

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HİBRİD ARAÇLARDA DEĞİŞİK PARAMETRELERE GÖRE ELEKTRİK MOTORU
SEÇİMİ**

CÜNEYT KOÇ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK MAKİNALARI VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. İBRAHİM ŞENOL**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Hibrid Araçlarda Değişik Parametrelere Göre Elektrik Motoru Seçimi

Cüneyt KOÇ tarafından hazırlanan tez çalışması 03/07/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. İbrahim Şenol
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. İbrahim Şenol
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Nur Bekiroğlu
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Zehra Yumurtacı
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Dünyada alternatif enerji kaynağı arayışları çalışmaları hızlanmıştır. Ulaşım sektöründe de bu eğilime paralel olarak alternatif çözümler üzerinde araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan büyük bir kısmında elektrikli tahrik sistemleri üzerinedir. Alternatif enerji arayışlarının yanı sıra verimliliğin artırılması ve sera gazı emisyonlarının düşürülmesi üzerine de çalışmalar sürdürülmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda en umut vadeden çözümlerden biri elektrikli tahrik sistemlerinin kullanıldığı hibrid elektrikli araçlardır. Bu yüzden hibrid elektrikli araçlar devamında elektrikli araçların alt sistemlerinin geliştirilmesi ve verimliliğinin artırılması son derece önemlidir. İçten yanmalı motor teknolojisinde geline nokta ülkemizin katkısı pek bulunmamaktadır. Ancak içten yanma motor teknolojisinde kaçırdığımız ama bu yeni teknoloji ile dünyayı yakalayabileceğimizden dolayı bu yeni teknolojiye ilgi gösterilmeli ve elektrikli araç tahrik sistemleri konusunda ülkemizde çalışmaların yapılması gerekmektedir. Bu doğrultuda yapılan bu tez çalışmasında bana yardımlarını esirgemeyen ve beni değerli görüşleri ile yönlendiren danışman hocam sayın Prof. Dr. İbrahim Şenol'a teşekkürü bir borç bilirim. Bu tezin ortaya çıkmasında bana sürekli destek veren Gizem Ebcin'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca beni yetiştiren ve her ihtiyacım olduğunda yanımda gördüğüm aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs, 2012

Cüneyt KOÇ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1.Literatür Özeti.....	1
1.2.Tezin Amacı.....	3
1.3.Hipotez.....	3
BÖLÜM 2	
OTOMOTİV TEKNOLOJİSİNDEKİ VE PAZARINDAKİ GELİŞMELER.....	4
2.1.EA’ların Dönüm Noktaları	4
2.2.EA’ların Dönüm Noktaları	8
2.3.Elektrikli Araçların Geleceği	9
BÖLÜM 3	
ELEKTRİKLİ ARAÇ SİSTEMLERİ.....	12
3.Elektrikli Araç Sistemleri	12
3.1.Tümü-Elektrikli Araçlar	12
3.2.Hibrid Elektrikli Araçlar	13
3.2.1.Seri Hibrid Elektrikli Araç	14
3.2.2.Paralel Hibrid Elektrikli Araç	15
3.2.3.Seri/Paralel Hibrid Elektrikli Araç.....	16
3.2.4.Kompleks Hibrid Elektrikli Araç	17
3.3.Hibridleşme Faktörü	17
3.4.HEA’ın Genel Performansı.....	18

3.5.Üretim Hattındaki Hibrid Elektrikli Araçlar.....	18
3.5.1.Honda Insight.....	18
3.5.2.Honda Civic	19
3.5.3.Toyota Prius	20
BÖLÜM 4	
HİBRİD ARAÇLARDA KULLANILAN ELEKTRİK MAKİNALARI	22
4.Hibrid Araçlarda Kullanılan Elektrik Makinaları.....	22
4.1.HEA'da Elektrik Makinası Seçim Kriterleri ve Kullanılan Makina Tipleri ..	24
4.1.1.Doğru Akım Motorları	25
4.1.2.İndüksiyon Makinaları (Asenkron Motor)	29
4.1.2.1.Stator.....	29
4.1.2.2.Rotor	30
4.1.2.2.1.Sincap Kafesli Rotor (Kısa Devre Rotor)	30
4.1.2.2.2.Sargılı Rotor (Bilezikli Rotor)	30
4.1.2.3.Asenkron Motorun Çalışma Prensibi	30
4.1.2.4.Asenkron Motorun Eşdeğer Devresi	31
4.1.2.5.Asenkron Motorlarda Güç,Moment ve Güç Faktörü	36
4.1.3.Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinalar	40
4.1.3.1.Mıknatıslı rotor yapıları.....	42
4.1.3.1.1.Rotor yüzeyinde mıknatıs malzeme yapısı	42
4.1.3.1.2.Rotora gömülü mıknatıs malzeme yapısı.....	42
4.1.3.2.Akı Yolları.....	43
4.1.3.3.Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinada Moment Üretimi.....	43
4.1.3.4.Manyetik Akının Hava Aralığındaki Dağılımı	44
4.1.3.5.SM Senkron Makinada'da Alan Oluşumu	45
4.1.3.5.1.Sadece Sürekli Mıknatıslar İle Alan Oluşumu	46
4.1.3.5.2.Sürekli Mıknatıs ve Stator Akımı ile Alan Oluşumu.....	49
4.1.3.6.SM Doğru Akım Makinalarında Hız Ayarı.....	50
4.1.3.7.Sürekli Mıknatıslı Makinalarda Verim.....	51
4.1.3.8.Sürekli Mıknatıslı Makinelerin Kullanım Alanları	51
4.1.3.9.SMSM Avantajları ve Dezavantajları	52
4.1.4.Anahtarlamalı Relüktans Motoru.....	53
4.1.4.1.Anahtarlamalı Relüktanslı Makina Yapısı	54
4.1.4.1.1.Anahtarlamalı Relüktans Motorun Yapısı	55
4.1.4.2.Anahtarlamalı Relüktans Motorun Çalışması	58

4.1.4.2.1.İndüktans/ Relüktans.....	58
4.1.4.3.Moment.....	61
4.1.4.4.Eşdeğer Devre	64
4.1.5.Enerji Dönüşümü	66
4.1.6.A.R.M. 'nin Üstün ve Zayıf Yönleri	67
BÖLÜM 5	
HEA'DA KULLANILAN ELK. MAK. VERİM ve GÜÇ YOĞ. KARŞI.....	70
5.HEA'da Kullanılan Elk. Mak. Verimlilik Haritası Ve Güç Yoğ. Karşı.....	70
BÖLÜM 6	
ELEKTRİK MOTORLARININ KARŞILAŞTIRMASI VE UYGULAN.....	73
6.Elektrik Motorlarının Karşılaştırması Ve Uygulanabilirliği.....	73
BÖLÜM 7	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
7.1.Sonuçlar ve Öneriler	75
7.2.Çalışmanın Sonuçları	76
7.3.Geleceğe Yönelik Çalışma Önerileri	76
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	79

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif akım
AYP	Alkali yakıt pili
AÖN	Alt ölü nokta
BG	Beygir Gücü
DC	Doğru akım
EA	Elektrikli araç
EKYP	Ergimiş karbonat yakıt pili
FAYP	Fosforik asit yakıt pili
GE	General electric
HEA	Hibrid elektrikli araç
İYM	İçten yanmalı motor
KOYP	Katı oksit yakıt pili
SM	Sürekli mıknatıslı
Li-iyon	Lityum-iyon
NiMH	Nikel-metal
Pb-asit	Kurşun asit
PEMYP	Proton elektrolit membranlı yak
PWM	Darbeli genişlik modülasyonu
SRM	Anahtarlama relüktanslı motor
SOC	Batarya şarj durumu
ÜÖN	Üst ölü nokta

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1 Morris ve Salomon'un Electrostats elektrikli aracı	5
Şekil 2 Londra Elektrikli Taksi Şirketinin Ürettiği Taksiler	5
Şekil 3 Ford Comuta elektrikli araç	7
Şekil 4 Tümü- elektrikli araç	13
Şekil 5 Hibrid Elektrikli Araç	14
Şekil 6 Seri Hibrid Elektrikli Araç	15
Şekil 7 Paralel Hibrid Elektrikli Araç Blok Şeması	16
Şekil 8 Seri-Paralel Hibrid Elektrikli Araç Blok Şeması	17
Şekil 9 Kompleks Hibrid Elektrikli Araç	17
Şekil 10 Honda Insight	19
Şekil 11 Honda Civic	20
Şekil 12 Toyota Prius	21
Şekil 13 Yol yükünün eğime bağlı değişimi	22
Şekil 14 Gerekli çekiş gücünün maksimum hızın baz hıza oranına göre değişimi	23
Şekil 15 Hibrid Elektrikli Araçlarda Kullanılan Elektrik Makinaları	25
Şekil 16 DC motor türleri	26
Şekil 17 Serbest uyarmalı DC motor kontrol sistemi	27
Şekil 18 DC Motor eşdeğer devresi	27
Şekil 19 DC motor çalışma bölgeleri	29
Şekil 20 Üç fazlı ve kısa devre rotorlu bir asenkron motor yapısı	29
Şekil 21 Üç Fazlı Asenkron Motorun Bir Faz Eşdeğer Devresi	32
Şekil 22 Rotor Eşdeğer Devresi a) Herhangi Bir (s) Kaymasında b) Durma Anında ..	33
Şekil 23 Üç Fazlı Asenkron Motorun Bir Faz Yaklaşık Eşdeğer Devresi	34
Şekil 24 Stator ve Rotor Akımı	35
Şekil 25 Güç akış diyagramı	36
Şekil 26 Verimin Kayma ve Hız İle Değişimi	38
Şekil 27 Bir Faz Eşdeğer Devre Üzerinde Elektromekanik Güç Dönüşümü	38
Şekil 28 Moment Hız Grafiği	40
Şekil 29 Güç Faktörünün Kayma İle Değişimi	40
Şekil 30 Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinelerin yapısı	41
Şekil 31 Rotor yüzeyinde mıknatıs malzeme yapısı	42

Şekil 32	Rotora gömülü mıknatıs malzeme yapısı	43
Şekil 33	a) d-Eksen Manyetik Akısı b) q-Eksen Manyetik Akısı	43
Şekil 34	Hava aralığı akı dağılımı a) Mıknatıs akısı b) Id akım bileşeninin d akısı...	45
Şekil 35	Dairesel gömülü mıknatıslı rotor yapısı	45
Şekil 36	Kaçak ve faydalı akı yollarının meydana gelişi	46
Şekil 37	Sürekli mıknatıs ile oluşan eşdeğer magnetik devre	46
Şekil 38	Stator alanı ile magnetik eşdeğer devre	48
Şekil 39	Farklı besleme gerilimleri için $f(T_e)$ Grafiği	50
Şekil 40	Farklı akı yoğunlukları için $f(T_e)$ Grafiği	50
Şekil 41	Farklı dizilişlere sahip ARM'ler	56
Şekil 42	En çok bilinen ve kullanılan ARM dizilişleri	57
Şekil 43	ARM sürücüsü için model çevirici	59
Şekil 44	ARM'de stator sargılarının tetiklenmesi	60
Şekil 45	ARM'nin çalışması (a) c fazının hiza konumu, (b) a fazının hiza konumu.	60
Şekil 46	Sabit stator sargı akımında momentin indüktansla değişimi	61
Şekil 47	ARM'nin elektromanyetik alan dağılımı	62
Şekil 48	ARM'nin bir fazına ait eş değer devre	64
Şekil 49	ARM'deki moment üretimi	66
Şekil 50	Verimlilik Haritası	72

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1	İYM, Hibrid Elektrikli Araç ve Tümü EA performans karşılaştırması.....	18
Çizelge 2	Elektrik Motorlarının Güç Yoğunluğu Karşılaştırması	70
Çizelge 3	1500 devir/dak'da Motorların Karşılaştırılması.....	71
Çizelge 4	6000 devir/dak'da Motorların Karşılaştırılması.....	71
Çizelge 5	Makinaların Yaklaşık Maliyetlerinin Karşılaştırılması	71
Çizelge 6	Hibrid Araçlarda Kullanılan Elektrik Motorlarının Karşılaştırılması	74

ÖZET

HİBRİD ARAÇLARDA DEĞİŞİK PARAMETRELERE GÖRE ELEKTRİK MOTORU SEÇİMİ

Cüneyt KOÇ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim Şenol

Fosil yakıt kaynaklarının tükeniyor olması ve buna bağlı petrol fiyatlarının artışı ulaşımında mevcut teknolojilerin verimliliğinin artırılması çalışmalarının hız kazanmasına ve alternatif enerji kaynaklarına yönelimin artmasına neden olmuştur. Bu kapsamda ticarileşme oranına bakıldığında yakın gelecekte hibrid elektrikli araçlar ve nihayetinde tüm elektrikli araçların kullanımındaki payları artacaktır. Bu tez çalışmasında günümüzde yaygınlığı ve kullanılabilirliği giderek artan elektrikli ve seri hibrid elektrikli yol araçları için tahrik motoru karşılaştırmasına odaklanılmıştır. Çalışmada öncelikle elektrikli ve hibrid elektrikli araçlar ve bunların alt sistemleri hakkında bilgi verilmiş, ardından elektrikli araçlarda kullanılan motorların karakteristik özelliklerden bahsedilmiştir. Kullanılan elektrik motorlarının karşılaştırması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: hibrid elektrikli araç, doğru akım makinaları, indüksiyon makinaları, sabit mıknatıslı senkron makina, anahtarlamalı relüktanslı makina, verimlilik, güç yoğunluğu

ABSTRACT

ELECTRICAL MACHINE SELECTION FOR VARIOUS PARAMETERS ON THE HYBRID ELECTRICAL VEHICLES

Cüneyt KOÇ

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Prof. Dr. İbrahim Şenol

Increasing oil prices depending on diminishing fossil fuel reserves brings about an effort to find means of improving energy efficiency and a tendency to seek for alternative energy sources in transportation. In a near future, market share of hybrid electric vehicles and consequently full electric vehicles will increase among other competitors considering their commercialization rates. This thesis work is focused on traction motor control of electric and series hybrid electric road vehicles. In this context, first information about electric and hybrid electric vehicles and their subsystems is introduced. In addition, electric motor characteristics are defined. Comparison of the electrical machines that used on the hybrid electrical vehicle is done.

Key words: hybrid electrical vehicle, direct current motor, induction motor, permanent magnet synchronous machine, switched reluctance machine, efficiency, power density

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1. Literatür Özeti

Hayatımızdaki temel ihtiyaçların karşılanması, ülkelerin sosyal gelişimleri ve ekonomik olarak kalkınmasında en önemli ihtiyaçlardan birisi enerjidir. Küresel olarak doğum oranındaki artışa ve sanayileşmeye bağlı olarak toplumların enerji gereksinimleri giderek artmaktadır. Ülkelerin gelecek planları arasında en önemli hedefleri enerji olmuştur. 2004 yılı verilerine göre dünya üzerinde 443,20.1015 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. Araçlarda kullanılan yakıt çeşidi ise tamamen 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 savaşlara neden olmaktadır. Buna ek olarak yoğun petrol tüketiminin yarattığı çevresel sorunlar daha 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 %28 gibi düşük verimle çalışmaktadır[3]. Düşük verimliliğinin yanında çevreye verdiği atıklar doğrudan veya dolaylı olarak dünya üzerindeki canlı yaşamını tehdit etmektedir. Atmosferdeki atık gazların ve zararlı partiküllerin artması küresel ısınmaya ve iklim değişikliklerine de neden olmaktadır.

Petrol tüketiminden kaynaklı bu olumsuzlukları gidermek adına temiz enerji başlığı altında birçok proje çalışması yapılmaktadır. Bu çalışmalarda kullanılan alternatif yakıtlarda ortaya çıkan zararlı atık ve emisyonlar %80'e varan oranda azaltılabilmektedir.

Elektrik kullanımı sırasında atık çıkarmaması nedeniyle en temiz enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrik enerjisinin araçlarda kullanılması içten yanmalı motorun keşfinden daha öncesine 1800'lü yıllara 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. Teknolojideki hızlı ilerlemeler sayesinde 80'li yıllarda 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 pazarda yerlerini almıştır.

Hibrid elektrikli araçların en önemli yapı taşı olan elektrik makinaları hayatımızda birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun en önemli nedeni, elektrik motorlarının çevreyi kirletmemesi, daha az gürültü kirliliğine neden olması ve değişik boyutlarda üretilmeleridir. Diğer bir neden ise elektrik motorlarının çok geniş güç seviyelerinde üretililebilmeleridir. Ayrıca, elektrik motorlarının istediği anda devreye alınabilmesi, devir sayısı ve yönünün basit ek düzenekler yardımı ile değiştirilebilmesi, dört bölgede çalıştırılabilmesi, fosil yakıt ile çalışan motorlara göre üstünlükler sağlamaktadır. Elektrik motorlarının fosil yakıtla çalışan motorlara göre bazı dezavantajları da vardır. Birim ağırlık başına ürettiği çıkış gücü oranının düşük olması; elektrik enerji kaynağının sınırlı olduğu ve depo edilmesi gereken elektrikli taşıt ve uzay teknolojileri gibi uygulamalarda, enerji depolama sistemlerinin yüksek verimli piller, aküler, ultra kapasiteler, mekanik enerji depoları, süper iletkenli enerji depolama sistemleri, yakıt hücreleri gibi sistemlerin henüz yüksek maliyetli olmaları, elektrik motorlarının daha yaygın kullanımını sınırlamaktadır.

Elektrikli araçlarda sistem nasıl olursa olsun taşıtın hareketini sağlayacak mekanik gücü üreten en önemli bileşenlerden biri elektrik motorudur. Bu kriter göz önünde tutularak, geçmişten günümüze elektrik tahrikli taşıtlarda kullanılan farklı yapılarıdaki 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.

1.2. Tezin Amacı

İçten yanma motor teknolojisini yakalayamamış ve bu konuda marka yaratamamış bir ülke olmak çıkarak gelişen teknolojiye ayak uydurup Hibrid ve Elektrikli araç teknolojisinde lider bir ülke konumuna çıkmamız için bu teknoloji detaylı bir şekilde incelenmiş ve geliştirmek için neler yapabileceğimiz üzerine çalışılmıştır. Bu çalışma neticesinde bu teknolojiye bilgi sahibi olarak üretim aşamasında ilerleyip lider ülke konumuna gelmemiz için destek çalışmalar yapılması hedeflenmiştir.

1.3. Hipotez

1900'lerde keşfedilmiş ama sonrasında İYM'nin bulunmasıyla askıya alınmış bir teknoloji günümüzde petrol rezervlerinin azalması ve küresel ısınmanın artmasından dolayı günümüzde tekrar kullanılmaya başlanmış ve güçlü Dünya ekonomileri bu teknolojiye yatırımlarını arttırmıştır. Bu çalışma ile Türkiye'nin yerel olarak üretebileceği elektrik motorunun seçilmiş, üretim sahfasında en yüksek verime ve güç yoğunluğuna sahip elektrik motorunun piyasada üretimi için gerekli çalışmalar yapılmış ve gerekli yatırım desteği sağlandığında bu sektörde kullanılabilecek bir elektrik motoru üretilerek bu konuda lider bir ülke olma yolunda ilerlemektir.

BÖLÜM 2

OTOMOTİV TEKNOLOJİSİNDEKİ VE PAZARINDAKİ GELİŞMELER

2.1. EA'ların Dönüm Noktaları

İlk EA modeli 1835 yılında Profesör Straitingh tarafından Hollanda'da yapılmıştır. 1834-1836 yılları arasında Thomas Davenport tarafından ABD'de elektrikli yol aracının geliştirildiği ve uygulamasının yapıldığı raporlanmıştır. Bu araç üç tekerlekli olmakla beraber şarj edilmeyen bataryalarla tahrik edilmiştir. 4 yıl sonra Robert Davidson şarj edilemeyen batarya ile tahrik edilen elektrikli lokomotif geliştirmiştir. 1859 yılından sonra kurşun-asit bataryaları geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır.

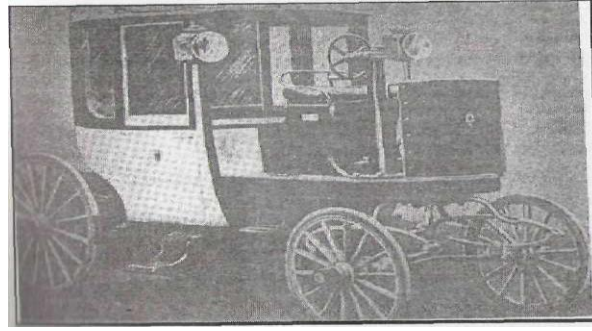
1882 yılında İngiltere'de Prof. William Ayrton ve John Perry elektrik tahrikli 3 adet tekerlekli aracın uygulamasını yapmıştır. Bu araçların her birinde 10 tane kurşun-asit batarya kullanılmıştır. Aracın menzili araziye bağlı olarak 16-20 km arasında olup azami hızı ise 14km/h tir. Bundan 3 yıl sonra Carl Benz İYM ile 3 tekerlekli aracı geliştirmiştir.

19. yüzyılın son dönemlerine doğru Amerika,İngiltere ve Fransa'da birçok şirket elektrikli araç üretmeye başlamıştır. Bu üreticilerden en önemlisi Morris ve Salomon'un sahibi olduğu Electric Carriage and Wagon Campany adlı şirkettir.Morris ve Salomon 1895 yılında iki oturma koltuğu olan Electrobats isimli elektrikli aracı geliştirmişlerdir (Şekil 1).



Şekil 1 Morris ve Salomon'un Electrobat's elektrikli aracı

EA'larla ilgili bu gelişmeler olurken, İYM'larda hızla gelişmeye başlamıştır. 1900 yılında Amerika'da üretilen araçların 1684 tanesi buhar tahrikli, 1575 tanesinin elektrik tahrikli ve 963 tanesinin de İYM'lu olduğu belirtilmektedir. Amerika'da bu gelişmeler devam ederken, 1897 yılında İngiltere'de "Londra Elektrikli Taksi Şirketi (London Electrical Cab Company) tarafından 15 tane taksi kullanıma alınmıştır. (Şekil 2).



Şekil 2 Londra Elektrikli Taksi Şirketinin Ürettiği Taksiler

1900 – 1912 arası dönemde menzil ve performansı artırma düşüncesi oluşmaya başlamıştır. Bu amaçla 1900 yılında French Electroautomobile ve 1903 yılında Krieger elektrikli-benzinli araçları geliştirmiştir. Bu araçta elektrik motor, benzinli motor ile birlikte kullanılmış ve ilk defa hibrid konfigürasyonu denenmiştir.

Bu dönemlerde Ferdinand Porsche ilk deneysel hibrid elektrikli aracın tasarımını yapmıştır. Mixt Wagen olarak adlandırılan bu araçta yardımcı bir benzinli motor kullanılmıştır. İYM bataryaları şarj eden generatörü tahrik etmektedir ve daha sonra elektrik motorunu döndürmektedir.

1916 yılında Woods hibrid elektrikli araç üretilmiştir. Bu araçta 4 silindirli küçük benzinli motor direkt olarak elektrik motoru/generatör grubuna ve daha sonra konvansiyonel itici

şaftıyla ön tahrik aksına bağlanmıştır. Bu düzenleme ile paralel hibrid elektrikli araç geliştirilmiştir.

1920'lerin başında ise hemen tüm elektrikli araç üreticileri İYM kullanarak üretimlerini sürdürmüşlerdir. 1920'lerin ortasından itibaren 1960 yıllara dek İYM'lu araçlar tüm dünyada tamamen üstünlük kurmuştur.

1960'lı yıllarda EA'lara duyulan ilgi yeniden artmaya başlamıştır. İYM'lardan kaynaklanan hava kirliliği bu araçların üretimine geçiş düşüncesini oluşturmuş ve bazı küçük üreticiler hava kirliliğine karşı EA'ların üretimine geçmiştir.

İYM'lu araçları elektrikli versiyona dönüştüren bazı önemli otomotiv firmaları, bu dönemlerde elektrikli aracı baştan sona tasarlamak üzere harekete geçmiştir. Buna örnek olarak Ford Motor firması 1966 yılında bu firma aşağıdaki gereksinimleri yerini getirebilecek bir elektrikli aracı tasarlanmak üzere işe koyulmuştur;

- En düşük kirlilik,
- Kolay Çalışma,
- Düşük ilk satın alma ve kullanım maliyeti,
- En düşük yol ve park alanı kaplayacak kadar küçük olmasıdır.

Bu amaçla 1967 yılında ilk prototip yapılmış ve buna Comuta (Şekil 3) adı verilmiştir.

Comuta her biri ön tekeri tahrik eden 2 tane DC motoruna sahiptir. Her motor 18 kg ağırlığında ve 14 cm çapındadır. Motorun titreşimini kontrol eden bir sistem geliştirilmiştir. Aracın gücü, toplam ağırlığı 170 kg olan 4 adet kurşun-asit bataryasından sağlanmaktadır. Araç 40 km/saat hız ile 64 km menzile sahip olup; azami hızı 64 km/saattir.



Şekil 3 Ford Comuta elektrikli araç

1968 yılında General Electric GE Delta aracının uygulamasını ortaya çıkarmıştır. Bu aracın menzili 64 km, azami hızı da 89 km/saattir. Bu araçta nikel-demir bataryaları kullanılmıştır. Aynı yıl Ford nikel-kadmiyum bataryaları kullanarak deneysel E-Car aracının prototipini yapmıştır. Bu dönemde, AC tahrikindeki çok önemli gelişme olmadığı takdirde kabul edilebilir menzil ve performansa sahip EA'ların üretiminin zor olduğu görülmüştür.

1970'lerin ortalarına doğru petrol krizi ile birlikte başta Amerika, İngiltere, Fransa, Almanya, İtalya ve Japonya gibi bir çok ülke, elektrikli araç araştırmalarına tekrar hız vermişlerdir. Amerika'daki bazı küçük firmalar konvansiyonel araçları elektrikli hale dönüştürme çabalarına girmiştir. Avrupa'da 1970'li yıllar çok aktif bir dönemdir. 1973'de Electricite de France 80 tane konvansiyonel aracı elektrik tahrikli hale dönüştürmüştür. Almanya'da Daimler - Benz ve Volkswagen ise deneysel EA'lar yapmışlardır. 1975 yılında İtalya'da Fiat X1/23B isimli deneysel bir prototip geliştirmiştir. Bu araç 2 kişilik olup kurşun-asit bataryaları içermekte ve DC elektrik motoru tarafından tahrik edilmektedir. Menzili 48 km ve azami hızı 64 km/saatin altındadır.

Japonya'da 1970'li yıllar boyunca Daihatsu, Toyota, Mazda ve Mitsubishi birlikte prototip EA'lar üzerine çalışmışlardır. Bu çalışma için Japonya hükümeti 1971-1976 yılları arasında 20 milyon dolarlık destek sağlamıştır. İlk araçlarda kurşun-asit bataryalarıyla birlikte DC tahriki kullanılmıştır ve 1980'lerden itibaren AC tahrikinin kullanılmaya başlandığı görülmektedir.

1980'li yıllarda hükümetler EA'ların çevresel avantajları nedeniyle bu araçlara karşı ilgi duymaya ve elektrikli araç programları için resmi kaynaklardan parasal destek vermeye başlamışlardır. Böylece 1980 ortalarında ABD Enerji bakanlığının sponsorluğu ile Ford/GE

tarafından ETX-1 aracının geliştirilmesi sağlanmıştır. Bu araçta ileri AC tahrik sistemi kullanılmıştır. 200 V'luk kurşun-asit bataryaları 300A AC güç üreten Darlington transistor bazlı evirici ile birlikte 37 kw'lık 2 kutuplu indüksiyon motorunu tahrik etmek için kullanılmıştır.

1988 yılında Ford ve GE birlikte ETX-1 isimli aracın AC tahrikli sistemini geliştirmiş ve sodyum-sülfür bataryaları kullanmışlardır, temel olarak Ford Araştırma Laboratuvarlarında geliştirilen evirici ile senkron kalıcı manyetik motoru sürülmektedir. Bu motor, 2 kademeli entegre dişli kutusu ile, taşıtın ön aksına monte edilmiştir. 160 km menziline sahip ve 96 km/saat hızı olan ve sodyum-sülfür bataryaları da içeren 2 tane ETX-2 prototipi üretilmiştir. Bu 2 araç 1988 yılı Aralık ayında ABD Enerji bakanlığına teslim edilmiştir.

Fransa'da 1988 yılında 500 kadar elektrikli araç deneysel olarak kullanılmıştır. Bu araçların çoğu Peugeot 205 ya da Citroen C15 modellerinin dönüşümleridir. Almanya'da 1970'lerin sonlarındaki deneysel araçlar daha geliştirilmiştir ve 1988 yılında GES City Stromer isimli aracın dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Taşıt, o dönemin Avrupa Güvenlik Standartlarını karşılayacak şekilde tasarlanmıştır.

Aynı dönemde İtalya'da Fiat Panda Elettra modelinin dönüşümü olan elektrikli aracı geliştirmiştir. 1988'de Japonya'da DC tahriki AC'nin yerini almış hem kurşun-asit hem de nikel-demir bataryaları ile senkron ve indüksiyon tahrik motorları kullanılmıştır.

2.2. EA'ların Dönüm Noktaları

- | | |
|------|--|
| 1800 | Volta, primer hücre ve bataryayı geliştirdi. |
| 1821 | Faraday, elektrik motorunun temel prensibini ortaya koydu. |
| 1834 | Davenport, primer bataryalı ilk elektrikli yol aracının uygulamasını yaptı. |
| 1859 | Plante, sekonder hücre ve bataryayı geliştirdi. |
| 1869 | Gramme, 1 BG' den daha büyük ilk DC elektrik motorunu yaptı |
| 1881 | Trouve, sekonder bataryalı ilk elektrikli aracı yaptı. |
| 1885 | Benz, ilk İYM'lu aracın uygulamasını gerçekleştirdi. |
| 1899 | Jenatzy, 105.9 km/saat ile dünya hız rekorunu kırmıştır. |
| 1900 | Eşit sayıdaki buharlı, elektrikli ve benzinli araçlar birbirleriyle yarıştı. |

- 1900-12 EA'ların altın dönemi yaşandı.
- 1921-60 Benzin motorlu araçlar tamamen yaygınlaşmaya EA'lar ise yok olmaya başladı.
- 1960-90 EA'lar çok az sayıda da olsa tekrar görünmeye başladı.
- 1990 Yeni batarya teknolojileri ile artan sayıda elektrikli araç görülmeye başladı.

1990 yılından sonra birçok araç üreticisi elektrikli araç geliştirmeye başlamıştır. Hali hazırda bulunan bazı EA'lara örnek olarak GM EV1, Ford Think City, Toyota RAV4, Nissan Hipermini ve Peugeot 106 Electric gösterilebilir. Bunlarla birlikte prototip ve deneysel amaçlı üretilmiş birçok elektrikli araç daha bulunmaktadır. Bu araçların çoğu AC indüksiyon motor veya sürekli mıknatıslı (SM) senkron motor kullanmışlardır. 1990'larda büyük araç üreticileri EA'ların gelişmesi için batarya teknolojisinin de gelişmesi gerektiğini belirtmekte, bu amaçla da tümü-EA'lann batarya ve menzil kısıtlarını gidermek için hibrid elektrikli araç geliştirme çalışmaları başlatılmıştır. Özellikle Japon endüstrisi Toyota Prius, Honda Insight ve Nissan Tino, modellerini geliştirmiştir.

2.3. Elektrikli Araçların Geleceği

Petrol fiyatları ve çevresel kaygılar otomotiv sektöründe alternatif enerji kaynaklarını kullanan teknolojilerin önemini hızla artırıyor. Bu konuda IBM tarafından yapılan bir araştırma, 2020 yılında üretilecek tüm araçların hibrid teknolojisine sahip olacağını ortaya koyuyor [4].

Artık belirtileri iyiden iyiye hissedilmeye başlanan küresel iklim değişiklikleri, etkileri üzerinde tartışılrsa da herkesin kabul ettiği bir gerçek. Özellikle de insanoğlunun burada taşıdığı sorumluk konusunda herkes hemfikir. Araçlarımızda kullandığımız fosil yakıtların ve buna bağlı karbon emisyon değerlerinin de küresel ısınmadaki rolünü fark eden üreticiler, bu durumun önüne geçebilmek için ciddi önlemler alıyor. En son IBM gurubuna bağlı bir araştıma ekibinin yayınladığı raporda, otomotiv endüstrisinin geleceği araştırılırken, artık çoğu parametrenin küresel iklim değişikliği ve enerji sorunlarının etkisinde belirlendiğini ortaya koyuyor.

15 ülkeden 125 yetkiliyle yapılan görüşmelerin toplanmasıyla ortaya çıkan rapor, 2020 yılına dair üreticilerin planlarını ve bu planları neleri gözönünde bulundurarak hazırladıklarını gösteriyor. 8 yıl sonrasını kastederek 'Kaosun Ötesindeki Berraklık' başlığıyla yayınlanan raporda, otomotiv üreticilerinin çevresel sorunlar için bulduğu en ciddi çözüm olarak hibrid

ve elektrikli motor teknolojileri gösteriliyor. Hali hazırda yüzde 3 altında bir pazar payına sahip hibrid araçların 2020 yılı itibari ile pazarı ele geçireceğine işaret edilen raporda, yapılan diğer araştırmalara göre önümüzdeki yılın sonuna doğru 89'a yakın hibrid modelin dünya çapında 2 milyonluk satış rakamına ulaşacağı belirtiliyor. Yaklaşan enerji krizi, üreticilerin yakıt tasarrufunu araçlarında öncelik olarak görmeye başlamasında diğer bir neden olarak gösteriliyor. Raporda, hibrid motorlar gibi yakıt tasarrufuna doğrudan etki yapan teknolojilerin dışında, yeni nesil araçlarda kullanılan elektronik yol sistemleri ve sürücüyü bilgilendirmeye yönelik yeni teknolojilerin önemine de yer veriliyor. Akıllı otomobiller'in sahip olduğu bu tür teknolojilerin yakıt tasarrufu üzerindeki dolaylı etkilerine değinilen raporda, otomotiv sektörünün artık elektronik başta olmak üzere diğer teknoloji üreticileri ile beraber çalışmasının gerekliliğine vurgu yapılıyor.

Günümüzde petrol, spekülâtörlerin isteği ya da gerçekten kaynak azalması nedeniyle varil başına yüksek fiyatlara doğru çıkarken Ferrari , Porsche , Lexus , BMW , Mercedes gibi birçok lüks ve spor otomobil üreticisinin başlattığı daha az yakan çevreci motor projeleri bir bir gün yüzüne çıkıyor. İşte birkaç örnek; hibrid araç geliştirmeye başladığını açıklayan Ferrari, bu teknolojiyle araçlarında açığa çıkan karbondioksit gazını bu yıl sonuna kadar yüzde 40 oranında azaltacağını belirtti. Markanın ilk çevreci hibrid otomobili 2015 yılında pazara sunulacak.

Petrolde, tam bağımsız yakıt türlerine geçiş teknolojisi olarak bilinen hibridli modellerle ilgili Alman Porsche da bir dizi çalışma yürütüyor. Cayenne hibrid modelini 2010 yılında yola çıkaran Porsche , bu motoru aynı zamanda 4 kapılı Coupe modeli Panamera'da da kullanmıştır. Lexus 'tan GM markalarına, Honda 'dan Ford 'a kadar birçok markanın özellikle büyük motorlara yönelik hibridleştirme çalışmaları hızla devam ediyor. Hibrid konusunda öncü Prius modeliyle bir hayli yol alan Toyota , 2010'da güneş panellerini de kullanarak yeni bir sayfa açmıştır. Araç içindeki elektronik donanımın elektrik ihtiyacı güneşten karşılanırken daha az yakıt tüketimi ortaya çıkardı. Mercedes , BMW gibi markalarda daha az tüketime yol açan, dolayısıyla çevreyi daha az kirleten dizel motor teknolojileri de öne çıkıyor.

İYM'da kullanılan petrol ve türevleri yakıtların rezervlerinin azalması ve buna bağlı olarak fiyat artışı ilginç gelişmeleri de beraberinde getiriyor. BMW Group ise elektrik ile çalışan Mini modellerinin testlerine başladığını açıklamıştır. Birkaç ay boyunca geleceğin sürüş alternatiflerini belirlemek üzere elektrikle çalışan otomobiller üzerinde çeşitli testler uygulayacağını duyuran şirket, bu testler için yüzlerce Mini marka otomobil hazırlıyor.

İngiltere Oxford fabrikasında üretilen Mini 'ler Almanya Münih 'te gerekli şekilde değiştirilip testlere uygun hale getirilecektir.

BÖLÜM 3

ELEKTRİKLİ ARAÇ SİSTEMLERİ

3. Elektrikli Araç Sistemleri

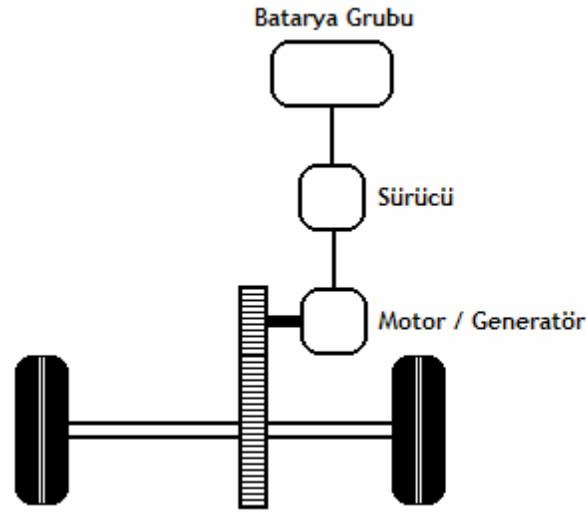
Elektrikli araçlarda, araç içerisine yerleştirilmiş enerji üretim, dağıtan ve tahrik sistem elemanları birlikte çalışmaktadır. Sistem içerisindeki elemanların birbirlerine bağlanma şekilleri, enerji akışındaki tercihi ve farklılıklarına göre tahrik sistem konfigürasyonları tanımlanmıştır. Elektrikli araçlar, tümü elektrikli ve hibrid elektrikli araçlar olarak olmak üzere 2 ana dalda incelenirler.

3.1. Tümü-Elektrikli Araçlar

Tümü-Elektrikli Araçlar, depolanan ya da üretilen tüm itici gücü elektrik olarak kullanmaktadır. Bu tip araçlarda ana güç kaynağına ek olarak yardımcı güç kaynakları da bulunmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi elektrik motorunun dönmesi için gerekli olan elektriksel enerji bataryalardan elde edilmektedir. Bunun yanında tümü-EA'larda ana bataryaya ilave yardımcı güç kaynağı olarak ikinci bir batarya veya süperkapasitör kullanılabilir. Bu yardımcı güç kaynakları pik çalışma şartları altında örneğin bir yokuşu tırmanırken veya ivmelenirken kısa periyotlar için yüksek güç sağlayabilmektedir. Yüksek enerji yoğunluğu uzun sürüş menzili, yüksek güç yoğunluğu ise ivmelenme ya da yokuş tırmanma ihtiyacını karşılayan dizayn parametreleridir. Bu durumun etkisi öncelikle yüksek enerji, düşük güç yoğunluğuna sahip batarya tipleri için önemlidir. Örneğin alüminyum-hava bataryalar 220 Wh/kg gibi yüksek enerji yoğunluğunun yanında, 30 W/kg gibi düşük güç yoğunluğuna sahiptirler. İyi bir ivmelenme veya tırmanma performansı için yüksek güç yoğunluğuna ihtiyaç duyulması durumunda yüksek güç yoğunluğuna sahip yardımcı güç kaynağına gereksinim duyulmaktadır. Şekil 4'de tümü-EA akış şeması görülmektedir.

Tümü-EA ların şarj edilebilir bataryalarında depolanmış bulunan elektrik enerjisi motor kontrolörüne güç sağlamaktadır. Motor kontrolü gaz pedalının pozisyonuna bağlı olarak elektrik motoruna gidecek gücün miktarını ayarlamaktadır.

Tümü-EA lar konvansiyonel araçlara göre daha verimlidir. Bir bataryalı elektrikli araç yaklaşık % 46 verimle çalışmasına karşın, konvansiyonel araçlar %18-25 arasında çalışmaktadırlar. Bir başka deyişle elektrikli araç bataryalarının şarjı için prizden çekilen enerjinin %46 sı tekerleklerde kullanılabilir işe dönüştürülmektedir. Bunun tersi konyansiyonel araçlarda yakıt tankında bulunan sıvı yakıtın % 18-25 kadarı tahrik tekerlerinde işe dönüştürülebilmektedir. Ancak bu durumda elektriğin santrallerde üretilmesi sırasında oluşan kayıplar dikkate alınmalıdır. [3]



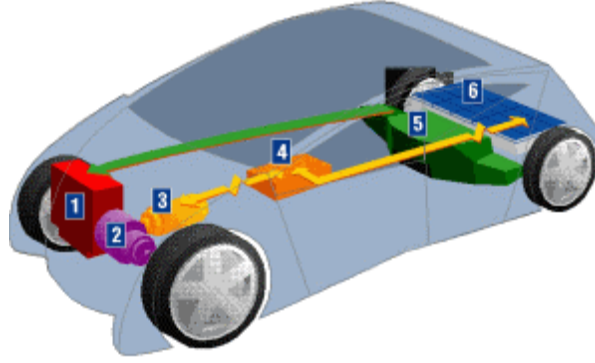
Şekil 4 Tümü- elektrikli araç

3.2. Hibrid Elektrikli Araçlar

Hibrid elektrikli araçlar birden fazla güç sistemine sahip araçlar olarak ifade edilebilmektedir. Hibrid elektrikli araç, enerjinin iki ya da daha fazla enerji deposundan sağlandığı ve bu enerji depolarından en az bir tanesinin elektrik enerjisi verdiği bir araç olarak ifade edilmiştir. Genel ifadeye bağlı olarak, batarya-yakıt pili, batarya-kapasitör batarya - batarya gibi bir çok çeşit hibrid elektrikli araç versiyonu vardır. Bir diğer tanımlamada ise hibrid elektrikli araç daha çok hem İYM'unun hem de elektrikli motorun birarada kullanıldığı olarak kabul edilmektedir.

Bir hibrid elektrikli araç enerji dönüşüm sistemi, enerji depolama sistemi, güç ünitesi ve taşıtı itici sistemden oluşmaktadır, depolama için başlıca seçenekler bataryalar, süperkapasitörler ve volanlardır (Şekil 5). Bataryalar kullanılan en yaygın enerji depolama sistemi olmasına

rağmen, diğer enerji depolama alanlarında da araştırmalara devam edilmektedir. Hibrid güç ünitesi olarak da otto motorlar, motorlar, gaz türbinleri ve yakıt pilleri kullanılmaktadır. İtici kuvvet seri hibrid sisteminde olduğu gibi elektrik motorundan, ya da paralel hibrid de olduğu gibi elektrik motoruna ek olarak İYM'larla sağlanabilmektedir. Çünkü paralel hibrid sistemde İYM, itici kuvveti mekaniksel olarak tekerlere vermektedir.



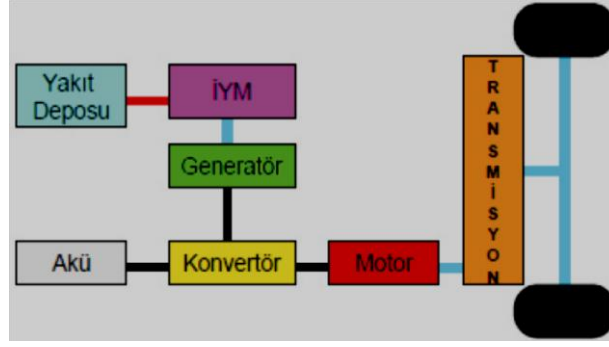
Şekil 5 Hibrid Elektrikli Araç

Şekil 5’deki hibrid elektrikli aracın alt elemanları;

- İYM
- Transmisyon
- Elektrik motoru
- Güç elektroniği
- Yakıt tankı
- Bataryalar’dır.

3.2.1. Seri Hibrid Elektrikli Araç

Bir seri HEA'da tekerleklere iletilen tahrik gücü elektrik motorundan sağlanmaktadır. Burada elektrik motoru, tahrik amacıyla elektrik gücü mekanik güce dönüştürmektedir. Motor için gerekli elektrik güç, elektrik enerjisini depolama aygıtlarından ya da İYM'dan sağlanmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6 Seri Hibrid Elektrikli Araç

İYM+generatör grubu, yakıtın kimyasal enerjisini önce mekanik enerjiye sonrasında elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Üretilen elektrik gücü bataryadan gelen güçle beraber elektronik kontrolörde birleşir. Bu kontrolör daha sonra sürücünün komutlarını tekerlek hızı ve ana tahrik motorundan elde edilen moment ile karşılaştırır ve her enerji kaynağından ne kadar güç kullanacağını sürücünün isteğine göre belirler. Kontrolör aynı zamanda güç elektroniği vasıtasıyla İYM-generatörü sürücü fren yapmak istediğinde rejeneratif mod için açar kapatır ve gücü bataryaları şarj edecek şekilde yönlendirir. Böylelikle generatörde üretilmiş olan elektrik enerjisi aynı zamanda bataryaları şarj etmek için de kullanılmış olur. Araç çalışırken bataryalar hem İYM generatör grubu tarafından hem de rejeneratif frenleme ile şarj edilmektedir. Aynı zamanda şarj cihazları ile de özellikle geceleri 5-8 saat içinde şarj edilir.

Seri hibrid sistem, yakıt pilli araca en yakın elektrikli araç konfigürasyonudur. Araç bu sayede sadece bataryalarını kullanarak hareket edebilmektedir. Ayrıca elektrik motorunun kendisi tekerlekler tahrik edebilmektedir. Burada kavrama ya da çok kademeli transmisyona gerek yoktur. Özellikle elektrik motorunun düşük devirlerde momenti yüksek olduğu için düşük devirlerde vites redüksiyonuna gerek kalmamaktadır. Aynı zamanda İYM tekerleklerle bağlı olmadığı için optimum verimde çalışabilmektedir. Böylelikle konvansiyonel olmayan motor tipleri de kullanılabilir. Örneğin gaz türbinleri, Atkinson ya da Stirling motorları gibi.

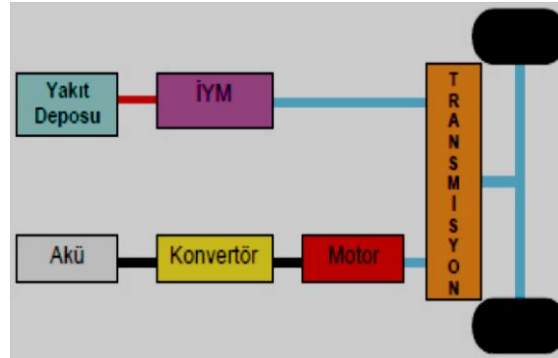
Seri tahrik sisteminin bir dezavantajı paralel tahrikte olmayan elektrik enerjisi üretmek amacıyla kullanılan generatördür. Generatör taşıt ağırlığını arttırmakta ve sisteme ek maliyet getirmektedir. Bundan dolayı verimi paralel hibrid elektrikli araçlara göre daha düşüktür.

3.2.2. Paralel Hibrid Elektrikli Araç

Paralel hibrid elektrikli araçta, İYM ve elektrik motoru aynı mil üzerinden tekerleklerle doğrudan mekanik bağlantı ile tahrik vermektedir (Şekil 7). Paralel hibrid araçlara örnek olarak, Honda Insight ve Honda Civic verilebilir. Paralel tahrik sistemleri mekanik olarak seri

hibrid sistemlere göre daha karmaşıktır. Örneğin İYM'nin tekerleklerle tahrik verebilmesi için bir transmisyonla ihtiyaç vardır. Bu elemanların birlikte düzgün bir şekilde çalışabilmesi için kontrolör seri hibride göre ilave özelliklere ihtiyaç duymaktadır. Paralel tahrikli taşıtlarda konvansiyonel taşıtlara göre daha küçük İYM kullanılır. Toplam güç ihtiyacı, çalışma verimine bağlı olarak kontrolör hangi kaynaktan ne kadar güç çekeceğini belirler. Kontrolör; yakıt ekonomisi, performans, emisyon ve menzil için optimize edilmiştir.

Seri hibrid sistemde ait olduğu gibi paralel hibrid sistemde de rejeneratif frenleme ile bataryalar şarj edilebilmektedir. Paralel hibrid sistem, seri sisteme göre daha küçük kapasiteli bataryalar kullanıldığı için şarj çoğunlukla rejeneratif frenleme sırasında yapılır. Buna ek olarak sürüş esnasında da elektrik motoru generatör gibi davranarak bataryaları şarj edebilmektedir. Daha küçük elektrik motoru ve bataryaların kullanılması paralel hibrid sistemin fiyatını seri hibrid sisteme göre daha düşük kılmaktadır. Burada içten yanmalı motor direkt olarak tekerleklerle bağlı olduğu için seri hibrid sisteme göre toplam enerji dönüşüm verimi daha yüksektir. Ayrıca hem İYM hem de elektrik motoru aynı anda güç sağladığı için taşıtın gücü daha fazladır.

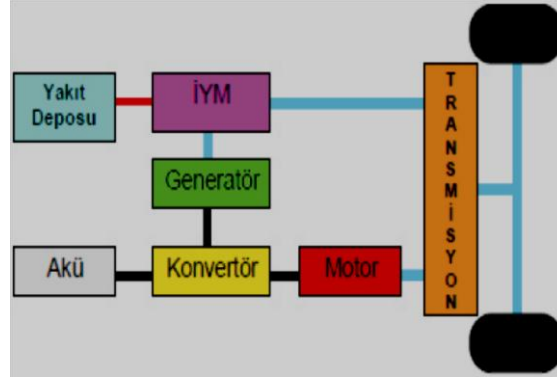


Şekil 7 Paralel Hibrid Elektrikli Araç Blok Şeması

3.2.3. Seri/Paralel Hibrid Elektrikli Araç

Bu seri/paralel tasarım paralel hibrid sisteme benzemektedir. Burada İYM direkt olarak tekerleklerle bağlıdır (Şekil 8). Tasarımın özelliği, İYM'nin transmisyon ile bağlı olmayıp seri tahrik sisteminde olduğu gibi generatör ile bağlı olmasıdır. Sonuçta İYM optimum verimde çalışabilmektedir. Düşük hızlarda araç seri hibrid sistemde olduğu gibi çalışmaktadır. Yüksek hızlarda ise İYM tekerleklerle güç verir ve seri tahrikteki gereksiz enerji dönüşümleri ile kaybedilen enerji en düşük seviyeye indirilir.

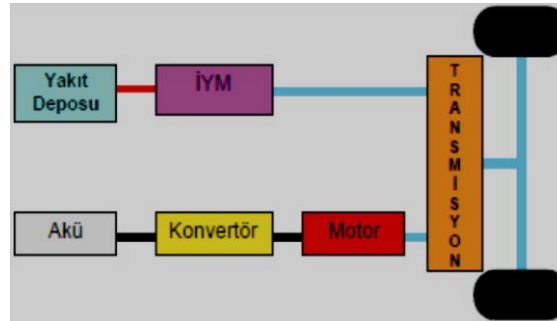
Toyota Prius'da bu sistem kullanılmıştır. Burada amaç hem paralel hem de seri sistemin avantajlarını kullanarak İYM'nin en verimli noktada çalışmasını sağlamaktır. Bundan sonra Japonya'da kısa sürede imal edilip satılan Nissan Tino Hibrid geliştirilmiştir.



Şekil 8 Seri-Paralel Hibrid Elektrikli Araç Blok Şeması

3.2.4. Kompleks Hibrid Elektrikli Araç

Kompleks hibrid elektrikli araçların Seri-Paralel hibrid araçlardan tek farkı seri-hibrid araçlarda kullanılan jeneratörün yerine gerektiğinde motor gerektiğinde jeneratör olarak çalışan bir elektrik makinesiyle değiştirilmesidir (Şekil 9).



Şekil 9 Kompleks Hibrid Elektrikli Araç

3.3. Hibridleşme Faktörü

Yakıt ekonomisi ve dinamik performans açısından Hibrid elektrikli araçlarda elektrik motorunun boyutlandırılması anahtar noktadır. Elektrik motorunun ve İçten Yanmalı motorun maksimum gücü arasındaki oran hibridleşme faktörü (HF) olarak tanımlanır.

$$HF = P_{EM} / (P_{EM} + P_{İYM})$$

$$= P_{EM} / P_{HEV} \quad (3.3.1)$$

P_{HEV} hibrid elektrikli aracın maksimum itiş gücüdür. Hibrid elektrikli araçlarda hibridleşme faktörü 0,3 ile 0,5 arasında optimum değerine ulaşır. Bu değer aralığından sonra elektrik tahrik sistem kapasitesinin artırılması hibrid elektrikli aracın performansını arttırmayacaktır.

3.4. HEA'nın Genel Performansı

Benzinli motorun ve jeneratör motorunun toplam gücü 50 kw (72 HP) kadardır. Özellikle düşük ve orta hızlarda taşıtların hareket momentlerinin çoğunu tahrik motoru sağlar ve içten yanmalı motor bir enerji kaynağı olarak çalışır. Bu tip bir taşıtın maksimum hızı 120 km/h kadardır. Aşağıdaki Çizelge 1'de benzinli, elektrikli ve hibrid motorlu taşıtların ivmelenme yakıt tüketimleri ve diğer özelliklerinin karşılaştırılmaları görülmektedir. Burada hibrid taşıtın 0 'dan 100 km/h 'a ve 400m'yi kaç saniyede aldığı belirtilmektedir.

Çizelge 1 İYM, Hibrid Elektrikli Araç ve Tümü EA performans karşılaştırması

Özellikler	Elektrik Motoru (kurşun/asit batarya)		İYM	Hibrid Motor
Yük (kg.)	136	13,6	363	240
Motor gücü (HP)	30	30	70	72
Bir dolun mesafesi	79,2	95,7	450,5	150,1
33 km/h şehir içi (m)	46,2	56	384,5	128,5
0–100 km/h hızlanma (sn.)	21,3	29,7	19,5	17,2
0–400 m. Hızlanma süresi	36,3	57,1	35,3	20,4
Yakıt Maliyeti (Cent /km)	0,68	0,56	0,68	0,68
Taşıt Maliyeti (Cent/km)	5,18	4,88	3,50	5,52

3.5. Üretim Hattındaki Hibrid Elektrikli Araçlar

3.5.1. Honda Insight

Şekil 10'da görülen Honda Insight bir hibrid elektrikli araç olup; araçta yüksek verimli benzinli motor, elektrik motoru ve 5 kademeli dişli kutusu kullanılmıştır. Bu aracın 0'dan 100 km/saat hıza 12 saniyede ulaştığı, azami hızının 180 km/saat ve AB kombine test çevrimine göre yakıt tüketiminin 28 km/litre olduğu ifade edilmektedir. İYM hafif malzemedendir yapılmıştır ve dünyanın en hafif motoru olduğu ifade edilmektedir. Elektrik motoru olarak ince (60 mm) DC fırçasız motor kullanılmıştır. Elektrik motoru direkt krank mili çıkışına

bağlıdır ve gücünü 20 kg ağırlığında ve 0,94 kWh enerji yoğunluğuna sahip 144V NiMH bataryalardan almaktadır. Bu batarya sadece rejeneratif frenleme ile şarj olmaktadır. Aracın toplam gücü, ivmelenme ve yokuş çıkma esnasında İYM'nin gücüne eklenen elektrik motorunun da desteği ile 50 kW'dan 56 kW'a ve momenti ise 4800 d/d'da 91 Nm'den 113 Nm'ye çıkmaktadır.



Şekil 10 Honda Insight

3.5.2. Honda Civic

Honda Civic Hibrid modelinde 4 silindirli 1339 ml benzinli İYM kullanılmıştır (Şekil 11). İYM'nin gücü 5700 d/d da 85 BG'dir. İYM çok noktadan enjeksiyon sistemine sahip olup 8 sübaplıdır. Yardımcı güç ünitesi olarak sürekli miktatsız elektrik motoru kullanılmaktadır. Bu motorun gücü 4000 d/d'da 13.4 BG'dir. Enerji depolama sistemi olarak 144 hücreden oluşan NiMH bataryalar kullanılmaktadır.

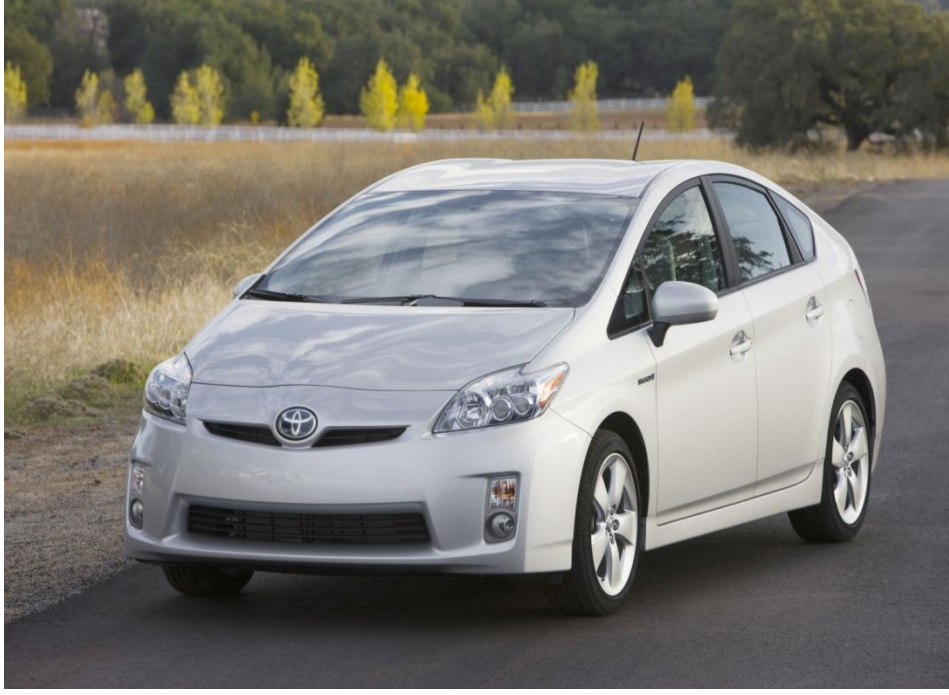


Şekil 11 Honda Civic

3.5.3. Toyota Prius

Toyota Prius hibrid elektrikli aracında benzinli motor ve elektrik motoru arasındaki güç paylaşımı Honda Insight'e göre daha eşit şekilde olmaktadır (Şekil 12). Bu paylaşım hibrid transmisyon sistemi ile sağlanabilmektedir. Planet dişli sistemi kullanılarak güç paylaşımı sağlayan bir sistem vardır. İYM mili planet dişli taşıyıcısına bağlıdır. Generatör tarafından üretilen elektrik enerjisi ya elektrik motoruna veya bataryanın şarj olabilmesi için DC akımın üretilmesi için eviriciye yönlendirilir.

Prius aracında 1.9 kWh kapasitede yüksek performanslı NiMH bataryaları kullanılmıştır. Toyota özel hibrid sistemde kullanılması amacıyla 1.5 litre benzinli motor geliştirmiştir. Bu motorda yüksek sıkıştırma oranının sağlanabilmesi ve bu sayede yüksek yanma veriminin sağlanabilmesi amacıyla çok küçük bir yanma odası kullanılmıştır. Bu motor düşük devirli olduğu için (Azami 4000 d/d) hareketli parçalar daha hafif yapılabilmektedir.



Şekil 12 Toyota Prius

4. Hibrid Araçlarda Kullanılan Elektrik Makinaları

22

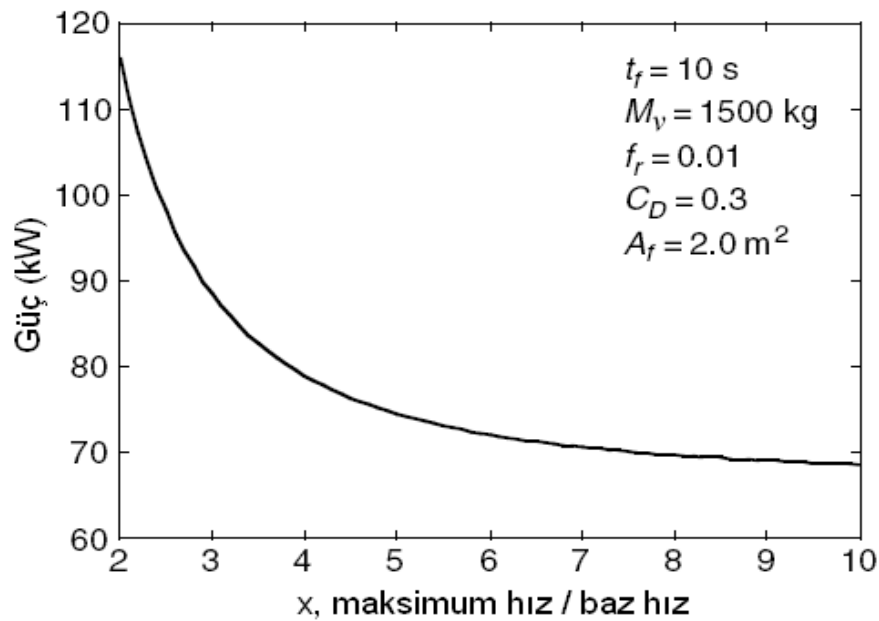
Maksimum ivmelenmeye göre boyutlandırma yaparken Newton'un ikinci yasası gereği düz yolda araç üzerine düşen yükler hesaplanarak bir güç bulunur. İvmelenme zamanı denklem (4.1)'deki gibi verilebilir[5]. Bu formüldeki Tp araç momenti araç hızının ve vites oranının bir fonksiyonu olduğundan integral analitik olarak çözülemez ancak numerik olarak çözülebilir.

$$t_a = \int_{V_1}^{V_2} \frac{Mv\delta V}{\left(\frac{Tp}{rd}\right) - M_v g Fr - \left(\frac{1}{2}\right)\rho_a C_d A_f V^2} \quad (4.1)$$

İkinci kriter olarak yokuş tırmanma kabiliyeti üzerinde yoğunlaşılabilir. Bu kriter ise Şekil 4.1'te belirtilen yol yükü (yuvarlanma direnci, hava direnci ve yerçekimi etkisi toplamı) eğrilerinden belirlenebilir.

Aracın son hız kriteri ise yine Şekil 4.1'de eğim yokken yol yükünün çekiş eğrisiyle kesiştiği yerden bulunabilir. Bazı durumlarda bu eğriler çakışmaz bu durumda motorun en yüksek hızı ve en yüksek dişli oranı ile aracın son hızına gidilebilir.

Araç çekiş motorunun tasarımında dikkat edilmesi gereken noktalardan biri de elektrik motoru baz hızının maksimum hızına oranı olmalıdır. Bu oranın büyümesi ile vites sayısı küçültülebilir. Ayrıca Şekil 4.2'te de görüleceği üzere aynı vites oranında aynı performansı sağlamak için daha küçük güçlü motor kullanılabilir [5].



Şekil 14 Gerekli çekiş gücünün maksimum hızın baz hıza oranına göre değişimi

Hibrid elektrikli araçlarda içten yanmalı motorla birlikte bir elektrik makinası da generatör olarak kullanılmaktadır. Bu generatör seti, içten yanmalı motoru en verimli noktalarında çalıştırmak için tasarlanmaktadır. Bu yüzden generatör tasarımında dikkat edilmesi gereken nokta İYM'nin en verimli olduğu moment-hız noktalarında generatörün yüksek verimli olmasıdır.

4.1. HEA'da Elektrik Makinası Seçim Kriterleri ve Kullanılan Makina Tipleri

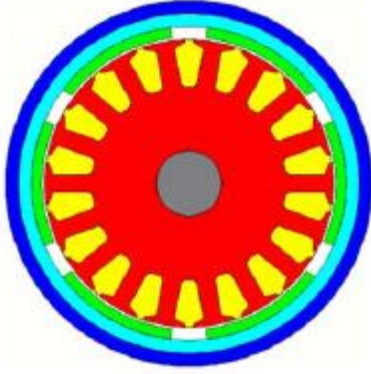
Hibrid Elektrikli Araçlarda elektrik makinası seçim kriterleri aşağıdaki gibidir;

- Ani ivmelenmeler için anlık yüksek güç ihtiyacını karşılanabilmesi,
- Ağırlığın azaltılması ve paketlemenin kolay olabilmesi için hacimsel ve kütsel olarak yüksek güç yoğunluğuna sahip olması,
- İlk kalkış ve tırmanma kabiliyeti için düşük hızlarda yüksek moment karakteristiği ve seyir halinde yüksek hızlarda yüksek güç karakteristiği,
- Sıfır hızdan nominal hızına kadar maksimum moment verebilme ve maksimum hızın yüksek olması,
- Büyük bir çalışma aralığında verimli olma,
- Aracın değişik çalışma koşulları için yüksek güvenilirlik ve dayanım özelliği,
- Kabul edilebilir maliyet.

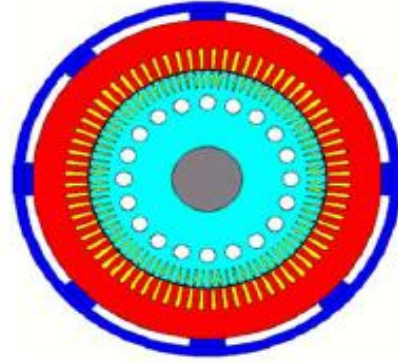
Elektrik motoru seçimi, hibrid elektrikli araçların güç aktarım organlarının dizilişine yani mimarisine de bağlıdır. Hibrid elektrikli araç tasarımında, içten yanmalı motorun aracın çekişi için mekanik olarak tekerlerle bağlantısı olmadığı için, çekiş işlevini sadece elektrik motoru sağlamaktadır. Buna karşılık, paralel hibrid konfigürasyonda, hibrid yönetim algoritmasına bağlı olarak içten yanmalı motor ve elektrik motoru çekişi değişik oranlarda paylaşmaktadır. Ancak, her durumda elektrik motoru seçilirken, araç modeli ile yapılan benzetimler ve sürüş simülasyonları ile belirlenen en kötü duruma göre elektrik motoru seçimi ve boyutlandırması yapılır. Boyutlandırmanın ötesinde elektrik motoru tasarımı yapılırken hibrid elektrikli araç çalışırken sıklıkla çalıştığı çalışma noktalarında verimin artırılmasına yönelik tasarım değişiklikleri yapılmalıdır. Hibrid elektrikli araçlar ve tümü elektrikli araçlarda tercih edilen ve kullanılan başlıca elektrik motoru çeşitleri şunlardır;

- a) Doğru Akım Makinaları

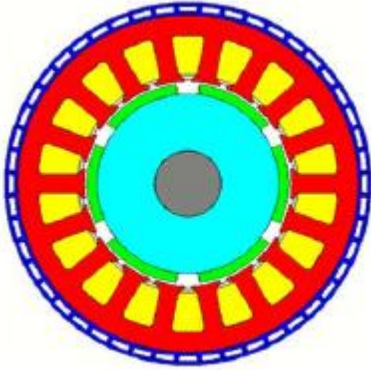
- b) İndüksiyon Makinaları
- c) Sabit Mıknatıslı Senkron Makinalar
- d) Anahtarlama Relüktans Makinaları



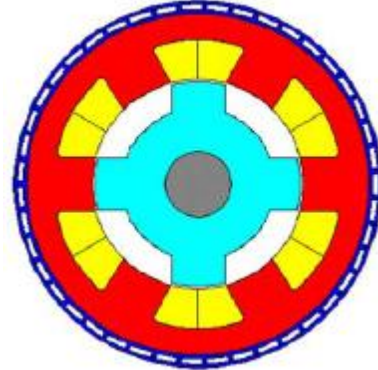
a) DC Motor Kesiti



b) İndüksiyon Makinası Kesiti



c) SMSM Kesiti



d) ARM Kesiti

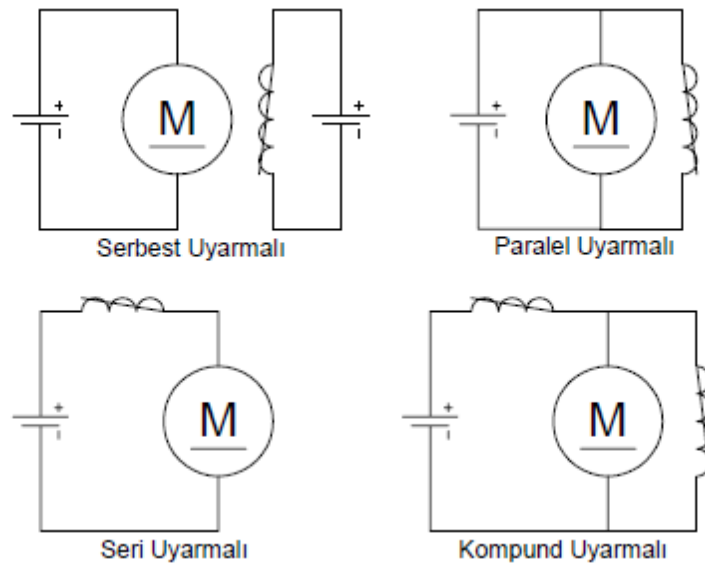
Şekil 15 Hibrid Elektrikli Araçlarda Kullanılan Elektrik Makinaları

4.1.1. Doğru Akım Motorları

DC motorlar, bir manyetik alan içerisinde bir iletkenin akım geçirilmesi sonucunda, o iletkene kuvvet etki etmesi prensibiyle çalışırlar. DC motorlarda manyetik alanın oluşturulması için statorda bir alan sargısı ve rotorda da dönme hareketinin sağlanması için bir endüvi sargısı bulunur. DC gerilim dönen kısma da uygulandığından fırça kolektör düzeneği kullanılmaktadır. Bu düzenek DC motorun bakım gereksinimini arttırmakta ve sanayiye olduğu gibi EA'larda da kullanımının azalmasına neden olmaktadır.

DC motorlar alan sargısının uyarılmasına göre serbest uyarmalı, seri uyarmalı, paralel uyarmalı ve kompund uyarmalı olmak üzere 4'e ayrılırlar. Şekil 16'da DC motor türlerinin şematik resimleri görülmektedir.

Serbest uyarmalı DC motorlarda, uyarma sargısı ve besleme sargısı elektriksel olarak birbirinden bağımsız olan iki kaynaktan beslenir. Seri uyarmalı DC motor da uyarma sargısı ve endüvi sargısı birbirine seri, paralelde ise paralel olarak bağlanmıştır. Kompund motor bu iki türün birleştirilmesiyle elde edilir.



Şekil 16 DC motor türleri

Seri uyarmalı motorlarda uyarma sargısından akan akım, endüvi sargısı ile aynıdır. Üretilen moment akımın karesi ile orantılı olması, elektrikli araç uygulamalarında seri uyarmalı DC motorların tercih edilmesine neden olmuştur. Buna karşın yüksüz çalışma durumunda çekilen akımın çok düşük olması motorun çok yüksek devirlere çıkmasına ve sonucunda da mekanik olarak zarar görmesine neden olur. Bu nedenle motor sürekli yüklü halde çalıştırılmalıdır.

Paralel uyarmalı DC motorda uyarma sargısına ve endüviye aynı gerilim uygulanmaktadır. Üretilen moment endüvi akımıyla lineer olarak orantılıdır, dolayısıyla seri uyarmalıya göre daha azdır.

Kompund motorlar ise seri ve paralel motorun kombinasyonudur. Uyarma sargılarının birbirine göre ters veya düz sarılması ile farklı karakteristikler gösterirler. Hız kontrolü, endüviye uygulanan gerilimin arttırılması veya uyarma sargısından akan akımın azaltılması

ile sağlanır. Ters yönde çalışma için ise endüvi sargısı ya da uyarma sargısından birine uygulanan gerilim yön değiştirilmektedir.

Seri, paralel ve kompund DC motorlarda ters yönde çalışma için ilave mekanik veya elektronik bağlantılar kullanılır. Bu anahtarlar sargılardan birine uygulanan gerilimin yönünün değiştirilmesini sağlar.

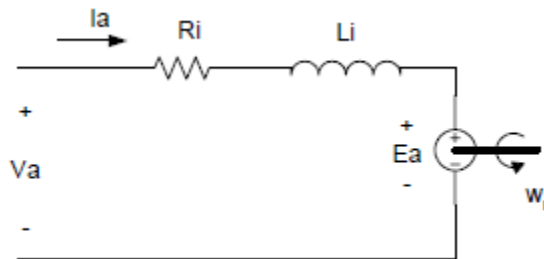
Serbest uyarımlı DC motorlarda her iki sargıya uygulanan gerilimin ayrı ayrı kontrol edilebilmesi, hız ve moment kontrolü açısından üstünlük sağlamaktadır. Motorun ters yönde dönmesi için, uygulanan gerilimlerden birinin yön değiştirmesi yeterlidir. Şekil 17’de serbest uyarımlı DC motor kontrol sisteminin şematik resmi görülmektedir.



Şekil 17 Serbest uyarımlı DC motor kontrol sistemi

DC makinalar kolay kontrol edilebilmesi, moment ve akı kontrolünün bağımsız olarak sağlanabilmesi ve yerleşmiş üretim teknolojisi gibi üstünlüklerine rağmen, yüksek bakım gereksinimine yol açan fırça aşınmaları, düşük nominal hız, komütatör nedeniyle oluşan yüksek elektromanyetik girişim, düşük özgül güç oranı (W/kg) ve düşük verimlilik gibi dezavantajları vardır.

Şekil 18’de DC motor endüvi eşdeğer devresi görülmektedir. Devre, iç direnç R_i , endüvi sargı endüktansı (L_i) ve rotorda endüklenen gerilimden (E_a) oluşmaktadır.



Şekil 18 DC Motor eşdeğer devresi

DC motor devre eşitlikleri aşağıdaki gibidir;

$$V_a = E_a + R_i \cdot I_a + L_i \cdot \frac{dI_a}{dt} \quad (4.1.1)$$

$$E_a = K \cdot \phi \cdot \omega_r \quad (4.1.2)$$

ω_r : motor hızı

ϕ : akı

K: makinanın yapısına bağlı olan bir sabit

J: motor eylemsizliği

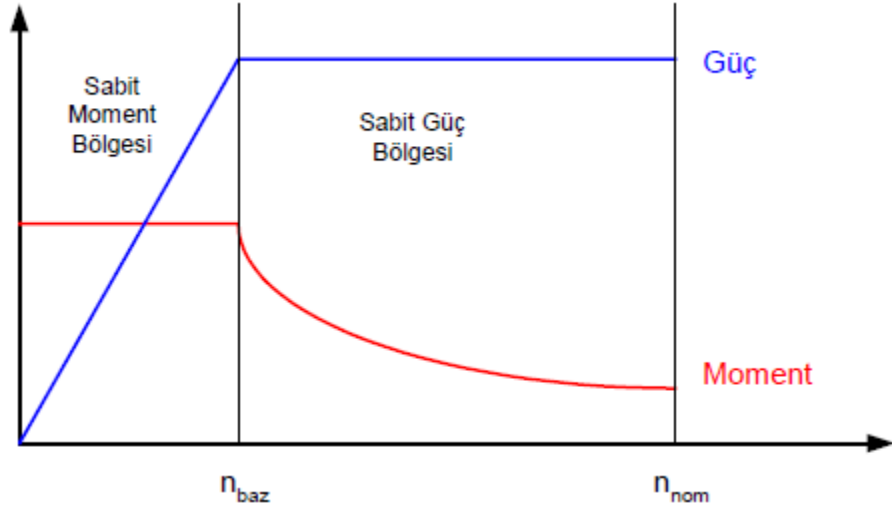
Tl: yük momenti

4.1.2 numaralı eşitlik 4.1.1 numaralı eşitlikte yerine konulur ve ifade düzenlendiğinde,

$$\omega_r = \frac{V_a - (R_i \times I_a) - (L_i \times dI_a/dt)}{K\phi} \quad (4.1.3)$$

4.1.3 numaralı eşitlikte de görüldüğü gibi DC motor hız kontrolü, rotora uygulanan gerilim veya akının kontrol edilmesiyle sağlanabilir.

Endüviye uygulanan gerilim V_a 'nın yükseltilmesi akımın artmasına neden olur. Bunun sonucunda elektriksel momenti yükselir ve motor hızlanır. Endüviye uygulanan gerilim nominal değerine ulaştığında, motor baz hızına ulaşmıştır. Bu durumda gerilimin daha fazla arttırılması mümkün değildir. Bu noktadan sonra motorun hızlanabilmesi için sabit gerilimde, uyarma devresi gerilimi düşürülerek akı azaltılmaya başlanır. Azaltılan akı endüvide endüklenen gerilimin düşmesine neden olur. E_a düştüğünde endüviden akım artar. Bu artış alan akısındaki azalmadan çok daha fazla olduğundan motor momenti artar ve sonucunda motor hızlanır. Motorun baz hızına ulaşana kadarki çalışma bölgesine moment bölgesi, alan zayıflatılarak hızın arttırıldığı bölgeye ise sabit güç bölgesi adı verilir. Şekil 19'da DC motor çalışma bölgelerinin şematik resmi görülmektedir.

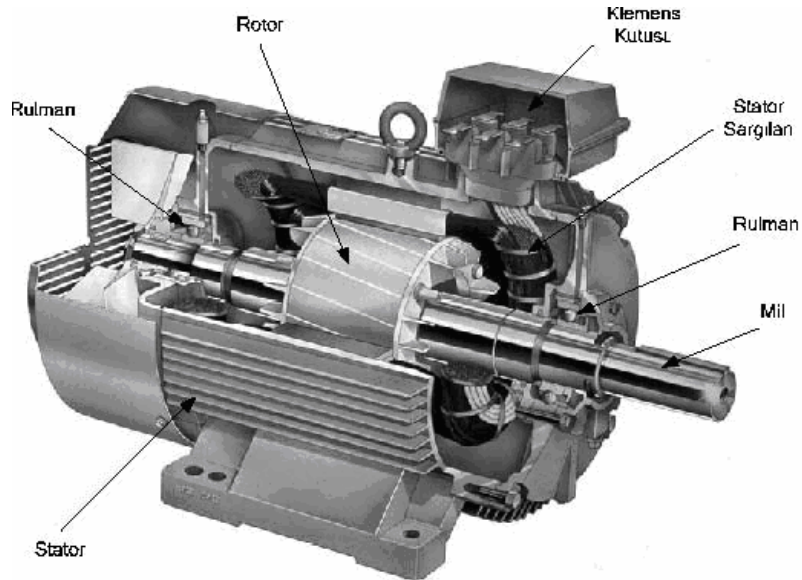


Şekil 19 DC motor çalışma bölgeleri

Yarı iletken güç elemanları üzerindeki son zamanlarda yaşanan büyük ilerlemeler ile IGBT ve IPM yarı iletken anahtarlama elemanlarının yüksek güçlerde üretilebilmeleri ile birlikte DC motorlar, elektrikli tahrik sistemlerinde yerlerini indüksiyon motorlara bırakmışlardır.

4.1.2. İndüksiyon Makinaları (Asenkron Motor)

Asenkron motorlar, genel olarak stator ve rotor olmak üzere başlıca iki kısımdan meydana gelir.



Şekil 20 Üç fazlı ve kısa devre rotorlu bir asenkron motor yapısı

4.1.2.1. Stator

Stator, asenkron motorun duran kısmıdır ve 0.4 – 0.5 mm kalınlığındaki silisyumlu sacların özel kalıplarda preslenmesiyle imal edilir. Daha sonra dışarıda sarılmış ve paketlenmiş üç

fazlı sargılar, statorda açılmış oluklara yerleştirilir. Sargı uçları klemens kutusundaki ilgili noktalara bağlanır. Gövdeye motor kapakları takılır ve motor kapaklarının ortasındaki rulmanlar ise statorun ortasında dönecek olan rotora yataklık eder.

4.1.2.2. Rotor

Asenkron motorun dönen kısmına rotor adı verilir. Sincap kafesli (kısa devre rotor) ve sargılı tip (bilezikli rotor) olmak üzere iki çeşit rotor yapısı vardır.

4.1.2.2.1. Sincap Kafesli Rotor (Kısa Devre Rotor)

Rotor, silisyumlu sacların kalıp preste kesilerek paketlenmesinden sonra, kanalların içine eritilmiş alüminyum dökülmesi ile elde edilir. Rotorun her iki tarafında, rotor çubuklarını kısa devre eden halkalar bulunur, bu halkaların uçlarındaki küçük kanatçıklar pervane görevi görerek motorun soğumasını sağlar. Bazı büyük motorlarda kanallara bakır çubuklar yerleştirilir.

4.1.2.2.2. Sargılı Rotor (Bilezikli Rotor)

Sacları paketlenerek silindir haline getirilen rotorun üzerindeki oluklara 3 fazlı alternatif akım sargısı yerleştirilir. Aralarında 120° faz farkı bulunan üç fazlı sargılar yıldız ya da üçgen bağlandıktan sonra elde edilen üç sargı ucu, mile yalıtılarak yerleştirilen üç adet bileziğe bağlanır ve böylece bilezikli rotor elde edilir[6].

4.1.2.3. Asenkron Motorun Çalışma Prensibi

3 fazlı, 2 kutuplu bir asenkron motora şebeke gerilimi uygulanır. Statordaki sargılardan geçen alternatif akımlar, 3 fazlı döner alanları meydana getirirler. Stator sabit olduğu halde, döner alanlar ortada bulunan kısa devreli rotorun çubuklarını kestiğinden, rotorun çubuklarından endüksiyon akımlarının geçmesine neden olurlar. Bu endüksiyon akımları rotorun kutup alanlarını meydana getirirler. Döner stator kutup alanları rotorun kutuplarını etkileyerek (benzer kutuplar birbirini iter, zıt kutuplar birbirini çeker prensibinden hareket ile) N kutbunun altındaki rotor çubukları bir yöne, S kutbunun altındaki rotor çubukları diğer yöne doğru iterler. Bu itme kuvvetlerinin meydana getirdiği döndürme momenti rotorun döner alan yönünde dönmesini sağlar.

Rotorun devri sayısı arttıkça, döner alanın rotor çubuklarını kesmesi azalacağından, rotor çubuklarında endüklenen emk'ler ve kısa devre çubuklarından geçen endüksiyon akımları azalır. Dolayısıyla, rotoru döndüren moment azalır. Böylece rotorun devir sayısında artış olmaz. Motor boşta çalışırken rotorun devir sayısı senkron devir sayısına (döner alanın

devrine) yaklaşır ama hiçbir zaman eşit olamaz. Çünkü bu iki devir sayısı eşit olursa, stator döner alanı rotor çubuklarını kesmez. Bu da rotorda döndürme momentini oluşturan endüksiyon akımının geçmemesine neden olur. Böylece rotorun kutup alanları oluşmaz ve rotor dönmemiş olur. Bu yüzden motorun momentini belirlemede etkili olan kayma kavramı ortaya çıkmıştır. Döner alanın devir sayısı ile rotor devir sayısı arasındaki farka “Rotorun Kayması” denmektedir. Diğer bir ifade ile, rotor devrinin senkron devirden geri kalmasına “Kayma” denilmektedir.

Kayma,

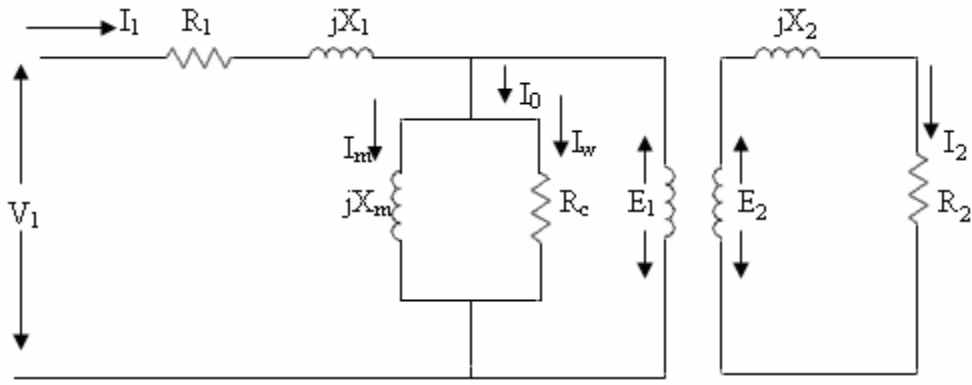
$$n_r = (1 - s)n_s \quad (4.1.3.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

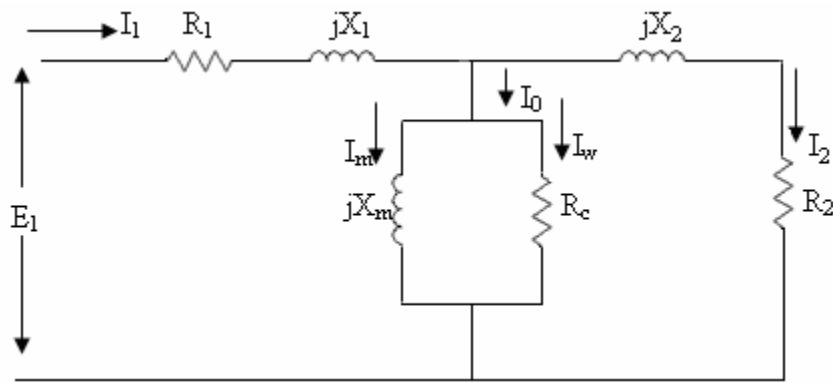
Eşitlik (4.1.3.1)'den de görüleceği gibi rotorun devir sayısı hiçbir zaman döner alanın devir sayısına yani senkron devire eşit olmaz. Bu da rotorun senkron devirden daha az bir devirle döndüğünün ve kaymanın sıfır olamayacağını göstermektedir. Rotor hızı senkron hıza yaklaştığında kayma azalacak ve buna bağlı olarak da rotor iletkenlerinde döndürme momentini üreten endüksiyon akımı azalacaktır. Böylece rotorun dönmesi yavaşlamaya başlayacaktır. Rotor yavaşlamaya başlayınca iletkenlerinde endüklenen gerilim artarak motorun tekrar hızlanması sağlanmaktadır

4.1.2.4. Asenkron Motorun Eşdeğer Devresi

Bir asenkron motorun çalışabilmesi için stator sargısının rotor sargısında gerilimler indüklemesi ve bu sargılardan akım geçmesi gerekir. Transformatörün çalışabilmesi ise birincil sargının ikincil sargıda gerilim indüklemesine ve bu sargıdan akım geçmesine dayanır. Çalışma ilkesindeki bu benzerlik nedeniyle asenkron makinanın eşdeğer devresi de transformatörün eşdeğer devresine çok benzer. Üç fazlı bir asenkron motor için bir faz eşdeğer devresi Şekil 21’de gösterilmiştir



(a)



(b)

Şekil 21 Üç Fazlı Asenkron Motorun Bir Faz Eşdeğer Devresi

a) Transformatör Devresi b) Primere İndirgenmiş Tam Eşdeğer Devresi

Statora V_1 geriliminin uygulanması ile mıknatıslanma reaktansı (X_m), primer ve sekonder devreyi bağlayan Φ_m akısını oluşturur ve I_m mıknatıslanma akımının geçmesini sağlar. Zamana göre değişen bu hava aralığındaki akı, rotorda I_2 akımını oluşturacak bir emk indükler. Toplam I_1 stator akımı I_2 rotor akımı ile boşa çalışma akımı olan I_0 ' ın fazör toplamıdır.

$$I_1 = I_2 + I_0 \quad (4.1.4.1)$$

Asenkron motorlarda boşa çalışma akımı, hava aralığı boyuna bağlı olarak tam yük akımının %20-%60'ı kadardır.

Rotor büyüklüklerinin bulunması stator büyüklüklerine göre daha zordur. Çünkü rotor döner alana göre n_2 değişken hızı ile döner. Bunun sonucunda birçok büyüklük kaymanın

fonksiyonu olur. Motor hızının etkisi eşdeğer devredeki R_2/s parametresi ile belirlenir. Rotor dururken $s=1$ olduğu için bu gerilim de f_1 frekansında olur. Rotor dururken indüklenen gerilimi ve durmadaki diğer büyüklükleri “0” alt indisi ile gösterirsek, rotorda indüklenen gerilim ve rotor frekansı aşağıdaki gibi verilebilir.

$$E_2 = 4.44 f_1 N_2 \Phi k_{w2} \quad (4.1.4.2)$$

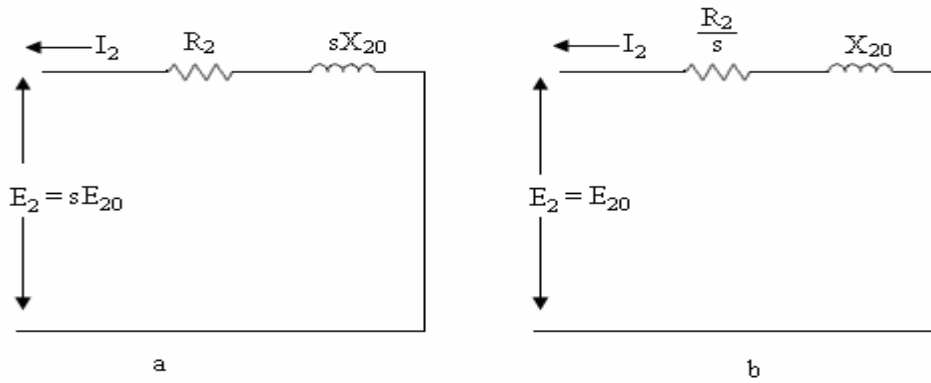
$$E_2 = sE_{20}$$

$$n_r = n_s \rightarrow s=0 \text{ ve } E_2=0$$

$$n_r=0 \rightarrow s=1 \text{ ve } E_2=E_{20} \quad (4.1.4.3)$$

$$f_2 = sf_1 \quad (4.1.4.4)$$

Motorun herhangi bir kayma anındaki ve motorun durma anındaki rotor eşdeğer devresi ise Şekil 22’de verilmiştir[7].



Şekil 22 Rotor Eşdeğer Devresi a)Herhangi Bir (s) Kaymasında b)Durma Anında

O halde hem rotorda indüklenen gerilim hem de rotor frekansı kayma ile orantılıdır. Normal işletmede özellikle nominal yüklerde kayma küç ve yüzde birkaç değerinde olduğundan, rotorda indüklenen gerilim birkaç volt ve frekans birkaç herztir[7]. Bu yüzden kısa devre çubukları rotor saç paketinden yalıtılmaz. Rotorda yalıtkan malzeme kullanılmadığı için sincap kafesli asenkron motorlarda birim hacme düşen güç, bilezikli asenkron motorlardakinden daha fazladır.

Kayma $s=0$ iken, motor mil hızı n_r , döner alanın hızı olan n_s ’e eşit olur. Hava aralığındaki döner alan rotor iletkenlerini kesemez ve böylece rotor iletkenlerinde indüklenen elektromotor kuvvet ve rotor akımı sıfır olur.

Şekil 22'deki eşdeğer devreden de görüleceği gibi $s = 0$ iken $I_2 = 0$ olur (sekonder açık devre).

Genel olarak I_2 ;

$$I_2 = \frac{E_1}{R_2/s + jX_2} \quad (4.1.4.5)$$

olarak hesaplanabilir. İndirgenmiş rotor akımının genliği,

$$I_2 = \frac{E_1}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} \quad (4.1.4.6)$$

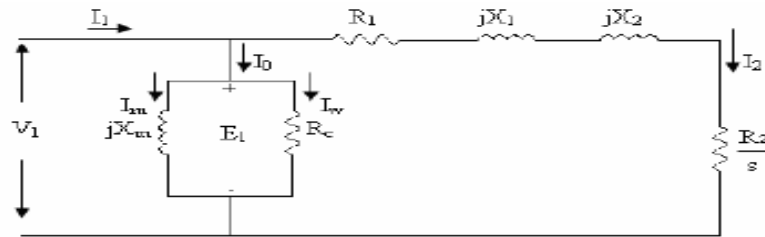
formülüyle hesaplanabilir.

Şekil 22'deki eşdeğer devreden stator sargılarında indüklenen E_1 gerilimi stator gerilimi cinsinden yazılacak olursa;

$$E_1 = V_1 - I_1(R_1 + jX_1) \quad (4.1.4.7)$$

Pratikte $(R_1 + jX_1)$ 'deki gerilim düşümü oldukça küçüktür ve $E_1 = V_1$ alınabilir.

Böylece Şekil 22'deki devre Şekil 23'deki devreye indirgenebilir.



Şekil 23 Üç Fazlı Asenkron Motorun Bir Faz Yaklaşık Eşdeğer Devresi

Şekil 23'e göre motora uygulanan V_1 gerilimi, boşa çalışma bileşenlerinin üzerinde düşer. Mıknatıslanma ve demir kayıpları akımı;

$$I_m = V_1 / jX_m$$

$$I_w = V_1 / R_c$$

olur. Stator akımı I_1 ;

$$I_1 = \frac{V_1}{\left(\frac{\left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right) + j(X_1 + X_2)}{jX_m + R_c} \right)} \quad (4.1.4.8)$$

Bu durumda rotor akımı I_2 ;

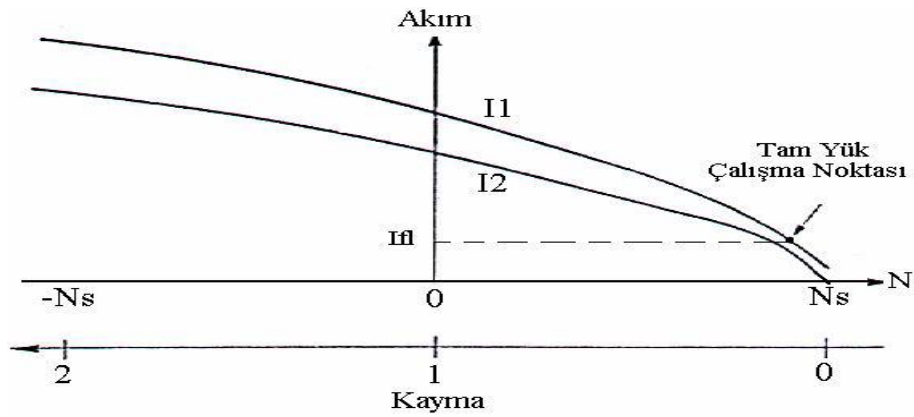
$$I_2 = \frac{V_1}{\left(\left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right) + j(X_1 + X_2) \right)} \quad (4.1.4.9)$$

olarak hesaplanır. Akımın genliği ise,

$$I_2 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right)}} \quad (4.1.4.10)$$

olur. Herhangi bir sabit kaymada, (4.1.4.6) ve (4.1.4.10) eşitliklerindeki I_2 ' lerin arasındaki fark tam yük akımında bile küçüktür. I_1 ve I_2 ' nin sabit V_1 geriliminde kaymayla değişimi, Şekil 4.1.4.4 de gösterilmiştir.

I_{f1} noktası, tipik tam yük nominal hızda çalışma noktasını göstermektedir. Hızın azalmasıyla akım değerleri artmaktadır. Motorun durması durumunda akım, nominal akımın üç hatta daha fazla katına ulaşır[8].



Şekil 24 Stator ve Rotor Akımı

Kaçak reaktans ve empedansın kaymaya bağlı ifadeleri ise şöyledir.

$$X_2 = \omega_r L_2$$

$$X_2 = 2\pi f_r L_2$$

$$X_2 = 2\pi s f_s L_2 \quad (4.1.4.11)$$

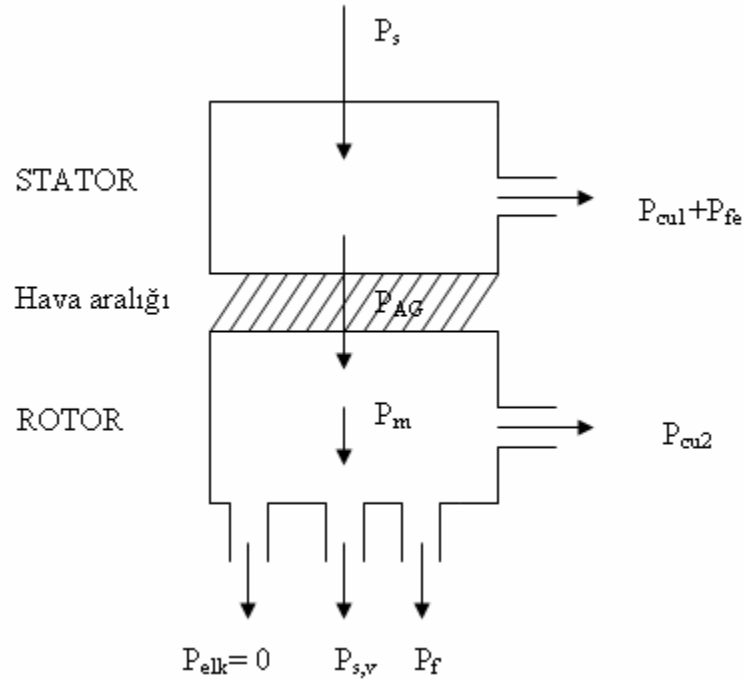
$$X_2 = s(2\pi f_s L_2)$$

$$X_2 = sX_{20}$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2} \quad (4.1.4.12)$$

4.1.2.5. Asenkron Motorlarda Güç, Moment ve Güç Faktörü

Motor çalışırken şebekeden P_s giriş gücünü çeker. Bu giriş gücü, statorda bakır ve demir kayıplarına uğradıktan sonra stator-rotor arasındaki hava boşluğundan rotora aktarılır. Rotor devresinde de bakır kayıpları, demir kayıpları, rüzgâr kayıpları, sürtünme kayıpları ve kaçak yük kayıplarına uğrayan güç, mile yük gücü veya mekanik güç olarak aktarılır. Ancak rotor demir kayıpları diğer kayıplar yanında çok küçük olduğundan, rotor devresinde gösterilmez. Motorun toplam demir kayıpları stator tarafında stator demir kaybı olarak gösterilir. Bu açıklamalar ışığında bir asenkron motorun güç akış diyagramı Şekil 25’de gösterilmiştir.



Şekil 25 Güç akış diyagramı

Stator, şebekeden P_s birincil aktif gücünü alır. Asenkron makinanın etiketinde belirtilen gerilim, akım ve güç katsayısı değerleri ile bu güç kolayca hesaplanabilir. Hat gerilimi U_1 ve hat akımı I_1 kullanıldığında, güç formülü, motorun bağlantı şekline bağımlı olmaz. Şebekeden çekilen aktif güç ifadesi aşağıdaki gibidir.

Giriş gücü P_s ;

$$P_s = \sqrt{3}U_1I_1 \cos \phi_1 \quad (4.1.5.1)$$

formülüyle hesaplanır. Bu güçten Stator bakır kayıpları(P_{cu1}) ve Demir Kayıpları(P_{FE}) çıkarılarak Hava aralığı gücü

$$P_{cu1} = 3 \times I_1^2 \times R_1$$

$$P_{FE} = 3 \times (V_1)^2 / R_c \quad (4.1.5.2)$$

$$P_{AG} = P_s - P_{cu1} - P_{FE}$$

formülüyle bulunur. Milden alına güç ise Hava aralığı (P_{AG}) gücünden rotor bakır kayıpları (P_{cu2}) ve sürtünme ve ventilasyon kayıpları ($P_{s,v}$) çıkarılarak;

$$P_{cu2} = 3 \times I_2^2 \times R_2$$

$$P_m = P_{AG} - P_{cu2} \quad (4.1.5.3)$$

$$P_f = P_m - P_{s,v}$$

şeklinde hesaplanır. Eşitlik (4.1.5.2) ve Eşitlik (4.1.5.3)'den aşağıdaki hesaplamalar elde edilir.

$$P_{AG} = 3 \times I_2^2 \times R_2 / s$$

$$P_m = 3 \times I_2^2 \times R_2 / s - 3 \times I_2^2 \times R_2 \rightarrow P_m = 3 \times I_2^2 \times R_2 (1-s) / s \quad (4.1.5.4)$$

$$P_{cu2} = s \times P_{AG}$$

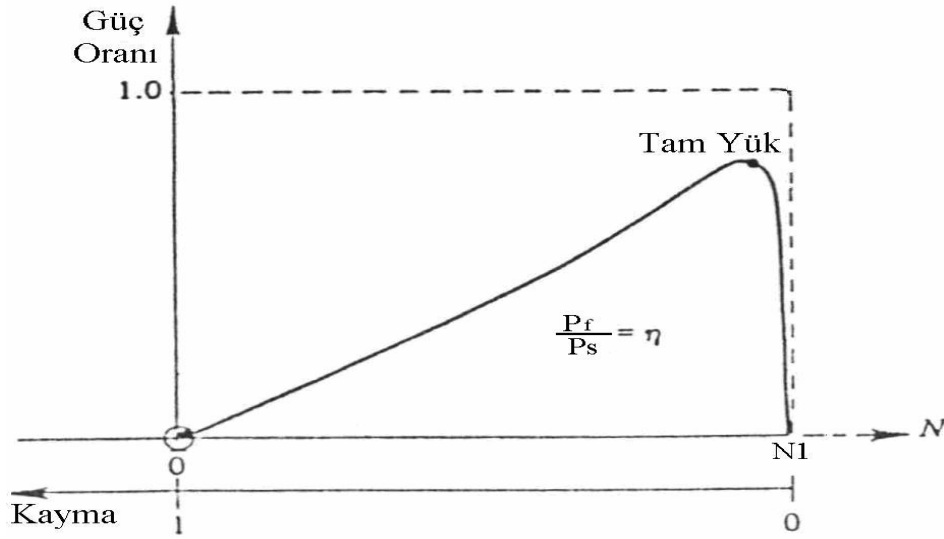
$$P_m = (1-s) \times P_{AG}$$

Asenkron motorun şebekeden çektiği gücün yüzde kaçının motorun milinden mekanik güç olarak alındığını verim gösterir. Verilen güç ile alınan güç arasındaki fark toplam kayıplardır. Asenkron motorlarda kayıplar, stator demir kaybı, stator ve rotor bakır kayıpları ile rotorun sürtünme ve rüzgâr kaybından ibarettir. Motorun kayıpları deneyle ve hesaplamalarla bulunabilir.

Asenkron motorun şebekeden çektiği güç hassas olarak vatmetrelerle ölçülebildiği halde, motorun milinden alınan mekanik güç aynı hassasiyetle ölçülemez. Bu yüzden bir motorun verimini bulmak için kayıpların hesaplanması yolu tercih edilir.

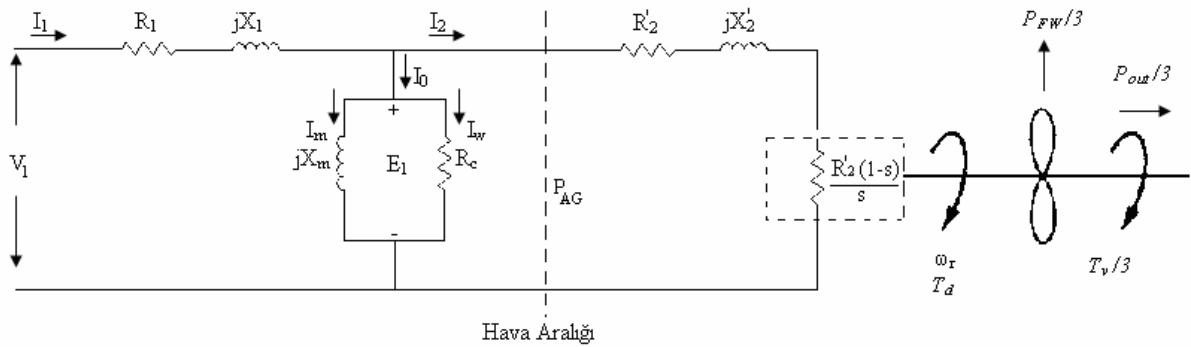
$$\mu = \frac{P_f}{P_s} \quad (4.1.5.4)$$

olarak verilebilir. Şekil 26’da ise bir asenkron motorun genel olarak devir sayısına ve kaymaya bağlı olarak verim değişimini gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 26 Verimin Kayma ve Hız İle Değişimi

Asenkron motorlarda meydana gelen güç dağılımı, motorun bir faz eşdeğer devresinde aşağıdaki gibi gösterilebilir[9].



Şekil 27 Bir Faz Eşdeğer Devre Üzerinde Elektromekanik Güç Dönüşümü

Eşdeğer devreye göre devrilme momenti T_d aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$T_d = \frac{P_{mek}}{\omega_r} = \frac{(1-s)P_{ag}}{\omega_r} = \frac{(1-s)}{\omega_r} (I_2')^2 \frac{R_2'}{s} \quad (4.1.5.5)$$

Burada ω_r rotorun açısal hızıdır. Devrilme momenti senkron açısal hız cinsinden ifade edilirse;

$$T_d = \frac{(I_2')^2 R_2}{\omega_s} \quad (4.1.5.6)$$

I_2 akımının değeri Formül (4.1.4.9)' da verilmişti. Bu ifade yukarıda yerine yazılırsa genel moment

ifadesi elde edilmiş olur.

$$T_d = \frac{60}{2\pi n_s} 3 \frac{1}{s} R_2 \frac{V_1^2}{(\frac{R_2}{s})^2 + (X_1 + X_2)^2} \quad (4.1.5.7)$$

Yol alma anındaki momentin bulunması için kayma değerinin $s=1$ olması gerekir. Bu durumda yol alma momentini T_{yol} ise şu şekilde olur.

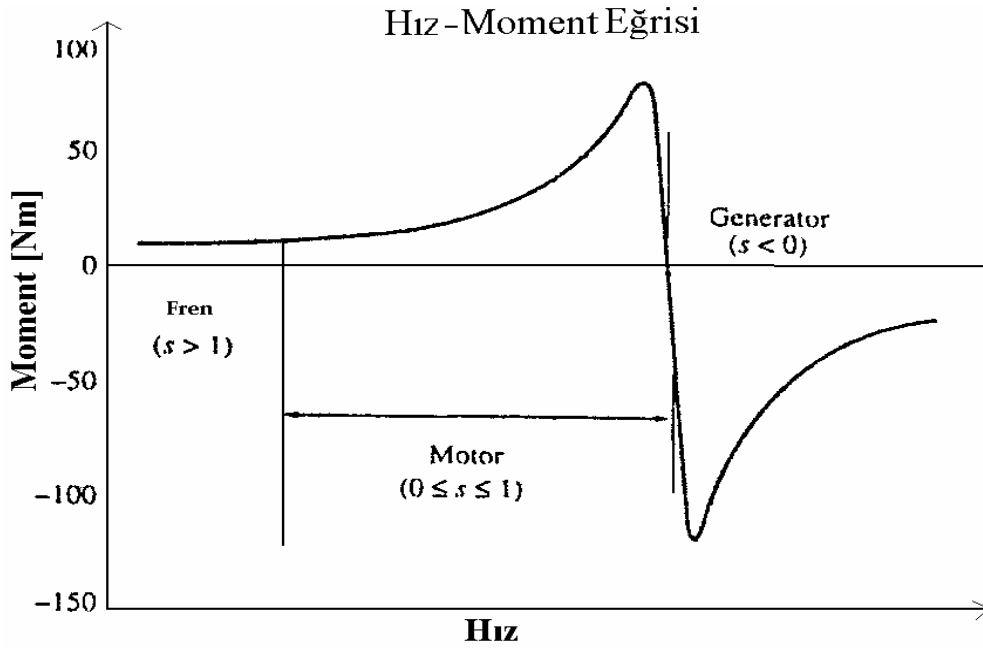
$$T_{yol} = \frac{60}{2\pi n_s} 3 R_2 \frac{V_1^2}{(R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} \quad (4.1.5.8)$$

Maksimum devrilme momentini $\frac{R_2}{s}$ direncinin $\sqrt{R_1^2 + X_k^2}$ reaktansına eşit olduğu durumda elde edilir.

$$\frac{R_2}{s^2} = R_1^2 + X_k^2 \quad (4.1.5.9)$$

$$T_{dmax} = \frac{60}{2\pi n_s} 3 \frac{V_1^2}{2[R_1 + \sqrt{(R_2)^2 + (X_k)^2}]} \quad (4.1.5.10)$$

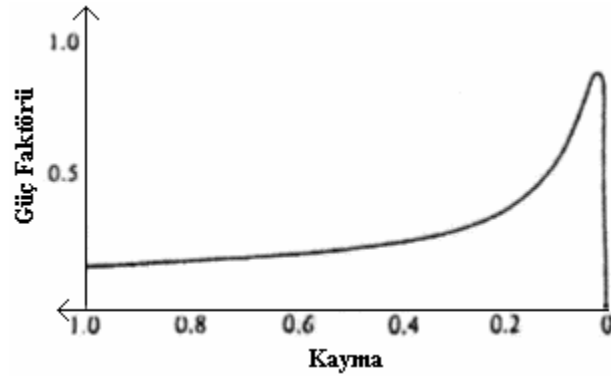
Denklemden de görüleceği üzere rotor direncinin ve frekansının maksimum momente herhangi bir etkisi yoktur. Asenkron motorun moment-hız grafiği Şekil 28'de gösterilmiştir[9].



Şekil 28 Moment Hız Grafiği

Motor üç fazlı dengeli bir yük olduğundan ve motora sinüzoidal bir gerilim uygulandığından güç faktörü, besleme gerilimi ile akımı arasındaki açının kosinüsü olur. Şekil 29'de ise tipik Kayma-Güç faktörü grafiği görülmektedir.

$$PF = \cos \phi_1 \quad (4.1.5.11)$$



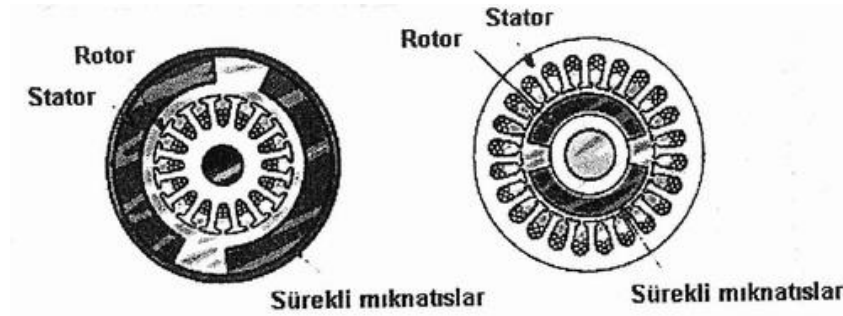
Şekil 29 Güç Faktörünün Kayma İle Değişimi

4.1.3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinalar

Mıknatısların kullanılması, çalışma prensibi ve tasarım açısından özellikle doğru akım ve senkron makineler için çok elverişlidir. Önceki bölümde açıklandığı gibi, doğru akım makinelerinde endüvi ve uyarma sargıları olmak üzere iki ana sargı mevcuttur. Bu sargılar farklı şekillerde beslenerek, motorda dönme hareketi için gereken akıyı oluştururlar. Akı

üretimi için sargı yerine sürekli mıknatıs malzeme kullanımı ile elde edilen makineler sürekli mıknatıs makineler olarak adlandırılır.

SM malzeme, klasik tip DA makinesinde kutup ayaklarında bulunan uyarma sargısı yerine kullanılarak, ihtiyaç duyulan uyarma alanı oluşturabilir. Elde edilen bu tip makine, fırçalı tip sürekli mıknatıslı doğru akım makinesi olarak anılır. Bunun nedeni, endüvi devresinin klasik tip DA makinesi olduğu gibi fırça-kollektör düzeneği üzerinden beslenmesidir.



Şekil 30 Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinelerin yapısı

Benzer şekilde, SM malzeme rotor devresi üzerinde de kullanılabilir. Bunun için, en basit şekilde bir senkron makine yapısı göz önüne getirilmelidir. Bilindiği gibi senkron makinenin rotorunda bir doğru akım sargısı statorunda ise farklı sayılarda faz sargıları bulunmaktadır. Rotorda SM malzeme kullanımı ile sürekli bir uyarma alanı oluşturulur. Rotor sargısı ortadan kalktığından dolayı, bunun beslenmesi için gereken fırça-kollektör düzeneği ihtiyacı da ortadan kalkacaktır. Bu nedenle bu tip makineler fırçasız tip SM makinalar olarak anılır. Şekil 30'da bu iki tip makinenin yapıları görülmektedir.

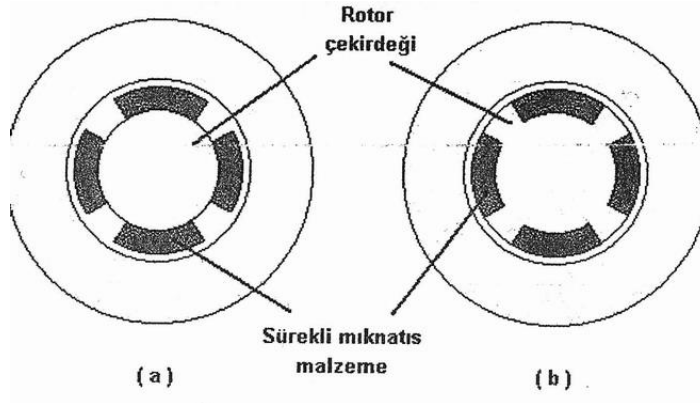
Fırçasız tip SM makinalar, stator sargılarının beslenme şekline göre iki grupta incelenir. Sürekli mıknatıslı senkron motorlar, sabit moment üretimi için sinüsoidal formda stator akımına gereksinim duyar ve sinüsoidal zıt emk'ya sahiptir. SM doğru akım makinaları ise sabit moment üretimi için dikdörtgen biçiminde stator akımlarına gereksinim duyar ve trapezoidal formda zıt emk'ya sahiptir.

Sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım makinalarında oluşacak MMK, sabit hızla dönmez. Ayrıca stator hava, aralığı akısı, SMSM'larda olduğu gibi sinüsoidal değil trapezoidaldir. Bu özellikler SMFDAM ile SMSM arasındaki en önemli farklardır.

4.1.3.1. Mıknatıslı rotor yapıları

Tasarım özelliklerine göre mıknatıs malzeme, rotorda yüzeye monte edilebileceği gibi, rotorun içine de farklı yapılarda yerleştirilebilir.

4.1.3.1.1. Rotor yüzeyinde mıknatıs malzeme yapısı



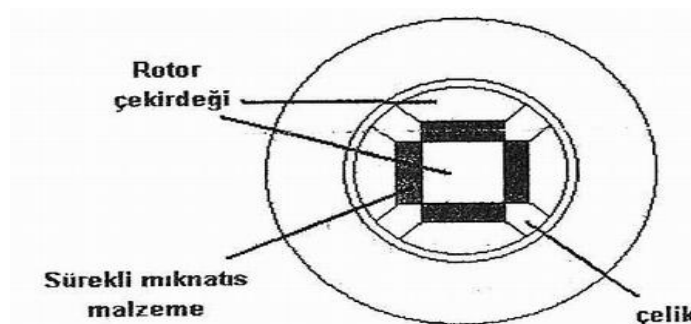
Şekil 31 Rotor yüzeyinde mıknatıs malzeme yapısı

Bu yapıda, mıknatıs malzeme, yay şeklinde rotor yüzeyine yapıştırılabileceği gibi, rotor yüzeyinde açılan oluklara da yerleştirilebilir(Şekil 31). Bu yöntemde iki farklı tip rotor yapısı elde edilebilir.

2 kutuplu bir rotor yapısı düşünüldüğünde, eğer mıknatıslar rotor yüzeyine çıkıntılı olarak yerleştirilirse ve kullanılacak olan mıknatısın yay uzunluğu 180° 'den az ise, çıkık kutuplu rotor yapısı oluşturulur. Rotor yüzeyine çıkıntılı olarak yerleştirilen mıknatısların yay uzunluğu 180° ise veya mıknatıslar rotor içine açılan oluklara yerleştirilirse yuvarlak rotor yapısı elde edilir.

Rotor yüzeyinde mıknatıs malzeme yapısında mıknatısların yerleştirilmesi için epoksi yapıştırıcı kullanılır. Buna bağlı olarak, yüksek hız gerektiren uygulamalarda, savrulmaya karşı dayanımlarının düşük olması nedeniyle bu yapıdaki makinalar tercih edilmez.

4.1.3.1.2. Rotora gömülü mıknatıs malzeme yapısı



Şekil 32 Rotora gömülü mıknatıs malzeme yapısı

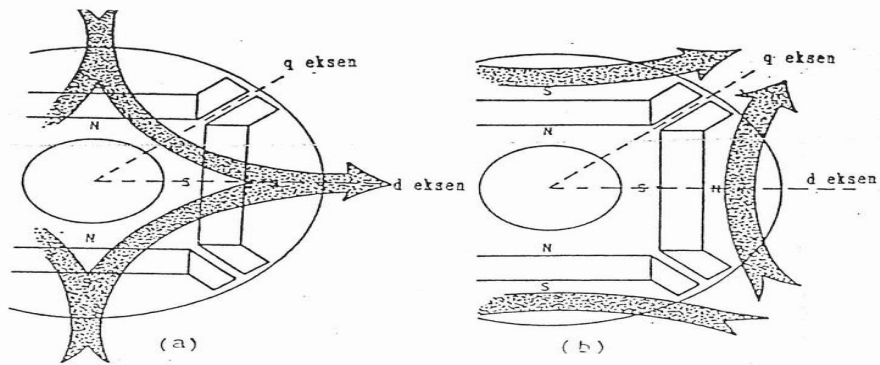
Bu yapıda mıknatıs malzeme Şekil 32'de görüldüğü gibi rotorun içine yerleştirilir. Bu tip makinaların üretim maliyetlerinin yüksek olmasına karşın, savrulma etkilerine karşı dirençli olmaları nedeniyle yüksek hızlı çalışma koşullarında tercih edilirler.

Rotor yüzeyinde mıknatıs malzeme yapışma sahip makinalarda nominal hızın en 1.5 katına kadar çıkılması mümkündür. Gömülü mıknatıs yapısında ise nominal hızın 2-3 katına kadar çıkılabilir. Rotor yüzeyine yapıştırılmış mıknatıs yapısındaki makinalar fırçasız DA makinalarında, gömülü mıknatıs yapısı ise SM senkron makinalarda 1 katı kullanılır.

4.1.3.2. Akı Yolları

Makinenin rotorunda 4 kutup vardır. Boyuna eksen (d-ekseni), mıknatısın orta kısmını keser ve enine eksen (q-ekseni) boyun eksen ile 45^0 mekanik açı yapacak şekildedir.

Şekil 33'de görüldüğü gibi, d-eksen manyetik akısı, iki mıknatıs ve iki hava aralığından geçmekte, q-eksen manyetik akısı ise sadece iki hava ağırlığından geçerek devresini tamamlamaktadır. Mıknatıs malzemenin manyetik geçirgenliğinin, havanın magnetik geçirgenliği ile yaklaşık değerde olmasından dolayı, $X_d < X_q$ olur.



Şekil 33 a) d-Eksen Manyetik Akısı b) q-Eksen Manyetik Akısı

4.1.3.3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinada Moment Üretimi

Sürekli mıknatıslı senkron makinesinin, sürekli hal çalışması ve doyma etkisinin ihmalı ile elektriksel moment ifadesi aşağıdaki gibidir;

$$M_e = (3/2) \cdot p \cdot [I_{qs} \cdot \psi_m + (L_d - L_q) \cdot I_{qs} \cdot I_{ds}] \quad (4.1.3.3.1)$$

Ψ_m : Mıknatıs halkalama akısı (= $L_{md}.I_f$)

L_d : d-ekseni toplam endüktansı (= $L_{md} + L_{lq}$)

L_q = q-ekseni toplam endüktansı (= $L_{mq} + L_{lq}$)

p : Çift kutup sayısı

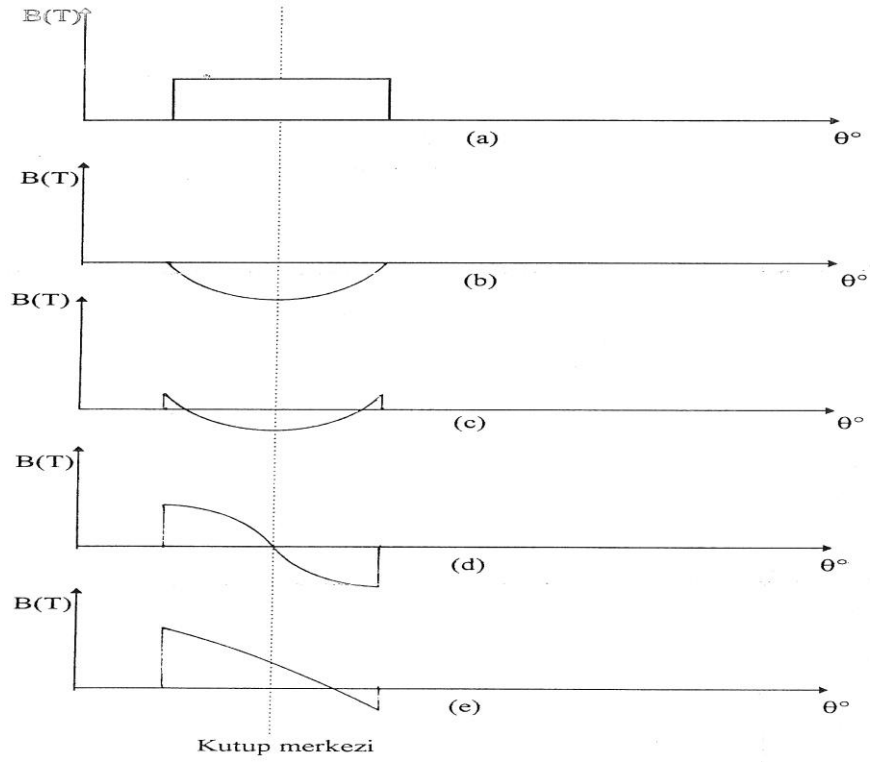
I_{ds}, I_{qs} : Sürekli halde d ve q-eksen akımlarıdır.

Moment oluşumunda iki terim vardır. İlki, d-ekseni boyunca mıknatıs akısı Ψ_m ve q-ekseni stator akımı I_{qs} 'in oluşturduğu ve $\Psi_m I_{qs}$ ile orantılı momenttir. İkincisi, d ve q eksen endüktansları arasındaki fark ile ($L_d - L_q$) orantılı momenttir.

4.1.3.4. Manyetik Akının Hava Aralığındaki Dağılımı

Sürekli mıknatıslı senkron makinede, üç ayrı alan kaynağı vardır. Bunlar, sürekli mıknatıs, d eksen amper sarımı ve q eksen amper sarımı bileşenleridir. Doymanın ihmal edilmesi durumunda, bir kutup altındaki hava aralığında akı yoğunluğu dağılımı, mıknatıs için kare dalga (Şekil 34 a), stator akımı d-ekseni bileşeni için kosinüs fonksiyonu (Şekil 34 b), stator akımı q-ekseni bileşeni için sinüs fonksiyonu biçimindedir (Şekil 34 d).

Mıknatıs ve d-eksen amper sarımının oluşturacağı akı, aynı doğrultudadır. Dolayısı ile d-ekseni üzerinde her ikisinin toplam akısı olacaktır (Şekil 34 c). bir kutup altındaki hava ağırlığındaki akı yoğunluğu dağılımı ise toplam d ve toplam q eksen akılarının bileşimi olacaktır (34 e). Toplam akı sinüzoidal olmayacaktır.

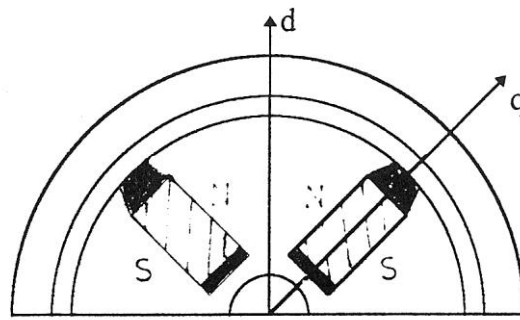


Şekil 34 Hava aralığı akı dağılımı a) Mıknatıs akısı b) Id akım bileşeninin d-eksen akısı

c) Toplam d-eksen akısı d) Iq akım bileşeninin q-eksen akısı e) Toplam akı

4.1.3.5. SM Senkron Makinada'da Alan Oluşumu

Makinanın statoru, asenkron makine statoru ile aynıdır. Rotor yapısı Şekil 35'de görüldüğü gibi içe gömülü sürekli mıknatıslardan oluşmaktadır.



Şekil 35 Dairesel gömülü mıknatıslı rotor yapısı

Yapılacak olan incelemede şu varsayımlar yapılacaktır;

-Demirin magnetik geçirgenliği sonsuzdur

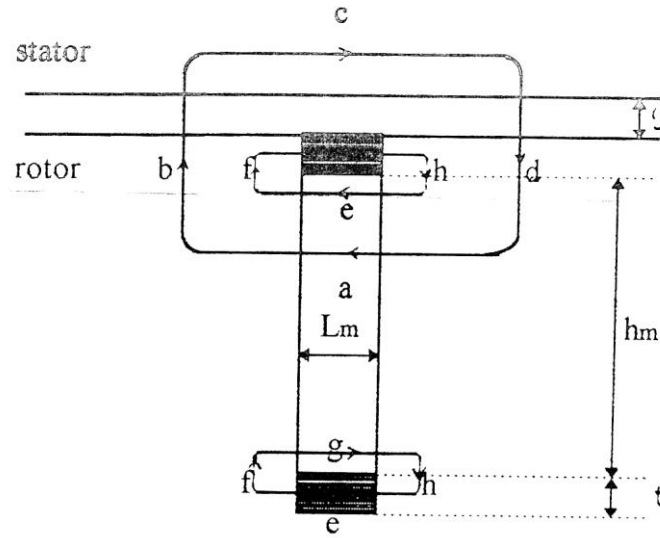
-q-eksen akısı hava aralığından, mıknatıs yüzeyine dik olacak şekilde geçmektedir.

-Hava aralığı düzgündür.

-Park dönüşümü ile m fazlı stator sargıları, rotora göre bağıl hızı sıfır olan boyuna (d) ve enine (q) eksen eşdeğer sargılarından oluşmaktadır.

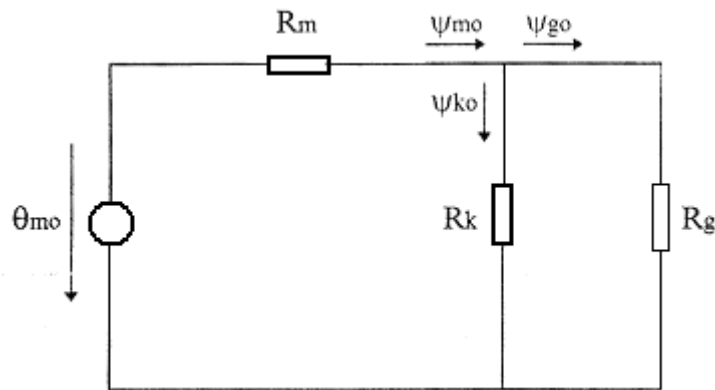
4.1.3.5.1. Sadece Sürekli Mıknatıslar İle Alan Oluşumu

Sürekli mıknatısın oluşturacağı akı yolları Şekil 36’da gösterilmiştir. “abcd” akı yolu, iki hava aralığı ve mıknatısı kat eden faydalı akı bölgesidir. “efgh” akı yolu, kaçak akı duvarını kat eden kaçak akı bölgesidir.



Şekil 36 Kaçak ve faydalı akı yollarının meydana gelişini

Manyetik alan kaynağı olarak yalnız sürekli mıknatısların olduğu varsayılırsa, manyetik eşdeğer devre Şekil 37’de görüldüğü gibi olacaktır.



Şekil 37 Sürekli mıknatıs ile oluşan eşdeğer magnetik devre

θ_{mo} = Mıknatıs magnetik gerilimi (MMK)

R_m = Mıknatıs magnetik direnci

$$R_m = L_m / (2 \cdot \mu_m \cdot h_m \cdot l_s) \quad (4.1.3.5.1.1)$$

Bu eşitlikte L_m ; mıknatıs genişliği, h_m ; mıknatıs boyu, l_s ; rotor eksenel boyudur.

R_g = Hava aralığı magnetik direnci (relüktans)

$$R_g = g / (\mu_0 \cdot S_g) \quad (4.1.3.5.1.2)$$

Bu eşitlikte g ; hava aralığı boyu, S_g ; bir kutup için hava aralığı yüzeyi, μ_0 ; boşluğun magnetik geçirgenliğidir.

R_k = Kaçak akı duvarı magnetik direnci

$$R_k = L_m / (4 \cdot \pi_1 \cdot l_s \cdot t) \quad (4.1.3.5.1.3)$$

Bu eşitlikte L_m ; mıknatıs genişliği, l_s ; rotor eksenel uzunluğu, t ; kaçak akı duvarı boyudur.

$$\Psi_{mo} = \Psi_{go} = \Psi_{ko} \quad (4.1.3.5.1.4)$$

Ψ_{ko} = Kaçak akı

Ψ_{go} : Hava aralığı mıknatıs akısı

$$\Psi_{go} = \Psi_{rm} / (1 + \beta \cdot k_1) \quad (4.1.3.5.1.5)$$

Bu eşitlikte Ψ_{rm} ; kalıcı akı (=Br.Sm) k_1 katsayısı (=1+ R_m / R_1), β ; makine geometrisine bağlı sayı (=2. R_g/R_m), S_m ; mıknatıs yüzeyinin alanıdır.

Yapılan bu eşitliklerden çıkarılan sonuçlara göre; hava aralığındaki mıknatıs akısını, makine geometrisi ve kalıcı mıknatıs etkilemektedir.

B_{go} : Hava aralığı mıknatıs akı yoğunluğu

$$B_{go} = \Psi_{go} / S_g = Br(S_m / S_g) / (1 + \beta \cdot k_1) \quad (4.1.3.5.1.6)$$

B_{mo} = Mıknatıs üzerindeki akı yoğunluğu

$$B_{mo} = Br - \mu_m \cdot H_{mo}$$

$$H_{mo} = \beta \cdot \Psi_{rm} \cdot R_m / L_m (1 + \beta \cdot k_1) \quad (4.1.3.5.1.7)$$

olarak ifade edilebilir.

Sadece Stator Akımı Tarafından Alan Oluşumu;

Stator sargıları boyuna ve enine olmak üzere iki eksende MMK üretirler. Boyuna ve enine magnetik gerilimler aşağıdaki gibidir:

$$\theta_s = \frac{4.(m/2).\sqrt{2}.I_d.N.kw}{\pi.P} \cos(P\alpha/2) \quad (4.1.3.5.1.8)$$

$$\theta_{sq} = \frac{4.(m/2).\sqrt{2}.I_q.N.kw}{\pi.P} \sin(P\alpha/2) = \theta_{qM} \cdot \sin(P\alpha/2) \quad (4.1.3.5.1.9)$$

I_d, I_q : Stator akımı d ve q-eksen bileşenleri

N : Faz sarım sayısı

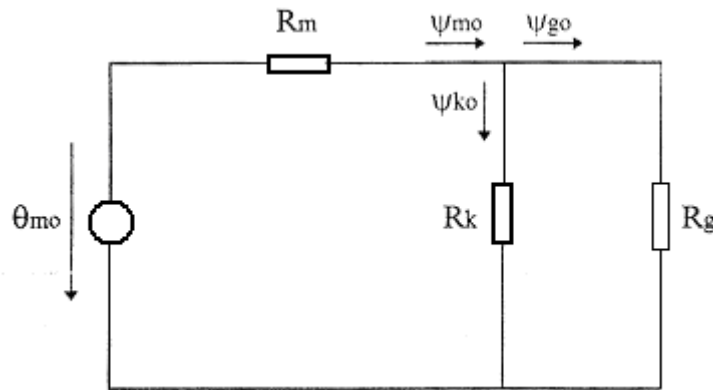
P : Kutup sayısı

m : Faz sayısı

kw :Sargı katsayısı

α : d-ekseninden görünen mekanik açı

Magnetik alan kaynağının stator amper sarımları olduğunu varsayarsak, manyetik eşdeğer devre şekil 38'deki gibi olacaktır.



Şekil 38 Stator alanı ile magnetik eşdeğer devre

Ψ_{sd} = Boyuna eksen hava aralığı akısı

$$\Psi_{sd} = \Psi_{ms} + \Psi_{ks} = 2.1s.hm.B_{ms} + \Psi_{ks} \quad (4.1.3.5.1.10)$$

B_{sd} : Boyuna eksen akı yoğunluğu

$$B_s = \mu_0 \frac{\theta_{dM}}{g} \left[\cos(P\alpha/2) - \frac{2/\pi}{(1 + \beta.k_1)} \right] \quad (4.1.3.5.1.11)$$

B_{ms} : Mıknatıs üzerindeki akı yoğunluğu

$$B_{ms} = \mu_0(4/\pi)\theta_{dM}/L_m(1 + \beta.k_1) \quad (4.1.3.5.1.12)$$

B_{sq} : Enine eksen akı yoğunluğu

$$B_{sq} = \mu_0.(\theta_{dM}/g).\sin(P\alpha/2) \quad (4.1.3.5.1.13)$$

4.1.3.5.2. Sürekli Mıknatıs ve Stator Akımı ile Alan Oluşumu

Herhangi bir çalışma anında hava aralığındaki akı yoğunluğu (B_g), sürekli mıknatıs ve stator sargılarının yarattığı akıların toplamı olacaktır.

$$B_g = B_{g0} + B_{sd}(\alpha) + B_{sq}(\alpha) \quad (4.1.3.5.2.1)$$

$$B_g = \frac{Br(S_m / S_g) - (\mu_0 / g)\theta_{dM}}{(1 + \beta.k_1)} - \mu_0 \frac{\theta_{sM}}{g} \sin[P(\alpha + \phi) / 2] \quad (4.1.3.5.2.2)$$

$$\theta_{SM} = \sqrt{\theta_{dM}^2 + \theta_{qM}^2}, \quad \theta = \cos^{-1} (\theta_{qM}/\theta_{SM}) \text{ olarak ifade edilir.}$$

Herhangi bir çalışma anında mıknatıs üzerinde oluşacak bileşke akı yoğunluğu aşağıdaki gibi olacaktır.

$$B_{mç} = Br - \mu_m.H_{mo} + \mu_0.H_{ms} \quad (4.1.3.5.2.2)$$

Yukarıdaki eşitlikteki H_{mo} değeri, daha önce (4.1.3.5.1.7) eşitliğinde verilmiştir.

$H_{ms} = (4/\pi).\theta_{dM}/L_m(1 + \beta.k_1)$ şeklinde ifade edilebilir.

Çalışma noktasını ($B_{mç}$) belirleyen iki ayrı akı yoğunluğu görülmektedir.

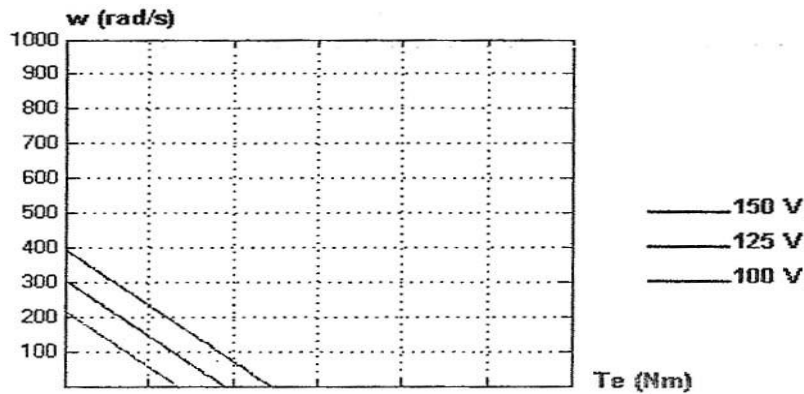
1) Br ; mıknatısın kalıcı akı yoğunluğudur ve mıknatıs malzemenin özelliğine göre değişir.

2) $-\mu_m H_{mo}$; stator akımı sıfır iken (boşta çalışma) akı yoğunluğuna belirler. Makine geometrisi, kaçak akı katsayısı ve mıknatısın özelliğine bağlıdır.

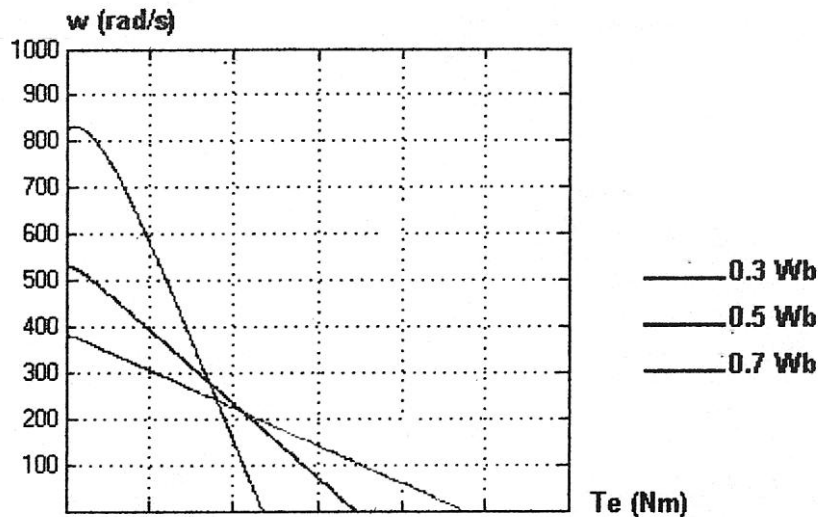
4.1.3.6. SM Doğru Akım Makinalarında Hız Ayarı

SM DA makinalarına, doğru akım makinaları kısmında anlatıldığı şekilde farklı hız kontrol yöntemleri uygulanabilir. Sargılara seri direnç bağlayarak yapılacak hız kontrolü verimli olmayacağından tercih edilmez. Makinada uyarma görevini mıknatıs malzeme yerine getirdiğinden dolayı, uyarma akımının ayarlanması olasılığı da söz konusu olmayacaktır. Bunun yerine, SM makinada hızın uyarma alanıyla değişimini göstermek için, rotorda farklı akı yoğunluklarına sahip mıknatısların bulunduğu düşünülebilir.

Aşağıda, matematiksel modeli oluşturulan ve simülasyonu yapılan makina için, farklı besleme gerilimi ve farklı akı yoğunluklarına sahip mıknatısların kullanılması durumunda hız-moment değişimleri görülmektedir.



Şekil 39 Farklı besleme gerilimleri için $\omega - f(T_e)$ Grafiği



Şekil 40 Farklı akı yoğunlukları için $\omega = f(T_e)$ Grafiği

4.1.3.7. Sürekli Mıknatıslı Makinalarda Verim

Bilindiği üzere, bir elektrik makinasında giriş gücü, çıkış gücüyle kayıpların toplamına eşittir. Makinede oluşan kayıplar İse üç ana başlık altında toplanabilir;

➤ Mekanik kayıplar

Mil ve yatak arasındaki sürtünme, fırça ve kollektörler arasındaki sürtünme ile rotorun dönme hareketi sırasında ortaya çıkan vantilasyon kayıplarından oluşur.

➤ Manyetik kayıplar

Makinada indüklenen emk' nın frekansına, manyetik akı yoğunluğuna ve kullanılan magnetik malzemenin özelliklerine bağlı olarak oluşan histerezis ve eddy kayıplarıdır ki, buna demir kayıpları adı verilir.

➤ Bakır kayıpları

Makinadaki sargılardan yük akımının akmasıyla, sargı direncine ve akımın büyüklüğüne bağlı olarak oluşan ve bakır kayıpları olarak isimlendirilen $I^2.R$ kayıplarıdır.

4.1.3.8. Sürekli Mıknatıslı Makinelerin Kullanım Alanları

Gerek yapısında, gerekse kontrol organlarında kullanılan malzeme ve yan ürünlerin artan teknolojik olanaklara bağlı olarak gelişimiyle birlikte, fırçasız tip DA motorları, özellikle klasik sargılı doğru akım motorlarına ciddi rakip oluşturmaktadır. Bu nedenle fırçasız tip doğru akım makinaları;

- Isıtma ve havalandırma sistemlerinde,
- Sağlık endüstrisinde,
- Soğutucularda,
- Uzay endüstrisinde,
- Robot endüstrisinde,
- Fırçalı tip makinaların kullanımının sakınca doğurabileceği, yanıcı ve parlayıcı çalışma ortamlarında,
- Sabit disk sürücü ve CD/DVD-ROM ve yazıcı gibi bilgisayar donanımlarında,

- Endüstride yürüyen bantlarda, Pompa ve fan motoru uygulamalarında,
- Özellikle yüksek hız ve yüksek güç yoğunluğu gerektiren birçok uygulamada giderek artan biçimde kullanılmaktadır.

4.1.3.9. SMSM Avantajları ve Dezavantajları

Sabit mıknatıslı bir senkron makineyi çıkıklar ile birleştirmenin hem avantajları hem de dezavantajları vardır[10,11,12].

Avantajları:

- Esas faydası sabit güç hız aralığını arttırmak ve belirli bir moment için mıknatıs boyutunu azaltmaktır.
- Rotorda herhangi bir sargı olmaması bakır kayıplarının oluşmamasına neden olur. Böylece rotorda bakır kayıplarının oluşmamasına neden olur. Böylece rotorda bakır kayıplarının nedeniyle oluşan ısınma problemi de ortadan kalkmış olur.
- Mıknatısların gömülü olması mıknatısların yüksek derecede harmonik alanlardan korunmasını sağlar.
- Güç faktörü bire yakın bir degerdedir.
- Fırça sistemi yoktur. Bu yüzden bakıma ihtiyaç duymazlar.
- Geleneksel motorlara göre hacim başına daha yüksek güç yoğunluğuna sahiptir. Yani aynı güçteki geleneksel motordan daha az yer kaplarlar.
- Yüksek verimli makinelerdir.
- Asenkron makineye nazaran hız kontrolü daha kolay yapılır.

Dezavantajları:

- En önemli dezavantajı üretim maliyetini arttırmak ve yapısal dayanıklılığı azaltmaktır. Rotor yüzeylerini kesip mıknatısları yerleştirmenin yüksek imalat maliyeti vardır. Zamanla bu maliyet düşürülebilir ama yine de önemli bir dezavantaj daha vardır. Bu da yapısal olarak rotorun zayıflamasıdır.
- Rotor hızlandıkça mıknatısların oluşturduğu deformasyon nedeniyle makineyi güvenli bir şekilde çalıştırmak zorlaşacaktır.
- Bu tür makinelerin maliyetleri, mıknatısların maliyetleri ve çeşitli rotor tasarımlarından oluşan maliyetler nedeniyle geleneksel makinelere nazaran daha yüksektir.

- Uyarma akımı olmadığı için generatör çalışmada gerilim ayarı yapılamaz. Fakat modern güç elektronigi kontrol elemanlarıyla bu dezavantajın etkileri azaltılabilir.
- Yüksek stator akımları mıknatısları demanyetize edebilir. Motor, demanyetizasyon probleminden korunmak için stator akımı kontrol sistemine ihtiyaç duyabilir.
- Zaman faktörü uzun vadede mıknatıslığı azaltıcı bir etkidir. Ayrıca termik sınırlamalar hem dizaynda hem de çalışma sırasında sorunlar yaratır.
- Mıknatıslar kapatılmadığı için, motorun enerjisi kesildiğinde üzerlerine manyetik parçacıklar toplayabilir.
- Yüksek hızlarda mıknatısları yerinde tutmak zorlasır.

4.1.4. Anahtarlama 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 Anahtarlama relüktans makinaları da bu farklı topolojilerden sadece biridir. “Anahtarlama relüktans” ifadesi, makinanın en temel iki özelliğini belirtmektedir:

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

Anahtarlama 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.

4.1.4.1. Anahtarlamalı Relüktanslı Makina Yapısı

Anahtarlamalı relüktans motorlar (ARM), taşıdığı özellikleri ve yapısı ile senkron ve asenkron makinalara fazla benzemez ancak hem senkron hem de asenkron makinaların yapısından faydalanılarak meydana getirilmişlerdir. İlk ARM senkron motor yapısı üzerinde değişiklikler yapılarak tasarlanmıştır.

Anahtarlamalı relüktans motorların çalışma ve tasarımı indüksiyon ve senkron makinaların çalışma prensipleri göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Stator ve rotorun geometrik yapısı üzerinde değişiklikler yapılarak oluşturulan yeni yapılar incelenmiş ve sonuçta daha verimli motorlar elde edilmeye çalışılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda stator ve rotor arasındaki hava boşluğunda depolanan enerjiden daha fazla istifade edilebilmesi amaçlanmıştır. ARM'ler yapı olarak adım motorlara benzemektedir. Senkron motorlarda rotor ve hava aralığı hızı aynı olmasından dolayı kalkınma problemi vardır. ARM'de ise rotor ve stator yapısı çıkıklardan müteşekkildir. Rotor ve stator çıkık sayısı birbirinden farklıdır. Bu sebeple senkron motorlarda olduğu gibi kalkınma problemi yaşanmaz. Kalkınma probleminin olmaması yönüyle bu motorlar asenkron motorlara benzerler. ARM'nin endüksiyon motorundan en önemli farkı ise uygulanan gerilimin yapısı itibarı ileler. Endüksiyon motorlarında hem rotor hem de statora alternatif gerilim uygulanırken ARM'lerde yalnızca stator sargılarına darbe şeklinde akım (PWM) verilir. Çalışma prensibi temel olarak stator sargılarına akım uygulayarak hava aralığında oluşan relüktansın değiştirilmesi aracılığı ile rotorun hareketinin sağlanması ve moment elde edilmesi şeklindedir. ARM'lerde rotor hiçbir iletken, sargı vs. içermez ve çok sade bir yapıdadır.

Relüktans, elektrik devresindeki rezistansın manyetik devredeki karşılığı şeklinde düşünülebilir. Bir manyetik devrede relüktans, rotor ve stator arasındaki hava aralığının manyetik direncidir. Elektrik devresinde rezistans elektrik akımına karşı zorluk gösterirken, manyetik devredeki relüktans manyetik akının (ϕ) dolaşımına zorluk gösterir. Ancak relüktans manyetik devre içerisinde sürekli değişkendir ve her noktada aynı değerde değildir. Relüktans, stator sargılarının enerjilenmesi ile hava aralığında meydana gelir. Elektrik devresinde aşırı rezistansın istenmemesine benzer şekilde manyetik devrelerde de yüksek relüktans istenmeyen bir niceliktir. Manyetik akı yine elektrik devresine benzer şekilde yüksek relüktans bölgesinden düşük relüktans bölgesine doğrudur. Böylece relüktans değişimi

ile manyetik akı değişimi gerçekleşmiş olur. Bu motorlar uyarıldığı zaman, makinanın bobinlerinden dolayı oluşan magneto motor kuvvetin (MMK) çoğu hava aralığındaki relüktansı yenmek için harcanır.

Anahtarlama relüktans motorlarda bir anda çoğunlukla tek faz enerjilenebilir ve diğer fazlar pasif olmak zorundadır. Bu şekilde bir anahtarlama işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem yarıiletken transistörler (Insulated Gate Bipolar Transistor- IGBT) ya da tristörler ile yapılmaktadır.

İlk ARM'ler indüksiyon motorlarından daha ağır ve daha geniş boyutlarda idiler. Ancak bu motorlar üzerinde yapılan çalışmalar ile ARM'ler günümüzde en çok çalışma yapılan elektrik makinalarının başında gelmektedir. Bunun en önemli sebebi ise diğer motorlara nazaran önemli avantajlara sahip olmalarıdır.

4.1.4.1.1. Anahtarlama Relüktans Motorun Yapısı

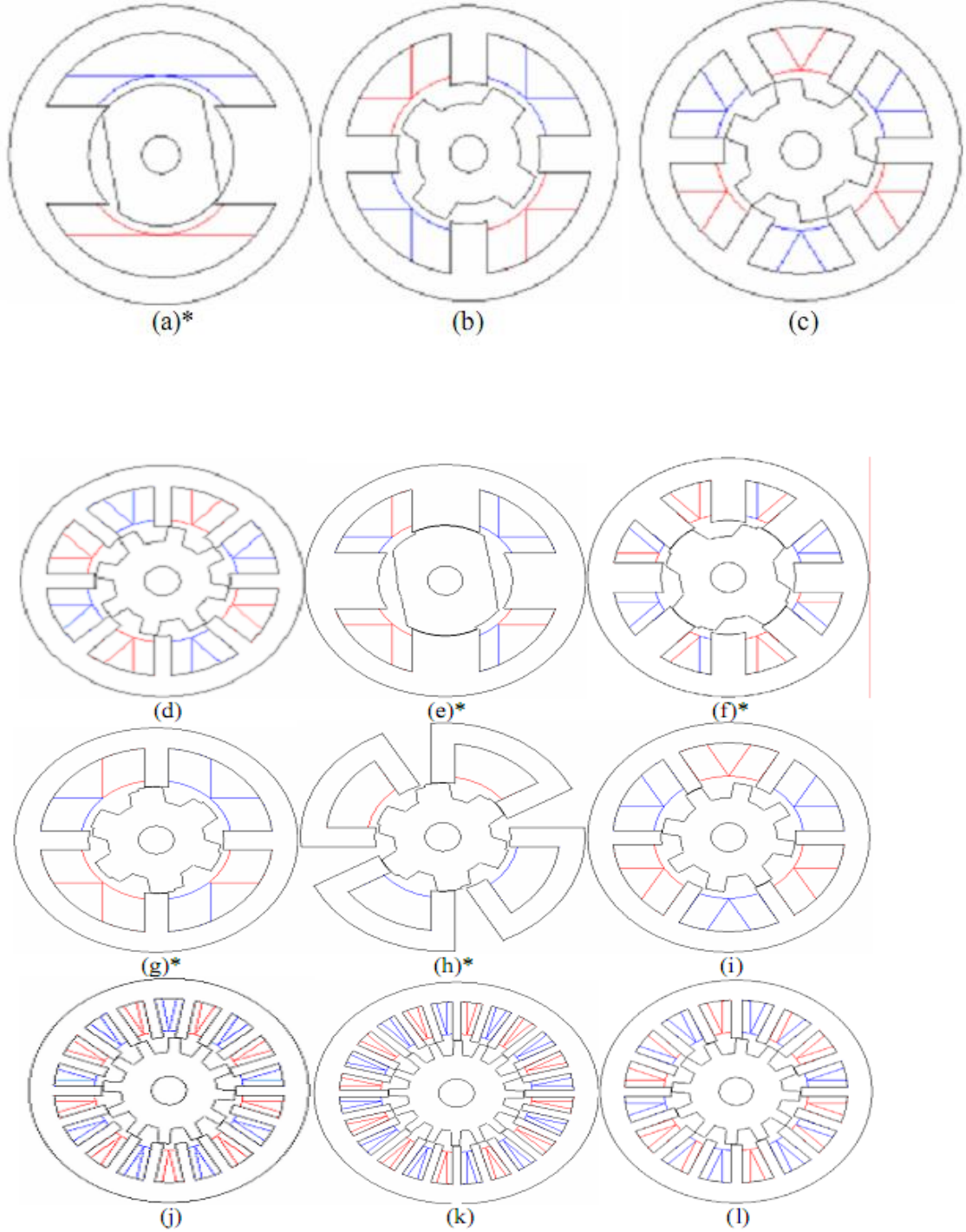
Anahtarlama relüktans motorlar son derece basit bir kurulum ve yapıya sahiptirler. Yapı olarak hem stator hem de rotor kısımlarında çift sayıda çıkığa sahiptirler. Bu sebeple çıkıklı ya da çift çıkıklı motorlar olarak bilinmektedirler.

Rotor ve stator çıkık sayıları çift sayıda olmak üzere sayıca birbirinden az, fazla ya da birbirine eşit olabilir. Çoğunlukla stator çıkık sayısı rotor çıkık sayısından daha fazladır. Stator ve rotor çıkık sayıları ya da ARM'nin tipi stator sayısı/ rotor sayısı şeklinde ifade edilmektedir. Örneğin 8/6, 8 stator çıkığına, 6 rotor çıkığına sahip bir ARM'yi temsil ederken, 6/4, 6 stator çıkığına ve 4 rotor çıkığına sahip bir ARM'yi temsil etmektedir.

Yüksek hız gerektiren uygulamalarda genelde rotor kutup sayısı stator kutup sayısına göre küçük seçilirken, yüksek moment gerektiren uygulamalarda ise rotor kutup sayısı stator kutup sayısına oldukça yakın seçilmektedir.

Karşılıklı olarak birbirine seri şekilde elektriki bağlantısı yapılmış olan 2 stator çıkığı (kutbu) ARM'nin bir fazını oluşturmaktadır. ARM'lerin tek fazlı olarak 2/2, 4/4, 6/6, 8/8; çift fazlı olarak 4/2, 8/4, 4/6, 8/6; üç fazlı olarak 6/4, 6/8, 12/8, 18/12, 24/16, dört fazlı olarak 8/6, 16/12 gibi birçok değişik dizilimleri oluşturulabilir. Bu dizilimler arasında 3 fazlı 6/4, 4 fazlı 8/6 en çok bilinen ve kullanılan dizilimler iken 3 fazlı 12/8 dizilimi de 6/4 ve 8/6 dizilimlerine göre daha az olmakla birlikte kullanılmaktadır.

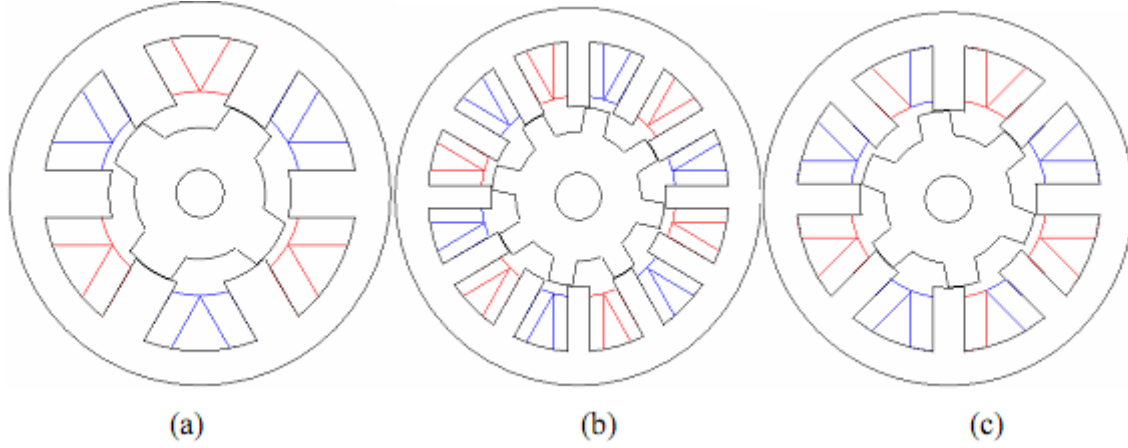
Şekil 41 çeşitli dizilimlere sahip ARM'ler, Şekil 42'de ise en çok bilinen ve kullanılan dizilimler görülmektedir.



Şekil 41 Farklı dizilimlere sahip ARM'ler. (a) Tek faz 2/2, (b) Tek faz 4/4, (c) Tek faz 6/6, (d) Tek faz 8/8, (e) İki faz 4/2, (f) İki faz 8/4, (g) İki faz 4/6, (h) İki faz 8/6, (i) Üç faz 6/8, (j) Üç faz 18/12, (k) Üç faz 24/16, (l) Dört faz 16/12.

* Kalkınma momentinin üretilmediği ARM dizilimleri.

ARM'nin bu farklı dizilimleri arasından tek fazlı 2/2, iki fazlı 4/2, 8/4, 4/6, 8/6 (Şekil 2.1 a, e, f, g, h) dizilim yapısına sahip olanlar yapıları teorikte düşünülebilir olmasına karşın yeterli kalkınma momentini en iyi konumda dahi üretmek mümkün olmadığından pratikte hiçbir anlam ifade etmemektedir.



Şekil 42 En çok bilinen ve kullanılan ARM dizilimleri (a) Üç faz 6/4, (b) Üç faz 12/8, (c) Dört faz 8/6.

Stator ve rotor çekirdekleri ince lamine saclardan oluşurlar. Bir tarafı iletken diğer tarafı yalıtkan olan bu saclar motorun demir kaybını azaltmak için kullanılırlar. ARM'lerin rotorlarında herhangi bir mıknatıs, sargı ya da kısa devre halkası bulunmayıp sadece masif demir ve sac paketi içermektedir.

ARM'lerde stator sargıları çok yoğun şekildedir. Bunun temel sebebi herhangi bir faz uyarıldığında daha fazla manyetik alan kuvveti elde etmek içindir. Bu şekilde diğer motorlara nazaran daha yüksek moment değerlerine ulaşılabilir. ARM'lerin diğer elektrik makinalarından en önemli fark ve avantajı, rotorunun mıknatıssız ve fırçasız olması ve hiçbir şekilde sargıya sahip olmamasıdır. Rotor kalkınma problemini önlemek, akı değişiminin fazlalığının önüne geçmek ve gürültüyü azaltmak amaçlarıyla hafif eğik şekilde imal edilmektedirler.

Genellikle stator kutupları, rotor kutuplarından daha dardırlar. Bu şekilde faz ya da fazlar enerjilendiğinde oluşan manyetik alandan daha fazla yararlanılmış ve stator sargılarına daha çok yer açılmış olur. Stator ve rotor genişliklerinin seçimi tahrik sisteminin özelliklerine bağlıdır. Ancak bunun yanında negatif moment üretiminden kurtulmak ve her fazın pozitif ve negatif moment üretme bölgelerini ayırabilmek için rotor kutuplarının genişliği, stator kutuplarının genişliğinden daha büyük seçilmektedir.

4.1.4.2. Anahtarlama Relüktans Motorun Çalışması

Bir relüktans makina, uyarılmış sargı indüktansının maksimum olduğu noktadaki konuma hareketli parçanın hareket eğilimi ile momentin üretildiği bir makinadır. Bu tanım, hem anahtarlama hem de senkron relüktans makinaları kapsar.

Anahtarlama, ARM'ye ismini vermektedir. Bu tip motor elektronik sürücüsü ya da kontrol edicisi olmaksızın çalışmaz.

ARM'lerin döndürme momenti akımın yönüne değil sadece genliğine bağlıdır. Dolayısıyla motorun kontrol devresinde kullanılacak yarı iletken sayısı yarıya indirilebilir.

Motorun çalışmasının daha net anlaşılabilmesi relüktans ve indüktans ve buna bağlı olarak moment üretiminin anlaşılabilmesine bağlıdır.

4.1.4.2.1. İndüktans/ Relüktans

Bir elektrik makinasında indüktans, bobinden geçen akımın birim değeri başına düşen bobin akısı olarak tanımlanır. Akı miktarı ve indüktans ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$\lambda = N \cdot \phi \quad (4.1.4.2.1)$$

$$L = \lambda / i \quad (4.1.4.2.2)$$

Burada λ akı miktarı, N sarım sayısı, ϕ bobin akısı, L indüktans, i akımı göstermektedir. Relüktans elektrik devresindeki rezistansın manyetik devredeki karşılığı şeklinde düşünülebilir. Bir manyetik devrede relüktans en basit olarak manyetik devrenin manyetik akıya karşı gösterdiği zorluk şeklinde tanımlanabilir. İndüktans ile relüktans arasında

$$L = N^2 / R \quad (4.1.4.2.3)$$

şeklinde bir eşitlik vardır. Burada R , relüktansı göstermektedir. (4.1.4.2.3) eşitliğinden indüktans ile relüktansın ters orantılı olduğu kolayca görülmektedir.

Anahtarlama relüktans motorlar karşılıklı stator kutuplarının birbiri ile elektriki bağlantı yapılarak oluşturulduğu fazların Şekil 43'de görüldüğü gibi belirli bir sıra ile uyarılması sonucu çalışmaktadır.

ARM'lerin birçok sürücü tipleri bulunmasına karşın Şekil 43'de görülen yapı en yaygın ve bilinen yapıdır. Bu devredeki güç anahtarları N-kanal MOS-FET'lerden oluşmaktadır. Her bir alt ve üst taraf anahtarlar her bir fazın tetiklenmesi için kullanılmaktadır. Alt taraf MOS-FET

darbe genişlik modülasyon üretici ile beraber on/off anahtarlama yaparken üst taraf MOS-FET rotor konum sensöründen gelen sinyaller tarafından çalıştırılmaktadır.

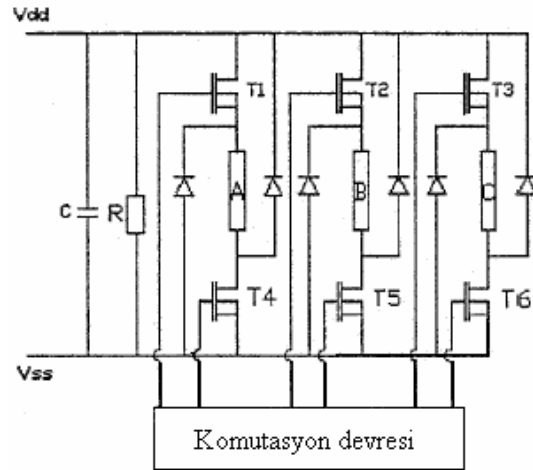
Faz sargısı üzerinde yüksek voltaj olduğunda, üst anahtarların kapıları alt güç anahtarları ile aynı voltaja sahip olmamalıdır. Herhangi bir kapı ateşlemesini en aza indirmek için entegre kapı kontrol sürücüleri kullanılmaktadır.

Konum detektörü olarak genellikle mutlak ya da artırımı tip enkoderler, hall etkili manyetik sensörler ya da foto-kesiciler kullanılmaktadır.

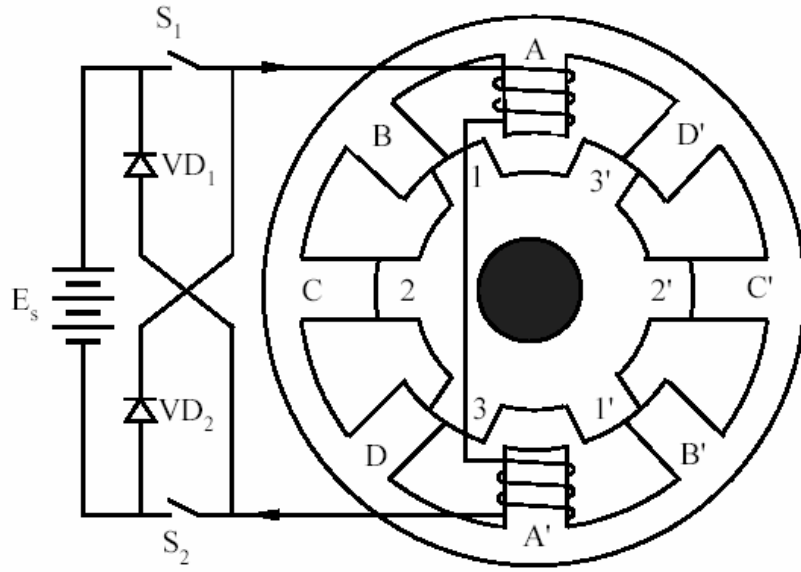
Rotor kutupların tam olarak stator kutupları ile karşı karşıya geldiği konuma hizalanmış (aligned) konum denilir. Bunun haricinde kalan diğer rotor konumlarının tamamı hizalanmamış (unaligned) konumlardır.

Rotorun hareketi anahtarlama devresi ile DC gerilim uygun hızda anahtarlanaarak kontrol edilir. Rotor, çap olarak birbirine zıt stator kutupları uyarıldığı anda hizalanmaya başlar yani stator kutupları rotor kutuplarını hizaya getirmek için uyarılmaktadır.

Stator sargıları içerisinde anahtarlama akımları gönderilerek rotor dönderilir. Rotorun dönmesi ile güç ve moment üretimi akımın stator sargılarında anahtarlama ve değişen relüktansla birlikte meydana gelir.



Şekil 43 ARM sürücüsü için model çevirici

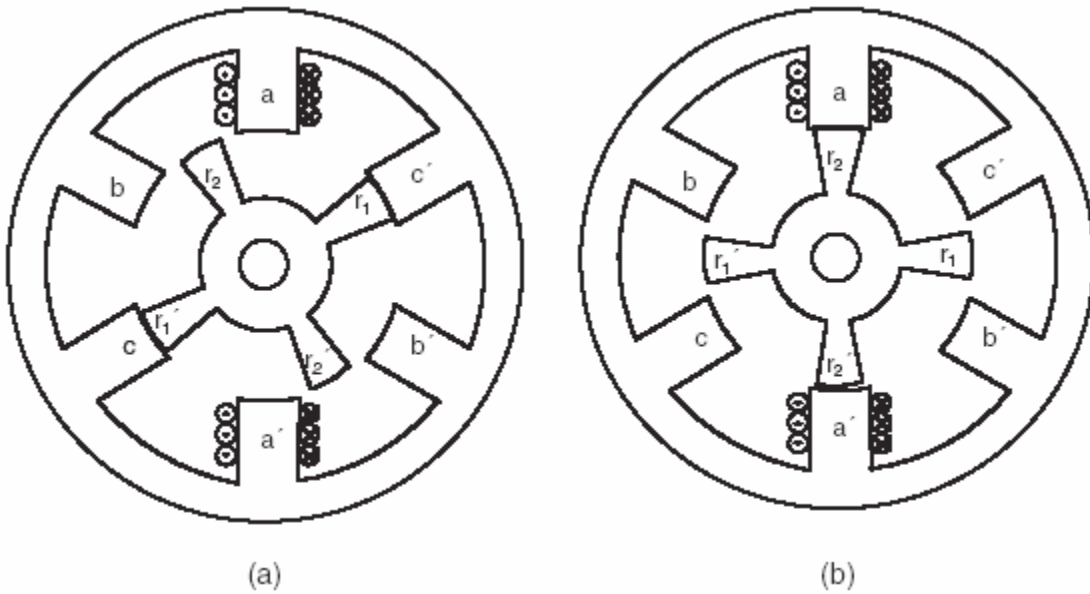


Şekil 44 ARM’de stator sargılarının tetiklenmesi

Anahtarlama relüktans motor denilmesinin sebebi rotorun hareketinin stator sargılarındaki bu anahtarlama şeklindeki akım ve relüktansın değişimiyle gerçekleşmesinden dolayıdır.

Manyetik devrede stator sargılarına akım uygulandıkça sürekli olarak değişen indüktans ve relüktans ve buna bağlı olarak da moment üretilecektir. Sonuçta rotor, yüksek relüktans bölgesinden düşük relüktans bölgesine hareket etme eğiliminde olacaktır.

Rotor hareketinin dönüş hızı her fazdaki anahtarlama akımı ve rotor çıkıklarının sayısı ile orantılıdır.



Şekil 45 ARM’nin çalışması (a) c fazının hiza konumu, (b) a fazının hiza konumu.

4.1.4.3. Moment

Anahtarlamalı relüktans motorda moment, üç değişkene bağlı olarak değişir. Bunlar indüktans, stator sargı akımı ve rotorun açısal konumudur.

Eğer verilen bir akım değeri için değişen rotor konumuyla birlikte indüktans lineer olarak değişiyorsa bu durumda ARM’de üretilen elektromanyetik moment;

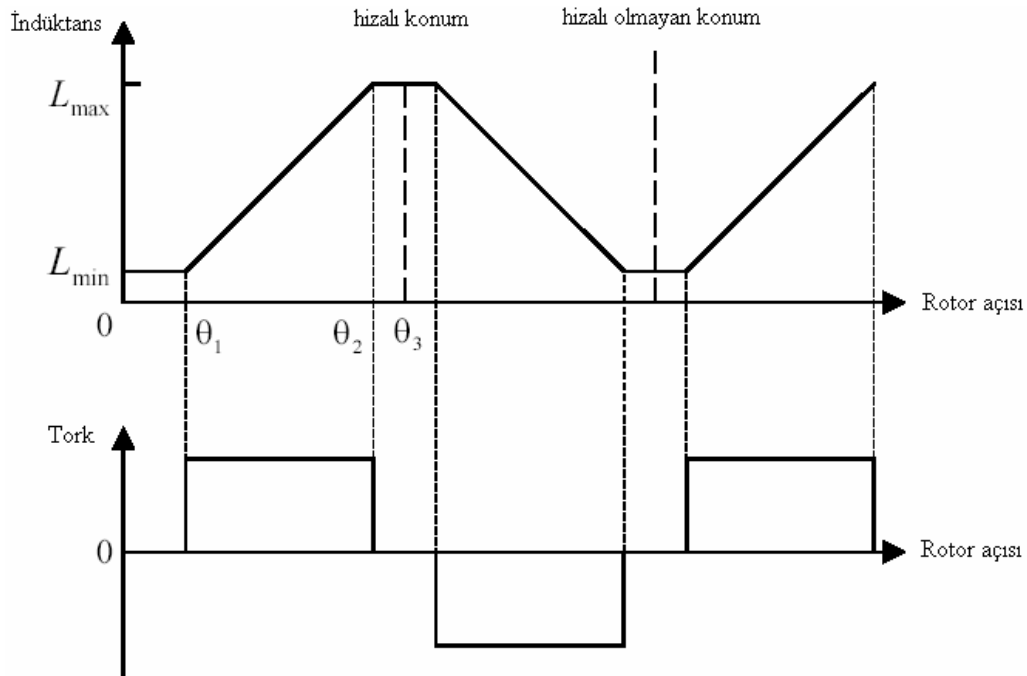
$$T_e = \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \frac{i^2}{2} \quad (4.1.4.3.1)$$

şeklindedir. Burada θ , rotor konumunu belirtmektedir.

Bu ifade hem ARM’nin bir fazına ait eş değer devresinden hem de enerji dönüşümü ilkesinden elde edilebilir.

Buradan momentin akımın karesi ile doğru orantılı olduğu ve üretiminin indüktans değişimine bağlı olduğu görülmektedir.

Şekil 46’de momentin stator sargı akımı sabit iken indüktans ve rotor konumu ile değişimi verilmektedir.



Şekil 46 Sabit stator sargı akımında momentin indüktansla değişimi

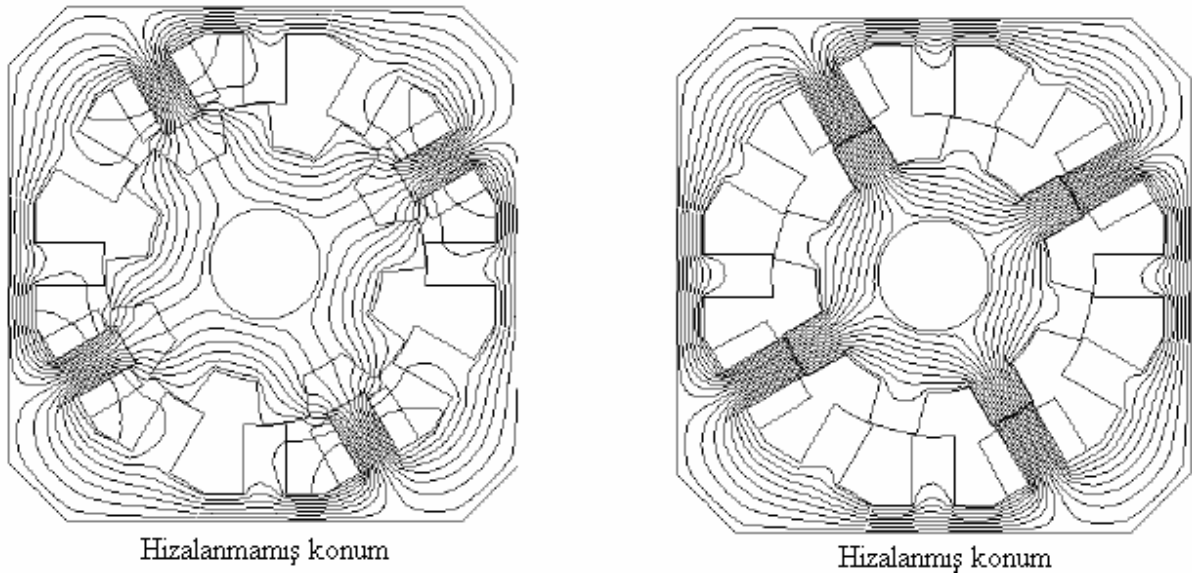
Şekil Şekil 46’da indüktans değişimi ideal olarak alınmıştır. Bu sebeple moment lineer indüktansla lineer olarak değişim göstermektedir. Ancak pratikte, ARM’lerin indüktans

değişimi lineer değildir ve bunun sonucu olarak moment titreşimli olarak elde edilir. Moment titreşimini en aza indirmek için indüktansın rotor açısı ile olan değişiminin ($dL/d\theta$) olabildiğince düzgün olması istenir. Bu amaçla rotor dişlerinde değişiklikler yapılarak indüktans değişimi olabildiğince lineer hale getirilmeye çalışılmaktadır.

Moment değeri indüktansın değişimine bağlı olduğundan, eğer akım indüktansın artma yönünde uygulanırsa döndürme momenti pozitif olurken, akımın indüktansı azaltma yönünde olması durumunda ise negatif olacaktır. Dolayısıyla akım darbelerinin, indüktans değişiminin hangi bölgelerinde uygulanacağını tespit edilmesi ve dolayısıyla da bu bölgelere ait rotor konumunun bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle ilgili rotor pozisyonu bilgisinin elde edilebilmesi için optik ya da etkili sensörlerin kullanımı gerekmektedir.

Anahtarlama relüktans motorda rotor yüksek relüktans noktasından düşük relüktans noktasına hareket etmektedir. Relüktansın en düşük olduğu bölge stator ve rotor kutularının tam olarak karşı karşıya geldiği hizalanmış konumdur. Relüktansın bu en düşük olduğu durumda indüktansta relüktansla ters orantılı olarak en yüksek değerine ulaşacaktır.

Tam hizalı konumda elektromanyetik alan çizgileri tam olarak karşı karşıyadır ve dolayısıyla indüktansta bu hizalı konum boyunca maksimum değerinde sabit kalır (Şekil 46). İndüktansta değişimin olmamasına bağlı olarak hizalanmış konumda herhangi bir moment üretilmez(Şekil 47).



Şekil 47 ARM'nin elektromanyetik alan dağılımı

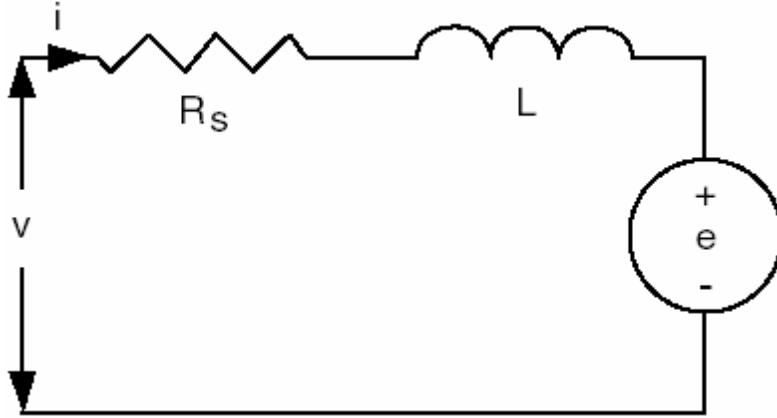
Eşitlik (4.1.4.3.1) 'ten şu sonuçlar çıkarılabilir:

1. Moment, akımın karesi ile orantılıdır, bundan dolayı doğrusal olmayan momenti üretmek amacı ile akım da farklı şekillerde uygulanabilir. Bu durum a.a makinaları için çok ters bir durumdur. Faz sargısı içerisindeki akımın değişik şekiller alabilmesi ARM kontrol devrelerinin çeşitliliğini artırırken konverter içerisindeki güç anahtarlarının sayısını azaltabilir ve sürücüyü daha ekonomik hale getirir.
2. Momenti sabiti, indüktansın rotor konumu ile değişimi karakteristiği eğrisinin eğimi ile verilir. Buradan stator sargısının indüktansının hem rotor konumunun hem de akımın fonksiyonu olduğu görülmektedir. İndüktansın değişimi motorun çıkıklı yapısından dolayı lineer değildir. Motorun lineer olmayan bu yapısından dolayı, bu motor için basit bir eşdeğer devre geliştirmek mümkün değildir.
3. Momentin akımın karesi ile doğru orantılı olmasından dolayı, motor dc motorlara benzer. Dolayısıyla, iyi bir başlangıç momentine sahiptir.
4. İndüktans eğrisinin negatif kısmında akımın değişimi ile jeneratif moment üretimi mümkündür.
5. Dönme yönü basit bir işlemle stator tetikleme kısmı değiştirilerek ters çevrilebilir.
6. 1,4 ve 5 özelliklerinden dolayı bu makine konverterle birlikte dört bölge de çalışmak için uygundur.
7. Moment ve hız kontrolü konverter kontrolü ile yapılabilmektedir.
8. Makine, çalışması için kontrol ediciye ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla, sabit hızlı uygulamalarda motor sürücü indüksiyon ve senkron motorlara kıyasla pahalıdır.
9. Çalışması için güç konverterine bağımlı olmasından dolayı, motorun sürücüsü kendi yapısından gelen bir değişken hızlı sürücü sistemine sahiptir.
10. ARM'de makine faz sarımları arasında çok küçük bir ortak indüktans vardır ve neredeyse tüm pratik uygulamalarda bu etki ihmal edilmektedir. Ortak kuplaj olmamasından dolayı, her bir faz diğer fazlardan elektriki olarak bağımsızdır. Bu özellik sadece anahtarlama relüktans motorlara has bir özelliktir. Bu özellik sayesinde herhangi bir fazdaki kısa devre hatasından diğer fazlar etkilenmez.

Bir fazda oluşabilecek hatalardan diğer fazların etkilenmemesi özelliği özellikle havacılık uygulamaları, soğutucu pompaları, elektrik cihazlarında önemlidir.

4.1.4.4. Eşdeğer Devre

Anahtarlama relüktans motorlar için temel bir eşdeğer devre Şekil 48’de görüldüğü gibi fazlar arasındaki ortak indüktansı ihmal ederek oluşturulabilir.



Şekil 48 ARM’nin bir fazına ait eş değer devre

Bir faza uygulanan gerilim direnç voltaj düşümü ile akı kaçaklarının oranının toplamıdır ve (2.5) eşitliği ile verilir.

$$v(i, \theta) = R_s i + \left[\frac{\sigma \alpha(\theta, i)}{\sigma i} \right]_{\theta=sbt} \frac{di}{dt} + \left[\frac{\sigma \alpha(\theta, i)}{\sigma i} \right]_{i=sbt} \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\alpha_M(i, \theta)}{dt} \quad (4.1.4.4.1)$$

Burada ilk terim, S R faz rezistansı dolayısıyla oluşan gerilimi, ikinci terim indüktif voltaj dağılımını (kısmi türev artan faz indüktansını göstermektedir), üçüncü terim makinanın zıt EMK’sını, dördüncü terim ortak kuplajdan dolayı indüklenen gerilimi göstermektedir. İkinci, üçüncü ve dördüncü terimler akımın ve rotor konumunun fonksiyonu olarak değişmektedir.

R_s faz başına rezistansdır ve λ faz başına akı kaçağıdır ve

$$\lambda = L(\theta, i) i \quad (4.1.4.4.2)$$

formülü ile verilir.

(4.1.4.4.2) eşitliğinde ortak kuplajdan dolayı meydana gelen dördüncü terim çoğu durumlar için önemsizdir ve sıfır olarak kabul edilir. Üçüncü terim olan makinanın zıt EMK’ sı da ihmal edilebilir ve ARM’nin bir fazına ait daha genel bir formül (4.1.4.4.3) eşitliği şeklinde yazılır.

$$V = R_s i + \frac{\sigma \alpha(\theta, i)}{dt} \quad (4.1.4.4.3)$$

Giriş gücü ise aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$p_i = R_s i^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (4.1.4.4.4)$$

Burada,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) = L(\theta, i) i \frac{dL(\theta, i)}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (4.1.4.4.5)$$

Eşitliği yazılabilir ve dolayısıyla da giriş gücü,

$$p_i = R_s i^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (4.1.4.4.6)$$

Eşitlik (4.1.4.4.5)' den de açıkça görüleceği üzere giriş gücü, $R_s i^2$ ifadesi ile verilen sargı kayıp gücü, $p \left[\frac{L(\theta, i) i^2}{2} \right]$ ifadesi ile verilen alan enerjisinin değişim oranı ve $i^2 p L(\theta, i)]/2$ ifadesi ile verilen hava aralığı gücünün toplamından oluşmaktadır

Hava aralığı gücü için zaman ifadesinde rotor pozisyonu ve hız terimleri yerine konulacak olursa,

$$t = \omega / \omega_m \quad (4.1.4.4.7)$$

ve dolayısıyla da,

$$p_a = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m \quad (4.1.4.4.8)$$

ifadesi elde edilir. Burada ω_m , açısal hızdır.

Hava aralığı gücü elektromanyetik moment ve hıza bağlı olarak,

$$P_a = \omega_m T_e \quad (4.1.4.4.9)$$

olduğundan motora ait moment,

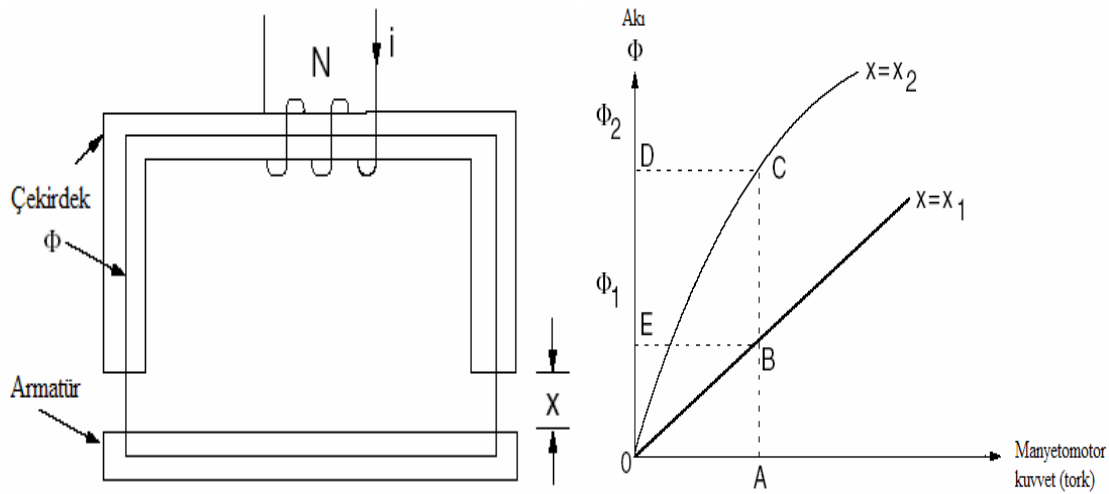
$$T_e = \frac{dL(\theta, i) i^2}{d\theta} \frac{1}{2} \quad (4.1.4.4.10)$$

şeklinde elde edilir. Bir sonraki bölümde aynı ifade enerji dönüşümü ile de elde edilecektir.

4.1.5. Enerji Dönüşümü

ARM'lerin normal çalışmaları esnasında relüktansın rotor konumu ve doyum sebebiyle değişiminden dolayı statora ait faz sargıları tarafından üretilen manyetik alanın basit bir matematiksel eşitliği yoktur.

ARM'deki moment üretimi Şekil 49'da görüldüğü gibi bir solenoid içerisindeki elektromekanik enerji dönüşümü temel prensibi kullanılarak açıklanmaktadır. Solenoid N sarım sayısına sahiptir ve içerisinde i akımı geçirildiğinde ϕ akısı oluşmaktadır. Artan i uyarma akımı armatürü çekirdeğe doğru hareket ettirecek ve sabitleyecektir.



Şekil 49 ARM'deki moment üretimi

Akının mmk ile değişimi x_1 ve x_2 olmak üzere iki hava aralığı değeri için verilmiştir ($x_1 > x_2$). x_1 için akı-mmk karakteristiği hava aralığının relüktansı baskın olduğu için lineerdir. Elektriki girişi enerjisi

$$W_e = W_f + W_m \quad (4.1.5.1)$$

şeklinde verilir.

Burada, e indüklenen emk ve f ise mmk'dır. Elektriki giriş enerjisi (W_e) bobindeki depo edilen enerji ve mekanik işe dönüştürülen enerji (W_m) toplamıdır. Elektrik enerjisinin artmaya başlaması ile alan ve mekanik enerjilerde de artış olacaktır. Bu ifade

$$\delta W_e = \delta W_f + \delta W_m \quad (4.1.5.2)$$

şeklinde verilir.

Koenerji alan enerjisinin komplementi şeklinde ifade edilir. OBEO alanının koenerjisi OBAO alanındaki enerjidir. A manyetomotor kuvvet çalışma noktası için 1 F sabit tetiklemesi ile oluşacak çeşitli enerjiler şu şekildedir.

$$\partial W_e = \int_{\phi_1}^{\phi_2} F_1 d\phi = F_1(\phi_2 - \phi_1) = \text{alan}(BCDEB) \quad (4.1.5.3)$$

$$\partial W_f = \partial W_{f_x-x_2} - \partial W_{f_x-x_1} = \text{alan}(OCDO) - \text{alan}(OBEO) \quad (4.1.5.4)$$

Artan yada motordan alınan mekanik enerji W_m ,

$$\partial W_m = \partial W_e - W_f = \text{alan}(OBCO) \quad (4.1.5.5)$$

ifadesinde değerler yerine konularak

$$T_e = \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \frac{i^2}{2} \quad (4.1.5.6)$$

moment ifadesi elde edilmektedir.

4.1.6. A.R.M.'nin Üstün ve Zayıf Yönleri

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

Avantajları;

- 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, esdeğer 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 makineleri ve asenkron makinelerin 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 adımli 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 yasanı da motor çalışmaya devam eder.
- Endüktans, rotor konumu ve uyarma akımına bağılı olarak değişmektedir. Herhangi bir faz sargısının pasif durumda olduğu sürede, endüktans değeri rotor konumunu belirlemek için kullanılabilir. Asenkron ve sürekli mıknatıslı senkron makinelerde sargıların pasif olduğu zaman dilimi olmadığından, bu mümkün değildir.

Dezavantajları;

- 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.

BÖLÜM 5

HEA'DA KULLANILAN ELEKTRİK MAKİNALARININ VERİMLİLİK HARİTASI ve GÜÇ YOĞUNLUĞU KARŞILAŞTIRMASI

5. HEA'da Kullanılan Elektrik Makinalarının Verimlilik Haritası Ve Güç Yoğunluğu Karşılaştırması

Çizelge 2 farklı tasarımlardaki makinaların geometrik parametrelerini göstermektedir. Çizelgeden görüleceği üzere Anahtarlama relüktanslı makinalar ve indüksiyon makinaları Sabit mıknatıslı motorlara alternatif olarak kullanılabilirler.

Çizelge 2 Elektrik Motorlarının Güç Yoğunluğu Karşılaştırması

PARAMETRE	SMSM	ARM	IM
Dış stator çapı [mm]	269.0	269.0	269.0
İç rotor çapı [mm]	111.0	111.0	111.0
Dış rotor çapı [mm]	160.5	170.0	180.0
Hava boşluğu uzunluğu [mm]	0.73	0.3	1.5
Eksenel çekirdek uzunluğu [mm]	84	84	84
Stator çekirdeği ağırlığı [Kg]	18.65	14.11	11.86
Stator bakır ağırlığı [Kg]	5.99	7.44	10.57
Rotor çekirdeği ağırlığı [Kg]	5.22	5.16	6.15
Toplam ağırlık [Kg]	31.16	26.71	36.25

Güç yoğunluğuna ve hacime göre incelediğimizde SMSM diğer makinalara göre daha yüksek güç yoğunluğuna sahip ve hacim olarak daha az yer kaplamaktadır.

Çizelge 3 1500 devir/dak'da Motorların Karşılaştırılması

Değişkenler	Moment [Nm]	Demir Kaybı [Watt]	Bakır Kaybı [Watt]	Verim [%]	Akı Yoğunluğu [A/mm ²]
SMSM	303	198	4328	91.3	15.7
IM	297	148	8591	83.1	15.8/12.1
ARM	294	404	7653	85.2	20.1

Çizelge 4 6000 devir/dak'da Motorların Karşılaştırılması

Değişkenler	Moment [Nm]	Demir Kaybı [Watt]	Bakır Kaybı [Watt]	Verim [%]	Akı Yoğunluğu [A/mm ²]
SMSM	45.6	953	219	96.1	3.75
IM	50.8	439	730	95.2	4.51/3.72
ARM	52.1	4074	306	88.2	4.02

1500 devir/dak ve 6000 devir/dak 'da üç makina tipinin karşılaştırılması Çizelge3 ve Çizelge4'de verilmiştir. Taban hız ile maksimum hız aralığında kayıplardaki değişim çok farklıdır. ARM makinalarda artan akı frekanslarında yüksek demir kayıpları ve 1500 devir/dak'da bakır kayıpları yüksektir. Bu ilerde yapılacak tasarım çalışmaları ile bu azaltılabilir. IM ve ARM makinaların verimleri genellikle daha düşük olmasına rağmen ilerde yapılacak tasarım çalışmaları ile verim arttırılabilecektir.

Çizelge 5 Makinaların Yaklaşık Maliyetlerinin Karşılaştırılması

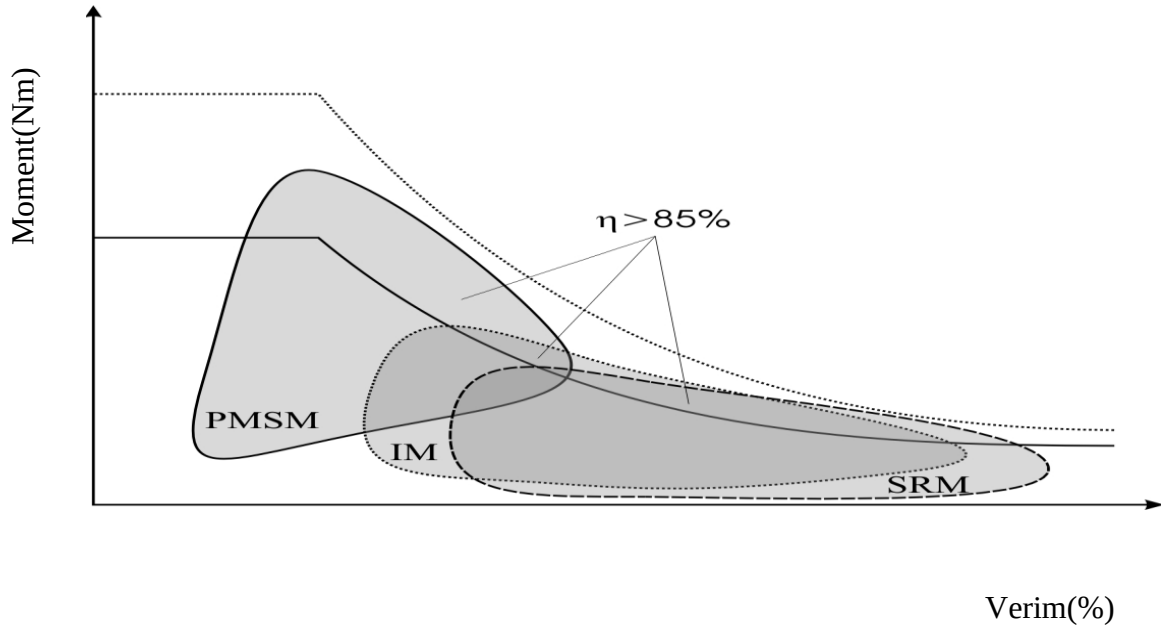
		Lamine Çelik	Bakır	Neodmiyum Demir Boron	Toplam[USD]
	USD/Kg	1.3 ^a	6.6 ^b	132 ^c	
SMSM	Ağırlık	23.87	5.99	1.3	242.17
	Maliyet	31.03	39.53	171.6	
ARM	Ağırlık	19.27	7.44	0	74.16
	Maliyet	25.05	49.10	0	
IM	Ağırlık	18.01	18.24	0	143.8
	Maliyet	23.41	120.38	0	

^a Laminasyon

^b Londra Metal Kuru, Haziran 2010

^c Western Minerals Grup, Haziran 2008

Aynı zamanda üretim maliyetlerinin de değerlendirildiğimizde ana malzeme maliyetleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir. Çizelgede açıkça görüleceği üzere SMSM'nin maliyetleri IM'nin maliyetinden çok daha yüksekken, ARM'nin maliyeti ise en azdır.



Şekil 50 Verimlilik Haritası

Hibrid araçlarda elektrik motorunun seçimi aynı zamanda kontrol stratejisine de bağlıdır. Hangi çalışma noktalarında elektrik motorunun kullanılacağı belirlenmelidir. Yani çalışma noktalarındaki sürüş döngüsüne karar verilmelidir. Birçok çalışma noktası minimum 1500 devir/dak ile maksimum 6000 devir/dak arasındadır. Verimlilik haritasına göre Sabit Mıknatıslı elektrik motorları düşük hızlarda en yüksek verime sahip olduklarından dolayı en iyi seçim olacaktır. Ancak daha geniş bir çalışma aralığında İndüksiyon Makinaları daha kullanışa

BÖLÜM 6

ELEKTRİK MOTORLARININ KARŞILAŞTIRMASI VE UYGULANABİLİRLİĞİ

6. Elektrik Motorlarının Karşılaştırması Ve Uygulanabilirliği

Anahtarlamalı relüktanslı makina düşük üretim maliyeti ile düşük güçlerde öne çıkmasına rağmen yüksek güçlerde ve dinamiklerde daha karışık bir kontrol gerektiğinden daha yüksek maliyetlere çıkmaktadır. Bütün hız aralığında en iyi ortalama verime sahip makinadır ancak maksimum verimde Sabit Mıknatıslı Senkron Makina kadar yüksek değerlere ulaşamaz. Bundan dolayı İndüksiyon Makinaları geniş hız aralığında verim yönünden ve sınırlı bir alan olmadığında avantajlıdır.

Anahtarlamalı relüktanslı elektrik makinaları güç yoğunluğu ve verim açısından İndüksiyon makinaları ile karşılaştırılabilir ancak diğer noktalarda indüksiyon makinası daha uygundur. Ana dezavantajları ve düşük hızlarda yüksek moment dalgalanmaları ve yüksek seviyede akustik ses yayımıdır.

Sabit mıknatıslı senkron makinalar en yüksek güç verimliliğini sunarlar ve bu sayede düşük ağırlıklarda yüksek güçlü makinalar elde edilmesini sağlar. Kurulum alanı küçük olan araçlarda bu çok önemli bir avantaj sağlar. Belirli hız aralığında en yüksek verimi sağlar ve bundan dolayı SMSM hibrid elektrikli araçlar için en uygun elektrik makinasıdır. Aynı zamanda nadir bulunan mıknatıslardan dolayı en pahalı elektrik makinasıdır.

Hibrid elektrikli araçlarda elektrik motoru seçimi araç sistemine ve isterlerine bağlı olarak değişir. Hibrid elektrikli araçlarda elektrik makinası maksimum araç gücüne ve tüm hız aralığına göre tasarlanmalıdır. Bu durumda İndüksiyon makinasını kullanmak geniş hız aralığı

ve düşük maliyetinden dolayı daha avantajlıdır. SMSM ise yüksek araç gücü için pahalıdır, ancak kurulum alanı ve ağırlık karar faktörleri arasında ise tercih edilebilir. Paralel hibrid sistemde hız aralığı dişli kutusu bağlantısına, dişli kutusu stratejisi seçimine ve hibrik elektrik araç fonksiyonlarına bağlı olarak değişir. Bundan dolayı düşük hızlarda sağladığı yüksek verimlilikten dolayı paralel hibrid sistemde SMSM kullanımı daha uygundur.

Bunlara ek olarak hibrid elektrikli aracın kontrol stratejisine bağlı olarakta elektrik motoru seçimi değişir. Elektrik motorunun hangi çalışma noktalarında çalıştırılacağına önceden karar verilmelidir. Yani sürüş döngüsü sırasında çalışma noktalarındaki frekans dağılımı kararlaştırılmalıdır. Yani çalışma noktaları sınırlı bir hız aralığındadır. Buna göre daha düşük hızlarda en yüksek verimliliğe sahip bir elektrik makinası seçmemiz gerekmektedir. Verimlilik haritası Şekil50’de görüldüğü üzere İndüksiyon Makinalar ve Anahatarlamalı resluktanslı makinalar geniş hız aralığında yüksek verime sahip olmalarına rağmen SMSM düşük hızlardaki yüksek verimliliğinden dolayı SMSM kullanım açısından daha uygundur. Ancak daha yüksek hızlar veya daha geniş hız aralığı söz konusu olduğunda İndüksiyon makinaları kullanım açısından daha uygundur.

Hibrid araçlarda kullanılan elektrik motorları güç yoğunluğu, verimlilik, kontrol kolaylığı, güvenilirlik, doygunluk ve maliyet açısından değerlendirildiğinde aşağıdaki çizelge ortaya çıkmaktadır. Çizelge 3’de görüldüğü üzere indüksiyon makinaları ve sabit mıknatıslı senkron makinalar diğer elektrik makinalarına göre daha avantajlıdır ve günümüzde hibrid araçlarda bu avantajlarından dolayı daha fazla tercih edilmektedirler.

Çizelge 6 Hibrid Araçlarda Kullanılan Elektrik Motorlarının Karşılaştırılması

Karakteristikleri	DC	IM	SMSM	ARM
Güç Yoğunluğu	2	3.5	5	3.5
Verimlilik	2	4	5	3.5
Kontrol Kolaylığı	5	3,5	5	3
Güvenilirlik	3	5	5	5
Doygunluk	5	5	4	4
Maliyet	3	4	3	5
Toplam	20	25	27	24

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1 Sonuçlar ve Öneriler

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 tahriginde 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.

7.2 Çalışmanın Sonuçları

- Doğru akım makinaları kayıplarından ve boyutlarından dolayı günümüzde artık nerdeyse elektrikli araçlarda kullanılmamaktadır.
- Sabit Mıknatıslı Senkron Makinalar ve Anahtarlamalı Relüktanslı Makinalar henüz teknolojik doygunluklarına ulaşılmamasına rağmen verimlilik oranları göz önüne alındığında gelecekte otomotiv sektöründe en fazla kullanılan 2 motor tipi olacaktır.
- Geniş hız aralığında İndüksiyon makinası kullanmak daha verimli gözükürken, belirli hız aralığı ve limitli kurulum alanı söz konusu olduğunda Sabit Mıknatıslı Senkron Makina yüksek verimliliğinden ve düşük hacminden dolayı tercih edilebilir.

7.3 Geleceğe Yönelik Çalışma Önerileri

Araba tasarım aşamasında ağırlık, hacim ve verimlilik faktörlerinin daha kolay bir şekilde tasarlanabilmesi için elektrik motoru karşılaştırması C++ programlama dili ile basit bir program arayüzü seçilerek istenilen parametreler girildiğinde hangi makina tipinin daha uygun olduğunu gösterebilecek bir program yazılıp sanayide elektrik makinası tercihi ve piyasadaki kullanım oranı arttırılabilir.

KAYNAKLAR

-
- [1] International Energy Outlook, (2006). Energy Information Administration–U.S. Department of Energy.
 - [2] BP Statistical Review of World Energy, (2005).
 - [3] Elektrikli Araçlar, (2003). Tübitak Marmara Araştırma Merkezi.
 - [4] Automotive Industry Report, (2008). IBM.
 - [5] Ehsani, M. , Gao, Y. , Gay, S. ve A Emadi, (2005). "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design".
 - [6] Önel, İ. Y. (2005). "Üç Fazlı Asenkron Motorlarda Rulman Arızalarını Tespit Etmek Üzere X – Y Dönüşümü Ve RTFA Yapay Sinir Ağı Algoritması İçeren Yeni Bir Yöntemin Tasarlanması Ve Uygulanması".
 - [7] Çetin, İ., (1993). "Asenkron Makina Problemleri (Çözümlü)" 192.
 - [8] Sarıyıldız, M., (2001). "Asenkron motorlar" 43.
 - [9] Cathey, J., (2001). "Electric Machines Analysis And Design Applying Matlab".
 - [10] Adnanes, A. K., (1991). "Torque Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors".
 - [11] Almeida, A., Ferreira, F. ve Fonseca, P., (2000). "VSDs for Electric Motor Systems".
 - [12] Andersson, S., (2000). "Optimization of a Servo Motor for an Industrial Robot Application".
 - [13] Cai, W., ve Pillay, P. ,(2001). "Resonant Frequencies and Mode Shapes of Switched Reluctance Motors".
 - [14] Bücherl, D. , Nuscheler, R. , Meyer, W. ve Herzog, H. (2008) "Comparison of Electrical Machine Types in Hybrid Drive Trains: Induction Machine vs. Permanent Magnet Synchronous Machine".
 - [15] Xue, X. D. , Cheng, K. W. E. ve Cheung, N. C. ,(2008). "Selection of Electric Motor Drives for Electric Vehicles".
 - [16] Isfahani, A. H. ve Sadeghi, S. ,(2008). "Design of a Permanent Magnet Synchronous Machine for the Hybrid Electric Vehicle".
 - [17] Keskin, A. ,(2009). "Hibrid Taşıt Teknolojileri ve Uygulamaları".
 - [18] Rahman, Z. , Ehsani, M. ve Butler K. L. (2006) "An Investigation of Electric Motor Drive Characteristics for EV and HEV Propulsion Systems".

- [19] Malan, J. ve Kamper, M. J. ,(2001). "Performance of a Hybrid Electric Vehicle Using Reluctance Synchronous Machine Technology".
- [20] Zeraoulia, M. , Benbouzid M. ve Diallo, D. (2008) "Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study".
- [21] Williams M. J., Wung, P. , Horst, G., Lloyd, J., Randall, S., (1996). "A Systematic Approach Toward Studying Noise and Vibration in Switched Reluctance Machines: Preliminary Results".
- [22] Inanç, N., Derdiyok, A. ve Ozbulur, V. ,(1997). "Torque Ripple Minimization of a Switched Reluctance Motor Including Mutual Inductances Via Sliding Mode Control Technique".
- [23] Ceylan, K., (1987), "Daimi Mıknatıslı Senkron Motor".
- [24] Chin, Y.K. ve Soulard, J., (2003). "A Permanent Magnet Synchronous Motor for Traction Applications of Electric Vehicles".
- [25] Dan, S., Weizhong, F. ve Yikang, H., (1998), "Study on the Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives".
- [26] Dan, S., Zhu, J. G. ve Hen, Y. K., (2003). "A Space Vector Modulation Direct Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Systems".
- [27] Diril, O., (1990). "Daimi Mıknatıslı Senkron Makine".
- [28] David, G. , Dorrell, M., Mircea, P. , Lyndon, E. ve David, A. ,(2010). " Comparison of Different Motor Design Drives for Hybrid Electric Vehicles".

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Cüneyt KOÇ
Doğum Tarihi ve Yeri :12/06/1986 AKÇAKOCA
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :cuneytkocc@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2009
Lise	Fen	Çağrıbey Anadolu Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010	RMK Marine Tersanesi	Elektrik Tasarım Müh.
2009	Esta İnşaat A.Ş.	Elektrik Mühendisi