

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KUTUP BAŞLARI ŞEKİLLENDİRİLMİŞ
ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUNDA
TAM KUTUP ADIMLI SARGININ MOMENT
DALGALILIĞININ İYİLEŞTİRİLMESİNE KATKISI**

Elektrik.Yük.Müh. Muhammet GARİP

F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 09 Ekim 2002
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Asım KASAPOĞLU
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Nurdan GÜZELBEYOĞLU
: Prof. Dr. Burhanettin CAN
: Prof. Dr. Halit PASTACI
: Doç. Dr. İbrahim ŞENOL

(YTÜ)
(İTÜ)
(MÜ)
(YTÜ)
(YTÜ)

[Handwritten signatures and initials]

İSTANBUL, 2002

[Handwritten signature]

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ÖNSÖZ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. TAM KUTUP ADIMLI ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN YAPISI	11
2.1 Giriş	11
2.2 TKARM 'un Temel Çalışma İlkesi	12
2.2.1 Sargı Yapısı	13
2.2.2 Endüktans Yapısı.....	14
2.2.3 Moment Üretimi	19
2.3 TKARM 'da Uyarma Yapıları	20
2.3.1 Tek Yönlü Uyarma Yapısı	20
2.3.2 Çift Yönlü Uyarma Yapısı	21
2.3.3 Çift Yönlü Üç Fazlı Uyarma Yapısı.....	22
2.4 TKARM 'da Sürücü Devrenin İncelenmesi.....	23
3. KLASİK ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN YAPISI	26
3.1 Giriş	26
3.2 Klasik ARM Temel Çalışma İlkesi	27
3.2.1 Sargı Yapısı ve Geometrik Özellikleri	27
3.2.2 Temel Çalışma İlkesi.....	28
3.3 Klasik ARM 'un Matematiksel Modeli.....	30
3.3.1 Doğrusal Bölgenin Matematiksel Modeli	30
3.3.2 Doğrusal Olmayan Bölgenin Matematiksel Modeli.....	32
4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE STATİK MAGNETİK ANALİZ.....	38
4.1 Giriş	38

4.2	SEY ve Elektromagnetik Alan Çözümlerine Uygulanması	39
4.2.1	Maxwell ve Poisson Denklemleri.....	40
4.2.2	Magnetik Vektör Potansiyel ve Temel Eşitlikler.	42
4.3	Statik Magnetik Analiz.....	47
4.4	Birleşik Alan Analizi.....	49
5.	TAM KUTUP ADIMLI ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN ANALİZİ.....	52
5.1	Giriş.....	52
5.2	Kullanılan Motorun Özellikleri	53
5.3	SEY İle Modelin Oluşturulması	56
5.3.1	Geometrinin Modellenmesi	56
5.3.2	Kullanılan Malzemenin Tanımı.....	57
5.3.3	Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması	57
5.3.4	Çözüm	60
5.3.5	Sonuçların Değerlendirilmesi.....	60
5.4	TKARM 'un Çalışma Karakteristiklerinin Elde Edilmesi	60
5.5	TKARM 'un Moment Karakteristikleri	65
5.6	Sonuçlar	68
6.	TAM KUTUP ADIMLI VE KLASİK ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARIN EŞİT ŞARTLARDA KARŞILAŞTIRILMASI	69
6.1	Giriş.....	69
6.2	Klasik Anahtarlama Relüktans Motorun SEY ile Analizi	70
6.2.1	Klasik ARM Modelinin Oluşturulması	70
6.2.2	Çalışma Karakteristiklerinin Elde Edilişi.....	71
6.2.3	Momet Eğrilerinin Elde Edilişi	76
6.3	Eşit Kayıplara Dayalı Analiz.....	77
6.4	SEY İle Eşit Bakır Kayıplarında TKARM Analizi	78
6.4.1	Çalışma Karakteristiklerinin Elde edilişi	78
6.4.2	Moment Eğrileri	83
6.5	Sonuçlar.....	84
7.	BÖLÜM DEĞİŞİK KUTUP BAŞI PARAMETRELERİNE SAHİP TKARM ANALİZİ VE MOMENT DALGALILIĞININ İYİLEŞTİRİLMESİ	86
7.1	Giriş.....	86
7.2	TKARM 'unda Moment Dalgallığı	87
7.3	TKARM 'un Moment Dalgallığını Azaltmak İçin Kullanılan Yöntem	88
7.3.1	Model 1 'e ait Kutup Şekilleri	90
7.3.2	Model 2 'ye ait Kutup Şekilleri	91
7.3.3	Model 3 'e ait Kutup Şekilleri	93
7.3.4	Model 4 'e ait Kutup Şekilleri	94
7.3.5	Model 5 'e ait Kutup Şekilleri	95
7.4	Model 5 'in Çalışma Karakteristikleri	97
7.4.1	Endüktans ve Akı Karakteristiği	97
7.4.2	Moment Karakteristikleri	99
7.5	Temel Model ve Model 5 'in Fourier Serisine Açılımı	102
7.6	Oluşturulan Modellerin Klasik ARM Üzerindeki Etkilerinin İncelemesi.....	103

7.7	Sonuçlar.....	105
8.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	107
	KAYNAKLAR.....	110
	EKLER.....	115
	Ek-1 TKARM ve Klasik ARM ‘una Ait Akı Yolu Haritaları.....	115
	Ek-2 TKARM ‘da Model 5 ‘e Ait Akı Yolu Haritaları.....	126
	ÖZGEÇMİŞ	132



SİMGE LİSTESİ

A_s	: Sargı alanı
B	: Magnetik akı yoğunluğu
B_x	: Akı yoğunluğunun radyal bileşeni
B_y	: Akı yoğunluğunun teğet bileşeni
D	: Elektrik akı yoğunluğu
d'_{r1}	: Rotor kutup başı uzantı yüksekliği
d'_{r2}	: Rotor kutup başı girinti yüksekliği
d'_{s1}	: Stator kutup başı uzantı yüksekliği
d'_{s2}	: Stator kutup başı girinti yüksekliği
D_r	: Rotor çapı
d_r	: Rotor kutup yüksekliği
D_s	: Stator çapı
d_s	: Stator kutup yüksekliği
E	: Elektrik alan şiddeti
g	: hava boşluğu
H	: Magnetik alan şiddeti
H_e	: Koersif kuvvet
i	: Faz akımı
J	: Akım yoğunluğu
K	: Katsayılar elemanı
L	: Sargı endüktansı
l_{art}	: Artımsal endüktans
L_e	: Toplam motor boyu
L_{stk}	: Motor boyu
m	: Faz sayısı
N	: Sarım sayısı
N_r	: Rotor kutup sayısı
N_s	: Stator kutup sayısı
P_s	: Mil gücü
R	: Sargı direnci
r_0	:Rotor boyunduruk çapı
r_1	: Rotor kutup yarıçapı
r_2	: Stator iç boyunduruk yarıçapı
r_3	: Stator dış boyunduruk yarıçapı
r_{sh}	: Motor mil yarıçapı
S/P	: Güç oranı
T	: Moment
T	: Zaman
T_d	: Moment dalgalılığı
T_{max}	: Moment eğrisindeki en büyük değer
T_{min}	: Moment eğrisindeki en küçük değer
t_r	: Rotor kutup genişliği
t_s	: Stator kutup genişliği
V	: Sargı besleme gerilimi
V	: Skaler potansiyel
v	: Hız
W'_m	: Ko-enerji

W_m	: Magnetik alanda depo edilen enerji
y_r	: Rotor boyunduruk kalınlığı
y_s	: Stator boyunduruk kalınlığı
M	: Toplam kütle
F_s	: Virtual iş kuvveti
F	: Faz frekansı
θ	: Rotor konumu
ρ	: Elektrik yük yoğunluğu
σ	: Elektriksel iletkenlik
μ	: Magnetik geçirgenlik
ε	: Stroke açısı
η	: Verim
∇	: Diverjans operatörü
$\nabla \times$	: Rotasyonel operatörü
ϕ	: Akı
λ	: Akı halkalanması
L_{faz}	: Faz öz endüktansı
L_1	: Kaçak öz endüktans
μ_0	: Mutlak magnetik geçirgenlik
β	: Rotor ve stator kutupları arasındaki örtüşme uzunluğu
G	: Hava boşluğu uzunluğu
M	: Fazlar arasında oluşan karşıt endüktans
R	: Rotor kutubu
S	: Stator kutubu
L_{max}	: En büyük öz endüktans
L_{min}	: En küçük öz endüktans
ω	: Açısal hız
J_s	: Sabit kaynak akım yoğunluğu
J_e	: Endüklenen girdap akım yoğunluğu
J_t	: Toplam akım yoğunluğu
J_v	: Hız akım yoğunluğu
α'_s	: Stator kaymış kutup başı açısı
α'_{s1}	: Stator kutup başı uzantı açısı
α'_{s2}	: Stator kutup başı girinti açısı
α'_{r1}	: Rotor kutup başı uzantı açısı
α'_{r2}	: Rotor kutup başı girinti açısı

KISALTMA LİSTESİ

TKARM	: Tam Kutup Adımlı Anahtarlama Relüktans Motor
ARM	: Anahtarlama Relüktans Motor
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
AA	: Alternatif Akım
DA	: Doğru Akım
MMK	: Magnetomotor Kuvvet
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
EMK	: Elektromotor Kuvvet



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	TKARM 'un genel yapısı	12
Şekil 2.2	Klasik ARM sargı yapısı	13
Şekil 2.3	TKARM sargı yapısı	14
Şekil 2.4	6/4 Klasik ARM üç faz sargı yapısı.....	15
Şekil 2.5	Klasik ARM 'da öz endüktans rotor konumu değişimi	15
Şekil 2.6	Örtüşme uzunluğu β_L 'nin boyutu	16
Şekil 2.7	TKARM 'da akı rotor konumu değişimi	17
Şekil 2.8	TKARM 'da karşıt ve öz endüktans rotor konumu değişimi	18
Şekil 2.9	Tek yönlü uyarma yapısı ve endüktans değişimi.....	21
Şekil 2.10	Çift yönlü iki fazlı uyarma yapısı ve endüktans değişimi	22
Şekil 2.11	Çift yönlü üç fazlı uyarma yapısı ve endüktans değişimi.....	23
Şekil 2.12	Asimetrik yarı köprü sürücü devresi	24
Şekil 2.13	Düşük kayıplı tam köprü sürücü devresi	24
Şekil 3.1	Klasik ARM genel görünümü.....	26
Şekil 3.2	Bir fazı uyarılmış 6/4 klasik ARM	27
Şekil 3.3	Klasik ARM 'un değişik konumlarına ait öz endüktans ve moment değişimi.	29
Şekil 3.4	Klasik ARM 'da doğrusal bölgeye ait akı akım değişimi	31
Şekil 3.5	Klasik ARM 'da doğrusal olmayan bölgeye ait akı akım değişimi.....	33
Şekil 3.6	Klasik ARM 'un bir fazına ait eşdeğer devre	34
Şekil 3.7	Sabit Akımda Ko-Enerji Değişimi ve Moment Üretimi.....	36
Şekil 5.1	ARM 'un kesit görünüşü ve boyutları	53
Şekil 5.2	Motorda kullanılan malzeme için B-H eğrisi	56
Şekil 5.3	TKARM 'un SEY ile modellenmiş hali	58
Şekil 5.4	Stator ve rotorda kullanılan elemanlar.....	59
Şekil 5.5	Hava aralığı ve kullanılan elemanlar	59
Şekil 5.6	TKARM ve tek yönlü uyarma yapısı	61
Şekil 5.7	TKARM 'da bir faza ait öz endüktans değişimi.....	62
Şekil 5.8	TKARM 'da karşıt endüktans değişimi.....	63
Şekil 5.9	TKARM 'da üç fazlı karşıt endüktans değişimi.....	63
Şekil 5.10	TKARM 'da akı akım değişimi.....	64
Şekil 5.11	TKARM 'da 3-fazlı doğrusal bölgeye ait moment eğrileri	65
Şekil 5.12	TKARM 'da 3-fazlı doğrusal olmayan bölgeye ait moment eğrileri	67
Şekil 5.13	TKARM moment eğrisi (6A)	67
Şekil 6.1	Klasik ARM 'na ait kısa kutup adımlı sargı yapısı	70
Şekil 6.2	Klasik ARM akı akım eğrisi.....	72
Şekil 6.3	Klasik ARM öz endüktans eğrisi (10A)	73
Şekil 6.4	Klasik ARM üç fazlı öz endüktans değişimi (10 A)	73
Şekil 6.5	Klasik ARM akı haritası (45°).....	74
Şekil 6.6	Klasik ARM akı haritası (60°).....	75
Şekil 6.7	Klasik ARM akı haritası (90°).....	75
Şekil 6.8	Klasik ARM moment eğrisi (10 A)	76
Şekil 6.9	TKARM 'da akı akım eğrisi.....	78
Şekil 6.10	TKARM 'da öz endüktans değişimi (5.59 A)	79
Şekil 6.11	TKARM 'da karşıt endüktans değişimi (5.59 A)	80
Şekil 6.12	TKARM 'da üç fazlı karşıt endüktans değişimi (5.59 A)	80
Şekil 6.13	TKARM 'da anma akımı için akı haritası (45°).....	81
Şekil 6.14	TKARM 'da anma akımı için akı haritası (60°).....	82

Şekil 6.15	TKARM 'da anma akımı için akı haritası (90°)	82
Şekil 6.16	TKARM moment eğrisi (5.59 A)	83
Şekil 7.1	TKARM 'da ideal durum için karşıt kuplaj ve moment.....	88
Şekil 7.2	Tanımlanan kutup başı parametreleri	89
Şekil 7.3	Model 1 'e ait kutup başı şekilleri	90
Şekil 7.4	Model 1 'e ait moment ve dalgalılığı	91
Şekil 7.5	Model 2 'ye ait kutup başı şekilleri.....	92
Şekil 7.6	Model 2 'ye ait moment ve dalgalılığı	92
Şekil 7.7	Model 3 'e ait kutup başı şekilleri.....	93
Şekil 7.8	Model 3 'e ait moment ve dalgalılığı	94
Şekil 7.9	Model 4 'e ait kutup başı şekilleri.....	94
Şekil 7.10	Model 4 'e ait moment ve dalgalılığı	95
Şekil 7.11	Model 5 'e ait kutup başı şekilleri.....	96
Şekil 7.12	Model 5 'e ait moment ve dalgalılığı	97
Şekil 7.13	Model 5 'e ait karşıt endüktans	98
Şekil 7.14	Anma akımda Model 5 'e ait 3 fazlı karşıt endüktanslar	98
Şekil 7.15	Model 5 'e ait akı eğrisi	99
Şekil 7.16	Model 5 'in doğrusal bölgeye ait moment eğrileri.....	100
Şekil 7.17	Model 5 'in doğrusal olmayan bölgelere ait moment eğrisi	100
Şekil 7.18	TKARM Temel Model ve Model 5 'e ait moment Fourier Serisi açılımı.....	102
Şekil 7.19	Klasik ARM Temel Model ve Model 5 'e ait moment Fourier Serisi açılımı	102
Şekil 7.20	Klasik ARM 'da Model 5 'e ait akı akım eğrisi.....	103
Şekil 7.21	Klasik ARM anma akım için Model 5 'e ait öz endüktans değişimi.....	104
Şekil 7.22	Klasik ARM Model 5 'e ait moment eğrisi (10 A).....	104

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 5.1	ARM 'un boyut parametre tablosu	54
Çizelge 5.2	ARM 'un genel etiket değerleri.....	55
Çizelge 5.3	Momentlerin ortalama değerleri ve dalgalılık oranları.....	68
Çizelge 6.1	Klasik ARM ortalama moment değerleri ve dalgalılık oranları	77
Çizelge 6.2	TKARM moment değerleri ve dalgalılık oranları	84
Çizelge 7.1	Kutup başlarında tanımlanan geometrik parametreler ve anlamları.....	89
Çizelge 7.2	Model 1 kutup şekillerine ilişkin parametreler.....	91
Çizelge 7.3	Model 2 kutup şekillerine ilişkin parametreler.....	92
Çizelge 7.4	Model 3 kutup şekillerine ilişkin parametreler.....	93
Çizelge 7.5	Model 4 kutup şekillerine ilişkin parametreler.....	95
Çizelge 7.6	Model 5 kutup şekillerine ilişkin parametreler.....	96
Çizelge 7.7	Model 5 ile değişik akımlarda sağlanan dalgalılıktaki iyileşmeler	101
Çizelge 7.8	Klasik ARM 'un Model 5 'in analizi ile elde edilen sonuçlar.....	105



ÖNSÖZ

Tez çalışmam esnasında yardım ve destekleri ile beni sürekli yönlendiren hocam ve tez danışmanım Prof.Dr.Asım KASAPOĞLU Bey 'e en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Özellikle Anahtarlmalı Relüktans Motor ile ilgili verdiği bilgilerden ve yardımlarından dolayı Prof.Dr.M.Oruç BİLGİÇ Bey 'e, Kadir HALİLOĞLU 'na ve ayrıca çalışmalarım esnasında tahammül sınırlarını zorlayarak destek olan eşime ve oğluma teşekkür ederim.



ÖZET

Tam Kutup Adımlı Anahtarlama Relüktans Motor (TKARM), yeni sargı yöntemi ile klasik Anahtarlama Relüktans Motorun (ARM) sahip olduğu üstünlüklere ek olarak ortalama momentte önemli bir oranda artış sağlamaktadır. Motorun magnetik ve elektrik devresinin daha verimli kullanılması ile elde edilen bu artış yanında temel çalışma ilkelerinde de önemli değişiklikler meydana gelmektedir.

Ortalama çıkış momentinde sağlanan olumlu gelişmeye rağmen, yeni sargı yöntemi iki olumsuz yönü beraberinde getirmektedir. Bunlardan ilki makinede üretilen akının sadece rotor konumuna ve bir faza değil aynı zamanda makinenin diğer fazlarına da bağlı olmasından kaynaklanan, analitik modelde meydana gelen karmaşıklığıdır. Diğer ise klasik ARM 'un yapısında zaten var olan fakat yeni sargı yapısı ile uyarmaya bağlı olarak etkisini daha da arttıran ve faz geçişleri esnasında oluşan momentteki dalgalılık oranının artmasıdır.

Çalışmanın amacı TKARM 'un moment dalgalılığını azaltmak ve yeni sargı yöntemi ile elde edilen ortalama çıkış momentindeki artışı ön plana çıkartmaktır. Bu amaçla ilk olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile TKARM 'un analizi yapılarak çalışma karakteristikleri bundan önceki çalışmalara uygun olarak elde edildi ve değişik uyarma akımları için dalgalılık oranları belirlendi. Aynı motor hiç bir parametresi değiştirilmeksizin klasik ARM olarak modellendi. Değişik konumlara ait akı yolu haritaları karşılaştırıldı ve moment dalgalılığını azaltmak amacıyla klasik ARM 'una uygulanan ve magnetik devreyi temel alan çalışmaların tek yönlü uyarma yapısında TKARM için de uygulanabileceği sonucuna varıldı. Ortalama çıkış momentleri açısından karşılaştırıldığında ise anma akımında %23.8 oranında bir artış sağlandı.

Moment dalgalılığını azaltmak için farklı stator ve rotor kutup başı parametrelerine sahip beş ayrı model oluşturuldu ve bu modeller anma akım değeri için analiz edildi. Moment dalgalılığında en iyi iyileşme oranına sahip olan Model 5 ayrıntılı olarak incelendi ve tüm çalışma karakteristikleri çıkartıldı. Kutup başı parametrelerinin hiç değiştirilmediği Temel Model ile karşılaştırıldığında anma akımı için dalgalılıkta %22.6 'lık bir iyileşme elde edildi. Ortalama moment açısından klasik ARM ile karşılaştırıldığında ise yaklaşık %26.7 değerinde bir artış elde edildi.

Sonuç olarak, TKARM 'da momentteki dalgalılık sorunu önemli ölçüde giderildi. Bu şekilde yeni sargı yönteminin sağladığı ortalama momentteki artıştan daha olumlu bir şekilde yararlanma imkanı sağlandı.

Anahtar Kelimeler : Tam Kutup Adımlı, Anahtarlama Relüktans Motor, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Moment Dalgalılığı, Kutup Başı Şekillendirme

ABSTRACT

Fully Pitched Switched Reluctance Motor (FPSRM) has higher average torque output than conventional SRM. This is an additional benefit of FPSRM since it has all other advantages of conventional SRM compared to the rest of the motor family. By employing a new winding configuration, the electric and magnetic circuit of motor is used more efficiently and some important modifications occur in its operational principles.

In spite of increasing average torque output, FPSRM has two major drawbacks. Firstly, since the phase flux linkages are a nonlinear function of not only the associated phase current and rotor position, but also other phase currents as well, the analytical modelling is more complex than conventional SRM. Second drawback is the torque ripple which occurs during transition between the phases. Although the torque ripple problem inherently exists in conventional SRM, it is likely more severe depending on excitation pattern and increases in fully pitched winding arrangement.

The aim of this thesis is to decrease the torque ripple and to emphasize the average torque increase provided by fully pitched winding arrangement. For this purpose, FPSRM is analyzed by Finite Element Method (FEM) and its operational characteristics have been obtained. Then, the model of conventional SRM has been built by changing winding arrangement for the same motor and compared to FPSRM. 23.8% increase has been observed in average torque output at nominal phase current. By comparing flux paths for different rotor positions, it has been shown that magnetic circuit based torque ripple reduction methods used in conventional SRMs, could be applied to FPSRM for unipolar excitation scheme.

Five FPSRM models, having different stator and rotor pole tip geometric parameters, have been constituted and FEM analyses has been performed at nominal phase current. The model which provides the best torque ripple improvement has been analyzed with all details and named as Model 5. When compared to basic model of FPSRM, 22.6% improvement had been obtained in torque ripple value. In terms of average torque output in conventional SRM, this value had been determined as approximately 26.7%.

Consequently, the torque ripple problem of FPSRM has been investigated and significant reduction is achieved. So torque output increase has been successfully exploited in FPSRM.

Keywords: Fully Pitched, Switched Reluctance Motor, Finite Element Method, Torque Ripple, Pole Tip Shaping

1. GİRİŞ

Elektrik makinelerinin performansını arttırmaya yönelik çalışmalar her zaman araştırmacıların ilgisini çeken bir konu olmuştur. Genellikle tasarım esnasında yapılan bu çalışmalar ile verimi yükseltmek, başka bir deyişle elektrik makinesinden en iyi bir şekilde yararlanmak amaçlanmıştır. Anahtarlamaalı Relüktans Motor (ARM) gerek yapısı ve çalışma ilkesi gerekse kontrolü açısından, uzun zamandır üzerinde yoğun çalışmaların yapıldığı bir elektrik makinesidir.

Yapısı itibari ile elektrik makineleri içerisinde en basit yapıya sahip olan bu motor, aslında çift çıkık kutuba sahip, tek uyarımlı bir senkron makinedir. Stator ve rotor nüveleri bir tarafı yalıtkan bir tarafı iletken lamine saçlardan imal edilmektedir. Rotorunda herhangi bir sargı ve mıknatıs taşımamakta olup sadece statorunda sargı taşımaktadır. Yarı iletken elemanlar ile rotor konumuna bağlı olarak sürekli dönmeyi sağlayacak şekilde uyarılırlar.

ARM üzerinde yapılan çalışmalar oldukça eskidir. İlk ARM 1838 yılında iskoçya da yapılmış ve bir lokomotif yapımında kullanılmıştır. Fakat özellikle kontrol devresindeki zorluklardan dolayı uzunca bir süre üzerinde çalışma yapılamamıştır. 1980 yılında Lawrenson ve ekibi tarafından yapılan önemli bir çalışma sonucu araştırmacılar yoğun bir şekilde bu motor üzerinde çalışmaya başlamıştır. Özellikle yarı iletken teknolojisinde meydana gelen gelişmelere eş zamanlı olarak bu çalışmalar da artmıştır. İlk zamanlar yapısından dolayı Değişken Relüktanslı Motor “Variable Reluctance Motor” diye isimlendirilen bu motor daha sonra çalışma ilkesine uygunluk açısından Anahtarlamaalı Relüktans Motor (ARM) olarak isimlendirilmiştir.

Bu motor, rotordaki bir çıkık kutubun statordaki sargı ile uyarılan kutup tarafından elektromıknatısta olduğu gibi, magnetik relüktansın minimum olacağı konuma çekilmesi ile dönmektedir. Stator kutupları sırasıyla uyarılır ve her seferinde başka kutuplar çekilerek dönme devam eder. Bu çekme işleminin uyarma akımının her seferinde aynı yönde uygulanması ile yapılabildiğinden ve kullanılacak dönüştürücüde akım yönünün değiştirilmesine gerek olmadığından dolayı, dönüştürücüdeki yarı iletken anahtar sayısı diğer elektronik kontrollü motorlara göre yarı yarıya azalmaktadır. Ayrıca çıkış gücünün yüksek olması, özellikle yüksek verimi ve fiyat üstünlüğü ile alternatif ve doğru akım motorlarının karşısında güçlü bir seçenek oluşturmaktadır. Anahtarlamaalı Relükans Motorların diğer motor türlerine göre üstünlükleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Rotorda sargı, mıknatıs veya kısa devre halkası bulunmaması ve stator sargısının basitliği nedeniyle maliyetinin düşük olması,
- Rotorun sargısız ve fırçasız olmasından dolayı çok yüksek hızlarda çalışmaya uygun oluşu,
- Rotor eylemsizlik momentinin düşük olması nedeni ile cevap süresinin küçük olması,
- Motor sargısının yarı iletken anahtarlara seri bağlı olması nedeniyle kısa devre tehlikesinin olmaması,
- Stator üzerindeki sargıların çok basit oluşu ve aralarında bir elektriksel bağlantının olmaması,
- Motor fazlarının birbirinden bağımsız çalışabilmesinden dolayı herhangi bir fazın arızalanması halinde bile motorun dönebilmesi.

Bütün bu üstünlüklerine karşın, bu motorun uzun süredir bilinmesine rağmen kullanışlı olmamasının bazı nedenleri şöyle sıralanabilir;

- Stator sargı endüktansının büyük oluşu ve anahtarlama esnasında sargı endüktansının uçlarında büyük gerilim oluşması,
- Özellikle düşük hız uygulamalarında momentte büyük genlikli salınımlar oluşmakta ve motor gürültülü çalışmaktadır,
- Motorun dönebilmesi için belli bir anda hangi faza gerilim uygulanması gerektiğinin bilinmesi zorunludur. Bu amaçla mile bağlı bir algılayıcı ile rotor konum bilgisi alınarak, konvertörün kontrol edilmesi gerekir.

Yarı iletken teknolojisinde ve modern kontrol yöntemlerinde meydana gelen gelişmelerle birlikte çalışmalar, ARM 'un özellikle sürücü devresi, kontrol yöntemleri, ve konum algılayıcısız çalışma v.b. konular üzerine yoğunlaşmıştı. Bu konular üzerine çalışmaktaki amaç ise motorun olumsuz yönlerini gidermek ve verimini arttırmaya yönelikti ve bunlar kontrol temelli çalışmalar idi. Tasarıma yönelik çalışmalar biraz daha geri planda kalıyordu.

Yoğun bir şekilde gerçekleştirilen kontrol temelli çalışmaların bir miktar doymaya ulaşması ile tasarım aşamasını temel alan ve motorun performansını arttırmaya yönelik çalışmalar hız kazandı. Bu çalışmalardaki ilk amaç hava aralığı açısından daha fazla faydalanmak idi ve bunu gerçekleştirmek için değişik stator ve rotor şekilleri kullanılıyordu. Daha sonraları

performansı arttırmak için makinenin elektrik ve magnetik devresinden daha fazla yararlanma düşüncesi ortaya çıktı. Yapılan ilk çalışmalar ilave sargıların kullanıldığı “Yardımcı Komütasyon Sargılı ARM” ‘lar idi. Bu ilave sargıların kullanım amacı, iletimdeki bir fazın magnetik enerjisinin bir diğer faza kısmi kuplajını sağlamak idi. Böylelikle faz söndüğü zaman bu enerji makine içerisinde aynı şekilde kalabilmekte ve dolayısı ile ortalama çıkış momentinde bir artış sağlanmakta idi.

İlk olarak Mecrow tarafından 1993 yılında ortaya konulan bir sargı yöntemi ile performansı arttırmaya yönelik çalışmalar yeni bir boyut kazandı. Gerçekleştirilen tam kutup adımlı sargı yapısı ile stator sargıları tüm oluğu kaplıyordu. Oysa klasik ARM stator dişleri etrafına sarılan kısa kutup adımlı sargılardan oluşmakta idi. Yeni sargı yapısı ile ARM ‘un çalışma ilkelerinde önemli değişiklikler meydana geldi ve ortalama çıkış momentini açısından eşdeğer ARM ‘lara göre yaklaşık %20-30 daha fazla moment elde edildi. Daha çok Tam Kutup Adımlı ARM “Fully Pitched SRM” veya Karşıt Kuplajlı ARM “Mutually Coupled SRM” olarak isimlendirilen bu motor üzerinde yakın zamana kadar bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada konuyu daha ifade ettiği düşünülerek, yeni sargı yapısına sahip ARM, “Tam Kutup Adımlı Anahtarlama Relüktans Motor” olarak isimlendirilmiş ve kısaltma açısından TKARM ifadesi kullanılmıştır. Kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip ARM ise klasik ARM olarak isimlendirilmiştir.

Tezin gidişatı açısından bu güne kadar gerek TKARM üzerine yapılan çalışmaları, gerekse moment dalgalılığını azaltmak amacı ile klasik ARM üzerine magnetik devre temel alınarak yapılan çalışmaları incelemenin yararlı olacağı düşünülmektedir.

2-boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturularak ARM ‘un magnetik alan incelemesi gerçekleştirilmiştir. Böylece motorun çalışma karakteristikleri magnetik alan çözümleri ile ortaya konuldu (Arumugam vd., 1985).

8/6 ‘lık ARM ‘un yapımı sırasında rotor kutbuna uygun profil vererek $T=T(\theta)$ eğrisi $T=k \cdot i \cdot \sin(6\theta)$ biçiminde yapılarak ve motor akımı $i=I \cdot \sin(6\theta)$ şeklinde değiştirilerek döndürme momentinin sabit yapılabileceği belirtildi (Ray vd., 1986).

ARM ‘un moment karakteristikleri sonlu elemanlar yöntemi ile elde edildi. Elde edilen sonuçlar, pratik olarak deneylerden sağlanan moment karakteristikleri ile karşılaştırıldı. Motorun doymalı yapısından dolayı dinamik modellemesinin zor olduğu da ayrıca belirtildi (Dawson vd., 1986).

Verimi ve kaliteyi artırmak, maliyeti düşürmek için ARM 'un bilgisayar destekli analizi yapılarak tasarım aşamaları verildi. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan bu tasarım sonuçları analitik çözüm sonuçları ile birlikte sunuldu (Krishnan vd., 1988).

Hem statorunda, hem de rotorunda çıkık kutuplara sahip olan büyük bir 8/6 ARM imal edilerek, bu motorda doymanın momente olan etkisi ve enerji akışı incelendi (Stephenson ve El-Khazendar, 1989).

ARM 'un çalışmasında gürültünün kaynağının ilke olarak, faz sargılarına uygulanan gerilimin harmonikleri olduğu gösterildi (Cameron, 1989).

ARM 'da moment dalgalanmasının hesabına çalışıldı. Motorun doymalı yapısının, dinamik modelleme için hayli kompleks bir problem oluşturduğu ifade edildi (Corda, 1989).

ARM üzerine yapılan çalışmalarda ihmal edilen ortak endüktans etkisini belirlemeye çalışıldı. Motor çalışırken uyarılan faz ile diğer uyarılmamış fazların gerilimlerini, yani fazlar arası ortak endüktans gerilimleri ölçüldü. Çalışmada 8/6 bir ARM kullanıldı. Performansın ve farklı kontrol metotlarının doğruluğunun yükselmesi için, ortak endüktansların göz önüne alınması gerektiği belirtildi (Davis ve El-Bahadly, 1990).

Faz ve kutup sayısının moment salınımlarına olan etkisi incelendi (Corda, 1990).

Sadece statorunda çıkık kutup bulunan relüktans motoru incelendi. 2-fazlı olan bu motor, 4-fazlı 8/6 kutuplu bir relüktans motoru ile karşılaştırıldı. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan incelemelerde önerilen relüktans motorundan 8/6 motora oranla daha büyük momentler elde edildiği ve bakır kayıplarının %75 oranında azaldığı ortaya konuldu (Xu vd., 1990).

ARM ile aynı güçteki değişik asenkron motorların performansları karşılaştırılarak, ARM 'un moment dalga şekilleri ve ani akım dalga şekilleri, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplandı. ARM 'un sargılarına darbeli gerilim uygulanarak, mil moment, ani akımı, verimi ve kayıpları ölçüldü. Ölçülen bu değerler, sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen ile karşılaştırıldı. Yapılan karşılaştırmada, asenkron motorlara nazaran ARM 'un daha yüksek bir verime ve daha düşük bir sıcaklık artışına sahip olduğu gösterildi (Moghbelli vd., 1991).

Aynı anda birden fazla fazın uyarılması durumunda ortak endüktansların etkilerinin de göz önüne alındığı bir ARM için eşdeğer devre elde edildi. Doyma göz önüne alınarak bir 6/4 ARM imal edildi. Birisi doymalı malzemeleri modellemek için, diğeri de uyarma seviyeleri

verilen akı değerlerine ilişkin devreyi çözmek için iki ayrı sonlu elemanlar modeli kullanıldı (Preston ve Lyons, 1991).

Sator sargılarından daha fazla faydalanmak için yüksek gerilimle çalışan 9 kV ve 5MW 'luk büyük güçlü 6/4 bir ARM tasarımı gerçekleştirilmiştir. Motorun tasarımı için gerekli bir çok büyüklüğün hesaplanabilmesi için gerekli analitik formüller verilmiştir. Ayrıca motorun kayıpları, soğutulması ve verimi incelenmiştir (Miles, 1991).

60 kW, 6000 d/d 'lık bir ARM 'un tasarımında hava aralığı değişiminin, rotor kutup genişliğinin ve rotor kutup yüzey profiline moment üzerindeki etkileri incelendi. Teorik olarak akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin testere şekilli kutup yüzeylerinde arttığı, bunun ise ortalama momentte bir artışa sebep olduğu, fakat aynı değişkenin radyal bileşen için söz konusu olmadığı gözlemlendi (Moallem vd., 1992).

ARM 'un rotor yapılarının moment üzerine etkileri incelendi. Motorun lineer modeli göz önüne alındı ve stator ve rotor farklı yapılarda tasarlanarak çıkış momenti üzerindeki etkilerine değinildi (Davis, 1992).

4 kW, 8/6 bir ARM 'un momenti hem akıma hem de rotor konumuna bağlı olarak elde edildi. Bunun için ölçüm sonuçları kullanılarak en küçük moment dalgalanması elde edilecek şekilde fazlara uygulanan gerilim açısı iyileştirildi. Döndürme momentine karşı düşen akım değerleri için tablo oluşturuldu ancak momentteki dalgalanmanın ne kadar azaldığı açık olarak ifade edilmedi (Schramm vd., 1992).

Çift çıkık kutuplu ARM 'larda akustik gürültünün sebepleri incelenerek gürültünün azaltılması için yeni bir metot ortaya konuldu (Cameron vd., 1992).

ARM 'un doymasız modeli kullanılarak, momentteki dalgalanmanın azaltılması için fazların kesime geçme anları analitik bir metotla tespit edildi. Tespit edilen kesim açısının moment üzerine etkisi bir benzeşim programı ile gösterildi (Orthmann ve Schoner, 1993).

TKARM 'un temel çalışma ilkesini ve tüm çalışma karakteristiklerini ortaya koyan bir çalışma gerçekleştirildi. Ortalama çıkış momentindeki artış gösterildi. Değişik uyarma yapılarının da incelendiği çalışmada, pozitif momentin uyarma yapılarına göre elde edilmiş şekli de açıklandı. Aynı sarım şeklinin Adım Motorlarına da uygulanabileceği belirtildi (Mecrow, 1993).

ARM 'un doyma modeli için, faz akımları ve tablo haline getirilmiş statik moment

karakteristiğinden yararlanılarak motor momenti hesaplandı ve konum bilgisi elde edildi. Daha sonra momentteki dalgalanmanın en aza indirilmesi için faz akımlarının nasıl olması gerektiği irdelendi (Corda vd., 1993).

ARM 'un moment dalgalanmasını azaltmak için stator ve rotor kutup açıları değiştirilerek yeni motor modelleri elde edildi. "Silikon görünür güç" sınırlayıcısı yöntemi ile bakır kayıplarını da azaltan bu çalışmada moment iyileştirmesi, deneysel çalışma ile gösterildi (Chenadec vd., 1994).

6/4 ARM 'un normal koşullar altındaki sürekli hal modeli oluşturularak motorun dinamik karakteristikleri elde edildi. Doyma etkisi dikkate alınarak, faz endüktansları elde edildi. Elde edilen sonuçlar deneysel verilerle de karşılaştırıldı. Ayrıca karşılıklı endüktansların sisteme etkisi incelendi (Arkadan ve Kielgas, 1994).

TKARM 'un çift yönlü (bipolar) uyarma yapısındaki davranışı ayrıntılı olarak analiz edildi. 7,5 kW, 1500 d/dak değerlerine sahip bir TKARM, 10 kHz anahtarlama frekansına sahip IGBT 'li bir sürücü devre ile mikrodenetleyiciden oluşan bir deney düzeneği ile tek yönlü (unipolar), çift yönlü (bipolar), kare dalga ve sinüsoidal uyarmalara makinenin verdiği cevap incelendi ve elde edilen moment değeri genlik ve dalgalılık oranı açısından birbirleri ile karşılaştırıldı. Çift yönlü akım ile çalışmanın tek yönlü akım ile çalışmaya göre bir üstünlüğü olmadığı fakat klasik makineye karşı önemli bir üstünlüğe sahip olduğu gösterildi (Barrass vd., 1995).

"Çift Çıkık Kutuplu ve Çift Uyarımlı Değişken Relüktanslı Motor" ismi ile 6/4 stator ve rotor kutup yapısına sahip makine, tam kutup adımlı sargı yapısı ile sarıldı ve deneysel sonuçlar elde edildi. Sargı yapısının sağladığı üstünlük nedeni ile magnetik alandaki enerjinin kaynağa verilmek yerine makine içerisinde tutulduğu ve makine performansını arttırmak yönünde kullanıldığı belirtildi. Ayrıca yüksek bir performans elde edilmesine rağmen momentteki dalgalılık oranının da artmış olduğu gösterildi (Li vd., 1995).

ARM 'un tasarımı için analitik tasarım denklemleri geliştirilerek, motorun performans değerleri bu metotla elde edildi. Geliştirilen analitik denklemlerle tasarlanan çok çeşitli motor yapıları moment yoğunluğu açısından karşılaştırılarak en uygun olan model elde edilmeye çalışıldı. Ayrıca çalışmada deneysel sonuçlara da yer verilerek analitik sonuçlar ile karşılaştırıldı (Radun, 1995).

Magnetik alan ile elektrik devrenin birleşik analizi, $d\lambda/dt$ ifadesini de modelde tanımlayacak

şekilde gerçekleştirildi. Böylece dinamik çalışma şartlarının kısmen modellendiği iddia edilerek, ARM 'un akı-akım eğrisi bulundu ve motor akım dalga şekli elde edildi. Ayrıca deneysel sonuçlar ile önerilen metot karşılaştırıldı (Xu ve Ruckstadter, 1995).

Düşük hız uygulamalarında farklı yapılara sahip değişken relüktanslı motorlar statik moment kabiliyetleri ile karşılaştırılmıştır. Sargı sonu ve çok kutupluluk etkisinin de dikkate alındığı doğrusal analizde, klasik ARM, ortak endüktanslı değişken relüktanslı motor ve anizotrop rotorlu değişken relüktanslı motor karşılaştırılmıştır (Suriano ve Ong, 1996).

ARM 'un statik ve dinamik analizleri sonlu farklar yöntemi ile gerçekleştirildi. Akı ve momentler virtual iş yöntemi ile elde edildi. Doymalı olarak modellenen motorun dinamik davranışı ortaya konuldu (Pelikant ve Wiak, 1996).

2-boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş ARM 'un magnetik alanı ile elektrik devre denklemleri birlikte eşzamanlı olarak çözülerek incelendi. Motorun akımı ve stator kutuplarındaki kuvvet dağılımı hesaplandı. Magnetik kuvvetlerin mekanik cevabı da bu incelemede ele alınmıştır. Mekanik sistemin frekans cevabı ve harmonikleri gösterilerek, benzeşim ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldı (Sadowski vd., 1996).

Ticari bir 7,5 kW 'lık klasik ARM 'un kısa kutup adımlı sargıları sökülerek "Tam Kutup Adımlı" sargı ile tekrar sarıldı ve üç değişik uyarma yapısı ile uyarılarak ölçümler gerçekleştirildi. Ortalama çıkış momentinde sağlanan artış, eşit bakır kayıplarına dayalı olarak karşılaştırıldı. Ölçümler ile statik moment eğrileri gösterildi ve bu sonuçlar klasik ARM ile karşılaştırıldı. Ayrıca makinenin modellenmesindeki zorluk önerilen bir dönüşüm denklem takımı ile aşılmaya çalışıldı (Mecrow, 1996).

Kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip klasik Anahtarlamalı Relüktans Motor çift uyarmalı olarak uyarıldı. Karşıt kuplaj etkilerini de içeren model oluşturuldu. Deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar neticesinde, fazlar arasında oluşan kuplajın incelenen 10/8 stator ve rotor kutup yapısına sahip makinede performansı yükselttiği görüldü (Michaelides ve Pollock, 1996).

İlk defa iki fazlı TKARM 'un sürücü devre ihtiyacı araştırıldı. Değişik dönüştürücü yapıları incelendi. Güç elektroniği devre elemanlarının volt-amper ihtiyaçları açısından, klasik ARM 'a göre daha avantajlı olduğu gösterildi (Wale ve Pollock, 1996).

"Fractionally-Pitched Winding" ismi ile tam kutup adımlı ve kısa kutup adımlı sargının birlikte kullanıldığı yeni bir sargı yöntemi Anahtarlamalı Relüktans Motora uygulandı. Pozitif

moment üretimi hem öz endüktansların hemde karşıt kuplajların rotor konumuna göre değişim oranından elde edildi. Klasik Anahtarlama Relüktans Motor ile karşılaştırıldığında makine veriminin yükseldiği gösterildi. Magnetik alan analizi ve deneysel çalışmalar sunuldu (Li ve Tang, 1997).

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ARM 'un moment dalgalılığı azaltılamaya çalışıldı. Rotor kutup şekli değiştirilerek elde edilen yeni bir ARM modeli ile klasik motor akustik gürültü bakımından karşılaştırıldı. Daha az gürültülü bir model olan bu yeni modelin aynı zamanda bir asenkron motordan da düşük gürültü seviyesine sahip olduğu verilerle vurgulandı (Kim, 1997).

ARM 'un en uygun tasarımı için dinamik sonlu elemanlar analizi gerçekleştirildi. Vektör kontrol yönteminde olduğu gibi akım iki bileşene ayrıldı ve momenti oluşturan bileşen moment dalgalılığını azaltmak üzere kontrol edildi. Motorun kutup açıları değiştirilerek momentteki dalgalılığın neredeyse tamamen yok edildiği ortaya konuldu (Ohdachi vd., 1997).

Dönen kısmı olan ve elektrik devresi ile bağlantılı bir elektromagnetik sistemin 3-boyutlu dinamik analizi 6/4 bir ARM örnek alınarak gerçekleştirildi. Hareketli kısım Langrange Sliding yöntemi ile modele dahil edildi. Önerilen metot ile ARM 'un akım dalga şekli de bu çalışmada ortaya konuldu (Lai vd., 1997).

Sonlu elemanlar yöntemi ile ARM 'un faz endüktansı hesaplanarak, motorun elektriksel devre tarafına ait denklem sisteminin çözümü yapılarak akım dalga şekli ortaya konuldu. ARM 'un magnetik akı yoğunluğu bileşenlerinden hareketle, stator kutup açısı değeri değiştirilerek moment değerinin arttığı tespit edildi (Koibuchi, 1997).

Standart sürücülerin TKARM 'da kayıpları artırdığı gösterildi. Bu kayıpları azaltan ve komütasyon sorununu çözen yeni bir sürücü devresi ortaya kondu. Bu sürücü devresi ile yeni sargı yapısına sahip motorun daha büyük güç dönüştürücülerine ihtiyaç duymadığı gösterildi (Mecrow vd., 1998).

Üç fazlı köprü inverter yapısı, hem kısa kutup adımlı motor hemde tam kutup adımlı sargı yapısına sahip motor için incelendi. Verim ve maliyet açısından birbirleri ve asenkron motor ile karşılaştırıldı. Ayrıca akım algılama düzenekleri ve akımı istenilen seviyede kontrol etme üzerine, konum algılayıcı sensör sayısının etkisi incelendi (Clothier ve Mecrow, 1999).

Tam kutup adımlı Anahtarlama Relüktans Motorun konum algılayıcısız denetlenmesi ile ilgili bir çalışma yapıldı. Önerilen Bulanık Mantık tabanlı algoritma ile hem akı

halkalanmasını hemde akımları kullanarak rotor konumunu belirlemek mümkün oldu. 400 W, 3000 d/dak., 12/8 stator ve rotor kutup yapısına sahip motorda uygulanan bu algoritma ile oldukça iyi sonuçlar elde edildi (Kosaka ve Matsui, 2000).

“Karşıt kuplajlı Anahtarlama Relüktans Motor” ismi ile, tam kutup adimli sargı yapısına sahip motor için magnetik devre modeli geliştirildi. Karşıt kuplajlı Anahtarlama Relüktans Motorun performans tahmini için bir yöntem ortaya kondu. Sunulan model ile faz akımlarına dayalı olarak makine akısının hesabı gerçekleştirildi. C++ programlama dili kullanılarak oluşturulan model sonlu elemanlar yöntemi ile de gerçekleştirildi (Kokernak ve Torrey, 2001).

“Magnetik Kuplajlı Sargılara Sahip Anahtarlama Relüktans Makinelerin Modellenmesi” ismi ile, tam kutup adimli sargı yapısına sahip Anahtarlama Relüktans Motorun modellenmesinde yaşanan zorluğu aşma yönünde önemli bir çalışma yapıldı. Akı halkalanmasının makinenin tüm fazlarının işlevi olmasından kaynaklanan yüksek miktarda doğrusal olmayan yapı, akı halkalanması ve akımın her stator dişi başına düşen akı ve magneto motor kuvveti olarak ayrıştırılması ve bunların basit bir look-up tablosu ile modele dahil edilmesi ile aşıldı. Gerçekleştirilen deneysel çalışma ile oluşturulan modelin doğruluğu gösterildi (Mecrow vd., 2001).

8/6 stator ve rotor yapısında TKARM ‘un sargı şekli kaydırılarak, Kayan Kipli hız kontrolü gerçekleştirildi. PI ve Kayan Kipli kontrol yöntemleri bu sargı yöntemine sahip motorda karşılaştırılarak artan parametre değişikliklerine karşı dayanıklılığın sağlandığı gösterildi (Ashour ve Williams, 2001).

Beraberinde getirdiği olumlu ve olumsuz yönleri ile araştırmacıların üzerinde çalıştığı TKARM, ortalama çıkış momentinde sağlanan önemli miktardaki artışa rağmen, beraberinde getirdiği bazı olumsuzluklardan dolayı bu üstünlüğü tam olarak ön plana çıkamamıştır. Bunlardan ilki makinede üretilen akının sadece rotor konumuna ve bir faza değil aynı zamanda diğer fazlara da bağlı olmasından kaynaklanan analitik modeldeki zorluktur ki bu konuda yakın zamanda iki önemli çalışma yapılmıştır. Diğer ise zaten klasik ARM ‘da var olan ve yeni sargı yapısı ile uyarmaya bağlı olarak şiddetini arttıran, faz geçişleri esnasında oluşan momentteki dalgalılıktır. Şu ana kadar tam kutup adimli sargı yöntemine sahip ARM ile ilgili olarak moment dalgalılığını azaltmak yönünde herhangi bir çalışma yapılmamıştır.

Çalışmanın hedefi TKARM ‘un moment dalgalılığı sorununu ortaya koymak ve bu dalgalılığı/gürültüyü magnetik devre temelli bir çalışma ile azaltmaktır. Bu amaçla, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile makinenin modeli oluşturularak analizi gerçekleştirilmiş ve

motorun akı yolu haritası çıkartılmıştır. Daha sonra aynı makine kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip klasik ARM olarak modellenip analiz edilmiş ve akı yolu haritası çıkartılmıştır. Her iki akı yollarının karşılaştırılması ile klasik ARM 'da moment dalgalılığını azaltmak için uygulanan magnetik devre temelli yöntemlerin tam kutup adımlı ARM için uygulanabilirliği araştırılmıştır.

Çalışmanın hedefine uygun olarak oluşturulan diğer tez bölümleri şu şekilde gelişmiştir. İkinci bölümde tam kutup adımlı Anahtarlama Relüktans Motor (TKARM) 'un yapısı ve çalışma ilkesi açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde TKARM ile karşılaştırma açısından, kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip klasik Anahtarlama Relüktans Motorun yapısı ve çalışma ilkesi açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde ise Sonlu Elemanlar Yönteminin (SEY) temel bağıntıları verilmiş ve magnetik analize uygulanması incelenmiştir.

Beşinci bölümde ise TKARM, SEY ile modellenmiş ve analizi yapılmıştır. Çalışma karakteristikleri bundan önceki çalışmalara uygun olarak elde edilmiştir.

Altıncı bölümde ise aynı ARM, hiçbir parametresi değiştirilmeksizin kısa kutup adımlı sargı ile modellenmiş ve eşit kayıplara dayalı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca her iki sargı yapısına sahip motorun akı yolu haritası çıkartılarak karşılaştırılmıştır.

Yedinci bölümde stator ve rotor kutup başlarında tanımlanan parametreler ile kutup başlarına değişik şekillerin verildiği farklı modeller oluşturulmuş ve moment dalgalılığı azaltılmıştır.

Sekizinci ve son bölümde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş, bundan sonra yapılacak çalışmalara ışık tutması açısından bazı önerilerde bulunulmuştur.

2. TAM KUTUP ADIMLI ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN YAPISI

2.1 Giriş

Anahtarlama Relüktans Motorun performansını arttırmaya yönelik çalışmalar sürekli araştırmacıların gündeminde olan bir konudur. Bu çalışmalar uzun süreden beri devam etmektedir. Gerek sürücü devre üzerine gerekse motorun magnetik devresi üzerine yapılan çalışmalarda bir çok yöntem denenerek performans yükseltilmeye çalışılmıştır. İlk olarak hava aralığı akısından daha fazla yararlanmak amacı ile makine geometrisinde değişikliklere gidilerek performans yükseltilmeye çalışılmıştır. Bunun için değişik stator ve rotor kutup şekilleri incelenmiştir. Sürücü devredeki kayıpları azaltarak performansı yükseltmek bu yönde yapılan ayrı bir çalışmadır. Sonraları makinenin sargı yapısına yönelik çalışmalar başlamıştır. Çıkış noktası ise makinenin elektrik ve magnetik devresinden daha fazla faydalanma düşüncesidir.

Anahtarlama Relüktans ve Adım Motorları şu ana kadar her faz sargısının tek bir stator dişi etrafına sarılması ile oluşan, kısa kutup adimli sargı kavramı ile ortaya kondu. Bu uygulama ile fazlar arasındaki kuplaj tamamen ortadan kalkmakta ve moment uyarılan fazların öz endüktanslarının rotor konumuna göre değişim oranı ile üretilmektedir. Her faz sargısı, öz endüktansın yükseldiği kısım ile pozitif momente zamanın en fazla bir yarısı kadar katkıda bulunabilmekte ve dolayısıyla elektrik devresinin kullanımı oldukça yetersiz kalmaktadır.

Bu yöndeki çalışmalarda ilk olarak yardımcı komütasyon sargıları kullanıldı. Bu sargıların kullanılmasındaki amaç, iletimdeki bir fazın magnetik enerjisinin bir diğer faza kısmi kuplajını sağlamaktır. Anahtarlama esnasında, magnetik enerjinin bir kısmı anahtarın açılması ile sonraki faza aktarılmakta idi. Klasik ARM 'da bu enerji kaynağa geri verilmekteydi. Bu amaçla bir ve iki yardımcı komütasyon sargılı makineler için benzeşimler ve deneysel çalışmalar yapıldı. Sonuç olarak performansın yükseldiği fakat bununla birlikte moment dalgalılığının da arttığı belirlendi (Liang vd., 1992).

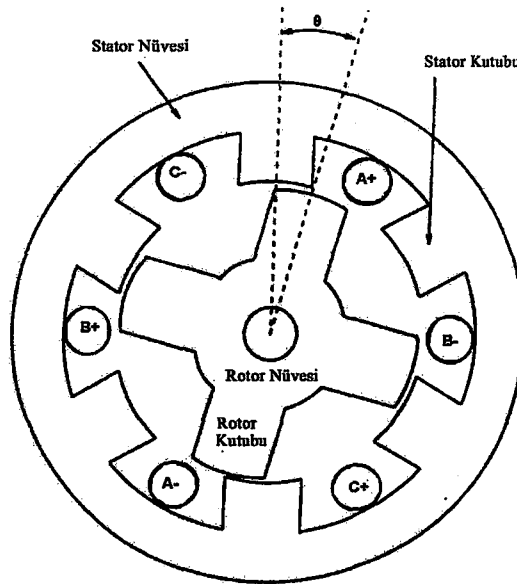
Mecrow tarafından ortaya konulan sarım şekli ile bu yöndeki çalışmalar farklı bir boyut kazandı. İlave bir sargı kullanılmaksızın sarım şeklinin basitçe değiştirilmesi sonucu makine temel çalışma ilkelerinde değişiklikler meydana gelirken, makine performansında da olumlu gelişmeler meydana geldi. Makine fazlarının pozitif moment üretimine daha fazla katkıda bulunması sağlanarak, elektrik ve magnetik devre daha verimli kullanıldı. Anahtarlama

Relüktans Motorda moment üretiminin neredeyse tamamı fazlar arasında oluşan karşıt kuplajın rotor konumuna göre değişim oranından elde edildi. Böyle bir sargı yapısı ve getirdiği değişiklikler aslında Lawrenson ve Hughes tarafından 1980 ile 1976 yıllarında gerçekleştirilen ve ARM üzerine temel sayılabilecek iki önemli çalışmaya ilk bakışta ters düşer gibi gözükse de aslında öyle değildir. Hatta bu çalışmalardan ikincisinde üç fazlı tek yönlü uyarmalı makineler için fazlar arasındaki karşıt kuplajın moment temel bileşenini nasıl azalttığını göstermekte idi. Oysa yeni sargı yöntemi ile momentin neredeyse tamamının karşıt kuplajlardan elde edildiği ve fazlara ait öz endüktansların uygun motor boyutları seçildiğinde yaklaşık olarak sabit kaldığı gösterilmiştir.

Şu ana kadar yapılan çalışmalarda iki farklı isim kullanılmaktadır. Bunlardan ilki Karşıt Kuplajlı Anahtarlamalı Relüktans Motor “Mutually Coupled Switched Reluctance Motor” bir diğeri ise Tam Kutup Adımlı Anahtarlamalı Relüktans Motor “Fully-Pitched Switched Reluctance Motor” şeklindedir. Yapılan çalışma boyunca konuyu daha iyi ifade ettiği için bunlardan ikincisi kullanılmış ve TKARM olarak kısaltılmıştır.

2.2 TKARM ‘un Temel Çalışma İlkesi

Tam kutup Adımlı Anahtarlamalı Relüktans Motor bir dereceye kadar klasik ARM ‘un değişmiş yeni halidir. Şekil 2.1 ile genel yapısı verilen TKARM ‘da, klasik ARM ‘un yapısal üstünlüklerinin çoğu muhafaza edilmiştir (Kokernak ve Torrey, 2001).



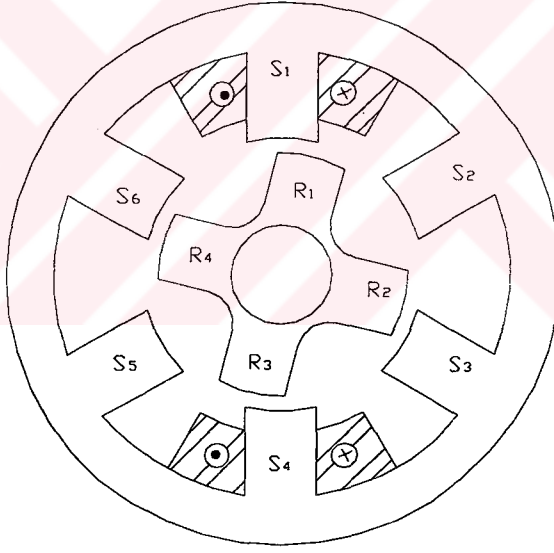
Şekil 2.1 TKARM ‘un genel yapısı

Sargı yapısı ve buna bağlı olarak uyarma yapısının değişmesi ile birlikte çalışma ilkesinde de önemli değişiklikler meydana gelmektedir. Sırası ile sargı yapısı, moment üretimi gibi konular incelenmiştir.

2.2.1 Sargı Yapısı

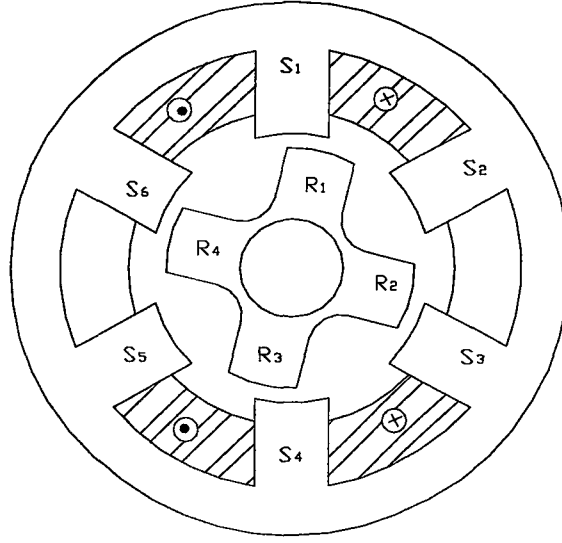
Yeni makinede sargılar tam kutup adımlı sargı yapısına sahiptir ve tüm oluğu kaplamaktadır. Şekil 2.1 'de gösterildiği gibi oluğu kaplayan sargıların karşılıklı olanları makinenin bir fazını oluşturmaktadır. Her “t” anında makine fazlarından en az ikisi iletim konumundadır. Bu sargı yapısı 6/4 stator ve rotor kutup yapısına sahip motorda incelenmişse de aynı sarım şekli diğer stator ve rotor kutup yapısına sahip motorlar içinde uygulanabilmektedir.

Şekil 2.2 ise bir fazı uyarılmış klasik ARM sargı yapısını göstermektedir. Diğer iki fazın uyarılmasının S_1 ve S_4 stator kutupları üzerinde enerjilendirilmiş fazın akı halkalanması üzerine herhangi bir katkısı yoktur.



Şekil 2.2 Klasik ARM sargı yapısı

Fazlar arasında tam bir dekuylaj olduğu çok açık bir şekilde görülmektedir. Bu yüzden, yani fazlar arasındaki nihai dekuylajdan dolayı, makinenin sargılarının ancak üçte biri S_1 ve S_4 stator dişleri üzerinde uyarma sağlamak amacıyla kullanılabilir. Zaman açısından olaya bakacak olursak, makine dönerken pozitif moment üretimi için herhangi bir faz sargısı, dönme periyodunun ancak $1/3$ 'ü oranında uyarılabilir.



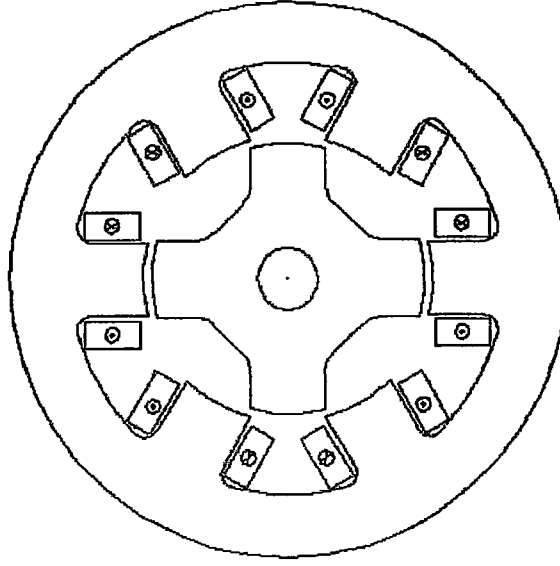
Şekil 2.3 TKARM sargı yapısı

Şekil 2.3 ile verilen tam kutup adımli sargı yapısında ise yine stator dişleri S_1 ve S_4 'ü uyaran sargı yapısı gösterilmektedir. Dikkat edilirse aynı stator kutuplarını uyarmak için iki faz iletimde bulunmaktadır. Başka bir deyişle akı halkalanmasına her faz dönme periyodunun $2/3$ 'ü kadar katkıda bulunmaktadır. Sargı yapısının gerçekleştirilmesi ile iki kat bakır alanını uyarmak mümkün olmaktadır. Bu sargı şeklini oluşturmak iki şekilde mümkündür. Bunlardan ilki iki kısa adımli sargının oluk içine yanyana yerleştirilmesi ile diğeri ise oluğu kaplayacak tek parça stator sargısının tüm oluğu kaplayacak şekilde yerleştirilmesi ile gerçekleştirilir. İlk sarım şekli uyarma açısından asimetrik bir yapıya sahip olacağı için tercih edilmemektedir (Mecrow, 1993).

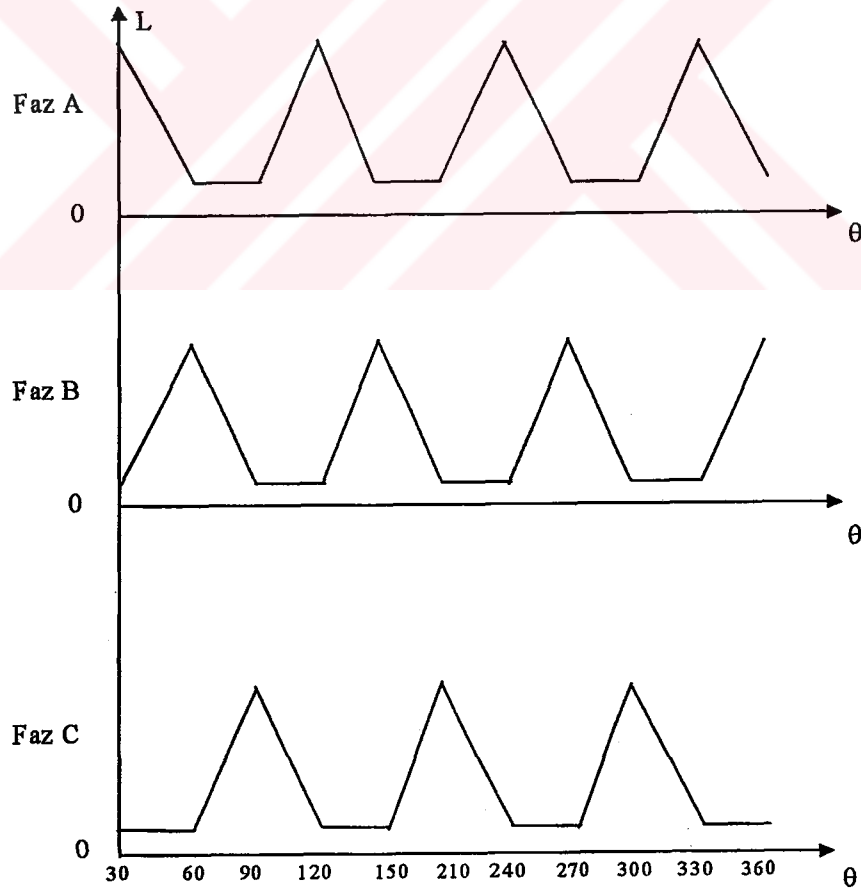
Makine döner iken, her bir "t" zamanı anında pozitif moment üretimini sağlayacak uygun stator diş çiftlerinden hangilerinin uyarılacağını denetlemek gerekmektedir. Üç fazlı makine için simetrik çalışma, tüm fazların tek yönlü akım taşımaları durumunda mümkündür. Dört fazlı makine için simetrik çalışma ancak çift yönlü akım yapısı ile elde edilebilmektedir. Uyarma yapıları ilerliyen kısımlarda incelenmiştir.

2.2.2 Endüktans Yapısı

Makinenin çalışma ilkesinin daha iyi anlaşılabilmesi için öz ve karşıt endüktanslarının rotor konumu ile değişimini incelemenin faydalı olacağı düşünülmektedir. Şekil 2.4 $6/4$ stator ve rotor kutup yapısına sahip klasik ARM 'un üç fazlı sargı yapısını ve Şekil 2.5 ise tek yönlü uyarma ile oluşan öz endüktans değişimini göstermektedir (Özoğlu, 1999).



Şekil 2.4 6/4 Klasik ARM üç faz sargı yapısı

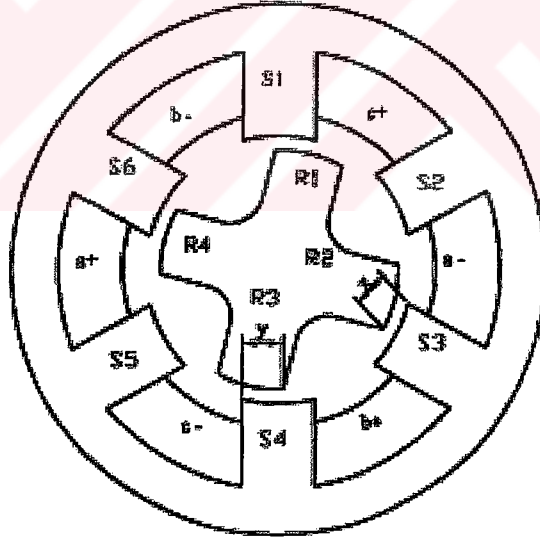


Şekil 2.5 Klasik ARM 'da öz endüktans rotor konumu değişimi

Kolaylık olması açısından, doymanın ihmal edildiği nüveye sahip olunan idealize edilmiş durumu göz önüne alalım. Her 30° 'lik zaman aralığında makine üç fazının öz endüktanslarından ilki azalma yönünde, ikincisi artma yönünde olduğu ve sonuncusunun ise sabit kaldığı görülmektedir. Herhangi bir faz sargısı, endüktansın sabit kaçak değeri artı büyük bir bileşenden oluşmakta ve aşağıdaki ifade ile gösterilmektedir (Mecrow, 1993).

$$L_{\text{faz}} = L_1 + \mu_0 \frac{N^2 \alpha \beta_L}{2 \cdot G} \quad (2.1)$$

Bu ifade de bir fazın toplam endüktansı L_{faz} , kaçak endüktansı L_1 , sarım sayısı N ile gösterilmektedir. β_L akımın akacağı fazın oluşturacağı akı yolu üzerindeki stator ve rotor dişlerinin örtüşme uzunluğu, G hava boşluğu uzunluğudur. Denklem 2.1 'de sargı sonu etkileri ve ateşleme ihmal edilerek kaba bir yaklaşım yapılmaktadır. β_L 'nin boyutu belirli bir rotor konumu için Şekil 2.6 'da verilmektedir. Kolaylık olması için, bu şekil stator diş genişliğinin rotor diş genişliğine ve stator diş genişliğinin stator oluk genişliğine eşit olduğu kabul edilmektedir. 6-4 makine için β_L 'nin, stator kutupları ile iki rotor kutubunun örtüşme uzunlukları olan x ve y 'nin toplamı olduğu görülmektedir.



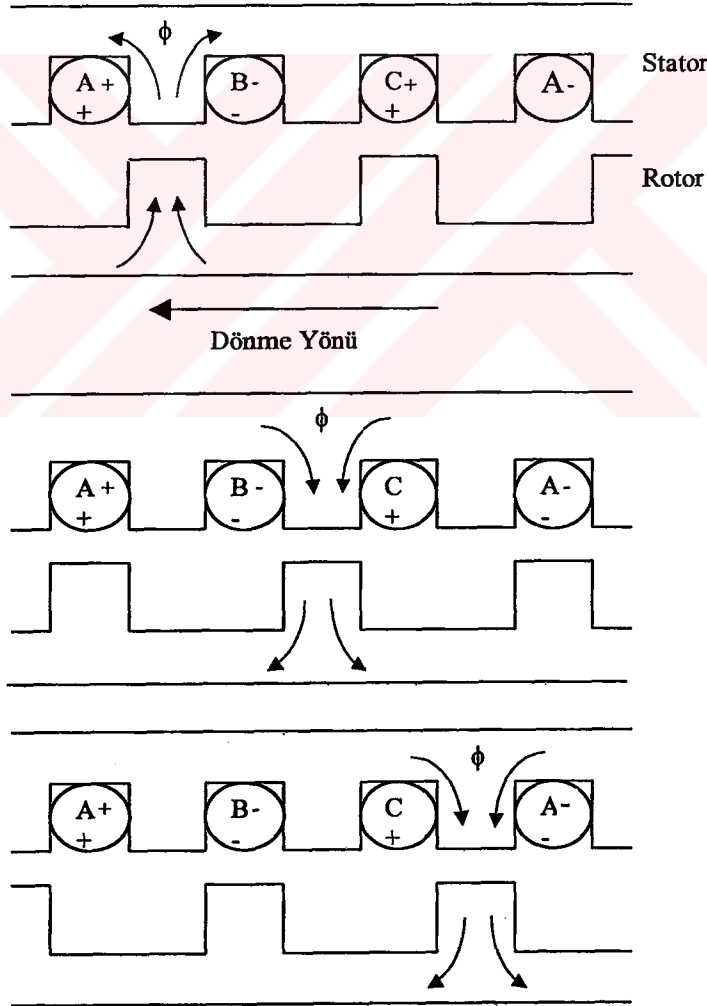
Şekil 2.6 Örtüşme uzunluğu β_L 'nin boyutu

Rotor dönerken β_L 'nin nasıl değiştiğini inceleyelim. Açık bir şekilde görülmektedir ki bir rotor kutubu hizalanmaya girerken diğeri çıkmaktadır. β_L rotor konumundan bağımsızdır. Bu makine için β_L her zaman bir stator kutup genişliğine eşittir. Sonuç olarak her fazın öz endüktansının rotor konumu ile değişmediği ve klasik ARM 'da en büyük hizalanma değerine

eşit olduğu açıkça görülmektedir. Fazlar arasındaki karşıt endüktans ifadesi de, öz endüktans ifadesine benzer şekilde çıkartılabilir. Örneğin, M_{ab} karşıt endüktansını inceleyelim. Faz a 'daki pozitif akım, S_3, S_4, S_5 stator dişleri üzerinde dış eksenel tarzda bir mmk üretir. S_4 ve S_5 'teki akı b fazını negatif olarak halkalamasına karşın S_3 'teki akı pozitif olarak halkalar. Dolayısı ile $\beta_M = x-y$ 'dir. Benzer ifade karşıt kuplaj için de yazılabilir (Mecrow, 1993).

$$M_{ab} = \mu_0 \frac{N^2 \alpha \beta_M}{2 \cdot G} \quad (2.2)$$

Denklem 2.2 ile elde edilen ifadede β_M 'den dolayı M_{ab} karşıt kuplaj endüktansının rotor konumu ile değiştiği görülmektedir. M_{ab} karşıt kuplaj endüktansının değişimi, akı halkalanması ile de açıklanabilir. Şekil 2.7 stator ve rotor kutupları düz hale getirilmiş

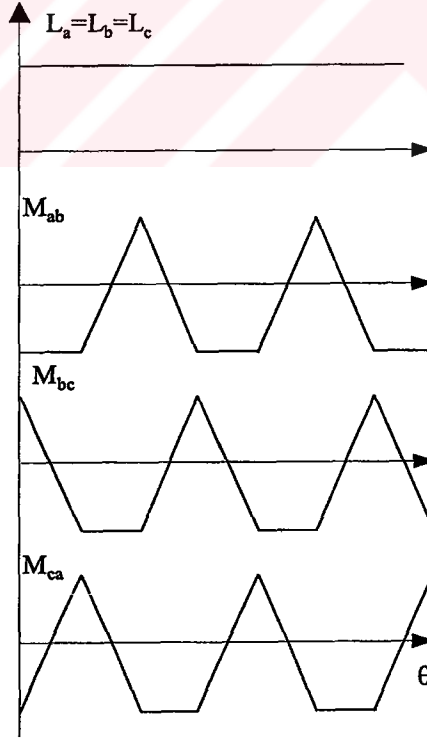


Şekil 2.7 TKARM 'da akı rotor konumu değişimi

motorda, a-b fazların iletimde olduğu durum başka bir deyişle M_{ab} 'nin elde edilmesi için akı değişimini göstermektedir. B fazının makine dönerken iletme alınacağı ve pozitif yön olarak yukarıdan aşağı yönün seçileceği kabul edilmektedir.

En üstteki kısımda, B fazındaki akım nedeni ile A fazını halkalayan akı negatiftir. Hatta bir sonraki çizimden görüldüğü gibi, hizalanmaya gelirken bile negatif halkalanma devam eder. Fakat üçüncü stator kutubu rotor ile hizalanmaya gelirken durum değişir ve A fazını halkalayan akı pozitif bir değer alır. Böylece ortaya ilginç bir durum ortaya çıkmaktadır. Tek yönlü bir akım tarafından oluşturulan akı, rotor konumuna göre bir fazı negatif olarak halkalarken diğer fazı pozitif olarak halkalayabilmektedir. Bu durumda karşıt endüktansın negatif ve pozitif değerler arasında değiştiği sonucuna varılır. Böyle bir yaklaşım makinenin tüm karşıt endüktans eğrileri için diğer fazlara da uygulanabilir (Kokernak, 1997).

İncelenen 6-4 'lük makine örneğinde, Şekil 2.8 'de verildiği gibi fazlar arasındaki karşıt endüktanslar 30° 'lik dönüş için azalmakta, bir sonraki 30° 'lik dönüşte sabit kalmakta, sonraki 30° 'lik dönüşte ise yükselmekte ve böylelikle periyodunu tamamlamaktadır. Yeni sargı yöntemine sahip motorda üretilen akı sadece bir fazın ve rotor konumunun işlevi değil aynı zamanda diğer fazlarında işlevidir. Bu durum makinenin analitik modelini oldukça



Şekil 2.8 TKARM 'da karşıt ve öz endüktans rotor konumu değişimi

karmaşık hale getirmiştir. Bir diğer yeni durum ise karşıt endüktansların rotor konumuna göre değişim oranı, öz endüktansın klasik ARM 'da rotor konumuna göre değişim oranının yaklaşık olarak iki katı kadardır (Mecrow, 1993).

2.2.3 Moment Üretimi

TKARM 'da moment üretim şekli klasik ARM 'dan farklı bir yapıya sahiptir. Yeni sargı yapısı ile yukarıdaki kısımlarda açıklandığı üzere endüktans eğrisinde meydana gelen önemli değişiklik moment üretimine de yansımaktadır. Üç fazlı bir Anahtarlama Relüktans Motorun en genel moment ifadesi Denklem 2.3 'de verilmiştir. Klasik ARM 'da fazlar arasında oluşan kuplaj ihmal edilebilecek seviyede olduğu için bu kuplajlardan elde edilecek moment üretimi de ihmal edilecek seviyededir.

$$T = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_c}{d\theta} + i_a \cdot i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} + i_b \cdot i_c \frac{dM_{bc}}{d\theta} + i_c \cdot i_a \frac{dM_{ca}}{d\theta} \quad (2.3)$$

Böylece Denklem 2.3 'teki son üç terim genellikle ihmal edilebilecek düzeydedir ve ihmal edilir. Klasik ARM 'da moment ifadesi,

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (2.4)$$

haline gelir. Dolayısı ile üretilen moment, öz endüktansın rotor konumuna göre değişim oranı ile akımın işlevidir. Dikkat edilirse her stator fazı, pozitif moment üretimine ancak elektriksel periyodun 1/3 'ü oranında katkıda bulunabilmektedir. Bu durum makine elektrik ve magnetik devresinin yeterince verimli kullanılmadığı anlamına gelmektedir.

TKARM 'da ise öz endüktansın rotor konumuna göre değişimi yaklaşık olarak sabit olduğu için Denklem 2.3 'teki ilk üç terim sıfır olacaktır. Böylece yeni sargı yapısına sahip motorun moment ifadesi Denklem 2.5 'teki gibi olur.

$$T = i_a \cdot i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} + i_b \cdot i_c \frac{dM_{bc}}{d\theta} + i_c \cdot i_a \frac{dM_{ca}}{d\theta} \quad (2.5)$$

Bu durumda her faz, pozitif moment üretimine elektriksel periyodun 2/3 'ü oranında katkıda bulunmaktadır. Makinenin elektrik devresinden daha fazla yararlanmak mümkün olmuştur. Motorda elde edilen moment, fazlar arasında oluşan karşıt endüktansların rotor konumuna

göre değişim oranı ve akımın işlevidir. Denklem 2.5 ve Denklem 2.4 karşılaştırıldığında, TKARM 'da üretilen moment klasik motorun tam dört katı olduğu görölmektedir. Fakat bu dört katlık oran ideal durum için geçerlidir ve gerçekte doyma ve kayıplardan dolayı bu fark oldukça azalmakta ve önceki yapılan çalışmalara göre %20-30 arasında bir değere düşmektedir (Mecrow, 1993), (Clothier, 1999). Bu değer eşdeğer motorlar ile karşılaştırıldığında çok önemli bir üstünlük olarak dikkat çekmektedir. Denklem 2.5 'teki moment üretim mekanizmasının çalışması, motorun uyarma yapısına göre değişmektedir. Bundan sonraki kısımda değişik uyarma yapıları ve bunlara ait moment üretim şekli incelenmiştir.

2.3 TKARM 'da Uyarma Yapıları

Kullanılan uyarma yapısına göre TKARM 'da momentin elde edilme şekli ve ortalama çıkış değeri değişmektedir. Makine fazlarına uygulanan uyarma yapısı;

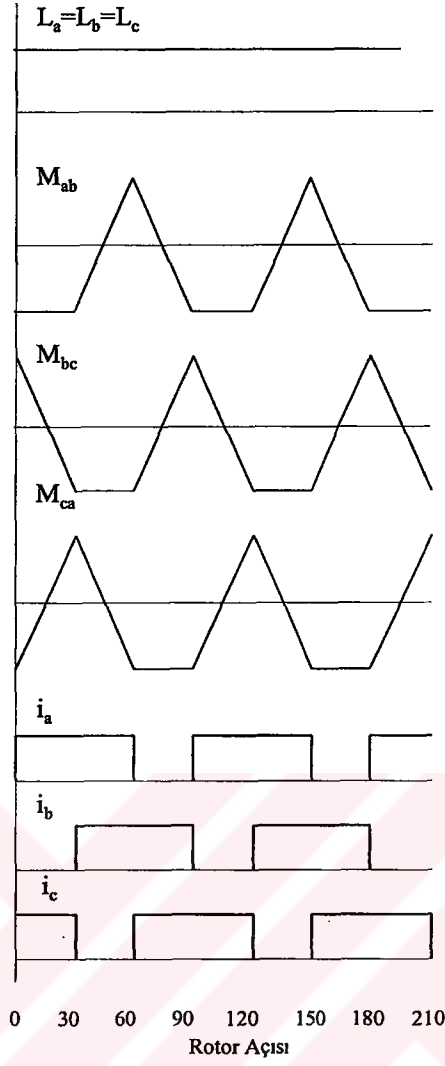
- Tek yönlü
- Çift yönlü iki fazlı
- Çift yönlü üç fazlı

olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Her birinin uygulanması halinde akı dağılımı ve momentteki dalgalılık oranı değişmektedir. TKARM 'un performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip bu uyarma yapıları, bundan sonraki kısımlarda geniş bir şekilde incelenmiştir.

2.3.1 Tek Yönlü Uyarma Yapısı

Şekil 2.9 'da uyarma yapısı ve sargı yapısına göre endüktans değişimi verilmektedir. Herhangi bir "t" zamanında iletimde bulunan iki faz pozitif işaretlidir ve her faz 60° iletimde kalmaktadır. TKARM 'da momentin elde edilme bağıntısı Denklem 2.5 ile verilmişti. Bu denklem incelendiğinde faz akımlarının pozitif olması veya başka bir deyişle aynı işaretli olması durumunda pozitif moment sadece karşıt kuplajların arttığı yani rotor konumuna göre türevinin pozitif olduğu bölgede üretilmektedir.

İlk zaman aralığı olan 0-30° 'ye baktığımızda a-c fazları iletimdedir ve bu iki faz arasında oluşan karşıt kuplajın rotor konumuna göre değişimi pozitif olduğu için pozitif moment bu bölgede elde edilmektedir. Karşıt kuplaj değişiminin negatif olduğu bölgede aynı fazlar uyarılmaya devam edilirse makine negatif moment üretmektedir.

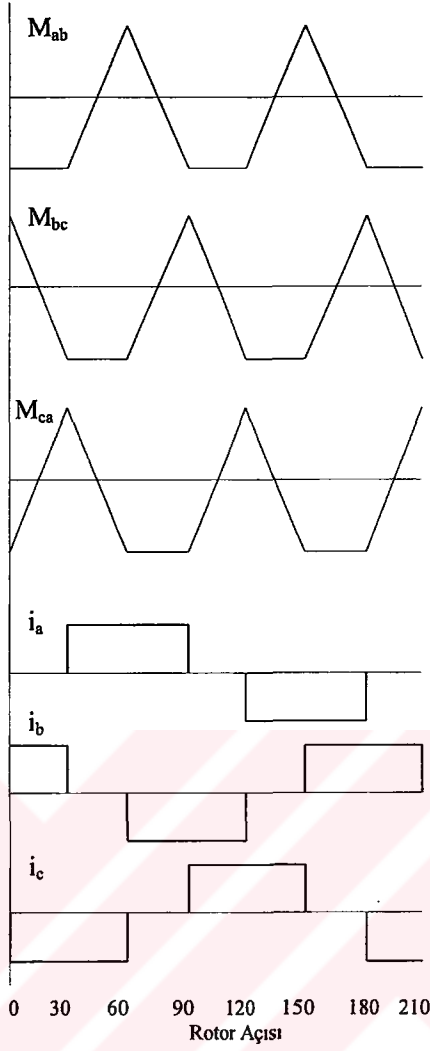


Şekil 2.9 Tek yönlü uyarma yapısı ve endüktans değişimi

2.3.2 Çift Yönlü Uyarma Yapısı

Bu uyarma yapısında akımlar 60° iletimde kalmakta, 30° kesimde kalmakta ve 60° ters polariteli olarak tekrar iletime girmektedir. İletimde bulunan fazlardan birisinin pozitif diğerinin negatif işaretli olması halinde pozitif moment üretimi için farklı bir durum ortaya çıkmaktadır.

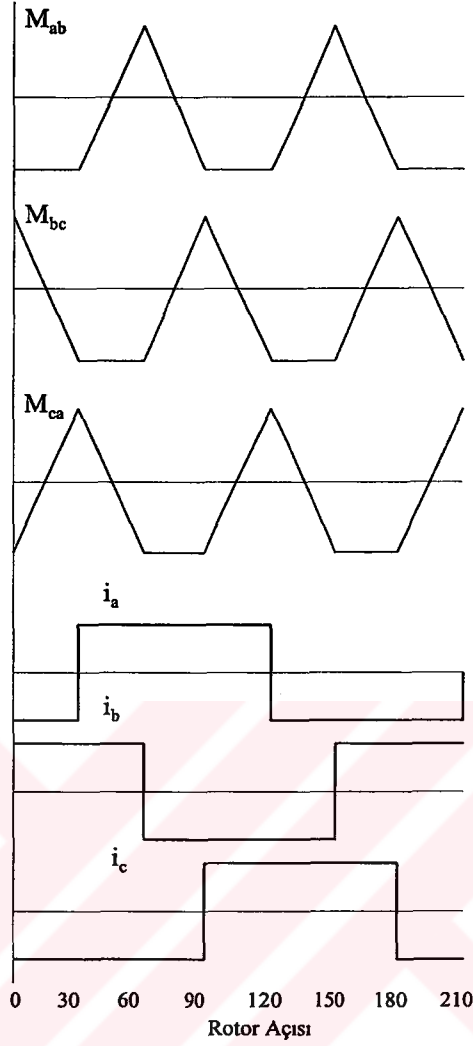
Denklem 2.5 göz önüne alındığında pozitif momentin üretilmesi için karşıt kuplajın rotor konumuna göre değişim oranının türevi negatif olmalıdır. Şekil 2.10 ile verilen uyarma yapısında ilk zaman aralığı $0-30^\circ$ 'yi göz önüne aldığımızda b-c fazları iletimdedir ve pozitif moment M_{bc} karşıt endüktansından elde edilmektedir.



Şekil 2.10 Çift yönlü iki fazlı uyarma yapısı ve endüktans değişimi

2.3.3 Çift Yönlü Üç Fazlı Uyarma Yapısı

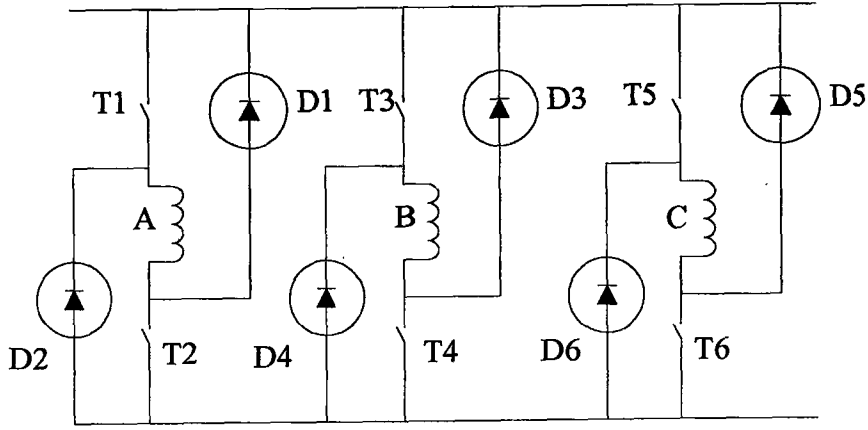
Şekil 2.11 ile gösterilen sonuncu uyarma yapısında ise akımlar 90° pozitif işaretli olarak iletimde kalmakta ve 90° negatif polariteli olarak tekrar iletime girmektedir. Bu uyarma yapısında yine pozitif moment elde ediliş mekanizması değişmektedir. Karşıt endüktansların rotor konumuna göre değişim oranı türevinin hem negatif olduğu hem pozitif olduğu bölgede pozitif moment elde edilebilmektedir. Yine ilk zaman aralığı olan $0-30^\circ$ 'yi incelediğimizde a fazı negatif, b fazı pozitif ve c fazı yine negatif işaretli olarak iletimdedir. Denklem 2.5 'e göre pozitif moment, a-c fazları negatif olduğu için M_{ac} karşıt endüktansının yükselen yanı ile ve b-c faz akımları çarpımı negatif olduğu için M_{bc} karşıt endüktansının azalan yanı ile üretilmektedir.



Şekil 2.11 Çift yönlü üç fazlı uyarma yapısı ve endüktans değişimi

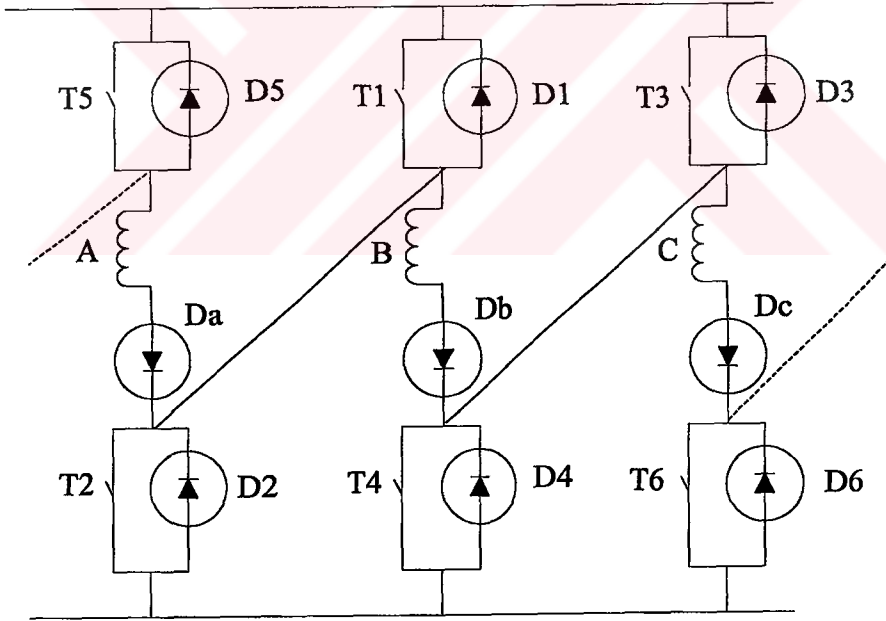
2.4 TKARM 'da Sürücü Devrenin İncelenmesi

Anahtarlama Relüktans Motor sürücülerinde özel yapılar olmasına rağmen en fazla kullanılan sürücü devresi asimetrik yarı köprü devreli sürücüdür. TKARM 'un akım ve gerilim dalga şeklinde, periyodun ortasında gerilimin uygulanmadığı fakat akımın aktığı bir zaman aralığı vardır. Bu aralıkta akan akım bir kontrollü güç elektroniği devre elemanı ve bir serbest geçiş diyodu üzerinden ilave kayıplar meydana getirerek akar. Asimetrik yarı köprü sürücü devresi Şekil 2.12 'de verilmiştir. Bu konu üzerine yapılan ayrıntılı çalışmalar, bahsedilen sürücünün TKARM 'da kullanılması sonucu kayıpların klasik ARM 'dakine oranla yaklaşık olarak %100 arttığını göstermekte ve kayıpları azaltmak amacı ile çeşitli sürücü devreler önerilmektedir (Clothier, 1999), (Mecrow vd., 1998).



Şekil 2.12 Asimetrik yarı köprü sürücü devresi

Bunlardan birisi Şekil 2.13 ile gösterilmektedir. Makine fazlarının üçgen olarak bağlandığı tam köprülü bu sürücü devresinde diyotlar sargılara seri olarak bağlanmaktadır. Hat akımları faz akımlarının farkı olacağı için devre elemanlarından geçen akımın tepe değeri asimetrik yarı köprüden geçene yakın olacaktır dolayısı ile kayıplarda benzer olmaktadır.



Şekil 2.13 Düşük kayıplı tam köprü sürücü devresi

TKARM 'un sürücü devresini, klasik ARM 'un sürücü devresi ile karşılaştıracak olursak aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir.

- Akım kotrollu çalışmada istenilen belirli bir moment değeri için, TKARM 'da ihtiyaç

duyulan faz başına mmk değeri klasik motordakinin yarısı kadardır.

- Gerilim kontrollü çalışmada ise TKARM için ihtiyaç duyulan akı değişimi tepe değeri, klasik ARM 'dakinin iki katıdır.
- Yukarıdaki iki açıklama birleştirilebilir. Yani TKARM eğer ARM 'un yarısı miktarda bir sarım sayısına sahip ise ancak bu şartla akım kontrollü çalışmada sürücüdeki akımın tepe değeri ve gerilim kontrollü çalışmada gerilimin tepe değeri aynı olmaktadır.
- TKARM 'da her faz periyodun $2/3$ 'ü kadar iletimde kaldığı için toplam dönüştürücü kayıpları yaklaşık olarak %100 fazladır.

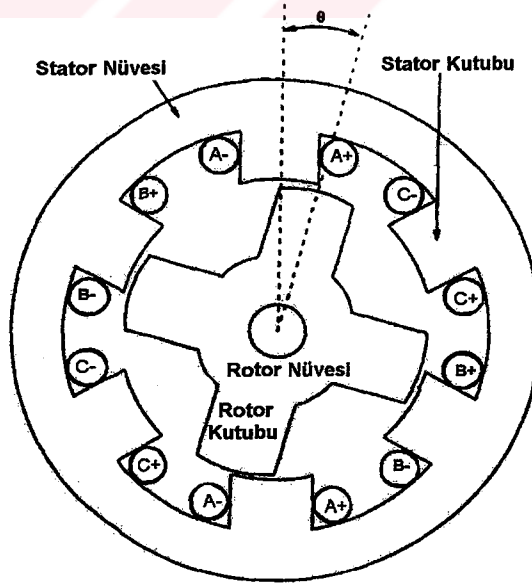


3. KLASİK ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN YAPISI

3.1 Giriş

Kendisine özgü olumlu ve olumsuz yanları ile uzun süredir araştırmacıların ilgi konusu olan Anahtarlama Relüktans Motor son derece basit bir yapıya sahiptir. Elektronik kontrollü olmasından dolayı, yarı iletken teknolojisinde 1970 'li yıllarda başlayan gelişmelere kadar üzerinde pek fazla çalışma yapılamadı.

1980 yılında Leeds Üniversitesinde Lawrenson ve çalışma gurubunun Relüktans Motorlar üzerine gerçekleştirdikleri kapsamlı bir çalışmadan sonra araştırmacılar bu motor üzerine yoğun ilgi gösterdiler. Ticari amaçlı olarak ilk Anahtarlama Relüktans Motorları, 1983 yılında Oulton Drives Ltd. lisansı ile Tasc Drives tarafından İngiltere’de üretilmeye başlanmıştır. Bu motorlara 1980 yıllarından önce, makinenin yapısından kaynaklanan, faz endüktanslarının değişken olmasından dolayı “Değişen Relüktanslı Motorlar” denmekteydi. Motorun güç elektroniği ile birleştirilmiş tasarımından sonra faz sargılarının yarı iletken anahtar elemanlar tarafından devreye alınıp çıkarılmasından dolayı, “Anahtarlama Relüktans Motoru” adı daha yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Derdiyok, 1996). Şekil 3.1 ‘te 6/4 stator ve rotor yapısına sahip üç fazlı klasik ARM gösterilmektedir (Kokernak ve Torrey, 2001).

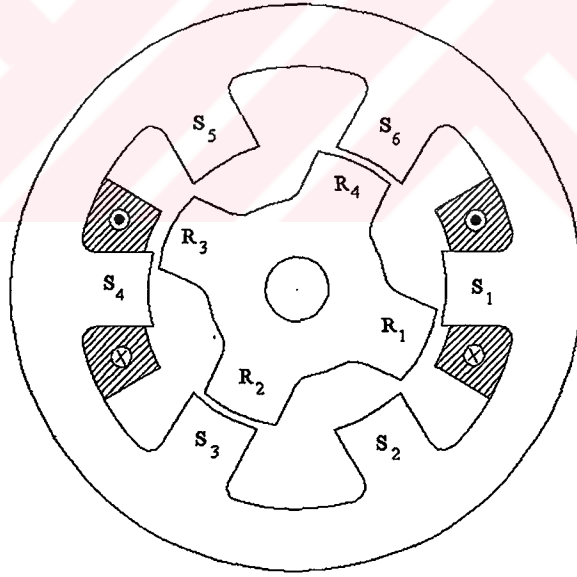


Şekil 3.1 Klasik ARM genel görünümü

3.2 Klasik ARM Temel Çalışma İlkesi

3.2.1 Sargı Yapısı ve Geometrik Özellikleri

Anahtarlama Relüktans Motoru (ARM) yapı bakımından hem Adım Motorlarına hem de çıkık kutuplu senkron motorlara benzer. Hem rotor hem de stator çıkık kutuplara sahiptir. Bu geometrik yapısından dolayı “çift çıkıklı” (double salient) elektrik motorları olarak ta adlandırılırlar. Stator ve rotor nüvelerinin her ikisi de, imalat uygunluğu ve demir kaybını azaltmak için, ince yaprak halinde lamine saçlardan imal edilirler. Rotorun çıkık kutuplarında herhangi bir sargı, kısa devre halkası veya mıknatıs bulunmamaktadır. Statordaki çıkık kutuplar, herhangi bir dc makinenin alan sargıları gibi basit şekilde, ince telli sarımlardan oluşan yoğun sargılar taşırlar. Bunun sebebi herhangi bir faz uyarıldığında ortaya çıkan magnetik alan kuvvetinden daha çok faydalanmaktır. Aynı Adım Motorlarında ayrı ayrı uyarılan bobinlerin her bir kümesinin bir faz olarak göz önüne alındığı gibi, ARM ‘larda da, statorun her bir çıkık kutbu bir faz oluşturur. Genellikle gösterimin basit olması açısından Şekil 3.2 ‘de olduğu gibi bir kutba ait faz sargısı gösterilir. Benzer sargılar, fazları oluşturan diğer kutuplar üzerinde de bulunmaktadır.



Şekil 3.2 Bir fazı uyarılmış 6/4 klasik ARM

Anahtarlama relüktans motorlarında aynı ekseninde bulunan karşılıklı kutuplarda aynı yönde sarılı olan iki bobin, bir faz sarımı oluşturmak için seri bağlanırlar. Stator kutbu etrafına sarılan ve Şekil 3.2 ile gösterilen bir fazı uyarılmış, üç fazlı 6/4 stator ve rotor yapısına sahip motorun sargı yapısı, “kısa kutup adımlı” sargı veya “klasik sargı” olarak isimlendirilir. Bu

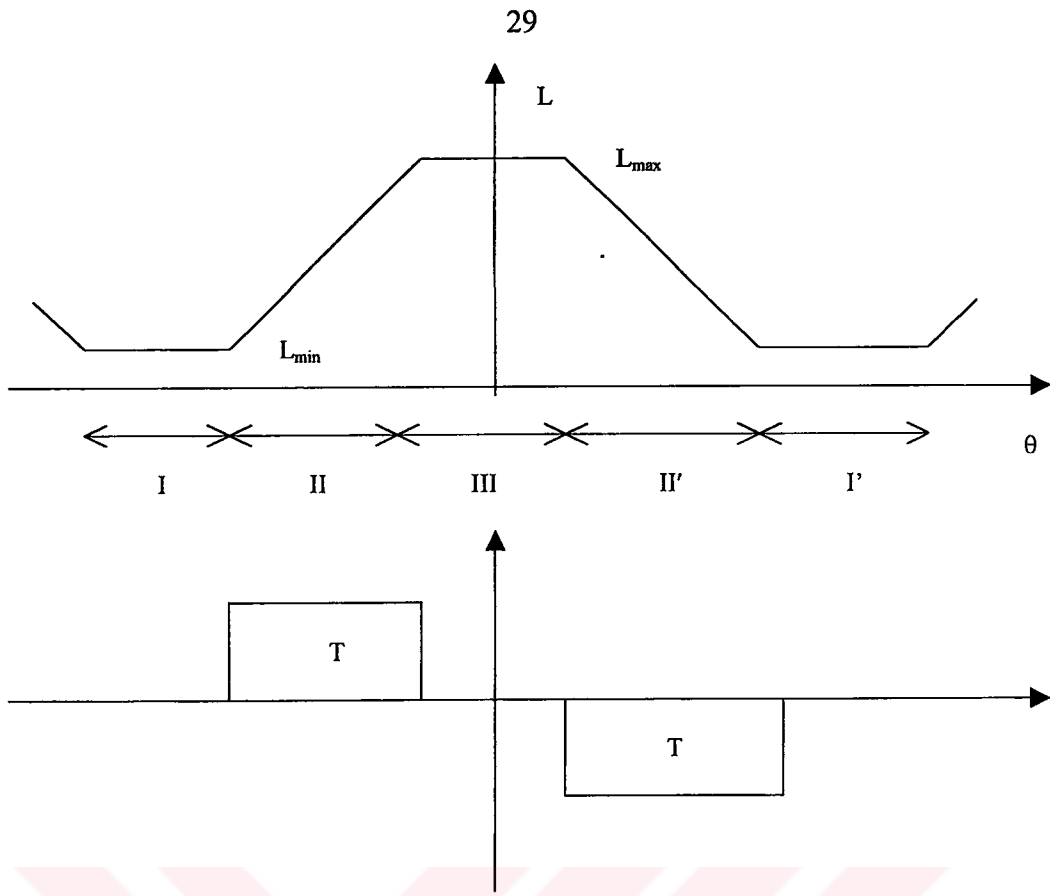
kısa kutup adımlı sargı yapısından dolayı fazlar arasında herhangi bir kuplajın oluşması söz konusu değildir. Bu motorlar stator-rotor hava aralığının sahip olduğu geometrik yapıdan dolayı relüktans prensibine göre çalışırlar ve bundan dolayı “Relüktans Motoru” denilmiştir. Bu motorlardan en fazla kullanılanları stator/rotor kutup oranları 8/6 ve 6/4 olanlarıdır. Ancak 6/2 ve 12/6 oranları da seyrek olarak bulunmaktadır. Kutup sayısının seçiminde kullanım amacı ön plana çıkmaktadır.

Eğer yüksek moment elde etme amacı öncelikli ise 8/6 ve 6/4 gibi stator-rotor kutup sayıları birbirine yakın olan makineler seçilir. Eğer yüksek hız elde etme öncelikli ise bu durumda stator-rotor kutup sayıları birbirinden daha farklı olan 6/2, 12/6 vb., yapılar seçilir. Ayrıca, asenkron motorlarda olduğu gibi, akı değişiminin çok fazla olmaması için ve rotor ataletini yenerken motor kalkışının daha az titreşimli olmasını sağlamak için rotor hafif eksenel kayıklıkta imal edilir.

ARM 'lar stator kutup sayısı, rotor kutup sayısından farklı olacak şekilde tasarlanırlar. Motorların herhangi bir konumdan kalkış yapabilmesi ve sürekli dönmeyi sağlaması için bu durum gereklidir. Motor geometrisinde bu amaç için stator kutup sayısı rotor kutup sayısından fazla seçilir. Genelde, rotor kutup sayısının mümkün olduğu kadar az sayıda olması, anahtarlama frekansını düşük kılmak açısından faydalı olabilir. Ancak, bu gerekli kalkış momentine ve ters yönde çalışmaya etki eder. Stator ve rotor kutuplarının sayısı, faz sayısı ve her stator kutbunun dış sayısı dikkate alınması gereken başlıca tasarım parametreleridir. Ayrıca negatif moment üretiminden kurtulmak veya her fazın pozitif ve negatif moment üretme bölgelerinin ayrılması için rotor kutuplarının eni, stator kutuplarının eninden daha geniş yapılır.

3.2.2 Temel Çalışma İlkesi

Anahtarlama Relüktans Motor rotorundaki bir çıkık kutbun statorundaki sargı ile uyarılan kutup tarafından, elektromıknatısta olduğu gibi, magnetik relüktansın en küçük olacağı konuma çekilmesi ile döner. Stator kutupları sırasıyla uyarılır ve her seferinde başka kutuplar çekilerek dönme devam eder. Bu çekme işlemi, uyarma akımının her seferinde aynı yönde uygulanması ile yapılabildiğinden ve kullanılacak dönüştürücüde akım yönünün değiştirilmesine gerek olmadığından dolayı dönüştürücüdeki yarı iletken anahtar sayısı diğer elektronik kontrollü motorlara göre yarı yarıya azalır. Ayrıca motorun çıkış gücünün yüksek olması, özellikle yüksek verimi ve fiyat avantajı ile alternatif ve doğru akım motorlarının karşısında güçlü bir seçenek oluşturmaktadır.



Şekil 3.3 Klasik ARM 'un değişik konumlarına ait öz endüktans ve moment değişimi

Şekil 3.3 ile verilen bir faza ait öz endüktans-rotor konumu değişimini incelendiğinde değişik çalışma bölgeleri görülmektedir (Özoğlu, 1996). Bu bölgeler:

- (I) Bölgesi : Kutupların ortalama konumuna ait bölge (En küçük endüktans)
- (II) Bölgesi : Ortalama-hizalanma konumuna gelirken ki bölge (Endüktansta artma)
- (III) Bölgesi : Hizalanma konumu (En büyük endüktans)
- (II') Bölgesi : Hizalanma-ortalama konumu (Endüktansta azalma).

Bölge I 'de öz endüktans eğrisi sabit olduğu için moment üretimi yoktur. Bölge II 'de ise öz endüktans arttığı için bu bölgede pozitif moment üretilmektedir. Bölge III 'te ise yine moment üretimi sıfırdır. Bölge II' 'de öz endüktans eğrisi azaldığı için bu bölgede negatif moment üretilmektedir. Bölge I' ile gösterilen aralıkta yine öz endüktansın rotor konumuna göre değişimi sabit olduğu için bu bölgede moment üretilmemektedir.

Denklem 2.3 'te verilen Relüktans Motorların en genel moment ifadesini göz önüne aldığımızda, kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip klasik ARM 'da karşıt kuplaj değerleri sıfır olduğu için söz konusu denklemin son üç terimi ihmal edilmektedir. Bu durumda klasik

$$T = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_c}{d\theta} \quad (3.1)$$

ARM için genel moment ifadesi Denklem 3.1 'de verilmektedir. ARM 'un momenti akımın yönü ile değil sadece genliği ile değişir. Akım, eğer endüktansın artma yönünde uygulanırsa moment pozitif, eğer azalma yönünde uygulanırsa negatiftir. Başka bir ifadeyle Anahtarlamalı Relüktans Motoru generatör olarak da kullanılabilir veya elektriksel frenleme özelliğine sahiptir. Akım yönünün değiştirilmesine gerek olmayışı nedeniyle bu motorun elektronik kontrolünde kullanılacak çeviricideki yarı iletken anahtar sayısı diğer motor türlerine nazaran yarı yarıya azalır. Akım darbelerinin, endüktansın hangi değişim bölgelerinde uygulanacağını tesbit etmek gerekir. Bunun için bu bölgelere ait rotor konumunun (θ) bilinmesi gerekir. Bu yüzden rotor miline optoelektronik veya hall effect türü bir konum algılayıcısı bağlanmalıdır.

3.3 Klasik ARM 'un Matematiksel Modeli

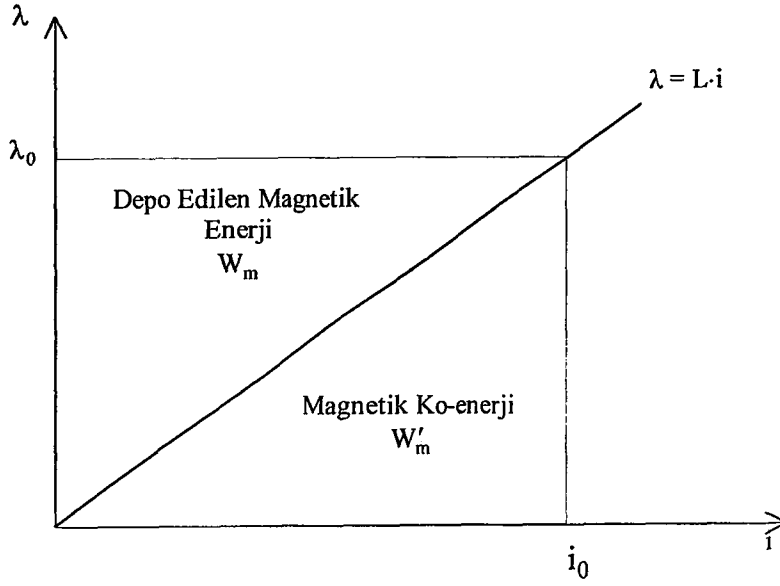
ARM 'un çalışma karakteristikleri çalışma bölgesinden oldukça etkilenmektedir. Doğrusal bölge ve doğrusal olmayan bölgede çalışma durumlarında doymadan kaynaklanan farklılık bulunmakta ve bu farklılık makinenin matematiksel modeline de etkilmektedir. Dolayısı ile ilerleyen kısımlarda her bölgeye ait matematiksel model ayrı ayrı incelenmektedir.

3.3.1 Doğrusal Bölgenin Matematiksel Modeli

Doymanın gerçekleşmediği yani doğrusal bölgede çalışan ARM, aldığı enerjinin yarısını mekanik enerji olarak miline verirken yarısını da kaynağa geri aktarmaktadır. ARM 'un çalışma ilkesini daha iyi anlamak için, akı ile akım ($\lambda = f(i)$) arasındaki ilişkiye bakmak faydalı olmaktadır.

Motor küçük yüklerde düşük akımlar çekeceği için, stator ve rotor kutuplarının karşılıklı olduğu hizalanma konumu ile ortalama konumlarında akı ile akım arasındaki ilişkisi doğrusal olacaktır. Şekil 3.4 'te verilen akı halkalanması-akım ilişkisinden yola çıkılarak, bir faza ilişkin matematiksel model oluşturulmaktadır. Her fazın birbirine eşdeğer olduğu varsayımı ile faz sayısından bağımsız, bir faza ait model oluşturulmuştur. Motor elektriksel parametreleri ile elektriksel giriş için,

$$V = R \cdot i + \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.2)$$



Şekil 3.4 Klasik ARM 'da doğrusal bölgeye ait akı akım değişimi

yazılabilir. Halkalanma akısı, $\lambda = f(i, \theta)$ olduğu için,

$$\frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} = \frac{d\lambda}{di} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{d\lambda}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (3.3)$$

şeklinde yazılabilir. Doymanın olmadığı magnetik malzeme için ise,

$$\lambda = L \cdot i \quad (3.4)$$

olmak üzere ve $\omega = d\theta/dt$ alınmak suretiyle,

$$\frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{dL}{d\theta} \cdot \omega \quad (3.5)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemin sağ tarafındaki ikinci terim “ ω ” açısal hızında sargıda endüklenen gerilimi, başka bir deyişle elektromagnetik kuvveti (emk) göstermektedir. Sonuç olarak elektriksel giriş için,

$$V = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{dL}{d\theta} \cdot \omega \quad (3.6)$$

yazılabilir. Bu ifade “ i ” akımı ile çarpılarak elektriksel giriş gücü,

$$v \cdot i = R \cdot i^2 + L \cdot i \cdot \frac{di}{dt} + i^2 \cdot \frac{dL}{dt} \cdot \omega \quad (3.7)$$

olarak yazılabilir. Magnetik alanda depo edilen enerji ifadesi, akı halkalanması–akım ilişkisinden yola çıkılarak,

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2 \quad (3.8)$$

şeklinde olup, buradaki L ve i zamanın işlevidir. Magnetik enerjideki değişim için,

$$\frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\frac{L \cdot i^2}{2} \right] \quad (3.9)$$

temel bağıntısı yazılır ve gerekli matematiksel işlemler yapılarak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\frac{dW}{dt} = L \cdot i \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \cdot \omega \quad (3.10)$$

Denklem 3.7 ‘deki ifade Denklem 3.11 gibi düzenlenebilir.

$$v \cdot i = R \cdot i^2 + \frac{d}{dt} \left[\frac{L \cdot i^2}{2} \right] + \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \cdot \omega \quad (3.11)$$

Bu güç ifadesinin sağ tarafında üç farklı terim görülmektedir. Bunlardan birincisi, sargı direncindeki bakır kayıplarını, ikincisi magnetik alandaki depolanan enerjideki artışı, üçüncüsü ise elektriksel girişten alınarak mekanik enerjiye dönüştürülen gücü göstermektedir. Üçüncü terimden modelde mekanik çıkış olarak yer alan momentin ani değeri,

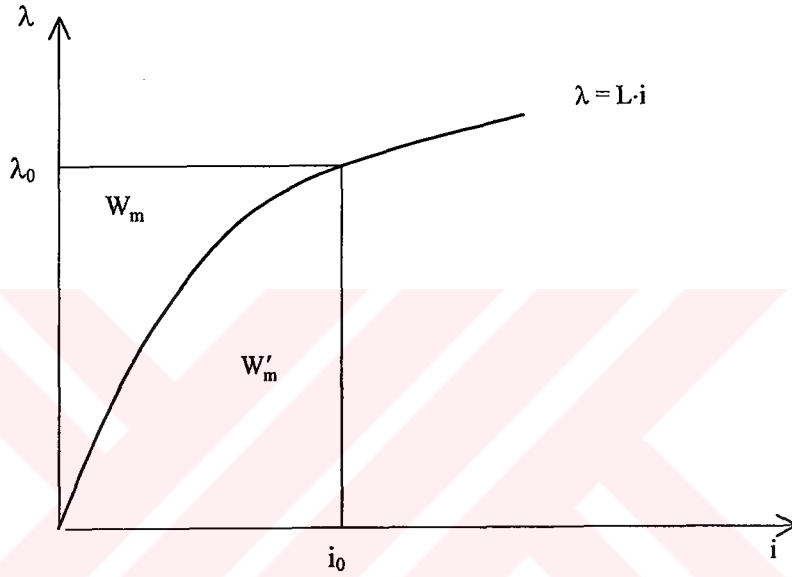
$$M = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (3.12)$$

olarak ifade edilir. Oluşturulan bu model bir faza aittir ve diğer fazları da içine alacak şekilde genişletilebilir.

3.3.2 Doğrusal Olmayan Bölgenin Matematiksel Modeli

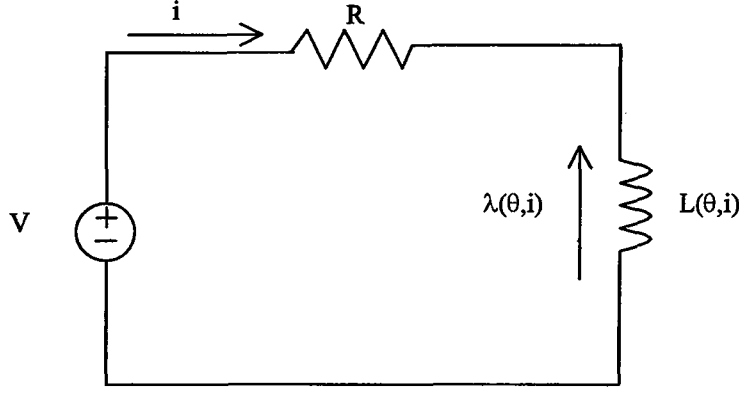
Faz akımının yüksek değerleri için ARM ‘un saç malzemesi, magnetik olarak hemen hemen her zaman doyma etkisi altındadır. Doyma etkisinin motora oldukça faydası olduğu görülebilir. Magnetik doymanın makineye faydalarını incelemek için, doymadaki ARM ‘un akı ile akım ilişkisini gösteren eğrilerin incelenmesi gerekir.

Şekil 3.5 'de motorun doymalı çalışma durumunda magnetik alanda depolanan enerji (W_m) ile mekanik enerjiye dönüştürülen (W'_m) ko-enerji arasındaki ilişki görülmektedir. Doğrusal bölgede çalışan bir ARM 'un magnetik alanda depolanan enerjisi (W_m) ve ko-enerjisine (W'_m) eşit idi. Ancak doğrusal olmayan bölgede çalışan ARM 'un magnetik alanda depolanan enerjisi (W_m), ko-enerjisinden (W'_m) daha küçüktür. Bir başka deyişle doğrusal olmayan bölgede çalışan ARM kaynaktan aldığı enerjinin büyük bir kısmını mekanik enerji olarak motor milinden verebilmektedir (Stephenson vd., 1989).



Şekil 3.5 Klasik ARM 'da doğrusal olmayan bölgeye ait akı akım değişimi

İdeal olarak doyma bölgesinde çalışan bir ARM, doğrusal bölgede çalışan bir ARM 'a göre iki kat daha büyük mekanik momente sahiptir. İdeal olarak doymalı bölgede çalışan bir ARM aldığı enerjinin hepsini, mekanik enerji olarak çıkış verebilir. Fakat doğrusal çalışmada ARM aldığı enerjinin %50 'sini mekanik enerji olarak kullanmakta, %50 'sini de kaynağa geri aktarmaktadır. Doğrusal bölgede çalışan bir ARM 'un, doymada çalışan bir ARM 'una göre daha büyük kVA/kW ihtiyacı olduğu gösterilmiştir (Miller, 1985). Böylece doymalı bölgede çalışan bir ARM doğrusal bölgede çalışana göre, daha küçük güçlü bir dönüştürücüye ihtiyaç duymaktadır. ARM 'un bir fazına ait eşdeğer devre ele alınarak motorun doymalı bölgede çalışması durumunda denklemlerin nasıl değiştiği gösterilmektedir. Motorun bir fazına ait eşdeğer devre Şekil 3.6 'da verilmiştir (Derdiyok, 1996). "V" sargı gerilimini, "i" sargı akımını, "R" sargı direnci, $L(\theta, i)$ sargı endüktansı ve " θ " rotor konum açısını göstermektedir.



Şekil 3.6 Klasik ARM 'un bir fazına ait eşdeğer devre

Stator sargısının halkaladığı akı;

$$\lambda(\theta, i) = L(\theta, i) \cdot i \quad (3.13)$$

Sargı endüktansı, rotor çıkık kutbu stator ile tam karşı karşıya geldiği zaman en en yüksek değerindedir ve sadece rotor açısına bağlıdır. Aynı zamanda bu endüktans magnetik malzemenin doyma özelliğinden dolayı sadece θ dönme açısı ile değişmeyip, sargıdan geçen akıma da bağlı olup genel olarak $L = L(\theta, i)$ şeklinde gösterilir.

Motor uçlarındaki gerilim,

$$V = R \cdot i + \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.14)$$

$$V = R \cdot i + \frac{d}{dt} [L(\theta, i) \cdot i] \quad (3.15)$$

$$V = R \cdot i + \frac{dL(\theta, i)}{dt} \cdot i + L(\theta, i) \cdot \frac{di}{dt} \quad (3.16)$$

$$V = R \cdot i + \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \cdot i + \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial i} \frac{di}{dt} \cdot i + L(\theta, i) \cdot \frac{di}{dt} \quad (3.17)$$

$$V = Ri + \left[L(\theta, i) + \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial i} \cdot i \right] \frac{di}{dt} + \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \cdot i \quad (3.18)$$

$$V = Ri + l_{art}(\theta, i) \frac{di}{dt} + emk(\theta, i) \quad (3.19)$$

Son ifade de $l_{art}(\theta, i)$ artımsal endüktansı ve $emk(\theta, i)$ zıt elektromotor kuvvettir. Birinci terim sargı direncindeki gerilim düşümü, ikinci terim akım değişmelerine karşı oluşan gerilim, üçüncü terim ise hızla orantılı olarak oluşan gerilimdir. Motorun çalışma durumlarında verilen ifadelerde bazı ihmaller yapılabilir. Eğer i akımı çok küçükse “ $(\partial L / \partial i) \cdot i$ ” terimi ihmal edilir. Hız çok küçükse emk ihmal edilebilir.

Genel olarak doymalı durumda depolanan enerji ve ko-enerji ifadeleri aşağıda (3.20) ve (3.21) ‘de verilmiştir.

$$W_m = \int_0^{\lambda} i(\lambda, \theta) \cdot d\lambda \quad (3.20)$$

$$W'_m = \int_0^i \lambda(i, \theta) \cdot di \quad (3.21)$$

Bulunan ko-enerji ifadesinden doyma çalışma bölgesindeki motorun moment ifadesi aşağıdaki gibi bulunur.

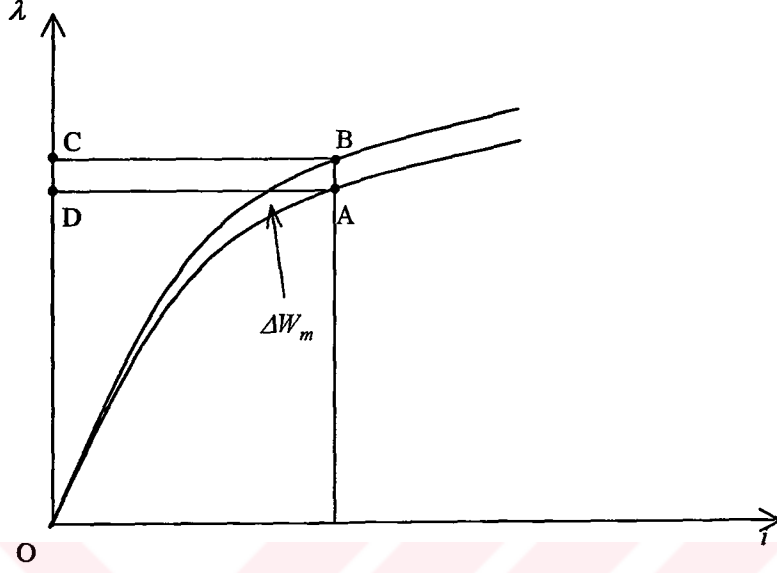
$$T = \frac{\partial W'_m}{\partial \theta} \quad (3.22)$$

Elde edilen bu moment ifadesi ARM ‘una ait en genel moment ifadesidir. O halde moment değişimi ko-enerji ile yakından ilişkilidir. Eğer sargı akımını sabit tutarak, rotoru $\Delta\theta$ kadar yer değiştirirsek ΔW_m miktarında enerji değişimi olur. Buradan hareketle moment şu şekilde yazılabilir,

$$T = \frac{\Delta W_m}{\Delta \theta} \quad (3.23)$$

Şekil 3.7 ‘de gösterilen böyle bir durum için, magnetik alanda depolanan enerji ile ko-enerjide

değişmeler gerçekleşmektedir. Akımın sabit kalarak rotorun $\Delta\theta$ miktarda yer değiştirmesi ile birlikte ko-enerjideki değişime ile eşit miktarda mekanik iş yapılır. Rotorun A konumundan B'ye hareketiyle birlikte yapılan enerji dönüşümü şu şekildedir;



Şekil 3.7 Sabit Akımda Ko-Enerji Değişimi ve Moment Üretimi

$$\Delta W_e = (\text{Alan})_{ABCD} \quad (3.24)$$

Magnetik alanda depolanan enerjideki değişim miktarı;

$$\Delta W_m = (\text{Alan})_{OBC} - (\text{Alan})_{OAD} \quad (3.25)$$

yapılan mekanik iş miktarı;

$$\Delta W_m = T \cdot \Delta\theta \quad (3.26)$$

$$\Delta W_m = \Delta W_e - \Delta W_m \quad (3.27)$$

$$\Delta W_m = (\text{Alan})_{ABCD} - [(\text{Alan})_{OBC} - (\text{Alan})_{OAD}] \quad (3.28)$$

$$\Delta W_m = [(\text{Alan})_{ABCD} + (\text{Alan})_{OAD}] - (\text{Alan})_{OBC} \quad (3.29)$$

$$\Delta W_m = (\text{Alan})_{OAB} \quad (3.30)$$

Kaynaktan elde edilen enerjinin tamamı mekanik işe çevrilmez. Magnetik alanda depolanan enerji boşa harcanmaz, fakat A'dan B'ye yapılan hareket sırasında da enerji dönüşümü yapılmaz. Bu durum çeviricinin boyutlandırılmasında önemli bir faktördür.



4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE STATİK MAGNETİK ANALİZ

4.1 Giriş

Elektrik mühendisliğinde transformatör, motor, generatör gibi elektrik makinelerinde magnetik alan dağılımının ve magnetik alana ilişkin büyüklüklerin belirlenmesi için analog veya sayısal yöntemler kullanılabilir. Analog yöntemlerin zorlukları ve yetersizlikleri sayısal yöntemlerle aşılabılır. Magnetik alan problemlerinin çözümünde farklı sayısal yöntemlerden yararlanılır. Bunlardan bazıları; Sonlu Farklar Yöntemi, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Monte Carlo Yöntemi, Sınır Elemanları Yöntemi, Yük Benzetim Yöntemi dir. En fazla kullanılan sayısal yöntemlerden birisi de Sonlu Elemanlar Yöntemidir (SEY).

Sonlu Elemanlar Yöntemi, fiziksel matematiğin sınır değer problemlerine yaklaşık çözümler üretmek için kullanılan bir sayısal yöntemdir. Yöntem yaklaşık kırk yıllık bir geçmişe sahiptir. İlk olarak 1940 'lı yıllarda önerilmiş, 1950 'li yıllarda uçak tasarımında kullanılmaya başlanmıştır. Bundan sonra, yöntem geliştirilmiş ve yapı analizi ile ilgili problemlere çok yaygın olarak, diğer alanlardaki problemlere de daha az yaygın olarak uygulanmıştır. Günümüzde Sonlu Elemanlar Yöntemi, mühendislik ve matematik problemlerinin çözümünde geniş uygulama alanına sahip genel bir yöntem olarak tanınmaktadır. Yöntemin elektromagnetik alan problemlerine uygulanması ilk olarak 1968 yılında gerçekleştirilmiştir.

Elektrik makinelerinin tasarım ve üretim aşamasında deneysel çalışmaların fazla olması, prototiplerin üretim maliyeti ve zaman kaybı açısından vermiş olduğu zararlar önemli bir sıkıntı olarak karşımıza çıkmaktadır. Oysa SEY ile gerçek motor parametreleri kullanılarak oluşturulan modeller üzerinde analizlerin gerçekleştirilmesi sonucu, motorun davranışı ve karakteristikleri elde edilebilmektedir. Motorun belirli performans karakteristiklerini iyileştirme yolunda SEY ile oluşturulan modelde belirli parametreler değiştirilerek sonuca ulaşılabilir. Böylelikle, prototip oluşturma olayı büyük ölçüde azaltılmış olmaktadır. Bu durum üretim safhasına da olumlu yansiyarak maliyetin düşmesi sağlanmaktadır.

Bu bölümde, uygulamada çokça karşılaşılan eksenel simetrik Poisson tipi magnetik alan problemleri ile ilgili temel bağıntılar verilerek statik magnetik analiz ve birleşik alan analizi ile ilgili konular incelenmektedir.

4.2 SEY ve Elektromagnetik Alan Çözümlerine Uygulanması

Elektromagnetik alan problemlerinin çoğu yapısında ya kısmi türevli ya da integralli denklemler içerir. Bu problemler diğer sayısal yöntemlerle olduğu gibi Sonlu Elemanlar Yöntemi ile de çözülebilir. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) bir sistemin sonlu sayıdaki bilinmeyenlerinin sistemin bilinen büyüklükleri cinsinden belirlenmesi amacını hedefler. SEY temelde toplam magnetik enerjiyi minimuma indiren çözümün, aynı zamanda, Poisson denklemini sağlayan çözüm olması ilkesine dayanır. Temel ilkesinden de anlaşıldığı gibi, sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekte Poisson denklemi gibi ikinci derece bir diferansiyel denklemin sayısal çözümü yapılmaktadır (Kalenderli,1996).

SEY ile herhangi bir problemin çözülmesi için aşağıda verilen dört temel safhanın gerçekleştirilmesi gerekmektedir:

- Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara veya alt bölgelere ayrılması
- Her bir eleman için temel denklemlerin yazılması
- Çözüm bölgesindeki tüm elemanların birleştirilmesi
- Elde edilen denklem sisteminin çözümü

SEY ile magnetik akı yoğunluğunun sayısal çözümünü elde etmek için verilen alan bölgesi sonlu küçük elemanlardan oluşan bir ağ ile örülür. Kapalı bir bölgenin sonlu elemanlara bölünmesi esnasında kullanılacak elemanların boyutları, konumları, ve biçimleri isteğe bağlı olarak değişmektedir. Bu elemanlar, bir boyutlu problemlerde doğru parçaları, iki boyutlu problemlerde üçgen, kare, dikdörtgen veya çokgen, üç boyutlu problemlerde ise küp, prizma, dörtyüzlü gibi şekillerde olabilir.

Bölge elemanlara ayrıldıktan sonra, her eleman içinde potansiyelin belirli bir bağıntı ile değiştiği kabul edilir ve bu şekilde potansiyelin sürekli değiştiği bir bölgede bölgenin tümü için bir yaklaşım işlevi ile çözüm elde edilir. Yaklaşım işlevi için seçilen çokterimlinin derecesi ne kadar yüksek ise doğru çözüme o kadar iyi yaklaşılr. Seçilen çokterimlinin katsayıları eleman üzerinde ve içinde seçilmiş düğümlerin koordinatları ve potansiyelleri cinsinden bulunabilir. Bu katsayıların hesaplanması esnasında, SEY 'nin enerjinin en küçüklenmesi ilkesi gereğince enerjinin potansiyele göre türevi alınır. Böylece belirli bir alan içerisinde enerjiyi en küçük yapan potansiyel değerleri bulunabilir.

Sonlu elemanların üçüncü adım çözüm bölgesindeki tüm elemanların birleştirilmesidir. Tüm

bölge içindeki toplam enerji, eleman enerjilerinin toplamına eşittir. Çözümü aranan potansiyel işlevinin tüm bölge içinde, elemanlar arasındaki sınırlarda sürekli olması gerekir. Elemanların birleştirilmesine küçük bir örnek verecek olursak; iki üçgen elemanın birleştirilmesi ile bir dörtgen eleman oluşturulur fakat bu yeni elemanın tekrar numaralandırılması gerekmektedir. Çünkü düğüm numaraları değişmektedir. Bu nedenle tanımlanan her düğüme hem yerel düğüm numarası hem de genel düğüm numarası verilir. Tek tek elemanların katsayılar matrisinden yola çıkılarak genel katsayılar matrisi oluşturulur. Daha sonra elde edilen denklem sisteminin çözülmesi ile hedeflenen magnetik vektör potansiyel değerleri bulunur. SEY ile bir, iki veya üç boyutlu magnetik alan problemleri çözülebilir.

4.2.1 Maxwell ve Poisson Denklemleri

Modern elektromagnetik alan kuramı Maxwell denklemlerine dayanır. Maxwell denklemlerinin diferansiyel biçimde yazılımları:

$$\nabla \times \{H\} = \{J\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} = \{J_s\} + \{J_e\} + \{J_v\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} \quad (4.1)$$

$$\nabla \times \{E\} = - \left\{ \frac{\partial B}{\partial t} \right\} \quad (4.2)$$

$$\nabla \cdot \{B\} = 0 \quad (4.3)$$

$$\nabla \cdot \{D\} = \rho \quad (4.4)$$

Maxwell denklemlerinin integral biçiminde yazılımla karşılıkları:

$$\oint_l E \cdot dl = - \int_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS \quad (4.5)$$

$$\oint_l H \cdot dl = \int_s \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot dS \quad (4.6)$$

$$\oint_s D \cdot dS = \int_v \rho \cdot dV \quad (4.7)$$

$$\oint_s B \cdot dS = 0 \quad (4.8)$$

Bu denklemler yapısal bağıntılarla tamamlanır. Yapısal bağıntılar ortamın makroskopik

özelliklerini tanımlar:

$$\{D\} = \epsilon \cdot \{E\} \quad (4.9)$$

$$\{B\} = \mu \cdot \{B_F\} \quad (4.10)$$

$$\{J\} = \sigma \cdot \{E\} + \{J_F\} \quad (4.11)$$

Genel olarak, anizotrop (yönser) ortamlar için ϵ , μ ve σ katsayıları tansörel (gerey) büyüklüklerdir. İzotropik (yönsemez) ortamlar için bu büyüklükler skaler (sayıl) olarak alınabilir. Ayrıca bu büyüklükler, homojen olmayan ortamlar için konumun işlevi iken, homojen ortamlar için konumdan bağımsızdırlar.

Diğer bir temel denklem, elektriksel yük sakınım veya süreklilik denklemidir.

$$\nabla \cdot \{J\} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4.12)$$

Bu bağıntılardaki büyüklükler:

E: elektrik alan şiddeti (V/m)

H: magnetik alan şiddeti (A/m)

D: elektriksel akı yoğunluğu (C/m²)

B: magnetik akı yoğunluğu (endüksiyon)(Wb/m²)

t: zaman (s)

ρ : elektriksel yük yoğunluğu (C/m³)

J: akım yoğunluğu (A/m²)

J_F : dış akım yoğunluğu (a/m²)

∇ : nabla vektörü ($\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i}_x + \frac{\partial}{\partial y} \vec{i}_y + \frac{\partial}{\partial z} \vec{i}_z$)

ϵ : dielektrik katsayısı (permittivite)(F/m) ($\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$)

μ : magnetik geçirgenlik (permeabilite)(H/m) ($\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$)

σ : elektriksel iletkenlik (S/m veya 1/ Ω .m)

B_r : remanans (kalıcı) endüksiyon (Wb/m^2)

Maxwell denklemleri, genel denklemlerdir. Bu genel denklemler uygulandığı problem türüne göre değişir ve basitleşir. Sonlu Elemanlar yöntemi toplam magnetik enerjiyi en küçüğe indirgeyen çözümün Poisson denklemini sağlayan çözüm olması ilkesine dayanır (Kalenderli, 1996).

Temel ilkeden de anlaşılacağı gibi SEY ile gerçekte Poisson denklemi gibi ikinci dereceden bir diferansiyel denklemin sayısal çözümü yapılmaktadır. Homojen bir ortamda Poisson denklemini aşağıdaki gibidir.

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (4.13)$$

4.2.2 Magnetik Vektör Potansiyel ve Temel Eşitlikler.

Statik ve dinamik alanların dikkate alındığı, ayrıca deplasman akımlarının ihmal edildiği durumda iki ayrı potansiyel ifadesi vardır. Bunlar;

$\{A\}$ = Magnetik vektör potansiyel

V = Elektrik scaler potansiyel

Magnetik vektör potansiyelli iki boyutlu ve üç boyutlu elektromagnetik alanları tanımlamak için PLANE53, PLANE13 ve SOLID97 elemanları kullanılabilir. Temel elektromagnetik alan sonuçları, magnetik alan şiddeti, magnetik akı yoğunluğu, magnetik kuvvetler ve akım yoğunluğu sonuç değerlerini içerir.

Magnetik akı yoğunluğu ilk elde edilen sonuçtur ve magnetik vektör potansiyelin rotasyoneli olarak tanımlanır. Eleman şekil fonksiyonunu kullanarak aşağıdaki gibi ifadesi çıkarılır;

$$\{B\} = \nabla \times [N_A]^T \{A_e\} \quad (4.14)$$

$\{B\}$ = Magnetik akı yoğunluğu

$\nabla \times$ = Rotasyonel işlemcisi

$[N_A]$ = Şekil fonksiyonu

$\{A_e\}$ = Düğüm magnetik vektör potansiyeli

$$\{H\} = [v]\{B\} \quad (4.15)$$

$\{H\}$ = Magnetik alan şiddeti

$[v]$ = Relüktans matrisi

Magnetik kuvvetler de aşağıdaki verilen şekilde elde edilirler,

$$\{J_t\} = \{J_e\} + \{J_s\} + \{J_v\} \quad (4.16)$$

$\{J_t\}$ = Toplam akım yoğunluğu

$$\{J_s\} = -[\sigma] \left\{ \frac{\partial A}{\partial t} \right\} = -[\sigma] \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [N_A]^T \left\{ \dot{A}_e \right\} \quad (4.17)$$

$\{J_e\} = \{A\}$ 'dan kaynaklanan akım yoğunluğu bileşeni

$[\sigma]$ = İletkenlik matrisi

n = Entegrasyon nokta sayısı

$[N_A] = \{A\}$ için eleman şekil fonksiyonu

$\left\{ \dot{A}_e \right\}$ = Magnetik vektör potansiyelin türevi

$$\{J_s\} = -[\sigma] \nabla V = -[\sigma] \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \nabla \{N_A\}^T \{V_e\}$$

$\{J_s\} = V$ 'den kaynaklanan akım yoğunluğu bileşeni

∇ = Diverjans operatörü

$\{V_e\}$ = Elektrik skaler potansiyel

$\{N_A\} = \{V\}$ için eleman şekil fonksiyonu

$$\{J_v\} = \{v\} \times \{B\} \quad (4.19)$$

$\{J_v\}$ = Hız akım yoğunluğu vektörü

$\{v\}$ = Uygulanan hız vektörü

$\{B\}$ = Magnetik akı yoğunluğu vektörü

Elemanlar seviyesinde magnetik kuvvetleri hesaplamada üç değişik metot kullanılır.

“Lorenz kuvvetler” metodu ile akım taşıyan iletkenlerdeki magnetik kuvvetler hesaplanır;

$$\{F^{jb}\} = \int_V \{N\}^T (\{J\} \times \{B\}) \cdot dV \quad (4.20)$$

$\{N\}$ = Eleman şekil fonksiyonu

“Maxwell stress tensör” metodu ile, ferromagnetik bölgelerdeki kuvvetler belirlenir. Bu kuvvet hesabı, sıfırdan farklı bir yüzey yükü ile tanımlanmış hava eleman yüzeyleri üzerinde oluşturulur. 2-boyutlu uygulamalar için, bu metot şu yüzeysel integral ifadesi ile belirtilir;

$$\{F^{mx}\} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \int_S \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{Bmatrix} dS \quad (4.21)$$

kartezyen koordinatlar için;

$$T_{11} = B_x^2 - \frac{1}{2} \cdot |B|^2 \quad (4.22)$$

$$T_{12} = B_x \cdot B_y \quad (4.23)$$

$$T_{21} = B_x \cdot B_y \quad (4.24)$$

$$T_{22} = B_y^2 - \frac{1}{2} \cdot |B|^2 \quad (4.25)$$

n_1 = x doğrultusundaki birim normal vektörü

n_2 = y doğrultusundaki birim normal vektörü

dS = Elemanın yüzey alanı .

$$|B|^2 = B_x^2 + B_y^2 \quad (4.26)$$

Şimdi ise elektromagnetik analiz için önemli görülen bazı büyüklükler çıkartılmaktadır. Tanımlanan kapalı bir eğrinin oluşturduğu yüzeyden geçen akıyı hesaplamak için magnetik akı yoğunluğu kullanılır. S yüzeyinden geçen akı şu şekilde hesaplanabilir (Özoğlu, 1999).

$$\lambda = \int_S \{B\} \cdot \{n\} dS \quad (4.27)$$

λ = S yüzeyinden akan akı

$\{B\}$ = Akı yoğunluğu vektörü

$\{n\}$ = Birim normal vektörü

S = S yüzeyinin çevrelediği alan

(3.66) denklemi A vektör potansiyel cinsinden yazılırsa,

$$\lambda = \int_S (\nabla \times \{A\}) \cdot \{n\} dS \quad (4.28)$$

$\{A\}$ = Magnetik vektör potansiyel vektörü

Stoke teoremini uygulayarak yüzey integrali, kapalı çevre boyunca A 'nın çizgi integratine dönüşür.

$$\lambda = \int_l \{A\} \cdot \{t\} dl \quad (4.29)$$

$\{t\}$ = Birim teğet vektörü

l = Çevrenin uzunluğu

Bir yol boyunca meydana gelen magnetomotor kuvvet düşümü Amper teoremine göre şu şekilde hesaplanabilir;

$$mmk = \int_l \{H\} \cdot \{t\} dl \quad (4.30)$$

$\{H\}$ = Magnetik alan şiddeti

Sargının sağladığı enerji şu şekilde hesaplanabilir;

$$W = \frac{1}{2} \int_V \{A\} \cdot \{J_s\} dV \quad (4.31)$$

W = Sargıdan enerji girişı

$\{J_s\}$ = DA kaynak akım yoğunluğu

Sargı endüktansı şu şekilde hesaplanabilir;

$$L = \frac{2W}{i^2} \quad (4.32)$$

L = Sargı Endüktansı

i = Sargı akımı

Bir sargıda halkalanan toplam akı, sargı endüktansı ve sargı akımından şu şekilde hesaplanabilir;

$$\lambda = L \cdot i \quad (4.33)$$

λ = Halkalanma akısı

2-Boyutlu bir analizde bir gövdenin momenti Maxwell stress tensörü kullanılarak şu şekilde hesaplanabilir;

$$T = \frac{1}{\mu_s} \int \left[(\{B\} \cdot \{n\}) \cdot (\{R\} \times \{B\}) - \frac{|B|^2}{2} (\{R\} \times \{n\}) \right] \cdot dS \quad (4.34)$$

T = Toplam moment

μ_s = Çevrelenen bölgenin geçirgenliği

$\{B\}$ = Akı yoğunluğu vektörü

$\{n\}$ = Birim normal vektörü

$\{R\}$ = Pozisyon vektörü

Dairesel bir yol boyunca moment değeri şu ifadeyle de hesaplanabilir;

$$T = \frac{1}{\mu_s} \int [(\mu \cdot \{B\} \cdot \{n\}) \cdot (\{R\} \times \{B\})] \cdot dS \quad (4.35)$$

4.3 Statik Magnetik Analiz

Statik analiz için şu kabulleri yapmak mümkündür;

- Statik magnetik alanlar dikkate alınmıştır. (zamana göre değişim ve elektrik alanları ihmal edilmiştir.)
- Magnetik malzeme özellikleri doymalı olabilir.

Birinci kabul, denklemdaki $\{J_e\}$, $\{J_v\}$ ve $\left\{\frac{\partial D}{\partial t}\right\}$ vektörlerini yok eder. Ayrıca (4.2) ve (4.4) ihmal edilir. Böylece Maxwell denklemleri şu hali alır;

$$\nabla \times \{H\} = \{J_s\} \quad (4.36)$$

$$\nabla \cdot \{B\} = 0 \quad (4.37)$$

Esas olarak potansiyel alan denklemlerinin türetilmesi, (4.5) ve (4.6) Maxwell denklemlerinden çıkarılmıştır. Kalıcı mıknatıslar olmaksızın doymalı malzemeler göz önüne alınacak şekilde magnetostatik problemler için esas bağıntı;

$$\{B\} = [\mu] \cdot \{H\} \quad (4.38)$$

$[\mu]$ = Magnetik geçirgenlik matrisi, genelde H 'nin bir fonksiyonudur.

Magnetik geçirgenlik matrisi $[\mu]$, sıcaklığın veya alanın fonksiyonu olarak tanımlanabilir.

$$[\mu] = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_{rx} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{rz} \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

Magnetik geçirgenlik şu şekilde yazılabilir:

$$[\mu] = \mu_0 [\mu_{rx}] \quad (4.40)$$

μ_0 = Mutlak magnetik geçirgenlik (boşluğun magnetik geçirgenliği)

$[\mu_{rx}]$ = Bağlı magnetik geçirgenlik matrisi (x doğrultu bileşeni)

Eğer $[\mu]$ sadece alanın fonksiyonu ise;

$$[\mu] = \mu_h \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

μ_h = BH değişim eğrisinden elde edilen geçirgenlik

Karışık kullanım durumunda,

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \mu_h & 0 & 0 \\ 0 & \mu_0 \mu_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_h \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

Kalıcı mıknatıslar dikkate alındığında, (4.7) bağıntısı şu şekli alır,

$$\{B\} = [\mu] \cdot \{H\} + \mu_o \{M_o\} \quad (4.43)$$

$\{M_o\}$ = Artık mıknatıslanma vektörü

Diğer ana denklemler ise:

$$\{H\} = [\mu]\{B\} - \frac{1}{\nu_o} [\nu] \cdot \{M_o\} \quad (4.44)$$

$[\nu]$ = Magnetik relüktivite (relüktans) matrisi = $[\mu]^{-1}$

ν_o = Boşluğun relüktansı = $\frac{1}{\mu_o}$

Elektrik alana ait ana denklem;

$$\{J\} = [\sigma] \cdot [\{E\} + \{v\} \times \{B\}] \quad (4.45)$$

$$\{D\} = [\epsilon] \cdot \{E\} \quad (4.46)$$

$[\sigma]$ = Elektriksel iletkenlik matrisi

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

$[\epsilon]$ = Dielektrik geçirgenlik (dielektrik sabiti) matrisi

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

$\{v\}$ = Hız vektörü

$$\{v\} = \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix} \quad (4.49)$$

σ_{xx} = İletkenlik (x doğrultu bileşeni)

ϵ_{xx} = Dielektrik geçirgenlik (x doğrultu bileşeni)

Magnetik alan problemlerinin çözümü potansiyel fonksiyonları kullanmakla mümkün olur. İki çeşit potansiyel fonksiyon vardır. Bunlar çözülecek problemin çeşidine göre kullanılan magnetik vektör potansiyel ve skaler magnetik potansiyeldir. Potansiyeli seçmede kullanılan faktörler, alan dinamikleri, alan eksen türleri, kaynak akım yapısı, model büyüklüğü ve elemanlara ayırma işlemidir (Özoğlu, 1999).

4.4 Birleşik Alan Analizi

Birleşik analiz mühendislikte iki yada daha fazla alanın birlikte ele alınması ile gerçekleştirilen analizdir. Birleşik alan analizine örnek olarak ısı-gerilme, ısı-elektrik ve elektromagnetik analizler verilebilir (Ansys Inc., 1996). Birleşik analizi gerçekleştirmek için dolaylı ve doğrudan olmak üzere başlıca iki metot vardır.

Dolaylı metotta birbirini takip eden farklı analizler bulunur. Birleşik alanlardan birinde elde edilen sonuçlar diğerine yük olarak uygulanarak bu metot gerçekleştirilir. Örneğin ısı-gerilme birleşik analizinde, ısı analizden elde edilen düğüm sıcaklıkları yük olarak gerilme analizine uygulanır.

Doğrudan metotta ise birleşik-alan elemanı olarak tanımlı elemanlar kullanılarak birleşik analiz gerçekleştirilir. Birleşik-alan elemanı farklı alanlarda geçerli olan serbestlik derecelerinin hepsini bünyesinde taşır, dolayısıyla birleşik-alan analizine imkan verir.

Bu analiz elektromagnetik alan ile elektrik devresini birleştirerek gerçekleştirilir. Elektrik devresi doğrudan sonlu eleman kısmındaki akım kaynağı bölgesine bağlanabilir. 2-B ve 3-B gerçekleştirilebilen birleştirme, hem sargıları hem de masif iletkenleri içerir. Sargılı uygulamalar için tipik örnekler, solenoidler, transformatörler ve elektrik makinalarıdır. Baralar ve sincap kafesli rotorlar ise masif iletkenlere örnektir (Ansys Inc., 1996).

Elektromagnetik-devre birleşik alanı gerçekleştirmek için genel devre CIRCU124 elemanı, magnetik PLANE53 elemanı ile bağlanmalıdır. Böyle bir model için analiz statik, harmonik (AA), yada geçici analiz olabilir. İletken malzeme doğrusal özelliğe sahip olup izotropdur. Doymalı malzeme seçilerek elektromagnetik bölgede doğrusal olmayan şartlar geçerli olabilir (Ansys Inc., 1996).

Elektromagnetik alanla elektrik devreyi birbirine bağlayan elemanların (PLANE53 ve CIRCU124) serbestlik dereceleri uyumlu olmalıdır. Eğer 2-B'lu sargı elemanı seçilirse bu durumda serbestlik dereceleri AZ (vektör potansiyel), EMF (elektromotor kuvvet), CURR (elektrik akımı) olarak seçilir.

Doğrudan alanları birleştirmede matris birleştirme yöntemi kullanılır. Sonlu eleman ifadelerinde matris birleştirme en genel olarak aşağıdaki şekilde verilir;

$$\begin{bmatrix} [K_{11}] & [K_{12}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{X_1\} \\ \{X_2\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_1\} \\ \{F_2\} \end{Bmatrix} \quad (4.50)$$

$\{X_1\}$ ve $\{X_2\}$ sistemdeki serbestlik derecelerine karşılık gelmektedir. Birleştirmenin etkisi katsayılar matrisinde diagonal terimleri K_{12} ve K_{21} ile temsil edilir. Bu metot ile birleşik cevaplar, çözümdeki bir iterasyon sonucu alınabilir.

Sıralı metotla gerçekleştirilen alan birleştirme yönteminde ise en genel olarak aşağıdaki şekilde verilir;

$$\begin{bmatrix} [K_{11}] & [0] \\ [0] & [K_{22}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{X_1\} \\ \{X_2\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_1\} \\ \{F_2\} \end{Bmatrix} \quad (4.51)$$

Bu metot ile birleşik cevaplar en az iki iterasyon sonunda elde edilir. Sargının izotrop özellikte, sabit magnetik geçirgenlik ve elektrik iletkenliğe sahip olduğu kabulü ile vektör potansiyel yaklaşımında eleman matris denklemleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [C^{iA}] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K^{AA}] & [K^{Ai}] \\ [0] & [K^{ii}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{i\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{V_0\} \end{Bmatrix} \quad (4.52)$$

$\{A\}$ = Düğüm magnetik vektör potansiyel (AZ)

$\{\dot{A}\}$ = Düğüm magnetik vektör potansiyelin türevi

$\{i\}$ = Düğüm elektrik akım vektörü (CURR)

$\{V_0\}$ = Uygulanan gerilim düşümü vektörü

$[K^{AA}]$ = Potansiyel katsayılar matrisi

$[K^{ii}]$ = Rezistif katsayılar matrisi

$[K^{Ai}]$ = Potansiyel-akım birleşik katsayılar matrisi

$[C^{iA}]$ = Endüktif sönümlenme matrisi

Düğüm elektrik akımı, sargıdaki bir sarımın içindeki akımı temsil eder. Bu yüzden, her sargı için sadece bir bilinmeyen elektrik akımı vardır. Buna ek olarak, CURR akım serbestlik derecesi için akı hesabına gerek yoktur. Bir sargı veya masif iletken bir elektrik devresine bağlandığı takdirde, hem elektrik akımı hem de gerilim bilinmeyen olarak kabul edilir. Bu problemin çözümünü gerçekleştirmek için sonlu eleman ve elektrik devre denklemleri eşzamanlı olarak çözülür.

5. TAM KUTUP ADIMLI ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN ANALİZİ

5.1 Giriş

Klasik ARM 'un Karşıt ve elektrik devresini esas alarak performansını arttırmaya yönelik çalışmalar 1990 'lı yıllarda yoğunlaşmıştır. İlk olarak "Yardımcı Komütasyon Sargılı ARM" (Liang, 1992) daha sonra "Çift Uyarmalı ARM" (Li, 1995) isimleri ile gerçekleştirilen bu çalışmalar, sahip olduğu sarım şekline atfen "Tam Kutup Adımlı Anahtarlama Relüktans Motor" (TKARM) ismi ile son şeklini aldı (Mecrow, 1993), (Mecrow, 1996).

Çalışma ilkesi açısından temel farklılıklar meydana getiren bu yeni sargı yöntemi, ARM üzerinde yapılan çalışmaların bir süreliğine konum algılayıcısız çalışma, sürücü devreler, kontrol yöntemleri v.b. konular üzerine kayması sonucu ikinci planda kalmıştır. Bu yapılan çalışmaların işaret işleme teknolojisi ve kontrol algoritmalarındaki gelişmeler ile birlikte üst düzeye çıkarak belirli bir doymaya ulaşması sonucu, son zamanlarda tekrar makine performansını arttırmaya yönelik ve özellikle bu sargı yöntemi üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

TKARM Bölüm 2 'de belirtildiği gibi yeni sargı yöntemi ile, eşdeğer güçte klasik sargı yöntemine sahip makineye göre yaklaşık %20-30 kadar fazla moment üretmektedir. Klasik ARM 'da moment üretimi öz endüktansların rotor konumuna göre değişim oranından elde edilmesine rağmen, TKARM 'da ise fazlar arasında meydana gelen karşıt kuplajların rotor konumuna göre değişim oranından elde edilmektedir. Ayrıca moment üretim mekanizması uyarma yapısına göre değişmektedir. Fakat TKARM iki sakıncalı yönü beraberinde getirmektedir. Bunlardan ilki, motorda üretilen akı sadece rotor konumuna ve ilgili faza bağlı olmaması aynı zamanda diğer fazlara da bağlı olmasından dolayı, analitiksel modeldeki karmaşıklığın artması, ikincisi ise özellikle fazlar arasındaki geçişte oluşan motor momentindeki dalgalılığın uyarma yapısına bağlı olarak artmasıdır.

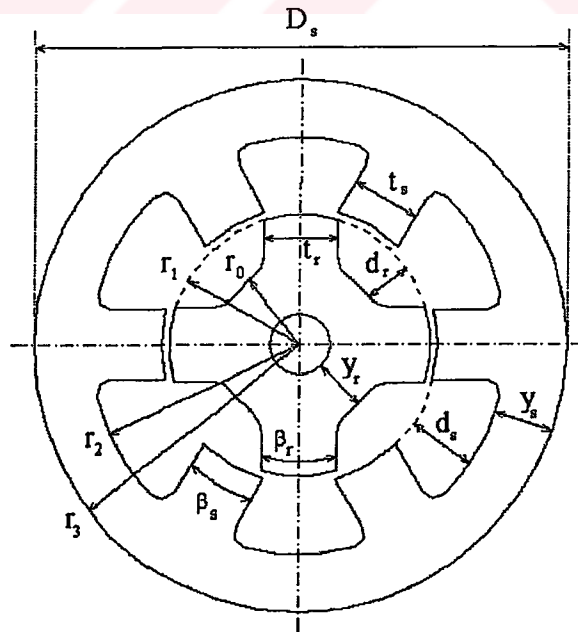
Elektrik mühendisliğinde SEY 'nin elektrik makineleri üzerine kullanılması ile yapılan ilk çalışmalarda, transformatör, generatör ve motorlar ile ilgili magnetik alana ilişkin büyüklükler hesap edilmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalar ile gerçekleşmiştir. Bilgisayar alanında meydana gelen gelişmeler ile sayısal hesap tekniklerinde işlem fazlalığından kaynaklanan hesap hızı yavaşlığı giderilmiş ve SEY daha fazla uygulama sahası bulmuştur.

SEY 'nin Anahtarlama Relüktans Motorlarının üzerine uygulanması ile ilgili olarak, 2-boyutlu olarak moment eğrisi çıkarılmış, ayrı bir çalışmada rotorun farklı konumları için akı halkalanması eğrisi elde edilmiştir (Arumugam, 1985), (Moallem, 1990). Yapılan çalışmalar sonucu, SEY 'nin özellikle motorun magnetik devresine ve geometrisine yönelik çalışmalarda çok iyi sonuçlar verdiği görülmektedir (Dawson, 1986). Bu çalışma boyunca SEY, gerçekleştirilen statik analizlerde sayısal hesap yöntemi olarak kullanılmıştır.

Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile yeni sargı yapısına sahip motorun tüm çalışma karakteristikleri çıkartılmıştır. TKARM 'un çalışma karekteristikleri ve momentteki dalgalılık oranları hem doymalı hemde doğrusal bölgeler için tesbit edilmiştir. Sonlu Elemanlar Yöntemini TKARM 'na uygulamak amacıyla ANSYS sonlu elemanlar analiz programı kullanılmıştır. Çalışmada 6 stator 4 rotor kutup yapısına sahip ARM incelenmiş ve motora ait ilgili parametreler çizelgeler halinde verilmiştir.

5.2 Kullanılan Motorun Özellikleri

Çalışmada kullanılan 6 stator 4 rotor kutup yapısına sahip kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip klasik ARM 'na ait boyutlar ve motorun kesit görünüşü Şekil 5.1'de gösterilmektedir (Miller, 1993). Motor, hiç bir geometrik parametresi ve faz başına düşen sarım sayısı değiştirilmeksizin tam kutup adımlı sargı yapısı ile modellenmektedir.



Şekil 5.1 ARM 'un kesit görünüşü ve boyutları

Çizelge 5.1 ARM 'un boyut parametre tablosu

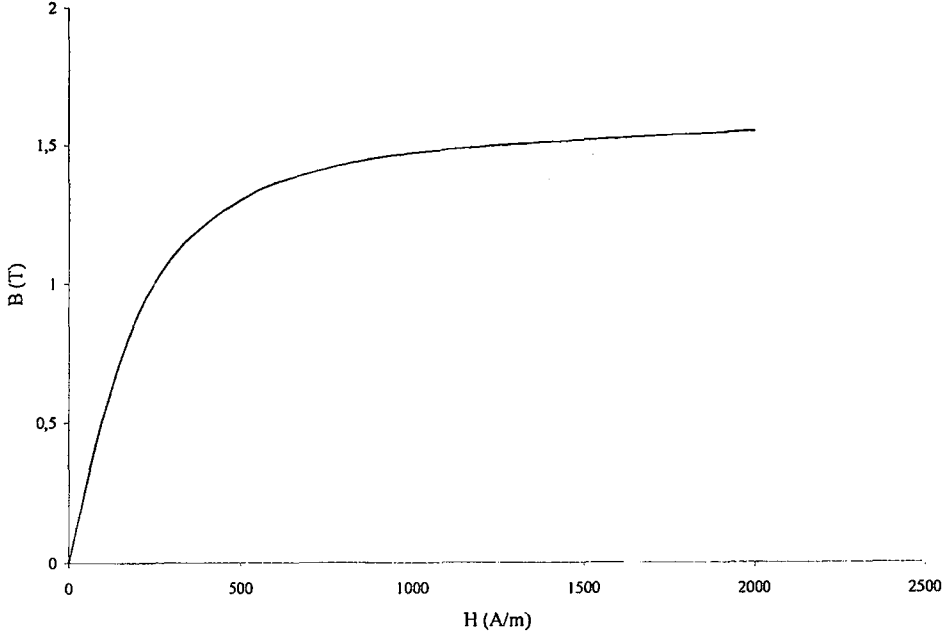
Parametrenin Adı	Sembolü	Değeri
Stator Çapı	D_s	$0.9398 \cdot 10^{-1} \text{ m}$
Rotor Çapı	D_r	$0.4699 \cdot 10^{-1} \text{ m}$
Motor Boyu	L_{stk}	$0.4699 \cdot 10^{-1} \text{ m}$
Toplam Motor Boyu	L_e	$0.7620 \cdot 10^{-1} \text{ m}$
Hava Aralığı	g	$0.2286 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Stator Kutup Genişliği	t_s	$0.1226 \cdot 10^{-1} \text{ m}$
Rotor Kutup Genişliği	t_r	$0.1295 \cdot 10^{-1} \text{ m}$
Stator Kutup Yüksekliği	d_s	$0.1508 \cdot 10^{-1} \text{ m}$
Rotor Kutup Yüksekliği	d_r	$0.6147 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
Stator Boyunduruk Kalınlığı	y_s	$0.8179 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
Rotor Boyunduruk Kalınlığı	y_r	$0.8636 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
Rotor Boyunduruk Yarıçapı	r_0	$0.1734 \cdot 10^{-1} \text{ m}$
Rotor Kutup Yarıçapı	r_1	$0.2349 \cdot 10^{-1} \text{ m}$
Stator İç Boyunduruk Yarıçapı	r_2	$0.3881 \cdot 10^{-1} \text{ m}$
Stator Dış Boyunduruk Yarıçapı	r_3	$0.4699 \cdot 10^{-1} \text{ m}$
Motor Mil Yarıçapı	r_{sh}	$0.8712 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
Stator Kutup Açısı	β_s	30°
Rotor Kutup Açısı	β_r	32°

Kullanılan ARM 'un geometrik boyutları ve bu boyutların değerleri Çizelge 5.1 'de verilmiştir. Birim sistemi olarak SI sistemi kullanılmış ve boyut değerleri de buna göre belirlenmiştir. Boyutlara bakıldığında hacim olarak küçük nitelendirilebilecek bir yapıya sahiptir. Ayrıca motorun etiket değerleri Çizelge 5.2 'de verilmiştir. Etiket değerlerine bakıldığında mil gücünün 261 W, moment değerinin 1.25 Nm, veriminin %83 olduğu görülmektedir. Bu nedenle çalışmada ele alınacak motorun küçük güçlü olduğu söylenebilir.

Çizelge 5.2 ARM 'un genel etiket değerleri

Parametrenin Adı	Sembolü	Değeri
Gerilim	V	24 V
Akım	I	$\cong 11$ A
Moment	T	$\cong 1.25$ Nm
Mil Gücü	P _s	$\cong 261$ W
Verim	η	%83
Ateşleme Açısı	θ_o	47.5°
Komutasyon Açısı	θ_c	80°
İletim Açısı	θ_D	32.5°
Stroke Açısı	ε	30°
Sargı Özgül Direnci	ρ	$1.922 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$
Faz Frekans	F	133.3 Hz
Güç Oranı	S/P	5.1 kVA/kW
Sarım Sayısı	N	31
Faz Direnci	R	0,111 Ohm
Açısal Hız	ω	2000 min ⁻¹
Faz Sayısı	M	3
Sargı Alanı	A _{slot}	$0.536 \cdot 10^{-4} m^2$
Stator Kutup Sayısı	N _s	6
Rotor Kutup Sayısı	N _r	4

Rotor ve Stator gövdesi doymalı sac malzemeden yapılmıştır ve malzemenin magnetik özellikleri Şekil 5.2 'de gösterilmektedir. Eğri incelendiğinde ARM 'un doğrusal olmayan bir malzeme karakteristiğine sahip olduğu görülmektedir. Bu karakteristiğin hatasız olarak tanımlanması, ilerliyen kısımlarda motorun davranışlarını doğru bir şekilde elde etmek için son derece önemli bir konudur. Motorun geometrik ve magnetik özelliklerinin verilmesiyle bundan sonraki bölümde TKARM 'un SEY ile modellenmesi gerçekleştirilmektedir. Bu modellemeye ait işlem aşamaları ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.



Şekil 5.2 Motorda kullanılan malzeme için B-H eğrisi

5.3 SEY İle Modelin Oluşturulması

Elektromagnetik alan problemlerinin SEY ile çözülmesi esnasında sorun farklı aşamalardan geçirilerek bir bütün halinde model oluşturulur. Bu aşamalar aşağıdaki gibidir;

1. Geometrinin oluşturulması
2. Kullanılan malzemenin tanımı
3. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması
4. Çözüm
5. Sonuçların değerlendirilmesi

5.3.1 Geometrinin Modellenmesi

Analiz aşamasının bu bölümünde, motorun geometrisi boyutlarına uygun olarak oluşturulmalıdır. Çizim sonlu elemanlar programı tarafından gerçekleştirilebileceği gibi, herhangi bir CAD programı tarafından da çizilebilir ve IGES/DXF formatında transfer edilebilir. Ancak bu durumda toleranslara dikkat edilmelidir. Fakat sonlu eleman programları tam anlamı ile çizim programı olmadıkları için herhangi bir CAD programını kullanmak

çizimde kolaylık sağlamaktadır.

5.3.2 Kullanılan Malzemenin Tanımı

Sonlu elemanlarda doğru analiz yapabilmek için modelde kullanılan malzeme özelliklerinin çok iyi bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Motorda kullanılan, demirin mıknatıslanma eğrisi, bakır ve alimünyumun iletkenliği gibi doğrusal karakteristiğe sahip özellikleri tanımlamak oldukça kolaydır. Ancak doğrusal olmayan karakteristikteki malzemeyi tanımlamak oldukça zordur ve zaman alır. Histerisiz ve anizotropi ihmal edilecek olursa genel olarak kullanılan üç yöntem vardır (Açıkgöz, 1998);

- Relüktivitenin akı yoğunluğunun karesinin işlevi olarak, $v=v(B^2)$
- Manyetik alan şiddetinin akı yoğunluğunun işlevi olarak, $B=B(H)$
- Permeabilitenin Magnetik alan şiddetinin işlevi olarak, $\mu=\mu(H^2)$

Motorun rotor ve statorundaki saç malzemenin mıknatıslanma eğrisi doğrusal değildir. Doyma özelliğine sahip bu eğri Şekil 5.2 'de gösterilmiştir. Bu eğrinin yapısına uygun olarak, yapılan çalışmada hem doğrusal hemde doğrusal olmayan bölgelere ait değerler alınmıştır.

Doğrusal bölgedeki çalışma şartları iki şekilde gerçekleştirilebilir. Bunlardan ilki belirli bir μ_{rx} magnetik geçirgenlik değeri tanımlamak, diğeri ise doymalı bölgede kullanılan $B=B(H)$ eğrisinde anma akımının altındaki bölgede çalışmaktır. Bu çalışmada ikinci seçenek gerçekleştirilmiştir. Motorun statorundaki sargıların özgül direnci $\rho = 1.922 \cdot 10^{-8} [\Omega\cdot m]$ 'dir.

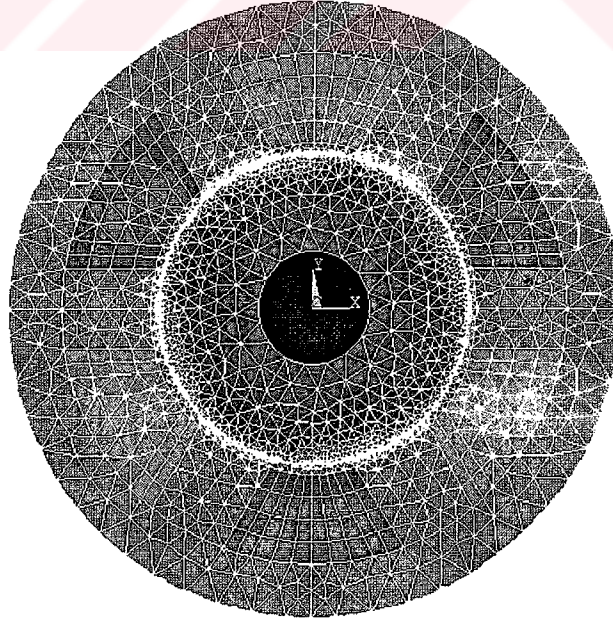
5.3.3 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Modelin geometrisi çizildikten ve malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra sıra sonlu elemanlar modelini oluşturmaya gelmiştir. Dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, sonlu elemanları oluştururken uygun eleman türünün seçilmesidir. Yapılan çalışmada iki tür eleman kullanılmıştır. Bunlar PLANE53 ve CIRCU124 elemanlarıdır.

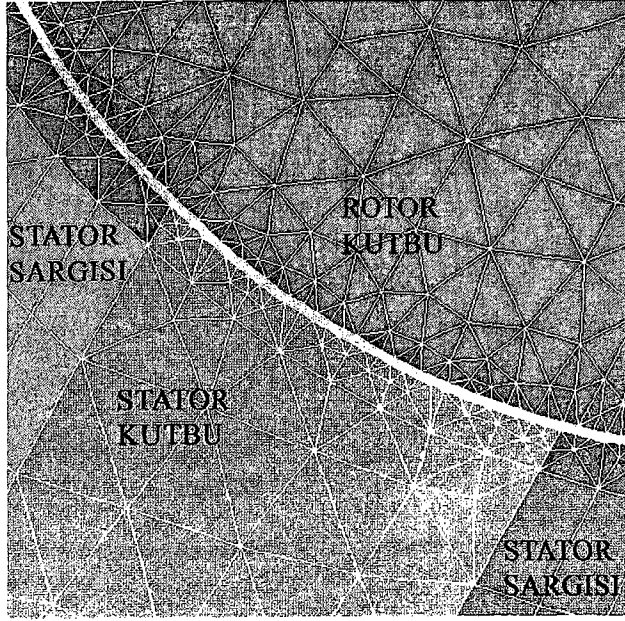
PLANE53 elemanı 8 düğüme sahip 2-boyutlu magnetik analizler için kullanılmaktadır. Bu eleman için 3 ayrı serbestlik derecesi tanımlanmıştır. Serbestlik derecelerinden ikisi sargılar içindir ki bunlar elektrik akımı (CURR) ve elektromotor kuvveti (EMF) dir. Vektör potansiyeli (AZ) ise stator ve rotor hava aralığı içindir.

CIRCU124 elemanı ise bir devre elemanıdır. Bu eleman hem elektrik devrelerinde hem de elektrik devrelerinin magnetik devrelere bağlanmasında kullanılmaktadır. CIRCU124 elemanı EMF ve CURR olmak üzere iki serbetlik derecesine sahiptir. Bu devre elemanı ile bağımlı veya bağımsız gerilim kaynağı, akım kaynağı, direnç, bobin ve kondansatör tanımlanabilmektedir. Sonlu elemanlar ile model oluşturulur iken yaklaşık 5000 devre elemanı ve 12000 düğüm kullanılmıştır. TKARM 'un sonlu elemanlar ile modellenmiş hali Şekil 5.3 'de gösterilmektedir. Karşılıklı sargılar makinenin bir fazını oluşturmaktadır. Motorumuz klasik ARM 'una kıyasla daha fazla sargı sonu etkisine sahiptir. Model oluşturulur iken sargı sonu etkileri ihmal edilmektedir. Önceki çalışmalara uygun olarak sargı sonu etkisinden dolayı direncin %60 arttığı kabul edilmiştir (Mecrow, 1998) (Clothier, 1999).

Model oluşturulur iken Şekil 5.4 'den görüldüğü gibi gerek sargılarda gerekse stator ve rotor kutuplarında, stator ve rotor kutup uçlarına göre, daha seyrek elemanlar kullanılmıştır. Kutup uçlarına doğru gittikçe daha sıklaşan elemanlar, stator ve rotor kutup uçlarına gelindiğinde en sık ve en yoğun halini almaktadır. Çünkü bu noktalar yüksek hassasiyet gerektiren noktalardır. Sonuçların en iyi şekilde elde edilmesi için akı çizgilerinin yoğun olduğu bölgelerin çok iyi modellenmesi gerekmektedir. TKARM modeli oluşturulur iken bu önemli husus göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle stator ve rotor kutup uçlarında ve hava aralığında çok sayıda eleman sıklıkla kullanılarak modelin hassasiyeti arttırılmalıdır.

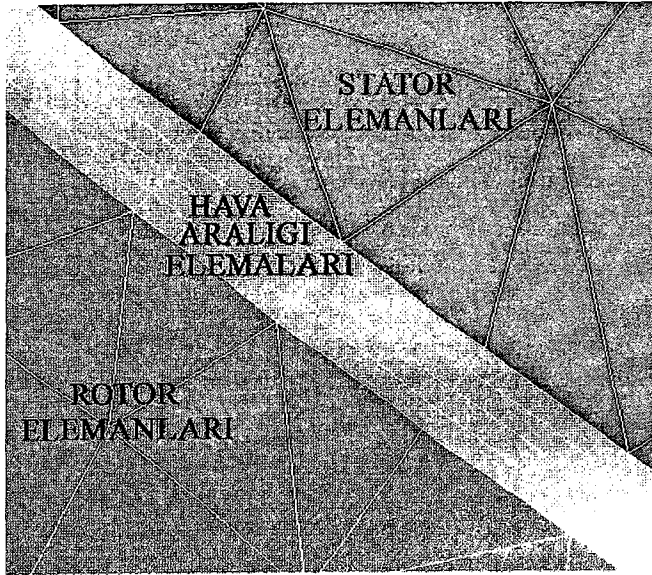


Şekil 5.3 TKARM 'un SEY ile modellenmiş hali



Şekil 5.4 Stator ve rotorda kullanılan elemanlar

Rotor ve stator kutupları arasındaki hava aralığı model oluşturulurken en dikkat edilen bölge olmuştur. Bu aralıkta gösterilen hassasiyet oranında sonuçların doğruluğu artmaktadır. Bu nedenle hava aralığı dört tabakaya bölünmüş, çok küçük elemanlar bu bölgeye yerleştirilmiştir. Şekil 5.5 hava aralığını ve kullanılan elemanları göstermektedir. Böylece hava aralığında meydana gelen olayları hassasiyetle tespit etmek mümkün olmuştur.



Şekil 5.5 Hava aralığı ve kullanılan elemanlar

5.3.4 Çözüm

Oluşturulan modelin çözümü esnasında model bir bütün olarak ele alınmış yani simetri özelliğinden yararlanılmamıştır. Model gerek magnetik özelliği gerekse elektrik özelliği içerdiğinden birleşik model olarak tanımlanabilir (Ansys Inc., 1996). Rotorun 5 'er derecelik her konumuna karşılık gelen çözümler, sabit akım uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen statik analiz neticesinde hem magnetik devreye hem de elektriksel devreye ilişkin serbestlik dereceleri hesaplanmıştır.

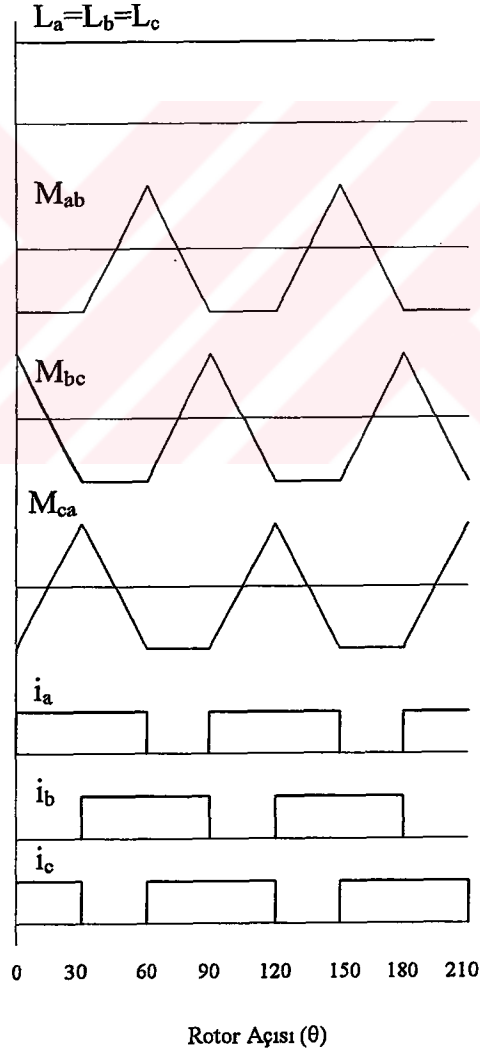
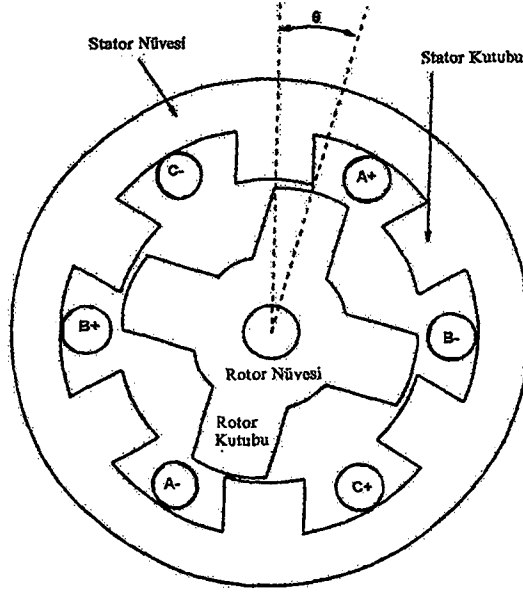
5.3.5 Sonuçların Değerlendirilmesi

Sonlu elemanlar tabanlı magnetik analiz programları, her düğümde magnetik vektör potansiyelini çözümlenmektedir. Elde edilen çözümlerin bir ara birim vasıtası ile değerlendirilmesiyle istenilen sonuçlara ulaşılır. Magnetik alan çözümlerinden genel olarak, kuvvet, moment, kayıplar, endüktans, direnç, akı v.b. büyüklükleri hesaplamak mümkündür. Bunların dışında akı yoğunlukları, akı çizgileri, manyetik alan şiddeti, v.b. gibi dağılımlarda model üzerinde görülebilmektedir (Açıkgöz, 1998).

5.4 TKARM 'un Çalışma Karakteristiklerinin Elde Edilmesi

TKARM 'u ve tek yönlü uyarma yapısını Şekil 5.6 ile tekrar göz önüne alalım. Herhangi bir "t" zamanında iki faz uyarımda bulunmaktadır. Rotorun her 5° 'er derecelik konum değişikliği için stator sargısı sabit akım ile uyarılmıştır. İlk zaman aralığı olan 0-30° arasında a-c fazları iletimdedir. Bu fazların oluşturduğu karşıt kuplaj M_{ac} negatif bir değerden başlayıp tam 30° 'de en yüksek noktaya erişmektedir. Pozitif moment 0-30° aralığında bu oluşan M_{ac} 'nin rotor konumuna göre değişiminden üretilmektedir. Fazlar arasında 30° 'lik bir fark olduğu için fazlar arasındaki karşıt kuplajlarda da aynı faz farkı vardır bu şekilde motorun ürettiği üç fazlı moment eğrisi oluşur. Fazlara ait öz endüktans değeri ise yine Şekil 5.6 'dan görüldüğü gibi ideal olarak sabit kabul edilmektedir. Öz endüktansın rotor konumuna göre değişimi sıfır olacağı için, öz endüktanstan kaynaklanan pozitif moment üretimi de olmamaktadır.

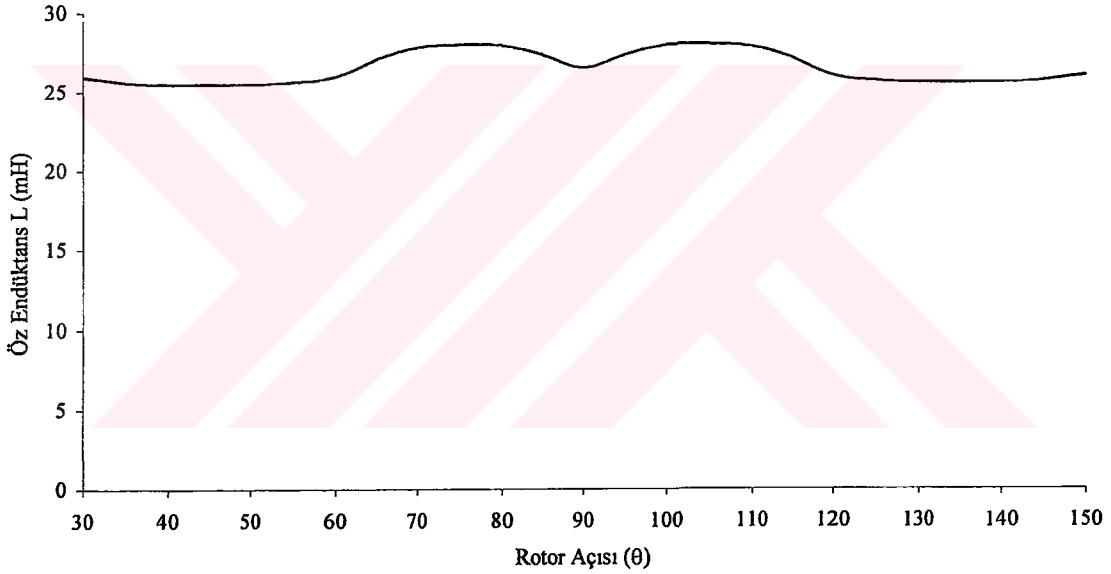
Bu bilgilerin ışığı altında gerçekleştirilen analiz ile yaklaşık anma akım değeri olan 6 A için çalışma karakteristiklerinden endüktans ve moment eğrileri ayrıntılı olarak incelenmiş, diğer akımlara ait sonuçlar ise çizelge halinde verilmiştir. Ayrıca elde edilen moment eğrileri fazlar arasındaki geçişte meydana gelen momentteki dalgalılık açısından da incelenerek sonuçlar ortaya konulmuştur.



Şekil 5.6 TKARM ve tek yönlü uyarma yapısı

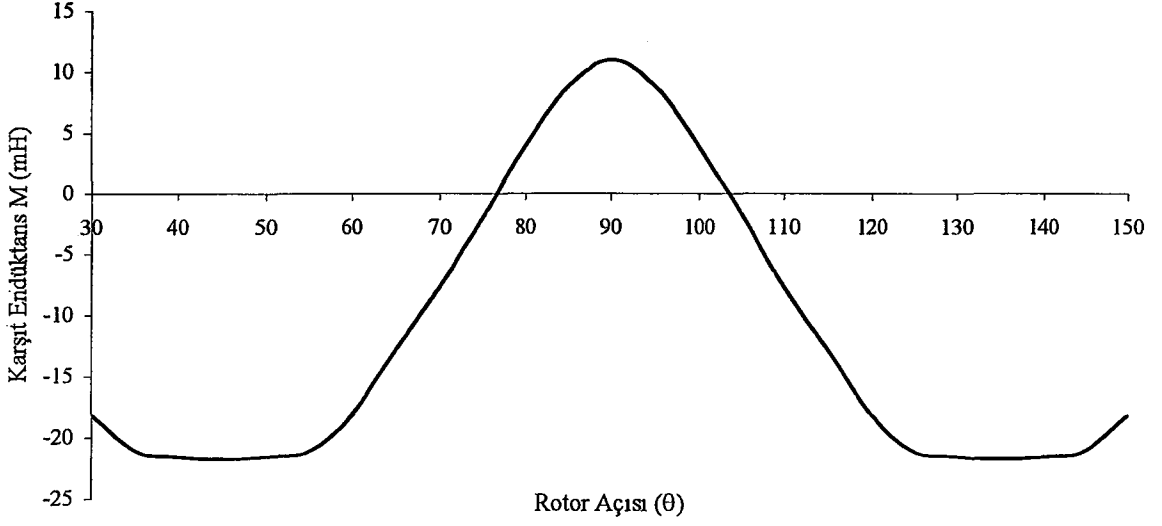
Şekil 5.7 ile gösterilen bir faza ait öz endüktans eğrisi incelendiğinde, rotor kutubu bir stator kutubundan ayrılırken, aynı zamanda diğer stator kutubu ile hizalanmaya girdiğinden dolayı yaklaşık olarak sabittir. Başka bir deyişle rotor konumundan bağımsızdır. Her ne kadar öz endüktans üzerinde küçük dalgalanmalar olsa da ve hatta dalgalanmalardan küçük bir moment değeri elde edilse de bu değerler karşıt endüktans yanında ihmal edilebilecek değerlerdir ve bu güne kadar konu üzerinde yapılan çalışmalarda öz endüktansın ideal olarak yaklaşık sabit kaldığı kabul edilmiştir (Mecrow, 1993), (Mecrow, 1995).

Öz endüktansın rotor konumu ile hiç değişmemesi ve sabit kalması, çalışma ilkesi açısından TKARM ile klasik ARM arasındaki en büyük fark kabul edilebilir. Bir diğer önemli nokta ise fazlar arasındaki kuplajdan kaynaklanan karşıt endüktans değeridir. Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, yeni sargı yapısına sahip motorda moment üretimi, fazlar arasındaki kuplajdan oluşan karşıt endüktanslardan kaynaklanmaktadır.



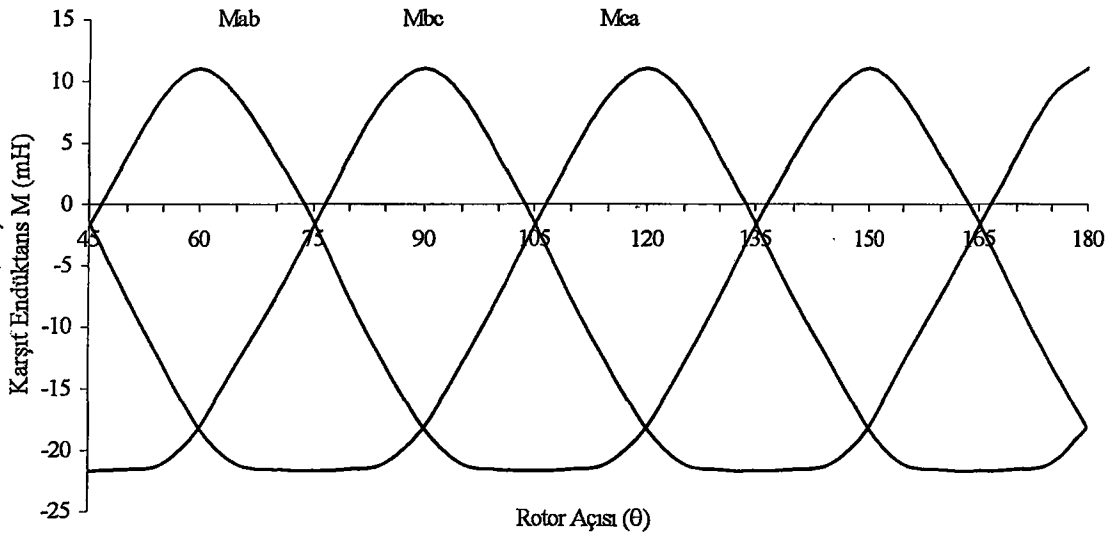
Şekil 5.7 TKARM 'da bir faza ait öz endüktans değişimi

Şekil 5.8 a-c fazlarına ait karşıt endüktansın değişimini göstermektedir. Karşıt endüktans, klasik ARM 'undaki öz endüktansın değişimi gibi rotor konumu ile değişmektedir. Dikkat edilirse 55° 'den başlayan yükselme 90° 'ye kadar sürmekte ve bu derecede en üst seviyeye ulaşmaktadır. Denklem 2.5 'e göre pozitif moment bu aralıkta üretilmekte ve makine motor çalışmada olmaktadır. Aynı fazlar 90° 'den sonra yine iletimde olurlar ise negatif moment üretilmekte ve motor generatör çalışmaya geçmektedir. Karşıt endüktans eğrisinin sabit kaldığı bölgede ise fazlar enerjili olsa da herhangi bir moment üretimi olmayacaktır.



Şekil 5.8 TKARM 'da karşıt endüktans değışimi

Ortalanmış (unaligned) konumda karşıt endüktans değeri en küçük değeri, hizalanma (aligned) konumunda ise en büyük değeri almaktadır. Böylece fazlar arasındaki karşıt endüktans değeri önceki yapılan çalışmalara uygun olarak bulunmuştur. Yani pozitif moment fazlar arasındaki karşıt endüktansların rotor konumuna göre değışiminden üretilmekte, öz endüktansların rotor konumuna göre değışiminden ise ihmal edilebilecek seviyede bir moment üretilmektedir. Şekil 5.9 TKARM 'da tüm fazlara ait karşıt endüktansların değışimini göstermektedir.

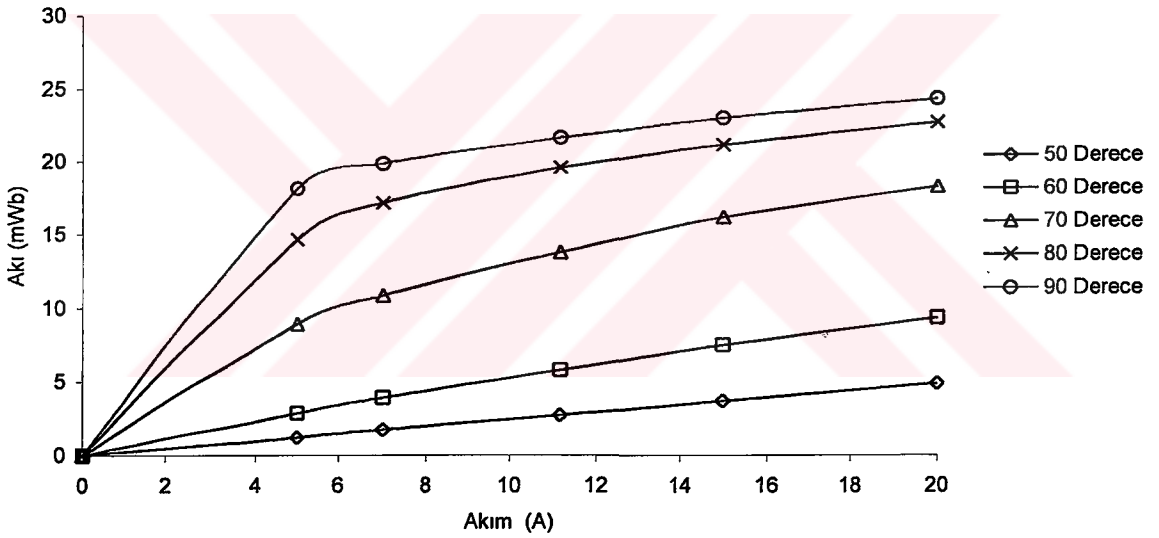


Şekil 5.9 TKARM 'da üç fazlı karşıt endüktans değışimi

TKARM 'un stator ve rotor yapısındaki simetriklik hali, karşıt endüktansların değişimine de yansımaktadır. Başka bir deyişle fazlar arasındaki 30° 'lik faz farkı aynı şekilde fazlar arasında oluşan karşıt endüktanslarda da görülmektedir. Dolayısı ile aynı simetriklik üç faza ait moment eğrilerinde de görülebilmelidir.

Doğrusal bölgede çalışıldığı takdirde karşıt endüktans, sadece rotor konumunun işlevi olmakta, akıma bağlı olmamakta ve $M(\theta)$ şeklinde gösterilebilmektedir. Diğer durumda yani doğrusal olmayan bölgedeki çalışmada karşıt endüktans sadece rotor konumunun işlevi olmamakta, o anda iletimde bulunan her iki fazında işlevi olmakta ve $M(\theta, i_1, i_2)$ şeklinde gösterilebilmektedir.

Çalışma karakteristiklerinden bir diğeri de akının akım ile değişimi eğrisidir. Bu eğri motorun çalışma şartları ile ilgili olarak bize önemli bilgiler vermektedir. Şekil 5.10 'dan görüldüğü gibi anma akımından küçük akım değerlerinde, akı değişimi doğrusal biçimdedir.



Şekil 5.10 TKARM 'da akı akım değişimi

Bu durum bize çalışma bölgesinin doğrusal bölge olduğunu göstermektedir. Bu doğrusal ilişki ortalanmış konumdan hizalanma konumuna kadar devam etmektedir. Anma akımından sonra akı-akım arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığı görülmektedir.

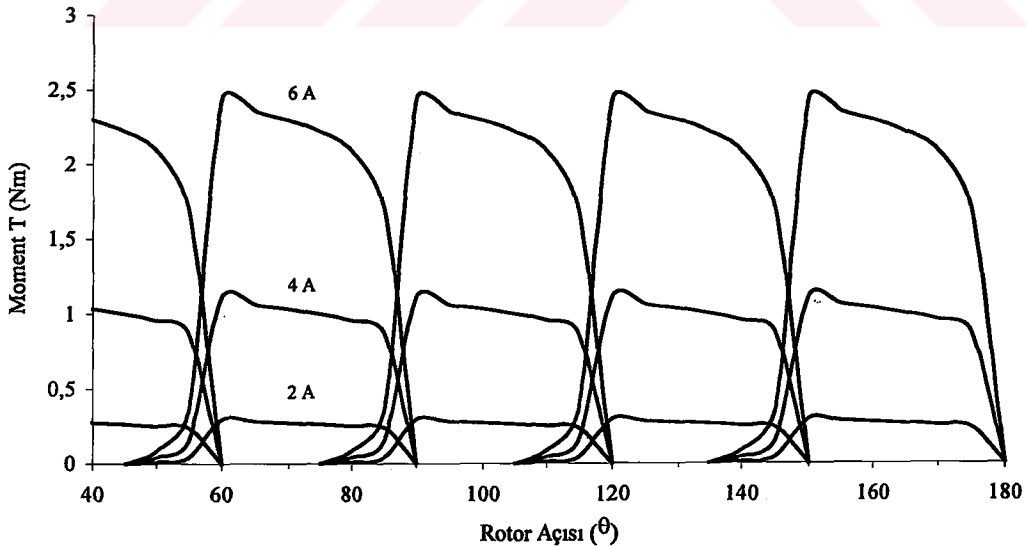
Ortalanmış konumdan hizalanma konumuna doğru yaklaştıkça, bir başka deyişle rotor kutubu stator kutubuna doğru yaklaştıkça akı değeri artmaktadır. Akım belirli bir değerden sonra ne kadar arttırılırsa arttırılsın, akı değeri doymadan dolayı fazla miktarda artmamaktadır.

5.5 TKARM 'un Moment Karakteristikleri

Motorun çalışma karakteristiklerinden en önemlilerinden birisi de moment eğrileridir. TKARM 'un ortalama çıkış momentinde sağlanan üstünlük moment dalgalılığı ve analitik modeldeki zorluk nedeni ile arka planda kalmaktadır. Bu nedenle ilk olarak TKARM 'un dalgalılık sorunu ortaya konulmuştur ve ayrı bir öneme sahip olduğu için diğer karakteristiklerden ayrı olarak ele alınmıştır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen analizlerin statik magnetik çözümler olduğu ve sonuçlarında bu statik çözüm sonucunda elde edildiği daha öncede ifade edilmiştir. Dolayısıyla TKARM 'dan elde edilen momentte buna uygun olarak statik özellik taşımaktadır. Yani motorda dönen rotorun belirli bir konumunda ve sargılardan geçen akımın sabit değeri için elde edilen moment "statik moment" olarak ifade edilir. Bundan sonra moment ifadesi ile anlatılmak istenen hususun statik moment olduğu kabul edilmiştir (Özoğlu,1999).

Doğrusal bölgeye ve doğrusal olmayan bölgeye ait olan moment eğrilerini ayrı ayrı incelemek amacıyla, söz konusu moment eğrileri iki ayrı kısımda değerlendirilmektedir. İlk olarak Şekil 5.11 ile verilen 2, 4, 6 A değerlerine ait moment eğrileri incelenmektedir. Moment dalgalılığının en genel hali ile iki nedeni vardır. Bunlardan ilki doyma ikincisi ise faz komütasyonudur. Eğrilerde fazlar arasındaki geçiş esnasında moment dalgalılığı oldukça yüksektir. Yüksek dalgalılık oranı, motordaki gürültü miktarını arttırmaktadır.



Şekil 5.11 TKARM 'da 3-fazlı doğrusal bölgeye ait moment eğrileri

Tam kutup adımlı sargı yapısına sahip TKARM 'da dalgalılık sorunu uyarma yapısına bağlı olarak daha şiddetli olmaktadır. Bu durum şu ana kadar yapılan bazı çalışmada belirtilse de sorunun giderilmesi üzerine herhangi bir çalışma yapılmamıştır (Mecrow, 1993), (Liang, 1992), (Li, 1995).

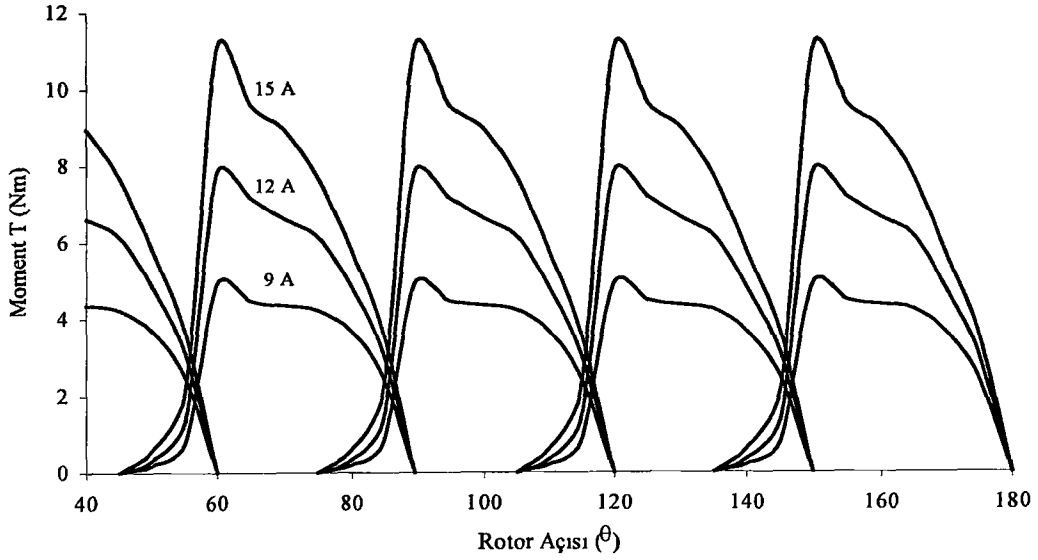
Doğrusal bölgeye ait bu eğrilerin dalgalılığını hesaplamak için, eğrilerin en yüksek değeri (T_{max}) ve en küçük değeri (T_{min}) bulunur. Daha sonra bu değerler Denklem 5.1 'de yerine yazıldığında % olarak dalgalılık tesbit edilmiştir. Yapılan hesap sonucu bu değerler, 2 A için % 32.6, 4 A için %33.9 ve 6 A için ise %37.2 olarak tesbit edilmiştir. Çalışma bölgesi dikkate alındığında elde edilen bu dalgalılık oranlarının ne kadar yüksek olduğu görülmektedir. Düşük akımlarda çalışılmasına rağmen elde edilen değerler sorunun önemini ortaya koymaktadır.

$$\%T_d = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max} + T_{min}} \times 100 \quad 5.1$$

Yeni sargı yapısına sahip makine, ortalama çıkış momenti olarak aynı güçteki kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip klasik ARM 'una göre %20-30 fazla bir değer elde etmesine rağmen, dalgalılık sorunu etkisini arttırarak hala devam etmektedir. Dolayısı ile TKARM 'un sağladığı bu üstünlükten yeterli oranda yararlanılamamaktadır.

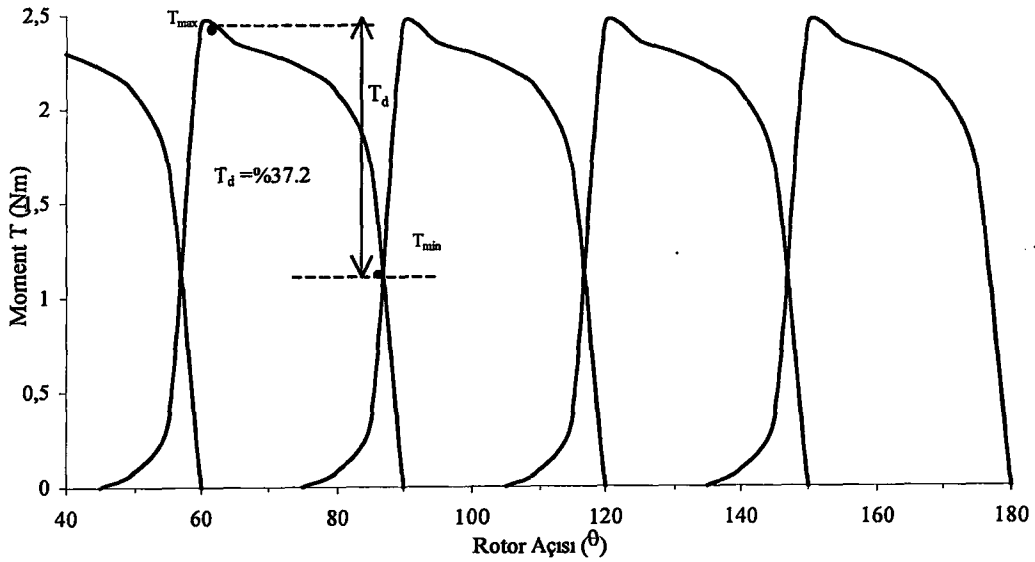
Bundan sonra doğrusal olmayan bölgelere ait değerler alınarak, bu bölgeye ait dalgalılık oranlarıda tesbit edilmektedir. Anma akımından yüksek akımlar bu bölgeye ait değerleri içermektedir. Bu amaçla 9 A, 12 A, 15 A gibi değerler alınmıştır. Yüksek akım değerlerine çıkıldıkça doyma olayı etkisini daha arttıracak için fazlar arası geçişte meydana gelen moment dalgalılığının da artması beklenmektedir. Aynı şartlar Klasik ARM için de geçerlidir.

Şekil 5.12 doğrusal olmayan bölgeye ait moment değerlerini göstermektedir. Bu bölgedeki moment değerleri incelendiğinde ise dalgalılığın beklenildiği gibi oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Yaklaşık 60° 'de ulaşılan tepe değeri ve eğrinin genel yapısı doğrusal bölgede elde edilenler ile karşılaştırıldığı takdirde, eğri şeklinin daha sivri hale geldiği ve çökme noktalarının ise daha düşük değerlerde meydana geldiği izlenmektedir. Akım seviyeleri farklı olmasına rağmen moment eğrileri birbirine benzemektedir. Dalgalılık oranları yine momentin en yüksek değeri (T_{max}) ve en küçük değeri (T_{min}) belirlenerek bulunur.



Şekil 5.12 TKARM 'da 3-fazlı doğrusal olmayan bölgeye ait moment eğrileri

Dalgalılık oranları 9 A için %46, 12 A için %52.2, 15 A için %58.8 olarak tesbit edilmiştir. Bu değerler incelendiğinde TKARM 'un doğrusal olmayan bölgesinde elde edilen moment dalgalılık oranlarının çok yüksek olduğu açıkça ortadadır. Doyma ve faz komütasyonundan kaynaklanan bu yükseklik, yeni sargı yapısına sahip motorda önemli bir sorun olarak durmaktadır. Şekil 5.13 'te anma akımı için moment eğrisi ve dalgalılık oranı gösterilmektedir. Gerçekleştirilen analiz sonucu elde edilen ve yukarıdakilere benzer hesaplama ile belirlenen



Şekil 5.13 TKARM moment eğrisi (6A)

momentteki dalgalılık oranı %37.2 'dir. Şu ana kadar elde edilen değerler Çizelge 5.3 'te en genel hali ile verilmektedir. Moment eğrilerinin ortalama değerleri de hesaplanarak bu eğride verilmiştir. Çizelge 5.3 incelendiğinde TKARM 'un doğrusal ve doğrusal olmayan bölgelerini kapsayan moment dalgalılık oranlarının %32.6-58.8 aralığında olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.3 Momentlerin ortalama değerleri ve dalgalılık oranları

TKARM		
Akım (i)	% T_d	T_a (Nm)
2 A	32.6	0.2225
4 A	33.9	0.8775
6 A	37.2	1.8
9 A	46.0	3.425
12 A	52.2	5.225
15 A	58.8	6.6375

5.6 Sonuçlar

TKARM sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile modellenmiş ve çalışma karakteristikleri literatüre uygun olarak bulunmuştur (Mecrow, 1993), (Mecrow, 1995), (Kokernak, 1997). Klasik ARM 'una göre çalışma ilkelerinde önemli değişiklikler meydana gelmektedir. Şu ana kadar yapılan çalışmalara uygun olarak, öz endüktansın rotor konumuna göre değişiminin yaklaşık sabit kaldığı, buna karşın karşıt kuplaj eğrilerinin pozitif ve negatif değerler arasında değiştiği belirlenmiştir. Makinede üretilen pozitif momentin neredeyse tamamının karşıt kuplajların rotor konumuna göre değişim oranından elde edildiği ortaya konmuştur.

Elde edilen moment eğrilerinden görülmektedir ki; klasik ARM 'larda bulunan dalgalılık sorunu bu sargı yapısına sahip makinede de benzer bir şekilde mevcuttur. Faz komutasyonundaki değişikliklerden ve doymadan dolayı bu dalgalılık oranı etkisini arttırmaktadır. Doğrusal olan ve olmayan bölgelere ait alınan değerlerden dalgalılığın %32.6-58.8 aralığında değiştiği görülmektedir. Bu değerler oldukça yüksektir ve makineye yüksek oranda gürültü olarak yansımaktadır. Dolayısı ile yeni sargı yapısına ait dalgalılık sorunu üzerinde çalışılması gereken önemli bir konu olarak belirlenmiştir.

6. TAM KUTUP ADIMLI VE KLASİK ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARIN EŞİT ŞARTLARDA KARŞILAŞTIRILMASI

6.1 Giriş

Anahtarlamalı Relüktans Motorun sargı yöntemi değiştirilerek nasıl magnetik ve elektrik devresinin daha verimli kullanıldığı önceki bölümdeki analizler sonucu gösterildi. Yeni sargı yapısından dolayı klasik ARM 'un çalışma ilkesindemeydana gelen değişiklikler yine Bölüm 5 'te yapılan analiz sonucu ortaya konulmuştur.

Bu temel değişikliklerden en önemlisi şüphesiz ki momentin sadece fazlar arasındaki karşıt kuplajlardan oluşan karşıt endüktanslar tarafından üretilmesidir. Öz endüktans uygun stator oluk ve rotor kutup genişliğine sahip makine kullanıldığında yaklaşık olarak sabittir. Her faz pozitif moment üretimine klasik ARM 'na göre daha fazla katkıda bulunmaktadır. Böylece ARM 'un ortalama çıkış momenti oldukça artmaktadır. Bununla birlikte TKARM 'un sargı yapısından dolayı momentte doymadan ve faz komütasyonundan kaynaklanan dalgalanmaların yüksek olduğu şu ana kadar yapılan çalışmalarda belirtilmekte idi (Kokernak, 1997), (Mecrow, 1996), (Li, 1995) ve bu durum Bölüm 5 'te yapılan analiz sonucu ortaya konulmuşdu.

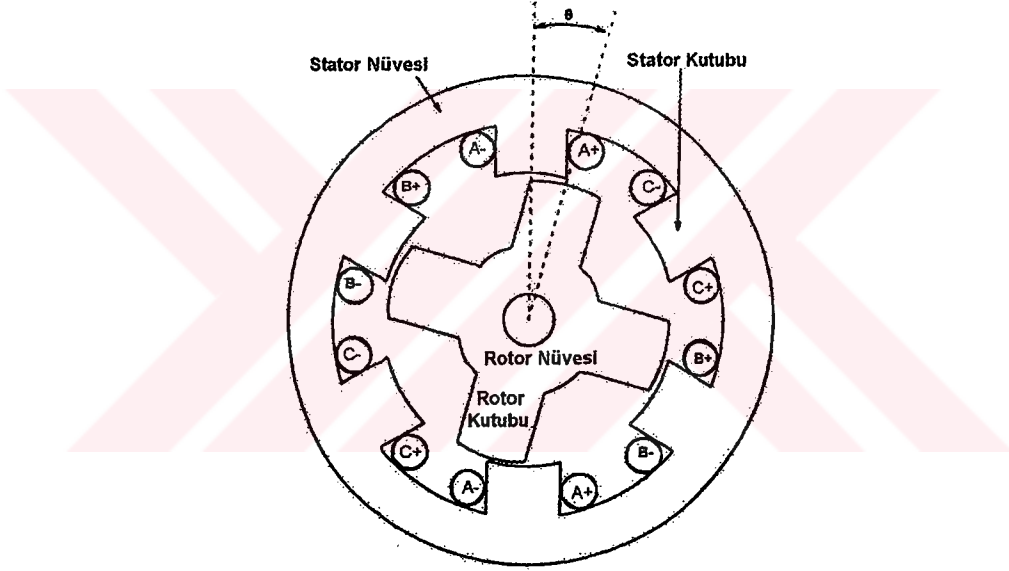
TKARM 'un moment dalgalılığını azaltmak amacıyla magnetik devre temel alınarak gerçekleştirilecek bir çalışma için, rotorun değişik konumlarına ait akı haritası son derece önem arz etmektedir. Klasik ARM üzerine uygulanan yöntemlerin TKARM 'a uygulanabilirliğini araştırmak için bu akı yollarının incelenmenin çok faydalı olacağı düşünülmektedir. Akı yollarının nasıl olduğunu belirlemek, uygulanacak yöntemin tesbiti açısından önemlidir.

Bu nedenle önceki bölümde analiz edilen motor hiç bir parametresi değiştirilmeksizin klasik ARM olarak modellenmiş ve elde edilen tüm analiz sonuçları eşit şartlarda TKARM ile karşılaştırılmıştır. TKARM 'da her zaman anında en az iki faz iletimde olacağı için kayıplar daha fazla olmaktadır. Bu kayıplar hem sargılarda artmakta hemde gerekli önlemler alınmaz ise dönüştürücüde artmaktadır. Dolayısıyla Klasik ARM ile etkili bir karşılaştırma yapabilmek ancak eşit kayıp değerlerinde mümkün olmaktadır. Bu amaçla ilerleyen bölümlerde moment değerleri karşılaştırma yapılırken eşit bakır kayıpları temel alınmış ve akı yolu haritaları da yine aynı şartlarda karşılaştırılmıştır.

6.2 Klasik Anahtarlama Relüktans Motorun SEY ile Analizi

Klasik ARM ve Adım Motorlarının stator sargıları, genel olarak kısa kutup adımlı sargıların tek bir stator dişi etrafına sarılmasından oluşmaktadır. Kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip klasik ARM Şekil 6.1 'de gösterilmektedir. Bu uygulama ile fazlar arasındaki kuplaj etkisi tamamen ortadan kalkmakta ve moment üretimi uyarılan fazın öz endüktansının değişim oranı ile elde edilmektedir. Her stator fazı pozitif moment üretimine elektriksel periyodun $1/3$ 'ü oranında katkıda bulunmaktadır.

Bu bölümde ilk olarak çalışmada ele alınan motor hiç bir parametresi değiştirilmeksizin klasik ARM olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi ile analiz edilmiş ve çalışma karakteristikleri çıkartılmıştır.



Şekil 6.1 Klasik ARM 'na ait kısa kutup adımlı sargı yapısı

6.2.1 Klasik ARM Modelinin Oluşturulması

Kullanılan ARM 'una ait değerler Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2 ile verilmiş idi. Bu parametreler değiştirilmeksizin SEY ile model oluşturulmuştur. Modelin elde edilmesinden sonra, önceki bölümde TKARM için yapılan statik analize benzer olarak, analiz gerçekleştirilmiş ve çalışma karakteristikleri elde edilmiştir. ARM 'un malzeme özelliğine uygun olarak $B=f(H)$ eğrisi tanımlanmış ve tüm bölgelerdeki çalışma karakteristiklerinin elde edilebilmesi anma akım altı ve üstü değerler ile mümkün olmuştur.

Yine model oluşturulur iken çeşitli elemanlar kullanılmıştır. Bu elemanların kendilerine özgü özellikleri olup her birinin verimli kullanım alanları farklıdır. Analizde kullanılan iki eleman türü PLANE53 ve CIRCU124 elemanıdır. Kullanılan bu elemanların özellikleri Bölüm 5 'te anlatılmış idi.

Stator ve rotor kutuplarının uç noktalarına daha doğrusu hava aralığına yakın olan kısımlarına yerleştirilen elemanların küçük olması ve sık bir şekilde yerleştirilmiş olmaları gerekmektedir. Çünkü modelin hassasiyetinin yüksek olması için bu zorunlu bir işlemdir. Oluşturulan modele elektrik devresinin de eklenmesi ile klasik ARM modeli tamamlanmıştır. Elde edilen model birleşik magnetik-elektrik model olarak ta isimlendirilebilir.

Klasik ARM modeli oluşturulduğunda yaklaşık olarak 6000 devre elemanı ve 16000 adet düğüm kullanılmıştır. Elde edilen çözüm rotorun 5 'er derecelik konum değişikliğine karşılık gelen çözümlerin toplamı olup, model bir bütün olarak ele alınmış simetri özelliğinden yararlanılmamıştır.

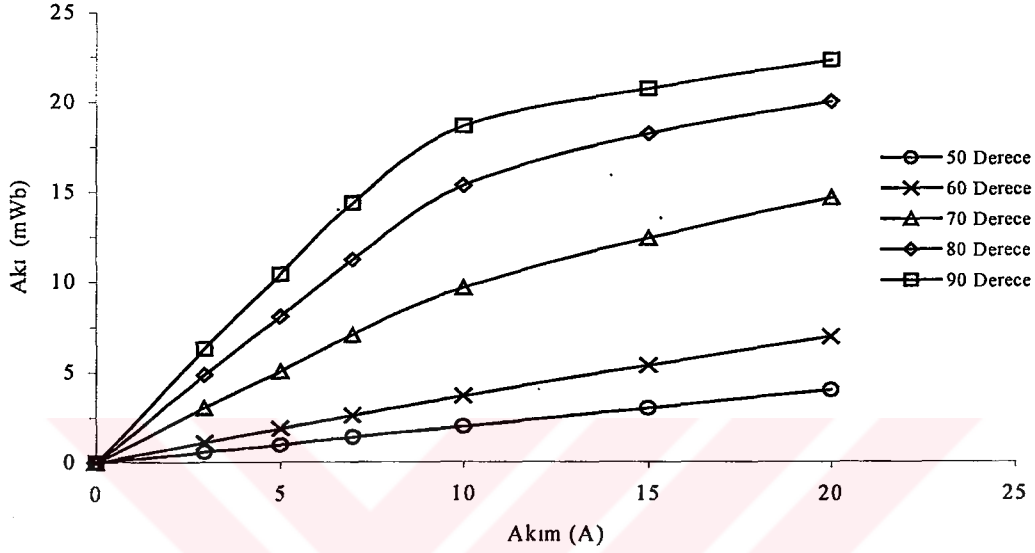
Uygulanan sabit bir akım ile rotor ortalananmış konumdan hizalanma konumuna kadar döndürülerek, magnetik-elektrik devreye ait tüm serbestlik dereceleri hesaplanmıştır. Daha sonra aynı işlemler farklı akım değerleri için de tekrarlanmıştır. Akım seviyeleri seçilirken hem doğrusal olan hem de doğrusal olmayan bölgelere ait değerler seçilmiştir. Uygulanan 5, 7, 10, 15, ve 20 A akım değerleri için çözümler elde edilmiştir.

6.2.2 Çalışma Karakteristiklerinin Elde Edilişi

Klasik ARM 'un çalışma eğrilerini çıkartmak amacı ile anma akım değeri olan 10 A 'in altında ve üstünde değerlerin alınması ile, doğrusal olan ve olmayan bölgelerin özelliklerini belirlemek mümkün olmaktadır. Çalışma karakteristiklerinden ilk olarak akı eğrisi incelenmiştir. Daha sonra klasik ARM 'un öz endüktans eğrisi incelenmekte ve TKARM 'dan farklılığı ortaya konmaktadır. Çünkü klasik ARM 'unda karşıt endüktanslar ihmal edilebilecek seviyededir ve moment öz endüktansın rotor konumuna göre değişim oranından elde edilmektedir.

Moment dalgalılığını azaltmak amacı ile uygulanacak yöntemin belirlenmesinde akı haritaları bize yol göstermektedir. Bu amaçla değişik rotor konumlarına ait akı yolu haritaları çıkartılmış ve TKARM 'da elde edilenler ile karşılaştırılması yapılmıştır.

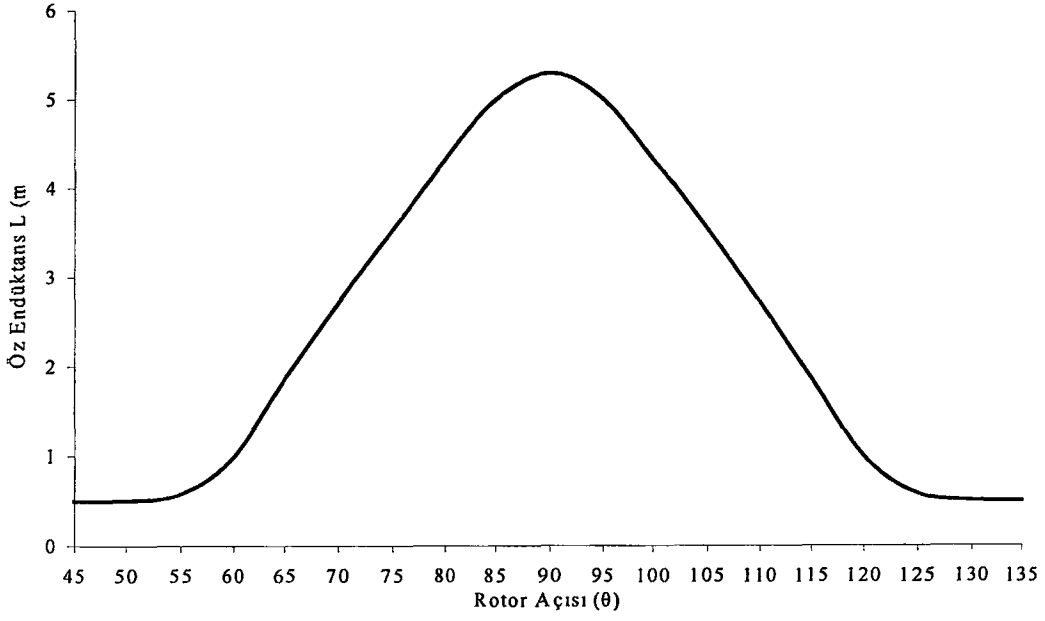
Şekil 6.2 'de gösterilen akı eğrileri dikkatle incelendiğinde 10.A civarında doymanın başladığı görülmektedir. Bu değerin altındaki değerler doğrusal bölgeye üstündeki değerler ise doğrusal olmayan bölgeye aittir. Akı hizalanma (aligned) konumunda en büyük değerine ulaşmaktadır. Şekil 6.3 ile verilen 10 A için öz endüktans eğrisi TKARM 'un öz endüktans eğrisi ile oldukça



Şekil 6.2 Klasik ARM akı akım eğrisi

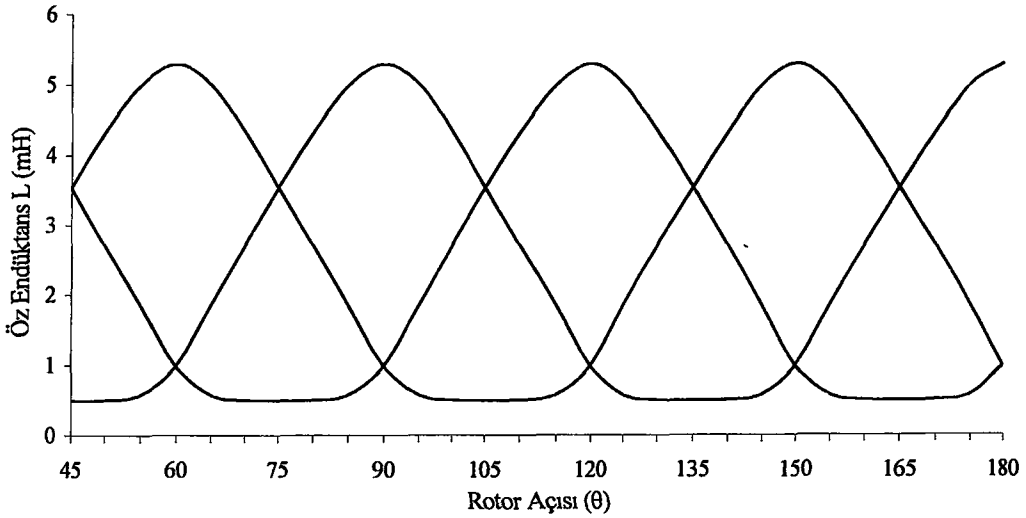
farklıdır. Hatırlanacağı gibi yeni sargı yöntemine sahip motorda öz endüktans eğrisi rotor konumundan bağımsız olup yaklaşık olarak sabit bir değere sahip idi. Klasik sargı yöntemine sahip endüktans eğrisi ise ortalananmış (unaligned) konumda en küçük değerinde, hizalanma (aligned) konumunda ise en büyük değerine ulaşmaktadır.

Öz endüktans eğrisi dikkatli incelendiğinde yaklaşık 55° 'den başlayan ve 90° 'ye kadar süren bir artış görülmektedir. Pozitif moment üretimi işte bu bölgede gerçekleştirilmektedir. Eğer bu bölgenin sonunda, uyarılan fazın enerjisi kesilmez ise motor negatif moment üretmektedir. Uyarılan fazlar arasında 30° olduğu için üç fazlı öz endüktans eğrilerinin tepe noktaları arasında aynı derecede mesafe bulunmalıdır. Şekil 6.4 'te bu durum gösterilmektedir. Dikkat edilirse bir fazın endüktans eğrisi en yüksek seviyede iken diğer ikisi en düşük seviyededir. Öz endüktans eğrileri hakkında genel bir değerlendirme yapacak olursak; doğrusal bölgede endüktans eğrisi akımdan bağımsız olup sadece $L(\theta)$ şeklinde sadece rotor konumunun

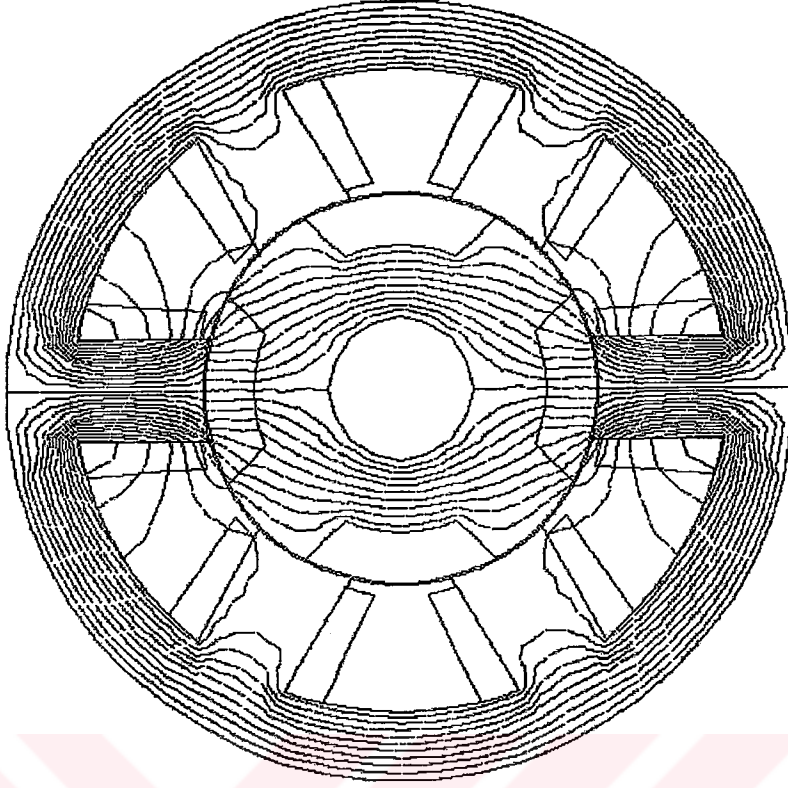


Şekil 6.3 Klasik ARM öz endüktans eğrisi (10A)

işlevidir. Diğer yandan doğrusal olmayan bölgede ise öz endüktans $L = f(i, \theta)$ şeklinde hem akımın hemde rotor konumunun işlevidir (Özoğlu, 1999). Karşıt kuplaj ise klasik ARM 'da fazlar arasındaki dekuplajdan dolayı ihmal edilecek seviyedir (Mecrow, 1993), (Wale, 1996), (Mecrow, 1996). Bunun yanı sıra karşıt kuplajı ARM modeline dahil eden ve motor performansı üzerine etkinliğini araştıran bir çok yayın yapılmıştır (Derdiyok, 1996).



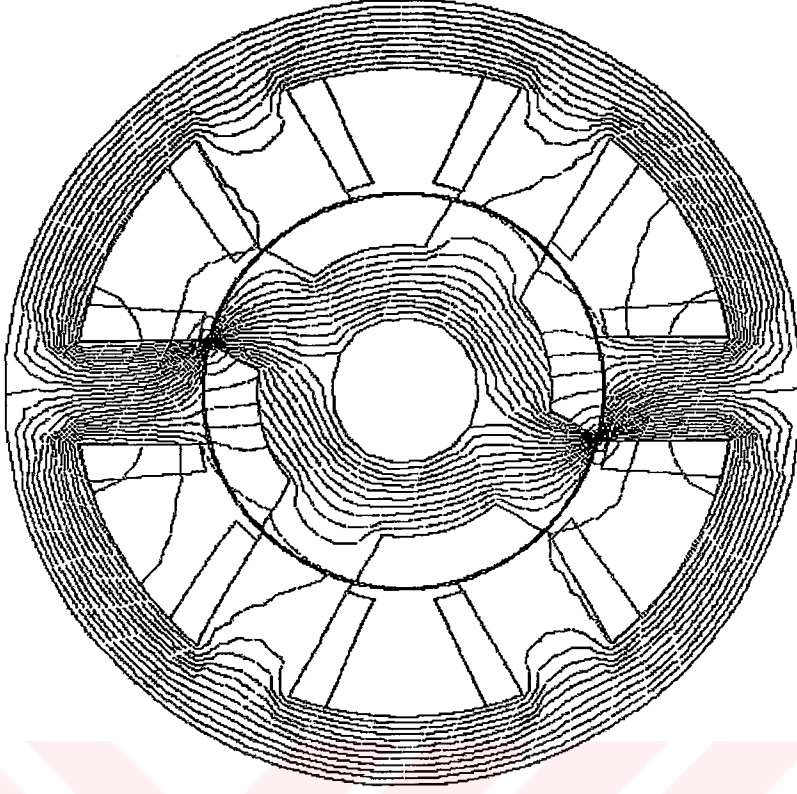
Şekil 6.4 Klasik ARM üç fazlı öz endüktans değişimi (10 A)



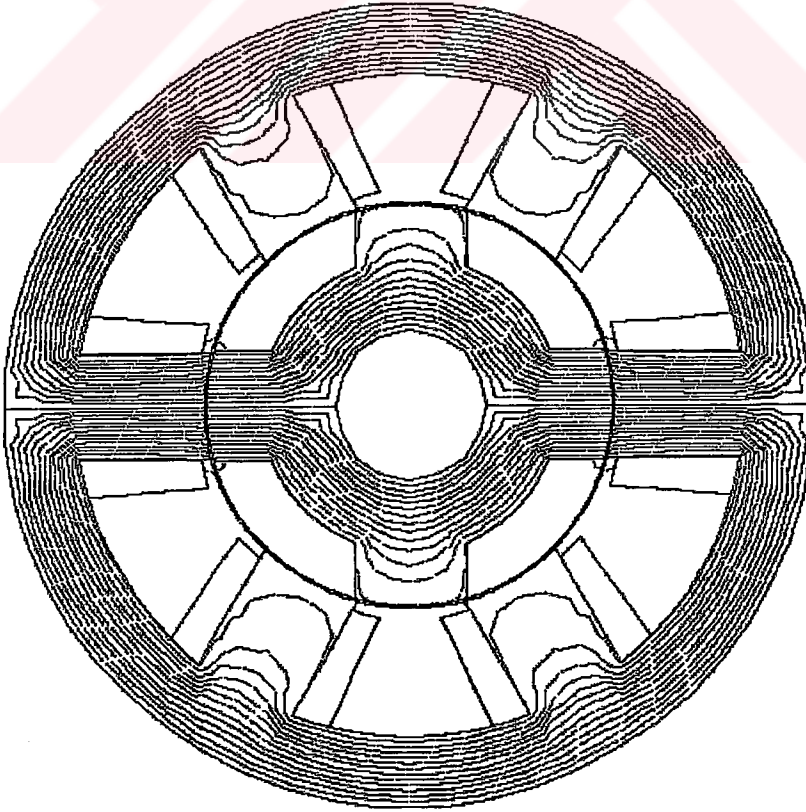
Şekil 6.5 Klasik ARM akı haritası (45°)

Stator ve rotor kutuplarının konumu değişirken buna bağlı olarak akı yolunun değişimi, tasarım esnasında yapılabilecek değişiklikleri belirlemektedir. Şekil 6.5 ortalanmış konuma yani endüktansın en küçük olduğu bölgeye ait akı çizgilerini vermektedir. Dikkat edilirse akı çizgileri son derece dağınık durumdadır ve bu dağınıklık öz endüktans değerinin, en küçük değerinde olduğunu göstermektedir. Bu durum aynı zamanda akı yolunun en düzensiz olduğu durumdur.

Şekil 6.6 rotor kutubunun hizalanmaya gelirken ara konumuna ait 60° için akı haritasını göstermektedir. Bu akı haritasında, artık akı yolunun kutup köşelerinden başlayarak oluşmakta olduğu ve dağınıklığın kısmen ortadan kalktığı izlenmektedir. Öz endüktans değeri yükselmeye başlamıştır ve rotor konumuna göre değişimi yanında uygun fazın iletimde olması ile pozitif moment üretilmeye başlanmıştır. Akı yolu tam hizalanma konumuna kadar daha da belirginleşerek devam etmektedir. Tam hizalanma konumunda ise öz endüktans değeri en büyük değerine ulaşmaktadır. Hizalanma konumuna ait akı haritası Şekil 6.7 'de verilmiştir. Akının tamamının rotor ve stator kutup uçlarından, rotor ve stator boyunduruklarından geçerek düzgün bir şekilde devresini tamamladığı görülmektedir. Endüktans bu durumda en büyük değerindedir ve rotor konumuna göre değişmemektedir.



Şekil 6.6 Klasik ARM akı haritası (60°)



Şekil 6.7 Klasik ARM akı haritası (90°)

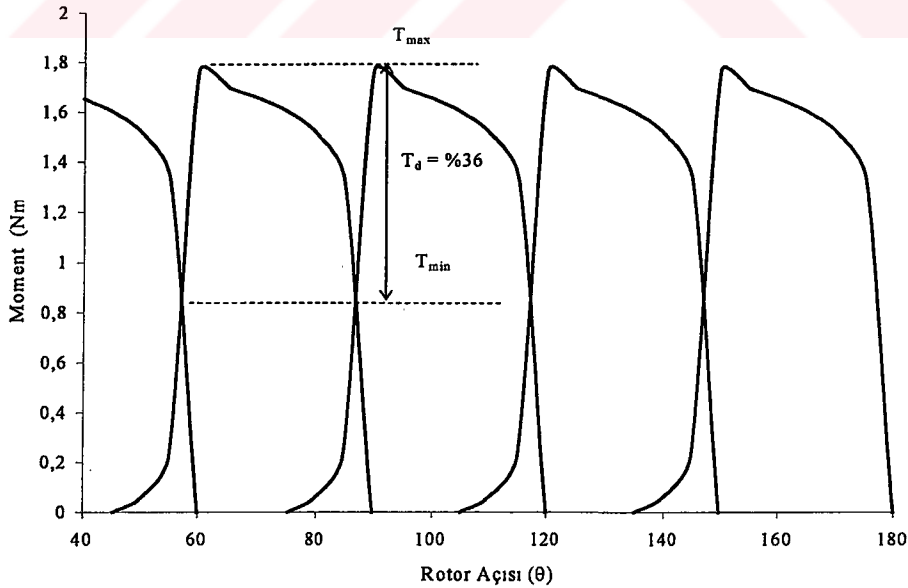
Klasik ARM için elde edilen değişik konumlara ait akı haritaları Ek-1 'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu akı haritalarının aynı uyarma akım seviyesi ve yine “tek yönlü” akım için TKARM 'da elde edilen akı haritaları ile karşılaştırması yine Ek-1 'de gösterilmiştir. Böylece tam kutup adımlı sargı yapısının, “tek yönlü” uyarma durumunda, motorun akı yoluna etkisi araştırılmıştır.

6.2.3 Momet Eğrilerinin Elde Edilişi

Çalışma karakteristiklerinin en önemlilerinden birisi şüphesiz ki moment eğrisidir. Daha önce belirtildiği üzere öz endüktansın rotor konumuna göre değişim oranı ve akımın karesi moment ifadesini oluşturan bileşenlerdir. Moment sadece öz endüktansın rotor konumuna göre değişim oranından elde edilmekte ve karşıt endüktanslar ihmal edilebilecek bir seviyededir.

Motorun anma akım değeri olan 10 A 'e ait moment eğrisi Şekil 6.8 'de gösterilmiştir. Tepe değeri 1.8 Nm olan moment eğrisinde faz geçişleri esnasında momentte meydana gelen çökmeler oldukça büyük değerdedir. Doyma ve faz komütasyonundan dolayı meydana gelen bu çökmeler, klasik ARM 'un en olumsuz yanlarından biridir. Bu nedenle araştırmacıların yoğun bir şekilde üzerinde çalıştığı bir konu olmuştur.

Yukarıdaki eğrinin dalgalılık oranı Denklem 5.1 'e göre tesbit edilmiştir. Anma akımı dışında, hem doğrusal hemde doğrusal olmayan bölgelere ait moment eğrileri elde edilmiş ve yine



Şekil 6.8 Klasik ARM moment eğrisi (10 A)

aynı dalgalılık hesabında kullanılan denkleme göre değerleri belirlenmiştir. Ortalama moment değerleri ile birlikte bu elde edilen sonuçlar Çizelge 6.1 'de verilmektedir. Elde edilen değerler incelendiğinde momentlerdeki dalgalılığın yüksek olduğu özellikle de doymalı çalışma bölgelerinde bu dalgalılığın daha fazla olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.1 Klasik ARM ortalama moment değerleri ve dalgalılık oranları

Klasik ARM		
Akım (i)	% T_r	T_a (Nm)
5 A	38.0	0.35
7 A	33.6	0.69
10 A	36.0	1.31
15 A	41.0	2.62
20 A	44.2	4.12

6.3 Eşit Kayıplara Dayalı Analiz

Klasik ARM 'un temel alınmasıyla eşit kayıplara dayalı karşılaştırma yapılarak, her iki sargı yöntemi arasındaki temel farklar değerler ile ortaya konmuştur. Bu karşılaştırma yapılırken, akımın iletim periyodu boyunca sabit bir değerde olduğu, klasik ARM 'da her fazın elektriksel periyodun 1/3 'ü kadar iletimde olduğu ve eşit bakır kayıplarındaki karşılaştırmanın yeterli olacağı kabul edilmektedir. Her ne kadar dönen elektrik makineleri için demir kayıpları önemli olsa da, düşük hızlarda dönen makineler için eşit bakır kayıplarında karşılaştırma yapmak yeterlidir (Mecrow, 1996). Klasik ARM 'unda faz başına kayıp güç ifadesi, Denklem 6.1 ile verilmektedir. Bu ifade de I_k klasik ARM 'unda faz akımı, R_k yine aynı motorda faz direnci, P_k ise bakır kayıplarını göstermektedir.

$$P_k = \frac{1}{3} \cdot I_k^2 \cdot R_k \quad 6.1$$

Diğer yandan karşıt kuplajlı ARM 'unda ise bakır kayıplarını veren ifade denklem 6.2 'de gösterilmiştir. Bu denklemde ise, P_{tk} TKARM 'undaki bakır kayıplarını, I_{tk} faz akımını, R_{tk} faz direncini temsil etmektedir. Sargı direncinin %60 arttığı kabul edilmiştir (Clothier, 1998).

$$P_{tk} = \frac{2}{3} \cdot I_{tk}^2 \cdot R_{tk} \quad 6.2$$

Faz dirençlerinde sargı sonu etkisinden dolayı artış da dikkate alınarak, ilgili yerlerde yerine yazılıp, Denklem 6.1 ve 6.2 'nin birbirine eşitlenmesi ile Denklem 6.3 ile verilen ifade elde

edilir. Böylece eşit kayıplarda karşılaştırma için gerekli şart elde edilmiştir. Bu ifade, klasik ARM 'daki faz akımının 0.559 katı bir akımla, tam kutup adımlı ARM 'un uyarılması halinde, iki sargı türü arasında eşit şartlarda karşılaştırma yapabileceğimizi göstermektedir.

$$I_{tk} = 0.559 \cdot I_k$$

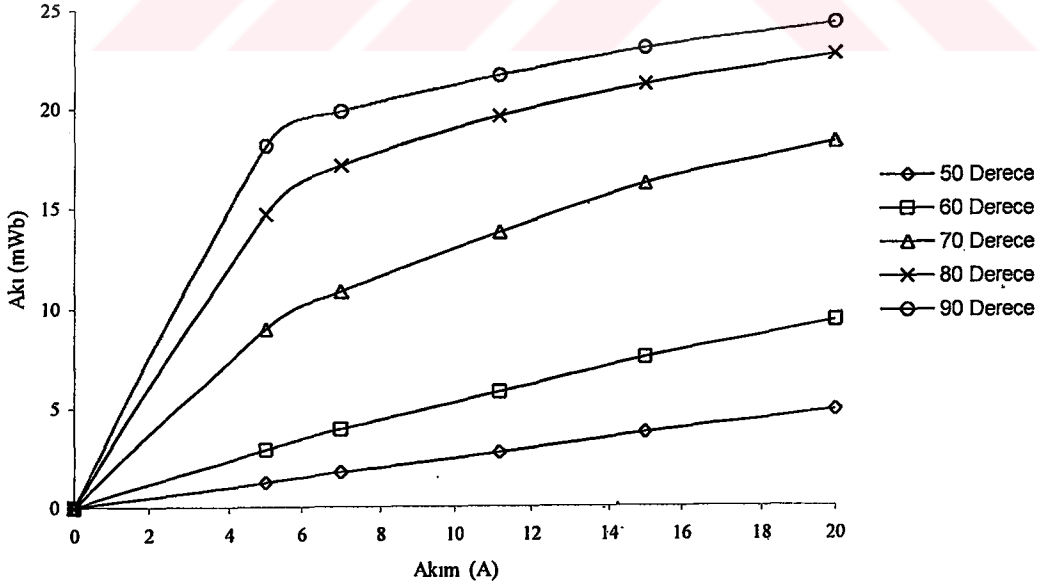
6.3

6.4 SEY İle Eşit Bakır Kayıplarında TKARM Analizi

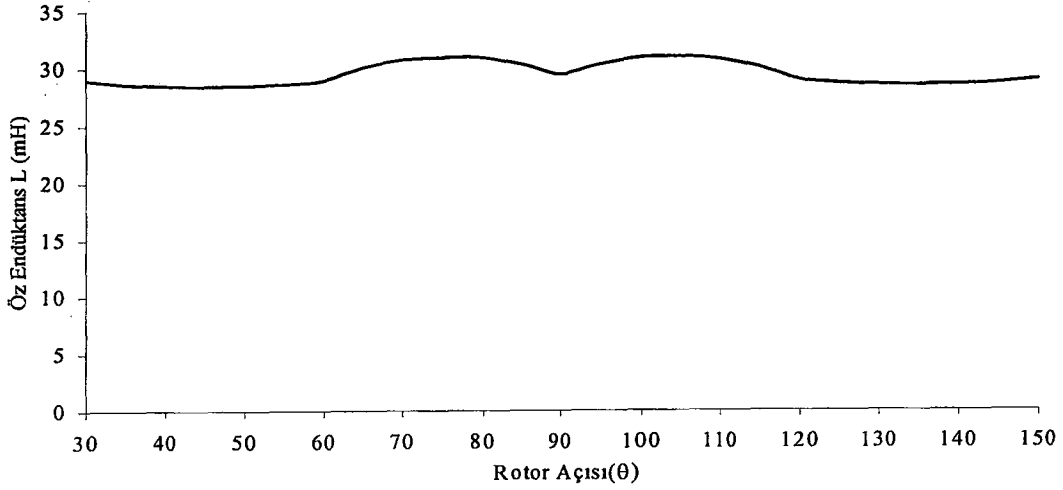
Yeni sargı yöntemine sahip ARM 'un eşit kayıplara dayalı analizi SEY ile gerçekleştirilerek akı haritası ve çalışma karakteristikleri elde edilmiştir. Elde edilen değerler klasik ARM 'da elde edilen değerler ile karşılaştırılmış ve sonuçlar çizelge halinde verilmiştir.

6.4.1 Çalışma Karakteristiklerinin Elde edilişi

Motorun yeni sargı yöntemi ile analizi, uyarma yapısı ve SEY ile yapılan analiz aşamaları önceki bölümde gerçekleştirildiği gibidir. Çalışma karakteristiklerinden ilk olarak Şekil 6.9 ile verilen akı-akım eğrisi göz önüne alındığında doymanın, klasik ARM 'un anma akımına karşılık gelen 5.59 A civarında olduğu görülmektedir. Ayrıca akı miktarları karşılaştırıldığında yeni sargı yöntemine sahip motorun akı değerlerinde bir artış olduğu izlenmektedir.



Şekil 6.9 TKARM 'da akı akım eğrisi

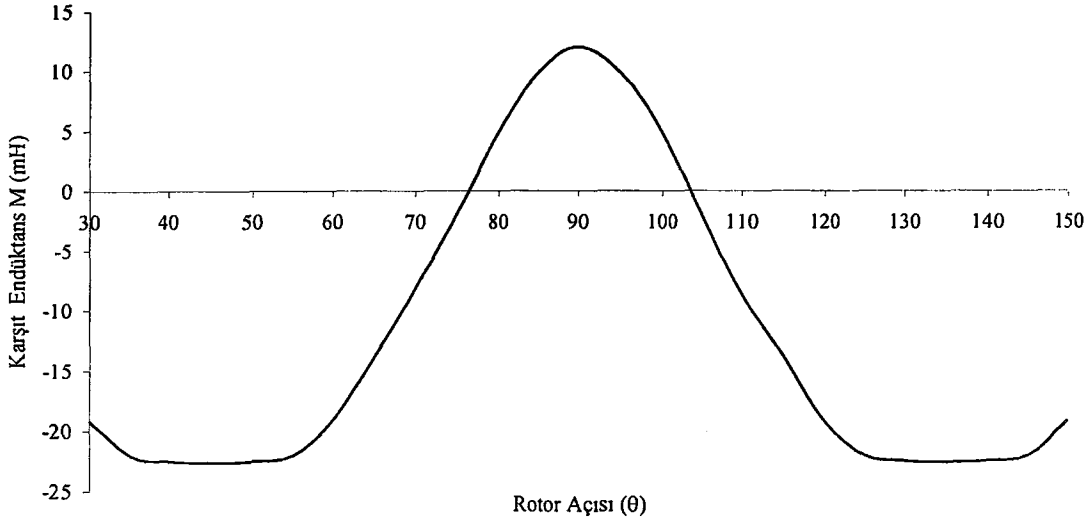


Şekil 6.10 TKARM 'da öz endüktans değişimi (5.59 A)

Şekil 6.10 ile gösterilen anma akımındaki öz endüktans eğrisinin rotor konumuna göre değişimi yaklaşık olarak sabittir. Dolayısı ile momentin yaklaşık tümünün, sadece fazlar arasındaki karşıt kuplaj değişim oranından elde edileceği kabul edilmektedir. Bu yaklaşım klasik ARM 'daki gibi öz endüktansların rotor konumuna göre değişimlerinden dolayı hiç moment üretilmeyeceği anlamına gelmemektedir.

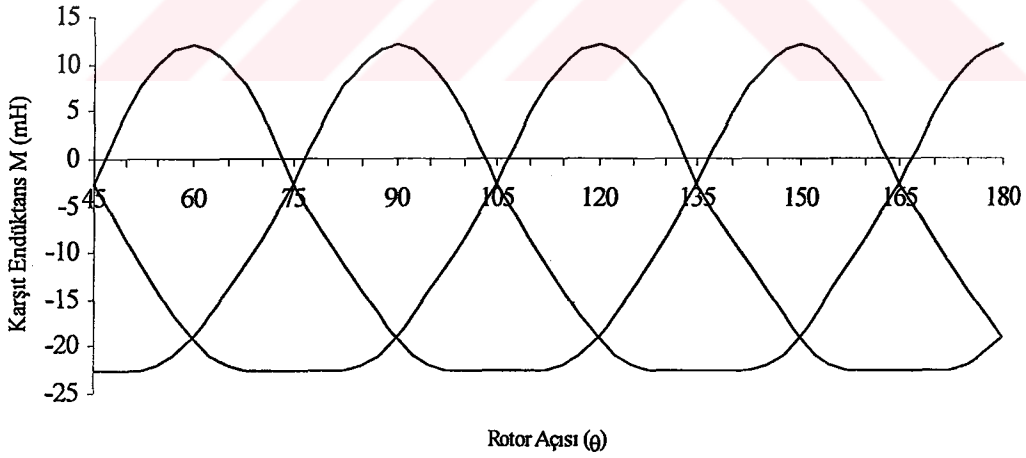
Öz endüktans eğrilerindeki dalgalanmalardan dolayı küçükte olsa belirli bir moment elde edilmektedir. Fakat bu değer karşıt endüktanstan elde edilen moment değeri yanında ihmal edilebilecek seviyedir. Şekil 6.11 ile verilen a-c fazlarına ait karşıt endüktans eğrisi, klasik ARM 'daki öz endüktans eğrisi ile büyük farklılık göstermektedir.

Daha önceki bölümlerde karşıt endüktansın pozitif ve negatif değerler arasında değiştiği gösterilmişti. Elde edilen eğri incelendiğinde, eğrinin 50° 'den itibaren yükselmeye başladığı, 90° 'de en yüksek değerine ulaştığı ve daha sonrada düşüş sürecine girdiği görülmektedir. İşte bu aralıkta uygun fazların uyarılması ile motor pozitif moment üretmektedir. Pozitif moment üretilme işlemi, eğrinin yükselme bölgesinin bitimine kadar bu şekilde devam etmektedir. Eğer 90° 'den sonra aynı uyarma devam ettirilir ise motor negatif moment üretmekte ve dolayısı ile generatör çalışma özelliğini göstermektedir. Dolayısı ile TKARM için de generatör çalışma hali mümkün olmaktadır.



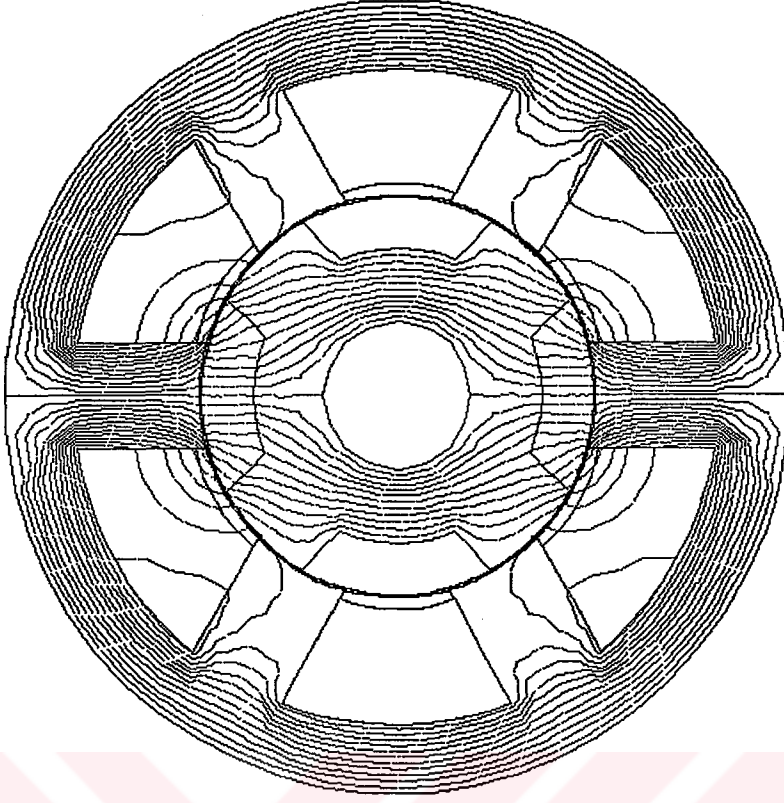
Şekil 6.11 TKARM 'da karşıt endüktans değişimi (5.59 A)

Yine fazlar arasında 30° faz farkı olduğu için, diğer fazların karşıt endüktansları üzerinde de bu fark görülmelidir. Şekil 6.12 anma akımı 5.59 A için üç fazlı karşıt endüktansların rotor konumuna göre değişimini göstermektedir. Beklenildiği üzere karşıt endüktanslar arasındaki faz farkı görülmektedir.



Şekil 6.12 TKARM 'da üç fazlı karşıt endüktans değişimi (5.59 A)

Çalışmanın çıkış noktasını teşkil eden yeni sargı yönteminin akı haritası, eşit bakır kayıplarına dayalı olarak çıkartılmaktadır ve elde edilen eğriler makinedeki magnetik olaylar hakkında bilgi vermektedir. Bu akı yolunun incelenmesi ve klasik ARM ile karşılaştırılması, moment dalgalılığını azaltmak amacı ile izlenecek yöntem konusunda yardımcı olmaktadır. Bunun için



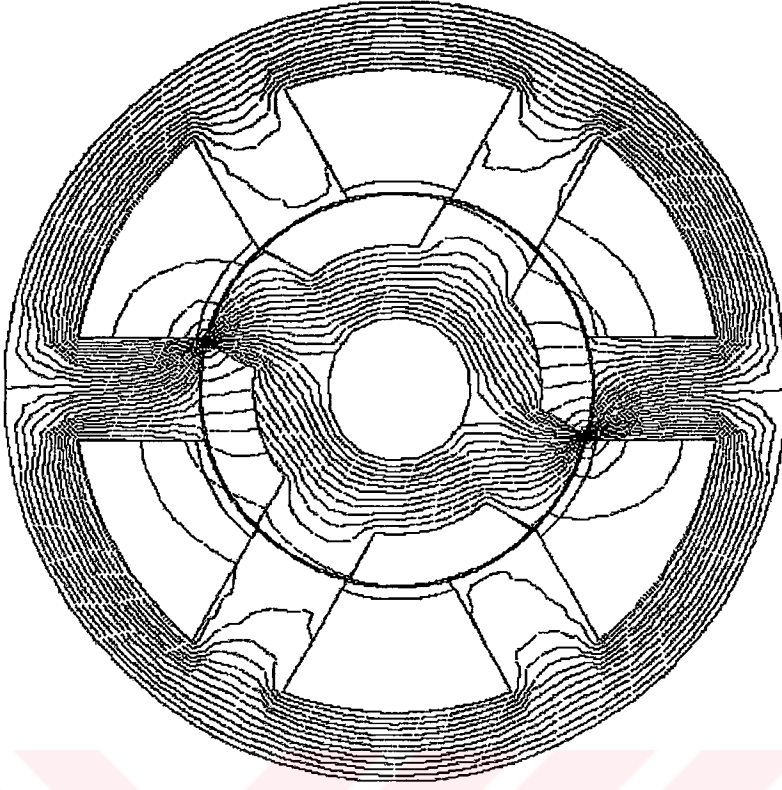
Şekil 6.13 TKARM ‘da anma akımı için akı haritası (45°)

rotorun ortanmış, ortalanmadan hizalanmaya gelirken ki ve hizalanma konumundaki akı eğrileri sırası ile Şekiller 6.13-15 ile verilmektedir.

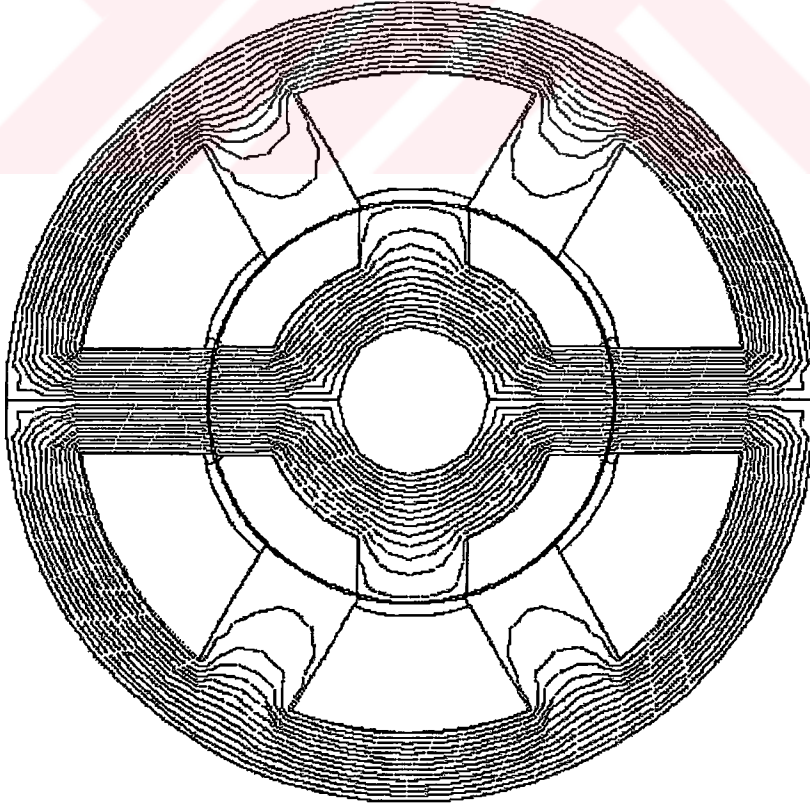
Şekil 6.13 dikkatli incelendiğinde, klasik ARM ‘dakine benzeyen fakat biraz daha düzenli bir akı dağılımının olduğu görülmektedir. Henüz akı yolu oluşmamıştır. Karşıt endüktans değeri en düşük seviyededir.

Şekil 6.14 ise rotor ve stator kutuplarının hizalanmaya gelirken 60° ‘deki akı yolu haritasını göstermektedir. Akı yolu oluşmaya başlamış ve karşıt endüktans değeri yükselmeye başlamıştır. Uygun fazların uyarılması bu bölgeden itibaren pozitif moment üretilmeye başlanmaktadır. Klasik ARM ile karşılaştırıldığında genel akı haritasının benzediği fakat kaçak akı dağılımının TKARM ‘da biraz daha düzenli olduğu görülmektedir.

Şekil 6.15 ‘te verilen hizalanma konumuna ait akı yolu ile klasik ARM için elde edilen hizalanma konumuna ait akı haritaları karşılaştırıldığında her iki motor türü için benzer bir akı dağılımının olduğu izlenmektedir. Bu durum, klasik ARM üzerine uygulanan magnetik devre temelli değişikliklerin, TKARM için de uygulanabileceği anlamına gelmektedir. Ayrıntılı akı yolu karşılaştırmaları Ek-1 ‘de verilmiştir.



Şekil 6.14 TKARM 'da anma akımı için akı haritası (60°)



Şekil 6.15 TKARM 'da anma akımı için akı haritası (90°)

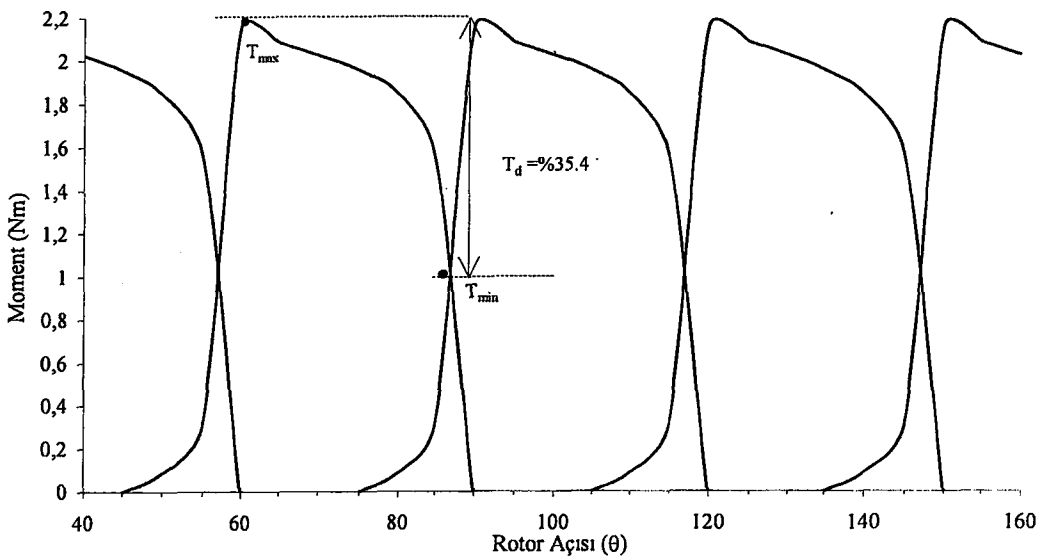
6.4.2 Moment Eğrileri

Eşit bakır kayıplarına dayalı karşılaştırma yapmak için önceki bölümlerde elde edilen katsayı kullanılarak anma akımının altı ve üstü bölgeler olmak üzere moment eğrileri elde edilmiş ve dalgalılıkları tesbit edilmiştir.

Gerçekleştirilen analiz sonucu elde edilen anma akım değeri için moment eğrisi Şekil 6.16 'da gösterilmektedir. Önceki bölümlerdekine uygun olarak mometteki dalgalılık oranı %35.4 olarak görülmektedir. Yine klasik ARM 'unda olduğu gibi fazlar arasındaki geçişte momentte çökmeler olmaktadır.

Elde edilen bu eğri sonucu görülmektedir ki yeni sargı yönteminde de dalgalılık olayı ciddi bir sorun olarak karşımızda durmaktadır. TKARM 'un sağladığı ortalama moment değerindeki artış momentteki dalgalılık yüzünden gölgede kalmaktadır. Klasik ARM analizi sonucu elde edilen değerler ile karşılaştırma yapmak açısından, TKARM 'da elde edilen değerler Çizelge 6.2 ile gösterilmektedir.

Verilen değerler incelendiğinde anma akım değeri ve altındaki dalgalılık oranlarında pek fazla bir değişiklik olmasa da, TKARM 'un doymalı bölgelerindeki moment dalgalılık oranı değerlerinde bir artış izlenmektedir. Klasik ARM ile karşılaştırıldığında moment genliklerinde de bir artış görülmektedir. Ortalama moment değeri 1.62 Nm değerine yükselerek %23.66 'lık bir artış sağlanmıştır. Eşdeğer klasik ARM ile karşılatırıldığında elde edilen bu artış son derece önemli bir değerdir.



Şekil 6.16 TKARM moment eğrisi (5.59 A)

Çizelge 6.2 TKARM moment değerleri ve dalgalılık oranları

TKARM		
Akım (i) A	% T_d	T_a (Nm)
5 A	33.7	0.44
7 A	34.9	0.84
10 A	35.4	1.62
15 A	44.4	3.15
20 A	49.5	4.75

6.5 Sonuçlar

Bu bölüm de aynı parametrelere sahip ARM hem kısa kutup adımlı, hemde tam kutup adımlı sargı yapısı ile modellenmiş ve statik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda eşit kayıplara dayalı olarak motorun tüm çalışma karakteristikleri çıkartılmış, momentlerdeki dalgalılık oranları tesbit edilmiştir.

Şekil 6.2 ve Şekil 6.9 ile gösterilen akı eğrileri incelendiğinde, doymanın klasik motorda 10 A civarında başladığı, yeni motorda ise anma akımına karşılık gelen 5.59 A civarında başladığı görülmektedir. Yine aynı şekiller akı değerlerinde yeni sargı yapısı lehinde bir artış olduğunu ortaya koymaktadır. Her iki motorun endüktans eğrileri incelendiğinde çok farklı bir durum ortaya çıkmaktadır. Klasik motorda öz endüktans rotor konumuna göre değişmekte ve pozitif moment üretiminde etkin rol oynamaktadır. Yeni sargı yapısına sahip motorda ise öz endüktans rotor konumu ile değişmeyip yaklaşık olarak sabit kalmaktadır ve moment üretimi fazlar arasındaki karşıt endüktans değişimi ile sağlanmaktadır.

Elde edilen moment değerleri incelendiğinde hem ortama moment hem de momentteki dalgalılık açısından farklılıklar görülmektedir. Eşit bakır kayıpları dikkate alındığında anma akımı moment değerleri, klasik motorda 1.31 Nm iken yeni motorda 1.62 Nm değerine yükselmiş dolayısı ile %23.66 'lık bir artış sağlanmıştır. Anma akımı değerinde momentteki dalgalılık aynı iken özellikle doymalı çalışma bölgelerinde yeni sargı yapısında bir artış görülmektedir. Yeni sargı yapısı ile her ne kadar ortalama momet değerinde bir artış sağlanmış ise de dalgalılık sorunu artan bir oranda karşımızda durmaktadır. TKARM 'da bu dalgalılık sorunundan dolayı, ortalama momentte sağlanan önemli miktardaki artıştan yeterli oranda yararlanılamamaktadır.

TKARM 'da moment dalgalılığını azaltmak amacı ile magnetik devreyi esas alarak yapılacak herhangi bir çalışmada kullanılacak yöntemin belirlenmesi açısından, akı yollarını belirten akı harıtlarının çıkartılması son derece önemlidir. Bu amaçla Klasik ARM ve TKARM ile ilgili ortalananmış, ortalananmış ve hizalanma konumu arası, hizalanma konumuna ait akı yolları ilgili şekillerde verilmiştir. Gerek bu akı yollarının gerekse Ek-1 ile verilen diğer rotor konumlarına ait akı yollarının incelenmesinden, “tek yönlü” uyarda yeni sargı yapısına sahip motor ile klasik motorun akı yollarının birbirine küçük farklar dışında çok benzediği belirlenmiştir. Bu durum, literatürde Klasik ARM üzerine yapılan magnetik devreyi esas alan çalışmaların, yeni sargı yapısına sahip motora da uyarlanabileceğini göstermektedir.



7. BÖLÜM DEĞİŞİK KUTUP BAŞI PARAMETRELERİNE SAHİP TKARM ANALİZİ VE MOMENT DALGALILIĞININ İYİLEŞTİRİLMESİ

7.1 Giriş

Daha önceki bölümlerde elde edilen TKARM karakteristikleri ile fazlar arasındaki geçişte meydana gelen çökmeler, yeni sargı yapısında da önemli sorunlar teşkil etmektedir. Aynı zamanda TKARM 'un gürültülü çalışmasına yol açacak bu çökmeler, uyarma yapısına bağlı olarak özellikle doymalı çalışma bölgelerinde klasik ARM 'a göre daha yüksektir (Mecrow, 1996), (Tang, 1998), (Li, 1995).

TKARM ve klasik ARM karşılaştırıldığında çıkış momentinde yaklaşık %20-30 civarında bir artış sağlamaktadır (Clothier, 1999), (Mecrow, 1996). Aynı güçteki iki motor karşılaştırıldığında momentte sağlanan bu artış, yeni sargı yöntemi ile gelen analitik modelde karmaşıklığın artması ve momentteki dalgalılığın daha fazla olması gibi önemli sakıncalardan dolayı, yeterince olumlu olarak kullanılamamaktadır. TKARM 'unda üretilen akı halkalanması, hem rotor konumunun hem de makine faz akımlarının işlevi olduğu için, karmaşık yapı içermektedir. Bu konu üzerine çalışan araştırmacılar yakın zamanda iki önemli çalışma sundular (Kokernak, 2001), (Mecrow, 2001).

Bunun dışında TKARM 'un konum algılayıcısız denetimi ile ilgili önemli bir çalışma yapıldı (Kosaka, 2000). TKARM sargı yapısından dolayı parametre değişimine daha duyarlı olduğu için dayanıklı kontrol algoritmalarına daha fazla ihtiyaç duymaktadır. Bununla ilgili olarak kontrol devresini esas alan bir çalışma yapıldı (Ashour, 2001). Literatürde yeni sargı yönteminin getirdiği moment dalgalılığını inceleyen ve bu dalgalılığı azaltma yönünde herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Oysa bu olumsuzluğun tamamen giderildiği yada azaltıldığı durumda, yeni sargı yönteminin getirdiği üstünlükten daha iyi bir şekilde yararlanılabileceği düşünülmektedir. Bu amaçla klasik ARM üzerine şimdiye kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde, moment dalgalılığını azaltma yönünde yapılan çalışmaların iki ana grupta toplandığı tesbit edilmiştir. Bunlardan ilki motorun kontrol devresine dayalı çalışmalar, ikincisi ise motorun magnetik devresini esas alan çalışmalardır.

Motorun kontrol devresini temel alan çalışmalarda, momentte etkin olan akım ifadesi üzerine yoğunlaşmıştır. Çeşitli kontrol algoritmaları kullanılarak moment dalgalılığı azaltılmaya çalışılmıştır (Moreira, 1995), (O'donovan, 1994), (Cameron, 1992), (Özbulur, 1995).

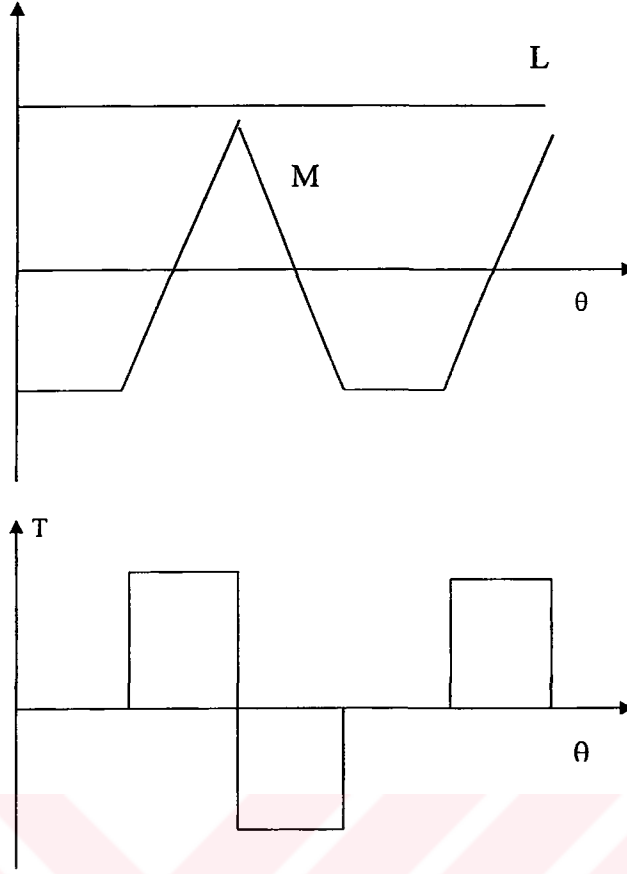
Motorun magnetik devresini hedef alan çalışmalarda ise endüktans eğrisinin şekli yada endüktansın rotor konumuna göre değişimi hedef alınmıştır. Bu amaçla değişik stator ve rotor kutup genişlikleri kullanılmış, kutup açıları parametre olarak ele alınmış, kutup uçlarına değişik şekiller verilerek momentte dalgalılığı azaltma yönüne gidilmiştir (Moallem , 1992), (Chenadec, 1994), (Ohdachi, 1997), (Koibuchi, 1997), (Özoğlu, 1999).

TKARM sahip olduğu sargı yöntemi ile klasik ARM 'a göre çok farklı çalışma ilkeleri ortaya koymaktadır. Momentin tamamına yakını fazlar arasında oluşan karşıt kuplajların rotor konumuna göre değişim oranından elde edilmektedir. Fazlara ait öz endüktans, rotor konumuna göre değişmeyip sabit kalmaktadır. Bölüm 6 'da klasik ARM ve TKARM için eşit kayıplara dayalı olarak elde edilen ve Ek-1 'de ayrıntılı olarak gösterilen akı haritalarının incelenmesi sonucu, yeni sargıya sahip motorun “tek yönlü” uyarma ile uyarıldığı durumda akı yolları arasında bir fark olmadığı görülmektedir. Dolayısı ile TKARM 'un moment dalgalılığını azaltmak amacıyla, klasik ARM için uygulanan yöntemlerin kullanılabilirliği ortaya çıkmaktadır.

Daha önceki bölümlerde statik analizi yapılan TKARM 'un, stator ve rotor kutup parametreleri değiştirilmediği için, söz konusu model bu bölümde "Temel Model" olarak isimlendirilmiştir. Temel Model hariç herbiri ayrı kutup uçları parametrelerine sahip beş ayrı model oluşturularak dalgalılık incelenip Temel Model ile karşılaştırılmış ve dalgalılıktaki iyileşmenin en iyi olduğu model daha ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Temel Model ve en iyi Model Fourier Serisine açılarak, harmonik durumları belirlenmiştir. Sonuçlar eşit kayıplara dayalı olarak klasik ARM 'unda elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır (Özoğlu, 1999).

7.2 TKARM 'unda Moment Dalgalılığı

TKARM 'da moment dalgalılığını azaltmak amacıyla ilk olarak momentteki çökmelerin niçin meydana geldiğini ortaya koymak gerekir. İdeal durumda karşıt kuplajın ve öz endüktansın rotor konumuna göre değişimleri Şekil 7.1 'de verilmektedir. Öz endüktans rotor konumuna göre değişmemekte, karşıt endüktans ise negatiften başlayıp pozitif noktada en yüksek değerini bulmakta daha sonra tekrar negatif değere düşmektedir. Pozitif moment, tek yönlü uyarma yapısı için karşıt endüktansın yükselen kısmında üretilmektedir. Aynı iki faz karşıt endüktansın azalan kısmında da iletimde kalırsa motor negatif moment üretmektedir. Fakat gerçek durumda hem endüktans eğrileri hem de moment eğrileri bu şekilde değildir. Doymadan kaynaklanan sebeplerden dolayı ideal durumdan sapmalar görülür. Bu nedenle faz



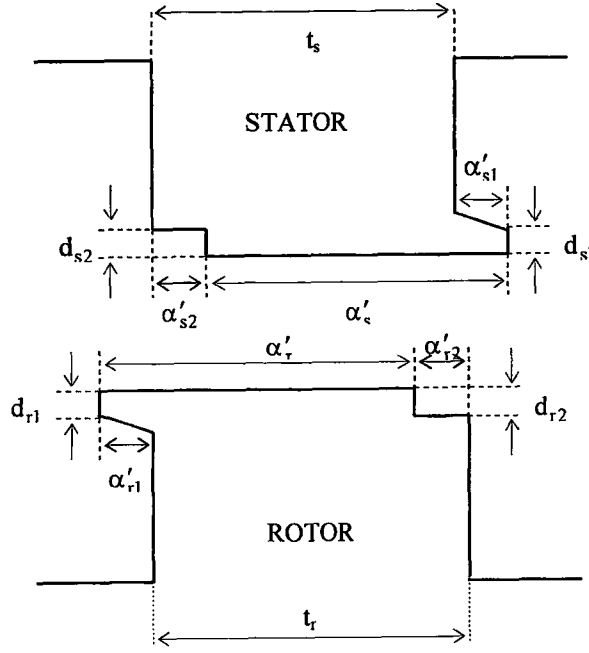
Şekil 7.1 TKARM 'da ideal durum için karşıt kuplaj ve moment

geçişleri esnasında çökmeler görülmektedir. Bu çökmeler yeni sargı yapısında özellikle doymalı çalışma bölgelerinde daha şiddetli olmaktadır.

7.3 TKARM 'un Moment Dalgalılığını Azaltmak İçin Kullanılan Yöntem

Eğer tam kutup adımlı sargı yapısına sahip motorun moment eğrisinin hızlı bir şekilde yükselmesi sağlanır ise moment şekli ideal duruma benzeyeceği ve dolayısı ile dalgalılığın azalacağı öngörülmektedir. Bunu sağlayacak şekilde geometrik kutup başı parametreleri tanımlanırsa, endüktans eğrisinin dolayısı ile moment eğrisinin şekli değişmektedir. Eğrinin hızlı bir şekilde yükselmesi sonucu çökme noktası yukarı çekilir böylece momentte dalgalılık azalır.

Bu amaçla klasik ARM 'daki moment dalgalılığını azaltmak için önerilen stator ve rotor kutup başlarında tanımlanan parametreler TKARM için kullanılmıştır (Özoğlu, 1999). Bu parametreler değiştirilerek beş ayrı model oluşturulmuş ve en iyi iyileşmeye sahip model ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Şekil 7.2 'de verilen kutup şekli dikkatli olarak incelendiğinde kutup uçlarında belirli bir kalınlıktaki parçacıkların girintiler ve uzantılar



Şekil 7.2 Tanımlanan kutup başı parametreleri

Çizelge 7.1 Kutup başlarında tanımlanan geometrik parametreler ve anlamları

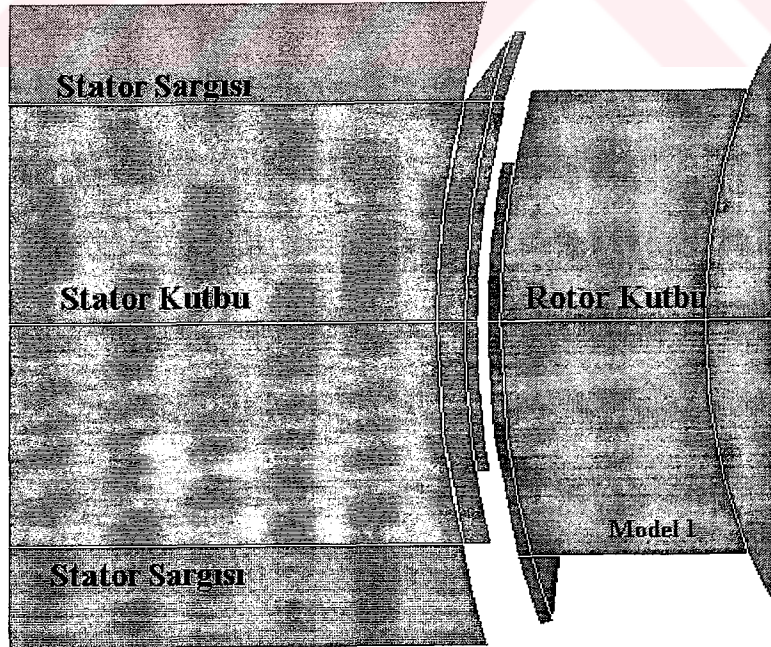
Parametre	Sembolü
Stator Kutup Genişliği	t_s (m)
Rotor Kutup Genişliği	t_r (m)
Stator Kutup Başı Uzantı Kalınlığı	d_{s1}' (m)
Rotor Kutup Başı Uzantı Kalınlığı	d_{r1}' (m)
Stator Kutup Başı Girinti Kalınlığı	d_{s2}' (m)
Rotor Kutup Başı Girinti Kalınlığı	d_{r2}' (m)
Stator Kaymış Kutup Başı Açısı	α'_s (°)
Rotor Kaymış Kutup Başı Açısı	α'_r (°)
Stator Kutup Başı Uzantı Açısı	α'_{s1} (°)
Rotor Kutup Başı Uzantı Açısı	α'_{r1} (°)
Stator Kutup Başı Girinti Açısı	α'_{s2} (°)
Rotor Kutup Başı Girinti Açısı	α'_{r2} (°)

oluşturduğu görülmektedir (Özoğlu,1999).

Çizelge 7.1 ile gösterilen geometrik parametreler, birimleri sabit tutularak farklı değerlerde tanımlanmış ve böylece değişik modeller elde edilmiştir. Her modelin analizi sonucu elde edilen moment değerleri, bütün akım değerleri yerine sadece anma akım değerlerinde elde edilmektedir. Temel Model ve dalgalılığın en aza indirildiği model Fourier Serisine açılarak uzay harmonikleri her iki durum için incelenmiştir. Bölüm 6 'da yapılan kabuller gereğince elde edilen sonuçlar klasik ARM ile karşılaştırılmıştır. Bölüm 5 ve 6 'da analizi yapılan motorun kutup uçlarında herhangi bir değişiklik yapılmadığı için bu bölümde Temel Model olarak isimlendirilmiştir. Yukarıda bahsedilen çalışmalar için beş ayrı model kurulmuş ve değişik kutup başı şekillerine sahip motorun anma akım değerinde analizi yapılmıştır.

7.3.1 Model 1 'e ait Kutup Şekilleri

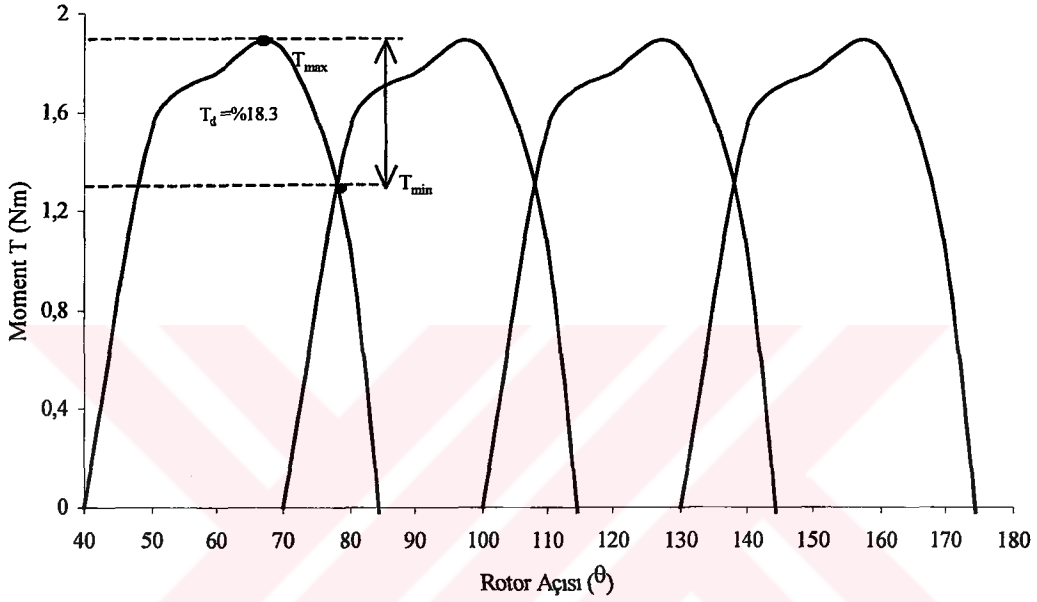
Oluşturulan ilk modelde kullanılan parametreler Çizelge 7.2 'de verilmiştir. Stator ve rotor kutup başlarında oluşturulan girinti ve uzantılar, stator kutup açısı α_s 'nin yarısının 1/3 'ü alınarak 5° olarak bulunmuştur. Akının hava aralığı üzerinden, statordan rotora geçişini kolaylaştırmak amacıyla, kutup başlarında ilk olarak üçgen şekiller kullanılmıştır. Şekil 7.3 ile gösterilen kutup başı şekline ait geometrik parametrelerde kullanılan “g” hava aralığı parametresi daha önce tanımlanmış idi.



Şekil 7.3 Model 1 'e ait kutup başı şekilleri

Çizelge 7.2 Model 1 kutup şekillerine ilişkin parametreler

Model 1'e ait Parametre Değerleri	d_{s1}'	d_{r1}'	d_{s2}'	d_{r2}'	α_s'	α_r'	α_{s1}'	α_{r1}'	α_{s2}'	α_{r2}'	$\%T_d$
	4g	4g	2g	2g	30°	32°	5°	5°	5°	5°	18.3

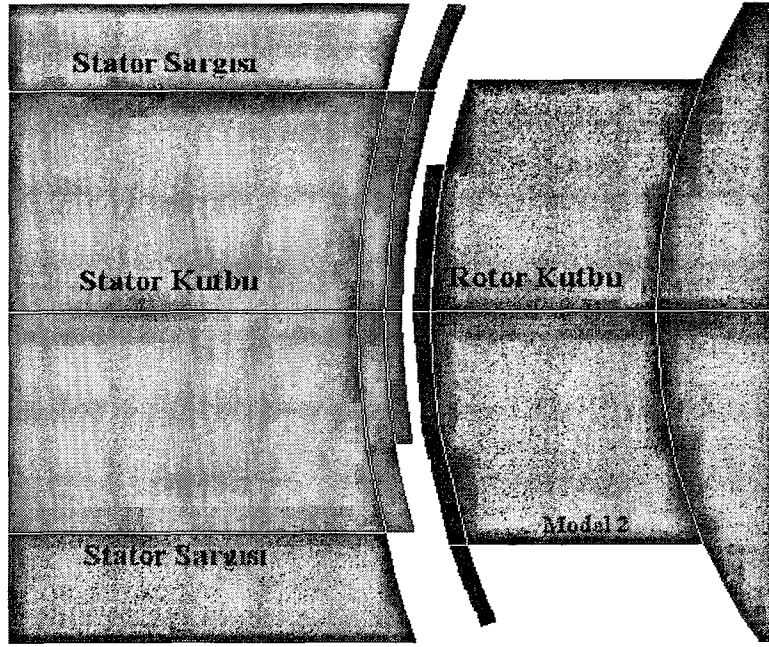


Şekil 7.4 Model 1 'ait moment ve dalgalılığı

Model 1 olarak isimlendirilen modeli anma akım değeri olan 5.59 A için analiz edilmiştir. Şekil 7.4 ile verilen moment eğrisinin dalgalılığı incelendiğinde %18.3 olarak belirlenmiştir. Oysa Bölüm 6 'da analiz sonucu elde edilen Temel Modele ait, anma akımı değerindeki dalgalılık %35.4 idi. Dolayısı ile dalgalılıkta önemli bir miktarda iyileşme görülmektedir. Elde edilen sonucu daha iyi bir değere götürmek amacı ile başka modeller oluşturulmuştur.

7.3.2 Model 2 'ye ait Kutup Şekilleri

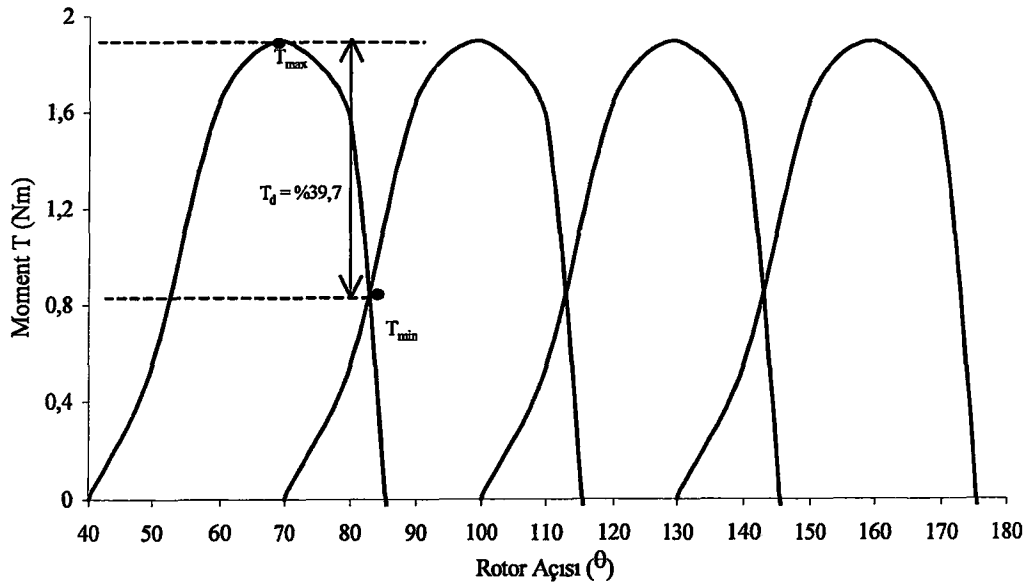
Yeni modelde tanımlanan parametrelerden kutup girinti ve çıkıntıları bir önceki modele göre 1° arttırılmış dolayısı ile 6° olmuştur. Diğer parametreler Çizelge 7.3 'de gösterilmiştir. Kutup başı uçları, Şekil 7.5 'de görüldüğü gibi daha ziyade dikdörtgen şekline benzemektedir. Modelin analizi incelendiğinde, momentteki dalgalılık % 39.7 olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.5 Model 2 'ye ait kutup başı şekilleri

Çizelge 7.3 Model 2 kutup şekillerine ilişkin parametreler

Model 2'ye ait Parametre Değerleri	d_{s1}'	d_{r1}'	d_{s2}'	d_{r2}'	α_s'	α_r'	α_{s1}'	α_{r1}'	α_{s2}'	α_{r2}'	$\%T_d$
	2g	2g	2g	2g	30°	32°	6°	6°	6°	6°	39.7

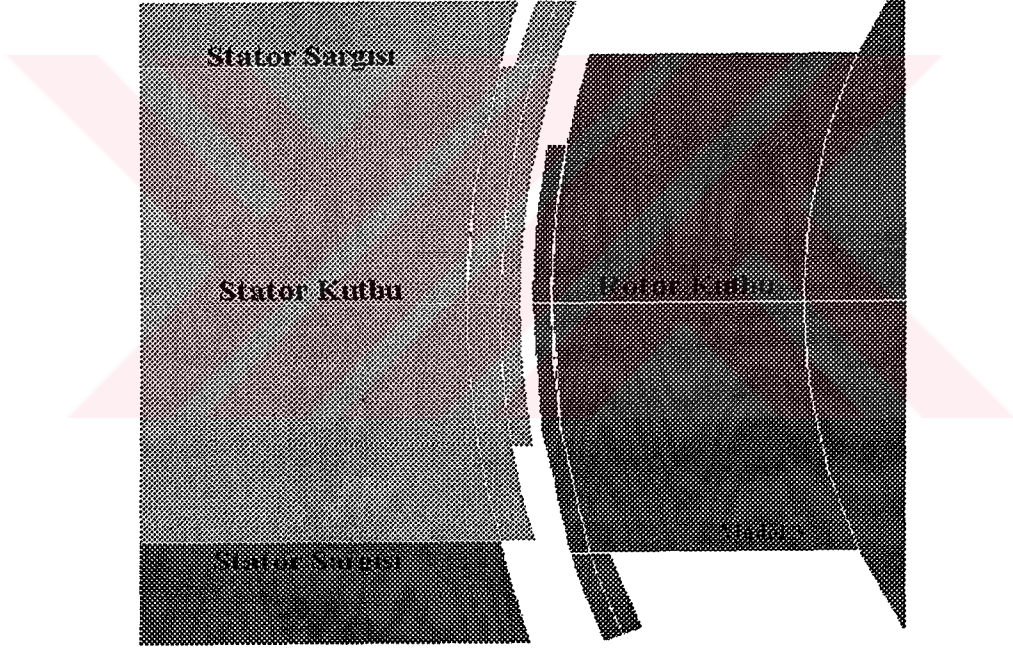


Şekil 7.6 Model 2 'ye ait moment ve dalgalılığı

Elde edilen bu değer Model 1 ve Temel Model ile karşılaştırıldığında yüksek bir değerdir. Anma akım değeri için elde edilen bu moment eğrisi, aynı zamanda üçgen bir görünüme sahiptir bu durum istenilen kare şeklindeki moment eğrisi şekline ters düşmektedir.

7.3.3 Model 3 'e ait Kutup Şekilleri

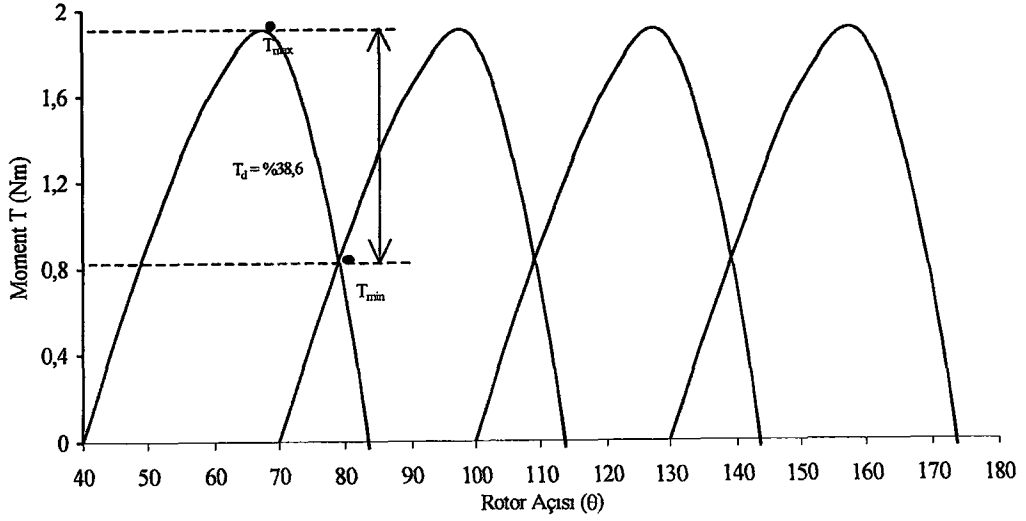
Model 3 'te ise stator ve rotor kutuplarına ait girinti ve çıkıntılar aynı kalmakla birlikte bu girinti ve çıkıntıların kalınlıkları arttırılmıştır. Bu tanımlanan kutup başı parametreleri Şekil 7.7 'de, değerleri ise Çizelge 7.4 'de verilmiştir. Ayrıca analiz sonucu elde edilen moment eğrisi görünümü Şekil 7.8 ile verilmektedir. Analiz sonucu elde edilen moment ifadesi incelendiğinde, momentteki dalgalılık oranı % 38.6 olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu değer oldukça yüksek bir değerdir ve hala moment dalga yapısı istenilen kare şeklinden uzaktır. Hatta moment eğrisi üçgen bir görünüme sahiptir. Bu nedenle yeni modeller oluşturulmuştur.



Şekil 7.7 Model 3 'e ait kutup başı şekilleri

Çizelge 7.4 Model 3 kutup şekillerine ilişkin parametreler

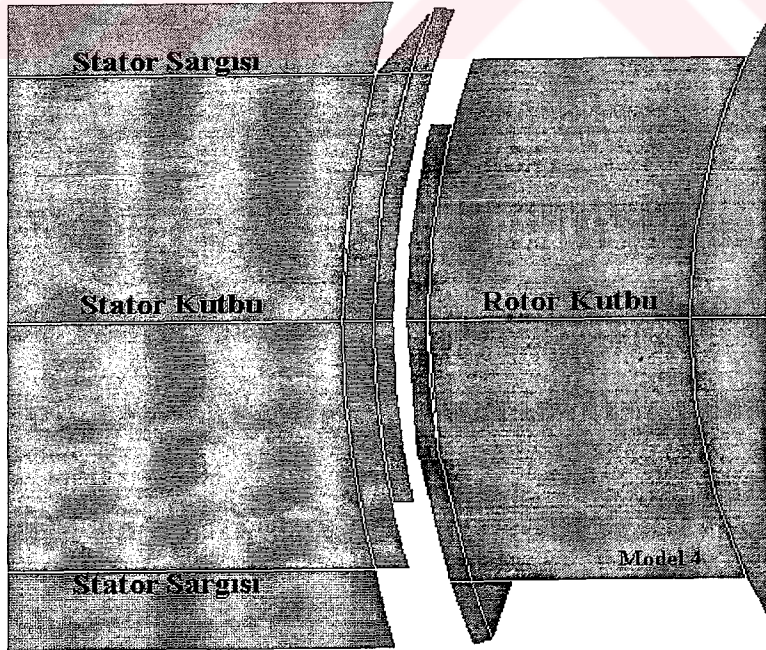
Model 3 'e ait Parametre Değerleri	d_{s1}'	d_{r1}'	d_{s2}'	d_{r2}'	α_s'	α_r'	α_{s1}'	α_{r1}'	α_{s2}'	α_{r2}'	%T _d
	4g	4g	2g	2g	30°	32°	6°	6°	6°	6°	38.6



Şekil 7.8 Model 3 'e ait moment ve dalgalılığı

7.3.4 Model 4 'e ait Kutup Şekilleri

Oluşturulan yeni modelde Model 2 ve Model 3 'ün aksine kutup başı girinti ve uzantıları azaltılıp 4° yapılmıştır. Bu durumda moment dalgalılığının nasıl oluşacağı araştırılmıştır. Stator ve rotor kutup başlarının görüntüsü Şekil 7.9 'da, ilgili parametre değerleri ise Çizelge 7.5 'de verilmiştir.

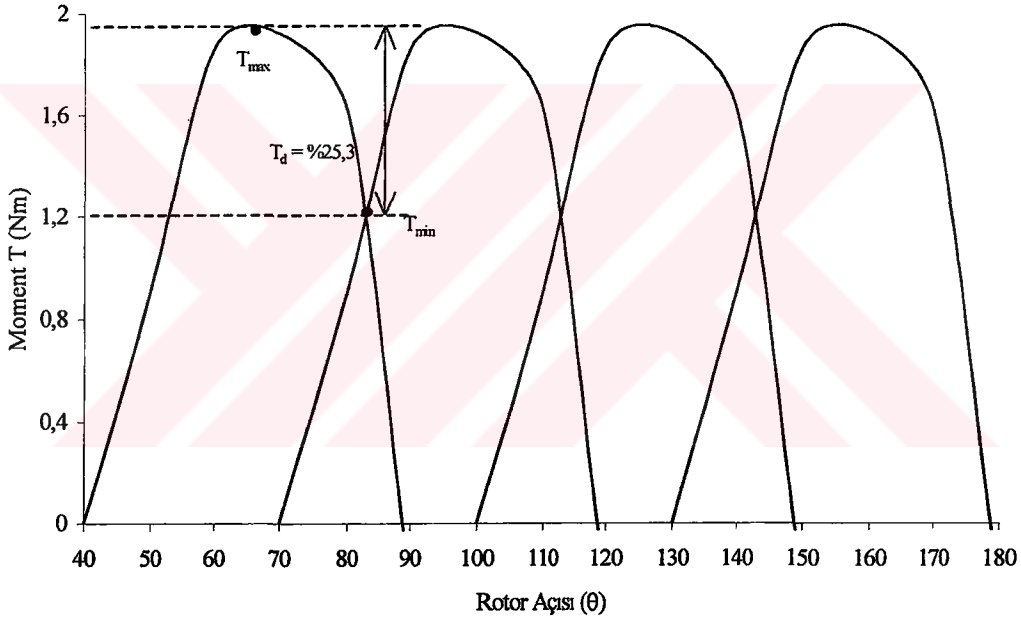


Şekil 7.9 Model 4 'e ait kutup başı şekilleri

Çizelge 7.5 Model 4 kutup şekillerine ilişkin parametreler

Model 4 'e ait Parametre Değerleri	d_{s1}'	d_{r1}'	d_{s2}'	d_{r2}'	α_s'	α_r'	α_{s1}'	α_{r1}'	α_{s2}'	α_{r2}'	% T_d
	4g	4g	2g	2g	30°	32°	4°	4°	4°	4°	25.3

Yapılan analiz sonucu momentteki dalgalılık %25.3 olarak bulunmuştur. Şekil 7.10 ile gösterilen moment şekli Model 3 ve Model 2 'ye göre daha olumludur yani üçgen görünümünden uzaklaşma vardır. Dikkat edilirse eğri azalırken yavaş bir şekilde azalmaktadır. Bu durum olumlu bir noktadır. Dolayısı ile seçilen kutup başı girintisi istenilen özelliği sağlamaktadır. Bundan sonraki modelde uzantı üzerinde çalışılmıştır.

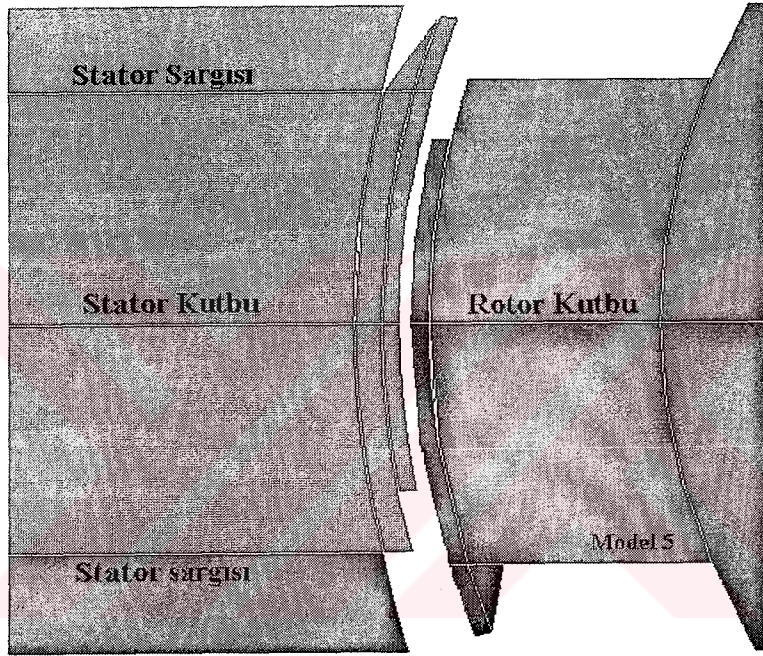


Şekil 7.10 Model 4 'e ait moment ve dalgalılığı

7.3.5 Model 5 'e ait Kutup Şekilleri

Kutup başı girinti ve uzantıları rotor için 4° olarak alınmıştır. Stator için ise bu değerler, Model 1 'de moment eğrisinin hızlı yükselişi sağlandığından dolayı, aynı değer olan 5° olarak alınmıştır. Şekil 7.11 'de görülen stator ve rotor kutup şekline ilişkin parametreler Çizelge 7.6 ile verilmiştir.

Yapılan analiz sonucu moment eğrisindeki dalgalılık %12.8 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuç Temel Model ile karşılaştırıldığında oldukça iyi bir değere sahiptir. Bu değere en yakın sonuç Model 1 ile sağlanmıştı. Ayrıca Şekil 7.12 'deki moment eğrisinin, istenilen kare dalga şekline benzediği görülmektedir. Dalgalılıkta elde edile bu iyileşme motordaki gürültü miktarını da önemli oranda azaltmaktadır. Model 5 TKARM 'un moment dalgalılığını azaltmada en iyi model olma durumundadır. Temel modele göre %22.6 'lık bir iyileşme vardır. Aynı güçteki eşdeğerlerine göre çıkış momentinde önemli bir üstünlüğe sahip TKARM 'un, yeni sargı yapısı ile uyarmaya bağlı olarak daha ön plana çıkan dalgalılık sorunu üzerine olumlu bir çalışma yapılmıştır.

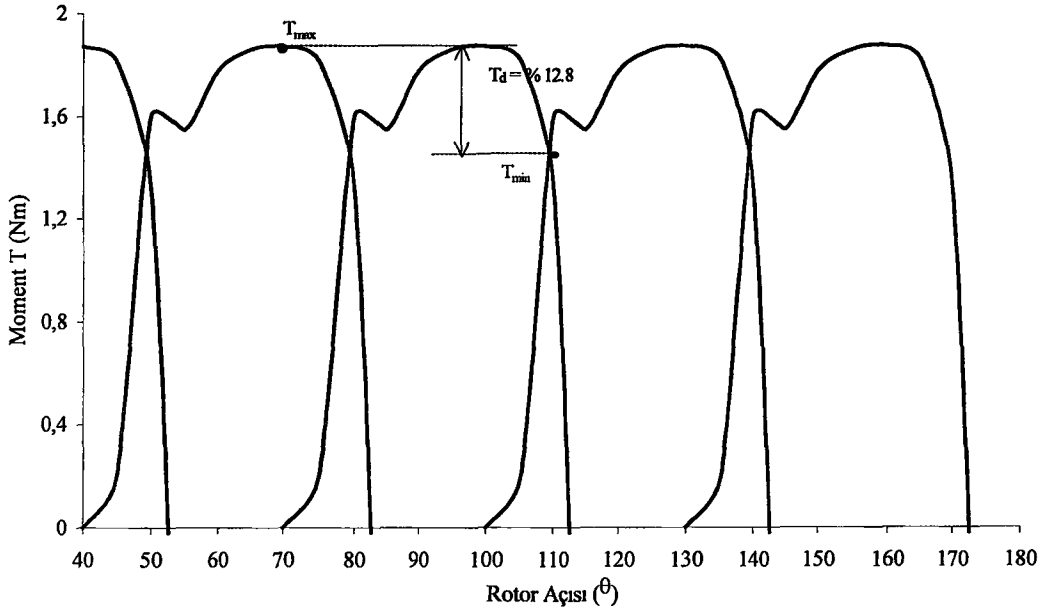


Şekil 7.11 Model 5 'e ait kutup başı şekilleri

Çizelge 7.6 Model 5 kutup şekillerine ilişkin parametreler

Model 5 'e ait Parametre Değerleri	d_{s1}'	d_{r1}'	d_{s2}'	d_{r2}'	α_s'	α_r'	α_{s1}'	α_{r1}'	α_{s2}'	α_{r2}'	%T _d
	4g	4g	2g	2g	31°	33°	5°	4°	5°	4°	12.8

Bundan sonraki bölümde en iyi sonuçların elde edildiği Model 5 çalışma karakteristikleri ile daha ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Ayrıca Temel Model ve Model 5 Fourier serisine açılarak, uzay harmonikleri açısından incelenip değerler birbiri ile karşılaştırılmıştır.



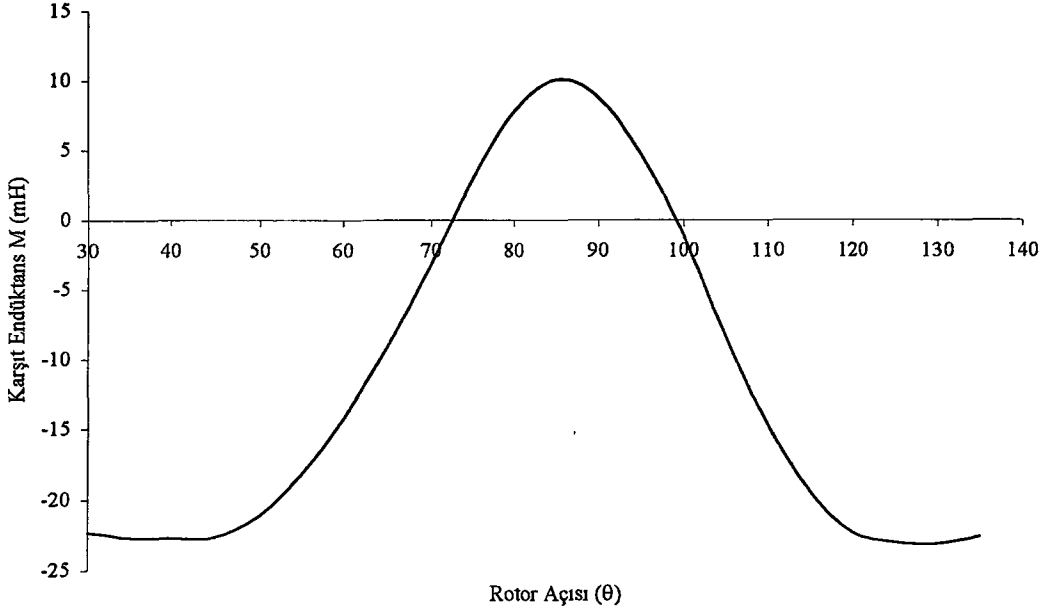
Şekil 7.12 Model 5 'e ait moment ve dalgalılığı

7.4 Model 5 'in Çalışma Karakteristikleri

Yukarıda anma akımı için moment eğrisi dolayısı ile dalgalılığı elde edilen Model 5 'e ait çalışma karakteristikleri çıkartılarak, ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilecek sonuçlar ilerleyen kısımlarda klasik ARM 'unda elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığı için, analiz yapılırken uygulanacak akımlar, eşit bakır kayıplarında klasik ARM 'unda 5, 7, 10, 15, 20 A değerlerine TKARM 'da karşılık gelen 2.79, 3.91, 5.59, 8.38, 11.18 A değerleridir. Moment karakteristiği daha önemli bir yere sahip olduğu için ayrıca ele alınmıştır.

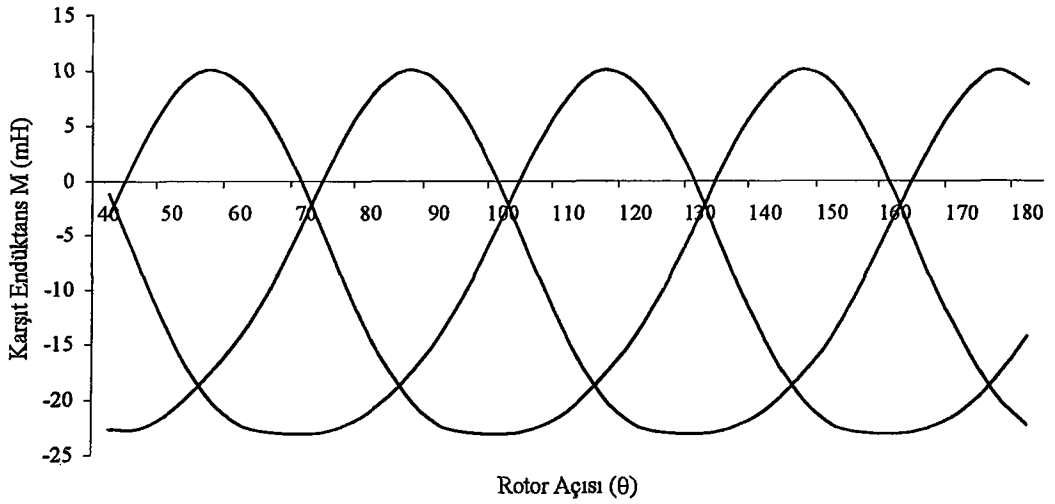
7.4.1 Endüktans ve Akı Karakteristiği

Bu amaçla ilk olarak Şekil 7.13 ile gösterilen a-c fazlarına ait karşıt endüktansı incelenmektedir. Şekil 6.11 ile karşılaştırıldığında dikkati çeken iki özellik görülmektedir. Bunlardan ilki Temel Modelin karşıt endüktansındaki köşelerde meydana gelen sert dönüşler, oldukça yumuşak hale gelmiştir. Bu özellik dolayısı ile moment eğrisinde dalgalılığın azalması şeklinde kendini hissettirmektedir. Yine diğer bir özellik ise karşıt endüktans eğrisindeki simetrililiğin ortadan kalkmasıdır. Başka bir deyişle Temel Modelde karşıt endüktans 55° 'de yükselmeye başlarken, Model 5 'te ise 45° 'de yükselmeye başlamaktadır. Bu özellik TKARM 'un çalışma performansına olumlu bir katkıda bulunmaktadır. Karşıt endüktans eğrisi Model 5 'te 85° 'de en yüksek değerine ulaşmaktadır.

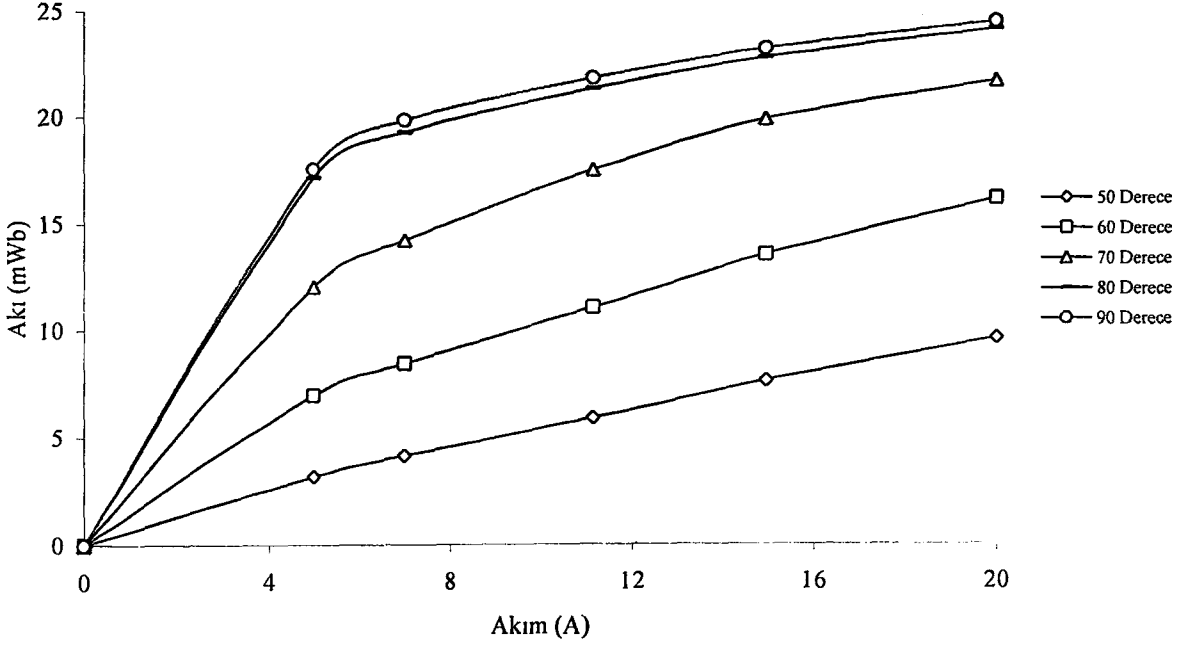


Şekil 7.13 Model 5 'e ait karşıt endüktans

Meydana gelen bu 5° 'lik kayma seçilen kutup başı parametrelerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 7.14 ile gösterilen anma akımına ait üç fazlı karşıt endüktans değişiminde görüldüğü gibi, kutup başlarında tanımlanan parametrelerden dolayı üç fazlı karşıt endüktans eğrilerinde de simetrililiğin bozulmuş olduğu görülmektedir. Yine karşıt kuplajların köşelerinde meydana gelen sert dönüşlerin, yumuşak dönüşler haline geldiği izlenmektedir.



Şekil 7.14 Anma akımında Model 5 'e ait 3 fazlı karşıt endüktanslar

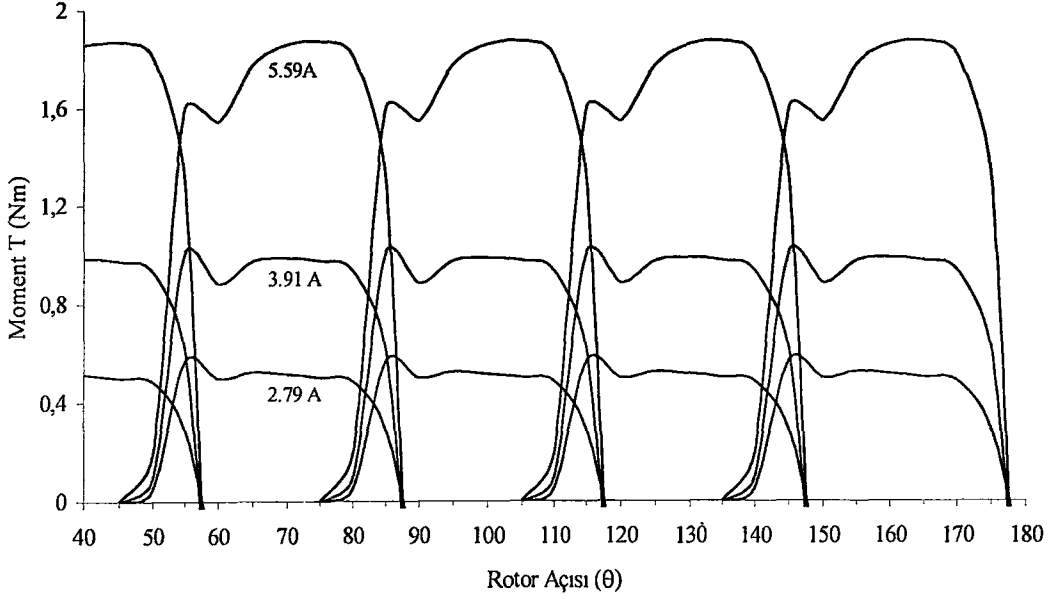


Şekil 7.15 Model 5 'e ait akı eğrisi

Model 5 'e ait akı eğrisi Şekil 7.15 'te gösterilmektedir. Akı eğrisi incelendiğinde Temel Modele ait akı eğrisi ile arasında fazla bir fark yoktur. Her iki akı eğrisi anma akım değeri olan 5.59 A 'de doymaya girmektedir. Uygulanan kutup başı parametrelerinden dolayı 80° ve 90° akı eğrilerinin birbirine yaklaştığı ve aralarında fazla bir fark olmadığı anlaşılmaktadır. Akı miktarlarında bir değişiklik yoktur. Akı anma akımı altındaki değerlerde doğrusal olarak değişmekte, üstündeki değerlerde ise doğrusal olmayan bir karakteristik sergilemektedir. Stator ve rotor kutupları birbirine yaklaşırken akı değeri yükselmeye başlamakta, hizalanma konumuna gelindiğinde ise en yüksek değerini almaktadır. Değişik rotor konumlarına ait akı yolu haritaları Ek-2 'de gösterilmiştir.

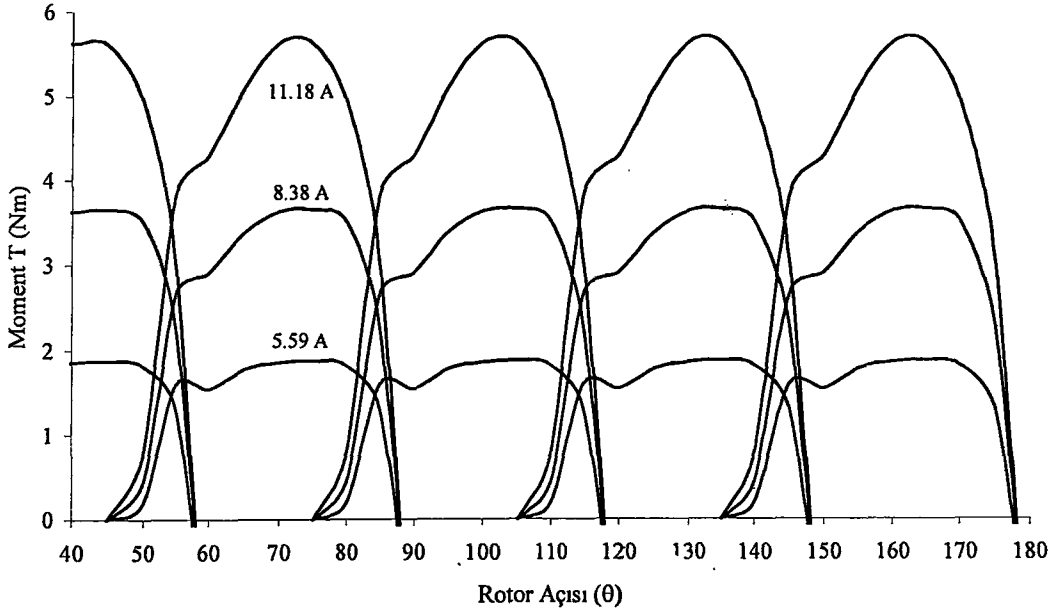
7.4.2 Moment Karakteristikleri

Doğrusal olan bölgeye ait moment eğrileri, anma akım değeri altındaki değerler olarak Şekil 7.16 'da gösterilmiştir. Moment eğrileri 45° 'den itibaren yükselmeye başlamakta ve 80° 'den sonra düşmektedir. Dolayısı ile temel model ile karşılaştırıldığında eğride bir kayma görülmektedir. Şekil 6.16 'da verilen Temel Modele ait moment eğrileri ile karşılaştırıldığında, bu eğrilerin 55° 'de yükselmeye başladığı ve 85° 'de düşmeye başladığı görülmektedir. Moment eğrileri 65° ve 75° 'ler arası en yüksek değerine ulaşmaktadır.



Şekil 7.16 Model 5 'in doğrusal bölgeye ait moment eğrileri

Yine Temel Model 'de elde edilen sonuçlardan farklı olarak moment eğrilerindeki faz geçişleri esnasında meydana gelen çökmelerin azaldığı, yani momentteki dalgalılığın azaldığı görülmektedir. Oysa bu çökmeler çıkış momentinde önemli bir artış sağlayan TKARM 'da uyarma yapısı ve doymaya bağlı olarak daha şiddetli olduğu daha önceden belirtilmiş idi. Ayrıca moment eğrilerinde genlik olarak bir azalma vardır. Benzer izlenimler ile Şekil 7.17 gösterilen doğrusal olmayan bölgeye ait moment eğrilerinden de görülmektedir.



Şekil 7.17 Model 5 'in doğrusal olmayan bölgelere ait moment eğrisi

Moment eğrilerinin düşme ve yükselme noktaları ile momentin en yüksek değerleri aynıdır. Temel Model ile karşılaştırıldığında moment dalgalılığındaki benzer iyileşmeler doğrusal olmayan bölge içinde elde edilmiştir.

Doğrusal olan ve doğrusal olmayan bölgelerde elde edilen moment dalgalılığındaki iyileşmeler Çizelge 7.7 ile gösterilmektedir. Doğrusal bölge için Temel Modelde elde edilen dalgalılık oranı %35.4 ile %37 arasında değişmektedir. Model 5 ile elde edilen iyileşme sonucu bu değerler %12.8 ile %24.1 değerlerine çekilmiştir. Ortalama moment değerlerinde de artışlar görülmektedir.

Çizelge 7.7 Model 5 ile değişik akımlarda sağlanan dalgalılıktaki iyileşmeler

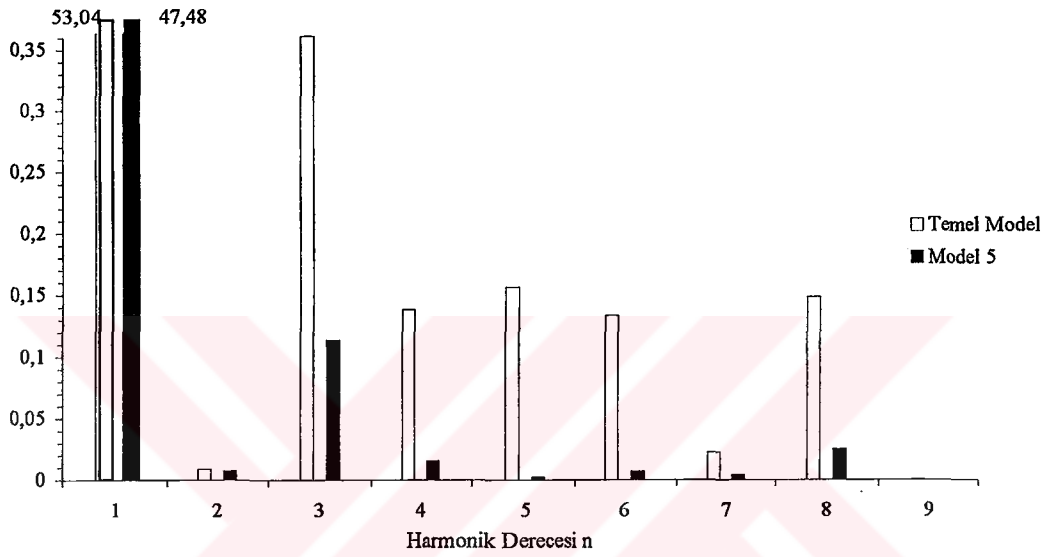
TKARM	Temel Model		Model 5		Değişim oranı	
Current (i)	% T_d	T_a (Nm)	% T_d	T_a (Nm)	ΔT_d (%)	ΔT_a (%)
2.79 A	37	0.43	19.6	0,485	17.4	12.8
3.91A	34.9	0.84	24.1	1.00	10.8	16.1
5.59 A	35.4	1.62	12.8	1.66	22.6	2.5
8.38 A	44.4	3.15	22.6	3.10	21.9	-1.6
11.18 A	49.5	4.75	23.9	4.60	25.6	-3.3

Doğrusal olmayan bölge için elde edilen değerler incelendiğinde Temel Modelde %35.4 ile %49.5 aralığında değişen bu oran, Model 5 'in sahip olduğu kutup başı parametrelerinin uygulanması ile birlikte %12.8 ve %23.9 arasında değişen değerlere indirilmiştir. Doymalı çalışma bölgelerinde ortalama moment değerinde bir miktar düşüş izlenmektedir. Sonuç olarak doğrusal olmayan bölgeler için de önemli miktarda iyileşmeler elde edilmiştir

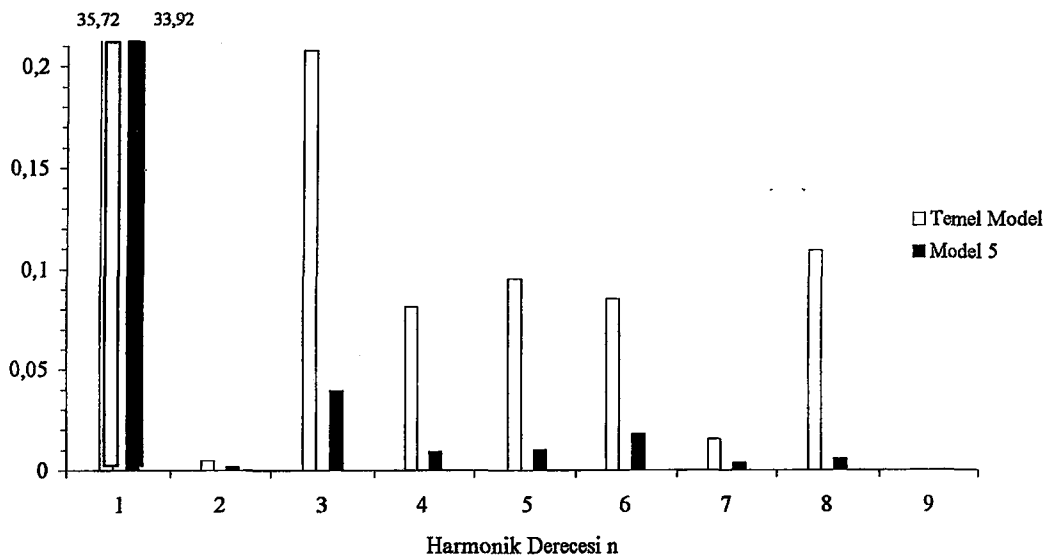
Özellikle doymalı çalışma bölgelerinde TKARM 'un oldukça yüksek değerlerde moment dalgalılığına sahip olduğu önceki bölümde klasik ARM ile karşılaştırılarak gösterilmiş idi. Elde edilen sonuçlar ile TKARM 'un olumsuz yanını gidermek ya da başka bir deyişle üstün tarafını daha ön plana çıkartmak adına son derece önemli katkıda bulunulmuştur.

7.5 Temel Model ve Model 5 'in Fourier Serisine Açılımı

TKARM ve klasik ARM 'un 3-fazlı statik moment eğrileri anma akım değeri için “Ayrık Fourier Serisine” (Discrete Fast Fourier Transform) açılarak, momentin harmonik analizi yapılmıştır. Elde edilen değerler Şekil 7.18 ve Şekil 7.19 ile gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, uygulanan yöntemin TKARM 'un sadece yüksek frekanslı harmoniklerini değil aynı zamanda düşük frekanslı harmoniklerini de azaltmakta oldukça iyi sonuç verdiği görülmektedir.



Şekil 7.18 TKARM Temel Model ve Model 5 'e ait moment Fourier Serisi açılımı



Şekil 7.19 Klasik ARM Temel Model ve Model 5 'e ait moment Fourier Serisi açılımı

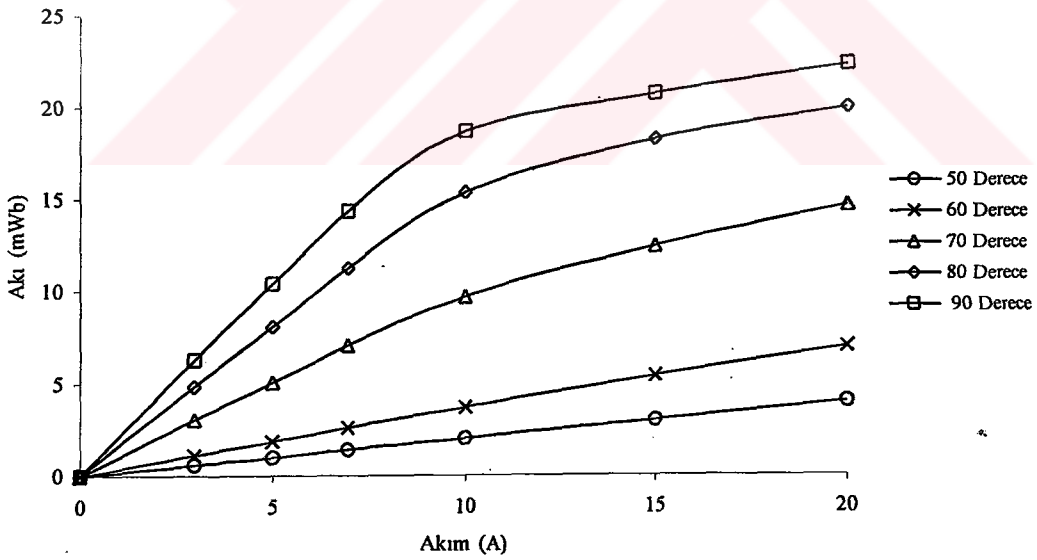
Özellikle düşük frekanslardaki harmoniğin azaltılması son derece önem arz etmektedir. Çünkü motor ve yük ataleti, düşük frekanslardaki harmonikleri kolaylıkla ortadan kaldıramamaktadır.

Klasik ARM 'da Model 5 'in analizinde de hem düşük hem yüksek harmoniklerde benzer azalmalar görülmektedir. Fakat bu elde edilen eğriler statik eğriler olduğu için yüksek hız bölgelerinde gerçek anlamda performans tahmini yapabilmek için dinamik analize ihtiyaç duymaktadır.

7.6 Oluşturulan Modellerin Klasik ARM Üzerindeki Etkilerinin İncelemesi

Bu kısımda TKARM 'una uygulanan kutup başı parametreleri, başka bir çalışmada (Özoğlu, 1999) olduğu gibi klasik ARM 'una uygulanarak çalışma karakteristikleri elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar TKARM 'da elde edilenler ile karşılaştırılmıştır.

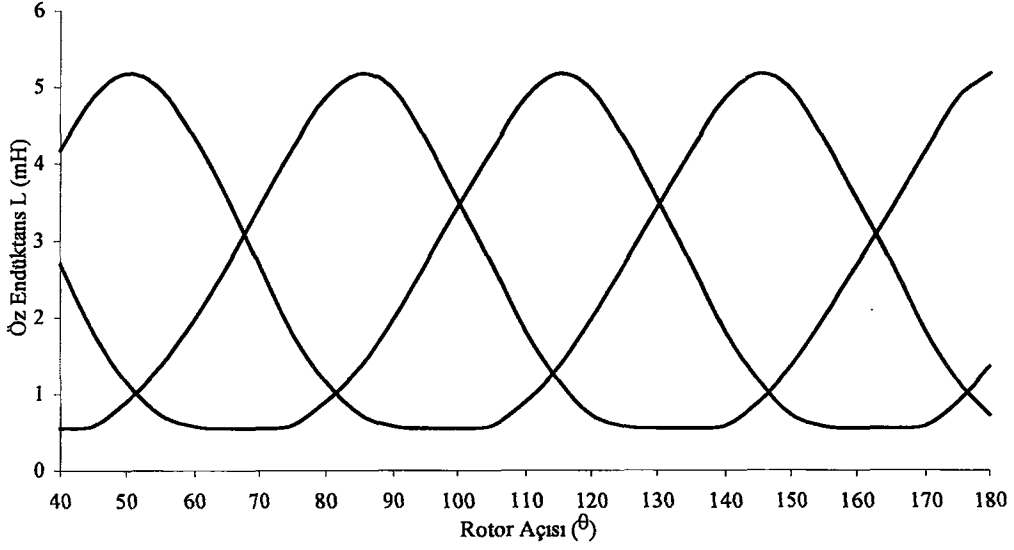
Çalışma karakteristiklerinden ilk olarak Şekil 7.20 ile gösterilen Model 5 'e ait akı eğrisi göz önüne alınmıştır. Klasik ARM 'da Temel Model akısı ile karşılaştırıldığında, yine 10 A civarında doymanın başladığı izlenmektedir.



Şekil 7.20 Klasik ARM 'da Model 5 'e ait akı akım eğrisi

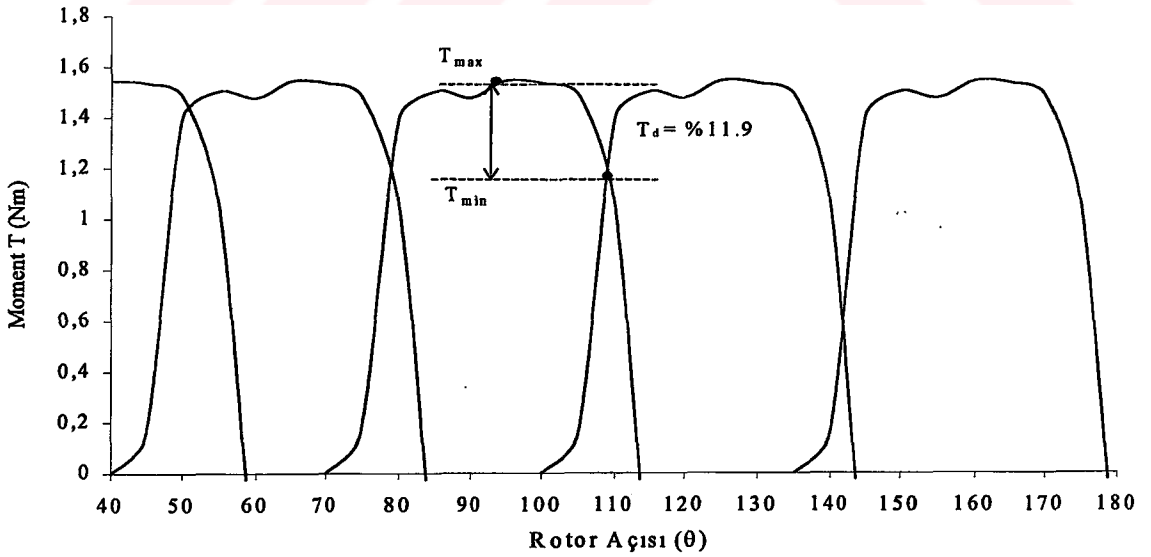
Şekil 7.21 ile verilen öz endüktans değişimi, Şekil 6.4 ile karşılaştırıldığında özellikle köşelerde meydana gelen keskin dönüşler, yumuşak dönüş haline gelmiştir. Endüktans eğrisinin yükselme ve düşme bölgelerinde var olan simetrilik, Model 5 ile ortadan kalkmıştır.

Öz endüktans eğrisinde meydana gelen bu değişiklik dolayısı ile moment eğrisine de yansımıştır. TKARM analizinde elde edilen karşıt endüktans eğrisi ile karşılaştırıldığında eğri yapısının değişimi noktasında, beklenildiği üzere benzer değişiklikler oluşmuştur.



Şekil 7.21 Klasik ARM anma akım için Model 5 'e ait öz endüktans değişimi

Anma akımında Model 5 'e ait moment eğrisi Şekil 7.22 ile verilmektedir. Moment şeklinde Temel Modelde var olan sivri yapı ortadan kalkmıştır. Bunun yerine kare şekline benzer bir yapı ortaya çıkmıştır. Moment dalgalılığı %11.9 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.22 Klasik ARM Model 5 'e ait moment eğrisi (10 A)

Moment eğrisinde hem tepe noktasında bir azalma hem de kesişme noktasında bir yükselme söz konusudur. Bunun kaynağı moment eğrisinin hızlı bir şekilde yükselmesidir. Dolayısı ile moment eğrisinde faz geçişleri esnasında meydana gelen çökmelerin oldukça azaldığı görülmektedir.

Çizelge 7.8 Klasik ARM ve TKARM 'da Model 5 'in analiz sonuçlarını göstermektedir. Ortalama moment değerlerine bakacak olursak yaklaşık %21 civarında bir artış görülmektedir. Bu değer önceki çalışmalara uygun olarak elde edilmiştir. Uygulanan 5, 7, 10, 15, 20 A değerleri için elde edilen moment dalgalılık oranları %11.9 ile %22.9 arasında değişmektedir. Dalgalılıktaki iyileşme oranları açısından her iki motoru karşılaştırdığımızda TKARM 'da iyileşme oranları biraz daha düşüktür. Başka bir deyişle TKARM 'da dalgalılık oranı klasik ARM 'una göre biraz daha yüksektir.

Çizelge 7.8 Klasik ARM 'un Model 5 'in analizi ile elde edilen sonuçlar

Model 5	Klasik ARM		TKARM		Değişim	
Akım (i)	%T _d	T _a (Nm)	%T _d	T _a (Nm)	ΔT _r (%)	ΔT _a (%)
5 A	21.7	0.39	19.6	0.48	-2.1	22.5
7 A	18.7	0.75	14.2	0.90	-4.5	19.7
10 A	11.9	1.36	12.8	1.66	0.9	22.0
15 A	18.4	2.57	19.5	3.07	1.1	19.2
20 A	22.9	3.82	23.9	4.60	1.0	20.3

7.7 Sonuçlar

TKARM yeni sargı yapısı magnetik ve elektrik devreyi daha verimli kullanarak, klasik ARM 'a göre ortalama çıkış momentini önemli miktarda arttırmaktadır. Çalışma ilkelerinde önemli değişiklikler meydana getiren bu sargı yöntemine sahip motorun momentindeki dalgalılık oranı, uyarma şekline bağlı olarak doymadan ve faz komütasyonundan kaynaklanan sebepler ile daha şiddetli olmaktadır.

Bu bölümde TKARM 'un moment dalgalılığını azaltmak amacı ile stator ve rotor kutup başlarında parametreler tanımlanıp çeşitli şekiller verilmiştir. Hedef moment eğrisinin hızlı yükselmesini sağlayarak faz geçişleri esnasında meydana gelen çökmeleri en aza indirmektir. Bu amaçla beş ayrı model oluşturulmuş ve oluşturulan bu modeller analiz edilerek dalgalılık

oranları elde edilmiştir. Anma akım için gerçekleştirilen bu analiz neticesinde dalgalılık oranları %12.8 ile %39.7 arasında değişmektedir. Stator ve rotor kutup başlarına herhangi bir şeklin verilmediği Temel Model ile karşılaştırıldığında yaklaşık moment dalgalılık oranında %22.6 'lık bir iyileşme elde edildi. Dolayısı ile Model 5 ile elde edilen sonuç moment dalgalılığını azaltma açısından oldukça iyi bir sonuçtur. Çalışma karakteristiklerinin çıkartılması amacı ile bu model ayrıntılı olarak analiz edildi ve değişik akım seviyelerinde klasik ARM Temel Modeline göre ortalama moment açısından yaklaşık %26.7 'lik bir artış, klasik ARM Model 5 'e göre ise %22 'lik bir artış sağlandı.

Daha önceki bölümlerde çıkartılan ve ayrıntılı olarak Ek-1 'de verilen akı yolu haritalarının incelenmesi sonucu varılan öngörüye uygun olarak, daha önce yapılan bir çalışma ile klasik ARM 'da elde edilen sonuçlara benzer değerler elde edildi. En iyi sonucu veren Model 5 'in moment eğrisi Fourier Serisine açılarak hem TKARM 'da hem de klasik ARM 'daki uzay harmoniklerini azaltmada ne kadar olumlu sonuç verdiği Temel Modeller ile karşılaştırılarak gösterilmiştir.

Yapılan bu çalışma ile klasik ARM 'un yapısında zaten var olan ve TKARM 'un sargı yapısı itibari ile uyarmaya bağlı olarak şiddetini arttıran momentteki dalgalılık sorununun çözümüne, magnetik devre temel alınarak olumlu bir katkı sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar ile, klasik ARM 'da magnetik devre temelli moment dalgalılığını azaltıcı yöntemlerin, "tek yönlü" uyarma yapısı için TKARM 'una da uyarlanabileceği gösterilmiştir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

TKARM yeni sargı yapısı ile elektrik ve magnetik devreyi daha verimli kullanarak ortalama çıkış momentinde eşdeğer klasik ARM 'lara göre %20-30 kadar artış sağlamakta ve bunu sağlarken çalışma ilkelerinde önemli değişiklikler meydana getirmektedir. Klasik ARM 'da moment öz endüktansın (rotor konumuna göre) değişim oranından elde edilmesine rağmen TKARM 'da fazlar arasında oluşan karşıt endüktansın (rotor konumuna göre) değişim oranından elde edilmektedir. Uygun stator ve rotor kutup genişliğine sahip motorun seçilmesi ile fazlara ait öz endüktansın (rotor konumuna göre) değişimi yaklaşık olarak sabittir. Dolayısı ile moment üretimine katkısı ihmal edilebilecek düzeydedir.

TKARM üstünlüğüne karşın iki olumsuz yanı beraberinde getirmektedir. Bunlardan ilki makinede üretilen akının sadece rotor konumuna ve bir faza değil aynı zamanda diğer fazlarda bağlı olmasından kaynaklanan analitik modeldeki karmaşıklığın artmasıdır. İkincisi ise zaten klasik ARM 'un yapısında var olan fakat yeni sargı yapısında da uyarmaya bağlı olarak şiddetini arttıran, moment dalgalılık oranının yüksek olmasıdır. Bu durum makinedeki gürültü miktarının artması anlamına gelmektedir

Çalışmanın hedefi magnetik devreyi temel alarak TKARM 'un moment dalgalılığını azaltmaktır. Klasik ARM üzerine bir çok yöntem uygulanarak değişik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar genel olarak kontrol temelli ve magnetik devre temelli çalışmalar olarak iki kısma ayrılmaktadır. Kontrol temelli çalışmalarda akım hedeftir ve değişik algolitmalar kullanılarak akımın şekli ile değişiminden yola çıkılarak moment dalgalılığını azaltma yoluna gidilmiştir.

Magnetik devre temelli çalışmalarda ise endüktans hedeftedir ve kutup açısı, kutup genişlikleri, kutup uç parametrelerini değiştirme gibi değişik yöntemler ile endüktansın şekli ve değişiminden yola çıkılarak moment dalgalılığını azaltma yoluna gidilmiştir. Bu çalışmada 6/4 stator ve rotor yapısına sahip klasik ARM, tam kutup adımlı sargı ile modellenerek SEY ile statik analizi gerçekleştirilmiştir.

- İlk olarak TKARM 'un çalışma karakteristikleri, şu ana kadar yapılan çalışmalara uygun olarak elde edilmiştir. Öz endüktansın rotor konumuna göre değişiminin yaklaşık sabit olduğu ve üretilen momentin neredeyse tamamının fazlar arasında oluşan karşıt endüktanstan elde edildiği gösterilmiştir.
- TKARM ve Klasik ARM 'un eşit bakır kayıplarına dayalı analizleri yapılarak, ortalama

momentteki artış ve dalgalılık durumları ortaya konulmuştur. Anma akımında Temel Modelin ortalama momentinde yaklaşık %23.8 'lık bir artış sağlandığı gösterilmiştir. Her ne kadar anma akım için dalgalılık aynı gibi görülse de doymalı bölgede TKARM 'un moment dalgalılığının daha fazla arttığı gösterilmiştir.

- Ayrıca iki motorun akı haritası çıkartılarak akı yolları karşılaştırılmış ve çok küçük farklar dışında akı haritasının tek yönlü uyarma yapısı için benzer olduğu gösterilmiştir. Dolayısı ile klasik ARM 'una uygulanan magnetik devre temelli yöntemin TKARM 'una uygulanması durumunda da benzer sonuçlara ulaşılacağı öngörüsüne varılmıştır.
- Daha önceki çalışmada, Klasik ARM 'unda stator ve rotor kutup başlarında tanımlanan parametreler kullanılarak farklı kutup şekillerine sahip motorlar elde etme yöntemi sayesinde moment dalgalılığını azaltma yoluna gidilmiştir. Uygulanan yöntemdeki temel düşünce, moment eğrilerinin artan ve azalan bölgelerindeki eğimlerini değiştirerek çökme noktalarının daha yukarı seviyelere çıkmasını sağlamak ve böylece momentteki dalgalılığı azaltma olmuştur.
- Farklı kutup başı parametrelerine sahip beş değişik model daha oluşturulmuştur. Stator ve rotor kutup uçlarının hiç değiştirilmediği model Temel Model olarak isimlendirilmiş olup anma akımında yapılan incelemelerde beş modelin moment dalgalılıkları %12.8 ile %39.7 arasında elde edilmiştir.
- En iyi sonucun elde edildiği Model 5 'in ayrıntılı analizi yapılarak incelenmiştir. Analiz sonuçları Temel Model ile karşılaştırılmış ve karşıt endüktans eğrilerinin köşelerinde meydana gelen sert dönüşlerin yumuşadığı, ayrıca tanımlanan parametreye uygun olarak tepe değerinin 5° kaydığı gösterilmiştir.
- Model 5 için elde edilen moment eğrisindeki çökme noktaları yukarı seviyelere çıkığı için momentteki dalgalılık oranı %12.8 olarak elde edilmiştir. Temel Modelde elde edilen dalgalılık değeri ile karşılaştırıldığında %22.6 'lık bir iyileşme sağlanmıştır.
- Anma akımında ki Model 5 ile Temel Model 'in ortalama momentleri karşılaştırıldığında %2.5 'luk bir moment artışı elde edilmiştir.
- TKARM Model 5 ortalama moment değeri, klasik ARM ortalama moment değeri ile karşılaştırıldığında ise elde edilen artış %26.7 olarak belirlenmiştir.
- TKARM ve klasik ARM 'un Temel Model ve Model 5 moment eğrileri Fourier Serisine

açılarak, uygulanan yöntemin sadece yüksek dereceli harmonikleri değil aynı zamanda düşük dereceli harmonikleri de azaltmada oldukça etkili olduğu gösterilmiştir.

Yapılan çalışma sonucu Tam Kutup Adımlı Anahtarlamalı Relüktans Motorun dalgalılık olayı literatürde ilk kez incelenmiş olup, moment dalgalılık sorunun çözümünde önemli adımlar atılmıştır. Çalışma bu yönü ile özgünlük arz etmektedir.

Bu çalışmanın devamı olarak yapılabilecek araştırmalar aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- TKARM modeli oluşturulur iken sargı sonu etkisi modele dahil edilmemiştir. Oysa TKARM 'da artan sargı uzunluğundan dolayı bu etkinin önemli miktarda olacağı düşünülmektedir. Dolayısı ile sargı sonu etkisinin modele dahil edildiği bir çalışma yapılabilir ve motor performansına etkisi araştırılabilir. Fakat böyle bir çalışma için 3-boyutlu bir modellemeye ihtiyaç duyulacaktır.
- TKARM 'un dinamik analizi gerçekleştirilebilir. Bu amaçla daha önce yapılan yayınlarda verilen dönüşüm ifadesi kullanılarak motorun dinamik analizi yapılabilir. Yalnız SEY ile model oluşturulur iken hava aralığının motorun dönmesine engel teşkil etmeyecek şekilde tasarlanması gerekmektedir. Ayrıca yeni sargı yapısına sahip motorda kullanılan bakır oranı arttığı için SEY ile motorun ısısal analizi gerçekleştirilerek makinenin ısısal sınırı belirlenir.
- TKARM 'un moment dalgalılığını azaltmak amacı ile magnetik devreyi temel alan başka çalışmalarda yapılabilir. Stator ve rotor genişlikleri parametreler ile tanımlanabilir ve buradan moment dalgalılığının an aza indiği stator ve rotor kutup genişlikleri belirlenebilir. Yine kutup açıları parametreler ile tanımlanabilir ve bu parametrelerin değiştirilmesi ile moment dalgalılığında iyileşme sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Açıkgöz H., "Üç Fazlı Sincap kafesli Asenkron Motorun ANSYS ve Flux2D Hazır Paket Programları İle Performanslarının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 1998.
- ANSYS Inc., ANSYS 5.4 Theory Manual, Specified Server Code: 15872/7930 4385 3199 8160 6311 1, 1996
- Arkadan A. A., Kielgas B. W., "Switched Reluctance Motor Drive Systems Dynamic Performance Prediction and Experimental Verification", IEEE Trans. on Energy Conversion, 1994, Vol. 9, No. 1, pp. 36-44
- Arumugam R., Lowther D. A., Krishnan R. and Lindsay J.F., "Magnetic Field Analysis of a Switched Reluctance Motor Using a Two Dimensional Finite Element Model", IEEE Tran. on Magnetics, March 1997, Vol. Mag-21, pp. 1883-1885
- Ashour H., Williams B., "Sliding Mode Control of a Shifted Fully Pitched Switched Reluctance Machine", Proc. 5th ICEMS'01, 2001, Vol. 2, pp. 1042-1052
- Barrass P. G., Mecrow B. C., Clothier A.C., "Bipolar Operation of Fully-Pitched Winding Switched Reluctance Drives", Electric Machines and Drives, September 1995, No. 412, pp. 433-437, Durham, U.K.
- Cameron D. E., Lang J. H., Umans S. D., "The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Dubly Salient Variable-Reluctance Motor", IEEE Trans. on Industry Applications, 1992, Vol. 28, No. 6.
- Cameron D.E., "The Origin of Acoustic Noise in Variable Reluctance Motors", Proc. IAS Conference, 1989; pp. 108-115, San Diego, USA.
- Chenadec L., Geoffroy J. Y., Multon M., Mouchoux J. C., "Torque Ripple Minimisation in Switched Reluctance Motors by Optimisation of Current Wave-Forms and of Tooth Shape With Copper Losses and V.A.Silicon Constraints", Proc. ICEM'94, 1994. pp.559-564.
- Clothier A.C., Mecrow B. C., "Inverter Topologies and Current Sensing Methods for Short Pitched and Fully Pitched Winding SR Motors", APEC 14th Annual Conference, 1999, Vol. 1, pp. 416-423, Dallas, TX, USA.
- Corda J. B., "Computation of Torque Pulsations of Switched Reluctance Drive", Proc. Of Conference on Electrical Machines and Drives, pp. 308-311, London, UK.
- Davis R. M. And Al-Bahadly I., "Experimental Evaluation of Mutual Inductances in a Switched Reluctance Motor", IEE Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, No. 324, pp. 337-347.
- Davis R: M., "Variable Reluctance Rotor Structures-Their Infufluence on Torque Production", IEEE Trans. on Industry Electronics, 1992, Vol. 39, No. 2, pp. 168-174
- Dawson G. E., Easstham A. R., and Mizia J., "Switched Reluctance Motor Torque Characteristics:Finite Element Method and Test Results", IEEE IAS Annual Meeting, 1986, Part I, 86 CH 2272-3, pp 864-869
- Derdiyok A., "Anahtarlmalı Relüktans Motorun Dinamiğinin İncelenmesi Ve Çıkış

Performansının İyileştirilmesi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1996.

Derdiyok A., Inanc N., Ozbulur V., Ozoglu Y., “Optimal Phase Current Profiling of SRM by Fuzzy Logic Controller to Minimize Torque Ripple”, Proc. 12th IEEE-ISIC 97, 1997. pp.77-82.

Goldenberg A. A., Lamiado I., Kuzan P., Zhou C., “Control of Switched Reluctance Motor Torque for Force Control Applications”, IEEE Trans. on Industrial. Electronics, 1994, Vol.4, No.4, pp.461-466.

Kalenderli Ö., “Sonlu Elemanlar Yöntemi Ders Notları”, İstanbul Teknik Üniversitesi, 1996.

Kim K.B. “Field Analysis of Low Acoustic Noise Switched Reluctance Motor”, IEEE Trans. on Magnetics, 1997, Vol. 33, No. 2, pp. 2026-2029

Koibuchi K., Ohno T., and Sawa K., “A Basic Study for Optimum Design of Switched Reluctance Motor by Finite Element Method”, IEEE Trans. on Magnetics, 1997 Vol.33, No.2, pp.2077-2080.

Kokernak J. M., “Performance Characterization Of A High Power Density Switched Reluctance Machine”, PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, USA, December 1997.

Kokernak J. M., Torrey D. A., “Magnetic Circuit Model for the Mutually Coupled Switched Reluctance Machine”, IEEE Tran. on Magnetics, March 2001, Vol. 36, No. 2, pp. 500-507

Kosaka T., Matsui N., “Position Sensorless Control of General Purpose Inverter-Fed Fully-Pitched Winding Reluctance Motor Drives”, Proc. Industry Applications Conference, 2000, Vol. 3 pp.1745-1750, Roma, Italy

Krishnan R., Arumugam R. and Lindsay J.F., “Design Procedure for Switched Reluctance Motors”, IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 24, No. 3, pp. 454-460

Lai H.C., Leonard P.J. Rodger D., Allen N., “3D Finite Element Dynamics Simulation of Electrical Machines Coupled to External Circuit”, IEEE Trans. on Magnetics, 1997, Vol. 33, No. 2, pp. 2010-2013

Lawrenson P. J., Stephenson J. M., Blenkinsop P. T., Corda J., and Fulton N. N., “Variable Speed Reluctance Motors”, IEE Proc. Inst. Elect. Eng., 1980, Vol. 127, pt. B, pp. 253-265.

Le Chenadec J.Y., Geoffroy M., Multon B., and Mouchoux L.C., “torque Ripple Minimisation in Switched Reluctance Motors by Optimization of Current Wave-Forms and of Tooth Shape with Copper Losses and V.A. Silicon Constrains”, ICEM-94 Conference, 1994, pp.559-564

Li S. H-Y., Liang F., Zhao Y., Lipo T. A., “A Doubly Salient Doubly Excited Variable Reluctance Motor”, IEEE Tran. on Industry Applications, January/February 1995, Vol. 31, No. 1, pp. 99-106

Li S., Liang F., Zhao Y., and Lipo T., “A Doubly Salient Doubly Excited Variable Reluctance Motor”, IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, Vol.31, No.1,

Li Y., Tang Y., “Switched Reluctance Motor Drives with Fractionally-Pitched Winding Design”, Emerson Motor Cor., Patent Çalışması, Vol. 2, pp. 875-880, St. Louis, MO., USA.

Liang F., Liao Y., Lipo T., “A New Variable Reluctance Motor Utilizing an Auxiliary

Commutation Winding" Proc. IEEE Industry Applications, 1995, Vol. 31, No. 1,

Low T. S., Lin H., Chen S. X., "Analysis and Comparison of Switched Reluctance Motors with Different Physical Sizes Using A 2D Finite Element method", IEEE Tran. on Magnetics, November 1995, Vol. 31, No. 6, pp. 3503-3505

Mecrow B. C., "Fully-Pitched Winding Switched Reluctance and Stepping Motor Arrangements", IEE Part B, 1993, Vol.140, No.1, pp. 61-70.

Mecrow B. C., "New Winding Configuration For Doubly Salient Reluctance Machines", IEEE Trans. on Industry Applications, 1996. Vol32, No.6, pp.1348-1356.

Mecrow B. C., Barrass P. G., Clothier A.C., Weiner C., "Drive Configurations for Fully-Pitched Winding Switched Reluctance Machines", IAS Annual Meeting, 1988, Vol. 1, pp. 563-570, St. Louis, MO, USA.

Mecrow B. C., Weiner C., Clothier A. C., "The Modelling of Switched Reluctance Machines With Magnetically Coupled Windings", IEEE Tran. on Industry Applications, November/December 2001, Vol. 37, No 6, pp. 1675-1683

Michaelidas A. M., Pollock C., "Modelling and Design of Switched Reluctance Motors with Two Phases Simultaneously Excited" IEE Proc. Electric Power Applications, September 1996, Vol. 143, No. 5, pp. 361-370

Miles A. R., "Design of a 5 MW, 9000V Switched Reluctance Motor", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 6, No. 3, pp. 484-491

Miller T. J. E., "Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives", 1993, Oxford University Press, Oxford.

Miller T. J. E., "Converter Volt-Ampere Requirements of the Switched Reluctance Motor Drive", IEEE Trans. on Industry Applications, 1985, Vol. 21, No. 5, pp. 1136-1144

Miller T. J. E., "Switched Reluctance Motors and Their Control", 1993, Oxford University Press, Oxford.

Miller T. J. E., "Fault and Unbalance Forces in the Switched Reluctance Machine", IEEE Trans. on Industry Applications, 1995, Vol. 31, No. 2, pp. 319-325

Mizia J., Adamiak K., Eastham A. R., Dawson G. E., "Finite Element Force Calculation: Comparison Of Methods For Electric Machines", IEEE Tran. on Magnetics, January 1988, Vol. 24, No. 1, pp. 447-450

Moallem M., Ong C. M., "Predicting the Torque of Switched Reluctance Machine From Its Finite Element Field Solution", IEEE Tran. on Energy Conversion, December 1990, Vol. 5, No. 4, pp. 733-739

Moallem, M., Ong, C. M., and Unnewehr, L. E., "Effect of Rotor Profiles on the Torque of a Switched Reluctance Motor", IEEE Trans. on Industry. Applications., 1992 Vol.28, No.2, pp.364-369.

Moghbelli H., Adams G. E. And Hoft R. G., "Performance of a 10-Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors", IEEE Trans. on Industry Applications, 1991, Vol. 27, No. 3, pp. 531-538

Moreira J.C., "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motors Via Bi-Cubic

Spline Interpolation, PESC-92 Conference, 1992, pp.851-856

O'donovan J. G., Roche P. J., Kavanagh R. C., Egan M. G., and Murphy J. M. D., "Neural Network Based Torque Ripple Minimisation in a Switched Reluctance Motor", Proc. IECON'94, 1994, pp.1126-1231.

Ohdachi Y., Kawase Y., Miura Y., Hayashi Y., "Optimum Design of Switched Reluctance Motors Using Dynamic Finite Element Analysis", IEEE Tran. on Magnetics, March 1997, Vol. 33, No. 2, pp. 2033-2036

Orthmann R., Schoner H. P., "Turn-off Angle Control of Switched Reluctance Motors for Optimum Torque Output", 1993, EPE-93 Conference, pp.20-25

Osheba S. M. And Aabdel-Kader F M., "Dynamic Performance Analysis of Reluctance Motors Using Damping and Synchronising Torques", IEE Proc. Vol. 137, Part B, No. 4, pp. 231-238

Ozbulur V., Bilgiç M. O., Sabanovic A., "Torque Ripple Reduction of a Switched Reluctance Motor", IEEE-IPEC Conference, 1995, pp. 550-567

Özoglu Y., "Anahtarlamaalı Relüktans Motorunda Kutup Başlarına Şekil Vererek Moment Dalgalanmasının Azaltılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, Ocak 1999.

Pelikant A., Wiak S., "Influence of the Rotor Pole Shape on the Static and Dynamics Characteristics of Switched Reluctance Motor", IEEE Trans. on Magnetics, 1996, Vol. 32, No. 3, pp. 1529-1532

Preston M. A., Lyons J. A., "A Switched Reluctance Motor Model with Mutual Coupling and Multi Phase Excitation", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 27, No. 6, pp. 5423-5425

Radun A. V. "Design Considerations for the Switched Reluctance Motor", IEEE Trans. on Industry Applications, 1995, Vol. 31, No. 5, pp. 1079-1087

Ray W. F., Davis R. M. And Blake R. J., "The Control of SR Motors", CAMC-Conference, 1986, pp. 51-59.

Rochford C., Kavanagh R. C., Egan M. G., and Murphy J. M. D., Development of Smooth Torque in Switched Reluctance Motors Using Öz-Learning Techniques, Proc. EPE'93, 1993 pp.14-19.

Sadowski N., Lefevre Y., Neves C. G. C., Carlson R., "Finite Element Coupled Electrical Circuit Equations in the Simulation of Switched Reluctance Drive: Attention to Mechanical Behaviour", IEEE Trans. on Magnetics, 1996, Vol. 32, No. 3, pp. 1086-1089

Schramm D. S., Williams B. W., Green T. C., "Torque Ripple Reduction of Switched Reluctance Motors by Phase Current Optimal Profiling", Proc. PESC'92, 1992, pp.857-860.

Stephenson J. M., El-Khazendar M. A., "Saturation in Doubly Salient Reluctance Motors", Proc. IEE, Vol. 136, Part B, No. 1, pp.50-58

Suriano J. R., and Ong C.M., "Variable Reluctance Motor Structures for Low-Speed Operation", IEEE Trans. on Industry Applications, 1996, Vol. 32, No. 2, pp. 345-353

Tang Y. T., KlineOng J. A., 1996, "Modelling and Optimization Switched Reluctance Machine by Boundary Element Analysis and Simulation", IEEE Trans. on Energy Conversion,

1996, Vol. 11, No. 4, pp. 673-680

Tang Y., "Switched Reluctance Motor with Fractionally Pitched Windings and Bipolar Currents", Proc. 33th IAS Annual Meeting, 1998, Vol. 1, pp. 351-358, St. Louis, MO, USA

Torey D. A., Niu X. M., Unkauf E. J. "Analytical Modelling of Variable Reluctance Machine Magnetization Characteristics", IEE, Proc. Part B., Vol. 142., No.1

Torrey D. A. and Lang J. H., "Modelling a Nonlinear Variable Reluctance Drive", IEE Proc. Inst. Elect. Eng., 1990, Part. B. pp. 314-326.

Xu L., Lipo T. A. and Rao S. C., "Analysis of a New Variable-Speed Singly Salient Reluctance Motor Utilizing Only Two Transistor Switches", IEEE Tans. On Industry Applications, Vol. 26, No. 2, pp. 229-236.

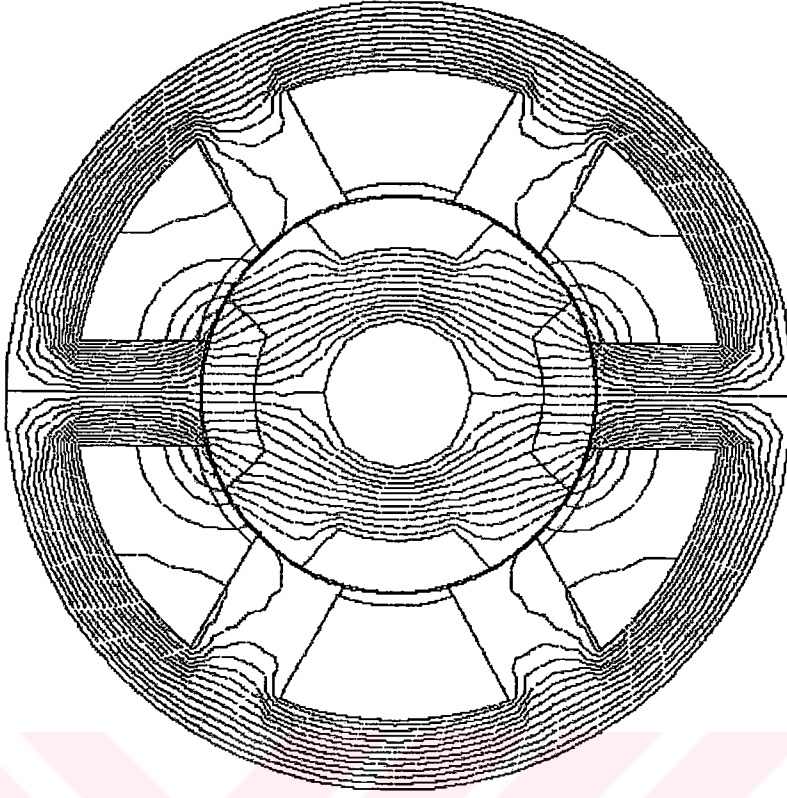
Xu L., Ruckstader E., "Direct Modelling of Switched Reluctance Machine by Coupled Field-Circuit Method", IEEE Trans. on Energy Conversion, 1995, Vol. 10, No. 3, pp. 446-454



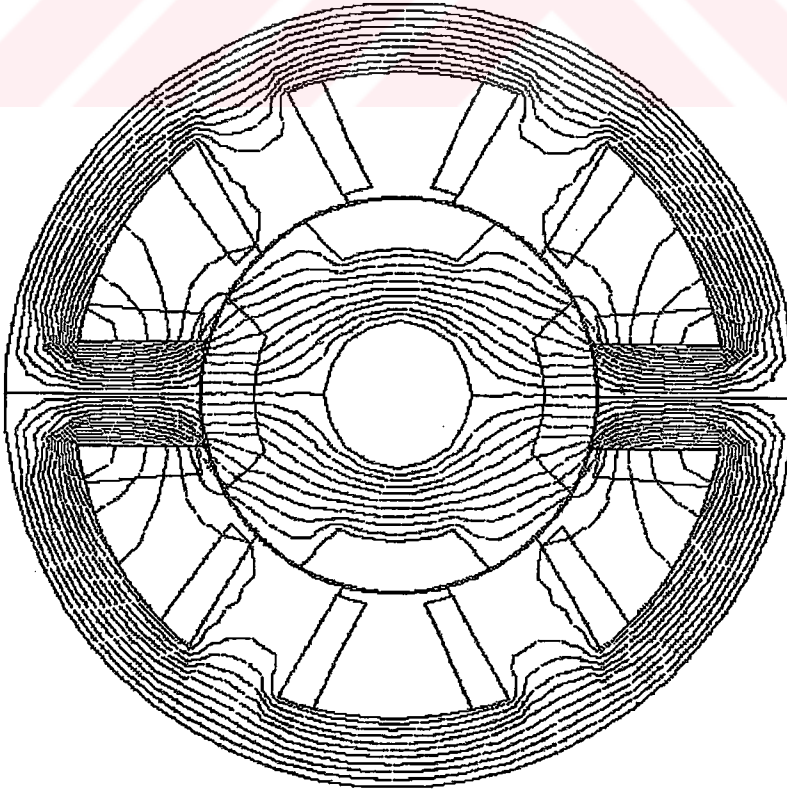
EKLER**Ek-1 TKARM ve Klasik ARM ‘una Ait Akı Yolu Haritaları**

Ek-1 ile verilen akı haritaları eşit seviyedeki akım uyarmaları ile elde edilmiştir. Her iki sargı yapısına sahip ARM için elde edilen bu eğriler, moment dalgalılığını azaltma yönünde kullanılan yöntemin uygulanabilirliği hakkında öngörüle bulunulmasını sağlamıştır.

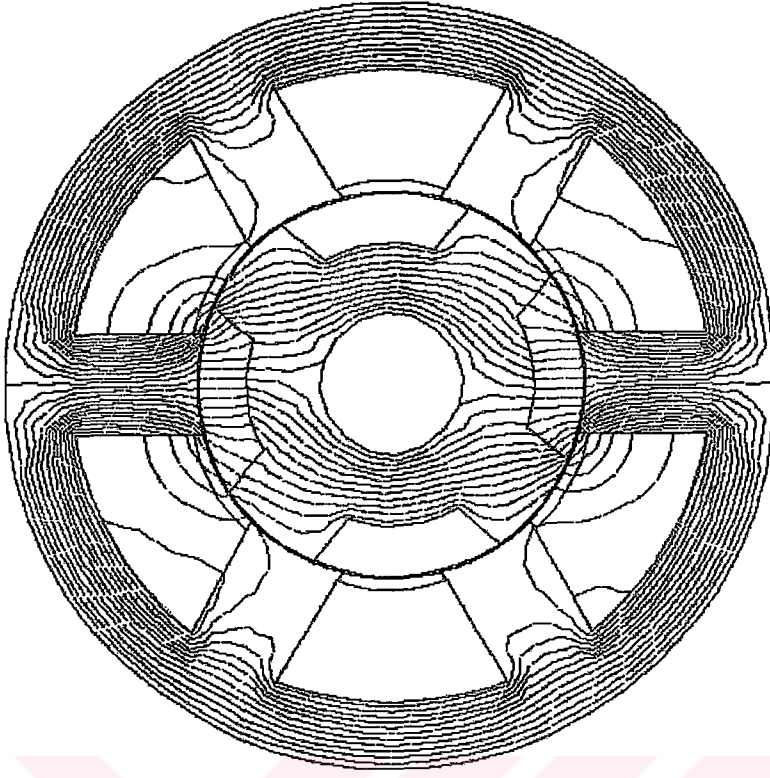




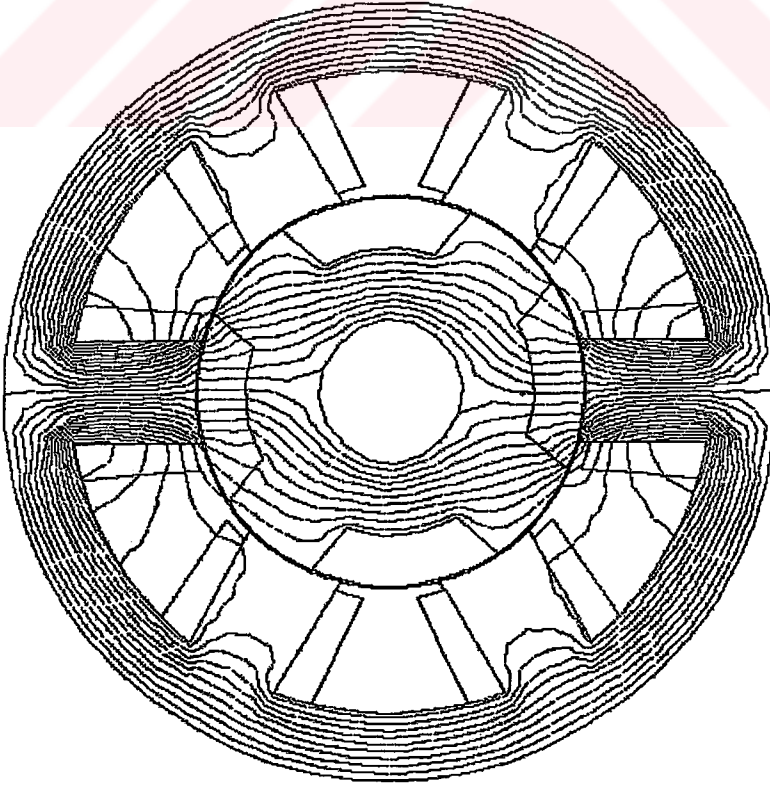
TKARM 45° akı yolu haritası



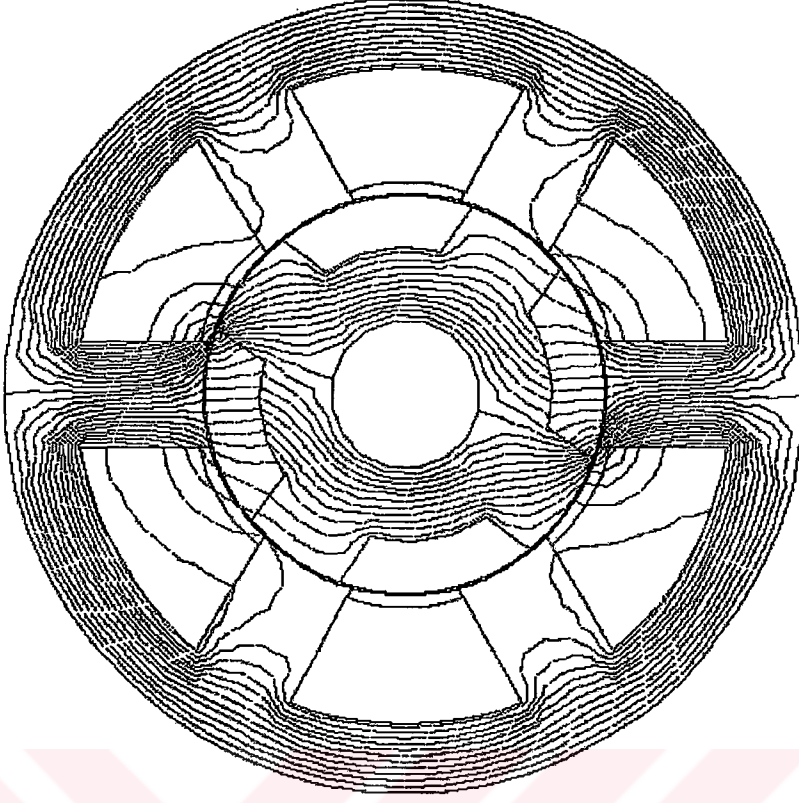
Klasik ARM 45° akı yolu haritası



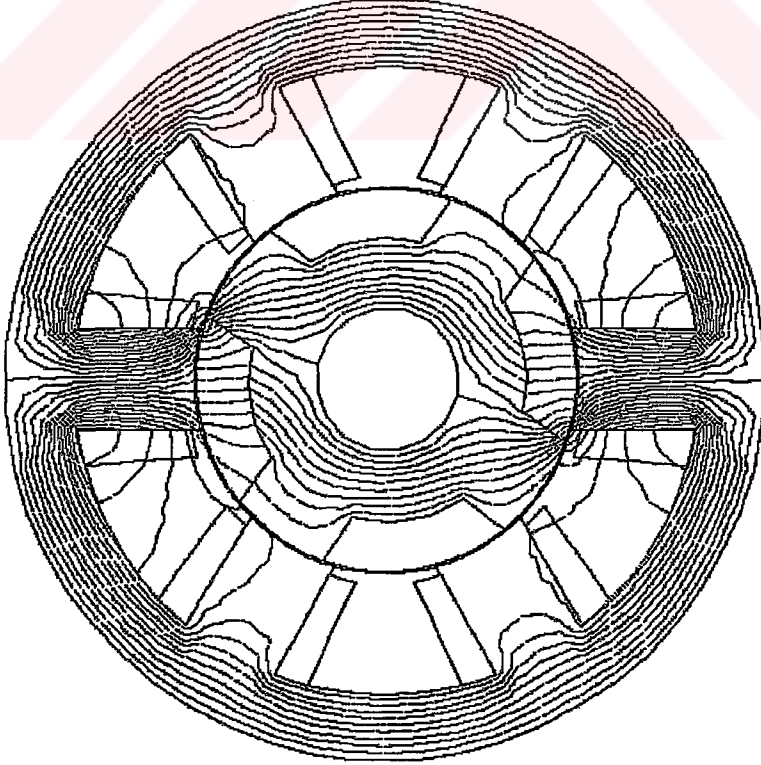
TKARM 50° akı yolu haritası



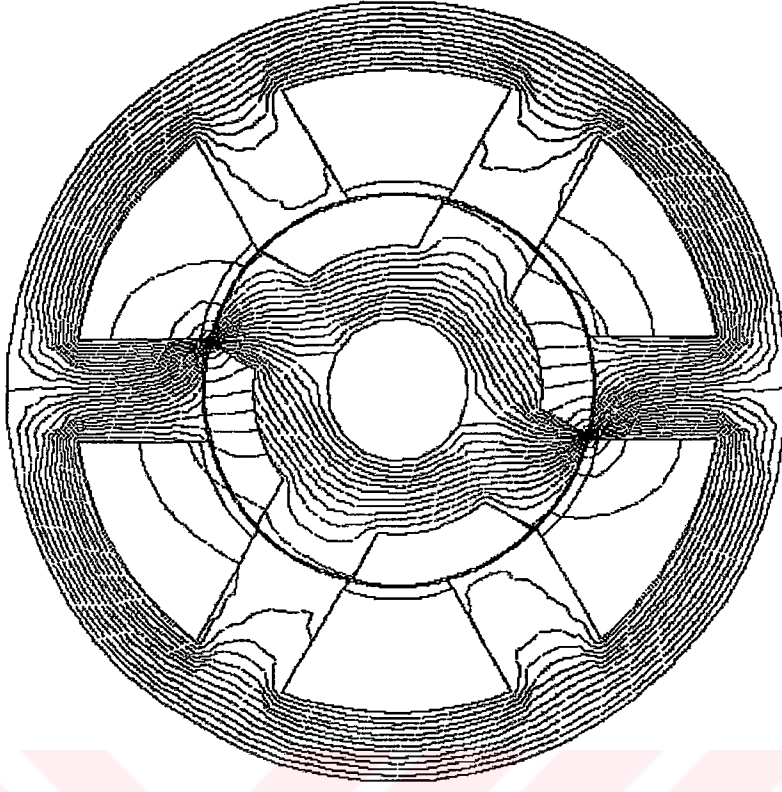
Klasik ARM 50° akı yolu haritası



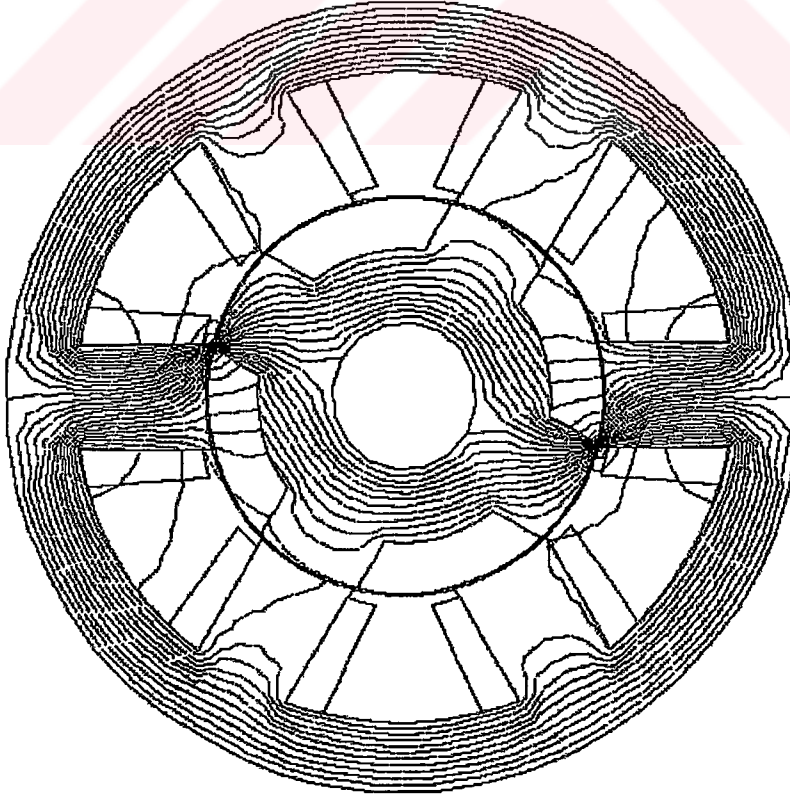
TKARM 55° akı yolu haritası



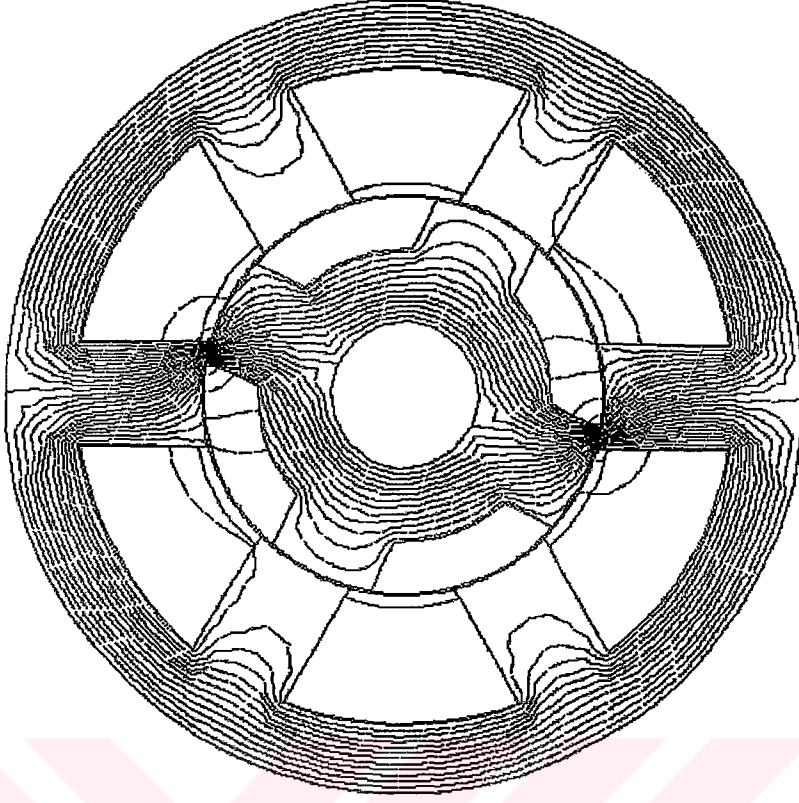
Klasik ARM 55° akı yolu haritası



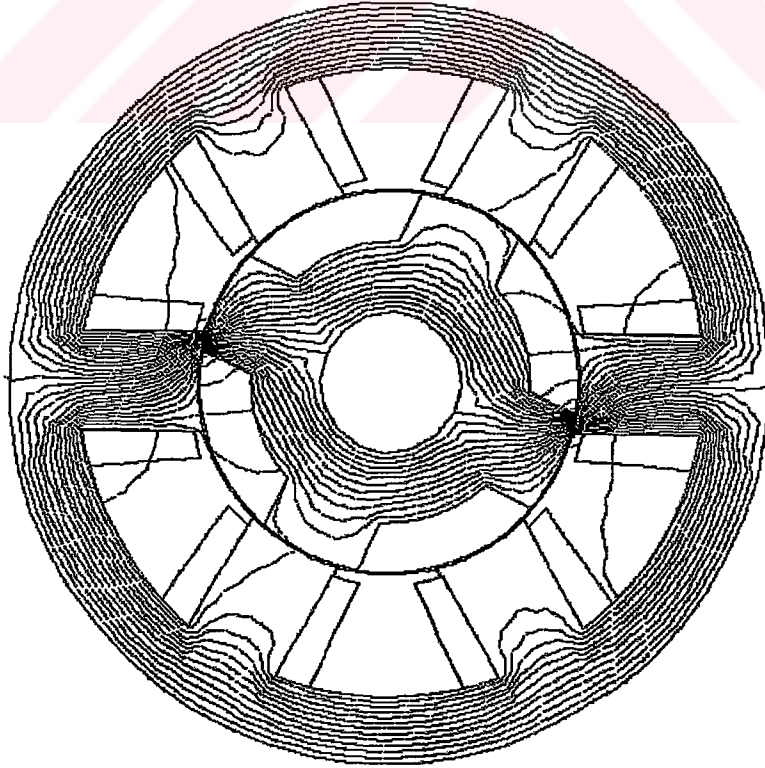
TKARM 60° akı yolu haritası



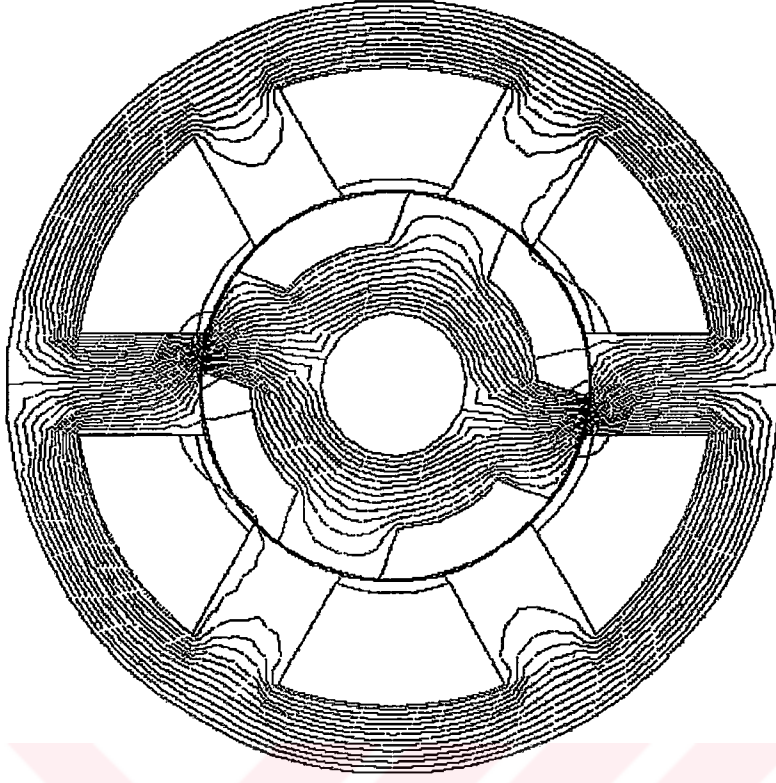
Klasik ARM 60° akı yolu haritası



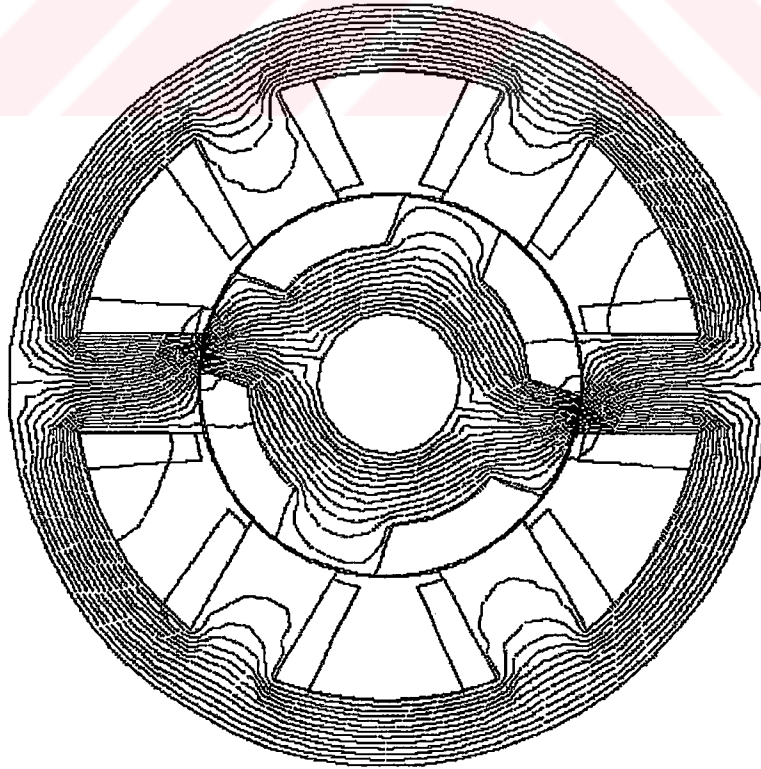
TKARM 65° akı yolu haritası



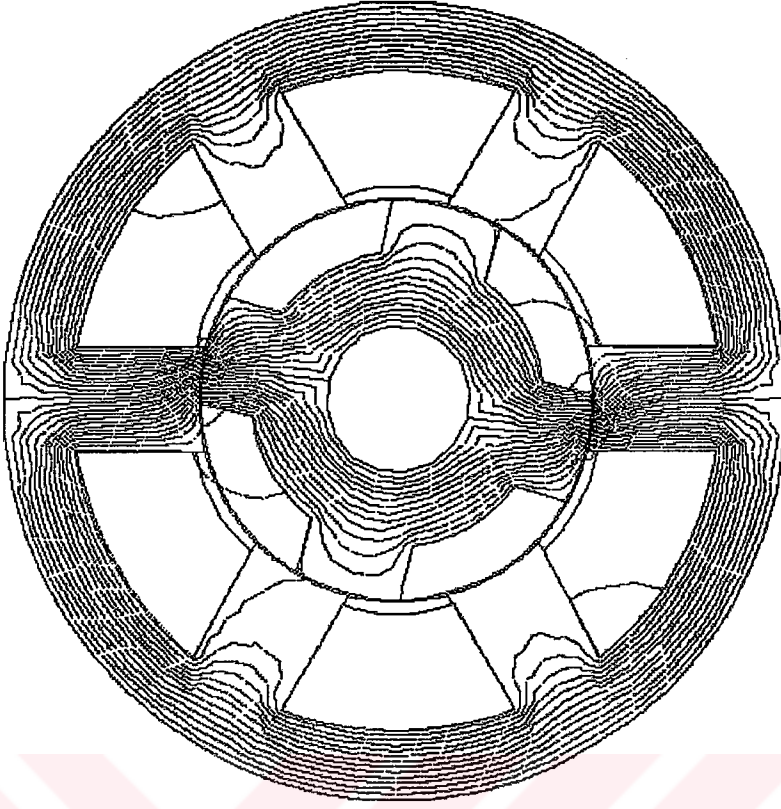
Klasik ARM 65° akı yolu haritası



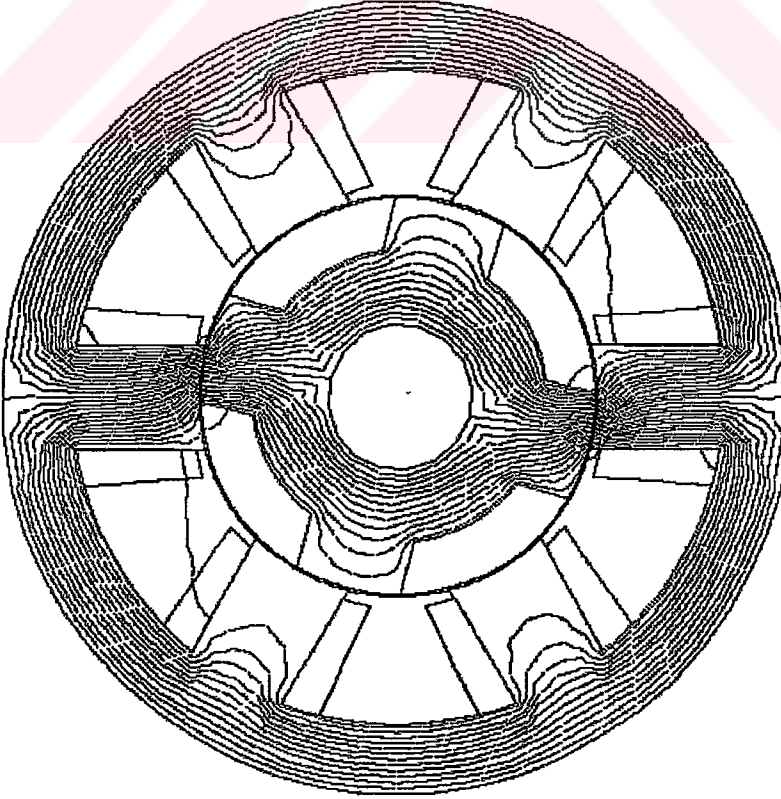
TKARM 70° akı yolu haritası



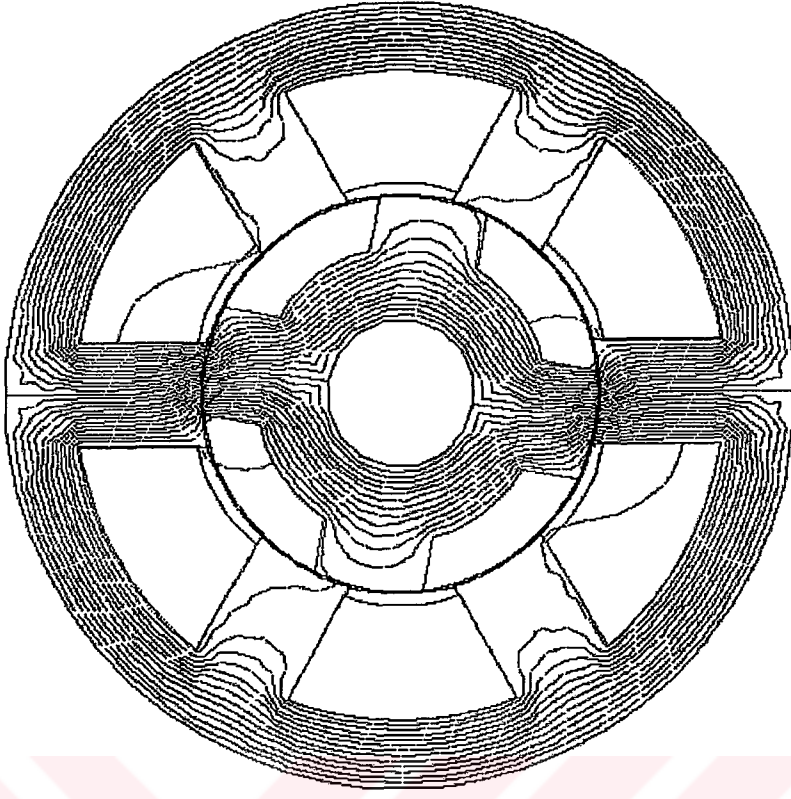
Klasik ARM 70° akı yolu haritası



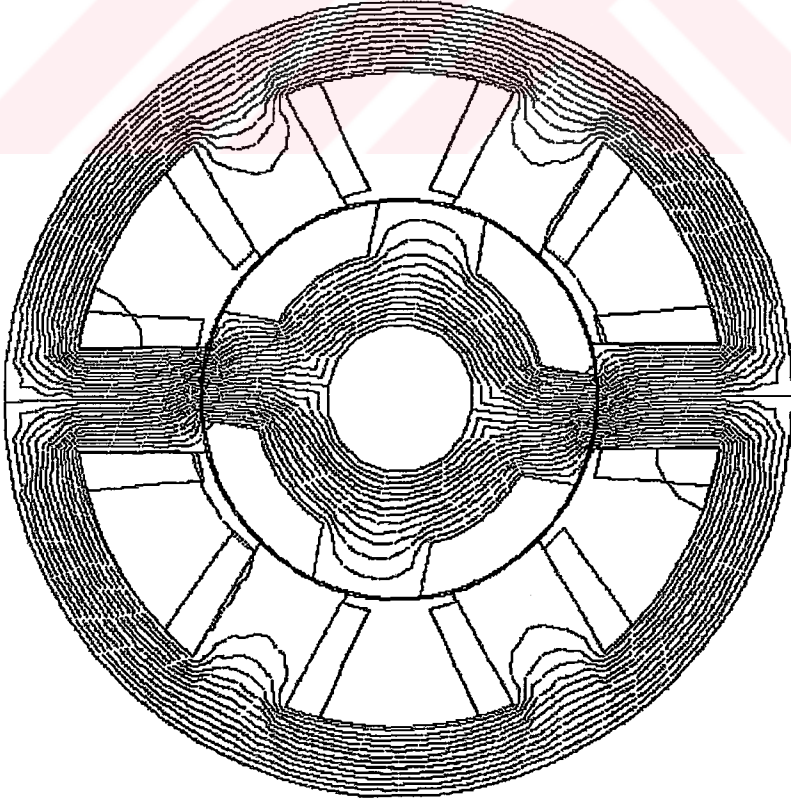
TKARM 75° akı yolu haritası



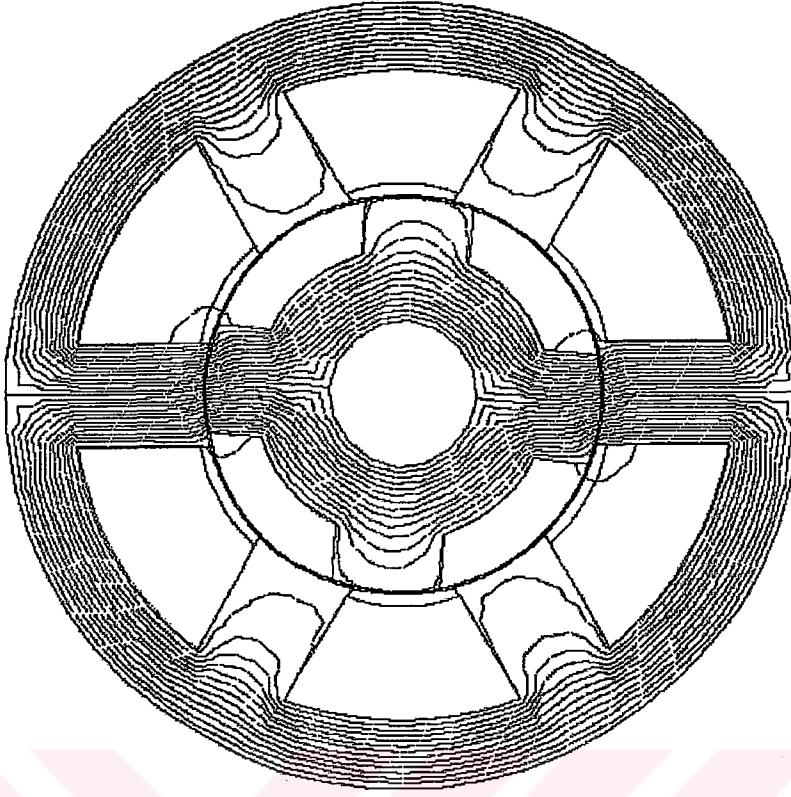
Klasik ARM 75° akı yolu haritası



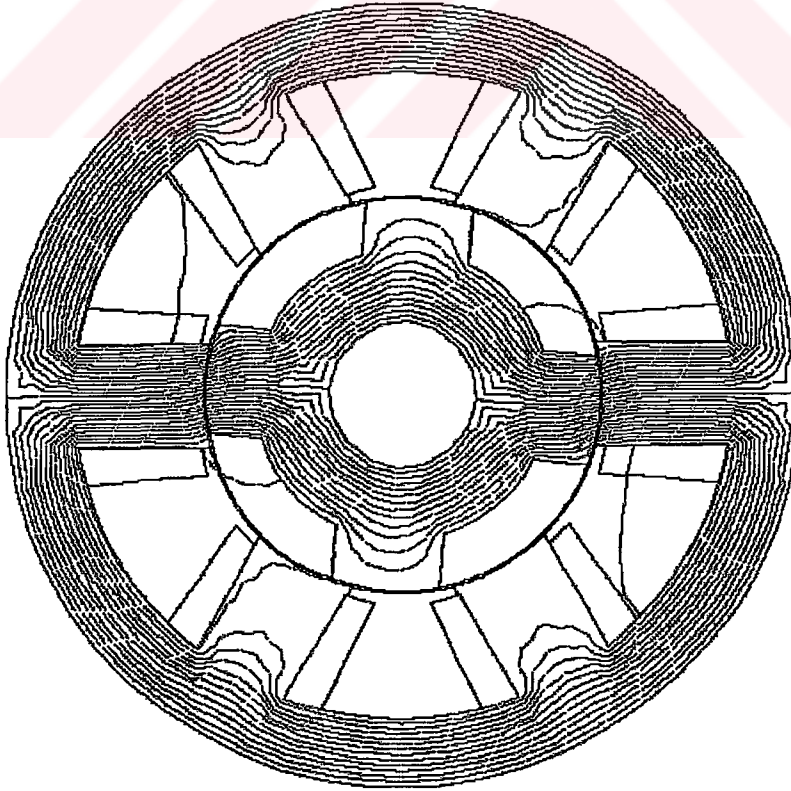
TKARM 80° akı yolu haritası



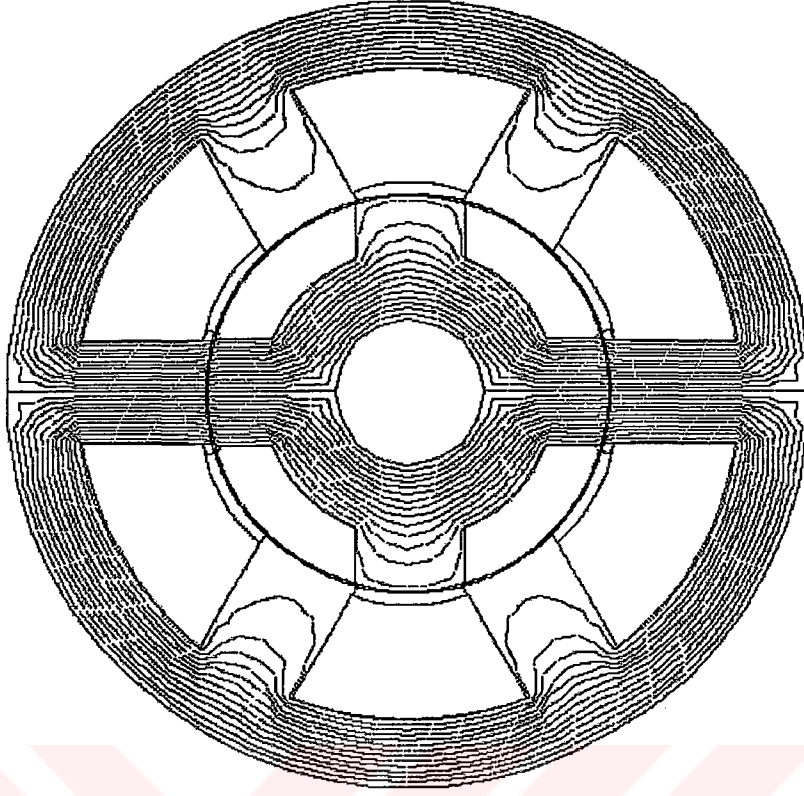
Klasik ARM 80° akı yolu haritası



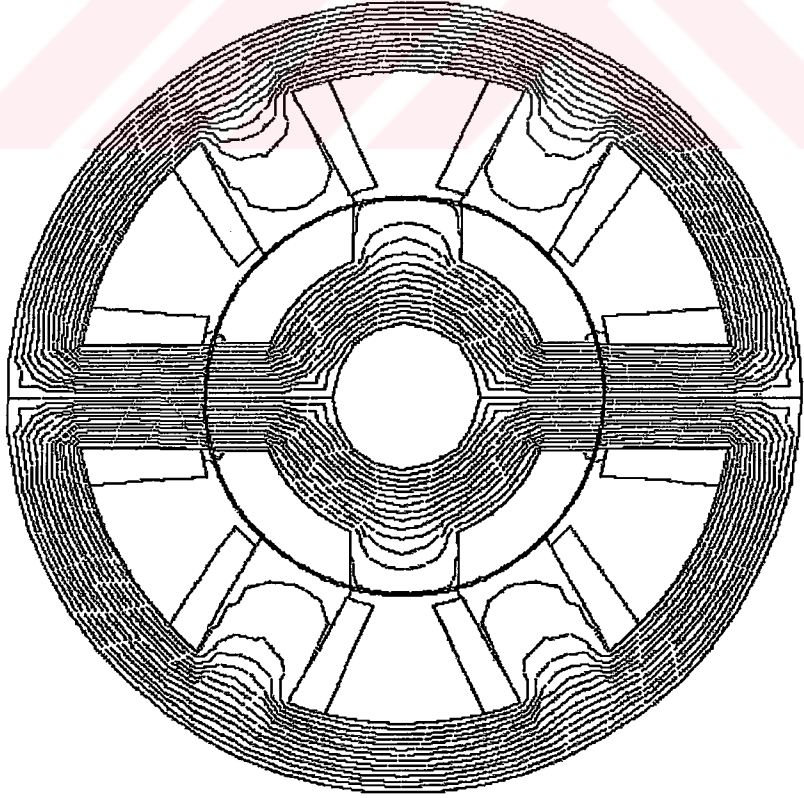
TKARM 85° akı yolu haritası



Klasik ARM 85° akı yolu haritası



TKARM 90° akı yolu haritası

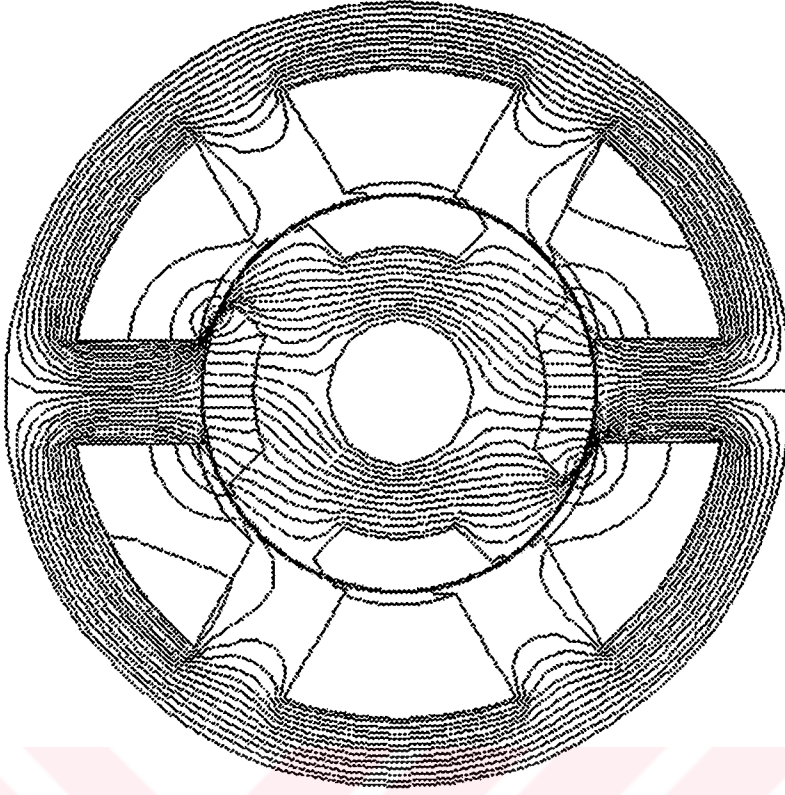


Klasik ARM 90° akı yolu haritası

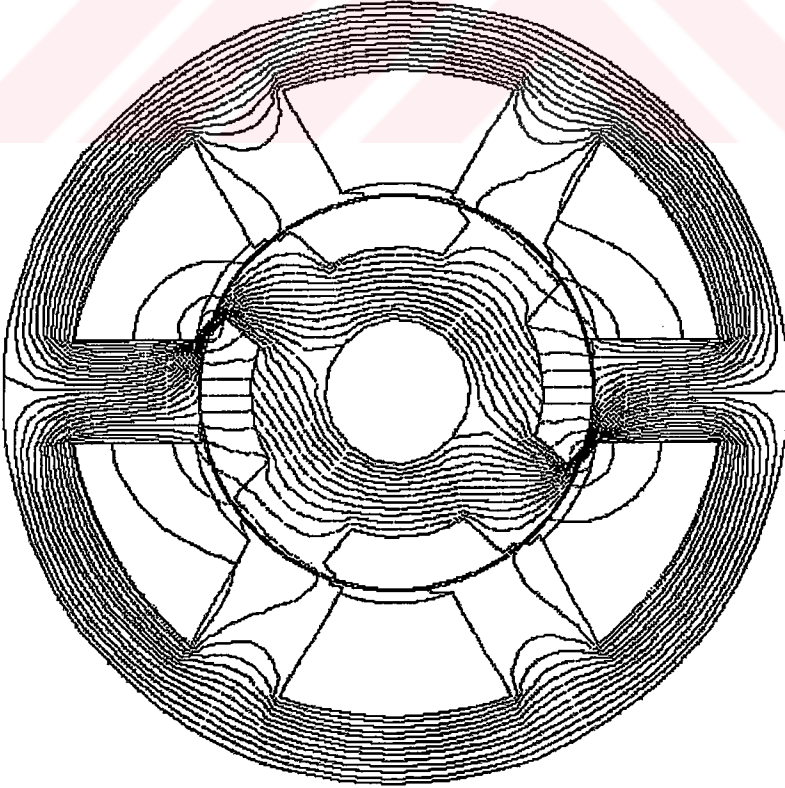
Ek-2 TKARM 'da Model 5 'e Ait Akı Yolu haritası

TKARM 'da moment dalgalılığında en iyi iyileşmenin elde edildiği Model 5 'e ait akı yolu haritası çıkarılmıştır.

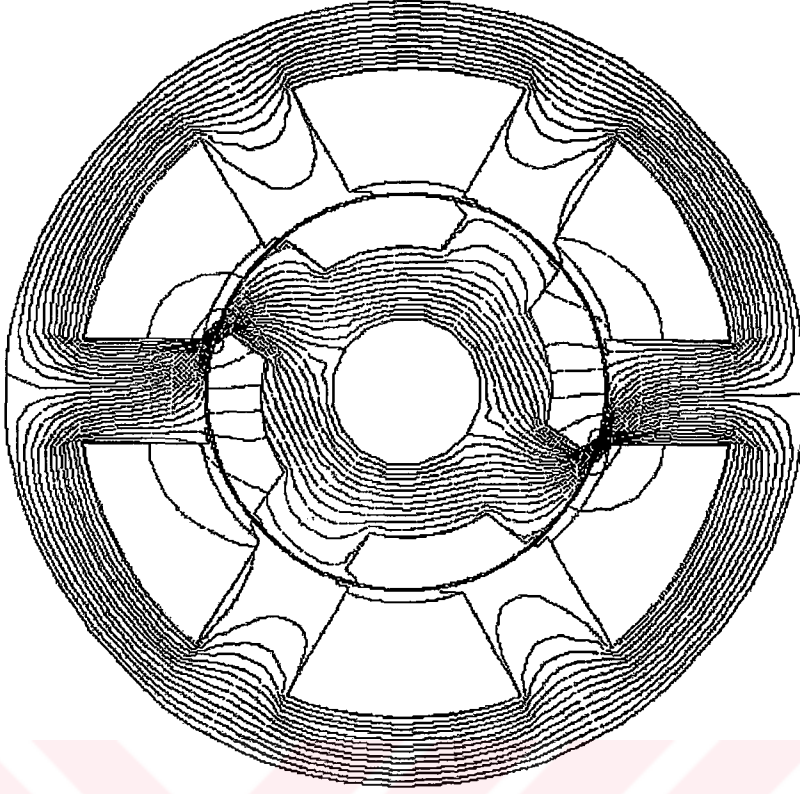




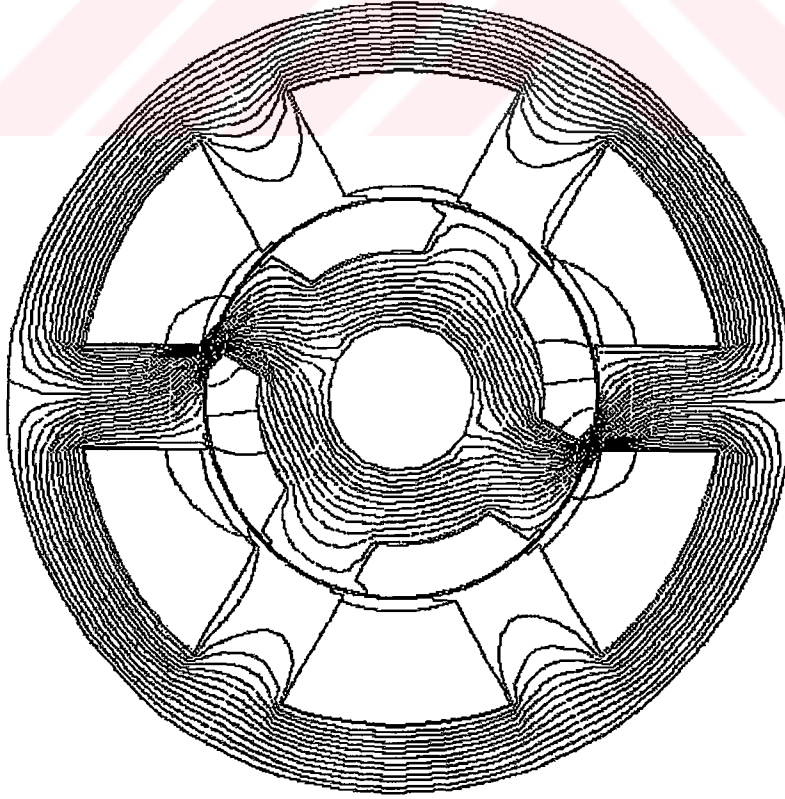
TKARM Model 5 'e ait 45° akı yolu haritası



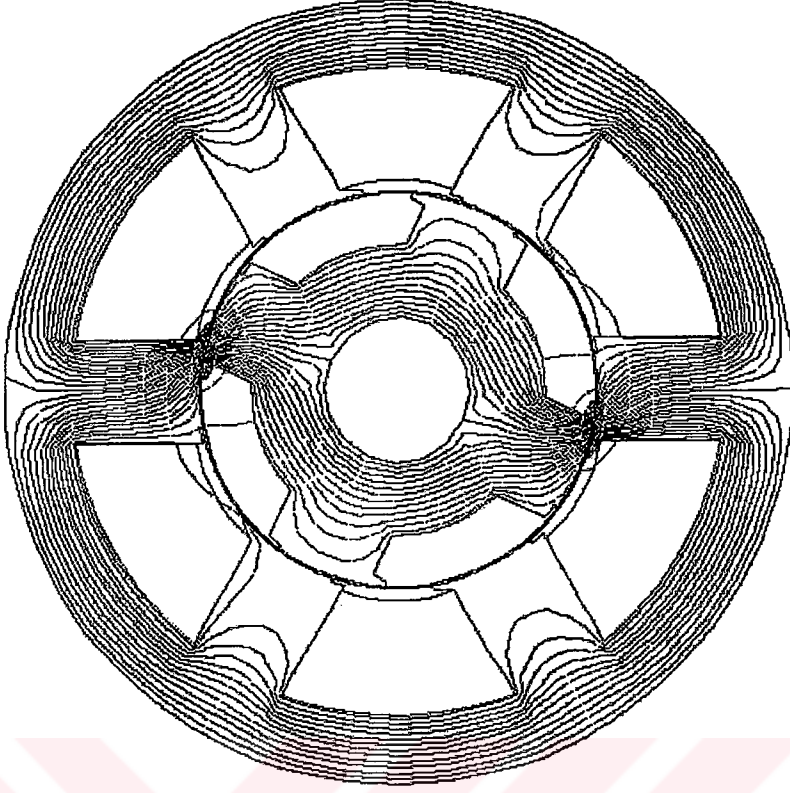
TKARM Model 5 'e ait 50° akı yolu haritası



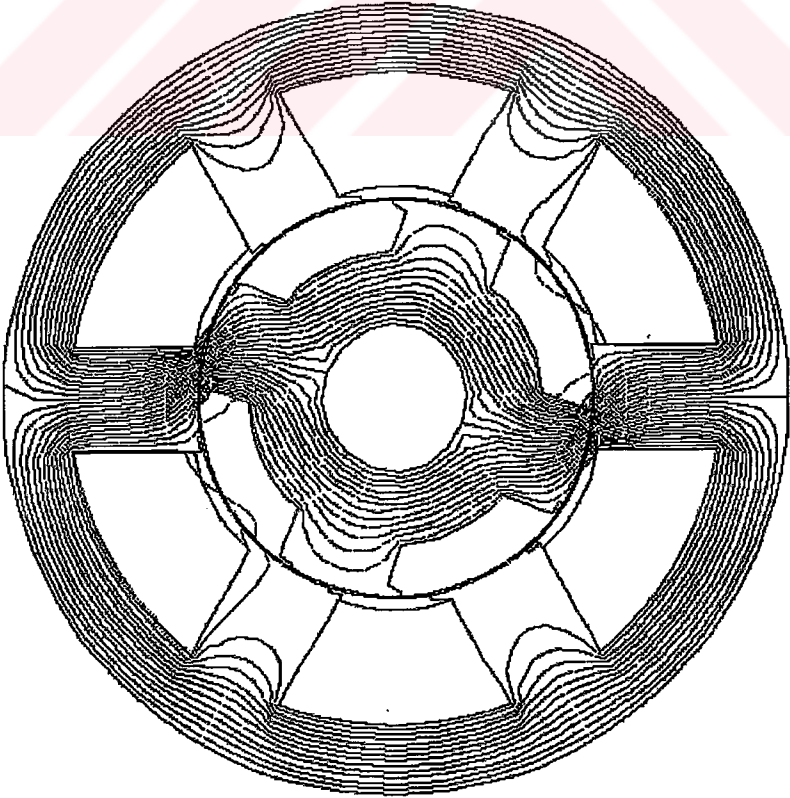
TKARM Model 5 'e ait 55° akı yolu haritası



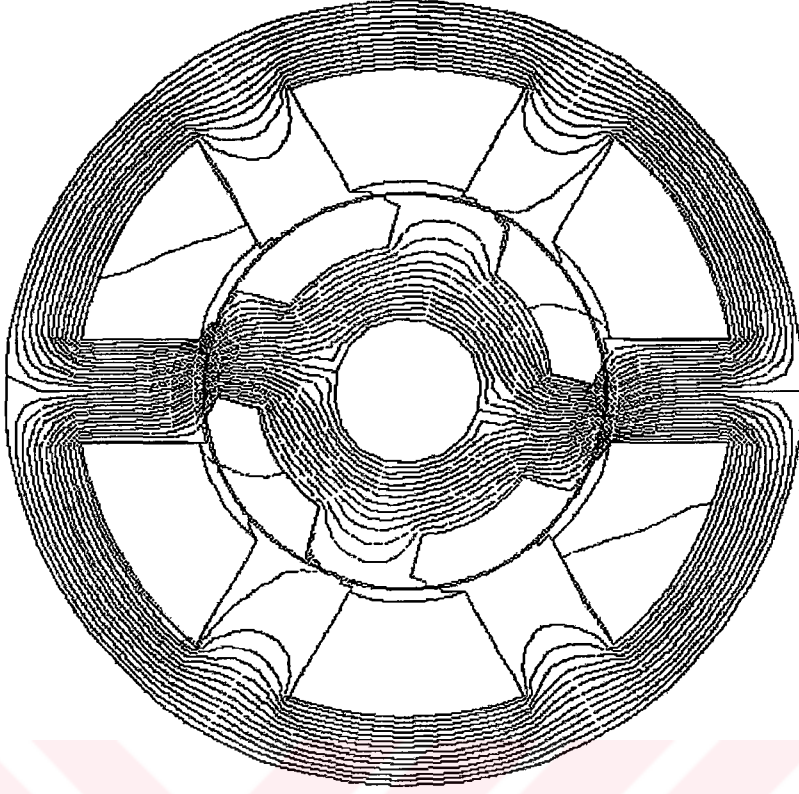
TKARM Model 5 'e ait 60° akı yolu haritası



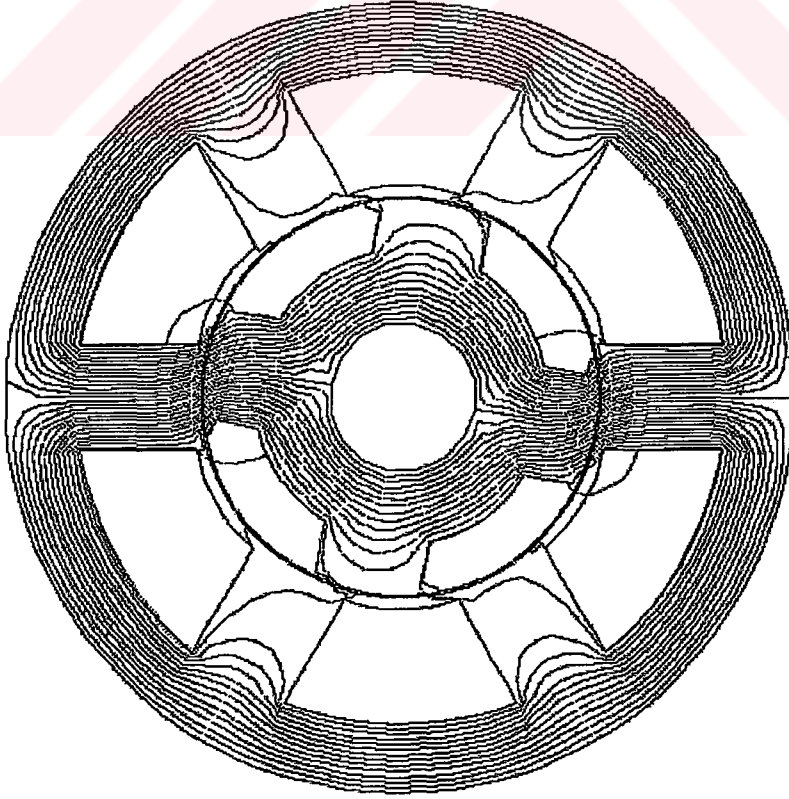
TKARM Model 5 'e ait 65° akı yolu haritası



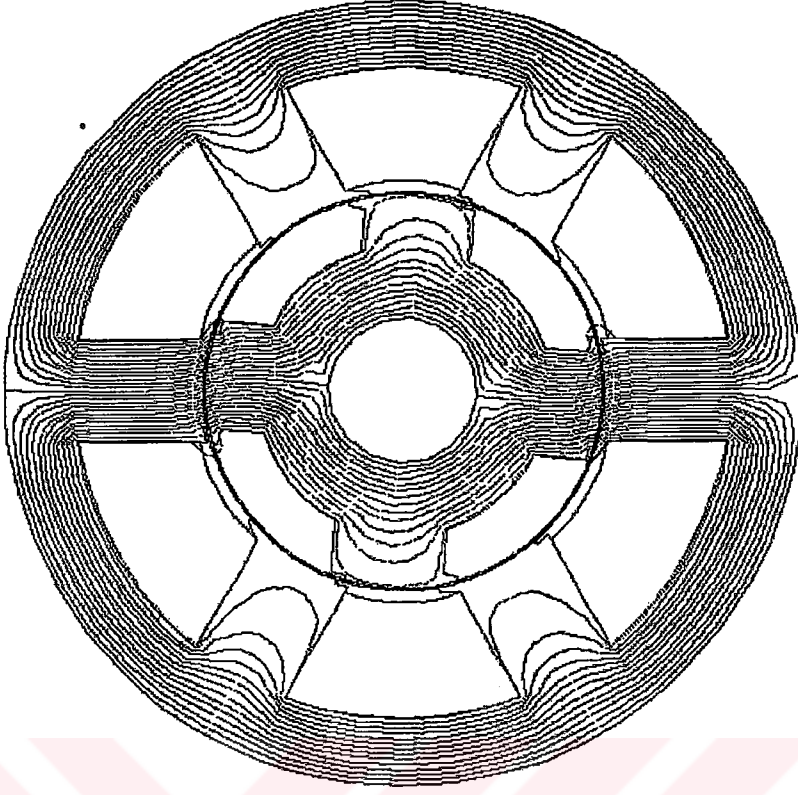
TKARM Model 5 'e ait 70° akı yolu haritası



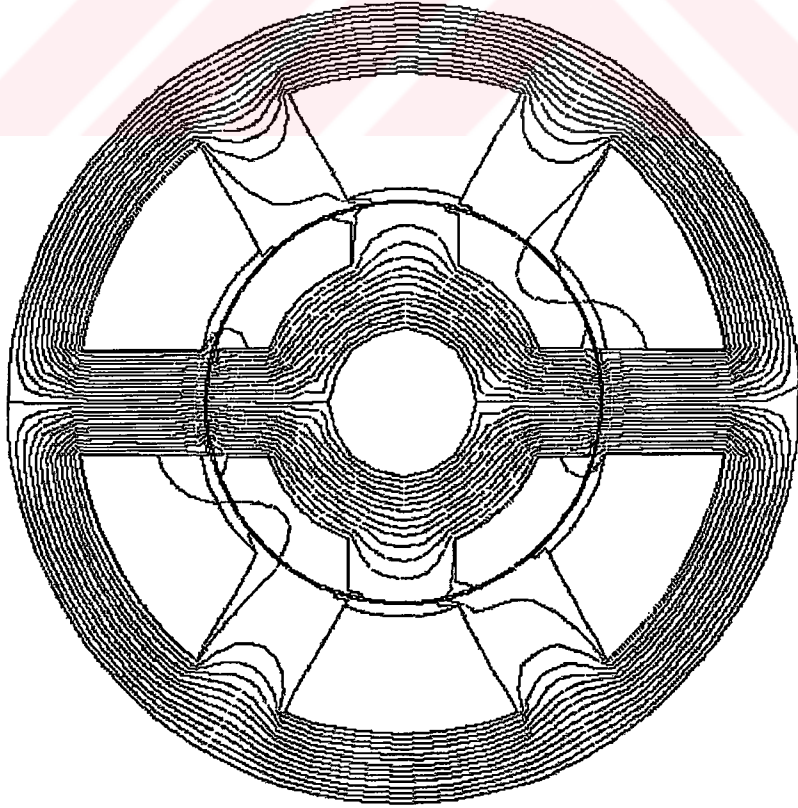
TKARM Model 5 'e ait 75° akı yolu haritası



TKARM Model 5 'e ait 80° akı yolu haritası



TKARM Model 5 'e ait 85° akı yolu haritası



TKARM Model 5 'e ait 90° akı yolu haritası

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	09.07.1972	
Doğum yeri	Adana	
Doktora	1997-2002	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. Anabilim Dalı.
Yüksek Lisans	1995-1997	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. Anabilim Dalı.
Lisans	1990-1994	Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik - Elektronik Fakültesi, Elektrik Müh. Bölümü.
Lise	1986-1990	Adana Merkez Teknik Lisesi.
Çalıştığı kurum	1995-Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik – Elektronik Fakültesi, Araştırma Görevlisi .

