

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ TAŞITIN TEKERLEK TAHRİĞİ İÇİN
GELİŞTİRİLEN DIŞ ROTORLU ANAHTARLI RELÜKTANS
MOTOR TASARIMI VE ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

Elektrik Yük. Müh. Mehmet Aytaç ÇINAR

Anabilim Dalı: Elektrik Mühendisliği

Danışman: Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU

KOCAELİ, 2008

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ TAŞITIN TEKERLEK TAHRİĞİ İÇİN
GELİŞTİRİLEN DIŞ ROTORLU ANAHTARLI RELÜKTANS
MOTOR TASARIMI VE ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

Elektrik Yük. Müh. Mehmet Aytaç ÇINAR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25.03.2008

Tezin Savunulduğu Tarih : 05.05.2008

Tez Danışmanı

Prof.Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU

(.....)

Üye

Prof.Dr. İbrahim ŞENOL

(.....)

Üye

Prof.Dr. Faik MERGEN

(.....)

Üye

Yrd.Doç.Dr. Ali Bekir YILDIZ

(.....)

Üye

Prof.Dr. Bekir ÇAKIR

(.....)
adını zengin
bildirimimiştir

KOCAELİ, 2008

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Fosil yakıtlar, başta ulaşım sektörü olmak üzere yaşantımızın birçok alanında kullandığımız en temel enerji kaynaklarıdır. Bu yakıtların yüksek miktarda tüketiminin gerek çevresel yönden sakıncaları, gerekse insan yaşamı üzerinde yarattığı olumsuz etkiler gün geçtikçe artmaktadır. Elektrik tahrikli taşıtlar, bu sorunlara bir çözüm olarak geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, özellikle tümü elektrikli, seri hibrid elektrikli ve yakıt hücreli elektrikli taşıtlarda tekerlek tahriğini sağlamak amacıyla kullanılabilecek, bir dış rotorlu anahtarlı relüktans motor tasarımı yapılmaktadır. Çalışma, hem motor yapısının uyarlandığı kullanım alanı, hem de bu motora uygulanan sargı yapısı bakımından özgünlük arz etmektedir.

Bu çalışma 2005/56 proje no'su ile Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmektedir.

Bu çalışmanın şekillenmesi sırasında gerek araştırma ve geliştirme zemininin oluşturulmasında, gerekse çalışmanın yönlendirilmesinde önemli katkıları bulunan ve birlikte çalıştığımız uzun yıllar boyunca hiçbir konuda desteğini esirgemeyen Prof.Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Ek olarak bu çalışma süresince, özellikle tasarım ve analiz aşamasında motorun teknik çizimlerinin oluşturulmasındaki yardımlarından dolayı Elk.Yük.Müh. Esra KANDEMİR BEŞER'e, sağladığı ortak çalışma imkanından dolayı Sabancı Üniversitesi'nden Prof. Asif ŞABANOVİĆ'e, motorun imalatı için sağladığı malzeme desteğinden dolayı ABB Elektrik A.Ş.'den Sayın Kaan SARIOĞLU'na teşekkür ederim.

Ayrıca, hayatım boyunca her zaman ve her konuda yanımda olan ve beni destekleyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER.....	viii
TÜRKÇE ÖZET	x
İNGİLİZCE ÖZET.....	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Anahtarlı Relüktans Motorunun Tarihçesi	5
1.2 Çalışmanın Amacı	7
1.3 Çalışmanın Yapısı.....	8
2. ELEKTRİKLİ TAŞITLAR	11
2.1 Otomotiv Sanayinin Gelişimi ve Günümüzdeki Durum	11
2.2 Alternatif Enerji Kaynağı Arayışının Nedenleri.....	12
2.2.1 Çevre kirliliği	12
2.2.2 Küresel ısınma	14
2.2.3 Petrol rezervlerinin azalması ve artan maliyetler.....	14
2.3 Yeni Enerji Kaynakları Geliştirilmesinin Önemi	15
2.4 Elektrikli Taşıt Tahrik Yapıları	17
2.4.1 Tümü-elektrikli taşıtlar	17
2.4.2 Hibrid elektrikli taşıtlar.....	22
2.4.2.1 Seri hibrid elektrikli taşıt tahrik yapısı.....	23
2.4.2.2 Paralel hibrid elektrikli taşıt tahrik yapısı	25
2.4.2.3 Seri-paralel hibrid elektrikli taşıt tahrik yapısı	26
2.4.2.4 Karışık hibrid elektrikli taşıt tahrik yapısı	27
2.4.3 Yakıt hücreli elektrikli taşıtlar	32
2.5 Elektrik Tahrikli Taşıtlarda Güç Üretim Zincirinin Bileşenleri	36
2.5.1 Enerji depolama elemanları	36
2.5.2 Güç kontrol ünitesi.....	39
2.5.3 Tahrik motoru	41
3. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORU	45
3.1 A.R.M.'nin Yapısı	46
3.2 Çalışma Prensibi	48
3.3 Motorun Eşdeğer Devresinin Oluşturulması	49
3.4 A.R.M.'de Güç Üretimi	55
3.4.1 Enerji dönüşümü	55
3.4.2 Moment üretimi	57
3.5 A.R.M. Sürücüleri ve Dinamik Çalışması	62
3.6 A.R.M.'nin Üstün ve Zayıf Yönleri	67
4. DIŞ ROTORLU ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUNUN TASARIMI..	69
4.1 Giriş	69
4.2 A.R.M. Parametrelerinin Analitik Olarak Hesaplanması	70

4.2.1	Motorun temel parametrelerinin belirlenmesi	70
4.2.2	Stator ve rotor kutup sayılarının belirlenmesi.....	71
4.2.3	Stator ve rotor kutup genişliklerinin belirlenmesi	71
4.2.4	Diğer geometrik boyutların belirlenmesi	74
4.2.5	Sargı yapısının belirlenmesi.....	79
4.2.6	Motorun manyetik eşdeğer devresinin oluşturulması	79
4.3	D.R.A.R.M.'nin Analitik Tasarımı	81
4.4	Diğer Parçaların Boyutlandırılması	89
4.4.1	Motor mili	89
4.4.2	Dış gövde ve yan kapaklar	91
4.5	Motorun Isınma Analizi.....	93
5.	STATİK ANALİZ.....	96
5.1	Sonlu Elemanlar Yöntemi	97
5.2	ANSOFT-Maxwell2D Yazılımının Tanıtımı	102
5.3	D.R.A.R.M.'nin Statik Manyetik Analizi.....	104
5.4	D.R.A.R.M.'nin Moment Dalgalılığının İncelenmesi	110
5.4.1	Kısa adımlı sargı yapısı için moment dalgalılığının incelenmesi	110
5.4.2	Farklı sargı yapısı için D.R.A.R.M.'nin moment üretim kapasitesi ve moment dalgalılığının incelenmesi	113
6.	DİNAMİK ANALİZ	121
6.1	Motorun Matematiksel Modelinin Elde Edilmesi	122
6.2	D.R.A.R.M.'nin Dinamik Simülasyonu	123
6.3	Dinamik Simülasyon Sonuçları	130
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	136
7.1	Çalışmanın Sonuçları.....	138
7.2	Geleceğe Yönelik Çalışma Önerileri	139
	KAYNAKLAR	141
	KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	149
	ÖZGEÇMİŞ	150

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Sektörel olarak enerji tüketimi sonucu ortaya çıkan CO ₂ miktarlarının enerji kaynağına bağlı karşılaştırılması.....	13
Şekil 2.2: 2004 yılı itibarıyla atmosferdeki sera gazlarının CO ₂ cinsinden eşdeğeri. 14	
Şekil 2.3: Dünya kanıtlanmış petrol rezervleri (2005).....	15
Şekil 2.4: Tümü-elektrikli taşıt tahrik yapısı	17
Şekil 2.5: Tek ve çok motorlu tümü-elektrikli taşıt tahrik sistemleri	19
Şekil 2.6: Dört oranlı dişli kutusuna sahip İ.Y.M.'li taşıta ait moment-hız karakteristiği.....	21
Şekil 2.7: Mitsubishi Colt elektrikli taşıt (a) tahrik yapısı, (b) tekerlek-içi tahrik motoru	21
Şekil 2.8: Eliica elektrikli taşıt.....	22
Şekil 2.9: Hibrid elektrikli taşıt tahrik yapısı	23
Şekil 2.10: Seri hibrid tahrik yapısı	24
Şekil 2.11: Paralel hibrid tahrik yapısı.....	26
Şekil 2.12: Seri-paralel hibrid tahrik yapısı	27
Şekil 2.13: Karışık hibrid tahrik yapısı	27
Şekil 2.14: Honda Insight.....	28
Şekil 2.15: Toyota Prius.....	29
Şekil 2.16: Honda Civic Hybrid.....	29
Şekil 2.17: Toyota HybridX.....	30
Şekil 2.18: Toyota FT-HS	30
Şekil 2.19: Honda Small Hybrid Sports	30
Şekil 2.20: LeTourneau L-1350 ağır yükleyici iş makinası.....	31
Şekil 2.21: Yakıt hücresi çalışma prensibi	32
Şekil 2.22: Hyundai Tucson yakıt hücreli elektrikli taşıt.....	34
Şekil 2.23: Mercedes Benz A-Class F-Cell yakıt hücreli elektrikli taşıt	34
Şekil 2.24: Honda FCX yakıt hücreli elektrikli taşıt.....	35
Şekil 2.25: C.U.T.E. projesi kapsamında kullanılan yakıt hücreli otobüs	35
Şekil 2.26: Li-Ion batarya	36
Şekil 2.27: Uyarma biçimlerine göre doğru akım motorlarına ait moment-hız karakteristikleri	41
Şekil 2.28: Asenkron motora ait moment-hız karakteristiği [72]	43
Şekil 3.1: Farklı geometrik yapılardaki A.R.M.'lere ait kesit görünüşleri	46
Şekil 3.2: 8/6 A.R.M.'nin çalışması.....	48
Şekil 3.3: A.R.M.'nin bir fazı için manyetik devresi	50
Şekil 3.4: 0° konumu	50
Şekil 3.5: θ_1 konumu	51
Şekil 3.6: θ_2 konumu	51
Şekil 3.7: θ_3 konumu	51
Şekil 3.8: θ_4 konumu	52
Şekil 3.9: θ_5 konumu	52
Şekil 3.10: A.R.M.'nin bir fazına ait özendüktansın doğrusal değişimi	53

Şekil 3.11: A.R.M.'nin bir faz eşdeğer devresi [73]	54
Şekil 3.12: Faz sargısı iletimde iken enerji dönüşüm döngüsü [74]	56
Şekil 3.13: Faz sargısı kesimde iken oluşan enerji dönüşüm döngüsü [74].....	56
Şekil 3.14: Toplam enerji dönüşüm döngüsü [74]	57
Şekil 3.15: Rotorun (a) θ konumu için akı eğrisi, (b) $\delta\theta$ hareketi için enerji dönüşümü [75]	58
Şekil 3.16: İdeal endüktans profiline göre A.R.M.'de moment üretimi	60
Şekil 3.17: Komutasyon esnasında oluşan moment çökmesi	61
Şekil 3.18: A.R.M. sürücülerde kullanılan konverter devre yapılarının sınıflandırılması [77]	63
Şekil 3.19: Üç fazlı asimetrik köprü konverter yapısı.....	64
Şekil 3.20: Asimetrik köprü konverter çalışma modları	65
Şekil 3.21: Asimetrik köprü konverter devresinde faz sargısının (a) tek anahtarla, (b) çift anahtarla kontrol edilmesiyle elde edilen dalga şekilleri,	66
Şekil 4.1: İki faza ait lineer endüktans eğrileri	73
Şekil 4.2: Stator ve rotor kutup genişlikleri için olasılık üçgeni.....	74
Şekil 4.3: Geleneksel yapıdaki A.R.M.'nin kesit görünüşü.....	78
Şekil 4.4: A.R.M.'nin tam manyetik eşdeğer devresi	80
Şekil 4.5: A.R.M.'nin basitleştirilmiş manyetik eşdeğer devresi.....	80
Şekil 4.6: Golf taşıtında kullanılan jant ve tekerlek.....	81
Şekil 4.7: M19 çeliğine ait BH eğrisi.....	84
Şekil 4.8: D.R.A.R.M.'nin kesit görünümü	88
Şekil 4.9: Bir faz sargısının üç boyutlu görünüşü	89
Şekil 4.10: Motor mili	90
Şekil 4.11: İç statorun (a) bilgisayar ortamında elde edilen üç boyutlu görünümü, (b) imal edilen görünümü,.....	90
Şekil 4.12: Dış gövdenin (a) bilgisayar ortamında elde edilen üç boyutlu görünümü, (b) dış rotor yerleştirilmiş durumdaki imal edilen görünümü	91
Şekil 4.13: Yan kapaklar	92
Şekil 4.14: Tasarlanan D.R.A.R.M.'nin üç boyutlu görünüşü.....	92
Şekil 4.15: İmal edilen D.R.A.R.M.'nin görünüşü	93
Şekil 5.1: İyileştirilmiş sonlu elemanlar yüzeyi ağ yapısı.....	105
Şekil 5.2: Hava aralığında oluşturulan ağ yapısı.....	105
Şekil 5.3: D.R.A.R.M.'nin (a) $\theta = 0^\circ$ (b) $\theta = 7,5^\circ$ (c) $\theta = 15^\circ$ (d) $\theta = 22,5^\circ$ konumları için manyetik akı çizgilerinin dağılımı	107
Şekil 5.4: D.R.A.R.M.'nin (a) $\theta = 0^\circ$ (b) $\theta = 7,5^\circ$ (c) $\theta = 15^\circ$ (d) $\theta = 22,5^\circ$ konumları için manyetik akı yoğunluğunun dağılımı.....	108
Şekil 5.5: D.R.A.R.M.'nin halkalama akısının faz akımı ve rotor konumuna bağlı değişimi	109
Şekil 5.6: D.R.A.R.M.'de üretilen momentin rotor konumu ve faz akımına bağlı değişimi	109
Şekil 5.7: D.R.A.R.M.'nin faz öz endüktanının faz akımı ve rotor konumuna bağlı değişimi	110
Şekil 5.8: Nominal akım değeri ($i=25A$) için statik moment profilleri	111
Şekil 5.9: Nominalden düşük akım değerleri için statik moment profilleri.....	112
Şekil 5.10: (a) Kısa kutup adımlı, (b) Uzun kutup adımlı sargılı D.R.A.R.M.	114
Şekil 5.11: Uzun adımlı sargılı D.R.A.R.M.'nin halkalama akısının faz akımı ve rotor konumuna bağlı değişimi	116

Şekil 5.12: Uzun adımlı sargılı D.R.A.R.M.'de üretilen momentin rotor konumu ve faz akımına bağlı değişimi	117
Şekil 5.13: Statik moment profilleri ($i_{ka}=25A$, $i_{ua}=14,84A$)	117
Şekil 5.14: Statik moment profilleri ($i_{ka}=15A$, $i_{ua}=8,90A$)	118
Şekil 6.1: D.R.A.R.M.'nin kapalı çevrim kontrol blok şeması	124
Şekil 6.2: D.R.A.R.M. simülasyonu ana blok şeması	125
Şekil 6.3: Faz sargıları alt bloğu	126
Şekil 6.4: Mekanik büyüklükler alt bloğu	126
Şekil 6.5: Komutasyon alt bloğu	127
Şekil 6.6: PI kontrol alt bloğu	128
Şekil 6.7: Histeresiz akım kontrolü alt bloğu	128
Şekil 6.8: Konum algılayıcı alt bloğu	129
Şekil 6.9: Optik algılayıcı çıkış sinyalleri	129
Şekil 6.10: $T_{yük}=20Nm$, $n=1100d/dk$ için sürekli haldeki zamana bağlı (a) $V_a(V)$ - $i_a(A)$, (b) $i_a-i_b-i_c(A)$, (c) $T_a(Nm)-i_a(A)$, (d) $T_a-T_b-T_c-T_{toplam}(Nm)$ dalga şekilleri,	130
Şekil 6.11: $T_{yük}=20Nm$, $n=500d/dk$ için sürekli haldeki zamana bağlı (a) $V_a(V)$ - $i_a(A)$, (b) $i_a-i_b-i_c(A)$, (c) $T_a(Nm)-i_a(A)$, (d) $T_a-T_b-T_c-T_{toplam}(Nm)$ dalga şekilleri,	131
Şekil 6.12: $T_{yük}=10Nm$, $n=1100d/dk$ için sürekli haldeki zamana bağlı (a) $V_a(V)$ - $i_a(A)$, (b) $i_a-i_b-i_c(A)$, (c) $T_a(Nm)-i_a(A)$, (d) $T_a-T_b-T_c-T_{toplam}(Nm)$ dalga şekilleri,	132
Şekil 6.13: $T_{yük}=5Nm$, $n=2200d/dk$ için sürekli haldeki zamana bağlı (a) $V_a(V)$ - $i_a(A)$, (b) $i_a-i_b-i_c(A)$, (c) $T_a(Nm)-i_a(A)$, (d) $T_a-T_b-T_c-T_{toplam}(Nm)$ dalga şekilleri,	133
Şekil 6.14: (a) $T_{yük}=20Nm$, $n=1100d/dk$ için, (b) $T_{yük}=20Nm$, $n=500d/dk$ için, (c) $T_{yük}=10Nm$, $n=1100d/dk$ için, sürekli haldeki $T_{toplam}(Nm)$ dalga şekilleri, (d) rotor konum açısı	134

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1: Elektrikli taşıtlarda kullanılan batarya tiplerinin karşılaştırılması [70]....	39
Tablo 2.2: Farklı motor tiplerinin moment yoğunluklarına göre karşılaştırılması [6]42	
Tablo 4.1: A.R.M.'lerde yaygın olarak kullanılan stator/rotor kutup sayısı kombinasyonları	71
Tablo 4.2: Motor izolasyon sınıfları.....	94
Tablo 5.1: Tanımlanan eleman sayıları	106
Tablo 5.2: Kısa adımlı sargılı D.R.A.R.M.'de üretilen ortalama moment değerleri ve dalgalılık oranları	112
Tablo 5.3: Kısa ve uzun adımlı sargılı D.R.A.R.M. için üretilen ortalama moment değerleri ve momentteki değişim	118
Tablo 5.4: Kısa ve uzun adımlı sargılı D.R.A.R.M. için üretilen momentteki dalgalılık oranları ve moment dalgalılığındaki değişim.....	119

SİMGELER

A	: kesit alanı
a	: iletken kesiti
B	: akı yoğunluğu (T)
C	: boyunduruk kalınlığı
D	: çap
d	: bakır iletken çapı
e	: endüklenen gerilim (V)
F	: amper sarım
g	: hava aralığı genişliği (mm)
H	: manyetik alan şiddeti (A/m)
h	: kutup yüksekliği
i	: akım (A)
J	: akım yoğunluğu (A/mm ²)
L	: öz endüktans (H)
l	: uzunluk (m)
M	: ortak endüktans (H)
m	: faz sayısı
N	: faz sargısı sarım sayısı
N	: kutup sayısı
n	: hız (d/dk)
P	: güç (W)
R	: sargı direnci (Ω)
T	: moment (Nm)
V	: Besleme gerilimi (V)
W	: Enerji
Φ	: Akı (Wb)
ω	: açısal hız (rad/s)
ℜ	: relüktans
β	: kutup genişliği (derece)
μ	: manyetik geçirgenlik
α	: yükleme oranı

Alt indisler

a	: çakışık konum
hp	: beygir gücü
in	: giriş
ka	: kısa adımlı sargı
ort	: ortalama
out	: çıkış
r	: rotor

rc : rotor çekirdeği
s : stator
sc : stator çekirdeği
u : ayrıık konum
ua : uzun adımlı sargı
W : watt
y : boyunduruk

Kısaltmalar

A.R.M. : Anahtarlı relüktans motoru
C.U.T.E. : Clean Urban Transportation for Europe
D.R.A.R.M. : Dış rotorlu anahtarlı relüktans motoru
I.E.C. : International Electrotechnical Commission
I.S.O. : International Standards Organisation
İ.Y.M. : İçten yanmalı motor
N.E.M.A. : National Electrical Manufacturers Association

ELEKTRİKLİ TAŞITIN TEKERLEK TAHRİĞİ İÇİN GELİŞTİRİLEN DIŞ ROTORLU ANAHTARLI RELÜKTANS MOTOR TASARIMI VE ANALİZİ

Mehmet Aytaç ÇINAR

Anahtar Kelimeler: Elektrikli taşıt, tekerlek içi motor, dış rotorlu anahtarlı relüktans motoru, tasarım, uzun adımlı sargı, statik analiz, dinamik analiz, simülasyon

Bu çalışmada bir elektrikli taşıtın tekerlek tahriğini sağlamak amacıyla radyal akı yoluna sahip bir anahtarlı relüktans motorunun tasarımı yapılmaktadır. Motor, taşıtın tekerlek jantının içine yerleştirilmesi amacıyla dış rotorlu olarak tasarlanmıştır. Basit yapısı, düşük maliyeti ve güvenilirliği nedeniyle anahtarlı relüktans motor topolojisi tercih edilmiştir.

Bu amaçla öncelikle, kullanım amacına yönelik olarak belirlenen sınırlayıcı koşulların ışığında motorun boyutları, konstrüksiyonu ve sargı yapısı matematiksel olarak hesaplanmıştır. Bunun ardından sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla motorun statik analizi yapılmış ve performans karakteristikleri elde edilmiştir.

Motorun çalışması sırasında faz sargıları, taşıdıkları akım nedeniyle ısı kaynağı olarak davranmaktadır. Bu nedenle tasarlanan motorun ısı analizi yapılmış ve gerekli olan izolasyon sınıfı belirlenmiştir.

Üretilen moment değeri, tekerlek motorları için büyük önem taşımaktadır. Tasarlanan motorun moment üretim kapasitesini artırmak amacıyla uzun adımlı sargı yapısı motora uyarlanmış ve elde edilen moment ve dalgalılık değerleri kısa adımlı sargı yapısıyla karşılaştırılmıştır. Yeni sargı yapısı ile üretilen moment değeriyle birlikte moment dalgalılığını da önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Bu nedenle, uzun adımlı sargı yapısının taşıt tahrik uygulamaları için dalgalılık kontrolü yapılmadan kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varılmaktadır.

Son olarak ise, motorun matematiksel modeli elde edilerek MATLAB-Simulink ortamında dinamik simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla statik manyetik analiz ile elde edilen karakteristikler, look-up tablolar halinde simülasyona dahil edilmiştir. Bu sayede farklı çalışma koşulları için motorun dinamik performansını izlemek mümkün olmaktadır.

Tüm bu çalışma sürecinde elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, tasarlanan dış rotorlu anahtarlı relüktans motorunun sunduğu performansın, bir elektrikli taşıtın tekerlek tahriğinin sağlanması için yeterli olduğu sonucuna varılmaktadır.

DESIGN AND ANALYSIS OF AN OUTER ROTOR SWITCHED RELUCTANCE MOTOR DEVELOPED FOR WHEEL TRACTION OF AN ELECTRIC VEHICLE

Mehmet Aytaç ÇINAR

Keywords: Electric vehicle, in-wheel motor, outer rotor switched reluctance motor, design, fully pitched winding, static analysis, dynamic analysis, simulation

In this thesis, a radial-flux type in-wheel switched reluctance traction motor for electric vehicles is designed. Constructional simplicity, low cost and reliability are the most important factors that led to the selection of this motor topology as a prototype in-wheel motor. Design process consists of static magnetic analysis, thermal analysis and dynamical modeling and analysis steps, following the mathematical dimensioning, respectively.

The design process starts with the numerical calculations of the dimensions, construction and winding configuration of the outer rotor SRM. A 2D finite element analysis is then performed to obtain the nonlinear field solutions within the motor.

Phase windings behave as a heat source in operation. Therefore, heat analysis of the designed motor is realized and isolation class is defined.

Torque profiles and ripple ratios are the most important parameters of in-wheel propulsion motors. To increase the torque production capability, fully pitched winding configuration is adapted to designed motor and obtained torque profiles and ripple ratios are compared to conventional short pitched winding configuration. It is observed that, with fully pitched winding configuration, not only the torque output but also the torque ripple is higher than the short pitched winding configuration. So, this configuration is inconvenient for in-wheel EV applications unless ripple control is applied.

A dynamic simulation model of the designed motor is composed of a set of electrical equations for each phase and equation of mechanical system, by using MATLAB-Simulink environment. By integrating the obtained static characteristic profiles into the dynamic model, drives simulation is realized. Thus, it is possible to study the dynamic behaviours of the designed motor under various operating conditions and investigate the applicability to an EV.

Consequently, obtained static and dynamic results show that, designed outer rotor switched reluctance motor performance is sufficient and meets the requirements of a multimotor propelled electric vehicle.

1. GİRİŞ

Enerji, insanoğlunun temel gereksinimlerinin karşılanmasında, ülkelerin sosyal gelişimleri ve ekonomik olarak kalkınmasında en önemli ihtiyaçlardan biridir. Dünya nüfusundaki hızlı artışa ve endüstriyel gelişmelere bağlı olarak toplumların enerji gereksinimleri giderek artmaktadır. Günümüzde ve gelecekte, toplumların refahı açısından stratejik bir önem taşıması nedeniyle enerjinin, ihtiyacı karşılayacak miktarlarda ve ekonomik şekilde sağlanması, temininde sıkıntıların yaşanmaması ve hem üretimi hem de tüketiminin çevreyle uyumlu biçimlerde başarılması gerekmektedir.

2004 yılı verilerine göre dünya üzerinde $443,20.10^{15}$ Btu enerji üretilmiş ve bu miktarın %86,2'si fosil yakıtlardan elde edilmiştir. Bu oranın %37,47'si ise petrol kaynaklıdır [1]. Petrol tüketiminin önemli bir kısmı ulaşım ve petrokimya sektörlerinde gerçekleşmektedir. Ulaşım sektörü dünya genelinde, enerji talebi açısından yıllık ortalama %2,2 artış hızıyla en hızlı büyüyen sektördür. Kullandığı yakıtın ise neredeyse tamamı petrol ürünlerinden oluşmaktadır. Bu büyüme hızıyla, petrolde 2020 yılına kadar gerçekleşecek talep artışının dörtte üçünden sorumlu olacağı ve bu tarihten sonra en büyük son kullanıcı haline geleceği öngörülmektedir. Bilinen petrol rezervlerinin ise en iyimser tahminlerle 2020'lerde yarıya ineceği tahmin edilmektedir.

Dünya petrol rezervlerinin %57'si Orta Doğu'da bulunmaktadır [2]. Bu bölge, günümüzde dünya genelindeki petrol ihtiyacının yarısını karşılamakta ve bu oranın 2023'te %75'ler düzeyine çıkması beklenmektedir. Dolayısıyla tüm dünya ülkeleri için petrol, bugün ve gelecekte dışa bağımlılık yaratmakta ve ticarete konu olmaktadır.

Diğer taraftan, yoğun petrol tüketiminin yarattığı çevresel sorunlar büyük önem taşımaktadır. İçten yanmalı motorların keşfi ulaşım sektörü için dev bir adım

olmuştur ve günümüzde insan yaşamını önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır. Bununla birlikte, içten yanmalı motorlar düşük verimle çalışmakta ve yanma sonucunda ortaya büyük miktarda zararlı atık maddeler çıkmaktadır. Gün geçtikçe artan motorlu taşıt sayısına bağlı olarak bu atıklar doğrudan veya dolaylı olarak dünya üzerindeki canlı yaşamını tehdit etmektedir. Atmosferdeki atık gazların ve zararlı partiküllerin artması küresel ısınmaya neden olmakta ve iklim değişikliklerini de beraberinde getirmektedir.

Ortaya çıkan tüm bu olumsuzlukları en aza indirmek amacıyla çeşitli alternatif yakıtların ve enerji kaynaklarının kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Alternatif yakıtların kullanımıyla, ortaya çıkan zararlı atık ve emisyonlar %80'e varan oranda azaltılabilmektedir. Bununla birlikte, temiz dizel olarak adlandırılan katkılı yakıtlar, propan ve sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) petrol türevi olmaları nedeniyle, biyodizel ve alkol türevleri ise benzin veya dizel yakıtlarla karışım halinde kullanılabilmesi nedeniyle, karşı karşıya kalınan sorunları tamamıyla çözmekten uzaktır.

Elektrik, üretim süreci bir yana bırakıldığında, kullanımı sırasında atık çıkarmaması nedeniyle en temiz enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrik enerjisinin taşıt tahriğinde kullanılması düşüncesi ise içten yanmalı motorun keşfinden daha öncesine dayanmaktadır. Bununla birlikte, elektrik enerjisini depo edecek bataryaların enerji yoğunluğunun düşük olması, elektrik tahrikli taşıt yapılarının 1970'lere kadar geri planda kalmasına neden olmuştur. 1970'teki petrol krizi ile hızlanan yeni teknoloji arayışları ile elektrikli araçlar yeniden gündeme gelmiştir. Gelişen teknolojinin paralelinde özellikle 80'li yıllarda artan çalışmalar sonucunda önce tümü-elektrikli taşıtlar, daha sonra da daha üstün özelliklere sahip olan hibrid elektrikli taşıtlar geliştirilmiştir. Günümüzde A.B.D. ve Japonya'nın başını çektiği gelişmiş ülkelerde hibrid elektrikli taşıtlar pazara sunulmuş ve yollara çıkmıştır. Bugünkü çalışmalar ise yakıt hücreleri ve geleceğin yakıtı olarak gösterilen hidrojen üzerine yoğunlaşarak devam etmektedir [3,4].

Elektrik tahrikli taşıtlarda kullanılan tahrik sistemlerinin ve bu sistemleri oluşturan bileşenlerin özellikleri ve seçim kriterleri tez çalışmasının ileriki bölümlerinde

detaylı biçimde açıklanmaktadır. Gücünün ister bir kısmını, isterse tamamını elektrik enerjisinden alıyor olsun, taşıtın hareketini sağlayacak mekanik gücü üreten en önemli bileşenlerden biri elektrik motorudur. Bu kriterler göz önünde tutularak, geçmişten günümüze elektrik tahrikli taşıtlarda kullanılan farklı yapılardaki elektrik motorlarına yönelik karşılaştırmaların yapılması mümkün olmaktadır.

Taşıt tahriğinde elektrik motorlarının kullanımına yönelik çalışmalar ve uygulamalar incelendiğinde, bu çalışmalarda iki farklı tahrik sistemi yapısı oluşturulduğu görülmektedir. Bunlardan birincisi, taşıta tahrik gücünü sağlamak için tek bir elektrik motorunun kullanıldığı tahrik sistemi yapısıdır. Bu yapıdaki elektrikli taşıt tahrik sistemleri üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar uzun zamandan beri süregelmekte ve günümüzde tahrik sistemlerinin iyileştirilmesi amacıyla halen sürmektedir.

Bir diğer tahrik sistemi ise, yapısında birden fazla sayıda elektrik motoru bulunan tahrik sistemi yapısıdır. Son yıllarda özellikle düşük maliyetli, hafif, az hacim kaplayan ve verimli elektrik motorlarının geliştirilmesi amacıyla çalışmalar yürütülmektedir. Bu sayede taşıta güç sağlayacak tahrik motorları doğrudan taşıtın tekerleğine bağlanarak, ara güç aktarım elemanı gereksinimi ortadan kaldırılmakta ve bu elemanlar üzerinde oluşan kayıpların önüne geçilmektedir. Tekerlek tahriği olarak da adlandırılan bu yapıda her bir elektrik motoru diğerlerinden bağımsız olarak taşıtın bir tekerleğini tahrik etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu sayede taşıtın daha yüksek performanslı ve güvenli kullanımı da mümkün olmaktadır [5,8].

Elektrikli tahrikli taşıt uygulamalarında tahrik motoru olarak kullanılacak motorların karşılaması beklenen özellikler göz önünde tutularak, geliştirilen ilk prototip modellerden günümüze kadar elektrikli taşıtlarda kullanılmakta olan doğru akım, asenkron, anahtarlı relüktans ve sürekli mıknatıslı motorların uygulamadaki örnekleri incelendiğinde, sürekli mıknatıslı fırçasız tip motorlar en avantajlı motor tipi olarak ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte maliyetlerinin yüksek oluşu bu makinaların başlıca dezavantajıdır [9-12]. Anahtarlı relüktans motorlarının ise, özellikle yüksek hız kapasitesi ve geniş sabit güç aralığında çalışmaları, avantajlı yönleri olarak görülmektedir [13].

Bilindiği gibi, endüstrinin birçok alanında kullanılan elektrik motorları, geleneksel iç rotorlu yapıdadır. Bununla birlikte özel amaçlı uygulamalarda kullanılmak üzere, alışlagelmişin dışında yapılara sahip elektrik motorları da tasarlanmakta ve kullanılmaktadır. Bahsedilen bu alışlagelmişin dışındaki yapılardan birisi de dış rotorlu tip elektrik motorlarıdır. Çok motorlu taşıt tahrik sistemlerinde de kullanım alanı bulan bu yapıdaki motorlar önemli avantajlar sağlamaktadır. Günümüzde büyük çoğunluğu sürekli mıknatıslı fırçasız tip motorlar olmak üzere [14-23], asenkron [24] ve anahtarlı relüktans motorlarının, tekerlek tahriği amacıyla kullanılmasıyla gerçekleştirilen çalışmalar literatürde görülmektedir.

Bu çalışmaların önemli bir kısmında tahrik motoru olarak aksiyel akı yoluna sahip makina yapısı tercih edilmektedir. Geleneksel radyal akı yoluna sahip makinalarla karşılaştırıldığında, bu yapıda çekirdek üzerindeki akı yolunun daha kısa olduğu görülmektedir. Bu sayede, makinada oluşan çekirdek kayıpları daha düşüktür. Sürekli mıknatıslı fırçasız tip motorlarda, manyetik akıyı üreten sürekli mıknatıs malzeme üzerinde de eddy akımı kayıpları oluşmaz. Bu da, eşdeğer özellikteki sargılı tip motorlarla karşılaştırıldığında, motorun moment/ağırlık oranının daha yüksek olmasını sağlar [25]. Aksiyel akı yoluna sahip motorlar daha karmaşık ve gelişmiş mikroişlemci destekli kontrol yöntemlerine gereksinim duymaktadırlar. Ayrıca motorun gerek manyetik kısımlarının gerekse sargıların imalatı ve yerleşimi, üretim sürecini daha karmaşık hale getirmektedir.

Sürekli mıknatıslı fırçasız tip motorların hem radyal hem de aksiyel akı yoluna sahip yapıdaki örneklerine rastlanmakla birlikte, literatürde, geleneksel radyal yapıdaki bir dış rotorlu anahtarlı relüktans motorunun elektrikli taşıtlarda tekerlek tahriğini sağlamak amacıyla kullanımına ilişkin ilk çalışmalar 2005 yılının başlarında gözlenmektedir. Bu çalışmalarda tekerlek tahriğini sağlamak amacıyla, faz sargısının statordaki birden fazla sayıda çıkık kutup üzerine dağıtıldığı çok kutuplu dış rotorlu A.R.M.'lerin tasarım ve karşılaştırılması yapılmaktadır [26-28]. Sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla yapılan performans incelemesi sonucunda, karşılaştırılan üç motordan 16/20 kutuplu yapının, 12/16 ve 18/24 kutuplu yapılara oranla daha yüksek performans sunduğu sonucuna varılmaktadır [26]. Bu motorun taşıta uygulanması ile

elde edilen performans değerleri de verilmekte ve sonuçlar değerlendirildiğinde bunun uygun bir seçim olduğu savunulmaktadır [27,28].

1.1 Anahtarlı Relüktans Motorunun Tarihçesi

Günümüzdeki anahtarlı relüktans motorlarının bilinen ilk modeli 1838 yılında Davidson tarafından İskoçya’da imal edilen motordur. Bu motor Glasgow-Edinburgh demiryolunda bir lokomotifin tahriğini sağlamak amacıyla üretilmiştir. Bir sonraki başlıca aşama ise, 1920’lerde C.L.Walker tarafından keşfedilen ve “elektromanyetik motor” olarak da adlandırılan, günümüzdeki adım motorlarının en basit halidir. Bunun ardından ise değişken relüktanslı motorları, adım motorlarının aksine güç yarı iletkenleri ile sürekli modda kullanma düşüncesinin öncüleri 1960’larda Nasar, French, Koch ve Lawrenson olmuştur. Buna karşın, o yıllarda yarı iletken anahtarlama elemanları çok sınırlı özelliklere sahip olduğundan, yapılan çalışmaların boyutları da sınırlı kalmıştır.

A.R.M.’lerin gelişiminin modern ağı ise 1972’de Bedford’un patentleriyle başlamıştır [29,30].

Bu makinalar için günümüzdeki “anahtarlı relüktans” ifadesi ise ilk olarak 1980’lerin başında Lawrenson tarafından kullanılmıştır [31]. Bu motorların ticari olarak kullanımlarına yönelik çalışmalar ise bu tarihten itibaren Byrne ve Lawrenson tarafından gerçekleştirilmiş, ticari olarak üretimleri ise Switched Reluctance Drives Ltd. lisansı ile yapılmıştır.

Bunun ardından 1980’li yılların ortalarında, özellikle İngiltere’de Leeds ve Nottingham Üniversitelerinde yapılan çalışmalar ve güç elektroniği teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte bu tip motorlara ilişkin yayınlar, patentler ve uygulama alanları artmıştır.

Anahtarlı relüktans motorlarının bu tarihlerden sonra tanınmaya başlamasıyla birlikte, yapılan çalışmaların makinanın tasarımına, manyetik analizine ve makinanın

karakteristik eğrilerinin doğru biçimde elde edilmesine yönelik olduğu gözlenmektedir.

Tasarım süreçleri, A.R.M.'nin yapısı gereği uzun zaman alan ve karmaşık hesaplamalar gerektiren işlemlerdir. Bu nedenle, bu süreci kısaltmak ve basitleştirmek amacıyla, geleneksel alternatif akım motorlarına benzer şekilde çıkış eşitliklerine bağlı sayısal tasarım prosedürleri literatürde önerilmektedir [32]. Bunun dışında, motorun kutup genişliği, kutup adımı, hava aralığı genişliği ve kutup yüzeyi yapısı gibi yapısal özelliklerinin, performansı ne şekilde etkilediğinin belirlenmesine yönelik çalışmalara da rastlanmaktadır [33-35].

Motorun manyetik analizi ve performans bilgilerinin elde edilmesinde, geliştirilen sayısal analiz yöntemleri önemli avantajlar sağlamaktadır. Sonlu elemanlar analizi bu amaçla ilk olarak 1985'te motorun halkalama akısı, moment ve endüktans değerlerini elde etmek amacıyla kullanılmıştır [36]. Bunun ardından farklı geometrilerdeki A.R.M.'lerin manyetik karakteristiklerinin elde edilmesi [37,38], moment profilindeki dalgalılığın azaltılması [39], ısınma analizinin yapılması [40] gibi amaçlarla bu tip sayısal yöntemlerin kullanımı giderek artmıştır.

Yarı iletken teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte farklı konverter devrelerinin geliştirilmesi, A.R.M.'lerin uygulama alanlarını artırmıştır. Bunun paralelinde, simülasyon çalışmalarına verilen önemin artması ile farklı simülasyon yazılımları da geliştirilmiş ve sonlu elemanlar analizi gibi sayısal analiz yöntemleriyle birlikte, makinanın çalışma koşullarına bağlı dinamik performansının elde edilmesi amacıyla kullanılmıştır [41-45]. Günümüzde ise modern kontrol yöntemleriyle, farklı A.R.M. uygulamalarında ortaya çıkan dezavantajların giderilmesine ve makina performansının iyileştirilmesine yönelik çalışmalar halen sürmektedir.

Otomotiv uygulamalarında kullanılacak olan A.R.M.'lerin tasarım süreçlerinde, optimum performansın elde edilebilmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle boyutlandırma sürecinde analitik yöntemlerle birlikte sayısal yöntemlerin bir arada kullanılması önemli kolaylıklar sağlamaktadır [46]. Bu sayede, tahrik motoru olarak kullanılacak A.R.M.'lerin boyutlandırılması sürecinde, motorun performansını taşıt

uygulamasının ihtiyaçları doğrultusunda optimum düzeye çıkarmak [47-49] ve çalışma sırasında ortaya çıkabilecek ısınma ve gürültü gibi bazı sorunların önüne geçmek amacıyla tedbirler almak mümkün olmaktadır [50].

A.R.M.'lerin taşıt tahriğinde kullanımına yönelik ilk uygulamalardan biri, 1984 yılında Nottingham Üniversitesi'nde yapılan çalışmadır [51]. Bu çalışmada van tipi bir taşıtın tahriği için 20 kW gücünde bir A.R.M. kullanılmaktadır.

1990'lı yılların ortasında duyurulan 100 kW'lık anahtarlı relüktans motoru, bu zamana kadar taşıt tahriği amacıyla gerçekleştirilen en yüksek güçlü motor olarak literatüre girmiştir [52]. Bunun ardından da taşıt tahriğini sağlamak amacıyla benzer özelliklerdeki A.R.M. tasarımlarına yönelik çalışmalar sürmüştür [53-56].

Geleneksel A.R.M.'nin dış rotorlu yapıya sahip literatürdeki ilk örneği, kişisel bilgisayarların hard disk sürücülerini için tasarlanmıştır [57]. Bu çalışmada, sürekli mıknatıslı motorun yerine kullanılmak amacıyla çok küçük boyutta bir A.R.M. tasarımı yapılmaktadır. Tasarlanan A.R.M., dört fazlı ve dış rotorlu bir prototip olup, makinanın tüm manyetik karakteristikleri iki boyutlu sonlu elemanlar analizi ile elde edilmektedir.

Tsai et al., ise çalışmasında, elektrikli taşıtlar için geliştirilen iki fazlı, dış rotorlu, homopolar yapıda, aksiyel akı yoluna sahip A.R.M.'yi tanıtmaktadır [58].

Sayısal işaret işlemci tabanlı kontrolörler [59] ve algılayıcısız kontrol [60] gibi ileri kontrol yöntemleri, kullanıldığı tahrik sisteminin ihtiyaçlarına cevap verebilecek şekilde, A.R.M.'nin daha performanslı olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

1.2 Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasında, bir elektrikli taşıtın tekerlek tahriğini sağlamak amacıyla radyal akı yoluna sahip, geleneksel kısa kutup adımlı sargılı, dış rotorlu bir anahtarlı relüktans motorunun tasarımının yapılması amaçlanmaktadır. Literatürde bulunan ve yukarıda açıklanan dış rotorlu örneklerinden farklı olarak motorun, bir faz sargısının

tek bir kutup çifti üzerine yerleştirildiği en basit yapıda tasarlanması öngörülmektedir. Bunun ardından, bugüne dek sadece iç rotorlu A.R.M.'lere uygulanan uzun kutup adımlı sargı yapısı tasarlanan motora uyarlanarak, sargı yapısına göre motorun moment üretim kapasitesi ve oluşan moment dalgalılığının karşılaştırılması ve bunun taşıt performansına olan getirilerinin incelenmesi hedeflenmektedir.

Bu çalışma, literatürde rastlanan dış rotorlu ve radyal akı yoluna sahip anahtarlı relüktans motorları içinde gerçek boyutlardaki bir taşıtın tekerlek tahriğini sağlamak amacıyla tek kutuplu yapıda geliştirilen ilk örnektir. Ayrıca çalışma, tekerlek-içi motor olarak tasarlanan dış rotorlu yapıdaki bir A.R.M.'ye uzun adımlı sargı yapısının ilk kez uygulanması nedeniyle de özgünlük arz etmektedir.

1.3 Çalışmanın Yapısı

Elektrik tahrikli taşıtların günümüzde dünya üzerinde kullanımının giderek yaygınlaştığı görülmekte, gelecekte ise taşıt tahriğini sağlamak amacıyla elektrik enerjisinin kullanımının yegane seçenek olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, elektrikli taşıt tahrik sistemlerini oluşturan enerji depolama birimleri ve enerji dönüşüm elemanları gibi bileşenlerin verimlerinin iyileştirilmesi, daha kompakt ve kullanışlı yapılar oluşturulması ve tüm bunların mümkün olan en ekonomik şekilde gerçekleştirilmesi önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada, bir elektrikli taşıt tahrik sisteminde tekerlek tahriğini sağlamak amacıyla kullanılacak olan dış rotorlu yapıdaki bir anahtarlı relüktans motorunun tasarımı ve imalatı yapılmakta ve elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

Tez çalışmasının içeriği detaylı olarak şu şekilde açıklanmaktadır.

Tezin birinci bölümünde bilimsel literatür taranarak, elektrikli taşıt tahrik sistemleri, bu tahrik sistemlerinde kullanılan tahrik motorları, bu motorların farklı yapılarına ait uygulama örnekleri ve anahtarlı relüktans motorlarının bu çalışmalar içindeki yeri incelenmektedir.

Tezin ikinci bölümü elektrik tahrikli taşıtlara ayrılmaktadır. Bu bölümde, günümüzde kullanılan taşıtlar ve tahrik yöntemleri incelenmektedir. Ayrıca elektrik enerjisinin taşıt tahriğinde kullanımının nedenleri ve avantajları vurgulanmaktadır. Son olarak elektrikli taşıt tahrik sistemleri ve bu sistemlerde kullanılan elemanlar incelenerek, birbirlerine göre üstünlükleri ve zayıf yönleri karşılaştırılmakta, doğru eleman seçiminin önemi belirtilmektedir.

Üçüncü bölümün ana hatlarını anahtarlı relüktans makinaları ve kontrolü oluşturmaktadır. Bu makinaya ait genel yapı ve çalışma prensipleri ile diğer elektrik makinalarıyla karşılaştırıldığında ortaya çıkan üstün ve zayıf yönleri vurgulanmaktadır. Ayrıca anahtarlı relüktans motorları sürekli çalışma esnasında yarı iletken güç anahtarlarından oluşan bir konverter devreye gereksinim duyduğundan, bu makinalarda kullanılan en yaygın konverter devre yapısı olan asimetrik köprü konverter devresinin çalışması açıklanmaktadır.

Dördüncü bölümde, tez çalışmasının temelini oluşturan dış rotorlu anahtarlı relüktans motorunun tasarım süreci açıklanmaktadır. Kullanım amacına yönelik olarak belirlenen sınırlayıcı koşullar altında motorun boyutları, konstrüksiyonu ve sargı yapısı matematiksel olarak elde edilmektedir.

Beşinci bölümde, tasarım ve optimizasyon çalışması sonucunda nihai boyutları elde edilen D.R.A.R.M.'nin statik manyetik ve ısınma analizleri yapılmaktadır. Motorun rotor konumuna ve akıma bağlı olarak değişen akı, moment ve endüktans karakteristiklerini elde etmek amacıyla statik manyetik analizi gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla, sonlu elemanlar analizi yardımıyla çözüm yapan ANSOFT-Maxwell2D yazılımından faydalanılmaktadır. Bu yazılım, basit ve kullanışlı kullanıcı arabirimi, hızlı çözüm sunması ve sonuçları görsel olarak anlaşılır ve kullanışlı biçimde verebilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Ayrıca motorun moment üretim kapasitesini ve moment dalgalılığını incelemek amacıyla uzun adımlı sargı yapısı da denenmekte ve karşılaştırmalı sonuçları verilmektedir.

Altıncı bölümde, tasarlanan motorun farklı çalışma şartlarındaki dinamik performansını belirlemek amacıyla geliştirilen matematiksel modeli ve nonlineer

dinamik simülasyonu sunulmaktadır. Simülasyon şartları, bir elektrik tahrikli taşıtın başlıca çalışma koşulları göz önünde tutularak belirlenmektedir.

Yedinci ve son bölümde ise, gerçekleştirilen tez çalışmasının aşamaları kısaca özetlenmekte, elde edilen sonuçlar yorumlanmakta ve bu çalışmanın devamı olarak ileride yapılabilecek çalışmalara yönelik önerilerde bulunmaktadır.

2. ELEKTRİKLİ TAŞITLAR

Günümüzde dünya üzerindeki taşıtların %98'i enerji kaynağı olarak benzin, motorin ve LPG gibi petrol türevi fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Bu yakıtların yoğun olarak tüketiminin gerek ekonomik, gerekse çevresel yönden önemli sakıncaları bulunmaktadır. Bunlar, kanıtlanmış petrol rezervlerinin giderek azalmasına bağlı olarak artan fiyatlar, petrol üreticisi ülkelere bağımlılık, bu yakıtların yakılması sonucu ortaya çıkan zararlı atık ve emisyonlar ile oluşan sera gazı etkisinin çevre üzerine etkileri olarak sayılabilir [61]. Özellikle kara taşıtlarının giderek artan sayısına bağlı olarak ortaya çıkan bu sorunlar, alternatif çözüm önerilerinin ortaya atılması gereksinimini gündeme getirmektedir.

Son yıllarda otomotiv sektöründe gerçekleştirilen araştırma ve geliştirme çalışmaları, hem yük hem de yolcu taşımada yüksek verimli, temiz ve güvenli çalışmanın önemine dikkat çekmektedir. Elektrik enerjisinin taşıt tahriğinde kullanılması fikri çok daha eskilere dayanmakla birlikte, bu amaca yönelik çalışmalar özellikle 1970'lerde yaşanan petrol krizi sonrasında hız kazanmıştır [3]. 1980'li yıllardan günümüze uzanan zaman içerisinde çeşitli yapılarda elektrikli ve hibrid taşıtlar geliştirilmiş ve tüketicilerin kullanımına sunulmuştur. Günümüzde ise bunlara ek olarak yakıt hücreleri ve hidrojen kullanımı geleceğin teknolojisi olarak görülmekte ve giderek artan oranda ve birçok alanda çalışmalara konu olmaktadır.

2.1 Otomotiv Sanayinin Gelişimi ve Günümüzdeki Durum

Otomotiv sanayi, Almanya ve Fransa öncülüğünde Avrupa'da doğmuş, A.B.D.'de gelişip güçlenmiştir. Yüz yılı aşkın bir tarihi geçmişe sahip olan otomotiv sanayi faaliyetleri, başlangıçta otomobil üretimi ile başlamış, Birinci Dünya Savaşı yıllarında ticari araç üretimi de gerçekleştirilerek toplam üretim içerisinde otomobil ağırlıklı olmak üzere sürekli bir gelişim ve değişim içerisinde olmuştur.

İçten yanmalı motorların keşfi, otomotiv endüstrisi için bir devrim niteliğindedir. Jean Joseph Etienne Lenoir, içten yanmalı motoru 1860 yılında Paris'te keşfetmiş ve bu tarihten dört yıl sonra da Köln'deki Gasmotorenfabrik Deutz AG fabrikasında içten yanmalı sabit motorların üretimine başlanmıştır. Bu fabrikanın kurucularından olan Otto, 1876 yılında ilk olarak dört silindirli içten yanmalı motorun üretimini gerçekleştirmiştir. İçten yanmalı motorlu, bugünkü anlamda modern bir otomobilin ilk olarak üretimi ise 1886 yılında Karl Benz ve Gottlieb Daimler tarafından gerçekleştirilmiş ve otomobil kullanımı bu yıllardan sonra hızlı bir şekilde Avrupa'da yayılmıştır. Ek olarak 1893 yılında A.B.D.'de de içten yanmalı motorlu otomobil üretimi başlamış ve üretim ve kullanım miktarı giderek artmıştır.

1900 yılında Fransa ve A.B.D. ağırlıklı olmak üzere toplam 9.500 adet olan üretim, 1915 yılında 1.000.000 adet üzerine çıkmıştır. 1950 yılına kadar dünya motorlu araç üretiminin %80'inden fazlası A.B.D.'de gerçekleştirilmiş, bu tarihten sonra ise Avrupa ülkeleri motorlu araç üretiminde kendilerini ciddi olarak hissettirmişlerdir. Japonya ise 1960 yılından sonra otomotiv sanayinde çok hızlı bir gelişme göstermiş ve 1960 yılında %4,9 olan dünya üretimi içerisindeki payı 1980 yılında %28,6'ya ulaşmıştır [62].

2005 yılına gelindiğinde ise dünyadaki motorlu taşıt üretimi 64.660.000 adet ve motorlu taşıt satışları ise 60.948.000 adet olarak gerçekleşmiştir [63]. 2005 yılı itibarıyla dünya üzerinde yaklaşık 850.000.000 adet olarak tahmin edilen taşıt sayısı, motorlu taşıtların günlük yaşantımızın ne kadar önemli bir parçası olduğunu kanıtlar [64].

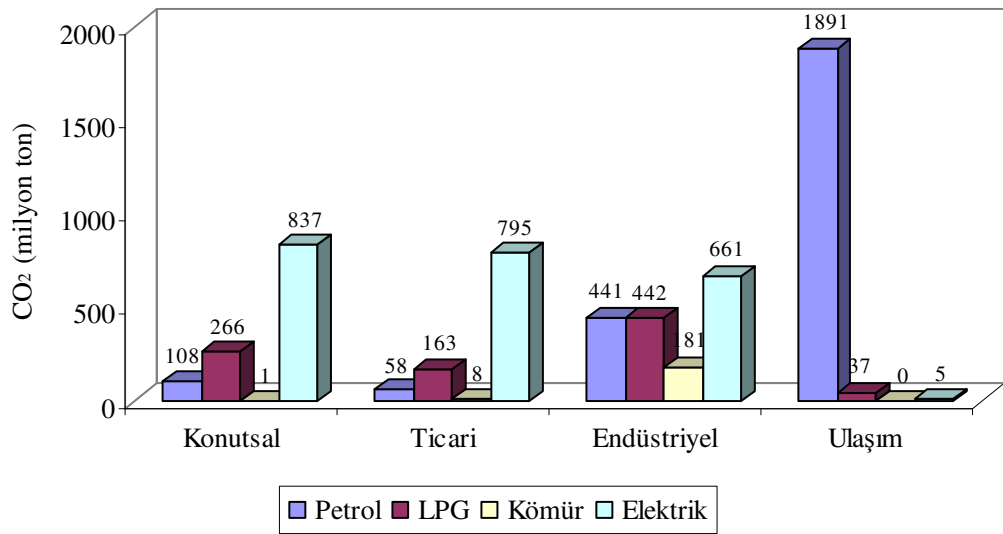
2.2 Alternatif Enerji Kaynağı Arayışının Nedenleri

2.2.1 Çevre kirliliği

Günümüzde içten yanmalı motorlu (İ.Y.M.) taşıtların hareketleri için ihtiyaç duydukları güç, petrol türevi fosil yakıtların yakılması sonucu elde edilmektedir. Yanma işlemi, ortaya ısı ve atıkların çıktığı kimyasal bir reaksiyondur. Isı, İ.Y.M. tarafından mekanik enerjiye çevrilir. Ortaya çıkan atıklar ise atmosfere salınır.

İdealde bu reaksiyon sonucunda atık olarak karbondioksit (CO_2) ve su (H_2O) oluşurken, gerçekte bunlara ek olarak azot oksitler (NO_x), karbonmonoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbonlar (HC) ortaya çıkar.

Şekil 2.1’de sektörel olarak enerji tüketimine bağlı olarak ortaya çıkan CO_2 miktarları, 2004 yılı verileri yardımıyla değerlendirilmektedir [65]. Buna göre ulaşım sektörünün, dünya üzerindeki en büyük petrol tüketicisi olarak, CO_2 üretimindeki payı açıkça görülmektedir.

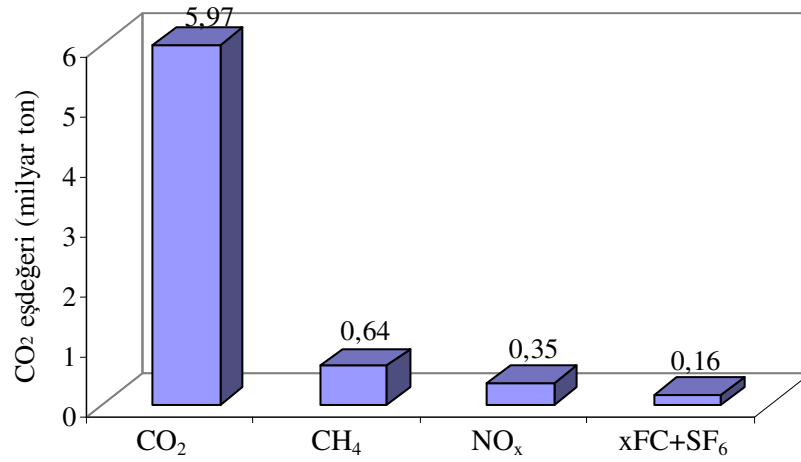


Şekil 2.1: Sektörel olarak enerji tüketimi sonucu ortaya çıkan CO_2 miktarlarının enerji kaynağına bağlı karşılaştırılması

CO_2 bitkisel yaşam için gerekli olan, çevreye zararsız bir gazdır. Yeşil bitkiler tarafından fotosentez yoluyla özümser. Hava içindeki yoğunluğu az olduğu sürece diğer canlılar da zarar görmezler. Bununla birlikte, İ.Y.M. içindeki yüksek sıcaklık ve basınçla oluşan NO_x 'ler atmosfere salındığında havadaki hidrojen ve oksijenle reaksiyona girerek diazotmonoksit (N_2O) ve nitrik asite (HNO_3) dönüşür. CO , oksijen eksikliği nedeniyle hidrokarbonların tam olarak yanmaması sonucunda oluşur. Solunduğunda insan ve hayvanlar için zehirleyici özelliktedir. Yanmamış hidrokarbonlar ise, yapılarına bağlı olarak, canlılar üzerinde doğrudan zehirleyici ve kanserojen etkiye sahiptir.

2.2.2 Küresel ısınma

Küresel ısınma, atmosferdeki CO₂, CH₄, NO_x'ler ve diğer zararlı gazların miktarındaki artış sonucu ortaya çıkan sera etkisinin sonucudur. Bu gazlar güneşin yeryüzünden geri yansıyan kızılötesi ışınlarını tutarak atmosfer sıcaklığını artırır. Günümüzde atmosferdeki sera gazları, güneşten gelen enerjinin %70'ini atmosferde tutarak dünyanın ısınmasına neden olmaktadır [66]. Şekil 2.2'de, 2004 yılı itibarıyla atmosferdeki sera gazlarının miktarları verilmektedir [65].



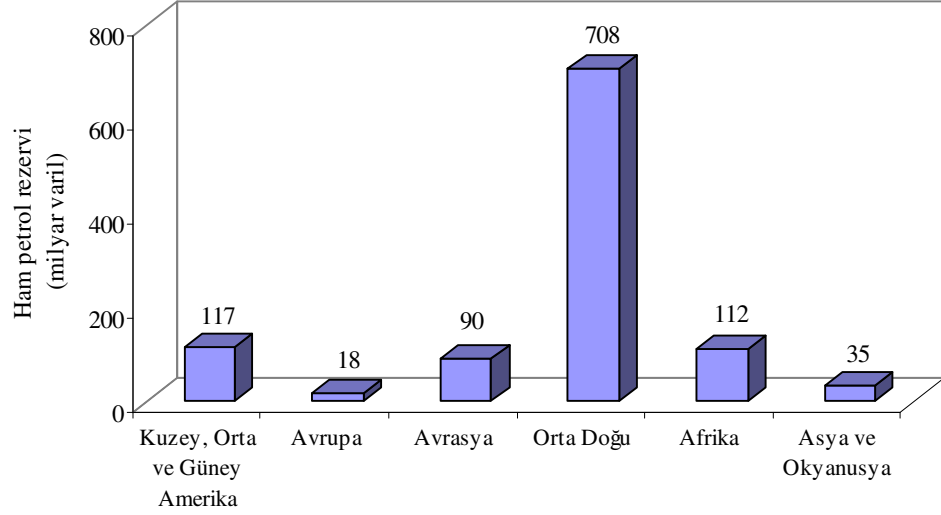
Şekil 2.2: 2004 yılı itibarıyla atmosferdeki sera gazlarının CO₂ cinsinden eşdeğeri

Otomotiv sektörünün yeryüzündeki en büyük CO₂ üreticisi olması ve kullanılan motorlu taşıt sayısının sürekli artması nedeniyle, atmosfere salınan CO₂'nin tamamı yeşil bitkiler tarafından özümsememektedir. Bu nedenle, İ.Y.M.'lu taşıtlar, küresel ısınmanın en önemli nedenlerinden biri olarak görülmektedir.

2.2.3 Petrol rezervlerinin azalması ve artan maliyetler

Petrol, milyonlarca yıllık jeolojik aşamalar sonucu oluşan bir fosil yakıttır. Ek olarak, çıkarılan ham petrolün kullanılabilir petrol ürünlerine dönüştürülmesi için de çeşitli işlemlere tabi tutulması gerekmektedir. Bu nedenle, dünya üzerinde varolan kanıtlanmış petrol rezervlerinin miktarı ve kullanım ömrü de dikkat edilmesi gereken bir noktadır.

Kanıtlanmış rezerv, “varolan ekonomik ve teknolojik imkanlarla, gelecekte kullanılabilirliği jeolojik ve mühendislik olarak kanıtlanmış kaynaklar” için kullanılan bir terimdir [67]. 2005 yılı verilerine göre, dünya üzerindeki kanıtlanmış petrol rezervleri Şekil 2.3’te verilmektedir [65].



Şekil 2.3: Dünya kanıtlanmış petrol rezervleri (2005)

Dünya üzerindeki petrol kaynaklarının varolan petrol talebini karşılayabileceği süre, tamamen kanıtlanmış rezervlerin üretim miktarına ve yeni rezervlerin keşfine bağlıdır. Bununla birlikte, petrol talebinin her geçen gün arttığı göz önüne alındığında, varolan rezervlerin 2038 yılına kadar tükeneceği sonucuna varılmaktadır [67]. Varolan rezervlerin giderek azalmasına bağlı olarak, petrol üreticisi konumundaki ülkelerin üretimde kısıntı yoluna gitmesi öngörülmektedir. Bu durum giderek artan taleple birleşince petrol fiyatlarında büyük artışlar yaşanması kaçınılmazdır. Buna en açık örnek olarak 1970’lerde yaşanan kriz ve petrol fiyatlarındaki dalgalanmalar gösterilebilir.

2.3 Yeni Enerji Kaynakları Geliştirilmesinin Önemi

Petrol türevi yakıtların yoğun şekilde kullanımının neden olduğu çevresel ve ekonomik olumsuzlukları azaltmak amacıyla yapılan çalışmaların; petrol türevi yakıtlar üzerine yapılan iyileştirme çalışmaları ve İ.Y.M.’ler üzerine gerçekleştirilen çalışmalar olmak üzere iki temel noktada yoğunlaştığı görülmektedir.

Yakıtların verimini artırmak ve yanma sonucunda ortaya çıkan zararlı atık miktarını azaltmak amacıyla, daha düşük oranda karbon içeren ve performans artırıcı çeşitli katkı maddeleriyle harmanlanmış farklı yakıt karışımları oluşturulmaktadır. Yanma sonucunda ortaya çıkan atık oranları incelendiğinde, bu yakıtların kullanımının çevresel bazda olumlu etkileri olduğu görülmektedir. Bununla birlikte bu katkı maddeleri yakıt içerisine oldukça sınırlı oranlarda katılmakta ve maliyetleri de yükseltmektedir.

İ.Y.M.'lerin verimlerini yükseltmek için gerçekleştirilen uğraşlar ise doyma noktasına ulaşmış durumdadır. Günümüzde en yüksek verimle çalışan İ.Y.M.'lerde yanma sonucunda elde edilen enerjinin sadece dörtte biri etkin olarak kullanılabilir. Düşük verimle gerçekleşen ve çevre üzerine olumsuz etkileri bulunan bu enerji dönüşümü nedeniyle, taşıt tahriğinde kullanılacak alternatif enerji kaynakları bulunmasına yönelik olarak 1980'lerde başlayan ve günümüz koşullarında hızlanarak devam eden çalışmalar sonucunda elektrik, en uygun enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Elektrik enerjisi, kolay elde edilebilir, verimli ve temiz bir enerji kaynağı olması nedeniyle taşıt tahriği için uygun bir alternatif oluşturmaktadır. Tarihsel gelişim süreci incelendiğinde, elektriğin taşıt tahriği için kullanılmasının yeni bir fikir olmadığı açıkça görülmektedir. 1900 yılında satılan 4.200 adet otomobilin %40'ı buhar, %38'i elektrik, %22'si ise petrolden elde ettiği enerjiyi kullanarak güç üretmektedir [68]. Enerji depolama elemanlarının çok yetersiz kaldığı ve yarı iletken güç elemanlarının henüz keşfedilmediği dönemlerde geliştirilen içten yanmalı motorlar kuşkusuz olarak otomobiller için yegane seçenek olmuştur. Bununla birlikte, güç elektroniğindeki ilerlemeler ve 1972 enerji krizi, elektrik enerjisinin kullanımının getirdiği önemli avantajların incelenerek, üzerinde yeni çalışmalara başlanmasını sağlamıştır.

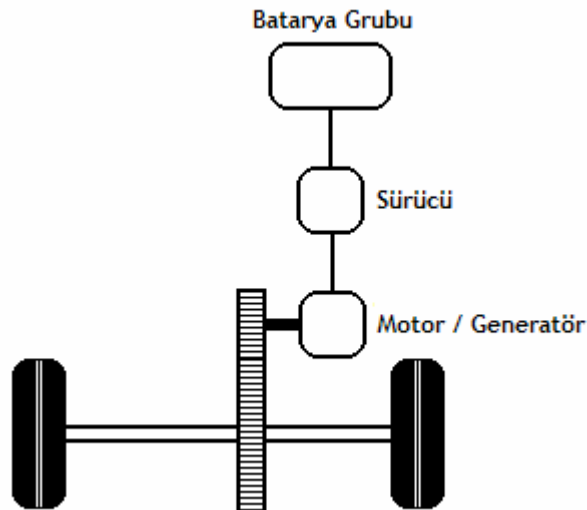
Artan Ar-Ge çalışmalarıyla birlikte 1980'lerden itibaren, batarya grubunda depolanan elektrik enerjisiyle tahrik edilen modern yapıdaki elektrikli taşıt prototipleri üretilmeye başlanmıştır. Bununla birlikte, batarya gruplarında depolanan enerjinin sınırlı olması ve taşıtın sürüş menzilini kısıtlaması nedeniyle elektrikli

taşıtlar üzerine yapılan çalışmaların, ilerleyen yıllarda hibrid taşıt yapıları üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Büyük otomotiv firmalarının da Ar-Ge çalışmalarına yaptığı katkıları sonucunda ilk hibrid taşıt uygulamaları 1997 yılı sonlarında piyasaya sürülerek kullanıma sunulmuştur. Günümüzde hibrid taşıt uygulamaları üzerine yapılan çalışmalar hızla devam etmekte birlikte, yakıt hücreleri ve hidrojen kullanımı, geleceğin teknolojisi olarak görülmektedir. Buna yönelik araştırma çalışmaları ve bazı pilot uygulamalar dünyanın farklı şehirlerinde hayata geçirilmeye devam etmektedir. Bu pilot uygulamaların en günceli, C.U.T.E. projesidir. Bu proje kapsamında 11 şehirde (İzlanda, Stockholm, Hamburg, Amsterdam, Londra, Lüksemburg, Stuttgart, Barcelona, Madrid, Porto, Perth) yakıt hücreli otobüsler, günlük hayatta yolcu taşımada kullanılmaya başlanmıştır.

2.4 Elektrikli Taşıt Tahrik Yapıları

2.4.1 Tümü-elektrikli taşıtlar

Hareketi için gerekli gücün tamamını, bir batarya grubu tarafından beslenen elektrik motorundan alan taşıtlar, tümü-elektrikli taşıt olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.4'te ana hatlarıyla bir tümü-elektrikli taşıt tahrik sisteminin yapısı görülmektedir.



Şekil 2.4: Tümü-elektrikli taşıt tahrik yapısı

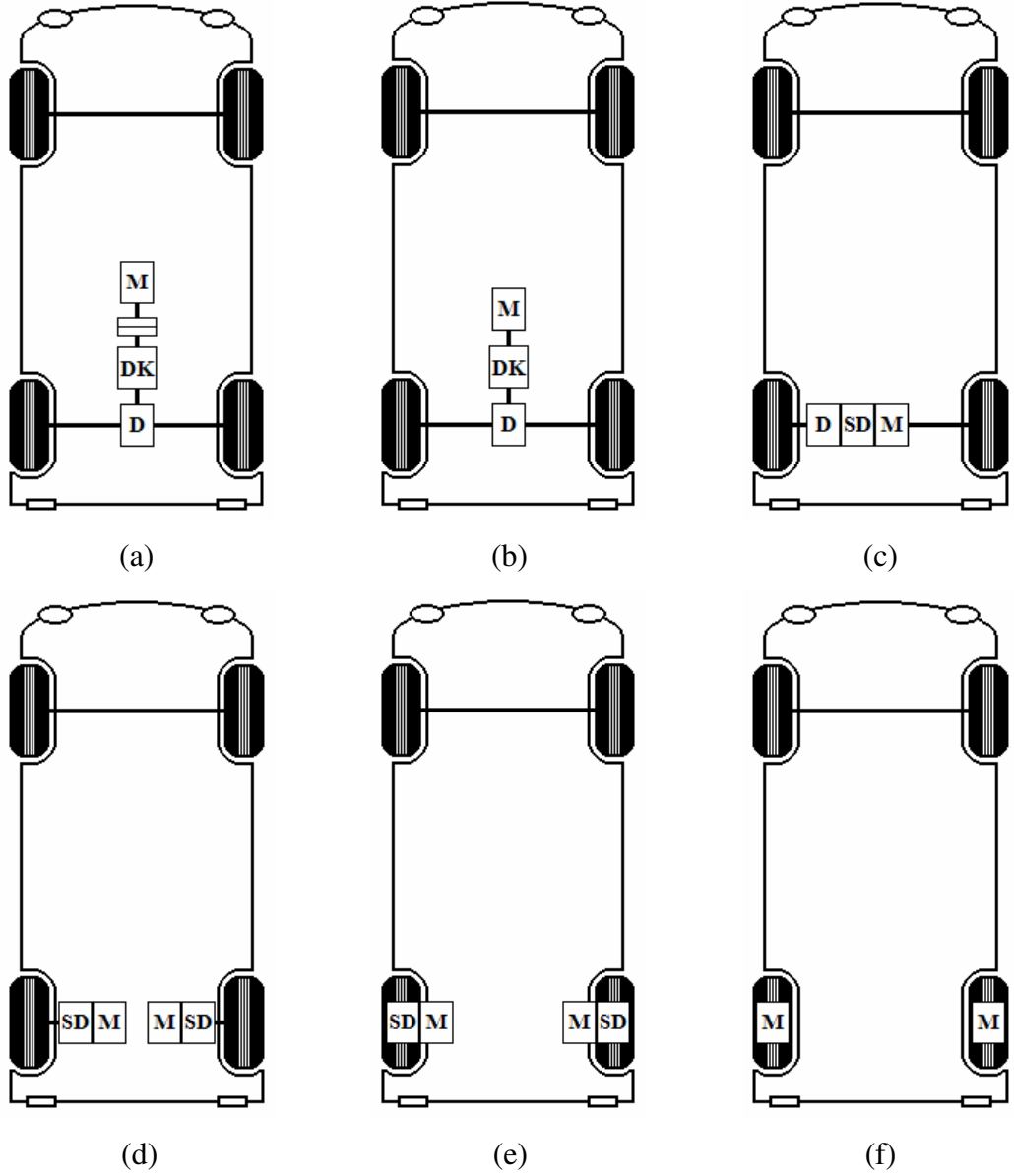
Geliştirilen ilk tümü-elektrikli taşıtların tahrik yapıları incelendiğinde, bu taşıtların halihazırda var olan İ.Y.M.'li taşıt tahrik yapısından türettiği görülmektedir. Bu örneklerde, taşıtın tahrik sistemindeki İ.Y.M. bir elektrik motoru ve sürücüsüyle, yakıt deposu ise batarya grubuyla değiştirilerek en basit tümü-elektrikli taşıt yapısı elde edilmiştir. Bununla birlikte, böyle bir işlem sonucunda elde edilen taşıtın sunduğu performans ve verimin yeterli olmaması nedeniyle, tümü-elektrikli taşıtlar için tamamen orjinal tasarımlar yapılması yoluna gidilmektedir.

Sürüş koşullarına bağlı olarak, taşıt tahrik sistemindeki güç akışı farklı yönlerde gerçekleşmektedir. Taşıtın kalkışı, ani hızlanma ve yokuş tırmanma gibi durumlarda batarya grubundan yoğun şekilde enerji çekilir. Bu gibi sürüş koşulları, bataryalarda depolanmış olan enerjinin tüketimini artırarak, taşıtın maksimum sürüş menziline önemli miktarda düşürür. Bu enerjinin kısmen geri kazanımı, geri kazanımlı frenleme ile mümkün olmaktadır. Taşıtın kendi ataletiyle yavaşlaması sırasında, elektrik motoru generatör olarak çalışarak tahrik sistemindeki güç akışını ters yöne çevirir ve batarya grubunu besler. Ayrıca güç talebinin arttığı durumlarda kısa süreler için motora ek güç sağlamak amacıyla, tahrik sistemine yardımcı bir batarya grubu veya süperkapasitör gibi bir ilave enerji depolama birimi eklenebilmektedir. Taşıtın özellikle şehir içi kullanımında, trafik ışıkları ve trafik sıkışıklığı gibi nedenlerle kaçınılmaz olan geçici duruşlar sırasında ise elektrik motorunun batarya grubuyla bağlantısı kesilerek, enerjinin boşa tüketiminin önüne geçilir.

Tümü-elektrikli taşıtların tahrik sistemleri üzerinde çeşitli şekillerde iyileştirme ve geliştirme çalışmaları yapılarak, farklı tahrik sistemi yapıları elde edilmiştir. Bu tahrik yapıları, kullanılan tahrik motorunun sayısına göre;

- Tek motorlu tahrik sistemleri,
- Çok motorlu tahrik sistemleri,

olarak iki grupta incelenirler. Bunlar sırasıyla Şekil 2.5'te verilmektedir.



Şekil 2.5: Tek ve çok motorlu tümü-elektrikli taşıt tahrik sistemleri

Şekil 2.5.a, elektrik motorunun, İ.Y.M.'li taşıt tahrik yapısındaki İ.Y.M.'nin yerini aldığı en basit elektrikli taşıt tahrik sistemini göstermektedir. Bu yapıda bir elektrik motoru (M), kavrama elemanı, dişli kutusu (DK) ve diferansiyel (D) bulunmaktadır. Kavrama elemanı, mekanik olarak elektrik motorunu dişli kutusuna bağlamak veya ayırmak için kullanılır. Dişli kutusu, yüklenme durumuna göre elektrik motorunun moment-hız karakteristiğini uyarlamak için kullanılan bir dizi dişliden oluşur. Diferansiyel ise, yol durumuna göre (viraj dönüşü vs.) tahrik edilen tekerleklerin dönüş hızlarının belirlenmesini sağlar.

Şekil 2.5.b’de ise bu tahrik sistemi, kavrama elemanı olmadan oluşturulmaktadır. Bu sayede mekanik güç aktarım organının boyutu ve ağırlığı azalır.

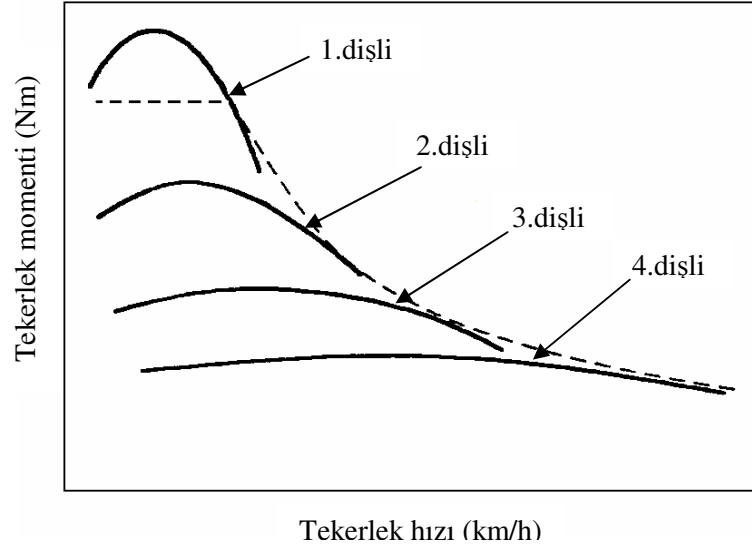
Şekil 2.5.c’de ise dişli kutusu tahrik sisteminden çıkartılarak yerine sabit bir dişli eleman kullanılmıştır. Bu yapıda önemli olan, kullanılan elektrik motorunun geniş hız ve moment aralığında çalışabilmesidir.

Şekil 2.5.d ve 2.5.e’deki tahrik sistemleri, birden fazla sayıda tahrik motorunun kullanıldığı tahrik yapılarıdır. Kullanılan motorların “tekerlek motoru” olarak adlandırıldığı bu yapı ile mekanik diferansiyel ihtiyacı ortadan kalkar. Ana taşıt kontrolöründen gelen kontrol sinyallerine göre motorlar, birbirlerinden bağımsız şekilde kontrol edilebilir. Bu amaçla her bir motor ayrı sürücü devre üzerinden beslenir. Bununla birlikte motor hızını azaltmak ve momentini artırmak için kullanılan dişli (SD), yine tahrik sisteminde yer almaktadır.

Elektrik motoruyla tekerlekler arasındaki dişli elemanı tamamen ortadan kaldırmak için, “tekerlek-içi motor” olarak adlandırılan dış rotorlu elektrik motorları geliştirilmektedir (Şekil 2.5.f). Bu amaçla kullanılan motorların en temel özellikleri momentlerinin yüksek, nominal hızlarının ise düşük olmasıdır. Motora uygulanacak hız kontrolü ile, tekerleğin ve dolayısıyla taşıtın hızı doğrudan kontrol edilebilir. Motorun moment kapasitesinin ise, taşıtın kalkışı ve ani hızlanması durumunda moment ihtiyacını karşılayabilmesi için yüksek olması gerekmektedir.

Şekil 2.6’da bir İ.Y.M. tarafından tahrik edilen bir taşıtın moment-hız karakteristiği verilmektedir. Kullanılan farklı dişli oranları yardımıyla motor momenti kontrol edilerek tekerleklere aktarılır. Bu sayede elde edilen moment-hız karakteristiğinin, bir elektrik motorunun moment-hız karakteristiğiyle gösterdiği benzerlik açıkça görülmektedir.

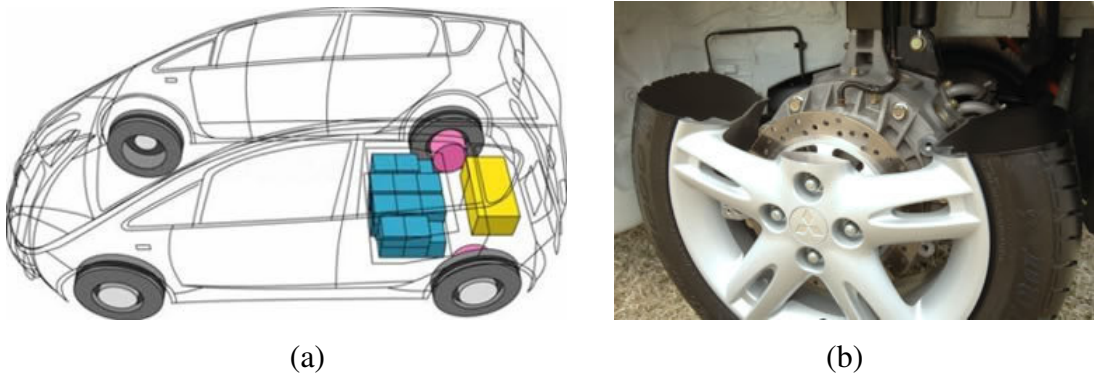
Şekil 2.5.a ve 2.5.b’de prensip şeması verilen elektrikli taşıt tahrik yapılarında da dişli kutuları benzer amaçla kullanılmaktadır. Farklı dişli oranları yardımıyla elektrik motorunun sabit moment ve sabit güç bölgeleri kontrol edilebilir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6: Dört oranlı dişli kutusuna sahip İ.Y.M.'li taşıta ait moment-hız karakteristiği

Dişli kutusunun kullanılmadığı tek motorlu tahrik yapıları ve tekerlek-içi motor kullanılan tahrik yapılarında, elektrik motorunun yüksek moment üretim kapasitesine sahip olmasının gerekliliği buradan da anlaşılmaktadır.

Günümüzde çok farklı sınıflardaki taşıtlara uygulanan elektrikli tahrik sistemlerine ve tekerlek-içi tahrik yapılarına rastlanmaktadır. Şekil 2.7-2.8'de tekerlek-içi motorlar ile tahrik edilen bu taşıtlara örnekler verilmektedir. Şekil 2.7.a'da Mitsubishi Colt EV elektrikli taşıt ve tahrik yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.7: Mitsubishi Colt elektrikli taşıt (a) tahrik yapısı, (b) tekerlek-içi tahrik motoru

Mini sınıfta yer alan bu taşıta tahrik gücünü, her biri 20kW, 300Nm değerinde olan iki adet sürekli mıknatıslı senkron motor sağlamaktadır. 22 hücreden oluşan Li-Ion batarya grubu tahrik motorlarına 325V gerilim sağlamaktadır.

Şekil 2.8’de ise, “concept car” sınıfına ait Eliica görülmektedir. Keio Üniversitesi’nden bir grup araştırmacı tarafından geliştirilen bu araç günümüzde elektrikli taşıt teknolojisinin ulaştığı uç noktalardan biridir. Her biri 60kW güç üretebilen sekiz adet sürekli mıknatıslı tekerlek-içi motor araca tahrik gücünü sağlamakta ve aracı 370km/h hıza ulaştırmaktadır. 328V’luk batarya grubu tarafından beslenen motorların her biri 100Nm moment üretmektedir.

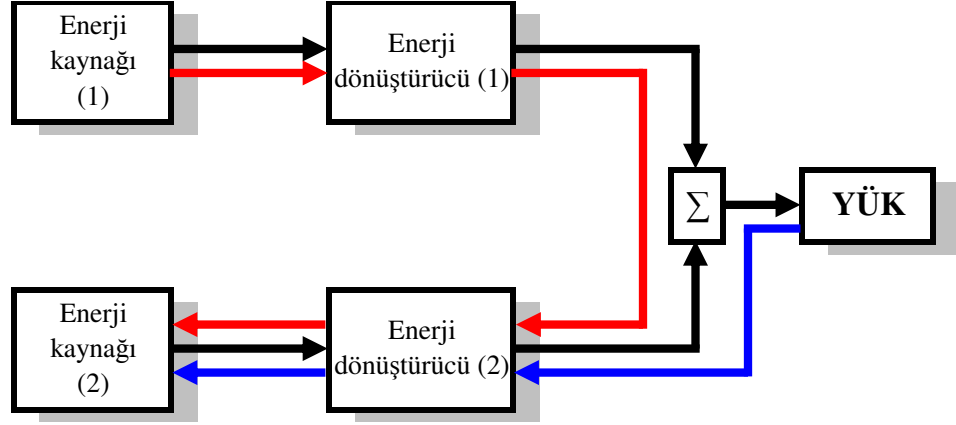


Şekil 2.8: Eliica elektrikli taşıt

2.4.2 Hibrid elektrikli taşıtlar

Hareketi için gerekli gücü, yapısındaki birden fazla enerji kaynağından alan taşıtlar “hibrid”, bu enerji kaynaklarından birisi elektrik enerjisi olan taşıtlar ise “hibrid elektrikli” taşıt olarak adlandırılmaktadır. Bununla birlikte, günümüzde hibrid elektrikli taşıt kavramı daha çok, tahrik gücünü yapısında bulunan İ.Y.M. ve elektrik motorundan birlikte veya ayrı ayrı alan taşıtlar için kullanılmaktadır.

Şekil 2.9’da hibrid elektrikli taşıt tahrik sisteminin yapısı prensip olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.9: Hibrid elektrikli taşıt tahrik yapısı

Burada 1 no'lu güç ünitesi, İ.Y.M. yardımıyla tek yönlü olarak tekerlekleri döndürecek tahrik gücünü üretir. 2 no'lu güç ünitesi ise enerji kaynağı olarak batarya grubunu kullanır. Bu üniteye güç akışı, geri kazanımlı frenleme ile enerji geri dönüşümünün sağlanması için çift yönlü olarak gerçekleşir. Batarya grubu, faydalı frenleme ile şarj edilebileceği gibi (mavi renkle gösterilen güç akış yönü), 1 no'lu güç ünitesi kullanılarak da şarj edilebilir (kırmızı renkle gösterilen güç akış yönü).

Hibrid elektrikli tahrik sisteminin yapısı, sistemi oluşturan bileşenlerin birbirleriyle bağlanma şekillerine göre dört farklı şekilde isimlendirilir.

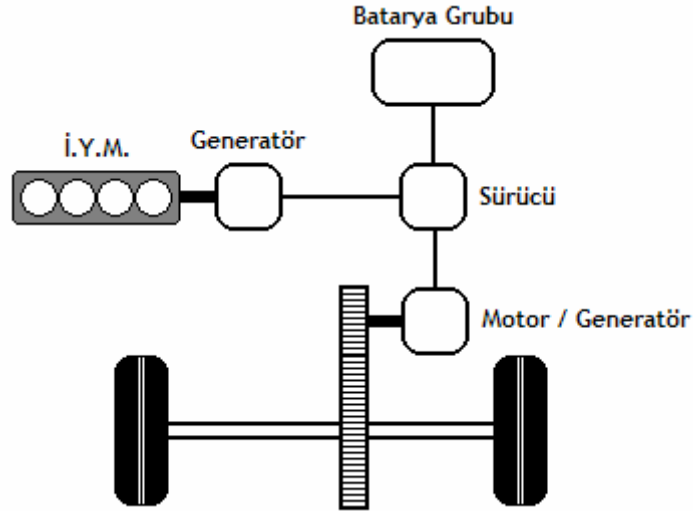
2.4.2.1 Seri hibrid elektrikli taşıt tahrik yapısı

Seri hibrid yapı, iki farklı güç kaynağının, taşıtı tahrik eden bir güç üreticini besleyebildiği yapı olarak özetlenebilir. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi seri hibrid yapı, tümü-elektrikli taşıt yapısına en benzer durumdur. Tek farklılık, elektrik enerjisinin İ.Y.M. tarafından tahrik edilen bir generatör ile taşıt üzerinde üretiliyor olmasıdır.

Sürüş koşullarına bağlı olarak seri hibrid elektrikli tahrik sisteminde güç akışı aşağıdaki şekillerde olmaktadır:

- Sadece elektrik gücü: İ.Y.M. kapalıdır ve tüm güç batarya grubundan çekilir.
- Hibrid çalışma: Tahrik gücü, hem İ.Y.M.-generatör, hem de batarya grubu tarafından birlikte sağlanır.

- Sadece İ.Y.M. gücü: Batarya grubu tamamen devre dışıdır. Tahrik gücünün tamamı İ.Y.M.-generatör grubu ile sağlanır. Elektrik makinaları, güç taşıma elemanı olarak davranır.
- İ.Y.M. tahriği ve batarya şarj durumu: İ.Y.M.-generatör grubu taşıta tahrik gücünü sağlarken diğer yandan da batarya grubunu besler.
- Geri kazanımlı fren modu: İ.Y.M.-generatör grubu devre dışı bırakılır. Tahrik motoru generatör olarak çalışarak batarya grubunu besler.
- Batarya şarj modu: Tahrik motoru çalışmaz. İ.Y.M.-generatör grubu bataryaları besler.
- Hibrid batarya şarj modu: İ.Y.M.-generatör grubu ve generatör olarak çalışan tahrik motoru birlikte bataryaları besler.



Şekil 2.10: Seri hibrid tahrik yapısı

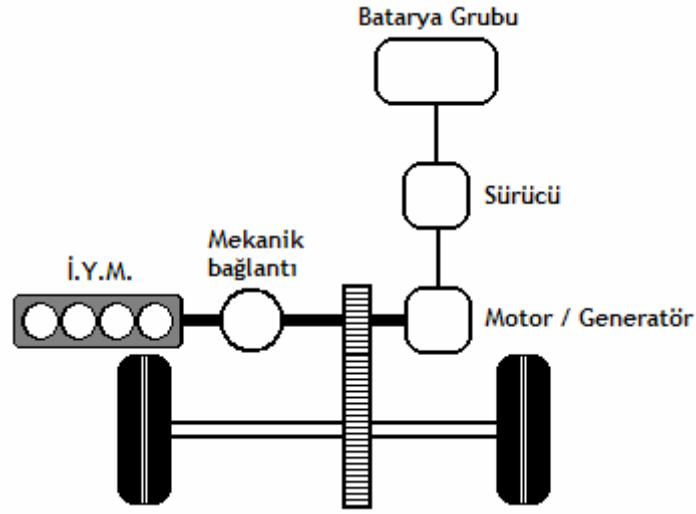
Seri hibrid elektrikli tahrik sisteminde geri kazanımlı frenleme ile, tümü-elektrikli taşıtlarda olduğu gibi harcanan enerjinin geri kazanımı sağlanmakta, böylece önemli ölçüde enerji tasarrufu yapılmaktadır. Uygun moment-hız karakteristiğine sahip tahrik motorları ile, mekanik güç aktarım elemanı ihtiyacı ortadan kaldırılabilir. Böylece taşıtın ağırlığı ve toplam maliyeti azaltılmakla birlikte, burada oluşacak olan kayıpların ortadan kalkması sağlanır. Ayrıca birden fazla sayıda motor ile taşıt çok tekerlekten tahrik edilerek, mekanik diferansiyel ihtiyacı da ortadan kaldırılabilir. Bu yapının bir diğer avantajı da İ.Y.M.'nin tekerleklerle doğrudan bağlantısının olmamasıdır. Böylece İ.Y.M. sürekli olarak en verimli olduğu hızda çalıştırılabilir.

Bununla birlikte seri hibrid yapıda, İ.Y.M.'nin ürettiği mekanik enerji önce generatör ile elektrik enerjisine, daha sonra ise motor ile tekrar mekanik enerjiye dönüştürülmektedir. Bu durumda her iki elektrik makinasında oluşan kayıplar sistemin toplam verimini düşürür. Ayrıca, kullanılan generatör taşıtın ağırlığını ve sistem maliyetini artırmaktadır. Ek olarak, tek tahrik motoru kullanılan seri hibrid yapıda, bu motor taşıtın tek tahrik kaynağı olduğundan dolayı, taşıtın maksimum ihtiyaçlarını karşılayabilecek şekilde boyutlandırılması gerekliliği önem taşımaktadır.

2.4.2.2 Paralel hibrid elektrikli taşıt tahrik yapısı

Bu yapıya sahip taşıtlarda elektrik motoru ve İ.Y.M., bir mekanik kavrama elemanı üzerinden tekerlekleri birlikte tahrik ederler (Şekil 2.11). Paralel hibrid taşıtlarda, İ.Y.M.'li taşıtlara göre daha küçük güçlü ve küçük boyutlu İ.Y.M.'ler kullanılır. Taşıtın toplam güç ihtiyacı ve çalışma koşullarına göre kontrolör, hangi kaynaktan ne kadar güç çekileceğini belirler. Sürüş koşullarına bağlı olarak paralel hibrid elektrikli taşıt tahrik sisteminde güç akışı aşağıdaki şekillerde olmaktadır:

- Hibrid tahrik: Ani hızlanma ihtiyacında veya yokuş tırmanma gibi sürüş koşullarında tahrik gücü, İ.Y.M. ve elektrik motoru tarafından ortak olarak sağlanır. Böylece birbirini destekleyen iki güç kaynağı elde edilir.
- Sadece İ.Y.M. gücü: Taşıta tahrik gücünü İ.Y.M. tek başına üretir.
- Sadece elektrik gücü: Tahrik gücünü elektrik motoru tek başına üretir. Sürüş koşullarına göre, özellikle sık sık dur-kalk yapılan yerlerde sadece elektrik gücü kullanılarak gürültü ve atık üretimi azaltılır.
- Geri kazanımlı frenleme: İ.Y.M. kapatılır veya kavrama elemanı ile bağlantısı kesilir. Taşıtın potansiyel veya kinetik enerjisi ile bataryalar şarj edilir.
- İ.Y.M. ile batarya şarj modu: Tekerleklerin kavrama elemanı ile bağlantısı kesilir. İ.Y.M. sadece bataryaları şarj eder.



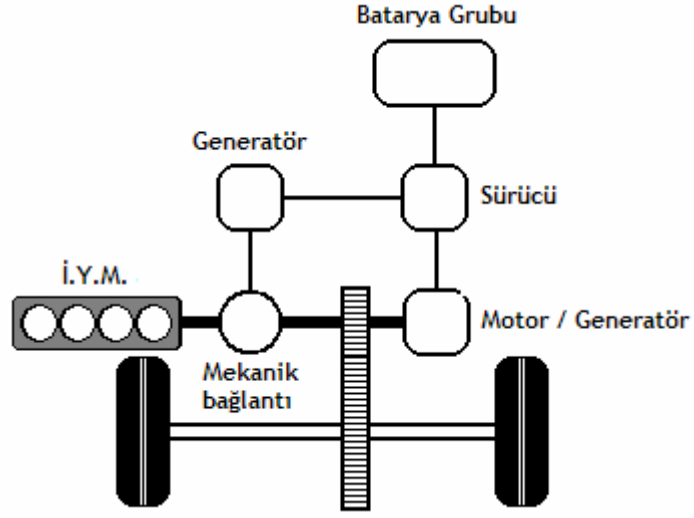
Şekil 2.11: Paralel hibrid tahrik yapısı

Paralel hibrid yapı, seri hibrid yapıyla karşılaştırıldığında daha düşük kapasiteli bataryalar kullandığı için şarj çoğunlukla geri kazanımlı frenleme ile sağlanır. Bunun yeterli olmadığı durumlarda ise bataryaların harici bir kaynak yardımıyla şarj edilmesine ihtiyaç duyulur.

2.4.2.3 Seri-paralel hibrid elektrikli taşıt tahrik yapısı

Seri-paralel hibrid yapı, seri hibrid yapıyla karşılaştırıldığında ilave bir mekanik bağlantı elemanı, paralel hibrid yapıyla karşılaştırıldığında ise ilave bir generatör içerir. Burada İ.Y.M., mekanik bağlantı elemanı ile hem diferansiyeli, hem de generatörü tahrik etmektedir (Şekil 2.12).

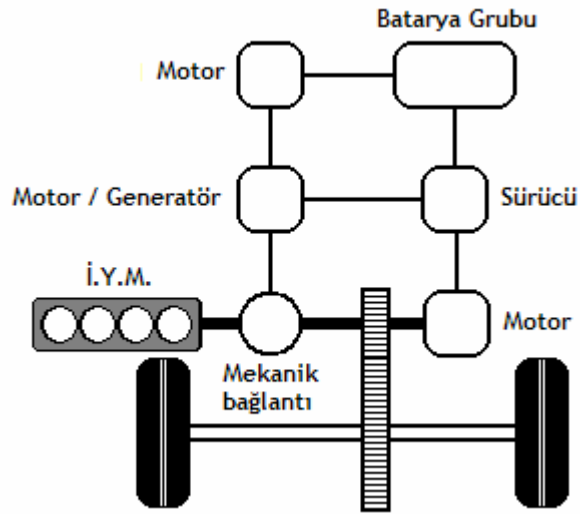
Bu sistem hem seri hem de paralel hibrid tahrik sistemlerinin olumlu özelliklerini taşımaktadır. İ.Y.M. normal şartlarda en verimli çalışma noktasında çalışarak generatör üzerinden bataryaları ve elektrik motorunu beslemekte, taşıtın ek güç ihtiyacında ise mekanik olarak elektrik motoruna destek olmaktadır. Bir başka ifadeyle, batarya grubunun elektriksel olarak üstlendiği fazla gücü karşılama görevini üstlenmektedir.



Şekil 2.12: Seri-paralel hibrid tahrik yapısı

2.4.2.4 Karışık hibrid elektrikli taşıt tahrik yapısı

Bu sistem diğer üç kategoriye dahil edilemeyecek karışık bir tahrik yapısı içerir. Bu sisteme karışık hibrid yapı denmesinin nedeni, seri-paralel sistemde kullanılan generatörün yerine gerektiğinde motor, gerektiğinde ise generatör olarak çalışan bir elektrik makinası kullanılmasıdır (Şekil 2.13). Bu sayede, seri-paralel hibrid yapıda generatör tek yönlü enerji akışına izin verirken, karışık hibrid yapıda bu güç akışı her iki yönde de gerçekleşebilmektedir.



Şekil 2.13: Karışık hibrid tahrik yapısı

Bu sistem seri-paralel hibrid yapının tüm avantajlarına sahiptir. Bunlara ek olarak, elektrik makinası motor olarak çalıştırılıp İ.Y.M. için marş motoru görevini de üstlenebilir.

Şekil 2.14-2.19'da, günümüzde seri üretimi yapılan bazı hibrid elektrikli taşıt örnekleri verilmektedir.

Honda Insight, seri üretimi yapılan ilk hibrid elektrikli taşıt modelidir. Taşıt paralel hibrid tahrik yapısına sahiptir. Tahrik gücünü 1.0lt hacminde, 65hp güç ve 4800d/dk'da 90Nm moment üreten bir benzinli motor ile 13hp güç ve 2000d/dk'da 34Nm moment üreten ve 144V gerilimle beslenen bir sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru sağlamaktadır.



Şekil 2.14: Honda Insight

Toyota Prius ise yine paralel hibrid yapıya sahiptir ve Honda Insight'a alternatif olarak geliştirilmiştir. Araçta 1.5lt hacminde, 70hp güç ve 4200d/dk 'da 110 Nm moment üreten benzinli motor bulunmaktadır. Elektrik motoru ise 500V gerilimle beslenen 67hp gücünde bir sürekli mıknatıslı senkron motordur ve 0-1200d/dk hız aralığında 400Nm moment üretir.



Şekil 2.15: Toyota Prius

Bir başka model olan Honda Civic Hybrid ise gücünü 95hp benzinli ve 20hp sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motorundan almaktadır. İki motor araca toplam 1000-2500d/dk aralığında 167Nm moment üretmektedir. Honda Insight ve Toyota Prius'un aksine Civic Hybrid, İ.Y.M.'li taşıttan hibrid elektrikli taşıta dönüştürülen bir modeldir.



Şekil 2.16: Honda Civic Hybrid

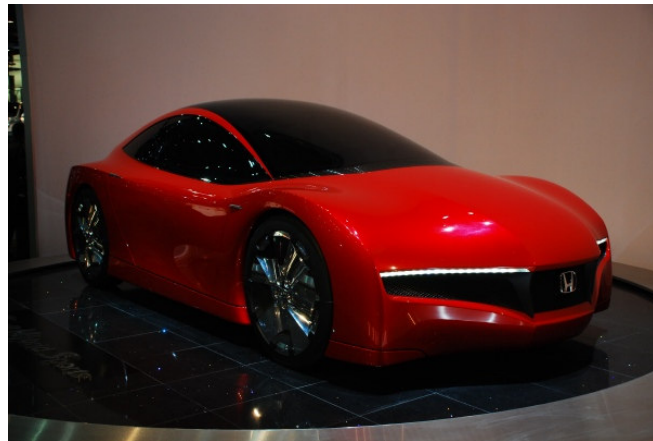
Ticari olarak seri üretimleri yapılan bu modellerin dışında, çeşitli prototip modellerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar sürmektedir. Bu prototip çalışmalarının en son örnekleri yine Toyota ve Honda tarafından tanıtılan modellerdir.



Şekil 2.17: Toyota HybridX



Şekil 2.18: Toyota FT-HS



Şekil 2.19: Honda Small Hybrid Sports

Hibrid elektrikli taşıtların tahrik yapıları incelendiğinde bunların neredeyse tamamının paralel veya seri-paralel hibrid mimaride olduğu görülmektedir. Bu taşıtlarda bir adet elektrik motoru tahrik gücünü üretmekte ve üretilen güç, güç aktarım elemanları yardımıyla tekerleklere aktarılmaktadır. Bu mimarilerde sürüş koşullarına bağlı olarak, İ.Y.M.'de tek başına tekerlekleri tahrik etme imkanına sahiptir. Bu nedenle tümü-elektrikli taşıtlarda daha yaygın şekilde kullanılan tekerlek motoru veya tekerlek-içi motorların bu tip hibrid elektrikli mimarilerde kullanılması mümkün değildir.

Seri hibrid elektrikli taşıt tahrik yapılarında ise, Bölüm 2.4.2.1'de detaylı olarak açıklandığı gibi elektrik motoru, taşıtın hem batarya grubu hem de İ.Y.M. tarafından beslendiği durumda sürekli olarak devrededir. Bu nedenle tekerlek motorları veya tekerlek-içi motorlar hibrid elektrikli yapı içerisinde sadece seri hibrid elektrikli tahrik yapılarında kullanılmaya uygundur.

Tekerlek tahriğinin elektrik motorlarıyla sağlandığı motorlu taşıt uygulamalarının günümüzdeki en uç örneklerinden biri Şekil 2.20'de gösterilen yükleyici iş makinalarıdır. LeTourneau Inc tarafından üretilen bu iş makinalarında her bir tekerleği tahrik etmek amacıyla bir adet anahtarlı relüktans motorundan faydalanılmaktadır. Motorun ürettiği 3390Nm'lik maksimum moment, bu taşıtta bu motor yapısının seçilmiş olmasının başlıca nedenidir.

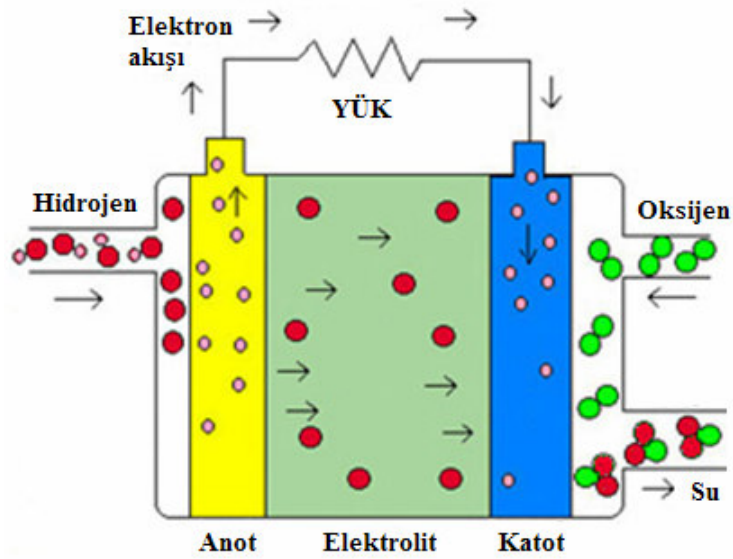


Şekil 2.20: LeTourneau L-1350 ağır yükleyici iş makinası

2.4.3 Yakıt hücreli elektrikli taşıtlar

Yakıt hücreleri, saf hidrojen ve oksijeni kullanarak basit bir kimyasal reaksiyon sonucunda elektrik enerjisi üreten enerji kaynaklarıdır. Bir yakıt hücresi, iki elektrot ve bu elektrotların arasına yerleştirilmiş elektrolitten oluşmaktadır. Günümüzde, kullanılan elektrolit malzeme çeşidine göre farklı tiplerde yakıt hücreleri geliştirilmektedir. Bunlar içerisinde yüksek güç yoğunluğuna sahip olmaları ve düşük sıcaklıklarda çalışabilmeleri, proton değişim membranlı (Proton Exchange Membrane – P.E.M.) yakıt hücrelerini özellikle mobil uygulamalar için cazip hale getirmektedir.

Bir yakıt hücresinde hidrojen atomları hücreye anottan girer ve burada kimyasal tepkime ile elektronlar koparılır. Hidrojen atomları böylece iyonlaşır ve pozitif elektrik yükü taşırlar. Açığa çıkan elektronlar ise elektrik akımını oluşturur. Oksijen hücreye katottan girer ve elektrik devresinden dönen elektronlar ve elektrolit içinden geçerek anottan gelen hidrojen iyonlarıyla birleşir. Bu reaksiyon dizisi sonucunda sadece su ve ısı meydana gelir. Bir yakıt hücresinin çıkış gerilimi 0.7V düzeyindedir. Bu nedenle yakıt hücreleri yığınlar halinde bir araya getirilerek kullanılır. Bir yakıt hücresi hidrojenle beslendiği sürece elektrik enerjisi üretmeye devam eder.



Şekil 2.21: Yakıt hücresi çalışma prensibi

Bir yakıt hücreli elektrikli taşıt, yakıt depolama sistemi, yakıt hücresi kontrol ünitesi, güç işlemci ünitesi ve tahrik sisteminden oluşur. Yakıt hücreleri taşıtlarda elektrik enerjisi üretimi için alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, yakıt hücreli taşıtların tahrik sistemi yapıları, tümü-elektrikli ve hibrid elektrikli taşıtlarla benzerdir.

Yakıt olarak hidrojen kullanan taşıtların geliştirilmesindeki en önemli teknik sorun, hidrojenin güvenli olarak üretilmesi, depolanması ve yakıt hücresini beslemesidir. Hidrojen periyodik cetveldeki en hafif element olduğundan, depolanması için petrol türevi yakıtlara oranla daha büyük hacimli depolara gerek duyulmaktadır. Oda koşullarında aynı kütledeki benzinden 3000 kat daha büyük hacme ihtiyaç duyan hidrojenin otomobilin deposuna sığdırılabilmesi için sıkıştırılması, sıvılaştırılması ya da herhangi bir ileri depolama tekniğinin geliştirilmesi gereklidir. Hidrojeni gaz olarak depolamayı amaçlayan teknolojilerin en büyük sorunu güvenlidir. Yeterli miktarlarda depolama için çok yüksek basınçlara dayanan depolar imal edilmelidir. Bu yüksek basınçlar özellikle taşınabilir sistemler için önemli güvenlik sorunları yaratmaktadır. Sıvı halde depolamada ise çok daha az hacimlere gerek duyulmasına karşın deponun hidrojenin sıvılaştırma derecesi olan $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altında tutulması gereklidir [69].

Yakıt hücresinin performansı, gerilim ve akım çıkış karakteristiklerine bağlı olarak değişmesi nedeniyle yük değişimlerine karşı oldukça duyarlıdır. Bu nedenle yakıt hücresinin kontrol ünitesi, gerilim ve akım bilgilerini değerlendirerek talep edilen güce göre yakıt hücresine beslenecek hidrojenin miktarını ayarlar.

Son yıllarda hidrojen üretim yöntemleri içinde, yeni gelişmekte olan kimyasal hidrürlerden hidrojen eldesi yöntemi önem kazanmaktadır. Bu sistemin en büyük avantajı hidrojenin depolanmayıp ihtiyaç duyulduğunda üretilmesidir. Bu sayede depolamanın tüm risk ve zorlukları ortadan kaldırılmaktadır. Aday kimyasallar arasında sodyum borhidrür (NaBH_4) öne çıkmaktadır. Yanıcı veya patlayıcı olmayan NaBH_4 çözeltisinin seçilmiş olan katalizörle hidrolizi H_2 gazı ve suda çözünen sodyum metaborat (NaBO_2) verir.

Şekil 2.22-2.25’de, günümüzde prototip olarak üretimi yapılan farklı sınıflardaki bazı yakıt hücresel elektrikli taşıt örnekleri verilmektedir. Hyundai Tucson FCEV, 80kW’lık elektrik motoru ile tahrik edilmektedir. Bu motor, gövdesinin alüminyum malzemedan imal edilmesine rağmen toplam ağırlığı 1765kg olan aracı 150km/h maksimum hıza ulaştırmaktadır. Aracın yapısında bulunan 152 litrelik depo, yakıt hücrelerini besleyen hidrojeni depolamakta kullanılır.



Şekil 2.22: Hyundai Tucson yakıt hücresel elektrikli taşıt

Mercedes Benz A-Class F-Cell ise, mini sınıftaki bir yakıt hücresel prototip araçtır (Şekil 2.23). Araca gücünü, 200V’luk Ni-MH batarya grubu tarafından beslenen 65kW’lık bir asenkron motor sağlamaktadır.



Şekil 2.23: Mercedes Benz A-Class F-Cell yakıt hücresel elektrikli taşıt

Konsept otomobil sınıfına dahil bir başka yakıt hücresel araç ise Honda FCX modelidir. Bu aracın en büyük özelliği çok tekerlekten tahrikli yapıya sahip olmasıdır. Araç üzerinde üç adet tahrik motoru bulunmaktadır. 80kW gücündeki motor dişli kutusuyla eş eksenli olarak yerleştirilerek aracın ön tekerleklerine güç sağlar. Her biri 25kW gücündeki iki tahrik motoru ise aracın arka tekerleklerini tahrik eder. Aracın maksimum hızı 160km/h olarak verilmektedir.



Şekil 2.24: Honda FCX yakıt hücresel elektrikli taşıt

Şekil 2.25’de ise C.U.T.E. projesi kapsamında dünya üzerindeki 11 şehirde şehir içi toplu taşıma amacıyla kullanılan otobüsler görülmektedir.



Şekil 2.25: C.U.T.E. projesi kapsamında kullanılan yakıt hücresel otobüs

2.5 Elektrik Tahrikli Taşıtlarda Güç Üretim Zincirinin Bileşenleri

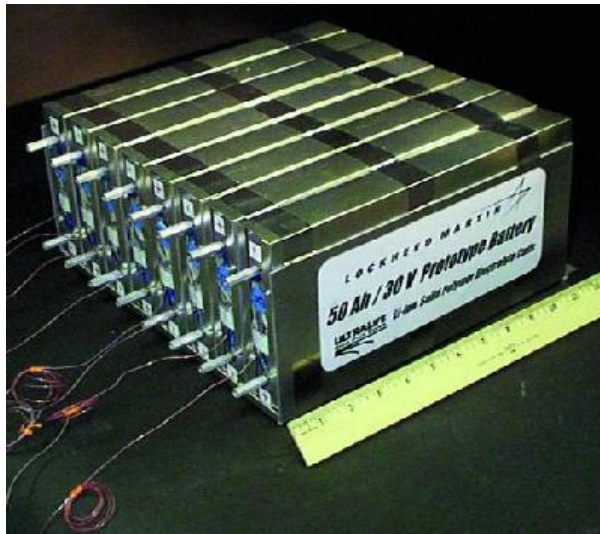
Güç üretim zinciri (powertrain), gerek tümü-elektrikli, gerek hibrid elektrikli, gerekse de yakıt hücresel elektrikli taşıtlarda taşıt tahrik sisteminin en önemli kısımlarından biridir. Görevi, taşıtı tahrik edecek mekanik gücü üretmektir. Elektrik enerjisiyle tahrik edilen taşıtlarda, elektriksel güç üretim zincirini oluşturan elemanlar;

- Enerji depolama elemanları,
- Güç kontrolünü sağlayan elektronik elemanlar,
- Tahrik motorları,

olarak üç ana başlık altında incelenmektedir.

2.5.1 Enerji depolama elemanları

Tümü-elektrikli ve hibrid elektrikli taşıtlarda kullanılan başlıca enerji depolama elemanları batarya grupları, volanlar ve süperkapasitörler olarak sayılmaktadır. Yakıt hücreleri, enerji depolamak amacıyla değil de, elektrokimyasal bir reaksiyonla enerji dönüşümü amacıyla kullanıldığı için, bu gruba dahil edilmemektedir.



Şekil 2.26: Li-Ion batarya

Bataryalar, şarj esnasında elektrik enerjisini kimyasal enerjiye çevirerek depo eden, deşarj esnasında ise depolanmış haldeki kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal elemanlardır. Bir batarya hücresi, iki elektrot (anot ve katot) ile elektrolit malzemedan oluşur. Batarya grupları ise temel olarak birçok batarya hücresinin bir araya getirilmesiyle elde edilmektedir.

Elektrik tahrikli taşıtlarda kurşun asit, nikel-kadmiyum (Ni-Cd), nikel-metal-hidrid (Ni-MH), nikel-çinko (Ni-Zn), lityum-polimer (Li-P) ve lityum-iyon (Li-Ion) bataryalar, kullanılan başlıca batarya tipleridir. Özellikle otomotiv uygulamalarında kullanılmak üzere batarya tipi seçilirken belli başlı bazı kriterlere dayanılarak tercih yapılmaktadır. Bunlar bataryanın özgül enerji, özgül güç, enerji yoğunluğu, çevrim ömrü, çalışma sıcaklığı gibi değerleri ve maliyetidir. Özgül güç, enerji kaynağının birim kütesinin verdiği güç olarak ifade edilmektedir. Özgül enerji yoğunluğu ise enerji kaynağının birim kütesinde depolanan enerji miktarını göstermektedir. Tüm elektrikli taşıt uygulamalarında kullanılacak batarya tipi seçilirken, taşıtın sürüş menziline belirlendiğinden dolayı özgül enerji değeri önemlidir. Hibrid-elektrikli taşıtlar için ise, özgül güç değeri önem kazanmaktadır.

Kurşun-asit bataryalar (VRLA) yüz yıldan uzun bir süredir bilinmekte ve hem otomotiv uygulamalarında hem de genel amaçlı uygulamalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Kurşun ve sülfürik asit gibi bileşenler maliyeti oldukça düşürmekte, bu da diğer batarya tipleri ile karşılaştırıldığında avantaj yaratmaktadır. Bununla birlikte kurşun-asit bataryaların enerji yoğunlukları düşüktür ve 10°C'den düşük sıcaklıklarda özgül güç ve özgül enerji değerleri büyük oranda azalır. Ayrıca yüksek derecede korozyon etkisi olan sülfürik asit bulundurması ve serbest deşarj (self discharge) sırasında hidrojen ortaya çıkması potansiyel olarak tehlike oluşturur.

Ni-Cd bataryalarda pozitif elektrot bir nikel bileşiği olan nikel oksit (NiOOH), negatif elektrot ise kadmiyumdun (Cd) oluşur. Bir Ni-Cd batarya hücresi 1,3V'luk gerilim üretir. Yüksek özgül güç (220W/kg), uzun çevrim ömrü (~2000), geniş çalışma sıcaklığı aralığı (-40~85°C), düşük serbest deşarj oranı (<%0,5/gün) gibi özellikleri üstün yanlarıdır. Buna karşın maliyetleri oldukça yüksektir ve yapısında bulunan kadmiyum çevre için zararlıdır.

Ni-MH bataryalar 1992 yılından beri kullanılmaktadır. Ni-Cd bataryalardan farkı, negatif elektrottaki kadmiyumun yerine metal-hidrid malzeme bulunmasıdır. Ni-Cd bataryalarla karşılaştırıldığında, özgül enerji değeri çok daha yüksektir ve içeriğinde zararlı madde bulunmamaktadır. Hücre gerilimi 1,2V'tur. Günümüzde özgül enerjisi (70-95Wh/kg) ve özgül gücü (200-300W/kg) düzeyinde olan Ni-MH bataryalar üretilmektedir.

Li-P bataryalarda negatif ve pozitif elektrotlarda sırasıyla lityum metal ve transition metal intercalation oxide (M_yO_z) kullanılır. Nominal hücre gerilimi 3V, özgül enerji 155Wh/kg ve özgül güç 315W/kg düzeyindedir. Serbest deşarj oranı çok düşüktür (%0,5/ay). Bununla birlikte düşük çalışma sıcaklıklarında performansı düşüktür.

Li-Ion bataryalar 1991 yılında üreilmeye başlanmış olmakla birlikte, kısa sürede elektrikli taşıt uygulamalarında kabul görmüş ve gelecek vaat eden batarya tipleridir. Li-Ion bataryalarda negatif elektrotlarda metalik lityum yerine lithiated carbon intercalation material (Li_xC), pozitif elektrotlarda lithiated transition metal intercalation oxide ($Li_{1-x}M_yO_z$), elektrolit olarak da likit organik çözelti veya katı polimer kullanılmaktadır.

Pozitif elektrotta $Li_{1-x}CoO_2$, $Li_{1-x}NiO_2$ ve $Li_{1-x}Mn_2O_4$ kullanılan farklı tipte bataryalar da üretilmektedir. Ni bileşiği bataryalar 4V hücre gerilimi, 120Wh/kg özgül enerji, 200WH/l enerji yoğunluğu ve 260W/kg özgül güç değerlerine sahiptir. Co bileşiği bataryaların özgül enerji ve enerji yoğunluğu değerleri daha yüksek olmakla birlikte maliyetler de oldukça yükselmektedir. Mn bileşiklerinin ise maliyetleri en düşük, özgül enerji ve enerji yoğunluğu değerleri ise Ni ve Co bileşikleri arasındadır. Günümüzde tümü-elektrikli ve hibrid-elektrikli taşıtlar için farklı özelliklerde Li-Ion bataryalar geliştirilmekte olup, hibrid-elektrikli taşıtlar için yüksek güçlü (özgül gücü 1350W/kg, özgül enerjisi 85Wh/kg), tümü-elektrikli taşıtlar için ise yüksek enerjili (150Wh/kg, 420W/kg) tipler kullanılmaktadır.

Bunların haricinde sodyum-sülfür (Na/S), çinko-hava (Zn/Air) ve alüminyum-hava (Al/Air) gibi batarya tipleri de elektrikli araç uygulamalarında daha az da olsa kullanım alanı bulmaktadır.

Elektrikli taşıtlarda kullanılan batarya tiplerinin temel seçim kriterlerine bağlı olarak yapılan karşılaştırma, Tablo 2.1’de verilmektedir.

Tablo 2.1: Elektrikli taşıtlarda kullanılan batarya tiplerinin karşılaştırılması [70]

	Özgül enerji (Wh/kg)	Enerji yoğunluğu (Wh/l)	Özgül güç (W/kg)	Şarj Deşarj Verimi (%)	Serbest Deşarj Oranı (%/ay)	Çevrim ömrü	Maliyet (US\$/kWh)
VRLA	30-45	60-90	200-300	70-92	3-20	400-600	150
Ni-Cd	40-60	80-110	150-350	70-90	10	600-1200	300
Ni-MH	60-70	130-170	150-300	66	30	600-1200	200-350
Al/Air	190-250	190-200	7-16	NA	NA	NA	NA
Li-P	155	220	315	NA	NA	600	NA
Li-Ion	90-130	140-200	250-450	99,9	5-10	800-1200	>200

Volanlar, dönen bir ağırlık sayesinde kinetik enerjiyi depo etmektedir. Özellikle hibrid elektrikli taşıtlarda İ.Y.M. ile birlikte yardımcı güç ünitesi olarak kullanılır. Ayrıca elektrikli taşıtlarda bataryalarla birlikte de kullanılabilir. Karmaşık, büyük ve ağır olmalarından dolayı enerji yoğunlukları düşüktür. Ancak çevrim ömrü, güç yoğunluğu, enerji depolama verimi oldukça yüksektir.

Süperkapasitörler ise geleneksel kapasitörlerin geliştirilmiş halidir. Güç ve enerji yoğunlukları sırasıyla yaklaşık olarak 10^6W/m^3 ve 10^4Wh/m^3 düzeyindedir. Hızlanma gibi ani güç ihtiyaçlarında batarya veya yakıt pillerine yardımcı enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır.

2.5.2 Güç kontrol ünitesi

Elektrik tahrikli taşıtlarda, başta taşıta ihtiyaç duyduğu tahrik gücünü sağlayan elektrik motoru olmak üzere, elektrik enerjisi tüketen tüm ana ve yardımcı elemanların çalışması için gerekli olan elektronik donanım bu alt başlıkta değerlendirilmektedir.

Elektrik tahrikli taşıtlarda gücün büyük kısmı bir veya birden fazla sayıdaki tahrik motoru tarafından tüketilmektedir. Bununla birlikte, tüketilen elektrik enerjisinin bir

kısmı, yine bu tahrik makinasının generatör olarak çalışması sonucu geri kazanılmaktadır. Bu nedenle, tahrik makinasının tipine bağlı olarak değişen ve enerji dönüşümü için kullanılması zorunlu olan konverter devre, güç kontrol ünitesinin temel bileşenini oluşturmaktadır. Konverter devreleri IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), MOSFET (Metal-Oxide Field-Effect Transistor), GTO (Gate Turn-Off Thyristor), MCT (MOS-Controlled Thyristor) veya BJT (Bipolar-Junction Transistor) gibi farklı yarı iletken güç anahtarlama elemanları kullanılarak oluşturulurlar. Kullanılan bu elemanlar belirlenirken, süreceği elektrik motorunun güç, akım, gerilim gibi temel karakteristik özellikleri ile, konverterin anahtarlama süresi, sönmülendirme yöntemi gibi diğer özellikleri göz önünde bulundurularak seçim yapılır.

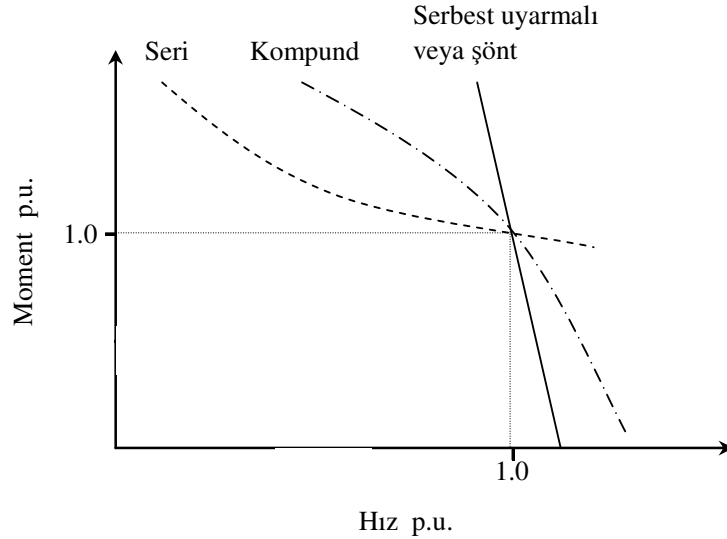
Konverter devresinde kullanılan yarı iletken anahtarlama elemanlarının iletim ve kesime alınacağı zamanlar ana kontrolör tarafından ve uygulanan motor kontrol yöntemine bağlı olarak belirlenmektedir. Literatürde incelenen elektrikli taşıt tahrik sistemlerinde farklı kontrol yöntemleri kullanıldığı görülmektedir. Mikroişlemciler, mikrodenetleyiciler veya sayısal işaret işlemciler (Digital Signal Processor – D.S.P.) yardımıyla uygulanan bu kontrol yöntemlerinden başlıcaları V.V.V.F. (Variable Voltage Variable Frequency), F.O.C. (Field Oriented Control), M.A.R.C. (Model Reference Adaptive Control), S.T.C. (Self Tuning Control), N.N.C. (Neural Network Control) ve F.L.C. (Fuzzy Logic Control) olarak sayılabilir. Ana kontrol devresinin giriş bilgilerini ise taşıt sürücüsünün, taşıtın gaz ve fren pedalları ve direksiyon yardımıyla verdiği komutlar ile tahrik motorundan geri besleme olarak alınan akım ve konum bilgileri gibi farklı sinyaller oluşturulmaktadır.

Taşıtta ihtiyaç duyulan ve elektrik enerjisiyle beslenen diğer donanım tarafından kullanılan diğer kontrol devreleri ise, güç kontrol biriminin diğer elemanlarını oluşturmaktadır. Bu donanıma örnek olarak taşıtın iç ve dış aydınlatma elemanları, taşıtın sürüşünü kolaylaştıran elektrik takviyeli direksiyon, taşıtın iklimlendirme donanımı gibi elektrik enerjisiyle çalışan cihazlar verilebilir. Bu tip donanım çoğunlukla, taşıtın yapısında kullanılan ve tahrik motorunun beslediği batarya grubundan başka bir yardımcı batarya grubu ile beslenmektedir.

2.5.3 Tahrik motoru

Taşıta tahrik gücünü sağlayan bir veya birden fazla sayıdaki elektrik motoru, güç üretim zincirinin temel bileşenini oluşturmaktadır. Elektrik motorlarının kullanıldığı diğer endüstriyel uygulamalardan farklı olarak, elektrik tahrikli taşıtlarda kullanılan elektrik motorları sık olarak değişen çalışma koşullar altında çalışırlar. Bu nedenle taşıtın tahrik gücünü üretecek olan elektrik motorunun seçimi, taşıt performansını da doğrudan etkileyecek olmasından dolayı çok büyük önem taşımaktadır [71].

Doğru akım makinaları, modern elektrikli taşıtların gelişim süreci içerisinde, geliştirilen ilk elektrikli taşıt uygulamalarında yaygın şekilde kullanılan elektrik makinalarıdır. Uyarma şekillerine göre farklı kategorilerde sınıflandırılmakla birlikte, üretilen momentin akımın karesi ile orantılı olarak değişmesi ve uygun hız-moment karakteristiği, endüvi ve uyarma sargılarının birbirine seri bağlandığı seri uyarımalı doğru akım makinalarının elektrikli taşıt uygulamalarında tercih edilmesine neden olmuştur (Şekil 2.27) [67].



Şekil 2.27: Uyarma biçimlerine göre doğru akım motorlarına ait moment-hız karakteristikleri

Doğru akım makinaları kolay kontrol edilebilmesi, moment ve akı kontrolünün bağımsız olarak yapılabilmesi ve yerleşmiş üretim teknolojisi gibi üstünlüklerine rağmen bakım gereksinimi, fırçalı yapısı, veriminin, güç yoğunluğunun ve nominal hızının düşük olması nedeniyle günümüzde elektrikli taşıt uygulamalarında kullanılmamaktadır. Güç elektroniği ve sayısal mikroişlemcili kontrol

teknolojilerindeki gelişmeler, asenkron, sürekli mıknatıslı ve anahtarlı relüktans tip motorların kullanımının önünü açmıştır.

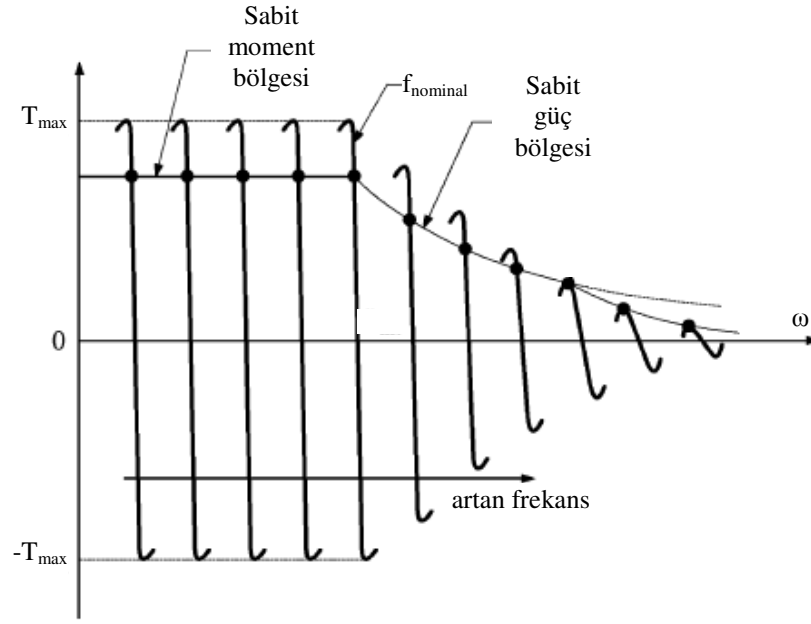
Taşıt tahrik uygulamalarında moment yoğunluğu en önemli değerlendirme kriterlerinden biridir. Tablo 2.2’de bu üç elektrik motoru yapısının, moment yoğunluğuna göre karşılaştırılması verilmektedir. Buna göre sürekli mıknatıslı makinalar en yüksek moment yoğunluğuna, bir başka ifadeyle birim moment ve güç değerleri için en düşük ağırlık oranına sahiptir.

Tablo 2.2: Farklı motor tiplerinin moment yoğunluklarına göre karşılaştırılması [6]

Makina tipi	M / V (Nm/m ³)	M / Cu ağırlığı (Nm/kg Cu)
Sürekli Mıknatıslı (SM)	28860	28,7 - 48
Asenkron	4170	6,6
Anahtarlı Relüktans	6780	6,1

Asenkron motorlar basit ve sağlam yapıları nedeniyle endüstride olduğu kadar elektrikli taşıtlarda da kullanım alanı bulmuştur. Doğru akım motorlarıyla karşılaştırıldığında, asenkron motorlar küçük hacim, düşük maliyet ve yüksek verim gibi üstünlüklere sahiptir. Bu üstünlükler, özellikle elektrikli taşıt uygulamaları için önemli özelliklerdir.

Asenkron motorlarda hız ayarı için en yaygın şekilde kullanılan hız kontrol yöntemi, V/f oranı sabit tutularak yapılan kontroldür. Bununla birlikte bu yöntem ile elde edilen performans ve verim, hızın sıkça değiştiği elektrikli taşıt uygulamaları için yetersiz olmaktadır. Bu nedenle tahrik motoru olarak asenkron motorun kullanıldığı elektrikli taşıt uygulamalarında vektör kontrolü (F.O.C.) yöntemi tercih edilmektedir. Bu sayede motor kontrolü, serbest uyarmalı doğru akım motoruna benzetilmektedir. Moment-hız karakteristiğinin sabit güç bölgesinde kontrol, akı zayıflatma ile sağlanır. Bununla birlikte, değeri giderek düşen devrilme momenti, karakteristiğinin sabit güç bölgesini sınırlamaktadır (Şekil 2.28) [6]. Bu nedenlerden dolayı günümüzde, taşıtlarda tahrik motoru olarak anahtarlı relüktans ve sürekli mıknatıslı motor yapıları tercih edilmektedir.



Şekil 2.28: Asenkron motora ait moment-hız karakteristiği [72]

Sürekli mıknatıslı motorlarda, uyarma alanını oluşturmak amacıyla yüksek enerjili sürekli mıknatıs malzemeler kullanılmaktadır. Bu sayede motorun moment yoğunluğu artarken, hacmi ve ağırlığı azalır. Rotor sargısı olmadığından, rotorda oluşacak bakır kayıplarının önüne geçilir ve motor verimi yükselir. Bununla birlikte mıknatıs akısının sabit olması, motorun sabit güç bölgesini sınırlamaktadır. Bu durumda akı zayıflatma, stator alanının mıknatıs akısına zıt bileşeni ile ve sınırlı miktarda gerçekleştirilebilir. Motorun sabit güç bölgesini genişletmek amacıyla mıknatıslara ek olarak bir uyarma sargısı kullanılmaktadır. Bu motorlar sürekli mıknatıslı hibrid motor olarak adlandırılır. Bu sayede motorun sabit güç bölgesi genişlemekte, buna karşın motorun kontrolü de karmaşıklaşmaktadır.

Tahrik motoru olarak tek bir sürekli mıknatıslı elektrik motorunun kullanıldığı taşıt tahrik sistemlerinde motorda üretilen güç, çok oranlı bir dişli kutusu üzerinden tekerleklere aktarılır. Böylece üretilen moment ve hız, daha etkin biçimde kullanılabilir. Birden fazla tahrik motorunun kullanıldığı taşıt yapılarında ise sürekli mıknatıslı motorlar, büyük üstünlük sergilemektedir. Bu uygulamalarda motorun hızı doğrudan taşıt hızına eşit olduğundan dolayı, önemli olan nokta motorun ürettiği moment değeridir.

Anahtarlı relüktans motorları, yapısının basit ve dayanıklı olması, kontrolünün basitliği ve geniş hız aralığında çalışabilmesi gibi üstünlüklere sahiptir. Bu üstünlükler düşük maliyet ve güvenilirliğinin yüksek olması gibi özelliklerle birleşince elektrikli taşıt tahriği için önemli bir seçenek oluşturmaktadır. Anahtarlı relüktans motorları ve taşıt tahriğinde kullanımlarına yönelik detaylı bilgi, tez çalışmasının ileriki bölümlerinde sunulmaktadır.

3. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORU

Elektrik enerjisi temiz, kullanışlı ve kolay ulaşılabilir bir enerjidir. Bu nedenle endüstriden ulaşım sektörüne, konutsal ve ticari alanlara kadar birçok sektörde, çok farklı kullanım alanlarına sahiptir. Bu kullanım alanlarının önemli bir kısmında ise elektrik enerjisi, mekanik enerjiye dönüştürülerek kullanılmaktadır.

Elektromekanik enerji dönüşümünü sağlayan dönen elektrik makinaları, ilk örneklerinin keşfinden bugüne kadar farklı tiplerde ve farklı yapılarda tasarlanmaktadır. Doğru akım makinalarının ilk örneklerinden başlayarak, günümüzde giderek artan oranda kullanım alanı bulan sürekli mıknatıslı makinalara kadar birçok farklı tipte dönen elektrik makinası, avantaj ve dezavantajları göz önünde tutularak uygun kullanım alanlarında elektromekanik enerji dönüşümünü sağlamaktadırlar. Geçmiş oldukça eskiye dayanan anahtarlı relüktans makinaları da bu farklı topolojilerden sadece biridir.

“Anahtarlı relüktans” ifadesi, makinanın en temel iki özelliğini belirtmektedir:

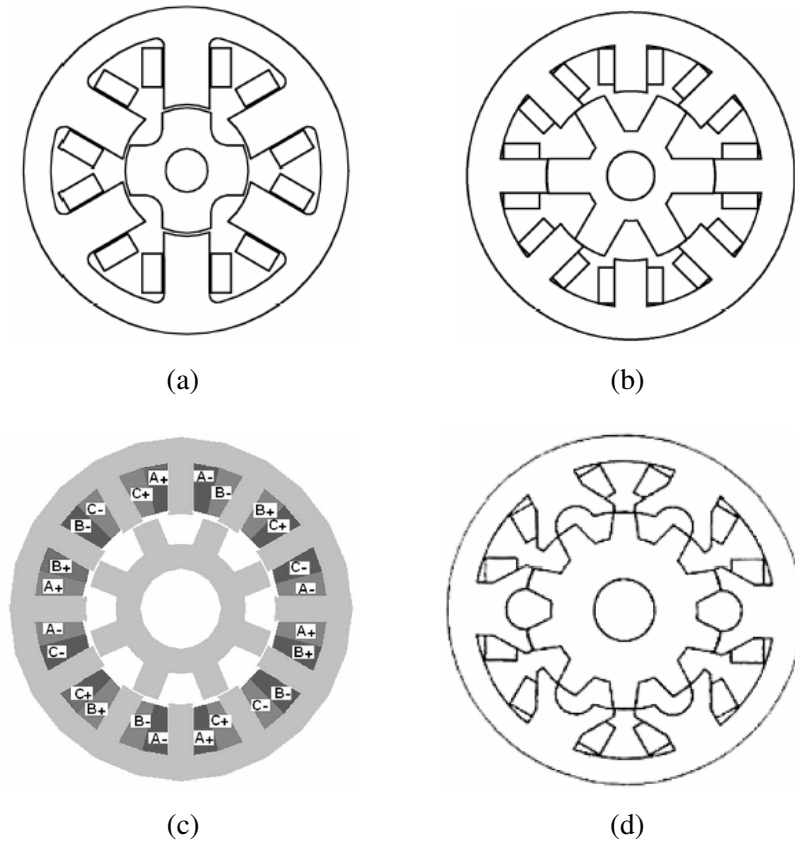
- anahtarlı – Makinanın dönme hareketi, faz sargılarının uygun düzende sürekli olarak anahtarlanması sonucunda elde edilir. Bu da makinanın, yüksek anahtarlama kapasitesine sahip anahtarlama elemanlarının gelişiminden sonra popüler olmasının bir göstergesidir.
- relüktans – Makina, hem stator hem de rotoru çıkık kutuplardan oluşan bir makinadır. Çift çıkık kutuplu yapısından dolayı, dönme hareketi yaparken makinanın relüktansı sürekli olarak değişir.

Anahtarlı relüktans makinaları dönen elektrik makinaları ailesinin yapısal olarak en basit üyesi olmasına karşın, sürücü devreye gereksinim duyması, konum bilgisinin doğru biçimde elde edilip kullanılması gerekliliği gibi nedenlerle oldukça detaylı kontrol yapısına sahiptir. Bu nedenle, makinanın iyi biçimde bilinmesi, uygun şekilde ve optimum verimle kontrolü için önem kazanmaktadır.

3.1 A.R.M.'nin Yapısı

Anahtarlı relüktans motoru, hem stator hem de rotoru üzerinde çıkık kutupları olan bir çeşit senkron makinadır. Stator ve rotor çekirdekleri, makinadaki demir kayıplarını azaltmak amacıyla bir yanı yalıtılmış lamine sacların uygun şekilde dizilip preslenmesiyle oluşturulur. Makinanın faz sargıları, statorun karşılıklı çıkık kutupları üzerine sarılmış basit yapıli bobinlerin seri veya paralel bağlanmasıyla elde edilirler. Rotor yapısında ise herhangi bir sargı, mıknatıs malzeme veya kısa devre çubuğu bulunmaz.

Motorun yol alamayacağı rotor konumu oluşmasına engel olmak ve ortaya çıkacak moment dalgalılığını azaltmak amacıyla A.R.M.'ler, çok fazlı ve çok kutuplu olarak tasarlanır ve stator/rotor kutup sayısı kombinasyonlarına göre sınıflandırılırlar. Şekil 3.1'de, endüstride oldukça fazla uygulama alanı bulmuş olan üç ve dört fazlı A.R.M.'lere ait kesitler görülmektedir.



Şekil 3.1: Farklı geometrik yapıdaki A.R.M.'lere ait kesit görünüşleri

Şekil 3.1.a, 3.1.b ve 3.1.c'de tek dişli kutup başı yapısına sahip A.R.M.'ler görülmektedir. Şekil 3.1.a'daki üç fazlı ve 3.1.b'deki dört fazlı makinalarda faz sargıları, statorun karşılıklı kutupları üzerine sarılmış olan bobinler yardımıyla oluşturulmaktadır. Şekil 3.1.c'de ise her bir faz sargısı, aralarında geometrik olarak 90° açı bulunan dörder tane bobin, elektriksel olarak bağlanarak oluşturulur.

Şekil 3.1.d'de ise çift dişli kutup başı yapısına sahip motor kesiti görülmektedir. Üç fazlı bu yapıda da faz sargıları, statorun karşılıklı kutupları üzerine sarılmış olan bobinler yardımıyla oluşturulur.

Anahtarlı relüktans motorunda rotorun bir tam dönüş yapabilmesi için faz sargılarının bir defadan fazla uyarılması gerekmektedir. Her bir faz sargısı uyarıldığında rotor, bir adım açısı kadar dönme hareketi yapar. m faz sayısı ve N_r rotor kutup sayısı olmak üzere, rotor $m.N_r$ adımda bir tam dönüşünü tamamlar.

A.R.M.'de mekanik adım açısı;

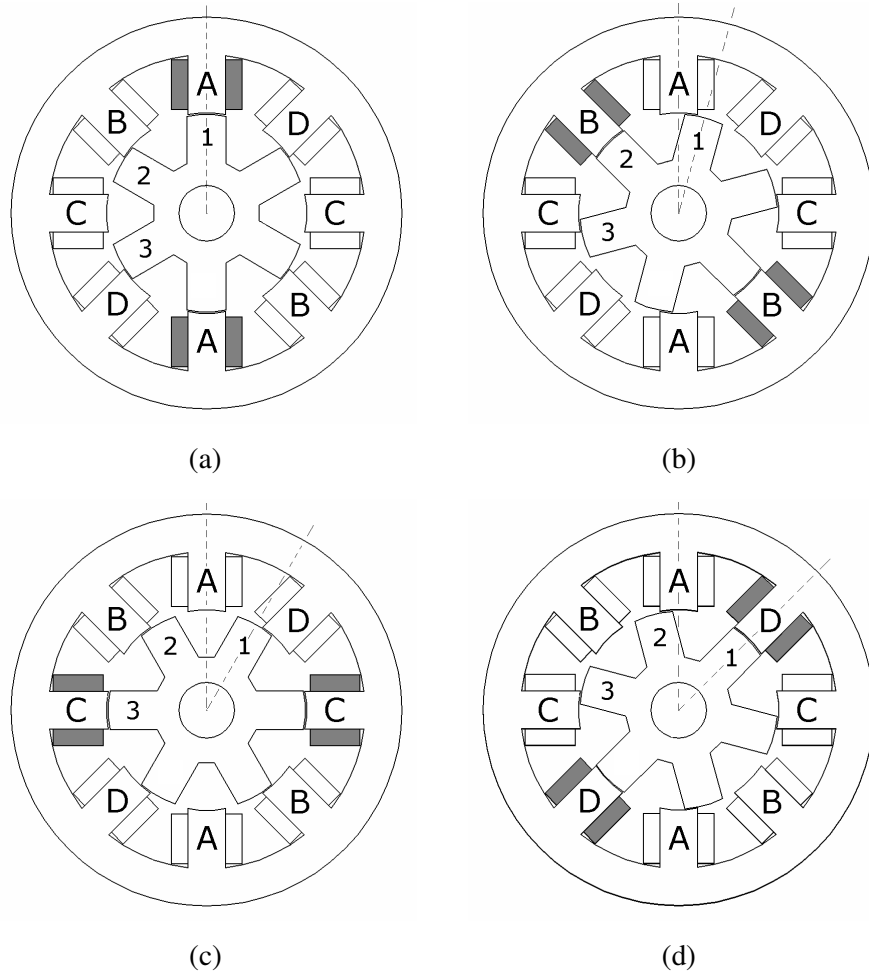
$$\theta = \frac{2\pi}{m.N_r} \quad (3.1)$$

olarak ifade edilir.

Anahtarlı relüktans motorlarında sürekli bir dönme hareketinin sağlanabilmesi için stator ve rotor kutup sayıları birbirinden farklı olarak tasarlanırlar. Motorun kullanım amacına bağlı olarak farklı rotor ve stator kutup kombinasyonları gerçekleştirilebilmektedir. Yüksek hız istenen uygulamalarda rotor kutup sayısı, stator kutup sayısından küçük seçilir. Yüksek moment istenen uygulamalarda ise rotor kutup sayısı, stator kutup sayısına yakın seçilir. Stator kutupları, rotor kutuplarına oranla daha dar tutulurlar. Bunun sebebi, statordaki herhangi bir faz uyarıldığında oluşan manyetik alandan daha fazla yararlanabilmek ve sargılara daha geniş hacim sağlamaktır.

3.2 Çalışma Prensipleri

Anahtarlı relüktans motoru, relüktans prensibine göre çalışır. Buna göre, karşılıklı stator kutupları üzerine sarılmış olan bobinlerin oluşturduğu bir faz sargısı uyarıldığı zaman, uyarılan faza en yakın konumda bulunan rotor kutupları, devrenin manyetik relüktansını minimum yapacak şekilde enerjilenmiş stator kutuplarına doğru çekilir.



Şekil 3.2: 8/6 A.R.M.'nin çalışması

Şekil 3.2'de 8/6 kutup yapısındaki bir A.R.M.'nin dönüşü açıklanmaktadır. Bu motor için adım açısı, denklem 3.1 yardımıyla 15° olarak hesaplanır. Şekil 3.2.a'da, A faz sargısını taşıyan stator kutupları ile 1 numaralı rotor kutup çifti çakışık konumdadır. Bu anda, A fazının endüktansı maksimum, relüktansı ise minimum değerdedir. Rotorun saat yönünde dönüşünü sürdürebilmesi için, B faz sargısının uyarılması gerekir. Böylece rotor, relüktans prensibine göre adım açısı kadar hareket edecek ve

bu hareket, B faz sargısını taşıyan stator kutupları ile 2 numaralı rotor kutupları çakışana kadar devam edecektir (Şekil 3.2.b). Benzer şekilde, bunun ardından sırasıyla C ve D faz sargılarının enerjilendirilmesiyle (Şekil 3.2.c ve Şekil 3.2.d) rotor, saat yönünde dönüşünü sürdürür. Rotorun saat yönünde sürekli olarak dönüşünü devam ettirmek için, faz sargıları, saatin tersi yönünde sırayla enerjilendirilmelidir.

3.3 Motorun Eşdeğer Devresinin Oluşturulması

Anahtarlı relüktans motorunun bir faz sargısı için gerilim eşitliği denklem 3.2'deki gibi oluşturulmaktadır. Buna göre, faz sargısına uygulanan gerilim, sargı direncinde oluşan omik gerilim düşümü ile halkalama akısının zamana bağlı değişiminin toplamıdır.

$$V = R_s \cdot i + \frac{d\phi(\theta, i)}{dt} \quad (3.2)$$

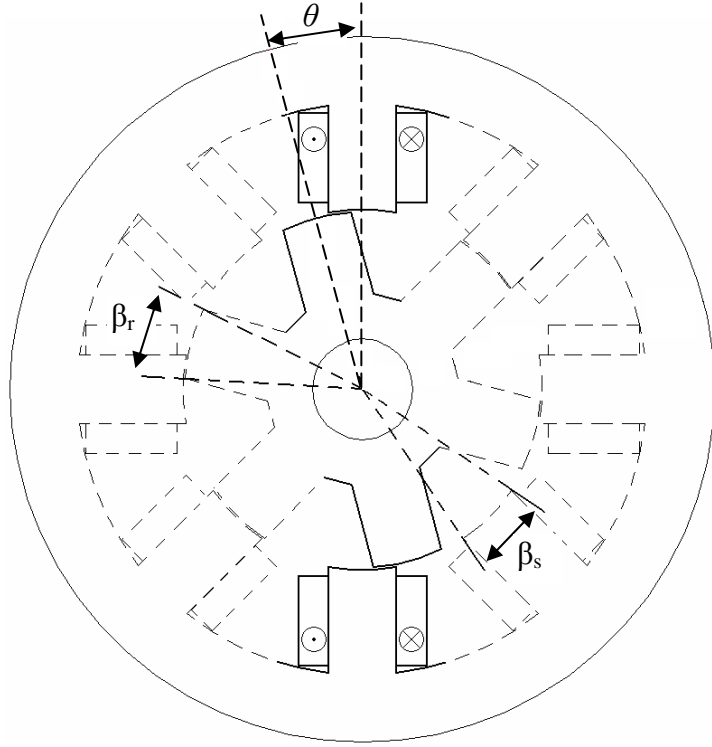
Burada; R_s , faz sargı direnci; ϕ , faz başına halkalama akısıdır. Halkalama akısı ise;

$$\phi = L(\theta, i) \cdot i \quad (3.3)$$

olarak ifade edilir. Burada L , faz sargısının faz akımına ve rotor konumuna bağlı olarak değişen özendüktansıdır. Klasik sargı yapısına sahip A.R.M.'de fazlar arası karşılıklı endüktans değeri ihmal edilmektedir.

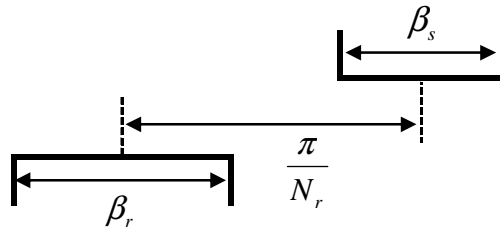
A.R.M.'nin bir faza ait öz endüktansının rotor konumuna bağlı değişimini açıklamak için, Şekil 3.3'teki temel manyetik devre kullanılmaktadır. Faz sargısının endüktans profili, rotor kutup yay genişliği, stator kutup yay genişliği ve rotor kutup sayısına bağlı olarak çizilir ve her $2\pi/N_r$ derecelik peryotlarda tekrarlanır.

Endüktans eğrisinin bir peryodu incelendiğinde, rotorun bir faz stator kutbuna göre tamamen ayırık, tamamen çakışık ve kısmen çakışık olmak üzere üç temel konumu olduğu görülmektedir.



Şekil 3.3: A.R.M.'nin bir fazı için manyetik devresi

0° konumunda stator ve rotor kutupları tamamen ayırık durumdadır (Şekil 3.4). Rotor ve stator kutuplarının tamamen ayırık olduğu süre boyunca faz endüktansı, ayırık endüktans olarak da adlandırılan minimum değerinde (L_u) sabit kalır.

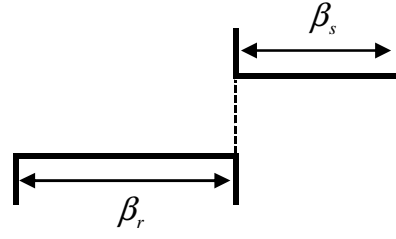


Şekil 3.4: 0° konumu

Rotorun saat yönünde hareketiyle birlikte bu endüktans değeri, θ_1 konumuna kadar devam eder. Rotor ve stator kutuplarının çakışmaya başladığı konum olan bu noktanın değeri,

$$\theta_1 = \frac{\pi}{N_r} - \frac{\beta_s}{2} - \frac{\beta_r}{2} \quad (3.4)$$

olarak ifade edilir (Şekil 3.5.).

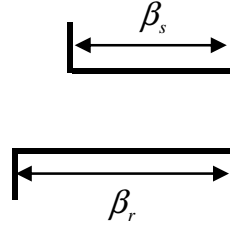


Şekil 3.5: θ_1 konumu

θ_1 ve θ_2 konumları arasında rotor ve stator kutupları kısmen çakışık durumdadır. Bu bölgede endüktans değerinde artış gözlenir. Rotor ve stator kutuplarının tamamen çakışık olduğu θ_2 konumuna kadar süren bu bölge,

$$\theta_2 - \theta_1 = \beta_s \quad (3.5)$$

genişliğindedir ve bu konumda faz endüktansı maksimum değerine (L_a) ulaşır (Şekil 3.6).

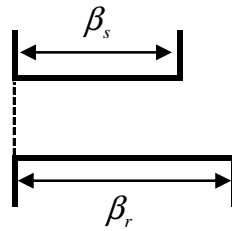


Şekil 3.6: θ_2 konumu

θ_2 ve θ_3 konumları arasında kutuplar tamamen çakışık durumdadır ve faz endüktansı maksimum değerinde sabit kalır.

$$\theta_3 - \theta_2 = \beta_r - \beta_s \quad (3.6)$$

genişliğinde olan bu bölgenin sonunda, θ_3 konumunda, rotor ve stator kutupları ayrılmaya başlar (Şekil 3.7).

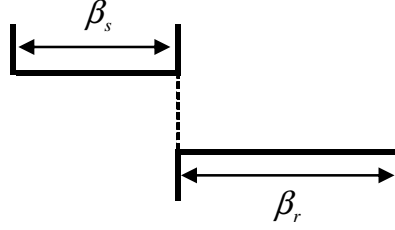


Şekil 3.7: θ_3 konumu

θ_3 ile θ_4 arası, rotor ve stator kutupları için ayrılma bölgesidir.

$$\theta_4 - \theta_3 = \beta_s \quad (3.7)$$

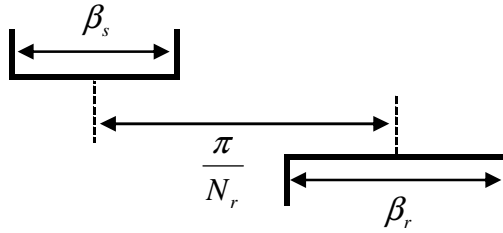
genişliğindeki bu bölge sonunda θ_4 konumunda faz endüktansı minimum değerine (L_u) düşer (Şekil 3.8).



Şekil 3.8: θ_4 konumu

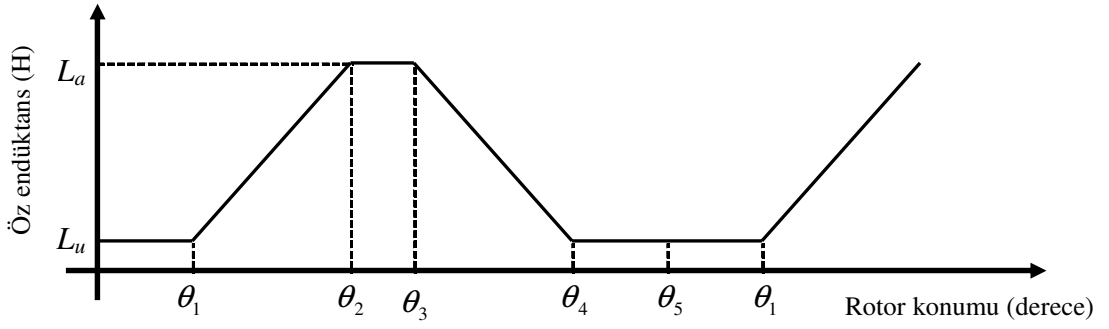
Bu durum kutupların tamamen ayrıık olduğu konum (unaligned position) olan θ_5 'e kadar devam eder (Şekil 3.9).

$$\theta_5 - \theta_4 = \frac{\pi}{N_r} - \frac{\beta_s}{2} - \frac{\beta_r}{2} \quad (3.8)$$



Şekil 3.9: θ_5 konumu

Buna göre, sabit akımda, doyma ve saçaklanma etkisinin ihmal edildiği durum için, faz sargısı özendüktansının rotor konumuna bağlı değişimi Şekil 3.10'daki gibi elde edilmektedir.



Şekil 3.10: A.R.M.'nin bir fazına ait özendüktansın doğrusal değişimi

Şekil 3.10'a göre rotorun herhangi bir konumu için endüktans değeri;

$$L = \begin{cases} L_u & \theta_4 \leq \theta \leq \theta_1 \\ K.(\theta - \theta_1) + L_u & \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \\ L_a & \theta_2 \leq \theta \leq \theta_3 \\ L_a - K.(\theta - \theta_3) & \theta_3 \leq \theta \leq \theta_4 \end{cases} \quad (3.9)$$

olarak yazılır. Burada;

$$K = \frac{(L_a - L_u)}{\theta_2 - \theta_1} = \frac{(L_a - L_u)}{\theta_4 - \theta_3} \quad (3.10)$$

olur.

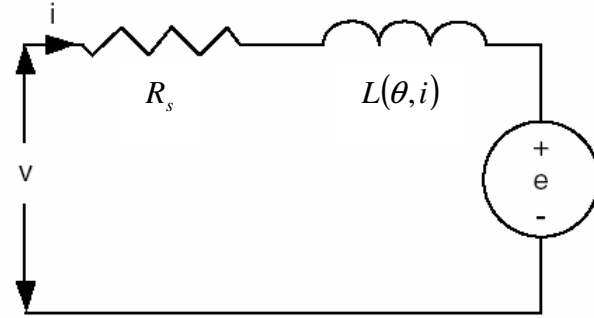
A.R.M.'nin endüktans profili ideal olarak Şekil 3.10'daki gibi çizilse de, gerçekte doyma etkisinden dolayı, tam olarak bu profilin elde edilmesi mümkün değildir. Doyma nedeniyle endüktans profilinin sivri köşeleri yuvarlaklaşır. Buna göre akımın artmasıyla, rotor ve stator kutuplarının çakışık olduğu konumdaki endüktans değeri (L_a) azalmaktadır. Bir başka ifadeyle endüktans profilinin eğimi, akımla ters orantılı olarak değişmektedir. A.R.M.'de sargı endüktansının maksimum ve minimum değerleri arasındaki oranın motorun performansını önemli biçimde etkilemesi nedeniyle, özellikle yüksek akımlarda doyma etkisi daha fazla önem kazanmaktadır.

Denklem 3.2-3.3'ten yola çıkılarak gerilim eşitliği;

$$\begin{aligned}
 V &= R_s \cdot i + \frac{d\{L(\theta, i) \cdot i\}}{dt} = R_s \cdot i + L(\theta, i) \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \\
 &= R_s \cdot i + L(\theta, i) \cdot \frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \omega \cdot i
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

şeklinde yazılabilir.

Eşitliğin sağ tarafındaki üç ifade, sırasıyla, omik gerilim düşümü, endüktif gerilim düşümü ve endüklenen emk'dır. Bu ifade yardımıyla, bir faz için eşdeğer devre Şekil 3.11'deki gibi türetilebilir.



Şekil 3.11: A.R.M.'nin bir faz eşdeğer devresi [73]

Gerilim eşitliğinin her iki tarafı faz akımı ile çarpılarak, motorun giriş gücü ifadesi oluşturulur.

$$P_i = V \cdot i = R_s \cdot i^2 + i^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{dt} + L(\theta, i) \cdot i \cdot \frac{di}{dt}
 \tag{3.12}$$

Eşitliğin sağ tarafındaki son ifadeyi

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) \cdot i^2 \right) = L(\theta, i) \cdot i \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{dt}
 \tag{3.13}$$

olarak elde edip yerine yazarak, güç eşitliği aşağıdaki şekle dönüştürülebilir.

$$P_i = R_s i^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (3.14)$$

Bu eşitliğin sağ tarafındaki üç ifade sırasıyla, faz sargı direncinde oluşan bakır kaybı, manyetik alan enerjisindeki değişim ve hava aralığı gücüdür. Hava aralığı gücü (P_g);

$$P_g = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \omega \quad (3.15)$$

olarak yazılabilir. Hava aralığı gücü mekanik parametreler yardımıyla ise,

$$P_g = \omega T_e \quad (3.16)$$

olarak yazılır.

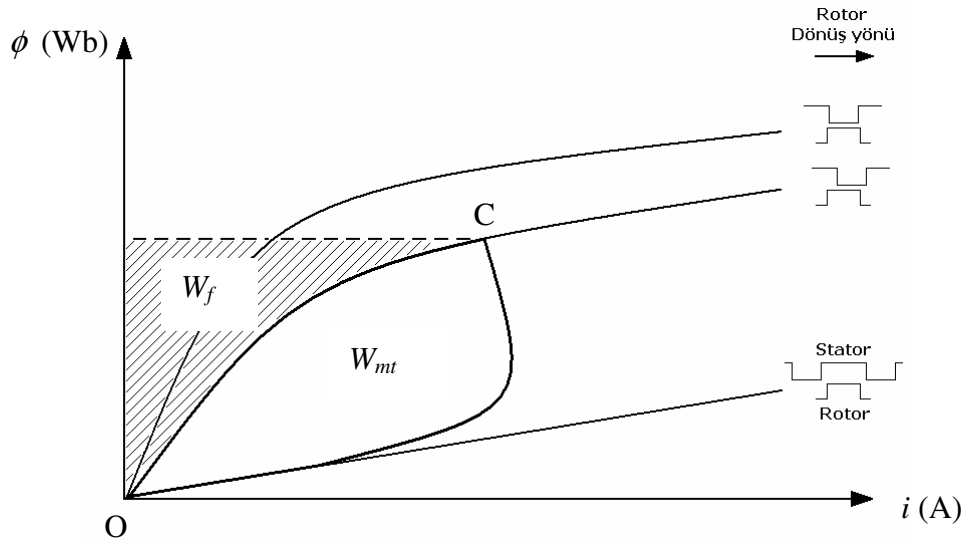
3.4 A.R.M.'de Güç Üretimi

3.4.1 Enerji dönüşümü

A.R.M.'de enerji dönüşümü, motorun sabit hızda hareket ettiği ve gerilimin faz sargısına stator ve rotor kutuplarının tamamen ayrık olduğu konumda uygulandığı varsayılarak açıklanmaktadır. Buna göre halkalama akısı, denklem 3.17 yardımıyla;

$$\phi = \int (V - R_s i) dt = \frac{1}{\omega} \int (V - R_s i) d\theta \quad (3.17)$$

olarak ifade edilir. Eğer besleme gerilimi sabit ve faz sargı direnci küçükse, halkalama akısı rotor konumuyla lineer olarak artar. Rotor ve stator kutuplarının ayrık konumu civarında endüktans değeri düşük ve neredeyse sabit olduğundan, akım önce lineer olarak yükselir. Kutuplar çakışmaya başladığında endüktans değeri gittikçe artar ve zıt emk endüklenmeye başlar. Bu da akımın yükselme hızını düşürür. Bu nedenle, sıfırdan C ile gösterilen çalışma noktasına giden yol, Şekil 3.12'deki gibi bir eğridir.

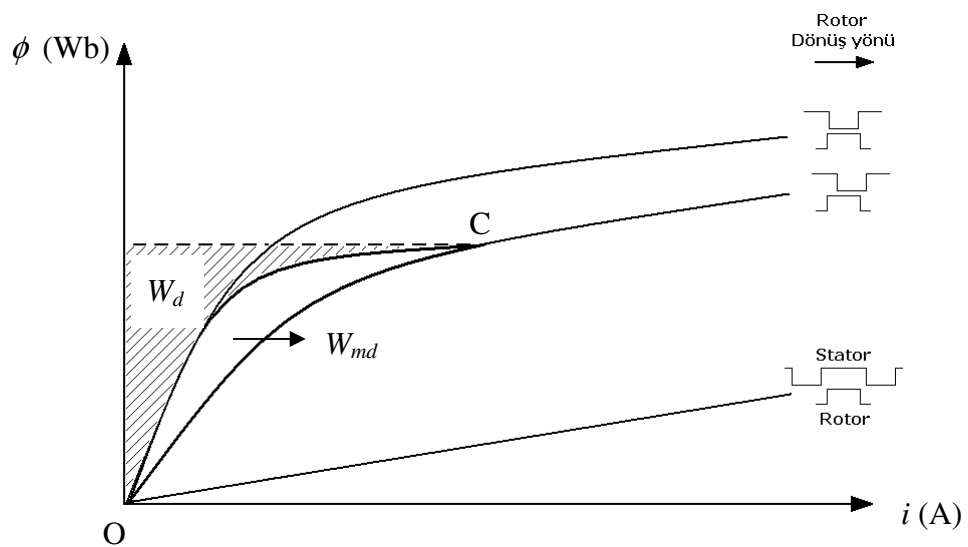


Şekil 3.12: Faz sargısı iletimde iken enerji dönüşüm döngüsü [74]

C noktasında, faz sargısı kesime sokulduğunda, besleme geriliminin polaritesi değişir ve akım, diyot üzerinden serbest geçiş yapar. C noktasında, kaynaktan alınan enerji toplam alana eşittir.

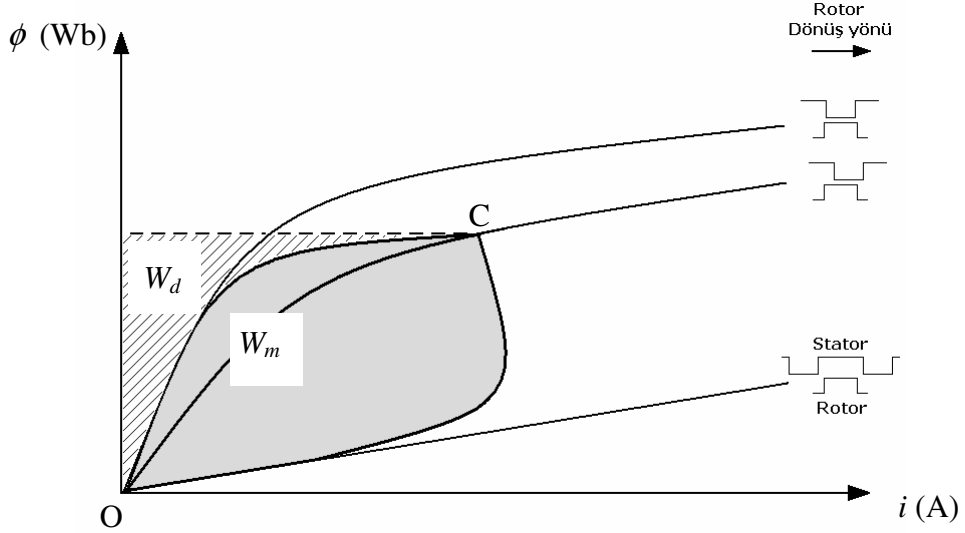
$$W_e = W_{mt} + W_f \quad (3.18)$$

Burada W_f depolanan manyetik enerji, W_{mt} ise yarı iletken güç anahtarının iletimde olduğu sürede, bir başka ifadeyle O ile C arasında mekanik işe dönüşen enerjidir.



Şekil 3.13: Faz sargısı kesimde iken oluşan enerji dönüşüm döngüsü [74]

Yarıiletken anahtar kesime sokulduğunda, faz sargısının geriliminin polaritesi değişir ve enerji (W_d) kaynağa geri aktarılır. O noktasında hem akım, hem de akı sıfırdır ve alanda depolanmış enerji kalmaz. C noktasından O noktasına dönüş süresince işe dönüşen enerji $W_{md}=W_{fc}-W_d$ kadardır (Şekil 3.13).



Şekil 3.14: Toplam enerji dönüşüm döngüsü [74]

Şekil 3.12 ve 3.13'ten faydalanılarak toplam enerji dönüşüm döngüsü elde edilebilir (Şekil 3.14). Burada; W_m rotorun adım açısı kadar hareketi süresince işe dönüşen enerji, W_d ise kaynağa geri aktarılan enerjidir.

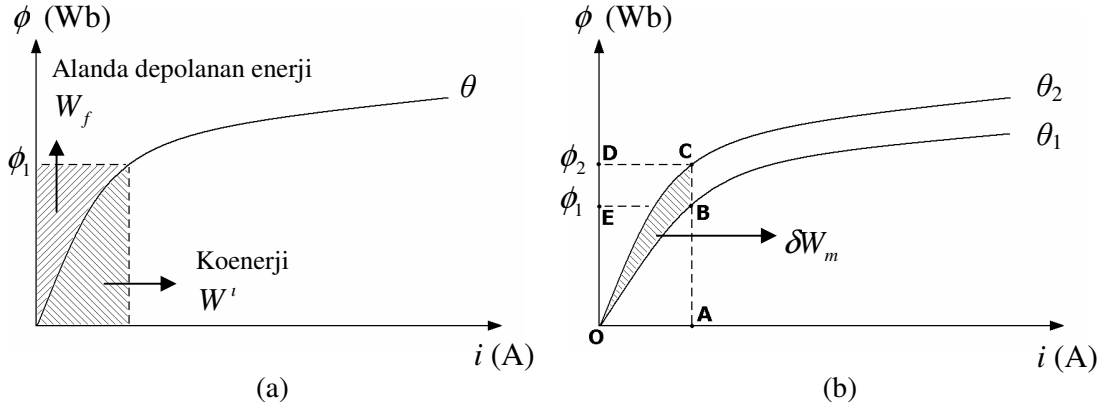
3.4.2 Moment üretimi

A.R.M.'de enerji dönüşümünü açıklamak ve moment ifadesini elde etmek için, makinanın bir fazına ait temel manyetik devre kullanılmaktadır (Şekil 3.3). Bir faz sargısı, statorun karşılıklı kutupları üzerine sarılmış olan ve her biri $N/2$ sarımdan oluşan iki bobin seri bağlanarak elde edilmektedir. Faz sargısının enerjilendirilmesi ile oluşan akı çizgileri, yollarını hava aralıkları ve rotor devresi üzerinden tamamlar. Sargının enerjilendirilmesiyle, kaynaktan çekilen elektriksel enerji;

$$W_e = \int e.i.dt = \int i.dt.N \frac{d\phi}{dt} = \int N.i.d\phi = \int F.d\phi \quad (3.19)$$

olarak ifade edilir.

Burada; e , sargıda endüklenen elektromotor kuvvet; F ise mmk'dır. Kaynaktan çekilen elektrik enerjisi (W_e), manyetik alanda depolanan enerji (W_f) ile mekanik olarak işe dönüşen enerjinin (W_m) toplamıdır (Şekil 3.15.a). Rotorun herhangi bir konumu için, mıknatıslanma eğrisinin altında kalan bölge koenerjiyi, üstünde kalan bölge ise manyetik alanda depolanan enerjiyi verir.



Şekil 3.15: Rotorun (a) θ konumu için akı eğrisi, (b) $\delta\theta$ hareketi için enerji dönüşümü [75]

Şekil 3.15.b'de, rotorun iki farklı konumu için mıknatıslanma eğrileri verilmektedir. Rotorun θ_1 konumu için alanda depolanan enerji "OBE", koenerji "OAB"; θ_2 konumu için ise alanda depolanan enerji "OCD", koenerji "OAC" bölgeleriyle ifade edilir. Rotorun θ_1 'den θ_2 konumuna kadar olan sonsuz küçük ($\delta\theta$) hareketi sonucunda kaynaktan çekilen ve alanda depo edilen enerjideki değişimler, sırasıyla;

$$\delta W_e = \delta W_f + \delta W' = \int_{\phi_1}^{\phi_2} F \cdot d\phi = F \cdot (\phi_2 - \phi_1) = \text{Alan}(EBCD) \quad (3.20)$$

$$\delta W_f = W_{f_{\theta_2}} - W_{f_{\theta_1}} = \text{Alan}(OCD - OBE) \quad (3.21)$$

olarak yazılır. Buradan yola çıkılarak, rotorun $\delta\theta$ kadar hareketi sonucunda mekanik işe dönüşen enerji;

$$\delta W_m = \delta W_e - \delta W_f = \text{Alan}(OBC) \quad (3.22)$$

olarak elde edilir. Bu enerji, elektromanyetik moment ve rotor konumundaki değişim yardımıyla;

$$\delta W_m = T_e \cdot \delta \theta \quad (3.23)$$

şeklinde yazılır. Buradan elektromanyetik moment ifadesi;

$$T_e = \frac{\delta W_m}{\delta \theta} \quad (3.24)$$

olarak elde edilir. Sabit akımda ve rotor konumundaki sonsuz küçük değişimi için mekanik işe dönüşen enerji, koenerjideki değişim kadardır.

$$\delta W_m = \delta W' \quad (3.25)$$

Burada koenerji;

$$W' = \int \lambda \cdot dF = \int \lambda \cdot d(N \cdot i) = \int (N \cdot \lambda) \cdot di = \int \phi(\theta, i) \cdot di = \int L(\theta, i) \cdot i \cdot di \quad (3.26)$$

şeklinde yazılır. Görüldüğü gibi endüktans ve halkalama akısı, rotor konumu ve akımın bir fonksiyonudur. Bu ifadeden faydalanılarak, motorun bir fazında üretilen elektromanyetik moment, koenerji cinsinden;

$$T_e = \frac{\delta W_m}{\delta \theta} = \frac{\delta W'}{\delta \theta} = \frac{\delta W'(i, \theta)}{\delta \theta} \Big|_{i=\text{sabit}} \quad (3.27)$$

olarak yazılır. Makinada üretilen anlık moment ve ortalama moment ise, denklem 3.15 ve 3.16'dan faydalanılarak sırasıyla;

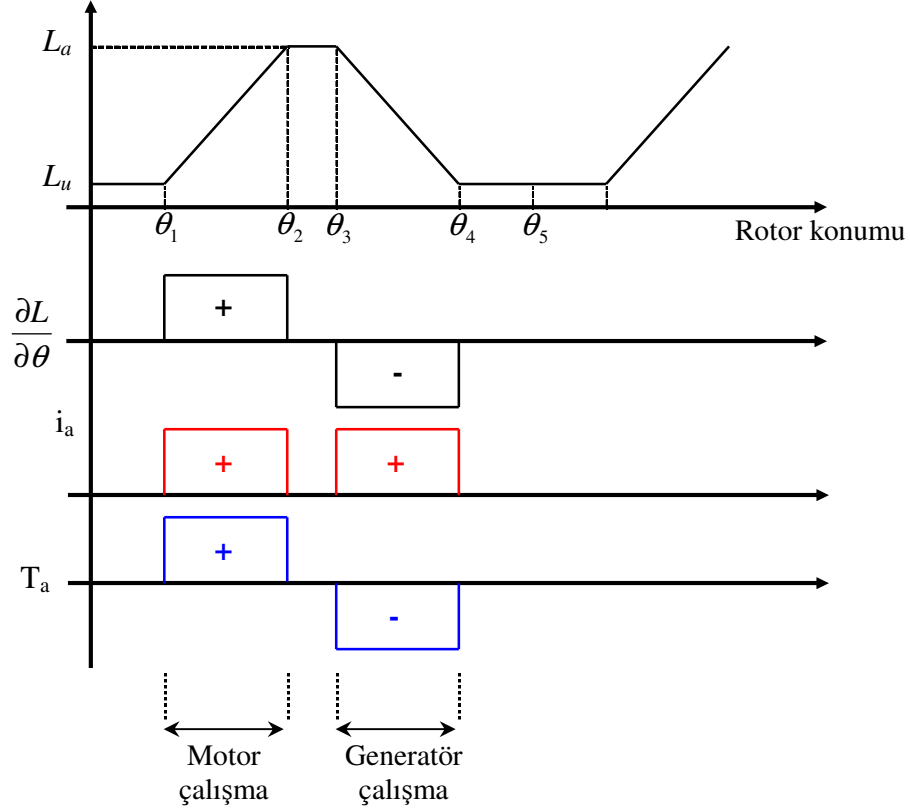
$$T_{an}(\theta, i) = \sum_{j=1}^m T_e(\theta, i) = \sum_{j=1}^m \frac{1}{2} \cdot i_j^2 \cdot \frac{dL_j(\theta, i)}{d\theta_j} \quad (3.28)$$

$$T_{ort} = \frac{1}{T} \int_0^T T_{an} dt \quad (3.29)$$

şeklinde yazılır. Burada; m makinanın faz sayısıdır.

Denklem 3.28'e göre sargı akımının sabit olduğu durumda A.R.M.'de üretilen moment, akımın karesi ve sargı endüktansının rotor konumuna göre değişimiyle orantılı olarak değişmektedir. Sargı akımının yönünden ise bağımsızdır.

A.R.M.'de dönüş yönüne bağlı olarak, motor çalışma momenti sadece endüktans profiline göre, artan endüktans bölgesinde faz sargısından akım akması sonucunda üretilir. Akımın azalan endüktans bölgesinde uygulanması durumunda ise üretilen moment, generatör moment veya fren momenti olarak adlandırılmaktadır (Şekil 3.16.) [76].



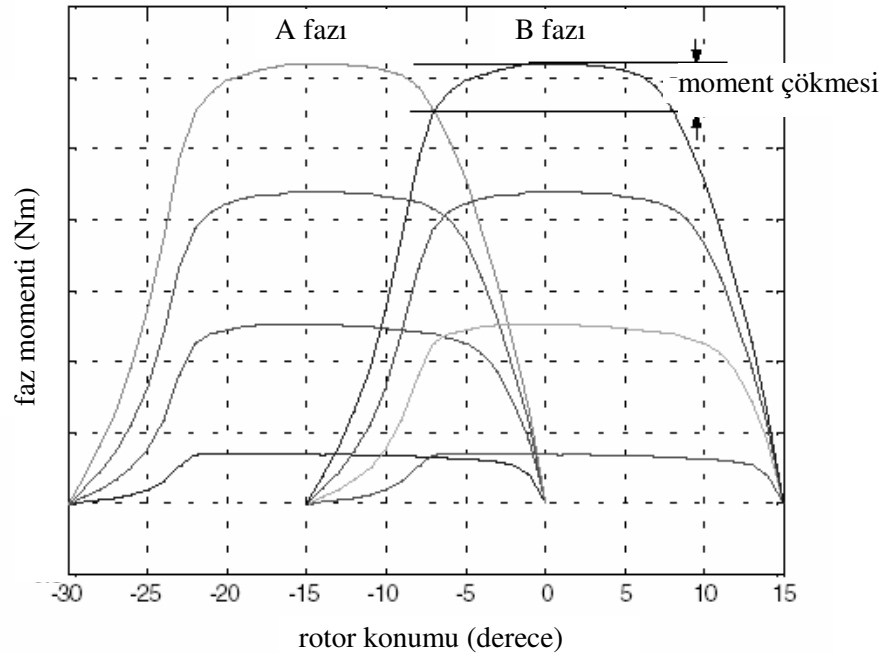
Şekil 3.16: İdeal endüktans profiline göre A.R.M.'de moment üretimi

İdeal endüktans profili göz önünde tutularak, rotorun herhangi bir konumu için üretilen moment;

$$T = \begin{cases} 0 & \theta_4 \leq \theta \leq \theta_1 \\ i^2 \cdot K / 2 & \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \\ 0 & \theta_2 \leq \theta \leq \theta_3 \\ -i^2 \cdot K / 2 & \theta_3 \leq \theta \leq \theta_4 \end{cases} \quad (3.30)$$

olarak yazılabilir. Gerçekte ise, doyma bölgesinde ($\theta_4 \leq \theta \leq \theta_1$ ve $\theta_2 \leq \theta \leq \theta_3$) moment, akımın karesiyle orantılı değildir. Bununla birlikte akıma bağlı olarak artmaya devam eder.

Şekil 3.17.'de dört fazlı bir A.R.M.'nin, farklı sargı akımları için iki fazında üretilen moment eğrileri verilmektedir.



Şekil 3.17: Komutasyon esnasında oluşan moment çökmesi

A.R.M.'lerin uygulamada karşılaşılan en büyük olumsuzluklarından biri, momentte oluşan dalgalılıktır. Özellikle komutasyon süresince yoğun olarak oluşan ve Şekil 3.17'de açıkça görülen bu çökmenin büyüklüğünü etkileyen faktörlerden biri, makinanın faz sayısıdır. Ayrıca faz sargısını kontrol eden anahtarlama elemanlarının iletme ve kesime alınma zamanlarının doğru biçimde belirlenmesi moment dalgalılığının azaltılması için büyük önem taşır. Sargının kesime olması gerektiği zamandan geç sokulması, motor olarak çalışan makinada generatör moment (fren momenti) üretilmesine neden olacak, bu da moment dalgalılığını artıracaktır. Motorun manyetik devre yapısında yapılan iyileştirmeler ve modern kontrol yöntemlerinin uygulanmasıyla, momentteki dalgalılık oranı azaltılabilmektedir.

3.5 A.R.M. Sürücüleri ve Dinamik Çalışması

Çalışma prensibi göz önünde tutulduğunda, A.R.M.'lerin çalışması için sadece bir doğru gerilim kaynağının yeterli olmadığı, motorun bir sürücü devre üzerinden beslenmesi gerektiği görülmektedir. Motorun sürekli dönüşü sırasında faz sargılarını besleyecek yarı iletken güç anahtarlarının anahtarlama zamanlarını belirlemek amacıyla faz akımının ve rotor konumunun yüksek doğrulukla elde edilmesi gereklidir. Geleneksel kontrol yapılarında bu bilgileri elde etmek için akım ve konum algılayıcı elemanlar kullanılmaktadır. Bununla birlikte sürücü devrede kullanılan eleman sayısını azaltmak, sürücü yapısını basitleştirmek ve algılayıcı elemanlardan kaynaklanan problem ve arızaları ortadan kaldırmak amacıyla, algılayıcısız kontrol yöntemleri geliştirilmekte ve uygulanmaktadır.

A.R.M. sürücülerinin en önemli bileşenlerinden biri, motoru besleyecek konverter devresidir. Konverter devresinin performansı, sürücü sisteminin toplam verim ve maliyetini önemli oranda etkiler. A.R.M.'de üretilen moment, akımın yönünden bağımsızdır. Bu nedenle, A.R.M. sürücülerinde faz sargısı başına bir anahtarlama elemanı yeterli olmaktadır. Bu özellik, akım kontrolü için faz başına iki anahtar gerektiren asenkron ve senkron motor sürücülerden farklıdır. A.R.M.'nin bu özelliği, fazların birbirinden elektriksel olarak bağımsız olmasıyla birleşince, çok farklı konverter yapıları oluşturulmasına imkan sağlamaktadır. Her farklı devre yapısının birbirlerine göre üstünlükleri olduğu gibi, olumsuz yanları da bulunmaktadır. Bu nedenle A.R.M. uygulamalarında, doğru konverter devresi seçimi önemli bir kriterdir.

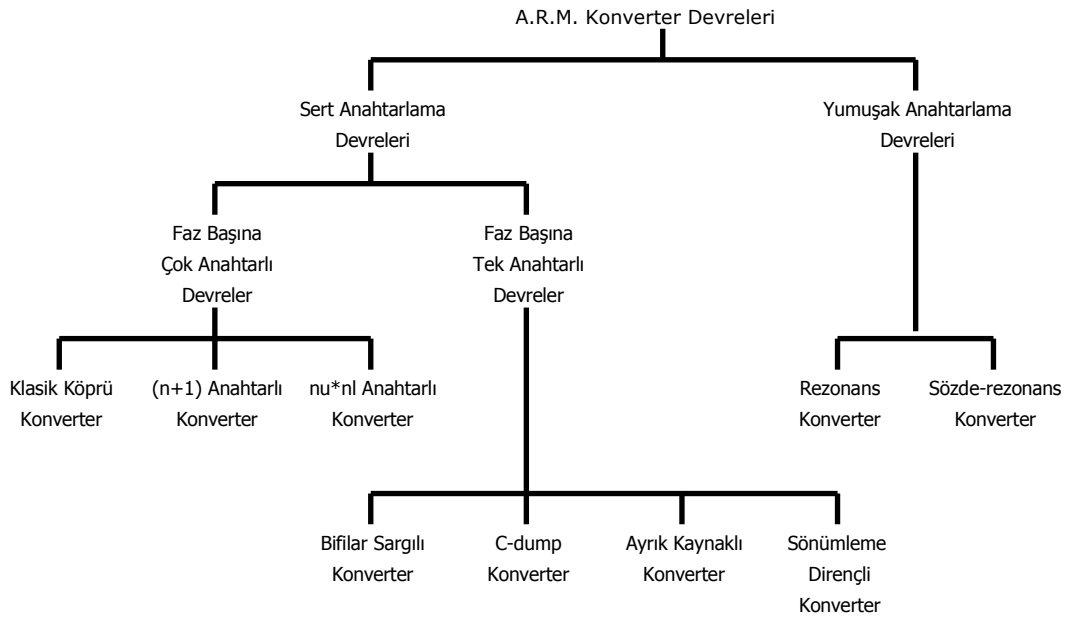
Konverter devresinin, makinanın her bir faz sargısını diğerlerinden bağımsız olarak enerjilendirebilmesi ve generatör bölgesine geçmeden önce fazın mıknatıslığının giderilmesine imkan sağlaması, tüm konverter devre yapılarında aranan temel özelliktir.

Bunun yanında, devrenin verimini ve sargıların mıknatıslığını daha hızlı şekilde gidererek performansını iyileştirmek amacıyla, konverter devresinin bazı ek ihtiyaçları da karşılaması istenir. Bu ihtiyaçlar;

- Kesime giden fazın mıknatıslığı tamamen giderilmeden, diğer faz iletime sokulabilmesi,
 - Kesime giden fazın enerjisi, faydalı bir şekilde güç kaynağına veya yeni iletime giren faza aktarılabilmesi,
 - Komutasyon süresini kısa tutmak için, kesime giden fazın mıknatıslığı kısa sürede giderilebilmesi,
 - Konverter devresi, anahtarlama frekansını azaltmak için, kıyılma süresince serbest geçişe (freewheeling) olanak vermesi,
- şeklinde sıralanabilir.

Tüm bu noktalar göz önünde tutularak, günümüzde A.R.M. sürücülerinde kullanılan konverter devre yapıları, devrelerin çalışması ve tasarımına göre Şekil 3.18’de verildiği şekilde sınıflandırılmaktadır.

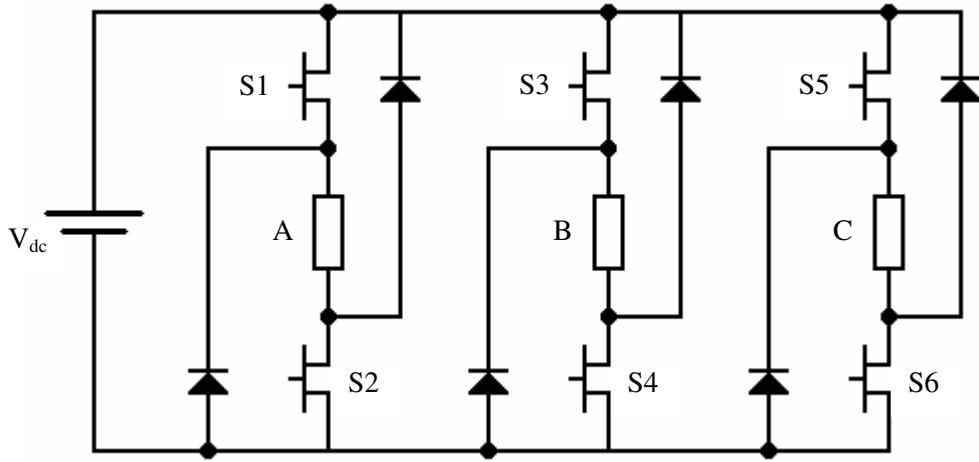
Sert anahtarlama devreleri (hard-switching circuits), giriş gerilimi seviyesinde anahtarlama yaparlar. Bu durum anahtarlama elemanları üzerinde kayıplar oluşmasına ve konverter devresinin veriminin düşmesine neden olur. Anahtarlama yapmak için gerilim veya akımdaki sıfır geçiş zamanlarına gereksinim olmadığından, rezonans elemanı ihtiyacı ortadan kalkar. Bu da konverter devrenin maliyetini azaltır.



Şekil 3.18: A.R.M. sürücülerde kullanılan konverter devre yapılarının sınıflandırılması [77]

Yumuşak anahtarlama devreleri (soft-switching circuits) ise gerilim veya akımın sıfır olduğu zamanlarda anahtarlama yaparlar. Bu sayede anahtarlama kayıpları oluşmaz ve konverter devresinin verimi artar. Gerilim veya akımın sıfır geçiş zamanlarının belirlenmesi gerektiğinden, devrede rezonans kapasitör veya endüktörler kullanılır. Bu da devre maliyetini artırır.

Tüm bu devre yapıları arasında en yaygın olarak tercih edilen devre yapısı, faz başına iki güç anahtarı ve iki diyotun kullanıldığı yapıdır. Bu yapı “klasik köprü konverter” veya “asimetrik köprü konverter” olarak adlandırılır. Şekil 3.19’da, üç fazlı bir A.R.M.’ye ait asimetrik köprü konverter devresi görülmektedir.



Şekil 3.19: Üç fazlı asimetrik köprü konverter yapısı

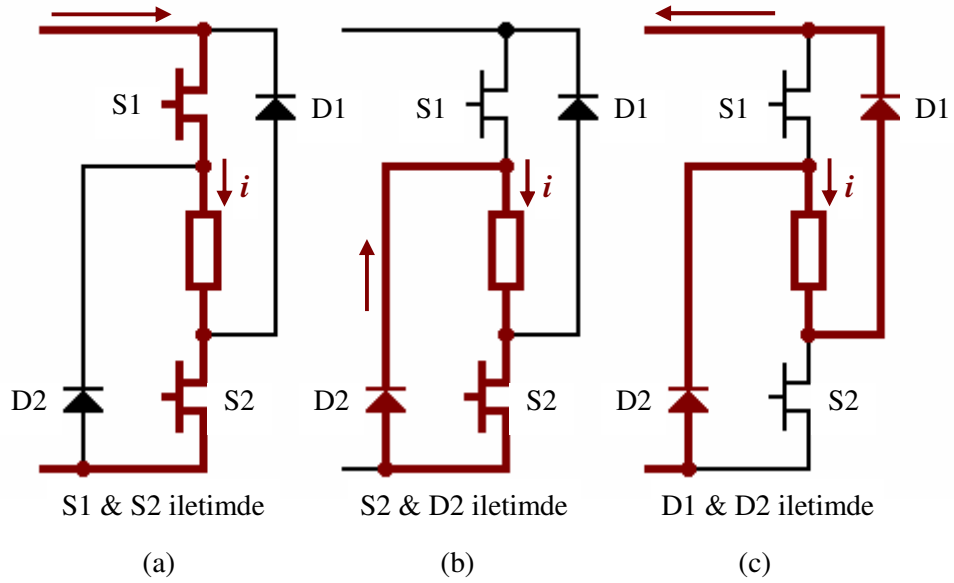
Asimetrik köprü konverter devre yapısının avantajları;

- Her bir fazın kontrolünün, diğer fazlardan tamamen bağımsız olması,
 - Tüm anahtarlama elemanı ve diyotların gerilim seviyesinin, kaynak gerilimi kadar olması,
 - Konverter düşük hızlarda, kıyılma periyodunda serbest geçişe olanak sağlaması,
 - Kesime giden faz sargısının enerjisinin kaynağa geri aktarılabilmesi,
- olarak sıralanabilir.

Bu yapının en büyük dezavantajı, faz başına kullanılan eleman sayısının fazla olmasıdır. Bunun sonucu olarak, düşük gerilimli uygulamalarda, elemanlarda

oluşacak gerilim düşümleri problemlere neden olabilir. Bu tip uygulamalarda faz başına kullanılan eleman sayısının az olduğu devre yapıları tercih edilir.

Şekil 3.20’de, asimetrik köprü konverter devresinin çalışması açıklanmaktadır. Motor düşük hızlarda çalışırken, faz sargısının enerjilendirilmesi için, faz sargısına seri bağlı olan anahtarlama elemanlarının her ikisi de (S1 ve S2) ilettime sokulur (Şekil 3.20.a). Böylece DC kaynak, faz sargısını enerjilendirir. Bu işlem, faz endüktansının değeri yükselmeye başlamadan önce faz akımını referans değerine ulaştırmak için, genellikle rotor ve stator kutupları çakışmaya başlamadan önce başlatılır. Bu sayede moment dalgalılığının azaltılması sağlanır. Referans değerine ulaştığında, akımı sabit tutmak için kısımla moduna geçilir. Bu işlem için histeresiz tip akım kontrolörü kullanılmaktadır. Bu sürede, kesim anına kadar, kontrol yöntemine göre faz anahtarlarından biri (Şekil 3.20.b) veya her ikisi sürekli olarak anahtarlama yaparak akımı referans değerinde tutar.

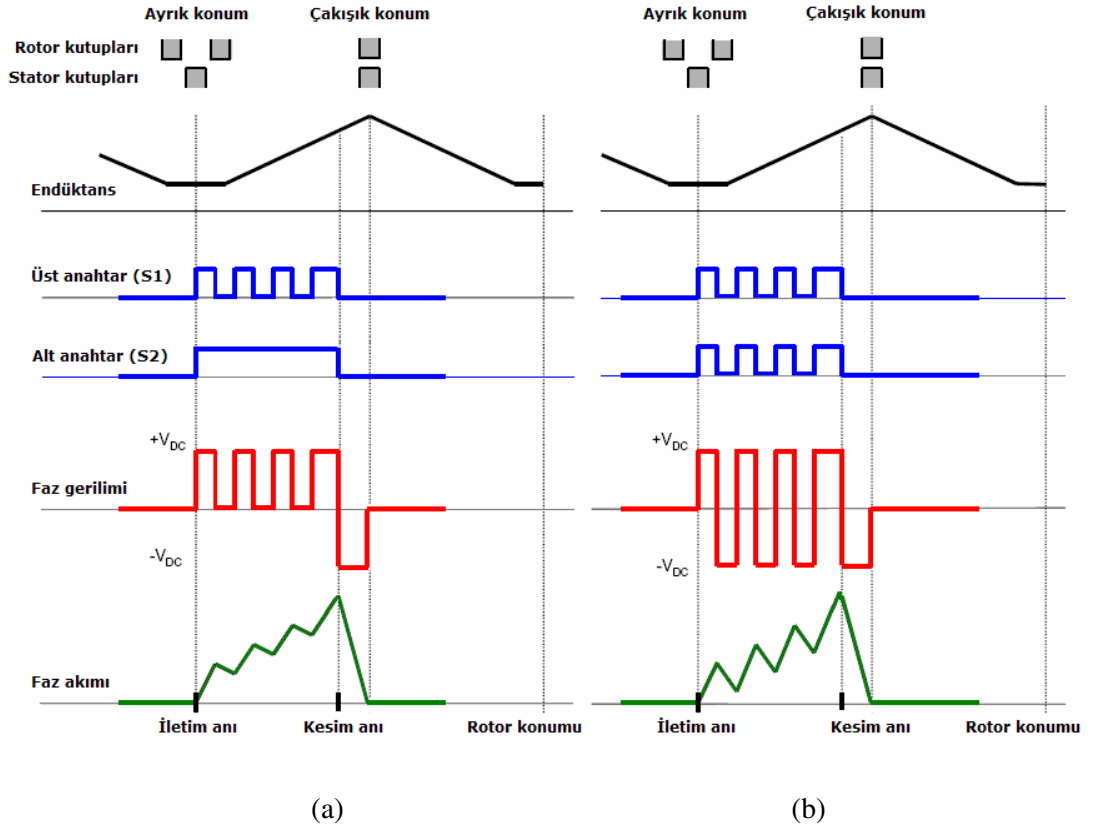


Şekil 3.20: Asimetrik köprü konverter çalışma modları

Şekil 3.20.b’de sadece bir elemanın (S1) anahtarlanması ile akım kontrolü yapılması durumu için, S1 anahtarının kesimde olduğu an görülmektedir. Anahtarların bu konumu (S1 kesimde, S2 iletimde) için akım, yolunu D2 diyodu üzerinden tamamlar. Şekil 3.20.c’de ise her iki elemanın anahtarlanması ile akım kontrolü yapılması durumunda her iki anahtarın da kesimde olduğu an görülmektedir. Anahtarların bu konumu için akım, yolunu D1 ve D2 diyotları üzerinden tamamlar. İletim süresinin

sonunda anahtarların her ikisi de kesime sokulur. Faz sargısının enerjisi iki diyot (D1 ve D2) üzerinden kaynağa aktarılır. Kesime sokulan faz sargısı, mıknatıslığı sıfıra inene kadar $-V_{dc}$ gerilimini görür. Bir faz sargısının sönmülmesi sırasında, diğer faz sargısı enerjilendirilebilir. Böylece moment dalgalılığının kısmen azaltılması sağlanır. Şekil 3.21’de sırasıyla, faz sargısının iletim süresinin tek ve çift anahtarla kontrol edilmesi durumları için izlenen gerilim ve akım dalga şekilleri görülmektedir.

Yüksek hızda çalışma durumu ise tek darbeli çalışma olarak adlandırılır. Rotor ve stator kutuplarının ayırık olduğu konumda faz sargısı iletme sokulur. Kutupların çakışmaya başladığı konuma kadar akımda artış gözlenir. Kutupların çakışmaya başlamasıyla birlikte artan endüktans ve endüklenen zıt emk’nın etkisiyle akım azalmaya başlar.



Şekil 3.21: Asimetrik köprü konverter devresinde faz sargısının (a) tek anahtarla, (b) çift anahtarla kontrol edilmesiyle elde edilen dalga şekilleri,

3.6 A.R.M.'nin Üstün ve Zayıf Yönleri

Günümüzde elektromekanik güç dönüşümünü sağlamak amacıyla birçok alanda dönen elektrik makinaları kullanılmaktadır. Kullanım alanına bağlı olarak, tercih edilen makina tiplerinin birbirlerine göre çeşitli üstün ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Dönen elektrik makinaları ailesinin bir üyesi olan A.R.M.'lerin diğer dönen elektrik makinalarıyla karşılaştırıldığında görülen üstünlükleri şu şekilde sıralanmaktadır.

- A.R.M.'de faz sargıları stator kutupları üzerine sarılmaktadır. Rotor üzerinde sargı veya mıknatıs malzeme bulunmaz. Böylece rotor yapısında kullanılan malzeme miktarı ve dolayısıyla maliyet azalmaktadır.
- Sargıların stator kutupları etrafında yığılı (konsantre) yapıda olması nedeniyle, dağıtılmış sargı yapısının kullanıldığı alternatif ve doğru akım makinalarına oranla üretim maliyetleri daha düşüktür.
- Konsantre sargı yapısı sayesinde aynı zamanda sargı sonu etkisi de azalmaktadır. Böylece dağıtılmış sargı yapısıyla karşılaştırıldığında sargı direnci ve oluşacak bakır kayıpları daha az olacaktır.
- A.R.M.'lerde rotorun boyutu, ağırlığı ve dolayısıyla atalet momenti, eşdeğer özellikteki diğer elektrik motor tipleriyle karşılaştırıldığında daha küçüktür. Bu sayede motorun hızlanma süresi kısalmaktadır.
- Motorun yapısında fırça ve kollektörler olmadığından, sargılı doğru akım motorlarının aksine bakım gereksinimi yoktur.
- Rotorda sargı veya mıknatıs malzeme taşımadığından dolayı, A.R.M.'ler mekanik olarak oldukça dayanıklıdır ve yüksek hızda çalışmaya uygundur.
- Makinadaki tek ısı kaynağı, sadece statorda bulunan sargılardır. Bu nedenle soğutmaya daha az gereksinim duyulur.
- Doğru akım makinaları ve asenkron makinaların aksine, rotorda oluşan kayıplar oldukça düşüktür.
- Güç yoğunluğu, asenkron motorlardan yüksek, fakat yüksek enerjili mıknatıs malzemelerin kullanıldığı SM senkron ve fırçasız doğru akım motorlarından daha düşüktür.
- A.R.M.'lerde yaygın olarak kullanılan kısa adımlı sargı yapısında her bir faz sargısının elektriksel devresi diğer fazlardan bağımsız ve fazlar arası karşılıklı

etkileşim (mutual coupling) ihmal edilecek kadar düşük olduğundan, bir fazda oluşabilecek arızalar diğer fazları etkilemez. Dolayısıyla performans düşüklüğü yaşansa da motor çalışmaya devam eder.

- Endüktans, rotor konumu ve uyarma akımına bağlı olarak değişmektedir. Herhangi bir faz sargısının pasif durumda olduğu sürede, endüktans değeri rotor konumunu belirlemek için kullanılabilir. Asenkron ve sürekli mıknatıslı senkron makinalarda sargıların pasif olduğu zaman dilimi olmadığından, bu mümkün değildir.

A.R.M.'lerin zayıf yönleri ise şu şekilde sıralanmaktadır.

- Makinada moment dalgalılığı yüksektir. Fakat bu durum faz komutasyonu yardımıyla azaltılabilir.
- Momentteki dalgalılık, makinanın çalışmasında ortaya çıkan gürültüyü de artırmaktadır.
- Çıkık rotor yapısından dolayı, yüksek hızlarda sürtünme ve hava sürtünmesi kayıpları yüksektir.
- Sürekli mıknatıslı senkron ve fırçasız doğru akım motorlarında olduğu gibi, A.R.M.'nin kontrolü için de rotor konum bilgisinin elde edilmesi gerekir. Bu nedenle özellikle bazı düşük performanslı uygulamalarda, bu gereksinimi olmayan dc ve asenkron motorlar tercih edilebilir.

4. DIŞ ROTORLU ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUNUN TASARIMI

4.1 Giriş

Elektrik motorları, günümüzde endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alanlardaki farklı uygulamalar için motor seçimi yapılırken gözönünde tutulması gereken en önemli nokta, kullanılan motorun, kullanıldığı uygulamanın ihtiyaç duyduğu performansı sunabilmesidir. Bu performansı optimum düzeyde elde edebilmenin en kesin yolu ise, motoru, istenen özellikleri sağlayacak şekilde tasarlamak ve imal etmektir.

Elektrikli taşıt tahrik sistemleri içinde, tek bir tahrik motorunun kullanıldığı yapılarda motordan talep edilen en önemli özellik, motorun nominal devir sayısının yüksek olmasıdır. Motorda üretilen nominal moment değeri ise ikinci derece önem taşır. Bu tahrik yapısında motorun ürettiği güç, mekanik güç aktarım elemanları ve dişliler üzerinden tekerleklere aktarılmaktadır. Bu sayede motorda üretilen moment, kullanılan dişli oranlarına bağlı olarak değiştirilerek tekerleklere iletilebilmektedir. Tekerlek-içi motor yapılarında ise tahrik motorundan istenen başlıca özellik, motorda üretilen nominal moment değerinin yüksek olmasıdır. Bu uygulamalarda dişlilere olan gereksinim ortadan kalktığından, üretilen momentin değiştirilmesi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle bu amaçla kullanılacak motorlar, yüksek momentli ve nispeten düşük hızlı olarak tasarlanırlar.

Bu çalışmada tasarımı yapılan D.R.A.R.M.'nin elektrik tahrikli bir taşıtta tekerlek-içi tahrik motoru olarak kullanılması amaçlanmaktadır. Bu nedenle motorun nominal devrinin düşük, nominal momentinin de yüksek olması planlanmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde, temel tasarım parametrelerine bağlı olarak, analitik hesaplar yardımıyla motorun boyutlarının belirlenmesi hedeflenmektedir.

4.2 A.R.M. Parametrelerinin Analitik Olarak Hesaplanması

4.2.1 Motorun temel parametrelerinin belirlenmesi

Elektrik motorlarının tasarım aşamasının başında, motorun kullanılacağı uygulamanın ihtiyaçları göz önünde tutularak belirlenecek ve bağlı kalınacak temel parametreler motor gücü, besleme gerilimi, akım ve çalışma hızı değerleri olarak sayılmaktadır. Elektrik motorları farklı yapısal şekil ve boyutlarda tasarlanabilmekle beraber, genel amaçlı uygulamalarda kullanılan elektrik motorları için çeşitli standartlar oluşturulmuştur.

Motorun temel tasarım parametreleri referans alınarak ve uluslararası kuruluşlarca belirlenmiş ve kabul görmüş olan standart değerlerine bağlı kalınarak makinanın tasarımı gerçekleştirilir. Dönen elektrik makinalarının tasarımı için baz alınan bu standart değerler, I.E.C. (International Electrotechnical Commission) tarafından belirlenmiş olan ve IEC60034 ve IEC60072 kod numaralarıyla yayınlanan standartlardır. Bu standartlar, I.S.O. (International Standards Organization) ve N.E.M.A. (National Electrical Manufacturers Association) düzenlemelerine dayanılarak oluşturulmakta ve kabul görmektedir. IEC60072 standartları dönen elektrik makinaları için kullanılacak boyutların sınırlarını belirlemektedir. IEC60034 standartları ise, ısınma sınırları, soğutma biçimleri, gürültü sınırları ve verim belirleme yöntemleri gibi çok çeşitli düzenlemeleri içermektedir.

Özel amaçlı uygulamalar için ise, motor tasarımı yapılırken birçok farklı etken, sınırlayıcı parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu etkenlere örnek olarak motorun kullanılacağı uygulamaya göre boyutları, soğutma biçimleri, gürültü değerleri gibi farklı parametreler sayılabilir. Bu durumlarda, yukarıda belirtilen standart değerlerin dışına çıkılması gerekebilir.

Temel tasarım parametrelerinden hız ve güç değerleri yardımıyla, makinada üretilecek moment değeri;

$$T_e = \frac{P_{out(hp)} \cdot 745,6}{2\pi \cdot \left(\frac{n}{60}\right)} = \frac{P_{out(w)}}{2\pi \cdot \left(\frac{n}{60}\right)} Nm. \quad (4.1)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada; $P_{out(hp)}$ beygir gücü cinsinden motor çıkış gücü, $P_{out(w)}$ watt cinsinden motor çıkış gücü, n ise devir/dakika cinsinden motor dönüş hızıdır.

4.2.2 Stator ve rotor kutup sayılarının belirlenmesi

Tasarlanacak A.R.M.'nin stator kutup (N_s) ve rotor kutup (N_r) sayıları tasarımcı tarafından belirlenen değerlerdir. Farklı kombinasyonlar oluşturulabilmekle birlikte geleneksel yapıdaki A.R.M.'ler için uygulamada yaygın olarak kullanılan kutup sayıları Tablo 4.1'de verilmektedir. Motorda üretilecek moment değerinin yüksek olması uygulama için önem taşıyorsa stator ve rotor kutup sayıları birbirine yakın (8/6, 12/10 vs.), motor hızının yüksek olması birinci öncelik ise stator ve rotor kutup sayıları birbirinden daha farklı (12/6 vs.) seçilir.

Tablo 4.1: A.R.M.'lerde yaygın olarak kullanılan stator/rotor kutup sayısı kombinasyonları

	Kutup Sayıları			
Stator	6	12	8	12
Rotor	4	8	6	10

Kutup sayısı seçimi aynı zamanda, faz sayısına bağlı olarak kontrol devresinde kullanılacak olan yarı iletken güç anahtarlarının sayısını ve dolayısıyla motor sürücüsünün maliyetini de belirleyeceğinden, oldukça önemli bir tasarım kriteridir.

4.2.3 Stator ve rotor kutup genişliklerinin belirlenmesi

Rotor ve stator kutup genişlikleri makinanın performansını önemli ölçüde etkiler. Rotor ve stator kutuplarının çakışık konumu için maksimum endüktans değerini ve maksimum halkalama akısını elde etmek için kutup genişlikleri de büyük olmalıdır. Bununla birlikte bu değerler çok geniş seçilirse, rotor ve stator kutuplarının ayrık olduğu konumda, kutup köşeleri arasında yeteri kadar boşluk kalmaz.

Eğer rotor ve stator kutupları dar tasarlanırsa, oluk alanı artar ve makinadaki bakır kayıpları azalacaktır. Bununla birlikte rotor ağırlığı ve ataleti de azalır. Fakat dar kutuplarla, çakışık durumdaki endüktans değeri ve endüktans oranı da küçük olur. Tüm bu nedenlerle, tasarım sırasında stator ve rotor kutup açılarının belirlenmesi büyük önem taşır. Bu aşamada göz önünde tutulması gereken noktalar literatürde detaylı biçimde açıklanmakla birlikte, kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir [31,74].

- Makinanın stator kutup açısı (β_s), rotor kutup açısından (β_r) küçük olmalıdır.

$$\beta_s \ll \beta_r \quad (4.2)$$

- Makinanın adım açısı,

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{\frac{N_s}{2} \cdot N_r} \quad (4.3)$$

olarak ifade edilir. Makinanın etkin moment bölgesi, stator kutup açısından küçük, adım açısından (ε , stroke angle) büyüktür. Bu nedenle seçilen stator kutup açısı, adım açısından büyük olmalıdır. Şekil 4.1’de motorun a ve b fazlarına ait lineer endüktans eğrileri görülmektedir. b faz endüktansı, L_{ba} ile gösterilen maksimum değerine, a faz endüktansı L_{aa} ile gösterilen maksimum değerine ulaştıktan ε kadar sonra ulaşır.

$$\theta_{1a} = \theta_1 + \varepsilon \quad (4.4)$$

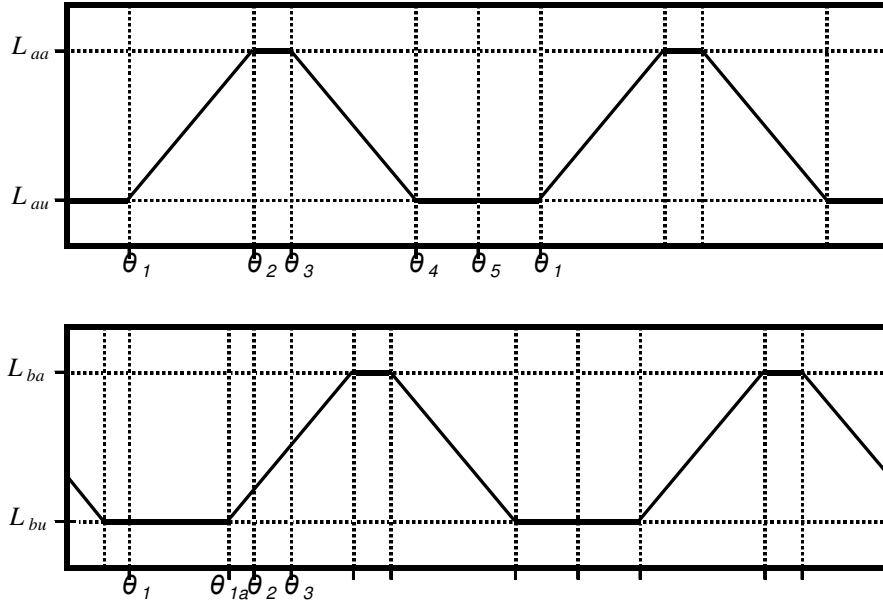
Aynı zamanda,

$$\theta_2 = \theta_1 + \beta_s \quad (4.5)$$

olarak yazılabildiğinden, bu iki denklem yardımıyla

$$\theta_2 = \theta_{1a} - \varepsilon + \beta_s \quad (4.6)$$

eşitliği elde edilir.



Şekil 4.1: İki faza ait lineer endüktans eğrileri

Eğer $\beta_s > \epsilon$ seçilirse, $\theta_2 > \theta_{1a}$ olarak elde edilir ve bu durumda a fazı endüktansı maksimum değerine ulaşmadan önce b fazı artan endüktans bölgesine geçer. Bu durumda rotorun her bir konumu için bir faza ait endüktans eğrisi mutlaka artış bölgesindedir ve makinanın yol alamayacağı herhangi bir konum söz konusu değildir. Oysa $\beta_s < \epsilon$ seçilirse, $\theta_2 < \theta_{1a}$ olur ve bu durumda b fazı artan endüktans bölgesine, a fazı maksimum endüktans değerine ulaştıktan sonra geçer. Bu da makinanın yol alamayacağı konumların oluşmasına neden olur. Bu nedenle stator kutbu genişliği mutlaka adım açısından büyük olmalıdır.

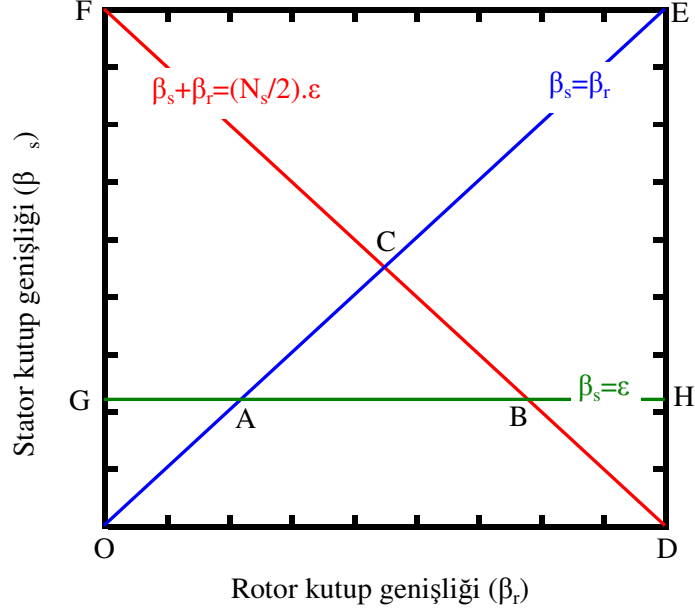
- Birbirini takip eden rotor kutupları arasındaki açı değeri mutlaka stator kutup genişliğinden büyük olmalıdır. Aksi takdirde rotor ve stator kutuplarının tamamen ayrık olması gibi bir durum söz konusu olmayacaktır. Bu koşul,

$$\frac{2\pi}{N_r} - \beta_r > \beta_s \quad (4.7)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Yukarıda açıklanan üç koşul göz önünde tutularak Şekil 4.2’de verilen olasılık üçgeni çizilebilir. Burada OE doğru parçasının altında kalan bölge birinci koşulu, GH

doğru parçasının üzerinde kalan bölge ikinci koşulu ve DF doğru parçasının altında kalan bölge üçüncü koşulu temsil eder. Ortaya çıkan üçgen, makinanın stator ve rotor kutupları için uygulanabilecek kutup genişliklerinin sınırlarını gösterir [31].



Şekil 4.2: Stator ve rotor kutup genişlikleri için olasılık üçgeni

4.2.4 Diğer geometrik boyutların belirlenmesi

Dış çapı, rotor ve stator kutup sayıları ve kutup genişlikleri gibi temel parametreleri belirlenmiş olan bir A.R.M. için diğer boyutların hesabı şu şekilde yapılır.

Stator kutup alanı,

$$A_s = \frac{D}{2} \cdot \beta_s \cdot l_d \quad (4.8)$$

ve buradan yola çıkılarak stator kutbunda üretilen akı,

$$\phi_s = B_s \cdot A_s \quad (4.9)$$

olarak hesaplanır.

Makinanın stator ve rotorunda kullanılacak olan manyetik malzemenin BH eğrisi ve özellikle bu malzemenin doyma bölgesinin başlangıcını gösteren ve eğrinin dirsek noktasına karşılık gelen akı yoğunluğu değeri, makina tasarımı sırasında göz önünde tutulması gereken önemli bir değerdir. A.R.M.'de maksimum akı yoğunluğu (B_{max}) değeri stator kutuplarında gözlenir. Bu nedenle motor tasarımı yapılırken, rotor ve stator kutuplarının tamamen çakışık olduğu konumda stator kutbundaki akı yoğunluğunun, BH eğrisinin dirsek noktasındaki akı yoğunluğu değerini aşmamasına dikkat edilmesi gerekir.

Stator kutbu yüksekliği ise;

$$h_s = \frac{D_0}{2} - C - \frac{D}{2} \quad (4.10)$$

şeklinde hesaplanır.

Stator boyunduruğu bir kutup çifti eksenine göre simetrik iki kısımdan oluşmaktadır. Bu simetrik kısımların her biri, bir stator kutbunun taşıdığı akının yarısını taşır. Bu nedenle stator boyunduruğu akısı;

$$\phi_y = \frac{\phi_s}{2} = \frac{B_s \cdot A_s}{2} \quad (4.11)$$

olarak yazılabilir. Kaçak akılar ihmal edilerek boyunduruk akı yoğunluğu stator kutbu akı yoğunluğuna eşit alınırsa, boyunduruk kesit alanı;

$$A_y = \frac{A_s}{2} \quad (4.12)$$

ve stator boyunduruk kalınlığı;

$$C = \frac{A_y}{l_d} \quad (4.13)$$

olarak elde edilir.

Rotor ve stator kutuplarının çakışık konumları göz önünde tutulduğunda, rotor çekirdeği de stator boyunduruğu gibi bir faz sargısını taşıyan kutup çifti eksenine göre iki simetrik kısımdan oluşur. Bu simetrik kısımların her biri, bir kutup çiftinde üretilen akının yarısını taşır. Rotor çekirdeği için akı yoğunluğu, maksimum değerinin %80'i ile sınırlanmaktadır. Bu sayede makinada ortaya çıkan gürültünün azaltılması sağlanır [78].

Kaçak akı ve yığılma faktörleri ihmal edilirse, rotor kutup akısı,

$$\phi_r = \phi_s \quad (4.14)$$

olarak alınabilir.

Rotor çekirdeği akısı,

$$\phi_{rc} = \frac{\phi_s}{2} = \frac{B_s \cdot A_s}{2} \quad (4.15)$$

ve rotor çekirdeği akı yoğunluğu,

$$B_{rc} = 0,80 \cdot B_s \quad (4.16)$$

şeklinde yazılır. Bu iki denklemden yola çıkılarak rotor çekirdeği alanı,

$$A_{rc} = \frac{A_s}{1,6} \quad (4.17)$$

olarak elde edilir. Rotor kutup yüksekliği ise,

$$h_r = \frac{D}{2} - g - \frac{D_{mil}}{2} - \frac{A_{rc}}{l_d} \quad (4.18)$$

olarak yazılır. Rotor kutup alanı ise,

$$A_r = \left(\frac{D}{2} - g \right) \cdot \beta_r \cdot l_d \quad (4.19)$$

şeklinde hesaplanır. Buradan, rotor kutup akı yoğunluğu;

$$B_r = \frac{\phi_r}{A_r} \quad (4.20)$$

olarak bulunur. Makinanın farklı kısımları için ortalama akı yolu uzunlukları;

$$l_s = h_s + \frac{C}{2} \quad (4.21)$$

$$l_g = g \quad (4.22)$$

$$l_y = \pi \cdot \left(\frac{D_0}{2} - \frac{C}{2} \right) \quad (4.23)$$

$$l_r = h_r + \frac{\frac{D}{2} - g - h_r - \frac{D_{mil}}{2}}{2} = \frac{D}{4} - \frac{g}{2} + \frac{h_r}{2} - \frac{D_{mil}}{4} \quad (4.24)$$

$$l_{rc} = \pi \cdot \left[\frac{\frac{D}{2} - g - h_r - \frac{D_{mil}}{2}}{2} + \frac{D_{mil}}{2} \right] = \pi \cdot \left(\frac{D}{4} - \frac{g}{2} - \frac{h_r}{2} + \frac{D_{mil}}{4} \right) \quad (4.25)$$

şeklinde yazılır. Bu eşitliklerde kullanılan uzunluklar Şekil 4.3 üzerinde gösterilmektedir.

Rotor ve stator da kullanılan manyetik malzemenin BH eğrisi yardımıyla, makinanın hava aralığı dışında kalan tüm kısımları için manyetik alan şiddetleri elde edilebilir. Rotor kutbu, rotor boyunduruğu, stator kutbu ve stator çekirdeği için manyetik alan şiddetleri sırası ile H_r , H_y , H_s ve H_{sc} ile simgelenmektedir.

Hava aralığı alanı ortalama olarak;

$$A_g = \frac{A_s + A_r}{2} \quad (4.26)$$

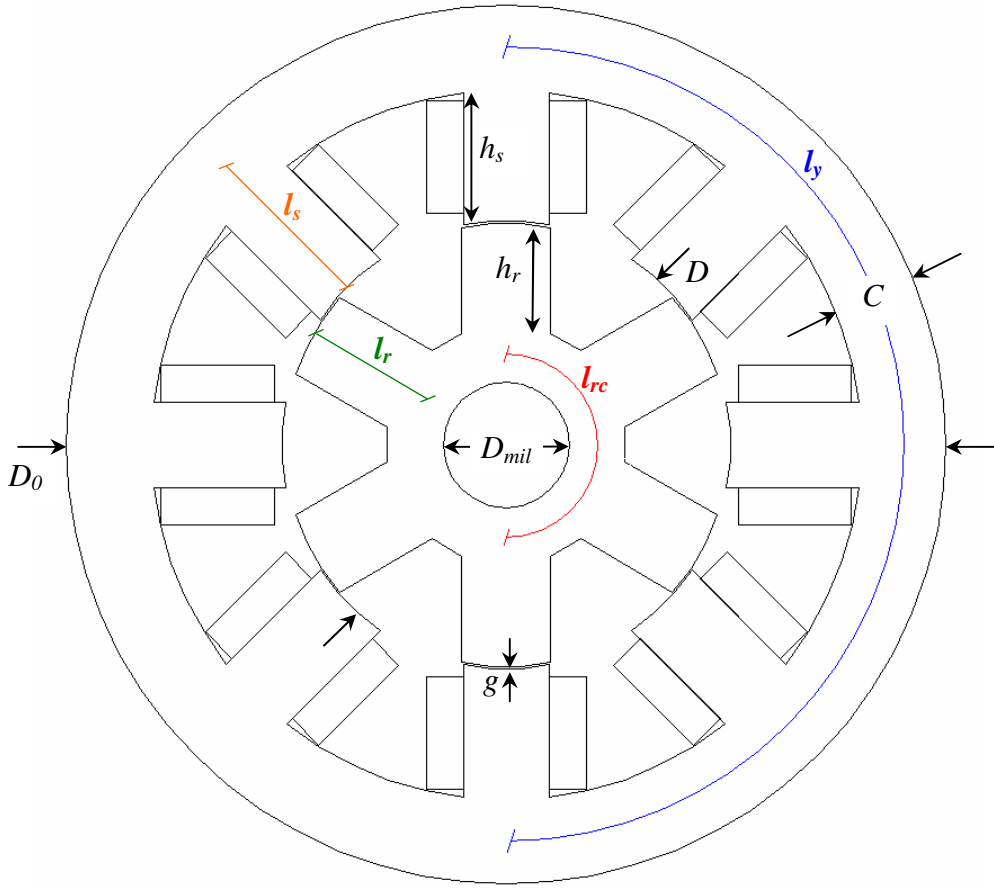
ve hava aralığı akı yoğunluğu, kaçak akı ve yığılma faktörleri ihmal edildiğinde;

$$B_g = \frac{\phi_s}{A_g} = \frac{A_s \cdot B_s}{A_g} \quad (4.27)$$

şeklinde yazılabilir. Hava aralığı manyetik alan şiddeti ise;

$$H_g = \frac{B_g}{4\pi \cdot 10^{-7}} \quad (4.28)$$

olarak yazılır.



Şekil 4.3: Geleneksel yapıdaki A.R.M.'nin kesit görünüşü

4.2.5 Sargı yapısının belirlenmesi

Makinanın tam yüklü çalışması durumunda ihtiyacı olan amper-sarım değeri (F), makinanın farklı kısımları için hesaplanan manyetik alan şiddetleri ve ortalama uzunluklardan faydalanılarak elde edilmektedir.

A.R.M.'nin tam eşdeğer devresi yardımıyla, toplam amper-sarım eşitliği;

$$F = N.i = 2.(H_r.l_r + H_g.l_g + H_s.l_s) + \frac{H_{rc}.l_{rc}}{2} + \frac{H_y.l_y}{2} \quad (4.29)$$

şeklinde yazılır. Bu değer yardımıyla, nominal akım değeri kullanılarak, bir faz sargısı için sarım sayısı;

$$N = \frac{F}{i} \quad (4.30)$$

olarak hesaplanabilir. Motorun her bir faz sargısı, her biri $N/2$ sarım sayısına sahip iki ayrı bobin halinde oluşturularak statorun karşılıklı çıkık kutupları üzerine seri bağlı olarak yerleştirilir.

4.2.6 Motorun manyetik eşdeğer devresinin oluşturulması

Makinanın herhangi bir kısmı için relüktans değeri;

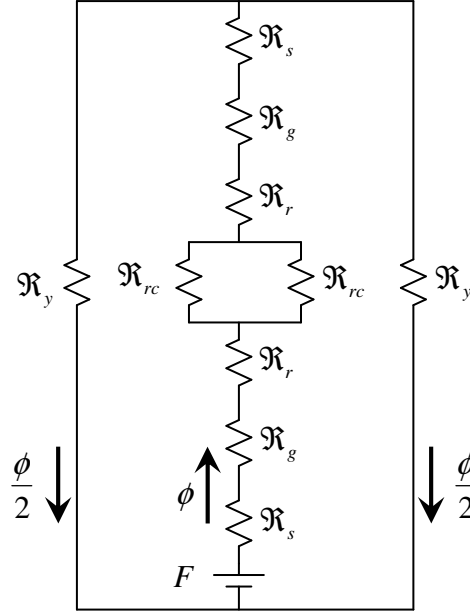
$$\mathfrak{R} = \frac{H.l}{B.A} = \frac{H.l}{\phi} \quad (4.31)$$

eşitliği yardımıyla hesaplanabilir. Hava aralığı relüktansı ise;

$$\mathfrak{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0.A_g} \quad (4.32)$$

olarak yazılır.

Stator kutbu, stator boyunduruğu, rotor kutbu, rotor çekirdeği ve hava aralığı relüktansları sırasıyla \mathfrak{R}_s , \mathfrak{R}_y , \mathfrak{R}_r , \mathfrak{R}_{rc} ve \mathfrak{R}_g ile gösterilmektedir. Bunlar yardımıyla, A.R.M.'nin manyetik eşdeğer devresi Şekil 4.4'teki gibi elde edilebilir.

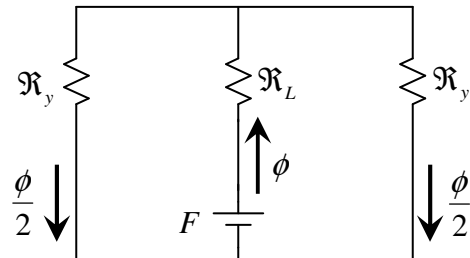


Şekil 4.4: A.R.M.'nin tam manyetik eşdeğer devresi

Motorun tam manyetik eşdeğer devresinin orta bacağındaki elemanlar birleştirilerek eşdeğer devre Şekil 4.5'teki gibi basitleştirilebilir. Burada;

$$\mathfrak{R}_L = 2.(\mathfrak{R}_s + \mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_r) + \frac{\mathfrak{R}_{rc}}{2} \quad (4.33)$$

olarak yazılmaktadır.



Şekil 4.5: A.R.M.'nin basitleştirilmiş manyetik eşdeğer devresi

4.3 D.R.A.R.M.'nin Analitik Tasarımı

Bu bölümde, bir elektrikli taşıtın tekerlek tahriğini sağlamak amacıyla kullanılacak olan D.R.A.R.M.'nin tasarımı, Bölüm 4.2'deki açıklamalar temel alınarak gerçekleştirilmektedir. Tasarlanacak olan motor geleneksel yapının aksine dış rotorlu olduğundan, hesaplamalarda bazı notasyon farklılıkları oluşmaktadır.

Tasarlanan motorun, taşıtın her bir tekerleğinin içine yerleştirilmesi öngörülmektedir. Bu nedenle dış rotorlu olarak tasarlanan A.R.M.'nin boyutlarının belirlenmesinde I.E.C. standartları yerine, motorun içine yerleştirileceği jantın iç çapı ve derinliği, motorun dış çapı ve derinliği için sınırlayıcı ölçüler olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.6: Golf taşıtında kullanılan jant ve tekerlek

Tasarlanacak olan motorun kullanılacağı taşıt tipi olarak, elektrik tahriğinin en basit ve yaygın şekilde kullanıldığı taşıt örneklerinden biri olan golf taşıtı seçilmiştir. Şekil 4.6'da bu tip taşıtlarda kullanılan tekerlek jantının ve taşıt lastiğinin resimleri verilmektedir. Katalog bilgisi olarak böyle bir jantın çapının 8 inch (=203,2mm), derinliğinin ise 7 inch (=178mm) olduğu verilmektedir. Tasarlanan motorun dış rotor dış çapı ve derinliği bu ölçüleri aşmamalıdır. Bu boyutlardaki jant ile birlikte kullanılacak lastiğin çapı ise 18 inch (=457,2mm) olarak verilmektedir.

Açıklanan bu kullanım amacına yönelik olarak tasarlanacak D.R.A.R.M.'ye ait temel parametreler;

$$P_{out(hp)} = 3hp$$

$$n = 1100rpm$$

$$i = 25A$$

olarak belirlenmiştir. Makinada üretilecek moment, denklem 4.1 yardımıyla;

$$T_e = \frac{P_{out(hp)} \cdot 745,6}{2\pi \cdot \left(\frac{n}{60}\right)} = \frac{3.745,6}{2\pi \cdot \left(\frac{1100}{60}\right)} = 19,42Nm. \quad (4.34)$$

olarak hesaplanmaktadır. Bu değer, taşıtın kullanım amacı göz önüne alındığında yeterli görülmektedir. Dış rotor dış çapı, jantın boyutları dikkate alınarak ve motorun jantın içine yerleştirilmesi ve sabitlenmesi için bir miktar tolerans boşluğu bırakılarak;

$$D_0 = 196mm$$

ve motor derinliği ise;

$$l_d = 100mm$$

olarak belirlenmektedir.

Geleneksel yapıdaki iç rotorlu elektrik motorlarında mil, enerji iletimi görevini döndürme momenti yardımıyla görmektedir. Burulma olarak da ifade edilebilen döndürme momentinden başka motor mili, eğilme momenti ve merkezkaç kuvvetler ile de zorlanırlar. Bu nedenle iç rotorlu motorlarda mil çapı belirlenirken, tüm bu noktaların dikkate alınması gerekir. Dış rotorlu yapıda ise motor mili sabittir. Dolayısıyla bu yapıda motor mili sadece eğilmeye zorlanmaktadır [79].

Burada mil çapı,

$$D_{mil} = 28mm$$

olarak alınmıştır.

Makinada moment dalgalılığının daha az olması nedeniyle tasarlanacak makinanın 6/8 kutuplu yapıda olması planlanmaktadır. Geleneksel A.R.M. tasarımlarında bu ifade motorun dört fazlı ve statorun sekiz, rotorun ise altı kutuplu olduğunu ifade eder. D.R.A.R.M.'de ise sargıları iç kısımdaki statorun taşıyacak olması sebebiyle, sargıların yerleştirilebileceği hacim daha küçüktür. Bu hacmi daha etkin biçimde kullanabilmek amacıyla, makinanın iç statorunun altı, dış rotorunun sekiz kutuplu olmasına karar verilmiştir. Bu durumda motorda dört yerine üç faz sargısı bulunacaktır. Motorun güç devresindeki güç elektroniği elemanlarının sayısının, motorun faz sayısı ile orantılı olarak değiştiği düşünülürse, gerçekleştirilen bu yeni tasarımla, üç fazlı A.R.M.'nin avantajı olan daha az sayıdaki güç anahtarlama elemanı ile, dört fazlı A.R.M.'nin avantajı olan düşük moment dalgalılığı özelliklerinin aynı motorda toplandığı görülmektedir.

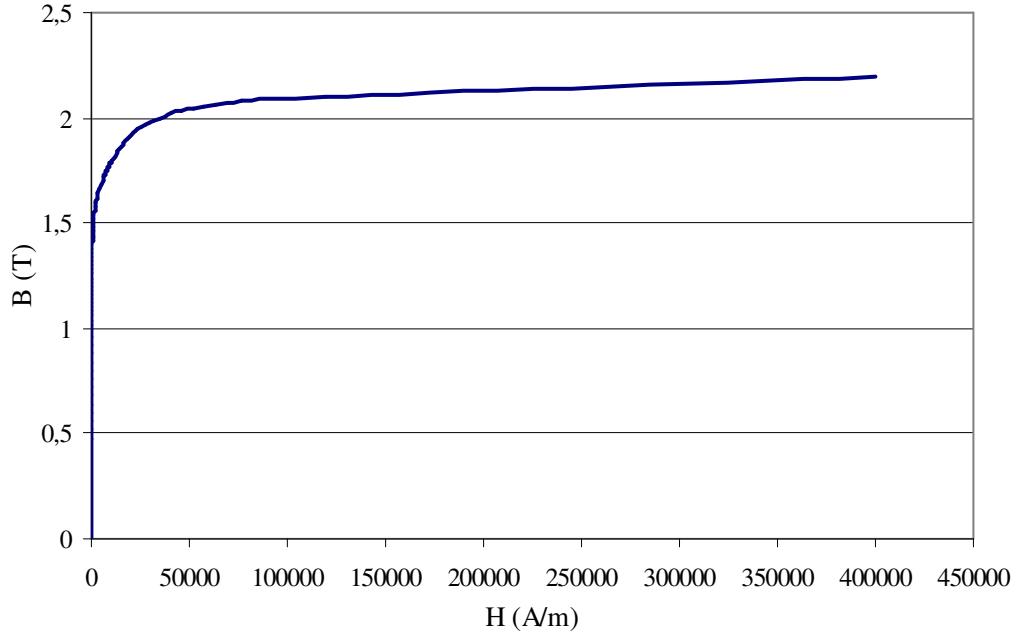
6/8 yapıdaki D.R.A.R.M. için adım açısı;

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{\frac{N_s}{2} \cdot N_r} = \frac{2\pi}{\frac{6}{2} \cdot 8} = 15^\circ \quad (4.35)$$

olarak hesaplanır.

Stator ve rotor kutup genişlikleri belirlenirken göz önünde tutulması gereken kriterler önceki bölümde verilmektedir. Olasılık üçgeni göz önüne alındığında, makinanın stator ve rotor kutup genişlikleri için birden fazla alternatif olduğu görülmektedir. Bu uygulamada stator ve rotor kutup genişliklerinin, $\beta_s=21^\circ$ ve $\beta_r=22^\circ$ olarak alınması kararlaştırılmıştır.

Makinanın stator ve rotorunda kullanılacak olan M19 çeliğinin BH eğrisi incelendiğinde, eğrinin lineer bölgesiyle doyma bölgesini ayıran “dirsek” noktasındaki manyetik alan şiddetinin 1,8T civarında olduğu görülmektedir. Bu değer makinada izin verilebilecek sınır değeri oluşturmaktadır ve B_{max} olarak tanımlanır.



Şekil 4.7: M19 çeliğine ait BH eğrisi

Stator kutbu akı yoğunluğu, B_{\max} değerine eşit alınarak tasarım hesaplarına devam edilmektedir. Kaçak akı ve yığılma faktörleri ihmal edilerek, iç stator kutup alanı;

$$A_s = \left(\frac{D}{2} - g \right) \cdot \beta_s \cdot I_d = \left(\frac{130}{2} - 0,5 \right) \cdot \frac{21\pi}{180} \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 2,364 \cdot 10^{-3} m^2 \quad (4.36)$$

ve buradan iç stator kutbunda üretilen akı;

$$\phi_s = B_s \cdot A_s = 1,8 \cdot 2,364 \cdot 10^{-3} = 4,255 mWb \quad (4.37)$$

olarak hesaplanır.

İç stator çekirdeği akısı;

$$\phi_{sc} = \frac{\phi_s}{2} = \frac{B_s \cdot A_s}{2} = \frac{4,255 \cdot 10^{-3}}{2} = 2,128 mWb \quad (4.38)$$

ve iç stator çekirdeği akı yoğunluğu,

$$B_{sc} = 0,80 \cdot B_s = 0,80 \cdot 1,8 = 1,44 T \quad (4.39)$$

şeklinde yazılır. Bu iki denklemden yola çıkılarak da, iç stator çekirdeği alanı,

$$A_{sc} = \frac{A_s}{1,6} = \frac{2,364 \cdot 10^{-3}}{1,6} = 1,478 \cdot 10^{-3} m^2 \quad (4.40)$$

olarak elde edilir. İç stator kutup yüksekliği ise;

$$h_s = \left(\frac{D}{2} - g - \frac{D_{mil}}{2} \right) - \frac{A_{sc}}{l_d} = \left(\frac{130}{2} - 0,5 - \frac{28}{2} \right) - \frac{1,478 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-3}} = 35,7 mm \quad (4.41)$$

olarak yazılır.

Kaçak akı ve yığılma faktörleri ihmal edilirse, rotor kutup akısı,

$$\phi_r = \phi_s = 4,255 mWb \quad (4.42)$$

olarak alınabilir. Dış rotor kutup alanı ise,

$$A_r = \frac{D}{2} \cdot \beta_r \cdot l_d = \frac{130}{2} \cdot \frac{22\pi}{180} \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 2,496 \cdot 10^{-3} m^2 \quad (4.43)$$

şeklinde hesaplanır. Bu iki denklemden, rotor kutup akı yoğunluğu,

$$B_r = \frac{\phi_r}{A_r} = \frac{4,255 \cdot 10^{-3}}{2,496 \cdot 10^{-3}} = 1,7 T \quad (4.44)$$

olarak bulunur. Hava aralığı alanı ortalama olarak,

$$A_g = \frac{A_s + A_r}{2} = \frac{2,364 \cdot 10^{-3} + 2,496 \cdot 10^{-3}}{2} = 2,43 \cdot 10^{-3} m^2 \quad (4.45)$$

ve hava aralığı akı yoğunluğu, kaçak akı ve yığılma faktörleri ihmal edildiğinden;

$$B_g = \frac{\phi_s}{A_g} = \frac{4,255 \cdot 10^{-3}}{2,43 \cdot 10^{-3}} = 1,751 T \quad (4.46)$$

şeklinde hesaplanır.

Dış rotor boyunduruğu akısı,

$$\phi_y = \frac{\phi_r}{2} = \frac{B_s \cdot A_s}{2} = \frac{4,255 \cdot 10^{-3}}{2} = 2,127 \text{ mWb} \quad (4.47)$$

ve dış rotor boyunduruğu akı yoğunluğu, stator çekirdeği akı yoğunluğuna eşit olarak hesaplanırsa,

$$A_y = A_{sc} = 1,478 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (4.48)$$

ve dış rotor boyunduruk kalınlığı,

$$C = \frac{A_y}{l_d} = \frac{1,478 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-3}} = 14,78 \text{ mm} \quad (4.49)$$

olarak elde edilir. Dış rotor kutbu yüksekliği ise,

$$h_r = \frac{D_0}{2} - C - \frac{D}{2} = \frac{196}{2} - 14,78 - \frac{130}{2} = 18,22 \text{ mm} \quad (4.50)$$

şeklinde hesaplanır.

Makinanın farklı kısımları için ortalama uzunluklar,

$$l_r = h_r + \frac{C}{2} = 18,22 + \frac{14,78}{2} = 25,61 \text{ mm} \quad (4.51)$$

$$l_g = g = 0,5 \text{ mm} \quad (4.52)$$

$$l_y = \pi \cdot \left(\frac{D_0}{2} - \frac{C}{2} \right) = \pi \cdot \left(\frac{196}{2} - \frac{14,78}{2} \right) = 284,66 \text{ mm} \quad (4.53)$$

$$l_s = h_s + \frac{\frac{D}{2} - g - h_s - \frac{D_{mil}}{2}}{2} = \frac{130}{4} - \frac{0,5}{2} + \frac{35,7}{2} - \frac{28}{4} = 43,1 \text{ mm} \quad (4.54)$$

$$l_{sc} = \pi \cdot \left(\frac{D}{4} - \frac{g}{2} - \frac{h_s}{2} + \frac{D_{mil}}{4} \right) = \pi \cdot \left(\frac{130}{4} - \frac{0,5}{2} - \frac{35,7}{2} + \frac{28}{4} \right) = 67,23 \text{ mm} \quad (4.55)$$

şeklinde yazılır.

Makinanın farklı kısımları için hesaplanan akı yoğunlukları için, manyetik malzemenin BH eğrisinden faydalanılarak stator çekirdeği, stator kutbu, rotor kutbu ve rotor boyunduruğu için manyetik alan şiddetleri sırasıyla,

$$H_{sc} = 1002 \text{ A/m}$$

$$H_s = 11144 \text{ A/m}$$

$$H_r = 6800 \text{ A/m}$$

$$H_y = 1002 \text{ A/m}$$

olarak hesaplanır.

Hava aralığı akı yoğunluğu;

$$B_g = \frac{A_s \cdot B_s}{A_g} = \frac{4,255 \cdot 10^{-3}}{2,43 \cdot 10^{-3}} = 1,751T \quad (4.56)$$

ve hava aralığı manyetik alan şiddeti;

$$H_g = \frac{B_g}{4\pi \cdot 10^{-7}} = \frac{1,751}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 1393400 \text{ As/m} \quad (4.57)$$

olarak hesaplanır.

Şekil 4.4'te verilmekte olan, A.R.M.'nin tam eşdeğer manyetik devresi yardımıyla, toplam amper sarım değeri;

$$\begin{aligned} F = N \cdot i &= 2 \cdot (H_r \cdot l_r + H_g \cdot l_g + H_s \cdot l_s) + \frac{H_{sc} \cdot l_{sc}}{2} + \frac{H_y \cdot l_y}{2} \quad (4.58) \\ &= 2 \cdot (6800 \cdot 0,0256 + 1393400 \cdot 0,0005 + 11144 \cdot 0,0431) + \left(\frac{1002 \cdot 0,06723}{2} \right) + \left(\frac{1002 \cdot 0,28463}{2} \right) \\ &= 2878 \text{ As.} \end{aligned}$$

olarak hesaplanır.

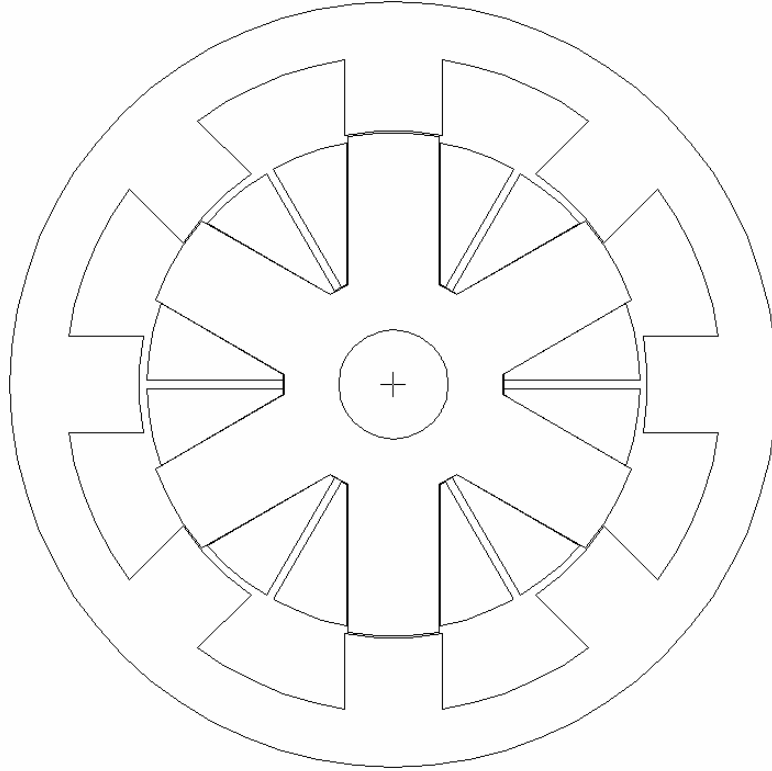
Faz akımının nominal değeri, tasarım sürecinin başında

$$i = 25A \quad (4.59)$$

olarak belirlendiğinden dolayı, hesaplanan toplam amper sarım değerinin yardımıyla bir faz sargısının sarım sayısı;

$$N = \frac{F}{i} = \frac{2878}{25} \cong 120 \text{ sarım} \quad (4.60)$$

olarak elde edilir.



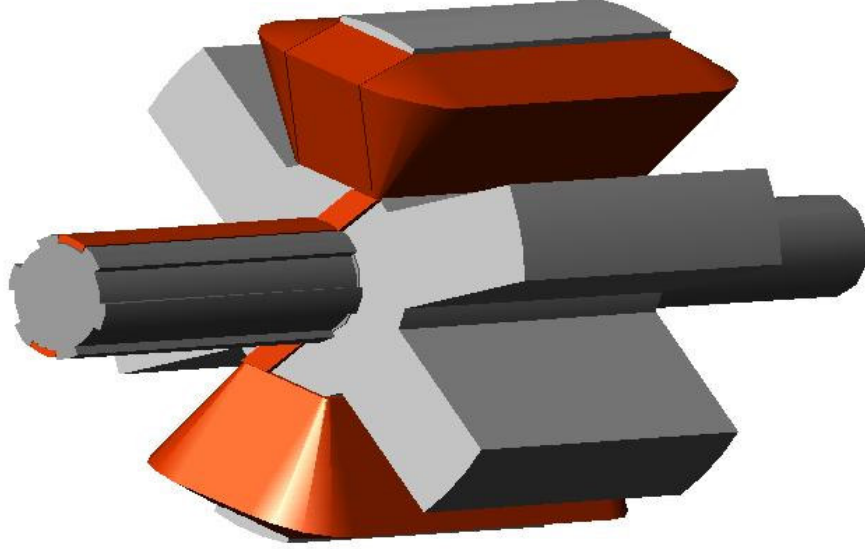
Şekil 4.8: D.R.A.R.M.'nin kesit görünümü

Sargı iletkeninin akım yoğunluğu $J=6A/mm^2$ olarak öngörülmektedir. Buna göre, bir faz sargısının $1,167mm^2$ 'lik iletken kullanılarak sarılan dört paralel koldan oluşacağı hesaplanmaktadır. İletken çapı, üzerindeki izolasyon tabakasıyla birlikte,

$$d = \sqrt{\frac{4.a}{\pi}} + 0,1 = \sqrt{\frac{4.1,167}{\pi}} + 0,1 = 1,319mm. \quad (4.61)$$

olarak hesaplanmaktadır.

D.R.A.R.M.'nin bir faz sargısı, statorun karşılıklı kutupları üzerine sarılmış eşit sarım sayısına sahip iki bobin seri bağlanarak oluşturulmaktadır. Buna göre, motorun bir faz sargısının bilgisayar ortamında elde edilen üç boyutlu görünümü Şekil 4.9'daki gibi olacaktır.



Şekil 4.9: Bir faz sargısının üç boyutlu görünüşü

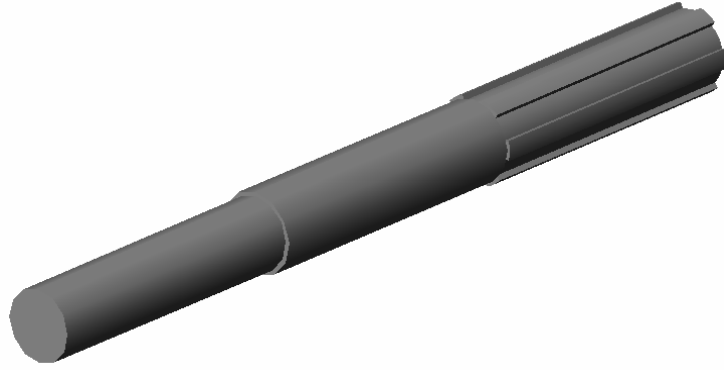
4.4 Diğer Parçaların Boyutlandırılması

4.4.1 Motor mili

Motor mili, tasarım aşamasında boyutları ve özellikleri dikkatle belirlenmesi gereken önemli parçalardan biridir. İç rotorlu elektrik motorlarında mil, döndürme momenti yardımıyla enerji iletimi görevini görürken aynı zamanda eğilme momenti ve merkezkaç kuvvetler ile de zorlanırlar. Dış rotorlu yapıda ise motor mili sadece eğilmeye zorlanmaktadır. Burada mili eğilmeye zorlayan kuvvet aracın ağırlığıdır.

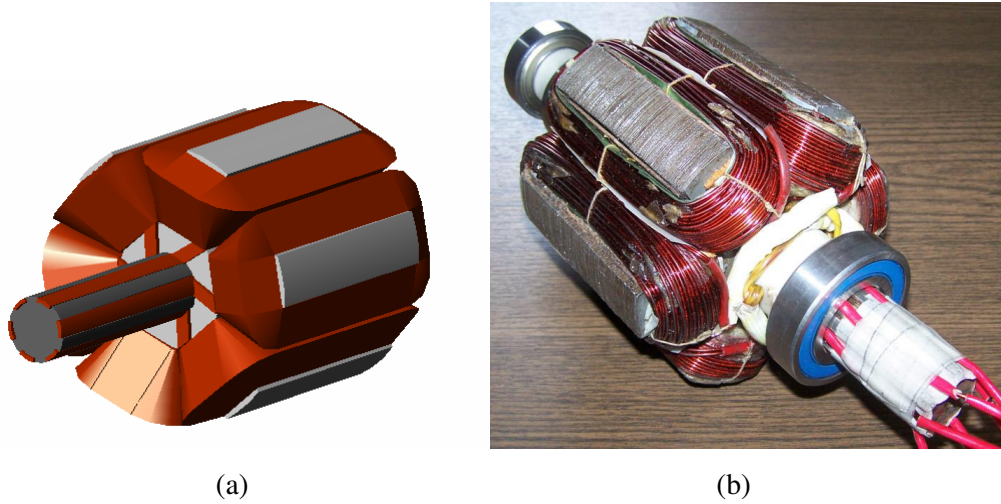
Tasarlanan D.R.A.R.M.'nin mili dönme hareketi yapmamaktadır ve iç stator ile üzerine sarılı faz sargılarını taşır. Faz sargılarının uçlarını motorun dışına taşıyabilmek amacıyla milin bir tarafına, faz iletkenlerinin ve iletkenleri koruyan izolasyon katmanlarının rahatça sığabileceği genişlik ve derinlikte oluklar açılmaktadır. Üstlendiği görev bakımından motor milinin dayanıklı malzemeden imal

edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada motor mili, paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiştir. Şekil 4.10'da tasarlanan motor milinin üç boyutlu görünümü verilmektedir.



Şekil 4.10: Motor mili

Şekil 4.11'de ise iç statoru oluşturan sac malzeme ve motorun faz sargıları yerleştirildiği halde motorun sabit kısmının üç boyutlu görünüşü verilmektedir. Faz sargılarının bağlantı uçlarının, mil üzerine açılan oluklara ne şekilde yerleştirilerek motorun dışına çıkarıldığı bu şekil yardımıyla daha açık şekilde görülmektedir.

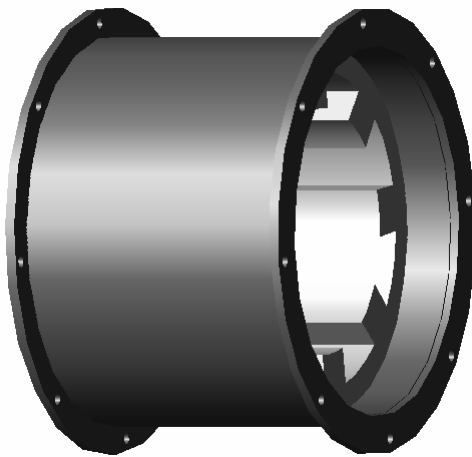


Şekil 4.11: İç statorun (a) bilgisayar ortamında elde edilen üç boyutlu görünümü, (b) imal edilen görünümü,

4.4.2 Dış gövde ve yan kapaklar

Tasarlanan motor, bir elektrikli taşıtın tekerlek tahriğini sağlamak amacıyla yönelik olarak tasarlanan bir dış rotorlu anahtarlı relüktans motorudur. Bu motor uygulamada taşıt tekerleğinde jantın içine yerleştirilerek kullanılacaktır. Dolayısıyla uygulamada dış gövde ve yan kapak, tekerlek jantının kendisidir. Deneysel çalışmada ise, dış rotorun dönme hareketiyle ürettiği momenti yüke aktarmak amacıyla dış gövde ve yan kapak tasarımı gerçekleştirilmektedir.

Dış rotor, sıkı şekilde dış gövdenin içine geçirilmektedir. Bu sayede dış rotor ile dış gövde arasında oluşacak herhangi bir kaymanın önüne geçilmektedir. Yan kapaklarla bağlantısının sağlanması için dış gövdenin yan kenarlar çıkıntılı şekilde tasarlanmış ve yan kenarlar üzerine çevre boyunca sekiz adet bağlantı deliği açılmıştır. Yan kapaklar ise kurulan deney düzeneğinde, motorda üretilen gücün yüke aktarımında önemli rol üstlenmektedir. Yan kapaklar rulmanlar yardımıyla mil üzerine yerleştirilirken, çevresel olarak açılan bağlantı delikleri yardımıyla dış gövdeye sabitlenirler. Ayrıca, motorun çalışması sırasında faz sargılarında oluşan ısının dışarıya atılmasına yardımcı olması için, yan kapaklar üzerine soğutma delikleri açılmıştır.

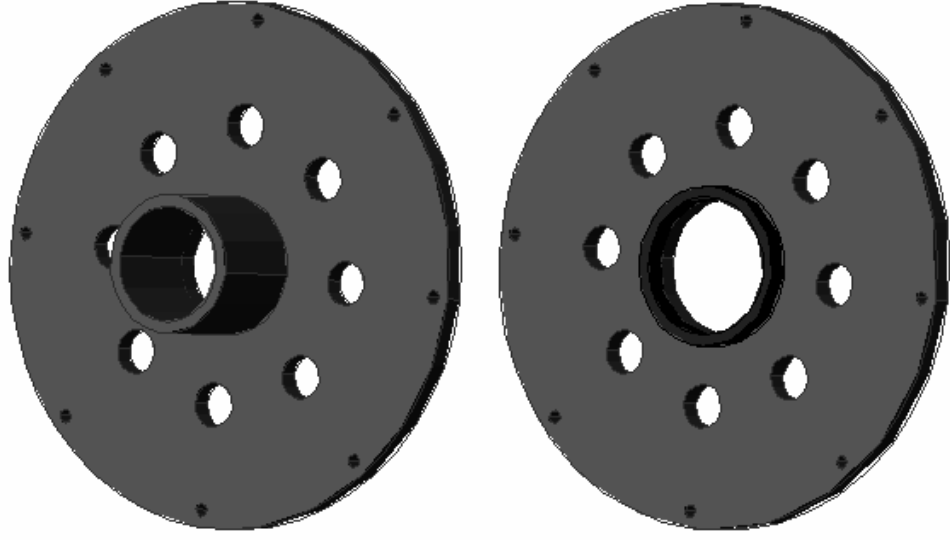


(a)



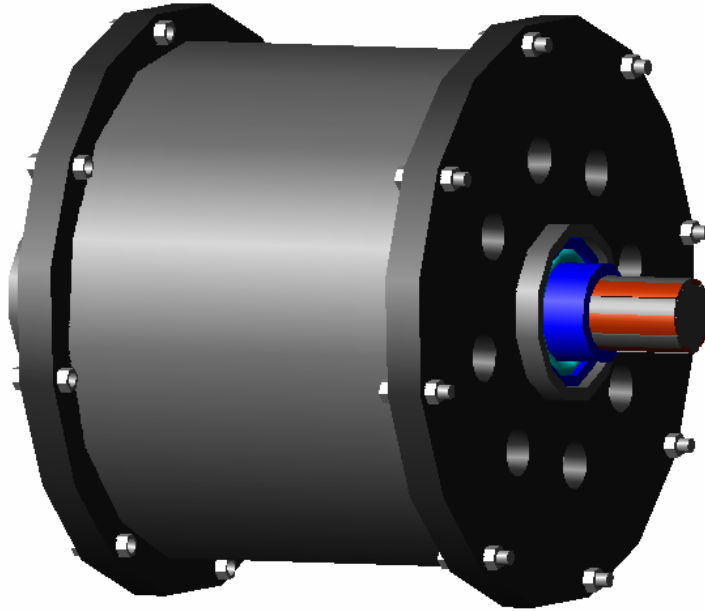
(b)

Şekil 4.12: Dış gövdenin (a) bilgisayar ortamında elde edilen üç boyutlu görünümü, (b) dış rotor yerleştirilmiş durumdaki imal edilen görünümü

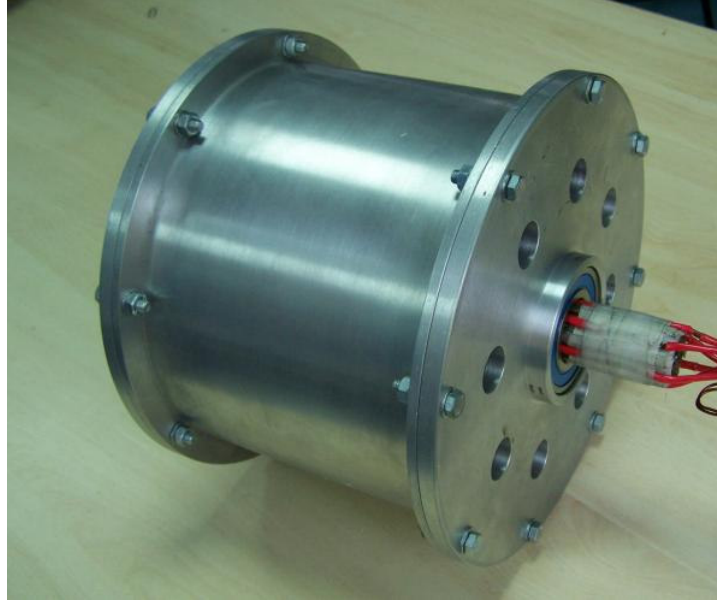


Şekil 4.13: Yan kapaklar

Motorun dönüşü sırasında oluşan hava sirkülasyonu motorun soğutulmasına yardımcı olacaktır. Şekil 4.14’te tasarlanan motorun bilgisayar ortamında elde edilen üç boyutlu görünümü, Şekil 4.15’te ise imal edilen motorun fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 4.14: Tasarlanan D.R.A.R.M.’nin üç boyutlu görünüşü



Şekil 4.15: İmal edilen D.R.A.R.M.'nin görünüşü

4.5 Motorun Isınma Analizi

Tasarlanan D.R.A.R.M.'nin faz sargıları, makinanın iç stator kutupları üzerinde bulunmaktadır. Motorun çalışması esnasında bu sargılar, üzerlerinden akan akım nedeniyle ısı kaynağı olarak davranmaktadırlar.

A.R.M.'de faz sargıları basit yapılu sargılar olup, doğru akım makinalarındaki uyarma sargılarına benzetilmektedir. Literatürde, uyarma sargılarındaki ısı verme katsayısı, endüvisinde vantilatör bulunmayan ve doğal olarak soğuyan doğru akım motorları için;

$$h = (11,0...16,5) \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) \quad (4.62)$$

endüvisinde vantilatör bulunan doğru akım motorları için ise,

$$h = (12,5...15,0) [1 + (0,06...0,07) \cdot v] \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) \quad (4.63)$$

olarak yazılmaktadır. Burada v , m/s cinsinden vantilatörün çevre hızıdır. Benzer şekilde ısı verme katsayısı, endüviler için, küçük endüvilerde;

$$h = (18...24) \left[1 + 0,1 \cdot \vartheta \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) \right] \quad (4.64)$$

büyük endüvilerde ise,

$$h = (22...28) \left[1 + 0,1 \cdot \vartheta \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) \right] \quad (4.65)$$

olarak ifade edilir.

Doğru akım motorlarında hava aralığı birkaç milimetredir. Burada endüvinin aktif yüzeyi, kendisini çevreleyen hava içerisindeki hareketi sonucunda hava tarafından soğutulmaktadır. Bu nedenle ısı verme katsayısı, motorun sabit kısmındaki uyarma sargılarına göre daha yüksektir.

Tablo 4.2’de, elektrik makinalarında kullanılan izolasyon sınıfları ve bu sınıflar için izin verilen maksimum sıcaklık değerleri verilmektedir.

Tablo 4.2: Motor izolasyon sınıfları

İzolasyon sınıfı	A	E	B	F	H	C
İzin verilen maksimum sıcaklık (°C)	105	120	130	155	180	225

Tasarlanan D.R.A.R.M.’de sargılar sabit kısım olan iç stator üzerinde sarıdır. Hareketli kısım olan dış rotorun ise, hava aralığının da çok küçük olmasının yardımıyla, bir vantilatör gibi davranıp vakum etkisi yaratacağı ve ısıyı hava akımı ile sargılardan uzaklaştıracağı düşünülmektedir. Bu amaçla, motor gövdesinde yan kapaklar üzerine havalandırma delikleri açılmıştır. Bu nedenle, ısınma hesabı yapılırken ısı verme katsayısı olarak, endüvisi küçük olan doğru akım motorlarındaki katsayı değerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

Bölüm 4.3’te, motorun dış rotorunun iç çapı 65mm olarak belirlenmiştir. Makinanın nominal hızının 1100d/dk olduğu düşünüldüğünde, dış rotorun çevre hızı;

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,13 \cdot 1100}{60} = 7,5 \text{ m/s} \quad (4.66)$$

olarak elde edilmektedir. Buradan yola çıkılarak motorun ısı verme katsayısı;

$$h = 20 \cdot [1 + 0,1 \cdot 7,5] = 35 \quad (4.67)$$

olarak bulunur. Motorun tam yüklü çalışması durumunda bir faz sargısında oluşacak bakır kaybı;

$$P_{cu} = I^2 \cdot R = 25^2 \cdot 0,123 = 76,875 \text{ W} \quad (4.68)$$

bir faz sargısının havayla temas eden yüzey alanı ise;

$$A = 4 \cdot [(0,0375 + 0,02) \cdot 0,1] = 0,023 \text{ m}^2 \quad (4.69)$$

olarak hesaplanmaktadır. Buradan, motorun tam yüklü olarak çalışması durumunda faz sargısı yüzeyinin soğutucu havaya göre ortalama sıcaklık derecesi farkı;

$$T = \frac{P_{cu}}{h \cdot A} = \frac{76,875}{35 \cdot 0,023} = 95,5^\circ \text{ C} \quad (4.70)$$

olarak bulunmaktadır. Bu sıcaklık değeri için Tablo 4.2'ye göre A sınıfı izolasyon uygulanması gerektiği sonucuna varılmaktadır.

5. STATİK ANALİZ

Analitik olarak tasarımı yapılan ve boyutları belirlenen makinanın performans analizlerini gerçekleştirmenin bir yolu, makineyi imal edip laboratuvar ortamında testlerini yapmaktır. Doğru ve net sonuçlar elde edilmesine karşın, bu yöntemin olumsuz yanları prototip makinanın üretiminin zaman alması ve maliyetinin yüksek olmasıdır.

Günümüzde endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılan geleneksel elektrik motorlarından farklı olarak, anahtarlı relüktans motorları yoğun olarak doyma altında çalışırlar. Hem doyma etkisi, hem de makinadaki manyetik relüktansın rotorun hareketi esnasında sürekli olarak değişmesi nedeniyle, makinanın halkalama akısı, moment ve endüktans eğrileri, rotor konumuna ve akıma bağlı olarak değişen, lineer olmayan fonksiyonlardır. Bundan dolayı, makinanın karakteristik özelliklerini belirleyen bu eğrilerin matematiksel ifadeler yardımıyla elde edilmesi, oldukça uzun ve zahmetli işlemlerin yapılmasını gerektirmektedir [80].

Son yıllarda bilgisayar destekli tasarım (Computer Aided Design – CAD) tekniklerindeki gelişmeler ve bu amaçla üretilen yazılımların kullanımıyla, yukarıda bahsedilen tüm bu zorlukların üstesinden gelinmektedir. Bu sayede, oldukça karmaşık olan ve çözümü uzun zaman alan matematiksel işlemler kısa sürede ve yüksek doğrulukla sonuçlandırılmakta, bu da mevcut tasarımın iyileştirilmesi ve performans analizinde kolaylık sağlamaktadır.

Elektrik makinalarının manyetik analizinin gerçekleştirilmesi ve performansının belirlenmesi için birçok matematiksel yöntem bilinmesine karşın, sonlu elemanlar yöntemi (finite element analysis) bunların içinde yaygın olarak kullanılması nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Günümüzde araştırmacı ve tasarımcılar tarafından tercih edilen ve sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla çözüm üreten birçok paket

program ve yazılım bulunmaktadır. Bunlardan başlıcaları ANSYS, Opera2D, MagNet ve ANSOFT-Maxwell olarak sayılabilir. Bu çalışmada, bu amaçla ANSOFT firması tarafından geliştirilen ve iki boyutlu statik manyetik analiz yapan Maxwell2D yazılımı tercih edilmektedir. Bunun nedeni yazılımın kullanıcı arabiriminin basit ve kullanışlı olması, hızlı çözüm sunması ve görsel olarak anlaşılır ve kullanışlı sonuçlar verebilmesidir.

5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Günümüzde tasarım yöntemlerini ve sürecini etkileyen önemli bir faktör, karmaşık matematiksel ifadelerin hesaplanmasını ve sonuçların çok kısa sürede elde edilmesini sağlayan bilgisayar teknolojisinde ve simülasyon yazılımlarındaki gelişimdir.

Bu sayede, mühendislik dallarının hemen hemen hepsini kapsayacak bir şekilde ve fizikte sınır değer ve ilk değer problemlerinden ortaya çıkan kısmi diferansiyel denklemlerinin yaklaşık çözümleri için çeşitli sayısal yöntemler doğmuştur. Bu tip çözümlerler içerisinde sonlu elemanlar yöntemi en fazla kullanılan sayısal yöntemlerden bir tanesidir. Bu yöntem, sistemi temsil eden diferansiyel ifade aranacak değişkenin yerine özellikle Taylor açılımına dayanan seri açılımı koyularak yapılan yaklaşık bir çözüm tekniğidir. Sonlu elemanlar yöntemi, ilgilenilen bir bölgenin tamamında enerji denklemini minimumlaştırma ilkesine dayanır. Bu bölgedeki alan Laplace veya Poisson tipinde bir elektrik alan veya manyetik alan olabilir.

Sonlu elemanlar yönteminin diferansiyel, varyasyonel, integral eşitliklerinin tümüne uygulanabilmesi, sınır değer, başlangıç değer ve kararlı hal problemlerinin herhangi bir boyuttaki çözümlerinin bu yöntemle yapılabilmesi, yöntemin başlıca avantajıdır. Üzerinde çözüm aranacak sistemin fiziksel özelliklerinin sistem içerisinde farklılıklar göstermesi, problemin çözümünü zorlaştırmaz. Bu tip problemlerde homojen olmayan ortam, sonlu sayıda homojen elemana ayrılarak oluşturulan ifadeler kolaylıkla çözülebilir. Bu da yöntemin esnek ve kullanışlı olmasını sağlamaktadır. Yöntemin lineer ve lineer olmayan diferansiyel denklemlerin çözümlerine uygulanabilirliği yanında karmaşık sınır şartlarının bulunduğu ortamlar içinde çözüm

yapabiliyor olması sayılabilecek diğer avantajlarıdır. Sonlu elemanlar yönteminin en büyük olumsuzluğu, sonsuz geniş bir açık uzay probleminin incelenmesinin mümkün olmamasıdır. Çözüm bölgesinin, uzayda değeri bilinen sınır koşulları ile sınırlanmış bir bölge olması gereklidir. Bu yüzden çözüm bölgesi açık olan bazı problemlerde ancak kısmi bir bölgenin belirli koşulları sağlayacak biçimde sınırlanmasıyla, sınırlanmış bu bölge için alan hesabı yapılabilir.

Sonlu elemanlar yönteminin temeli, karmaşık sınır koşulları nedeniyle tüm çözüm bölgesi için analitik bir potansiyel fonksiyonu bulmanın mümkün olmadığı durumlarda, çözümün tanımlanan sonlu küçük elemanlar içinde aranmasına dayanmaktadır. Sınırlar içerisinde kalan bölge, elemanların geometrik yapısı aynı kalmak koşuluyla, şekilleri ve konumları tamamen keyfi seçilebilen sonlu küçük elemanlara bölünür. Bölmedeki temel şart, elemanlar arasında üst üste binme ve aralarda boşluk olmaması koşuludur. Seçilen elemanlar ne kadar küçük olursa nümerik çözümün de o kadar iyi olacağına dikkat edilmelidir. Daha küçük elemanlar daha fazla sayıda bilinmeyenle sonuçlandırıldığından ve dolayısıyla da hafıza talebini ve hesaplama süresini artırdığından istenen hassasiyet için eleman sayısını minimumda tutmak gereklidir. Eksenel simetrisinin bulunduğu problemlerde iki boyutlu bir inceleme yeterli olacağından, elemanlar daha çok üçgen, dikdörtgen, çokgen gibi şekiller olabilir. Üçgenleri eleman olarak seçmenin, sınır yüzeyler üzerine kolayca uyum sağlayabilmesi açısından önemli bir üstünlüğü bulunmaktadır. Üç boyutlu analizlerde ise tanımlanan elemanlar hacimsel elemanlar olup, bunların başlıcaları dört yüzlü ve altı yüzlü elemanlardır. Elemanların yerleştirilmesinden sonra, sistemi temsil eden diferansiyel ifadenin her bir eleman için sonlu eleman formülasyonu yapılır. Son yıllardaki çalışmalar, elemanların tanımlanması ve bunların verilmiş bir sınır yüzeye uydurulması işleminin bilgisayar tarafından otomatik olarak gerçekleştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Elemanların oluşturulmasından sonra gelen adım, cebrik ifadelerin birleştirilerek sistem eşitliklerinin elde edilmesidir. Bu eşitliklere sınır koşulları uygulandıktan sonra, lineer denklem sisteminin tamamı bir matris eşitliği ile ifade edilebilir. Çözüm yöntemlerinden bir tanesi kullanılarak sistem içinde değişimi aranan fonksiyonun yaklaşık değeri bulunabilir.

Çoğu fiziksel sistemler matematiksel olarak modellenirken ortaya çıkan diferansiyel denklemler alan incelemelerinde de kendisini gösterir. Alan incelemelerinde sınır değerine göre belli diferansiyel denklem sisteminin çözümü, başka bir deyişle sınır değer problemleri vardır. Elektrik makinalarında da alan incelemelerinde karşılaşılan bu denklemler eliptik kısmi diferansiyel denklemler olan Laplace ve Poisson denklemleridir.

$$\varphi = \varphi(x, y) \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad \text{Laplace tipi eliptik kısmi diferansiyel denklem} \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = f(x, y) \quad \text{Poisson tipi eliptik kısmi diferansiyel denklem} \quad (5.3)$$

Sınır değer problemlerine ait sınır koşulları; Dirichlet tipi, Neumann tipi ve ikisinin bileşimi karma tip olmak üzere üç tiptedir.

$$\varphi|_r = f(r) \quad \text{Dirichlet tipi} \quad (5.4)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_r = f(r) \quad \text{Neumann tipi} \quad (5.5)$$

$$\left. \varphi + \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_r = f(r) \quad \text{Karma tip} \quad (5.6)$$

Genellikle elektrik makinalarının iki boyutlu analizinde kullanılan sınır koşulları manyetik vektörel potansiyel A olmak üzere;

$$A = 0 \quad \text{Manyetik akı çizgileri boyunca} \quad (5.7)$$

$$\left. \frac{\partial A}{\partial n} \right|_r = 0 \quad \text{Ferromanyetik malzeme boyunca} \quad (5.8)$$

$$\left. \frac{\partial A}{\partial n} \right|_r = 0 \quad \text{Geometri simetri eksenini boyunca} \quad (5.9)$$

şeklinde tanımlanmaktadır [81].

Maxwell denklemleri elektromanyetik alan davranışının matematiksel olarak ifadeleridir. Bu denklemler diferansiyel formda;

$$\nabla \times \vec{E} = \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Faraday yasası} \quad (5.10)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Maxwell-Amper yasası} \quad (5.11)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \text{div} \vec{D} = \rho \quad \text{Gauss yasası} \quad (5.12)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = \text{div} \vec{B} = 0 \quad \text{Manyetik Gauss yasası} \quad (5.13)$$

olarak tanımlanırlar. Bu denklemlerde;

E : elektrik alan şiddeti (V/m)

H : manyetik alan şiddeti (A/m)

D : elektriksel akı yoğunluğu (C/m²)

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

t : zaman (s)

J : akım yoğunluğu (A/m²)

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

Maxwell denklemleri genel denklemlerdir. Bu genel denklemler, uygulandığı problem türüne göre değişir ve basitleşir. Statik manyetik alan problemlerinde amaç, manyetik alan dağılımını belirlemektir. Manyetik akı yoğunluğu, elektromanyetik alan analizinde ilk elde edilen sonuçtur ve manyetik vektör potansiyelin rotasyoneli olarak tanımlanır ve ifadesi,

$$\vec{B} = \nabla \times [N_A]^T \vec{A} \quad (5.14)$$

olarak çıkarılır. Burada $[N_A]$ eleman şekil fonksiyonudur. Manyetik alan şiddeti ise;

$$\vec{H} = [\nu] \vec{B} \quad (5.15)$$

olarak yazılır. Burada $[\nu]$ manyetik alanın, malzemenin cinsine bağlı olarak değişen lineer olmayan bir fonksiyonudur.

Tanımlanan kapalı bir eğrinin oluşturduğu yüzeyden geçen akıyı hesaplamak için manyetik akı yoğunluğu kullanılır. S yüzeyinden geçen akı,

$$\lambda = \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS \quad (5.16)$$

olarak yazılır. Burada \vec{B} akı yoğunluğu vektörü, \vec{n} birim normal vektörü, S S yüzeyinin çevrelediği alandır. Bu denklem \vec{A} manyetik vektör potansiyeli cinsinden ise,

$$\lambda = \int_S (\nabla \times \vec{A}) \cdot \vec{n} dS \quad (5.17)$$

olarak ifade edilir. Stokes teoremini uygulayarak yüzey integrali, kapalı çevre boyunca A 'nın çizgi integraline dönüşür.

$$\lambda = \int_l \vec{A} \cdot \vec{t} dl \quad (5.18)$$

Burada \vec{t} birim teğet vektörü, l ise çevrenin uzunluğudur. Bir yol boyunca meydana gelen magnetomotor kuvvet düşümü ise Amper teoremine göre,

$$F = \int_l \vec{H} \cdot \vec{t} dl \quad (5.19)$$

şeklinde hesaplanır. Burada \vec{H} manyetik alan şiddetidir [83].

Elektromanyetik moment ise,

$$T_e = \frac{\partial}{\partial \theta} \int_S \left(\int_0^H B dH \right) dS \quad (5.20)$$

olarak yazılır [84].

5.2 ANSOFT-Maxwell2D Yazılımının Tanıtımı

Bölüm 4'te analitik olarak tasarımı yapılan ve temel boyutları belirlenen D.R.A.R.M.'nin statik manyetik analizinin gerçekleştirilmesinde ve boyutların optimizasyonunda ANSOFT-Maxwell2D yazılımı ve buradan elde edilen sonuçlar kullanılmaktadır. Bu yazılımla, tanımlanan problemin çözümü aşağıda kısaca açıklanan beş temel adımda gerçekleştirilmektedir.

Adım 1 – Motor geometrisinin çizimi ve elemanların tanımlanması (2D Modeller)

Analiz sonuçlarının doğru biçimde elde edilmesi için en önemli noktalardan biri, makinanın teknik çiziminin yüksek doğrulukla yapılmasıdır. Yazılım, analizi yapılacak makinanın geometrisinin oluşturulması amacıyla iki boyutlu bir grafik çizim arabirimi (2D Modeller) içermektedir. Bununla birlikte, yaygın olarak kullanılan teknik çizim yazılımlarından biri olan Autodesk-AUTOCAD yardımıyla da makinanın çiziminin yapılarak, Maxwell2D'nin tanıyacağı çizim formatına dönüştürülmesi mümkündür. Analizi yapılacak makinanın geometrisinin daha hassas ve doğru şekilde elde edilmesi için bu yöntem daha avantajlı olarak görülmektedir.

Geometrik şeklin elde edilmesinin ardından, makinanın faz sargılarının, dönen ve duran kısımlarının ve çizimde belirlenen tüm diğer parçalarının uygun biçimde isimlendirilmesi, analiz sürecinin bundan sonraki aşamalarında kullanıcıya kolaylık sağlamaktadır.

Adım 2 – Motor bileşenlerini oluşturan malzemelerin tanımlanması (Material Setup)

Makinanın stator ve rotorunun üretiminde kullanılacak olan manyetik özellikli malzemelerin, faz sargılarında kullanılacak iletkenlerin, sürekli mıknatıs malzemelerin cinsi ve manyetik özellikleri ile makinanın çalışacağı ortam koşulları bu adımda tanımlanır. Bu malzemeler ve ortam koşulları, yazılımın kendi kütüphanesinden seçilebileceği gibi, deneysel olarak elde edilmiş olan veya kataloglardan alınan veriler dışarıdan girilerek de yazılıma tanıtılabilir.

Adım 3 – Sınır değerler ve uyarım kaynaklarının belirlenmesi (2D Boundary/Source Manager)

Bu adımda, tanımlanan probleme göre;

- gerilim, akım ve yük kaynakları,
- elektrik veya manyetik alanların etkileyeceği yüzeyler ve sınır koşullar tanımlanır.

Bu tanımlamaların hassas ve doğru biçimde yapılması, elde edilen sonuçların doğruluğunu önemli ölçüde etkilemektedir.

Adım 4 – Çözüm (Solve)

Çözüm aşamasında, öncelikle kaba bir sonlu elemanlar yüzeyi (finite element mesh) otomatik olarak oluşturulur. Bu yüzeye göre yapılan çözüm ile elde edilen enerji hatası değeri (error-energy), referans değer ile karşılaştırılır. Karşılaştırma sonucuna göre, eğer gerekiyorsa sonlu elemanlar yüzeyi üzerinde çeşitli iyileştirmeler yine otomatik olarak yapılarak çözüm tekrarlanır. Bunun haricinde, analizi yapılacak olan makinanın herhangi bir parçasındaki, herhangi bir bölgesindeki veya tüm makinadaki sonlu elemanlar yüzeyi, analizi yapan kullanıcının isteğine göre iyileştirilebilir.

Sonlu elemanlar yüzeyinin uygun şekilde oluşturulması, problemin çözümü sırasında büyük önem taşımaktadır. Yüzeydeki sonlu eleman sayısının düşük olması, çözüm sonucunda oldukça kaba değerler elde edilmesine neden olur. Buna karşın, bu sayının çok yüksek seçilmesi ise, güçlü bilgisayarlar kullanılmasına rağmen, problemin çözüm süresini oldukça uzatacaktır. Bu nedenle eleman sayısı, makina geometrisinin önemli kısımlarında yüksek seçilirken, diğer kısımlarda daha düşük olarak belirlenmelidir. Buna göre çözüm aşamasında, analizi yapılan makinanın faz öz endüktansları, fazlar arası karşılıklı endüktansları, makinadaki kuvvet ve moment değerleri ve halkalama akısı değerleri hesaplanmaktadır.

Adım 5 – Sonuç izleme (Post Processing)

Çözüm sonrasında elde edilen sonuçların görsel olarak izlenmesine olanak veren basit ve kullanışlı bir arabirim, yazılımda mevcuttur. Bu arabirim yardımıyla makinanın tamamı veya belli kısımlarının manyetik alan şiddeti, manyetik akı yoğunluğu ve akı yoğunlukları hem vektörel olarak hem de renk dağılımları yardımıyla izlenmektedir. Ayrıca halkalama akı çizgileri, enerji ve koenerji dağılımları da gözlenebilmektedir.

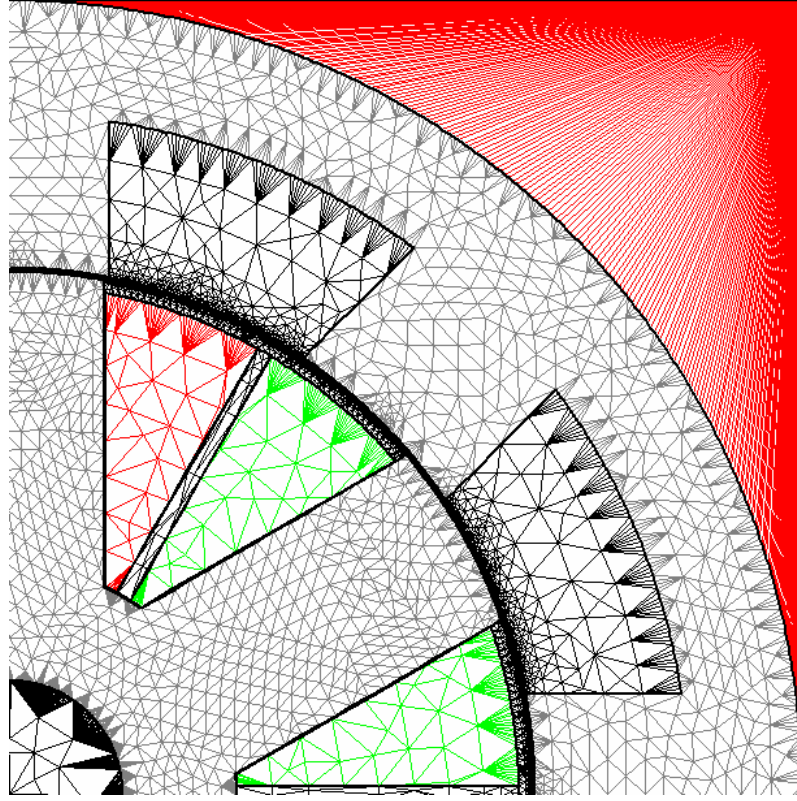
5.3 D.R.A.R.M.’nin Statik Manyetik Analizi

Önceki bölümde analitik olarak tasarımı yapılan D.R.A.R.M.’nin statik manyetik analizi için ilk olarak, matematiksel olarak hesaplanan geometrik boyutlar kullanılarak makinanın geometrisi 1/1 ölçekte elde edilmiştir. Bu amaçla Autodesk AUTOCAD teknik çizim programından faydalanılmaktadır. DXF formatında oluşturulan geometrik şekil, Maxwell2D’nin dönüşüm arabirimi yardımıyla, manyetik analiz yazılımının tanıyacağı çizim formatına dönüştürülmektedir.

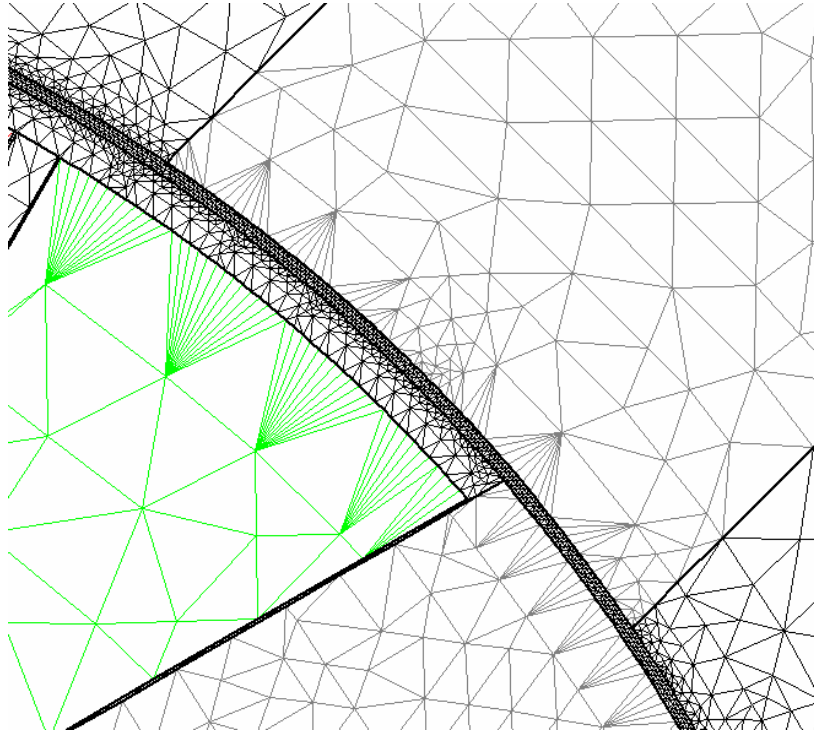
Şekil 4.8’de, tasarlanan üç fazlı D.R.A.R.M.’nin geometrik şekli görülmektedir. Her bir faz sargısı, iç statorun karşılıklı kutupları üzerine sarılmış olan eşit sarım sayısındaki bobinler seri bağlanarak elde edilmektedir. Her bir bobin, sarım yönüne bağlı olarak iki farklı kısımda gruplanarak Maxwell2D’ye tanıtılmaktadır.

D.R.A.R.M.’nin rotor ve stator sac paketlerinin üretiminde kullanılacak olan manyetik malzeme olarak, M19 olarak adlandırılan yönlendirilmemiş (non-oriented) silisli sac malzeme seçilmiştir. Sözkonusu malzemenin BH eğrisi, Şekil 4.7’de verilmektedir. Motorun faz sargılarının sarılmasında ise, kesiti ve sarım sayısı Bölüm 4’te belirtilen bakır sargı iletkeni kullanılmaktadır.

Tanımlanan manyetik analiz probleminin çözümü sırasında oluşturulan iyileştirilmiş sonlu elemanlar yüzeyi, Şekil 5.1’de verilmektedir.



Şekil 5.1: İyileştirilmiş sonlu elemanlar yüzeyi ağ yapısı



Şekil 5.2: Hava aralığında oluşturulan ağ yapısı

Sonlu elemanlar yüzeyi oluşturulurken motor içerisindeki hava boşlukları üç ayrı grup olarak ayrılmaktadır. Burada önemli olan kısım stator ve rotor arasındaki 0,5mm genişliğindeki “ince hava aralığı” olarak adlandırılan alandır. Şekil 5.2 ve Tablo 5.1’den de görüldüğü gibi, bu alandaki üçgen elemanların büyük bir kısmı ince hava aralığında tanımlanmaktadır. Bunun nedeni, ince hava aralığının moment üretiminde önemli rol oynaması ve elektromanyetik enerji dönüşümü sırasında enerjinin çok büyük kısmının burada depolanıyor olmasıdır [82].

Tablo 5.1: Tanımlanan eleman sayıları

	Üçgen eleman sayısı
Stator	1000
Rotor	2000
İnce hava aralığı	10000
Sargı alanları	50

D.R.A.R.M.’nin statik manyetik analizi için rotor konumu ve sargı akımı, problemin giriş değişkenleridir. Bu değişkenlere bağlı olarak makinanın sonlu elemanlar yüzeyi oluşturulmakta ve faz endüktansları, halkalama akısı, moment ve kuvvet gibi temel çıkış büyüklükleri hesaplanmaktadır.

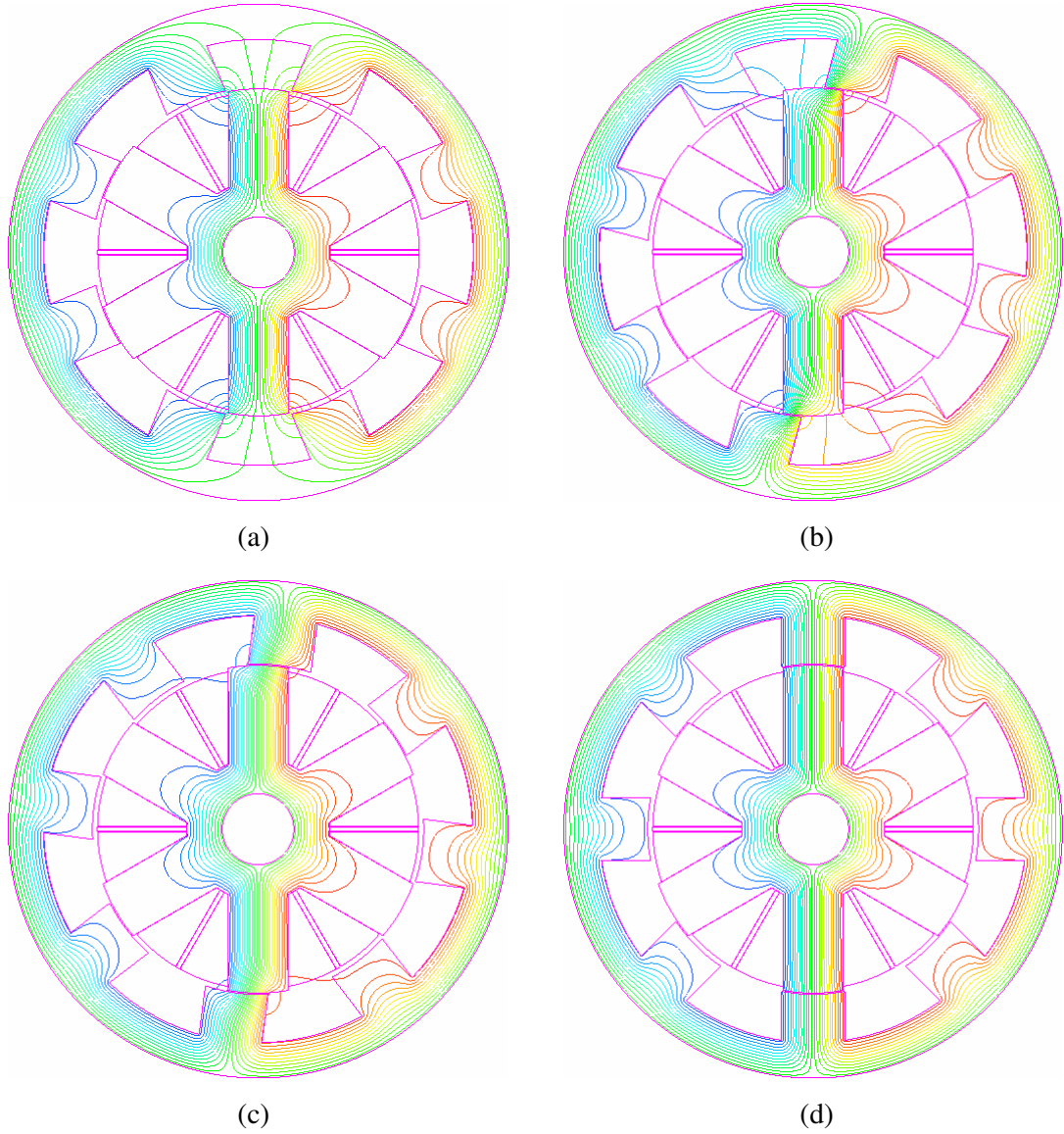
Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak motorun statik manyetik analizi gerçekleştirilirken yapılan bazı ihmaller ve varsayımlar şu şekilde sıralanmaktadır [78].

- Dış rotorun dışındaki manyetik vektör potansiyeli sıfır kabul edilmektedir.
- İç stator ve dış rotorun imalatında kullanılan sac malzemenin mıknatıslanma eğrisindeki histeresiz etkisi ihmal edilmektedir.
- Motorun içinde aksiyel yönde manyetik alan dağılımı sabittir.
- Sargı sonu etkileri ihmal edilmiştir.

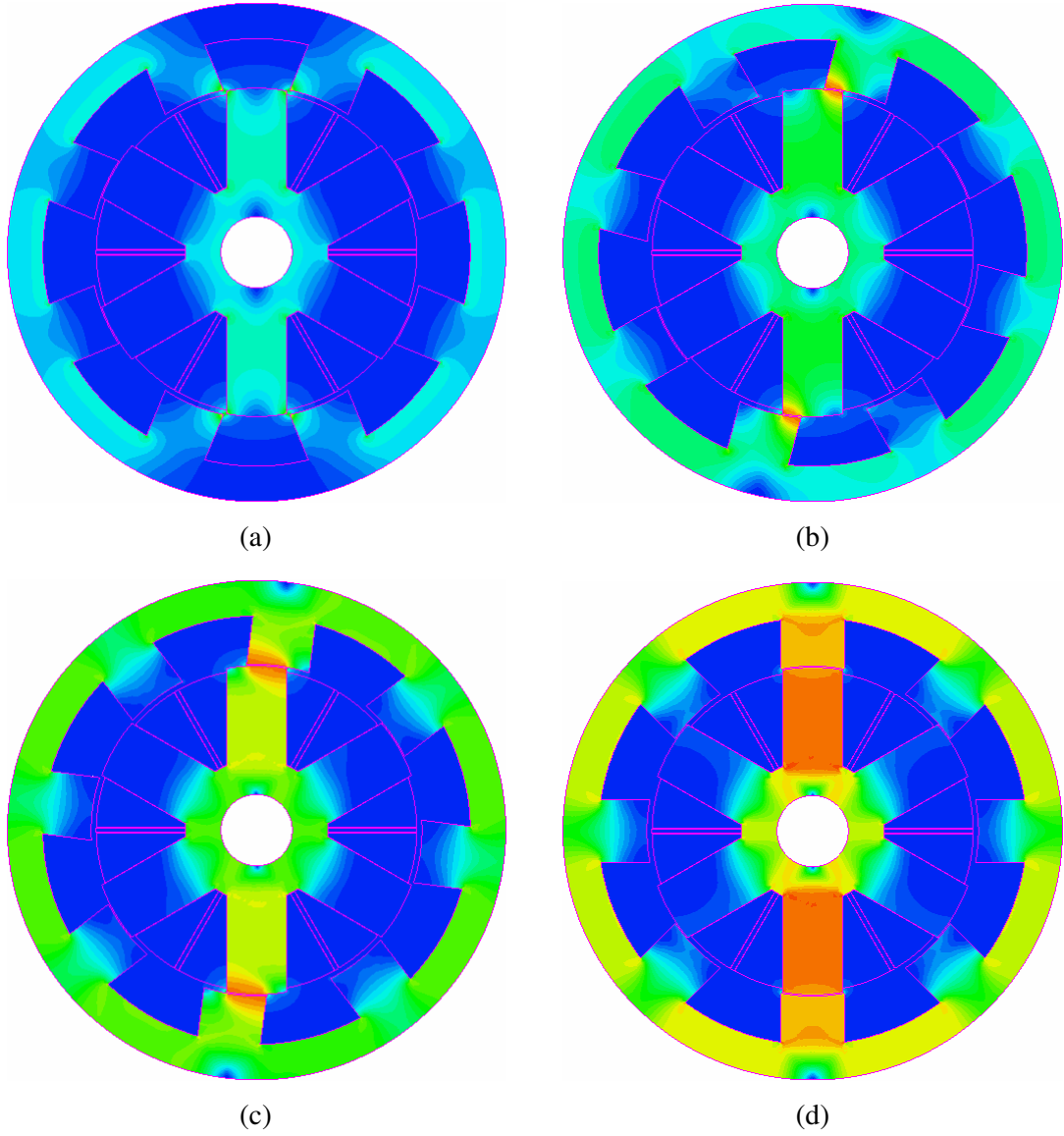
Söz konusu çıkış büyüklüklerinin elde edilmesi için, sargı akımları 0-40A aralığında 1A’lik adımlarla artırılarak, rotorun 0°-22,5° aralığındaki her 0,5°’lik konum değişimi için, problem Maxwell2D tarafından çözülerek statik manyetik analiz

gerçekleştirilmiştir. Burada 0° rotor ve stator kutuplarının tamamen ayrık olduğu konumu, $22,5^\circ$ ise rotor ve stator kutuplarının tamamen çakışık olduğu konumu ifade etmektedir.

Şekil 5.3'te, rotor konumunun 0° - $22,5^\circ$ aralığında $7,5^\circ$ 'lik adımlar için elde edilen manyetik akı çizgilerinin, Şekil 5.4'te ise manyetik akı yoğunluklarının değişimleri görülmektedir.

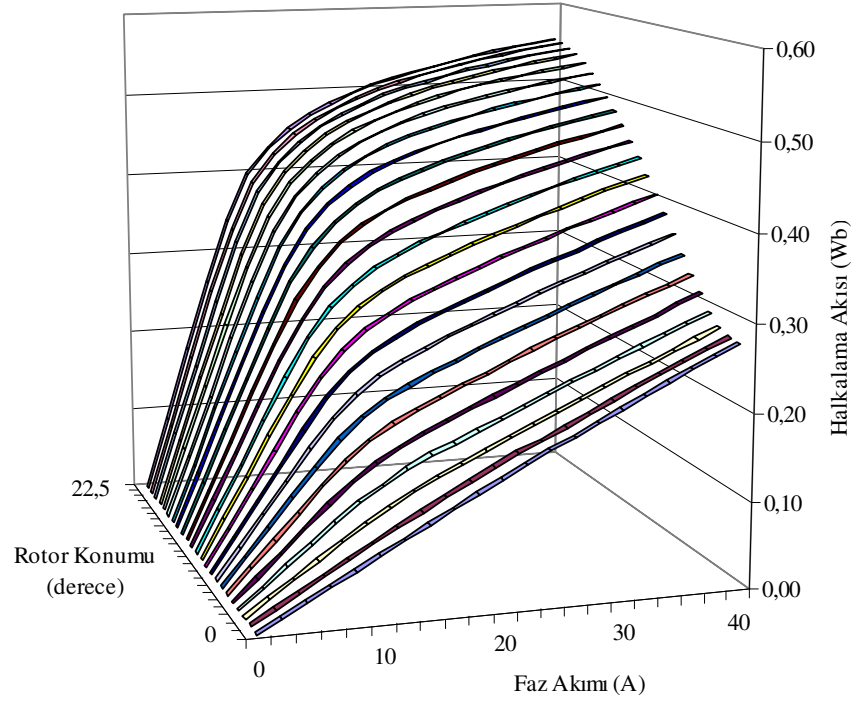


Şekil 5.3: D.R.A.R.M.'nin (a) $\theta = 0^\circ$ (b) $\theta = 7,5^\circ$ (c) $\theta = 15^\circ$ (d) $\theta = 22,5^\circ$ konumları için manyetik akı çizgilerinin dağılımı

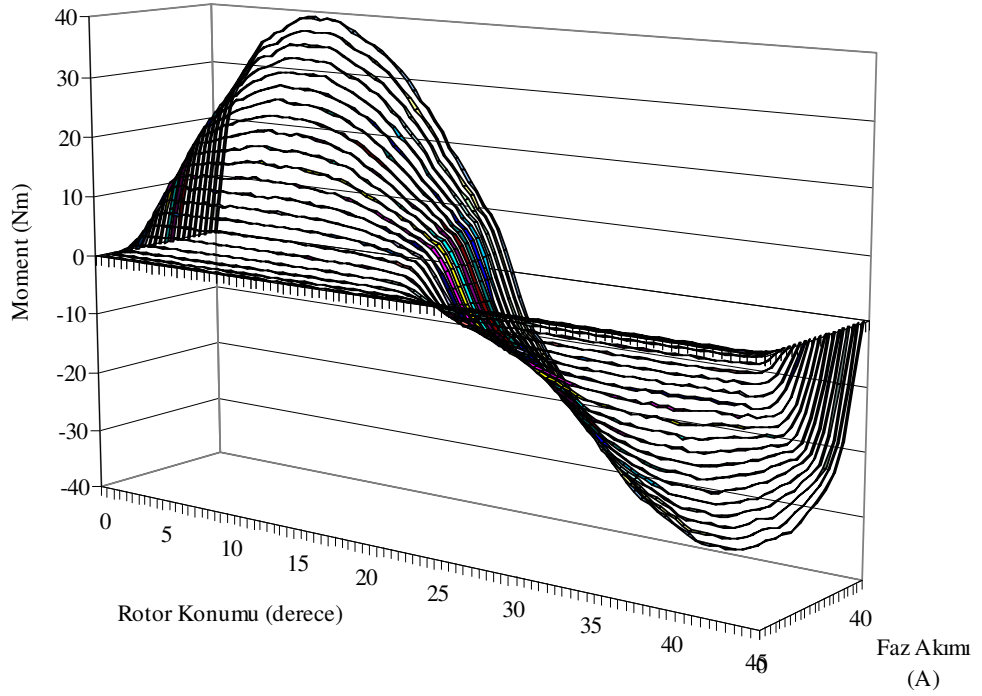


Şekil 5.4: D.R.A.R.M.'nin (a) $\theta = 0^\circ$ (b) $\theta = 7,5^\circ$ (c) $\theta = 15^\circ$ (d) $\theta = 22,5^\circ$ konumları için manyetik akı yoğunluğunun dağılımı

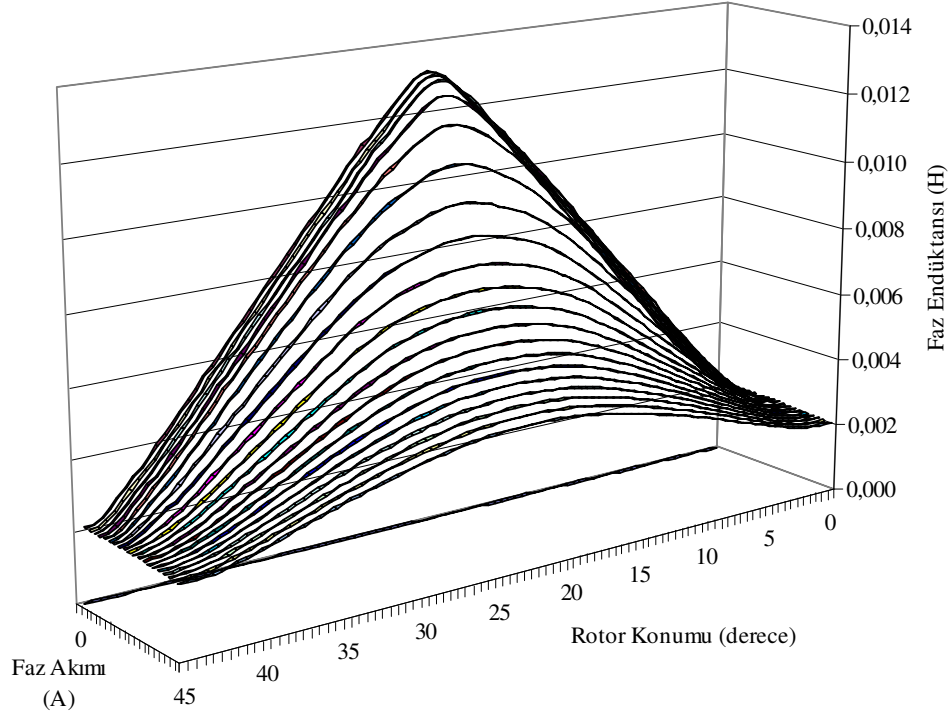
Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 yardımıyla, rotor ve stator kutuplarının çakışmaya başlamasıyla kutup başlarında ortaya çıkan doyma etkisi net biçimde görülmektedir. D.R.A.R.M.'nin statik manyetik analiz sonucunda elde edilen akı, statik moment ve endüktans eğrileri sırasıyla Şekil 5.5-5.7'de verilmektedir. Bu eğriler oluşturulurken herhangi bir eğri uydurma (curve fitting) işlemi uygulanmamıştır.



Şekil 5.5: D.R.A.R.M.'nin halkalama akısının faz akımı ve rotor konumuna bağlı değişimi



Şekil 5.6: D.R.A.R.M.'de üretilen momentin rotor konumu ve faz akımına bağlı değişimi



Şekil 5.7: D.R.A.R.M.'nin faz öz endüktansının faz akımı ve rotor konumuna bağlı değişimi

5.4 D.R.A.R.M.'nin Moment Dalgallığının İncelenmesi

5.4.1 Kısa adımlı sargı yapısı için moment dalgallığının incelenmesi

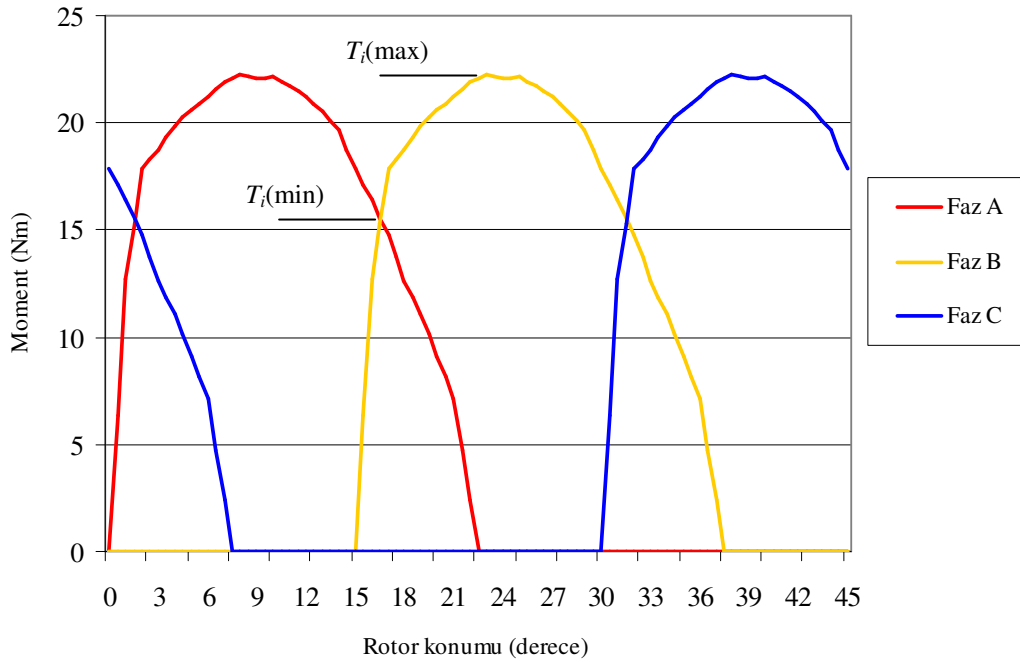
Bölüm 3'te açıklandığı gibi, anahtarlı relüktans motorlarının en büyük olumsuzluklarından biri makinada oluşan moment dalgallığıdır. Moment dalgallığı doymaya ve sargı komutasyonuna bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Faz akımının nominal değerinin altındaki akım değerleri için komutasyon anında görülen moment çökmeleri dalgallığın başlıca nedenini oluşturmaktadır. Nominal üstü akım değerleri için ise sargı komutasyonu ile birlikte doyma etkisi, moment dalgallığının nedenleri olarak ortaya çıkmaktadır. Momentteki dalgallığın yüksek olması, motorun çalışması esnasında oluşan titreşimi ve akustik gürültüyü de artırmaktadır.

Dalgallık oranı, motorun statik moment profilinin maksimum, minimum ve ortalama değerleri kullanılarak,

$$\%Oran = \frac{T_i(\max) - T_i(\min)}{T_{ort}} \times 100 \quad (5.21)$$

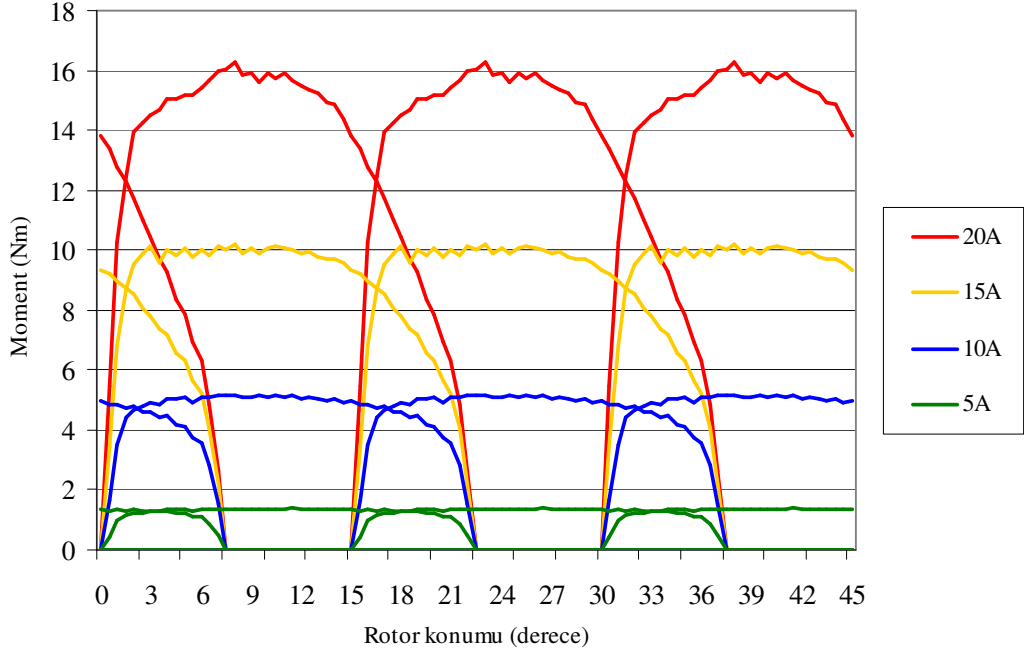
eşitliğiyle hesaplanır. Şekil 5.6'da verilen statik moment eğrileri yardımıyla tasarlanan motorun farklı çalışma durumlarındaki dalgalılık analizi gerçekleştirilebilir. Tasarlanan motorun, bir elektrikli taşıtın tekerlek tahriğini sağlaması hedeflenmektedir. Uygulama alanı göz önünde tutulduğunda tasarlanan motor, sürekli olarak değişen yükleme oranlarında, bir başka ifadeyle sürekli olarak değişen yük akımları altında çalışacaktır. Bu nedenle, motorun dalgalılık analizinin farklı akım değerleri için yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Elektrikli taşıtların kalkış, hızlanma ve yokuş tırmanma gibi sürüş şartları, taşıtı tahrik eden bir veya birden fazla sayıdaki elektrik motorunun yüksek akım çektiği koşullardır. Bu nedenle, motorun belirtilen bu sürüş şartlarında nominal akımıyla çalıştığı düşünülerek, nominal akım için elde edilen statik moment eğrileri yardımıyla motorun moment dalgalılığı analiz edilmektedir. Bu eğriler motorun her üç fazı için Şekil 5.8'de verilmektedir. Bu şekilde $T_i(\max)$ anlık momentin en büyük değerini, $T_i(\min)$ ise anlık momentin en küçük değerini göstermektedir.



Şekil 5.8: Nominal akım değeri ($i=25A$) için statik moment profilleri

Taşıtın düz yolda ve sabit hızda kullanımı gibi sürüş şartlarında ise tahrik motorunun çektiği akım, aracın ağırlığına da bağlı olmakla birlikte, nominal akımdan daha düşük değerlerdedir.



Şekil 5.9: Nominalden düşük akım değerleri için statik moment profilleri

Tüm bu çalışma koşullarını göz önünde tutmak amacıyla, tasarlanan motor için elde edilen statik moment profilleri, farklı çalışma koşullarını temsil eden farklı akım değerleri için Şekil 5.9'da verilmektedir. Denklem 5.30'da verilen eşitlik yardımıyla, Şekil 5.8-5.9'daki akım değerleri için momentteki dalgalılık değerleri hesaplanmakta ve Tablo 5.2'de verilmektedir.

Tablo 5.2: Kısa adımlı sargılı D.R.A.R.M.'de üretilen ortalama moment değerleri ve dalgalılık oranları

Akım (A)	Ortalama moment (Nm)	Dalgalılık oranı (%)
5	1,342	5,88
10	5,030	9,25
15	9,521	14,04
20	14,655	21,60
25	19,885	32,76

Görüldüğü gibi, üretilen moment ve moment dalgalılığına ilişkin karşılaştırmalar faz akımının nominal değerine kadar olan aralıkta gerçekleştirilmiştir. Elektrikli taşıtların tahrik gücü profilleri incelendiğinde ve tasarlanan motorun tipi, yapısı ve uygulamadaki çalışma koşulları göz önünde tutulduğunda, böyle bir motorun nominal üstü değerlerde çalışmasına ancak özel durumlarda ve çok kısa zaman dilimlerinde ihtiyaç duyulacaktır. Böyle durumlarda önemli olan, motorun ihtiyaç duyulan yüksek gücü üretebilmesidir. Bu nedenle, nominal üstü çalışma koşulları için moment dalgalılığına yönelik herhangi bir inceleme yapılmamıştır.

5.4.2 Farklı sargı yapısı için D.R.A.R.M.'nin moment üretim kapasitesi ve moment dalgalılığının incelenmesi

Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi, özellikle tekerlek içi motor olarak kullanılmak üzere geliştirilen elektrik motorlarında motorun ürettiği moment değeri büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle ilk kez 1993 yılında literatüre giren ve uzun adımlı sargı olarak da bilinen sargı yapısı, tasarlanan D.R.A.R.M.'ye uygulanarak moment profili elde edilmekte ve dalgalılık analizi gerçekleştirilmektedir [85,86].

Bu sargı yapısında faz sargıları, statorun çıkık kutupları arasındaki karşılıklı hacimlere, bir başka ifadeyle oluklara yerleştirilmektedir. Sargı yerleşiminde yapılan bu değişiklik, geleneksel yapıdaki A.R.M.'nin yapısal üstünlüklerini büyük ölçüde değiştirmemektedir. Sadece, sargı yapısının değişmesi ile uyarma yapısında da bazı değişiklikler meydana gelmektedir. Şekil 5.10'da her iki sargı yapısı için D.R.A.R.M.'nin kesit görüntüleri verilmektedir.

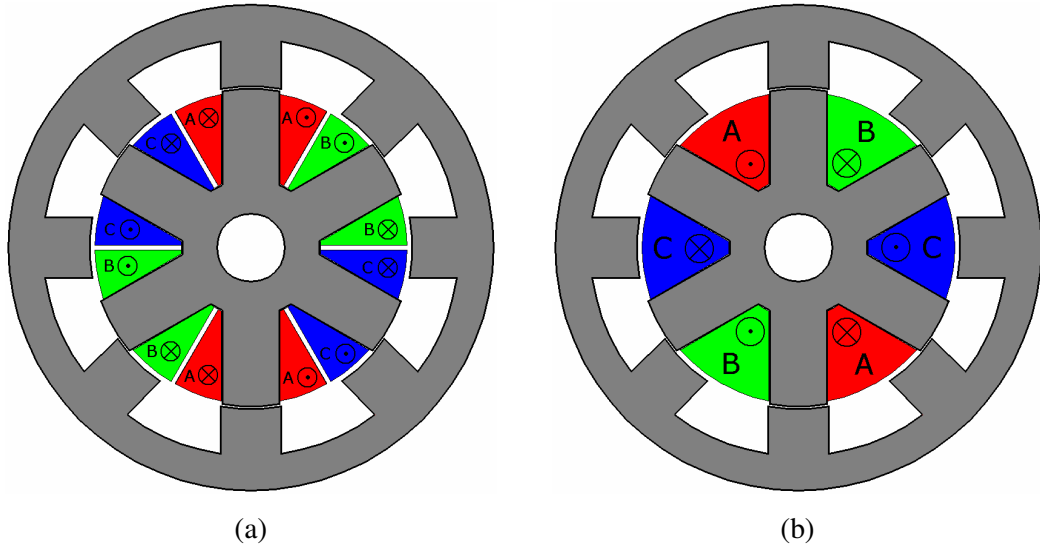
Her iki sargı yapısı için stator ve rotor çekirdekleri ile hava aralığının boyutları ve dolayısıyla sargı alanı özdeşdir. Bunun yanı sıra her bir faz sargısı için sarım sayısı da sabit tutulmaktadır. Bununla birlikte, artan sargı sonu uzunluğu nedeniyle toplam sargı uzunluğu artmakta, bu da faz direncinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle iki farklı sargı yapısına sahip motoru karşılaştırırken aynı akım değerleri için karşılaştırma yapılamaz. İki makinayı karşılaştırma, ya eşit bakır kayıpları altında ya da aynı manyetik çalışma noktasında yapılabilir. Makinanın geometrik boyutlarının

sabit kaldığı durum için bu iki koşulun aynı anda sağlanması mümkün değildir [85,88].

Kısa kutup adımlı A.R.M. için denklem 3.28’de verilen moment eşitliği uzun kutup adımlı A.R.M. için,

$$T = \frac{1}{2}i_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + \frac{1}{2}i_b^2 \frac{dL_b}{d\theta} + \frac{1}{2}i_c^2 \frac{dL_c}{d\theta} + i_a i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} + i_b i_c \frac{dM_{bc}}{d\theta} + i_a i_c \frac{dM_{ac}}{d\theta} \quad (5.22)$$

olarak yazılmaktadır.



Şekil 5.10: (a) Kısa kutup adımlı, (b) Uzun kutup adımlı sargılı D.R.A.R.M.

Uzun kutup adımlı A.R.M.’de öz endüktansın rotor konumuna bağlı ifadesi yaklaşık olarak sabittir. Bu nedenle denklem 5.22’deki ilk üç terim sıfır olacaktır. Böylece motorun moment ifadesi denklem 5.23’teki gibi olur.

$$T = i_a i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} + i_b i_c \frac{dM_{bc}}{d\theta} + i_a i_c \frac{dM_{ac}}{d\theta} \quad (5.23)$$

Bu durumda her faz, pozitif moment üretimine elektriksel periyodun üçte ikisi oranında katkıda bulunmaktadır. Bu sayede kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip makina ile karşılaştırıldığında %20-30 oranında daha yüksek moment üretimi mümkün olmaktadır [85].

Geleneksel yapıdaki A.R.M.'nin geometrik boyutlarını değiştirmeden sadece sargı yapısının değiştirilmesi sonucunda sargı sonu uzunluğunun artması ile faz sargısının direnci de artmaktadır. Buna göre, geleneksel sargı yapısına sahip şekilde tasarlanan D.R.A.R.M.'nin sargı yapısının değiştirilmesi ile faz sargısı direncinin %41,87 oranında arttığı hesaplanmaktadır.

Geleneksel A.R.M.'de her bir faz, elektriksel periyodun üçte biri kadar süre boyunca iletimdedir. Bu nedenle, klasik sargı yapısına sahip D.R.A.R.M. için bir faza ait bakır kaybı;

$$P_{Cuk} = \frac{1}{3} \cdot i_{ka}^2 \cdot R_{fk} \quad (5.24)$$

uzun adımlı D.R.A.R.M. için bir faza ait bakır kaybı ise,

$$P_{Cuu} = \frac{2}{3} \cdot i_{ua}^2 \cdot R_{fu} \quad (5.25)$$

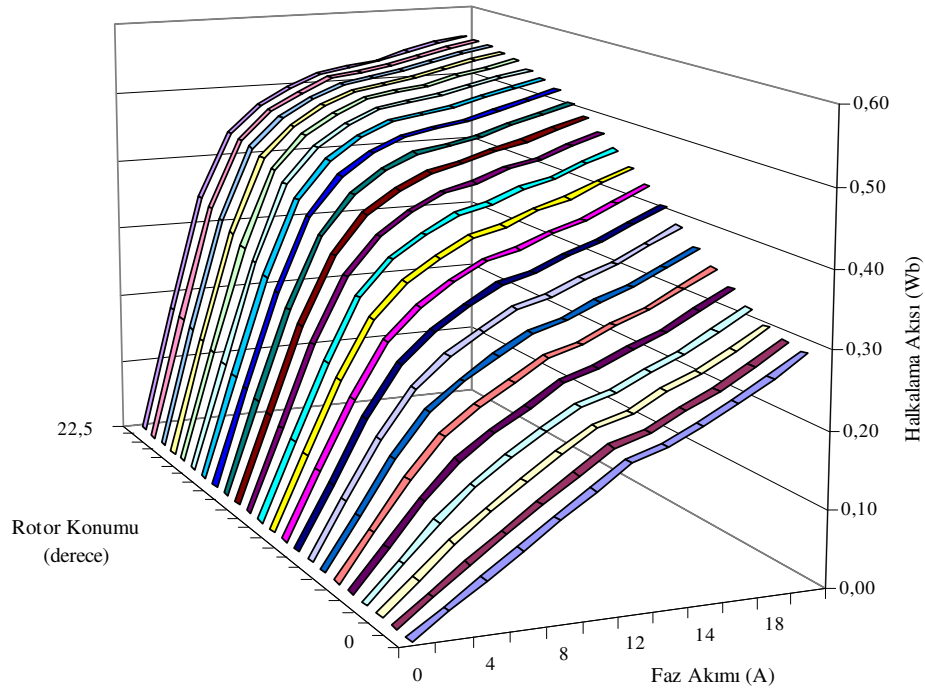
olarak ifade edilebilir. Bu iki denklemde i_{ka} ve i_{ua} sırasıyla kısa ve uzun adımlı sargı yapısına sahip motorlar için faz akımları, R_{fk} ve R_{fu} ise faz sargı dirençleridir. Eşit bakır kayıplarında karşılaştırma yapmak amacıyla bu iki ifade eşitlendiğinde, klasik D.R.A.R.M.'deki faz akımının 0,594 katı bir akımla uzun adımlı D.R.A.R.M.'nin uyarılması halinde, iki sargı yapısı arasında eşit şartlarda karşılaştırma yapmanın mümkün olacağı sonucuna varılmaktadır.

Uzun adımlı sargı yapısına sahip D.R.A.R.M.'nin statik manyetik analizi Maxwell2D yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Motorun rotor ve statorunda kullanılan sac malzeme, sargı iletkeni kesiti ve sarım sayısı klasik sargılı D.R.A.R.M. ile aynıdır. Klasik sargılı A.R.M.'nin manyetik analizi sırasında kabul edilen varsayımlar, bu motor için de aynen kabul edilmiştir. Uzun adımlı D.R.A.R.M.'nin statik moment ve halkalama akısı değişimlerinin elde edilmesi için, sargı akımları 0-20A aralığında 1A'lık adımlarla artırılarak, rotorun 0°-22,5° aralığındaki her 1°'lik konum değişimi için, problem Maxwell2D tarafından çözümlenerek statik manyetik

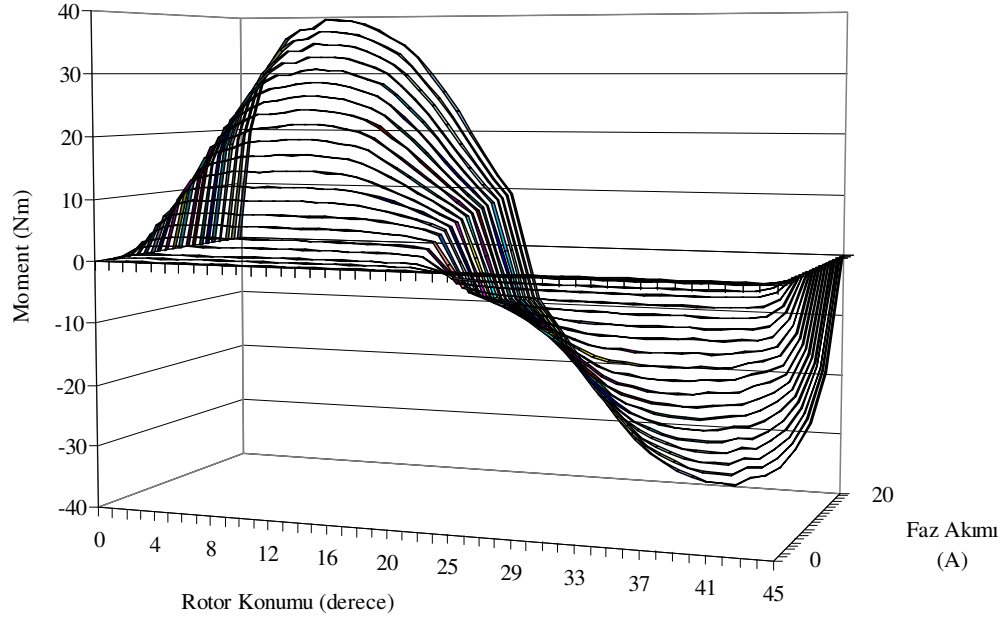
analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizler yapılırken motorun unipolar uyartım yöntemiyle enerjilendirildiği çalışma durumu dikkate alınmaktadır.

Tasarlanan D.R.A.R.M.'nin faz sargılarının eşit bakır kayıplarını oluşturacak şekilde uzun adımlı olarak sarılması durumunda, makinanın statik manyetik analizi sonucunda elde edilen halkalama akısı ve statik moment profilleri Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de verilmektedir.

Burada 0° rotor ve stator kutuplarının tamamen ayrık olduğu konumu, $22,5^\circ$ ise rotor ve stator kutuplarının tamamen çakışık olduğu konumu ifade etmektedir. Söz konusu eğrilerde herhangi bir eğri uydurma (curve fitting) işlemi uygulanmamıştır.

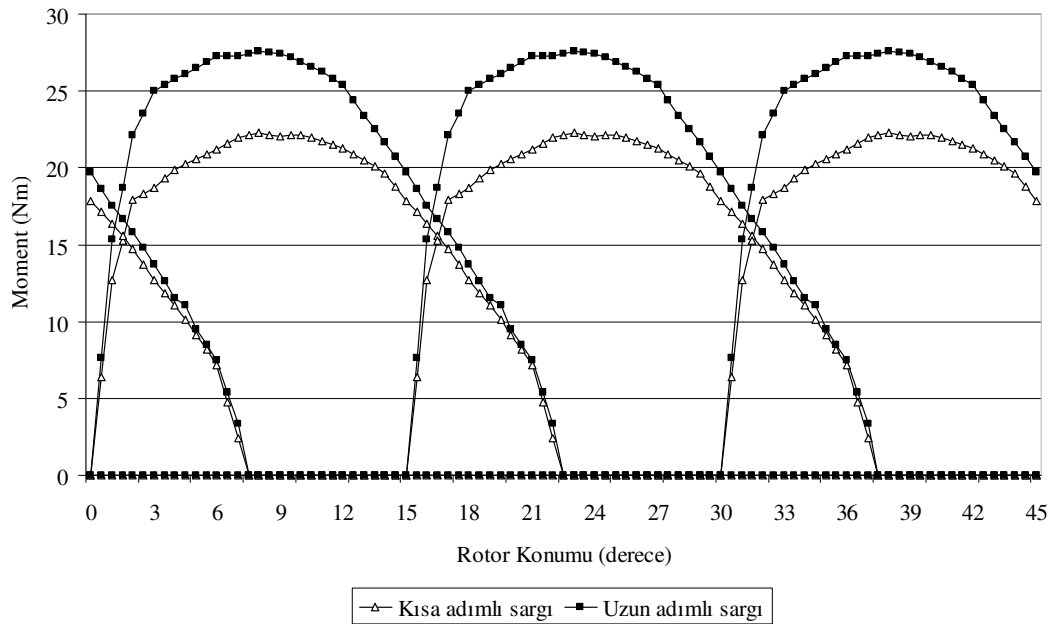


Şekil 5.11: Uzun adımlı sargılı D.R.A.R.M.'nin halkalama akısının faz akımı ve rotor konumuna bağlı değişimi

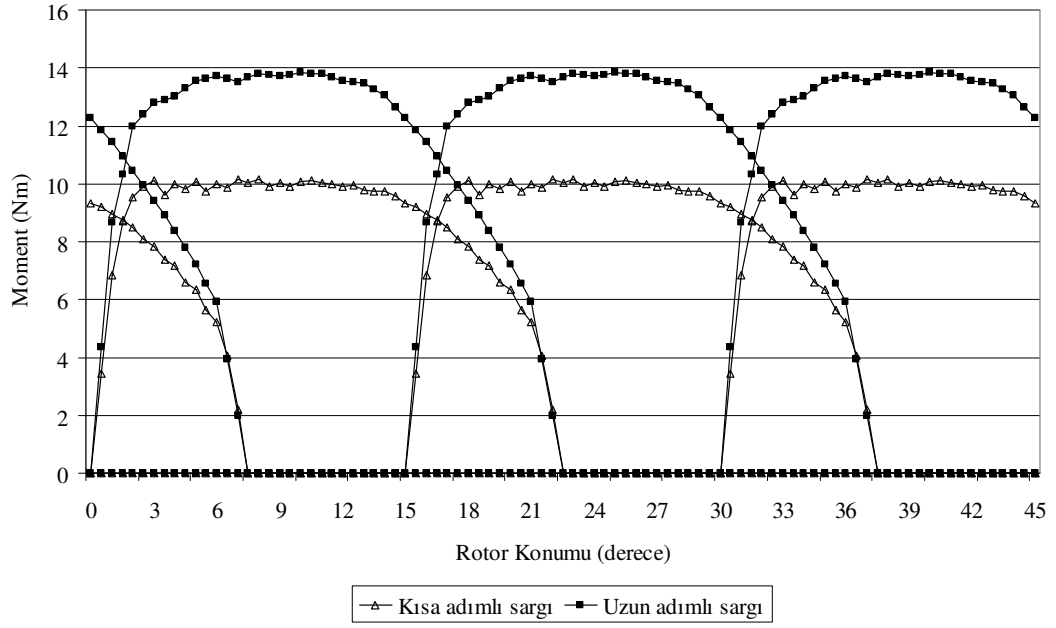


Şekil 5.12: Uzun adımlı sargılı D.R.A.R.M.'de üretilen momentin rotor konumu ve faz akımına bağlı değişimi

Şekil 5.13'te, kısa adımlı sargılı D.R.A.R.M.'nin nominal akımı olan 25A, Şekil 5.14'te ise nominalden düşük bir akım değeri olan 15A ve eşit bakır kayıplarında karşılaştırma yapılırken uzun adımlı sargılı D.R.A.R.M.'nin sırasıyla bu değerlere karşılık gelen faz akımları olan 14,84A ve 8,90A ile çalışması durumundaki statik moment eğrileri aynı eksen üzerinde verilmektedir.



Şekil 5.13: Statik moment profilleri ($i_{ka}=25A$, $i_{ua}=14,84A$)



Şekil 5.14: Statik moment profilleri ($i_{ka}=15A$, $i_{ua}=8,90A$)

Kısa adımlı sargılı D.R.A.R.M.'nin faz akımının sıfır ile nominal değeri arasında 5A'lık adımları ve eşit bakır kayıplarında uzun adımlı sargılı D.R.A.R.M.'nin bu akımlara karşılık gelen faz akımları için üretilen moment değerleri Tablo 5.3'te, moment dalgalılık oranları ise Tablo 5.4'te karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Tablo 5.3: Kısa ve uzun adımlı sargılı D.R.A.R.M. için üretilen ortalama moment değerleri ve momentteki değişim

Kısa adımlı sargılı D.R.A.R.M.		Uzun adımlı sargılı D.R.A.R.M.		
Faz Akımı (A)	Ortalama Moment (Nm)	Eşdeğer Faz Akımı (A)	Ortalama Moment (Nm)	Momentteki Değişim Oranı (%)
5	1,342	2,97	2,036	+ 51,71
10	5,030	5,94	6,767	+ 34,53
15	9,521	8,90	12,900	+ 35,49
20	14,655	11,87	19,650	+ 34,08
25	19,885	14,84	24,387	+ 22,65

Tablo 5.4: Kısa ve uzun adımlı sargılı D.R.A.R.M. için üretilen momentteki dalgalılık oranları ve moment dalgalılığındaki değişim

Kısa adımlı sargılı D.R.A.R.M.		Uzun adımlı sargılı D.R.A.R.M.		
Faz Akımı (A)	Dalgalılık Oranı (A)	Eşdeğer Faz Akımı (A)	Dalgalılık Oranı (A)	Dalgalılıktaki Değişim Oranı (%)
5	5,88	2,97	5,47	- 6,97
10	9,25	5,94	8,08	- 12,65
15	14,04	8,90	21,08	+ 50,14
20	21,60	11,87	31,66	+ 46,57
25	32,76	14,84	42,78	+ 30,58

Kısa adımlı sargılı D.R.A.R.M. için elde edilen ve Tablo 5.3'te verilen moment ve Tablo 5.4'te verilen moment dalgalılığı oranları incelendiğinde, motorun nominal akımla çalışması durumunda dalgalılık oranının %32,76 olarak gerçekleştiği görülmektedir. Bu değer, geleneksel iç rotorlu yapıdaki üç fazlı A.R.M.'ler ile karşılaştırıldığında olağan bir değerdir. Taşıtın bu akım değerini hızlanma esnasında veya taşıtın ağırlığının yüksek olduğu durumda çekeceği düşünüldüğünde, taşıtın ağırlığına da bağlı olarak artan atalet, bu dalgalılık oranının taşıta etkisinin azalmasına neden olacaktır. Daha düşük akım değerleri ile çalışma durumunda ise dalgalılık oranı, üretilen momentin ortalama değerine bağlı olarak azalmaktadır. Bunun en önemli nedeni manyetik doyma etkisinin azalmasıdır. Momentteki çökmelerin azalması taşıtın ataletiyle birleşince, dalgalılık oranının taşıtın performansı ve sürüş konforunu etkilemeyecek düzeye düşeceği öngörülmektedir.

Moment üretim kapasitesini artırmak amacıyla, iç rotorlu A.R.M.'lerde uygulama alanı bulan uzun adımlı sargı yapısı, tasarlanan D.R.A.R.M.'ye uygulanmaktadır. Gerçekleştirilen statik analizler sonucunda nominal sargı akımı referans alındığında, uzun adımlı sargılı makinada üretilen momentin, kısa adımlı sargı yapısına göre %22,65 oranında arttığı görülmektedir. Tasarlanan motorun kullanılması öngörülen uygulama alanı dikkate alındığında, bu orandaki moment artışının önemli bir avantaj sağlayacağı açıktır. Bununla birlikte momentteki bu artış, moment dalgalılığında

yaklaşık %30'luk artışı da beraberinde getirmektedir. Bu da D.R.A.R.M. için büyük bir olumsuzluk yaratmaktadır.

Kısa adımlı sargı yapısı için nominalden düşük bir akım değeri olan 15A ve uzun adımlı sargı yapısında bu değere karşılık gelen faz akımı değerinde çalışma durumunda ise üretilen moment değerinde %35,49'luk artış görülmesine karşın, statik moment profilleri incelendiğinde moment dalgalılığı da bu değerler için yaklaşık olarak %50 oranında artmaktadır (Tablo 5.3-5.4).

Buna göre, düşük akımlı çalışma koşullarında uzun adımlı sargılı D.R.A.R.M.'de üretilen momentin arttığı, moment dalgalılığının ise azaldığı görülmektedir. Nominal değere yakın akımla çalışma esnasında ise, üretilen momentteki artış miktarı doyma etkisinden dolayı daha sınırlı olarak kalmaktadır. Moment dalgalılığı ise oldukça yüksek oranda artış göstermektedir. Tasarlanan motorun uygulama alanındaki çalışma şartları göz önünde tutulduğunda, böyle bir motorun çoğunlukla %50. I_n ile %100. I_n değerleri arasında çalıştığı sonucuna varılmaktadır. Bu nedenle, bu akım aralığında çalışma durumları için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, uzun adımlı sargılı D.R.A.R.M.'nin kısa adımlı sargılı D.R.A.R.M.'ye oranla yaklaşık olarak %30 daha fazla moment ürettiği, dalgalılığın da ortalama olarak %40 oranında arttığı görülmektedir. Bu değerler, diğer endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanan geleneksel iç rotorlu A.R.M.'ler ile bunların uzun adımlı sargılı uygulamaları ile benzer değerlerdir.

Dalgalılık oranının yüksek olması makinadaki gürültü miktarının da artması anlamına gelmektedir. Tüm bu şartlar gözönünde tutulduğunda tasarlanan D.R.A.R.M. için uzun adımlı sargı yapısının taşıt tahrik uygulamaları için dalgalılık kontrolü yapılmadan kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varılmaktadır.

6. DİNAMİK ANALİZ

Simülasyon, teorik ya da gerçek fiziksel bir sisteme ait neden-sonuç ilişkilerinin bir bilgisayar modeline yansıtılmasıyla, değişik koşullar altında gerçek sisteme ait davranışların bilgisayar modelinde izlenmesini sağlayan bir modelleme tekniğidir [89]. Sistemlerin tasarımı, yenilenmesi ve geliştirilmesi aşamalarında bilgisayar destekli simülasyon yazılımlarının kullanılması önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu sayede, uzun ve yüksek maliyetli deneysel çalışmalar yardımıyla ulaşılabilecek sonuçlar daha kısa sürede ve düşük maliyetle elde edilmektedir.

Lineer olmayan yapıya sahip olması ve doyma altında çalışması nedeniyle A.R.M.'nin farklı çalışma koşullarındaki dinamik davranışının doğru biçimde analiz edilebilmesi için, simülasyon çalışmaları büyük önem taşımaktadır. İyileştirilmiş makina boyutlarının ve davranışının doğru biçimde belirlenmesinde manyetik devreyi oluşturan bileşenlerin özellikleri ve değerlerinin doğru biçimde bilinmesi gereklidir. Ayrıca, belirtilen matematiksel ifadelerin doğru biçimde çözümü de büyük önem taşıyan ve zaman alan işlemlerdir. Bu nedenle, tüm endüstriyel sistemlerde olduğu gibi elektrik makinalarının tasarımında da bilgisayar desteğinin kullanılması, özellikle yüksek performanslı ve yüksek maliyetli sistemlerde tasarımcılara önemli avantaj sağlamaktadır.

Tez çalışmasının bu bölümünde, tasarlanan D.R.A.R.M.'ye ait dinamik simülasyon çalışması sunulmaktadır. Bu amaçla, MATLAB-Simulink yazılımından faydalanılmaktadır. D.R.A.R.M.'nin konum açısı ve faz akımına bağlı olarak bir önceki bölümde sonlu elemanlar analizi yardımıyla akım ve rotor konumuna bağlı olarak elde edilen halkalama akısı ve statik moment eğrileri, simülasyon çalışmasında kullanılmaktadır. Bu sayede makinanın farklı çalışma koşullarındaki dinamik analizi yapılmakta ve çalışma performansı izlenmektedir. Ek olarak, motorun sürücü devresi ile kontrol devresine konum bilgisini sağlayan konum algılayıcılar da simülasyona dahil edilmektedir.

6.1 Motorun Matematiksel Modelinin Elde Edilmesi

Elektrik makinaları için, makina hangi tipte olursa olsun, dinamik davranışlarını etkileyen birçok parametre vardır. Deneysel çalışma koşullarında makina testleri yapılırken değişen giriş parametrelerine bağlı olarak çıkış büyüklüklerinin değişimi görülebilmeye karşın, laboratuvar koşulları dışında bu analizlerin yapılması oldukça zor ve karmaşık işlemler gerektirir. Bu amaçla, farklı yöntemler yardımıyla makinanın davranışını ifade eden matematiksel denklemler elde edilerek makinanın modeli oluşturulur. Bu sayede bilgisayar ortamında kurulan sistemin cevabı kolay bir şekilde elde edilebilir.

Tasarlanan üç fazlı D.R.A.R.M. için gerilim eşitliği her bir faz için,

$$V_j = R_j \cdot i_j + \frac{d\phi_j(i_j, \theta_j)}{dt} \quad j = 1 \dots 3 \quad (6.1)$$

şeklinde yazılır. Buradan yola çıkılarak faz akımının zamana göre değişimi,

$$\frac{di_j}{dt} = \left(\frac{\partial \phi_j}{\partial i_j} \right)^{-1} \cdot \left(V_j - R_j \cdot i_j - \frac{\partial \phi_j}{\partial \theta_j} \cdot \omega \right) \quad (6.2)$$

olarak ifade edilir. Burada j faz sayısını temsil eder. ω ise rotorun açısal hızıdır ve rotor konumu cinsinden,

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (6.3)$$

olarak yazılır. Üretilen elektromanyetik moment ise mekanik parametreler yardımı ile,

$$\sum_{j=1}^n T_j(i_j, \theta_j) - T_{yük} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega \quad (6.4)$$

şeklinde yazılır. Burada T_j faz momenti, $T_{yük}$ yük momenti, J ve B ise sırasıyla atalet momenti ve sürtünme katsayısıdır. Kısa adımlı sargı yapısı nedeniyle faz sargıları arasındaki ortak endüktans etkisi ihmal edilmektedir.

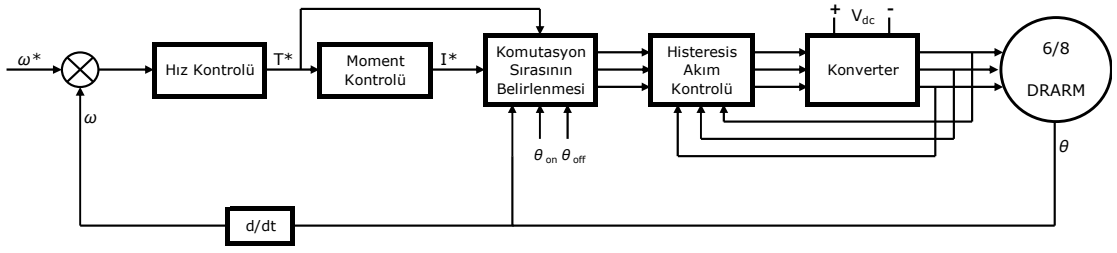
6.2 D.R.A.R.M.'nin Dinamik Simülasyonu

Çalışma prensibine bağlı olarak, A.R.M.'lerin bir sürücü devre yardımıyla beslenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, A.R.M.'nin dinamik simülasyon blokları oluşturulurken, sürücü devresini oluşturan ve motorun çalışması için gerekli olan konum algılayıcı, kontrol ve konverter devreleri gibi tüm bileşenler uygun şekilde simülasyona dahil edilmelidir. Bu sayede farklı çalışma koşullarında motorun ve sürücünün davranışları incelenebilmektedir. Benzer şekilde farklı sürücü devre yapıları ve motor kontrol yöntemleri de simülasyona katılabilir.

Bölüm 3'te açıklandığı gibi A.R.M.'ler, her birinin diğerine göre çeşitli avantaj ve dezavantajları olan farklı konverter devreleri kullanılarak sürülebilmektedir. Bu konverter devreleri motor sürücüsünün güç katını oluşturmaktadır. Burada, Şekil 3.20'de gösterilen ve çalışması açıklanan asimetrik köprü konverter olarak adlandırılan konverter devre yapısı simüle edilmektedir.

Konverter devresindeki yarı iletken güç anahtarlarının tetiklenmesi ise, kontrol devresi tarafından yapılmaktadır. Tetikleme zamanlarının belirlenmesi için geleneksel veya modern kontrol yöntemleri kullanılarak modele uyarlanabilir. Burada ise, sabit açılı kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Bu yöntemde yarı iletken anahtarlar θ_{on} anında iletme sokularak faz sargılarına pozitif gerilim uygulanır. θ_{off} anında ise kesime alınarak, faz akımının sıfıra düşmesi sağlanır. İletim süresi ($\theta_{off} - \theta_{on}$), yöntemin adından da anlaşılacağı gibi sabittir.

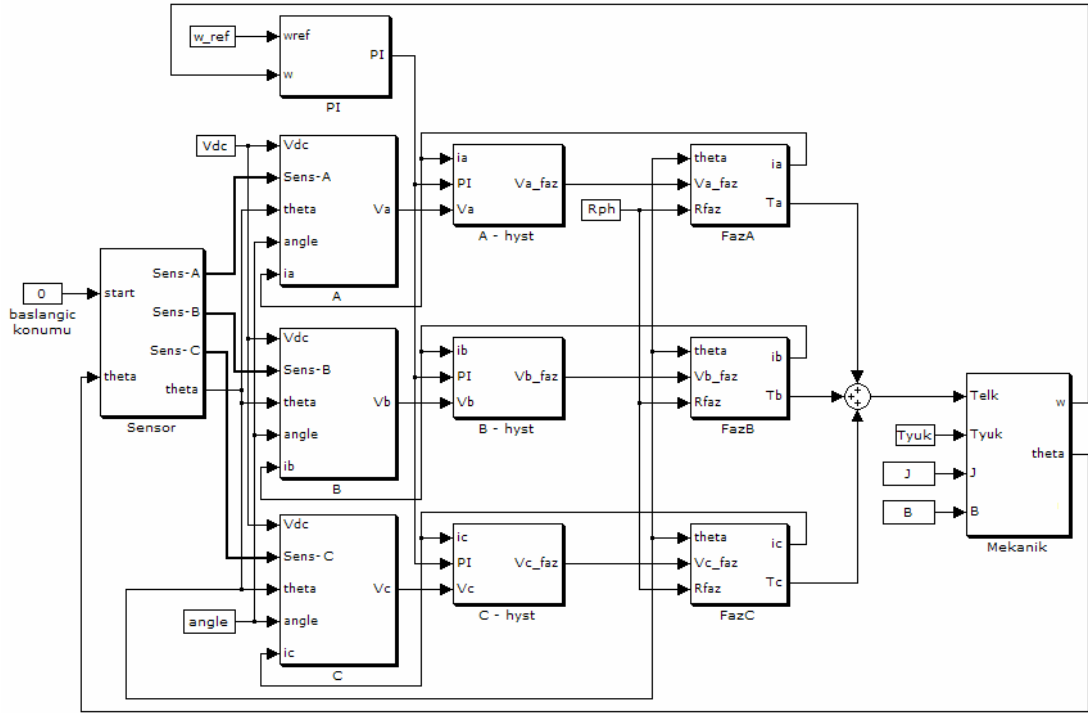
Motorun kapalı çevrim kontrol blok diyagramı Şekil 6.1'de verilmektedir. Burada iki ayrı kapalı çevrim görülmektedir. Dış çevrimde konum algılayıcılarla birlikte motor, hız kontrolörü ve sürücü devre bulunmaktadır. İç çevrim ise akım algılayıcılar, referans akım üretici, akım kontrolörü ve komutasyon sinyal üreticiden oluşmaktadır.



Şekil 6.1: D.R.A.R.M.'nin kapalı çevrim kontrol blok şeması

Bu kontrol devresinin çalışması ise şu şekilde özetlenmektedir. Rotor konum bilgisi konum algılayıcılar tarafından sağlanır. Buradan denklem 6.3 yardımıyla açısal hız bilgisi elde edilir. Referans hız motor hızıyla karşılaştırılarak hız hatası hesaplanır ve hız kontrolörüne uygulanır. Hız kontrolörünün çıkışı referans moment değeridir. Buna göre her bir faz için referans akım değeri üretilir. Referans akım değeri ve rotor konumu ile iletim ve kesim açıları komutasyon bloğu tarafından değerlendirilerek hangi fazın enerjilendirileceği belirlenir. Sargı akımları sürücü devre çıkışında akım algılayıcılar tarafından algılanarak akım kontrolörüne iletilir. Akım kontrolörü ise uygun faz sargısı için uygun anahtarlama elemanlarının anahtarlama zamanlarını belirler [90].

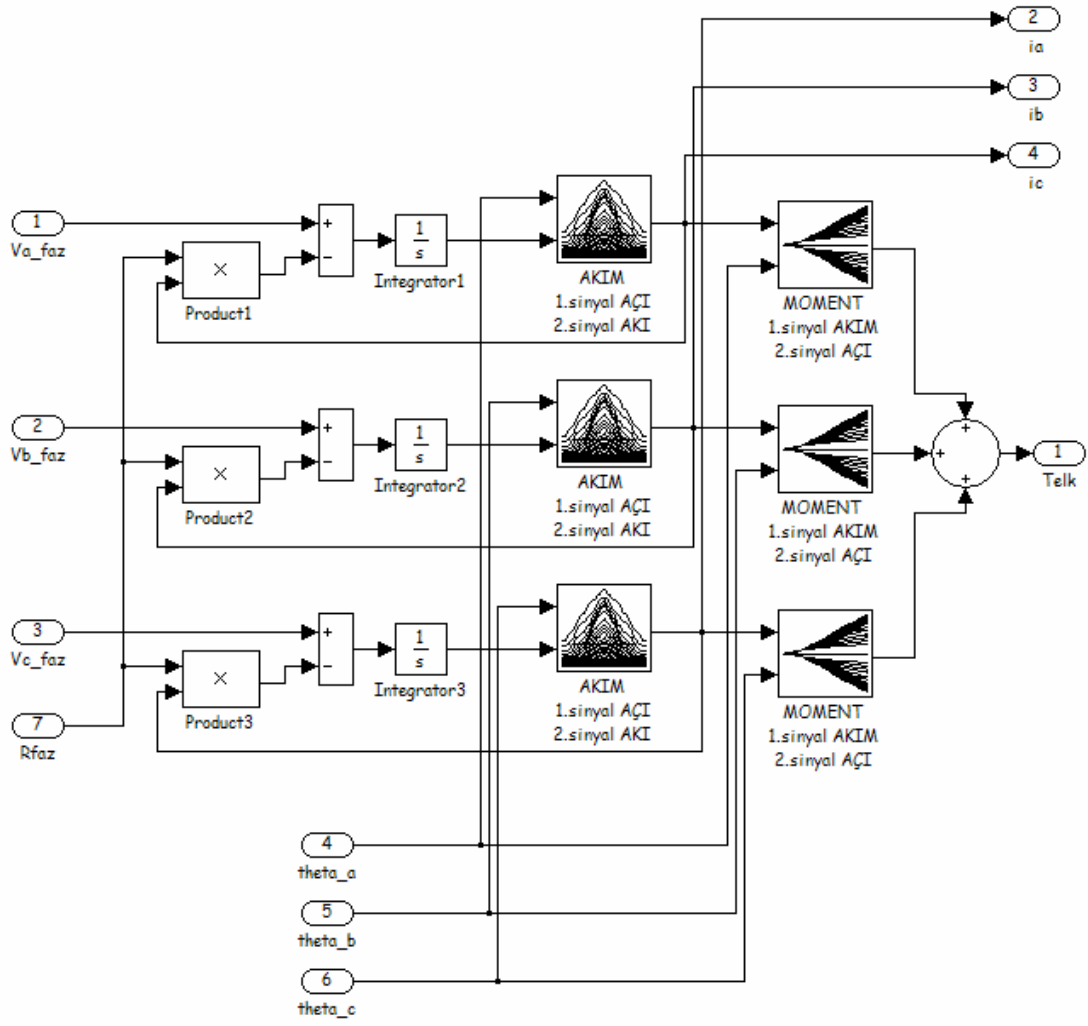
Şekil 6.2'de motor ve sürücü devrenin MATLAB-Simulink ortamında geliştirilen blok diyagramları görülmektedir. Referans hız değeri, yük momenti ve sabit açılı kontrol yöntemi için gereken iletim açısı değeri başlıca giriş parametreleridir. Bunun yanında besleme gerilim değeri, durağan haldeki motorun başlangıç konumu ve faz direnci ile motorun atalet momenti ve sürtünme katsayısı da farklı blokların kullandığı giriş bilgileridir.



Şekil 6.2: D.R.A.R.M. simülasyonu ana blok şeması

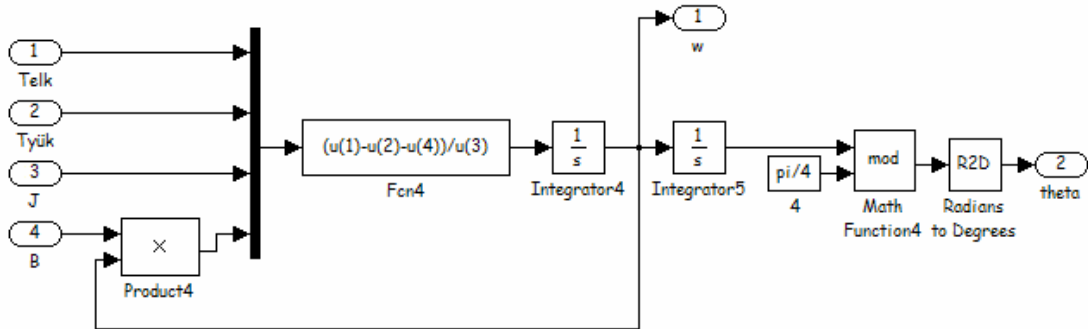
Motorun her bir faz sargısına ilişkin simülasyon blokları oluşturulurken denklem 6.1'den faydalanılmaktadır. D.R.A.R.M.'nin manyetik analizi ile elde edilen halkalama akısı ve moment değerleri, simülasyonun gerilim eşitliklerini içeren kısmına, iki boyutlu look-up tablolar olarak dahil edilmektedir (Şekil 6.3). Bu değerlerin doğru olarak elde edilmesi ve kullanılması, simülasyonun doğruluğunu da doğrudan etkileyeceğinden büyük önem taşımaktadır.

Her bir faz sargısına uygulanan ve anahtarlanma zamanları kontrolör tarafından belirlenmiş olan gerilimler ve konum bilgisi bu bloğun temel giriş bilgileridir. Her bir faza ait akı ve moment bloklarına farklı konum bilgisinin uygulanma nedeni, fazlar arasındaki açı farkıdır. Her fazdaki akı ve moment blokları özdeş olduğundan, konum algılayıcılardan elde edilen konum bilgisi, 15° kaydırılarak her bir faza uygulanmaktadır.



Şekil 6.3: Faz sargıları alt bloğu

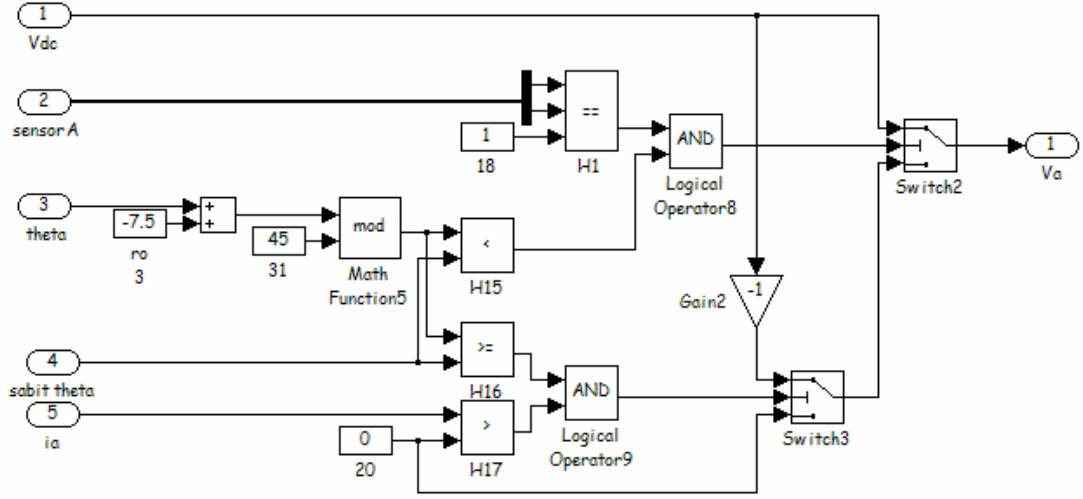
Şekil 6.4'te, motorun mekanik parametreleri yardımıyla denklem 6.3 ve 6.4'ten faydalanılarak oluşturulan blok şeması görülmektedir. Bu bloğun ana çıktısı, rotorun açısal hızıdır.



Şekil 6.4: Mekanik büyüklükler alt bloğu

Açısal hız bilgisi, integral bloğundan geçirilerek denklem 6.3'e göre, rotor konumu elde edilmektedir. Rotor konum bilgisinin kullanıldığı diğer simülasyon blokları 45°'lik peryotlarla oluşturulduğundan dolayı, burada elde edilen konum bilgisi 45°'lik bir mod bloğundan geçirilmektedir.

Şekil 6.5'te motorun bir fazına ait komutasyon alt bloğuna ilişkin simülasyon çalışması verilmektedir. Burada konum algılayıcılardan gelen sinyallere ve rotor konumuna göre faz sargısının iletme sokulma zamanı belirlenmektedir. Faz sargısının iletimde kalma süresi kullanılan kontrol yöntemi gereğince sabit olduğundan dolayı, sargının kesime sokulacağı zaman da burada hesaplanmaktadır.



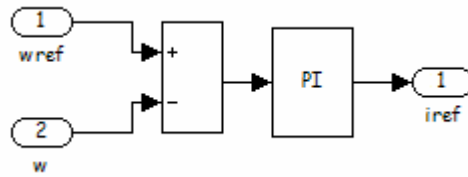
Şekil 6.5: Komutasyon alt bloğu

Faz eşitliklerinde kullanılan akı ve moment bloklarına sağlanan konum bilgisine benzer şekilde, her bir fazın komutasyon bloğuna sağlanan konum bilgisi de 15° kaydırılarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda her bir faza ait akım bilgisi de sürekli olarak izlenerek, kurulan mantık devresi yardımıyla, faz sargısının kesime sokulmasının ardından akım sıfıra düşene kadar faz sargısının negatif V_{dc} gerilimi görmesi sağlanmaktadır. Konverter devredeki yarı iletken anahtarlama elemanları üzerinde oluşacak gerilim düşümleri ihmal edilmektedir.

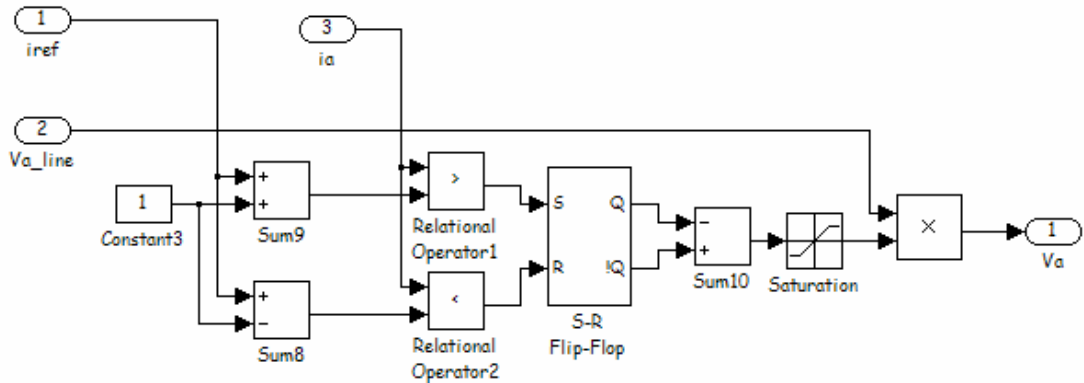
Elektrik makinalarının mekanik dinamikleri yüksek atalet momentinden dolayı oldukça yavaş olduğundan, geleneksel PI kontrolör uygun dinamik cevabın elde

edilmesinde çoğunlukla yeterli olmaktadır. Bununla birlikte, A.R.M.'nin durum denklemleri nonlinear yapıda olduğundan dolayı, kontrolör parametrelerinin hesaplanması oldukça zor ve karmaşıktır. Bu nedenle bu çalışmada kontrolör parametreleri deneme-yanılma yöntemiyle elde edilmektedir.

Referans hız değeri ile gerçek hız bilgisi anlık olarak karşılaştırılarak, PI kontrolör tarafından referans akım bilgisi üretilmektedir (Şekil 6.6). Komutasyon bloğu çıkışında elde edilen gerilim dalga şekli, Şekil 6.7'deki histeresiz akım kontrolü alt bloğu üzerinden faz sargılarına uygulanmaktadır. Burada histeresiz kontrolör, SR Flip-Flop kullanılarak elde edilmiştir. Histeresiz bant genişliği olarak $\pm 1A$ 'lık akım büyüklüğü tanımlanmaktadır. Uygulamada bu bant aralığının genişliği, kontrol devresinin güç katında kullanılan yarı iletken anahtarlama elemanlarının çalışma hızıyla doğrudan ilişkilidir. Her bir faz sargısını besleyen yarı iletken anahtarlama elemanlarının anahtarlama anları, gerçek akım değeri akımın \pm sınırlarına göre sınırlandırılarak belirlenmektedir.

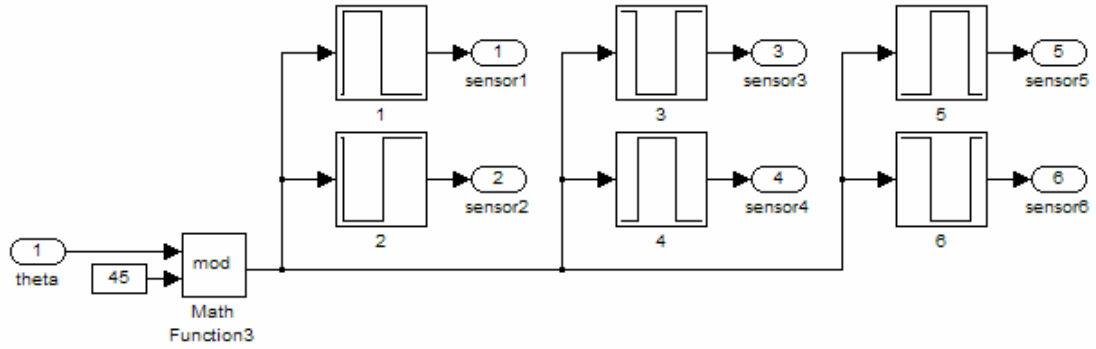


Şekil 6.6: PI kontrol alt bloğu

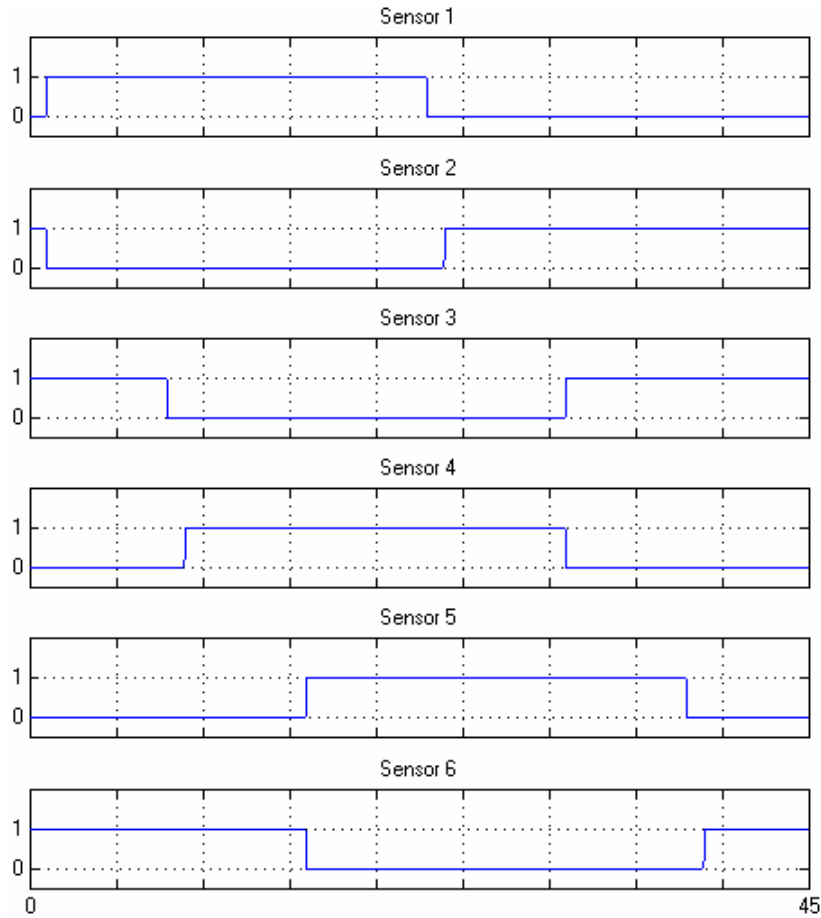


Şekil 6.7: Histeresiz akım kontrolü alt bloğu

Uygun faz sargısının doğru zamanda enerjilendirilmesi, A.R.M.'nin çalışması esnasında optimum performansın elde edilmesi ve moment dalgalılığının azaltılması için büyük önem taşır. Son yıllarda algılayıcısız kontrole yönelik çalışmalar yoğun olarak yapılmakla birlikte, bu çalışmada rotor konum bilgisinin yüksek doğrulukla elde edilmesi için optik algılayıcılar kullanılmakta ve bunlara ait çıkış sinyalleri simülasyonda gözlenebilmektedir (Şekil 6.8 – 6.9).



Şekil 6.8: Konum algılayıcı alt bloğu

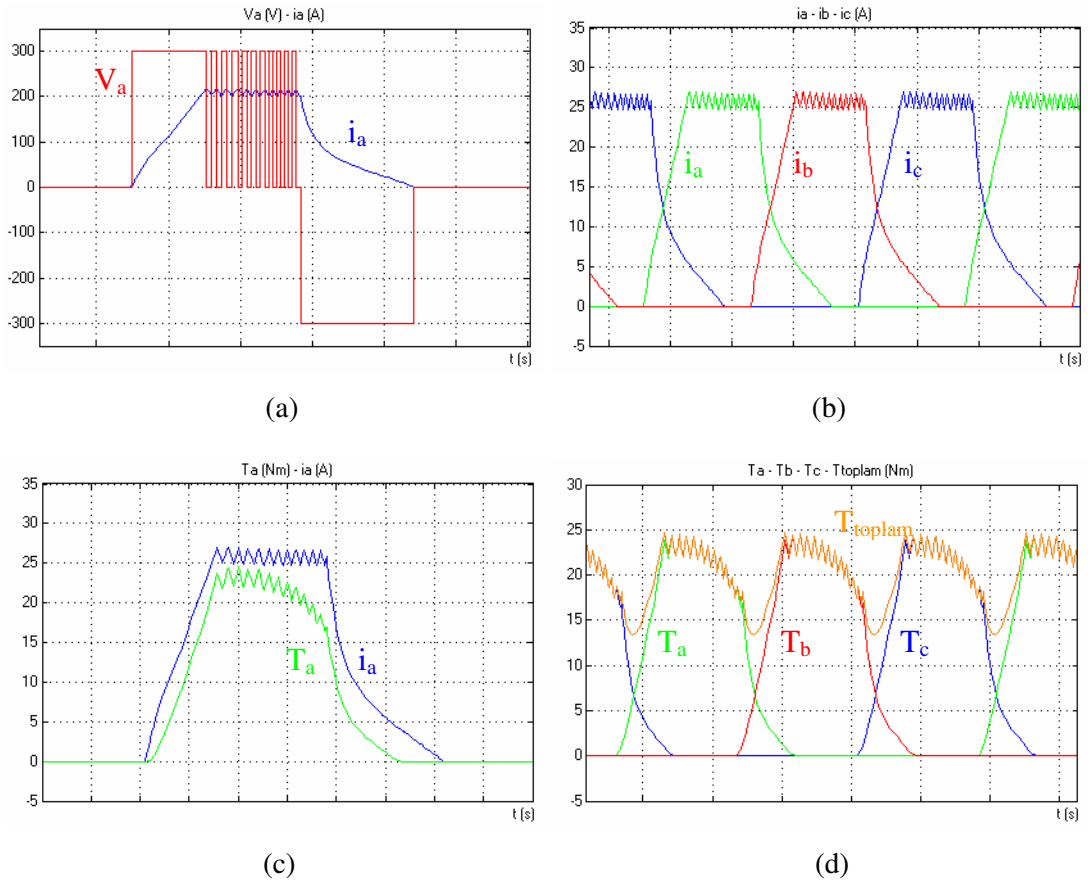


Şekil 6.9: Optik algılayıcı çıkış sinyalleri

6.3 Dinamik Simülasyon Sonuçları

Taşıtlarda sürüş esnasında birçok parametre taşıtın sürüş koşullarını ve performansını etkilemektedir. Bu parametrelerden başlıcaları taşıt ağırlığı, hızlanma ivmesi, yol yüzeyinin yatayla yaptığı açı olarak sayılmakla beraber yol ve hava sürtünme katsayısı, taşıtın ön yüzey alanı ile ortamdaki rüzgar hızı da belirleyici olmaktadır. Sürüş esnasında dinamik olarak değişen bu parametreler, taşıta tahrik gücünü sağlayan motorun çalışma koşullarının da sürekli olarak değişmesine neden olur. Çalışmanın bu bölümünde motorun farklı çalışma hızları ve yüklenme koşullarında çalışması durumları, oluşturulan simülasyon blokları yardımıyla simüle edilmektedir.

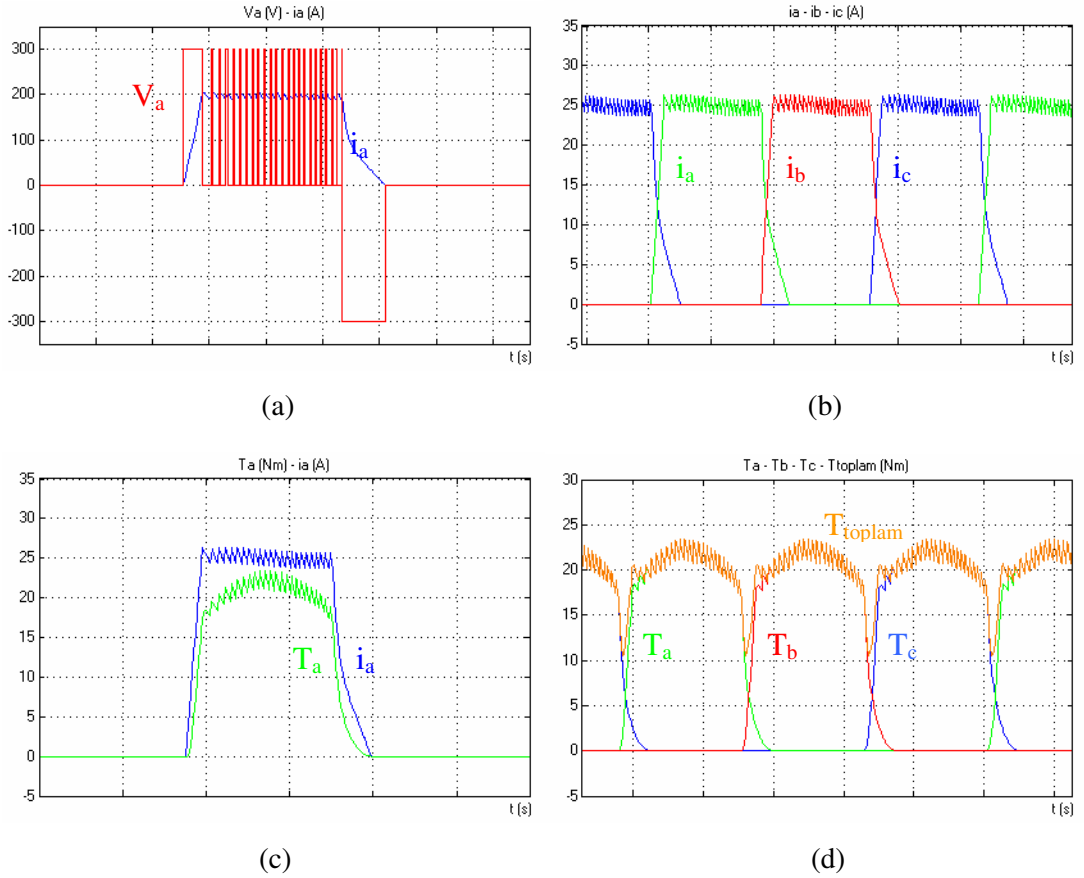
Şekil 6.10'da motorun nominal yüklü durumda ve 1100d/dk hızla çalışırken elde edilen sürekli haldeki zamana bağlı dalga şekilleri verilmektedir.



Şekil 6.10: $T_{yük}=20\text{Nm}$, $n=1100\text{d/dk}$ için sürekli haldeki zamana bağlı (a) $V_a(\text{V})-i_a(\text{A})$, (b) $i_a-i_b-i_c(\text{A})$, (c) $T_a(\text{Nm})-i_a(\text{A})$, (d) $T_a-T_b-T_c-T_{toplam}(\text{Nm})$ dalga şekilleri,

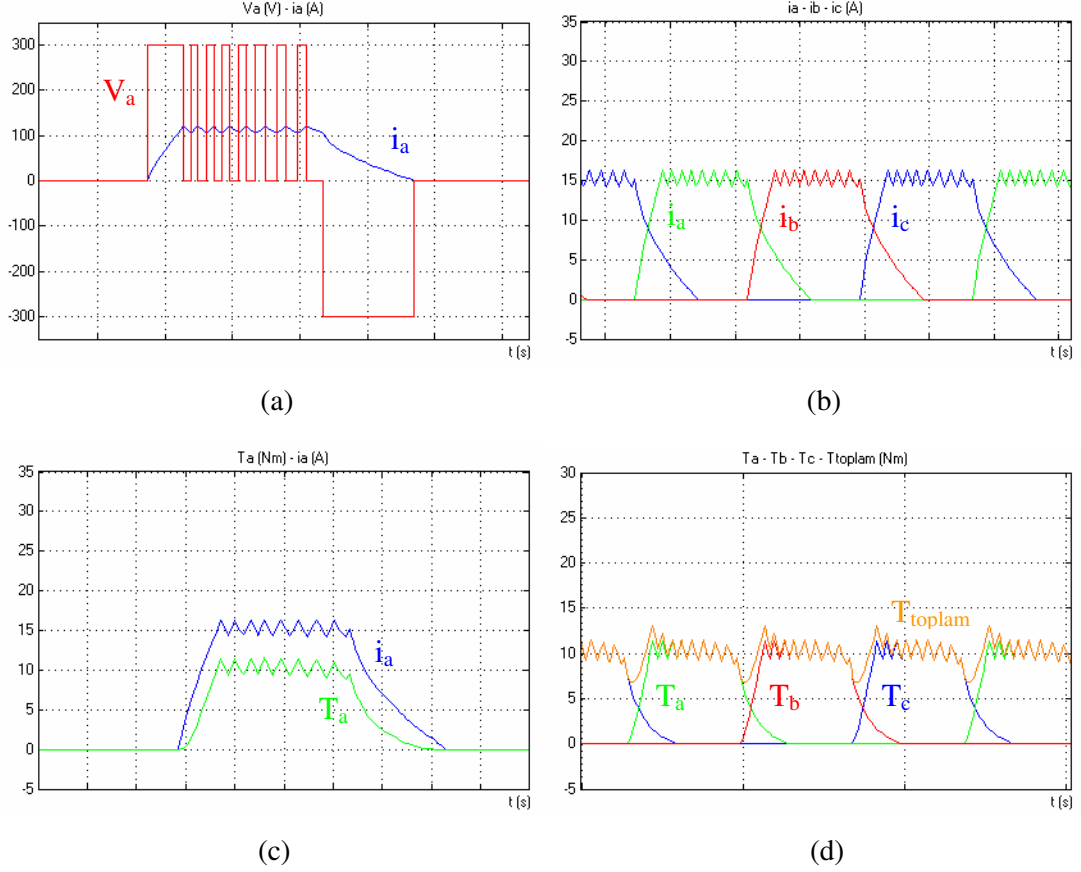
Tahrik motorunun nominal yüklü durumda çalışması çoğunlukla duran taşıtın hızlanması, yokuş tırmanma veya taşıtın yüklü halde sürüşü gibi sürüş şartlarında gerçekleşmektedir. Bu durumlarda tahrik motoru da çoğunlukla nominal, bazen de aşırı yüklü durumda çalışmaktadır. Bunun gibi tahrik motorunu zorlayıcı şartların üstesinden gelebilmek için, motorun yüksek moment değeri üretebilmesi gerekmektedir. Şekil 6.10.a'da, motorun bir fazına ait gerilim ve akım dalga şekilleri verilmektedir. Aynı eksen üzerinde her iki dalga şeklini kolayca izleyebilmek amacıyla burada akım dalga şekli için kazanç değeri sekiz olarak alınmaktadır.

Şekil 6.11'de ise motorun yine nominal yüklü durumda, fakat daha düşük hızla çalışırken elde edilen sürekli haldeki zamana bağlı dalga şekilleri verilmektedir.



Şekil 6.11: $T_{yük}=20Nm$, $n=500d/dk$ için sürekli haldeki zamana bağlı (a) $V_a(V)$ - $i_a(A)$, (b) $i_a-i_b-i_c(A)$, (c) $T_a(Nm)$ - $i_a(A)$, (d) $T_a-T_b-T_c-T_{toplam}(Nm)$ dalga şekilleri,

Şekil 6.12’de ise, taşıttın gereksinimi olan momentin küçük olduğu çalışma durumlarındaki sürüş şartlarına karşılık gelen simülasyon sonuçları verilmektedir.



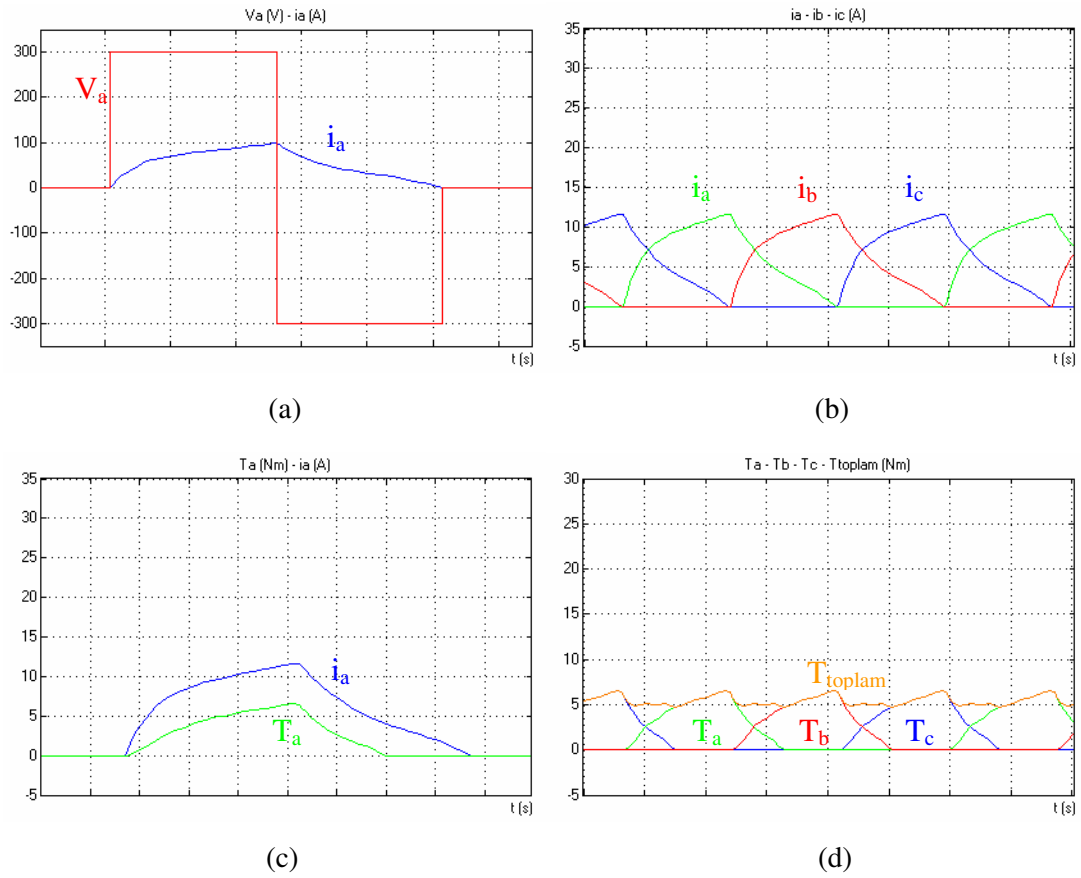
Şekil 6.12: $T_{yük}=10\text{Nm}$, $n=1100\text{d/dk}$ için sürekli haldeki zamana bağlı (a) $V_a(\text{V})-i_a(\text{A})$, (b) $i_a-i_b-i_c(\text{A})$, (c) $T_a(\text{Nm})-i_a(\text{A})$, (d) $T_a-T_b-T_c-T_{toplam}(\text{Nm})$ dalga şekilleri,

Farklı çalışma koşulları için elde edilen tüm bu dalga şekillerinden görüldüğü gibi akım, referans değerinde histeresis kontrol ile tutulmaktadır. Histeresis bant aralığı, Şekil 6.7’de gösterilen histeresis kontrol bloğunda $\pm 1\text{A}$ olacak şekilde tanımlanmıştır. Herhangi bir anda faz sargılarından sadece biri enerjilendirilmiş durumdadır. Komutasyon anlarında moment dalga şeklinde görülen çökmeler nedeniyle, özellikle akım değerinin yüksek olduğu çalışma şartlarında moment dalgalılığı da yüksek değerlere ulaşmaktadır.

Dinamik simülasyon çalışmasından elde edilen veriler yardımıyla, motorun nominal değerlerinde çalışması durumunda (Şekil 6.10) verim yaklaşık %73 olarak hesaplanmaktadır. Motorun Şekil 6.11 ve Şekil 6.12’de verilen düşük yüklü olarak

çalışması koşullarında ise verim değeri %60'lar seviyesine düşmektedir. Bölüm 5'te açıklandığı gibi motorun statik manyetik analizi, iki boyutlu sonlu elemanlar analizi ile gerçekleştirilmiş ve statik moment profilleri çıkartılmıştır. Bu çalışmanın üç boyutlu olarak yapılması ile daha gerçekçi sonuçlara ulaşılabileceği ve elde edilen statik moment değerlerinde %20'lere varan bir artış elde edileceği düşünülmektedir. Bu şartlarda ise yukarıda belirtilen verim değerlerinin sırasıyla nominal çalışma şartlarında %84, düşük yüklü çalışma şartlarında ise ortalama olarak %75'ler düzeyinde gerçekleşeceği öngörülmektedir. Sonlu elemanlar analizi yardımıyla elde edilen verilerin de, deneysel çalışma sonuçlarıyla %10-20'ler düzeyinde farklılık göstereceği düşünüldüğünde, D.R.A.R.M.'nin veriminin daha da yüksek değerlere ulaşacağı sonucuna varılmaktadır.

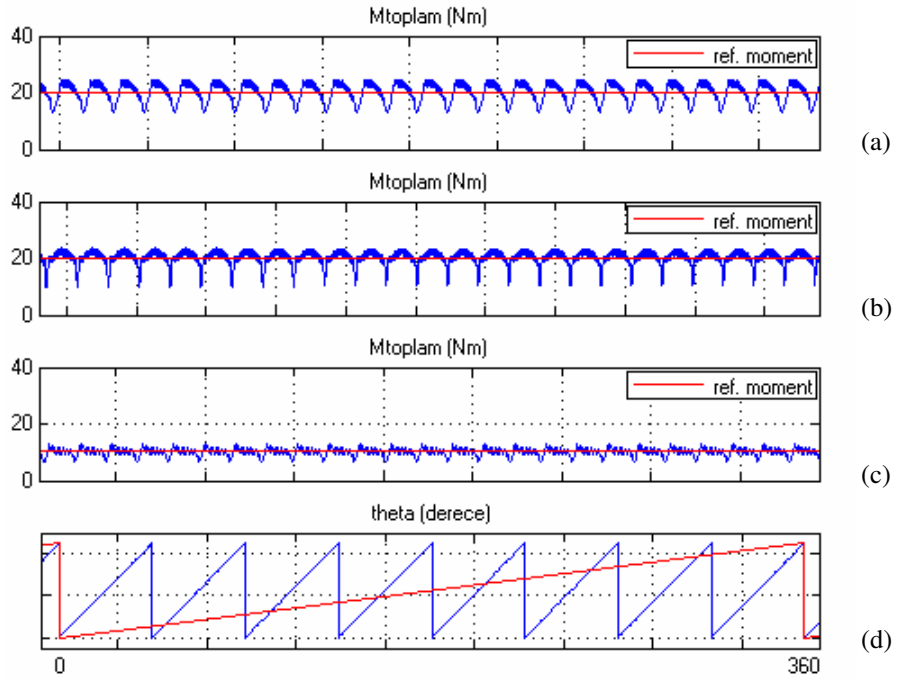
Yüksek hızlarda ise motor tek darbeli çalışma moduna geçmektedir. Bu çalışma durumuna ilişkin zamana bağlı sürekli hal dalga şekilleri Şekil 6.13'te verilmektedir.



Şekil 6.13: $T_{yük}=5Nm$, $n=2200d/dk$ için sürekli haldeki zamana bağlı (a) $V_a(V)$ - $i_a(A)$, (b) i_a - i_b - $i_c(A)$, (c) $T_a(Nm)$ - $i_a(A)$, (d) T_a - T_b - T_c - $T_{toplaml}(Nm)$ dalga şekilleri,

Önceki bölümlerde de açıklandığı gibi, tekerlek motorları ile tahrik edilen elektrikli taşıtlarda sürüş esnasında taşıtın performansını ve konforunu belirleyen en önemli etken momentteki dalgalılıktır. Tasarlanan motorun statik moment eğrilerinden faydalanılarak Bölüm 5’te hesaplanan moment dalgalılığının oluşumu ve faz geçişleri sırasında oluşan akım çökmelerinin toplam moment üzerindeki etkisi, Şekil 6.10-6.13’te verilen dalga şekilleri yardımıyla gözlenmektedir.

Motorun yükleme koşullarına göre moment dalgalılığının değişimi Şekil 6.14’ten kolaylıkla izlenmektedir. Burada farklı yükleme koşullarında motorun 360°’lik bir tam tur dönüşü için toplam moment dalga şekilleri verilmektedir. Her bir şekilde referans moment değeri kırmızı renkle gösterilmektedir.



Şekil 6.14: (a) $T_{yük}=20\text{Nm}$, $n=1100\text{d/dk}$ için, (b) $T_{yük}=20\text{Nm}$, $n=500\text{d/dk}$ için, (c) $T_{yük}=10\text{Nm}$, $n=1100\text{d/dk}$ için, sürekli haldeki $T_{toplam}(\text{Nm})$ dalga şekilleri, (d) rotor konum açısı

Buna göre özellikle Şekil 6.10.b’de faz geçişleri sırasında akım dalga şeklinde gözlenen çökmeler yüksek akımdan kaynaklanan doyma etkisiyle de birleşince, moment dalga şeklinde çökmeler görülmektedir. Bu da toplam momentte önemli oranda dalgalılık oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 6.14.a). Benzer şekilde, düşük

hızlarda faz geçişi sırasında akımda ve dolayısıyla momentte oluşan çökmeler de önemli oranda hissedilmektedir (Şekil 6.14.b). Buna karşın, düşük akımla çalışma koşullarında momentteki dalgalılık oranı azalmaktadır (Şekil 6.14.c). Bunun nedeni doyma etkisinin ortadan kalkmasıdır. Ortaya çıkan dalgalılık ise faz geçiş anlarında daha sınırlı boyutta yaşanan akım çökmelerinden dolayı oluşmaktadır. Şekil 6.14 yardımıyla izlenen dalga şekilleri incelendiğinde momentte görülen dalgalılığın, Tablo 5.3'te verilen dalgalılık oranlarını doğrular nitelikte olduğu sonucuna varılmaktadır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde toplumların enerji gereksinimleri, yaşam standartları ve gelişmişlik düzeyleri ile doğru orantılı olarak gün geçtikçe artmaktadır. Bu nedenle, kişi başına tüketilen enerji miktarı, toplumların gelişmişlik düzeyini ifade etmeye yarayan önemli bir kriterdir. Kişilerin yaşam ve çalışma mekanlarında çeşitli amaçlarla kullanılan enerjinin çevreye mümkün olduğunca az zarar verecek şekilde ve yüksek verimle üretimi ve tüketimi, geçmişten günümüze uzanan zaman içerisinde araştırmacıların üzerinde hassasiyetle çalıştıkları bir konu olmuştur. Gelecekte de böyle olmaya devam edecektir.

Ulaşımında kullanılan motorlu taşıtlar, günümüzde dünya üzerindeki enerji tüketiminin büyük bir kısmından sorumludur. Tarihsel süreçte yaşanan ve sonuçlarının ne kadar ağır olduğu yaşanılarak görülen enerji krizleri, bu alanda da enerjinin etkin kullanımının ne kadar önemli olduğunu bir kez daha ortaya koymuştur. Özellikle 1970'lerde yaşanan enerji krizi sonrasında hız kazanan, elektrik enerjisinin taşıt tahriğinde kullanımına yönelik çalışmalar günümüzde de hızlanarak ve yaygınlaşarak sürmektedir.

Yapısındaki batarya grubunda depolanan elektrik enerjisini kullanan ilk elektrikli taşıtlardan günümüze kadar uzanan süreç içerisinde, farklı sınıflardaki motorlu taşıtlar elektrikli ve hibrid yapılarda üretilmiş, bunlardan bazıları seri üretime geçmiş ve tüketicilerin kullanımına sunulmuştur. Günümüzde ise yakıt hücreleri, hidrojenin taşıt üzerinde depolanması ve temel enerji kaynağı olarak kullanılması, üzerinde Ar-Ge çalışmaları süren güncel teknolojiler olarak izlenmektedir.

Bu çalışma kapsamında, geçmişten günümüze kadar geliştirilen birçok elektrikli, hibrid ve yakıt hücreli taşıtlar ile bunların tahrik sistemleri incelenmiş, birbirlerine göre üstün ve zayıf yönleri karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar ortaya konulmuştur.

Buna göre, literatüre giren elektrik tahrikli taşıtların büyük kısmında tercih edilen tek motorlu yapı, elektrikli tahrik sistemini ve kontrolünü basitleştirmekle birlikte, taşıtın güç zincirine birçok mekanik eleman eklenmesini gerekli kılmaktadır. Bu da, çalışmanın önceki bölümlerinde açıklandığı gibi, taşıtın toplam veriminin azalmasına neden olmaktadır. Bu sorunların önüne geçmenin en basit ve temel yolu, taşıt tahrik sisteminde birden fazla sayıda tahrik motoru kullanmaktır.

Bu çalışmada, bir elektrikli taşıtın tahrik sisteminde taşıtın tekerlek tahriğini sağlayacak bir elektrik motoru tasarlanmıştır. Motor topolojisi olarak yapısı en basit fakat denetimi bir o kadar karmaşık olan anahtarlı relüktans motoru tercih edilmiştir. Motor, taşıtın tekerlek jantının içine yerleştirilmesi amacıyla dış rotorlu olarak tasarlanmıştır. Literatürde bu amaçla çoğunlukla sürekli mıknatıslı motor topolojileri tercih edilmekle birlikte, aksiyel akı yoluna sahip anahtarlı relüktans motorlarına da az da olsa rastlanmaktadır. Bu çalışmada tasarlanan makina ise radyal akı yoluna sahiptir. Bu çalışma, literatürde rastlanan dış rotorlu ve radyal akı yoluna sahip anahtarlı relüktans motorları içinde gerçek boyutlardaki bir taşıtın tekerlek tahriğini sağlamak amacıyla tek kutuplu yapıda geliştirilen ilk örnektir. Ayrıca çalışma, tekerlek-içi motor olarak tasarlanan dış rotorlu yapıdaki bir A.R.M.'ye uzun adımlı sargı yapısının ilk kez uygulanması nedeniyle de özgünlük arz etmektedir.

Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen işlemler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Öncelikle, uygulama alanına bağlı olarak belirlenen temel parametrelere sadık kalınarak motorun geometrik boyutları belirlenmiştir.
- Elde edilen boyutlara sahip motor, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla modellenerek statik manyetik analizi yapılmış ve motorun moment üretim kapasitesi belirlenmiştir. Alınan sonuçlar değerlendirilerek motorun geometrik boyutları üzerinde iyileştirmeler yapılmış ve nihai boyutlar elde edilmiştir.
- İki boyutlu sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen statik moment eğrilerinden faydalanılarak, tasarlanan motorun moment dalgalılığı incelenmiştir.

- Tekerlek içi tahrik motorlarında üretilen moment değerinin önem taşıması nedeniyle, geleneksel yapıdaki A.R.M.'lerde uygulamaları bilinen uzun adımlı sargı yapısı, tasarlanan dış rotorlu motora uygulanarak moment üretim kapasitesindeki ve moment dalgalılığındaki artış incelenmiştir.
- Tasarlanan motora ait nonlinear dinamik simülasyon çalışması gerçekleştirilerek, taşıtın farklı sürüş şartlarına karşılık gelen çalışma koşulları için motorun dinamik performansı incelenmiştir.

7.1 Çalışmanın Sonuçları

- Geliştirilen kısa adımlı sargılı D.R.A.R.M. için momentteki dalgalılığın, geleneksel yapıdaki A.R.M.'ler ile benzer düzeyde olduğu görülmektedir. Daha küçük yükleme oranlarında ise dalgalılık, üretilen momentin ortalama değerine bağlı olarak daha küçük değerlerdedir. Sürüş esnasında taşıtın ağırlığına da bağlı olarak artan atalet sayesinde moment dalgalılığının kısmen de olsa sönmüneceği ve etkilerinin taşıt performansı ve sürüş konforunu etkilemeyecek düzeye düşeceği düşünülmektedir.
- Üretilen momentin ortalama değerinin tekerlek-içi tahrik motorları için büyük önem taşıması nedeniyle, motorun moment üretim kapasitesini artırmak amacıyla, dış rotorlu yapıdaki bir tekerlek içi A.R.M.'ye uzun adımlı sargı yapısı ilk kez uygulanmış ve elde edilen sonuçlar kısa adımlı sargı yapısından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.
- Her iki sargı yapısı için karşılaştırmalar, tezin ilgili bölümlerinde açıklanan nedenlerle eşit bakır kayıpları gözönünde tutularak gerçekleştirilmiştir. Buna göre, düşük çalışma akımlarında uzun adımlı sargı yapısı ile önemli miktarda moment artışı sağlanmakta ve dalgalılık oranında azalma gözlenmiştir. Bununla birlikte, nominal yük akımı değerine yaklaştıkça üretilen momentteki artış oranı azalmış ve doymaya bağlı olarak moment dalgalılığı da artmıştır.

- Geliştirilen dinamik simülasyon modelinden elde edilen dalga şekilleri yardımıyla, motorun farklı çalışma koşulları için momentteki dalgalılık izlenmiş ve statik analiz sonuçları yardımıyla hesaplanan dalgalılık oranlarıyla karşılaştırılmıştır. Kısa adımlı sargı yapısı için yapılan bu karşılaştırma ile dinamik simülasyon sonuçlarının Tablo 5.2’de verilen dalgalılık oranlarını doğruladığı görülmüştür. Buna göre, uzun adımlı sargı yapısı uygulanan D.R.A.R.M.’nin taşıt tahrik uygulamaları için dalgalılık kontrolü yapılmadan kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.
- Çalışmanın yukarıda kısaca belirtilen aşamalarında elde edilen statik ve dinamik analiz verileri ve değerlendirmeler ışığında, geliştirilen D.R.A.R.M.’nin, çok tekerlekten tahrikli bir elektrikli taşıtın ihtiyaç duyacağı tahrik gücünü uygun çalışma verimiyle sağladığı sonucuna varılmıştır.

7.2 Geleceğe Yönelik Çalışma Önerileri

Burada elde edilen sonuçlara göre, çalışmayı daha ileriye taşıyabilmek amacıyla gerçekleştirilebilecek diğer çalışmalar şu şekilde sıralanabilir.

- Motorun manyetik analizi için iki boyut yerine üç boyutlu modelleme ve sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilebilir. Bu sayede, bu çalışmada dikkate alınmayan sargı sonu etkisi hesaplara dahil edilerek daha gerçekçi sonuçlara ulaşılabilir.
- Gerek kısa adımlı sargılı, gerekse uzun adımlı sargılı D.R.A.R.M.’nin performansını artırmak ve moment dalgalılığını azaltmak amacıyla, manyetik devre üzerinde iyileştirmeler gerçekleştirilebilir. Üç boyutlu analizin tercih edilmesi, bu durumda avantaj sağlayacaktır.
- Yapısında iki veya dört adet D.R.A.R.M.’nin kullanıldığı bir elektrikli taşıta ait taşıt modelinin oluşturulması, taşıt performansının elde edilmesi için önem taşımaktadır. Bu sayede, çok motorlu elektrikli taşıtların, tek motorlu taşıt uygulamalarına göre üstünlükleri açıkça görülebilir. Ayrıca, taşıtın sürüş şartlarına göre momentteki dalgalılığın taşıt performansına olan etkisi

incelenebilir. Taşıt modelinin oluşturulması bu aşamada önemli avantaj sağlayacaktır.

- Gerek motor kontrolünde, gerekse taşıtın ana kontrol ünitesinde modern kontrol yöntemlerinin kullanılması hem tahrik motorunun, hem de taşıtın performansının iyileştirilmesini sağlayabilir. Bu amaçla, bu çalışmada kullanılan dinamik simülasyon modeli farklı kontrol yöntemlerinin kolayca uygulanabilmesine olanak verecek şekilde oluşturulmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] International Energy Outlook 2006, *Energy Information Administration – U.S. Department of Energy*, (2006).
- [2] BP Statistical Review of World Energy, 1-44, 2005.
- [3] D’Agostino S., “The electric car: A historical survey on the motives driving its existence”, *IEEE Potentials*, 12(1), 28-32, (1993).
- [4] Van Mierlo J., Maggetto G., Lataire Ph., “Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles”, *Journal of Energy Conversion and Management*, 47(17), 2748-2760, (2006).
- [5] Tahami F., Kazemi R., Farhanghi S., “A Novel Driver Assist Stability System for All-Wheel-Drive Electric Vehicles”, *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 52(3), 683-692, (2003).
- [6] Roque A., Esteves J., Maia J., Verdelho P., “Analysis and design of a traction control algorithm for an electric kart with two independent wheel drives”, *International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems (ELECTRIMACS 99)*, 257-262, (1999).
- [7] Yamakawa J., Watanebe K., “A method of optimal wheel torque determination for independent wheel drive vehicles”, *Journal of Terramechanics*, 43, 269-285, (2006).
- [8] Esmailzadeh E., Vossoughi G. R., Goodarzi A., “Dynamic Modeling and Analysis of a Four Motorized Wheels Electric Vehicle”, *Journal of Vehicle System Dynamics*, 35(3), 163-194, (2001).
- [9] West J. G. W., “DC, induction, reluctance and PM motors for electric vehicles”, *IEEE Power Engineering Journal*, 8(2), 77-88, (1994).
- [10] Zhu Z. Q., Howe D., “Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles”, *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 746-765, (2007).
- [11] Ehsani M., Gao Y., Gay S., “Characterization of Electric Motor Drives for Traction Applications”, *The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON’03)*, vol.1, 891-896, (2003).
- [12] Chan C. C., “An Overview of Electric Vehicle Technology”, *Proceedings of the IEEE*, 81(9), 1202-1213, (1993).

- [13] Rahman K. M., Fahimi B., Suresh G., Rajarathnam A. V., Ehsani M., “Advantages of Switched Reluctance Motor Applications to EV and HEV: Design and Control Issues”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 36(1), 111-121, (1998).
- [14] Caricchi F., Crescimbin F., Mezzetti F., Santini E., “Multistage Axial-Flux PM Machine for Wheel Direct Drive”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 32(4), 882-888, (1996).
- [15] Tseng K.-J., Chen G. H., “Computer-Aided Design and Analysis of Direct-Driven Wheel Motor Drive”, *IEEE Trans. on Power Electronics*, 12(3), 517-527, (1997).
- [16] Terashima M., Ashikaga T., Mizuno T., Natori K., Fujiwara N., Yada M., “Novel Motors and Controllers for High-Performance Electric Vehicle with Four In-Wheel Motors”, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 44(1), 28-38, (1997).
- [17] Profumo F., Zhang Z., Tenconi A., “Axial Flux Machines Drives: A New Viable Solution for Electric Cars”, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 44(1), 39-45, (1997).
- [18] Yang Y.-P., Wang J.-P., Wu S.-W., Luh Y.-P., “Design and Control of Axial-Flux Brushless DC Wheel Motors for Electric Vehicles – Part II: Optimal Current Waveforms and Performance Test”, *IEEE Trans. on Magnetics*, 40(4), 1883-1891, (2004).
- [19] Chen G. H., Tseng K. J., “Design of a Permanent-magnet Direct-driven Wheel Motor Drive for Electric Vehicle”, *The 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC’96)*, 2, 1933-1939, (1996).
- [20] Rahman K., Patel N., Caricchi F., Crescimbin F., “Application of Direct Drive Wheel Motor for Fuel Cell Electric and Hybrid Electric Vehicle Propulsion System”, *Conference Record of the 39th IEEE IAS Annual Meeting*, 3, 1420-1426, (2004).
- [21] Yang Y.-P., Chuang D. S., “Optimal Design and Control of a Wheel Motor for Electric Passenger Cars”, *IEEE Trans. on Magnetics*, 43(1), 51-61, (2007).
- [22] Chan C. C., Jiang J. Z., Chen G. H., Wang X. Y., Chau K. T., “A Novel Polyphase Multipole Square-Wave Permanent Magnet Motor Drive for Electric Vehicles”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 30(5), 1258-1266, (1994)
- [23] Chin Y. K., Soulard J., “A Permanent Magnet Synchronous Motor for Traction Applications of Electric Vehicles”, *Proc. of the International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC’03*, 2, 1035-1041, (2003).
- [24] Benoudjit A., Guettafi A., Nait Said N., “Axial Flux Induction Motor for On-Wheel Drive Propulsion System”, *Electric Machines and Power Systems*, 28, 1107-1125, (2000).

- [25] Caricchi F., Crescimbeni F., Honorati O., Di Napoli A., Santini E., “Compact Wheel Direct Drive for EVs”, *IEEE Industry Applications Magazine*, 2(6), 25-32, (1996).
- [26] Nakamura K., Suzuki Y., Goto H., Ichinokura O., “Design of outer-rotor type multipolar SR motor for electric vehicle”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 290-291(2), 1334-1337, (2005).
- [27] Goto H., Suzuki Y., Nakamura K., Watanebe T., Guo H. J., Ichinokura O., “A multipolar SR motor and its application in EV”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 290-291(2), 1338-1342, (2005).
- [28] Fujishiro S., Ishikawa K., Kikuchi S., Nakamura K., Ichinokura O., “Design of outer-rotor-type multipolar switched reluctance motor for electric vehicle”, *Journal of Applied Physics*, 99(8), 972-974, (2006).
- [29] Bedford, “Compatible permanent magnet or reluctance brushless motors and controlled switch circuits”, U.S. Patent No. 3,678,352, (1972).
- [30] Bedford, “Compatible brushless reluctance motors and controlled switch circuits”, U.S. Patent No. 3,679,953, (1972).
- [31] Lawrenson P. J., Stephenson J.-M., Blenkinsop P. T., Corda J., Fulton N. N., “Variable-speed switched reluctance motors”, *Proc. Inst. Elect. Eng.B.*, 127, 253-265, (1980).
- [32] Krishnan R., Arumugam R., Lindsay J. F., “Design Procedure for Switched Reluctance Motors”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 24(3), 456-461, (1988).
- [33] Arumugam R., Lindsay J. F., Krishnan R., “Sensitivity of Pole Arc/Pole Pitch Ratio on Switched Reluctance Motor Performance”, *Conf. Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, vol.1, 50-54, (1988).
- [34] Moallem M., Ong C. M., Unnewehr L. E., “Effect of Rotor Profiles on the Torque of a Switched Reluctance Motor”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 28(2), 364-369, (1992).
- [35] Lee J. W., Kim H. S., Kwon B. I., Kim B. T., “New Rotor Shape Design for Minimum Torque Ripple of SRM Using FEM”, *IEEE Trans. on Magnetics*, 40(2), 754-757, (2004).
- [36] Arumugam R., Lowther D. A., Krishnan R., Lindsay J. F., “Magnetic Field Analysis of a Switched Reluctance Motor using a Two Dimensional Finite Element Method”, *IEEE Trans. on Magnetics*, 21(5), 1883-1885, (1985).
- [37] Wu W., Dunlop J. B., Collocott S. J., Kalan B. A., “Design Optimization of a Switched Reluctance Motor by Electromagnetic and Thermal Finite-Element Analysis”, *IEEE Trans. on Magnetics*, 39(5), 3334-3336, (2003).

- [38] Parreira B., Rafael S., Pires A. J., Costa Branco P. J., “Obtaining the Magnetic Characteristics of an 8/6 Switched Reluctance Machine: From FEM Analysis to the Experimental Tests”, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 52(6), 1635-1643, (2005).
- [39] Ohdachi Y., Kawase Y., Miura Y., Hayashi Y., “Optimum Design of Switched Reluctance Motors using Dynamic Finite Element Analysis”, *IEEE Trans. on Magnetics*, 33(2), 2033-2036, (1997).
- [40] Moghbelli H. H., Adams G. E., Hoft R. G., “Comparison of Theoretical and Experimental Performance of 10 HP Switched Reluctance Motor”, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1, 89-98, (1989).
- [41] Krishnan R., Bedingfield R. A., “Dynamic Analysis of an SRM Drive System”, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1, 265-271, (1991).
- [42] Koibuchi K., Ohno T., Sawa K., “A Basic Study for Optimal Design of Switched Reluctance Motor by Finite Element Method”, *IEEE Trans. on Magnetics*, 33(2), 2077-2080, (1997).
- [43] Ichinokura O., Onda T., Kimura M., Watanebe T., Yanada T., Guo H. J., “Analysis of Dynamic Characteristics of Switched Reluctance Motor Based on SPICE”, *IEEE Trans. on Magnetics*, 34(4), 2147-2149, (1998).
- [44] Srinivas K. N., Arumugam R., “Dynamic Characterization of Switched Reluctance Motor by Computer-Aided Design and Electromagnetic Transient Simulation”, *IEEE Trans. on Magnetics*, 39(3), 1806-1812, (2003).
- [45] Tsukii T., Nakamura K., Ichinokura O., “SPICE Simulation of SRM Considering Nonlinear Magnetization Characteristics”, *Electrical Engineering in Japan*, 142(1), 50-56, (2003).
- [46] Chang L., “Design Procedures of a Switched Reluctance Motor for Automobile Applications”, *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, vol.2, 947-950, (1996).
- [47] Risse S., Henneberger G., “Design and Optimization of a Switched Reluctance Motor for Electric Vehicle Propulsion”, *Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Machines (ICEM'2000)*, 3, 1526-1530, (2000).
- [48] Sheth N. K., Rajagopal K. R., “Optimum Pole Arcs for a Switched Reluctance Motor for Higher Torque With Reduced Ripple”, *IEEE Trans. on Magnetics*, 39(5), 3214-3216, (2003).
- [49] Murthy S. S., Singh B., Sharma V. K., “Finite Element Analysis to Achieve Optimum Geometry of Switched Reluctance Motor”, *IEEE Region 10 International Conference on Global Connectivity in Energy, Computer, Communication and Control (TENCON'98)*, 2, 414-418, (1998).

- [50] Ramamurthy S. S., Balda J. C., “Sizing a Switched Reluctance Motor for Electric Vehicles”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 37(5), 1256-1264, (2001).
- [51] Blake R. J., Davis R. M., Ray W. F., Fulton N. N., Lawrenson P. J., Stephenson J. M., “The Control of Switched Reluctance Motors for Battery Electric Road Vehicles”, *Proceedings of International Conference PEVD*, 361-364, (1984).
- [52] Uematsu T., Wallace R. S., “Design of a 100 kW switched reluctance motor for electric vehicle propulsion”, *The 10th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC’95)*, vol.1, 411-415, (1995).
- [53] Wu W., Lovatt H. C., Dunlop J. B., “Optimisation of Switched Reluctance Motors for Hybrid Electric Vehicles”, *International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, 177-182, (2002).
- [54] Paul M., Hofmann W., Bochnia D., “Design of Permanent Magnet Motors for a Hybrid Electric Vehicle”, *International Conference on Electrical Machines*, 1535-1539, (2000).
- [55] Ohyama K., Nashed M. N. F., Aso K., Fujii H., Uehara H., “Design Using Finite Element Analysis of Switched Reluctance Motor for Electric Vehicle”, *ICTTA’06 Information and Communication Technologies*, 1, 727-732, (2006).
- [56] Liptak M., “Principle of Design of Four-Phase Low-Power Switched Reluctance Machine Aimed to the Maximum Torque Production”, *Journal of Electrical Engineering*, 55(5-6), 138-143, (2004).
- [57] Low T. S., Lin H., Chen S. X., Chang K. T., “Design and Analysis of 4-Phase (In-hub) Mini-Switched Reluctance Motor for Spindle Motor in Hard Disk Drive”, *International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS’95)*, 645-650, (1995).
- [58] Tsai M. C., Huang C. C., Huang Z. Y., “A new two-phase homopolar switched reluctance motor for electric vehicle applications”, *Elsevier Science Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 267(2), 173-181, (2003).
- [59] Inderka R. B., De Doncker R. W. A. A., “Control of Switched Reluctance Drives for Electric Vehicle Applications”, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 49(1), 48-53, (2002).
- [60] Ehsani M., Gao Y., Asadi P., Welth S., “The Application of Switched Reluctance Motor Drive to Vehicle Application”, *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP’04)*, 160-165, (2004).
- [61] Çınar M. A., Kuşdoğan Ş., Erfan Kuyumcu F., “Motorlu Taşıtlarda Enerji Verimliliğinin İncelenmesi”, *1. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu (EVK’2005)*, 1, 43-46, (2005).

- [62] Bedir A., “Türkiye’de Otomotiv Sanayi Gelişme Perspektifi”, *DPT Yayın No:2660*, (2002).
- [63] Otomotiv Sanayicileri Derneği, “2005 Yılı Değerlendirmesi” *OSD-2006/03*, 1-10, (2006).
- [64] Otomotiv Sanayicileri Derneği, “2005 Yılı Otomobil ve Toplam Motorlu Araç Parkı “Dünya ve Türkiye””, *OSD-2006/04*, 1-7, 2006.
- [65] U.S. Department of Energy, Energy Information Administration, “Annual Energy Review 2005”, *DOE/EIA-0384*, (2005).
- [66] Nuclear Energy Agency, “Nuclear Energy and the Kyoto Protocol”, *NEA/OECD*, 2002(16), 1-53, (2002).
- [67] Ehsani M., Gao Y., Gay S. E., Emadi A., “Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles”, *CRC Press*, 6, (2005).
- [68] Husain I., “Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals”, *CRC Press*, 34, (2003).
- [69] Ersöz Y., İlgen O., Akın A. N., “Sodyum Borhidrür’den Hidrojen Eldesi”, *I. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu (EVK’2005)*, 1, 151-154, (2005).
- [70] Chan C. C., Wong Y. S., “Electric Vehicles Charge Forward”, *IEEE Power & Energy Magazine*, 2(6), 24-33, (2004).
- [71] Rahman Z., Ehsani M., Butler K. L., “An Investigation of Electric Motor Drive Characteristics for EV and HEV Propulsion Systems”, *SAE Technical Paper Series no.2000-01-3062*, (2000).
- [72] Ehsani M., Gao Y., Miller J. M., “Hybrid Electric Vehicles: Architecture and Motor Drives”, *Proc. of the IEEE*, 95(4), 719-728, (2007).
- [73] Krishnan R., “Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications”, *CRC Press*, (2001).
- [74] Miller T. J. E., “Switched Reluctance Motors and Their Control”, *Magna Physics Publishing and Clarendon Press*, 20, (1993).
- [75] Gao Y., “Speed Control of Switched Reluctance Motors”, Yüksek Lisans Tezi, *The Hong Kong University of Science and Technology*, Hong Kong, 8-11, (2000).
- [76] Lefley P. W., Erfan F., “Operation of a 4 Quadrant Voltage Fed Reluctance Motor Drive”, *Modern Electrical Drives*, NATO Advance Study Institute, 61-66, (1994).

- [77] Mir S., “Classification of SRM Converter Topologies for Automotive Applications”, *SAE Technical Paper Series no.2000-01-0133*, (2000).
- [78] Vijayraghavan P., “Design of Switched Reluctance Motors and Development of a Universal Controller for Switched Reluctance and Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives”, Ph.D. Thesis, *Virginia Polytechnic Institute and State University*, Virginia, 2001.
- [79] Boduroğlu T., “Elektrik Makinaları Dersleri, Doğru Akım Makinaları (Hesap ve Konstrüksiyon), Cilt IV Kısım 2, *Beta Yayınevi*, (1988).
- [80] Erfan F., “Anahtarlı Relüktans Motorunun Statik ve Dinamik Davranışı ile Ulaşımında Kullanılabilirliğinin Analizi”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1992).
- [81] Yılmaz M., “Fırçasız DA Motorunun (FDAM) Dalgacık Teorisi Tabanlı Algılayıcısız Kontrolü” Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 105-110 (2005).
- [82] Erfan F., Lefley P., Seçilmiş M., “Torque Characteristics and Test Results of a Pulsed Synchronous Reluctance Motor by Using FEM”, *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP'95)*, 599-602, (1995).
- [83] Garip M., “Kutup Başları Şekillendirilmiş Anahtarlamalı Relüktans Motorunda Tam Kutup Adımlı Sargının Moment Dalgallılığının İyileştirilmesine Katkısı” Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 37-47, (2002).
- [84] Kanerva S., “Simulation of Electrical Machines, Circuits and Control Systems Using Finite Element Method and System Simulator”, Doctoral Dissertation, *Helsinki University of Technology, Department of Electrical and Communication Engineering*, Helsinki, 19-27, (2005).
- [85] Mecrow B. C., “New Winding Configurations for Doubly Salient Reluctance Machines”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 32(6), 1348-1356, (1996).
- [86] Mecrow B. C., “Fully pitched-winding switched-reluctance and stepping-motor arrangements”, *IEE Proc.-B*, 140(1), 61-70, (1993).
- [87] Yılmaz K., “Anahtarlı Relüktans Motorunun Sargı Yapısı Değıştirilerek Moment Performansının İyileştirilmesi”, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmit, 113-117, (2004).
- [88] Yılmaz K., Erfan Kuyumcu F., “Comparison Between Short Pitched and Bipolar Excite Fully Pitched Switched Reluctance Motors for Accurately Computed Phase Resistance Value”, *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP'04)*, 250-254, (2004).

[89] <http://www.uytes.com.tr/simulasyon/simulasyon.html> (*Ziyaret tarihi: 05.06.07*)

[90] Akhter H. E., Sharma V. K., Chandra A., Al-Haddad K., “Modeling Simulation and Performance Analysis of Switched Reluctance Motor Operating with Optimum Value of Fixed Turn-On and Turn-Off Switching Angles”, *IEEE 34th Annual Power Electronics Specialists Conference*, 1, 397-402, (2003).

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

1. ÇINAR M.A., ERFAN KUYUMCU F., “Design and Drives Simulation of an In-Wheel Switched Reluctance Motor for Electric Vehicle Applications”, *Proc. of the International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC’07*, ISBN:1-4244-0743-5, May 3-5, 50-54, Antalya, TURKEY, 2007.
2. ÇINAR M.A., ERFAN KUYUMCU F., “Comparison of the Torque Production Capacity of Short Pitched and Fully Pitched Outer Rotor Switched Reluctance Motor”, *COMPUMAG’2007 16th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields*, June 24-28, 195-196, Aachen, GERMANY, 2007.
3. ÇINAR M.A., ERFAN KUYUMCU F., “Elektrik Enerjisinin Üretimi ve Tüketiminin Küresel Isınmaya Etkileri ve Alınması Gereken Önlemler”, *TİKDEK’2007 1. Türkiye İklim Değişikliği Kongresi*, 296-303, 11-13 Nisan 2007, İstanbul.
4. ÇINAR M.A., YILDIZ A.B., “Time-Domain Analysis of Transformers by Using Modified Nodal Equations”, *PSCE’2006 IEEE Power Systems Conference & Exposition*, 29 Oct – 1 Nov, 1059-1062, Atlanta, Georgia, USA, 2006.
5. YILDIZ A.B., ÇINAR M.A., “Time-Domain Analysis of Circuits with Ideal Switches by Nodal Equations”, *PEDS’2005 IEEE The Sixth International Conference on Power Electronics & Drive Systems*, ISBN:0-7803-9296-5, 28 Nov – 1 Dec, 1046-1050, MALAYSIA, 2005.
6. ÇINAR M.A., GÜNDOĞAN Ç., ERFAN KUYUMCU F., “Anahtarlı Relüktans Motorunun Sonlu Elemanlar Analizi Destekli Dinamik Simülasyonu”, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*, 308-311, 2005, İstanbul.
7. ÇINAR M.A., GÜNDOĞAN Ç., ERFAN KUYUMCU F., “Taşıt Tahriğinde Kullanılacak Bir Anahtarlı Relüktans Motor Tasarımı ve Analizi”, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*, 304-307, 2005, İstanbul.
8. ÇINAR M.A., KUŞDOĞAN Ş., ERFAN KUYUMCU F., “Motorlu Taşıtlarda Enerji Verimliliğinin İncelenmesi”, *EVK’2005 1. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, 43-46, 2005, Kocaeli.
9. BAĞCI N., ÇINAR M.A., ERFAN KUYUMCU F., “Analysis of Harmonic Effects in Non-Sinusoidal-Fed Induction Motor”, *ACEMP’2004 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics*, May 26-28, Istanbul, TURKEY, 2004.
10. ÇINAR M.A., GÜNDOĞAN Ç., ERFAN KUYUMCU F., “Elektrik Tahrikli Araçlar için Çekiş Kontrol Sistemi Simülasyonu”, *ELECO’2004 Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Kongresi*, 296-300, 2004, Bursa.
11. ÇINAR M.A., KUŞDOĞAN Ş., İNAN E., “Elektrikli ve Hibrid Taşıtlar”, *IV. Ulaşım ve Trafik Kongresi*, 101-106, 26-27 Eylül 2003, Ankara

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 1995 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden 1999 yılında Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. 1999-2002 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2000 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.