

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARŞIT KUPLAJLI ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUNUN
MOMENT DALGALILIĞININ AZALTILMASI**

DOKTORA TEZİ

Mevlüt KARAÇOR

Anabilim Dalı : Elektrik Eğitimi

Danışman : Prof.Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU

KOCAELİ, 2010

**KARŞIT KUPLAJLI ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUNUN
MOMENT DALGALILIĞININ AZALTILMASI**

DOKTORA TEZİ

Mevlüt KARAÇOR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 18 Haziran 2010

Tezin Savunulduğu Tarih: 31 Ağustos 2010

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU

(..........)

Üye

Prof. Dr. Oruç BİLGİÇ

(..........)

Üye

Prof. Dr. Nurettin ABUT

(..........)

Üye

Prof. Dr. Hakan TEMELTAŞ

(..........)

Üye

Doç. Dr. Ercüment KARAKAŞ

(..........)

ÖNSÖZ ve TE EKKÜR

Günümüzde petrol rezervlerinin her geçen gün daha da azaldığı herkes tarafından kabul edilen bir gerçektir. Bu sebepten dolayı, özellikle bireysel ve toplu taşımacılıkta yaygın olarak kullanılan petrol temelli yakıtlar, ulaşım maliyetlerini arttırmaktadır. Son yıllarda, bilhassa taşıt uygulamalarında, yaygın olarak kullanılan içten yanmalı motorlara alternatif olarak kullanılacak motorlar üzerinde yapılan araştırmalar her geçen gün daha da artmaktadır. Yapılan çalışmalar yakıt olarak elektrik enerjisinin ve elektrik motorlarının kullanımının çevreyle ilgili olumsuzlukları en aza indirmesi dikkatleri üzerine çekmesini sağlamıştır.

Karıt Kuplajlı Anahtarlı Relüktans Motoru basit ve dayanıklı yapısı, kolay imalatı, verimin yüksek olması, yüksek moment/devir karakteristiği gibi özelliklerinden dolayı taşıtlarda kullanılacak alternatif bir motor tipidir.

Ayrıca, Karıt Kuplajlı Anahtarlı Relüktans Motoru yüksek devir ve moment karakteristiği sebebiyle, çeşitli ev aletlerinde, vakum jeneratörlerinde ve diğer makinelerinde kullanılacak bir motor tipidir.

Doktora tez çalışmamı bu konuda yapmama izin veren, çalışmalarımın yön veren ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU'ya, değerli fikir ve görüşleri ile çalışmalarımın katkıda bulunan Prof. Dr. Hakan TEMELTA ve Doç. Dr. Ercüment KARAKA'ya, moment ölçüm sisteminin geliştirilmesinde değerli fikir ve yardımlarını esirgemeyen Yard. Doç. Dr. Özcan ATLAM'a, mekanik sistem test sisteminin tasarlanmasında ve yapımında yardımları ile desteğini esirgemeyen Selçuk AYTIN ve ORVE Makinaya, üniversite destek programı kapsamında DSP deney seti ve donanımını desteği sağlayan Texas Instruments ve Microchip firmalarına, manevi desteklerinden dolayı Cihan AHN, Nasır ÇORUH, Kenan KELE, Murat ÜNLÜ ve Metin KESLER'e, her zaman manevi destekleri ile bana güç veren aileme, çalışmalarımın dolayı yeterince ilgilenemediğim kardeşim Seyda KARAÇOR'a ve çalışmalarımın esnasında bana büyük bir anlayış ve sabır gösteren desteğini esirgemeyen sevgili ailem Nilay KARAÇOR'a tekkür ederim.

Ç İNDEK İLER

ÖNSÖZ	i
Ç İNDEK İLER.....	ii
EK İLLER D Z N	iv
TABLolar D Z N	viii
S İMGELER	ix
ÖZET.	xi
NG L ZCE ÖZET.	xii
1. G R	1
1.1. Literatür Taramasının De erlendirilmesi	7
2. ANAHTARLI RELÜKTANS MAK NASI.....	10
2.1. Klasik ARM Yapısı ve Çalı ması.....	10
2.1.1. Momentin üretilmesi	12
2.1.2. ARM geometrik Yapısının Belirlenmesi.....	15
2.1.2.1. Mekanik boyutlandırma ve sargı özelliklerinin belirlenmesi	15
2.1.2.2. Tasarım programının yapısı ve çalı ması	16
2.1.2.3. Deneysel amaçlı olarak kullanılan ARM'nin geometrik yapısı.....	20
2.2. ARM Sürücü Sistemleri	22
2.2.1. DA-DA Dönü türücüler	23
2.2.1.1. Birinci bölgede kısıyıcı	25
2.2.1.2. İkinci Bölgede Kısıyıcı	25
2.2.1.3. Üçüncü Bölgede Kısıyıcı	26
2.2.1.4. Dördüncü Bölgede Kısıyıcı	27
2.2.1.5. Birinci ve İkinci Bölgede Kısıyıcı	28
2.2.1.6. Üçüncü ve Dördüncü Bölgede Kısıyıcı	29
2.2.1.7. Dönü türücüler ve Buck Dönü türücü	29
2.2.2. Buck -DA-Hat Boost dönü türücü.....	32
2.2.3. Sürücü sistemi (Asimetrik H tipi Köprü Dönü türücü)	33
3. KKARM'NİN YAPISI VE ÇALI MA PRENS İBİ	36
3.1. KKARM'nin Modelleme Çalı maları ve YSA ile Modellenmesi.....	41
3.1.1 KKARM'nin Klasik ARM'ye benzetilmesi.....	41
3.1.2. Manyetik Devre Temelli Modelleme	42
3.2. KKARM'nin Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Analizi	45
3.3. YSA ile KKARM'nin Modellenmesi Çalı ması	54
3.3.1. İleri Beslemeli Yapay Sinir A ları.....	54
3.3.2. Geri yansıtma yöntemi ile yapay sinir a larının e itimi	55
4. KKARM'NİN MOMENT DALGALILI İ VE AZALTILMASI	62
4.1. KKARM'nin Statik Analizi.....	64
4.2. Moment Dalgalılı İ Denetimi.....	66
4.3. KKARM için Moment Denetiminin Gerilim Kontrollü Kaynak ile Gerçekle tirilmesi.....	67
5. DENEYSEL ÇALI MA	71
5.1. Mekanik Düzenek	71

5.2. Sürücü Sistem	73
5.2.1. KKARM güç katı	75
5.2.3. Sürücü Katı	76
5.2.4. DA Hat Yükseltici Katı	77
5.2.5. DA Hat Yükseltici Sürücü Katı	77
5.2.6. Buck Dönü türücü Katı	77
5.2.7. Darbe Genlik Ayarı Sinyal Üretici Katı	78
5.2.8. DSP Denetleyici Katı	79
5.3. Ölçme Ara Birimleri	80
5.3.1. Rotor konumunun enkoder ile ölçülmesi	80
5.3.2. Akım ölçme katı.....	81
5.3.3. Gerilim ölçüm katı	82
5.4. Mekanik Momentin Hesaplanması	83
5.4.1. Mekanik kayıpların tespiti	84
5.4.1.1. DAM'nın motor olarak çalıştırılması	84
5.4.1.2. DAM'nın generatör olarak çalıştırılması.....	86
5.5. DSP ile KKARM'nin Denetimi	88
5.5.1. DSP Denetim Programı	88
5.5.2. DSP Kartından Ölçme Değerlerinin Alınması	93
5.5.2.1 KKARM'nin Denetimi	96
5.5.2.2 KKARM'nin Boşta Çalışma Testi	99
5.5.2.3 KKARM'nin Yükte Çalışma Testi.....	102
5.5.2.4 KKARM'nin Moment Dalgalılığının Azaltılması	105
SONUÇ VE ÖNERİLER	108
KAYNAKLAR.....	113
EKLER.....	118
ÖZGEÇMİŞ	121

EKLER DİZİNİ

ekil 1.1: Gerçekleştirilmiş deneysel düzenek, denetim ve sürücü sisteminin blok şeması.....	8
ekil 2.1: Klasik ARM'nin yapısı.	11
ekil 2.2: Manyetik alanda akı-akım denklemleri.....	14
ekil 2.3: Geometrik yapı ve dirsek noktası.	16
ekil 2.4: Tasarlanan program ve alt programlar arası veri akımı.....	16
ekil 2.5: Programın çalışması.	18
ekil 2.6: ARM tasarım programının ekran görüntüsü.....	18
ekil.2.7: ARM'nin boyutlandırılması.	20
ekil 2.8: Kullanılan ARM'nin geometrik yapısı.....	21
ekil 2.9: KKARM'nin ait geometrik yapısı.	22
ekil 2.10: ARM sürücüsüne ait blok diyagramlar.	22
ekil 2.11: Dört bölgeli yapı.	24
ekil 2.12: Birinci bölge çalışması, kısıyıcı yapısı ve gerilim dalga şekilleri.....	25
ekil 2.13: İkinci bölge çalışması, kısıyıcı yapısı ve gerilim dalga şekilleri.....	26
ekil 2.14: Üçüncü bölge çalışması, kısıyıcı yapısı ve gerilim dalga şekilleri.	27
ekil 2.15: Dördüncü bölge çalışması, kısıyıcı yapısı ve gerilim dalga şekilleri.....	28
ekil 2.16: Birinci ve ikinci bölgede çalışmaya ait devre yapısı.....	29
ekil 2.17: Birinci ve üçüncü bölgede çalışmaya ait devre yapısı.	29
ekil 2.18: Buck dönüştürücü.	30
ekil 2.19: Buck dönüştürücü (Tranzistör ve diyotlu yapı).	31
ekil 2.20: Buck dönüştürücüye ait kararlı durum analizindeki dalga şekilleri.....	31
ekil 2.21: Tasarlanan hibrit kaynak prensip genelleştirilmiş şeması.	32
ekil 2.22: Tasarlanan hibrit kaynak bileşenleri.	33
ekil 2.23: Çıkış gerilimi.	33
ekil 2.24: Asimetrik H tipi köprü dönüştürücü.	34
ekil 2.25: Sert kırım stratejisi.	34
ekil 2.26: Üç fazlı asimetrik yarım köprü dönüştürücü.	35
ekil 3.1: a- ARM'de akı üretimi, b- KKARM'de akı üretimi.	37
ekil 3.2: KKARM'nin yapısı(a) ve üç boyutlu görünümü(b).	37
ekil 3.3: KKARM'nin tek yönlü uyarma yapısı, karışık endüktans ve akım profili. 38	
ekil 3.4: KKARM'nin çift yönlü uyarma yapısı, karışık endüktans ve akım profili. 39	
ekil 3.5: Çift yönlü üç faz aktif uyarma yapısı, karışık endüktans ve akım profili. ..	40
ekil 3.6: E-tip çekirdek nüvenin manyetik devre modeli.	42
ekil 3.7: Klasik ARM manyetik devre şekli.....	43
ekil 3.8: Klasik ARM manyetik devre şeklinin yeniden düzenlenmiş hali.....	44
ekil 3.9: KKARM manyetik devre şekli.	44
ekil 3.10: KKARM manyetik devre şeklinin yeniden düzenlenmiş hali.....	45
ekil 3.11: Stator ve Rotor kutuplarının çakışık olduğu durum.....	47
ekil 3.12: Stator ve Rotor kutuplarının çakışık olmadığı durum.	47
ekil 3.13: Stator ve Rotor kutupları arasındaki maksimum açı olduğu durum.	47
ekil 3.14: M19 saç malzeme B-H karakteristiği.....	48

ekil 3.15: Maxwell 2D analiz programında SEY analizinin gerçekleştirilmesi.....	49
ekil 3.16: Klasik ARM'ye ait Mesh yapısı.....	50
ekil 3.17: KKARM'ye ait Mesh yapısı.....	50
ekil 3.18: Klasik ARM akı e risi.....	51
ekil 3.19: Klasik ARM endüktans e risi.....	51
ekil 3.20: Klasik ARM moment e risi.....	52
ekil 3.21: KKARM akı e risi.....	52
ekil 3.22: KKARM karıt endüktans e risi.....	53
ekil 3.23: KKARM moment e risi.....	53
ekil 3.24: KKARM ve Klasik ARM moment e risilerinin karşılaştırılması.....	54
ekil 3.25: İleri beslemeli üç katmanlı YSA.....	55
ekil 3.26: Tasarlanan KKARM tipindeki makina.....	56
ekil 3.27: $I_b=7$ A sabit $I_a=0.5-7$ A arası rotor 0-45 derece arası de i ti inde elde edilen moment ve akı de i imleri.....	57
ekil 3.28: a. Akının modellenmesi, b. Modellemede Kullanılan YSA'ların dağılımı.....	57
ekil 3.29: KKARM Modeli.....	58
ekil 3.30: Hızın (devir/dak) zamana ba lı de i imi e risi.....	59
ekil 3.31: Bir faz tarafından üretilen moment.....	59
ekil 3.32: Model ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	59
ekil 3.33: Faz akımının osiloskoptan görünüşü.....	60
ekil 3.34: KKARM modeline uygulanan akım, üretilen moment ve akı de i imleri.....	61
ekil 4.1: İletime girme açısı.....	63
ekil 4.2: Kutup ba larının ekillendirilmesi ve moment e risi.....	63
ekil 4.3: KKARM'nin yapısı ve karıt endüktans de i imi.....	64
ekil 4.4: a-Karıt endüktans ve b-endüktans de i im e rileri.....	65
ekil 4.5: Sabit faz akımında üretilen moment.....	65
ekil 4.6: KKARM'de moment denetimi.....	66
ekil 4.7: KKARM'nin optimal iletim açısı.....	68
ekil 4.8: Farklı faz akımlarında üretilen moment ve ortalama moment.....	69
ekil 4.9: Statik moment e rileri ile ortalama moment e rilerinin kesi imi.....	69
ekil 4.10: "M" E risinin oluşturulması.....	70
ekil 4.11: "M" E risi.....	70
ekil 5.1: Tasarlanan deneysel düzene in bile nelerinin üç boyutlu görünüşü.....	71
ekil 5.2: Tasarlanan deneysel düzene in üç boyutlu görünümü.....	72
ekil 5.3: KKARM faz sargıları.....	73
ekil 5.4: Sürücü sistemin blok şeması.....	73
ekil 5.5: Sürücü sisteme ait elektronik bile neler.....	74
ekil 5.6: KKARM'nin test düzene i.....	75
ekil 5.7: Üç fazlı asimetrik H tipi köprü konverter.....	75
ekil 5.8: KKARM güç katı devre şeması.....	76
ekil 5.9: Sürücü katı devre şeması.....	76
ekil 5.10: DA hat yükseltici devre şeması.....	77
ekil 5.11: DA hat yükseltici sürücü devre şeması.....	77
ekil 5.12: Buck yükseltici devre şeması.....	78
ekil 5.13: DGA sinyal üretici katı devre şeması.....	78
ekil 5.14: dsPIC denetleyici devre şeması.....	79
ekil 5.15: dsPIC denetleyici baskı kartı.....	80
ekil 5.16: NEMICON NOC-S500MWT enkoder.....	81

ekil 5.17: LEM akım sensörü çalı ma prensibi devre ekli.	82
ekil 5.18: Akım ölçüm katı devre eması.....	82
ekil 5.19: KKARM gerilim ölçüm katı.....	83
ekil 5.20: KKARM akım ve gerilim ölçüm katı foto rafı.	83
ekil 5.21: Deneysel düzenek.	84
ekil 5.22: DAM'ın prensip ba lantı eması ve temel elektriksel modeli.....	85
ekil 5.23: Sistem kayıpları ile zıt emk arasındaki ili ki.	86
ekil 5.24: Generatör çalı ma durumundaki temel elektriksel model.	86
ekil 5.25: Deney düzenekte giri , elektriksel ve kayıp güçlerin elde edilmesi.	87
ekil 5.26: Deney düzene indeki ölçme ve denetim noktaları.	88
ekil 5.27: MPLAB programı ekran görüntüsü.	89
ekil 5.28: Ana denetim algoritması.	90
ekil 5.29: Enkoder denetim algoritması.	91
ekil 5.30: Zamanlayıcı denetim algoritmasının kurulumu.	91
ekil 5.31: Analog bilginin sayısal veriye dönü üm algoritması.	91
ekil 5.32: Zamanlayıcı kesmesinin denetim algoritması.	92
ekil 5.33: Klasik ARM'nin denetiminden elde edilen veriler.	93
ekil 5.34: Klasik ARM giri akımı.	94
ekil 5.35: Klasik ARM giri akımı osiloskop görüntüsü.	94
ekil 5.36: Klasik ARM giri gerilimi.	94
ekil 5.37: Klasik ARM mekanik kayıplar.	95
ekil 5.38: Klasik ARM toplam mil gücü.....	95
ekil 5.39: Klasik ARM tararından üretilen dinamik mil momenti.	95
ekil 5.40: SEY ile hesaplanan KKARM tarafından üretilen moment ve faz akımları.	97
ekil 5.41: KKARM rotor ve stator geometrisi.....	97
ekil 5.42: KKARM'nin fazlarının iletim durumu.	98
ekil 5.43: KKARM'nin faz akımı ve uygulanan gerilim.	99
ekil 5.44: KKARM'ye uygulanan gerilim ve hat akımı.	100
ekil 5.45: Deney düzene ine ait akım ve gerilimler.	100
ekil 5.46: KKARM faz akım.	101
ekil 5.47: KKARM hat akım.	101
ekil 5.48: KKARM'ye uygulanan gerilim.	101
ekil 5.49: Generatörden elde edilen gerilim.	101
ekil 5.50: Yükte çalı ma testinde KKARM'ye uygulanan gerilim ve hat akımı.	102
ekil 5.51: Yükte çalı ma testinde KKARM hat ve faz akımı.....	103
ekil 5.52: Yükte çalı ma testinde deney düzene ine ait akım ve gerilimler.....	103
ekil 5.53: Yükte çalı ma testinde KKARM faz akımı.....	104
ekil 5.54: Yükte çalı ma testinde KKARM hat akımı.....	104
ekil 5.55: Yükte çalı ma testinde KKARM'ye uygulanan gerilim.	104
ekil 5.56: Yükte çalı ma testinde generatörden elde edilen gerilim.....	104
ekil 5.57: Yükte çalı ma testinde toplam mekanik mil gücü.	105
ekil 5.58: Yükte çalı ma testinde KKARM'nin üretti i dinamik moment.....	105
ekil 5.59: Yardımcı kaynak iletim durumu.	105
ekil 5.60: Algoritmanın uygulanması sonucunda KKARM faz akımı.	106
ekil 5.61: Algoritmanın uygulanması sonucunda KKARM hat akımı.	106
ekil 5.62: Algoritmanın uygulanması esnasında KKARM'ye uygulanan gerilim.	106
ekil 5.63: Algoritmanın uygulanması sonucunda generatörden elde edilen gerilim. .	107
ekil 5.64: Algoritmanın uygulanması sonucunda elde edilen toplam mekanik mil gücü.	

.....	107
ekil 5.65: Algoritmanın uygulanması sonucunda KKARM'nin üretti i dinamik moment.....	107
ekil 6.1: Verimdeki iyile tirme.....	110
ekil 6.2: Ortalama momentteki iyile tirme.	111
ekil 6.3: Moment dalgalılı ndaki iyile tirme.	111

TABLolar D Z N

Tablo 2.1: Tasarım programının giri ve çıkı parametreleri.....	19
Tablo 2.2: Endüktans de erleri.....	20
Tablo 2.3: ARM' nin boyutları ve de erleri	21
Tablo 3.1: SEY analizinde kullanılacak olan akım ve rotor konum de erleri.	48
Tablo 5.1: Deneysel ve hesaplanan sonuçlar.	85

SİMGELER

\mathfrak{R}	: Relüktans, (1/H)
F	: Magneto motor kuvveti, (Amper Sarım)
	: Akı, (Wb)
H	: Hava aralığındaki manyetik alan şiddeti, (Amper Sarım/m)
l	: Manyetik yolun uzunluğu, (m)
B	: Akı yoğunluğu, (Wb/m ² , T)
S	: Manyetik yolun kesit alanı, (m ²)
μ	: Manyetik malzemenin manyetik geçirgenliği, (H m ⁻¹)
ψ	: Halkalanma akısı değeri, (Wb)
I	: Faz akımı, (Amper)
N	: Sarım sayısı, (spir)
$\psi(i, \theta)$: Akı bağıntı fonksiyonu, (Wb)
θ	: Rotorun açısal konumu, (Konum °)
$T(i, \theta)$: Makinadan sağlanan moment, (Nm)
W	: Hava aralığında depolanan enerji, (J/m ³)
D_o	: Stator çapı, (m)
D	: Stator iç çapı, (m)
D_{mc}	: Mil çapı, (m)
L_{derinlik}	: Motor derinliği, (m)
g	: Hava aralığı, (m)
α_s	: Stator kutup açısı, (°)
α_r	: Rotor kutup açısı, (°)
J	: Akım yoğunluğu, (A/m ²)
B_{max}	: Akı yoğunluğu, (Wb/m ² , T)
N_s	: Stator kutup sayısı
N_r	: Rotor kutup sayısı
N_{faz}	: Faz başına siper sayısı
D_f	: Sargı dolgu faktörü, (%)
P_{talep}	: Talep edilen güç, (watt)
n	: Devir sayısı, (devir/dakika)
C	: Stator boyunduruk, (m)
H_s	: Stator kutup yüksekliği, (m)
H_r	: Rotor kutup yüksekliği, (m)
L	: Endüktans, (H)
L_a	: Çakıl konumundaki endüktans, (H)
L_u	: Çakıl olmayan konumundaki endüktans, (H)
T_s	: Stator kutup genişliği, (m)
D_w	: İletken çapı, (m)
M_{ort}	: Ortalama moment, (Nm)
T	: Anahtarlamamanın tekrarlama süresi, (sn)
K	: Görev çevirimi
V_o	: Çıkış gerilimi, (Volt)

V_{in}	: Giri gerilimi, (Volt)
k	: Anahtar
V_A	: Ortalama gerilimdir, (Volt)
q(t)	: Anahtarlama frekansı, (Hz)
T_s	: Anahtarlama periyodu, (sn)
P_{cu}	: Bakır kayıpları, (Watt)
	: Adım açısı, (°)
$L_{a,b,c}$: Faz endüktansları, (H)
M_{ab}	: Karıt endüktansları, (H)
w_{ref}	: Referans hız, (devir/dakika)
e_z	: Zıt emk, (Volt)
M_{mil}	: Mil momenti, (Nm)
* i_{in}	: Do ru akım kayna ından çekilen akımın ölçme noktaları, (Amper)
* v_{in}	: Do ru akım kayna ından çekilen gerilimin ölçme noktaları, (Volt)
* i_o	: Yük tarafından çekilen akım ölçme noktası, (Amper)
* v_o	: Yük tarafından çekilen gerilim ölçme noktası, (Volt)
* w	: Milin açisal hızının ölçümü, (°)
P_{in_ort}	: Ortalama giri gücü, (Watt)
P_{mek_ort}	: Ortalama mekanik gücü, (Watt)
P_{in}	: Anlık giri gücü, (Watt)
P_{mek}	: Anlık mekanik gücü, (Watt)
P_{Kyp}	: Sürtünme, vantilasyon ve aktarma organları (kaplinler) sebebiyle meydana gelen sitemin kayıpları, (Watt)
R_S	: Sargı direnci, (Ohm)

Kısaltmalar

ARM	: Anahtarlı Relüktans Motor
KKARM	: Karıt Kuplajlı Anahtarlı Relüktans Motor
DSP	: Dijital Sinyal İlemci
DAC	: Dijital Analog Dönü türücü
GUI	: Graphical User Interface
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
YSA	: Yapay Sinir A 1
B	: İeri Beslemeli
GY	: Geri Yansıtmalı
BYSA	: İeri Beslemeli Yapay Sinir A ları
GBYSA	: Geri Beslemeli Yapay Sinir A ları
DMDAG	: Daimi Mıknatıslı Do ru Akım Generatör
DGA	: Darbe Genlik Ayarı
DAM	: Do ru Akım Makinası

KAR İT KUPLAJLI ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUNUN MOMENT DALGALILIĞININ AZALTILMASI

Mevlüt KARAÇOR

Anahtar Kelimeler: Anahtarlı Relüktans Motor, Kar İt Kuplajlı Relüktans Motor, Moment Dalgalı ının Azaltılması, Modelleme.

Özet: Bu tez çalışmasında, Kar İt Kuplajlı Anahtarlı Relüktans Motorunun (KKARM) modellenmesi ve moment dalgalılığının azaltılması ile ilgili önerilen yeni bir yöntem sunulmuştur.

Çalışmanın ilk bölümünde KKARM ile ilgili yapılmış olan literatür çalışmasına yer verilmiş, ikinci bölümde klasik ARM ve sürücü sistemleri tanıtılmıştır. KKARM'nin yapısı tanıtılmış ve manyetostatik analizleri üçüncü bölümde sunulmuştur. Bu bölümde KKARM'nin modellenmesi amacıyla kullanılan manyetik devre temelli modelleme yöntemi ve matris temelli modelleme yöntemi tanıtılmıştır. Manyetostatik Analiz verileri kullanılarak, Yapay Sinir Ağları (YSA) tabanlı KKARM yeni bir model gerçekleştirilmiştir. YSA tabanlı modelin Matlab Simulink ortamında çalıştırılması ile KKARM'nin dinamik analizi gerçekleştirilmiş ve modelden elde edilen akım, akı, moment ve hız verilerinin literatürde gerçekleştirilmiş çalışmalar ile örtüşen benzer profiller çizildiği görülmüştür.

Çalışmanın son iki bölümünde, KKARM'nin moment üretimi esnasında meydana gelen dalgalılığının azaltılması için yeni bir yöntem tanıtılmış ve bu yöntem "moment desteği" adı verilmiştir. Bu yöntem ile, anlık moment değerlerinin ortalama moment değerinin altına düşmesi konum aralıkları önceden tespit edilebilmektedir. Bu konum aralıklarında KKARM'nin ilave bir kaynak ile beslenmesi sağlanarak momentteki düşmeler desteklenmiş ve moment dalgalılığı %50'ye yakın bir şekilde azaltılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ispatlanmıştır.

TORQUE RIPPLE REDUCTION OF MUTUALLY COUPLED RELUCTANCE MOTOR

Mevlüt KARAÇOR

Keywords: Switched Reluctance Motor, Mutually Coupled Reluctance Motor, Torque Ripple Reduction, Modelling

Abstract: In this thesis, is presented modeling of Mutually Coupled Reluctance Motor (MCSRМ) and a new method of torque ripple reduction about MCSRМ.

In first chapter, MCSRМ related to literature study are presented that have been made. In the second section, the classical SRМ and drive systems are introduced. In the third section, the structure of MCSRМ and magnetostatic analysis are presented. Also used for the purpose of MCSRМ model, modeling method based on magnetic circuit, and matrix-based modeling method is introduced. Magnetostatic Analysis using the data, Artificial Neural Networks (ANN) was carried out based on a new model. ANN-based model in the Matlab environment Simulink, dynamic analysis of MCSRМ was performed by running the model derived from current, flux, torque and speed data in the literature have been found to be similar to the study.

In the last two chapters of the study, occurring the production of torque in MCSRМ to reduce the torque ripple a new method is introduced and the method is called "m-curve". With this method, instantaneous torque values, the average torque value falls below the range of positions can be determined in advance. This range of positions with a source of nutrition MCSRМ providing additional torque and torque-wave work supported by the decrease of 50% reduced close to the experimental value has been proven in studies. With this method, instantaneous torque values, the average torque value falls below the range of positions can be determined in advance. When the torque is reduced, in this position range of the MCSRМ, is supported by an additional power source. Torque ripple is reduced %50 and distinguished in experimental study chapter of this thesis.

1. G R

Anahtarlı Relüktans Motoru (ARM) dü ünçesi, ilk olarak skoçya'da bir lokomotifte kullanılmak üzere 1838'de ortaya atılmı ve ilk patent Lawrance tarafından alınmı tır. Optimal denetim devresi ve SRM (Switched Reluctance Motor) ismi ise W.F. Ray ve Rex Davis tararından verilmi tır. Önceki ismi ise De i ken Relüktans Motor (Variable Reluctance Motor)'dur. 1969'da Nasar, günümüz modern ARM'lerinin temel prensiplerini tanıtmı tır [1-2]. 1970'lerden sonra hızlı anahtarlama elemanlarının ortaya çıkması sonucunda, ARM ile ilgili ara tırmalar büyük bir ivme kazanmı ve ara tırmalardaki ba arılı sonuçların neticesinde, ARM'nin endüstride kullanımı hızla artmı ve artmaya devam etmektedir.

ARM'nin basit yapısı ve birçok uygulamalar için yüksek performans göstermesi endüstride kullanılmaya ba lanmasının nedenlerini açıklayabilir. Genellikle ARM'ler otomotiv endüstrisinde, havacılık endüstrisinde, demiryolu ve hafif raylı araçlarının tahri inde, ev aletlerinde (süpürgeler, beyaz e yalar v.b.), genel amaçlı endüstriyel sürücülerde, servo sistemlerde, robot uygulamalarında ve özellikle dı rotorlu yapısı ile kompresör, fan, pompa ve santrifüj tahri inde kullanılmaktadır. Günümüzde, ARM'lerin ta ıma araçlarında kullanımı üzerine çe itli ara tırmalar yapılmaktadır. Alternatif ta ıt modellerinde, en önemli motor seçeneklerinden birisi de elektrik motorları olup bu motorlarının fiziksel yapıları, akım moment ili kileri ve verimlilikleri ara tırma konusu olmakta ve bu ara tırmalar enerji problemlerine bir çözüm olabilme ihtimallerinden dolayı oldukça önem arz etmektedirler. Bilhassa bu tip uygulamalarda klasik ARM ve daha yüksek moment üretilmesini öngören Kar ıt Kuplajlı Anahtarlı Relüktans Makinası'da (KKARM) önemli bir rakip olabilecektir.

ARM'ler, rotor ve stator arasındaki hava aralı nda olu an de i ken relüktansa ba lı olarak moment üreten makinelerdir. ARM di er elektrik makineleri ile kar ıla tırıldı nda bazı önemli üstünlüklere sahiptir. Bunlar;

- Yüksek verimlilik,
- Stator ve rotor kutuplarının çıkıntılı olması ve rotor kutuplarında sargı olmaması sebebiyle imalat maliyeti düşüktür.
- Geni hız aralığında çalışmaya özeline sahiptir.
- Sürücü devresi kolay ve daha sağlamdır.
- Yüksek kalkış momentine sahiptir.
- Anahtarlama kayıpları düşüktür.
- Fazlardan birinde hata meydana gelse dahi, diğer fazlar bağımsız düşük performansta çalışmaya devam edebilir [3].

Yapılan literatür taramasında ARM ile ilgili bir çok yayın incelenmiştir. SCI tarafından taranan dergilerde, iki yüz adete yakın yayına (SCI tarafından taranan son beş yılda yapılan yayın sayısı) Engineering Index tarafından taranan dergi ve konferanslarda, bin altı yüz adet civarında yayına (Engineering Index tarafından taranan 1969 yılından bu yana yapılan yayın sayısı) rastlanmıştır. KKARM ile ilgili SCI tarafından taranan dergilerde, on civarında yayına (SCI tarafından taranan son beş yılda yapılan yayın sayısı), Engineering Index tarafından taranan dergi ve konferanslarda, yaklaşık yirmi adet yayına rastlanmıştır (Engineering Index tarafından taranan 1969 yılından bu yana yapılan yayın sayısı). Yapılan literatür taraması, Anahtarlı Relüktans Makinası'nın güncellenmesini koruduğu ve bunun yanı sıra Kuplajlı Anahtarlı Relüktans Makinası'nın ise, ara tırma adına güncel bir makine olduğu sonucuna varılmıştır. Kuplajlı Anahtarlı Relüktans Makinası ile ilgili literatür aşağıda özetlenmiştir.

Suriano(1992), klasik ARM, Akım Regüleli Relüktans Motor (ARRM) ve KKARM karşılaştırmasını gerçekleştiren bir teknik rapor hazırlamış, bu raporu Eylül 1992'de Purdue Üniversitesi'nde yayınlamış olup, bu çalışmada KKARM ile ilgili yayınlanmış çalışmaların ilki olduğunu belirtmiştir. KKARM birbirine paralel bağlı iki bobin, ARM seri bağlı iki bobin ve ARRM ise tek bobin ile gösterilerek lineer analiz gerçekleştirilmiştir. Üç motorun faz direnci, sarım sayısı, magneto motor kuvveti (mmk) ve statik moment değerleri ile karşılaştırılmıştır [4].

Mecrow(1992), KKARM'nin ARM ile karşılaştırılmasını gerçekleştirmiş ve her bir fazın moment üretimine periyodun üçte ikisinden daha fazla katkı sağladığını göstermiştir. Ayrıca, KKARM'nin modellenmesinde klasik ARM denklemlerinin katsayı matrisi ile dönüşümünü gerçekleştiren basit bir modelleme yapısını önermektedir [5].

Mecrow(1993), KKARM'de moment üretiminin fazlar arasında meydana gelen karışım endüktans değişimi ile meydana geldiğini ve öz endüktansın moment üretimine katkısının oldukça az olmasından dolayı, sabit olduğu kabulü yapmıştır.deal akımda farklı uyartımlı (tek ve çift yönlü) 6/4 KKARM'nin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Yüklü olarak yapılan testlerde yazar, çıkış momentinin farklı uyartım durumlarında klasik ARM'den en az %25 daha fazla olduğu sonucunu elde etmiştir [6].

Barrass(1994), KKARM için geliştirilmiş sürücü sisteminin deneysel sonuçlarını vermiştir. Tek yönlü akım uygulandığında, karışım endüktansın artışı gösterdiği bölgede KKARM'nin pozitif moment ürettiği, çalışmada gösterilmektedir. Düşük hızlarda akım denetiminin ve yüksek hızlarda gerilim denetiminin sürücüde kullanıldığı deneysel sonuçlar verilmiştir. Deneysel sürücü performansı ve dalga şekilleri elde edilmiş kısa adımlı bir makinenin sürücüsü ile karşılaştırılmıştır. Düşük hızlarda akım denetiminin benzer olduğu buna rağmen yüksek hızlarda iki makinenin gerilim denetiminin farklı olduğu, yapılan çalışmada gösterilmiştir [7].

Barrass(1995), KKARM'nin çift yönlü uyarma yapısındaki davranışı ayrıntılı olarak analiz etmiştir. 7.5 kW, 1500 d/dak denklemlerine sahip bir KKARM, 10 kHz anahtarlama frekansına sahip IGBT'li bir sürücü devre ile dijital sinyal işlemcisinin (DSP) kullanıldığı bir deney düzeni ile tek yönlü, çift yönlü, kare dalga ve sinüzoidal uyarmalara makinenin verdiği cevap incelemiştir. Elde edilen moment denklemleri genlik ve dalgalılık oranı açısından birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Çift yönlü akımla çalışmasına tek yönlü akım ile çalışmaya göre bir üstünlüğü olmadığı, fakat klasik makineye karşı önemli bir üstünlüğe sahip olduğu gösterilmiştir [8].

Mecrow(1996), 7,5 kW'lık klasik bir makine üzerinde çeşitli testler yaparak KKARM teorik olarak geliştirmeye çalışmıştır. Farklı uyarma durumlarında

KKARM'nin verdiği cevapların ölçümleri gerçekleştirilmiştir. KKARM farkı uyartım durumlarında meydana gelen kayıplar modellenmeye çalışılmış ve elde edilen ifadeler klasik ARM tarafından çekilen akım ile karşılaştırılmıştır. KKARM modellenmesi için bir dönüşüm matrisi önerilmiştir [9].

Wale(1996), ilk defa prensibi üç fazlı makinanın çalışması prensibi ile aynı olan iki fazlı KKARM için sürücü devre ihtiyacı araştırılmış ve farklı dönüşürücü yapıları incelenmiştir. Önerilen makine için farklı güç dönüşürücü sürücüler denenmiş ve sonuçları çalışmada sunulmuştur [10].

Mecrow(1998), standart sürücülerin KKARM'de kayıpları arttırdığını gösterilmiş ve bu kayıpları azaltan ve komütasyon sorununu çözen yeni bir sürücü devresi ortaya koymuştur. Bu sürücü devresi ile yeni sargı yapısına sahip motorun daha büyük güç dönüşürücülerine ihtiyaç duymadığını gösterilmiştir [11].

Clothier(1999), üç fazlı köprü dönüşürücü yapısı, hem kısa adımlı motor hem de tam adım sargı yapısına sahip motor için incelenmiştir. Verim ve maliyet açısından hem birbirleri ile hem de asenkron motor ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca akım algılama düzenekleri ve akımı istenilen seviyede denetleme üzerine, konum algılayıcı sayısının etkisi incelenmiştir [12].

Kosaka(2000), tam adımlı Anahtarlı Relüktans Motorun konum algılayıcısız denetlenmesi ile ilgili bir çalışması yapılmıştır. Önerilen Bulanık Mantık tabanlı algoritma ile hem akı halkalanmasını hem de akımları kullanarak rotor konumunu belirlemek mümkün olmuştur. 400 W, 3000 d/dak., 12/8 stator ve rotor kutup yapısına sahip motorda uygulanan bu algoritma ile oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir [13].

Kokernak(2000), "Karıt Kuplajlı Anahtarlı Relüktans Motor" ismi ile, tam adımlı sargı yapısına sahip motor için manyetik devre modeli geliştirilmiştir. Karıt Kuplajlı Anahtarlı Relüktans Motorun performans tahmini için bir yöntem ortaya konulmuş ve sunulan model ile faz akımlarına dayalı olarak makine akısının hesabı gerçekleştirilmiştir. C++ programlama dili kullanılarak oluşturulan model sonucu

elemanlar yöntemi ile de gerçekleştirilmiştir [14].

Ashour(2000), çift çıkıntılı 8/6 Anahtarlı Relüktans Motorunun kaydırılmış tam adım sargı konfigürasyonunun performansı araştırılmıştır. Öz endüktans ve karışık endüktans motorun moment üretiminde temel etmenlerdir ve bundan dolayı her iki karakteristik sargı çeşidi deneysel olarak araştırılmıştır. IGBT temelli dönüştürücü ile akım denetim kapasitesi geliştirilmiş DA gerilim yükseltici devre tasarlanmıştır ve devrenin analizi yapılan çalışmada gerçekleştirilmiştir. Makinenin sürülmesi için kullanılmış olan iki anahtarlı yapı çalışmada tartışılmıştır [15].

Mecrow(2001), tam adım sargı yapısına sahip ARM'nin modellenmesinde yarı anahtarlı yapıya yönelik önemli bir çalışma yapılmıştır. Akı halkalanmasının makinenin tüm fazlarının seviyesi olmasından kaynaklanan yüksek miktarda harmonik olmayan yapı, akı halkalanması ve akımın her stator dikey basına düşen akı ve magneto motor kuvveti olarak ayrılaştırılması ve bunların basit bir örnekleme tablosuyla modele dahil edilmesi ile araştırılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmaları ile oluşturulan modelin doğruluğu ilgili yayında gösterilmiştir [16].

Kosaka(2001), tasarım amacıyla bilinen parametrelerden endüktansı hesaplamak için geliştirilmiş, manyetik devre analizini ve akım analizini içeren bir yöntemle çalışılarak en uygun gerilim iletim açısının belirlenmesi üzerinde çalışılmıştır. [17].

Ashour(2001), C167, 16 bit mikro denetleyici ile kaydırılmış tam Adım sarımlı Anahtarlı Relüktans Motorunun kayan kipli hız denetimi deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Hız denetimi ve hızlanma tahmin yöntemleri çalışmada tartışılmıştır. Hız basamak değişimi, hız izleme, ters yönde dönme ve yük dalgalanmasının gerçekleştirildiği durumlarda PI (oransal ve integral) denetleyici ile kayan kipli hız denetleyiciye sistemin verdiği cevaplar karşılaştırılmıştır. Kayan kipli denetimde sistem cevabının daha kararlı olduğu görülmüştür buna rağmen PI denetimde hız tepedeğerinin daha düşük olduğu deneysel sonuçlarla elde edilmiştir [18].

Garip(2002), moment dalgalanması klasik ARM ve KKARM yapıları için belirli değerlere çekilmesine yönelik yapılan çalışmaları ile stator ve rotor kutup ekseninin

yeniden tasarlanmı ve moment dalgalılı mın giderilmesi üzerinde çalı ılımlı tır. Kutup ba larında yapılan de i iklik ile endüktans profilinin de i ti i tespit edilmi tir. Bunun sonucunda, %37.2 den %13.7 ye moment dalgalılı ı indirilmi tir [19].

Ozoglu(2002), stator ve rotor kutup eklinin yeniden tasarlanması ile moment dalgalılı mın giderilmesi üzerinde çalı ılımlı ve 5 farklı tip model üretilmi tir. Yapılan alı malar sonucunda, kısa adımlı ARM'de dalgalılık %24.1 tam adımlıda ise, % 22.6 azaltılmı tır [20].

Ghoneim(2002), herhangi bir çift çıkıntılı relüktans makinası analizi için moment, akı ve gerilim matris çözümü, çalı mada sunulmu tur. Matris formülünün, de i ik faz ve sargı sayıları, bobin adımı, ba lantı tipi, simetrik ve asimetrik sargı yapısı için ihtiyacı kar ılıadı ı yapılan çalı mada gösterilmi tir [21].

Xu(2002), KKARM'nin elektromanyetik karakteristi i üzerinde çalı ılımlı tır. Farklı uyarım ve çalı ma durumları için denetim prensipleri geli tirilmi tir. Testler 11KW'lık KKARM üzerinde yapılmı olup sonuçlar yapılan çalı mada de erlendirilmi tir [22].

Gallegos(2003), 15KW, 48/32 kutuplu ve 3 fazlı KKARM'de tek yönlü ve çift yönlü akım ve 120° ve 180° iletim testleri yapılarak makinanın performansı ara tırılmı tır. Yapılan Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) sonucunda KKARM'nin do rusal olmayan bir davranı gösterdi i tespit edilmi tir. Deneysel alı malarda 120° tek yönlü akım ile çalı manın en iyi performansı sa ladı ı görülmü tür [23].

Barnes(2004), yapılan çalı mada anahtarlı relüktans makina sürücü sistem tasarımı üzerinde durulmu tur. Ayrıca DA beslemeli kısa ve tam adım sargılı hibrit bir makina tasarımı çalı mada önerilmi tir [24].

1.1. Literatür Taramasının De erlendirilmesi

Yapılan literatür taraması sonuçları irdelendi inde, günümüze kadar yapılan çalı maların a a ıdaki ba lıklar altında toplandı ı görülmü tür.

- a) KKARM'nin çalı ma ekilleri (unipolar ve bipolar),
- b) Sürücü tasarımı ve sürücü kayıpları,
- c) Modelleme çalı maları,
- d) Mekanik tasarımın iyile tirilmesiyle moment dalgalılı ının giderilmesi ile ilgili çalı malar.

Literatür taraması esnasında, KKARM'nin en büyük avantajının klasik ARM'ye nazaran %20-30 arasında, daha fazla moment üretmesi ve en büyük dezavantajının ise moment dalgalılı ının momentteki artı a paralel olarak artmasıdır. Bu ba lamda yapılan çalı malar, KKARM'nin mekanik yapısının (kutup ekilleri) de i tirilmesi yoluyla moment dalgalılı ı azaltılmaya çalı ılmı tür. Bu çalı malar belirli oranlarda ba arılı olmu tür (KKARM'de % 22.6 azaltılmı [20]).

Mekanik tasarımın iyile tirilmesi yoluyla, moment dalgalılı ının giderilmesi metodu halen endüstride kullanılmakta olan KKARM'lere uygulanabilme olasılı ı yoktur, sadece yeni tasarlanan makinalara uygulanabilir. Bu sebepten dolayı, KKARM'nin moment dalgalılı ının azaltılması için yapılmı olan tez çalı masında geometrik yapının iyile tirilmesi üzerinde durulmamı ve yeni bir denetim tekni i geli tirilmi tür.

KKARM ile ilgili bir di er önemli problem ise, modellemede ya anan güçlüklerdir. Klasik ARM modellemede kullanılan ön de er tablolarında (Look-up table) konum, akı veya akım de erleri kullanılırken, KKARM'de ise konum, faz sargı akımı ve di er aktif faz sargı akımlarının kullanılması gerekmektedir. Ön de er tablolarında üç de i keninin kullanılması modellemede oldukça fazla sayıda döngü kullanılması gereksinimini ortaya çıkarmaktadır. Bunun sonucunda, döngülerin kurulması oldukça güçle mekte ve dinamik analiz için kullanılacak olan simülasyonlar oldukça karma ık hale gelmektedir. Sonuç olarak, literatürde tespit

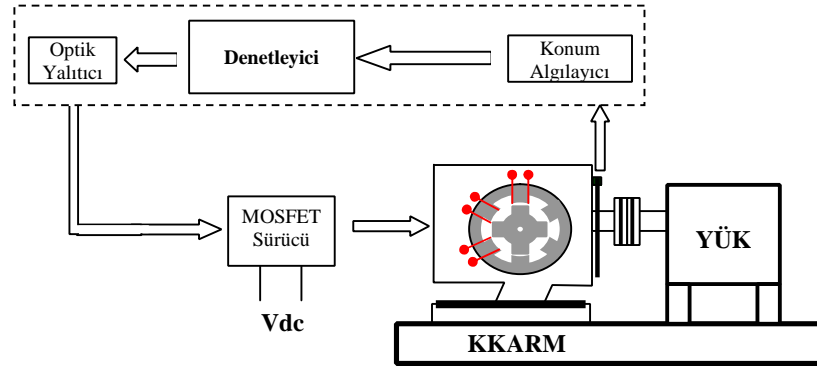
edilen iki problemi çözmek için iki öneride bulunulmu tur.

Bunlar;

- a) KKARM'nin modellenmesinde Yapay Sinir A larının (YSA) kullanılması,
- b) Moment dalgalılı mın azaltılması için gerekli olan denetim algoritmasının geli tirilmesidir.

Tez çalı masında yukarıda öneride bulunulan iki katkı için, deneysel ve bilgisayar ortamında gerçekleştirilmi ve sonraki bölümlerde çalı manın nasıl gerçekleştirildi i açıklanmı ve deneysel sonuçlar verilmi tir.

ekil 1.1'de çalı mada yapılan katkıların testini gerçekle tirmek için geli tirilmi olan deneysel düzene e ait sistemin blok eması görülmektedir.



ekil 1.1: Gerçekle tirilmi deneysel düzenek, denetim ve sürücü sisteminin blok eması.

İlk bölümünde, yapılan çalı malar özetlenerek tez çalı masının literatüre katkısı açıklanmı tir.

İkinci bölümde ise, KKARM'nin geli tirilmesine temel olu turan klasik ARM'nin yapısı ve çalı ması, moment üretimi, geometrik yapısının belirlenmesi, tez kapsamında yapımı gerçekleştirilen Matlab GUI tabanlı ARM tasarım programı ve sürücü sistemler tanıtılmı tir.

Üçüncü bölümde ise, KKARM'nin yapısı ve çalı ması, Klasik ARM'ye benzetilerek gerçekleştirilen modelleme çalı ması ile manyetik devre temelli modelleme

çalışmaları açıklanmıştır. Yapılan modelleme çalışmaları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen YSA ile KKARM modellenmesi elde edilen sonuçlar bu bölümde verilmiştir.

Dördüncü bölümde, KKARM'nin moment dalgalılığının azaltılması için geliştirilen algoritma üzerinde durulmuştur. Öncelikli olarak KKARM'nin statik analizi gerçekleştirilmiş ve analiz sonucunda moment profili talep edilen moment değerlerine göre üç farklı durumun olduğu görülmüştür. Üç farklı durum ayrıntılı olarak incelenmiş olup var olan sürücü sistemlerinin hangi durumda yetersiz kaldığı tartışılmıştır. Sonuç olarak, bu bölümde moment dalgalılığını gidermek amacıyla iki kademeli gerilim ayarlamalı bir sürücü sisteminin gereksinimleri ortaya konulmuştur. Gereksinimler sonucunda tasarlanan iki farklı kaynağın seri bağlanması ile beslenen sürücü sistemi için, hangi konumlarda çift hangi konumlarda tek kaynak tarafından besleneceğinin tespitinde kullanılan yeni bir moment-konum eğrisi (M-E eğrisi) geliştirilmiştir.

Beşinci bölümde, KKARM ile ilgili deneysel çalışmalar için hazırlanan altyapı düzenekleri (mekanik aksam, KKARM güç katı, sürücü katı, DA hat yükseltici katı, DSP denetleyici katı, akım ve gerilim ölçüm katı v.d.) tanıtılmıştır. Ayrıca bu bölümde, mekanik momentin hesaplanması için gerekli olan mekanik kayıpların tespiti ve kayıp pozisyon arasındaki ilişki vurgulanmıştır. KKARM deneysel düzeneği denetleyen DSP program algoritması tanıtılmıştır.

Son bölümde KKARM'nin deneysel düzeneğinden alınan veriler ile SEY analizi sonucunda elde edilen benzetim çalışmaları sonuçları karşılaştırılmış ve yapılan tez çalışmasının katkısı ortaya konulmuştur.

2. ANAHTARLI RELÜKTANS MAKİNASI

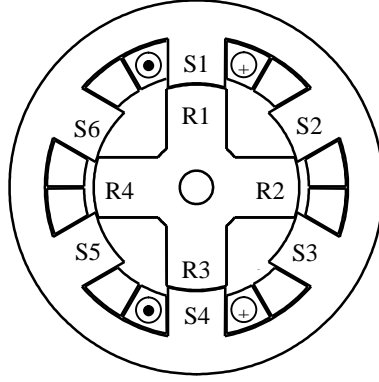
Klasik ARM ile ilgili, gerek uluslararası yayınlarda gerekse ulusal yayın ve tez çalışmalarında birçok kaynak ve bilgi bulunmaktadır. Bu sebepten dolayı, bilgi tekrarına gitmemek için Klasik ARM'nin yapısı ve çalışması kısaca anlatılacak ve literatür atıfları verilecektir.

2.1. Klasik ARM Yapısı ve Çalışması

Klasik elektrik makinaları gibi ARM'de stator ve rotordan oluşur. Temel farklılık olarak stator ve rotorunda çıkıntılara sahiptir. Bu çıkıntılar yüzünden literatürde bazı çalışmalarda “Çift Çıkıntılı Anahtarlı Relüktans Makinası” olarak da adlandırılmaktadır. Rotor ve stator, manyetik kalitesi yüksek ve kalınlığı 0.25-0.35mm arasında değişen saç levhaların paketlenmesi ile oluşturulur. Stator ve rotorun kutuplarındaki en önemli farklılık moment üretimi için kullanılacak olan sargıların sadece stator kutuplarına yerleştirilmesi olmasıdır. Aslında bu farklılık ARM'nin çalışması mantığının temelini oluşturmaktadır. Rotorunda sargı bulunmaması makina yapısında daha az bakırın kullanıldığını ve dolayısıyla bakır kayıplarının diğer makinalara göre daha az olduğunu gösterir.

Kutup sayısı, moment üretilebilme yeteneğine, moment dalgalılığına ve dört bölge çalışması gibi bazı kıyaslamalara göre belirlenir. ARM kutup sayısı bakımından çok çeşitlilik gösterir. Kutup sayısı arttıkça makinanın performansı değişecektir.

ARM'nin faz sayısı yapısı, bilinen makinaların faz sayılarından farklıdır. Her stator kutbu bir uyarma sargısına sahiptir ve karışındaki stator kutbu ile seri bağlıdır. Bu şekilde karışıklık iki stator kutbu birlikte makinanın bir fazını oluşturur. Buna göre stator kutup sayısı arttıkça faz sayısı artacaktır. Klasik ARM'nin yapısı şekil 2.1'de görülmekte [25] ve S1-S6 stator kutuplarını, R1-R4 rotor kutuplarını göstermektedir.



ekil 2.1: Klasik ARM'nin yapısı.

Relüktans, basit bir analogi ile elektrik devresindeki direncin, manyetik devredeki karılıklı ekinde dünülebilir. Elektrik devresinde direnç, elektrik akımına karşı zorluk gösterirken, manyetik devredeki relüktans manyetik akının dolaşımına zorluk gösterir. Relüktans motorlarda stator, rotor ve gövde üzerindeki relüktans sabit olmasına karşın, rotor ve stator arasındaki hava aralığının relüktansı de i kendir. ARM'lerde rotor konumuna göre halkalanma akılarının izlediği yol de i mekte ve bu da manyetik devredeki relüktansın de i imine neden olmaktadır. ARM'nin çalışması için kısaca, hava aralığındaki relüktansın de i imi prensibine dayandıı söylenebilir. Yani stator ve rotor kutupları arasındaki hava aralığı ne kadar çok ise, manyetik devrenin relüktansı o kadar fazla olur ve devre relüktansı azaltmak için moment üretir. Üretilen moment stator ve rotor kutuplarını bir birine yakınlaştırır. Böylece manyetik devrenin relüktansı azalmı olur. Manyetik devrenin relüktans ifadesi Denklem 2.1 ile belirlenmektedir [26].

$$\mathfrak{R} = \frac{F}{\phi} = \frac{Ni}{\phi} = \frac{Hl}{BS} = \frac{l}{\mu S} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S} \quad (2.1)$$

\mathfrak{R} Relüktansı, F magneto motor kuvvetini (mmk), ϕ akıyı, l manyetik yolun uzunluğunu, B manyetik akı yoğunluğunu, H manyetik alan şiddetini, S manyetik yolun kesit alanını ve μ ise manyetik malzemenin manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir. Denklem 2.1'de görülen l , μ ve S parametreleri, rotorun açısal de i imi ile birlikte devre relüktansının de i imine neden olmaktadır. Stator ve rotor kutuplarının ortalanmış pozisyonunda manyetik kesim S alanı çok küçük bir de erde olmakta ve bundan dolayı, relüktans de eri maksimum de erini almaktadır. Rotor ve stator kutuplarının karşılaıklı pozisyon konumuna yakla maları durumunda artan kesim S

alanıyla birlikte geçirgenlik de eri de hızlı bir ekilde artmakta ve relüktans de eri azalmaktadır. Rotor ve stator kutupları tamamen çakı ık konuma geldiklerinde ise, kesim alanı maksimum olmakta ve manyetik geçirgenlik maksimum de erine ulaşmakta bundan dolayı relüktans minimum de er almaktadır. Rotor ve stator çakı ık ve çakı ık polmayan konumları ile ilgili detaylı açıklama bölüm 3.2’de yer almaktadır. ARM’lerde relüktans yerine daha çok kullanılan kriter endüktans de eridir ve bu iki de er arasındaki ilişki Denklem 2.2’de verilmiştir.

$$L = \frac{\psi}{i} = \frac{N\phi}{i} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \quad (2.2)$$

ψ halkalanma akısı de erini, i faz akımını ve N ise faza ait sarım sayısını göstermektedir [27].

ARM’lerde relüktans yerine daha çok endüktans de erinin kriter olarak kullanılmasının temel sebebi, moment üretiminin endüktans de erimi ile doğrudan orantılı olmasıdır.

2.1.1. Momentin üretilmesi

Dönme hareketi yapan bir elektrik makinasında, hava aralığı geometrisini karakterize eden akı-akım ba ntısını ifade eden endüktans matrisi bilindi inde, makinanın matematiksel modeli üretilebilir [28]. Böyle bir makinada enerji korunumu, akı ba ntı fonksiyonu $\psi(i, \theta)$ ile uyarma akımının (I) çarpımı, rotorun açısal konumu (θ) ile makinadan sağlanan moment $T(i, \theta)$ ile çarpımının, hava aralığı nda depolanan enerjinin W toplamına eşittir ve Denklem 2.3’de ifade edilmiştir.

$$\psi(i, \theta)I = T(i, \theta)\theta + W \quad (2.3)$$

Enerji korunum ifadesinden faydalanılarak rotor pozisyonundaki ufak bir de i iklik meydana geldi inde ($\delta\theta$), akı ($\delta\psi$) ve manyetik alanda depolana enerjide (δW) de kısmi bir de i me meydana gelir (Denklem 2.4).

$$\delta\psi(i, \theta)I = T(i, \theta)\delta\theta + \delta W \quad (2.4)$$

$\delta\theta$ ve $\delta\phi$ 'deki de i imler çok küçük oldu undan moment,

$$T(i, \theta) = I \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} - \frac{\partial W_m}{\partial \theta} \quad (2.5)$$

Denklem 2.5 ifadesinden elde edilir. “N” sarım sayılı bir bobinde depolanan manyetik enerji Denklem 2.6’da ifade edilmi tir.

$$W = \sum_{k=1}^n \left(\int_0^{\Psi_k} i_k d\Psi_k \right) \quad (2.6)$$

“N” sarım sayılı bir bobin için Denklem 2.5 yeniden düzenlendi inde,

$$T = \sum_{k=1}^n I_k \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} - \sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\int_0^{\Psi_k} i_k d\Psi_k \right) \quad (2.7)$$

moment ifadesi elde edilir. Elde edilen ifade iki farklı durum açısından incelenebilir. Bunlar;

1- Rotor pozisyonundaki $\delta\theta$ de i imine kar ın akının sabit oldu u varsayıldı nda, Denklem 2.7’deki e itli in sa tarafındaki ilk terimin de eri türevin sıfır olmasından dolayı sıfır olur. Yeni ifade Denklem 2.8’de görölmektedir.

$$T = - \sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\int_0^{\Psi_k} i_k d\Psi_k \right) \text{ veya } T = - \sum_{k=1}^n \left(\int_0^{\Psi_k} \frac{\partial i_k}{\partial \theta} d\Psi_k \right) \quad (2.8)$$

Do rusal sistemlerde manyetik enerjinin ifadesi Denklem 2.9’da görölmekte olup do rusal bir sistem için Denklem 2.8 tekrar düzenlendi inde Denklem 2.10 elde edilir.

$$W_m = \sum_{k=1}^n \left(\int_0^{\Psi_k} i_k d\Psi_k \right) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (i_k \Psi_k) \quad (2.9)$$

$$T = - \frac{\partial W_m}{\partial \theta} \quad (2.10)$$

Bu ifade akı fonksiyonuna ili kin olarak rotor yer de i tirmesi ile depolanan manyetik enerjideki azalma oranını gösterir.

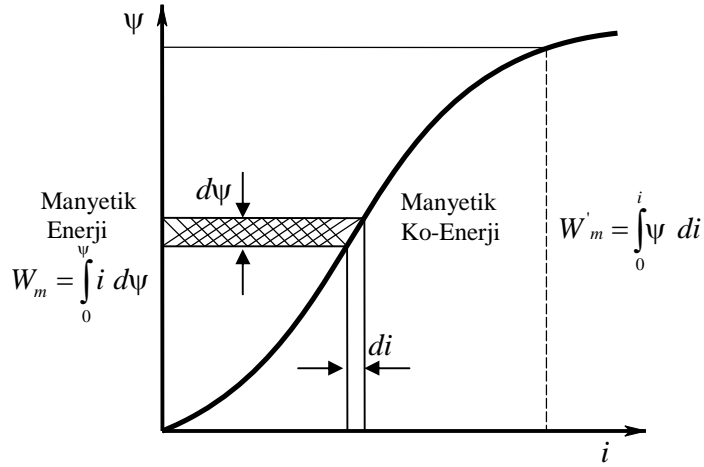
2- Rotor pozisyonundaki $\delta\theta$ de i imine kar ın akımın sabit I_k oldu u varsayıldı ında, Denklem 2.7'deki e itli in sa tarafındaki ikinci ifadenin kısmi integrali alınır sa, Denklem 2.11 ba lantısı elde edilir ve Denklem 2.7'de yerine konuldu unda ise Denklem 2.12 elde edilir.

$$\sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\int_0^{\psi_k} i_k d\psi_k \right) = \sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial \theta} \left(I_k \psi_k - \int_0^{I_k} \psi_k di_k \right) \quad (2.11)$$

$$T = \sum_{k=1}^n I_k \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} - \sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial \theta} \left(I_k \psi_k - \int_0^{I_k} \psi_k di_k \right) \quad (2.12)$$

$$T = \sum_{k=1}^n \int_0^{I_k} \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} di_k \quad (2.13)$$

ekil 2.2'de manyetik alanda akı-akım de i imi görölmektedir. Denklem 2.14'de manyetik ko-enerjinin endüktans cinsinden ifadesi görölmektedir. Denklem 2.15'de ise manyetik ko-enerjinin denkli inin kullanılarak moment ifadesinin elde edili i gösterilmi tir [28].



ekil 2.2: Manyetik alanda akı-akım de i imi.

$$W'_m = \frac{1}{2} Li^2 \quad (2.14)$$

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (2.15)$$

2.1.2. ARM geometrik Yapısının Belirlenmesi

ARM'nin geometrik yapısının belirlenmesi yeni bir motor tasarımı için gerçekte tirilmesi gereken ilk a amadır. Fakat tezin katkı boyutunun anlatıldı ı birinci bölümde, gerçekte tirilmi olan moment dalgalılı nı azaltacak olan tekni in, var olan makinalara da uygulanabiliyor olması, tezin genel hedeflerinden tasarım tekniklerinin geli tirilmesinin çıkarılmasına sebep olmu tur. Buna ra men, hem ARM'nin geometrik parametrelerinin anla ılması için, hem de gelecekte tasarım yazılımı üzerine çalı mak isteyen ara tırmacılara ık tutması amacıyla tez çalı ması esnasında geli tirilmi olan ARM tasarım yazılımına yer verilmi tir.

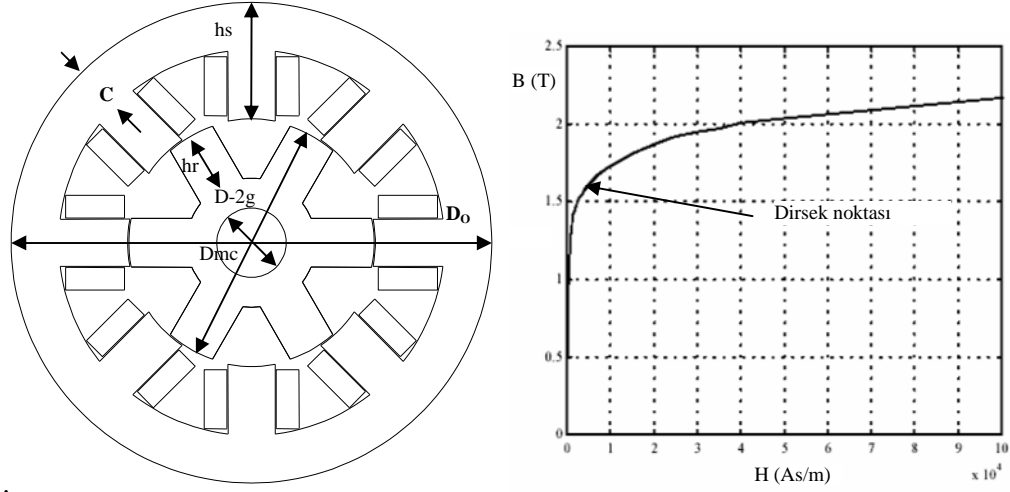
2.1.2.1. Mekanik boyutlandırma ve sargı özelliklerinin belirlenmesi

Mekanik boyutlandırma için öncelikle ARM'nin kullanılaca ı yerde ne kadar gücün talep edildi inin (P_{talep}) belirlenmesi gerekmektedir. P_{talep} 'e ba lı olarak talep edilen ortalama moment Denklem 2.16'dan hesaplanabilir. Burada n , devir sayısını ifade etmektedir.

$$M_{ort} = \frac{P_{talep} \cdot 746}{2\pi \left(\frac{n}{60} \right)} \quad (2.16)$$

Daha sonra tasarlanacak olan ARM'nin stator ve rotor kutup sayısı ve açları (N_s , N_r s ve r) belirlenir. Motor geometrik yapısı ile ilgili standart olan IEC71'den motorun dı çapı (D_o), mil çapı (D_{mc}) ve belirlenen boyuta ba lı olarak motorun hangi aralıklarda moment üretebilece i tespit edilebilir. Motorun derinli i (L) ve stator rotor arasında minimum hava aralı ı (g)'nin belirlenmesi ile geometrik yapıya ait ön hazırlık parametreleri belirlenmi olunur. Bu parametrelerden D_o , D_{sh} , N_s ve N_r sabit tutularak, s , r , rotor dı çapı (D), g ve L de i tirilerek, motordan elde edilebilecek olan maksimum ortalama moment (M_{ort}) tespit edilebilir. Sargı özelliklerinin belirlenebilmesi için sargı dolgu faktörü (fill factor, %df)'nün belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca motorun sargılarından geçecek olan maksimum akımın (I_p), akım yo unlu u (J)'nin ve manyetik malzemeye ait "dirsek noktası"nın

tespit edilmesi gerekmektedir. ekil 2.3’de geometrik yapı ve dirsek noktası görülmektedir [29].

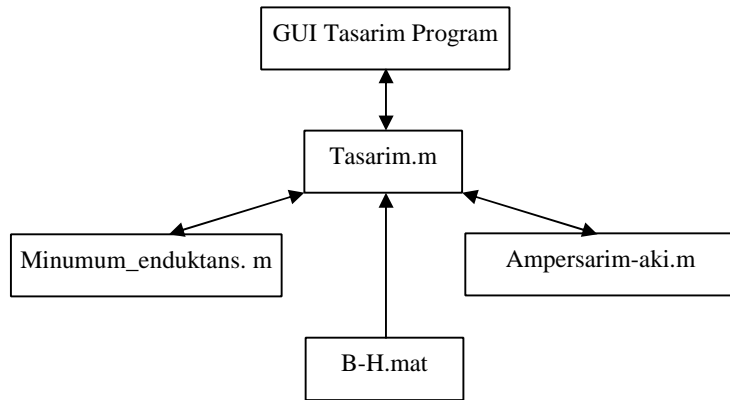


ekil 2.3: Geometrik yapı ve dirsek noktası.

Ortalama momentin hesaplanması için, ARM’nin çakı ık ve çakı ık olmayan durumlarda yapılan i in hesaplanması gerekmektedir. Bunun için ise, makinanın çakı ık ve çakı ık olmayan durumlardaki akıları hesaplanır [29].

2.1.2.2. Tasarım programının yapısı ve çalı ması

Program Matlab ortamında geli tirilmi bir figür dosyasıyla beraber çalı an M-Files’lardan meydana gelmektedir. ekil 2.4’de tasarlanan program ve alt programlar yapısı görülmektedir.

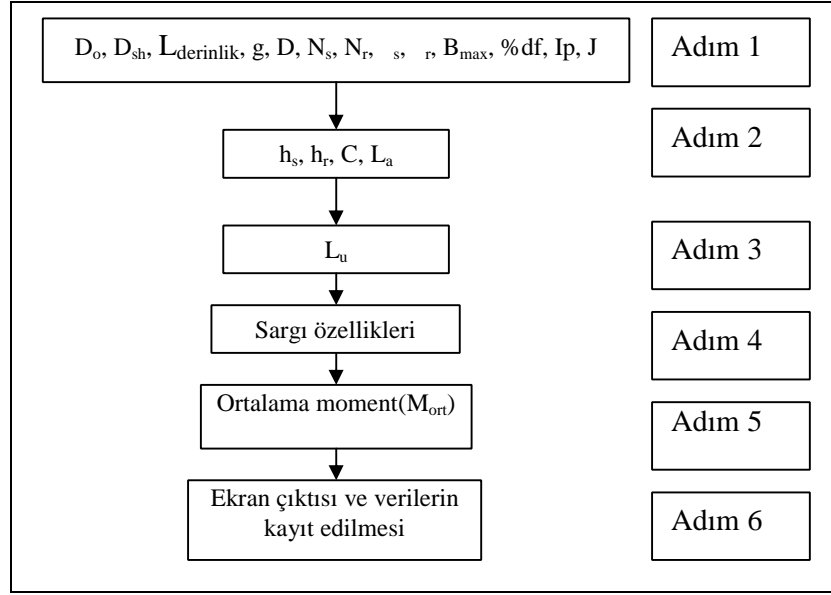


ekil 2.4: Tasarlanan program ve alt programlar arası veri akı ı.

Tasarım programı be ayrı bile enden meydana gelmektedir. “GUI Tasarım Program” kullanıcının mekanik ve sargı tasarımı ile ilgili parametrelerin grafik arayüzden girilmesini sa layan alt programdır. lgili parametrelerin girilmesi ve ekil 2.6’da gösterilen hesapla butonuna basılmasıyla bu veriler “Tasarim.m” alt programına aktarılır. “Tasarim.m” girilen verilere ba lı olarak, “Minimum_enduktans.m”, “Ampersarim-aki.m” ve “B-H.mat” alt bile enleri kullanarak mekanik, sargı ve elektriksel parametreleri hesaplar.

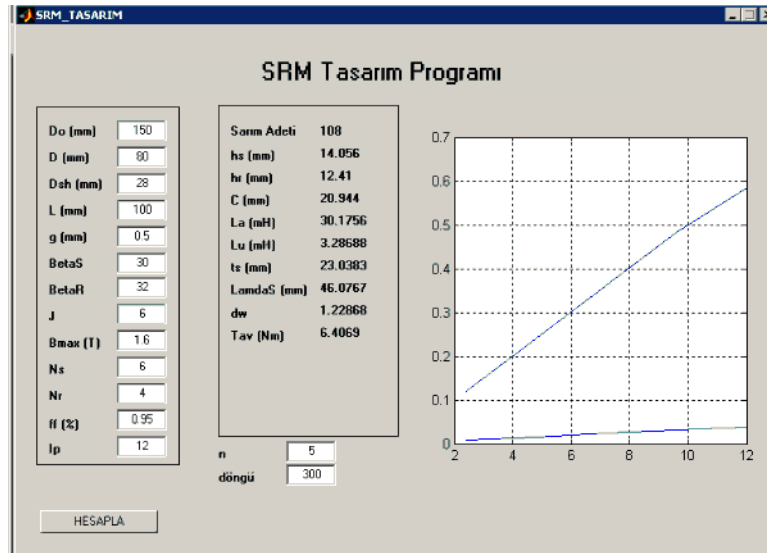
Program, makinanın manyetik özelliklerini hesaplayabilmesi için iteratif bir yapıda çalı maktadır. Yani bir kutuptaki akıyı hesaplayabilmek için gerekli olan akı yo unlu u iteratif olarak tespit edilir. Program çalı tıldıktan sonra gerçekte tirilen iterasyonlara ba lı olarak bulunması istenen parametreler ve makinanın çakı ık ve çakı ık olmayan rotor-stator kutup pozisyonlarındaki akı-akım e rileri üretilerek geometrik yapı kaydedilir. Böylece gerçekte tirilen çe itli testler sonucunda en uygun geometrik yapı üretilen ortalama moment göz önüne alınarak tercih edilebilir.

ekil 2.5’de programın hangi adımları sırasıyla gerçekte tirdi i görülmektedir. Buna göre Adım 1’de programa veri giri i gerçekte tirilir. Adım 2’de girilen verilere ba lı olarak kutup yükseklikleri (h_s , h_r), stator ve rotor boyunduru u (C) ve çakı ık durumdaki endüktans (L_a) hesaplanır. Adım 3’de “minimum_endüktans.m” programı çalı tırılır. Adım 4’te ise, sargı boyutlandırması ve kesit hesapları yapılp Adım 5’e geçilir. Bu adımda ortalama moment, elde edilen toplam akı de erlerine ba lı olarak hesaplanır. Son adımda ise, kullanıcıya bir grafik ekranda hesaplanan de erler sunulur ve bu de erler bir veri dosyasına kaydedilir.



ekil 2.5: Programın çalışması.

ekil 2.6'de ARM tasarım programının ekran görüntüsü görülmektedir. Ekranın sol tarafında kullanıcı tarafından girilen verilere ait kutular görülmektedir.



ekil 2.6: ARM tasarım programının ekran görüntüsü.

Orta kutucukta ise, programın çalıştırılması ile elde edilen mekanik, sarım ve moment özelliklerine ait çeşitli değerler görülmektedir. Sağ tarafta ise toplam akım e-risi görülmektedir.

Tasarım programının giriş verilerine bağlı olarak, hedeflenen makinanın ne kadar

ortalama moment M_{ort} üretimi hesaplanır (Denklem 2.16). İkinci olarak gerçekleştirilen hazırlık işlemi ise; makinanın çekebileceği en yüksek akım değerinin tespitidir.

$$P = P_{talep} \cdot 0.746 \quad (2.17)$$

$$I = P / V \quad (2.18)$$

$$I_p = 1.73 \cdot I \quad (2.19)$$

Bu değerler belirlendikten sonra, ekil 2.5’de görülen program akımına bağlı olarak makinadan elde edilebilecek olan ortalama moment, sarım sayısı, iletken özellikleri ve geometrik yapı tasarım programı tarafından hesaplanır. Tablo 2.1’de tasarım programının giri ve çıkı parametreleri gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Tasarım programının giri ve çıkı parametreleri.

Giri Parametreleri		Çıkı Parametreleri	
D_o	Stator Çapı(mm)	N_{faz}	Faz Baına Sipir Sayısı
D	Stator ç Çapı(mm)	C	Stator Boyunduruk(mm)
D_{mc}	Mil Çapı(mm)	H_s	Stator Kutup Yüksekliği(mm)
$L_{derinlik}$	Motor Derinliği(mm)	H_r	Rotor Kutup Yüksekliği(mm)
g	Hava Aralığı(mm)	L_a	Çakıık konumdaki endüktans(mH)
α_s	Stator Kutup Açısı($^\circ$)	L_u	Çakıık olmayan konumdaki endüktans(mH)
α_r	Rotor Kutup Açısı($^\circ$)	t_s	Stator Kutup Geni liği(mm)
J	Akım Yo unlu u(A/mm^2)	D_w	iletken Çapı(mm)
B_{max}	Akı Yo unlu u(Tesla)	M_{ort}	Ortalama Moment(Nm)
N_s	Stator Kutup Sayısı		
N_r	Rotor Kutup Sayısı		
D_f	Sargı Dolgu Faktörü(%)		
P_{talep}	Talep Edilen Güç(Hp)		
n	Devir (d/dk)		

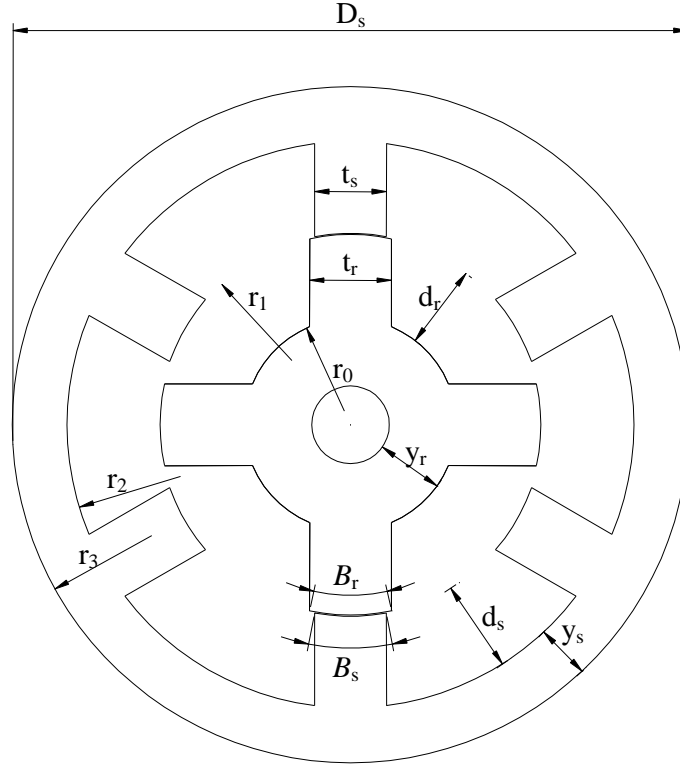
Referans [29]’de verilen geometrik yapı göz önüne alınarak tasarım programı çalıştırıldı. İnda, elde edilen L_u ve L_a endüktans değerleri Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen değerler ile karşılaştırıldı ve Tablo 2.2’de sonuçlar gösterilmiştir. Elde edilen değerler referans [29]’de verilen değerlere oldukça yakındır.

Tablo 2.2: Endüktans değerleri.

	Çakı ık olmayan konumdaki endüktans	Çakı ık konumdaki endüktans
Analitik Sonuçlar	15,9 mH	83,8 mH
SEY Sonuçları	16,18mH	84,92 mH

2.1.2.3. Deneysel amaçlı olarak kullanılan ARM'nin geometrik yapısı

Tez çalışması kapsamında kullanılan ARM, 6 stator 4 rotor kutup yapısına sahiptir ve boyutlandırma kısaltmaları ekil 2.7'de gösterilmiştir.



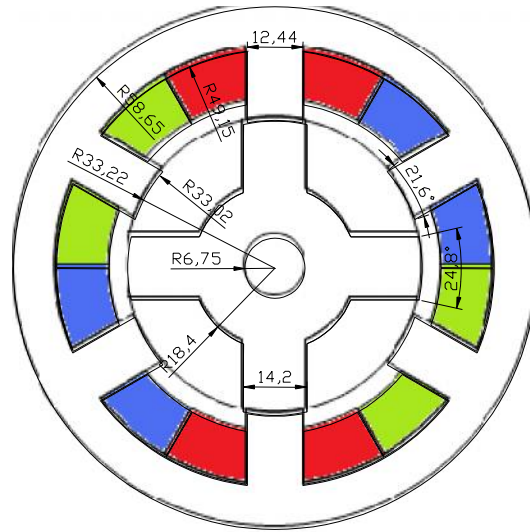
ekil.2.7: ARM' nin boyutlandırılması.

Kullanılan ARM'ye ait geometrik boyutlandırma değerleri Tablo 2.3' de verilmektedir.

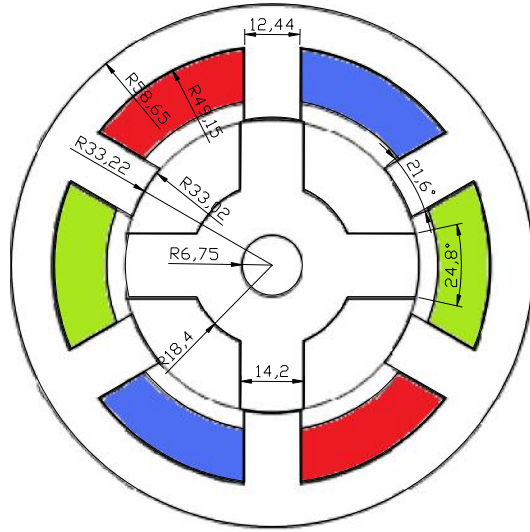
Tablo 2.3: ARM' nin boyutları ve değerleri

Parametre Adı	Sembol	Değer
Stator Çapı	D_s	117,3 mm
Rotor Çapı	D_r	66,03 mm
Motor Derinliği	L_{derinlik}	20,5 mm
Hava Aralığı	g	0,2 mm
Stator Kutup Geniliği	t_s	12,44 mm
Rotor Kutup Geniliği	t_r	14,2 mm
Stator Kutup Yüksekliği	d_s	15,935 mm
Rotor Kutup Yüksekliği	d_r	14,615 mm
Stator Boyunduruk Kalınlığı	y_s	9,5 mm
Rotor Boyunduruk Kalınlığı	y_r	11,65 mm
Rotor Boyunduruk Yarıçapı	r_0	18,4 mm
Rotor Kutup Yarıçapı	r_1	33,4 mm
Stator Kutup Boyunduruk Yarıçapı	r_2	49,15 mm
Stator Dış Boyunduruk Yarıçapı	r_3	57,4 mm
Motor Mil Yarıçapı	r_{sh}	6,75 mm
Stator Kutup Açısı	α_s	21,6°
Rotor Kutup Açısı	α_r	24,8°

Kullanılan ARM'ye ve KKARM'ye ait geometrik boyutlandırma değerleri ve geometrik yapısı Şekil 2.8 ve 2.9'da görülmektedir.



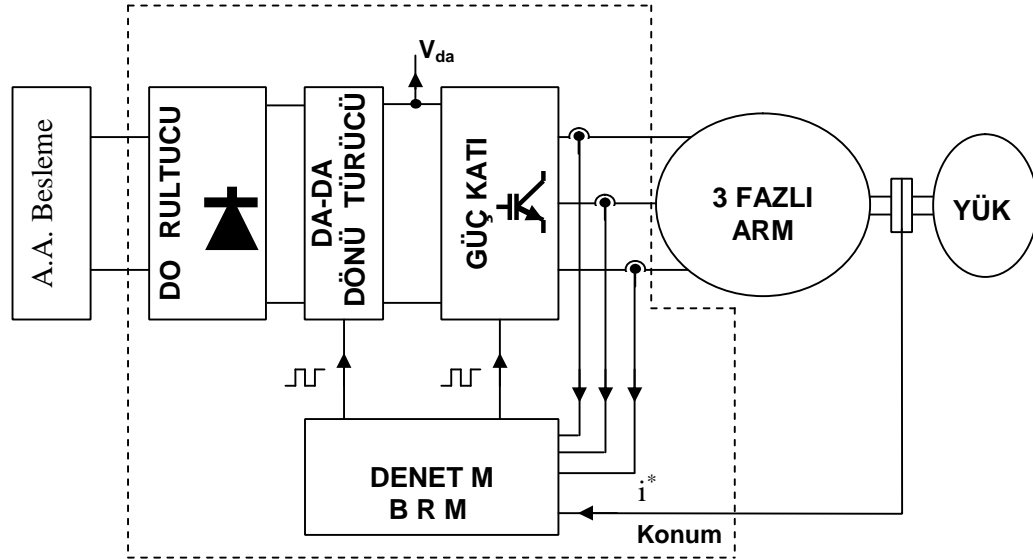
Şekil 2.8: Kullanılan ARM' nin geometrik yapısı.



ekil 2.9: KKARM'nin ait geometrik yapısı.

2.2. ARM Sürücü Sistemleri

ARM'nin çalışması için kullanılan sürücüye ait blok diyagramı ekil 2.10'da görülmektedir



ekil 2.10: ARM sürücüsüne ait blok diyagramlar.

ekil 2.10'da da görüldü ü gibi ARM'yi denetlemek amacıyla kullanılan sürücü, do rultucu, DA-DA dönü türücü, Güç katı ve Denetim birimi olmak üzere dört ayrı

birimin birle mesinden olu maktadır. Bu birimlerin görevleri öyledir;

Do rultucu, ebekeden aldı ı alternatif gerilimi, do ru gerilime dönü türme i lemini gerçeikle tirir. Bu birim, do ru gerilime dönü türme i levini gerçeikle tirecek olan diyotları ve üretilen do ru gerilimde olabilecek dalgalanmaları yok etmek amacıyla kullanılacak olan bir kondansatörü ihtiva eder.

DA-DA Dönü türücü, do rultucudan aldı ı do ru gerilimi, ARM'yi sürececek olan güç katının gereksinimi olan seviyeye yükseltmek veya alçaltmak i lemlerini gerçeikle tirmektedir. Literatür taraması esnasında çe itli tip DA-DA Dönü türücü yapıları incelenmi tir (Boost, Buck-Boost v.d.). Sürücü ve ARM tasarımı esnasında tespit edilen ihtiyaçlara ba lı olarak uygun DA-DA Dönü türücü tiplerinde biri seçilerek uygulamada kullanılacaktır.

Güç Katı, ARM'yi sürmek için kullanılacak güç katıdır. Literatür taraması esnasında çe itli tip Güç Katı yapıları incelenmi tir (klasik, Miller devresi, Buck-Boost, C-dump ve Sood). Sürücü ve ARM tasarımı esnasında tespit edilen ihtiyaçlara ba lı olarak uygun Güç Katı tiplerinde biri seçilerek uygulamada kullanılacaktır.

Denetim Birimi, ARM'nin, dönü türücü ve güç katı üzerinden denetimi i levini gerçeikle tirecek olan birimdir. Bu birimin merkezi bir mikroi lemci tarafından olu turulmaktadır. Faz akımı (i), gerilim (V_{da}) ve konum algılayıcılarından gelen bilgiler de erlendirilerek, dönü türücü ve güç katının denetimini gerçeikle tiren sinyaller bu birimde üretilmektedir. Bu ba lamda, denetim birimi sürücünün ana merkezini olu turmaktadır. Yukarıdaki tanımlamalardan yola çıkarak denetim birimi görevleri, algılayıcılardan bilginin alınması, denetim algoritmasının çalı tırılması ve dönü türücü ve güç katının denetlenmesidir.

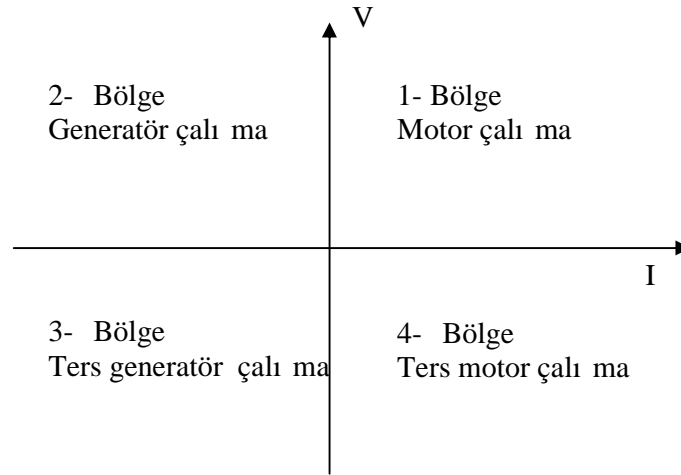
2.2.1. DA-DA Dönü türücüler

Dönü türme teknikleri, güç elektroni i sahasında en büyük ara tırma alanlarından birisidir. Dönü türme teknikleri, günümüz dünyasında birçok uygulama sahasında kendine yer bulmu , endüstriden, yönetim organizasyonuna, ara tırmadan

geli tirmeye, günlük hayatta kullanılan birçok aletlerde kullanılmaktadır. Dönü türücüler, yüksek güç yoğunlu u, hızlı geçici durum cevabı ve denetiminin kolay olması sebebiyle, endüstride büyük uygulama alanına sahiptir. Geçmiş son altmış yılda 500'den fazla prototipte DA-DA dönü türücü tipinin bulundu u tespit edilmiştir. Dönü türücüler kullanılacağı yerin ihtiyaçlarını gidermek amacıyla tasarlanmıştır ve fonksiyonlarına göre adlandırılırlar. Örneğin; Buck dönü türücüler, Boost dönü türücüler gibi. 2001'de Fang Lin Luo ve Hong Ye DA-DA dönü türücüleri yapısal olarak altı kısma ayırmış ve bu işlemi gerçekleştirebilmek için kısıcılardaki dört bölge çalışmadan faydalanmıştır [30-32]. Kısıcılarının çalışma prensibi kısım 3.1'de verilmiştir. Bunlar;

- 1.Bölge çalışır,
- 2.Bölge çalışır,
- 3.Bölge çalışır,
- 4.Bölge çalışır,
- 1.ve 2. Bölge çalışır,
- 3 ve 4. Bölge çalışır.

DA-DA dönü türücüler için gerçekleştirilen sınıflandırmada kısıcılardan yararlanılmıştır. ekil 2.11'de dört bölgeli yapı görülmektedir.



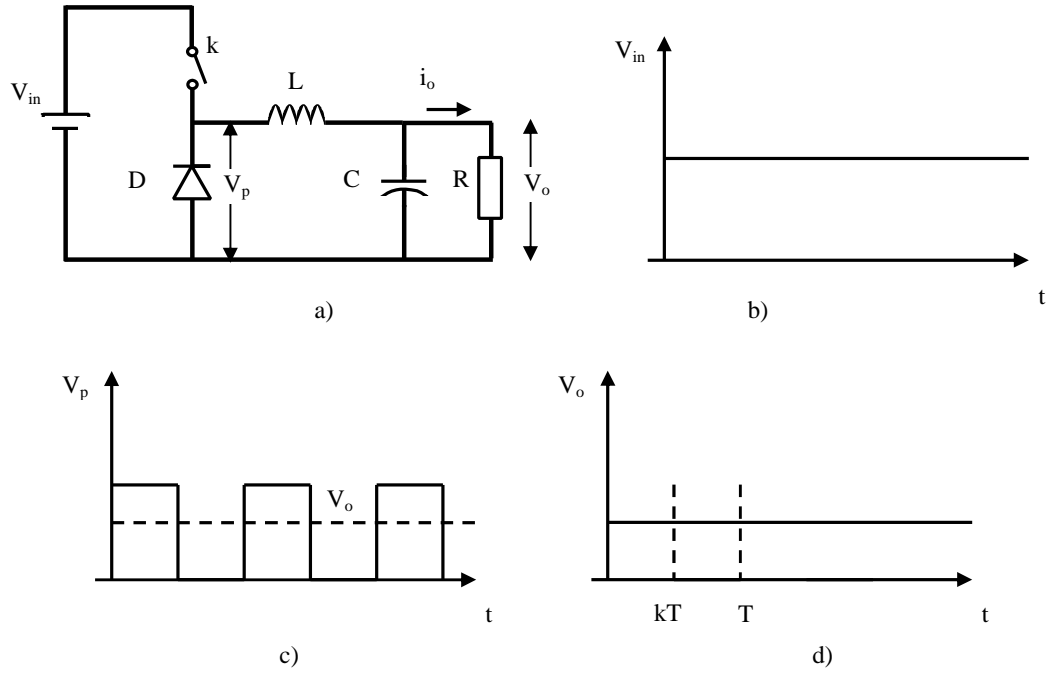
ekil 2.11: Dört bölgeli yapı.

2.2.1.1. Birinci bölgede kıyıcı

Birinci bölgede çalı ma, akım ve gerilim pozitifdir ve ileri motor çalı ma diye adlandırılabilir. Bu tip kıyıcılar ise “A” tip kıyıcı olarak adlandırılır ve ekil 2.12.a’da “A” tip kıyıcı yapısı görölmektedir.

ekil 2.12.b’de giri gerilimi, V_{in} , ekil 2.12.c’de diyot üzerine dü en gerilim, V_D , ve ekil 2.12.d’de ise çıkı gerilimi, V_o , görölmektedir. k , anahtarlanmanın tekrarlanma süresi (periyot) $T=1/f$, iletim süresi t_{on} görev çevirimi $K=t_{on}/T$ ekinde ifade edilmektedir. Çıkı gerilimi ise Denklem 2.20 ifadesinden yararlanılarak hesaplanır.

$$V_o = \frac{t_{on}}{T} V_{in} = K V_{in} \quad (2.20)$$



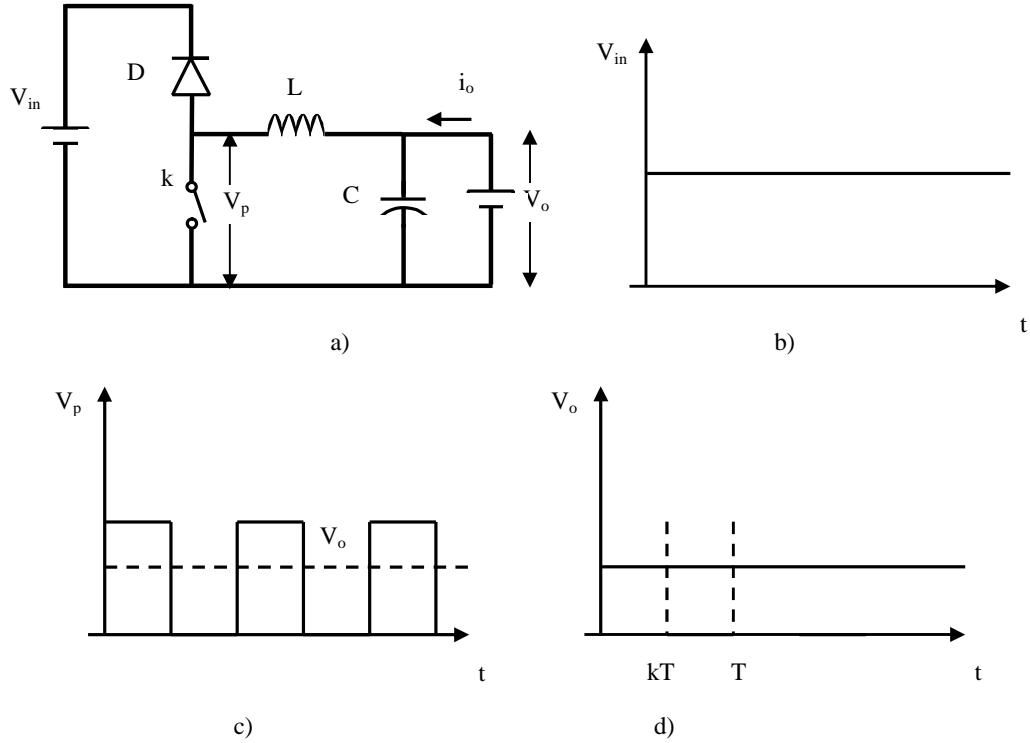
ekil 2.12: Birinci bölge çalı ma, kıyıcı yapısı ve gerilim dalga ekilleri.

2.2.1.2. İkinci Bölgede Kıyıcı

İkinci bölge çalı ma, gerilim pozitifdir, akım negatifdir ve ileri generatör çalı ma diye adlandırılabilir. Bu tip kıyıcılar ise “B” tip kıyıcı olarak sınıflandırılır ve ekil 2.13.a’da yapısı görölmektedir. ekil 2.13.b’de V_{in} giri gerilimi, c’de anahtarlanma

elmanı üzerindeki gerilim ve d 'de ise çıkı gerilimi görölmektedir. Çıkı gerilimi ise denklem 2.21 ifadesinden yararlanılarak hesaplanır.

$$V_o = \frac{t_{off}}{T} V_{in} = (1 - K) V_{in} \quad (2.21)$$

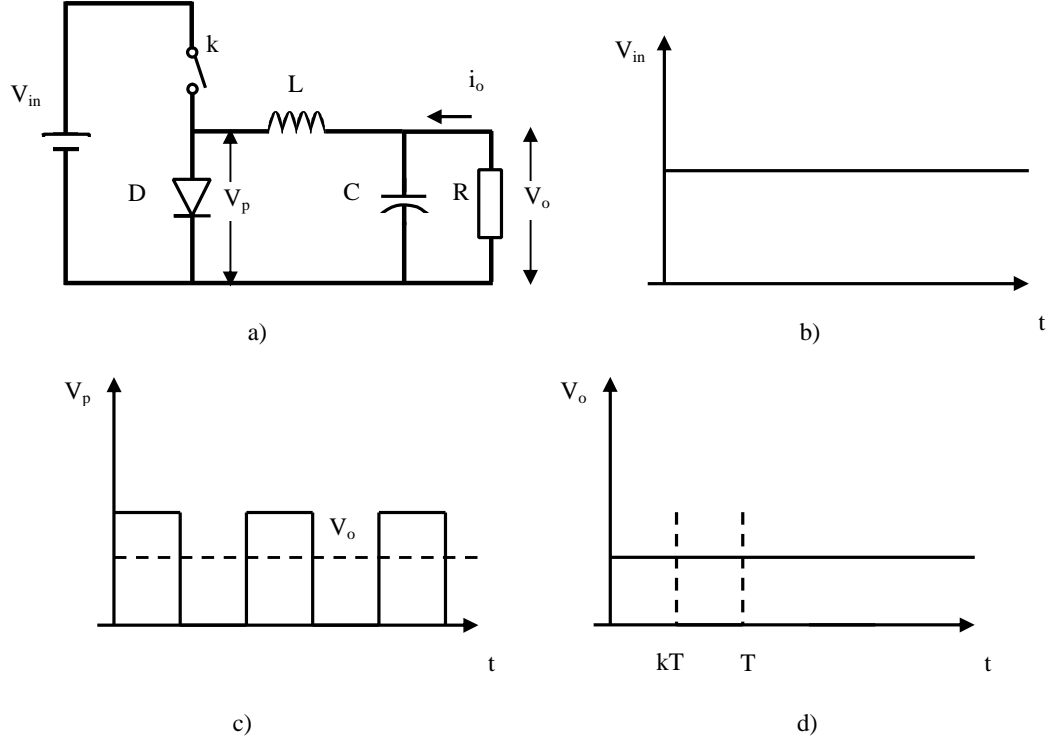


ekil 2.13: ikinci bölge çalı ma, kıyıcı yapısı ve gerilim dalga ekileri

2.2.1.3. Üçüncü Bölgede Kıyıcı

Üçüncü bölge çalı mada, akım ve gerilim negatiftir ve ters motor çalı ma diye adlandırılabilir. Bu tip kıyıcılar ise “C” tipi kıyıcı olarak adlandırılır ve ekil 2.14.a’da yapısı görölmektedir. ekil 2.14.b’de giri gerilimi, c’de diyot üzerindeki anahtarlama gerilimi ve d’de ise çıkı gerilimi görölmektedir. Çıkı gerilimi ise Denklem 2.22 ifadesinden yararlanılarak hesaplanır.

$$V_o = \frac{t_{on}}{T} V_{in} = K V_{in} \quad (2.22)$$

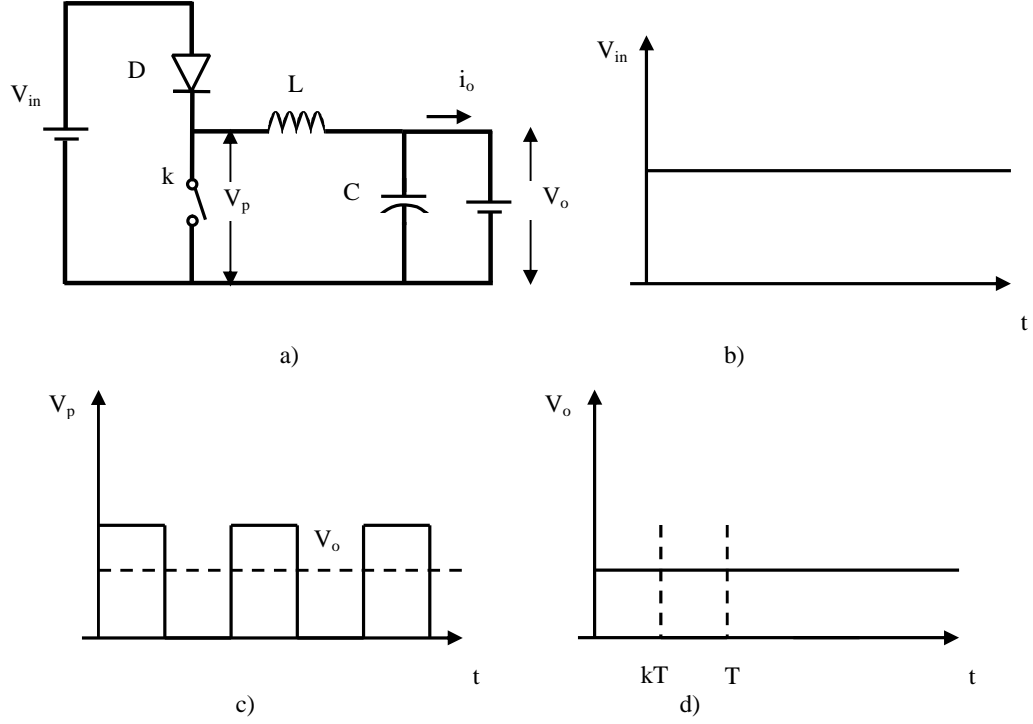


ekil 2.14: Üçüncü bölge çalı ma, kıyıcı yapısı ve gerilim dalga ekilleri.

2.2.1.4. Dördüncü Bölgede Kıyıcı

Dördüncü bölgede çalı mada, gerilim negatiftir, akım pozitifdir ve ters generatör çalı ma diye adlandırılabilir. Bu tip kıyıcılar ise “D” tip kıyıcı olarak adlandırılır ve ekil 2.15.a’da yapısı görülmektedir. ekil 2.15.b’de giri gerilimi, c’de anahtarlama elmanı üzerindeki gerilim ve d’de ise çıkı gerilimi görülmektedir. Çıkı gerilimi ise Denklem 2.23 ifadesinden yararlanılarak hesaplanır.

$$V_o = \frac{t_{off}}{T} V_{in} = (1 - K) V_{in} \quad (2.23)$$

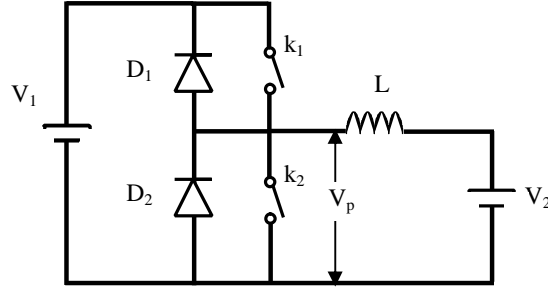


ekil 2.15: Dördüncü bölge çalı ma, kıyıcı yapısı ve gerilim dalga ekilleri.

2.2.1.5. Birinci ve kinci Bölgede Kıyıcı

Birinci ve ikinci bölgede çalı maya ait devre yapısı ekil 2.16'da görölmektedir. Burada V_1 , kaynak gerilimi V_2 kaynak geriliminden yüksek ve L endüktansı ise ideal kabul edilmi tir. Birinci bölge çalı mada k_1 ve D_2 aktif iken ikinci bölge çalı mada k_2 ve D_1 aktif bile enlerdir. Buna göre devre çıkı gerilimi, V_2 , Denklem 2.24 kullanılarak hesaplanır.

$$V_2 = \begin{cases} kV_1 & \text{Birinci Bölge} \\ (1-k)V_1 & \text{Kinci Bölge} \end{cases} \quad (2.24)$$

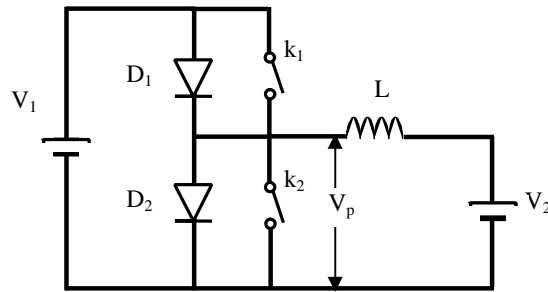


ekil 2.16: Birinci ve ikinci bölgede çalı maya ait devre yapısı.

2.2.1.6. Üçüncü ve Dördüncü Bölgede Kıyıcı

Üçüncü ve dördüncü bölgede çalı maya ait devre yapısı ekil 2.17de görölmektedir. Burada V_1 , kaynak gerilimi V_2 kaynak geriliminden yüksek ve L endüktansı ise ideal kabul edilmiştir. Üçüncü bölge çalı mada k_1 ve D_2 aktif iken dördüncü bölge çalı mada k_2 ve D_1 aktif bile enlerdir. Buna göre devre çıkı gerilimi, V_2 , Denklem 2.25 kullanılarak hesaplanır.

$$V_2 = \begin{cases} kV_1 & \text{Birinci Bölge} \\ (1-k)V_1 & \text{Üçüncü Bölge} \end{cases} \quad (2.25)$$



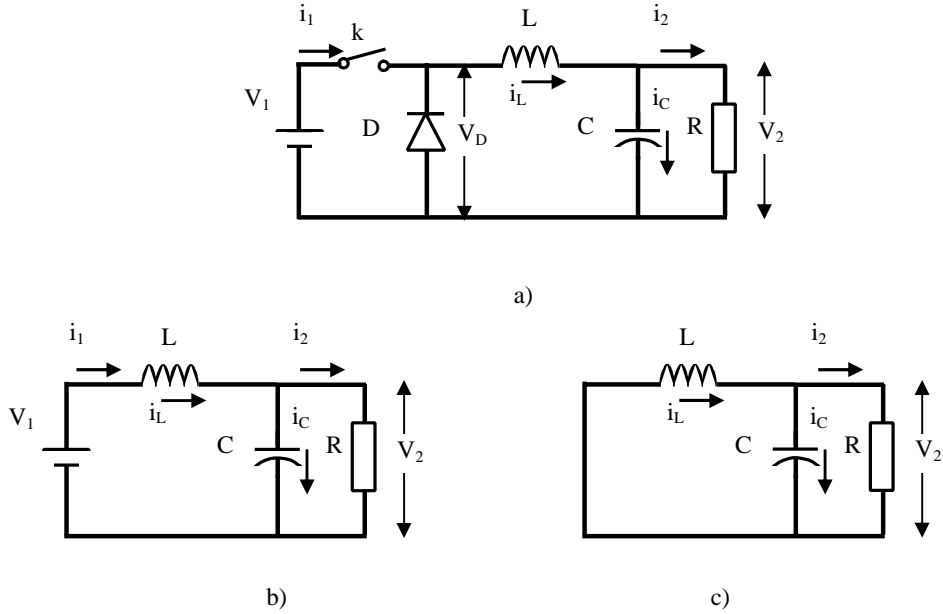
ekil 2.17: Birinci ve üçüncü bölgede çalı maya ait devre yapısı.

2.2.1.7. Dönü türücüler ve Buck Dönü türücü

Dönü türücüler yapısal olarak sınıflandırıldı nda altı kısma ayrıldı ı görölmü tür. Bunlar;

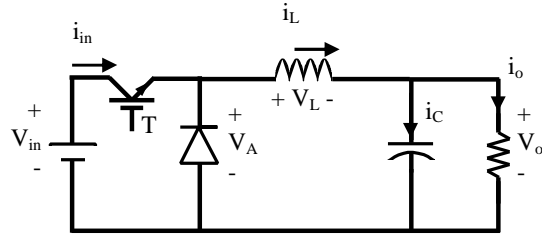
- Birinci ku ak \Rightarrow Klasik dönü türücüler,
- İkinci ku ak \Rightarrow Çok bölgeli dönü türücüler,
- Üçüncü ku ak \Rightarrow Anahtarlama dönü türücüler,
- Dördüncü ku ak \Rightarrow Yumu ak anahtarlama dönü türücüler,
- Be inci ku ak \Rightarrow Senkron do rultucu-dönü türücüler,
- Altıncı ku ak \Rightarrow Birden fazla enerji depolayan eleman içeren dönü türücüler,

Kıyıcılardaki sınıflandırmalar incelendi inde, Buck tipi dönü türücülerin birinci bölgede çalı an “A” tipi bir kıyıcıdan türetildi i ve klasik bir dönü türücü tipine sahip oldu u görülmektedir. ekil 2.18’de Buck dönü türücünün yapısı ve anahtar (k) kapalı ve açık olma durumlarına ait e de er devre gösterilmi tir.



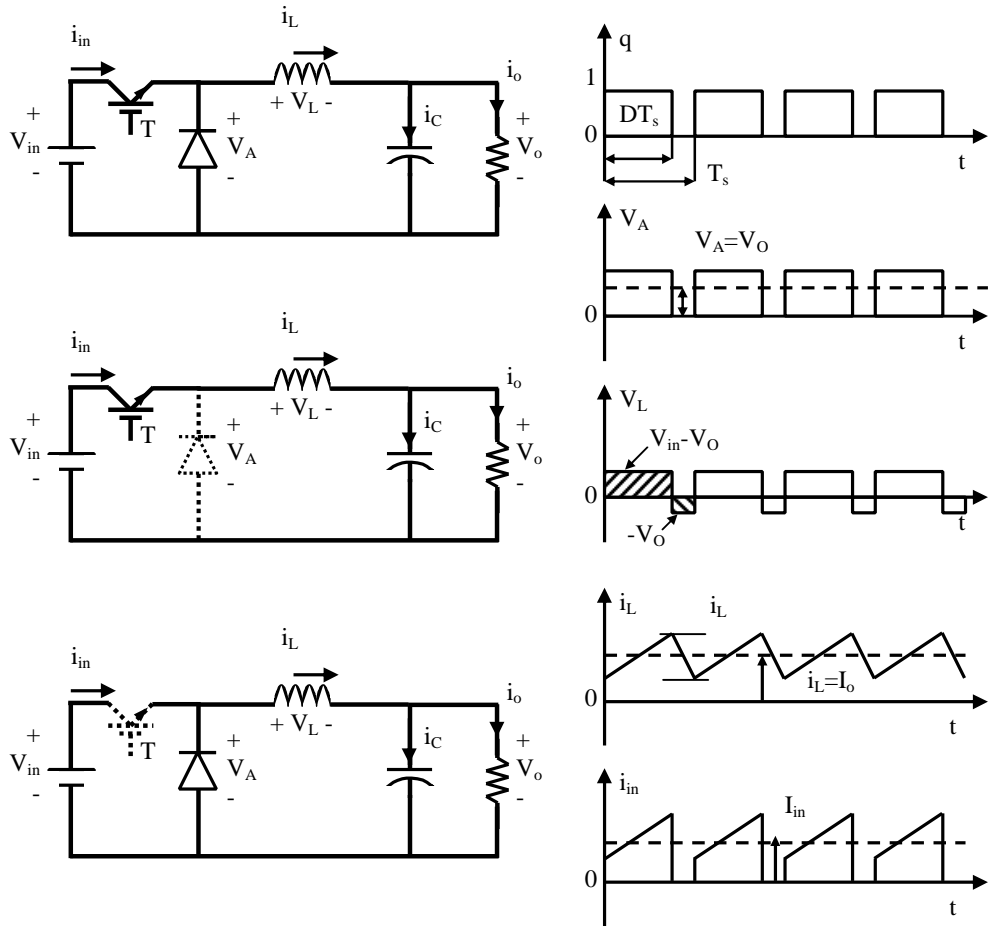
ekil 2.18: Buck dönü türücü. a) genel devresi, b) anahtar kapalı duruma ait e de er devre, c) anahtar açık duruma ait e de er devre.

Buck dönü türücüy e ait tranzistor (T) ve diyot ile gerç ekle tirilmi olan yapı ekil 2.19’da gösterilmi tir.



ekil 2.19: Buck dönü türücü (Tranzistör ve diyotlu yapı).

Buck dönü türücünün kararlı durumda anahtarlama analizi gerçekleştirilirken kondansatör ihmal edilmiştir. Tranzistör iletime geçtiğinde (on), endüktans üzerinden



ekil 2.20: Buck dönü türücüyü ait kararlı durum analizindeki dalga şekilleri.

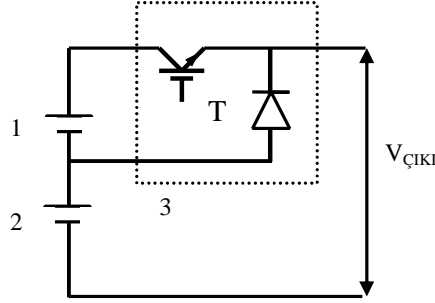
akım artarak akmaya başlamaktadır. Tranzistör kesime gittiğinde (off) ise serbest geçi diyotu üzerinde endüktans üzerinde depo edilen enerji akmaya devam eder.

ekil 2.20'da Buck dönü türücüyü ait kararlı durum analizindeki dalga şekilleri görülmektedir [31]. V_A , dalga şekillerinden de anlaşılacağı gibi ortalama gerilimdir.

D görev çevirimi ve T_s ise anahtarlama periyodudur.

2.2.2. Buck -DA-Hat Boost dönü türücü

Momentteki dalgalılı ı azalmak için özel bir kaynak tasarımı gerekmekte olup, tasarlanan hibrit kaynak prensip eması ekil 2.21'de görülmektedir [35-37].



ekil 2.21: Tasarlanan hibrit kaynak prensip genelle tirilmi ema.

Bir ve iki nolu gerilim kaynakları, Buck tip DA-DA dönü türücü kullanılarak elde edilmi tir. Üç nolu kaynak ise DA hat Boost tip kaynaktan olu maktadır. DA hat Boost kaynak mimarisinde, T anahtarının iletme geçmesiyle seri ba lı iki kaynak yapısını meydana getirir. Böylece, iki seviyeli bir DA gerilim elde edilmi olunur.

Temel olarak hibrit yapının iki problemi bulunmaktadır. Bunlar,

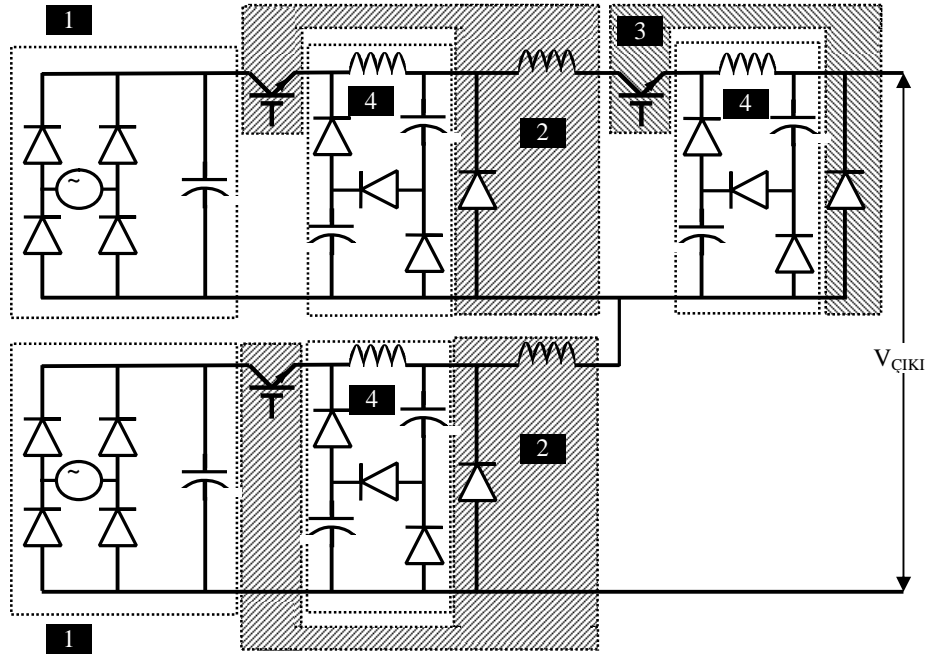
- Yüksek frekanstaki anahtarlama kayıpları,
 - Radyo ve elektromanyetik dalga giri imleri sebebiyle meydana gelen gürültüdür.
- Bu sebeple tasarlanan sistemde pasif rezonans söndürme devresi kullanılarak yumu ak anahtarlama i lemi gerçekleştirilmi tir.

ekil 2.22'de tasarlanan hibrit kayna ın bile enleri görülmektedir. Kaynak dört temel bile enden meydana gelmektedir. Bunlar;

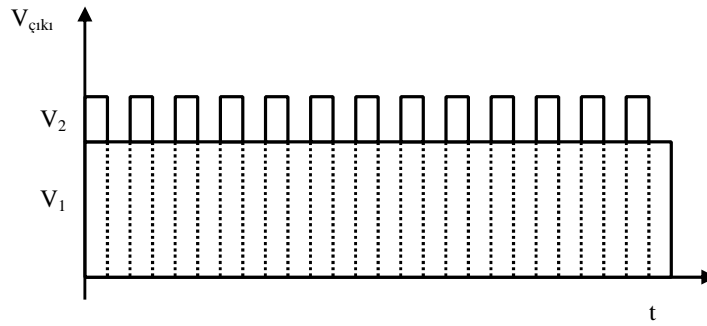
- 1- Do rultucu,
- 2- Buck DA-DA dönü türücü,
- 3- DA-hat dönü türücü,
- 4- Pasif rezonans söndürme.

Bu bile enler, ekil 2.22'de gösterilmi tir. ekil 2.23'de tasarlanan hibrit kayna ın

çıkı gerilim ekli görölmektedir.



ekil 2.22: Tasarlanan hibrit kaynak bile enleri.

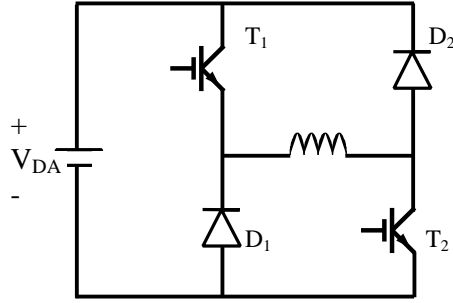


ekil 2.23: Çıkı gerilimi.

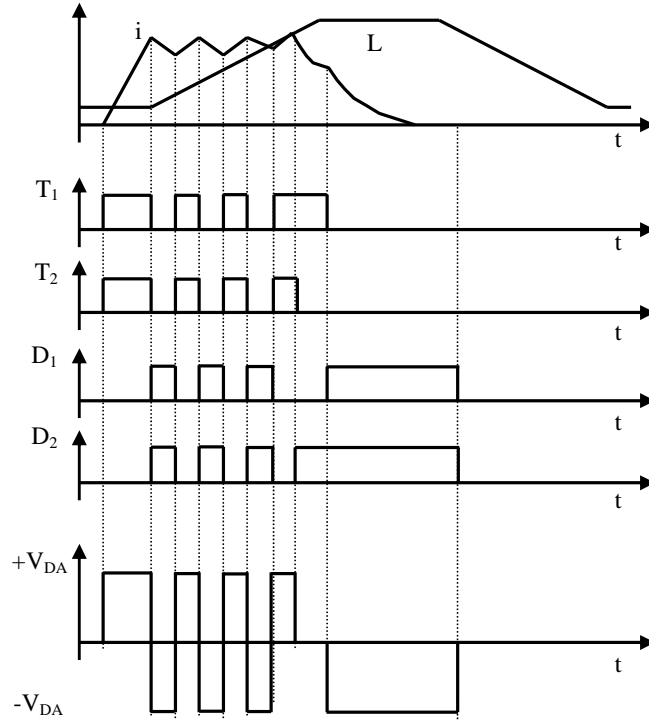
2.2.3. Sürücü sistemi (Asimetrik H tipi Köprü Dönü türücü)

Asimetrik H tipi köprü dönü türücüye ait bir faz ba lanı eması ekil 2.24'de görölmektedir. ekil 2.24, ARM'nun bir fazı için asimetrik H tipi köprü dönü türücü eklidir. Di er fazlarda aynı ekilde ba lanacaktır. T_1 ve T_2 iletime sokularak ARM fazı enerjilendirilmi olur. E er akım istenen de erin üzerine çıkarsa T_1 ve T_2 kesime

sokulur [33].



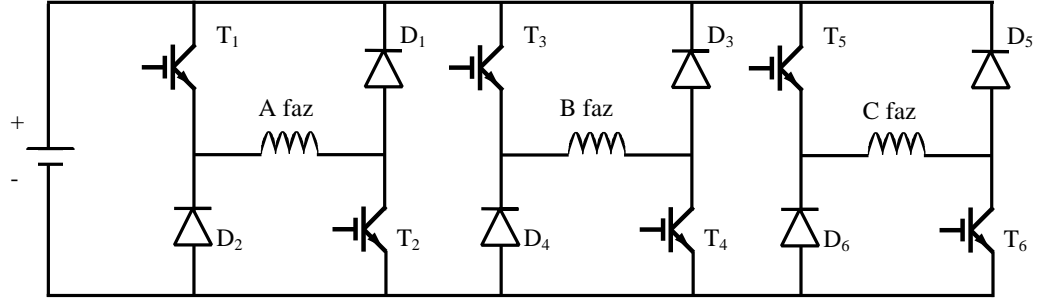
ekil 2.24: Asimetrik H tipi köprü dönü türücü.



ekil 2.25: Sert kıyım stratejisi.

Motor sargısında birikmi enerji D_1 ve D_2 diyotları üzerinden DA kayna ına geri akar. Akım hızlı bir ekilde referans de erin altına iner ve faz gerilimi negatife dü er. Bu aralık süresince, DA kayna ı ve motor sargısı arasında tekrarlanan bir enerji de i imi vardır. T_1 ve T_2 'nin iletim ve kesime girmesi sırasında, makina faz sargısı DA besleme gerilimindeki de i im oranının iki katını üzerinde görür ki bu da yalıtımı bozan bir etkidir. Bu denetim stratejisine (ekil 2.25) sert kıyım denir. DA

hat kapasitesine daha fazla dalgalanma uygulanır. Bu yüzden kapasitenin ömrü azalır ve güç elektroni i elemanlarından kaynaklanan anahtarlama kayıpları artar. ekil 2.26'da görülmekte olan asimetrik H tipi köprü dönü türücüde üç çalı ma modu vardır. Pozitif gerilim döngüsünde, faz sargısı anahtarlarının her ikisi de iletimdedir. Örne in Faz A için T_1 ve T_2 aynı anda iletimdedir ve sargıdaki akım hızlı bir eilde artar. Sıfır gerilim döngüsünde, sadece bir anahtar iletimdedir ve akım yolunu bir anahtar ve bir diyot üzerinden tamamlar (T_1 kesimde), faz sargısındaki akım T_2 ve D_2 üzerinden akmaya devam eder. Negatif gerilim döngüsünde ise, her iki anahtarda kapalıdır ve sargı üzerinde birikmi enerji diyotlar üzerinden kayna a geri yollarınır (D_1, D_2) [33].



ekil 2.26: Üç fazlı asimetrik köprü dönü türücü.

3. KKARM'İN YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Anahtarlı Relüktans Makinası'nın performansını arttırmak amacıyla gerek denetim gerekse, geometrik yapıda çeşitli derinlikler yapılmıştır. Özellikle geometride yapılan derinlikler ile en uygun tasarım geometrisi bulunmaya çalışılmıştır. ARM'nin elektrik devresinden daha fazla faydalanılarak daha fazla moment üretilmeye çalışılmıştır. ARM'nin endüktans profilini derinleştirilmesi için kutup ekillerinin derinleştirilmesi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Sonuçta üretilen moment profilinin derinleştirildiği sonucu elde edilmiştir [41].

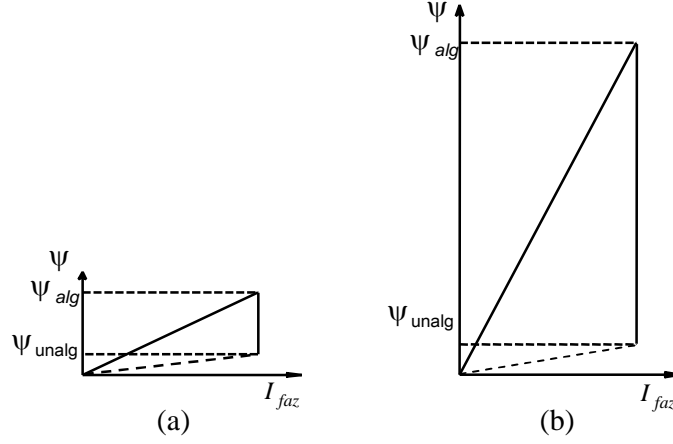
Bu çalışmalar esnasında ARM'nin ürettiği momenti arttırmak amacıyla farklı sargı yapıları da denenmiş olup 1992'de B.G. Mecrow tarafından ilk olarak KKARM sargı yapısı önerilmiştir. KKARM'ler, klasik ARM'lerin tüm avantajlarına sahip olup ilave olarak, %20-30 daha fazla moment üretebilme yeteneğine sahiptir. Denklem 3.1'de görüldüğü üzere KKARM'de moment üretimi aktif olan fazların birbirine olan etkisi ile meydana gelen karışık endüktans temelli olarak moment üretmektedir. Klasik ARM'de ise moment sadece aktif olan fazın öz endüktansı temelinde (Denklem 3.2) üretilmektedir olup makinanın elektriksel devresinden daha az faydalanılmaktadır. 3 fazlı klasik ARM için her faz üretilen momente 1/3 oranında katkı sağlarken KKARM'de bu oran 2/3'dür. Yani elektriksel devreden klasik ARM'ye nazaran iki kat daha fazla faydalanılmış olur.

$$T = \frac{1}{2} i_a i_b \frac{\partial M_{ab}}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_b i_c \frac{\partial M_{bc}}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_c i_a \frac{\partial M_{ca}}{\partial \theta} \quad (3.1)$$

$$T = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{\partial L_a}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{\partial L_b}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{\partial L_c}{\partial \theta} \quad (3.2)$$

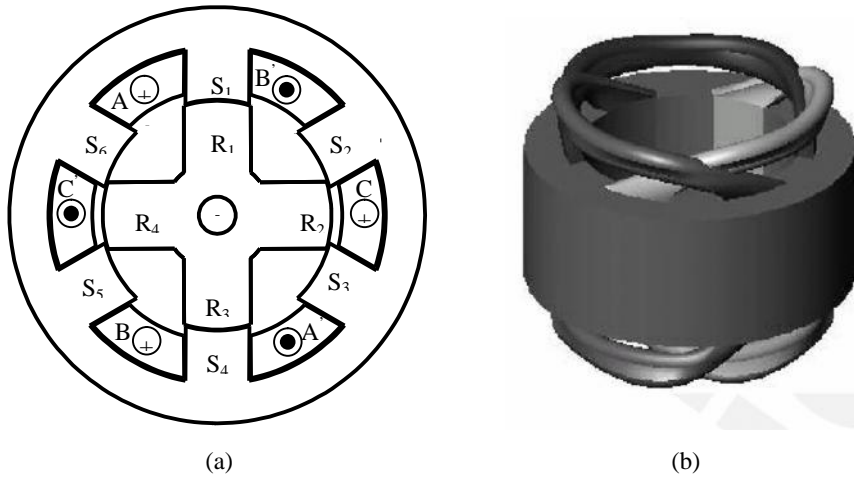
Denklem 2.3'de ifade edildiği üzere makine tarafında üretilen moment akı ile doğru orantılı olup ekil 3.1'de iki makinanın ürettiği akıların karşılaştırılması gösterilmiştir. Ekil 3.1'de de görüldüğü gibi klasik ARM'de etkin faz (I_{faz}) tarafından üretilen akının dört katı KKARM tarafından üretilmektedir.

Her iki makinaya ait çakı ık ve çakı ık olmayan konumlar için üretilen akılar sırasıyla Ψ_{alg} ve Ψ_{unalg} sembolleri ile gösterilmiştir. Her iki makina e it akımlarda çalışırken bu akıdaki artış dört kart olmasına rağmen e it artlarında karıla tırma yapılabilmesi için e it bakır kayıplarında KKARM, ARM' ye göre iki kat daha fazla akı üretmektedir. Fakat üretilen fazla akı, manyetik doyum sebebiyle, moment üretimindeki artış %20-%30 arasında meydana gelmektedir [42].



ekil 3.1: a- ARM'de akı üretimi, b- KKARM'de akı üretimi.

ekil 3.2'de KKARM'nin yapısı ve üç boyutlu ekli görülmektedir. ekilde de görüldü ü üzere KKARM'de faz sargıları, kutup ayaklarına do rudan sarılmamaktadır. Faz sargıları kutup bo luklarına tam adım meydana gelecek ekilde yatırılmaktadır (ekil 3.2.b) [25].

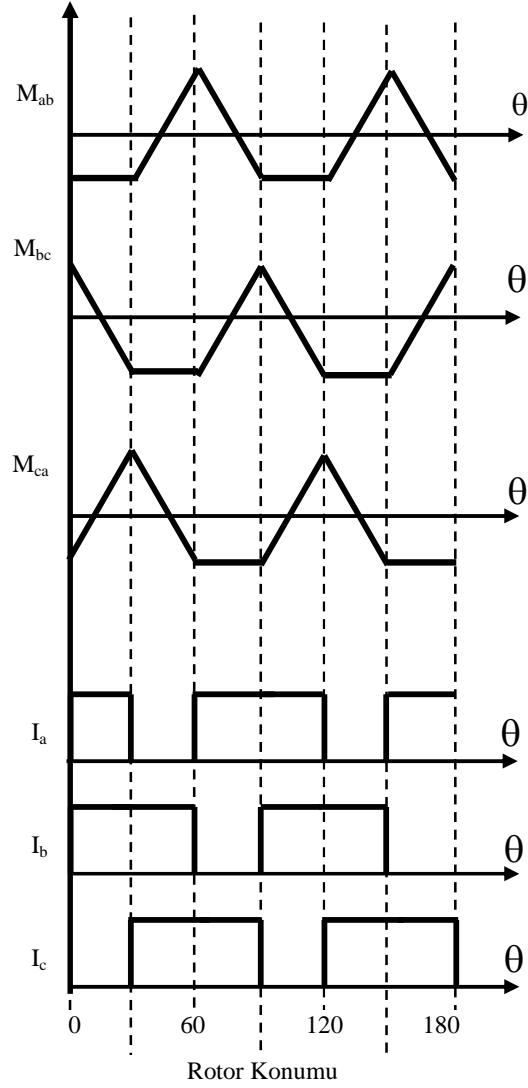


ekil 3.2: KKARM'nin yapısı(a) ve üç boyutlu görünü ü(b).

KKARM'de üç farklı uyarma ekli olup, uyarma ekilerine göre üretilen moment ve

ortalama moment de i mektedir.

Tek yönlü uyarma yapısı, karıt endüktans ve akım profili ekil 3.3'de görülmektedir.

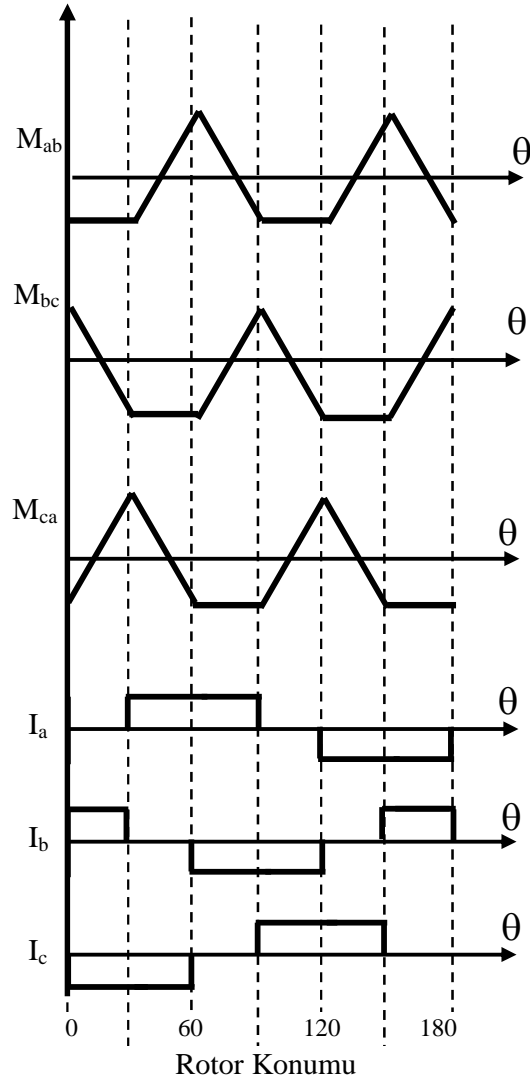


ekil 3.3: KKARM'nin tek yönlü uyarma yapısı, karıt endüktans ve akım profili.

Karıt endüktans profili verilmi olan makine 6/4 kutupludur ve adım açısı 30°dir. Adım açısının 30° olması ve makinanın üç fazlı olması sebebiyle periyodun 90° oldu u kolayca söylenebilir. ekil 3.3'de görülen karıt endüktans profili idealize edilmi tir ve bundan dolayı e ri do rusal yapı sergilemektedir. Karıt endüktans profili üç kısma ayrılmı olup, ilk 30°de yükselme, ikinci 30°de ini ve üçüncü 30°de ise sabit bir yapı karakterize etmektedir. Tek yönlü uyarma yapısında fazlar

periyodun $2/3$ 'ünde iletimde kalmakta olup, $6/4$ üç fazlı KKARM'de 60° 'dir [5].

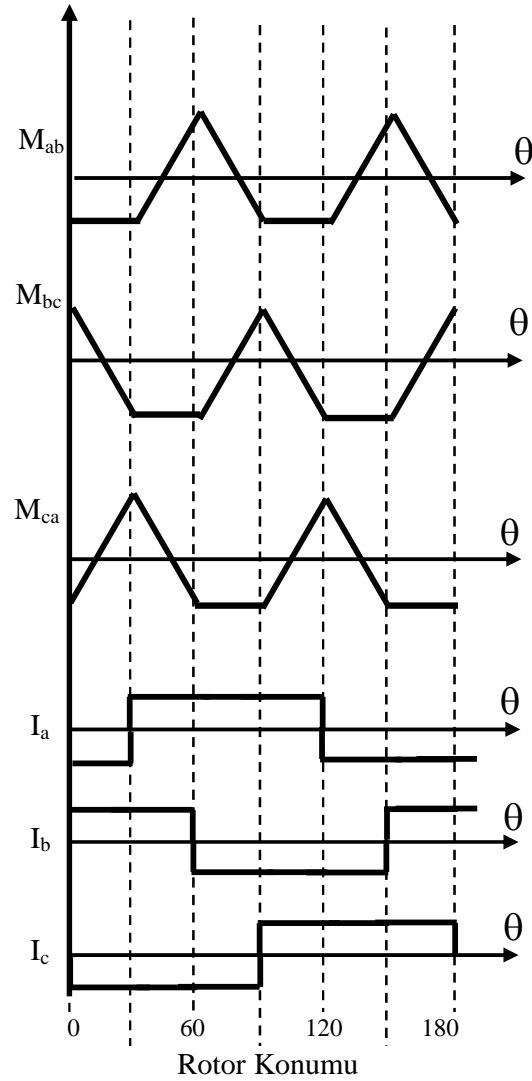
Çift yönlü uyarma yapısı, karıt endüktans ve akım profili ekil 3.4'de görülmektedir. Bu uyarma yapısında herhangi bir anda iletimde olan fazlardan biri pozitif di eri, negatif uyarma durumundadır. ekil 3.4'den de görüldü ü üzere, bu uyarma yapısının periyodu 180° 'dir. Denklem 3.1 dikkate alınarak çift yönlü uyarma yapısı incelendi inde, tek yönlü uyarma yapısından ve klasik ARM'den farklı bir durum dikkat çekmektedir. Çift yönlü uyarma yapısında moment üretimi karıt endüktansın yükseldi i kısımda de il, dü ü esnasında pozitif moment üretilmesi gerçekleşmektedir.



ekil 3.4: KKARM'nin çift yönlü uyarma yapısı, karıt endüktans ve akım profili.

Bunun sebebi ise, aktif olan fazlardan birinin pozitif di erinin ise negatif i aretli olmasıdır. Pozitif moment üretiminin gerçekleştirilebilmesi için karıt endüktansın türevinin negatif olması gerekmektedir [5].

Çift yönlü üç faz aktif uyarma yapısı, karıt endüktans ve akım profili ekil 3.5’de görülmektedir. Çift yönlü uyarma yapısı ise, di er iki uyarma yapısından moment üretimi olarak oldukça farklı bir karakteristik ortaya koymaktadır. Bu uyarma yapısında üç fazında aktif olmasından dolayı moment üretimine üç fazda katkıda bulunmaktadır.



ekil 3.5: Çift yönlü üç faz aktif uyarma yapısı, karıt endüktans ve akım profili.

ekil 3.5’den de görüldü ü üzere bu uyarma yapısının periyodu 180°’dir. Her bir faz

90° pozitif 90° negatif yönlü olarak iletimde kalır ve fazlar arasında 60°'lik faz farkı bulunmaktadır. 0-30° arası Denklem 3.1 dikkate alınarak incelendi inde I_a negatif I_b pozitif yönlü olarak uyarmada oldu u ve çarpım sonucunun negatif de erli oldu u görülür. Fakat M_{ab} sabit bir de erde olmasından dolayı, türev “0”dır ve A ve B fazlarının moment üretimine katkısı bundan dolayı “0”dır.

I_b pozitif ve I_c negatif yönlü uyarmada oldu u ve çarpım sonucunun negatif de erli oldu u görülür. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta M_{bc} kar it endüktansıdır. Çünkü kar it endüktans 0-30° arasında i aret de i tirmektedir. Dolayısıyla M_{bc} kar it endüktansının türevinin i areti, moment üretimini pozitif veya negatif yönde etkiledi ini belirleyecektir. ki fazın çarpım sonucunun negatif olmasından dolayı M_{bc} kar it endüktansının türevinin negatif oldu u kısımlarda moment ifadesine katkı sa larken pozitif olan de erlerde (0-30° arasında) ise toplam momenti azaltır. Böylece B ve C fazları 0-30° arasında, toplam momente hem katkı sa lar, hem de azaltır.

I_c ve I_a negatif yönlü uyarmada oldu u ve çarpım sonucunun pozitif de erli oldu u görülür. M_{ca} pozitif de erde olmasından dolayı türevi de pozitifdir ve C ve A fazlarının moment üretimine katkısı bundan dolayı pozitifdir [5].

3.1. KKARM'nin Modelleme Çalı maları ve YSA ile Modellenmesi

Yapılan literatür taramasında iki temel KKARM modelleme çalı masına rastlanmı tır. Bunlar;

- KKARM'nin Klasik ARM'ye benzetilerek gerçekleştirilen modelleme,
- Manyetik devre temelli modelleme, çalı malarıdır.

3.1.1 KKARM'nin Klasik ARM'ye benzetilmesi

KKARM'nin Klasik ARM'ye benzetilerek modellenmesi çalı ması ilk olarak B. Mecrow tarafından gerçekleştirilmi tir [8]. Bu çalı mada benzetim i leminin

gerçekle tirmek için, ARM parametreleri sabit bir “C” matrisi (dönü üm matrisi) ile çarpılarak KKARM parametrelerine dönü türülmü tür. Mecrow’un yaptı ı modelleme çalı masında Denklem 3.3-3.6 kullanılmı tır.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} Ia' \\ Ib' \\ Ic' \end{bmatrix}}_{KKARM} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}}_{C \text{ Matrisi}} \underbrace{\begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix}}_{ARM} \quad (3.3)$$

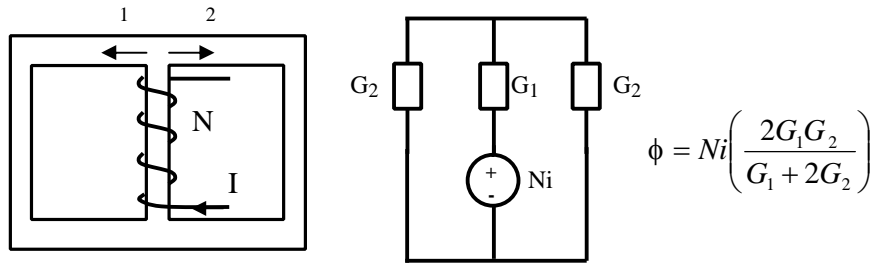
$$[I'] = [C][i] \quad (3.4)$$

$$[\lambda'] = [C]^{-1}[\lambda] \quad (3.5)$$

$$[V'] = [C]^{-1}[V] \quad (3.6)$$

3.1.2. Manyetik Devre Temelli Modelleme

Manyetik devre temelli modelleme çalı ması ilk olarak James M. Kokernak [13] tarafından önerilmi tir. Bu modelleme tekni inde temel mantık transformatörlerin modelleme mantı ına yakındır. E tip çekirdek nüvenin orta aya ına bir bobin sargısının yerle tirilmesi ile olu an manyetik devre ekil 3.6’de görülmektedir.



ekil 3.6: E-tip çekirdek nüvenin manyetik devre modeli.

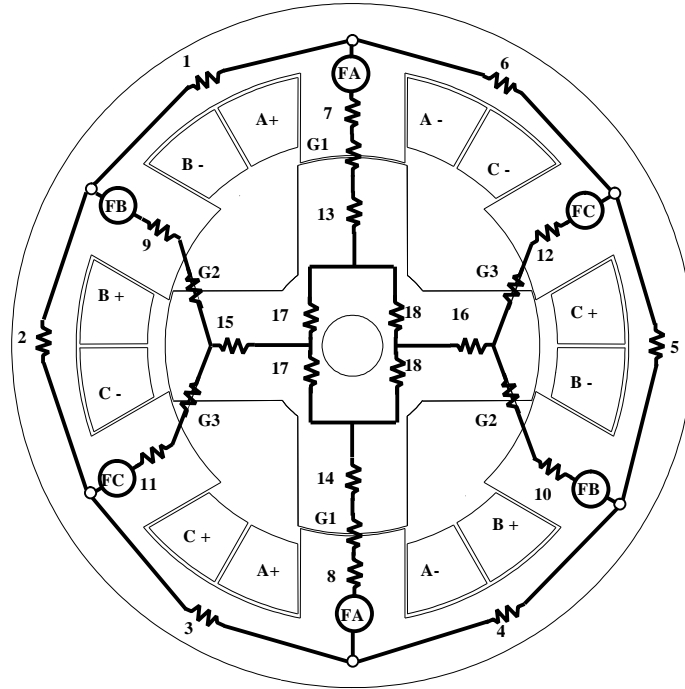
ekil 3.6’de E tip nüvenin manyetik devresine ait akı, sarım, akım, manyetik geçirgenlik ve magneto motor kuvveti (mmk) arasındaki ili ki Denklem 3.7-3.9’da verilmi tir.

$$F - \frac{\phi}{G_1} - \frac{\phi_1}{G_2} = 0 \quad (3.7)$$

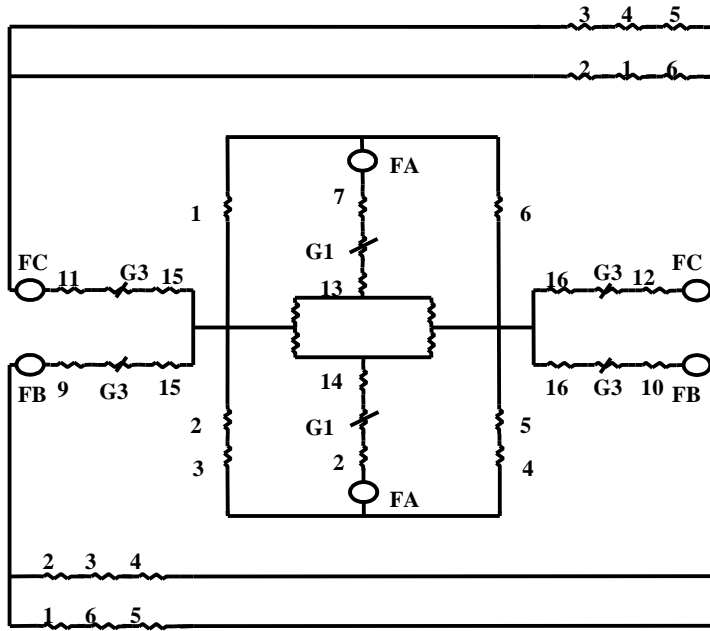
$$F - \frac{\phi}{G_1} - \frac{\phi_2}{G_2} = 0 \quad (3.8)$$

$$\phi = F \left(\frac{2G_1 G_2}{G_1 + 2G_2} \right) \quad (3.9)$$

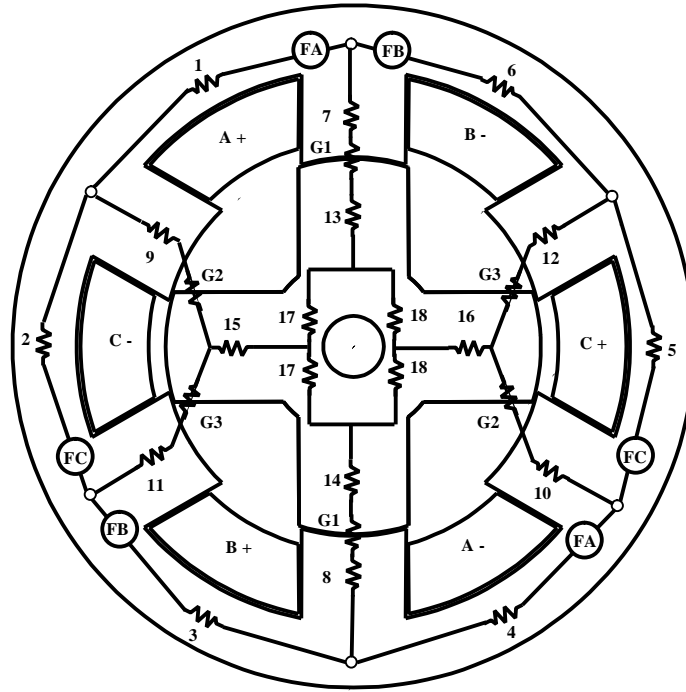
2004 yılında Kenji Nakumura tarafından geli tirilen Klasik ARM manyetik devre modelinin [43] yeniden düzenlenmesi sonucunda ekil 3.7 ve 3.8’de verilmi olan Klasik ARM manyetik devre ekli elde edilmi tir. KKARM’ye ait manyetik devrenin ekli, ekil 3.9 ve 3.10’da gösterilmi tir. Geli tirilen KKARM manyetik devre modeli, Takashi Kosaka [16] ve James M. Kokernak [13] tarafından geli tirilen modellerin birle tirilmesi ile olu turulmu tur.



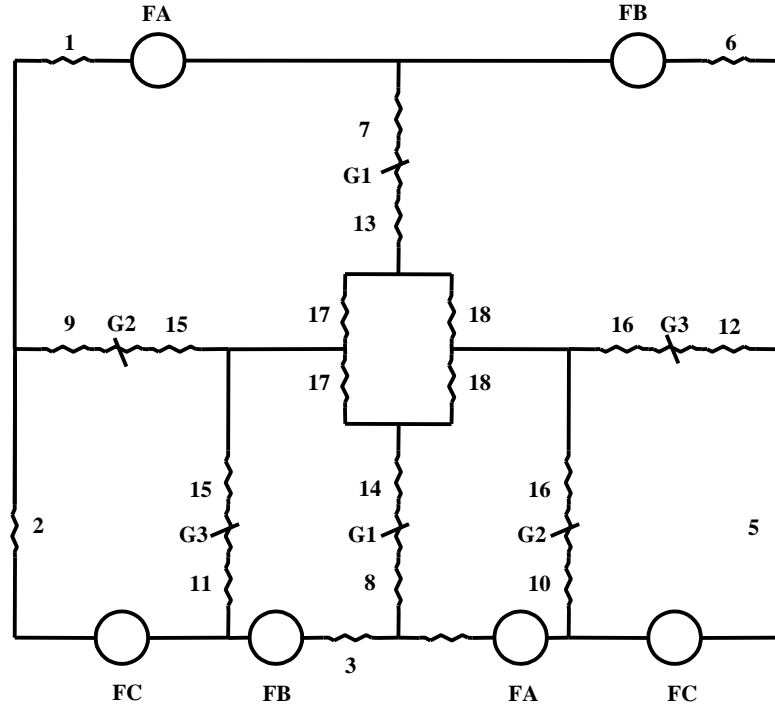
ekil 3.7: Klasik ARM manyetik devre ekli.



ekil 3.8: Klasik ARM manyetik devre eklinin yeniden düzenlenmi hali.



ekil 3.9: KKARM manyetik devre ekli.



ekil 3.10: KKARM manyetik devre eklinin yeniden düzenlenmi hali.

Sonuç olarak, her iki modelleme tekni inin en büyük dez avantajı, modellemede kullanılan faz akımları ve pozisyona ba lı 3 boyutlu matrislerdir ($i_a \cdot i_b \cdot t_{eta}$). Bu matrisler sebebiyle her bir benzetim sonucunun elde edilebilmesi için, binlerce döngülük iterasyon gerekebilmektedir. terasyon sayısının çok olması benzetim süresinin uzamasına sebep olmaktadır.

3.2. KKARM'nin Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Analizi

Bu kısımda, Klasik ARM ve KKARM'nin Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak Maxwell 2D paket programında gerçekleştirilen magneto statik analizinin gerçekleştirilmesi anlatılmı tır. Makinaların her ikisine de uygulanan farklı akım ve rotor konum de erleri için, gerçekleştirilen analiz sonucunda, endüktans, akı ve moment de erleri elde edilmi tir.

SEY ile analizinin gerçekleştirilmesi i lemine ba lamadan önce, analizde kullanılacak olan akım ve rotor konum de erlerinin tespit edilmesi gerekmektedir. SEY analizinin gerçekleştirilebilmesi için ARM ve KKARM'ye uygulanılacak olan akım de erinin tespit edilmesi gerekmektedir. Her iki makinanın geometrik yapısının

aynı olmasına karşın sargı yapılarının farklı olması nedeniyle makinaların birbirleriyle karşılaştırılabilmesi için ortak bir referans noktası tespit edilmelidir. Yapılan literatür çalışmasında, her iki makinanın birbirleriyle karşılaştırılabilmesi için genel olarak iki referans noktasının kullanıldığı görülmüştür. Bunlar;

- Erit bakır kayıplarında makinaların çalıştırılması,

- Erit manyetik çalıştırma noktasında çalıştırılması,

kişinin seçeneğinin ortak referans olarak seçilebilmesi için, ARM ve KKARM'nin farklı geometrik yapıya sahip olması gerekmektedir. Oysaki yapılan çalışmada amaç, geometrik yapının sabit tutularak sargı yapısındaki değişimle üretilen momentteki artışın tespit edilmesi ve bu artışa bağlı olarak artan moment dalgalılığının azaltılmasıdır. ARM ve KKARM'nin birbirleriyle karşılaştırılmasında her iki makinede erit bakır kayıplarında çalıştırılmıştır.

Klasik ARM ve KKARM'ye ait bakır kayıpları aşağıdaki Denklemler (3.10 ve 3.11) kullanılarak hesaplanır.

$$P_{cu1}=(1/3)R_s I_1^2 \text{ (Klasik ARM)} \quad (3.10)$$

$$P_{cu2}=(2/3)R_s I_2^2 \text{ (KKARM)} \quad (3.11)$$

$$I_2=0,45I_1 < I_1 < 0,56 I_1 \quad (3.12)$$

Literatürde KKARM ile ARM faz akımları arasındaki Denklem 3.12'de görüldüğü gibidir.

DeneySEL çalışmada kullanılan ARM için, Klasik ARM'de bir fazın çekebileceği maksimum akım 12A olarak sınırlandırılmıştır. Buna göre KKARM'nin bir fazının çekebileceği akım 6,72A olarak hesaplanmıştır.

Bu değerler tespit edildikten sonra SEY analizinde kullanılacak maksimum akım, açı değerleri ve bu parametrelere ait artış miktarlarının belirlenmesi gerekmektedir. Makinelerin her ikisinde de stator ve rotor kutuplarının çakışık olduğu noktada rotor açısının sıfır(0) derece olduğu kabul edilmiştir ve şekil 3.11'de görülmektedir.

Şekil 3.12'de görülen stator ve rotor kutuplarının çakışık olmadığı açı değeri ise

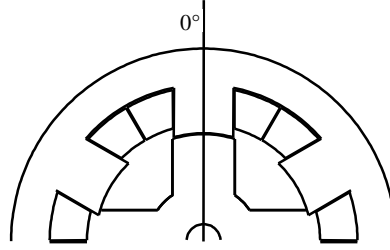
(adım açısı), Denklem 3.13 ile hesaplanır,

$$\alpha = \frac{360}{N_s} - \frac{360}{N_r} = 30^\circ \quad (3.13)$$

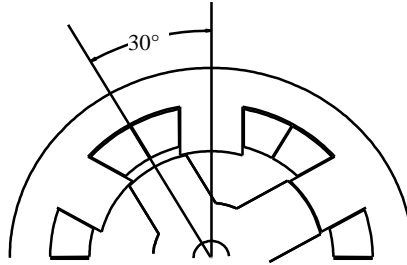
Stator ve rotor kutupları arasındaki maksimum açı ise;

$$\alpha_{mak} = \frac{360}{2N_s} = 45^\circ \quad (3.14)$$

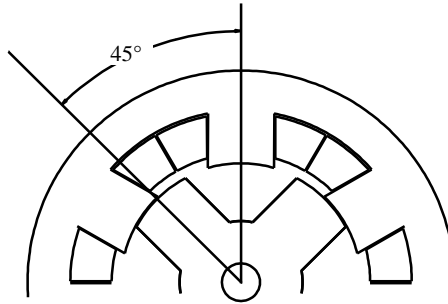
olarak hesaplanmıştır ve ekil 3.13'da maksimum açıda stator ve rotor konumları görülmektedir.



ekil 3.11: Stator ve Rotor kutuplarının çakışık olduğu durum.



ekil 3.12: Stator ve Rotor kutuplarının çakışık olmadığı durum.



ekil 3.13: Stator ve Rotor kutupları arasındaki maksimum açı olduğu durum.

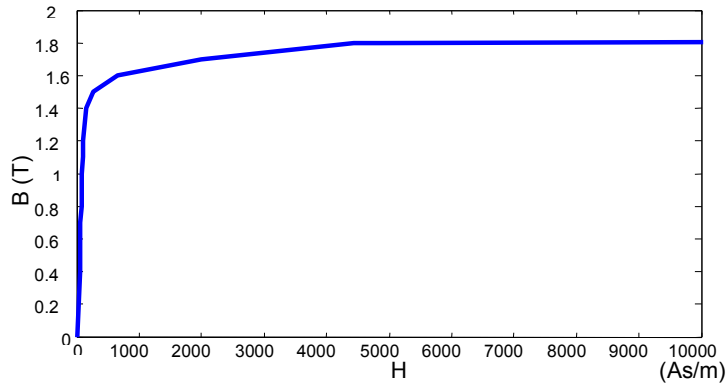
Bu durumda Klasik ARM ve KKARM için SEY analizinde kullanılacak olan akım

ve rotor konum değerleri Tablo 3.1’de sunulmuştur.

Tablo 3.1: SEY analizinde kullanılacak olan akım ve rotor konum değerleri.

	Klasik ARM		KKARM		
	Rotor Konum	Akım	Rotor Konum	Akım 1	Akım 2
Min			0 °	0 A	0 A
Max	45 °	12 A	45 °	7 A	7 A
Artı	2,5 °	0,5 A	2,5 °	0,5 A	0,5 A
terasyon	19	25	19	15	15

Makina tasarım programında da kullanılan ve SEY analizinde de kullanılacak olan M19 saç malzemeye ait B-H karakteristiği ekil 3.14’de gösterilmiştir.



ekil 3.14: M19 saç malzeme B-H karakteristiği.

SEY analizi Maxwell 2D programıyla gerçekleştirilmiştir olup ekil 3.15’de işlem akı algoritması gösterilmiştir.

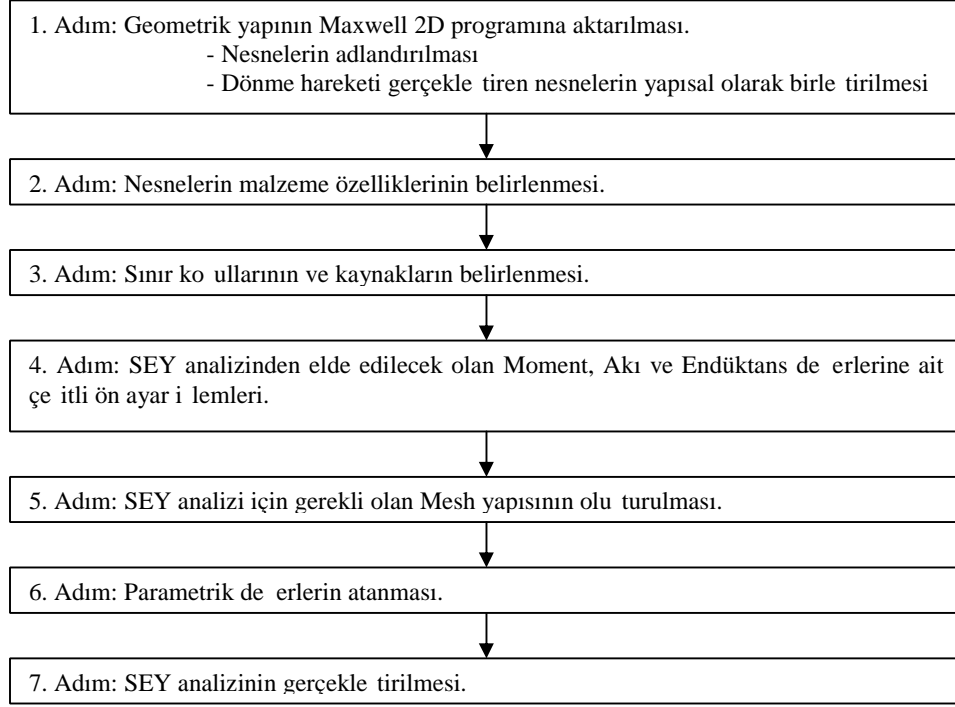
Maxwell 2D ile analizi gerçekleştirilmesinde dikkat edilmesi gereken en önemli husus, analiz sonucunda elde edilen değerlerin makinenin SEY analiz sonuçlarına ait olmadığıdır. Analiz sonucunda elde edilen değerlerde, motor derinliğinin 1 mm, motor sarım sayısının 1 sipir olarak kabul edilmektedir. Bu sebepten dolayı, elde edilen değerleri, istenilen geometrik yapıya ve sarım sayısına ait değerlere dönüştürme işlemi gerçekleştirilmelidir.

$$Moment_{SEY} = Moment_{MAXWELL} \times Motor_{derinlik} \quad (3.15)$$

$$Ak_{SEY} = Ak_{MAXWELL} \times Motor_{derinlik} \times 2 \quad (3.16)$$

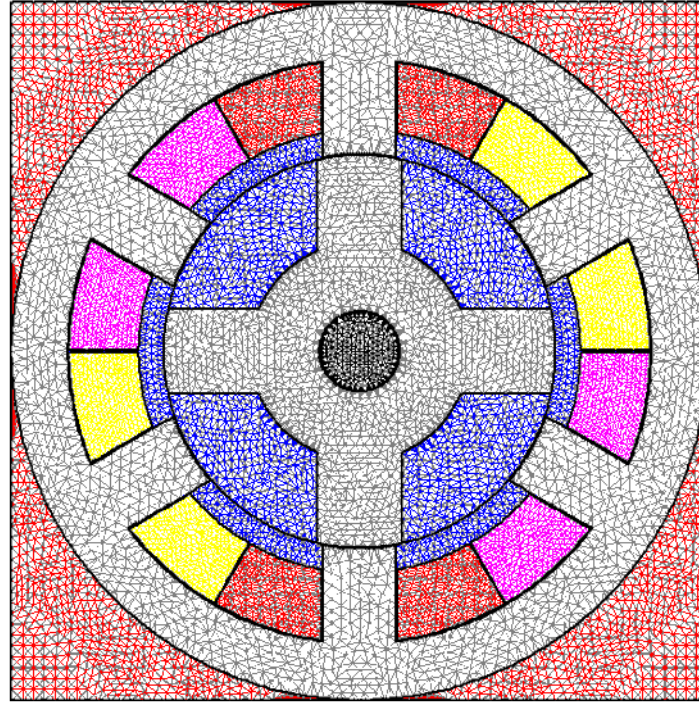
$$Endüktans_{SEY} = Endüktans_{MAXWELL} \times Motor_{derinlik} \times N \times N \times 2 \quad (3.17)$$

Denklem 3.15-3.17'nin kullanılması ile tasarlanan Klasik ARM ve KKARM'nin SEY analiz sonuçları elde edilmektedir.

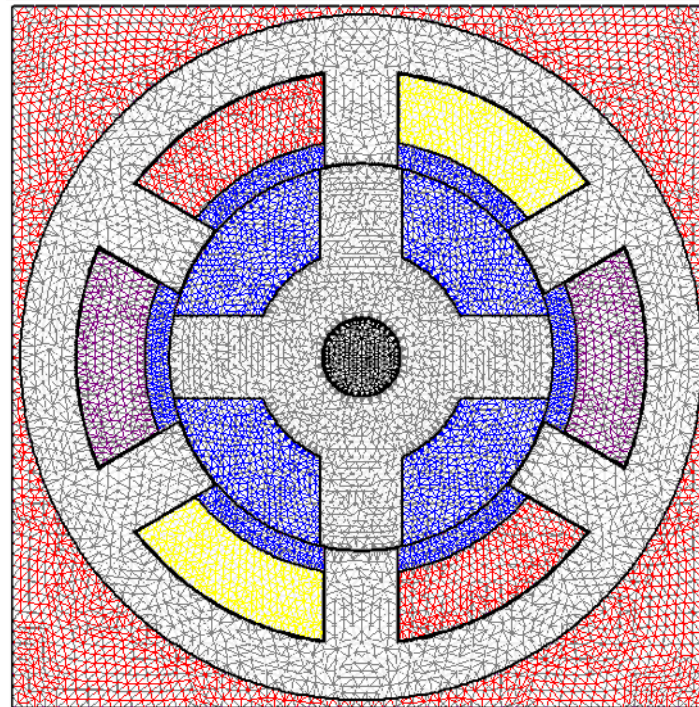


ekil 3.15: Maxwell 2D analiz programında SEY analizinin gerçekleştirilmesi.

ekil 3.16'da Klasik ARM'ye ait Mesh yapısı görülmektedir. ekil 3.17'de KKARM'ye ait Mesh yapısı görülmektedir.

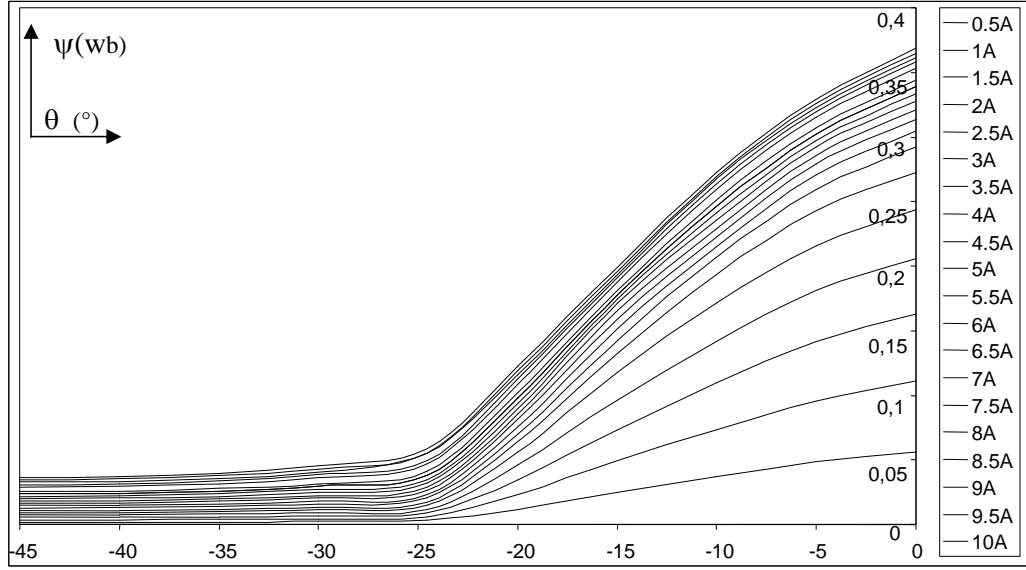


ekil 3.16: Klasik ARM'ye ait Mesh yapısı.

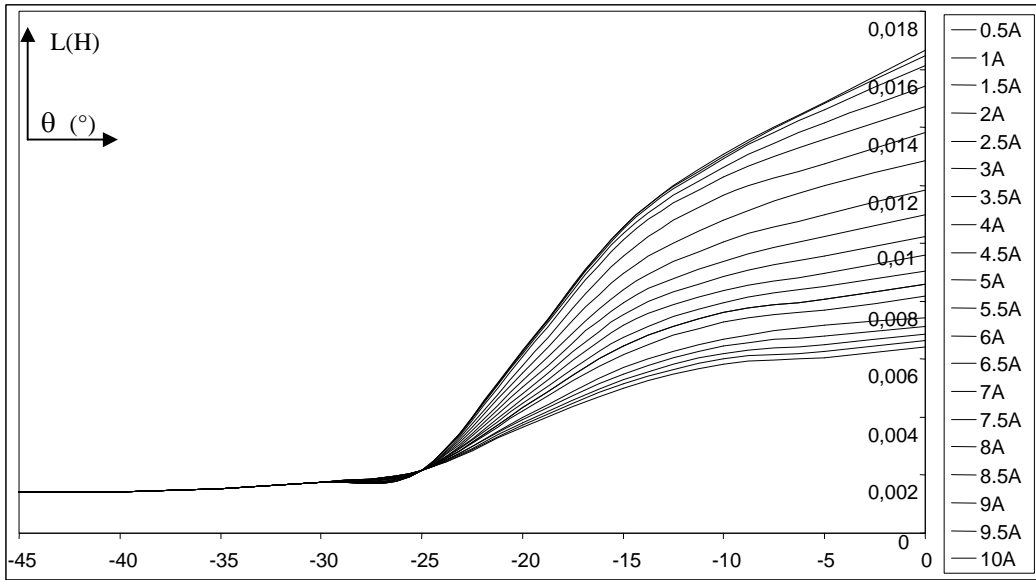


ekil 3.17: KKARM'ye ait Mesh yapısı.

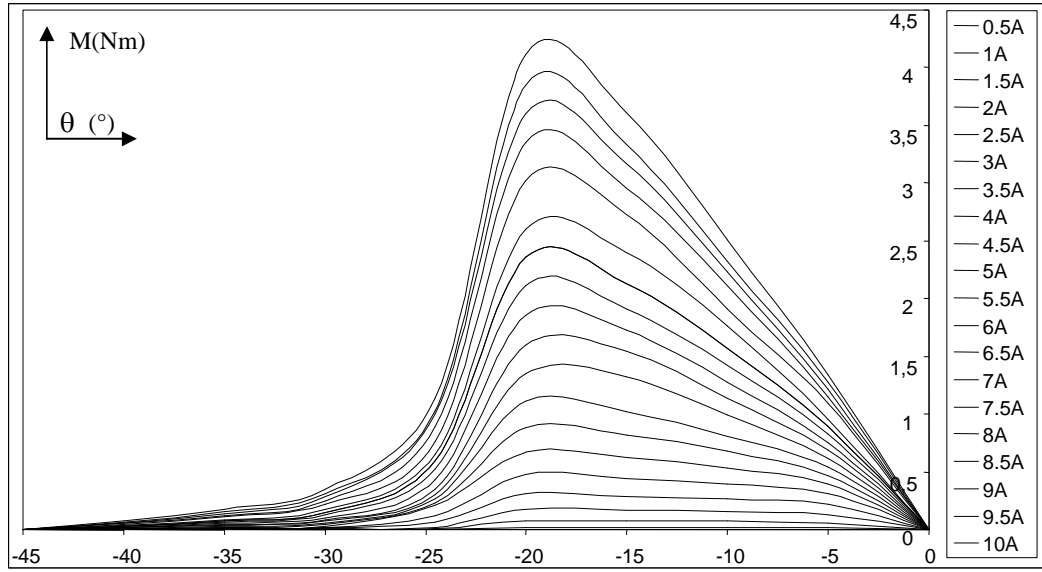
ekil 3.18-3.20'de Klasik ARM'ye ait akı, endüktans ve moment e rileri görülmektedir.



ekil 3.18: Klasik ARM akı e risi.

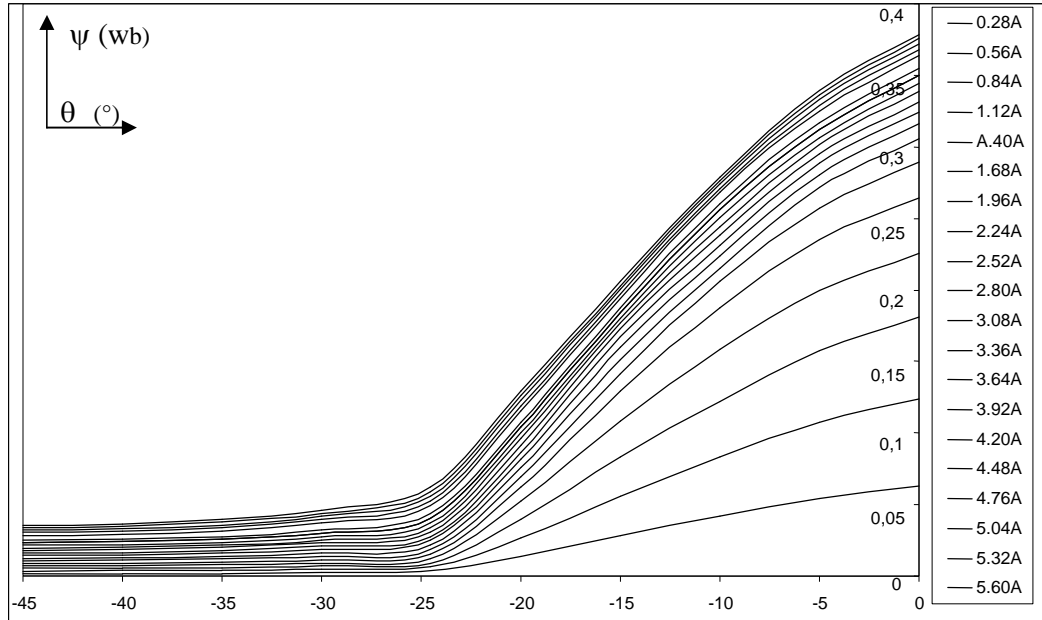


ekil 3.19: Klasik ARM endüktans e risi.

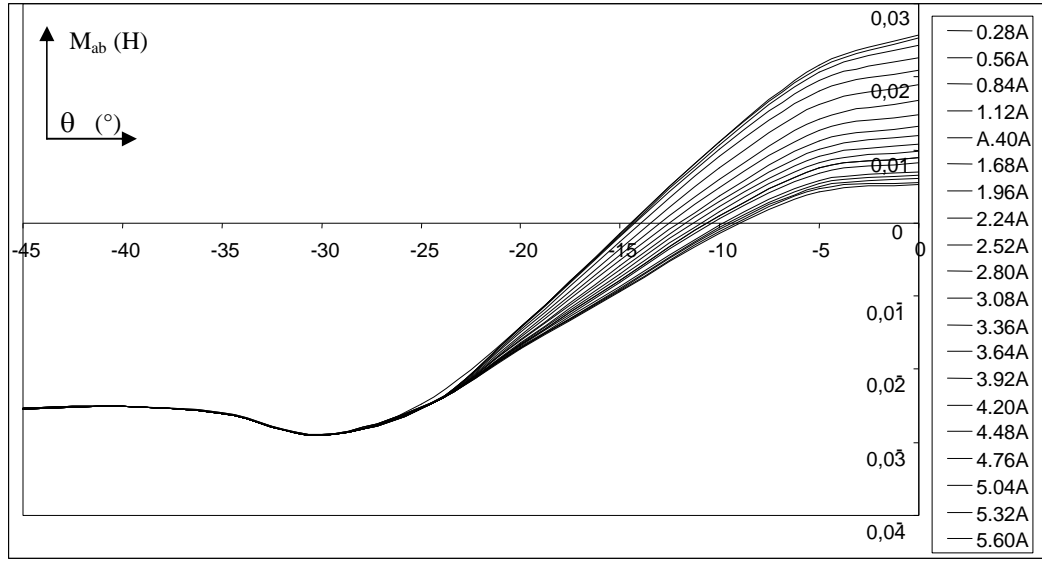


ekil 3.20: Klasik ARM moment e risi.

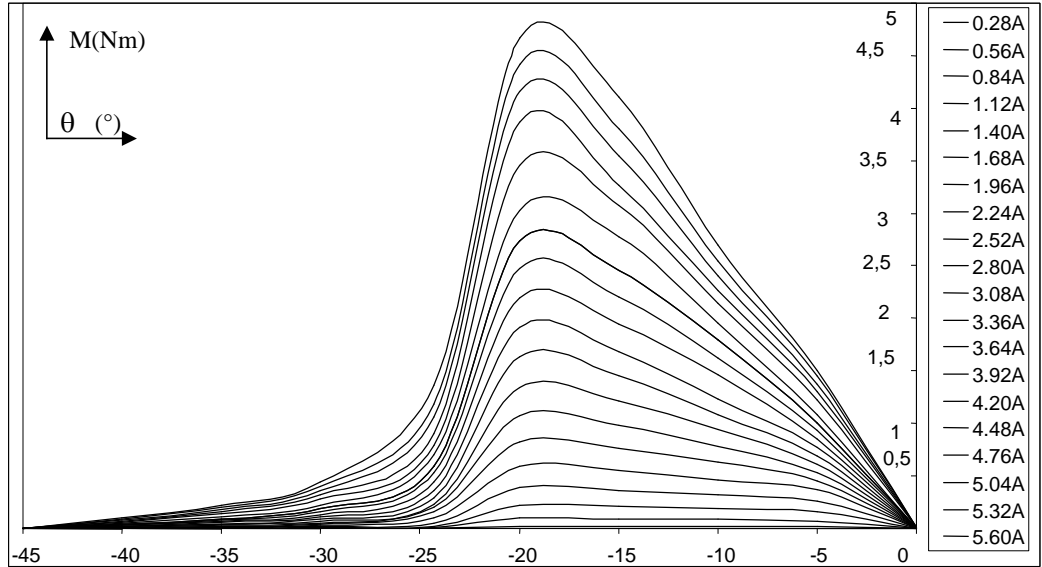
ekil 3.21-3.23'de KKARM'ye ait akı, karıt endüktans ve moment e rileri görölmektedir.



ekil 3.21: KKARM akı e risi.

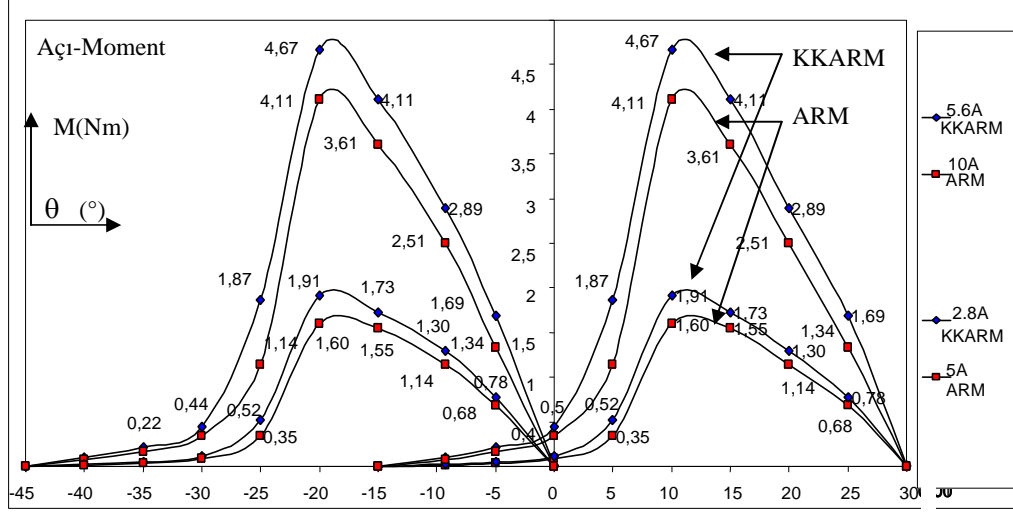


ekil 3.22: KKARM kar it endüktans e risi.



ekil 3.23: KKARM moment e risi.

ekil 3.24'de KKARM ve Klasik ARM moment e rilerinin kar ıla tırılması görülmektedir. Bu kar ıla tırmada her iki makinenin çekebilecekleri maksimum akım altında çalış tırıldı nda üretilen moment de erleri gösterilmi tir.



ekil 3.24: KKARM ve Klasik ARM moment e erlerinin kar ıla tırılması.

3.3. YSA ile KKARM'nin Modellenmesi Çalışması

Yapay Sinir A ları (YSA) ile modellenme i leminde, önceden SEY analizi ile statik moment ve akı verilerinin üretildi i KKARM kullanılmı tır. KKARM'nin modelini olu turmak için leri Beslemeli (B, Feed Forward FF) bir YSA tasarlanmı tır. SEY analizi sonucunda elde edilen veriler, Geri Yansıtmalı (GY, Back Propagation BP) e itim ile olu turulan YSA'ya uygulanmı ve KKARM'nin modeli olu turulmu tur.

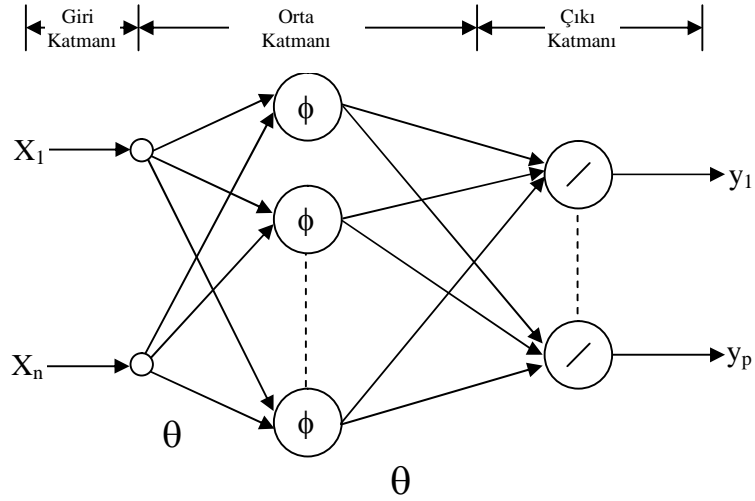
Yapay sinir a ları ile ilgili yapılan literatür taramasında oldukça fazla kayna a rastlanmı tır. Bu sebepten dolayı konu ile ilgili detaylı bilgi verilmeyip sadece modelleme çalışmasında YSA'nın nasıl kullanıldı ı a a ıda açıklanmı tır.

Hücrelerin ba lantı ekilerine, ö renme kurallarına ve aktivasyon fonksiyonlarına göre çe itli YSA yapıları geli tirilmi tir. Bu yapılardan en temelleri, leri Beslemeli Yapay Sinir A ları (BYSA) ve Geri Beslemeli Yapay Sinir A ları (GBYSA) [43].

3.3.1. leri Beslemeli Yapay Sinir A ları

leri beslemeli YSA'da, hücreler katmanlar ekinde düzenlenir ve bir katmandaki hücrelerin çıkı ları bir sonraki katmana a ırlıklar üzerinden giri olarak verilir. Giri

katmanı, dış ortamlardan aldığı bilgileri hiçbir değişikliğe uğratmadan orta katmandaki hücrelere iletir. Aşağıda sunulan giriş, orta ve çıkış katmanında ilerlenerek ağ çıkışı belirlenir. Bu yapıyı ile ileri beslemeli ağlar da rusal olmayan statik bir ileri gerçeikleştirir. İleri beslemeli üç katmanlı YSA'nın, orta katmanında yeterli sayıda hücre olmak kaydıyla, herhangi bir sürekli fonksiyona istenilen doğrulukta yakınsanabileceği gösterilmiştir. En çok bilinen geriye yayma öğrenme algoritması, bu tip YSA'ların eğitiminde etkin olarak kullanılmakta ve bazen bu ağlara geriye yayma ağları da denmektedir. Şekil 3.25'de giriş, orta ve çıkış katmanları olmak üzere üç katmanlı ileri beslemeli YSA yapısı gösterilmiştir [45-47].



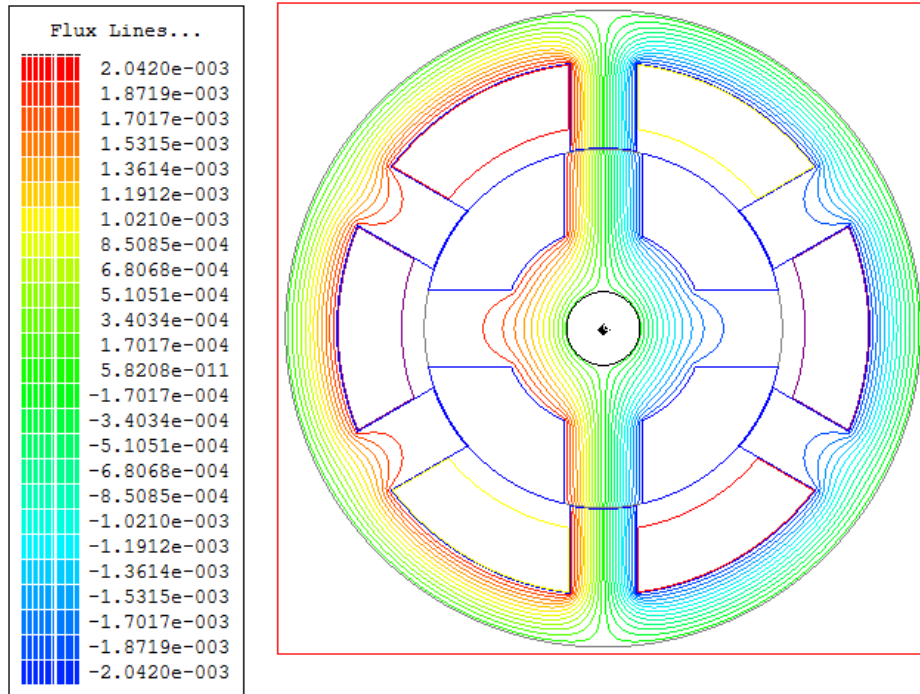
Şekil 3.25: İleri beslemeli üç katmanlı YSA.

3.3.2. Geri yansıtma yöntemi ile yapay sinir ağlarının eğitimi

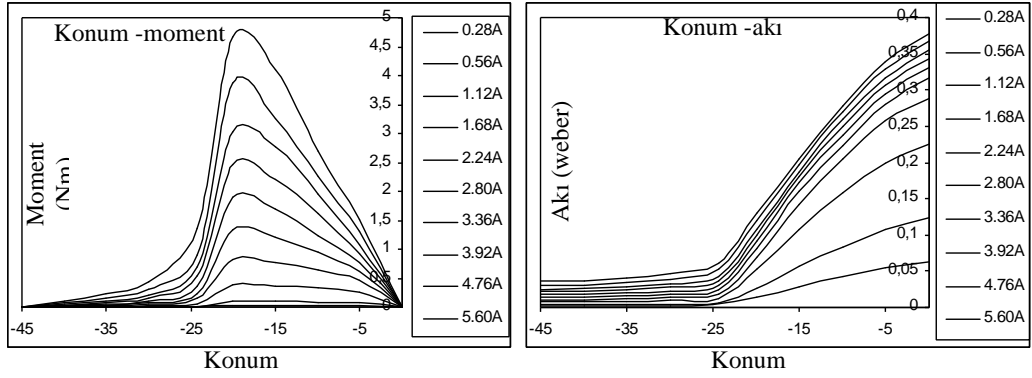
Yapay sinir ağlarının parametrelerinin güncellenmesi için literatürde en çok kullanılan yöntem hata geriye yayma yöntemidir. Ses tanıma problemlerinden rusal olmayan sistem tanıma ve denetimi problemlerine kadar yapay sinir ağları ile çözüm üreten bir çok alanda başarı ile uygulanan bu yöntem, maliyet fonksiyonunun zaman içerisinde, ağ parametrelerinin uyarlanması ile minimizasyonuna dayanmaktadır [48]. Hata geriye yayma yöntemi, tek parametrelili bir maliyet fonksiyonunun aldığı en küçük değerini iteratif olarak bulunması olarak özetlenebilir.

ekil 3.26'de modelleme çalışması gerçekleştirilen makinede SEY analizi sonucunda elde edilen akı dağılımları görülmektedir. ekil 3.27'de bir faz akımı sabit iken diğer faz akımının ve rotor konumunun değiştirilmesiyle yapılan analiz sonucunda elde edilen statik moment ve akı eğrileri görülmektedir.

SEY analizi sonucunda elde edilen veriler, oluşturulan YSA modeline aktarılmıştır. Fakat KKARM modellenmesinde tek bir YSA kullanılmamıştır. Bunun sebebi ise; KKARM modellenmesinde kullanılan akı ve moment yapılarının oldukça karmaşık bir yapıya sahip olmasıdır. Hatta klasik öngerilme tabloları ile akının modellenmesi binlerce döngünün kullanılmasını gerektirmektedir [2]. I_a , I_b ve rotor pozisyonuna bağlı olarak akı modellenmektedir. Bu sebepten dolayı, I_b akımı sabitlenerek YSA tarafından modellenecek olan yapı, değiştirilerek basitleştirme yoluna gidilmiştir ve I_b değeri ise akı modeline lineer bir katkı sağladığı varsayılmıştır. Bu basitleştirme içinlemine ait denklemler, Denklem 3.18-3.20'de verilmektedir.



ekil 3.26: Tasarlanan KKARM tipindeki makina.



ekil 3.27: $I_b=7$ A sabit $I_a=0.5-7$ A arası rotor 0-45 derece arası de i ti inde elde edilen moment ve akı de i imleri.

$$=f(I_a, I_b, \theta) \quad (3.18)$$

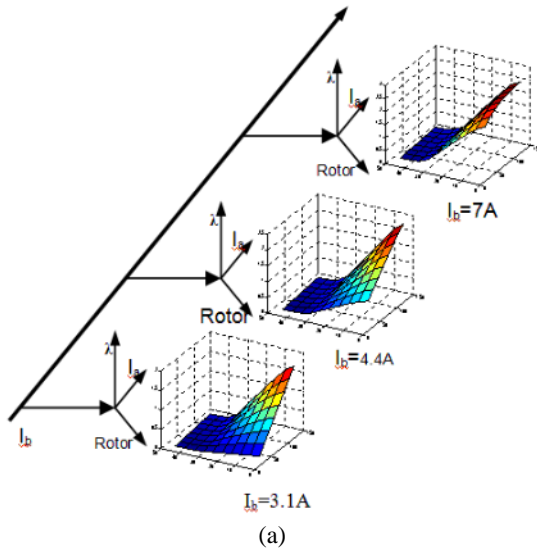
$$\lambda_{üst} = \lambda_{alt} = f(I_a, \theta) \quad (I_b \Rightarrow \text{Sabit}) \quad (3.19)$$

$$\lambda = [(I_b - I_{balt}) / (I_{büst} - I_{balt})] \cdot (\lambda_{üst} - \lambda_{alt}) + \lambda_{alt} \quad (3.20)$$

Moment ise, akıda oldu u gibi, iki fazın akımına ve rotor pozisyonuna ba lı olarak de i mektedir (Denklem 3.21).

$$M = f(I_1, I_2, \theta) \quad (3.21)$$

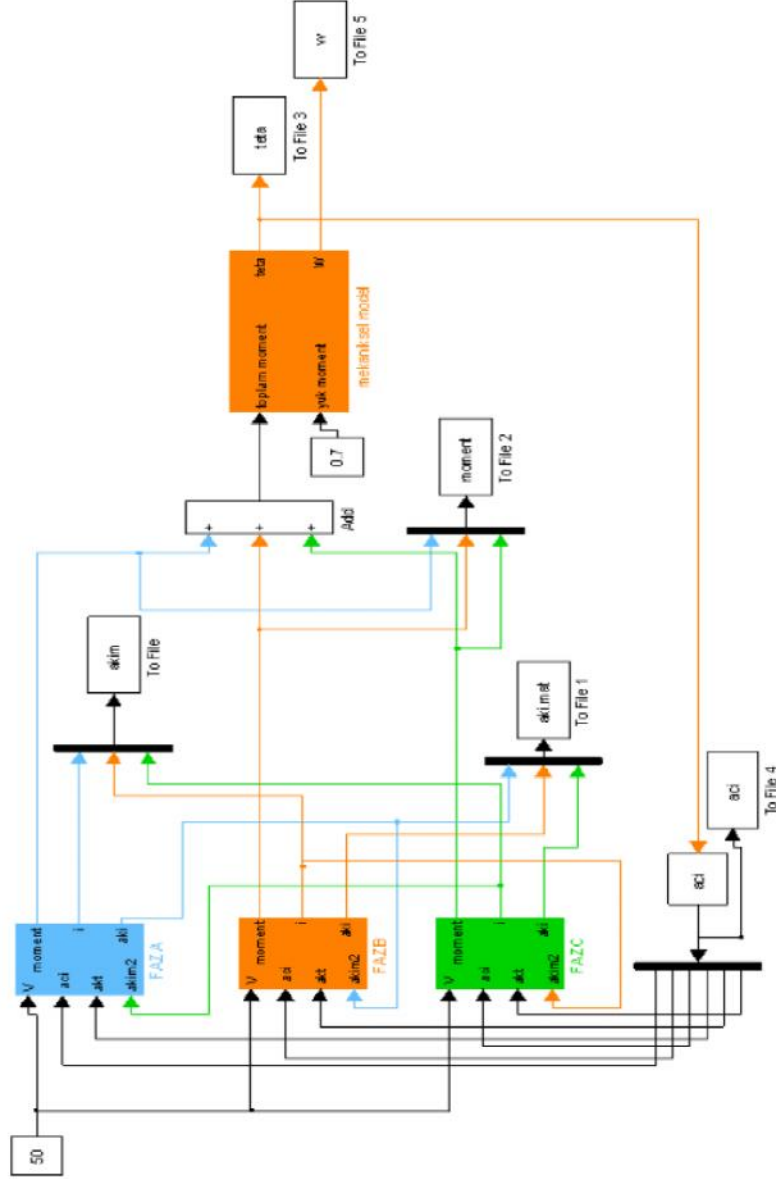
ekil 3.28.a'da akının modellenmesi gösterilmi olup, ekil 3.28.b'te ise KKARM modelinde kullanılan YSA'ların da ılımı gösterilmektedir.



	akı	moment	
Faz 1	2X6	1	= 39
Faz 2	2X6	1	
Faz 3	2X6	1	

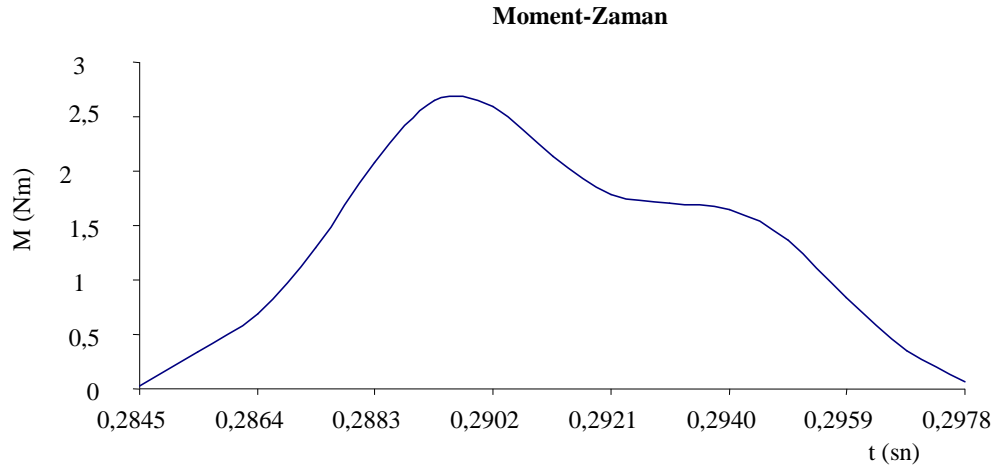
ekil 3.28: a. Akının modellenmesi, b. Modellemede Kullanılan YSA'ların da ılımı.

Üretilen YSA'larının birle imi sonucunda KKARM'nin modeli olu turulmu tur. Her faz bir ana ve yardımcı fazdan olu maktadır. Modelde ise, toplam 39 adet YSA kullanılmı tur. ekil 3.29'da Kar ıt Kuplajlı Anahtarlı Relüktans Motorunun, YSA ile gerçekte tirilmi modeli görölmektedir.

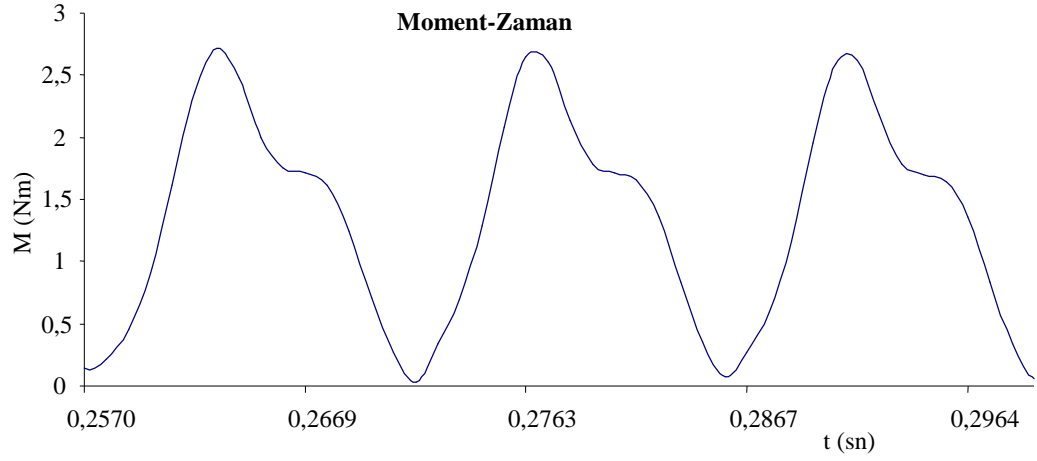


ekil 3.29: KKARM Modeli.

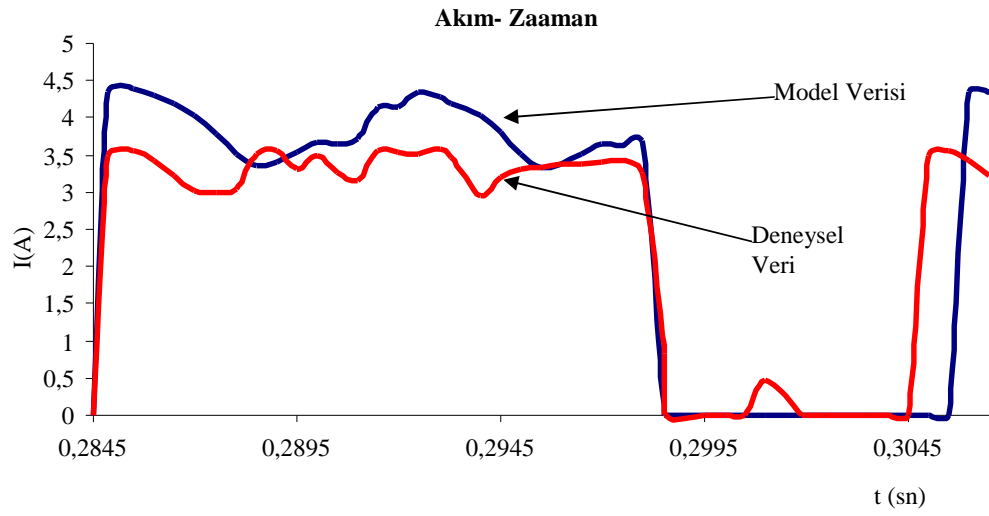
ekil 3.30-31'de YSA ile geli tirilen modelin benzeti im çalı masına ili kin sonuçlar (moment akı ve akım e rileri) görölmektedir. ekil 3.32'de deneysel düzenekten ve modelden elde edilen faz akımları gösterilmi tir.



ekil 3.30: Bir faz tarafından üretilen moment.

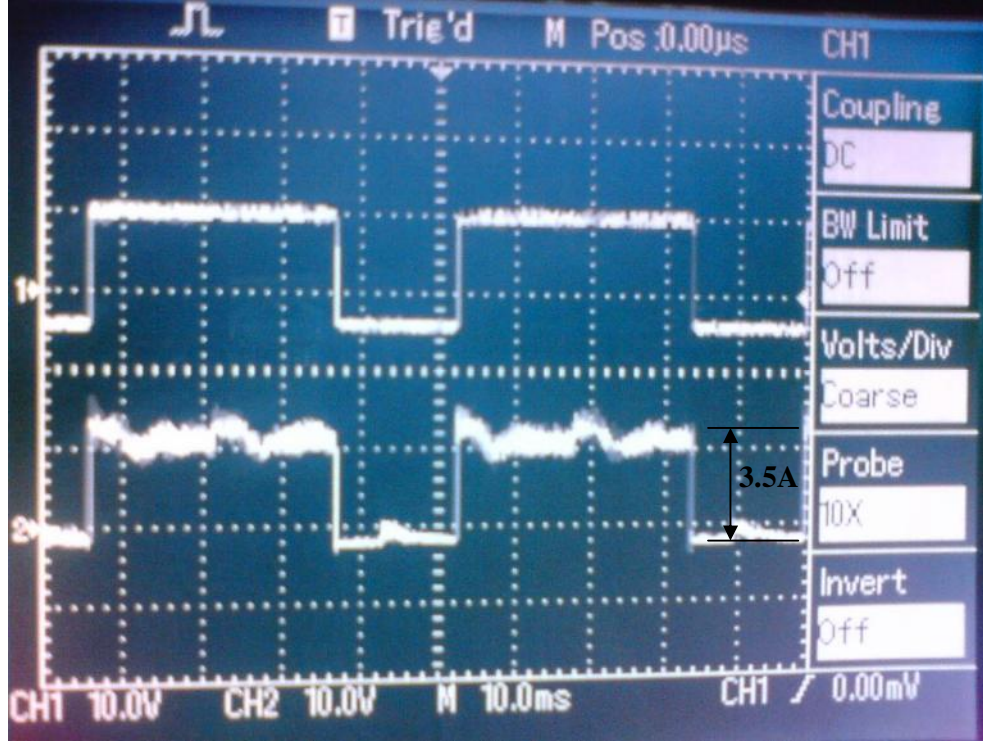


ekil 3.31: Toplam moment.



ekil 3.32: Model ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.

ekil 3.33'de KKARM'nin faz akımının osiloskop ekran görüntüsü gösterilmiştir.

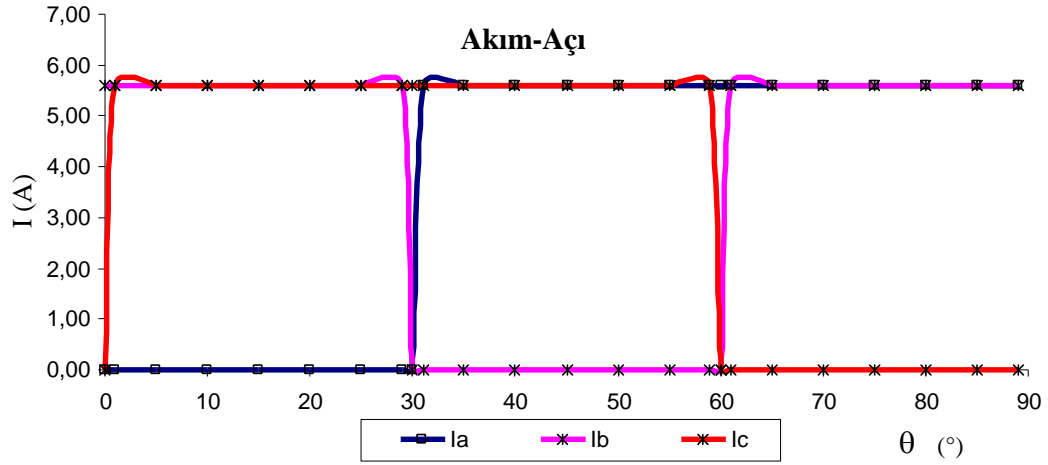


ekil 3.33: Faz akımının osiloskop görüntüsü

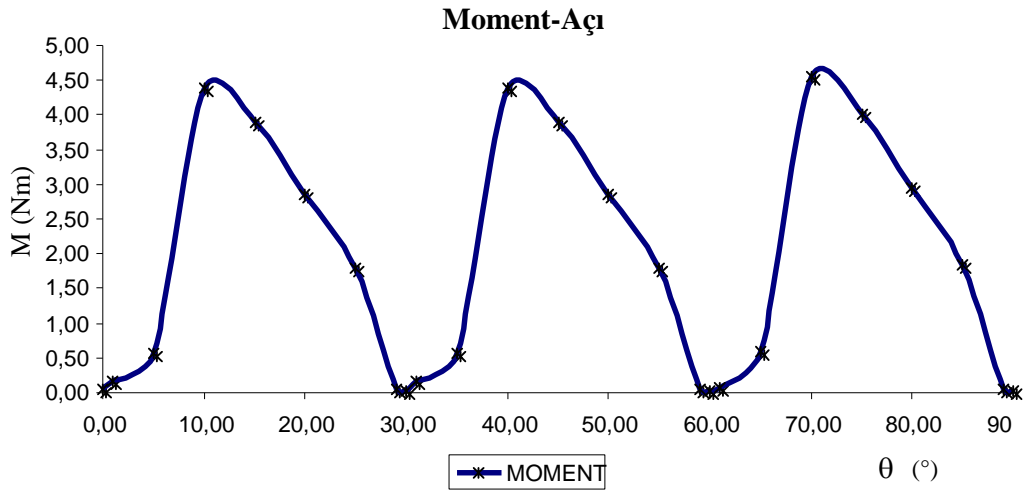
ekil 3.32'de grafiksel olarak gösterilen model ve deneysel çalışmaları arasındaki farkın ortalama hatası %8,32'dir.

ekil 3.34'de ise Maxwell yazılımı ile KKARM modeline farklı faz akımları uygulandığında, makina tarafından üretilen moment ve akı değerleri görülmektedir.

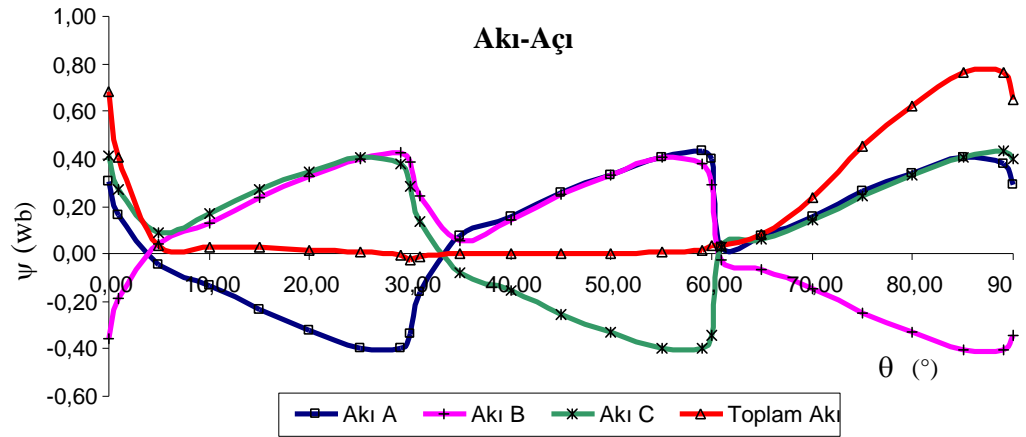
ekil 3.34.a'da KKARM modeline uygulanan akım ve motor pozisyonundaki değişimlere ait ekil gösterilmiştir, b ekinde ise, makina tarafından üretilen moment ve c ekinde ise, kutuplarda üretilen akı ve toplam akı gösterilmektedir.



(a)



(b)



(c)

ekil 3.34: KKARM modeline uygulana akım, üretilen moment ve akı de erleri.

4. KKARM'N N MOMENT DALGALILI I VE AZALTILMASI

KKARM'nin klasik ARM ile kıyaslandığında ve en büyük dezavantajı, denetimde yaşanan güçlükler ve moment dalgalılığı oranının yüksek olmasıdır. Moment dalgalılığının fazla olmasının nedeni, motorun çalışması prensibinden kaynaklanmaktadır. Üretilen momentin, fazların anahtarlama ve relüktans değişiminin doğrusal olmaması sebebiyle moment dalgalılığı fazladır ve denetim sorunları ortaya çıkmaktadır.

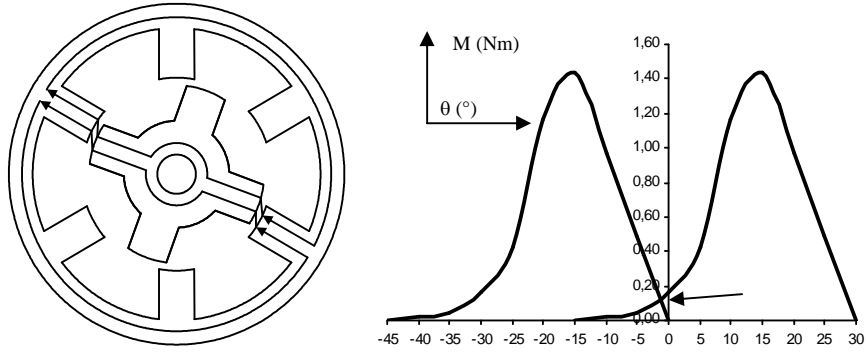
Üretilen momentteki dalgalılığı azaltmak için literatürden de görüldüğü gibi motorun geometrisinde çeşitli değişiklikler yapılmış, faz ve/veya kutup sayısı artırılmış ve iletme girme açısı ile ilgili çeşitli araştırmalar yapılmıştır.

Faz sayısının artırılması, sürücü sistemde maliyeti arttırmakta ve denetim güçlüklerini ortaya çıkarmaktadır. Faz sargılarının iletme girme açısının uygun şekilde denetimi ile moment dalgalanması belirli derecelere indirilebilir. Şekil 4.1'de iletme girme açısının tespiti görülmektedir. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi kullanılan makina 6/4 kutuplu olup adım açısı 30 derecedir. İletim açısının tespiti Sonlu Elemanlar Yöntemi ile elde edilen statik analiz moment değerlerinden kolaylıkla yapılabilmektedir. Denklem 4.1 ve 4.2'de SEY analizinden elde edilen moment değerleri, konum açısına (θ) bağlı bir fonksiyon olarak ifade edilebilir. Denklem 4.2'de ilave edilen 30° dereceli adım açısıdır. Aynı denklem birbirine eşitlenip (denklem 4.3) de iki kenarına θ olarak çözümlendiğinde, denklemin sağ ve sol tarafını birbirine eşit olmasını sağlayan θ dereceli en uygun iletme girme açısını vermektedir.

$$M_{faz1}(\theta) = f(\theta) \quad (4.1)$$

$$M_{faz2}(\theta + 30) = f(\theta + 30) \quad (4.2)$$

$$M_{faz1}(\theta) = M_{faz2}(\theta + 30) \quad (4.3)$$

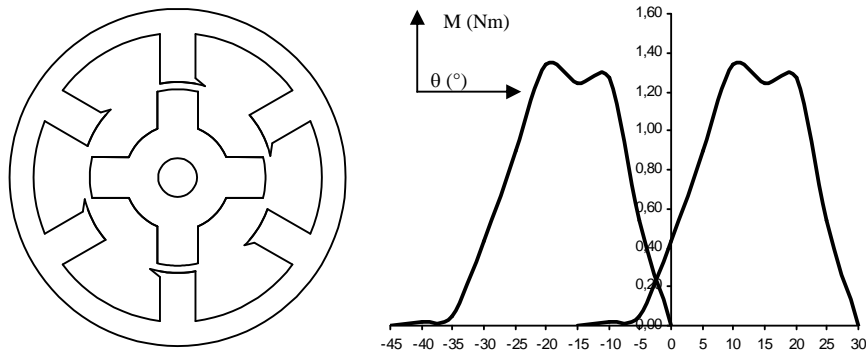


ekil 4.1: letime girme açısı.

Böylece fazların komütasyonundan kaynaklanan moment dalgalılığını azaltılmı olunur. Moment dalgalılığının azaltılabilmesi için, yapılan çalımalardan bir diğeri ise, makinanın kutup başlarının eğilendirilmesi ile ilgili olan çalımalardır.

Bu çalımlar sonucunda literatürde moment dalgalılığının %26.7 oranında azaltıldığı [22] görülmektedir.

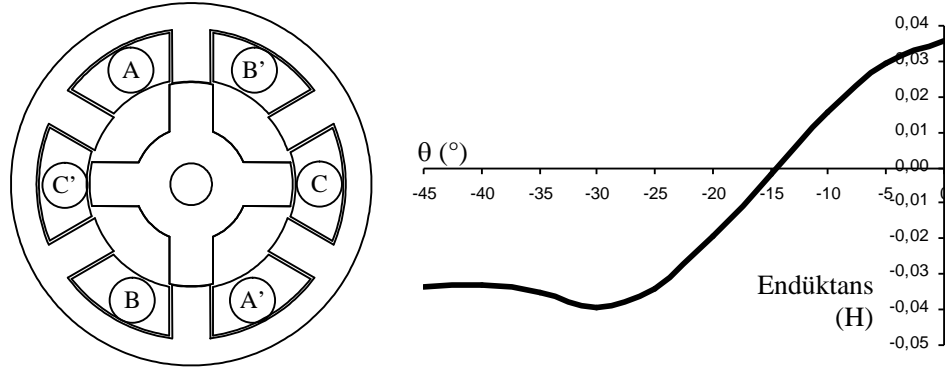
ekil 4.2’de kutup başlarında yapılan değişim ve moment düşüşü görülmektedir [19,20]. Geometri yapısındaki değişiklik ile hava aralığındaki relüktansın değişimi farklı bir eğri çizmekte ve moment üretimine doğrudan katkıda bulunan endüktans düşüşü de deşmektedir.



ekil 4.2: Kutup başlarının eğilendirilmesi ve moment düşüşü.

Moment dalgalılığının giderilmesi üzerine yapılan iki temel çalışmada, ARM’nin moment üretme kapasitesinin artırılması ile ilgili olarak çeşitli çalımlar yapılmıştır. Bunlardan en dikkat çeken ise ARM, sargılarının sökülerek uzun tam

adım sargı yapısının kullanılarak elde edilen KKARM'lerdir. Önceki bölümlerde de açıklandı ı gibi, KKARM ile üretilen momentin yaklaşık olarak %30 arttı ı buna paralel olarak moment dalgalılı ının da aynı oranda arttı ı literatürden görülmektedir [5]. ekil 4.3'de KKARM'nin yapısı ve kar ıt endüktans de i imi görülmektedir.



ekil 4.3: KKARM'nin yapısı ve kar ıt endüktans de i imi.

4.1. KKARM'nin Statik Analizi

KKARM ve ARM'nin statik analizini gerçekle tirmek için moment üretim ifadesi Denklem 4.4-4.7'den genelle tirilerek elde edilmektedir.

$$T = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{\partial L_a}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{\partial L_b}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{\partial L_c}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_a i_b \frac{\partial M_{ab}}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_b i_c \frac{\partial M_{bc}}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_c i_a \frac{\partial M_{ca}}{\partial \theta} \quad (4.4)$$

3 fazlı Klasik ve Kar ıt Kuplajlı ARM için genelle tirilmi moment e itli i Denklem 4.4'de görülmektedir. L_a, L_b ve L_c faz endüktanslarını, M_{ab}, M_{bc} ve M_{ca} kar ıt endüktansları ve θ rotor konum açısını ifade etmektedir. Burada faz endüktans de i imi sabit kabul edilirse,

$$T = \frac{1}{2} i_a i_b \frac{\partial M_{ab}}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_b i_c \frac{\partial M_{bc}}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_c i_a \frac{\partial M_{ca}}{\partial \theta} \quad (4.5)$$

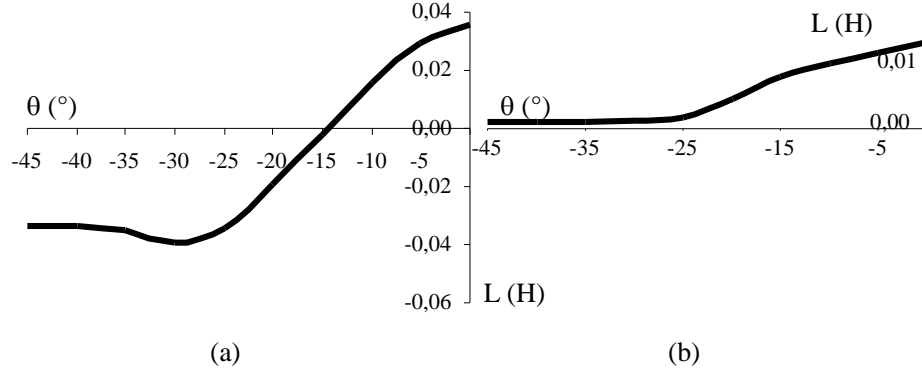
elde edilir. Yine aynı makine için, e zamanlı olarak sadece iki fazın iletimde oldu u dü ünülürse,

$$T = \frac{1}{2} i_a i_b \frac{\partial M_{ab}}{\partial \theta} \quad (4.6)$$

elde edilir.

$$T = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (4.7)$$

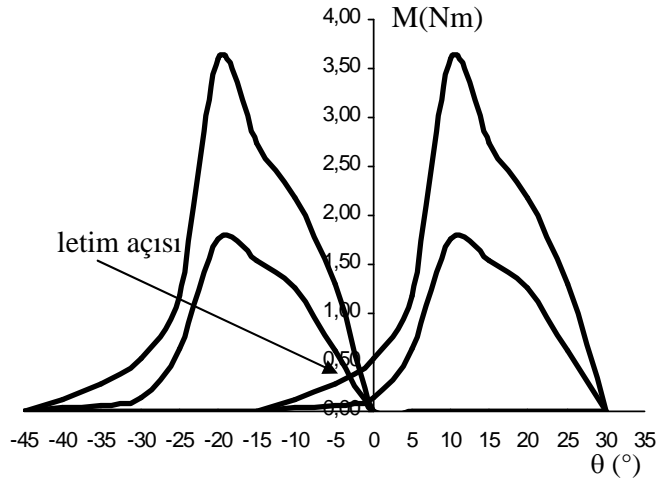
Denklem 4.6 ve 4.7 incelendi inde klasik ARM'de moment üretiminin sabit akımda endüktansın konuma ba lı olarak de i ti i, KKARM de ise sabit akımda kar ıt endüktansın rotor konumuna ba lı olarak de i ti i ekil 4.4'de görölmektedir.



ekil 4.4: a-Kar ıt endüktans ve b-endüktans de i im e rileri.

Genel olarak $\frac{\partial L}{\partial \theta}$ ve $\frac{\partial M}{\partial \theta}$ kar ıla tırıldı nda, $\frac{\partial M}{\partial \theta}$ 'nin artı mın dört kat daha fazla oldu u görölmektedir.

Sabit faz akımında üretilen moment ve minimum moment dalgalılı ı için gerekli olan iletim açısı ekil 4.5'da görölmektedir.



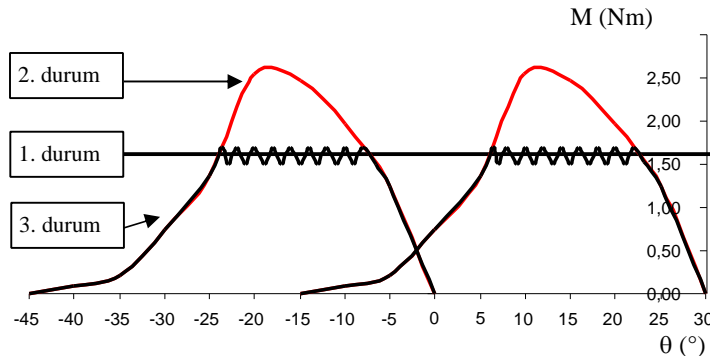
ekil 4.5: Sabit faz akımında üretilen moment.

Yapılan sonlu elemanlar analizinde kullanılan geometriye ba lı olarak, kullanılan

prototip KKARM'nin %14 daha fazla moment ürettiği ve moment dalgalanmasının %14 olarak gerçekleştiği görülmüştür. Üçüncü bölümde, ekil 3.24'te ARM ve KKARM'ye ait statik moment analizi sonuçları verilmiştir. Deneysel amaçla kullanılan makinenin nominal akımı 6A'dır. KKARM olarak makine sargıları yeniden sarıldığında, çekilen akım nominal akımın 0,56 katıdır. Bunun sebebi ise; makinenin ARM ve KKARM çalışma durumlarının ekleme güç kaybının gerçekleştiği noktada karşılaştırılabilirliği.

4.2. Moment Dalgalılı Kontrolü

Temel olarak moment dalgalılı kontrolü ekil 4.5'de görüldüğü gibi tetikleme açısının denetimi ile gerçekleştirilmektedir. ekil 4.6'de KKARM'nin moment denetimi görülmektedir.



ekil 4.6: KKARM'de moment denetimi.

ekil 4.6'de görüldüğü gibi en önemli problem momentin istenilen değerin üzerine çıktığında momentin denetlenmesinden ziyade, moment çökmelerinin minimize edilmesidir. Makine tarafından üretilen moment, talep edilen yük momenti ve referans hıza (w_{ref}) bağlı olarak meydana gelen $j \frac{\partial w}{\partial \theta}$ ve Bw olarak elde edilen toplam momentin üstüne çıkması referans akım değerini azaltarak, makine tarafından çekilen akımın aşılmaması için nominal değerlere indirilebilir. Fakat makinenin nominal akımda ürettiği moment optimal iletim açısının denetimi ile mümkün olmaktadır. ekil 4.6'de görüldüğü gibi, moment Denklem 4.6 ve 4.8 ile ifade edilmektedir.

$$T = T_L + J \frac{\partial w}{\partial \theta} + Bw \quad (4.8)$$

Bu iki moment ifadeleri birbirine e itlendi inde,

$$\frac{1}{2}i_a i_b \frac{\partial M_{ab}}{\partial \theta} = T_L + J \frac{\partial w}{\partial \theta} + Bw \quad (4.9)$$

Üç durum söz konusu olur. Bunlar;

Durum 1: $\frac{1}{2}i_a i_b \frac{\partial M_{ab}}{\partial \theta} = T_L + J \frac{\partial w}{\partial \theta} + Bw$, denkli in iki tarafının e it oldu u durumda, devreden çekilen akım “i” normal seviyededir.

Durum 2: $\frac{1}{2}i_a i_b \frac{\partial M_{ab}}{\partial \theta} > T_L + J \frac{\partial w}{\partial \theta} + Bw$, denkli in sol tarafının sa tarafından büyük oldu u durumda, devreden çekilen akım “i” yüksek seviyededir.

Durum 3: $\frac{1}{2}i_a i_b \frac{\partial M_{ab}}{\partial \theta} < T_L + J \frac{\partial w}{\partial \theta} + Bw$, denkli in sol tarafının sa tarafından küçük oldu u durumda, devreden çekilen akım “i” dü ük seviyededir.

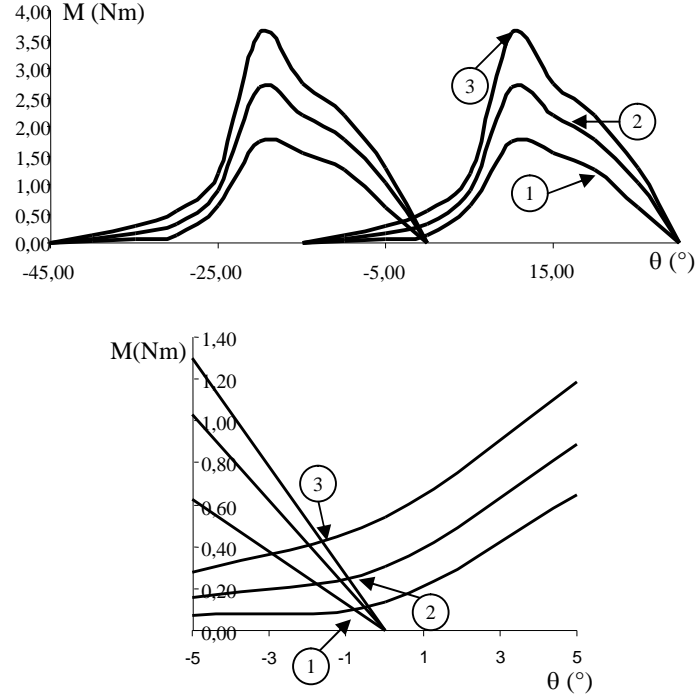
Üç durum ile ilgili olan bölgeler (2 ve 3) ekil 4.7’deki moment-açı grafi i üzerinde gösterilmi tir. Durum 2 gerçekte ti inde ARM’yi süren sistem faz akımlarını keserek üretilen momenti dengelemeye çalı maktadır. Makina nominal güçünde çalı rken, Durum 3 gerçekte ir ise sürücü sistem güç anahtarlarını momentteki çökmenin daha fazla artmaması için sürekli devrede tutar.

Moment çökmelerinin azaltılması için yapılan çalı malarda, kutup ba larının yapısının de i tirilmesi veya optimal iletim açısı üzerinde durulmaktadır.

4.3. KKARM için Moment Denetiminin Gerilim Kontrollü Kaynak ile Gerçekle tirilmesi

Moment dalgalılı ı bölüm (4.2)’de üç duruma ayrılarak incelenmi tir. Genel olarak en önemli problem üçüncü durumda meydana gelmektedir. Temel sorun referans denetleyici akımın ebeke akımından yüksek çıkması, kayna ın bu farkı kar ılayamaması ile moment çökmelerinin giderilememesidir. Bu sebepten dolayı, üçüncü durumda kaynak kapasitesine müdahale etmeden KKARM tarafından çekilen

akımın artırılması ve moment çökmelerinin giderilmesi mümkün görülmektedir. Moment çökmesinin meydana geldiği açı değerlerinde çökmenin makul değerlere çekilebilmesi için yedek güç kaynağının kullanılması, yapılan tez çalışmasında önerilmiştir ve deneysel düzenekte kullanılmıştır.

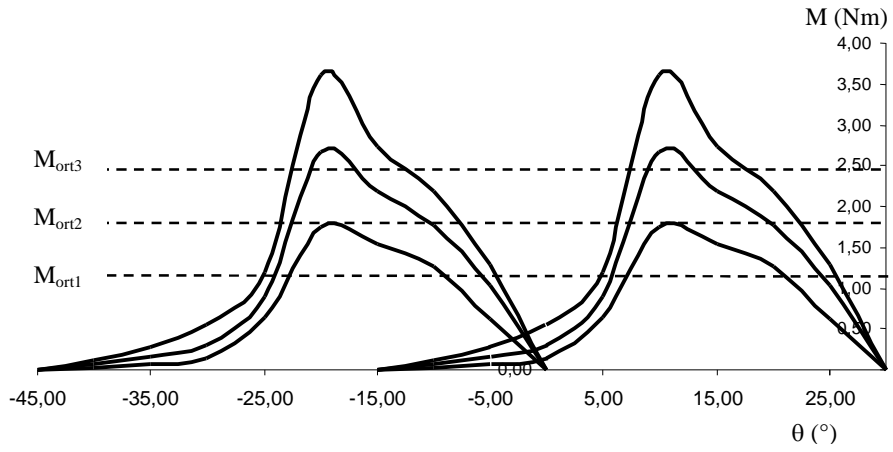


ekil 4.7: KKARM'nin optimal iletim açısı.

Kullanılan ilave kaynağın gücünün seçiminde KKARM'ye verebileceği maksimum akım motorda izolasyon problemleri meydana getirmeyecek şekilde seçilmelidir.

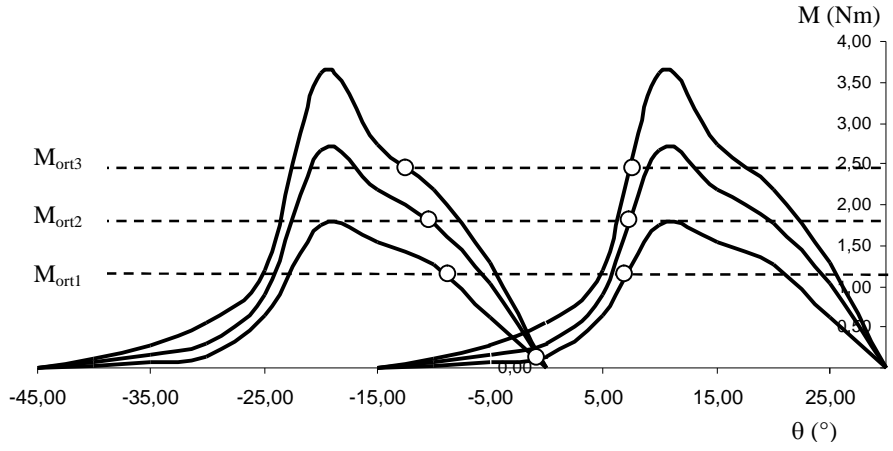
ekil 4.7'de KKARM'nin optimal iletim açısı görülmektedir. 1,2 ve 3 noktalarında sistemden çekilen akım i , $3/2i$, ve $2i$ olarak artırılması momentteki çökmede belirli miktarda iyileşme göstermiştir.

ekil 4.8'de farklı faz akımlarında üretilen moment ve ortalama moment eğrileri görülmektedir. Moment eğrilerinin ortalama olarak verebilecekleri değerler pozisyon eksenine paralel olarak çizilen değerler ile gösterilmiştir. Bu doğrular ile moment eğrilerinin kesiştiği noktaların pozisyon eksenindeki iz düşümü, ekstra gücün devreye alınma ve devreden çıkartılma açılarını belirlemektedir.



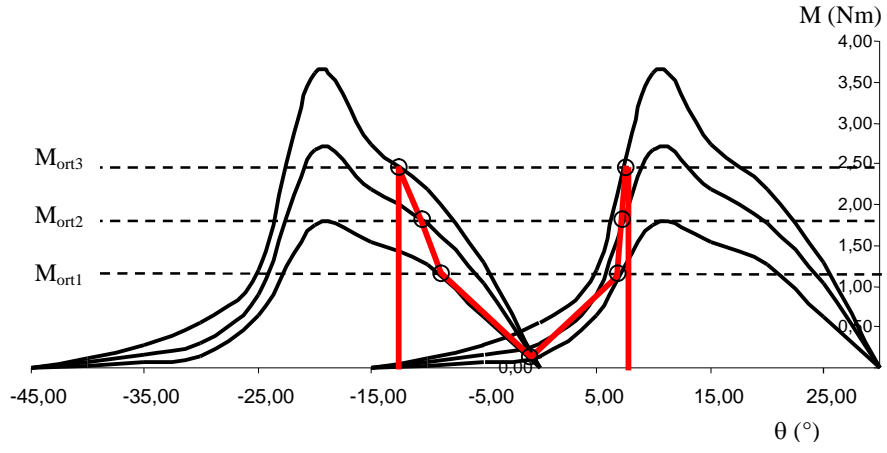
ekil 4.8: Farklı faz akımlarında üretilen moment ve ortalama moment.

ekil 4.8’de görülen ortalama moment ile statik moment e rilerinin kesi ti i noktalar birle ti inde, ekil 4.9 elde edilir.

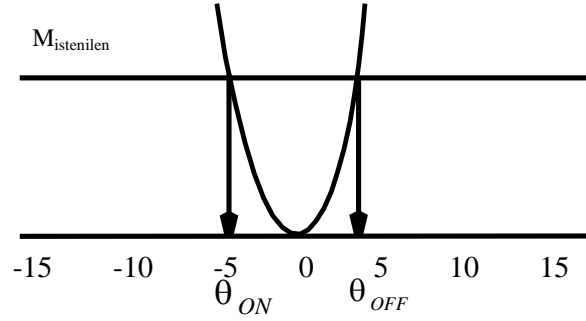


ekil 4.9: Statik moment e rileri ile ortalama moment e rilerinin kesi imi.

ekil 4.10’da görüldü ü gibi, kesi im noktalarının birle imi “M” harfine benzer, bundan dolayı çalı mada bu e ri “M” e risi olarak isimlendirilecektir. “M” e risi Fourier serisi olarak ifade edildi inde, statik analizi yapılmamı ara moment e rilerinin de erleri de elde edilmi olur.



ekil 4.10: “M” E risinin ortalama turulması.



ekil 4.11: “M” E risi.

ekil 4.11’de “M” e risi ve yedek güç kaynağının devreye gireceği θ_{ON} ve θ_{OFF} açı değerleri görülmektedir. Denklem 4.10’da “M” E risinin Fourier açılımı görülmektedir.

$$f(M) = a_0 + a_1 \cos(TW) + b_1 \sin(TW) \quad (4.10)$$

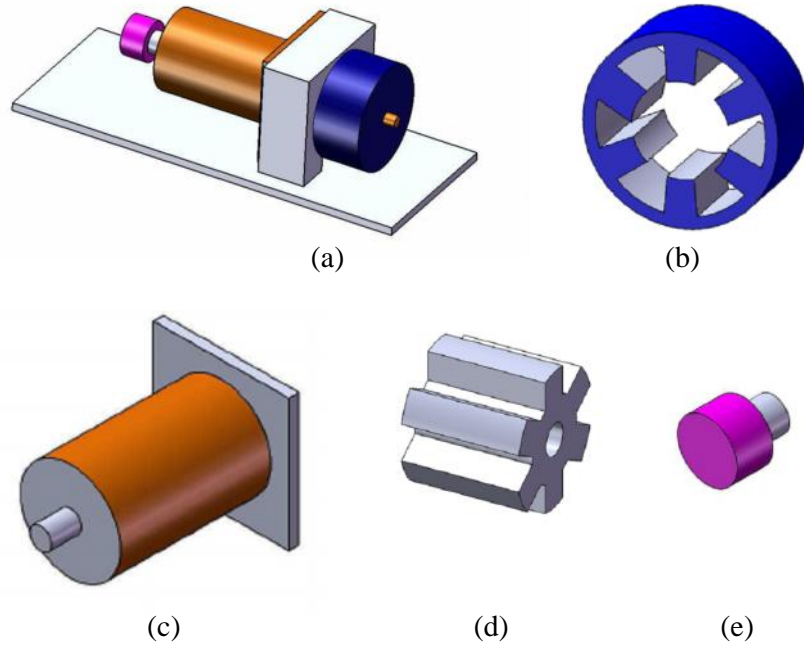
Moment dalgalılığının azaltılması için kullanılan ilave kaynak, devreye DA hat Boost dönüştürücü ile alınabilmektedir.

5. DENEYSEL ÇALI MA

Deneysel çalı ma için hazırlanan test standı, tez kapsamında yapılacak olan çalı malar için iki ayrı kısımda hazırlanmı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. İlk kısımda, mekanik düzenek ve bile enleri, ikinci kısımda ise elektronik katı ve bile enleri yer almaktadır.

5.1. Mekanik Düzenek

Deneysel düzene in yapılacak olan test çalı malarına uygun hale getirebilmek amacıyla metal dı standı bu çalı ma için tasarlanmı ve imal edilmiştir. Düzene in oturacağı kaide ise hafif ve kolay i lenabilirlik gereksinimleri sebebiyle alüminyum ala ım dayanıklı malzemeden imal edilmiştir. Tasarlanan sistemin üç boyutlu çizimleri ekil 5.1’de görülmektedir.



ekil 5.1: Tasarlanan deneysel düzene in bile enlerinin üç boyutlu görünümü.

ekil 5.1.a'da deneysel düzene in mekanik aksam, b'de KKARM statoru, c'de daimi mıknatıslı yük generatörü, d'de KKARM rotoru, e'de ise, rotor konumunu tespit etmek için kullanılan enkoderin üç boyutlu ekli görülmektedir. Tasarlanmı olan deneysel düzene in mekanik parçaları ekil 5.2'de gösterilmektedir.



(a)

(b)



(c)



(d)

ekil 5.2: Tasarlanan deneysel düzene in üç boyutlu görünüümü.

ekil 5.2.a'da rotor, b'de stator ve sargıları, c'de daimi mıknatıslı generatör ve

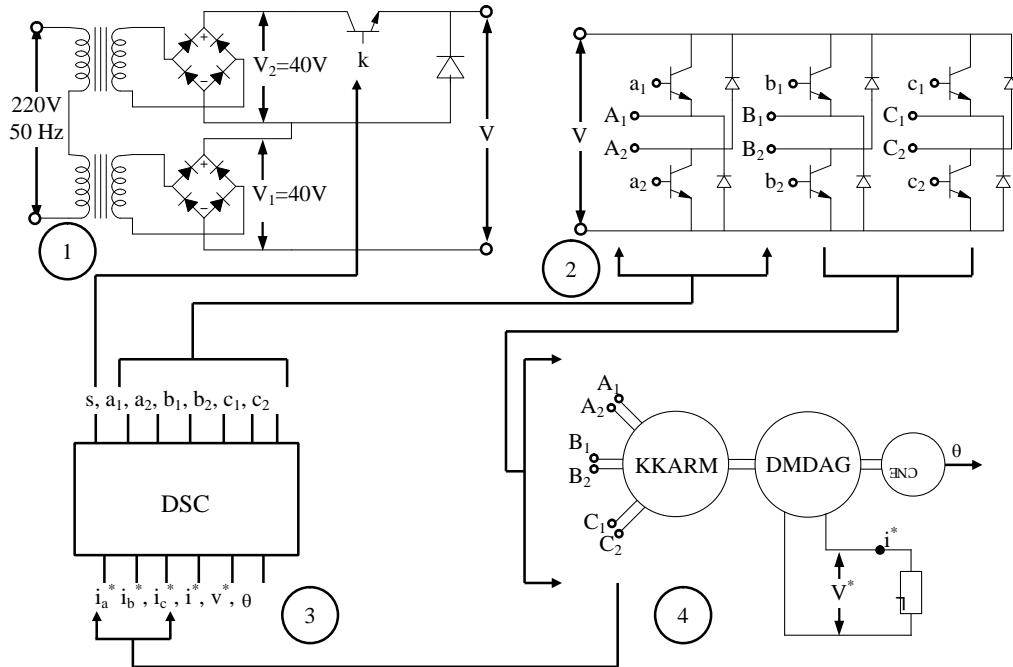
enkoder, d'de ise deneysel düzene in genel görünümü görülmektedir. ekil 5.3'de ise KKARM için hazırlanan stator faz sargıları görülmektedir.



ekil 5.3: KKARM faz sargıları.

5.2. Sürücü Sistem

Deneysel düzenek dört ana parçadan meydana gelmektedir ve ekil 5.4'de düzene in temel bile enleri görülmektedir.

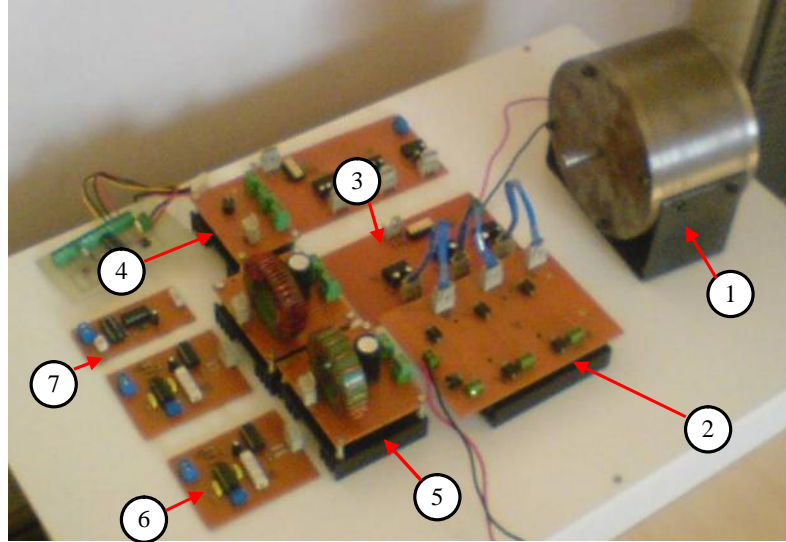


ekil 5.4: Sürücü sistemin blok eması.

lk bile ende güç kayna 1 bulunmakta olup kaynak kapasitesi 1500VA'dir ve iki adet izoleli 40 V DA kaynak bulunmaktadır. Bu iki kaynak birbirinden ba ımsızdır. lk

kaynak sürekli devrede kalır iken, ikinci kaynak ise moment çökmelerinin olduğu noktalarda devreye k anahtarı yardımı ile alınır. Bile en birde görülen yapı literatürde DA-Hat Boost Dönü türücü diye adlandırılır ve bölüm 2.2.2’de detaylı olarak anlatılmıştır. İkinci bile ende ise, KKARM’yi sürmek amacıyla kullanılan asimetrik H tipi köprü dönü türücü yapısı yer almaktadır. Üçüncü bile ende ise, sürücü sistemi denetlemek amacıyla kullanılan mikro denetleyici (dsPIC 30F4011) yer almaktadır. Blok temasından da görüldüğü gibi denetleyiciye altı sinyal (akım, gerilim ve pozisyon) girişi olurken, yedi sinyal çıkışı (k, anahtarlama çıkışları) olmaktadır. Dördüncü bile ende ise, birbirine akuplenmiş KKARM ve daimi mıknatıslı doğru akım genaratörü (DMDAG) yer almaktadır.

ekil 5.5 ve 5.6’de, ekil 5.2’de blok teması verilmiş olan sürücü sisteme ait elektronik devreler görülmektedir.



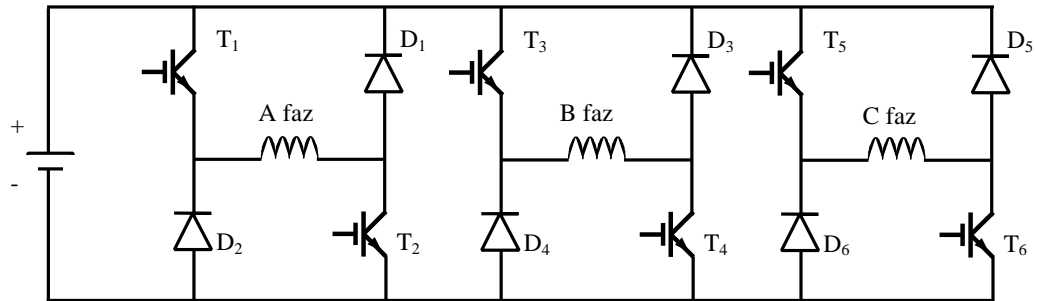
ekil 5.5:Sürücü sisteme ait elektronik bile enler. 1) KKARM, 2) KKARM güç katı, 3) sürücü kartı, 4) DA hat yükseltici katı, 5) Buck dönü türücü kartı, 6) sabit DGA (20 KHz) sürücü kartı, 7) DA hat yükseltici sürücü kartı.



ekil 5.6: KKARM'nin test düzene i.

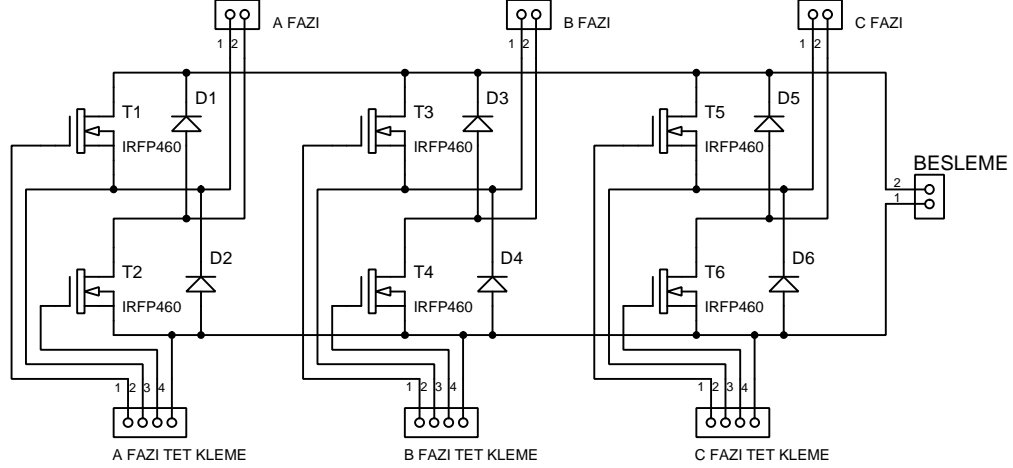
5.2.1. KKARM güç katı

KKARM güç katını oluşturmak için asimetrik H tipi köprü dönüştürücü kullanılmı olup üç çalı ma durumu vardır. Pozitif gerilim döngüsünde, faz sargısı anahtarlarının her ikisi de iletimdedir. Örne in Faz 1 için T_1 ve T_2 aynı anda iletimdedir ve sargıdaki akım hızlı bir şekilde artar. Sıfır gerilim döngüsünde, sadece bir anahtar iletimdedir ve akım yolunu bir anahtar ve bir diyot üzerinden tamamlar (T_1 kesimde), faz sargısındaki akım T_2 ve D_2 üzerinden akmaya devam eder. Negatif gerilim döngüsünde ise, her iki anahtar da kapalıdır ve sargı üzerinde birikmiş enerji diyotlar üzerinden kaynağa geri yollanır (D_1, D_2). ekil 5.7'da üç fazlı asimetrik H tipi köprü dönüştürücü görülmektedir [33].



ekil 5.7: Üç fazlı asimetrik H tipi köprü dönüştürücü.

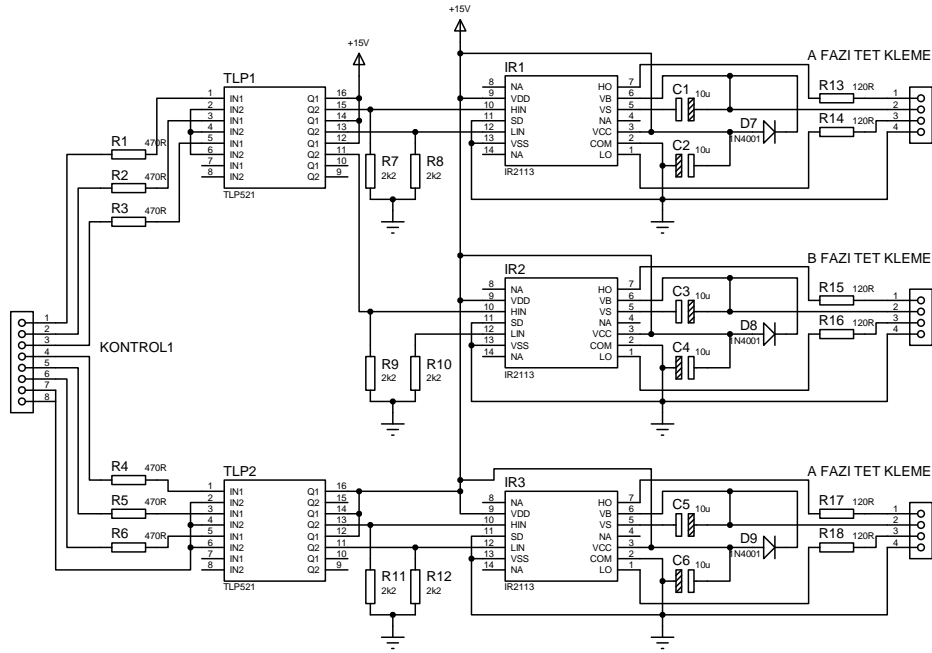
ekil 5.8’de asimetrik köprü KKARM güç katı görülmektedir. Devrede anahtarlama elemanı olarak nominal gerilimi 500V ve nominal akımı ise 28 A olan IRFP460 MOSFET kullanılmı tır.



ekil 5.8: KKARM güç katı devre eması.

5.2.3. Sürücü Katı

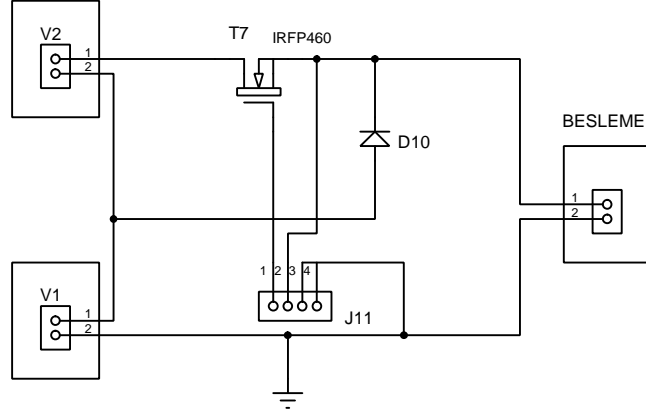
ekil 5.9’da sürücü katı devre eması görülmektedir. KKARM güç katını sürmek için her bir kola (high ve low side) bir adet IR2113 MOSFET sürücü kullanılmı tır. DSP ile güç katı arasındaki izolasyon TLP521 optokuplör ile sa lanmaktadır.



ekil 5.9: Sürücü katı devre eması.

5.2.4. DA Hat Yükseltici Katı

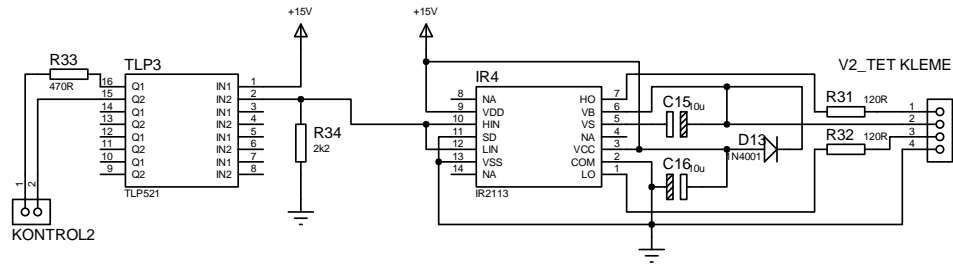
DA hat Boost kaynak mimarisinde, Q7 anahtarının ilettime girmesi ile seri ba lı iki kaynak yapısını meydana getirir. Böylece, iki seviyeli bir DA gerilim elde edilmi olunur. ekil 5.10'de DA hat yükseltici katı devre eması görölmektedir.



ekil 5. 10: DA hat yükseltici devre eması.

5.2.5. DA Hat Yükseltici Sürücü Katı

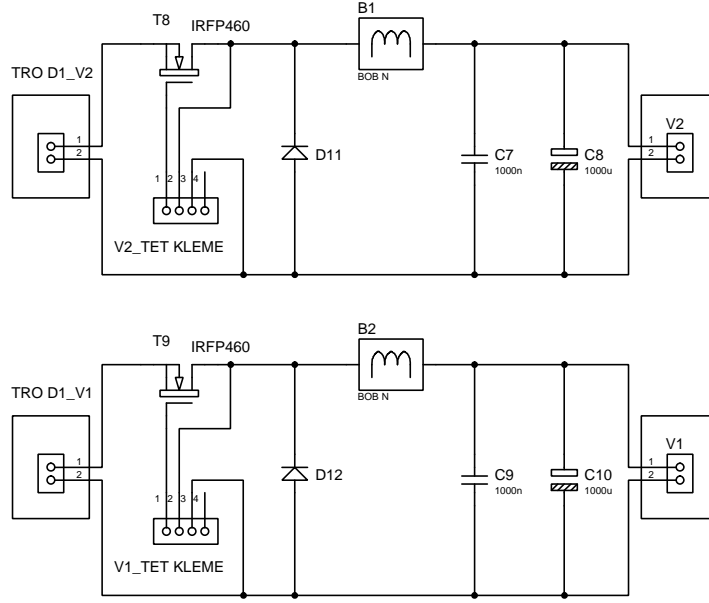
ekil 5.11' de DA hat yükseltici sürücü devre eması görölmektedir. Bu bile en gerilim seviyesinin DSP'den alınan sonuçlara ba lı olarak yükseltilmesi için kullanılan arayüz kartını olu turur.



ekil 5.11: DA hat yükseltici sürücü devre eması.

5.2.6. Buck Dönü türücü Katı

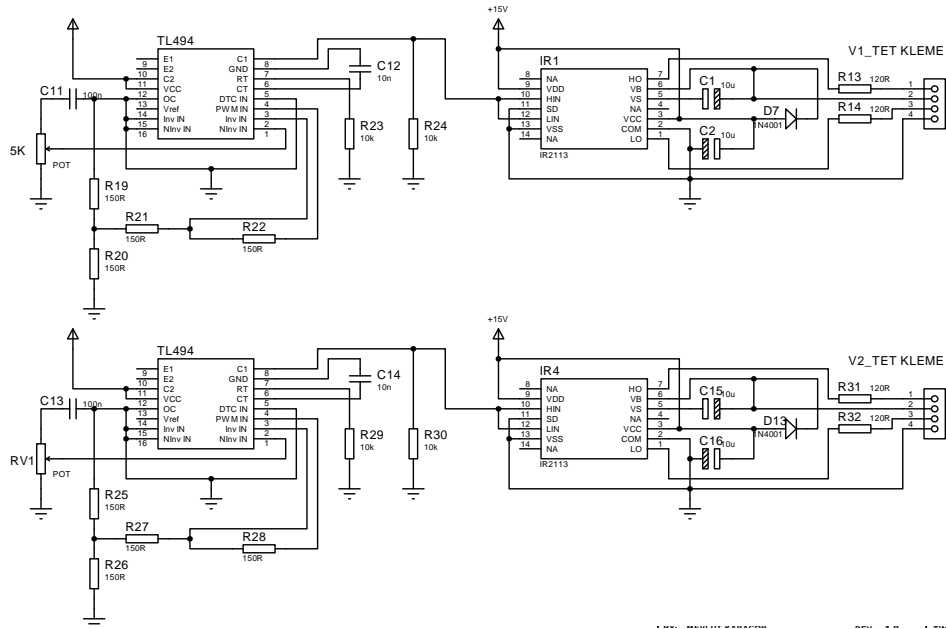
ekil 5.12'de Buck dönü türücü katı görölmektedir. ekilden de anla ılaca ı gibi ba ımsız iki adet Buck dönü türücü kullanılmı tır.



ekil 5.12: Buck yükseltici devre eması.

5.2.7. Darbe Genlik Ayarı Sinyal Üretici Katı

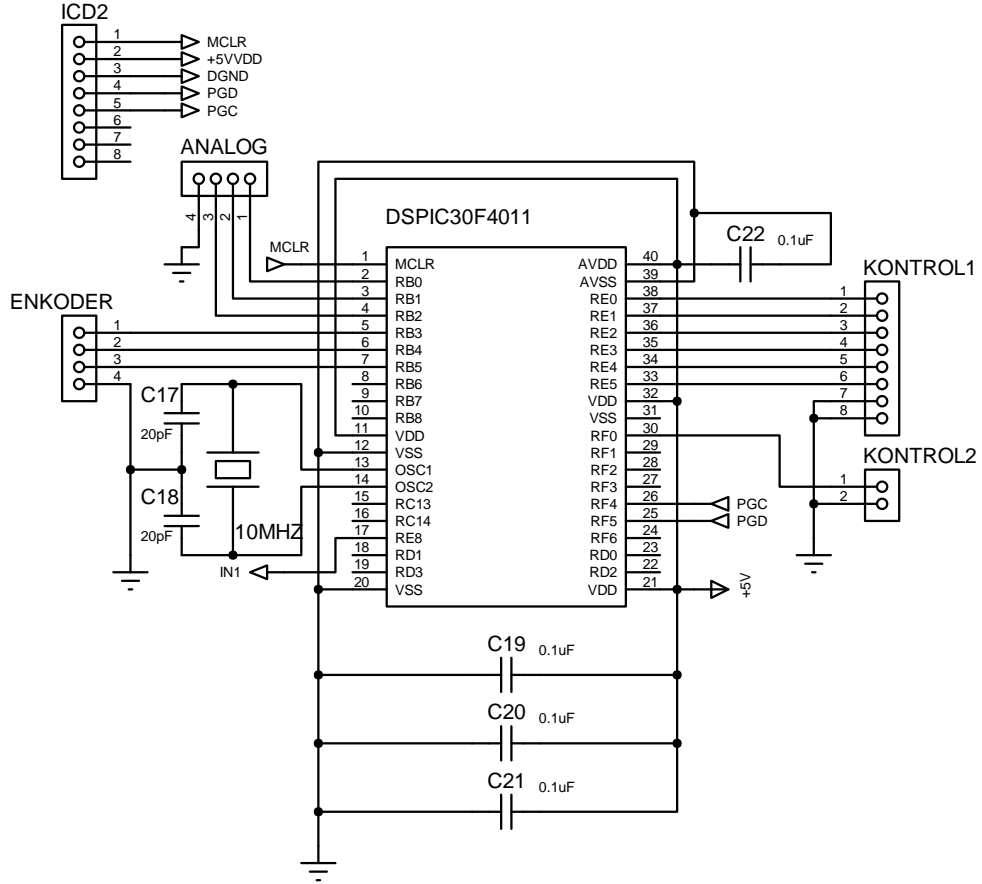
ekil 5.13'de Darbe Genlik Ayarı (DGA) sinyal üretici katı devre eması görülmektedir. DGA sinyalini üretebilmek için TL494 DGA entegresi kullanılmış olup 20 KHz de sinyal elde edilmiştir.



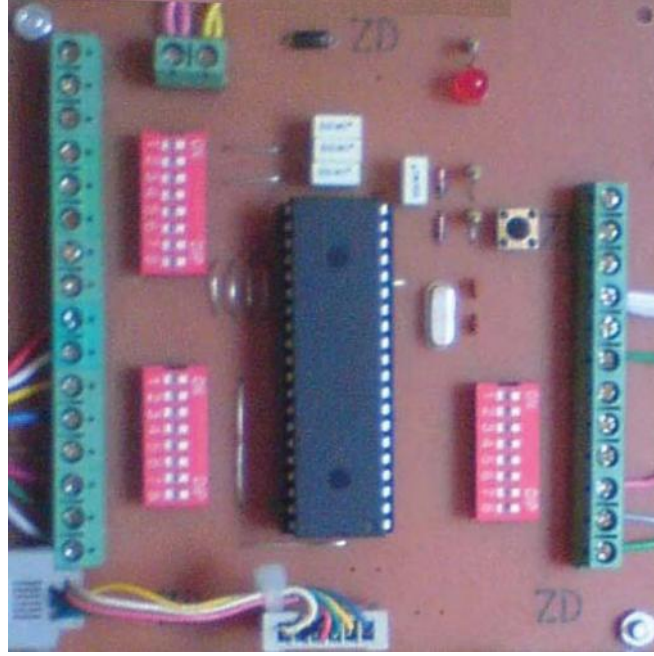
ekil 5.13: DGA sinyal üretici katı devre eması.

5.2.8. DSP Denetleyici Kartı

ekil 5.14’de dsPIC denetleyici devre eması ve ekil 5.15’de ise dsPIC denetleyici kartı görülmektedir. ekilde de görüldü ü üzere KKARM’yi denetlemek için dsPIC 30F4011 i lemci kullanılmı tır.



ekil 5.14: dsPIC denetleyici devre eması.



ekil 5.15: dsPIC denetleyici baskı kartı.

5.3. Ölçme Ara Birimleri

Bundan önceki kısımlarda, mekanik bilemler ve sürücü sistem bilemleri açıklanmış olup, bu kısımda ise, ölçme ara birimleri tanıtılacaktır.

5.3.1. Rotor konumunun enkoder ile ölçülmesi

KKARM'nin düzgün bir moment üretebilmesi için rotor konumunun bilinmesi gerekmektedir. Bu sebepten dolayı KKARM miline NEMICON marka her turda 500 darbe üreten enkoder monte edilmiştir. Kullanılan enkoder 4,75-30 volt gibi geniş besleme aralığında çalışabilmektedir. Bu özelliği kullanılan DSP açısından oldukça üstünlük sağlamaktadır. Kullanılan DSP'nin giriş sinyal gerilimi 5 voltur. Bu da tasarlanan DSP kartının pozisyonu herhangi bir ara dönüştürücü devre kullanmadan okuyabilmesini sağlamaktadır. ekil 5.16'da ise deneysel düzenekte kullanılan enkoder görülmektedir.



ekil 5.16: NEMICON NOC-S500MWT enkoder.

KKARM'yi denetlemek amacıyla kullanılan DSP Microchip firmasının üretti i dsPIC 30F4011 olup saniyede 30 milyon komut i leme, altı DGA çıkı ı ve on kanal analog veri okuma gibi motor denetimi için özelle tirilmi bir mimariye sahiptir. Kullanılan dsPIC aynı zamanda enkoder arayüzünde sahiptir. dsPIC, 2x ve 4x okuma özelli ine ba lı olarak ayarlanabilir. Böylece enkoderden alınan verilere ba lı olarak rotorun pozisyonu (360/2000) 0.18 derece hassasiyetle okunabilir.

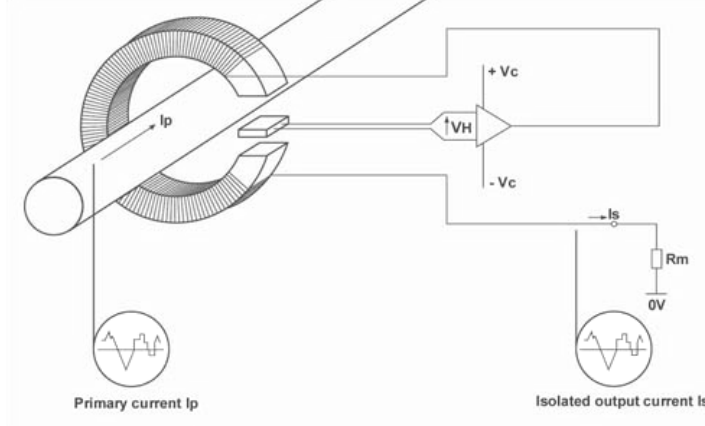
5.3.2. Akım ölçme katı

KKARM'nin laboratuvar düzene inde yük ve filtre akımlarının ölçülmesinde elektrik sisteminden galvanik olarak yalıtım sa layan LEM LA 25-P (25A, 1:1000 dönü türme oranı) hall etkili akım sensörleri kullanılmaktadır. Hassas ölçme, çok iyi do rusallık, geni frekans aralı ı (DA-200 Khz), ideal cevap zamanı, dü ük sıcaklık sapması gibi teknik özelliklerinden dolayı güç elektroni i uygulamalarında tercih edilmektedir.

LEM akım sensörü, içerde i hall levhası sayesinde akımı algılar. Hall levhasının uçlarında, manyetik alanın yönüne ve iddetine ba lı olarak bir gerilim meydana gelir. Manyetik alan dik ve algılayıcı düzlemden dı arı do ru uygulandı ında, çıkı gerilimi algılayıcıdaki manyetik yo nlu unun genli i ile orantılı miktarda artar.

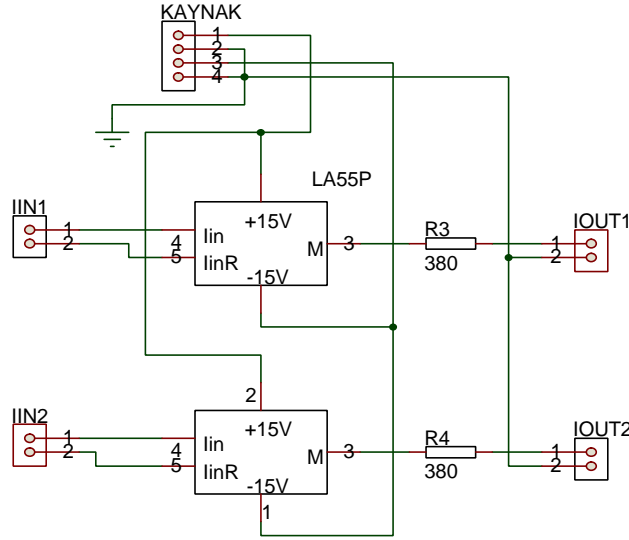
ekil 5.17'de LEM akım sensörü çalı ma prensibi devre ekli görülmektedir. Primer akımı (I_p) tarafından üretilen manyetik alan akısı, sekonder sargıdan geçen akım tarafından üretilen destekleyici akı ile dengelenir. Bir hall etkisi levhası ve ilgili

elektronik devre sekonder akımını üretmek için kullanılır.



ekil 5.17: LEM akım sensörü çalışma prensibi devre ekli [50].

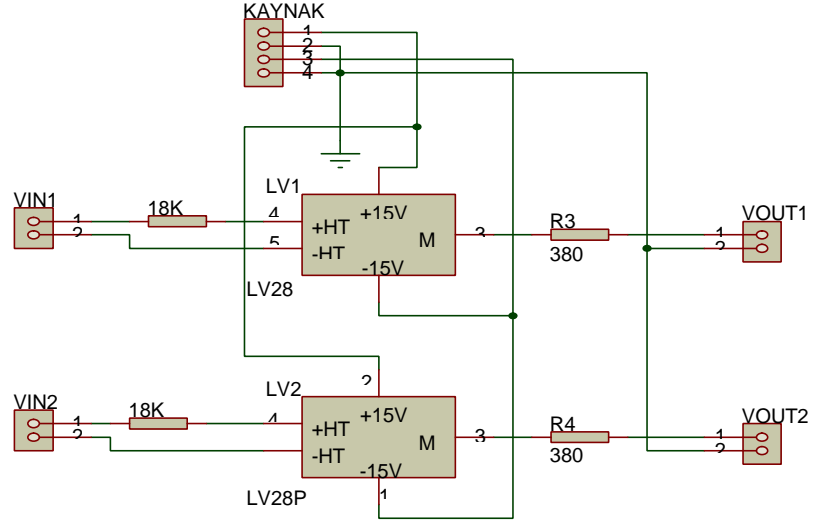
Bu akım, örnekleme direnci (R_m) üzerinde I_p akımı ile orantılı gerilim düşümü olarak izoleli akım ölçümü yapılmaktadır. ekil 5.18'de akım ölçümü için kullanılan ölçüm katı devre masası görülmektedir.



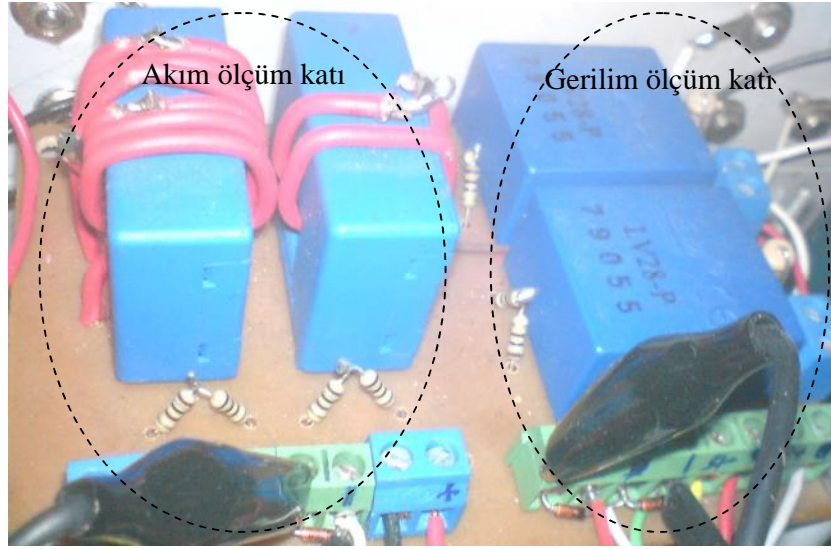
ekil 5.18: Akım ölçüm katı devre masası.

5.3.3. Gerilim ölçüm katı

ekil 5.19'de sürücü kısmında gerilim ölçüme için kullanılan ölçüm katı devre masası görülmektedir. ekil 5.20'da LEM akım ve gerilim algılayıcı kullanılarak gerçekleştirilen akım ve gerilim ölçüm katı fotoğrafı görülmektedir [50].



ekil 5.19: KKARM gerilim ölçüm katı.



ekil 5.20: KKARM akım ve gerilim ölçüm katı foto rafı.

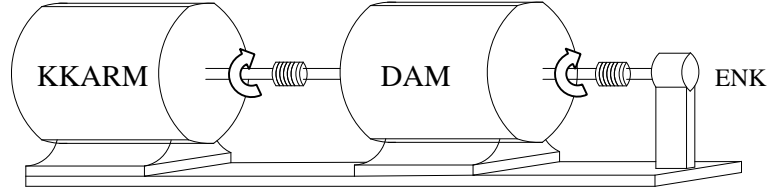
5.4. Mekanik Momentin Hesaplanması

KKARM tarafından üretilen mekanik momentin hesaplanması i lemini gerçeikle tirmeden önce sistem mekanik kayıplarının tespit edilmesi gerekmektedir. Sistem mekanik kayıplarının tespiti için a a ıda tanımlanan i lemler gerçeikle tirilmi tir.

5.4.1. Mekanik kayıpların tespiti

Deneysel düzeneğin mekanik kayıplarını, KKARM ve Doğru Akım Makinasının (DAM) akuplenmesi ile oluşturulmuş olan sistemin, sürtünme ve vantilasyon kayıpları oluşturmaktadır.

Bu kayıplar, bir dizi basit bir deneysel yaklaşımla tespit edilmiştir. Buna göre ilk olarak ekil 5.21’de prensip şeması verilmiş olan deneysel düzenek kurulmuştur.



ekil 5.21: Deneysel düzenek.

5.4.1.1. DAM'nın motor olarak çalıştırılması

Motor çalışırken esnasında, uygulanan gerilim ve motor tarafından çekilen akımlar kaydedilir.

Makinanın enerjisi kesildikten sonra sargı direnci ölçülür. ekil 5.22’de deneysel düzenekte kullanılan DAM’nın prensip şeması ve temel elektriksel modeli görülmektedir. ekil 5.22’de görüldüğü gibi, motora uygulanan gerilim (denklem 5.1)

$$VI = P_{Kyp} + e_z \quad (5.1)$$

$$VI = P_{Kyp} + I^2 R_S + P_{Mek} \quad (5.2)$$

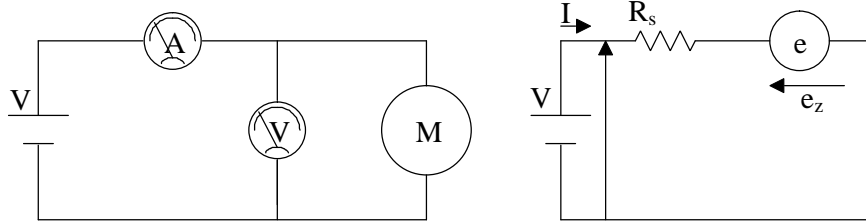
P_{Kyp} sürtünme, vantilasyon ve aktarma organları (kaplinler) sebebiyle meydana gelen sistemin kayıplarını (joule kayıpları dışında), R_S sargı direncini ve P_{Mek} mekanik gücü ifade etmektedir. Test işlemleri mekanik yükün sıfır olduğu durumda gerçekleştirildiğinden, $P_{Mek}=0$ ’dır. Bu sebepten denklem 5.2’de yeniden düzenlenirse,

$$VI = P_{Kyp} + I^2 R_S \quad (5.3)$$

Denklem 5.3 elde edilmiş olur. Sistem kayıpları (P_{kyp}) ve DAM tarafından üretilen zıt emk (e_z) denklem 5.4 ve 5.5'den elde edilebilir.

$$P_{kyp} = VI - I^2 R_s \quad (5.4)$$

$$e_z = V - IR_s \quad (5.5)$$



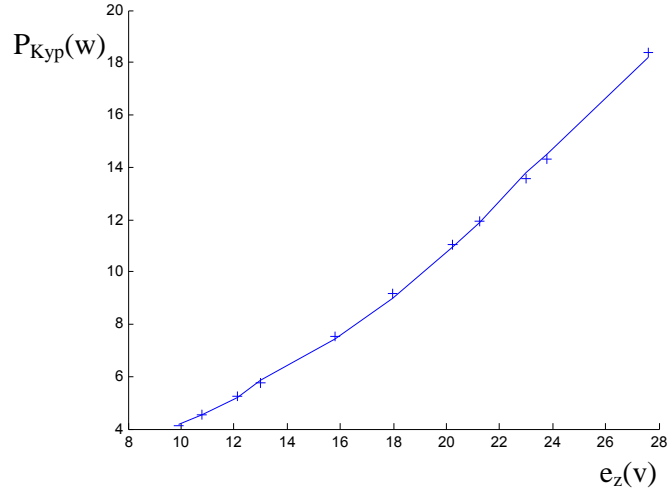
ekil 5.22: DAM'ın prensip ba lantı eması ve temel elektriksel modeli.

Motor olarak çalıştırma sonucunda ölçülen akım ve gerilim değerleri ayrıca denklem 5.4 ve 5.5'den elde edilen zıt emk ve kayıp güç değerleri tablo 5.1'de verilmiştir. Kayıpların, önceden ölçülmüş gerilim ve akım değerlerindeki değerler içinde bulunabilmesi için, zıt emk ile kayıplar arasındaki ilişki "Matlab Cftool" kullanılarak deneysel uydurma metodu ile fonksiyon haline getirilmiş ve denklem 5.6'da verilmiştir. p_1 , p_2 ve p_3 fonksiyon sabitleri olup sırasıyla 0.01891, 0.09829 ve 1.275 sabitlerin değerleridir. ekil 5.23'de sistem genel mekanik kayıplarının değeri zıt emk'ya bağlı olarak değeri görülmektedir.

$$P_{kyp} = p_1 e_z^2 + p_2 e_z + p_3, \quad (5.6)$$

Tablo 5.1: Deneysel ve hesaplanan sonuçlar.

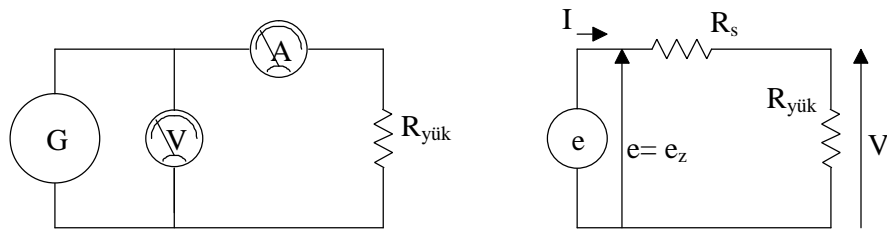
Örnek	I	V	Hesaplanan	Ez	Pkayıp
1	0,42	10,4		10,4	4,15632
2	0,42	11,3		11,3	4,53432
3	0,43	12,64		12,64	5,21332
4	0,45	13,55		13,55	5,8545
5	0,47	16,36		16,36	7,42412
6	0,5	18,58		18,58	8,99
7	0,54	20,9		20,9	10,93608
8	0,56	21,93		21,93	11,90448
9	0,6	23,74		23,74	13,812
10	0,61	24,53		24,53	14,51678
11	0,66	28,39	28,39	18,21468	



ekil 5.23: Sistem kayıpları ile zıt emk arasındaki ilişki.

5.4.1.2. DAM'nın generatör olarak çalıştırılması

Do ru akım makinasının generatör olarak çalıştırılması esnasında giriş mil gücünü P_G , ve mil momentini M_{mek} , hesaplamak için denklemler 5.7-5.9'daki ifadeler kullanılmaktadır. ekil 5.24'de generatör durumunda çalıştırılan DAM'ın temel elektriksel modeli görülmektedir.



ekil 5.24: Generatör çalıştırma durumundaki temel elektriksel model.

Denklemler 5.7'de generatörde indüklenen emk'nın hesaplanması, denklemler 5.8'de ise kayıp güç ve indüklenen emk ilişkilerinden faydalanılarak mekanik gücün elde edilmesi gösterilmiştir. Mekanik gücünden mil momentinin (M_{mil}) elde edilmesi denklemler 5.9'da gösterilmiştir.

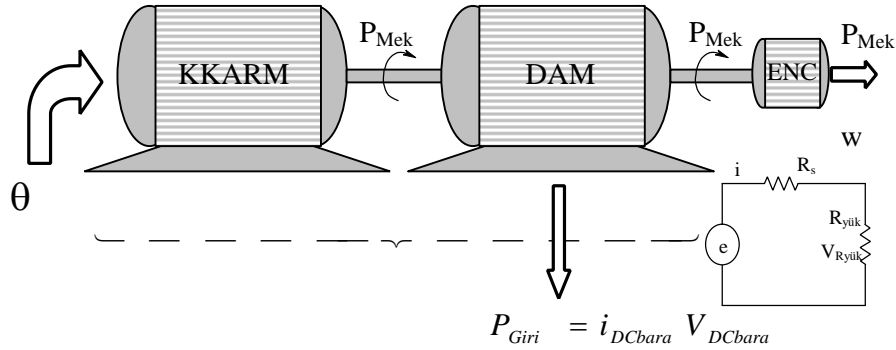
$$e = iR_s + iR_{yük} \quad (5.7)$$

$$P_{mek} = P_{kyp}(e) + i^2 R_s + i^2 R_{yük} + i V_{yük} \quad (5.8)$$

$$M_{mil} = \frac{P_{mek}}{\omega} = \frac{P_{mek}}{2\pi \left(\frac{n}{60}\right)} (Nm) \quad (5.9)$$

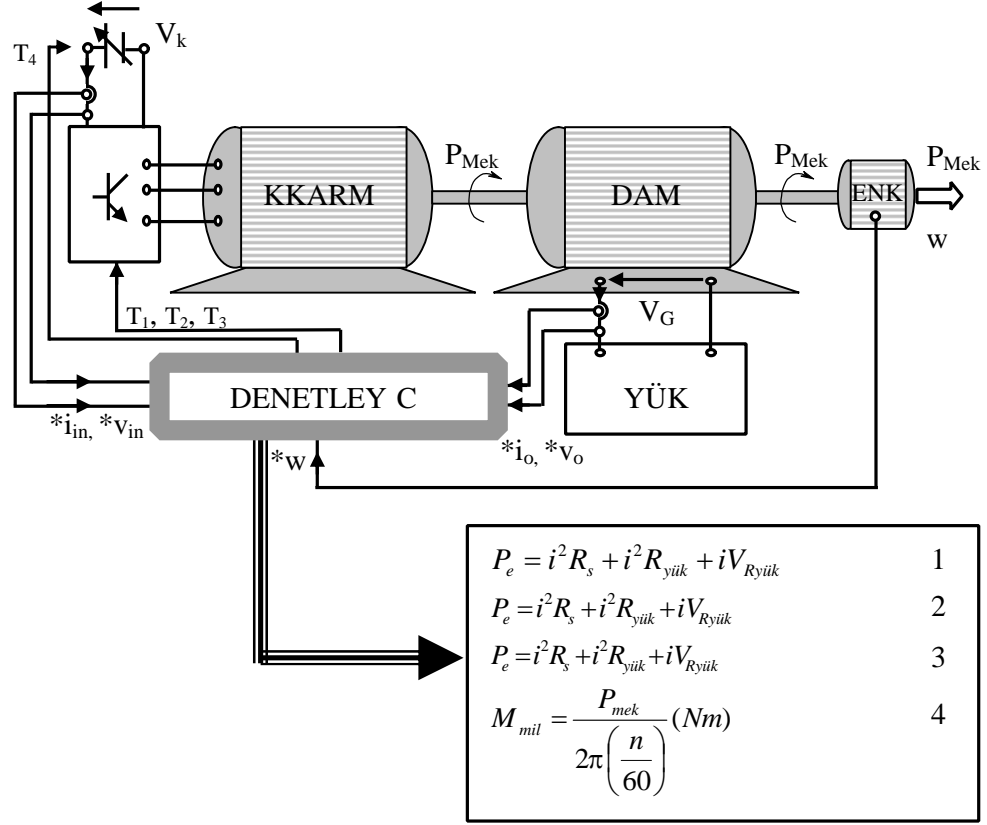
Dinamik mil momentini elde etmek için denklem 5.8'deki hesaplama yapılmaktadır. Denklem 5.9'da mil momenti (M_{mil}) Nm, mekanik güç (P_{mek}) W ve n (d/dk) birimlerindedir.

ekil 5.25'de deney düzeneğindeki ölçme ve denetim noktaları görülmektedir. i_{in} ve v_{in} iki seviyeli do ru akım kaynağından çekilen akım ve gerilimin ölçme noktaları, i_o , v_o yük tarafından çekilen akım ve gerilim ölçme noktaları ve ω milin açısal hızının ölçümü olmak üzere be farklı noktadan ölçümü gerçekleştirilmektedir.



ekil 5.25: Deney düzenekte giri , elektriksel ve kayıp güçlerin elde edilmesi.

İlk dört ölçme noktasından akım ve gerilim değerleri analog devreler okunurken milin açısal hızı ise tur başına enkoder tarafından üretilen darbelerin sayılması ile elde edilmektedir. Ölçüm verilerinin ekil 5.25'de verilmiş olan denklemlerde kullanılması sonucunda sistemin mekanik ve elektriksel kayıp gücü, mil gücü ve mil momentini elde edilir. ekil 5.26'de görülen T_1 , T_2 ve T_3 anahtarları motoru sürmek için kullanılan faz sargısının anahtarlarına ilişkin denetim sinyalleri ve T_4 ise kaynak denetim sinyalidir.



ekil 5.26: Deney düzeneindeki ölçme ve denetim noktaları.

5.5. DSP ile KKARM'nin Denetimi

DSP denetim yazılımı Microchip firması tarafından geliştirilmiş olan MPLAB programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yazılım, Microchip firması tarafından geliştirilmiş olan c30 kullanılarak derlenmiş ve kaynak kod üretilmiştir [51-53]. ekil 5.27'de MPLAB programı görülmektedir.

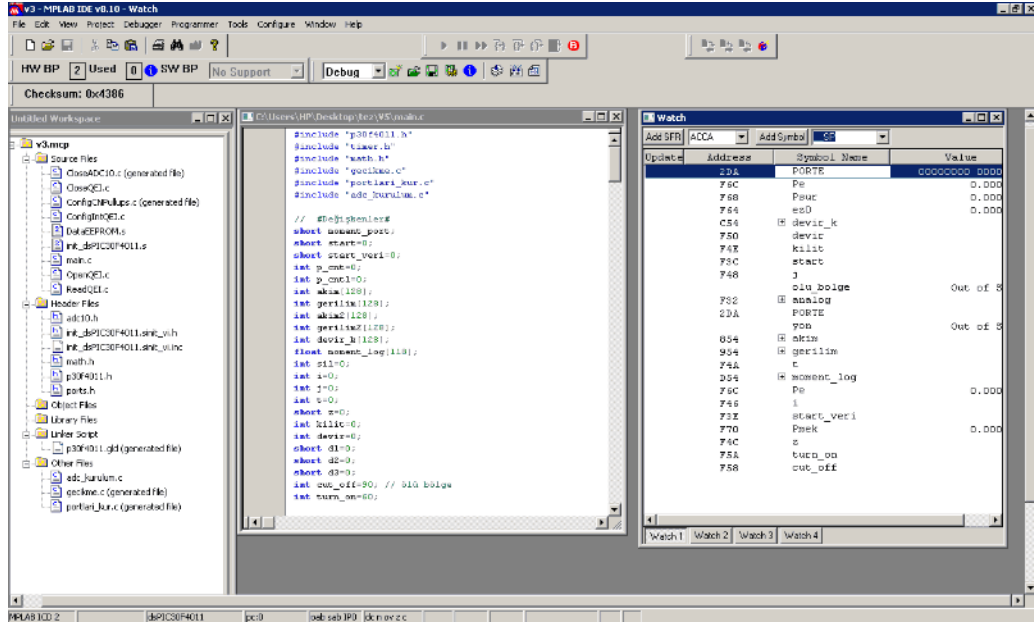
5.5.1. DSP Denetim Programı

KKARM denetimi için geliştirilmiş olan ana algoritma ve alt denetim algoritmaları sunulmaktadır.

ekil 5.28'de ana denetim algoritması görülmekte olup, algoritmadan da anlaşılacağı gibi motor fazlarının denetimi ve iki seviyeli kaynağın denetimi içermektedir.

gerçekle tirilmektedir. Ayrıca, analog de erlerin sayısal veriye dönü türülmesi için gerekli kurulum i lemleri, pozisyon bilgisinin enkoderden alınması, giri çıkı portlarının kurulumu ve 10ms'lik zamanlayıcı kesmesinin kurulumu bu algoritmada gerçekle tirilmektedir.

ekil 5.29'de enkoderden veri alınabilmesi için gerekli olan kurulum algoritması görülmektedir. Enkoder algoritmasından da görüldü ü gibi, enkoder 4x modda çalı maktadır. Buna göre her 0.18 derecede enkoder bilgisinin bulundu u de i ken içeri i 1 birim arttırılmaktadır.

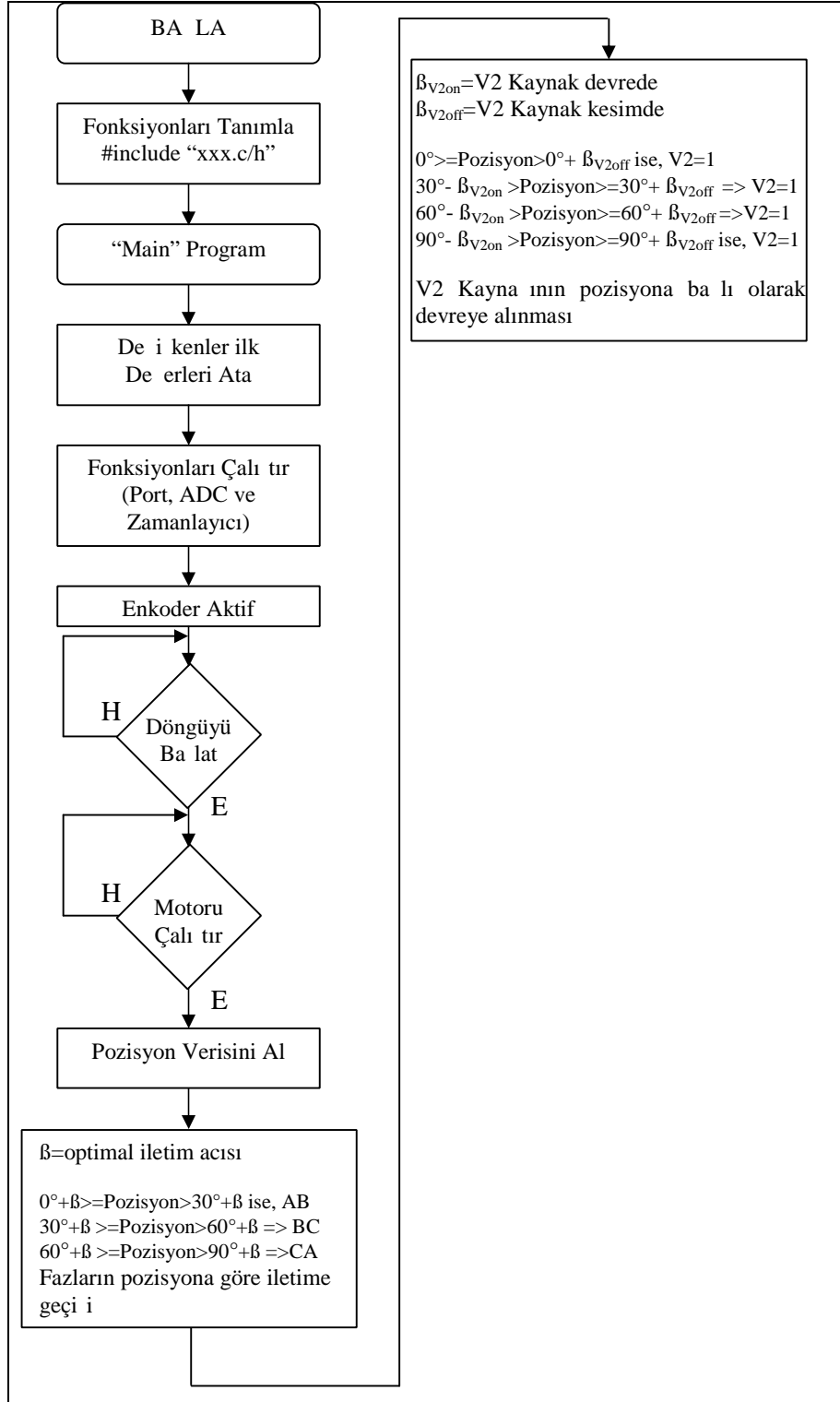


ekil 5.27: MPLAB programı ekran görüntüsü.

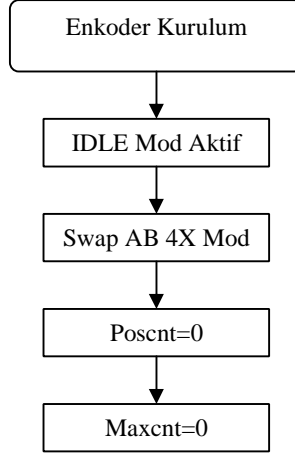
ekil 5.30'da sabit periyotta akım ve gerilim de erlerinin okunabilmesi amacıyla ayarlanması gereken zamanlayıcının kurulum algoritması görülmektedir. Bu algoritma kurulduktan sonra, zamanlayıcı kesmesi sabit zaman aralıklarıyla devreye girerek gerekli denetim hesaplamalarını gerçekle tirir.

ekil 5.31'de DSP'ye ait ADC modülün kurulumu gösterilmektedir. ADCBUF0 de i keni sistemden alınan dört adet analog veriyi saklamaktadır. ekil 5.32'de zamanlayıcı kesmesinin denetim algoritması görülmektedir. Devir hesaplama, akım ve gerilim kütüklenmesi, sürtünme ve mekanik kayıpların bulunması, mil momentinin

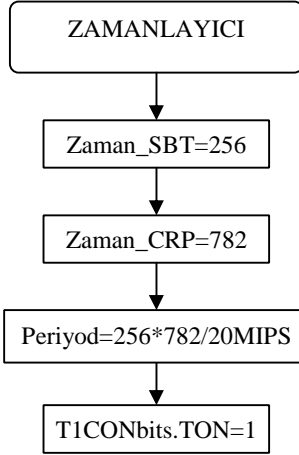
hesaplanması ve hesaplanan momentin sayısal veri olarak DAC katına aktarılması bu a amada gerçekleştirilmektedir.



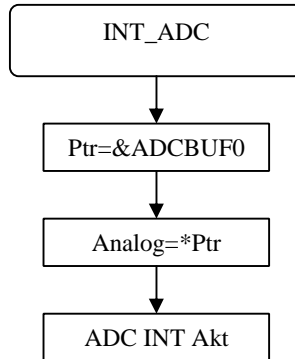
ekil 5.28: Ana denetim algoritması.



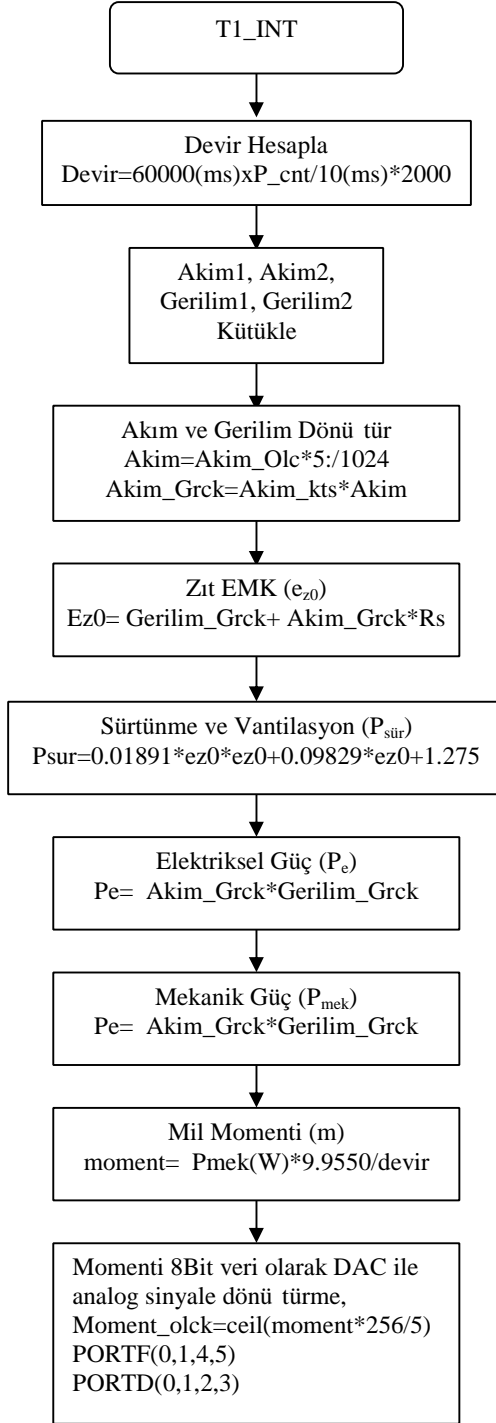
ekil 5.29: Enkoder denetim algoritması.



ekil 5.30: Zamanlayıcı denetim algoritmasının kurulumu.



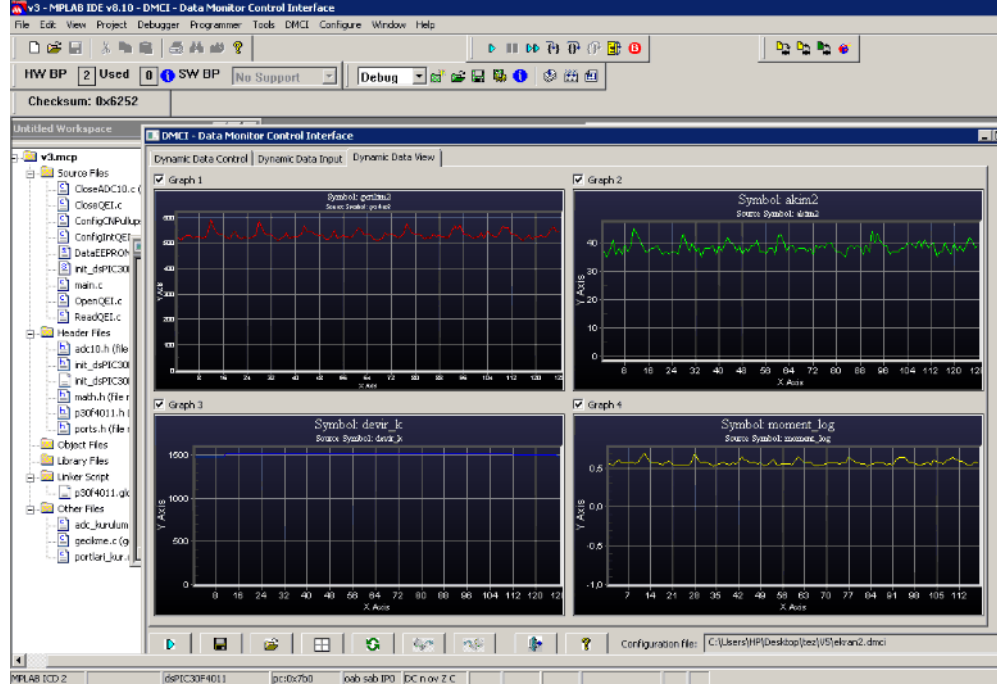
ekil 5.31: Analog bilginin sayısal veriye dönü üm algoritması.



ekil 5.32: Zamanlayıcı kesmesinin denetim algoritması.

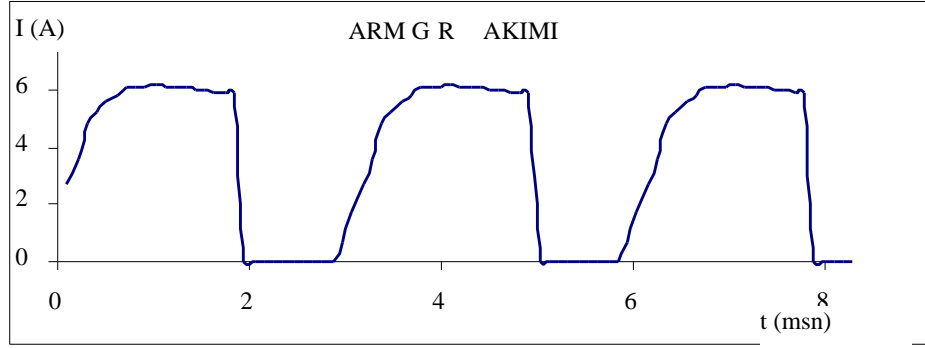
5.5.2. DSP Kartından Ölçme Değerlerinin Alınması

DSP denetim programının çalıştırılması sonucunda motor devri, denetim kartı ile doğrudan bağlantılı çalışan ICD2 denetim kartı vasıtasıyla ölçülüp MPLAB programından görüntülenmiştir. Elde edilen verilere bağlı olarak MPLAB programından görüntülenen grafik ekil 5.33’de verilmiştir.

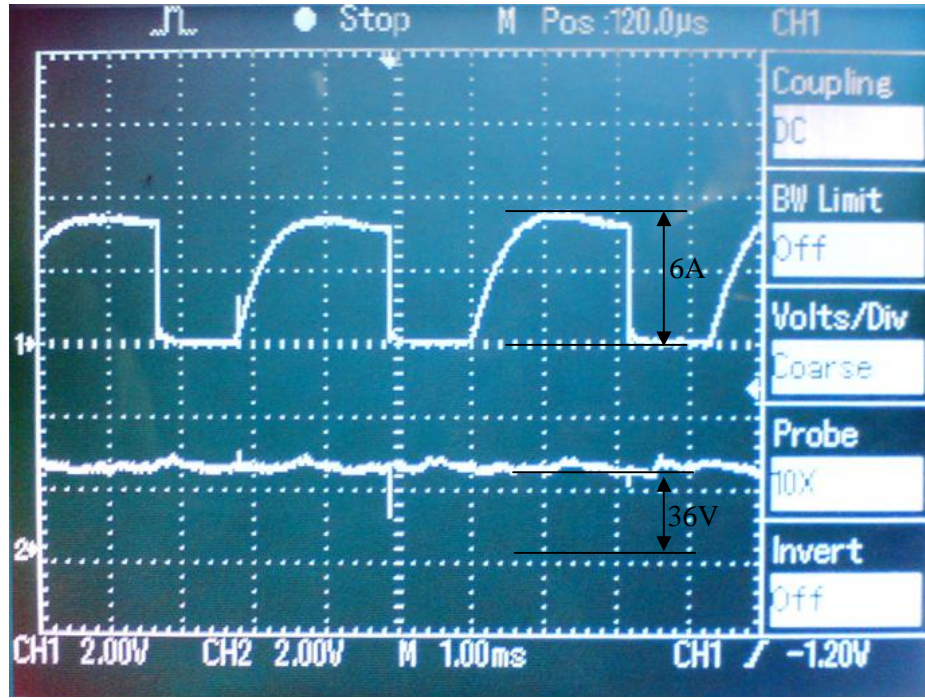


ekil 5.33: Klasik ARM'nin denetiminden elde edilen veriler.

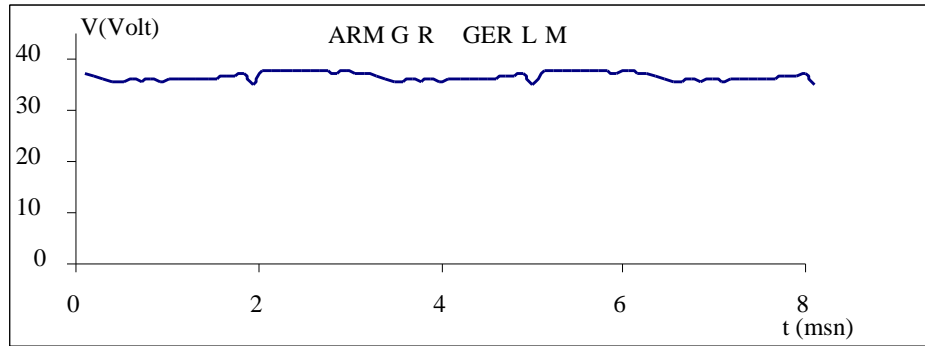
Klasik Arm'nin deneysel düzende denetlenmesi sonucunda elde edilen veriler ekil 5.34, 36, 37, 38, 39'de gösterilmektedir. Bu verilerde klasik ARM'ye ait sırasıyla; giriş akımı, giriş gerilimi, toplam mekanik kayıplar, toplam mil gücü ve mil momenti gösterilmiştir. ekil 5.35'de ise klasik ARM'nin kaynaktan çekilen akımı osiloskop ekranında gösterilmektedir. Veriler incelendiğinde klasik ARM'nin 5,4 derece önce iletme girdisi ve 16,2 derece önce kesime girdisi görülmektedir. İletim ve kesim açı değerleri ARM'ye ait statik analiz moment verilerinin incelenmesi sonucunda tespit edilmiştir. Veri toplama frekansı 0,1024 ms'lik aralıklarla 8,192 ms'lik zaman diliminde gerçekleştirilmiştir.



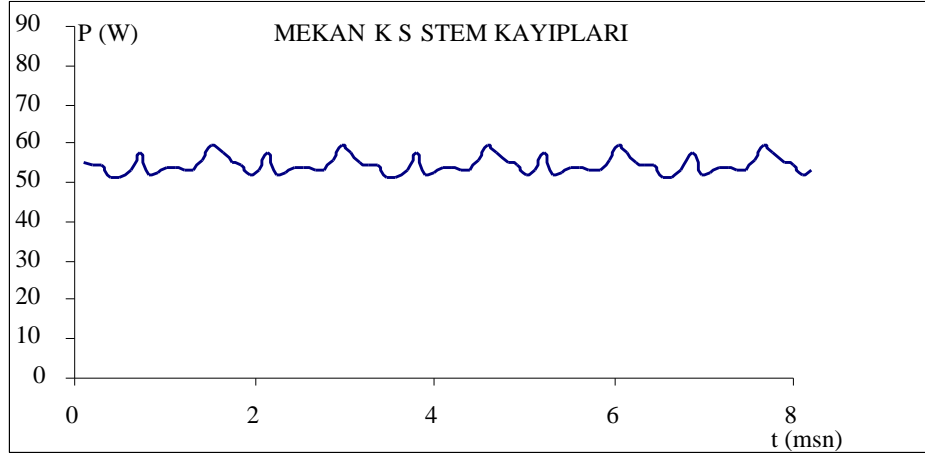
ekil 5.34: Klasik ARM giri akımı.



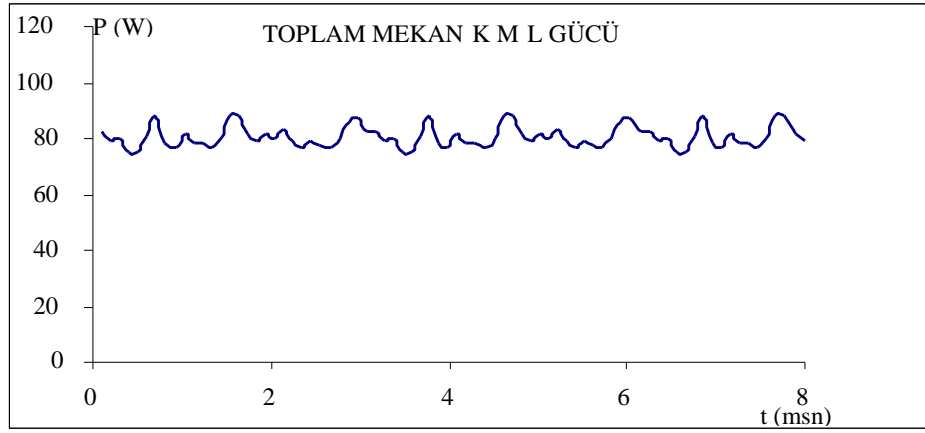
ekil 5.35: Klasik ARM giri akımı osiloskop görüntüsü.



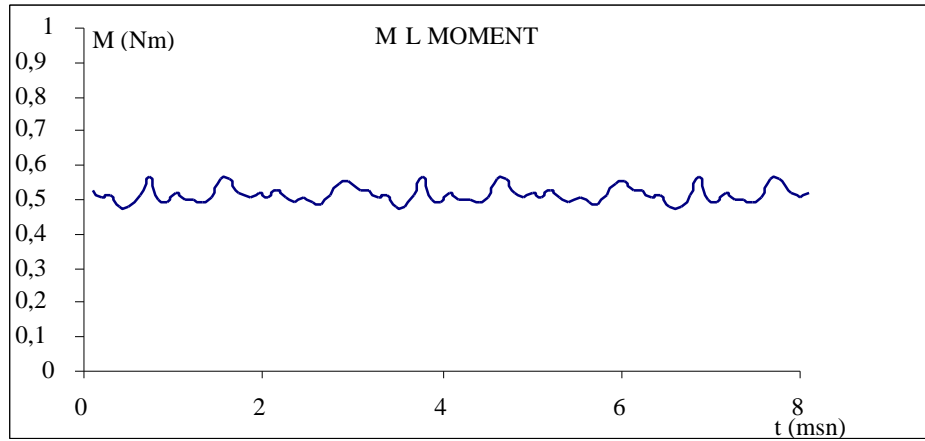
ekil 5.36: Klasik ARM giri gerilimi.



ekil 5.37: Klasik ARM mekanik kayıplar.



ekil 5.38: Klasik ARM toplam mil gücü.



ekil 5.39: Klasik ARM tarafından üretilen dinamik mil momenti.

Denklem 5.10 ve 11’de ortalama giri gücün ($P_{in_{ort}}$) ve ortalama mekanik gücün

(P_{mek_ort}) nasıl hesaplandı ı görülmektedir. Denklem 5.10 ve 11’de anlık giri gücü (P_{in}), anlık mekanik gücü (P_{mek}) ve toplam örnek sayısı (t_{toplam}) olarak gösterilmi tir.

$$P_{in_ort} = \frac{\sum P_{in}}{t_{toplam}} \quad (5.10)$$

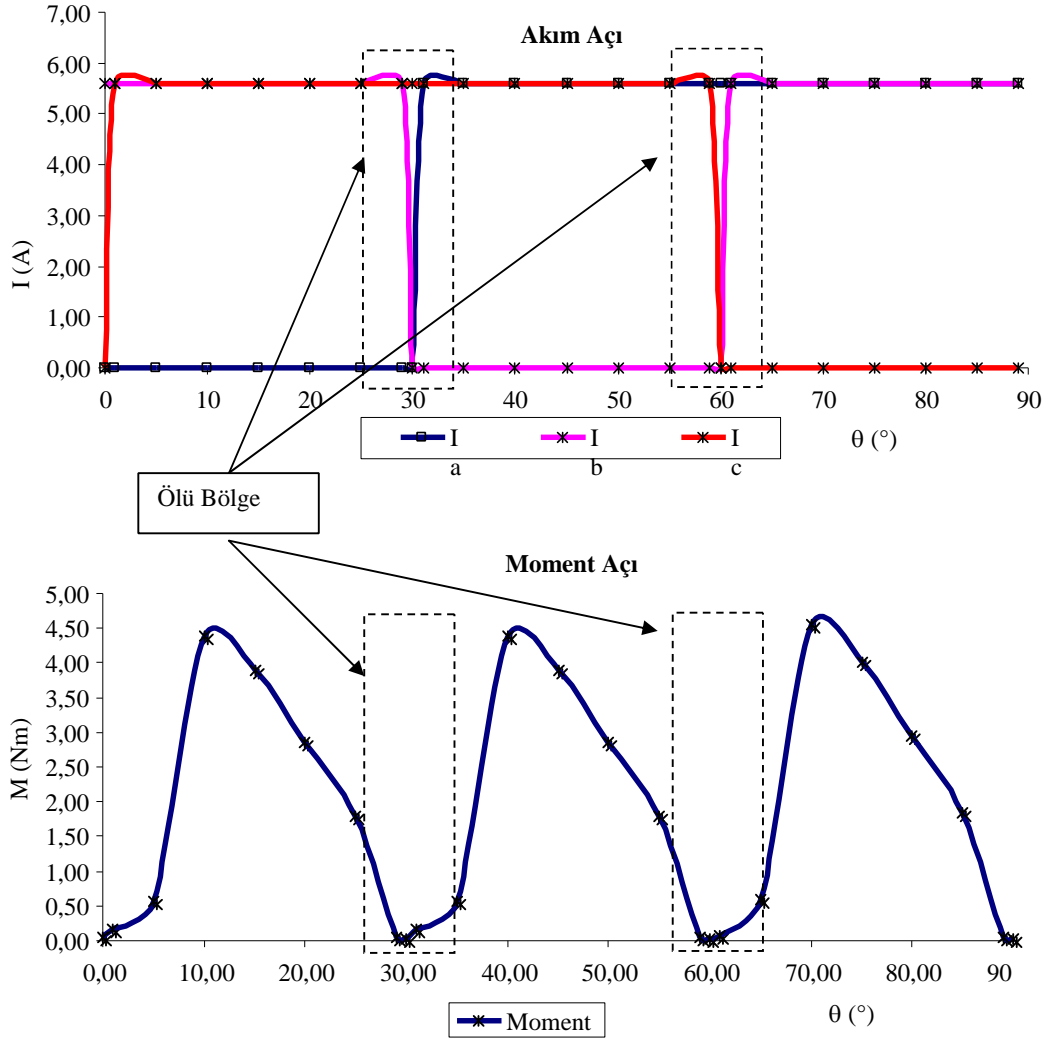
$$P_{mek_ort} = \frac{\sum P_{mek}}{t_{toplam}} \quad (5.11)$$

Deneysel düzenekten alınan verilere göre, ortalama giri gücün (P_{in_ort}) 131,16 watt ve ortalama mekanik gücü (P_{mek_ort}) ise 80,69 watt olarak hesaplanmı tir. Yapılan deneysel çalı ma esnasında motorun devri 1524 devir/dk oldu u tespit edilmi tir. Klasik ARM deneysel çalı masından elde edilen deneysel veriler sonucunda verim, denklem 5.12’den hesaplanmaktadır. Verim (η) 0,615, % verim 61,5 olarak elde edilmi tir. Motor ortalama momenti ise 0,514 Nm olarak hesaplanmı tir.

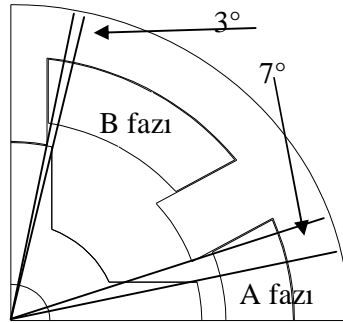
$$\eta = \frac{P_{mek_ort}}{P_{in_ort}} \quad (5.12)$$

5.5.2.1 KKARM’nin Denetimi

KKARM’nin idealize edilmi karakteristikleri üçüncü bölümde verilmi tir. Bu kısımda ise KKARM’nin gerçek uygulamada nasıl çalı tırılması gerekti i ifade edilmi tir. ekil 5.46’da KKARM’ye ait akım-açı ve moment açı grafikleri gösterilmi tir. Grafik verileri Sonlu Elemanlar Yöntemiyle hesaplanmı tir. ekil 5.40’da akım ve moment e rileri üzerinde kesikli çizgilerle gösterilen ve tez kapsamında ölü bölge olarak adlandırılan kısımlar gösterilmi tir. KKARM’nin çalı ması esnasında, ölü bölge tarafından kapsanan rotor konumlarında, faz akımlarının de i imine, rotor ve stator kutup açlarına ve bunlar arasındaki açısabö luklarına dikkat edilmelidir. Yapılan deneysel çalı mada kullanılan KKARM için ölü bölge 10° ’dir. ekil 5.41’de stator ve rotor geometrisi ve kutupların birbirleri ile tam çakı ıklık durumunun gerçekle mesi esnasında meydana gelen açısabö luklar görülmektedir.



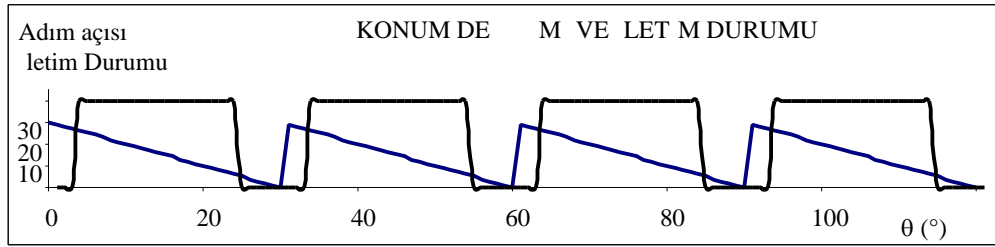
ekil 5.40: SEY ile hesaplanan KKARM tarafından üretilen moment ve faz akımları.



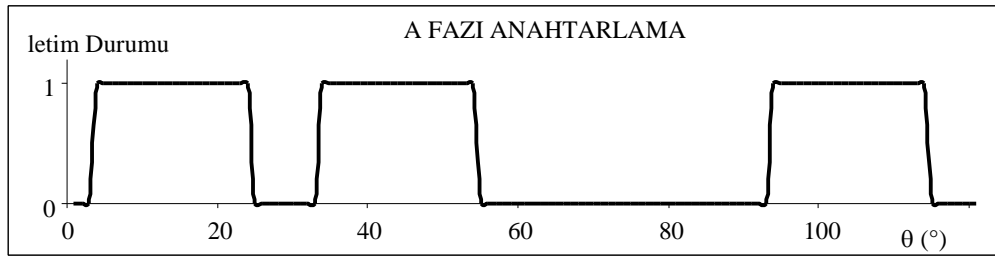
ekil 5.41: KKARM rotor ve stator geometrisi.

A Fazın ilk ilettime girdi i 7°'de ve tam çakı ık durumun gerçekleşme sine 3° kala, üretilen moment oldukça dü mektir. Çakı ık durum gerçekleşti inde, aktif olan fazlardan birinin kesime gitmesi di er fazın devreye girerek moment üretiminin

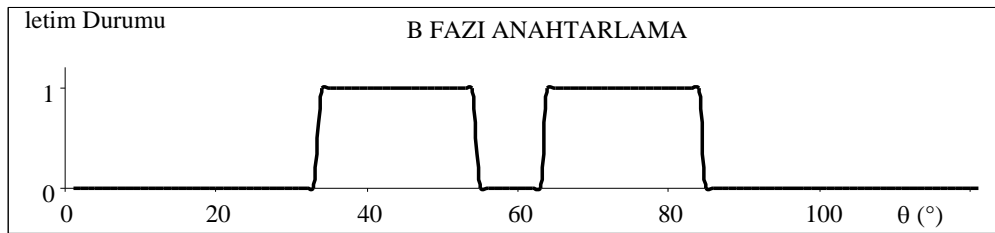
devam etmesi beklenmektedir. Fakat uygulamada kesime giden fazın manyetik alanında depolanan enerjisinin de arj olma süresi dikkate alınmadan diğer fazın devreye alınmasının aynı anda üç fazın aktif olarak moment üretimine katkı sağlamasının sakıncalı olduğu, rotor milinin kilitlendiği ve aırı gürültülü ve verimsiz bir çalışmanın meydana geldiği tespit edilmiştir. ekil 5.42’de KKARM’nin fazlarının iletim durumları gösterilmiştir.



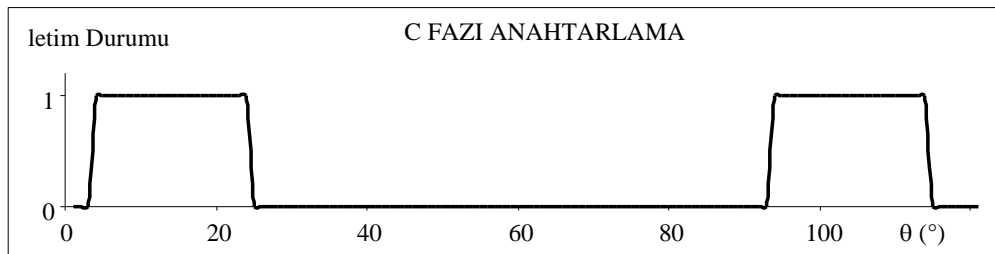
(a)



(b)



(c)



(d)

ekil 5.42: KKARM’nin fazlarının iletim durumu.

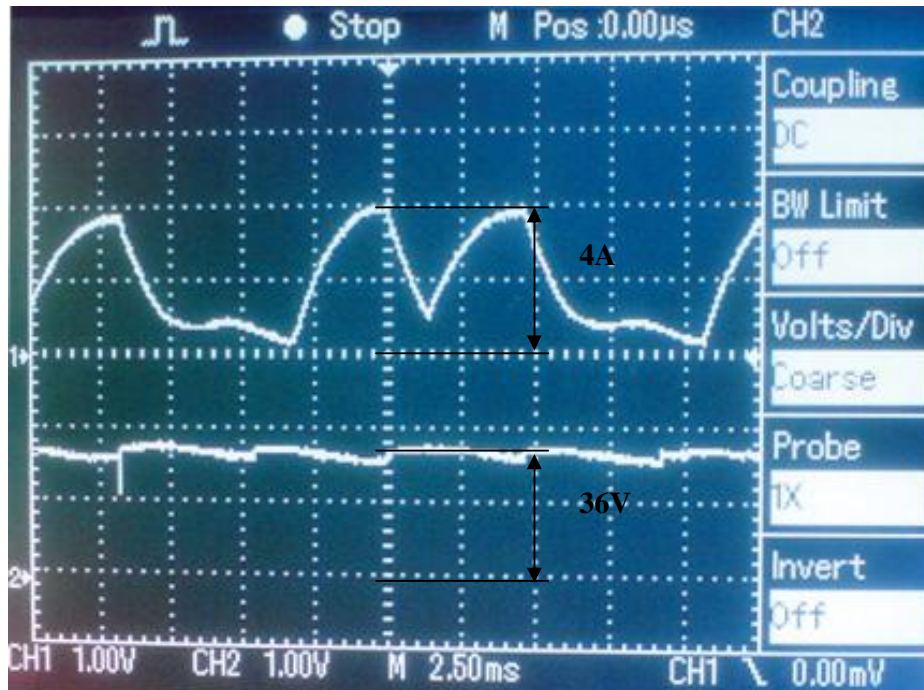
ekil 5.42.a’da adım açısının değeri ve fazların iletim durumları gösterilmiştir, b’de

A fazının iletim durumu c'de B fazının iletim durum ve d'de ise C fazının iletim durumu incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar esnasında elde edilen veriler göz önünde bulundurularak ekil 5.42'deki fazların iletim durumları belirlenmiştir. Bu verilerden faydalanılarak motorunu denetlemek amacıyla kullanılan denetim programındaki iletme giri ve çıkı açıları yenilenmiştir.

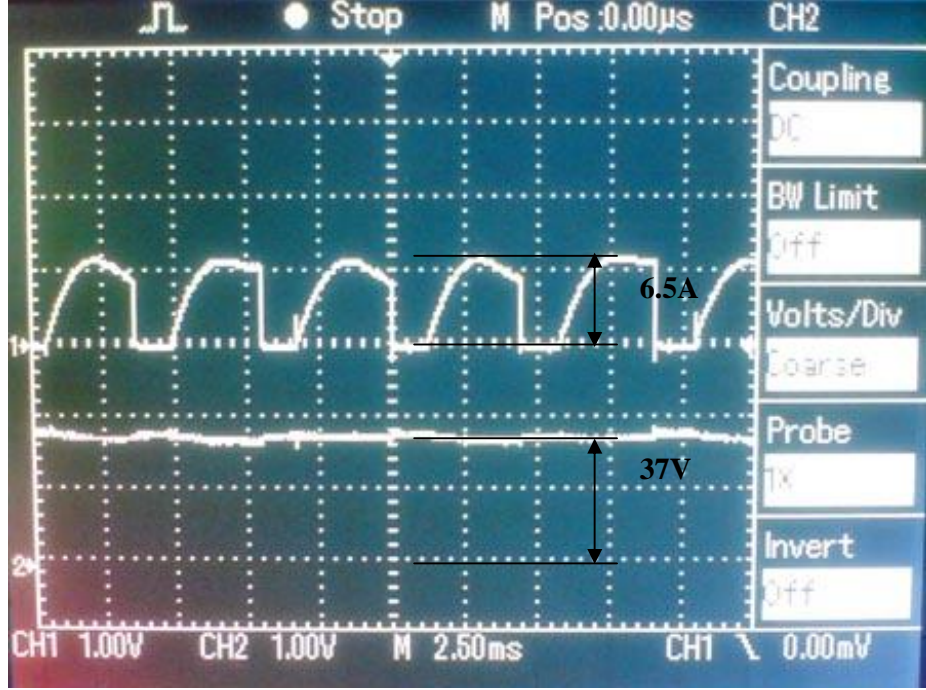
KKARM'nin denetim çalışmaları üç ayrı kısımda gerçekleştirilmiş olup bunlardan ilki bo çalışması testidir.

5.5.2.2 KKARM'nin Bo çalışması Testi

KKARM'nin bo çalışması testi gerçekleştirilmiş ve motor tarafında çekilen hat ve faz akımı, motora uygulanan gerilim ve doğru akım generatörünün uç gerilimi anlık olarak kaydedilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, KKARM'nin bo çalışması sırasında, ortalama mekanik kayıp gücün 25,5watt olduğu ve verimin % 24 olduğu tespit edilmiştir. ekil 5.43'de KKARM'nin faz akımı ve uygulanan gerilim ekil 5.44'de hat akımı ve uygulanan gerilim gösterilmiştir.



ekil 5.43: KKARM'nin faz akımı ve uygulanan gerilim.

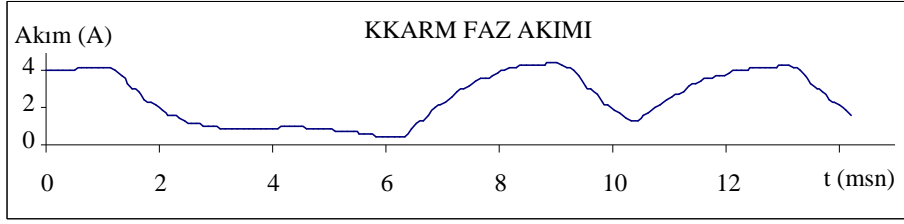


ekil 5.44: KKARM'ye uygulanan gerilim ve hat akımı.

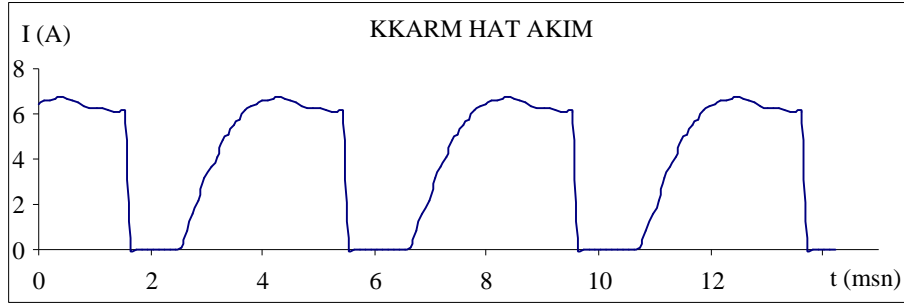
ekil 5.45'de dsPIC'den alınan deney düzene ine ait akım ve gerilim de erlerinin Mplab program arayüzünde ki gösterimi görülmektedir. ekil 5.46, 47, 48, 49'da dsPIC'den alınan veriler sonucunda elde edilen KKARM'ye ait faz ve hat akımları, uygulana gerilim ve generatörden elde edilen gerilimi gösterilmi tir.



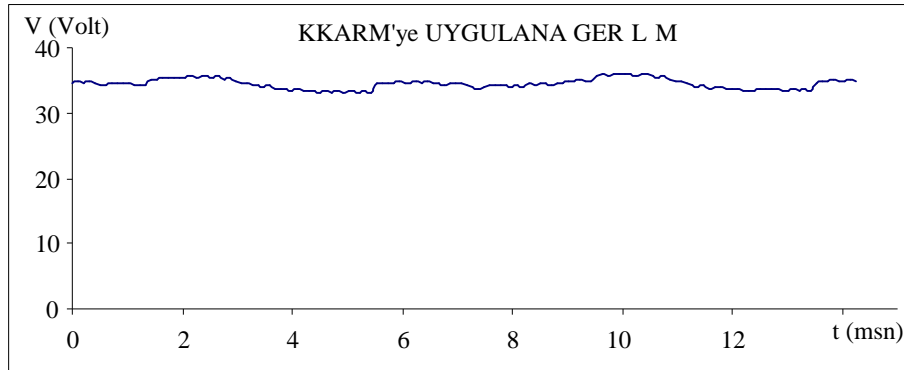
ekil 5.45: Deney düzene ine ait akım ve gerilimler.



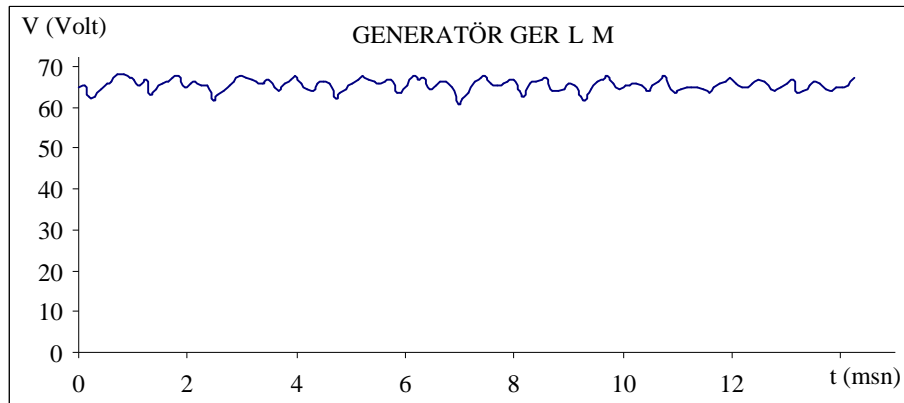
ekil 5.46: KKARM faz akım.



ekil 5.47: KKARM hat akım.



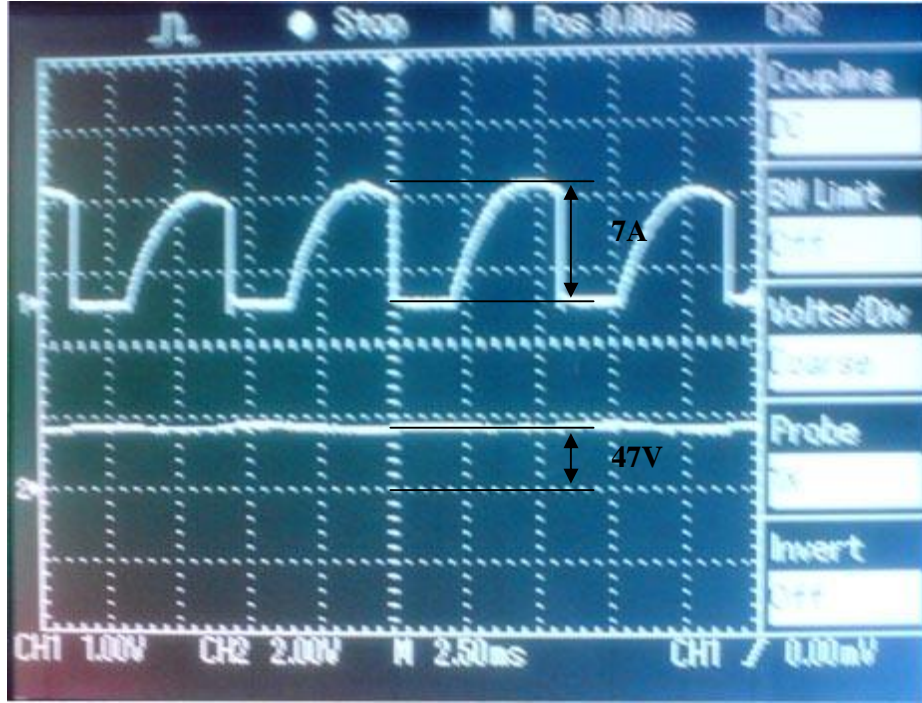
ekil 5.48: KKARM'ye uygulanan gerilim.



ekil 5.49: Generatörden elde edilen gerilim.

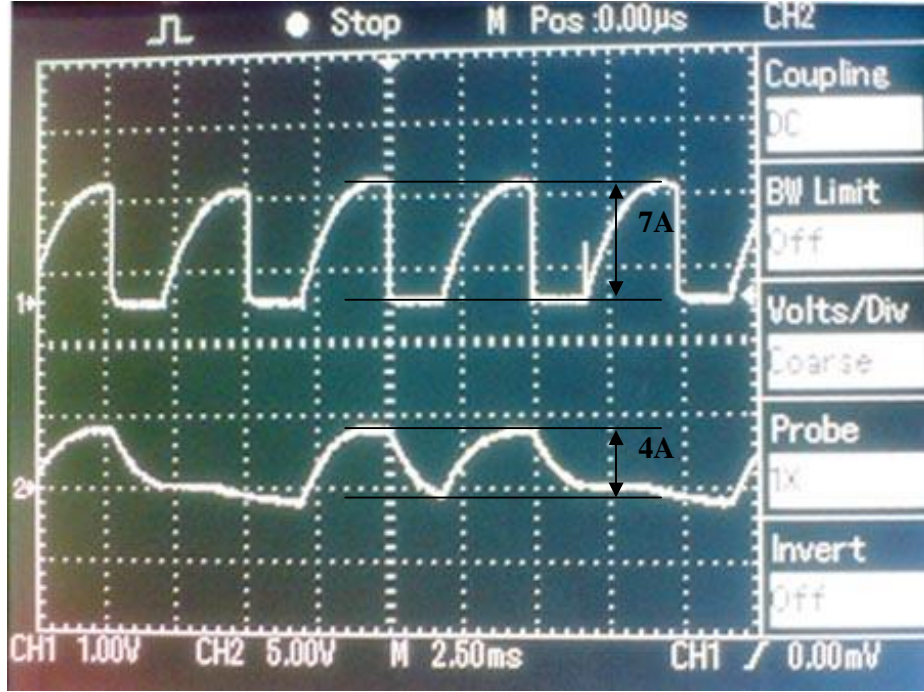
5.5.2.3 KKARM'nin Yükte Çalışma Testi

Deneysel düzende KKARM'ye akuple olarak bağlı olan doğru akım generatörü, yükleme testi lemini gerçekle tirmek ve dolaylı yoldan dinamik momentin ölçmek için kullanılmı tır. KKARM'nin yüklü çalı ma testi gerçekle tirilmi ve motor tarafında çekilen hat ve faz akımı, motora uygulanan gerilim ve doğru akım generatörünün uç gerilimi anlık olarak kaydedilmi tir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, KKARM'nin yüklü çalı tırılması esnasında, ortalama mekanik gücün 95,75 watt, verimin % 64,1 ve 0,60 Nm oldu u tespit edilmi tir. ekil 5.50'de KKARM'nin hat akım ve uygulanan gerilim 5.51'de ise hat ve faz akımı aynı ekranda gösterilmi tir.

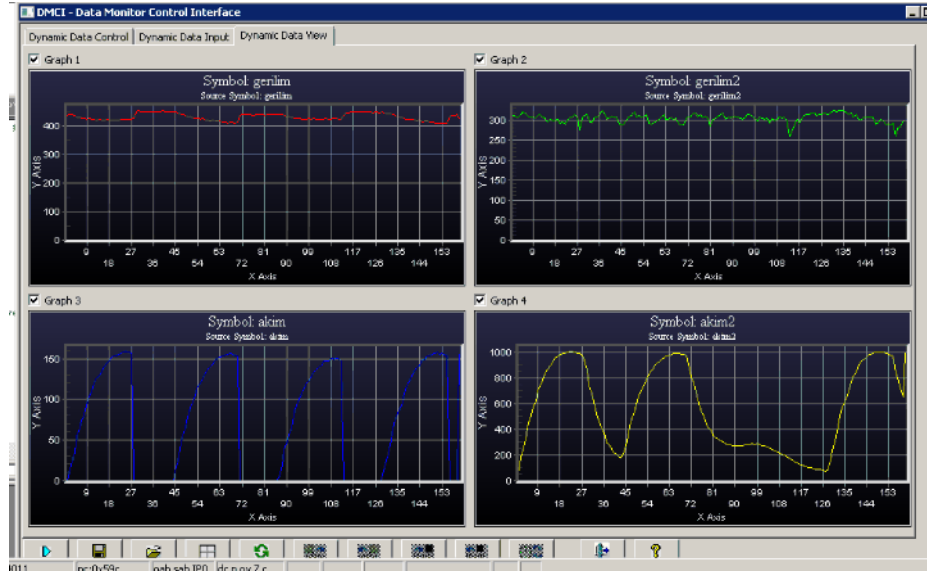


ekil 5.50: Yükte çalışma testinde KKARM'ye uygulanan gerilim ve hat akımı.

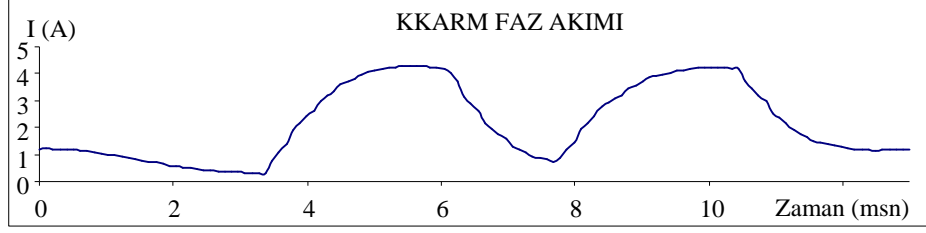
ekil 5.52'de dsPIC'den alınan deney düzene ine ait akım ve gerilim de erlerinin Mplab program arayüzünde ki gösterimi görülmektedir. ekil 5.53, 54, 55, 56, 57, 58'de dsPIC'den alınan veriler sonucunda elde edilen KKARM'ye ait faz ve hat akımları, uygulana gerilim, generatörden elde edilen gerilim, toplam mekanik mil gücü ve mil momenti gösterilmi tir.



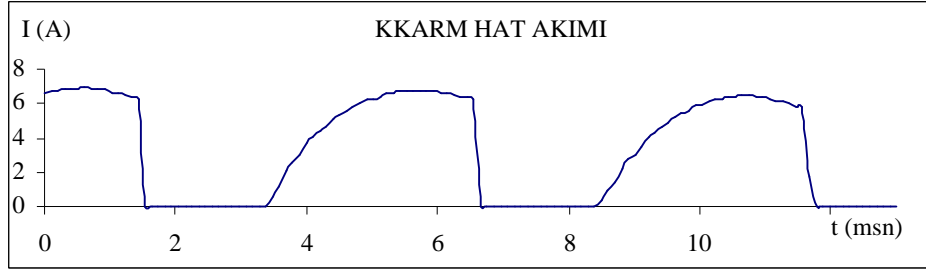
ekil 5.51: Yükte çalı ma testinde KKARM hat ve faz akımı.



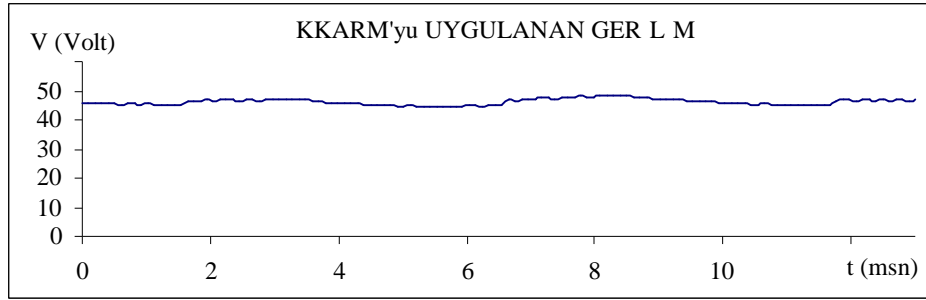
ekil 5.52: Yükte çalı ma testinde deney düzene ine ait akım ve gerilimler.



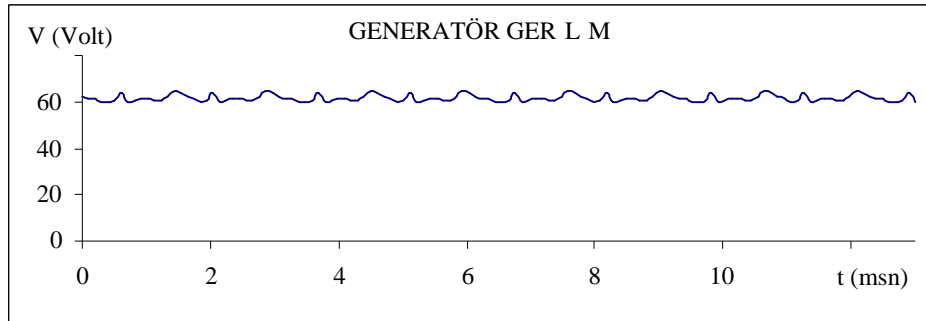
ekil 5.53: Yükte çalı ma testinde KKARM faz akımı.



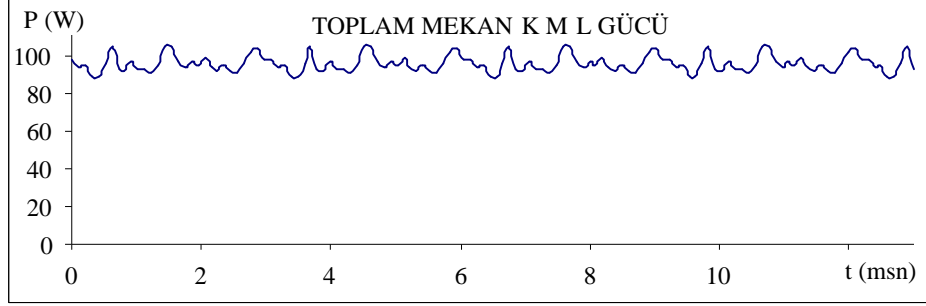
ekil 5.54: Yükte çalı ma testinde KKARM hat akımı.



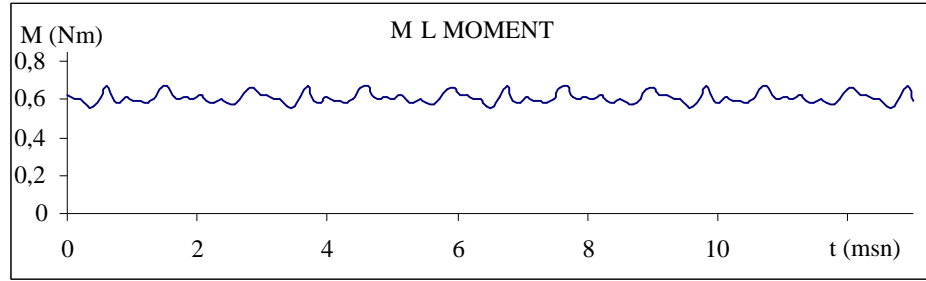
ekil 5.55: Yükte çalı ma testinde KKARM'ye uygulanan gerilim.



ekil 5.56: Yükte çalı ma testinde generatörden elde edilen gerilim.



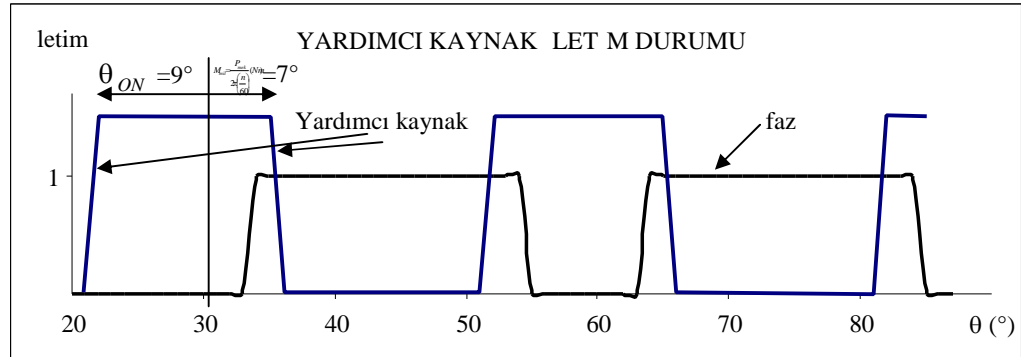
ekil 5.57: Yükte çalışırken testinde toplam mekanik mil gücü.



ekil 5.58: Yükte çalışırken testinde KKARM'nin ürettiği dinamik moment.

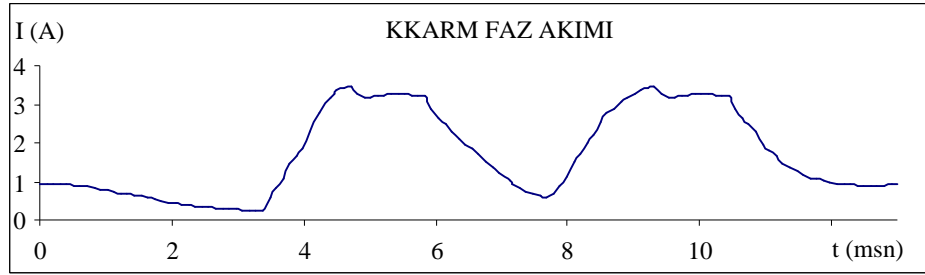
5.5.2.4 KKARM'nin Moment Dalgallılığının Azaltılması

KKARM'nin moment dalgallılığının giderilmesi için önerilmiş olan algoritma ve sürücü sistem, deneysel düzenek üzerinde test edilmiştir. Dördüncü bölümde önerilen DA hat Boost dönüştürücü yapısında kullanılan yardımcı kaynağın iletim durumu ekil 5.59'da gösterilmiştir. Yardımcı kaynağın devreye alınması ve devreden çıkarılması için gerekli olan açılar (θ_{ON} ve θ_{OFF}), denklem 4.10'dan hesaplanmıştır. Sistemden talep edilen ortalama momentin 0,7 Nm olduğu kabul edildiğinde; $\theta_{ON} = 7^\circ$ ve $\theta_{OFF} = 9^\circ$ olarak bulunmuştur. Yardımcı kaynak toplam 16° iletimde kalmaktadır.

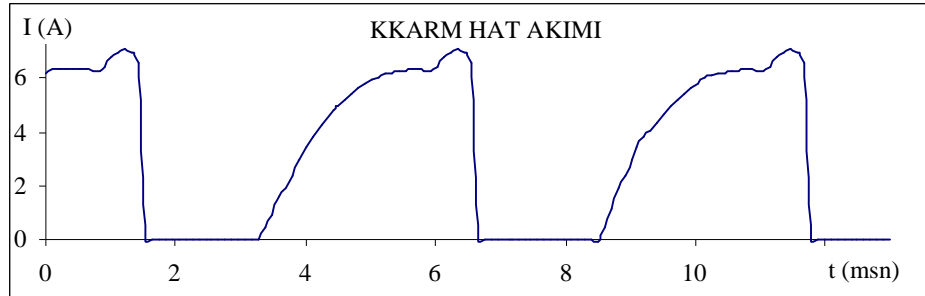


ekil 5.59: Yardımcı kaynak iletim durumu.

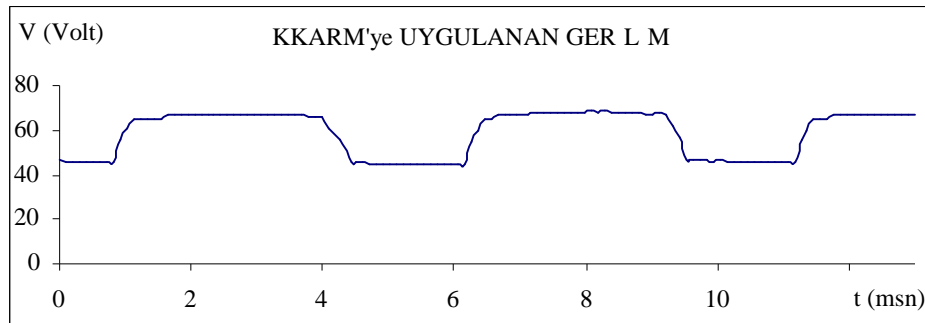
KKARM'nin moment dalgalılığının giderilmesi için geliştirilen algoritma ve sürücü sistem devreye alınması ve motor tarafında çekilen hat ve faz akımı, motora uygulanan gerilim ve doğru akım generatörünün uç gerilimi anlık olarak kaydedilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, ortalama mekanik gücün 113,18 watt, verimin % 67,7 ve dinamik mil momentinin 0,72 Nm olduğu tespit edilmiştir. Ekil 5.60-65'da dsPIC'den alınan veriler sonucunda elde edilen KKARM'ye ait faz ve hat akımları, uygulanan gerilim, generatörden elde edilen gerilim, toplam mekanik mil gücü ve mil momentini gösterilmiştir.



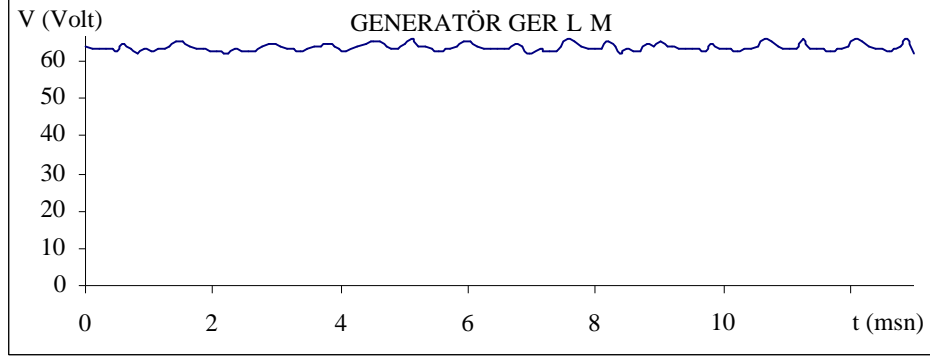
ekil 5.60: Önerilen algoritmanın uygulanması sonucunda KKARM faz akımı.



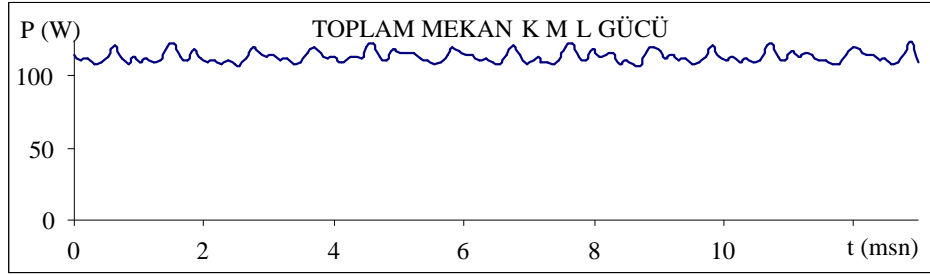
ekil 5.61: Algoritmanın uygulanması sonucunda KKARM hat akımı.



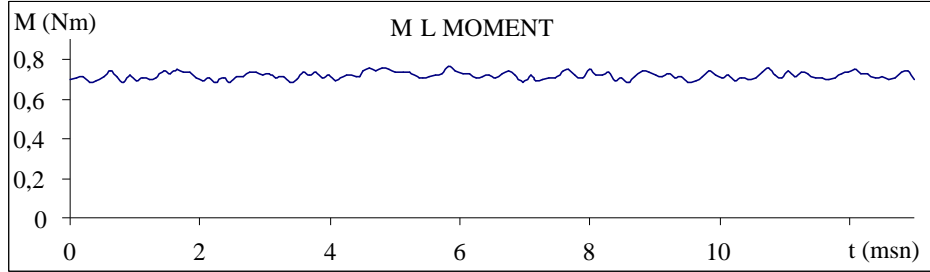
ekil 5.62: Algoritmanın uygulanması esnasında KKARM'ye uygulanan gerilim.



ekil 5.63: Algoritmanın uygulanması sonucunda generatörden elde edilen gerilim.



ekil 5.64: Algoritmanın uygulanması sonucunda elde edilen toplam mekanik mil gücü.



ekil 5.65: Algoritmanın uygulanması sonucunda KKARM'nin ürettiği dinamik moment.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bugüne kadar KKARM (Karıt Kuplajlı Anahtarlı Relüktans Motoru) ile ilgili yapılmış olan çalışmaların literatür özetleri tezin giriş kısmında sunulmuştur. Literatür çalışması sonucunda, KKARM ile ilgili iki husus dikkat çekmiştir. Bunlar;

- KKARM'nin modellenmesi,
- KKARM'deki moment dalgalılığının azaltılmasıdır.

Çalışma esnasında, hem KKARM'nin modelinin yeni bir teknik ile üretilmesi, hem de momentte var olan yüksek dalgalılığın azaltılması üzerinde durulmuştur.

KKARM'nin modellenmesi ile ilgili yapılan literatür taraması esnasında iki temel model tespit edilmiştir. Bunlardan ilki, B. Mecrow tarafından gerçekleştirilmiş olan, Anahtarlı Relüktans Motoru'nun (ARM) parametrelerinin bir dönüşüm matrisi kullanılarak KKARM'nin parametrelerinin üretildiği tekniktir. Bu teknik, her ne kadar basit bir yapı gibi gözükse de, benzetim çalışmalarında, gerçeğe yakın sonuçlar elde edebilmek için yüksek adette veri gerektirmesi ve bu verilerin matrisler çarpımında yaşanan güçlükler sebebiyle, çok kullanılan bir teknik değildir.

Diğer modelleme tekniği ise, manyetik devre temelli olup ilk olarak James M. Kokernak tarafından önerilmiştir. Bu modelleme tekniğinde temel mantık transformatörlerin modelleme mantığına yakındır. Bu teknikte, KKARM'be farklı manyetik direnç ayrılır. Bunlar, stator boyunduruk manyetik direnci, stator kutbu manyetik direnci, rotor kutbu manyetik direnci, rotor boyunduruk manyetik direnci ve hava aralığı manyetik direncidir. İlk dört manyetik direnç sabit kabul edilir ve beşincisi ise, hava manyetik direnci olup rotorun konumuna bağlı olarak değişir. Oluşturulan modelde, motor konumuna bağlı olarak manyetik geçirgenlik hesaplanmakta ve buna bağlı olarak halkalama akısı, ψ elde edilmektedir. Son olarak, elde edilen akıdan moment hesaplanmaktadır. Bu tekniğin en büyük dezavantajı ise, matematiksel hesaplamaların oldukça yoğun olmasıdır.

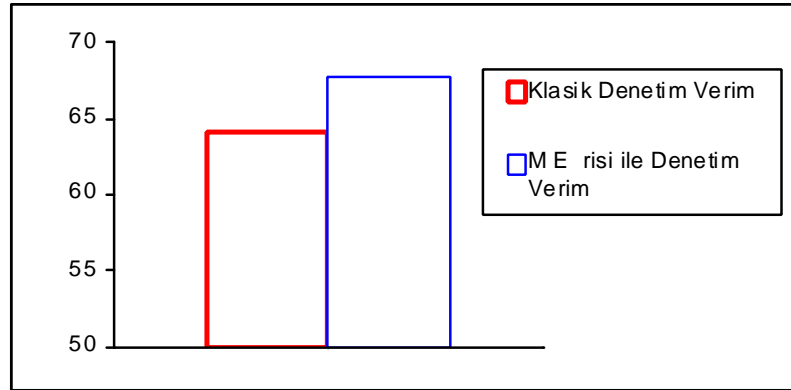
Manyetik modelleme tekni i ile benzeti im çalı masının gerçekte tirilebilmesi için iyi donanıma sahip bilgisayar gerektirmektedir. Bu teknik gerçekte zamanlı denetim uygulamalarını gerçekte tirebilmek için oldukça fazla matematiksel ifade içermektedir.

ki modelleme tekni inin dezavantajları sebebiyle, yapılan tez çalı masında KKARM'yi modellemek için yeni bir teknik olarak Yapay Sinir A ları'nın kullanılması önerilmiştir. YSA ile KKARM'nin modellenmesi üçüncü bölümde açıklanmış olup gerçekte tirilen model, dinamik benzeti im çalı masında kullanılmıştır. Benzeti im çalı malarının sonucunda elde edilen verilerin literatürde yapılmış olan çalı malarla örtü tü ü görülmü tür. KKARM'nin YSA ile modellenmesi ile sa lanan en önemli avantaj, YSA modelin benzeti im çalı malarında sonuçların elde edilme süresini kısılması ve modelin gerçekte uygulamalarda mikro i lemci ve dijital sinyal i lemci gibi denetleyicilerde uygulama kolaylı mını sa lamasıdır. Bunun yanı sıra en önemli dezavantajı ise, modelin kullanılabilmesi için YSA'nın e itilmesidir.

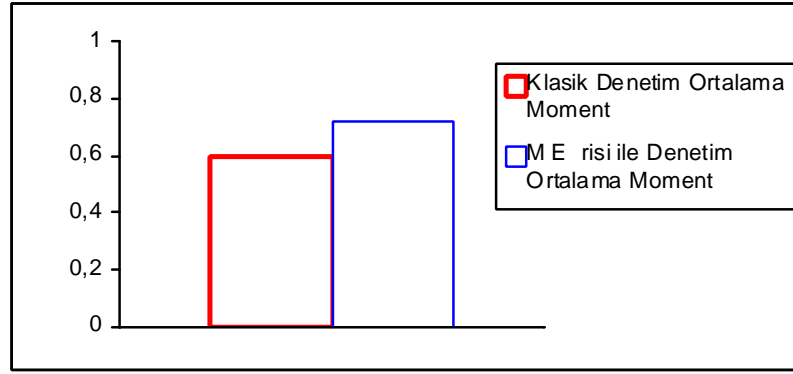
KKARM'nin endüstriyel uygulamalarda kullanımını güçle tiren en önemli dezavantajı ise, moment dalgalılı nın fazla olmasıdır. Moment dalgalılı nın azaltılması için yapılan çalı malar incelendi inde, çalı maların KKARM'nin geometrik yapısında yeniden düzenlenerek dalgalılı nın azaltılması çerçevesinde odaklanıldı ı görülmü tür. Aslında geometrik yapıdaki de i iklikler ile klasik ARM'de endüktans profilinde de i iklik yapılmakta, KKARM'de ise kar ıt endüktans profilinde de i iklik yapılmaktadır. Temel olarak geometrideki de i im ile, endüktans profil e imlerindeki de i imine ba lı olarak üretilen momentte de i im meydana getirmek hedeflenmektedir. Moment dalgalılı ı bu metodun uygulanması ile belirli sınırlarda azaldı ı literatürde görülmektedir. Fakat bu metodun en büyük dezavantajı ise, metodun var olan KKARM'lere uygulanamaması ve seri üretim hatlarında üretim güçlüklerinin olmasıdır.

Yapılan tez çalı masında moment dalgalılı nın azaltılması için yeni bir denetleyici geli tirilmiştir. Geli tirilen denetleyici dördüncü bölümde detaylı olarak sunulmu tur. Temel olarak dalgalılı nın azaltılması için, motor tarafından üretilen momentin, talep

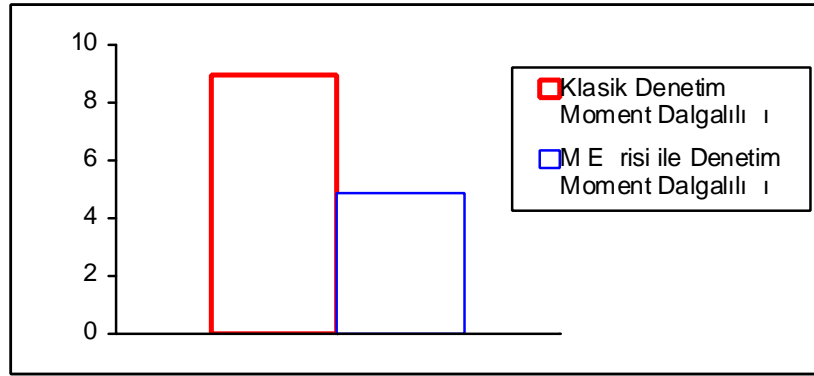
edilen ortalama moment de erin altına dü tü ünde, üretilen moment de erinin artmasını sa layacak iki seviyeli gerilim ayarlı sürücü yapısı önerilmi tir. Önerilen bu yapının denetimini basit bir ekilde sa layacak yardımcı gerilim kayna ının devreye alınmasını denetleyen yeni bir yöntem geli tirilmi tir. Geli tirilen bu yöntemde, KKARM'ye ait statik analiz moment e rilerinden yararlanılmı tır. Farklı akım de erlerinde, statik analiz moment e rilerinin verebilecekleri ortalama moment de erlerinin kesim noktalarının birle iminden “M e risi” elde edilmi . Bu e ri yardımıyla, KKARM'den talep edilen ortalama momente ba lı olarak, dalgalılı ının azaltılması amacıyla kullanılan yardımcı kaynak denetlenmi tir. Yardımcı kayna ın ana kaynak ile e zamanlı devreye alınması ile sisteme ilave güç enjekte edilmi tir. M e risinin en önemli fonksiyonu ise, bu yardımcı kayna ın devreye ilave gücün enjekte edece i rotor konumlarının belirlenmedir. M e risinin, KKARM'nin denetimi için kullanılması sonucunda, moment dalgalılı ı klasik denetimde %8,97 iken %4,82 de erine dü ürülmü tür. Klasik denetim ile önerilen yöntem ile denetim arasında yakla ık %50'ye bir de erde moment dalgalılı ı azaltılmı tır. Verim ise, klasik denetimde %64,1'de, M e risi ile gerçe kletirilen denetimde %67,7 ye yükseltilmi tir. ekil 6.1-6.3'de M e risi ile denetim sonucunda KKARM'de gerçe kletirilmı olan sırasıyla verim, ortalama moment ve moment dalgalılı ındaki iyile tirme grafik olarak gösterilmı tir.



ekil 6.1: Verimdeki iyile tirme.



ekil 6.2: Ortalama momentteki iyile tirme.



ekil 6.3: Moment dalgallılı ındaki iyile tirme.

Yapılan çalı ma ile gelecekte gerçekte tirilmesi muhtemel ara tırmalar a a ıda sınırlanmı tır. Bunlar;

M e risi kullanılarak, önerilen sürücü yapısı ile moment ve hız denetimi e zamanlı olarak gerçekte tirilebilir. Hız denetiminde PID, Bulanık Mantık gibi denetleyiciler kullanılabilir.

Ayrıca, yapılan çalı mada iki farklı kayna ın birbirine seri ba lanması ile sisteme ilave gücün enjekte edildi i sürücü sistem kullanılmı tır. Sürücü sistem yapısında farklılıklar gerçekte tirilerek KKARM'nin moment dalgallılı ındaki de i im incelenebilir ve sistem performansının geli tirilmesi sa lanabilir.

Moment dalgallılı ının azaltılması için kullanılan iki seviyeli dönü türücü, yerine çok kademeli dönü türücü yapısı kullanılarak gerçekte en dalgallılık incelenebilir.

Yapılan çalı ma esnasında dikkat çeken di er bir konu ise, KKARM sürücü sistem

anahtarlama kayıplarının azaltılması için yumu ak anahtarlama tekniklerinin genel sistem verimliliğinin arttırmada denenebilecek bir yöntem olarak ortaya çıkmasıdır.

KAYNAKLAR

- 1- ERFAN, F., "Anahtarlı Relüktans Motorunun Statik ve Dinamik Davranışı ile Ulaştırılabilirliğin Analizi", Doktora Tezi, *Yıldız Üniversitesi, İstanbul*, 1-53, (1992).
- 2- Vijayraghavan, P., "Design of Switched Reluctance Motors and Development of a Universal Controller for Switched Reluctance and Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives", Doktora Tezi, *Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, Virginia*, (2001).
- 3- Staley, A.M., "Designs and Implementation of A Novel Single-Phase Switched Reluctance Motor Drive System", Yüksek Lisans Tezi, *Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, Virginia*, 1-2, (2001).
- 4- Suriano, J.R., "Design Methodology For Low Speed Variable Reluctance Motors", *Purdue University School of Electrical Engineering ECE Technical Report*, TR-EE 92-37, 1-20, (1992).
- 5- Mecrow, B.C., "New Winding Configurations for Doubly Salient Reluctance Machines", *Industry Applications Society Annual Meeting*, IEEE, 249-256 Houston TX USA, 4-9 October (1992).
- 6- Mecrow, B.G., "Fully Pitched-Winding Switched-Reluctance and Stepping-Motor Arrangements", *IEE Proceedings-B*, 140, 61-70 (1993).
- 7- Barrass, P.G., Mecrow, B.C., and Clothier, A.C., "The Unipolar Operation of Fully Pitched Switched Reluctance Motor Drives", *Proceedings of the IEE conference ICEM*, IEEE, 71-76 Paris France, 05-08 September (1994).
- 8- Barrass, P.G., Mecrow, B.C., Clothier, A.C., "Bipolar Operation of Fully-Pitched Winding Switched Reluctance Drives", *IEE Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives*, IEE, 252-256 Durham, 11-13 September (1995).
- 9- Mecrow, B.C., "New Winding Configurations for Doubly Salient Reluctance Machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 32, 1348-1356 (1996).
- 10- 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*, IEEE, 1798-1803 Baveno Italy, 23-27 June (1996).

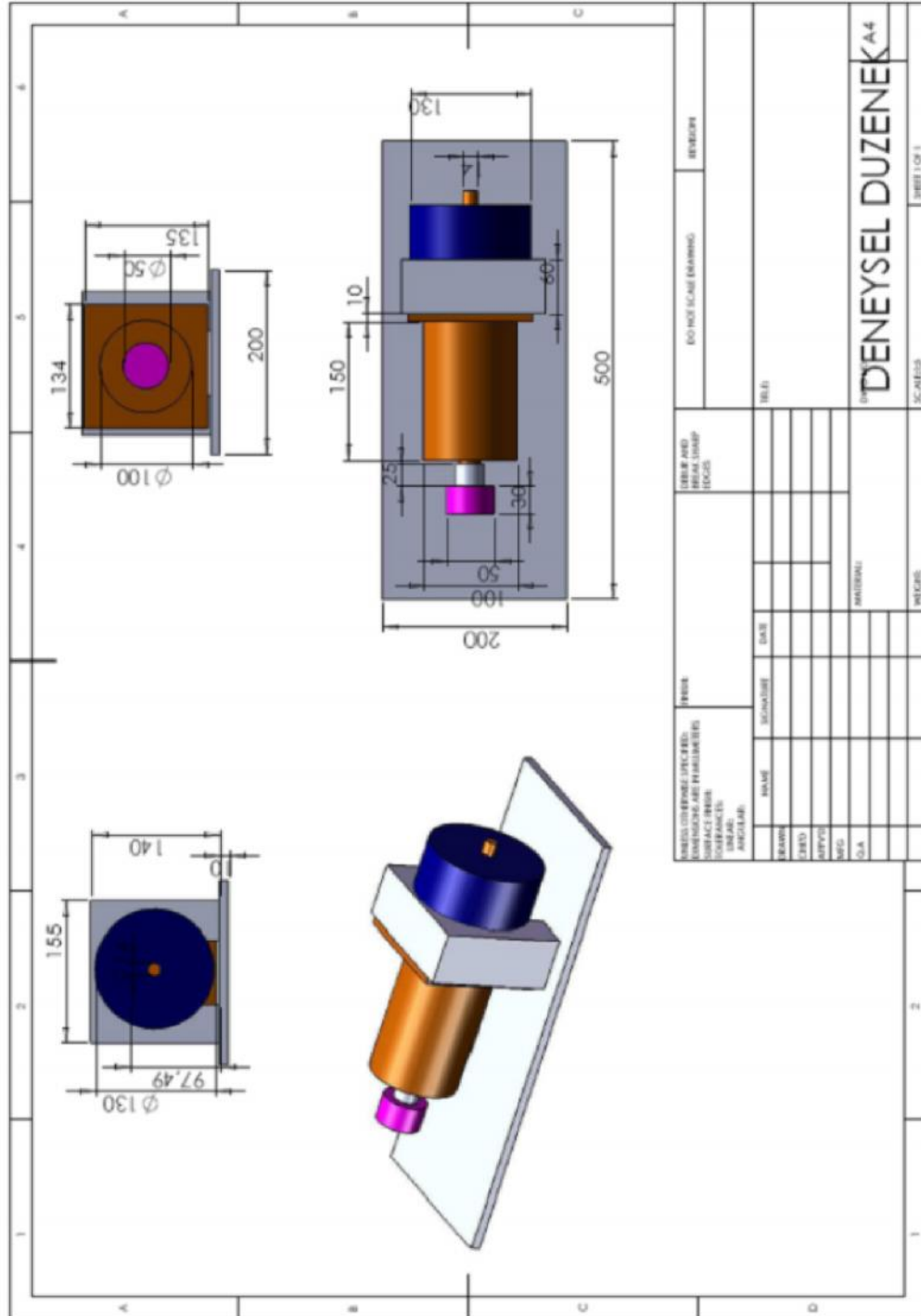
- 11- Mecrow, B.C., Clothier, A.C., Barrass, P.G., Weiner, C., "Drive Configurations for Fully-Pitched Winding Switched Reluctance Machines", *Thirty-Third IAS Annual Meeting Industry Applications Conference*, IEEE, 563-570 Louis MO USA, 12-15 October (1998).
- 12- Clothier, A.C., Mecrow, B.C., "Inverter Topologies and Current Sensing Methods for Short Pitched and Fully Pitched Winding SR Motors", *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, IEEE, 416-423 Dallas TX USA, 14-18 March (1999).
- 13- Kosaka, T., Matsui, N., "Position Sensorless Control of General Purpose Inverter-Fed Fully-Pitched Winding Reluctance Motor Drives", *Industry Applications Conference*, IEEE, 1745-1750 Rome Italy, 08-12 October (2000).
- 14- Kokernak, J.M., Torrey, D.A., "Magnetic Circuit Model for the Mutually Coupled Switched-Reluctance Machine", *IEEE Transactions on Magnetics*, 36,500-507 (2000).
- 15- Ashour, H.A., Reay, D.S., Williams, B.W., (2000)."Shunt-Excited Doubly Salient 8/6 Switched Reluctance Machine", *IEE Proceedings Electric Power Applications*, 147, 391-401 (2000).
- 16- Mecrow, B.C., Weiner, C., Clothier, A.C., "The Modeling of Switched Reluctance Machines with Magnetically Coupled Windings", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37, 1675-1683 (2001).
- 17- Kosaka, T., Matsui, N., "Simplified Analysis and Evaluation of Drive Characteristics of Fully-Pitched Winding Reluctance Motors", *Electrical Engineering in Japan*, 134, 45-52 (2001).
- 18- 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*, IEEE, 1042-1052 Shenyang China, 18-20 August (2001).
- 19- 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*, IEEE, 157- 161 Cairo EGYPT, 7-9 May (2002).
- 20- Ozoglu, Y., Garip, M., Mese, E., "New Pole Tip Shapes Mitigating Torque Ripple in Short Pitched and Fully Pitched Switched Reluctance Motors", *37th IAS Annual Meeting Industry Applications Conference*, IEEE, 43-50 Pittsburgh PA USA, 13-18 October (2002).
- 21- 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*, 149, 65- 80 (2002).

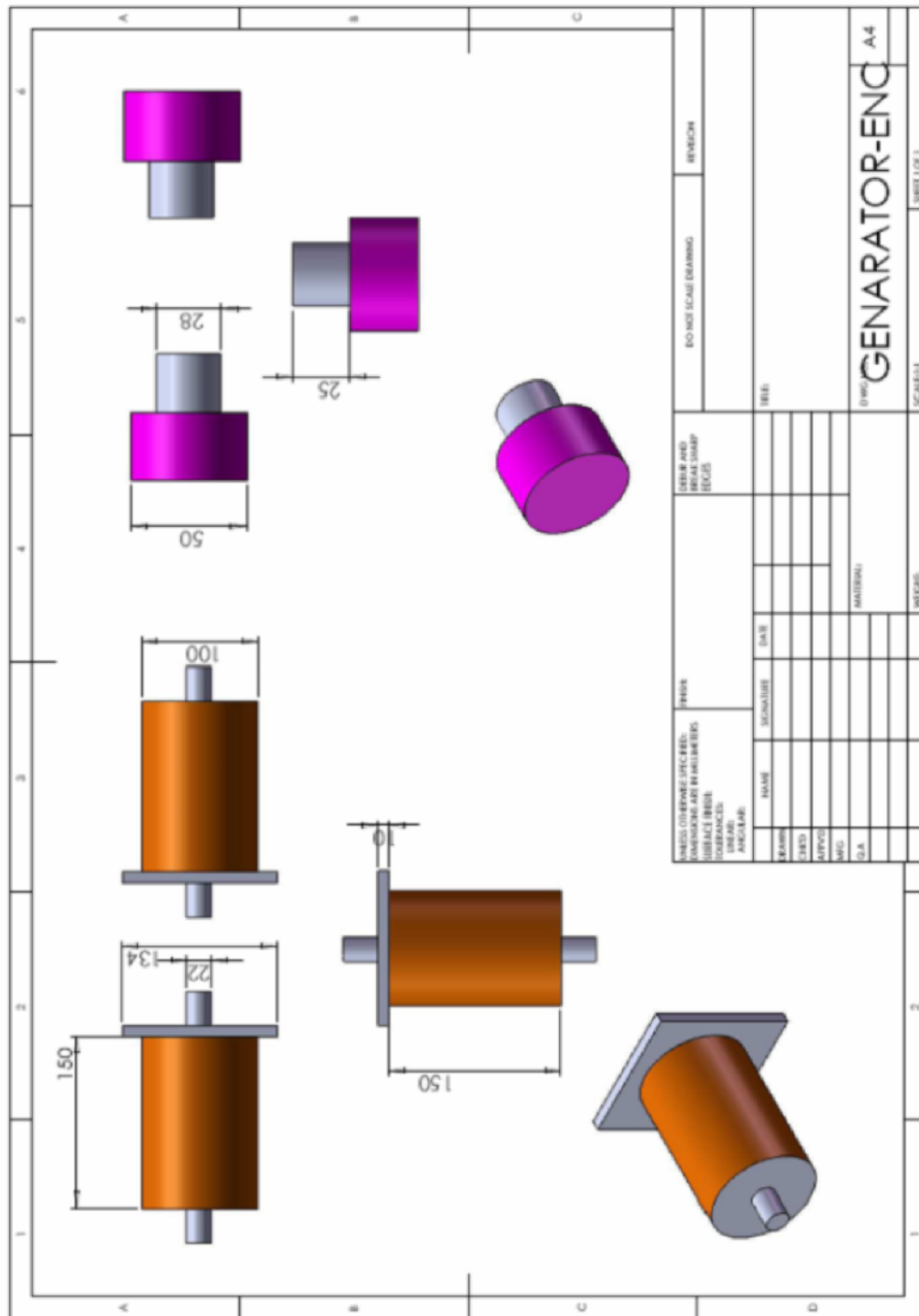
- 22- Xu, Y., Torrey, D.A., "Study of the Mutually Coupled Switched Reluctance Machine Using the Finite Element Circuit Coupled Method", *IEEE Proceedings Electric Power Applications*, 149, 81-86 (2002).
- 23- Gallegos-Lopez, G., Krefta, R.J., "Comparison of Full Pitch and Concentrated Coil Switched Reluctance Machines", *38th IAS Annual Meeting Industry Applications Conference*, IEEE, 213-218 Salt Lake City, Utah USA, 12-16 October (2003).
- 24- Barnes, M., Veerapraditsin, C., "Analysis of DC Bias Switched Reluctance Winding Configuration", *Power Electronics, Machines and Drives PEMD*, IEEE, 475-480 Edinburgh UK, 31 March-2 April (2004).
- 25- Yılmaz, K., "Anahtarlı Relüktans Motorunun Sargı Yapısı De ğ iştirilerek Moment Performansının iyileştirilmesi", Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, zmit, 3-13, (2004).
- 26- Fitzgerald , A. E., Kingsley, C., Umans, S. D., "Electric Machinery", *McGraw-Hil*, 1-56, (2003).
- 27- Lu, Y., "Instantaneous Torque Control of Switched Reluctance Motors", Yüksek Lisans Tezi, *The University of Tennessee*, Knoxville, USA, 6-7, (2002).
- 28- ahin, K., "Anahtarlı Relüktans Motorların Matematik Modelinin Elde Edilmesi ve Simülasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *stanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, stanbul, 36-43, (1995).
- 29- Vijayraghavan, P., "Design of Switched Reluctance Motors and Development of a Universal Controller for Switched Reluctance and Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives", Doktora Tezi, *Virginia Polytechnic Institute and State University*, Blacksburg, Virginia, USA, 5-82, (2001).
- 30- Luo, F., F., Ye, H., "Essential Dc/Dc Converters", *CRC Press*, 3-31, (2006).
- 31- MOHAN, N., "First Course on Power Electronics and Drives", *MNPERE*, 48-70, (2003).
- 32- RASHID, M., H., "Power Electronics Handbook", *Academic Press*, 211-218, (2001).
- 33- Çoruh, N., " Küçük Güçlü Bir Anahtarlı Relüktans Motorunun Sürücü Devresi Tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, zmit, 26-30, (2005).
- 34- Gribble, J., J., Kjaer, P.,C., Miller, T., J., E., "Optimal Commutation in Average Torque Control of Switched Reluctance Motors", *IEE Proceedings, Electric Power Applications*, 146, 2-10 (1999).

- 35- Hwu, K., I., Liaw, C., M., "DC-link voltage Boosting and switching control for switched reluctance motor drives," *IEE Proceedings, Electric Power Applications*, 147, 337-344 (2000).
- 36- Hwu, K., I., Liaw, C., M., "Intelligent Tuning of Commutation for Maximum Torque Capability of a Switched Reluctance Motor", *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 18, 113-120 (2003).
- 37- Ma, B., Y., Liu, T., H., Chen, C., G., Chang, Y.,H., "Design and implementation of a switched reluctance motor drive with a novel converter", *Electric Power Systems Research*, 56, 111–119 (2000).
- 38- Rasmussen, P., O., Andersen, G., Helle, L., Blaabjerg, F., Pedersen, J., K., "Fully Automatic Characterization System for Switched Reluctance Motors", *International Conference on Electrical Machines ICEM*, IEEE, 1692-1698, Istanbul, Turkey, 2-4 September (1998).
- 39- Consoli, A.; Gennaro, F.; Scarcella, G.; Testa, A., "A simple unity power factor motor drive for home appliances", *Electric Power Components and Systems*, 29,. 335 – 348 (2001).
- 40- Choi, J., H., Kim, T., H., Kim, Y., S., Lim, S., B., Lee, S., J., Kim, Y., H., Lee, J., "The Finite Element Analysis of Switched Reluctance Motor Considering symmetric Bridge Converter and DC Link Voltage Ripple", *IEEE Transactions on Magnetics*, 41, 1640- 1643 (2005).
- 41- Özo lu, Y., "Anahtarlamalı Relüktans Motorunda Kutup Ba larına ekil Vererek Moment Dalgalanmasının Azaltılması", Doktora Tezi, *stanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, stambul, 111-113, (1999).
- 42- Yuanto, X.i, "Utility Interface Design and Mutual Coupled Switched Reluctance Machine Study for a Wind Generation System", Doktora Tezi, *Rensselaer Polytechnic Institute*, Troy, New York, 65-75, (2001).
- 43- Nakamura, K., Kimura, K., Ichinokura, O., "Electromagnetic and motion-coupled analysis for switched reluctance motor based on reluctance network analysis", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 290-291, 1309-1312 (2004).
- 44- Elliott, D., L., Omidvar, O., "Neural Networks and Automatic Control", *Elsevier Science & Technology Books*, 7-13, (1997).
- 45- Jones, M.i T., "Artificial Intelligence A Systems Approach", *Infinity Science Press LLC*, 7-13 (2008).
- 46- Fauselt, L., "Fundamentals of Neural Networks Architectures, Algorithms and Applications", *Prentice-Hall, Inc.*, 7-13, (1994).
- 47- M.N. Cirstea, A. Dinu, J.G. Khor, M. McCormick, "Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems", *Newnes*, 66-73, (2002).

- 48- Andrew G. Barto, Reinforcement Learning, Omid Omidvar, David L. Elliott (Ed.), “Neural Systems for Control”, *Elsevier Science & Technology Books*, 16-23, (1997)
- 49- Elmas, Ç., Akcayol, M., A., Yi it, T., “Bulanık PI Denetleyici ile Bir Anahtarlama Relüktans Motorun Hız Denetimi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22, 65-72, (2007).
- 50- Kesler, M., “Paralel aktif güç filtresinin tasarımı ve vissim yazılımı ile dsp üzerinden denetimi”, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 40-42, (2006).
- 51- Microchip Technology Inc., “dsPIC30F Data Sheet Motor Control and Power Conversion Family High Performance Digital Signal Controllers”, *DS70082G*, (2004).
- 52- Microchip Technology Inc., “Quadrature Encoder Interface (QEI)”, *DS70063C*, (2004).
- 53- Microchip Technology Inc., “MPLAB® C Compiler for PIC24 MCUs and dsPIC® DSCs User Guide”, *DS51284G*, (2008).
- 54- POPA, O., G., “Learn Hardware Firmware and Software Design”, *Corollary Theorems Ltd.* 129-145, (2005).

EKLER





K SEL YAYINLAR VE ESERLER

- 1- Karacor M., Kuyumcu F. E., Yılmaz K., “Modeling MCSRM With Artificial Neural Network”, *ACEMP’07 and ELECTROMOTION’07 Joint meeting*, Vol I, p.p. 849-852, Bodrum, Turkey, 10-12 September (2007).
- 2- Karacor M., Kuyumcu F. E., “Matlab Gui Based SRM Desing Program”, *ACEMP’07 and ELECTROMOTION’07 Joint meeting*, Vol. I p.p. 846-848, Bodrum, Turkey, 10-12 September (2007).
- 3- Karacor M., Kuyumcu F. E., “Modelling Mutually Couple Switched Reluctance Machine With Artificial Neural Network”, *ISEF 2007, 13. International Symposium Electromagnetic Fields In Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering*, p.p. 326-329, Prague September 13-15, (2007).
- 4- Karacor M., Kuyumcu F. E., “Determination Of Srm Design Parameters Via Matlab Gui Based Programa”, *ISEF 2007, 13. International Symposium Electromagnetic Fields In Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering*, p.p. 330-332, Prague , September 13-15, (2007).

ÖZGEÇM

1977 yılında Eski ehir’de do du. İlk, orta ve lise e itimini Eski ehir’de tamamladı. 1995 yılında girdi i Kocaeli Üniversitesi, Teknik E itim Fakültesi, Elektrik E itimi Bölümü’nden 2000 yılında Elektrik Ö retmeni olarak mezun oldu. 2001-2004 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik E itimi Anabilim Dalı’nda yüksek lisans ö renimini tamamladı. 2000 yılından beri Kocaeli Üniversitesi, Teknik E itim Fakültesi, Elektrik E itimi Bölümü’nde Ara tırma Görevlisi olarak görev yapmakta olup, evlidir.