

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTROMEKANİK BİR DİFERANSİYELİN TASARIMI,
OPTİMİZASYONU VE PROTOTİPİNİN ÜRETİMİ**

Ulvi Taha YILDIRIM

**Danışman
Prof. Dr. İsmail Hakkı AKÇAY**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2014**

© 2014 [Ulvi Taha YILDIRIM]

TEZ ONAYI

Ulvi Taha YILDIRIM tarafından hazırlanan " **Elektromekanik Bir Diferansiyelin Tasarımı, Optimizasyonu ve Prototipinin Üretimi**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman	Prof. Dr. İsmail Hakkı AKÇAY Süleyman Demirel Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN Afyon Kocatepe Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Yrd. Doç. Dr. Habib GÜRBÜZ Süleyman Demirel Üniversitesi	

Enstitü Müdürü **Prof.Dr.Ahmet ŞAHİNER**

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Ulvi Taha YILDIRIM

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTRİKLİ HİBRİT VE TÜMÜ-ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA TAHRİK YAPILARI	2
2.1. Tümü-Elektrikli Taşıtlar	2
2.2. Hibrit Elektrikli Taşıtlar.....	6
2.2.1. Seri hibrit elektrikli taşıt tahrik yapısı.....	6
2.2.2. Paralel hibrit elektrikli taşıt tahrik yapısı	8
2.2.3. Seri-paralel hibrit elektrikli taşıt tahrik yapısı	9
2.2.4. Karışık hibrit elektrikli taşıt tahrik yapısı.....	10
3. ELEKTROMEKANİK DİFERANSİYEL İLE ELEKTRİKLİ VE HİBRİT ELEKTRİKLİ TAŞITLAR.....	12
3.1. Elektromekanik Diferansiyel Tasarımında Genel Kabuller.....	15
3.2. Arkadan İtişli Hibrit Elektrikli Taşıtlar İçin Elektromekanik Diferansiyel'in Tasarımı	16
3.3. Önden Çekişli Hibrit Elektrikli Taşıtlar ve Tümü Elektrikli Taşıtlar İçin Elektromekanik Diferansiyel Tasarımı.....	18
3.4. Elektromekanik Diferansiyel İçin Elektrik Motoru Seçimi	20
3.4.1. FDAM'ların özellikleri ve çalışma prensipleri.....	23
3.4.2. FDAM'ların karakteristikleri.....	25
3.4.3. FDAM'ların yapısı	26
3.4.4. FDAM'ların kontrolü	29
3.4.4.1. Sensörler ile FDAM'unun kontrolü	29
3.4.4.2. Zıt EMK ile FDAM'un kontrolü.....	32
3.4.5. Yüksek torklu, direk tahrikli FDAM'unun karakteristiği	33
3.4.6. FDAM elektrik motorlarının büyüklüklerinin verime etkisi	35
3.5. Motor Tasarımında Verimliliğe Etki Eden Faktörler	36
3.5.1. Histerize (artık manyetizma) kayıpları.....	36
3.5.2. Eddy akımı kayıpları	37

3.5.3. Akı yoğunluğunun azaltılması	37
3.5.4. Bölgesel manyetik saturasyon	37
3.5.5. Manyetik malzeme seçimi	38
3.5.6. İletken tasarımı, iletkenlerin direnci	38
3.5.7. İletkenler arası hava aralıkları.....	38
3.5.8. İletken direncinden dolayı oluşan ısının atılması.....	38
3.5.9. Manyetik devre hava aralığı	39
3.5.10. Diğer faktörler	39
4.TAŞIT İHTİYACINA GÖRE ELEKTROMEKANİK DİFERANSİYELİN TASARIM HESAPLARI.....	40
4.1. Taşıtın Güç İhtiyacı	40
4.1.1. Azami hızda aerodinamik direnç	40
4.1.2. Tekerlerin yuvarlanma direnci.....	42
4.1.3. Yokuş direnci.....	42
4.1.4. Toplam dirençler ve minimum güç	43
4.2. Taşıtın Güç İhtiyacına Göre FDAM'unun Boyutlandırılması	44
4.2.1. Hız ve tork ihtiyacına göre, çapa ve kutup sayısının seçimi	45
4.2.2. Statorun ana boyutlarının belirlenmesi	45
4.2.3. FDAM'larında EMK.....	45
4.2.4. Sürekli mıknatıslı senkron makinada moment üretimi	46
4.2.5. Manyetik akının hava aralığındaki dağılımı	47
4.2.6. Sadece sürekli mıknatıslar ile alan oluşumu.....	48
4.2.7. Sadece stator akımı tarafından alan oluşumu	51
4.2.8. Sürekli mıknatıs ve stator akımı ile manyetik alan oluşumu.....	53
4.2.9. FDAM'unda güç, kuvvet ve tork eşitlikleri.....	54
4.2.10. FDAM'larında manyetizmanın etkisi.....	55
4.3. Ortası Boş Rotor Milinin Mukavemet Eşitlikleri.....	56
4.4. Rejeneratif Frenleme ve Taşıt Performansına Etkisi.....	57
4.5. Elektrik Motorlarında Isınma Analizinin Eşitlikleri.....	59
5. TİPİK BİR AİLE TAŞITI İÇİN GELİŞTİRİLEN SENARYOYA GÖRE ELEKTROMEKANİK DİFERANSİYEL TASARIMI VE OPTİMİZASYONU...	62
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR.....	69
EKLER.....	73
EK A. Hesaplamalar.....	74
EK B. Tam Kesiti Alınmış Açıklamalı Montaj Resmi.....	76
EK C. Üretilmiş Parçalar	77
ÖZGEÇMİŞ.....	81

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTROMEKANİK BİR DİFERANSİYELİN TASARIMI, OPTİMİZASYONU VE PROTOTİPİNİN ÜRETİMİ

Ulvi Taha YILDIRIM

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İsmail Hakkı AKÇAY

Azalan petrol rezervi, artan taşıt sayısı, zararlı emisyonlar için dünya çapından getirilen sınırlamalar, petrole bağımlı gelişen içten yanmalı motorlu taşıtlar için temiz ve yenilenebilir alternatif yakıtların kullanılmasını ve/veya alternatif güç üretim sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu hale getirmektedir. Mevcut içten yanmalı motora sahip taşıtların bu yönde modifikasyonu için hibrit elektrikli taşıtlara dönüşümü iyi bir alternatif olarak görülmektedir. Günümüz taşıtlarının hibrit taşıtlara dönüştürmek için kullanılacak mekanizmanın tasarımındaki temel ihtiyaçlar, verimlilik için direk tahrikli olması ve rejeneratif frenleme sistemi ile yakıt ikmali yapmadan ve/veya batarya şarjı gerçekleştirilmeden kat edeceği mesafenin artırılmasını gerektirmektedir.

Bu çalışma kapsamında tasarlanarak prototipi geliştirilen **elektromekanik diferansiyel** mekanizması ile mevcut konvansiyonel bir taşıtın hibrit elektrikli taşıta dönüştürülmesi mümkün olabileceği gibi taşıtın istenildiği zaman elektrik ile tahrik edilebilmesi de mümkün olabilecektir. Bu sistemde, rejeneratif frenleme için ek bir mekanizmaya ihtiyaç kalmadan aynı mekanizma ile frenleme yapabilecektir. Tasarlanan bu mekanizmanın taşıt üzerine yerleştirilmesi için en uygun yer diferansiyel ve aks donanımıdır. Bu yerleşim düzeni, herhangi bir dişli kavraması olmadan taşıtın direk tahrik edilebilmesine olanak sağladığından günümüz konvansiyonel taşıtlarının hibrit elektrikli taşıta daha kolay ve düşük maliyetli modifikasyon imkanı sağlamaktadır.

Çalışma kapsamında tasarlanan bu sistemin, mevcut taşıtlara modifiye olarak uygulanabilmesi mümkün olabileceği gibi taşıtın tasarım ve uygulama aşamalarında uygulanabilmesi de mümkün olabilecektir. Elektrik enerjisinin taşıtın tahriki için kullanılacak olması; düşük yakıt tüketimi, emisyon miktarı ve gürültü oranı gibi nedenlerden dolayı tercih sebebi olabilecektir. Elektriğin verimli kullanılmasıyla, elektrik enerjisiyle tahrik olan taşıtların kullanımının yaygınlaşmasına katkıda bulunacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Diferansiyel, Elektromekanik diferansiyel, Güç aktarma organı, Rejeneratif Frenleme, Elektrik Motorunun taşıtlarda verimli kullanılması

2014, 81 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

DESIGN, OPTIMITZATION AND MANUFACTURE OF PROTOTYPE OF AN ELECTROMECHANICAL DIFFERANTIAL

Ulvi Taha YILDIRIM

**Suleyman Demirel University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. İsmail Hakkı AKÇAY

Decreasing of petroleum reserve, increasing of vehicle quantity, restrictions for harmful emissions at whole world are make mandatory that fuel engines development of using clean and renewable alternative energy to depending petroleum and developing alternative power produce systems. Modification in this way for available vehicles which owning fuel engines to modification electrical hybrid vehicles is a good alternative way. Main requirements are direct drive for efficiency and increase in range with regenerative breaking system without realizing refueling and/or recharging batteries that today's vehicles modifying to electrical hybrid vehicles system.

Designed and developed prototype mechanism is **electromechanical differential** in this work scope, available conventional a vehicle can be realizing to modifying an electrical vehicle and vehicle can drive with electrical energy when drivers make choice. This designed system can do regenerative breaking with same equipments without necessary other equipments. Most appropriate side is differential and axle equipages for designed this mechanism on vehicle. This side order is without any clutch of gear and contains can be direct drive mechanism so today's conventional vehicles are support modifying to electrical hybrid vehicle is too easily and too low costly to other systems.

System for designed on this work can be modifying to available today's fuel engines on vehicles and can be realizing to during the vehicle design process. Electrical energy for will use vehicle drive mechanism choice reasons can be; low fuel consumption, low emissions quantity and low noise like this causes. Vehicles which drive mechanism with electrical energy use predict to contribute more widespread with efficient use electrical energy.

Keywords: Differential, Electromechanical differential, Drive mechanism, Regenerative braking, Productivity using of Electric motor to the car

2014, 81 pages

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Prof. Dr. İsmail Hakkı AKÇAY’a ayrıca elektrik ve manyetizma konularında yorumlarını ve yardımlarını esirgmeden yol gösteren Öğr. Gör. Serkan AYDIN’a teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan maddi, manevi her türlü desteği sağlayan geniş ailemin her bir bireyine sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ulvi Taha YILDIRIM
ISPARTA, 2013

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Tümü-elektrikli taşıt tahrik yapısı.....	2
Şekil 2.2. Tek ve çok motorlu tümü-elektrikli taşıt tahrik sistemleri	4
Şekil 2.3. Dört oranlı dişli kutusuna sahip İYM’lu taşıta ait moment-hız karakteristiği	5
Şekil 2.4. Seri hibrit elektrikli taşıtın tahrik yapısı	7
Şekil 2.5. Paralel hibrit elektrikli taşıtın tahrik yapısı	9
Şekil 2.6. Seri-paralel hibrit elektrikli taşıtın tahrik yapısı	10
Şekil 2.7. Karışık hibrit tahrik yapısı	11
Şekil 3.1. Elektromekanik diferansiyelin taşıt üzerindeki konumu	14
Şekil 3.2. Elektromekanik diferansiyelin şasi üzerindeki konumu.....	16
Şekil 3.3. Hibrit elektrikli taşıtlar için elektromekanik diferansiyel kesitinin perspektif görünüşü.....	17
Şekil 3.4. Önden çekişli hibrit veya elektrikli taşıtlar için elektromekanik diferansiyel tasarımının şasi üzerinde perspektif görünümü.	19
Şekil 3.5. Önden çekişli hibrit veya elektrikli taşıtlar için elektromekanik diferansiyel tasarımının perspektif görünümü.	20
Şekil 3.6. Teorik FDAM’unun tork-devir eğrisi	21
Şekil 3.7. Üst üste koyulan iki grafiğin karşılaştırılması	22
Şekil 3.8. 3 faz 2 kutuplu yıldız bağlantılı FDAM’nun fazlarının tetiklenmesi.....	24
Şekil 3.9. FDAM’un tork artışına bağımlı karakteristik eğrileri	25
Şekil 3.10. FDAM’un bir noktadaki değerlerinin grafik üzerinde gösterimi.....	26
Şekil 3.11. Statorun toplu sarımı ve dağınık sarımı.....	27
Şekil 3.12. FDAM’lar için kullanılan rotorlar.....	28
Şekil 3.13. Yıldız ve üçgen sarım.....	29
Şekil 3.14. Hall sensörlerinin motor şeması üzerinde gösterimi	30
Şekil 3.15. FDAM’un şeması	31
Şekil 3.16. Zıt EMK ile tetikleme şeması	33
Şekil 3.17. Yüksek torku FDAM’un tork-hız karakteristiği	34
Şekil 3.18. Yüksek torklu FDAM’un üç boyutlu tork-hız-verimlilik karakteristiği ..	34
Şekil 4.1. FDAM’un karakteristiği üzerinde taşıt ihtiyacının değerleri.....	44
Şekil 4.2. Hava aralığı akı dağılımı	48
Şekil 4.3. Kaçak ve faydalı akı yollarının meydana gelişi.....	49
Şekil 4.4. Sürekli mıknatıs ile oluşan eşdeğer magnetik devre	49
Şekil 4.5. Stator alanı ile manyetik eşdeğer devre.....	52
Şekil 4.6. Ultrakapasitörlerin üç boyutlu karakteristik grafiği.....	58
Şekil 5.1. Bir diferansiyel mekanizmasının dişlileri.....	64
Şekil 5.2. Diferansiyele taşıyıcının eklenmesi	64
Şekil 5.3. Taşıyıcıya rotor plakalarının eklenmesi	65
Şekil 5.4. Rotor plakalarına S ve N kutuplu mıknatısların yerleştirilmesi.....	65
Şekil 5.5. Mekanizmaya statorun eklenmesi	66
Şekil 5.6. Mekanizmaya muhafaza kovanının eklenmesi	66
Şekil B.1. Tam kesiti alınmış açıklamalı montaj resmi	76
Şekil C.1. İmal edilen muhafaza kovanı	77
Şekil C.2. Bakır tel sarılmış stator	78
Şekil C.3. İmal edilen taşıyıcı ve diferansiyel dişlileri	79
Şekil C.4. Kapline montelenmiş mahrutu dişli	80

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Saat yönünde dönüş için tetiklemeler	31
Çizelge 3.2. Yüksek hız ve yüksek tork motorunun karşılaştırılması.....	35
Çizelge 3.3. Yaklaşık olarak motor verimleri	35
Çizelge 4.1. Kutup sayısına bağlı statorun iç/dış çap oranları	45
Çizelge 4.2. Motor izolasyon sınıfları.....	60

SİMGELER DİZİNİ

A	Taşıtın ön yüz alanı
A_{sr}	Bir faz sargısının havayla temas eden yüzeyi
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
B_g	Hava aralığındaki akı yoğunluğu
B_{go}	Hava aralığı mıknatıs akı yoğunluğu
B_{mo}	Mıknatıs üzerindeki akı yoğunluğu
B_{ms}	Mıknatıs üzerindeki akı yoğunluğu
B_{sd}	Boyuna eksen akı yoğunluğu
B_{sq}	Enine eksen akı yoğunluğu
$B(x)dx$	En küçük akı yoğunluğu
C	kapasitans
C_x	Taşıtın Aerodinamik direnç katsayısı
D	Dış çap
d	İç çap
E	EMK
E_b	Zıt EMK
E_m	İndüklenmiş motor gerilimi
F	Kuvvet
F_t	Tekerlek tahrik kuvveti
f_{ro}	Lastiklerin yuvarlanma direnci
G	Taşıtın Newton cinsinden toplam yükü
g	Hava aralığı boyu
h	Motorun ısı verme katsayısı
h_m	Mıknatıs boyu
r_m	Motorun hava aralığı yarıçapı
I_a	A fazının akımı
I_d	Stator akımı d ekseni bileşenleri

I_q	Stator akımı q eksen bileşenleri
I_f	Uyarma akımı
i_o	Güç aktarma oranı
i	İletkenden geçen akım
K	EMK sabiti
k_1	Katsayısı
k_w	Sargı katsayısı
k_T	Motor tork sabiti
k_E	İndüklenmiş motor gerilimi sabiti
L_d	d-ekseni toplam endüktansı
L_q	q-ekseni toplam endüktansı
L_m	Mıknatıs genişliği
l	İletkenin boyu
l_m	Motordan geçen akım
l_s	Rotor eksenel boyu
M	Tork
m	Faz sayısı
M_b	Burulma momenti
M_t	Tekerlek tahrik torku
N	Slot başına iletken sayısı
n	Devir sayısı
Q_f	Bir bobinin oluşturduğu magnetomotor kuvvet
P	Güç
P_{cu}	Bakır kaybı
p	Çift kutup sayısı
R_a	A fazının direnci
R_{ax}	Taşıtın aerodinamik direnci
R_g	Hava aralığı magnetik direnci (relüktans)

R_k	Kaçak akı duvarı manyetik direnci
R_m	Mıknatıs magnetik direnci
R_{ro}	Yuvarlanma direnci
R_{ro}	Taşıtın yuvarlanma direnci
r_w	Tekerleğin yarıçapı
S_g	Bir kutup için hava aralığı yüzeyi
S_m	Mıknatıs yüzeyinin alanı
st	Eğim açısının tanjantı
T_p	Kutup aralığı
T_{mil}	Mildeki Tork
t	Kaçak akı duvarı boyu
U	Endüviye uygulanan gerilim
V	voltaj
v	İletkenin hızı
x	Eğimin açısı
W_f	Her bir bobinin sarım sayısı
α	d-ekseninden görünen mekanik açı
β	Makine geometrisine bağlı katsayı
$\emptyset$	Manyetik akı
v	hız
θ_{mo}	Mıknatıs magnetik gerilimi
Φ	Toplam akı yoğunluğu
η_{tr}	Güç aktarma verimi
μ	Manyetik geçirgenlik
μ_m	Mıknatısın manyetik geçirgenliği
μ_0	Boşluğun magnetik geçirgenliği
ρ_a	Havanın yoğunluğu
Ψ_m	Mıknatıs halkalama akısı

Ψ_{ko}	Kaçak akı
Ψ_{go}	Hava aralığı mıknatıs akısı
Ψ_{rm}	Kalıcı akı
Ψ_{sd}	Boyuna eksen hava aralığı akısı
ω_m	Açısal hız

KISALTMALAR DİZİNİ

AC	Alternative Current (Alternatif Akım)
BLDC	Brushless Direct Current (Fırçasız Doğru Akım)
CD	Compact Disc
D	Diferansiyel
DC	Direct Current (Doğru Akım)
DK	Dişli kutusu
EM	Elektrik Motoru
EMK	Elektro Motor Kuvveti
FDAM	Fırçasız Doğru Akım Motoru
FDC	Fırçasız DC
FEM	Finite Elements Method (Sonlu Elemanlar Metodu)
GND	Ground
İYM	İçten Yanmalı Motor
M	Motor
MOSFET	Metal Oxide Field Effect Transistor
N	North (Kuzey)
PIC	Peripheral Interface Controller
PWM	Pulse Width Modulation
S	South (Güney)
SD	Sabit Dişliler
US	United States (Amerika)

1. GİRİŞ

Bu çalışmada; en az iki tekeri İYM'dan tahrik alan veya en az iki tekeri EM'dan tahrik alan taşıtların güç iletimlerinden kaynaklanan verim düşmesini engellemek amacıyla “**Elektromekanik Diferansiyel**” tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Tasarım direk tahriklidir, yani herhangi bir dişli, kayış veya zincir olmaksızın tekerlere gücü direk iletmektedir. Diferansiyelin ayna dişlisi, motor milindeki flanşa oturmaktadır. Dolayısıyla güç aktarma organlarının hiçbir parçası kullanılmadığı için transmisyon verimi yoktur. 2 tekere birden aynı mekanizmayla direk tahrikli olarak EM ile güç iletilmesi bu alanda bir yeniliktir. Aynı zamanda tekerlekler, diferansiyel ayna dişlisini mahruhi dişlinin çevirmesi ile de içten yanmalı motordan tahrik alabilmektedir. Böylece taşıt bataryasında elektrik bitse dahi içten yanmalı motorla ilerleyebilecektir. Hatta bu tasarım ile günümüzdeki içten yanmalı motorlara sahip olan taşıtların hibrit taşıtlara dönüşümü mümkündür.

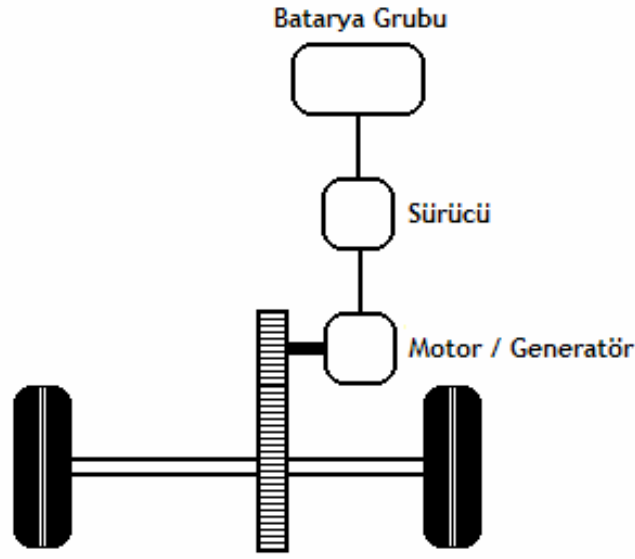
Ancak elektromekanik diferansiyelin rotor milinin ortası boyu boyunca boşluktur ve bu boşluktan aks mili geçmektedir. Böylece manyetizma kayıpları artmaktadır. Histerize kayıplarıyla manyetizma kayıplarındaki azalma eğer transmisyon veriminden daha düşük ise; toplam verimde daha yüksek verim var demektir. Böylece tasarımın uygulanabilirliğinin olduğu görülür. Her ne kadar FEM analizleriyle veya çeşitli eşitliklerle manyetizma verimliliği hesap edilebilse de bu hesaplamaların sapmalarının büyük olduğu aşıkardır. Böyle bir durumda ancak ampirik sonuçlar ile karar verilmesi uygundur.

Konuya öncelikle günümüz hibrit taşıtlarındaki transmisyon çeşitleri ile başlanıp bunlara alternatif olabilecek elektromekanik diferansiyel tasarımı ve çeşitli taşıtlara uygulamaları tanıtılmıştır. Daha sonra elektrik motorunun tasarımda dikkate alınması gereken hususlar işlenmiş ve son olarak taşıtın güç ihtiyacına göre boyutlandırılabilmesi için eşitlikler verilmiştir. Bir aile taşıtı için güç ihtiyacı çeşitli kabul edilebilecek sabitler alınarak, güç ihtiyacı belirlenmiş ve tasarımın boyutlandırması yapılmıştır. Sonuç ve öneriler kısmında ise manyetizmanın verimliliğinin bu tasarımda nasıl artırılacağı konusunda ileriki çalışmalarda izlenmesi öngörülen süreç ile mantığı hakkında yöntem ve bilgilere yer verilmiştir.

2. ELEKTRİKLİ HİBRİT VE TÜMÜ-ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA TAHRİK YAPILARI

2.1. Tümü-Elektrikli Taşıtlar

Hareketi için gerekli gücün tamamını, bir batarya grubu tarafından beslenen elektrik motorundan alan taşıtlar tümü-elektrikli taşıt olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.1.'de ana hatlarıyla bir tümü-elektrikli taşıt tahrik sisteminin yapısı görülmektedir (Çınar, 2008).



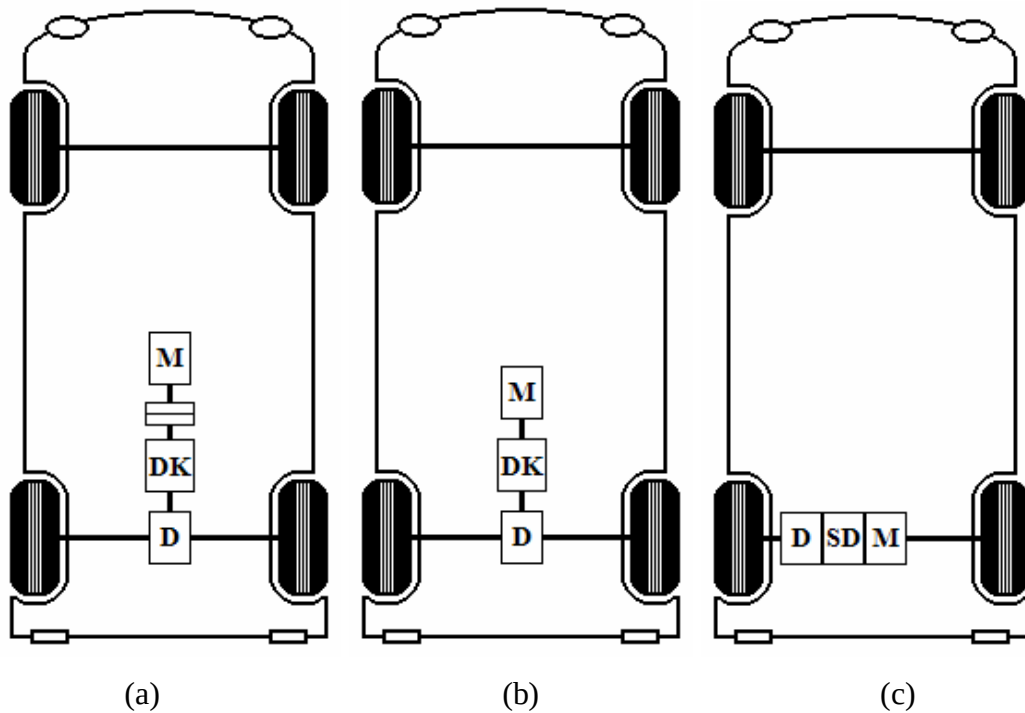
Şekil 2.1. Tümü-elektrikli taşıt tahrik yapısı (Çınar, 2008)

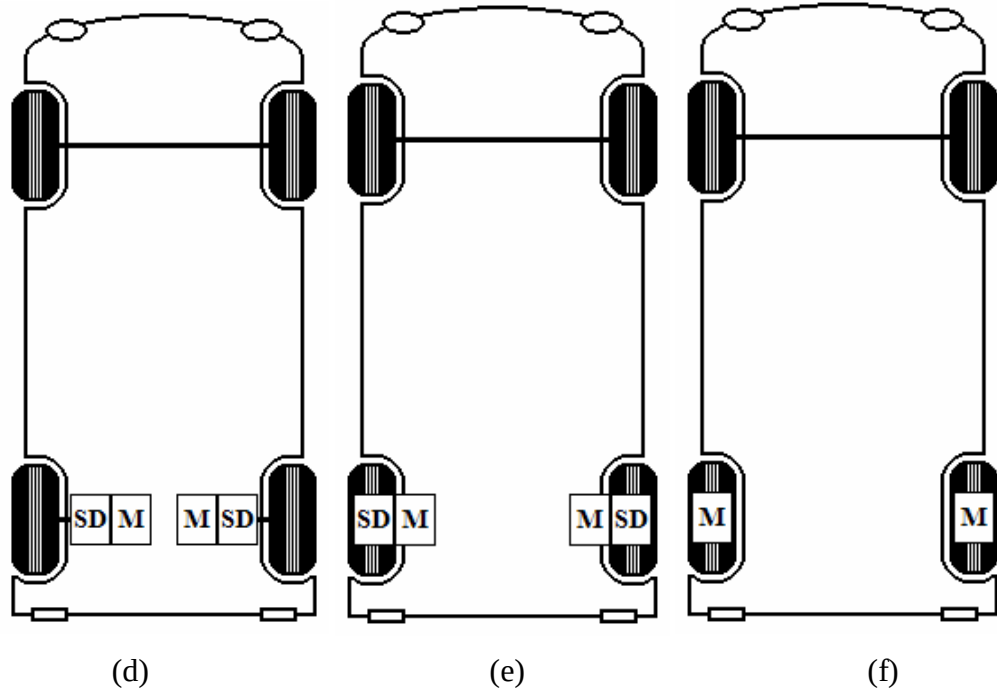
Geliştirilen ilk tümü-elektrikli taşıtların tahrik yapıları incelendiğinde, bu taşıtların halihazırda var olan İYM'lu taşıt tahrik yapısından türetildiği görülmektedir. Bu örneklerde, taşıtın tahrik sistemindeki İYM bir elektrik motoru ve sürücüsüyle, yakıt deposu ise batarya grubuyla değiştirilerek en basit tümü-elektrikli taşıt yapısı elde edilmiştir. Bununla birlikte, böyle bir işlem sonucunda elde edilen taşıtın sunduğu performans ve verimin yeterli olmaması nedeniyle, tümü-elektrikli taşıtlar için tamamen orijinal tasarımlar yapılması yoluna gidilmektedir. Sürüş koşullarına bağlı olarak, taşıt tahrik sistemindeki güç akışı farklı yönlerde gerçekleşmektedir. (Çınar, 2008).

Taşıtın kalkışı, ani hızlanma ve yokuş tırmanma gibi durumlarda batarya grubundan yoğun bir şekilde enerji çekilmektedir. Bu gibi sürüş koşulları, bataryalarda depolanmış olan enerjinin tüketimini artırarak taşıtın maksimum sürüş menzilini önemli miktarda azaltmaktadır. Bu enerjinin kısmen geri kazanımı, rejeneratif frenleme sistemi ile mümkün olmaktadır. Taşıtın kendi ataletiyle yavaşlaması sırasında, elektrik motoru generatör olarak çalışarak ve tahrik sistemindeki güç akışını ters yöne çevirerek ve batarya grubunu beslemektedir. Ayrıca güç talebinin arttığı durumlarda, kısa süreler için motora ek güç sağlamak amacıyla, tahrik sistemine yardımcı bir batarya grubu veya süper kapasitör gibi bir ilave enerji depolama birimi eklenebilmektedir. Taşıtın özellikle şehir içi kullanımında, trafik ışıkları ve trafik sıkışıklığı gibi nedenlerle kaçınılmaz olan geçici süre beklemesi sırasında ise elektrik motorunun batarya grubuyla bağlantısı kesilerek, enerjinin boşa harcanması engellenmiş olur. Tümü-elektrikli taşıtların tahrik sistemleri üzerinde çeşitli şekillerde iyileştirme ve geliştirme çalışmaları yapılarak, farklı tahrik sistemi yapıları elde edilmiştir. Bu tahrik yapıları, kullanılan tahrik motorunun sayısına göre;

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

olarak iki grupta incelenirler. Bunlar sırasıyla şekil 2.2.'de verilmektedir (Çınar, 2008).





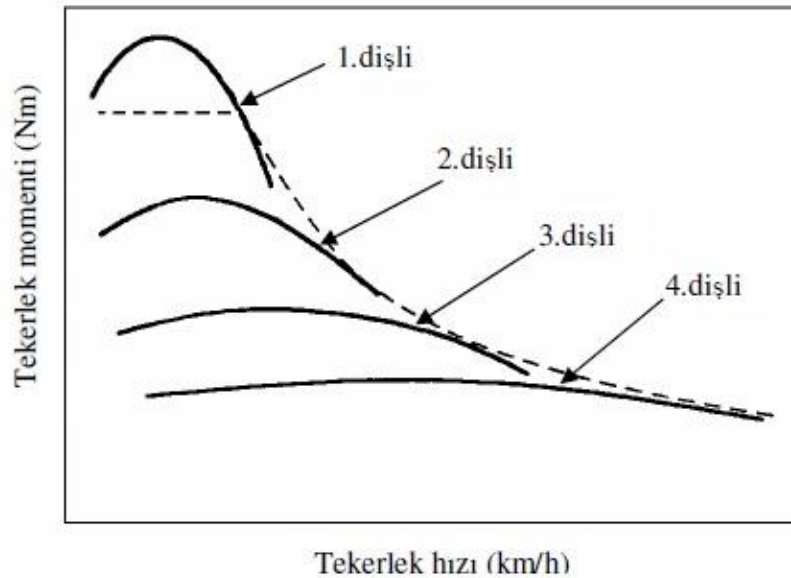
Şekil 2.2. Tek ve çok motorlu tümü-elektrikli taşıt tahrik sistemleri (Çınar, 2008)

Şekil 2.2.a’da elektrik motorunun, İYM’lu taşıt tahrik yapısındaki İYM’nin yerini aldığı en basit elektrikli taşıt tahrik sistemi görülmektedir. Bu sistem bir elektrik motoru (M), kavrama elemanı, dişli kutusu (DK) ve diferansiyel (D)’den oluşmaktadır. Kavrama elemanı, mekanik olarak elektrik motorunu dişli kutusuna bağlamak veya ayırmak için kullanılmaktadır. Dişli kutusu, yüklenme durumuna göre elektrik motorunun moment-hız karakteristiğini uyarlamak için kullanılan bir dizi dişliden oluşmaktadır. Diferansiyel ise, yol durumuna göre tahrik edilen tekerleklerin dönüş hızlarının belirlenmesini sağlamaktadır. (Çınar, 2008).

Şekil 2.2.b’de ise bu tahrik sistemi, kavrama elemanı olmadan oluşturulmuştur. Bu sayede mekanik güç aktarım organının boyutu ve ağırlığı azalmıştır. Şekil 2.2.c’de ise dişli kutusu tahrik sisteminden çıkartılarak yerine sabit bir dişli eleman kullanılmıştır. Bu yapıda önemli olan, kullanılan elektrik motorunun geniş hız ve moment aralığında çalışabilmesidir. Şekil 2.2.d ve 2.2.e’deki tahrik sistemleri, birden fazla sayıda tahrik motorunun kullanıldığı tahrik yapılarıdır. Kullanılan motorların tekerlek merkezine yerleştirilen ve “tekerlek motoru” olarak adlandırıldığı bu yapı ile mekanik diferansiyel ihtiyacı ortadan kalkar. Ana taşıt kontrolöründen gelen kontrol sinyallerine göre elektrik motorları, birbirinden bağımsız şekilde kontrol

edilebilmektedir. Bu amaçla her bir elektrik motoru ayrı bir elektronik sürücü devre üzerinden beslenmektedir. Bununla birlikte bu sistemde elektrik motorunun hızını azaltmak ve momentini artırmak için kullanılan dişli (SD), yine tahrik sisteminde yer almaktadır (Çınar, 2008).

Elektrik motoruyla tekerlekler arasındaki dişli elemanı tamamen ortadan kaldırmak için, “tekerlek-İçi motor” olarak adlandırılan dış rotorlu elektrik motorları geliştirilmektedir (Şekil 2.2.f). Bu amaçla kullanılan motorların en temel özellikleri momentlerinin yüksek, nominal hızlarının ise düşük olmasıdır. Motora uygulanacak hız kontrolü ile tekerleğin ve dolayısıyla taşıtın hızı doğrudan kontrol edilebilir. Motorun moment kapasitesinin ise, taşıtın kalkışı ve ani hızlanması durumunda moment ihtiyacını karşılayabilmesi için yüksek olması gerekmektedir. Şekil 2.3.’de bir İYM tarafından tahrik edilen bir taşıtın moment-hız karakteristiği verilmektedir. Bu sayede elde edilen moment-hız karakteristiğinin, bir elektrik motorunun moment-hız karakteristiğiyle gösterdiği benzerlik açıkça görülmektedir. Şekil 2.2.a ve 2.2.b’de prensip seması verilen elektrikli taşıt tahrik yapılarında da dişli kutuları benzer amaçla kullanılmaktadır. Şekil 2.3.’de farklı dişli oranları yardımıyla elektrik motorunun sabit moment ve sabit güç bölgeleri kontrol edilebilir (Çınar, 2008).



Şekil 2.3. Dört oranlı dişli kutusuna sahip İYM’lu taşıta ait moment-hız karakteristiği (Çınar, 2008)

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

Mitsubishi Colt elektrikli taşıt Mini sınıfta yer alır ve bu taşıta tahrik gücünü, her biri 20 kW, 300 Nm değerinde olan iki adet sürekli mıknatıslı senkron motor sağlamaktadır. 22 hücreden oluşan Li-Ion batarya grubu tahrik motorlarına 325V gerilim sağlamaktadır (Çınar, 2008).

2.2. Hibrit Elektrikli Taşıtlar

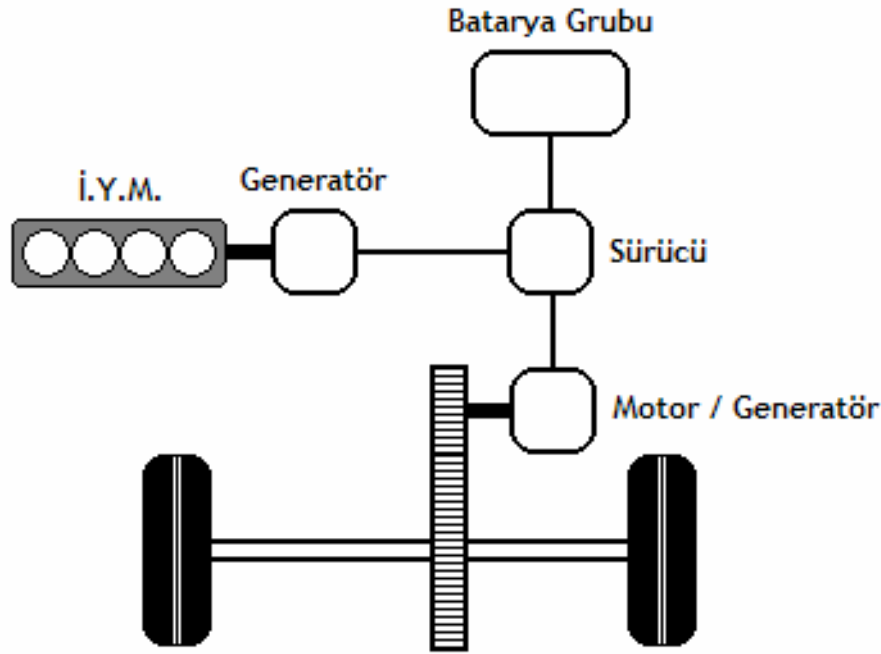
Hareketi için gerekli gücü, yapısındaki birden fazla enerji kaynağından alan taşıtlar “hibrit taşıtlar”, bu enerji kaynaklarından birisi elektrik enerjisi olan taşıtlar ise “hibrit elektrikli taşıtlar” taşıt olarak adlandırılmaktadır. Bununla birlikte, günümüzde hibrit elektrikli taşıt kavramı daha çok, tahrik gücünü yapısında bulunan İYM ve elektrik motorunun birlikte veya ayrı ayrı kullanan taşıtlar için kullanılmaktadır (Çınar, 2008).

2.2.1. Seri hibrit elektrikli taşıt tahrik yapısı

Seri hibrit yapı, iki farklı güç kaynağının taşıtı tahrik eden güç üretim sistemi olarak kullanıldığı yapı olarak özetlenebilir. Şekil 2.4.’de görüldüğü gibi seri hibrit yapı, tümü-elektrikli taşıt yapısına oldukça benzer yapıdadır. Bu sistemdeki tek farklılık, elektrik enerjisinin İYM tarafından tahrik edilen bir generatör ile taşıt üzerinde üretiliyor olmasıdır. Sürüş koşullarına bağlı olarak seri hibrit elektrikli tahrik sisteminde güç akışı aşağıdaki şekillerde olmaktadır;

- **Sadece elektrik gücü:** İYM kapalıdır ve tüm güç batarya grubundan çekilmektedir.
- **Hibrit çalışma:** Tahrik gücü, hem İYM-generatör, hem de batarya grubu tarafından birlikte sağlanmaktadır.

- **Sadece İYM gücü:** Batarya grubu tamamen devre dışıdır. Tahrik gücünün tamamı İYM-generatör grubu ile sağlanmaktadır. Elektrik makineleri, güç taşıma elemanı olarak davranmaktadır.
- **İYM tahriği ve batarya şarj durumu:** İYM-generatör grubu taşıta tahrik gücünü sağlarken diğer yandan da batarya grubunu beslemektedir.
- **Geri kazanımlı fren modu:** İYM-generatör grubu devre dışı bırakılır. Tahrik motoru generatör olarak çalışarak batarya grubunu beslemektedir.
- **Batarya şarj modu:** Tahrik motoru çalışmaz. İYM-generatör grubu bataryaları beslemektedir.
- **Hibrit batarya şarj modu:** İYM-generatör grubu ve generatör olarak çalışan tahrik motoru birlikte bataryaları beslemektedir (Çınar, 2008).



Şekil 2.4. Seri hibrit elektrikli taşıtın tahrik yapısı (Çınar, 2008)

Seri hibrit elektrikli tahrik sisteminde geri kazanımlı frenleme ile, tümü-elektrikli taşıtlarda olduğu gibi harcanan enerjinin geri kazanımı sağlanmakta, böylece önemli ölçüde enerji tasarrufu yapılmaktadır. Bu tahrik sisteminde uygun moment-hız karakteristiğine sahip tahrik motorları ile mekanik güç aktarım elemanı ihtiyacı ortadan kaldırılabilir. Böylece taşıtın ağırlığı ve toplam maliyeti azaltılmakla birlikte, burada oluşacak olan kayıpların ortadan kalkması sağlanmaktadır. Ayrıca

birden fazla sayıda motor ile taşıt çok tekerlekten tahrik edilerek mekanik diferansiyel ihtiyacı da ortadan kaldırılabilir. Bu yapının bir diğer avantajı da İYM'nin tekerleklerle doğrudan bağlantısının olmamasıdır. Böylece İYM sürekli olarak en verimli olduğu devirde çalıştırılabilir (Çınar, 2008).

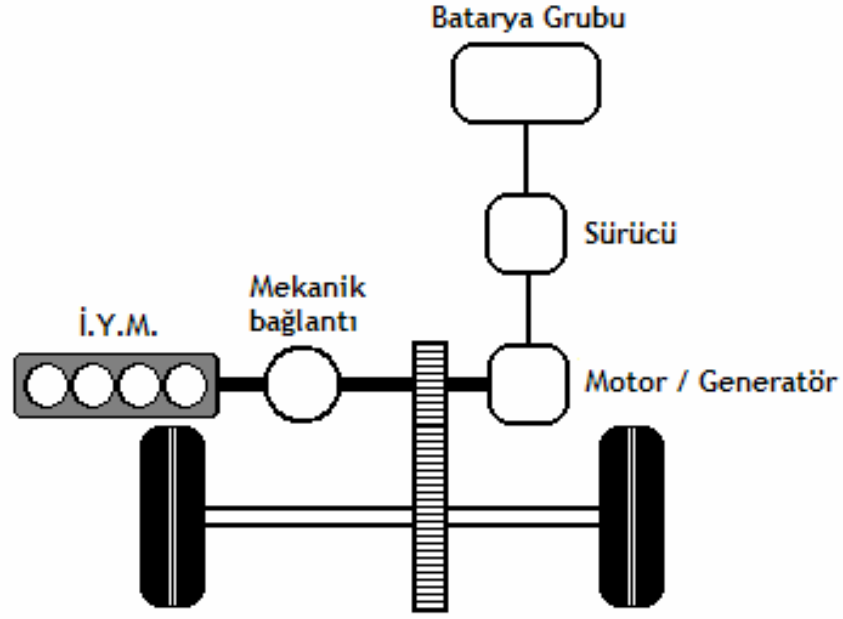
Bununla birlikte seri hibrit yapıda, İYM'nin ürettiği mekanik enerji önce generatör ile elektrik enerjisine, daha sonra ise motor ile tekrar mekanik enerjiye dönüştürülmektedir. Bu durumda her iki elektrik makinesinde oluşan kayıplar sistemin toplam verimini düşürmektedir. Ayrıca, kullanılan generatör taşıtın ağırlığını ve sistem maliyetini artırmaktadır. Ek olarak, tek tahrik motoru kullanılan seri hibrit yapıda, bu motor taşıtın tek tahrik kaynağı olduğundan dolayı, taşıtın maksimum ihtiyaçlarını karşılayabilecek şekilde boyutlandırılması gerekliliği önem taşımaktadır (Çınar, 2008).

2.2.2. Paralel hibrit elektrikli taşıt tahrik yapısı

Şekil 2.5.'de görüldüğü gibi paralel hibrit elektrikli tahrik yapısına sahip taşıtlarda elektrik motoru ve İYM, bir mekanik kavrama elemanı üzerinden tekerlekleri birlikte tahrik etmektedir. Paralel hibrit taşıtlarda, içten yanmalı motor ile tahrik edilen taşıtlara göre daha küçük güç ve boyuta sahip küçük boyutlu İYM'ler kullanılmaktadır. Taşıtın toplam güç ihtiyacı ve çalışma koşullarına göre elektronik kontrolör ünitesi tarafından, hangi kaynaktan ne kadar güç çekileceği belirlenmektedir. Sürüş koşullarına bağlı olarak paralel hibrit elektrikli taşıt tahrik sisteminde güç akışı aşağıdaki şekillerde olmaktadır;

- **Hibrit tahrik:** Ani hızlanma ihtiyacında veya yokuş tırmanma gibi sürüş koşullarında tahrik gücü, İYM ve elektrik motoru tarafından ortak olarak sağlanmaktadır. Böylece birbirini destekleyen iki güç kaynağı elde edilmektedir.
- **Sadece İYM gücü:** Taşıta tahrik gücünü İYM tek başına üretmektedir.
- **Sadece elektrik gücü:** Tahrik gücünü elektrik motoru tek başına üretmektedir. Sürüş koşullarına göre, özellikle sık sık dur-kalk yapılan yerlerde sadece elektrik gücü kullanılarak gürültü ve zararlı emisyon oranı azaltılmaktadır.

- **Geri kazanımlı frenleme:** İYM kapatılır veya kavrama elemanı ile bağlantısı kesilmektedir. Taşıtın potansiyel veya kinetik enerjisi ile bataryalar şarj edilmektedir.
- **İYM ile batarya şarj modu:** Tekerleklerin kavrama elemanı ile bağlantısı kesilmektedir. İYM sadece bataryaları şarj etmektedir (Çınar, 2008).



Şekil 2.5. Paralel hibrit elektrikli taşıtın tahrik yapısı (Çınar, 2008)

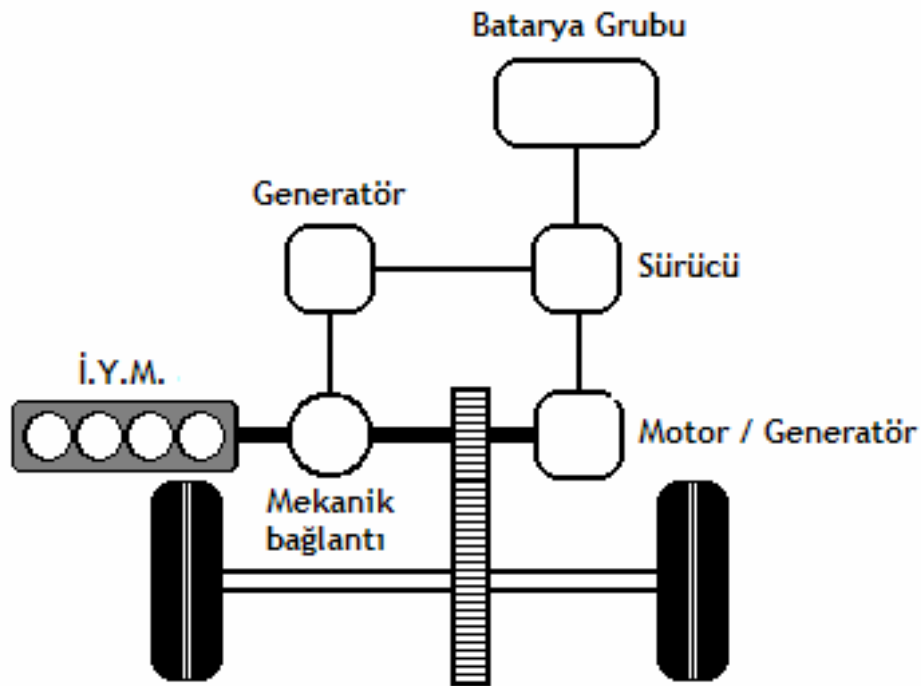
Paralel hibrit elektrikli taşıt yapısı, seri hibrit elektrikli taşıt yapısıyla karşılaştırıldığında daha düşük kapasiteli bataryalar kullandığı için şarj çoğunlukla geri kazanımlı frenleme ile sağlanmaktadır. Bunun yeterli olmadığı durumlarda ise bataryaların harici bir kaynak yardımıyla şarj edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır (Çınar, 2008).

2.2.3. Seri-paralel hibrit elektrikli taşıt tahrik yapısı

Şekil 2.6.'da görüldüğü gibi seri-paralel hibrit yapı, seri hibrit yapıyla karşılaştırıldığında ilave bir mekanik bağlantı elemana sahiptir, paralel hibrit yapıyla karşılaştırıldığında ise ilave bir generatör içermektedir. Burada İYM, mekanik

bağlantı elemanı ile hem diferansiyeli, hem de generatörü tahrik etmektedir (Çınar, 2008).

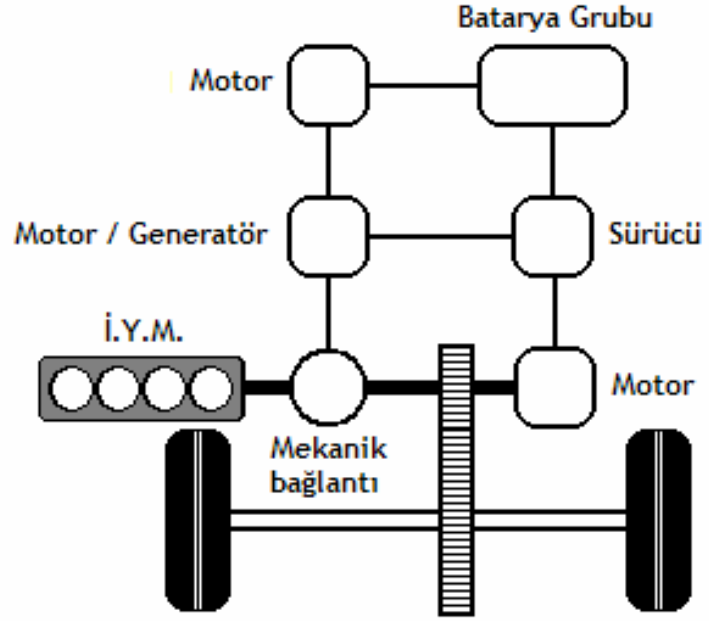
Bu sistem hem seri hem de paralel hibrit tahrik sistemlerinin olumlu özelliklerini taşımaktadır. İYM normal şartlarda en verimli çalışma noktasında çalışarak generatör üzerinden bataryaları ve elektrik motorunu beslemekte, taşıtın ek güç ihtiyacında ise mekanik olarak elektrik motoruna destek olmaktadır. Bir başka ifadeyle, batarya grubunun elektriksel olarak üstlendiği fazla gücü karşılama görevini üstlenmektedir (Çınar, 2008).



Şekil 2.6. Seri-paralel hibrit elektrikli taşıtın tahrik yapısı (Çınar, 2008)

2.2.4. Karışık hibrit elektrikli taşıt tahrik yapısı

Bu sistem diğer üç kategoriye dahil edilemeyecek karışık bir tahrik yapısı içerir. Şekil 2.7.'de görülen bu sisteme karışık hibrit yapı denmesinin nedeni, seri-paralel sistemde kullanılan generatörün yerine gerektiğinde motor, gerektiğinde ise generatör olarak çalışan bir elektrik makinesi kullanılmasıdır. Bu sayede, seri-paralel hibrit yapıda generatör tek yönlü enerji akışına izin verirken, karışık hibrit yapıda bu güç akışı her iki yönde de gerçekleşebilmektedir. (Çınar, 2008).



Şekil 2.7. Karışık hibrit tahrik yapısı (Çınar, 2008)

Bu sistem seri-paralel hibrit yapının tüm avantajlarına sahiptir. Bunlara ek olarak, elektrik makinası motor olarak çalıştırılıp İYM için marş motoru görevini de üstlenebilir (Çınar, 2008).

3. ELEKTROMEKANİK DİFERANSİYEL İLE ELEKTRİKLİ VE HİBRİT ELEKTRİKLİ TAŞITLAR

İçten yanmalı motorlarda güç aktarımının bir parçası olan diferansiyel mekanizması, motordan tekerleklere iletilen gücü 90° açıyla ileten bir sistemdir. Temel bir taşıt diferansiyeli; mahruti dişli, ayna dişli ve istavroz dişlilerinden meydana gelmektedir. Motorda üretilen güç, mahruti vasıtasıyla ayna dişliye bu dişli üzerinden istavroz grubuna iletilmektedir. İstavroz grubu ise virajlarda ve taşıtın dönüşü esnasında ayna dişliden aldığı gücü farklı devirlerde tekerleklere ileten bir mekanizmaya sahiptir. İstavroz dişlisi üzerinde iki veya daha fazla adet avare dişli bulundurur ve bu avare dişliler iki tekerleğin torklu bir şekilde dönerken farklı hızlarda dönebilmesini sağlamaktadır. Mevcut taşıtlarda ve sistemlerde bulunan diferansiyellerin çalışma sistemi bu şekildedir. İçten yanmalı motora sahip bir taşıt motor gücünün toplamda %18-30'u arasındaki bir enerjiyi güç aktarma organlarında tekerlere iletirken kaybetmektedir. Böylece bu çalışma kapsamında oluşturulan direk tahrik sistemi ile tekerlerin harekete geçirilmesi verimlilik açısından önem kazanmaktadır.

Hibrit taşıtlarda ise hem içten yanmalı motorun hem de elektrik motorunun diferansiyele ait ayna dişlisini tahrik edebilecek (içinde daha fazla dişlinin bulunduğu) sistem kullanılmaktadır. Her dişli kavramasının %5-15 arasında verimin düşmesi göz önünde bulundurulursa toplam verimde büyük bir azalma etkisi yapması, daha verimli kullanılabilecek direk dönüşlü bir sistemin ihtiyacını doğurmaktadır. Direk dönüşlü sistem olan tekerlek içi motorda ise; hız kontrol sisteminin gereksinimi ek bir yükümlülük oluşturmaktadır. Bu sistemin ise çeşitli yol şartlarına tam cevap verememesinden dolayı ticarileşememiştir. Elektrikli taşıtlarda ise elektrik motorunun çıkışında mahruti dişli bulunur ve bu mahruti dişli ayna dişliyi tahrik ederek ilerler. Yani güç aktarımında bir dişli kavraması vardır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen elektromekanik diferansiyel tasarımında, elektrik motorlarının (EM) bir ucundan güç alınmakta, diğer ucu ise yataklama için kullanılmaktadır. Eğer tahrik gücünü diğer ucu uzatarak iki uçtan alınacak olsa idi, ve uçlarına tekerlek takarak otomobillerde kullanılsa idi, viraj esnasında tekerlerin torklu bir şekilde farklı hızlarda dönmesi mümkün olmayacaktı. Bu konvansiyonel taşıtlarda mekanik bir sistemle çözümlenmektedir. Mevcut taşıtlarda kullanılan

diferansiyel tertibatının içerisindeki istavroz dişlileri bu görevi görmektedir. Bu çalışmada elektrik motorunun merkezinde dönen rotor adı verilen parçanın içine monte edilen istavroz dişlileri bu amaçla kullanılmaktadır. Böylece hem direk dönüşlü bir mekanizma elde edilmiş olacak, hem de tekerler viraj esnasında torklu bir şekilde farklı hızlarda döndürülmüş olacaktır.

Bu çalışma kapsamında tasarlanan elektromekanik diferansiyelin amacı, kara yollarında kullanan tümü elektrikli ve hibrit elektrikli taşıtlarda kullanılabilecek yeni bir sistemin geliştirilmesidir. Bu sistem yeni bir güç aktarım çeşididir ve aynı zamanda taşıtın dinamik kararlılığını sağlamaktadır. Mevcut taşıtlarda bu görevi gören hali hazırda bulunan sistemlere kıyasla daha verimli, uygulaması daha basit, üretimi daha kolay ve maliyeti daha düşük bir sistemdir. Günümüzde çevre dostu olan elektrikli ve hibrit taşıtlara verilen önem gün geçtikçe artmaktadır. Çünkü elektrikli hibrit taşıtların temel mantığı, öncelikle elektrik enerjisini kullanarak tahrik edilen ve batarya enerjisinin tükendiği durumda yolda kalmamak için petrol kökenli yakıtla geri kalan mesafeyi tamamlamaktır. Bu durum ülke ekonomisinin cari açığının, hava kirliliğinin ve enerji ihtiyacında dışa bağımlılığın azalmasına olumlu katkılar sağlaması öngörülmektedir.

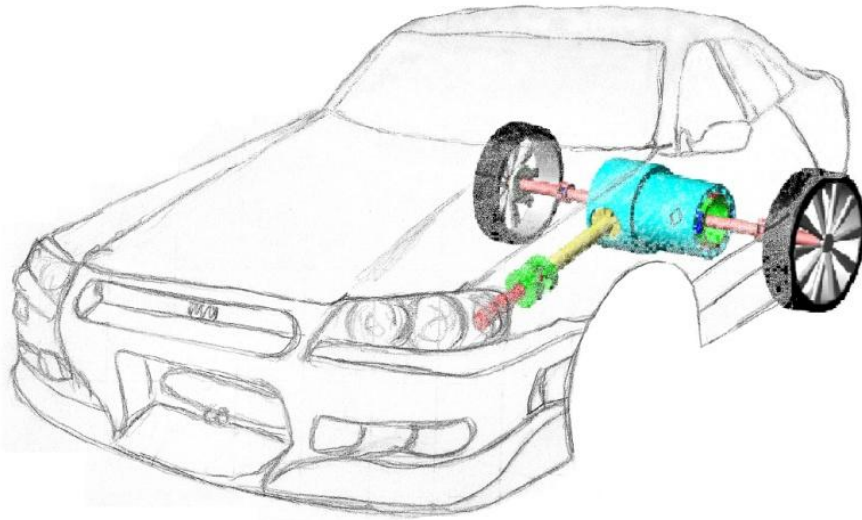
Elektromekanik diferansiyelinin tasarımında ayrıca, hibrit taşıtların kullanımının yaygınlaşması, rejeneratif frenleme ile frenleme esnasında normalde fren balatalarında ısıya dönüşerek sönmölen enerji nin tekrardan elektrik enerjisine çevrilerek kullanılması, tahrik mekanizmasının direk olması nedeniyle daha verimli bir güç aktarımının gerçekleşmesi mümkün olabilecektir. Bu taşıtlardaki mevcut bazı sıkıntıların aşılması ile taleplerin daha da artması beklenmektedir. Enerjiyi bu tasarımla daha verimli kullanılacağından dolayı tek seferde alınan yolun artması beklenmektedir. Bu tasarımın diğer tekerlek içi motor tasarımlarına göre imali daha düşük maliyetlidir. Çünkü tekerlek içi motor kullanımlarına göre hız kontrol devreleri bulunmamaktadır.

Böylelikle, güç aktarımı direk tahrikli olacak ve güç aktarımında enerji kaybı olmayacaktır. Elektrik motorunun rotoru sabit mıknatıslı olmasından dolayı alternatör olarak da işlevi olabilecek, böylelikle frenleme esnasında rejeneratif frenleme yapılacak, rejeneratif frenleme için ek bir mekanizmaya ihtiyaç

duyulmayacaktır. Bu da hem maliyetten hem de taşıtı ek bir mekanizma ve ağırlıktan kurtarmış olacaktır.

Günümüz taşıtlarını hibrit taşıtlara dönüştürecek olan bu mekanizma; prototip bir taşıta uygulanarak, ileride gerçek taşıtlara uygulanmasıyla oluşabilecek sıkıntıların görülmesi hedeflenmiştir. Bu sistemde taşıt içten yanmalı motor ile tahrik ediliyor iken diğer yandan bu sistemle elektriğin üretilmesi söz konusu değildir. Benzer şekilde taşıt elektrik motoru ile tahrik ediliyor iken bu sistemle elektrik enerjisinin üretilmesi de söz konusu değildir. Tasarlanan bu sistem, elektrik enerjisini sadece frenleme esnasında üretecektir. Böylece çekilen akımın değerine göre alternatör daha zor dönecek ve böylece taşıtın frenlenmesi sağlanmış olacaktır.

Bu çalışmada hibrit taşıtlarda verimli bir güç aktarımı için bir mekanizma tasarlanmış, bu mekanizma elektromekanik diferansiyel olarak adlandırılmıştır. Bu mekanizma günümüz taşıtlarına modifiye olarak uygulanabileceği gibi taşıtın üretimi esnasında da uygulanabilir. Mekanizmanın taşıt üzerindeki konumu şekil 3.1.'de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.1. Elektromekanik diferansiyelin taşıt üzerindeki konumu

3.1. Elektromekanik Diferansiyel Tasarımında Genel Kabuller

Normal bir sedan taşıtın mil başına ortalama güç ihtiyacı 300 W olarak belirlenmiştir (Thomas ve Andrew 2007). 1 mil = 1.609344 km olduğuna göre, km başına güç ihtiyacını 186 W/km olarak bulunur. 1 kWh elektriğin Kasım 2013 tarihli bedeli 0.28386 TL (tek zamanlı tarife, Gece puant tarifesiyile bu bedel daha aşağılara çekilebilir.) (Akdeniz, 2013), olduğundan 186W enerjinin bedelini 0,0529 TL olarak hesaplanır. Buda km başına yakıt ekonomisi en az 0,25 TL civarında olan içten yanmalı otomobiller için km başına maliyetin 0,053 TL olmasıyla %80 oranında ulaşım bedelinin azalması anlamına gelir. Ulaşım bedelinin azalmasının nedeni daha az enerji harcanması değil, harcanan enerjinin elektrik enerjisi olması ve elektrik motoruyla kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

Hibrit ve tümü elektrikli otomotiv uygulamaları için en uygun elektrik motoru çeşidi sabit mıknatıslı DC (Doğru Akım) motorlarıdır (Gürdal, 2003). Bu çalışma kapsamında kullanılacak sabit mıknatıslı doğru akım motoru direk tahrikli olacağı için kutup sayısını artırarak torkunun artırılması gerekmektedir. Elektrik motoru yerine içten yanmalı motor kullanılmasıyla devir ve tork ihtiyacının karşılanması adına ek mekanizmalar kullanılmaktadır. Kavrama, vites kutusu ve diferansiyel gibi mekanik parçalar ise güç aktarımında gerekli olup aktarılan gücün verimini düşürmektedir.

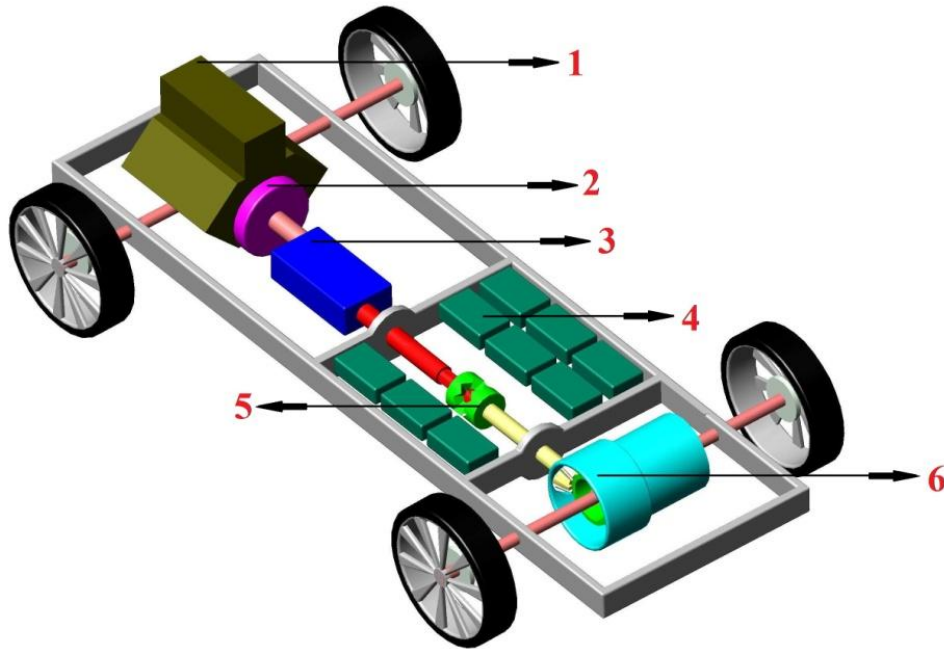
Her dişli kavramasının verimi %5-10 oranında düşürdüğü göz önünde bulundurularak, kavrama tertibatının veriminin %85 olduğu kabul edilirse içten yanmalı motorlarda üretilen gücün maksimum %70'i tekerleklerle iletilebilmektedir (Çetinkaya, 2010). Bu çalışma kapsamında tasarlanan elektromekanik diferansiyel mekanizması direk tahrikli olduğundan elektrik motorunda üretilen dönme gücü herhangi bir dişli kavramasından dolayı verim kaybına uğramadan tekerlere iletilebilecektir. Sistemin verimi için %100 tahrik durumunda sadece sistemde kullanılan 2 adet yataklama rulmanı verimi düşürecektir. Rulmanlarda verim pratik olarak %100 kabul edilebilmektedir (Özdemir, 2005). Fakat aşınma, titreşim veya sürtünme gibi etkenlerden dolayı verimleri çalışma yükleriyle ters orantılı olarak

kullanıma bağı azalmaktadır. Bu nedenle tasarlanan bu sistemde mekanik verimliliği %99 kabul edilecektir (Aydın ve Aydemir, 2013).

Fırçasız doğru akım motorlarının tetikleme yollarından biri hall effect sensörleriyle konumunun algılanarak uygun bobinlere elektrik gönderilmesiyle gerçekleşmektedir. Bobinlere giden akımın ters olarak gönderilmesiyle elektrik motoruna ileri geri kabiliyeti kazandırılmış olur (Kurdoğlu, 2007); (Yedamale, 2003).

3.2. Arkadan İtişli Hibrit Elektrikli Taşıtlar İçin Elektromekanik Diferansiyel'in Tasarımı

Bu çalışma kapsamında tasarlanan elektromekanik diferansiyelin taşıt şasisi üzerinde yerleşimini gösteren şematik resim şekil 3.2.'de görülmektedir.

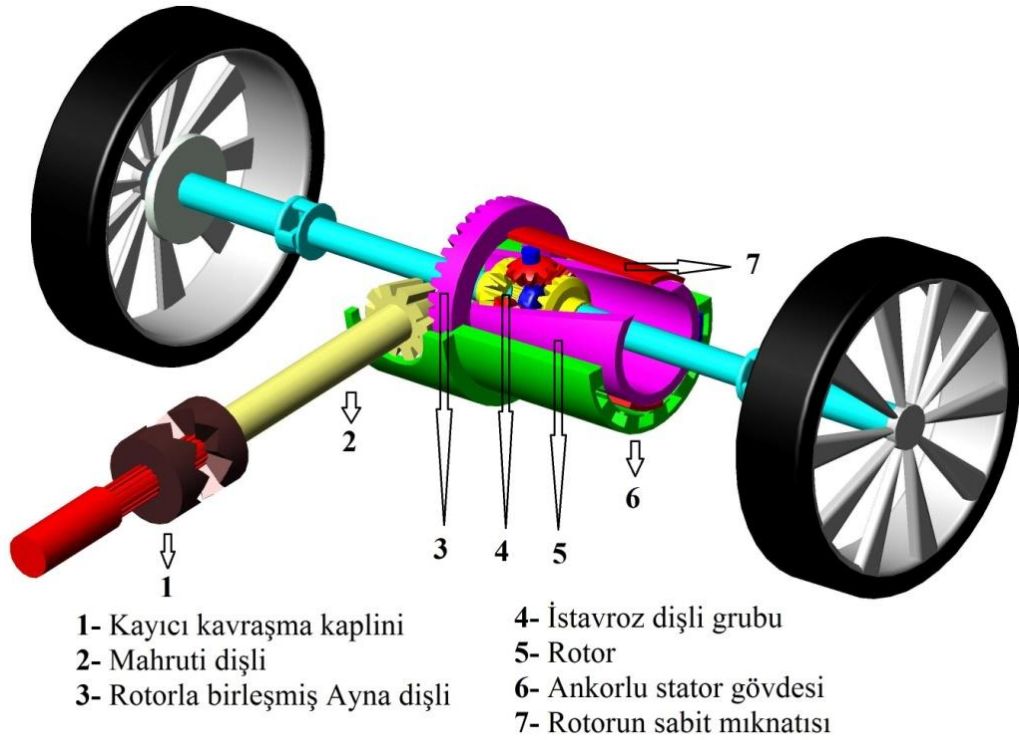


1-) İçten Yanmalı Motor 2-) Kavrama 3-) Vites kutusu 4-) Bataryalar 5-) Kayıcı kavrama kaplini 6-) Elektromekanik Diferansiyel

Şekil 3.2. Elektromekanik diferansiyelin şasi üzerindeki konumu

Şekil 3.3.'de arkadan çekişli içten yanmalı bir motorla tahrik edilen bir taşıtın güç aktarma organlarına elektromekanik diferansiyelin uygulanaşına ait model görölmektedir. Bu sistemde kayıcı kavrama kaplini (5) sayesinde taşıt elektrik motoru ile hareket ederken içten yanmalı motor ve güç aktarma organlarından mahruti dişlinin bağlantısı kesilerek sürtünmeler önlenmiş olacaktır.

Şekil 3.3.'de göröldüğü gibi kayıcı kaplin (1) kavramamış iken mahruti dişli (2) boşta dönmekte (sarı), vites kutusundan çıkan şaft (kırmızı) dönmemektedir. Rotor (5) üzerinde bulunan sabit mıknatısların (7) statordaki (6) bakır tellerin oluşturduğu manyetizma ile etkileşime girerek dönme gücü meydana getirecektir. Rotorun (5) ortasındaki istavroz dişli grubu (4) rotor ile yek pare olarak dönmektedir. Bu şekilde tekerlere dönme gücü direk olarak iletilmiş olacaktır. Tetiklemeler sayesinde ileri geri yapabilecektir.



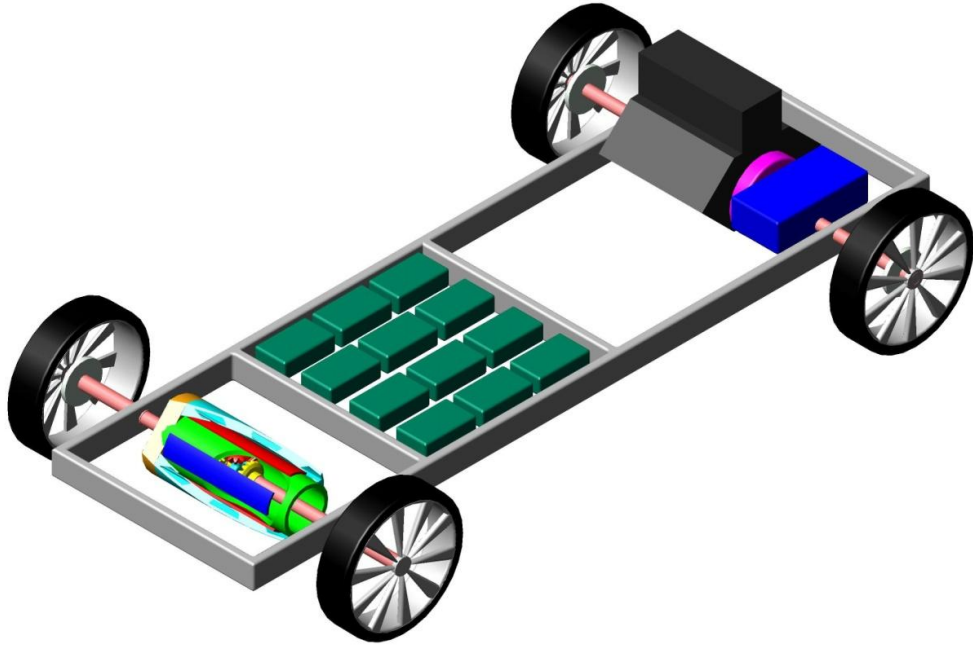
Şekil 3.3. Hibrit elektrikli taşıtlar için elektromekanik diferansiyel kesitinin perspektif görünüşü

Sabit mıknatısların oluşturduğu manyetizma statordaki bakır telleri kesmesiyle bakır tellerde elektrik gerilimi oluşacaktır. Alternatörlerin genel elektrik üretimi prensibi budur. Alternatörden çekilen akım ne kadar fazla ise o kadar daha zor dönmektedir. Böylece rejeneratif frenlemeyi başka mekanizma kullanmadan uygulanabilmesine olanak tanımaktadır. Çekilen akım değerine göre frenleme uygulanacaktır. Kapasitörlerde depolanan bu enerji taşıtın ilk hareketi esnasında tekrar kullanılacaktır.

Taşıt hareket halinde ilerler iken frenleme yapılır yapılmaz elektrik motoruna gönderilen akım kesilecek, bunun yerine rejeneratif frenlemenin yapılması için röleler açılarak kapasitörlere enerji depolanması tasarlanmaktadır. Gaza veya frene basılmadığı takdirde taşıtın kendi hızıyla ilerlemesi için herhangi bir müdahale (tetikleme veya frenleme) yapılmaması tasarlanmaktadır.

3.3. Önden Çekişli Hibrit Elektrikli Taşıtlar ve Tümü Elektrikli Taşıtlar İçin Elektromekanik Diferansiyel Tasarımı

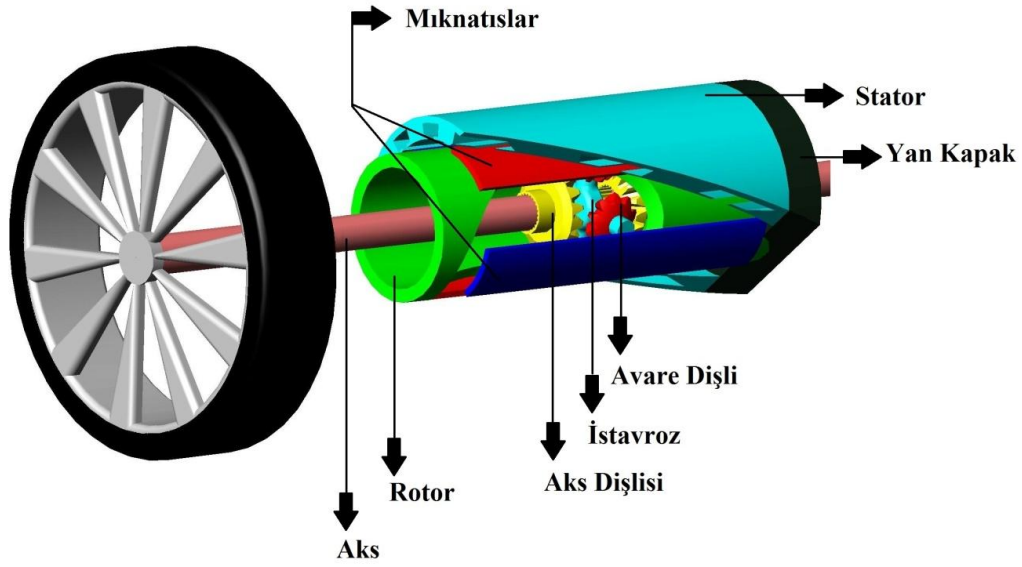
Şekil 3.4.' de görülen şasi üzerindeki konumu gösterilen elektromekanik diferansiyel hali hazırda piyasada bulunan önden çekişli taşıtlar için şekildeki haliyle modifiye edilebileceği gibi tümü elektrikli taşıtlarda da kullanılması mümkündür. Tümü elektrikli taşıtlarda kullanımı sadece arkadan itişli, sadece önden çekişli ya da hem arkadan itişli hem de önden çekişli şekilde uygulanması ve istenildiği zaman 4x4 olarak kullanılması mümkündür. 4x4 kullanımda ön ve arka tekerler arası senkronizasyonsuzluğu taşıtın yük dağılımından kaynaklanabilecektir.



Şekil 3.4. Önden çekişli hibrit veya elektrikli taşıtlar için elektromekanik diferansiyel tasarımının şasi üzerinde perspektif görünümü

Bu senkron uyumsuzluk FDAM elektrik motorlarını ancak konum algılayıcı Hall effect sensörü kullanımıyla veya konum algılayıcı ESC kullanımlarından ve şasinin bir bütünlük sağlayacağından dolayı oluşmaması planlanmaktadır.

Ön ve arka motorlarda aynı akımın gitmesiyle oluşabilecek senkron uyumsuzlukları ancak ön tekerlerin veya arka tekerlerin kaymaya girmesiyle (patinaj) ile mümkün olabilecektir. Böylece ön tekerler için ayrı arka tekerler için ayrı tetikleyicilerin kullanılması gerekecektir. Zaten tercihe bağlı 4x4 taşıtta iki tetikleyici (beyin) kullanılması taşıtın kontrolü bakımından daha kolay olacaktır. Şekil 3.5.'de diferansiyel ayna dişi ve mahrutu dişli olmadan tasarımın tekrar edilmesi söz konusu olan elektromekanik diferansiyel görülmektedir. Parçaları adlandırılmıştır.



Şekil 3.5. Önden çekişli hibrit veya elektrikli taşıtlar için elektromekanik diferansiyel tasarımının perspektif görünümüdür

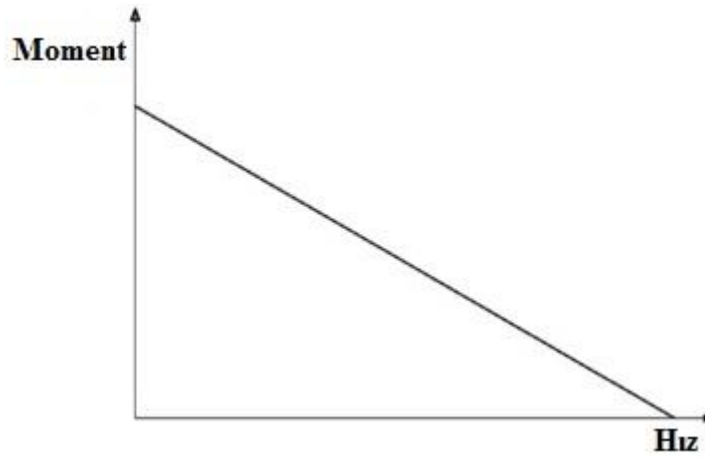
3.4. Elektromekanik Diferansiyel İçin Elektrik Motoru Seçimi

Otomotiv alanında kullanımı önerilen elektrik motoru çeşidi Fırçasız Doğru Akım motorlarıdır ve literatürde FDAM (Brushless DC) olarak da adlandırılmaktadır. Elektrik motorlarının bir ucu sadece yataklama için kullanılıyor iken diğer ucu hem yataklama hem de güç çıkışı için kullanılmaktadır. Sadece yataklama yapılan ucu diğer uç gibi hem yataklama hem de çıkış gücü alacak şekilde üretilmiş olsaydı, elektrik motorundan iki çıkış alınmış olacaktı ve bu elektrik motorunun iki ucuna da tekerlek takılarak ilerlenebilecekti. Bu şekilde direk tahrikli olarak elektrik motorunu kullanabilmiş olurdu. Bu çalışmada kullanılan motor türünden dolayı anahtarlamalar sayesinde ek bir sisteme ihtiyaç kalmadan rejeneratif frenlemeyi de aynı mekanizmada gerçekleştirmiş olmaktadır.

Bu çalışmada kullanılacak elektrik motoru sabit mıknatıslı DC motor olarak tercih edilecektir. Bunun sebebi hem alternatör hem motor olarak kullanılabilmesi ve bununda rejeneratif frenleme sağlayacak olmasıdır. Hall effect sensörleri ile tetikleme tercih edilmesinin sebebi fırçalı sistemlere göre daha verimli olması ve

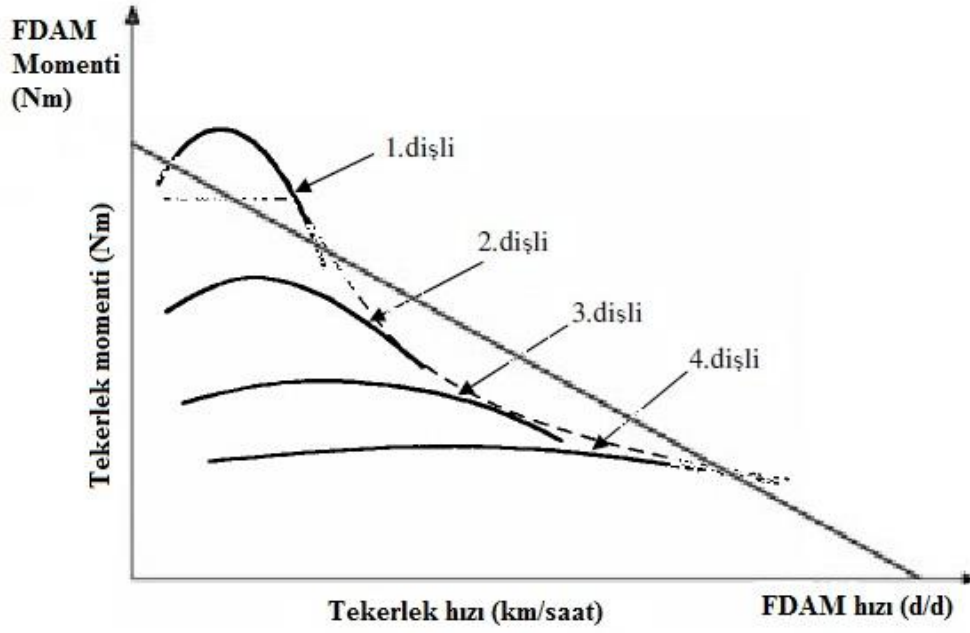
senkronizasyon ayarına gerek olmadan sensörlerle okunan manyetik alan konumuna göre tetiklemelerin gerçekleşebilecek olmasıdır. H köprüsü kurularak ileri geri kabiliyeti eklenecek, direk tahrikli olacak mekanizmanın tork ihtiyacının karşılanması için kutup sayıları artırılacak, rejeneratif frenleme esnasında üretilen gerilimin kapasitörlere depolanabilmesi için röleler kullanılacaktır.

Elektromekanik diferansiyel taşıtlarda kullanılacağından taşıtın tork eğrisi ihtiyacına göre en uygun elektrik motoru çeşidi Fırçasız Doğru Akım Motorlarıdır (Gürdal, 2003). Bu motorlara FDAM'ları denildiği gibi İngilizce olarak BLDC motorları da denilmektedir. Şekil 3.6.'da FDAM'unun teorik tork-devir eğrisi görülmektedir.



Şekil 3.6. Teorik FDAM'unun tork-devir eğrisi (Ertaç, 2008)

Şekil 2.3.'deki taşıtın ihtiyaç duyduğu tork eğrisi ile şekil 3.6'daki tork-devir eğrisi şekil 3.7.'deki gibi birleştirildiğinde; grafikten de anlaşılacağı üzere taşıtın tork ihtiyacı kalkış esnasında ve düşük hızlarda daha fazladır. Bundan dolayı vites mekanizması kullanılarak motor tork eğrisini vites kademesi kadar yayarak bu ihtiyacı karşılamaktadır. Ancak bu eğri FDAM'unun tork karakteristiği olarak halihazırda bulunduğundan; herhangi bir tork artırıcı veya hız artırıcı ek bir vites kutusu gibi bir mekanizmaya ihtiyaç duymamaktadır.



Şekil 3.7. Üst üste koyulan iki grafiğin karşılaştırılması

Aynı zamanda grafikte de görüldüğü gibi hızlanmanın sıfırdan başlaması içten yanmalı motorlardaki gibi rölantide çalışıp kavrama ihtiyacının olmadığını göstermektedir. Sonuç olarak elektrik motorunun kullanımıyla vites kutusu ve kavrama mekanizmalarına ihtiyaç duyulmayacaktır. Ancak bu tork ve hız eğrisinin elektrik motorunun yapısıyla ve taşıtın karakteristiğiyle uygun bir optimizasyon yapıldığında geçerlidir. Taşıtın azami hızıyla tekerlek çapından motorun yapacağı maksimum devri belirlenebilir. Tabi ki boşta azami devirde dönen elektrik motorunun üreteceği tork ise o hızda ilerlemekte olan taşıtın hava direnci, yuvarlanma direncinin tekerlek tahrik torkuna eşleştirilerek hesaplanması gerekmektedir.

Burada bir başka durumda ortaya çıkan durumda taşıtın ağırlığına ve içerisinde bulunacak azami yolcuya göre kalkış ivmesinin belirlenmektedir. Böylece tekerlek tahrik torkunun ihtiyacı belirlenerek bir grafik oluşturulup bu grafik karakteristiğine en uygun kutup sayısı ve bobin sayısı belirlenmesi mümkündür. FDAM olarak çalışan elektrik motorunda kutup sayısının artmasıyla tork artmakta devir sayısı ise azalmaktadır. Bobinler için ise bobinlerin sarımlarından dolayı elektrik akımı kesildiğinde elektro manyetizması bir süre daha gecikmeyle devam etmektedir bu olay endüktans değeri olarak adlandırılmaktadır. Bundan dolayı yüksek hızlara

çıkılmasında sıkıntılar oluşabilmektedir. Çünkü tetiklemesi bitmiş bir bobinde elektromanyetizma halen azalarak devam etmektedir. Hız arttıkça bobinlerde elektromanyetizmanın oluşması, devam etmesi ve azalarak bitmesi için gerekli zaman giderek azalmaktadır. Bunları kesici olarak elektromanyetizmanın daha hızlı olarak boşalmasını sağlamak amacıyla yüksek hız gereksinimi olan motorlarda kesici devreler kullanılmaktadır.

3.4.1. FDAM'ların özellikleri ve çalışma prensipleri

Fırçasız Doğru Akım (DC) motorları günümüzde, özellikle otomotiv sektörü, uzay teknolojileri, bilgisayar teknolojileri, tıp elektroniği, askeri alanlar, robotik uygulamaları ve ev ürünlerinde sıkça kullanılmaktadır. Bu motorlar, yüksek moment/akım ve yüksek moment/eylemsizlik oranına sahiptir. Ayrıca Fırçasız DC motorların, sağlam yapı, yüksek verim ve yüksek güvenilirlik gibi üstünlükleri vardır. Bu özelliklerinin yanında, Fırçasız DC motorların avantaj ve dezavantajlarını aşağıdaki gibi sıralanabilir; (Toliat ve Gopalarathnam, 2002);(Lee ve Ehsani, 2003).

Fırçasız DC motorların avantajları:

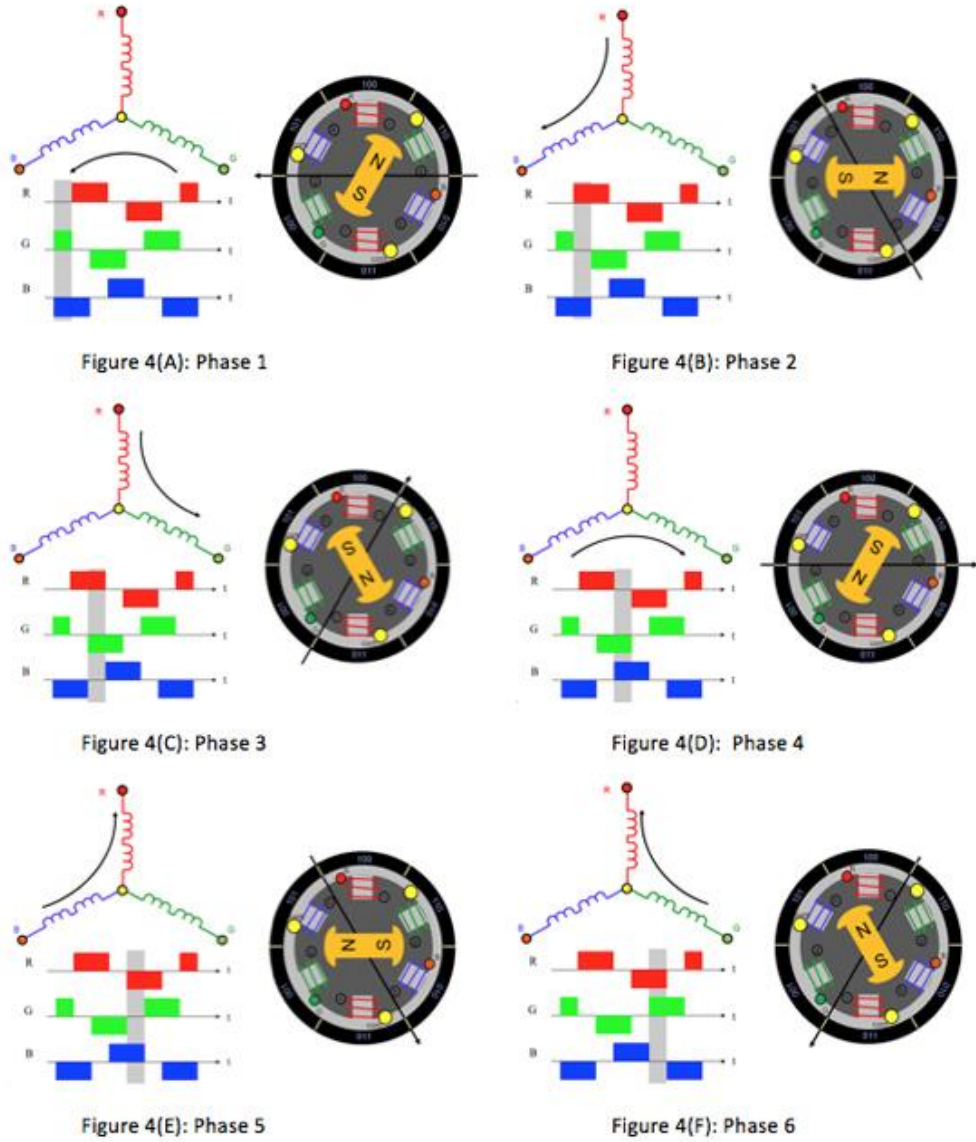
- Hız kontrol olanağına sahiptir,
- Verimleri çok yüksektir,
- Fırçasız yapıları sebebi ile ark oluşturmamakta ve fırçadan çıkan karbon tozlarını içermemektedir,
- Küçük boyutta yüksek moment üretebilirler,
- Uyarma akımına ihtiyaç duymazlar,
- Güvenilir çalışma ortamı sağlarlar,
- Soğutulması kolaydır,
- Yüksek hızlarda çalışma imkanı verirler,
- Sessiz çalışma sağlarlar.

Fırçasız DC motorların dezavantajları:

- Kontrol devresi karmaşıktır,

- Pozisyon sensörlerine ihtiyaç duyarlar,
- Maliyetleri yüksektir.

Şekil 3.8.'de görülen faz 1 olarak görülen resimde yeşilden maviye doğru bir elektrik akımı geçmektedir. Dolayısıyla 60 derecelik saat yönünde bir dönüş yaparak tetiklenmektedir. Her faz için tetiklemeler gösterilmiştir tam bir dönüş 6 tetikleme ile tamamlanmaktadır (Pushek, 2013).

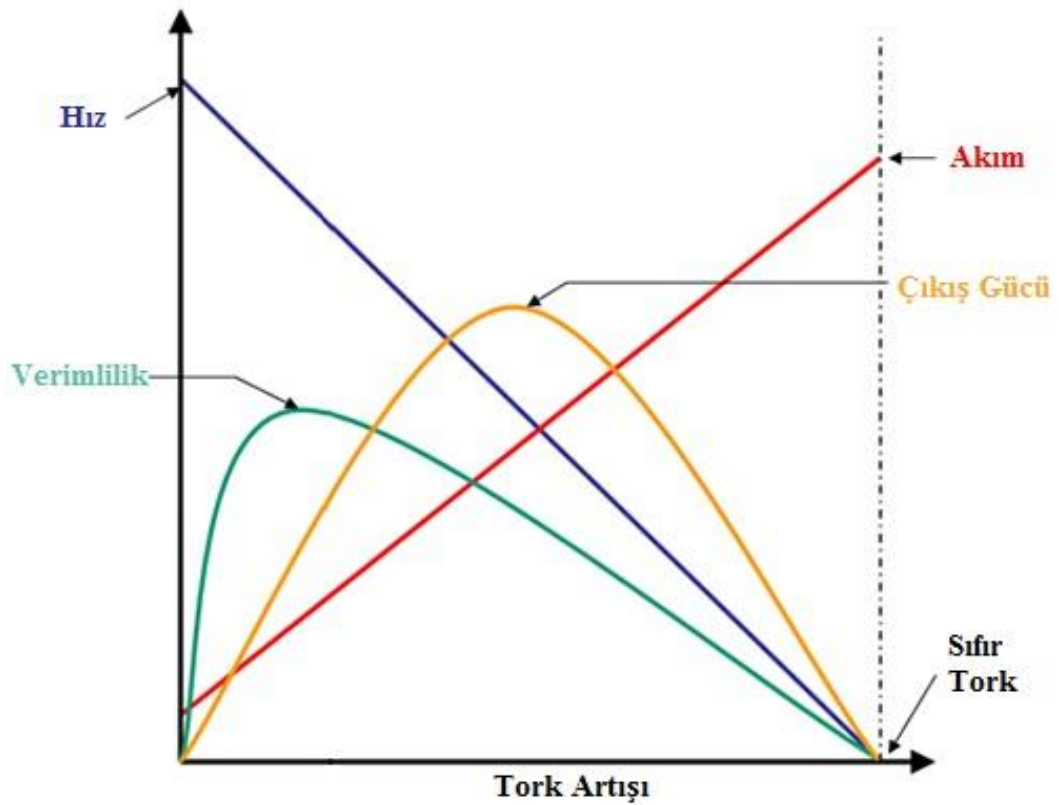


Şekil 3.8. 3 faz 2 kutuplu yıldız bağlantılı FDAM'nun fazlarının tetiklenmesi
(Pushek, 2013)

3.4.2. FDAM'ların karakteristikleri

FDAM tipi bir elektrik motoruna akım verilerek sıfır torkda başlayıp zorlanmalar nedeniyle dönememesinden dolayı tork üretmiyor kabul edilerek sıfır torkuna kadar incelenmiş hız, verimlilik, çıkış gücü ve verilen akım bakımından incelenmiştir. (Jhonsonelectric, 2013).

FDAM'nın çalışma esnasında torkun ilk sıfır kabul edildiği maksimum hız durumunda aslında teorik olarak bu kısımda tork sıfır değildir. Çok az da olsa rulmanların sürtünmeleri bulunmaktadır. Fakat hesap edilmeyecek kadar küçük kabul edilip karakteristik eğride belirtilmemiştir. Yani elektrik motoru boşa dönmektedir ve dönemeyecek hale gelene kadar yüklenerek şekil 3.9.'da görülmekte olan karakteristiğini ortaya koymaktadır (Jhonsonelectric, 2013).

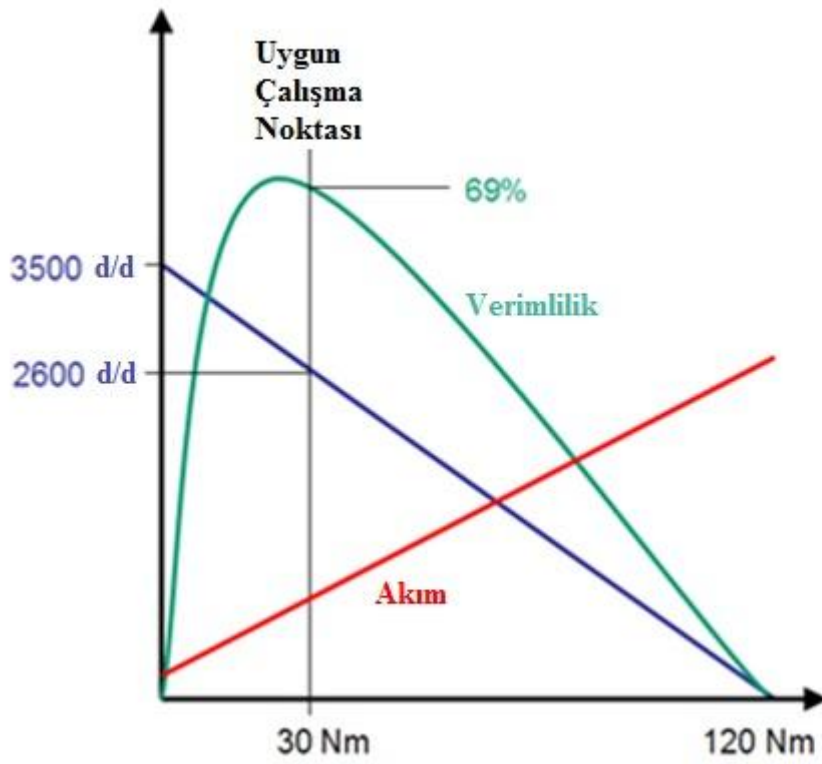


Şekil 3.9. FDAM'un tork artışına bağlı karakteristik eğrileri (Jhonsonelectric, 2013)

Böylece boşa dönen bir motor yüklenirken ürettiği doğrusal bir artış gösterirken hız ise doğrusal olarak azalma göstermiştir. Yüklenmenin başlamasıyla verimlilik hızlı

bir artış göstermiş daha sonra ise azalma göstereceği bir eğim çizmektedir. Çıkış gücü ise yüklenmeyle verimden daha yavaş bir artış gösterip daha hızlı bir eğimle azalmaktadır. Çekilen akımın sıfırdan başlamayarak belirli bir seviyeden başlıyor olması boşta dönen motorun çektiği akımı göstermektedir. Doğrusal olarak yüklenmesiyle çekilen akım doğrusal orantıda artış göstermektedir.

Şekil 3.10.'da işaretlenmiş olan noktada 2600 devir/dakika da çalışan bir motorun 30Nm tork ürettiği ve çektiği akıma nazaran %69 verimlilikle çalışmakta olduğu görülmektedir (Jhonsonelectric, 2013).



Şekil 3.10. FDAM'un bir noktadaki değerlerinin grafik üzerinde gösterimi (Jhonsonelectric, 2013)

3.4.3. FDAM'ların yapısı

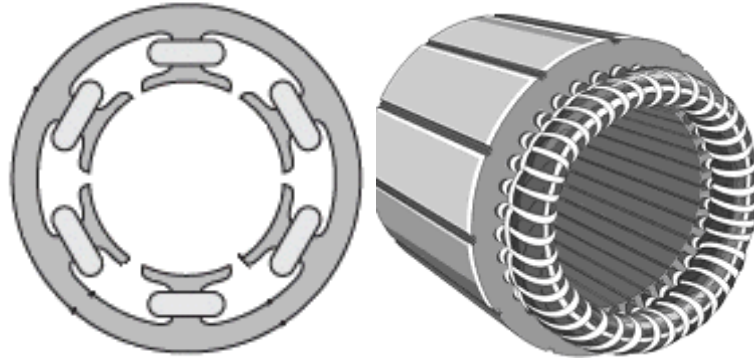
Faz sargılarının sarıldığı motorun duran kısmıdır. Stator, demir kayıplarını azaltmak için silisli saçlardan yapılmıştır. Kutup sargılarının sarılı olduğu stator iki tiptedir.

- Çıkık kutuplu stator yapısı (konvansiyonel DC motorlarda olduğu gibi)

- Oluklu stator yapısı (Asenkron motorlarda olduğu gibi)

Çıkık kutuplu statora toplu sargılar sarılırken oluklu stator yapısına dağıtılmış sarım uygulanır.

Toplu sargıların işçiliği kolaydır. Bu tip statorlarda döner alanın oluşması için en az üç çıkık kutba ihtiyaç duyulmaktadır. Çoğunlukla üç bobin grubu (Faz) vardır ve bobinler çıkık kutuplar üzerinde sarılı olup karşılıklı çıkık kutuplara sarılı her bobin grubu seri bağlanmaktadır. Dağıtılmış sargıda ise yine üç bobin grubu (Faz) vardır ve sargılar asenkron motorlarda olduğu gibi stator oluklarına 120 şer derecelik elektriki açı ile yerleştirilmektedir. İster dağıtılmış ister toplu olsun bobin grupları yıldız veya üçgen bağlanarak motor dışarısına 3 faz ucu olarak çıkarılır. Şekil 3.11.'de toplu ve dağıtık sarımlar görülmektedir (Bal, 2006).



Şekil 3.11. Statorun toplu sarımı ve dağıtık sarımı (MEGEP, 2009)

Rotor tamamen sabit mıknatıstan yapılmamaktadır. Çünkü sabit mıknatısın manyetik alan geçirgenliği havaya yakındır yani manyetik alan geçirgenliği açısından demire (saca) göre oldukça düşüktür. Tamamen sabit mıknatıstan oluşacak bir rotor, stator sargı endüktans değerinin düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle stator manyetik alanını kuvvetlendirmek için rotor sabit mıknatıs ve silisli saçların çeşitli yapılarda beraber kullanılmasından oluşmaktadır. Sabit mıknatıs olarak samaryum-kobalt veya neodyum-demir elementleri kullanılmaktadır. İçe gömülü mıknatıs rotorların momenti yüzey yerleştirmeli mıknatıs rotorlara oranla daha az titreşimli olmaktadır. Şekil 3.12.'de FDAM'larında kullanılan rotor tipleri görülmektedir. Bunlar sabit

mıknatısların gömülü olup olmadığına ve ne şekilde gömülü olduğuna ve ne çeşit mıknatıs kullanıldığına bağlıdır (Bal, 2006).



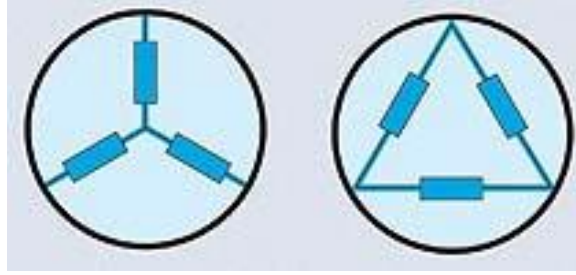
Şekil 3.12. FDAM'lar için kullanılan rotorlar (MEGEP, 2009)

İki veya daha çok kutuplu FDAM rotoru olabilmektedir. En çok kullanılan tipleri iki, dört ve altı kutuplu olanlarıdır. Kutup sayısı arttıkça motorun karakteristik olarak torku artmakta ve azaldıkça maksimum hız kabiliyeti artmaktadır. Hobi amaçlı uçaklarda yüksek devir ihtiyacından dolayı iki kutuplu rotorlar kullanılmaktadır. Rotordaki kutup sayısına göre statordaki bobin sayısı belirlenir ve bu bobinlerin akı değerleri güç ihtiyacına göre belirlenmektedir (Yedamale, 2013).

Fırçasız DC motorun yapısı, AC senkron motoruna benzemektedir. Rotor tarafından sağlanan manyetik alan ile stator tarafından sağlanan manyetik alan aynı frekansta dönmektedir. Harddisk, CD sürücüler gibi elektronik aygıtlarda kullanılan FDC motorlar, üç fazlıdır. Yani statoru 3 ayrı sargıdan oluşmaktadır. Mikroişlemci soğutma fanlarında kullanılan motorlar ise 2 fazlıdır. Stator sargıları çok fazlı AC motorlarda olduğu gibi sarılır. AC motorlarından farkı, sargıları sürmek için rotor konumlarının algılanması gerekmektedir. Bu da optik sensör ya da Hall sensörü adı verilen alan etkili sensörlerle sağlanmaktadır (Yedamale, 2013).

Statora sargılar iki şekilde sarılmaktadır. Üçgen (delta) ve yıldız (Y). Üçgen sarım, üç ayrı sargıyı bir üçgen oluşturacak şekilde birbirine bağlamaktır. Gerilim her bir birleşim noktasına verilmektedir. Yıldız bağlantısı, her üç sargıyı tek bir merkeze bağlar ve gerilim sargıların açıkta kalan uçlarına verilmektedir. FDC motorlar, birinci sargıya pozitif, ikinci sargıya negatif (GND) enerji verilerek

alıştırılmaktadır. Üçüncü sargı bu esnada boşta yani enerjisizdir. şekil 3.13.'de faz uçlarının yıldız ve üçgen bağlantıları görölmektedir (MEGEP, 2009).



şekil 3.13. Yıldız ve üçgen sarım (MEGEP, 2009)

Y bağlantısında daima iki sargı seri olarak kullanıldığından manyetik alan daha şiddetlidir. Bu da daha fazla tork, daha düşük hız demektir. Buna karşın gerilim yüksek akım düşüktür. Delta bağlantısında ise tek bir sargı kullanıldığından düşük gerilimde yüksek akım elde edilir. Bu da beraberinde yüksek hız, düşük tork getirmektedir. Mikroişlemci fanı gibi iki fazlı motorlarda stator, dört kutuplu olduğu gibi bazı türlerde manyetik akının ölü noktalarını azaltmak için gölge (yardımcı) kutuplar kullanılmaktadır (MEGEP, 2009).

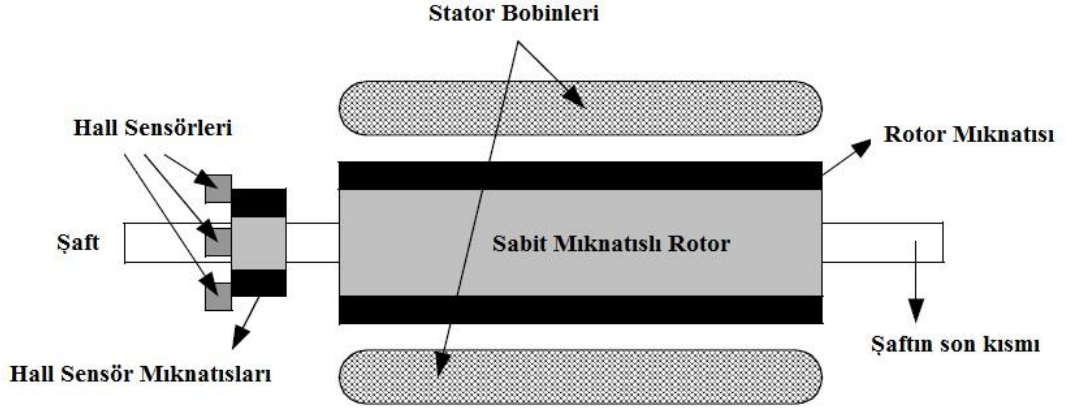
3.4.4. FDAM'ların kontrolü

FDAM'larda temel olarak iki tür kontrolü vardır. Bunlar; tetiklemelerin sensöre dayalı olarak yapılması ve tetiklemelerin zıt EMK'ya göre yapılmaktadır. Sensörler yani algılayıcılar, hall etkili algılayıcılar olabildiği gibi fotosensörlü algılayıcılar da kullanılabilmektedir. Rotorun üzerine encoder koyularak konumu devamlı olarak da bilinebilmektedir.

3.4.4.1. Sensörler ile FDAM'unun kontrolü

Hall effect sensörleri ise bipolar ve unipolar olarak ikiye ayrılmaktadır. Unipolar hall effect sensörlerin çalışması sadece S kutbunun algılanmasıyla anahtarlama yapmaktadır. Bipolar hall effect sensörleri ise S kutbunun algılanmasıyla anahtarı

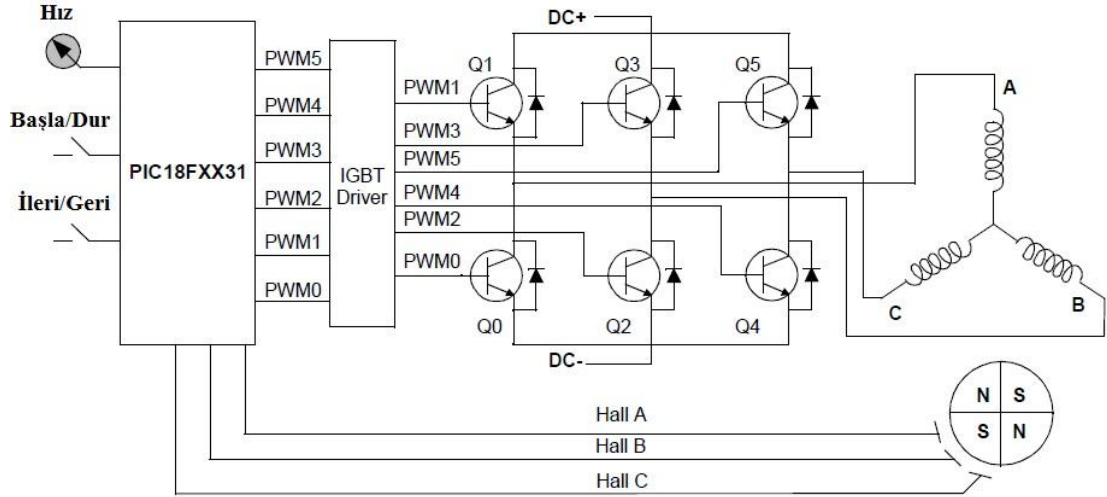
açmakta N kutbunun algılanmasıyla anahtarı kapatmaktadır. Şekil 3.14.'de FDAM'unun genel hatları açıklanmaktadır (Lepkowski, 2013).



Şekil 3.14. Hall sensörlerinin motor şeması üzerinde gösterimi (MEGEP, 2009)

Sensörlerden alınan bilgiler pıç tabanlı bir işlemciye giderek yorumlanıp tetikleme sinyalleri transistörlerden oluşan H köprülerindeki transistörleri tetikleyerek elektrik akımını motorun sargılarına yollamaktadır.

Şekil 3.15.'de görüldüğü gibi transistör yerine MOSFET sürücüler kullanılmıştır. Bunun sebebi MOSFET lerin daha yüksek gerilim ve akımlarda tetikleme gerçekleştirebilmesidir. MOSFET lerin bulunduğu kısma tetikleme devresi veya H köprüleri olarak adlandırılmaktadır. Q0, Q1, Q2, Q3, Q4, Q5 mosfetlerdir. PWM ler ise tetikleme yollarıdır (Lepkowski, 2013).



Şekil 3.15. FDAM'un şeması (Lepkowski, 2013)

Pic ile ise başlama durdurma için düğme konulabilmekte, ileri geri kontrolü yapılabilmekte ve hız için kontrol yapılabilmektedir. PWM 1 yolu Q1 mosfetini, numaraları eşleşen diğer PWM yolları diğer Q numaralı mosfetleri tetiklemektedir. Tetiklemeler dolayısıyla DC+ dan DC- ye bobinler üzerinden yol açılmaktadır. Böylece bobinlere elektrik gitmiş olur bunun zamanlamasını ise hall sensörlerinin konumlanması dolayısıyla hall sensörlerinden gelen sinyaller belirlemektedir. Çizelge 3.1.'de şekil 3.15.'deki FDAM'nun elektronik şemasının saat yönünde dönüş için sensörlerden alınan sinyallere bağlı tetiklenmesinin çizelgesi gösterilmektedir.

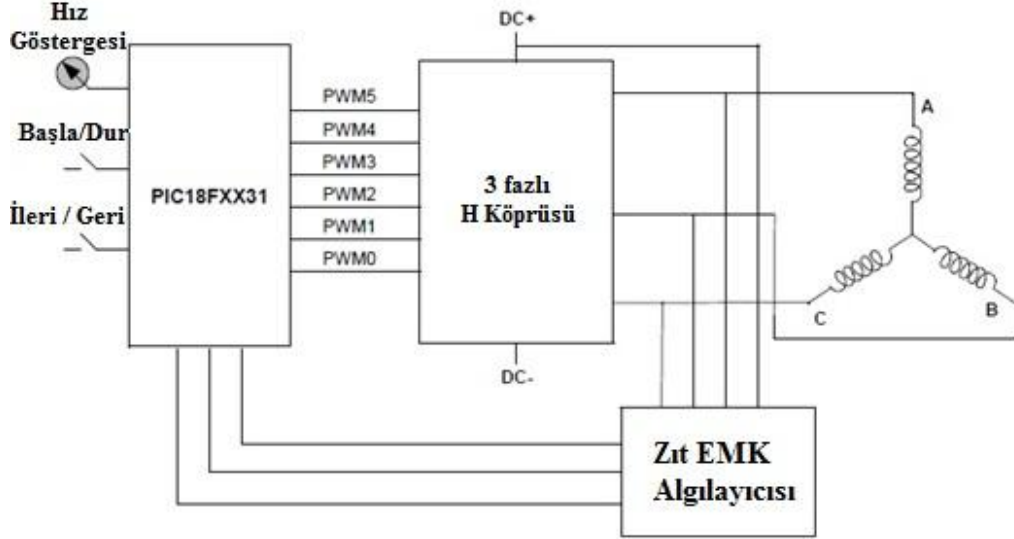
Çizelge 3.1. Saat yönünde dönüş için tetiklemeler (Lepkowski, 2013)

Sıra	Hall Sensör Sinyali			Aktif PWM yolları		Bobinlerdeki faz akımları		
	A	B	C			A	B	C
1	0	0	1	PWM1(Q1)	PWM4(Q4)	DC+	Off	DC-
2	0	0	0	PWM1(Q1)	PWM2(Q2)	DC+	DC-	Off
3	1	0	0	PWM5(Q5)	PWM2(Q2)	Off	DC-	DC+
4	1	1	0	PWM5(Q5)	PWM0(Q0)	DC-	Off	DC+
5	1	1	1	PWM3(Q3)	PWM0(Q0)	DC-	DC+	Off
6	0	1	1	PWM3(Q3)	PWM4(Q4)	Off	DC+	DC-

Hall sensörlerinden gelen bilgilere göre Pic tabanlı işlemci PWM yollarına sinyal göndermektedir. Dolayısıyla tetiklenen Q mosfetleri A, B ve C bobin sargıları üzerinden elektrik akımının geçmesini sağlamaktadır (Lepkowski, 2013).

3.4.4.2. Zıt EMK ile FDAM'un kontrolü

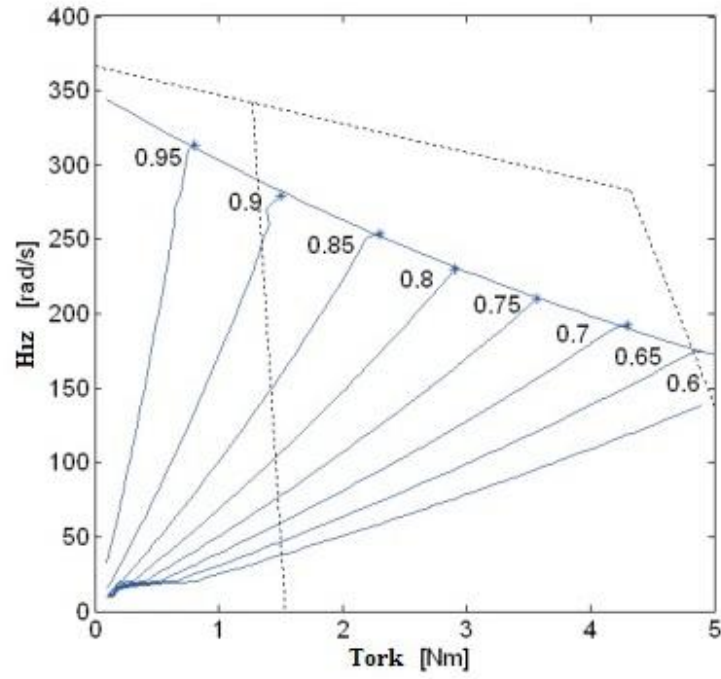
Zıt EMK rotordaki sabit mıknatısların dönerken bobinlerde elektrik üretimini sağlamaktadır. Her ne kadar akım çekilmediği için düşük miktarlarda da olsa bunlar algılanarak motorun bir sonraki konumu için tetiklemeler gerçekleştirilmektedir. Zıt EMK kuvveti algılanıp sinyallere dönüştürülerek pic tabanlı işlemciye sinyal olarak gönderilmektedir. Yalnız bu yöntemin olumsuz bir yönü ise ilk kalkışta dönmüyor olan motorda zıt EMK olmayacağından sinyalde olmayacağı için ilk olarak hangi PWM lere sinyal yollanacağı bilinmemektedir. Bu yüzden konum algılayıcılar kullanılmaktadır. Bir başka yöntem ise bulanık mantıkla yazılan pic lerdir ki bunlar konumu algılamak için çeşitli sinyaller yollamak suretiyle zıt EMK oluşana kadar çeşitli sinyaller yollamaktadırlar ve ilk kalkışta silkelenmelere yol açmaktadırlar. Şekil 3.16.'da zıt EMK ile tetiklenen bir FDAM'nun şeması görülmektedir. (Microchip, 2013).



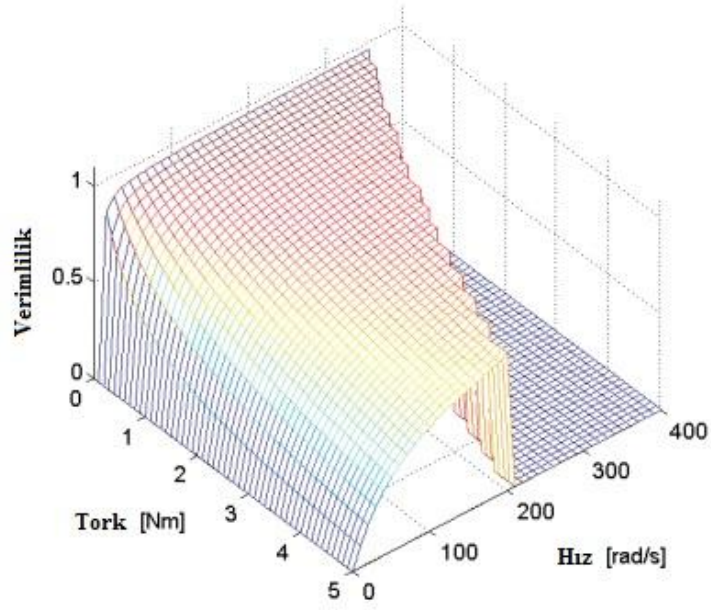
Şekil 3.16. Zıt EMK ile tetikleme şeması (Microchip, 2013)

3.4.5. Yüksek torklu, direk tahrikli FDAM'unun karakteristiği

Bilindiği üzere FDAM elektrik motorları günümüzde elektrikli bisikletlerde de direk tahrikli olarak kullanılmaktadır. Direk tahrikli motorlar yüksek torklu olmak zorundadırlar. Böylece tasarımsal olarak statordaki ve rotordaki kutup sayıları fazla olmaktadır. Yüksek sayıdaki kutup sayıları olan FDAM'ların karakteristiği şekil 3.17.'de üç boyutlu karakteristiği ise şekil 3.18.'de görülmektedir (Starschich ve Muetze, 2013).



Şekil 3.17. Yüksek torklu FDAM'un tork-hız karakteristiği (Starschich ve Muetze, 2013)



Şekil 3.18. Yüksek torklu FDAM'un üç boyutlu tork-hız-verimlilik karakteristiği (Starschich ve Muetze, 2013)

Yüksek torklu FDAM'unu düşük torklu FDAM'unun etiket değerlerinin karşılaştırılması çizelge 3.2.'de görülmektedir (Starschich ve Muetze, 2013).

Çizelge 3.2. Yüksek hız ve yüksek tork motorunun karşılaştırılması (Starschich ve Muetze, 2013).

	Birimler	Yüksek Hız Motoru	Yüksek Tork Motoru
Azami tork	[Nm]	2.3	7.6
Anma torku	[Nm]	0.42	1.33
Anma Hızı	[rpm]	7400	3300
Anma Gücü	[W]	328	459
Zıt EMK sabiti	[V/rad/s]	0.0148	0.0325
Stator Direnci	[Ω]	0.0345	0.0345
Stator Endüktansı	[mH]	0.0645	0.1
Giriş Voltajı	[V]	24	24
Anma Akımı	[A]	16.4	23
Sürtünme Torku	[Nm]	$7.5 \cdot 10^{-4}$	$7.5 \cdot 10^{-4}$
Rotor Ataleti	[Nm/s ²]	$42.3 \cdot 10^{-6}$	$12.7 \cdot 10^{-6}$
Kutup Sayısı		8	8

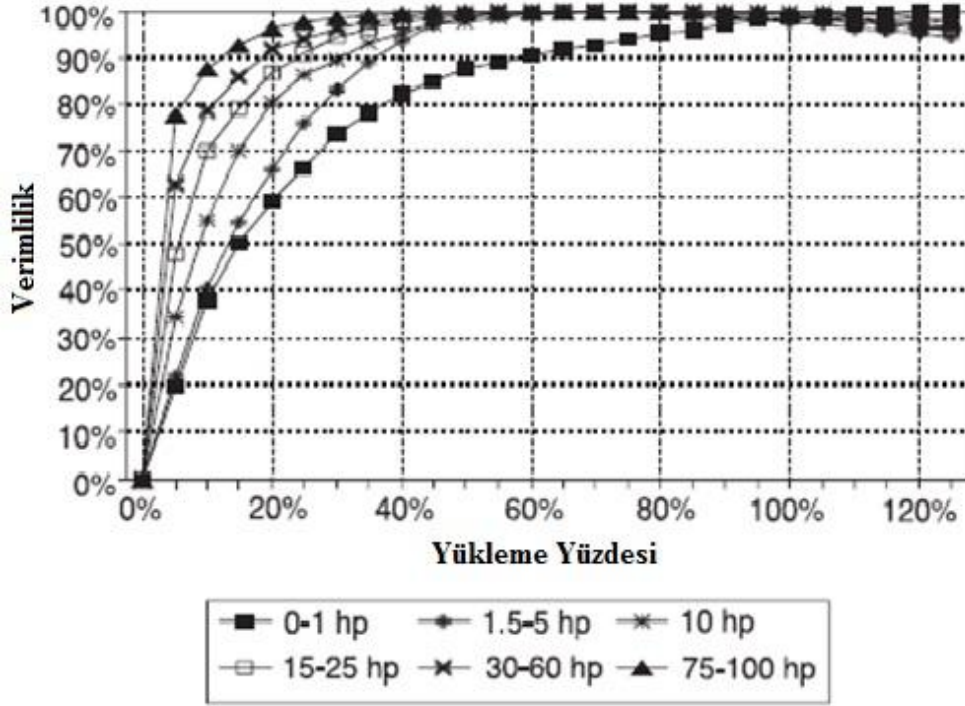
3.4.6. FDAM elektrik motorlarının büyüklüklerinin verime etkisi

FDAM ne kadar büyük üretilirlerse verimleri açısından iyileştirme sağlanmış olmaktadır. Çizelge 3.3.'de FDAM'nın boyutlarına ve yüklemelerine göre verimleri gösterilmektedir (Starschich ve Muetze, 2013).

Çizelge 3.3. Yaklaşık olarak motor verimleri (Starschich ve Muetze, 2013)

Beygir Gücü	½ yükleme	Tam yükleme
½	%60	%69
1	%75	%76
5	%80	%82
15	%84	%88
100	%89	%91
250	%91	%93

Farklı güçlerdeki elektrik motorlarının yük altındaki verim karakteristikleri şekil 3.17.'de görülmektedir. Böylece elektrik motorunun boyutu küçüldükçe yüksek hızlardaki verimi de düşük olmaktadır. Elektrik motorları büyüdükçe yüksek hızlarda düşük torkta çalışmalarının veriminin arttığı sonucu çıkarılmaktadır (U.S. Energy Inf., 2013).



Şekil 3.19. Yük altında elektrik motoru boyutlarına göre verim düşüşleri (U.S. Energy Inf., 2013).

3.5. Motor Tasarımında Verimliliğe Etki Eden Faktörler

Diğer motorlarda da olduğu gibi FDAM'larında da hava aralığı manyetizma ve diğer faktörlerin etkileri bulunmaktadır. Bunlar alt başlık altında incelenebilir.

3.5.1. Histerize (artık manyetizma) kayıpları

Tasarımı yapılacak motorun tipi bu kayıplar açısından etken olacağı için motor tipine göre manyetik nüve ve malzeme seçimi yapılmalıdır. Histerize kayıpları motor tipi ve uygulamasına uygun olarak minimal olabilecek malzeme seçilmelidir.

Ferromanyetik malzeme, laminasyon saçı histerize kayıpları açısından değerlendirilmelidir (Bodur, 2013).

3.5.2. Eddy akımı kayıpları

Kullanılacak laminasyon sacının kalınlığı Eddy akımlarından kaynaklanacak kayıpların azaltması bakımından önemlidir. Bu çalışmada gerçekleştirilecek sistemde önemle göz önüne alınmalıdır. Eddy akımlarının azaltılması için kullanılacak laminasyon sacının silikonlu tiplerden seçimi yapılabilmektedir. Eddy kayıpları toplam kaybın %20'sine erişebilir, silikonlu iletkenliği azaltılmış laminasyon saçları ile bu kayıpların %10-25 kadar azaltılabileceği ifade edilmektedir. Laminasyon sacının kalınlığını azaltmak %10-25 arasında bundan kaynaklanan nüve kayıplarını azaltabilmektedir (Bodur, 2013).

3.5.3. Akı yoğunluğunun azaltılması

Diğer bir teknik olarak manyetik nüvenin boyutunu dönme eksenini boyunca arttırıp akı yoğunluğunu belirli oranda azaltarak nüve kayıpları azaltılabilmektedir. Kullanılan laminasyon saçlarının izolasyon kaplamaları, kaplama kalınlığı tasarımı kayıpları azaltma açısından göz önüne alınmalıdır (Bodur, 2013).

3.5.4. Bölgesel manyetik saturasyon

Manyetik malzemedeki kayıplardan başka motor manyetik devresinde motorun değişik çalışma rejimlerinde, değişik yük durumlarında bölgesel manyetik saturasyonlar oluşabilmektedir. Tasarımda manyetik motor nüvesinin geometrisi çalışma rejimi içinde bölgesel saturasyonlara girmeyecek şekilde olukların pabuçların ve girintili çıkıntılı bölgelerin geometrik biçim tasarımının yapılması gerekmektedir. Bu şekilde bölgesel saturasyondan oluşacak kayıplardan sakınılmış olunur. Bölgesel saturasyonların tespiti için sonlu elemanlar tekniği kullanan bir manyetik nüve analiz yazılımı kullanılmalıdır (Bodur, 2013).

3.5.5. Manyetik malzeme seçimi

Tasarımı yapılacak motor tipine göre manyetik malzeme seçilmelidir. Saç laminasyon malzemeleri ve sabit mıknatıs malzemelerden Neodmium - Boron, Samarium - Cobalt gibi yüksek permeabiliteye sahip malzemelerin motor manyetik nüve yapısı içinde bölgesel veya tam olarak uygulanması yüksek verimli motor tasarımında sıkça kullanılmaktadır (Bodur, 2013).

3.5.6. İletken tasarımı, iletkenlerin direnci

Yüksek verimli motor tasarımında iletken direncinden oluşacak kayıplar minimize edilecek şekilde sargı ve iletken tasarımı yapılmalıdır. Bu tip motorlarda iletkenlik katsayısı yüksek olduğu için bakırdan başka iletken göz önüne alınmamalıdır (Bodur, 2013).

3.5.7. İletkenler arası hava aralıkları

İletkenler arası ve iletkenler ile manyetik nüve arası hava boşlukları minimal olacak (boşluk bulunmayacak) şekilde motor manyetik nüve geometrisi tasarlanmalıdır (Bodur, 2013).

3.5.8. İletken direncinden dolayı oluşan ısının atılması

Gerek stator gerekse rotorda iletken direnci yüzünden oluşan ısının, ısı transferi yolu ile atılması gereklidir. Aksi halde bu ısı, motor iletkenlerinde sıcaklık artışı oluşturmaktadır. Bu ısı kaynağı, motor dış ortamı ve motorun iç yapısının üretilen ısının iletimi için yarattığı ısı iletim dirençlerinin dinamiği ile termal dengeye ulaşmaya kadar motorun parçalarında, elektriksel iletkenlerde sıcaklık yükselmesi olacaktır. Termal dengede motor iletkenlerindeki sıcaklık sabit değerde kalacaktır ancak bu sıcaklık değeri ne kadar yüksek ise bakır (alüminyum) iletkenlerin elektriksel direnci de benzer oranla artmış olacaktır. Elektrik motorlarının çalışma rejimine göre, sargı iletken direnci 20 C'daki değerinin iki katından yukarı değerlere bile erişebilmektedir. Bu da verimsizlik artışı ve güç kaybı artışı getirmektedir (Bodur, 2013).

Tasarımcının iletkenlerin ısınmasına karşı motor tasarımında iletkenlerin ve motorun soğutulmasını sağlayacak ısı iletimini ve ısının dış ortama transfer edilmesini sağlayacak ve düşük sıcaklıklarda termal dengeye erişilecek motor içi ve dışı ısı iletimi tasarımını yapması gereklidir. Diğer bir konu da, sabit mıknatıs kullanan motorlarda bu şekilde sıcaklık yükselmesi ile mıknatısların Curie sıcaklığına erişip erişmeyeceği göz önüne alınmalıdır (Bodur, 2013).

3.5.9. Manyetik devre hava aralığı

Motorlarda yüksek verim için stator ve rotor manyetik devreleri arası hava aralığının minimal olacak şekilde tasarımı yapılması gereklidir. Hava aralığı minimal olacak şekilde geometrik tasarım yapıldığında, sıcaklık artışı göz önüne alınmalıdır. Metallerde sıcaklık artışından oluşan stator ve rotor genişmesi nedeni ile hava aralığı değişebilir. Bunun motor performansına etkisi hesaplanmalıdır. Ayrıca mekanik sürtme problemleri de göz önüne alınmalı ve tasarım ile önlem alınmalıdır. Elektrik motorlarında bilhassa asenkron motorlarda rotor statorun içinde ise rotorun daha elverişsiz ısı iletim şartlarından dolayı statordan daha fazla ısınacağı ve rotor genişmesinin statordan daha fazla olacağı göz önüne alınmalıdır (Bodur, 2013).

3.5.10. Diğer faktörler

Tasarımcının motorun tasarımında ve üretiminde motor çalışması sırasında oluşabilecek titreşimleri en aza indirecek unsurları göz önüne alması gerekmektedir. Titreşim ve ses motora gelen elektrik enerjisinin istenmeyen mekanik kuvvetler halinde kayba, ısıya dönüşmesinden ibarettir. Titreşimsiz ve sessiz çalışan motorlarda bu kayıplar yoktur. Motorun dönen parçalarında dinamik balans ile titreşim azaltılmasını sağlayacak şekilde üst mekanik yetkinlikte tasarım yapılmalıdır. Motorda mekanik, elektrik ve elektromanyetik ses ve titreşimler oluşmaması yada minimal düzeyde olması sağlanmalıdır (Bodur, 2013).

4.TAŞIT İHTİYACINA GÖRE ELEKTROMEKANİK DİFERANSİYELİN TASARIM HESAPLARI

Çıkış büyüklükleri temel alınarak, güç, hız, kutup sayısı, soğutma tipi ve rotor çapı hesaplanır daha sonra belirlenen bir akım yükleme ve hava aralığı akı yoğunluğu değerleri temel alınarak paket boyu belirlenir. Bu aşamada alınan akım yoğunluğu ve oluk magnetomotor kuvvetlerine bağlı olarak manyetik devrenin değişik bölgelerindeki akı yoğunlukları sabitlenerek, olukların boyutlandırılması, nüve yüksekliği ve stator dış çapı hesaplanır. Dış çap belirlendikten sonra paket boyu, oluktaki akım yoğunluğu değeri seçilmiş olan değerine uygun olacak şekilde tekrar belirlenmektedir. Stator ve rotor nüvesinin boyutlandırılması çok değişik kriterler göz önüne alınarak yapılabilmektedir. Verimin alınan ilk değeri tasarım için sadece bir başlangıç noktasıdır. En iyi performans elde edilene kadar iterasyonla verim değeri iyileştirilmektedir. Güç katsayısı, güç değeri ile atarken, kutup sayısı değeri arttıkça düşmektedir (Kaygısız, 2008).

Bu çalışmada taşıtlara göre elektromekanik diferansiyelin optimizasyonunun yapılabilmesi için öngörülen koşullar alt başlıklar olarak verilmiştir. İlk olarak 3.4 no’lu başlıkta verilen “Elektromekanik diferansiyel için elektrik motoru seçimi” konusunda verilen grafikte taşıtın içten yanmalı motordan gelen gücü vites kutusuyla beraber istenilen tork eğrisini FDAM elektrik motorlarının karakteristik tork eğrisiyle ilişkisi göz önünde bulundurarak, taşıtın ilk hareketi esnasında içten yanmalı motor ile elde edilen minimum tekerlek tahrik gücü, FDAM’un azami tork olarak kabul edilebilmektedir.

4.1. Taşıtın Güç İhtiyacı

Taşıtın güç ihtiyacının belirlenmesinde etki eden faktörler ulaşmak istenen azami hızı, bu hızdaki aerodinamik direnci, ağırlığının oluşturacağı yuvarlanma direnci, yokuş direnci ve atalet kuvvetleridir.

4.1.1. Azami hızda aerodinamik direnç

Taşıtın hareketi sırasında hava hareketine bağlı olarak gelişen aerodinamik kuvvetler, taşıtın performansını etkilemektedir. Hava akışı taşıtın hızına ve ortamın rüzgar hızına bağlıdır. Taşıtın hızı, sayısal değer ve yön bakımından sürekli olarak değişmektedir. Rüzgarın hızı ise bölgesel topografya ve atmosferik koşullara bağlı olarak değişmektedir. Tüm taşıt yüzeyine dağılmış olan basınçların bileşkesi olan aerodinamik kuvvet, “basınç merkezi” adı verilen bir noktaya etki etmekte, taşıtın kullanım ve yönlendirme karakteristiklerini olumlu veya olumsuz biçimde etkileyen koşullar oluşturmaktadır. Aerodinamik kuvvet, taşıt kararlılığı bakımından dikkate alınması gereken önemli bir kuvvettir. Taşıta etkiyen aerodinamik direnç esas olarak şu üç elemandan oluşmaktadır (Çetinkaya, 2010):

- Taşıtın, arka kısmında boşalttığı bölgede meydana gelen türbülansın oluşturduğu direnç. Bu direnç, özellikle arka kısım olmak üzere, taşıt gövdesinin biçimine bağlıdır. Aerodinamik direncin en önemli bileşeni budur ve toplam aerodinamik direncin, %80 i kadardır.
- Taşıtın dış yüzeylerinden akan havanın neden olduğu yüzey sürtünmesi. Normal durumdaki bir otomobilde bu bileşen, toplam aerodinamik direncin yaklaşık %10 u kadardır.
- Soğutma ve havalandırma amacıyla, taşıtın radyatör sisteminden veya iç kısımlarından geçen havaya bağlı olarak oluşan iç direnç. Bu bileşen akış kanallarının tasarımına bağlı olarak değişmekle birlikte, toplam direncin %10u kadardır.

Hesaplamaları basitleştirmek amacıyla bu kuvvetlerin tümü tek bir kuvvete indirgenir ve aerodinamik direnç olarak adlandırılır. Toplam aerodinamik kuvvetin taşıtın hareketi doğrultusundaki bileşeni olan aerodinamik direnç eşitlik 4.1 ile hesaplanmaktadır (Çetinkaya, 2010).

$$R_{ax} = 0,0386 \cdot \rho_a \cdot C_x \cdot A \cdot (V \pm V_o)^2 \quad (4.1)$$

Burada;

R_{ax} : Taşıtın aerodinamik direnci (N)

- ρ_a : Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
 C_x : Taşıtın aerodinamik direnç katsayısı
 A : Taşıtın ön yüz alanı (m^2)
 V : Taşıtın hızı (km/h)
 V_o : Rüzgar hızı (km/h)

4.1.2. Tekerlerin yuvarlanma direnci

Yuvarlanma direnci taşıtın ağırlığından dolayı tekerlerin dönmeye karşı olan direnci olarak tanımlanmaktadır. Zemin, lastiğin çapı, lastiğin basıncı, lastiğin çeşidi gibi birçok parametreler yuvarlanma direncinin büyüklüğünü etkileyerek yuvarlanma kuvvetine etki etmektedir. Yuvarlanma katsayısının taşıt ağırlığıyla çarpılması yuvarlanma direnç kuvvetini vermektedir. Eşitlik 4.2 deki gibi hesaplanabilmektedir. Yuvarlanma direnç katsayısını 0.015 alınacaktır bu asfaltta ortalama bir tekerleğin direnç katsayısıdır (Çetinkaya, 2010).

$$R_{ro}=G.f_{ro} \quad (4.2)$$

Burada;

- R_{ro} : Taşıtın yuvarlanma direnci (N)
 G : Taşıtın toplam yükü (N)
 f_{ro} : Lastiklerin yuvarlanma direnci katsayısı

4.1.3. Yokuş direnci

Taşıtın yokuş yukarı çıkarken yokuş eğimini yokuş direnci olarak kabul edilmektedir. Taşıtın ağırlığından dolayı eğimle geri tepkili bir kuvvet oluşacağından eşitlik 4.3 ile ve buradan F_t (tekerlek tahrik kuvveti) eşitlik 4.4 ile hesaplanabilmektedir (Çetinkaya, 2010).

$$\tan x^0 = st \quad (4.3)$$

$$st = \frac{F_t - R_{ro} - R_{ax}}{G} \quad (4.4)$$

Burada;

- x: Eğimin açısı (Derece)
st: Eğim açısının tanjantı
F_t: Tekerlek tahrik kuvveti (N)
R_{ro}: Yuvarlanma direnci (N)
R_{ax}: Aerodinamik direnç (N)

4.1.4. Toplam dirençler ve minimum güç

Tekerlek tahrik kuvvetinden, tekerlek momentine dolayısıyla elektrik motorunun momentini hesaplanabilir. Tekerlek tahrik torku eşitlik 4.5 ile hesaplanabilmektedir (Çetinkaya, 2010).

$$F_{tr} = \frac{M_t \cdot i_o}{r_w} \cdot \eta_{tr} \quad (4.5)$$

Burada;

- M_t: Tekerlek tahrik torku (Nm)
i_o: Güç aktarma oranı
r_w: Tekerleğin yarıçapı (m)
η_{tr}: Güç aktarma verimi

Transmisyon olmadığından transmisyon verimini gücü bulmak için kullanılan 4.6 numaralı eşitliğe alınmamaktadır. Motor torku ve devir bilgisi kullanılarak motor gücü eşitlik 4.6 ile hesaplanabilmektedir (Çetinkaya, 2010).

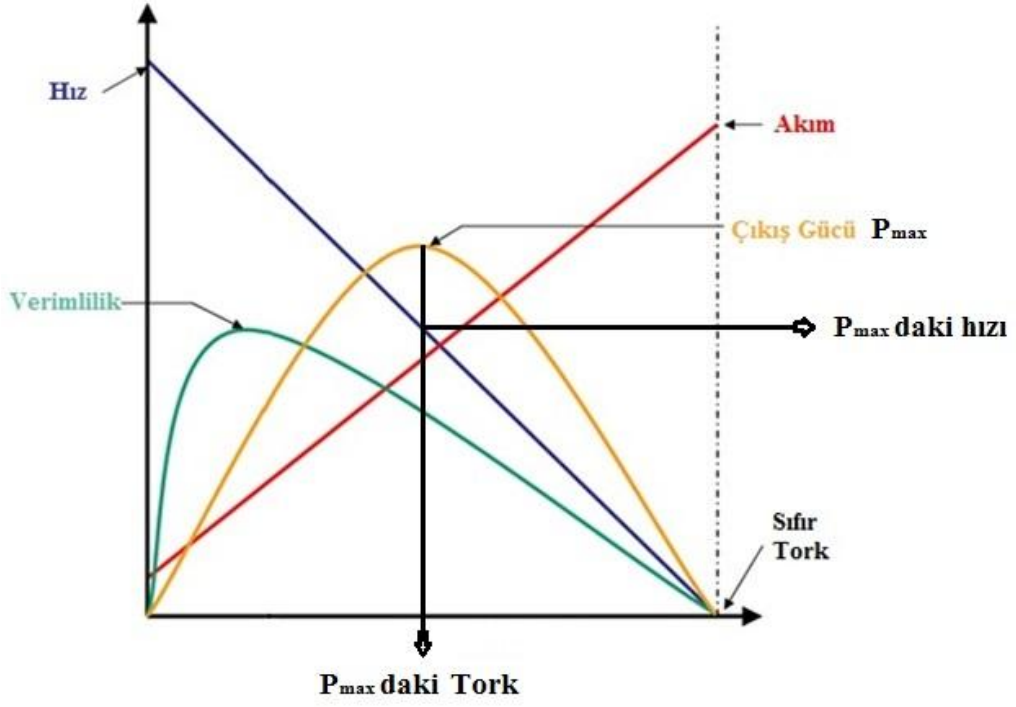
$$P = \frac{M \cdot n}{9549} \quad (4.6)$$

Burada;

- P: Güç (kW)
M: Tork (Nm)
n : Devir hızı (devir/dakika)

4.2. Taşıtın Güç İhtiyacına Göre FDAM'unun Boyutlandırılması

Toplam güç; ağırlık, istenilen azami hız, bu hızdaki aerodinamik direnç ve yokuş tırmanma performansına göre belirlenmiş bir taşıt için şekil 3.8.'deki grafik göz önünde bulundurulursa;



Şekil 4.1. FDAM'un karakteristiği üzerinde taşıt ihtiyacının değerleri
(Jhonsonelectric, 2013)

Şekil 4.1'deki P_{max} maksimum gücü göstermektedir. Maksimum güç maksimum hızın yaklaşık olarak yarısına tekabül etmektedir. Dolayısıyla taşıtın hesaplanan maksimum güç ihtiyacında seçilen motor için 2 kat alınmaktadır. Çünkü maksimum güç hız karakteristik eğrisinin yarısına tekabül etmektedir. Tasarlanacak motor maksimum tork değeri olarak maksimum hızdaki tork değerinin gene yaklaşık olarak 2 katı alınmalıdır. Grafiği bu şekilde yorumlanarak tasarlanacak elektrik motorunun değerleri bulunmalıdır.

4.2.1. Hız ve tork ihtiyacına göre, çapa ve kutup sayısının seçimi

FDAM'lar yapısal olarak senkron makineler grubuna girmektedirler. Fakat akım olarak DC motorlarıdır. DC motorlarında kutup sayısı arttıkça tork artar devir ise azalır. Ters durumda kutup sayısı azaldıkça tork azalır devir ise artmaktadır. DC motorlarda 2 kutuplular 2800 d/d, 4 kutuplular 1400 d/d, 6 kutuplular 900d/d, 8 kutuplular 750 d/d ile dönmektedir (Boldea ve Nasar, 2002).

4.2.2. Statorun ana boyutlarının belirlenmesi

Stator hesaplamaları bazı eşitliklere dayansa da bu tasarım için statorun dış çapının sınırlamaları bulunmaktadır. Bu sınırlama taşıtın altının kasislerde veya düzensiz yol şartlarında sürtünmemesinin istendiğinden dolayı tekerin yere değen noktasından itibaren taşıtın sahip olduğu süspansiyon sisteminin performansına bağlı olarak belirli bir mesafe yükseklikte olmasıdır. Elektromekanik diferansiyelin stator dış sınırlarını belirleyen taşıt üzerindeki etkendir. Çizelge 4.1.'de görüldüğü üzere statorun iç/ dış çap oranları kutup sayılarına bağlı olarak verilmiştir. Statordaki kutup sayılarının artmasıyla stator boyunduruğunun azaldığı görülmektedir. Böylece kutup sayısının artması hem statorun iç çapının artmasından dolayı mekanik olarak torku artıracak, hem de kutup sayısının fazla olmasından dolayı dönüş derecelerinde azalış meydana getirecek, dolayısıyla tork artışı sağlanmış olacaktır (Boldea ve Nasar, 2002).

Çizelge 4.1. Kutup sayısına bağlı statorun iç/dış çap oranları (Boldea ve Nasar, 2002)

$2p_1$	2	4	6	8
$D_{iç}/D_{dış}$	0,54...0,58	0,61...0,63	0,68...0,71	0,72...0,74

4.2.3. FDAM'larında EMK

Doğru akım motorlarında ihtiyaç olan yüke göre geçen akımı ayarlayacak ayrı bir düzeneğe gerek yoktur. Doğru akım motorlarında bu işi zıt EMK yapar. Zıt EMK'in eşitlikleri (Görkem, 1994):

$$E_b = K \cdot \Phi \cdot n \quad (4.7)$$

Burada;

E_b : Zıt EMK (V)

K : EMK sabiti

Φ : Manyetik akı (Wb)

n : Devir sayısı (devir/dakika)

$$E_b = U - I_a \cdot R_a \quad (4.8)$$

Burada;

U : Endüviye uygulanan gerilim (Volt)

I_a : A fazının akımı (Amper)

R_a : A fazının direnci (Ohm)

Örneğin makinenin yükünde meydana gelecek bir artma devir sayısını düşürmektedir. Devir sayısının düşmesi, $E_b = K \cdot \Phi \cdot n$ formülüne göre zıt EMK'in azalmasına neden olmaktadır. E_b azalınca (Görkem, 1994):

$$I_a = (U - E_b) / R_a \quad (4.9)$$

eşitliğine göre U ve R_a sabit olduğundan I_a akımı artmaktadır. Artan I_a akımı, motorun yükünü karşılamaktadır. Motorun yükünde meydana gelecek azalma ise devir sayısını yükseltmektedir. Devir sayısının yükselmesi, $E_b = K \cdot \Phi \cdot n$ formülüne göre zıt EMK' in yükselmesine neden olacaktır. E_b 'nin yükselmesi ise (Görkem, 1994):

$$I_a = (U - E_b) / R_a \quad (4.10)$$

eşitliğine göre U ve R_a sabit olduğundan I_a akımı azalmaktadır (Görkem, 1994).

4.2.4. Sürekli mıknatıslı senkron makinada moment üretimi

Sürekli mıknatıslı senkron makinesinin, sürekli hal çalışması ve doyma etkisinin ihmal ile elektriksel moment ifadesi eşitlik 4.11'deki gibidir (Talu, 2013).

$$M_e = (3/2).p.[I_{qs}.\Psi_m + (L_d-L_q).I_{qs}.I_{ds}] \quad (4.11)$$

Burada;

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

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

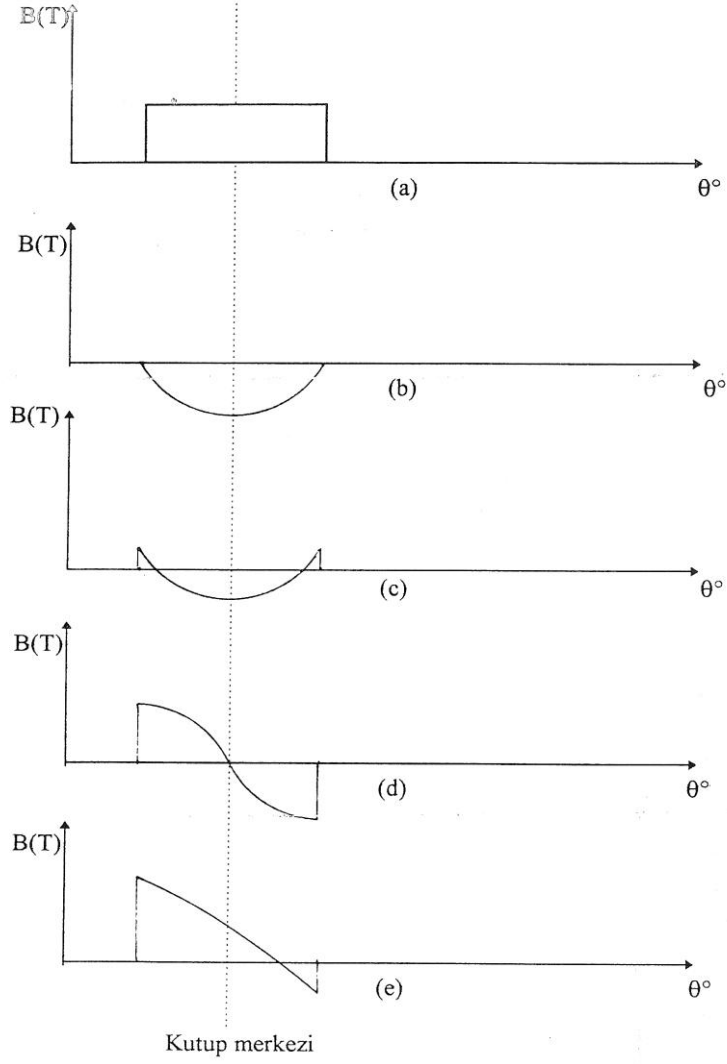
L_q : q-ekseni toplam endüktansı (= $L_{mq} + L_{lq}$) (Henry)

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.

4.2.5. 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 4.2. a), stator akımı d-ekseni bileşeni için kosinüs fonksiyonu (Şekil 4.2. b), stator akımı q-ekseni bileşeni için sinüs fonksiyonu biçimindedir (Şekil 4.2. d). Mıknatıs ve d-eksen amper sarımının oluşturacağı akı, aynı doğrultudadır. Dolayısı ile d-ekseni üzerinde her ikisinin toplam akısı olacaktır (Şekil 4.2. c). bir kutup altındaki hava ağırlığındaki akı yoğunluğu dağılımı ise toplam d ve toplam q eksen akılarının bileşimi olacaktır (Şekil 4.2. e). Toplam akı sinüzoidal olmayacaktır (Talu, 2013).



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

Şekil 4.2. Hava aralığı akı dağılımı (Talu, 2013)

4.2.6. Sadece sürekli mıknatıslar ile alan oluşumu

Sürekli mıknatısın oluşturacağı akı yolları şekil 4.3.'de 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 (Talu, 2013).

$$R_g = g/(\mu_0.S_g) \quad (4.13)$$

Burada;

R_g : Hava aralığı magnetik direnci (1/Henry)

g : Hava aralığı boyu (m)

S_g : Bir kutup için hava aralığı yüzeyi (m²)

μ_0 : Boşluğun magnetik geçirgenliğidir ($4\pi 10E-7$ Henry/m)

$$R_k = L_m/(4.\pi.1s.t) \quad (4.14)$$

Burada;

R_k : Kaçak akı duvarı manyetik direnci (1/Henry)

L_m : Mıknatıs genişliği (m)

$1s$: Rotor eksenel uzunluğu (m)

t : Kaçak akı duvarı boyudur (m)

$$\Psi_{mo} = \Psi_{go} = \Psi_{ko} \quad (4.15)$$

Burada;

Ψ_{ko} : Kaçak akı (Wb)

Ψ_{go} : Hava aralığı mıknatıs akısı (Wb)

$$\Psi_{go} = \Psi_{rm} / (1 + \beta.k_1) \quad (4.16)$$

Burada;

Ψ_{rm} : Kalıcı akı (Wb)

k_1 : Katsayısı ($=1+R_m / R_1$),

β : Makine geometrisine bağlı katsayı ($=2.R_g/R_m$)

Yapılan bu eşitliklerden çıkarılan sonuçlara göre; hava aralığındaki mıknatıs akısını, makine geometrisi ve kalıcı mıknatısiyet etkilemektedir (Talu, 2013).

$$B_{go} = \Psi_{go}/S_g = Br(S_m/S_g)/(1+\beta.k_1) \quad (4.17)$$

Burada;

B_{go} : Hava aralığı mıknatıs akı yoğunluğudur (Tesla)

S_m : Mıknatıs yüzeyinin alanıdır (m²)

$$B_{mo} = B_r - \mu_m.H_{mo} \quad (4.18)$$

Burada;

B_{mo} : Mıknatıs üzerindeki akı yoğunluğudur (Tesla)

$$H_{mo} = \beta.\Psi_{rm}.R_m/L_m(1+\beta.k_1) \quad (4.19)$$

4.2.7. Sadece stator akımı tarafından alan oluşumu

Stator sargıları boyuna ve enine olmak üzere iki eksende MMK üretirler. Boyuna ve enine magnetik gerilimlerin eşitlikleri 4.20 ve 4.21'deki gibidir (Talu, 2013);

$$\theta_s = \frac{4.(m/2).\sqrt{2}.I_d.N.k_w}{\pi.P} \cos(P\alpha/2) \quad (4.20)$$

$$\theta_{sq} = \frac{4.(m/2).\sqrt{2}.I_q.N.k_w}{\pi.P} \sin(P\alpha/2) = \theta_{qm}.\sin(P\alpha/2) \quad (4.21)$$

Burada;

I_d : Stator akımı d ekseni bileşenleri

I_q : Stator akımı q eksen bileşenleri

N : Faz sarım sayısı

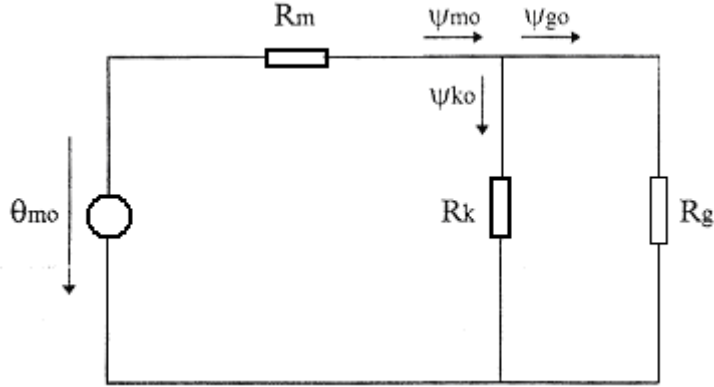
P : Kutup sayısı

m : Faz sayısı

k_w : Sargı katsayısı

α : d-ekseninden görünen mekanik açı

Manyetik alan kaynağının stator amper sarımları olduğunu varsayarsak, manyetik eşdeğer devre şekil 4.5.'deki gibi olacaktır (Talu, 2013);



Şekil 4.5. Stator alanı ile manyetik eşdeğer devre (Talu, 2013)

$$\Psi_{sd} = \Psi_{ms} + \Psi_{ks} = 2.1s.hm.B_{ms} + \Psi_{ks} \quad (4.22)$$

Burada;

Ψ_{sd} : Boyuna eksen hava aralığı akısı (Wb)

$$B_{sd} = \mu_0 \frac{\theta dM}{g} \left[\cos(P\alpha/2) - \frac{2/\pi}{(1 + \beta.k_1)} \right] \quad (4.23)$$

Burada;

B_{sd} : Boyuna eksen akı yoğunluğu (Tesla)

$$B_{ms} = \mu_0(4/\pi)\theta dM/L_m(1 + \beta.k_1) \quad (4.24)$$

Burada;

B_{ms} : Mıknatıs üzerindeki akı yoğunluğu (Tesla)

$$B_{sq} = \mu_0.(\theta_{dM}/g).\sin(P\alpha/2) \quad (4.25)$$

Burada;

B_{sq} : Enine eksen akı yoğunluğu (Tesla)

4.2.8. Sürekli mıknatıs ve stator akımı ile manyetik alan oluşumu

Herhangi bir çalışma anında hava aralığındaki akı yoğunluğu (B_g), sürekli mıknatıs ve stator sargılarının oluşturduğu akıların toplamı olmaktadır (Talu, 2013).

$$B_g = B_{g0} + B_{sd}(\alpha) + B_{sq}(\alpha) \quad (4.26)$$

$$B_g = \frac{Br(Sm / Sg) - (\mu_0 / g)\theta_{dM}}{(1 + \beta.k_1)} - \mu_0 \frac{\theta_{sM}}{g} \sin[P(\alpha + \phi) / 2] \quad (4.27)$$

Burada;

B_g : Hava aralığındaki akı yoğunluğu (Tesla)

$$\theta_{SM} = \sqrt{\theta_{dM}^2 + \theta_{qM}^2}, \quad \theta = \cos^{-1} (\theta_{qM} / \theta_{SM}) \quad (4.28)$$

olarak ifade edilir. Herhangi bir çalışma anında mıknatıs üzerinde oluşacak bileşke akı yoğunluğu eşitlik 4.29 ve 4.30'daki gibi olmaktadır (Talu, 2013).

$$B_{mç} = Br - \mu_m.H_{mo} + \mu_0.H_{ms} \quad (4.29)$$

$$H_{ms} = (4/\pi).\theta_{dM}/L_m(1 + \beta.k_1) \quad (4.30)$$

Çalışma noktasını ($B_{mç}$) belirleyen üç ayrı akı yoğunluğu görülmektedir. Bir; mıknatısın kalıcı akı yoğunluğudur ve mıknatıs malzemenin özelliğine göre değişmektedir (Talu, 2013).

$\mu_m H_{mo}$; stator akımı sıfır iken (boşta çalışma) akı yoğunluğuna belirler. Makine geometrisi, kaçak akı katsayısı ve mıknatısın özelliğine bağlıdır (Talu, 2013).

4.2.9. FDAM’unda güç, kuvvet ve tork eşitlikleri

FDAM’un hesaplamaları aşağıdaki şekilde yapılır ve temelde kullanılan öncelikli iki denklem Faraday yasası ve Lorenz Kuvveti’dir. Kayıpların olmadığı kabulü ile kullanılabilecek eşitlikler (Talu, 2013);

$$E = B.l.v \quad (4.31)$$

Burada;

E: EMK (volt)

B: Manyetik Akı Yoğunluğu (Wb/m^2) (Tesla)

l: İletkenin boyu (m)

v: İletkenin hızı (m/s)

$$F = B.i.l \quad (4.32)$$

Burada;

F: Kuvvet (N)

i: İletkenden geçen akım (A)

$$E_m = k_E \cdot \omega_m \quad (4.33)$$

Burada;

E_m : İndüklenmiş motor gerilimi (V)

k_E : İndüklenmiş motor gerilimi sabiti

ω_m : Açısal hız (rad/sn)

$$T_{mil} = I_m \cdot k_T \quad (4.34)$$

Burada;

T_{mil} : Mildeki Tork (Nm)

I_m : Motordan geçen akım (A)

k_T : Motor tork sabiti

$$k_T = k_E = 2.N.2.p.B_g.l_m.r_m \quad (4.35)$$

Burada;

N: Slot başına iletken sayısı

B_g: Hava aralığı akı yoğunluğu (Wb/m²)

r_m: Motorun hava aralığı yarıçapı (m)

$$P = E_m \cdot I_m = k_E \cdot \omega_m (T_{mil} / k_T) = \omega_m \cdot T_{mil} \quad (4.36)$$

Burada;

P: Motor gücü (W)

4.2.10. FDAM'larında manyetizmanın etkisi

Güç hesabında manyetizmanın etkisi verilmiştir (Gören, 2012).

$$\Phi = l \cdot \int_0^{T_p} B(x).dx \quad (4.37)$$

Burada;

Φ : Toplam akı yoğunluğu (Tesla)

T_p : Kutup aralığı

B(x)dx: En küçük akı yoğunluğu (dT)

$$B_{fm} = \frac{1}{T_p} \cdot \int_0^{T_p} B(x).dx \quad (4.38)$$

$$2Q_f = V_{Fe} + 2.V_L \quad (4.39)$$

Burada;

Q_f : Bir bobinin oluşturduğu magnetomotor kuvvet (Volt)

$$Q_f = W_f \cdot I_f \quad (4.40)$$

Burada;

W_f : Her bir bobinin sarım sayısı

I_f : Uyarma akımı (Amper)

$$B = H \cdot \mu \quad (4.41)$$

Burada;

H: Hacim (m^3)

μ : Manyetik geçirgenlik (1/Henry)

4.3. Ortası Boş Rotor Milinin Mukavemet Eşitlikleri

Rotor mili üretilen güç dolayısıyla yayılı bir burulma momenti etkisi altındadır. Kendi ağırlığı dolayısıyla eğilme gerilimleri çok küçük değerlerde olacağından hesaplanmasını göz ardı edebilecektir. Burulma momenti elektromekanik diferansiyelin rotoru için sırasıyla verilen eşitlikler ile ortası boş bir mil için hesaplanabilmektedir (Cürgül, 2005).

$$M_b = 974 \cdot \frac{P}{n} \text{ (daNm)} \quad (4.42)$$

eşitliği ile burulma momenti hesaplanır, burada;

M_b : Burulma momenti (daNm)

P: Güç (kW)

n: hız (d/d)

$$\tau_b = \frac{M_b}{W_b} \leq \tau_{em} \quad (4.43)$$

eşitliği ile mildeki burulma gerilmesi hesaplanır, burada;

W_b : Burulma mukavemeti ($N/da \text{ m}^2$)

$$W_b = \frac{\pi}{16} \cdot \left(\frac{D^4 - d^4}{D} \right) \quad (4.44)$$

eşitliği ile içi boş silindirik kesitlerde burulma mukavemeti hesaplanır, burada;

D: Dış çap (dam)

d: İç çap (dam)

$$D \geq \frac{1}{\sqrt[3]{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \cdot \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_b}{\pi \cdot \tau_b}} \quad (4.45)$$

eşitliği ile milin çapları hesaplanır, özel istekler dışında mil malzemesi olarak Fe50 çeliği kullanılmaktadır. Bu malzeme için $\tau_{em} = 1,5 \text{ daN/mm}^2$ alınabileceğine göre içi dolu kesitlerde, ön boyutlandırma için mil çapı hesabında iç çap için aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır (Cürgül, 2005).

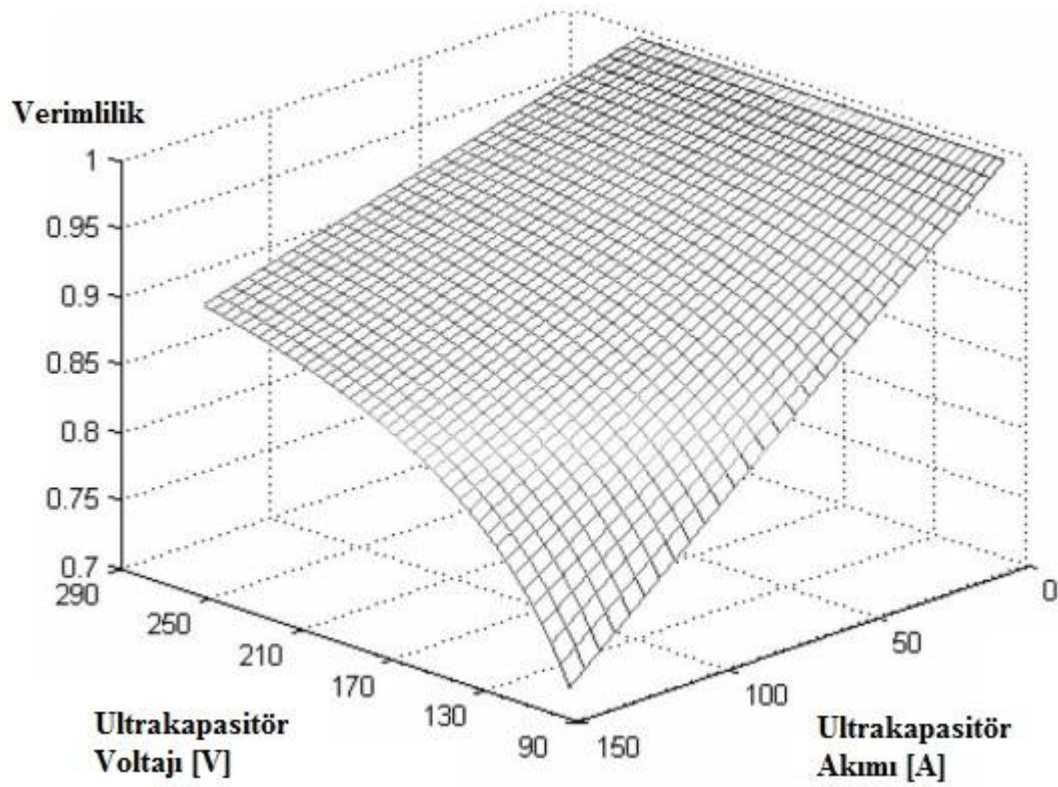
$$d \geq 134,4 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{n}} \quad (4.46)$$

4.4. Rejeneratif Frenleme ve Taşıt Performansına Etkisi

Frenleme esnasında balataların sıkıştırdığı diskte ısıya dönüşerek kullanılamayan enerji yerine geri kullanılabilir şekilde tüketilmesi rejeneratif frenleme olarak adlandırılmaktadır. Bu enerjinin geri kazanımının farklı yolları olabilse bu çalışmada tasarlanan sistemde elektrik enerjisine çevrilecek olmasıyla frenleme yapılmış olacaktır. Alternatörlerden yük çekildikçe daha zor dönerler.

DC motor anahtarlama ile akımı kesilerek ve sabit mıknatısların manyetik akısı bobinlerde kesme yaparak elektrik üretimi meydana getirmektedir. Bu elektrik üretimi kapasitörlerde depolanıp tekrar kullanılabilir. Taşıt durduktan sonra tekrar hareket edecekse bu kapasitörlerdeki enerji ile tekrar tahrik edilebilir. Böylece ilk enerjisini batarya yerine kapasitörden almış olacaktır.

Daha ani frenlemeler için balataların veya kampanaların devreye girmesi öngörülmektedir. Kapasitörlerin elektrikle dolmasıyla rejeneratif frenleme gerçekleşmeyecektir. Dolayısıyla daha fazla enerjinin depolanabilmesi için ultrakapasitörlerin kullanımı gerekecektir. Şekil 4.6.'da ultrakapasitörlerin karakteristiği görülmektedir.



Şekil 4.6. Ultrakapasitörlerin üç boyutlu karakteristik grafiği (Moreno vd, 2006)

Rejeneratif frenleme olmaksızın taşıt 2,61 km yi 1 kWh ile almaktadır. Rejeneratif frenleme ile bu mesafe 3,09 km ye çıkmıştır. Böylece taşıt %18,2 daha verimli olarak kaydedilmiştir. Ultra kapasitörlerin rejeneratif frenlemelerde kullanılmasıyla bu verimlilik %24,4 (3,25 km/kWh) olarak kaydedilmiştir. Kapasitörlerde depolanabilecek enerji ise aşağıdaki eşitlikler ile belirlenebilmektedir (Moreno vd, 2006).

$$E_{uc}^{ram} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{uc}^2 \quad (4.47)$$

Burada;

E: Enerji (Joule)

C: Kapasitans (Farad)

V: Voltaj (Volt)

4.5. Elektrik Motorlarında Isınma Analizinin Eşitlikleri

FDAM'nun faz sargıları, makinenin iç stator kutupları üzerinde bulunmaktadır. Motorun çalışması esnasında bu sargılar, üzerlerinden akan akım nedeniyle ısı kaynağı olarak davranmaktadırlar. FDAM'ında faz sargıları basit yapılı sargılar olup, doğru akım makinelerindeki uyarma sargılarına benzetilmektedir. Literatürde, uyarma sargılarındaki ısı verme katsayısı, endüvisinde vantilatör bulunmayan ve doğal olarak soğuyan doğru akım motorları için (Çınar, 2008);

$$h = (11,0-16,5) \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) \quad (4.48)$$

endüvisinde vantilatör bulunan doğru akım motorları için ise;

$$h = (12,5-15) \cdot [1 + (0,06-0,07) \cdot v] \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) \quad (4.49)$$

Burada;

v: vantilatörün çevre hızıdır (m/s)

Benzer şekilde ısı verme katsayısı, endüviler için, küçük endüvilerde;

$$h = (18-24) \cdot [1 + 0,1 \cdot v] \quad (4.50)$$

büyük endüvilerde ise;

$$h = (22-28) \cdot [1 + 0,1 \cdot v] \quad (4.51)$$

olarak ifade edilmektedir. Doğru akım motorlarında hava aralığı birkaç mm'dir. Burada endüvinin aktif yüzeyi, kendisini çevreleyen hava içerisindeki hareketi sonucunda hava tarafından soğutulmaktadır. Bu nedenle ısı verme katsayısı, motorun sabit kısmındaki uyarma sargılarına göre daha yüksektir. Çizelge 4.2.'de, elektrik makinelerinde kullanılan izolasyon sınıfları ve bu sınıflar için izin verilen maksimum sıcaklık değerleri verilmektedir (Çınar, 2008).

Çizelge 4.2. Motor izo1asyon sınıfları (Çınar, 2008)

İzolasyonSınıfı	A	E	B	F	C	H
İzin verilen Azami Sıcaklık($^{\circ}C$)	105	120	130	155	280	255

Tasarlanan FDAM’da sargılar sabit kısım olan iç stator üzerine sarılmaktadır. Hareketli kısım olan dış rotorun ise, hava aralığının da çok küçük olmasının yardımıyla, bir vantilatör gibi davranıp vakum etkisi oluşturacağı ve ısıyı hava akımı ile sargılardan uzaklaştıracağı düşünülmektedir. Bu amaçla, motor gövdesinde yan kapaklar üzerine havalandırma delikleri açılmıştır. Bu nedenle, ısınma hesabı yapılırken ısı verme katsayısı olarak, endüvisi küçük olan doğru akım motorlarındaki katsayı değerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Motorun tam yüklü çalışması durumunda bir faz sargısında oluşacak bakır kaybı (Çınar, 2008);

$$P_{cu} = I^2 \cdot R \quad (4.52)$$

Burada;

P_{cu} : Bakır kaybıdır.

bir faz sargısının havayla temas eden yüzey alanı A_{sr} olarak hesaplanıp, buradan, motorun tam yüklü olarak çalışması durumunda faz sargısı yüzeyinin soğutucu havaya göre ortalama sıcaklık derecesi farkı (Çınar, 2008);

$$T = \frac{P_{cu}}{h \cdot A_{sr}} \quad (4.53)$$

Burada;

A_{sr} : Bir faz sargısının havayla temas eden yüzeyi (m^2)

P_{cu} : Bakır kaybı

h : Motorun ısı verme katsayısıdır.

olarak bulunmaktadır. Bulunulan sıcaklık değeri için çizelge 4.2.'ye göre hangi sınıf izolasyon uygulanması gerektiği sonucuna varılır (Çınar, 2008).

5. TİPİK BİR AİLE TAŞITI İÇİN GELİŞTİRİLEN SENARYOYA GÖRE ELEKTROMEKANİK DİFERANSİYEL TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Bu bölümde tipik bir aile taşıtı için “Elektromekanik Diferansiyel” in boyutlandırılması için tipik bir aile taşıtının değerleri ile yol şartlarını da dikkate alarak bir senaryo geliştirilmiştir. Tasarımın boyutlandırılması için öncelikle güç ihtiyacından başlanmıştır, bunun için ortalama şartları ve kanuni şartlar referans alınmıştır. Diğer hesaplamalar için referans alınan şartlar göz önünde bulundurularak ortalama değerler ile hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplamaların tamamı sayısal olarak ek kısmında verilmektedir. Referans alınan şartlar maddeler halinde belirtilmiştir;

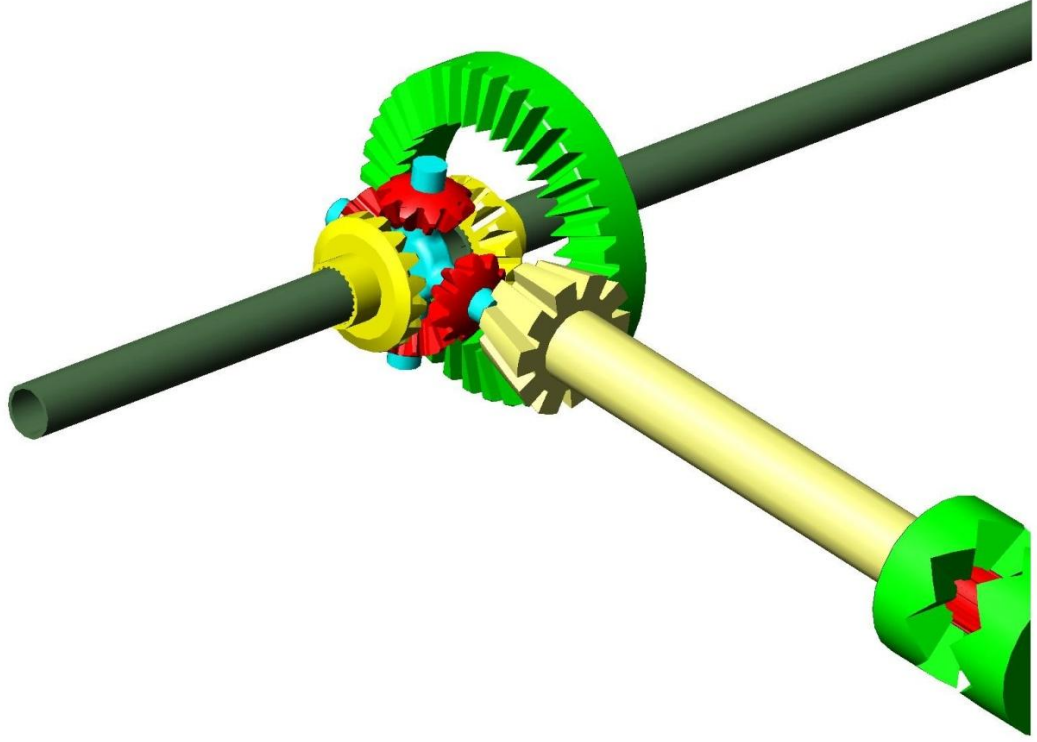
- Tipik bir aile taşıtının verileri; ağırlığı 1272 kg hava direnç katsayısı 0,32 ve ön iz düşüm alanı 2,22 m² dir ve radyal lastik kullanılmaktadır (Otlu, 2010).
- Yuvarlanma direnci katsayısı 0,015 olarak alınmıştır. Bu ortalama bir radyal tekerleğin asfalttaki direnç katsayısıdır (Çetinkaya, 2010).
- Aynı marka ve model taşıtın tekerlek yarı çapı 0,32 m dir (Volkswagen, 2013).
- Taşıttaki her yolcunun ağırlığı 75 kg olarak alınmıştır (Altındemir, 2008).
- Tırmanılan yokuşun eğimi %3 olarak alınmıştır (Aashto, 2001).
- Aile bireyleri 3 kişiden oluşmaktadır. (Giray, Keskinoglu, 2006).
- Deneyin yapıldığı gün rüzgar esmediği varsayılmaktadır.
- Havanın yoğunluğu 1,2 kg/m³ olarak alınmıştır (Çetinkaya, 2010).

Taşıtın aerodinamik direnci eşitlik 4.1’e göre R_{ax} : 473,842 N olarak sonuçlanmaktadır. Taşıtın yuvarlanma direnci, toplam ağırlık 1497 kg iken otobanda gittiği ve radyal bir lastik kullandığı göz önünde bulundurulduğunda eşitlik 4.2’ye göre R_{ro} = 220,28 olarak sonuçlanmaktadır. Yokuş yukarı çıktığını varsayılan taşıtın 3 derecelik yokuşu tırmanırken yokuşun eğimi eşitlik 4.32’e göre $st=0,052$ olarak ve yokuş direnci 763,65 N olarak sonuçlanmaktadır. Tekerlek tahrik kuvveti eşitlik 4.4’e göre en az tüm dirençlerin toplamı olmalıdır ki taşıtın hızında azalma olmasın, böylece bu şartlar altında asgari $F_t= 1457,77$ N olarak sonuçlanmaktadır. Tekerlek momenti eşitlik 4.5’e göre 466,48 Nm olarak sonuçlanmaktadır. Eşitlik 4.6’ya göre $P = 48,606$ kW’lık güç gerekmektedir.

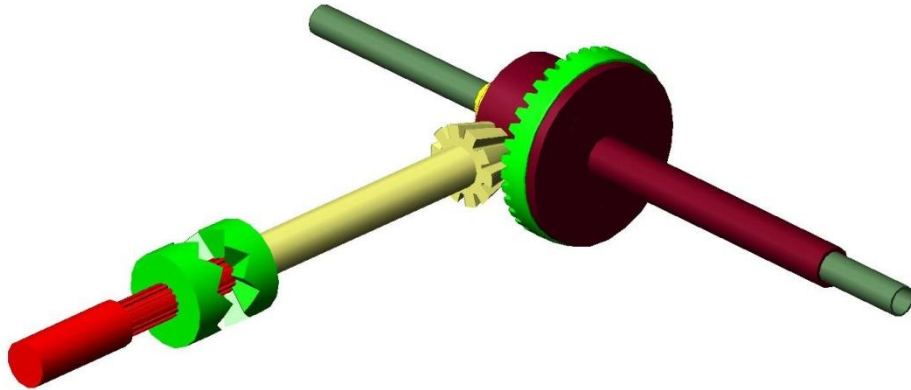
FDAM'ları kW enerji başına ağırlık düşen oranı en az olan motor tipidir. Örneğin şönt bir DC elektrik motoru için verilere göre kW başına 4 kg düşmektedir (Femsan, 2013). 20 kW'lık FDAM'unun ağırlığı 17 kg'dır, böylece üretilen kW (mekanik enerji) başına 0,850 kg ağırlık düşmektedir. 48,6 kW'lık FDAM'unun ağırlığı yaklaşık olarak 41,31 kg olması beklenmektedir.

20 kW'lık FDAM'nun çapı 206 mm boyu ise 170 mm dir. 10 kW'lık bir elektrik motorunun çapı 206 mm boyu ise 126mm'dir (Golden Motor Co. Ltd.). Etkin tork mesafesi, encoderin, fanın ve kapakların mesafeleri de dikkate alındığında her 10 kW için 44 mm'dir. 48,6 kW için ise 213,86 mm'dir. 10 kW'lık FDAM'nun uzunluğundan 44 mm'lik etkin tork mesafesini çıkararak diğer elemanlar için gereken uzunluk 82 mm olarak belirlenir. Etkin tork mesafesine encoderin, fanın ve kapakların mesafeleri eklendiğinde 295,86 mm olarak belirlenir.

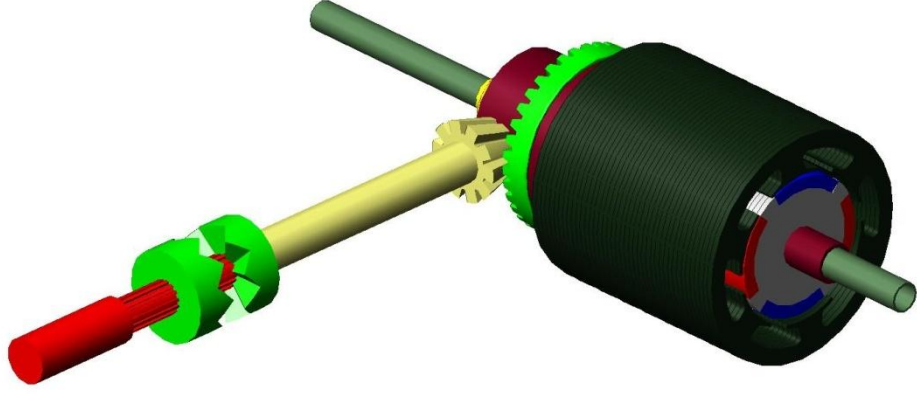
Gerçek boyutlarda çizilen diferansiyel dişlilerine, hesaplanan boyutlardaki elektromekanik diferansiyel tasarımının parça parça eklenmesiyle şekil 5.1., şekil 5.2., şekil 5.3., şekil 5.4., şekil 5.5. ve şekil 5.6.'da gösterilmektedir.



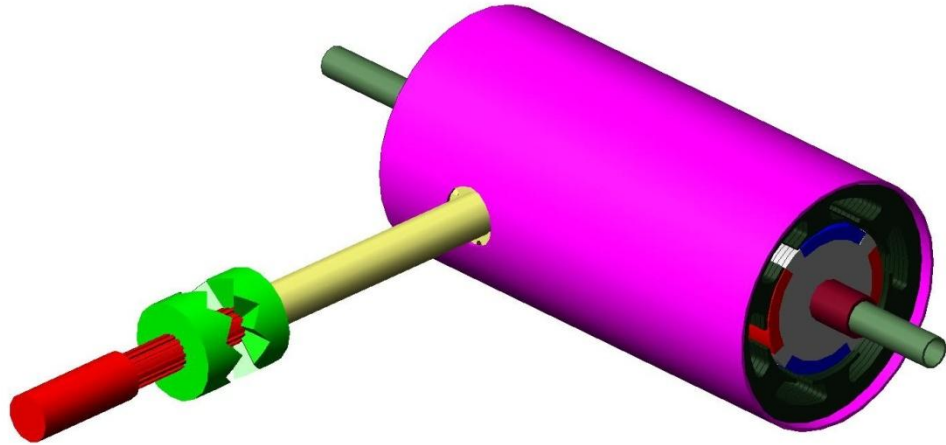
Şekil 5.1. Bir diferansiyel mekanizmasının dişlileri



Şekil 5.2. Diferansiyele taşıyıcının eklenmesi



Şekil 5.5. Mekanizmaya statorun eklenmesi



Şekil 5.6. Mekanizmaya muhafaza kovanının eklenmesi

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Modifiyesi planlanan FDAM'nun manyetizma harmoniklerinin öncelikle FEM analizinin yapılması uygun görülmüş, rotorun ortasından geçecek aks milinin manyetizmadan etkilenmemesi için manyetizma kafesi öngörülmüştür. Dolayısıyla rotor iç çapı daha da genişleyeceği ve bunun da manyetik verimlilikte azalma olacağı kanaatini uyandırmıştır.

Üretilmiş olan parçaların yetersiz olmasından dolayı piyasada hazır satılan bir FDAM'unun rotorunun üzerinde yapılacak modifiyelerin manyetizma verimliliğinin FEM analizlerinin yapılması, daha sonra satın alınarak bu gücü, torku, ve devri belli motorun rotorunun üzerinde modifiyeler yapılarak gücünün ve torkunun ölçülmesi ve azami verimliliğe yaklaşılması planlanmıştır.

FDAM'unun kontrolü hazır satılan devreler ile gerçekleştirilmesi öngörülmüş olup, bataryasının ise içten yanmalı taşıtlarda kullanılan bataryaların kullanılması planlanmıştır. Uygulama olarak ise hali hazırda bulunan tek kişilik bir taşıtın şasisinde denenmesi planlanmış olup rejeneratif frenleme ise en son olarak ultra kapasitörlerin kullanımıyla gerçekleştirilmesi uygun görülmüştür. Çünkü frenlemeden doğacak enerjinin bataryayı şarj etmesi bataryanın ömrünü kısaltacaktır. Dolayısıyla eğer kapasitörde elektrik enerjisinin bulunması durumunda ilk olarak elektrik enerjisinin kapasitörden daha sonra bataryadan çekilmesi uygun görülmüştür.

Elektromekanik bir diferansiyelin taşıtlarda tahrik sistemi olarak kullanılması ulusal çapta yapılan "Otomotiv Proje Pazarı" yarışmasında 3.lük ödülü almıştır. Teknogirişim sermayesi desteği ve Tübitak 1002 proje desteklerinden geçerli not alamadığı için destek alamamıştır. Başvurusu yapılan proje desteklemelerin jürilerine dilekçe ile başvurulup eksik ve yetersiz yönleri hakkında bilgi istenmiş ve gelen cevaplar doğrultusunda değişiklikler ve geliştirmeler yapılmıştır. Tasarımın özgünlüğünün ve çıktılarının yüksek olması tasarımın gerçekleştirilmesi isteğinde motivasyon olarak olumlu bir etken olmuştur. Jüri üyelerinin tavsiyeleri doğrultusunda tasarımsal olarak yapılan değişimler hali hazırda prototipinin üretilmekte olan ve üretilmiş olan parçalarının yetersiz olduğunu ortaya koymuştur.

Bu önerilerle tasarımın ileriki akademik programlarda hayata geçirilmesi uygun görülmüştür. Faydalı model Patent başvurusu yapılmıştır.

Tasarım için öngörülen hesaplamalar, tam kesiti alınmış açıklamalı montaj resmi ve üretilmiş parçaların resimleri ve açıklamaları ekler kısmında verilmiştir.

KAYNAKLAR

- Aashto, A., 2001. Policy on Geometric Design of Highways and Streets. American Assoc. of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- Altındemir, S., 2008. Hibrit Elektrikli Taşıtlarda Rejeneratif Frenleme. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 6s, İstanbul.
- Aydın, K., Aydemir, M.T. Enerji Saklayabilen Moment Kontrol Jiroskoplarında (ESMKJ) Kullanılan Aktif Manyetik Rulmanların Enerji Tüketimi.
- Bal, G., 2006. Özel Elektrik Makineleri. Seçkin Yayınları, 3. Baskı, Ankara.
- Boldea, I., S., A., Nasar, 2002. The Induction Machine Handbook. CRC Pres LLC, 133-159 pp, Washington, DC.
- Bodur, F., 2013. Yüksek Verimli Elektrik Motoru Tasarımı. Bakioğlu Holding, İzmir.
- Cürgül, İ., 2005. Makine Elemanları ve Çözümlü Problemleri. Birsen Yayınevi.
- Çetinkaya, S., 2010. Taşıt Mekaniği. Nobel Yayınları, 5. Baskı, Ankara.
- Çınar, M.A., 2008. Elektrikli Taşıtın Tekerlek Tahriği için Geliştirilen Dış Rotorlu Anahtarlı Relüktans Motor Tasarımı ve Analizi. Doktora Tezi, 27-95s, Kocaeli.
- Ertaç, Y., 2008. Elektrikli Taşıtların Tasarımı ve Simülasyonu. Master Tezi, 35s, Ankara.
- Giray, H., Keskinoglu, P., 2006. İlkokul Öğrencilerinde Enterobius Vermicularis Varlığı ve Etkileyen Etmenler. Türkiye Parazitoloji Dergisi, 30 (2), 99-102s İzmir.

Golden Motor Technology Company Ltd., 2013, 20 kW BLDC Technical Documents. Jiangsu, China

Gören, A., 2012. Doğru Akım Motorları, Ders notları.

Görkem, A., 1994. Elektrik Makinelerinde Bobinaj. Çorum.

Gürdal, O., 2003. Elektrik Makinalarının Tasarımı. Nobel Yayınları, İstanbul.

Kaygısız, F., 2008. Asenkron Makinaların Matlab’da Tasarımı ve Analizi. Kütahya.

Kurdoğlu, A., 2007. Brushless Direct Current Motor Speed Control Circuit Design.

Lee, B., Ehsani M., 2003. Advanced Simulation Model for Brushless DC Motor Drives. Electric Power Component and Systems, 841-868 pp.

Lepkowski, J., Microchip, AN894, Motor Control Sensor Feedback Circuits.

Megep, 2009. Endüstriyel Otomasyon Teknolojileri Servo Sürücüler. Ankara.

Method for Controlling Regenerative Braking in A Vehicle. US Patent ID: US 8,204,664 B2.

Microchip, 2008. DS00885A, Brushless Direct Current Motor Fundamentals.

Moreno, J., Ortúzar M.E., Dixon J.W., April 2006. Energy-Management System for a Hibrit Electric Vehicle, Using Ultracapacitors and Neural Networks Ieee Transactions on Industrial Electronics. 53p.

Otlı, S., 2010. İçten Yanmalı Motorlu Bir Taşıtın Basit Bir Hibrit Elektrikli Taşıta Dönüşümü için Bir Model. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi. 79-80s, İstanbul.

Özdemir, U., 2005. Dişli Kutusunun Parametrik Tasarımında; Dönme Yönü, Güç ve Helis Açısı Değişiminin Millerdeki Eğilme Momentine Etkisinin İstatistiksel Analizi. H. ve U. T. Dergisi, Temmuz 2005, 15-25s.

Pushek, M., 2013. Brushless DC Motors – Part I: Construction and Operating Principles, Cypress Semiconductor.

Thomas, H. B., Andrew A. F., 20 May 2007. Design, Demonstrations And Sustainability İmpact Assessments For Plug-in Hibrit Electric Vehicles, Renewable & Sustainable Energy Reviewes.

Toliat, H.A., Gopalarathnam T., 2002. AC Machines Controlled as DC Machines (Brushless DC Machines/Electronics), The Power Electronic Handbook. CRC Press LLC, New York.

Starschich, E., Muetze A., 2013. Operating Area Analysis of Direct and Geared Brushless Direct Current Motor Drives for Electric Bicycles.

Yedamale, P., 2003. Microchip Technology Inc. Brushless Direct Current Motor Fundamentals.

İnternet kaynakları

Akdeniz Elektrik Dağıtım A.Ş. Elektrik Tarifesi Erişim: 23.05.2013 Saat: 12.00
Kaynak: <http://www.akdenizedas.gov.tr/>

Femsan Electric Motors, İstanbul, 180 Gövde 350 Tip, 27s., Erişim: 21.08.2013 Saat: 20.00
Kaynak: http://www.femsan.com/docs/KG_TR_2010.pdf

Jhonsonelectric Company Education Documents, BLDC Motor Brushless. Erişim: 12.11.2013 Saat:15.00
Kaynak: <http://www.johnsonmotor.com/fr/resources-for-engineers/automotive-applications/motion-technology/ec-motor-brushless.html>

Karayolları Genel Müdürlüğü. Erişim: 10.10.2013 Saat:11.00 Kaynak:
<http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Trafik/HizSinirlari.aspx>

Talu, C., 2013. Fırçasız DC Ders Notları. Erişim: 07.11.2013 Saat:17.00 Kaynak:
<http://www.metu.edu.tr/~tcemil/>

U.S. Energy Information Administration. Erişim: 12.09.2013 Saat: 19.00 Kaynak:
<http://www.eia.gov>

Volkswagen Co. Erişim: 21.10.2013 Saat:18.00 Kaynak:
<http://binekarac.vw.com.tr/golf-donanim.aspx>

EKLER

EK A. Hesaplamalar

EK B. Tam kesiti alınmış açıklamalı montaj resmi

EK C. Üretilmiş parçalar

EK A. Hesaplamalar

Bu bölümde yapılan hesaplamalar açık bir şekilde belirtilmiştir.

Eşitlik 4.1'e göre hava direncinin hesaplanması;

$$R_{ax} = 0,0386 \cdot \rho_a \cdot C_x \cdot A \cdot (V \pm V_o)^2$$

$$R_{ax} = 0,0386 \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,32 \cdot 2,22 \cdot (120 \text{ km/saat} \pm 0)^2$$

$$R_{ax} = 473,842 \text{ N'dur.}$$

Eşitlik 4.2'ye göre yuvarlanma direncinin hesaplanması;

G= Toplam ağırlık= Taşıtın ağırlığı + 3 kişilik ailenin ağırlığı

G= 1272kg + 3x75kg = 1497kg Newton birimine çevirmek için 9,81 ile çarparsak

$$G = 1497 \cdot 9,81$$

$$G = 14685,57 \text{ Newton}$$

$$R_{ro} = G \cdot f_{ro}$$

$$R_{ro} = 14685,57 \text{ N} \cdot 0,015$$

$$R_{ro} = 220,28 \text{ N'dur.}$$

Eşitlik 4.3'e göre taşıta etkiyen yokuş direncin hesaplanması;

$$\tan x^\circ = st$$

$$\tan 3 = 0,052$$

$$st = 0,052$$

$$F_{yokuş} = st \cdot G$$

$$F_{yokuş} = 0,052 \cdot 14685,57 \text{ N}$$

$$F_{yokuş} = 763,65 \text{ N'dur}$$

Taşıta etkiyen toplam dirençler toplanarak bulunabileceği gibi eşitlik 4.4 ile de bulunabilir;

$$s_t = \frac{F_t - R_{ro} - R_{ax}}{G} = 0,052 = \frac{F_t - 220,28 \text{ N} - 473,84 \text{ N}}{14685,57 \text{ N}}$$

$$F_t = 1457,77 \text{ N'dur.}$$

Taşıta etkiyen toplam F_t direnci tekerden alınan kuvvet olduğundan tekerlek torkunu eşitlik 4.5'e göre hesaplanması;

$$F_{tr} = \frac{M_t \cdot i_0}{r_w} \cdot \eta_{tr}$$

Dişli oranı olmadığı için ve transmisyon olmadığı için verimi de dolayısıyla olmayacaktır. Eşitlik tekrar düzenlendiğinde;

$$F_{tr} = \frac{M_t}{r_w}$$

$$1457,77 \text{ N} = \frac{M_t}{0,32 \text{ m}}$$

$$M_t = 466,48 \text{ Nm}$$

Taşıtın tekerleğinin 120 km/saat hızda döneceği dakikadaki devir sayısının hesaplanması;

$$\text{Tekerleğin çevresi} = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot 0,32 = 2,0106 \text{ metre}$$

$$\text{Hız} = 120000 \text{ m/saat} = 2000 \text{ m/dakika}$$

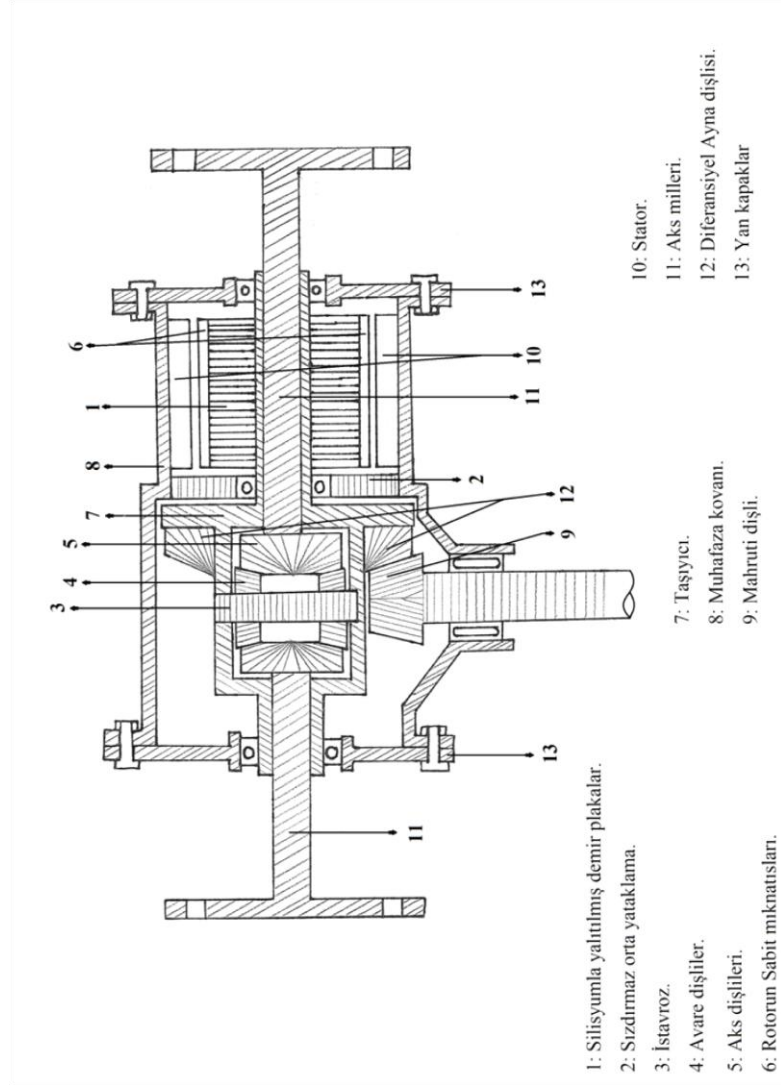
$$n = \frac{2000 \text{ m/d}}{2,0106 \text{ m}} = 995 \text{ devir/dakika}$$

Eşitlik 4.6'ya göre kullanılacak elektrik motorunun gücünün hesaplanması,

$$P = \frac{M \cdot n}{9549} = \frac{466,48 \text{ Nm} \cdot 995 \text{ d/d}}{9549}$$

$$P = 48,606 \text{ kW}$$

EK B. Tam Kesiti Alınmış Açıklamalı Montaj Resmi



Şekil B.1. Tam kesiti alınmış açıklamalı montaj resmi

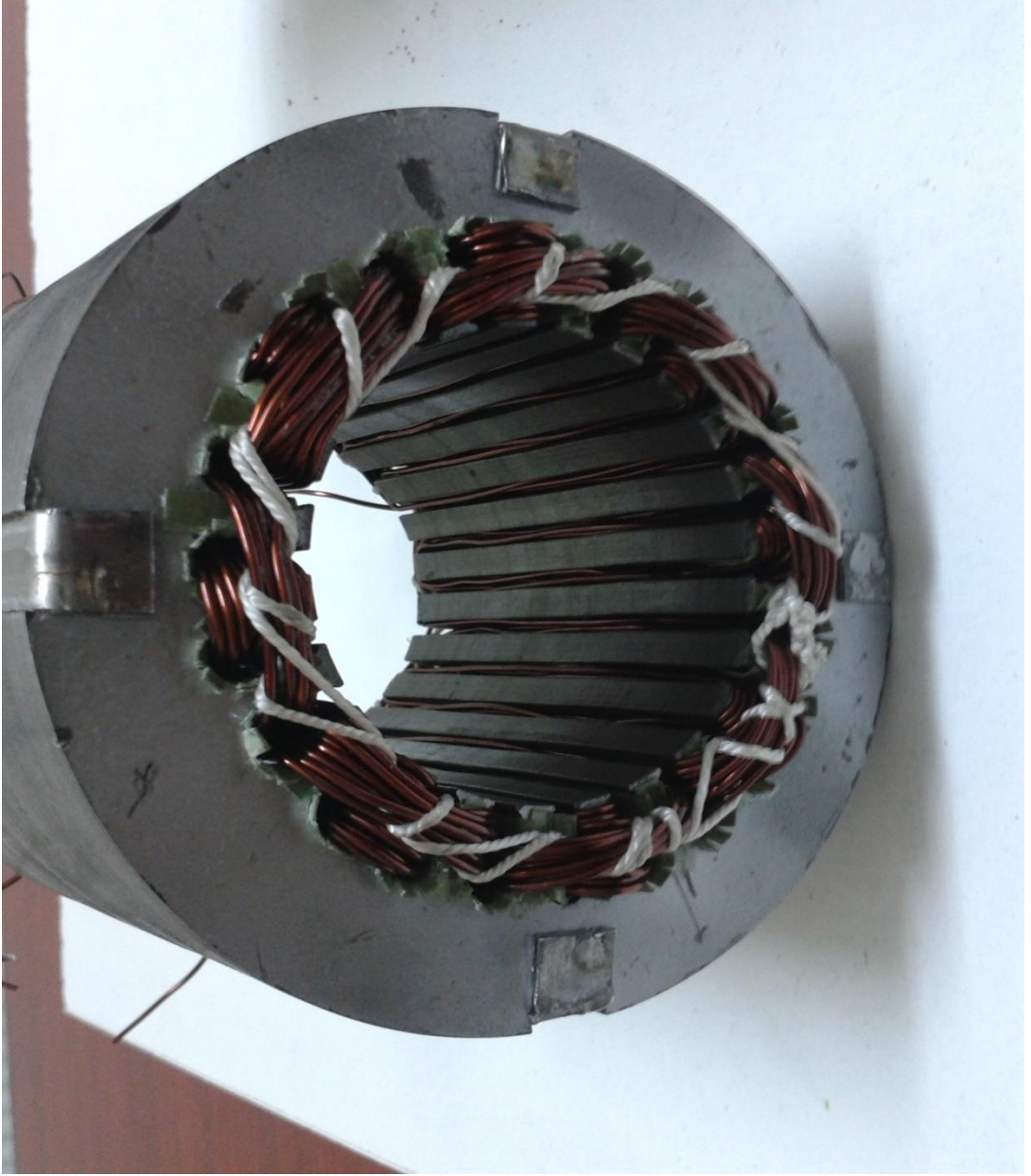
EK C. Üretilmiş Parçalar

Şekil C.1.'de görülen muhafaza kovani Ç1040 çelik borudan kesilmiş olup, iç çapı tornada talaş kaldırılarak işlenmiştir. Bobin sargılarını gösterim amaçlı dışarıya çıkması ve tetikleme devresine bağlanması için delikler açılmış, hall sensörlerinin dışarıdan görülecek şekilde konumlandırılabilmesi için kare oyuklar açılmıştır. Sistemin şekilde görülen beyaz sunta plakaya oturabilmesi için ayaklar imal edilip kaynaklanmış ve plakaya vidalanmıştır.



Şekil C.1. İmal edilen muhafaza kovani

Şekil C.2.'de görülen stator gövdesi silisyumla yalıtılmış plakalardan oluşmaktadır. 1,1 kW'lık bir elektrik motorunun statorudur. Toplu sarım metoduyla bakır tel sarılmıştır. Stator muhafaza kovanına oturmaktadır.



Şekil C.2. Bakır tel sarılmış stator

Şekil C.3.'de görülen diferansiyel dişlileri, rotor ve taşıyıcıdır. Diferansiyel dişlileri triportör aracından alınmıştır. Taşıyıcı ise Ç1040 çeliğinden flanşıyla birlikte tornada talaş kaldırılarak imal edilmiştir. Ayna dişli flanşa oturarak vidalanmıştır. Rulmanların arasına stator geçmektedir. Neodyyum mıknatıslar ise düzenli olarak teflon kalıplarına oturmaktadır. Taşıyıcının içinden aks mili geçebilmekte ve aks dişlisine oturabilmektedir.



Şekil C.3. İmal edilen taşıyıcı ve diferansiyel dişlileri

Şekil C.4.'de görülen mahruti dişlidir. Mahruti dişli ayna dişliyi tahrik edebilecek şekilde iğne bilyeli rulmanıyla konumlandırılmış yataklamasına oturmaktadır. Mahrutinin civata dişlerinin bulunduğu ucu, kapline açılan dişlilere civatalanmıştır.



Şekil C.4. Kapline montelenmiş mahruti dişli

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ulvi Taha YILDIRIM
Doğum Yeri ve Yılı : Mersin, 1985
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ulvitahayildirim@gmail.com



Kendi memleketim olan Isparta’da Yüksek Lisans eğitimim sırasında “*Elektromekanik Diferansiyel*” adlı tasarım ile Otomotiv Proje Pazarında 2013 yılında ödül aldım. Bu tasarımın geliştirilmesi adına önerilere, fikirlere, düzenlemelere ve tavsiyelere açığım. E-posta yoluyla ulaşabilirsiniz.