Sıfır Akımda Anahtarlama (Zero Current Switching-ZCS)
- Sıfır Gerilimde Anahtarlama (Zero Voltage Switching-ZVS)
- Sıfır Akımda Geçiş (Zero Current Transition-ZCT)
- Sıfır Gerilimde Geçiş (Zero Voltage Transition-ZVT)

şeklinde sınıflandırılmıştır. Şekil 3.1’de bir anahtarlama elemanının denetim sinyali ve buna bağlı sert anahtarlama (HS) ve yumuşak anahtarlama (SS) dalga şekilleri görülmektedir. ZCS ile ZVS temel ve ZCT ile ZVT ileri yumuşak anahtarlama teknikleridir [39, 40, 44].



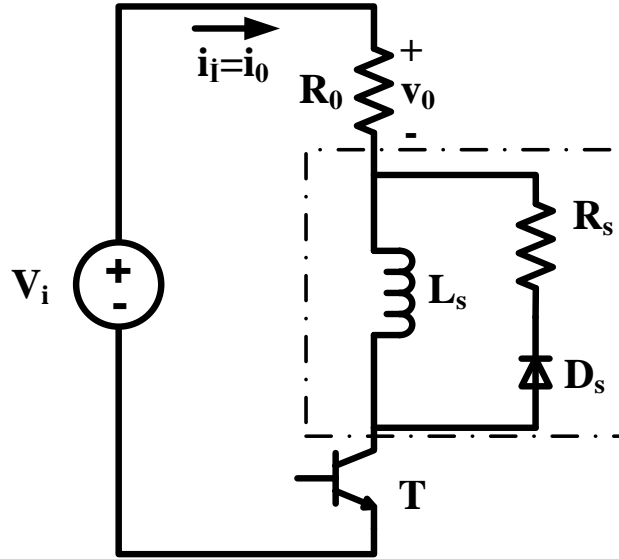
Şekil 3.1. (a) Anahtarlama elemanı denetim sinyali, (b) Sert anahtarlama dalga şekli, (c) ZCS ve ZVS dalga şekli, (d) ZCT ve ZVT dalga şekli [39, 40, 44]

3.2.1. Sıfır akımda anahtarlama (ZCS)

ZCS, ana güç anahtarının ilettime girdiği anda uygulanan bir yumuşak anahtarlama tekniğidir. Bu yöntem güç anahtarına küçük değerli bir bobin seri bağlanarak gerçekleştirilir. Böylece ilettime girme anında anahtardan geçen akımın yükselme hızı sınırlandırılır. Sonuçta akım ve gerilimin üst üste binmesi önlenir. Böylece anahtarlama enerji kaybı azalır ve anahtarlama enerjisi bobine aktarılmış olur. Bobindeki bu enerji, klasik hücrelerde bir dirençte harcanır, modern hücrelerde ise kısa süreli bir kısmi rezonans ile gerilim kaynağı veya yüke aktarılarak geri kazanılır [39, 40, 44].

Şekil 3.2’de klasik seri bir ZCS bastırma hücresi görülmektedir. Ana anahtara (T) küçük değerli seri bir bobin (L_s) bağlanmıştır. Burada bobin; ilettime girme anında

anahtardan geçen akımın yükselme hızını sınırlandırır ve ZCS elde edilir. Böylece anahtarın iletme girmesi sırasında oluşan enerji kaybı büyük ölçüde düşürülür. Düşürülen bu enerji aslında bobine aktarılmaktadır. Bobinde depolanan bu enerji, kesim anında anahtar üzerinde büyük bir emk oluşturur ve bu da anahtarın zarar görmesine neden olabilir. Bu nedenle anahtara paralel bir direnç (R_s) bağlanır. Ancak paralel direnç, anahtar iletme girerken üzerinde ek bir akım stresi oluşturur. Oluşan bu akım stresini engellemek amacıyla paralel dirence, seri ve anahtarın iletimine ters yönde bir diyot (D_s) bağlanır. Sonuç olarak RLD şeklinde bir bastırma hücresi elde edilir [39-47].

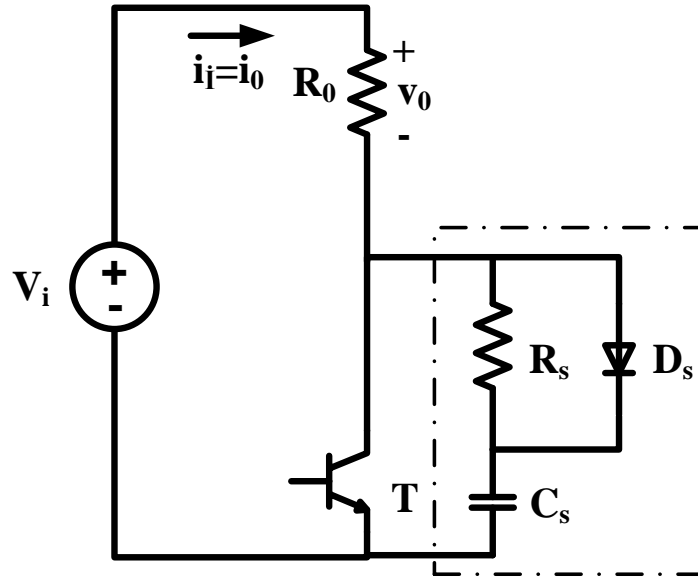


Şekil 3.2. Klasik seri ZCS bastırma hücresi [39-47]

3.2.2. Sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS)

ZVS, ana güç anahtarının kesime girdiği anda uygulanan bir yumuşak anahtarlama tekniğidir. Bu yöntem güç anahtarına küçük değerli bir kondansatör paralel bağlanarak gerçekleştirilir. Böylece kesime girme anında anahtar uçlarına düşen gerilimin yükselme hızı sınırlandırılır. Sonuçta akım ve gerilimin üst üste binmesi önlenir. Böylece anahtarlama enerji kaybı azalır ve anahtarlama enerjisi kondansatöre aktarılmış olur. Kondansatördeki bu enerji, klasik hücrelerde bir dirençte harcanır, modern hücrelerde ise geri kazanılır.

Şekil 3.3'te klasik paralel bir ZVS bastırma hücresi görülmektedir. Ana anahtara (T) küçük değerli paralel bir kondansatör (C_s) bağlanmıştır. Burada kondansatör; kesime girme anında anahtar üzerine düşen gerilimin yükselme hızı sınırlandırır ve ZVS elde edilir. Böylece anahtarın kesime girmesi sırasında oluşan enerji kaybı büyük ölçüde düşürülür. Düşürülen bu enerji aslında kondansatöre aktarılmaktadır. Kondansatörde depolanan bu enerji, iletim anında anahtar üzerinden aşırı bir akım geçişine ve dolayısıyla anahtarın zarar görmesine neden olabilir. Bu nedenle kondansatöre seri bir direnç (R_s) bağlanır. Ancak seri direnç, anahtar kesime girerken üzerinde ek bir gerilim stresi oluşturur. Oluşan bu gerilim stresini engellemek amacıyla seri dirence, paralel ve anahtarın iletim yönünde bir diyot (D_s) bağlanır. Sonuç olarak RCD şeklinde bir bastırma hücresi elde edilir [39-47].



Şekil 3.3. Klasik paralel ZVS bastırma hücresi [39-47]

ZCS ve ZVS tekniklerinde anahtarlama enerji kaybı tamamen yok edilemez. Bu nedenle, bu tekniklere yaklaşık ZCS ve yaklaşık ZVS teknikleri de denir. ZCS'de kullanılan bobin "seri bastırma elemanı" ve ZVS'de kullanılan kondansatör "paralel bastırma elemanı" olarak adlandırılır. Güç elemanı üzerinde seri bobin ek bir gerilim stresine ve paralel kondansatör ise ek bir akım stresine neden olur. Seri bobinin neden olduğu ek gerilim stresinin önlenemediği kabul edilmiştir [39, 40, 44]. ZCS ve ZVS yumuşak anahtarlama teknikleri anahtarlama kayıplarını önemli ölçüde azaltmasına rağmen oluşturduğu bu ek stresler sebepleriyle sürücüdeki güç yoğunluğunda azalma ve kontrol da zorlamalara sebep olmaktadır [48].

3.2.3. Sıfır akımda geçiş (ZCT)

Sıfır Akımda Geçiş (ZCT), kesime girme anında anahtardan geçen akımın sıfıra ulaşma noktasının öne alındığı ileri bir yumuşak anahtarlama tekniğidir. Burada, güç anahtarından geçen akım kısa süreli kısmi rezonans sayesinde sıfıra düşürülür denetim sinyali sıfır akımda kesilir. Böylece, akım ile gerilimin üst üste binmesi engellenir ve anahtarlama kaybı tamamen yok edilir. Bu teknikle mükemmel bir kesime gidiş gerçekleştirilir. Burada ZCS ve ZVS'nin aynı anda gerçekleştiği görülmektedir. Anahtarlama enerjisinin geri kazanıldığı bu teknik, ancak modern hücrelerle gerçekleştirilebilir ve bir yardımcı anahtar gerektirir [39, 40, 44].

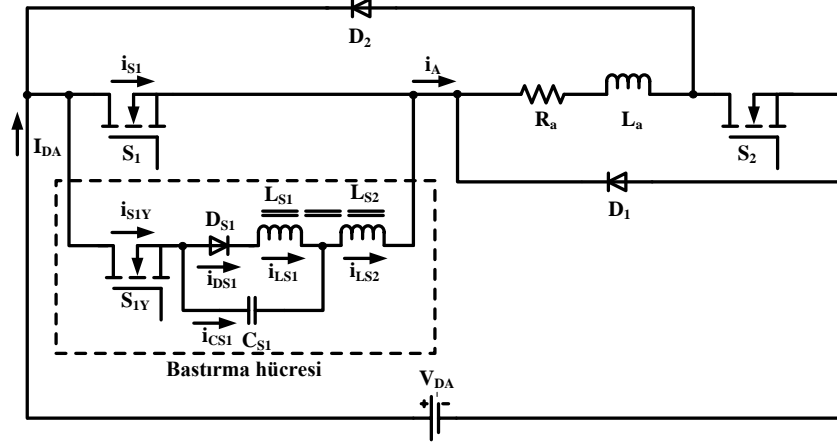
3.2.4. Sıfır gerilimde geçiş (ZVT)

Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT), iletme girme anında uygulanan gelişmiş yumuşak anahtarlama tekniğidir. Burada, güç anahtarı uçlarındaki gerilim kısa süreli kısmi rezonans sayesinde sıfıra düşürülür ve denetim sinyali sıfır gerilimde uygulanır. Böylece, anahtarlama enerji kaybı tamamen yok edilir ve mükemmel bir iletme gidiş gerçekleştirilir. Gerilimin sıfıra düşme noktası öne alınarak gerçekleştirilen bu teknikte de ZCS ve ZVS'nin birlikte sağlandığı söylenebilir. Anahtarlama enerjisinin geri kazanıldığı bu teknik modern hücrelerle elde edilir ve ek bir anahtar gerektirir. Sadece bu teknikte güç anahtarı parazitik kondansatörünün deşarj enerjisi geri kazanılmaktadır. Yüksek güçlü parazitik kondansatörlü MOSFET'lerin ZVT yumuşak anahtarlama tekniği ile sürülmesi büyük önem taşır [39, 40, 44].

3.3. Prototip KKARM Sürücüsü

Literatürde görüldüğü üzere ARM'lerin sürülmesinde pek çok model kullanılmaktadır. Yapılan incelemelerde asimetrik H köprü dönüştürücünün ARM'lerin sürülmesinde yaygın olarak kullanıldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni, H köprü dönüştürücünün denetiminin ve uygulamasının basit olmasıdır. Tez çalışmasında gerçekleştirilen prototip KKARM'yi süren 1 ve 3 fazlı sıfır akım geçişli asimetrik H köprü dönüştürücüler Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de sırasıyla gösterilmiştir. Çalışmada; H dönüştürücünün bastırma hücresi modeli Ürgün ve arkadaşlarının önerdiği ZVT-ZCT tekniği kullanılarak çıkarılmıştır [49]. Burada bastırma hücresi ana anahtara paralel, yüke (makina) seri bağlıdır. Makina; ana anahtar'ın sıfır akım geçişiyle kesime girmesi durumundayken bastırma hücresi tarafından üretilen

rezonans akımlarıyla beslenmektedir. Bu da makinanın performansını olumlu yönde etkilemektedir.



Şekil 3.4. 1 fazlı sıfır akım geçişli asimetrik H tipi köprü dönüştürücü

Sistemin çalışmasının daha kolay anlaşılması amacıyla, 1 fazlı sürücü eşdeğer devresinin analizi yapılmıştır. Şekil 3.4'te verilen yumuşak anahtarlama devre; faz sargı direnci (R_a), faz sargı endüktansı (L_a), faz anahtarları (S_1, S_2), serbest geçiş diyotları (D_1, D_2), yardımcı anahtar (S_{1Y}), yardımcı diyot (D_{S1}), manyetik kuplaj endüktansları (L_{S1}, L_{S2}) ve bastırma kondansatörü (C_{S1})'den oluşmaktadır. Devrenin bir anahtarlama periyodunda kararlı durum analizini kolaylaştırmak amacıyla; devre gerilimi ve akımının sabit, yarı iletken elemanların ideal olduğu varsayılmıştır.

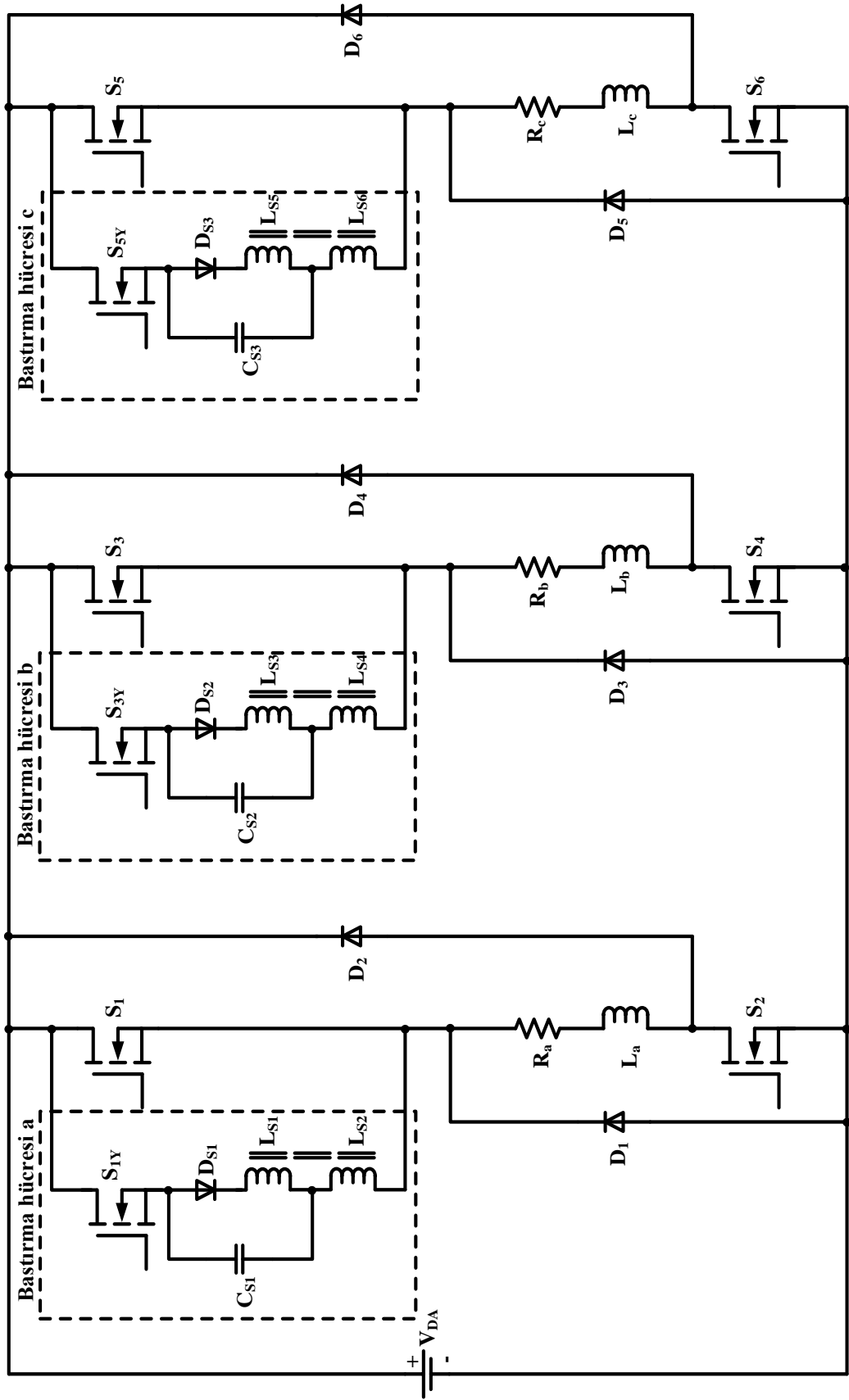
3.3.1. Devrenin çalışma aralıkları

Önerilen yumuşak anahtarlama sürücü devresi; kararlı durumda, bir anahtarlama periyodu için yedi farklı aralıkta çalışmaktadır. Çalışma aralıklarının eşdeğer devre şemaları ve temel dalga şekilleri sırasıyla Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de verilmiştir.

Aralık 1 [$t_0 < t < t_1$]

Sürücü devresinin Aralık 1'deki durumu Şekil 3.6-a'da gösterilmiştir. Bu aralıkta ana anahtar (S_1) iletimdedir. Gerilim kaynağı, makinanın faz sargısını S_1 anahtarı üzerinden beslemektedir. Kondansatör üzerindeki gerilim;

$$V_{CS1} = -V_{CS1MAX} \quad (3.1)$$



Şekil 3.5. 3 fazlı sıfır akım geçişli asimetrik H tipi köprü dönüştürücü

tır. Aralık 1 yardımcı anahtar (S_{1Y})'nin iletme girmesiyle tamamlanmaktadır. Bu aralık için;

$$I_{DA} = i_{S1} = i_A \quad (3.2)$$

eşitliği geçerlidir.

Aralık 2 [$t_1 < t < t_2$]

Sürücü devresinin Aralık 2'deki durumu Şekil 3.6-b'de gösterilmiştir. Bu aralık S_{1Y} 'nin iletme girmesiyle başlamaktadır. S_{1Y} iletme geçirildiğinde C_{S1} - L_{S2} arasında seri rezonans oluşur. Bu andan itibaren rezonans kol üzerindeki akım artarken, S_1 üzerinden geçen akım azalır. Aralık sonunda ($t=t_2$) rezonans kol üzerinden akan akım I_{DA} değerine ulaşır; dolayısıyla S_1 'den geçen akım sıfırlanır ve böylece S_1 kesime gider. Aralık 2'de C_{S1} kondansatörü üzerine düşen gerilim $-V_{CS1MAX}$ değerinden sıfıra doğru yükselmeye başlar. Bu aralık için;

$$i_{S1} = i_A - i_{S1Y} \quad (3.3)$$

$$i_{S1Y} = i_{CS1} = i_{LS2} = \frac{V_{CS1MAX}}{Z_r} \sin(\omega_r(t - t_1)) \quad (3.4)$$

$$V_{CS1} = -V_{CS1MAX} \cos(\omega_r(t - t_1)) \quad (3.5)$$

$$t_{d1} = T_r / 4 \quad (3.6)$$

$$T_r = 2\pi \sqrt{L_{S2} C_{S1}} \quad (3.7)$$

$$Z_r = \sqrt{L_{S2} / C_{S1}} \quad (3.8)$$

eşitlikleri yazılır.

Aralık 3 [$t_2 < t < t_3$]

Sürücü devresinin Aralık 3'teki durumu Şekil 3.6-c'de gösterilmiştir. Aralık 3, S_1 'in kontrol sinyalinin kesilmesiyle başlar. Aralık 3'ün başlangıcında;

$$V_{CS1} = V_{CS1}(t_2) \quad (3.9)$$

$$i_{S1}=0 \quad (3.10)$$

$$i_{S1Y}=i_{CS1}=i_{LS2} \quad (3.11)$$

eşitlikleri geçerlidir. S_{1Y} halen iletimde olduğu için C_{S1} - L_{S2} seri rezonansı devam etmektedir. Rezonans kol üzerinden akan akım $i_{S1Y}=i_{CS1}=i_{LS2}$ maksimum seviyeye ulaşır. Aralık sonunda C_{S1} gerilimi sıfıra düşer. D_{S1} diyotunun iletime girmesiyle bu aralık son bulur.

$$i_{S1Y} = i_{CS1} = i_{LS2} = \frac{V_{CS1MAX}}{Z_r} \sin(\omega_r(t-t_2)) \quad (3.12)$$

$$V_{CS1} = -V_{CS1MAX} \cos(\omega_r(t-t_2)) \quad (3.13)$$

$$W_{LS2MAX} = \frac{1}{2} L_{S2} (i_{LS2MAX})^2 \quad (3.14)$$

$$i_{LS2MAX} = \frac{V_{CS1MAX}}{Z_r} \quad (3.15)$$

eşitlikleri yazılır.

Aralık 4 [$t_3 < t < t_4$]

Sürücü devresinin Aralık 4'deki durumu Şekil 3.6-d'de gösterilmiştir.. Aralık 4 D_{S1} 'in iletime girmesiyle başlar. Aralık başlangıcında;

$$V_{CS1}=0 \quad (3.16)$$

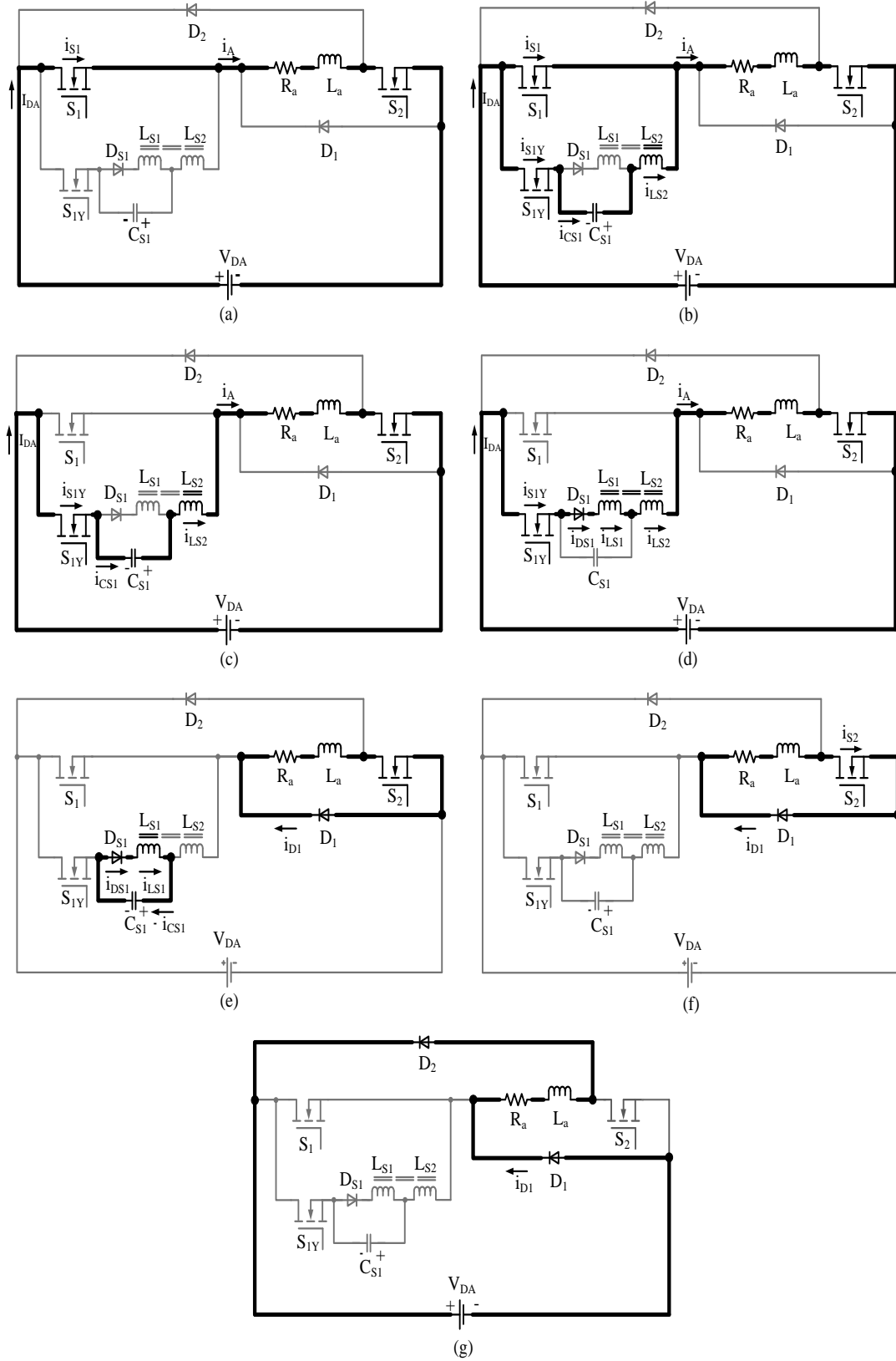
$$i_{S1Y}=i_{DS1}=i_{LS1}=i_{LS2} \quad (3.17)$$

eşitlikleri geçerlidir. Yardımcı kol akımı S_{1Y} - D_{S1} - L_{S1} - L_{S2} üzerinden akmaya devam eder. Yardımcı anahtar S_{1Y} 'nin kontrol sinyalinin kesilmesiyle bu aralık son bulur.

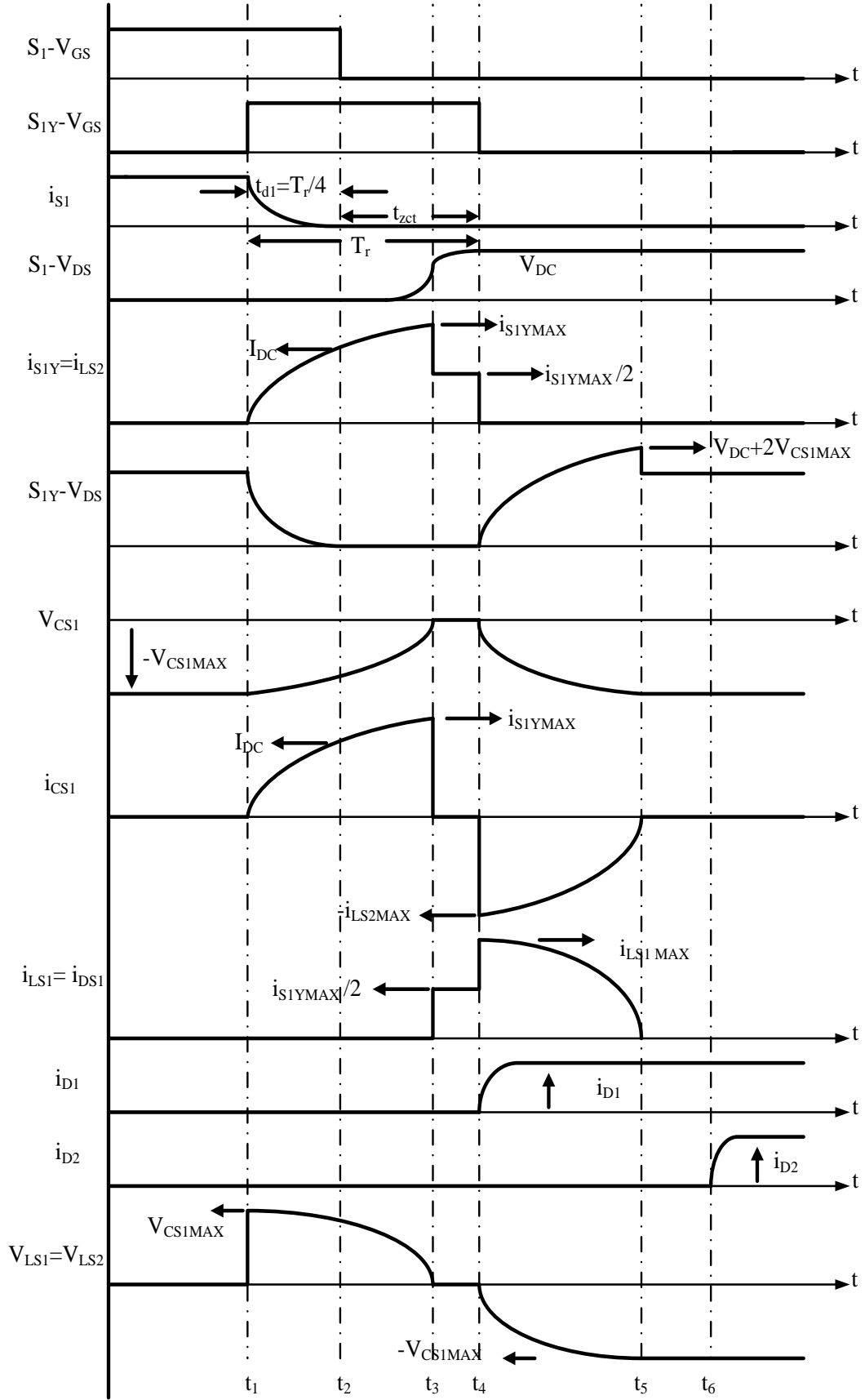
Bu aralık için;

$$i_{S1Y} = i_{LS2} = i_{LS1} = i_{DS1} = \frac{1}{2} i_{S1YMAX} \quad (3.18)$$

eşitlikleri yazılır.



Şekil 3.6. Sıfır akım geçişli Asimetrik H tipi köprü dönüştürücünün çalışma aralıkları a) Aralık 1 $[t_0-t_1]$, b) Aralık 2 $[t_1-t_2]$, c) Aralık 3 $[t_2-t_3]$, d) Aralık 4 $[t_3-t_4]$, e) Aralık 5 $[t_4-t_5]$, f) Aralık 6 $[t_5-t_6]$, g) Aralık 7 $[t_6-t_0]$



Şekil 3.7. Sıfır akım geçişli Asimetrik H tipi köprü dönüştürücü temel dalga şekilleri

Aralık 5 [$t_4 < t < t_5$]

Sürücü devresinin Aralık 5'deki durumu Şekil 3.6-e'de gösterilmiştir. Aralık 5 yardımcı anahtar S_{1Y} 'nin kontrol sinyalinin kesilmesiyle başlar. Aralık başlangıcında $V_{CS1} = 0$ (3.19)

eşitliği geçerlidir. Bu çalışma durumunda iki kapalı devre incelenmelidir. Birinci devrede, D_{S1} 'in iletme girmesiyle; C_{S1} ve L_{S1} arasında paralel rezonans oluşur. Rezonans devam ettiği sürece bu aralık devam eder. Aralık 5, i_{LS1} 'in sıfıra düşmesiyle sona erer. Bu anda L_{S1} üzerinde depolanmış olan tüm enerji C_{S1} bastırma kondansatörüne aktarılmıştır. Böylece aralık sona erdiğinde,

$$V_{CS1} = -V_{CS1MAX} \quad (3.20)$$

değerine ulaşmıştır. İkinci devrede aralık başlangıcında D_1 serbest geçiş diyotunun iletme girmesiyle, I_{D1} akımı D_1 - R_a - L_a - S_2 üzerinden akmaya devam eder. Bu aralık için;

$$i_{LS1} = i_{CS1} = i_{DS} = i_{LS1MAX} \cos(\omega(t - t_4)) \quad (3.21)$$

$$S_{1Y-V_{DS}} = V_{DC} + 2V_{CS1MAX} \quad (3.22)$$

eşitlikleri yazılır.

Aralık 6 [$t_5 < t < t_6$]

Sürücü devresinin Aralık 6'daki durumu Şekil 3.6-f'de gösterilmiştir. Aralık 6, i_{LS1} akımının sıfıra düşmesiyle başlar. Aralık başlangıcında C_{S1} kapasite gerilimi;

$$V_{CS1} = -V_{CS1MAX} \quad (3.23)$$

değerindedir. I_{D1} akımı ise D_1 - R_a - L_a - S_2 üzerinden akmaya devam etmektedir. S_2 anahtarının kontrol sinyalinin kesilmesiyle aralık sona erer. Bu aralık için;

$$i_{D1} = i_{S2} \quad (3.24)$$

eşitliği yazılır.

Aralık 7 [$t_6 < t < t_7$]

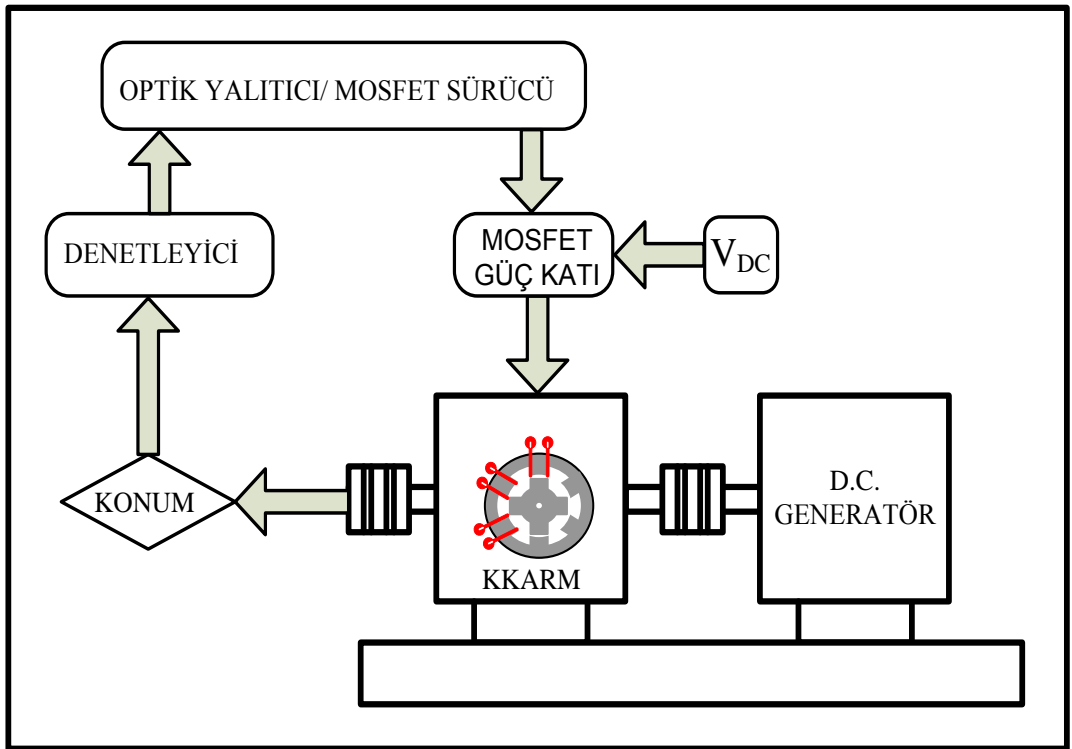
Sürücü devresinin Aralık 7'deki durumu Şekil 3.6-g'de gösterilmiştir. Aralık 7, S_2 anahtarının kontrol sinyalinin kesilmesiyle başlar. Sargılar üzerinde birikmiş olan enerji bu aralıkta şebekeye aktarılır. Bu aralık için;

$$i_{S1} = i_{S1Y} = 0 \quad (3.25)$$

eşitliği geçerlidir.

4. UYGULAMA

Şekil 4.1’de, prototipi gerçekleştirilen uygulama devresinin blok şeması verilmiştir. Sistem; KKARM mekaniği, güç katı ve bastırma devreleri, işlemci birimi, sürücü devreleri, akım ölçüm katı ve gerilim ölçüm katı ve besleme devrelerinden oluşmaktadır.

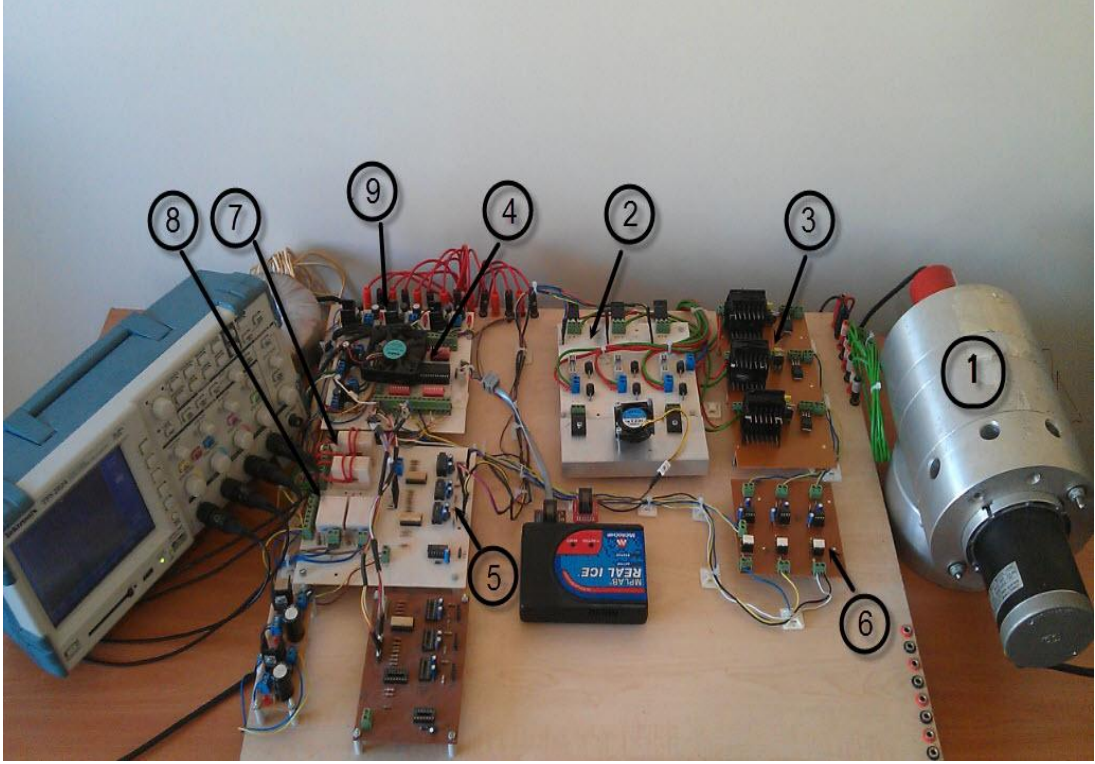


Şekil 4.1. Test sistemi blok şeması

Tez çalışmasında KKARM, sert ve sıfır akım geçiş teknikleriyle sürülmüş; her iki durumda sürücüde oluşan anahtarlama kayıpları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Şekil 4.2’de gerçekleştirilen test düzeneğinin resmi görülmektedir. Burada;

1. KKARM mekaniği,
2. Güç katı,
3. Bastırma hücreleri,
4. İşlemci ünitesi,
5. Ana anahtarların sürücü devresi,
6. Yardımcı anahtarların sürücü devresi,

7. Akım ölçüm katı,
8. Gerilim ölçüm katı,
9. Besleme devreleridir.



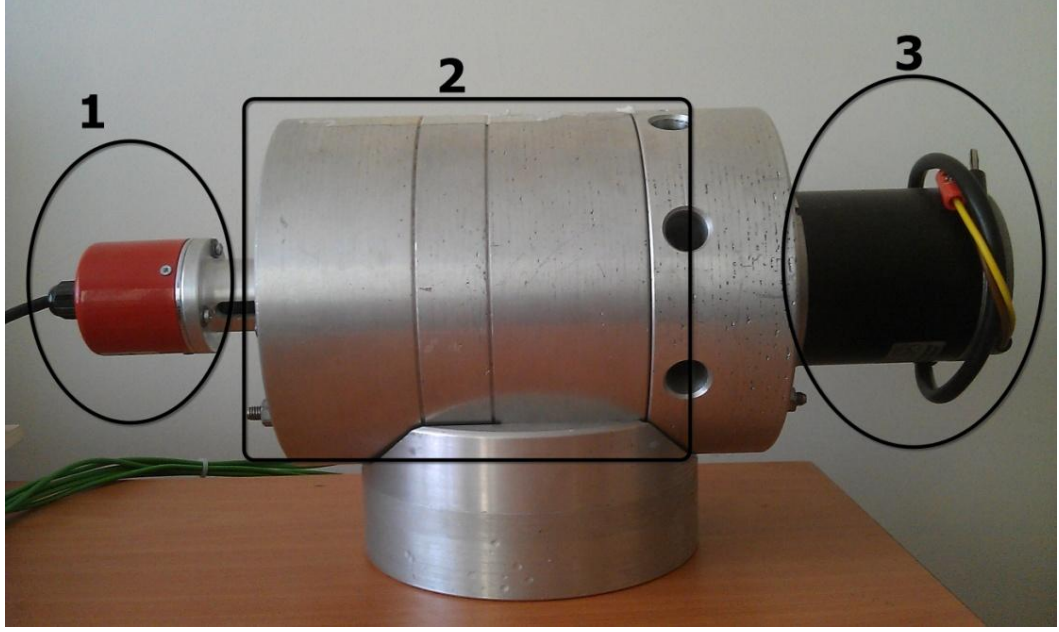
Şekil 4.2. Test sistemi

4.1. Prototip KKARM Mekanığı

Şekil 4.3’de görülen mekanik düzenek; prototip KKARM, rotor konum tespiti için kullanılan enkoder ve yük olarak kullanılan daimi mıknatıslı generatörden oluşmaktadır. KKARM ve DA generatör kaprinle birbirine akuple edilmiştir. KKARM, 1000 d/daki nominal hıza, 700 Watt giriş gücüne ve 6/4 kutup yapısına sahiptir. Burada;

1. Encoder,
2. KKARM,
3. DA Generatörü göstermektedir.

KKARM miline akuple edilen enkoder, 0,25⁰ hassasiyetli, OPKON PRI50 TT360-Z-5V-2M5 serisindedir. Seçilen bu enkoder 5V besleme gerilimi ile çalışmaktadır.



Şekil 4.3. KKARM mekaniği

Kullanılan Digital Signal Processor (DSP)'nin giriş gerilimi de 5V olduğu için, DSP ile enkoder arasına herhangi bir dönüştürücüye gerek kalmamaktadır. DSP pozisyon bilgisini doğrudan okuyabilmektedir. Sonuç olarak böyle bir uygulama için bu model enkoderin seçilmesinin, bir avantaj olduğu söylenebilir. Test düzeneğinde kullanılan enkoder ayrıntısı, Şekil 4.4'te görülmektedir.

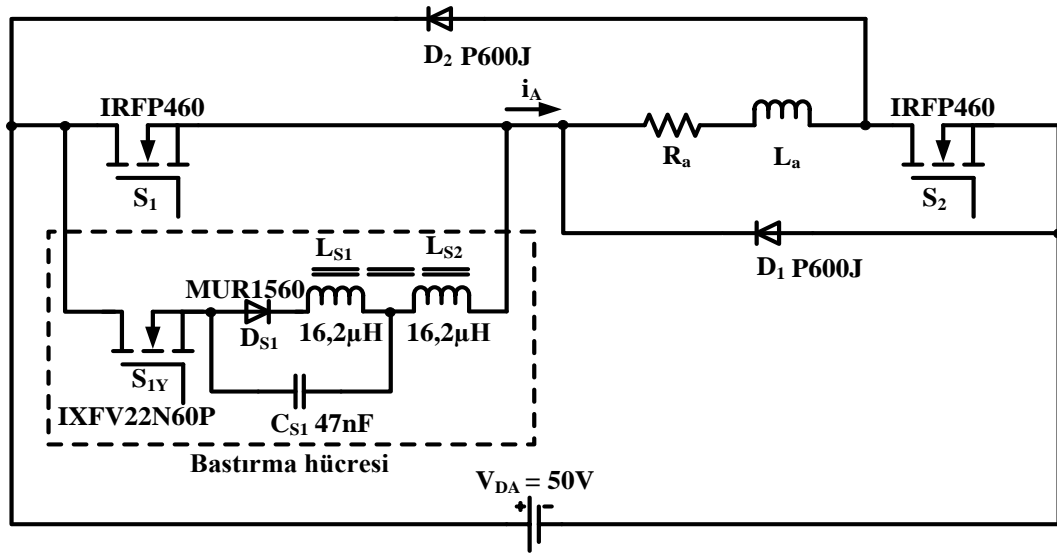


Şekil 4.4. 360 Darbeli enkoder

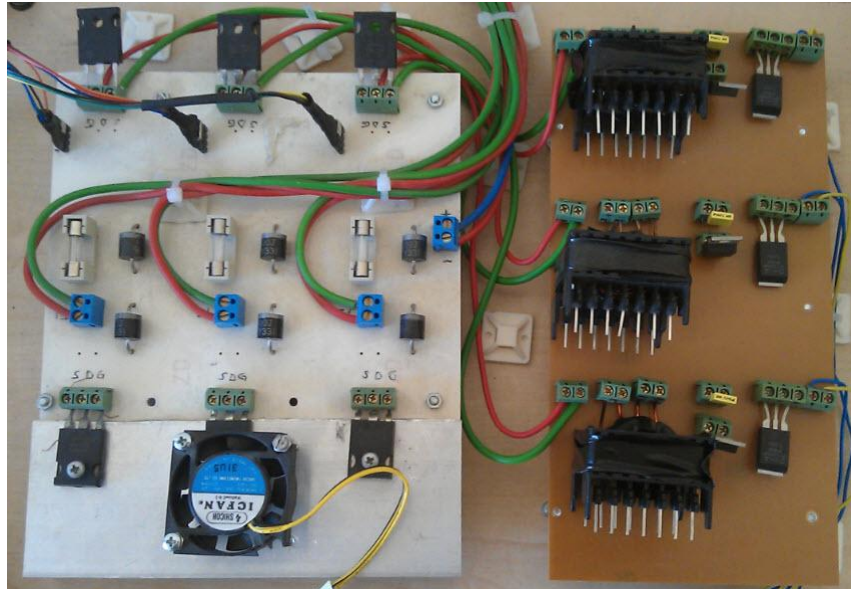
4.2. Güç Katı ve Bastırma hücreleri

Şekil 4.5'te Prototip KKARM'nin güç katı ve bastırma hücrelerinin bir faz teorik şeması ve uygulama devresi gösterilmiştir. Teorik devrede KKARM sargıları R_a-L_a ile modellenmiştir. Bastırma hücresinde kullanılan kuplajlı endüktansların değerleri,

çalışmaları gereği birbirine eşittir. 50V DA kaynak gerilimi şebekeye bağlanan bir transformatörün uçlarına köprü doğrultucu bağlanarak elde edilmiştir. Filtreleme amacıyla köprü doğrultucu çıkışına bir kondansatör ilave edilmiştir. Burada kondansatörün değeri yüksek seçilmiştir. Çünkü harmonikli bir gerilim, KKARM'nin performansını olumsuz etkileyecek ve moment dalgalılığında artışa neden olabilecektir.



a)



b)

Şekil 4.5. Sıfır akım geçişli asimetrik köprü dönüştürücü; a) Bir faz teorik devre, b) Uygulama devresi

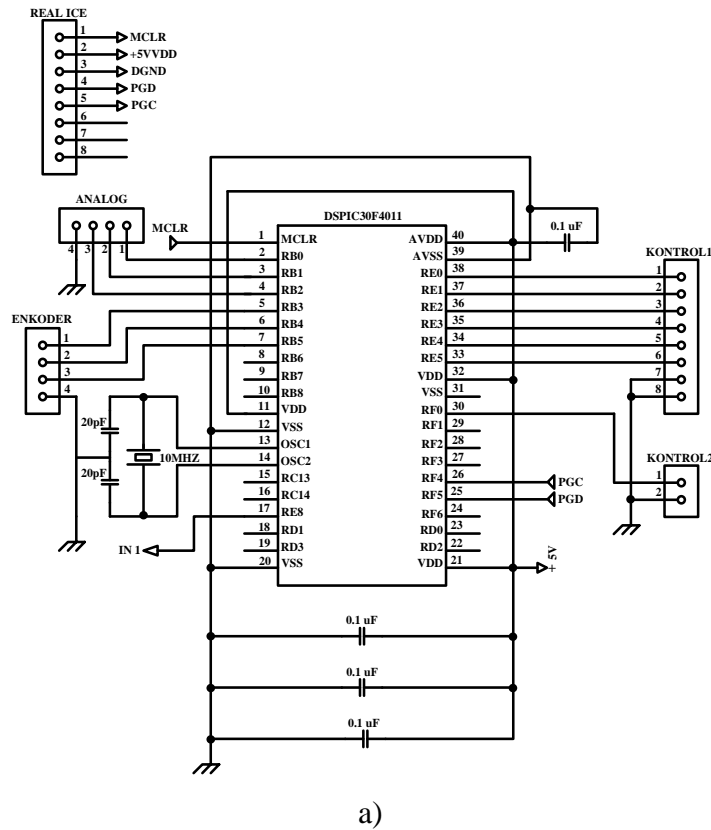
Devrede kullanılan yarı iletken elemanların nominal değerleri devrenin kararlı çalışması için büyük önem arz etmektedir. Tablo 4.1’de kullanılan yarı iletken elemanlar ve nominal değerleri verilmektedir.

Tablo 4.1. Yarı iletken elemanlar ve nominal değerleri

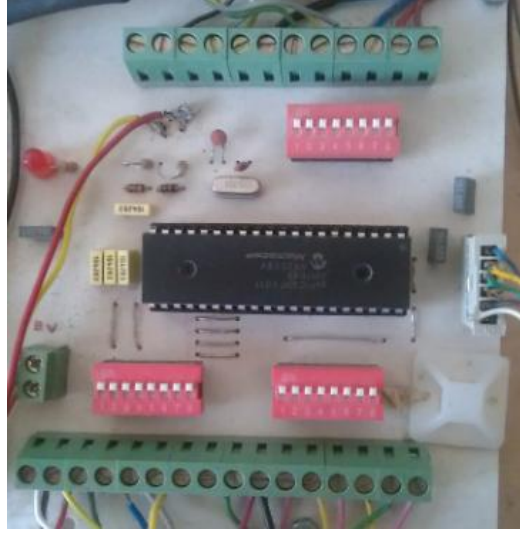
Yarı İletken	Seri	Gerilim (V)	Akım (A)	t_r (ns)	t_f (ns)	t_{rr} (ns)
S_1	IRFP460	500	20	59	58	570
S_{1Y}	IXFV22N60P	600	22	20	23	200
D_{S1}	MUR1560	600	60			35
D_1	P600J	1000	6			$2,5 \times 10^3$

4.3. Denetleyici Katı

Denetim sinyallerini elde etmek için kullanılan mikrodenetleyicinin teorik ve uygulama devresi Şekil 4.6’da görülmektedir. Çalışmada MICROCHIP firmasının DSPIC 30F4011 işlemcisi kullanılmıştır.



Şekil 4.6. DSPIC denetleyici; a) Teorik şema, b) Uygulama devresi

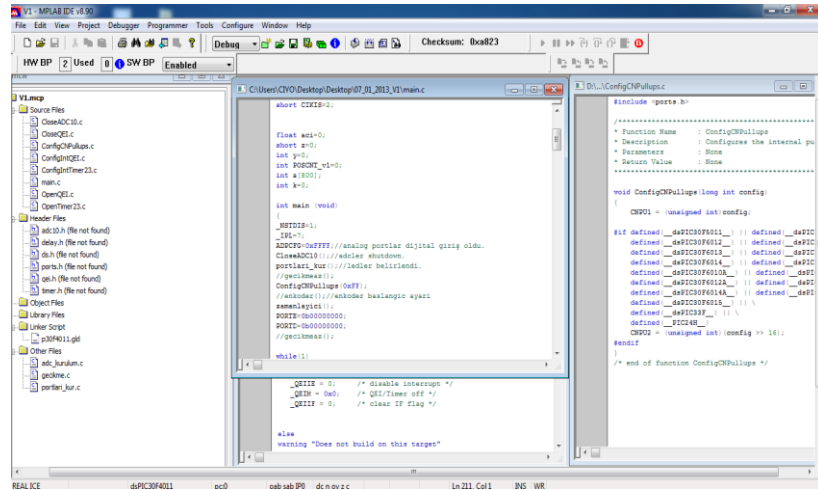


b)

Şekil 4.6. (Devam) DSPIC denetleyici;
a) Teorik şema, b) Uygulama devresi

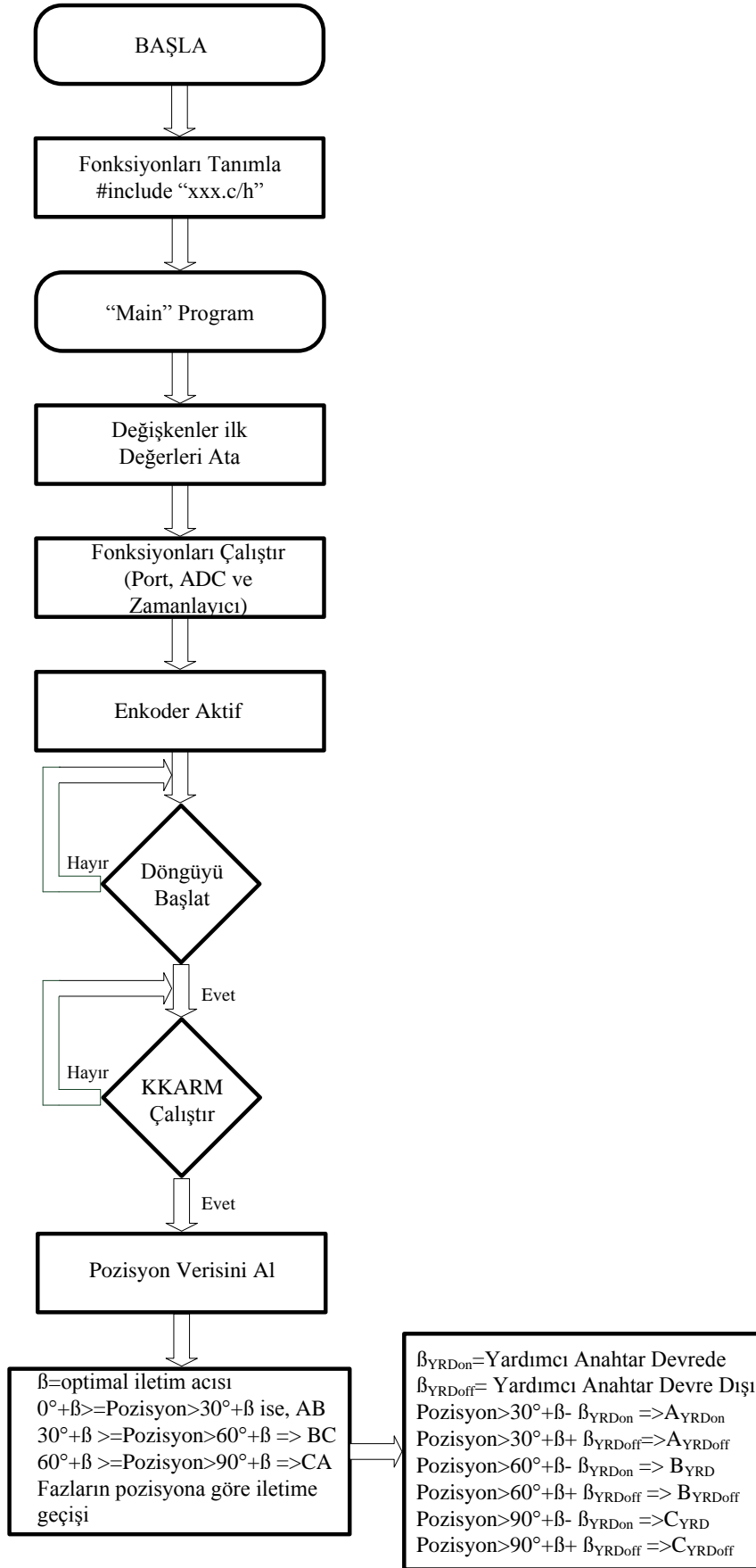
4.3.1. Denetleyici programı

Denetim yazılımı Microchip firması tarafından geliştirilmiş olan MPLAB programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7’de MPLAB programı görülmektedir.



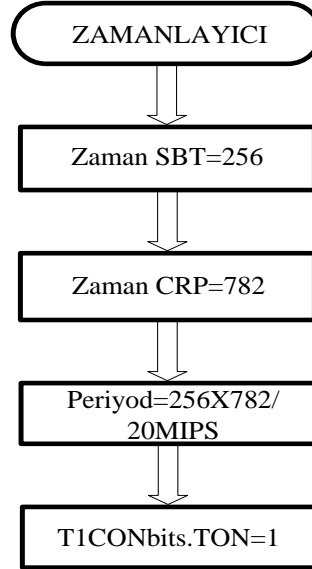
Şekil 4.7. MPLAB ekran görüntüsü

Şekil 4.8’de ana denetim algoritması görülmektedir. Motor fazlarını denetleyen ana anahtarlar ve bastırma hücreleri için yardımcı anahtarın denetimi işlemleri gerçekleştirilmektedir. Encoderden pozisyon bilgisinin alınması, giriş çıkış portlarının kurulumu ve 10ms’lik zamanlayıcı kesmesinin kurulumu da bu algoritmada gerçekleştirilmektedir.



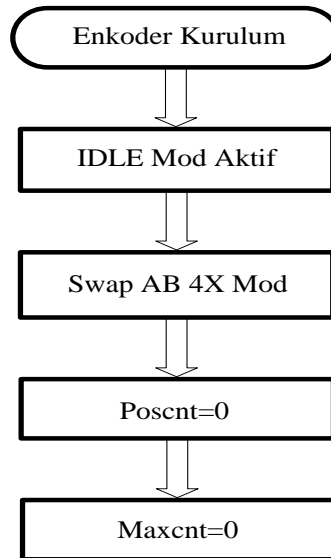
Şekil 4.8. Ana denetim algoritması

Şekil 4.9’da akım ve gerilim değerlerinin okunabilmesi için ayarlanması gereken zamanlayıcının kurulum algoritması görülmektedir. Algoritma kurulduktan sonra, zamanlayıcı kesmesi sabit zaman aralıklarıyla devreye girerek gerekli denetim hesaplamalarını gerçekleştirir.



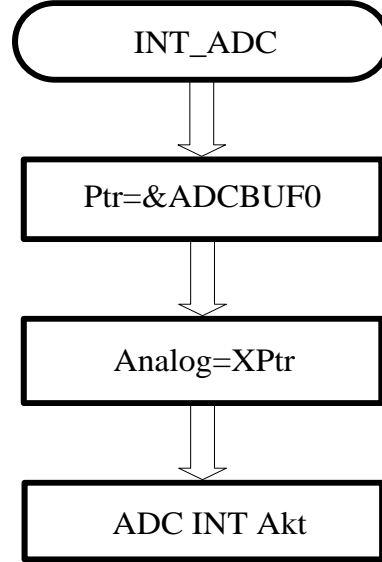
Şekil 4.9. Zamanlayıcı denetim algoritması

Şekil 4.10’da enkoderden veri alınabilmesi için gerekli olan algoritma görülmektedir. Enkoder 4x modda çalışmaktadır. Buna göre her 0.18 derecede enkoder bilgisinin bulunduğu değişken içeriği 1 birim arttırılmaktadır.



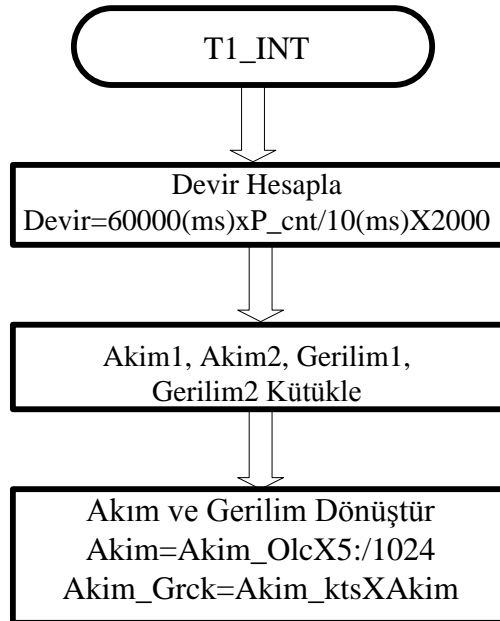
Şekil 4.10. Enkoder denetim algoritması

Şekil 4.11’de DSP’ye ait ADC modülün kurulumu gösterilmektedir. ADCBUF0 değişkeni sistemden alınan dört adet analog veriyi saklamaktadır.



Şekil 4.11. Analog bilginin sayısal veriye dönüşüm algoritması

Şekil 4.12’de zamanlayıcı kesmesinin denetim algoritması görülmektedir. Devir hesaplama, akım ve gerilin kütüklenmesi bu aşamada gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.12. Zamanlayıcı kesmesinin denetim algoritması

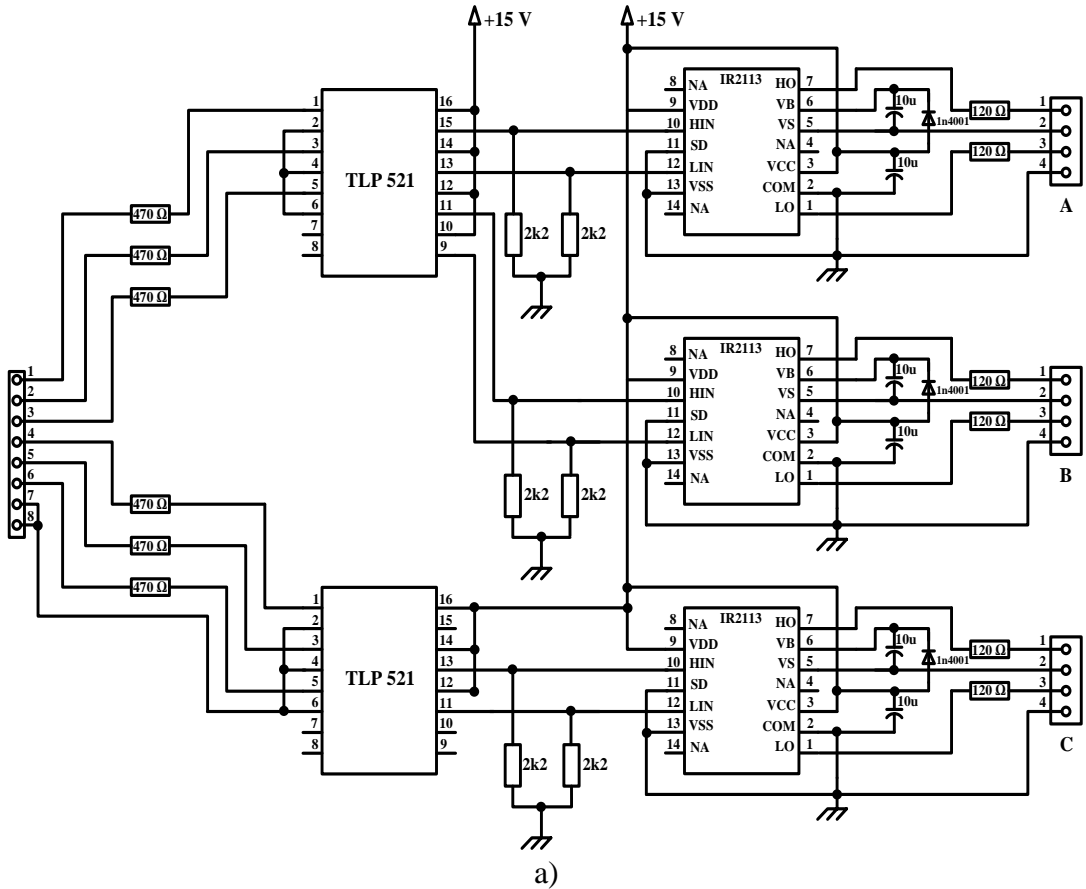
4. 4. Ana Anahtar Sürücü Katı

Şekil 4.13’de ana anahtarları sürmek için kullanılan sistemin devre şeması ve uygulama devresi görülmektedir.

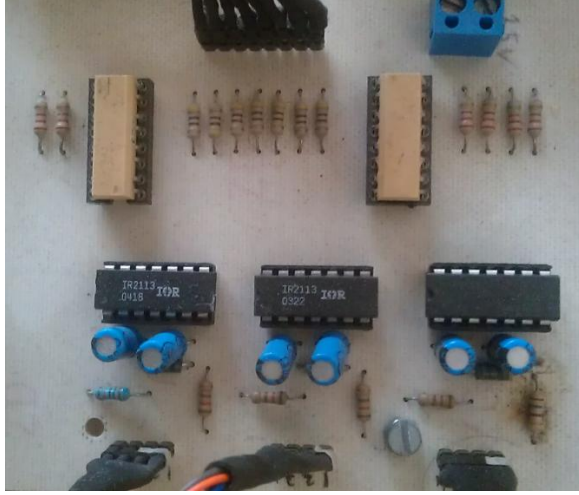
Burada her bir faz için IR2113 anahtar sürücü entegre kullanılmıştır. Entegre ve işlemci arasındaki yalıtım TLP521 optokuplörü ile sağlanmıştır. Sürücü entegreye ait bazı özellikler Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Ana anahtar sürücü entegrenin karakteristik özellikleri

Besleme gerilimi	10-20 V
Yükselme zamanı	25 ns
Düşme zamanı	17 ns
Açma süresi	120 ns
Kapama süresi	94 ns



Şekil 4.13. Ana anahtarlar sürücü katı; a) Teorik şema, b) Uygulama devresi

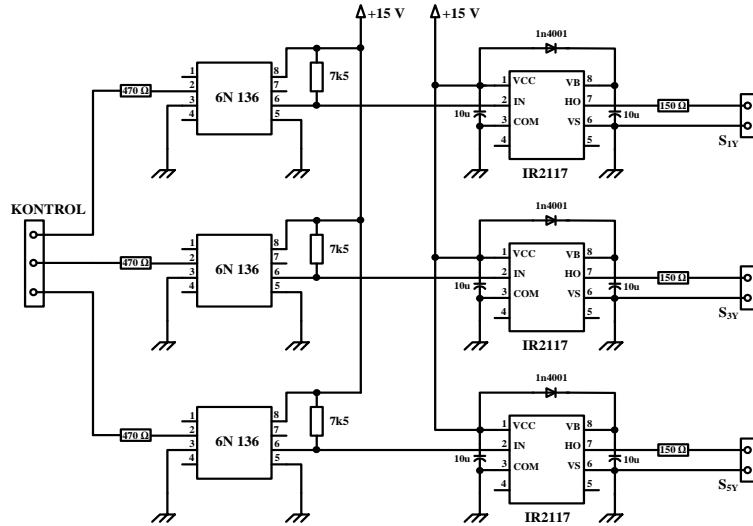


b)

Şekil 4.13. (Devam) Ana anahtarlar sürücü katı; a) Teorik şema, b) Uygulama devresi

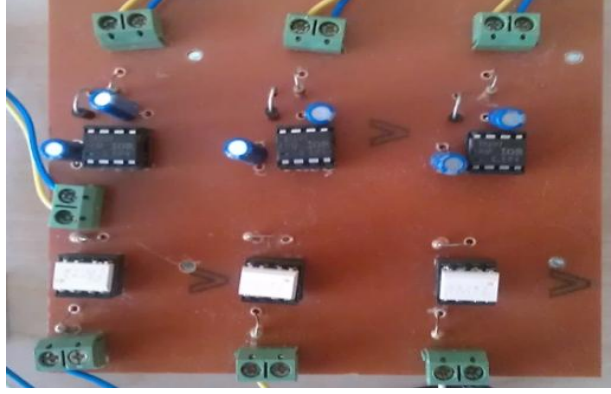
4.5. Yardımcı Anahtar Sürücü Katı

Şekil 4.14’de yardımcı anahtar sürücü katı devre şeması ve uygulama devresi görülmektedir. Her bir bastırma hücresi için birer adet IR2117 sürücü entegre kullanılmıştır. Sürücü ve işlemci arasındaki yalıtımı sağlamak amacıyla 6N136 optokuplör kullanılmıştır. Sürücü entegreye ait bazı özellikler Tablo 4.3’de verilmiştir.



a)

Şekil 4.14. Yardımcı anahtarlar sürücü katı; a) Teorik şema, b) Uygulama devresi



b)

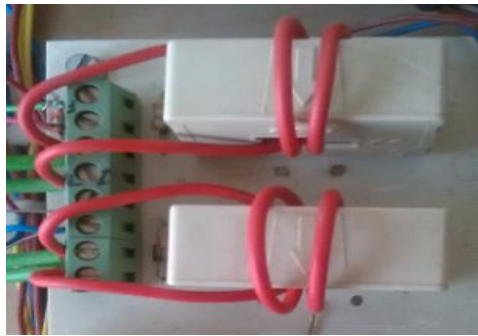
Şekil 4.14. (Devam) Yardımcı anahtarlar sürücü katı; a) Teorik şema, b) Uygulama devresi

Tablo 4.3. Yardımcı anahtar sürücü entegrenin karakteristik özellikleri

Besleme gerilimi	10-20 V
Yükselme zamanı	80 ns
Düşme zamanı	40 ns
Açma süresi	125 ns
Kapama süresi	105 ns

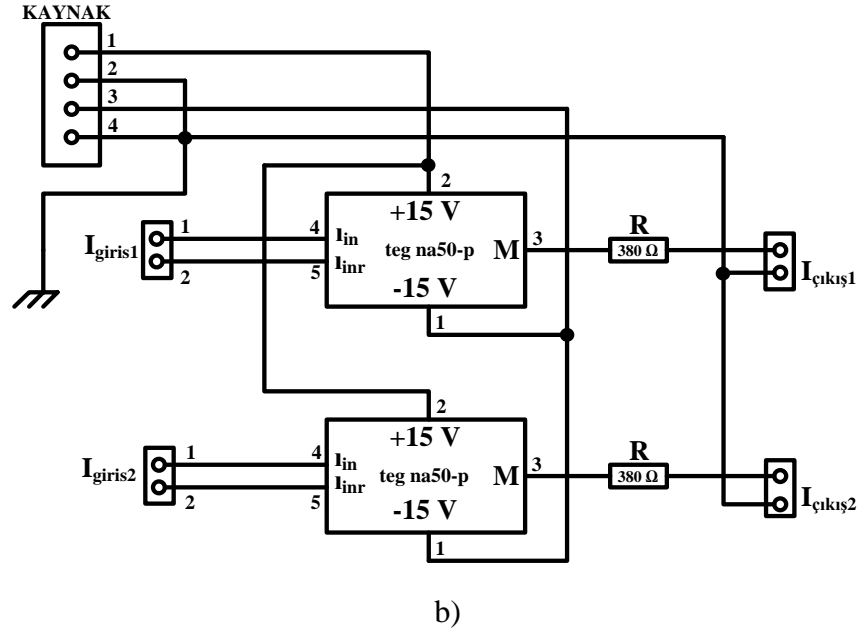
4.6. Akım Ölçüm Katı

Şekil 4.15’de akım ölçüm katının devre şeması ve uygulama devresi görülmektedir. Devrede TEG NA50-P hall etkili akım sensörü kullanılmıştır. Bu sensör, +/-12V~+/-15V DA besleme gerilimine, 0-200 KHz frekans aralığına, -25°C/ +85°C çalışma sıcaklığına, 1µs’den düşük cevap zamanına sahiptir.



a)

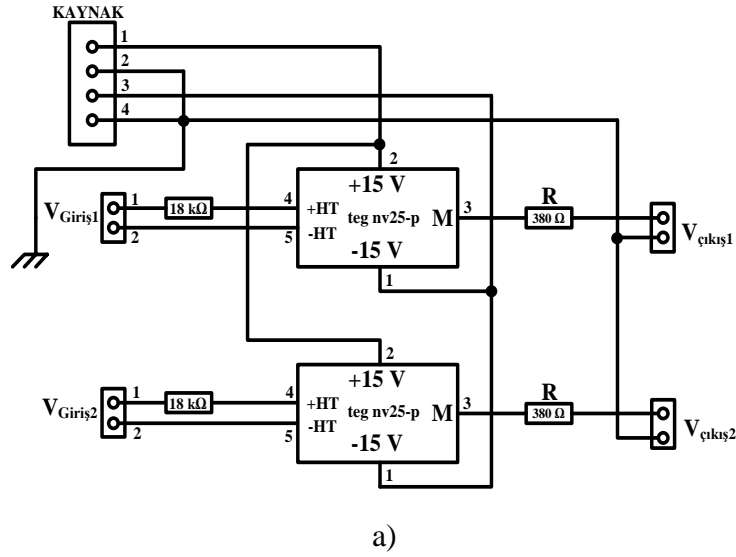
Şekil 4.15. Akım ölçüm katı; a) Uygulama devresi, b) Teorik şema



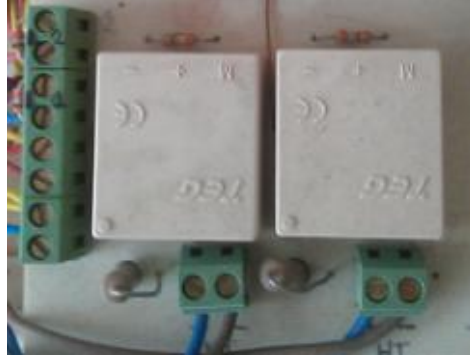
Şekil 4.15. (Devam) Akım ölçüm katı; a) Uygulama devresi, b) Teorik şema

4.7. Gerilim Ölçüm Katı

Şekil 4.16'da gerilim ölçüm katının devre şeması ve uygulama devresi görülmektedir. Devrede TEG NV25-P gerilim sensörü kullanılmıştır. Kullanılan bu sensör, +/-12V~+/-15V DA besleme gerilimine, -40°C/ +85°C çalışma sıcaklığına, 40µs'den düşük cevap zamanına sahiptir.



Şekil 4.16. Gerilim ölçüm katı; a) Teorik şema, b) Uygulama devresi

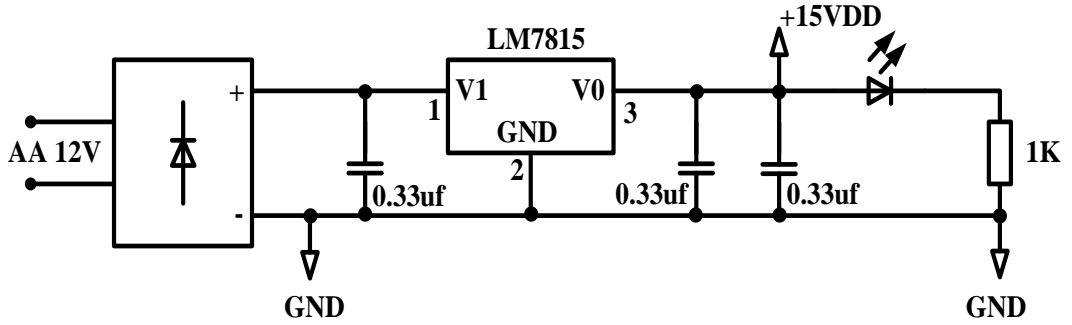


b)

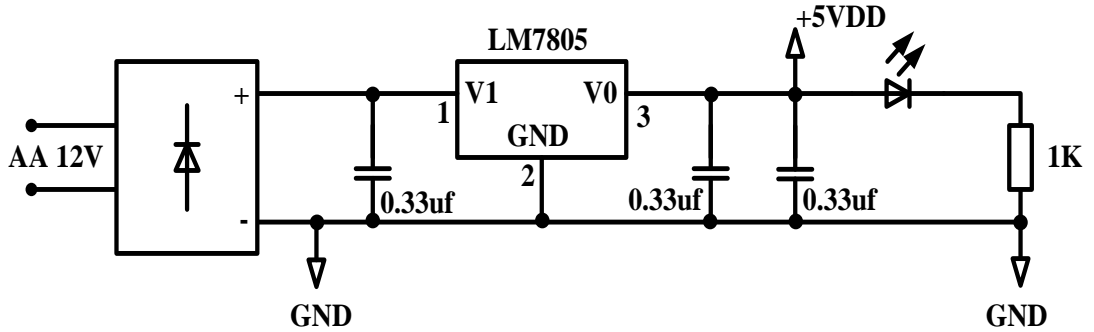
Şekil 4.16. (Devam) Gerilim ölçüm katı; a) Teorik şema, b) Uygulama devresi

4.8. Besleme Devreleri

Şekil 4.17’de besleme devreleri görülmektedir. Kontrol devresi için 5V, sürücü devreleri için ise 15V DA gerilim üretilmiştir. Kontrol devresinde LM7805, sürücü devresinde LM7815 voltaj regülatörleri kullanılmıştır.



a)



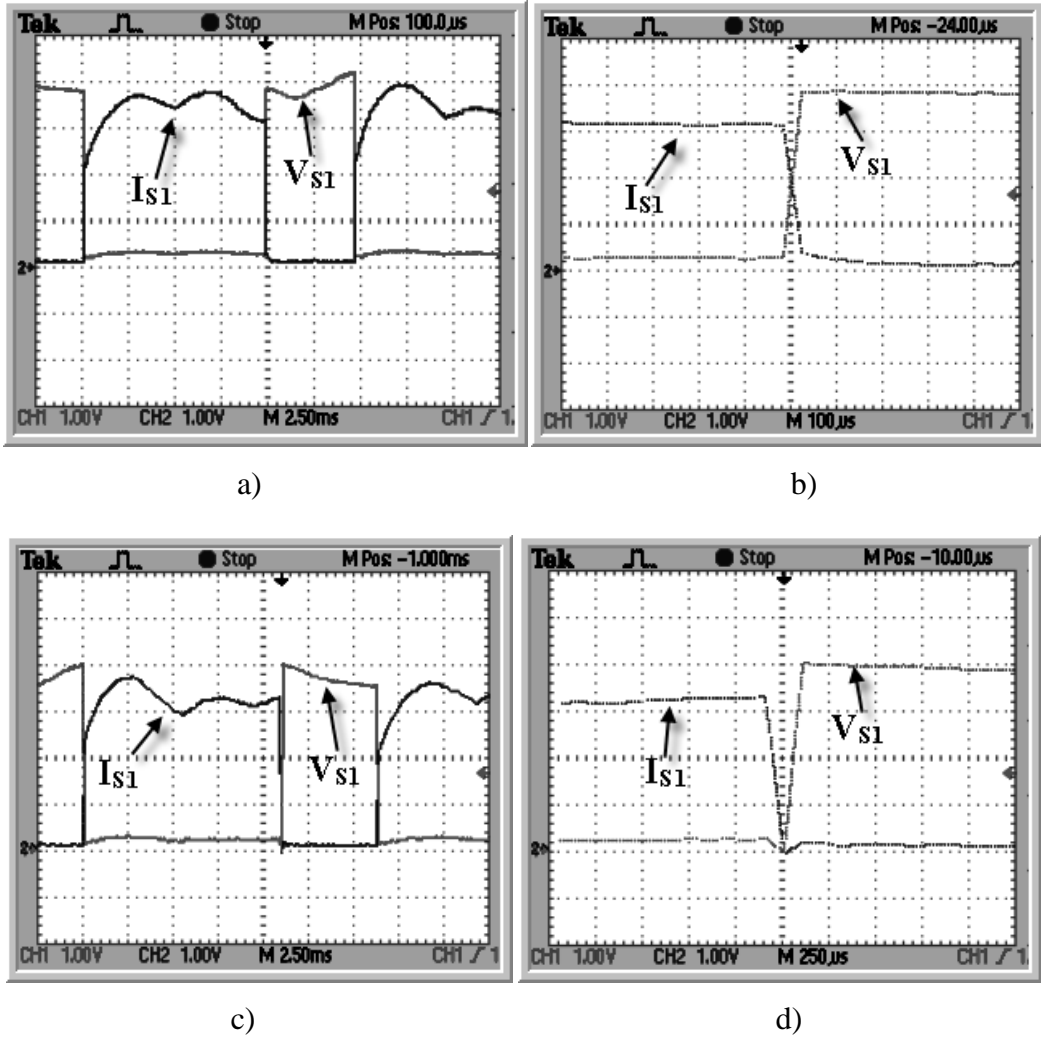
b)

Şekil 4.17. Besleme devreleri; a) Sürücü devreleri besleme geriliminin üretilmesi, b) Kontrol devresi besleme geriliminin üretilmesi

4.9. Sonuçlar

Sıfır akım geçişli asimetrik H tipi sürücü uygulamasından alınan devre elemanlarına ait akım ve gerilim grafikleri Şekil 4.18-4.23'de verilmiştir. lmler yaklaşık 1000 devir/dakika hızda alınmıştır. Bu grafikler TEKTRONIX TPS2024 osiloskobu ile elde edilmiştir. Sonuçlar, Tektronix firmasına ait OpenChoice Desktop programı kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Ayrıca osiloskop, ekranındaki grafikleri veri olarak da bilgisayar ortamına aktarabilmektedir.

Şekil 4.18 (a)-(d)'de KKARM'nin 1 faz ana anahtarı (S_1)'e ait akım ve gerilim eğrileri görülmektedir. Karşılaştırma yapmak amacıyla sert ve sıfır akım geçişli anahtarlama eğrileri birlikte verilmiştir.



Şekil 4.18. KKARM ana anahtar akım-gerilim grafikleri. 10V/Kare ve 2,5A/Kare ölçeklidir; a) Sert anahtarlama tam periyot, b) Sert anahtarlama detay, c) Sıfır akım geçişli tam periyot, d) Sıfır akım geçişli anahtarlama detay

Şekil 4.18 (a)–(d)’de ana anahtar (S_1) akım ve gerilim grafiklerinin kesim anındaki durumları görülmektedir. Gerilim grafiklerinde her bir kare, 10V/kare olarak ölçeklendirilmiştir. Akım grafiklerinde her bir kare 2.5A/kare olarak ölçeklendirilmiştir. Sert anahtarlama; Şekil 4.18 (b)’de görüldüğü üzere S_1 ’in kesim anında akım ve gerilim yüksek bir değerde kesişmektedir. Bu durum anahtarlama kayıplarına neden olmaktadır. Oysa önerilen sıfır akım geçiş anahtarlama; Şekil 4.18 (d)’de görüldüğü üzere S_1 ’in kesim anında sıfır akım geçişi (ZCT) olmakta ve anahtarlama kaybı azalmaktadır.

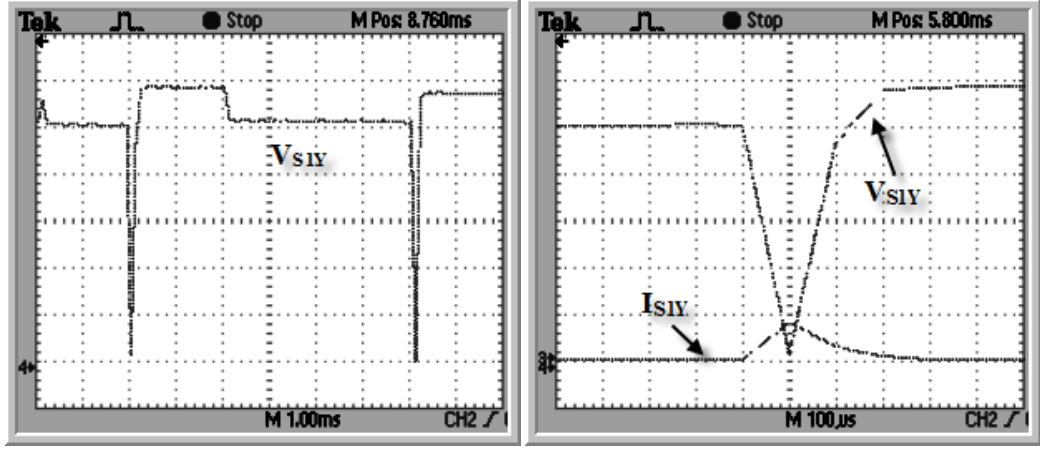
Yardımcı anahtar (S_{1Y})’nin iletme girmesiyle, bastırma hücresi S_1 akımının sıfıra düşmesini sağlamaktadır. S_1 , kendi üzerinden geçen akım sıfıra yakın değerde iken, denetim işareti kesilerek iletimden çıkarılmaktadır. Böylece S_1 üzerinde ilave bir gerilim stresi oluşmamaktadır.

Şekil 4.19 (a)–(c)’de S_{1Y} ’ye ait akım ve gerilim eğrileri görülmektedir. S_{1Y} ’ye seri bağlı kondansatör nedeniyle anahtar üzerinde ek gerilim stresleri oluşmaktadır.

Şekil 4.20 (a)–(b)’de D_{S1} diyotuna ait akım ve gerilim dalga şekilleri verilmiştir. Buradan, D_{S1} diyodu üzerinde bastırma hücresindeki paralel kondansatörden dolayı ilave bir gerilim stresi oluştuğu anlaşılmaktadır.

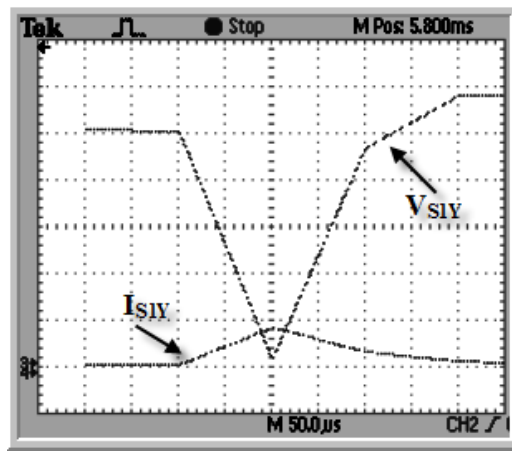
Şekil 4.21’de C_{S1} kondansatörüne ait akım ve gerilim dalga şekilleri verilmiştir. Okunan akım değeri aynı zamanda işlemci ünitesinde işlenmektedir. Burada; oluşabilecek arızalardan korunmak amacıyla kondansatör akımının pozitif alternansı okunduğu özellikle belirtilmelidir.

Sert ve yumuşak anahtarlama durumlarında ana hat akım ve gerilim dalga şekilleri Şekil 4.22 ve 4.23’de sırasıyla verilmiştir. KKARM’nin çalışma prensibi gereği aynı anda iki faz devrededir. Bu nedenle hat akımı faz akımının yaklaşık iki katı değerindedir.



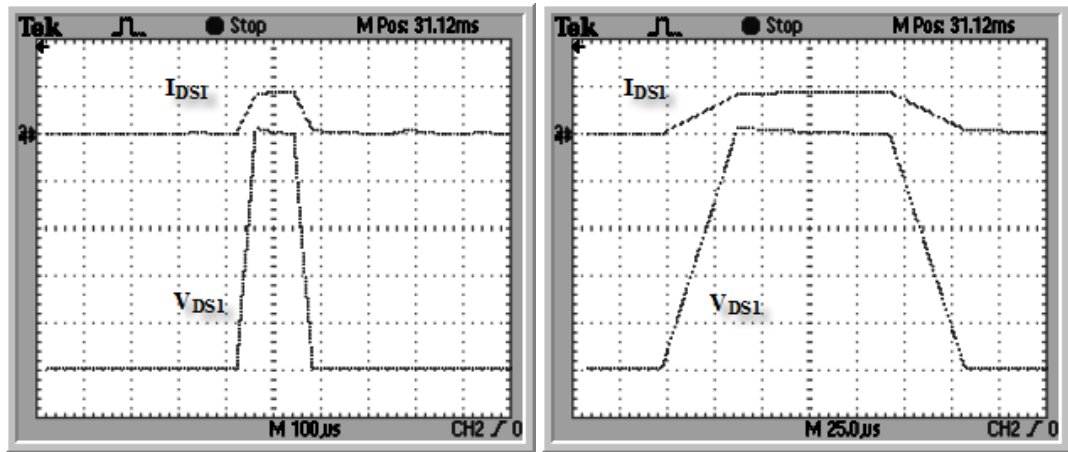
a)

b)



c)

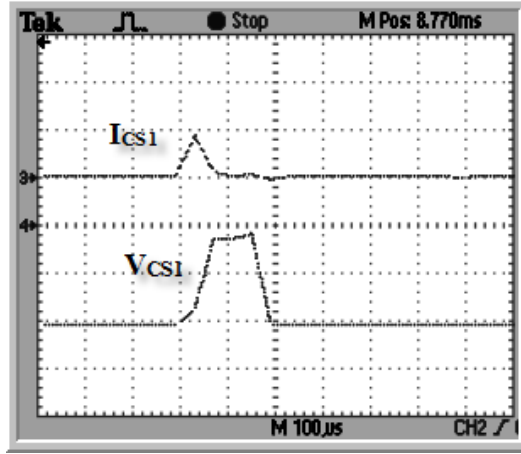
Şekil 4.19. Yardımcı anahtar akım-gerilim grafikleri. 50V/Kare ve 10A/Kare ölçeklidir; a) Yardımcı anahtar gerilim, b) Yardımcı anahtar akım/gerilim, c) Yardımcı anahtar akım/gerilim detay



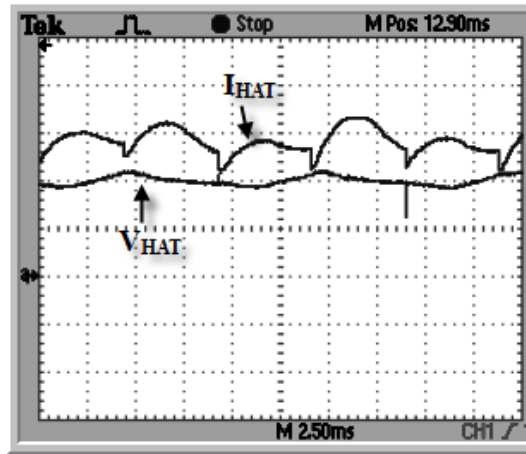
a)

b)

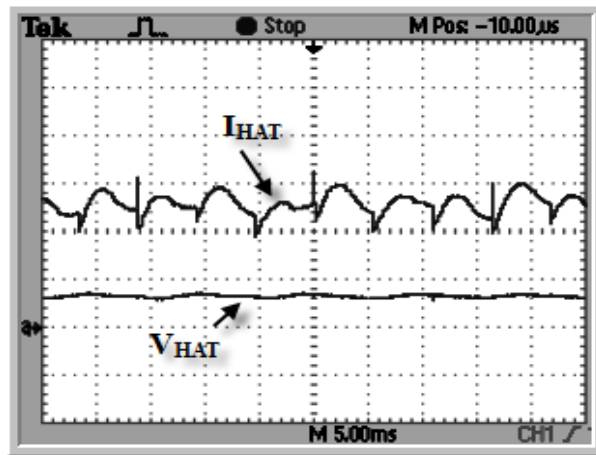
Şekil 4.20. D_{S1} akım-gerilim grafikleri. 50V/Kare ve 10A/Kare ölçeklidir; a) D_{S1} akım/gerilim (100u saniye), b) D_{S1} akım/gerilim (25u saniye)



Şekil 4.21. C_{S1} akım-gerilim grafikleri. 50V/Kare ve 10A/Kare ölçeklidir



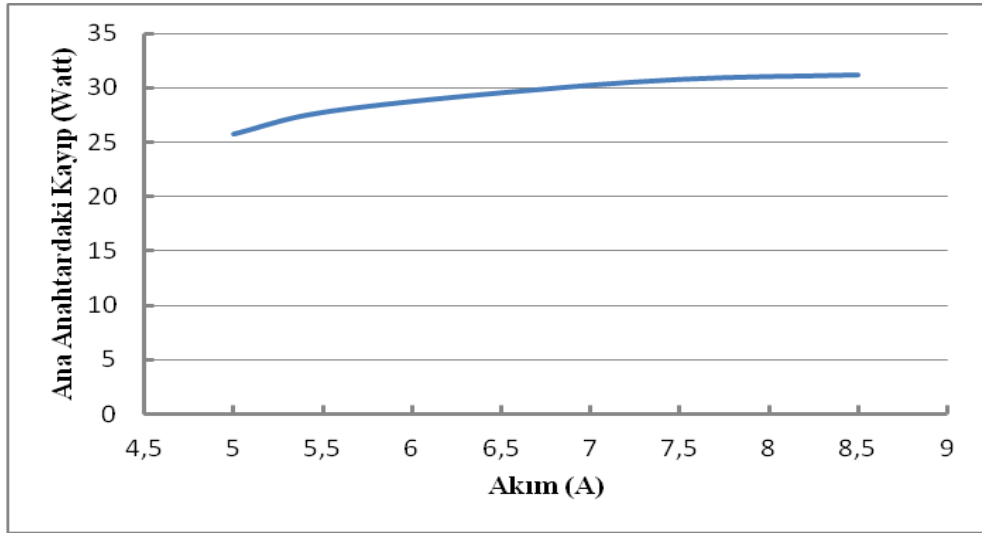
Şekil 4.22. Sert anahtarlama ana hat akım-gerilim grafikleri. 20V/Kare ve 5A/Kare ölçeklidir



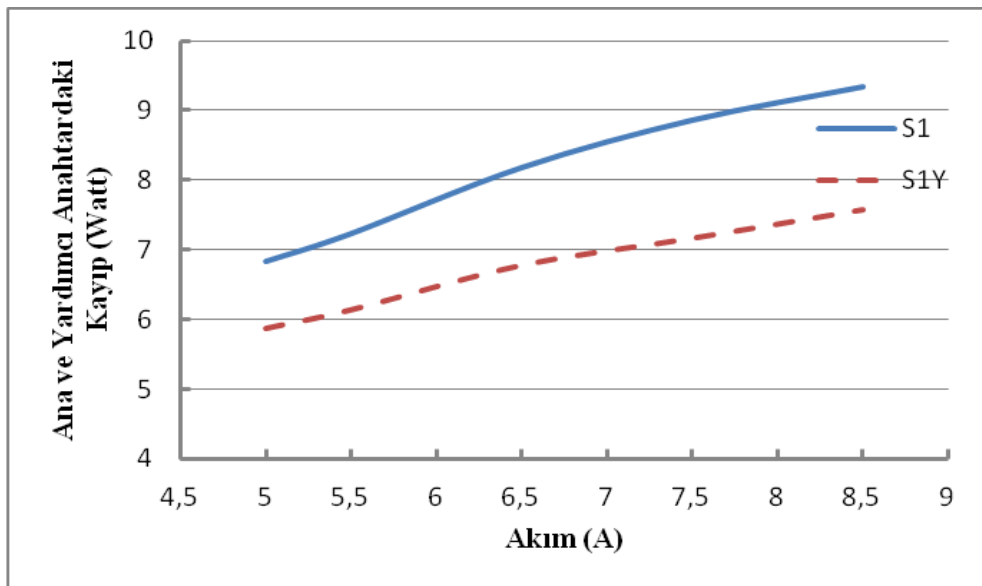
Şekil 4.23. Sıfır akım geçişli yumuşak anahtarlama ana hat akım-gerilim grafikleri. 50V/Kare ve 5A/Kare ölçeklidir

4.10. Anahtarlama Kayıplarının Karşılaştırılması

Sert anahtarlamaalı dönüştürücüyle sürülen KKARM'nin farklı çalışma akımlarında; sürücüdeki ana anahtar üzerinde meydana gelen kayıplar Şekil 4.24'de grafik halinde verilmiştir. KKARM'nin ana anahtar üzerinden ortalama 5-9 Amper çekmesiyle anahtarda 25-31 Watt'lık kayıp oluşmaktadır. Sıfır akım geçişli yumuşak anahtarlamaalı dönüştürücüyle sürülen KKARM'nin farklı çalışma akımlarında; sürücüdeki ana ve yardımcı anahtarlar üzerinde oluşan kayıplar Şekil 4.25'de grafik halinde verilmiştir.

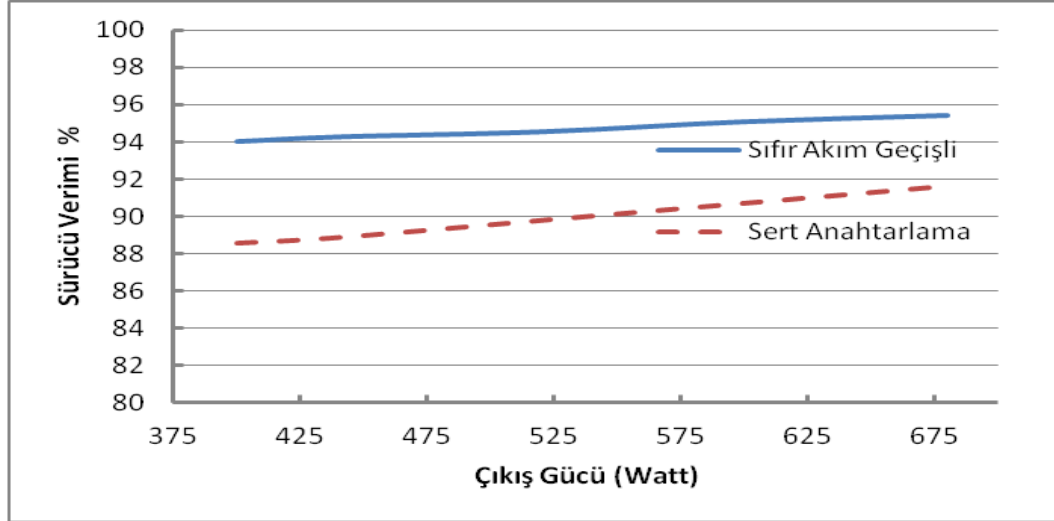


Şekil 4.24. Sert anahtarlamaalı sürücüde ana anahtar kayıpları



Şekil 4.25. Sıfır akım geçişli sürücüde ana ve yardımcı anahtar kayıpları

375-675 wattlık çıkış gücü için sert anahtarlama ve sıfır akım geçişli sürücünün verim grafiği Şekil 4.26'de verilmiştir. Sert anahtarlama sürücünün verimi %88,6-%91,6 arasında değişmektedir. Sıfır akım geçişli sürücünün verimi ise %94-%95,4 arasında değişmektedir. Sıfır akım geçişli sürücüde yardımcı elemanlar devrededirler. Ancak çalışma periyodu boyunca kısa süreli devrede kaldıkları için sürücü verimine etkileri oldukça düşüktür.



Şekil 4.26. KKARM sürücüsünün sert ve sıfır akım geçişli anahtarlama verimi

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Günümüzde Anahtarlamalı Relüktans Makina (ARM)'lerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle hibrit araçlara olan talep bu tarz makinelerin gelişmesini zorunlu kılmaktadır. ARM'lerden yüksek performans alınabilmesi için bir takım çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan biri de makinanın kısa adım sargısının uzun adıma dönüştürülmesidir. Bu yöntemle üretilen makinaya Karşıt Kuplajlı veya Tam Adım Anahtarlamalı Relüktans Makinası (KKARM) adı verilmiştir. Bu değişiklik makine momentinde artış sağlamasına rağmen, yüksek moment dalgalılığı, yüksek bakır kayıpları vb. bazı dezavantajları da beraberinde getirmiştir.

KKARM'ile ilgili literatür incelendiğinde yapılmış olan çalışmaların çok sınırlı olduğu görülmüştür. Bunun nedeni makinanın denetiminin zor olmasıdır. Makina ile ilgili çalışmalar; genellikle manyetik ve matematiksel modeller, moment dalgalılığı azaltma yönünde yoğunlaşmıştır. Makina sürücüsü üzerine yapılan çalışmaların ise daha da az sayıda olduğu tespit edilmiştir. Bilindiği üzere aynı anda klasik ARM'lerde tek, KKARM'lerde ise iki faz devrededir. Bu nedenle KKARM sürücüsünde meydana gelen anahtar kayıpları daha fazladır. Mecrow ve arkadaşları tarafından 1998 yılında yaptıkları deneysel çalışma ile, klasik ARM sürücülerinin, KKARM'de kayıpları artırdığını tespit etmiştir.

Yumuşak anahtarlama teknikleri, sürücü anahtarları üzerinde meydana gelen kayıpların azaltılması için kullanılan yöntemlerin arasında, önemli bir yere sahiptir. Bu yöntemde ilave anahtar kullanılmasına rağmen, sürücünün toplam verimi artmaktadır. Ancak KKARM sürücüsünün yumuşak anahtarlama teknikleri ile denetimine literatürde rastlanmamıştır.

Tez çalışmasında, prototip KKARM'nin sürülmesinde kullanılan asimetrik H-tipi köprü dönüştürücü hem sert ve hem de yumuşak anahtarlama tekniğiyle test edilmiş ve verimi incelenmiştir. KKARM sürücü anahtar kayıpları, genellikle anahtarlar

kesim durumundayken meydana gelir. Bu nedenle kesim durumundaki kayıpların azaltılması için sıfır akım geçişli (ZCT) yumuşak anahtarlama tekniği kullanılmıştır.

Çalışmanın ilk aşaması; prototip KKARM'nin tasarım ve analizidir. Bu aşamada KKARM'de perçin noktalarının büyük bir öneme sahip olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada; rotor perçinleri kutup başına doğru yaklaştıkça KKARM'nin moment dalgalılığında farklı çalışma akımları için %3 ile %17 arasında azalma olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bu durum, perçinlerin fazlar arasında oluşan karşıt kuplajı etkilemesinden kaynaklanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürde kabul görmüş ve tez çalışmasında yerini almıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında anahtarlama kayıplarının azaltılması için sıfır akım geçişli (ZCT) denetlenen asimetrik H-tipi köprü dönüştürücü tasarımı yapılmıştır. Hazırlık aşamasında bu konu ile ilgili tüm literatür taranmıştır. Sonuçta pek çok uygulama için farklı yumuşak anahtarlama tekniklerinin kullanıldığı tespit edilmiştir. Ancak bu uygulamada yük döner makinadır. Bu da sürücünün denetiminde zorluklara neden olmaktadır. Örneğin sürücüde ZCT denetimini gerçekleştirebilmek için kullanılan bastırma hücresinin çalışması sırasında yük kaynak tarafından beslenmeye devam etmelidir. Aksi halde makina dönerken dengesizleşebilir ve bu da makinanın performansını olumsuz etkiler. Literatürde Ürgün ve arkadaşlarının ortaya koyduğu; ZVT-ZCT tekniği döner makinalar için için önemli bir referans olmuştur.

Sonuç olarak prototip KKARM sert anahtarlama ve ZCT yumuşak anahtarlama teknikleriyle sürülmüştür. Her iki teknikte sürücü anahtarları üzerinde meydana gelen ortalama kayıplar incelenmiş ve çalışmada grafiksel olarak sunulmuştur. Sert anahtarlama ile sürüldüğünde; dönüştürücü ana anahtarı üzerinde; 7,5 A'de ortalama 30 watt kayıp meydana gelmektedir. ZCT yumuşak anahtarlama ile sürüldüğünde ise dönüştürücü ana anahtar üzerinde aynı akımda kayıp; ortalama 9 watt'a düşmektedir. KKARM'de aynı anda iki fazın devrede olduğu göz önüne alınırsa sürücü anahtarlar üzerinde meydana gelen bu kayıpların önemi de artmaktadır. Şebekeden çekilen gücün bir kısmının sürücüde kaybolmasıyla makinarya aktarılan güç azalır. Bu durum makina performansında düşüslere neden olur ve istenmeyen bir durumdur.

Çalışmada ayrıca prototip KKARM sürücüsünün verimi de araştırılmıştır. ZCT yumuşak anahtarlama tekniği ile denetlenen sürücüde verim; sert anahtarlama ile

denetlenen sürücüye nazaran oldukça yüksektir. Sürücü verimi 375-675 watt'lık çıkış için; sert anahtarlama da %88,6-%91,6 arasında değişmektedir. ZCT yumuşak anahtarlama da ise verim %94-%95,5 arasındadır. Sonuç olarak ZCT yumuşak anahtarlama tekniği kullanılarak sürülen prototip KKARM'nin sürücü veriminde yaklaşık %5'lik bir iyileşme elde edilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, ZCT yumuşak anahtarlama lı sürücü ile, kaynaktan çekilen gücün büyük oranda prototip KKARM'ye aktarıldığı görülmektedir. Ayrıca sert anahtarlama da anahtar üzerinde meydana gelen kayıplar anahtarların aşırı ısınmasına ve dolayısıyla yanmasına neden olabilmektedir. ZCT yumuşak anahtarlama tekniği kullanılarak bu dezavantaj bertaraf edilmiş ve soğutucu gereksinimi ortadan kalkmıştır.

Yapılan çalışmada moment dalgalılığı azaltılmış, KKARM sürücü verimi arttırılmıştır. Bu çalışmanın KKARM'nin tercih edilebilirliğine önemli katkıda bulunulduğuna inanılmaktadır. KKARM'nin, özellikle son yıllarda popüler olan hibrit araçlarda kullanılan elektrik makinalarına önemli bir alternatif olması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Yadlapalli N., Implementation of a novel soft switching inverter for switched reluctance motor drivers, Master of Science, Virginia Polytechnic Institute and State University, Electrical Engineering, Blacksburg, Virginia, 1999.
- [2] Ünlü M., Anahtarlı relüktans makinasının simülasyonu ve dinamik davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2006, 198662.
- [3] Çoruh N., Küçük güçlü bir anahtarlı relüktans motorunun sürücü devresi tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2006, 168869.
- [4] Mecrow B. C., Fully pitched-winding switched-reluctance and stepping-motor arrangements, *IEE Proceedings-B*, 1993, **140**, 61-70.
- [5] Barrass P. G., Mecrow B. C., Clothier A. C., The unipolar operation of fully pitched switched reluctance motor drives, *Proceedings of the IEE conference ICEM*, Paris, France, September 1994.
- [6] Barrass P. G., Mecrow B. C., Clothier A. C., Bipolar operation of fully-pitched winding switched reluctance drives, *Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives*, Durham, 11-13 September 1995.
- [7] Mecrow B. C., New winding configurations for doubly salient reluctance machines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, **32**, 1348-1356.
- [8] Wale J. D., Pollock C., Novel Converter Topologies for a Two-Phase switched reluctance motor with fully pitched windings, *27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC*, Baveno, Italy, 23-27 June 1996.
- [9] Mecrow B. C., Clothier A. C., Barrass P. G., Weiner C., Drive configurations for fully-pitched winding switched reluctance machines, *Thirty-Third IAS Annual Meeting Industry Applications Conference*, Louis, USA, 12-15 October 1998.
- [10] Clothier A. C., Mecrow B. C., Inverter topologies and current sensing methods for short pitched and fully pitched winding sr motors, *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Dallas, USA, 14-18 March 1999.
- [11] Kosaka T., Matsui N., Position sensorless control of general purpose inverter-fed fully-pitched winding reluctance motor drives, *Industry Applications Conference*, Rome, Italy, 8-12 October 2000.
- [12] Ashour H. A., Reay D. S., Williams B.W., Shunt-Excited doubly salient 8/6 switched reluctance machine, *IEE Proceedings Electric Power Applications*,

2000, **147**, 391-401.

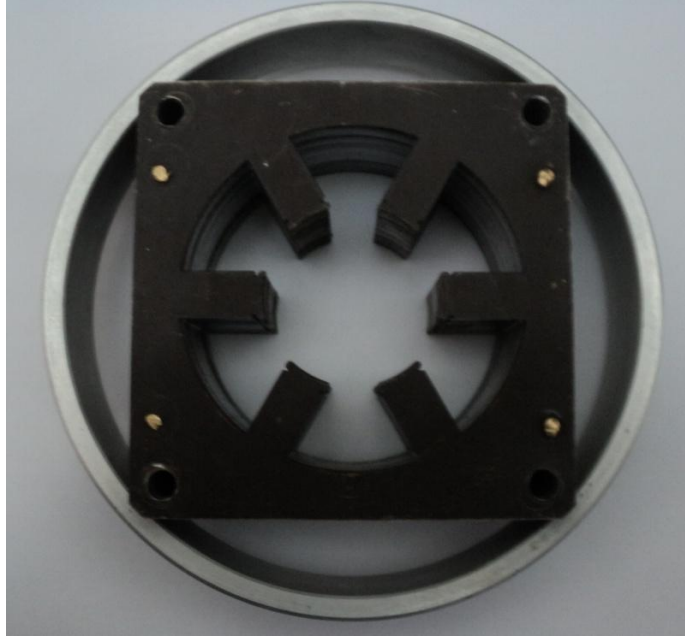
- [13] Kokernak J. M., Torrey D. A., Magnetic circuit model for the mutually coupled switched-reluctance machine, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, **36**, 500-507.
- [14] Kosaka T., Matsui N., Simplified analysis and evaluation of drive characteristics of fully-pitched winding reluctance motors, *Electrical Engineering in Japan*, 2001, **134**, 45-52.
- [15] Mecrow B. C., Weiner C., Clothier A. C., The modeling of switched reluctance machines with magnetically coupled windings, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2001, **37**, 1675-1683.
- [16] Ashour H. I., Williams B., Sliding mode speed control of a shifted fully pitched switched reluctance machine, *Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems ICEMS*, Shenyang, China, 18-21 August 2001.
- [17] Garip M., Ozoglu Y., Mese E., An approach to torque ripple reduction in fully pitched switched reluctance motors by pole tip shaping, *11th Mediterranean Electrotechnical Conference MELECON*, Cairo, Egypt, 7-9 May 2002.
- [18] Ghoneim W. A. M., Fletcher J. E., Williams B.W., Matrix approach for the generalized theory of doubly salient reluctance Machines, *IEE Proceedings Electric Power Applications*, 2002, **149**, 65- 80.
- [19] Xu Y., Torrey D. A., Study of the mutually coupled switched reluctance machine using the finite element circuit coupled method, *IEE Proceedings Electric Power Applications*, 2002, **149**, 81-86.
- [20] Gallegos-Lopez G., Krefta R. J., Comparison of full pitch and concentrated coil switched reluctance machines, *38th IAS Annual Meeting Industry Applications Conference*, Salt Lake City, Utah, USA, 12-16 October 2003.
- [21] Ozoglu Y., Garip M., Mese E., New pole tip shapes mitigating torque ripple in short pitched and fully pitched switched reluctance motors, *Electric Power Systems Research*, 2005, **74**, 95-103.
- [22] Karaçor M., Yılmaz K., Kuyumucu F. E., Modeling MCSRМ with artificial neural network, *ACEMP '07*, Bodrum, Türkiye, 10-12 Eylül 2007.
- [23] Yılmaz K., Meşe E., Comparison between short-pitched and unipolar excited fully-pitched switched reluctance motors for equal electrical losses, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2008, **33**, 473-486.
- [24] Garip M., Kutup başları şekillendirilmiş anahtarlamalı relüktans motorunda tam kutup adımlı sargının moment dalgalılığının iyileştirilmesine katkısı, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002, 128809.

- [25] Geçit İ., Terslendirilmiş anahtarlamalı relüktans motor tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2007, 177629.
- [26] Duran F., Endüstriyel çamaşır makinelerinde anahtarlamalı relüktans motoru kullanımı ve sistemin zeki denetimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, Ankara, 2008, 216660.
- [27] Omaç Z.; Yeni bir anahtarlı relüktans motorun tasarımı ve akım kontrolü, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2006, 185342.
- [28] Karaçor M., Karşıtlı kuplajlı anahtarlı relüktans motorunun moment dalgalılığının azaltılması, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2010, 283031.
- [29] Krishnan R., *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications*, CRC Press, New York, 2001.
- [30] Karaçor M., Kuyumcu F. E., Matlab GUI Based SRM Design Program, *ACEMP '07*, Bodrum, Türkiye, 10-12 Eylül 2007.
- [31] Gürdal O., *Elektrik Makinalarının Tasarımı*, Nobel Yayın Dağıtım Ltd. Şti., Ankara, 2000.
- [32] Sheikhi A., Oraee H., Kaboli S., Dorkhah, M., A new configuration of switched reluctance motor for reducing the torque ripple, *EPECS'09*, , Sharjah, UAE, 10-12 Kasım 2009.
- [33] Desai P. C., Krishnamurthy M., Schofield N., Emadi, A., Novel switched reluctance machine configuration with higher number of rotor poles than stator poles: Concept to implementation, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, **57**, 649-659.
- [34] Yılmaz K., Anahtarlı relüktans motorunun sargı yapısı değiştirilerek moment performansının iyileştirilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2004, 154965.
- [35] Gallegos-Lopez G., Krefta R. J., Comparison of Full Pitch and Concentrated Coil Switched Reluctance Machines, *38th IAS Annual Meeting Industry Applications Conference*, Salt Lake City, Utah USA, 12-16 October 2003.
- [36] Şahin C., Ergun Amac A., Karacor M., Emadi A., A comparative analysis of the effects of rotor molding clinches of torque ripple of mutually coupled SRMs, *International Review of Electrical Engineering-IREE*, 2011, **6**(4), 1627-1634.
- [37] Şahin C, Ergun Amac A., Karacor M., Emadi A., Reducing torque ripple of switched reluctance machines by relocation of rotor molding clinches, *IET Electric Power Applications*, 2012, **6**(9), 753-760.

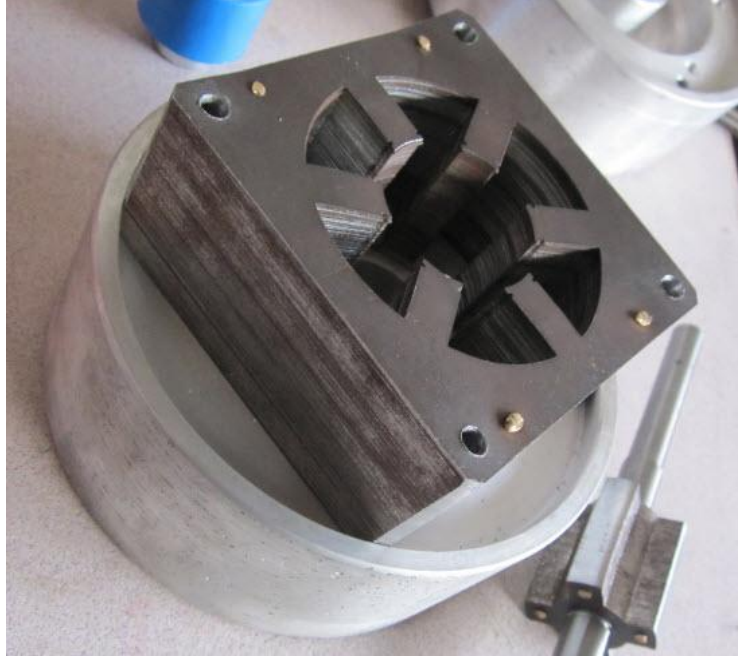
- [38] Kumar R., Gupta R. A., Bishnoi S. K., Converter topologies for switched reluctance motor drives, *International Review of Electrical Engineering-IR.E.E*, 2008, **6**(2), 289-299.
- [39] Bodur H., *DC- DC Dönüştürücülerde yumuşak anahtarlama teknikleri ders notları*, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2007.
- [40] Aksoy İ., Yeni bir yumuşak anahtarlmalı dc-dc pwm dönüştürücünün tasarım, analiz ve uygulaması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 213483.
- [41] Öztürk Nihat, Sert ve yumuşak anahtarlmalı tam köprü çeviricilerde kayıp analizi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2008, **23**(1), 147-155.
- [42] Ching T. W., Analysis of soft-switching converters for switched reluctance motor drives for electric vehicles, *Journal of Asian Electric Vehicles*, 2009, **7**(1), 1199-1206.
- [43] Murai Y., Cheng J., Yoshida M., New soft-switched reluctance motor drive circuit, *Industry Applications Conference*, New Orleans, LA-USA, 5-9 October 1997.
- [44] Ürgün S., Yumuşak anahtarlmalı eviriciler için yeni bir zvt-zct kısmi rezonanslı da hat devresinin geliştirilmesi ve gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2008, 232761.
- [45] Wu J., Dai H., Xing K, Lee F. C., Boroyevich D., Implementation of a ZCT Soft Switching Techniquein a 100 kW PEBB Based Three-phase PFC Rectifier, *Power Electronics Specialists Conference*, Charleston, USA, 27 June-01 July 1999.
- [46] Ehsani M., Rahman K. M., Bellar M. D., Severinsky A. J., Evaluation of soft switching for ev and hev motor drives, *IEEE transactions on industrial electronics*, 2001, **48**(1), 82-90.
- [47] Yu H., Driver based soft switch for pulse-width-modulated power converters, Doctor of Philosophy, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2005.
- [48] Bodur H., Bakan M., Baysal M., A detailed analytical analysis of a passive resonant snubber cell perfectly constructed for a pulse width modulated d.c.-d.c. buck converter, *Electrical Engineering*, 2003, **85**, 45-52.
- [49] Urgan S., Erfidan T., Bodur H., Cakir B., A new ZVT-ZCT quasi-resonant DC link for soft switching inverters, *International Journal of Electronics*, 2010, **97**(1), 83-97.

EKLER

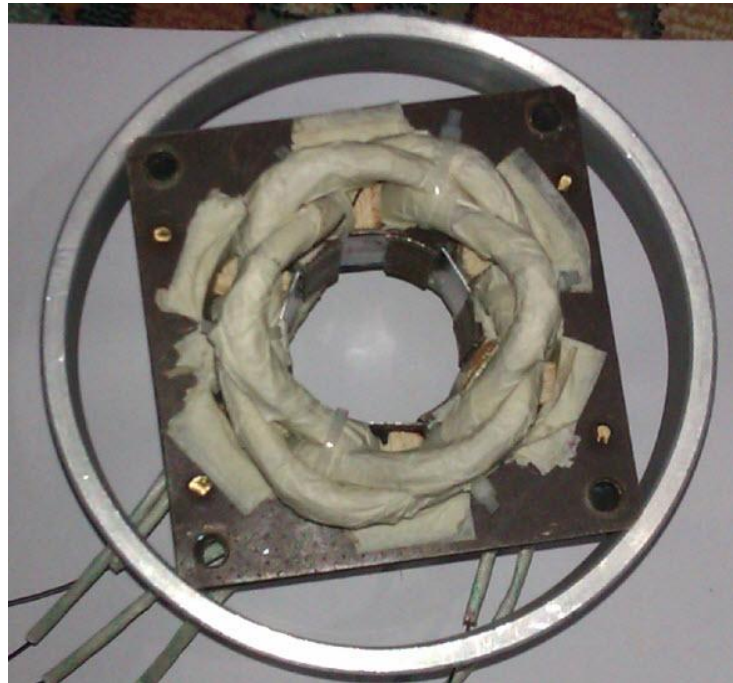
Ek-A. Prototip KKARM Stator Resimleri



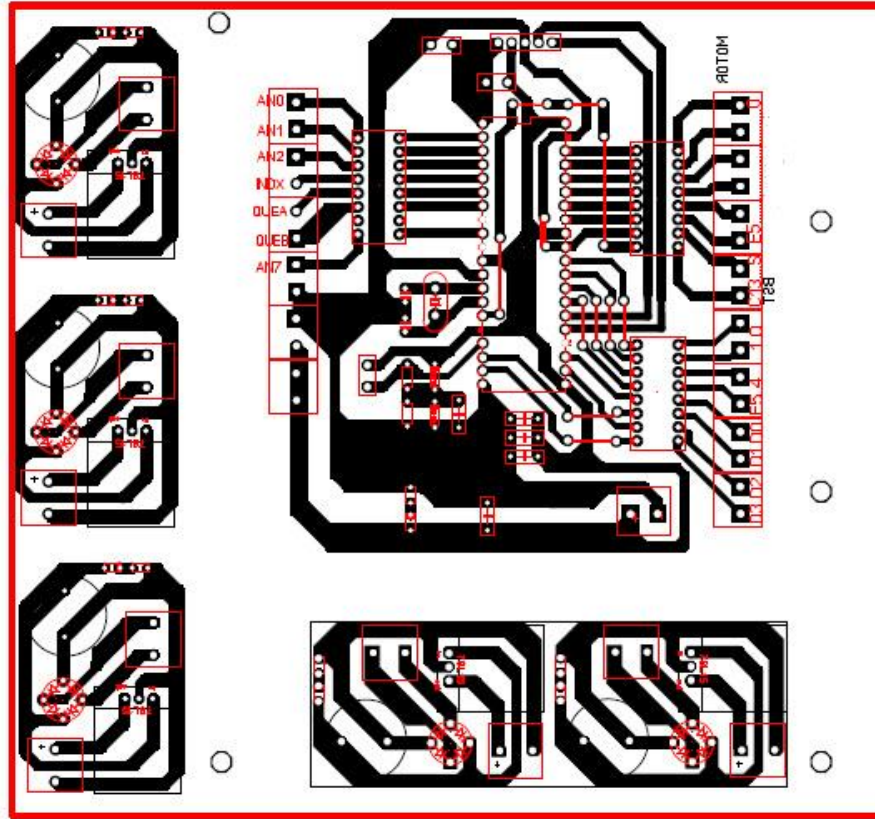
Ek-B. Prototip KKARM Gvde ve Rotor Resimleri



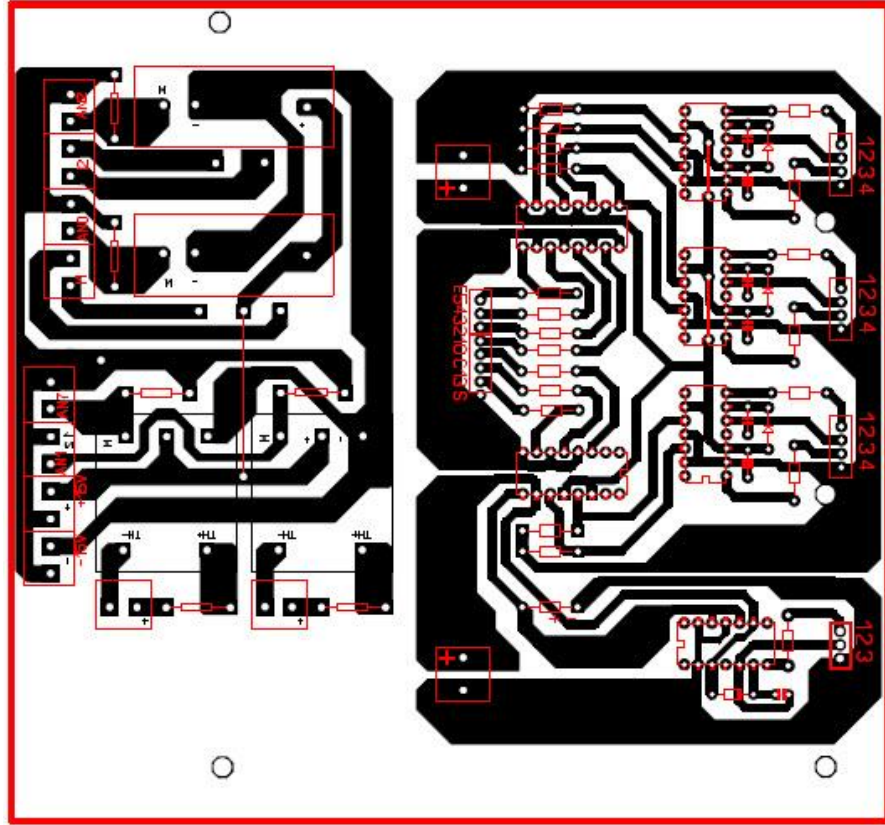
Ek-C. Prototip KKARM Sargı Resimleri



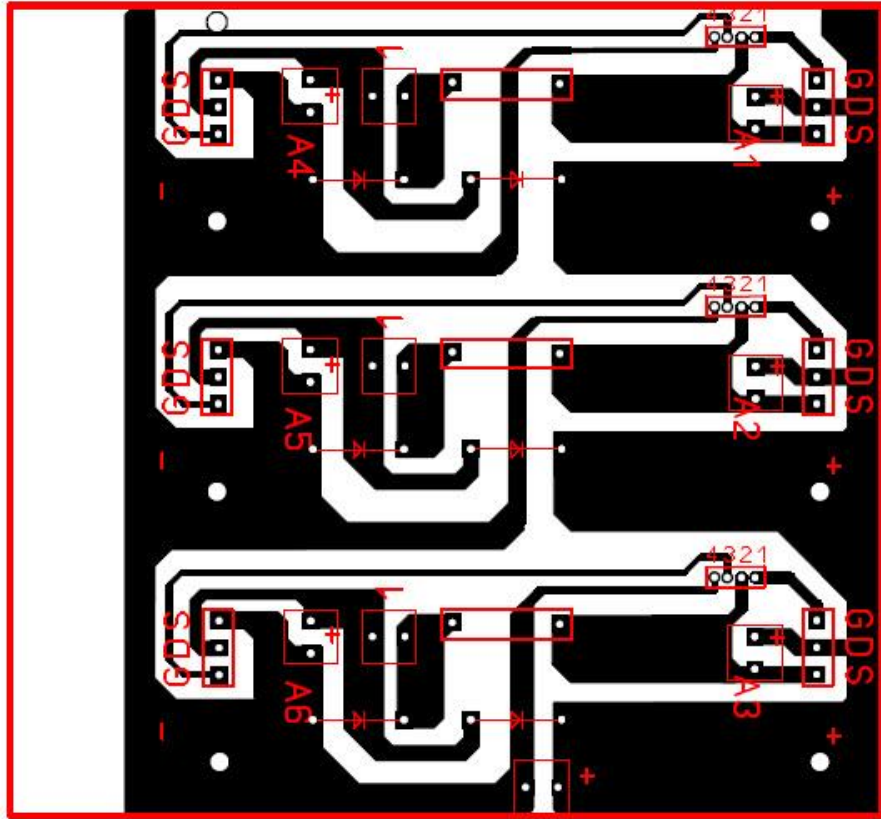
Ek-D. Gerilim Düzenleyici ve İşlemci Kartı Baskı Devre Şeması



Ek-E. Akım Ölçüm, Gerilim Ölçüm ve Sürücü Kartı Baskı Devre Şeması



Ek-F. Güç Katı Baskı Devre Şeması



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Şahin C.**, Ergun Amac A., Karacor M., Emadi A., Reducing torque ripple of switched reluctance machines by relocation of rotor molding clinches, *IET Electric Power Applications*, 2012, **6**(9), 753-760.
- [2] **Şahin C.**, Ergun Amac A., Karacor M., Emadi A., A comparative analysis of the effects of rotor molding clinches of torque ripple of mutually coupled SRMs, *International Review of Electrical Engineering-IREE*, 2011, **6**(4), 1627-1634.

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında İskenderun'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İskenderun'da tamamladı. 1999 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi bölümünden 2004 yılında mezun oldu. 2005-2007 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi Anabilim dalında yüksek lisans öğrenimini tamamladı. 2007 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi Anabilim dalında Doktora eğitimine başladı. 2010 yılından bu yana Kastamonu Üniversitesi Tosya Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji programında Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.