

**ASENKRON MOTOR İLE SÜRÜLEN ELEKTRİKLİ
ARACIN MODELLENMESİ**

**2013
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

Turgut ÖZTÜRK

**ASENKRON MOTOR İLE SÜRÜLEN ELEKTRİKLİ ARACIN
MODELLENMESİ**

Turgut ÖZTÜRK

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Ocak 2013**

Turgut ÖZTÜRK tarafından hazırlanan “ASENKRON MOTOR İLE SÜRÜLEN ELEKTRİKLİ ARACIN MODELLENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Mustafa AKTAŞ



Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 09 / 01 / 2013

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. M. Bahattin ÇELİK (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa AKTAŞ (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Selim ÖNCÜ (KBÜ)

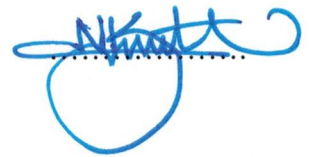


...../...../ 2013

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Turgut ÖZTÜRK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ASENKRON MOTOR İLE SÜRÜLEN ELEKTRİKLİ ARACIN MODELLENMESİ

Turgut ÖZTÜRK

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Yrd. Doç. Dr. Mustafa AKTAŞ

Ocak 2013, 79 Sayfa

Elektrikli Araçların önemi otomotiv endüstrisindeki gelişmelere paralel temiz enerji kaynağı ve enerji verimliliği üzerine yapılan çalışmalardan dolayı hızla artmıştır. Elektrikli Araçlardaki uygun sistem yapılandırması sonucunda bölgenin koşulları ve bataryadaki yeni gelişmeler kullanılarak gürültüsüz, egzoz emisyonuz ve çevre ile dost yeni tip araçlar ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada bir Elektrikli Araç, Matlab programı ile modellenmiştir. Sistemde batarya olarak Li-iyon batarya ve elektrik makinası olarak bir Asenkron Makina kullanılmıştır. Burada aynı elektrik makinası hem motor hem de jeneratör olarak görev yapmaktadır. Elektrik makinası jeneratör modunda çalıştığı zaman frenleme esnasında kaybedilen enerji kısmen geri kazanılmaktadır. Elektrik makinasının kontrolünde iyi ve başarılı sonuçlar veren Alan Yönlendirmeli Kontrol (FOC) metodu uygulanmıştır.

Elektrikli araçta havanın sürtünme kuvveti, yuvarlanma sürtünme kuvveti, yokuş direnci kuvveti ve hızlanma (ivmelenme) kuvveti modellenmiştir. Ayrıca elektrik makinasının momenti ile bu kuvvetler arasındaki hesaplamalar tekere aktarılarak güç dönüşümleri yapılmıştır. Enerji tüketimi; SOC (State of Charge) ve enerji kazanımlarında yol ve hız durumlarına göre incelenmiştir.

Oluşturulan modellemede elektrikli aracın hızı geleneksel PI ve Bulanık Mantık Kontrol metotları ile kontrol edilmiştir. Özellikle şarj durumu ve bataryadaki enerji değişimi durumları incelenmiş ve bulanık mantık kontrol yönteminin PI kontrol yönteminden daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. PI kontrolde salınımlardan kaynaklanan mevcut hatalar bulanık mantık kontrolde ortadan kalkmıştır. Ayrıca elde edilen simülasyon sonuçlarına göre anlık hız değişimlerinde bulanık mantık kontrol metodunun daha iyi bir performans sergilediği saptanmıştır. Bataryadaki enerji tüketiminin dur-kalk ve yokuş aşağı-yukarı durumlarına göre de anlık değiştiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Asenkron motor, alan yönlendirmeli kontrol, elektrikli araç.

Bilim Kodu : 905.1.033

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

MODELLING OF ELECTRIC VEHICLE DRIVEN BY INDUCTION MOTOR

Turgut ÖZTÜRK

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electric-Electronic Engineering

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ

January 2013, 79 Pages

The importance of electric vehicles has increased rapidly in the automotive industry parallel to search on need sources of clean energy and efficient use of the energy. If the appropriate system configuration is selected by examining the road conditions of the region and new developments in batteries, electric vehicles are more successful comparing to conventional vehicles in terms of today's concerns about the environment, particularly noise and exhaust emissions.

In this study, the electric vehicle was modeled by Matlab Programming. Li-ion battery and an induction motor have been used as battery and electric motor, respectively. The same electric motor has used as generator. The lost energy is partly recovered during braking of the electric vehicle in generating mode of electric motor. The electric motor has controlled by field oriented control that is used for giving good and successful results in control of electric motor.

The forces were modeled which are rolling resistance, aerodynamics drag, hill climbing resistance and linear acceleration forces. Furthermore the relations modeled between torque of electric motor and these forces. Additionally the relations have been modeled between the electric motor and transformations of the motor torque into the force in the wheels. The energy consumption has been analyzed in the state of the battery charge and energy recovery in common road and velocity change conditions, respectively.

The speed of the electric vehicle was controlled with conventional PI Control and Fuzzy Logic Control methods in created modeling. Especially State of Charge (SOC) and change of the energy statements on battery package were analyzed. According the results of simulation the Fuzzy Logic Control method was determined given better results than the PI Control method. In addition, the Fuzzy Logic Control method was exhibited good performance in changes of instantaneous velocity.

Consequently, energy consumption of the battery pack is changed in repeated start-stop and up/down hill conditions on this model. It also noticed that the magnetizing current value of the induction motor significantly affects the energy recovery rate.

Keywords : Induction motor, field oriented control, electric vehicle.

Science Code : 905.1.033

TEŐEKKÖR

Tez alışmama verdikleri desteklerden dolayı danışman hocam Yrd. Do. Dr. Mustafa AKTAŞ'a, alışmalarımnda yardımlarını esirgemeyen hocam Yrd. Do. Dr. Ata SEVİN'e, Eindhoven Teknik Öniversitesi'nden Prof. Dr. Peter NOTTEN, Dr. Dmitri DANILOV ve Esin İLHAN'a, maddi ve manevi desteklerinden ötürü başta Enes KILINÇ olmak üzere tÖm çalışma arkadaşlarıma teŐekkÖr ederim.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| KABUL | ii |
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT | vi |
| TEŞEKKÜR | viii |
| İÇİNDEKİLER..... | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | xii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xiv |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ..... | xv |
| | |
| BÖLÜM 1 | 1 |
| GİRİŞ | 1 |
| 1.1. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDAKİ PROBLEMLER..... | 3 |
| 1.2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN TARİHSEL GELİŞİMİ | 4 |
| 1.3. LİTERATÜR ÖZETİ | 6 |
| | |
| BÖLÜM 2 | 13 |
| ELEKTRİKLİ ARAÇLAR | 13 |
| 2.1. ELEKTRİKLİ ARAÇ TÜRLERİ | 13 |
| 2.1.1. Tümü Elektrikli Araçlar..... | 13 |
| 2.1.1.1. Akümülatör, Elektrik Motoru ve Diferansiyelli Sistem..... | 14 |
| 2.1.1.2. Akümülatör ve İki veya Dört Elektrik Motoru Kullanılan Diferansiyelsiz Sistem | 15 |
| 2.1.1.3. Akümülatör, Elektrik Motoru, Zincir Dişli veya Kayış Kasnaktan Oluşan Sistem..... | 15 |
| 2.1.2. Yakıt Pili Elektrikli Araçlar | 15 |
| 2.1.3. Hibrid Elektrikli Araçlar | 17 |
| 2.2. GÜNÜMÜZDE ELEKTRİKLİ ARAÇ MODELLERİ..... | 18 |
| 2.3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN BAŞLICA ELEKTRİKLİ MOTORLAR..... | 21 |

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 2.3.1. Elektrikli Motorlardan Beklenen Temel Özellikler..... | 22 |
| 2.3.2. Elektrik Motorunun Seçimi..... | 22 |
| 2.3.2.1. Doğru Akım Motorları | 23 |
| 2.3.2.2. Sürekli (Sabit) Miknatıslı Motorlar | 24 |
| 2.3.2.3. Anahtarlamalı Relüktans Motorları (ARM) | 25 |
| 2.3.2.4. Asenkron Motorlar..... | 25 |
| 2.4. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ | 27 |
| 2.4.1. Bataryalar | 27 |
| 2.4.1.1. Kurşun-Asit Bataryalar | 28 |
| 2.4.1.2. Nikel-Kadmiyum Bataryalar | 28 |
| 2.4.1.3. Nikel-Metal Bataryalar..... | 29 |
| 2.4.1.4. Sodyum-Sülfür Bataryalar..... | 29 |
| 2.4.1.5. Lityum-İyon Bataryalar..... | 30 |
| 2.4.2. Süperkapasitörler..... | 31 |
| 2.4.3. Volanlar | 31 |
| 2.4.4. Yakıt Pilleri..... | 32 |
| 2.5. EVİRİCİLER..... | 32 |
| 2.5.1. PWM Eviriciler | 34 |
| | |
| BÖLÜM 3 | 35 |
| MATLAB PROGRAMI İLE ELEKTRİKLİ ARACIN MODELLENMESİ | 35 |
| 3.1. Lİ-İYON BATARYA MODELİ..... | 36 |
| 3.2. ASENKRON MOTOR MODELİ..... | 37 |
| 3.2.1. Asenkron Motorda Koordinat Dönüşümleri | 38 |
| 3.2.2. Asenkron Motorun Modeli | 41 |
| 3.3. ALAN YÖNLENDİRMELİ KONTROL YÖNTEMİ | 44 |
| 3.4. BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ..... | 47 |
| 3.5. SÜRÜCÜ MODELİ | 48 |
| 3.6. KUVVETLERİN HESAPLANMASI VE DÖNÜŞÜMLER | 52 |
| 3.6.1. Yuvarlanma Sürtünme Kuvveti..... | 53 |
| 3.6.2. Havanın Sürtünme Kuvveti..... | 53 |
| 3.6.3. Yokuş Direnci Kuvveti..... | 54 |

| | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| 3.6.4. Hızlanma (İvmelenme) Kuvveti..... | 54 |
| 3.6.5. Toplam Kuvvetin Hesaplanması ve Dönüşümler..... | 54 |
| 3.7. REJENERATİF FRENLEME | 55 |
| 3.8. MODELLEME SONUÇLARI..... | 57 |
| | |
| BÖLÜM 4 | 68 |
| SONUÇ VE ÖNERİLER..... | 68 |
| | |
| KAYNAKLAR..... | 70 |
| EK AÇIKLAMALAR A. PROGRAM KODLARI..... | 75 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 79 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | | |
|-------------|--|----|
| Şekil 1.1. | Nüfus ve araç büyüme grafiği. | 3 |
| Şekil 1.2. | Geçmişten günümüze elektrikli araçlar. | 5 |
| Şekil 2.1. | Tümü elektrikli araç..... | 14 |
| Şekil 2.2. | Yakıt pilli elektrik araç modeli..... | 16 |
| Şekil 2.3. | Hibrid elektrikli araç..... | 17 |
| Şekil 2.4. | Fiat Doblo EA. | 18 |
| Şekil 2.5. | Ford Focus Electric..... | 19 |
| Şekil 2.6. | RAV4 EA. | 20 |
| Şekil 2.7. | Honda Fit EA..... | 20 |
| Şekil 2.8. | Tesla model S EA. | 21 |
| Şekil 2.9. | Asenkron makinanın kesiti..... | 26 |
| Şekil 2.10. | Lityum iyon bataryanın iç yapısı. | 30 |
| Şekil 2.11. | Üç fazlı evirici modeli. | 33 |
| Şekil 3.1. | Elektrikli araçta elektrik motorunun kontrol blok şeması..... | 36 |
| Şekil 3.2. | Açısal hız-moment düzleminde asenkron motorun dört çalışma bölgesi. | 38 |
| Şekil 3.3. | Clarke dönüşümü. | 39 |
| Şekil 3.4. | Park dönüşümü. | 40 |
| Şekil 3.5. | Ters Park dönüşümü. | 40 |
| Şekil 3.6. | Ters Clarke dönüşümü. | 41 |
| Şekil 3.7. | Asenkron makinanın basitleştirilmiş modeli..... | 42 |
| Şekil 3.8. | Asenkron makinanın çalışma aralığı. | 42 |
| Şekil 3.9. | Alan yönlendirmeli kontrol (FOC) metodunun blok şeması..... | 46 |
| Şekil 3.10. | Evirici durumları ve referans vektörün sabit referans ekseninde gösterimi..... | 49 |
| Şekil 3.11. | Anahtar konumlarına karşılık gelen gerilim vektörleri..... | 50 |
| Şekil 3.12. | Birinci sektörde gerilim referans vektörü için anahtarlama sinyalleri..... | 51 |
| Şekil 3.13. | Referans vektörün bileşenleri ve anahtarlama süresinin gösterimi. | 51 |

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 3.14. Bir araca etki eden kuvvetler. | 53 |
| Şekil 3.15. PI ile hızların zamana göre değişimi (ECE15). | 58 |
| Şekil 3.16. Bulanık mantık ile hızların zamana göre değişimi (ECE15). | 59 |
| Şekil 3.17. Elektrikli aracın hızı ile referans hız arasındaki fark (PI). | 60 |
| Şekil 3.18. Elektrikli aracın hızı ile referans hız arasındaki fark (Bulanık Mantık)... | 60 |
| Şekil 3.19. Bataryadaki enerjinin zamana göre değişimi (PI)..... | 61 |
| Şekil 3.20. Bataryadaki enerjinin zamana göre değişimi (Bulanık Mantık)..... | 62 |
| Şekil 3.21. SOC'ın zamana göre değişimi (PI). | 63 |
| Şekil 3.22. SOC'ın zamana göre değişimi (Bulanık Mantık)..... | 63 |
| Şekil 3.23. Hızlanma, yavaşlama ve sabit hız anındaki değişimler (PI)..... | 64 |
| Şekil 3.24. Hızlanma, yavaşlama ve sabit hız anındaki değişimler (Bulanık Mantık)..... | 65 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| Çizelge 3.1. Sabit hızlarda km başına enerji tüketimi. | 66 |
| Çizelge 3.2. Sabit hızlarda gidilebilecek maksimum menzil. | 66 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

| | |
|------|------------------|
| A | : Amper |
| Ah | : Amper saat |
| HP | : Beygir gücü |
| Hz | : Hertz |
| Km | : Kilometre |
| Km/h | : Kilometre/saat |
| Kg | : Kilogram |
| kW | : Kilo watt |
| kWh | : Kilo watt saat |
| N | : Newton |
| V | : Volt |
| W | : Watt |
| Wh | : Watt saat |

Alt indisler:

| | |
|------|----------------------|
| a | : a eksenini |
| ad | : Havanın sürtünmesi |
| b | : b eksenini |
| batt | : Batarya |
| c | : c eksenini |
| C | : Coulomb |
| d | : d eksenini |
| hc | : Yokuş direnci |
| k | : Bölge numarası |
| L | : Yük |

| | |
|------------|-------------------------|
| La | : Lineer hızlanma |
| m | : Motor |
| q | : q eksen |
| r | : Rotor |
| ref | : Referans |
| rr | : Yuvarlanma sürtünmesi |
| s | : Stator |
| s α | : Statorun alfa eksen |
| s β | : Statorun beta eksen |
| sd | : Statorun d eksen |
| sq | : Statorun q eksen |
| te | : Çekiş gücü |

KISALTMALAR

| | |
|------|--|
| AC | : Alternatif Akım |
| ARM | : Anahtarlama Relüktans Motor |
| CSI | : Akım Kaynaklı Evirici |
| DC | : Doğru Akım |
| DSP | : Dijital Sinyal İşlemcisi |
| EA | : Elektrikli Araç |
| EMI | : Elektro Manyetik Girişim |
| FOC | : Alan Yönlendirmeli Kontrol |
| GM | : General Motor |
| HEA | : Hibrid Elektrikli Araç |
| İYM | : İçten Yanmalı Motor |
| IGBT | : Yalıtılmış Kapılı Bipolar Transistor |
| MDS | : Magneto Dinamik Sistem |
| PI | : Oransal İntegral |
| PSO | : Parçacık Sürü Optimizasyonu |
| PWM | : Darbe Genişlik Modülasyonu |
| SM | : Sürekli Miknatıslı |
| SOC | : Şarj Durumu |

SVPWM : Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu
VRLA : Valf Ayarlı Kurşun Asit
VSI : Gerilim Kaynaklı Evirici

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Ulaşım, insanoğlunun eski çağlardan beri temel ihtiyaçlarından birisidir. Özellikle yaşadığımız yüzyılda bu ihtiyaç daha da artmıştır. Mevcut taşıt teknolojileri, fosil kökenli yakıtlara büyük oranda bağımlıdır. Fosil kökenli yakıtların kullanımının uzun dönemde insanlık için iki açıdan tehdit oluşturacağı öngörülmektedir. İlk tehdit, sınırlı rezervlere sahip özellikle petrol ve doğal gaz gibi yakıtların azalmasına bağlı olarak artan maliyetler ve neticesinde sosyal ve ekonomik etkilerin büyüklüğüdür. İkinci tehdit ise fosil kökenli yakıtların kullanılması sonucu ortaya çıkan zararlı emisyonlar ve sera gazlarının çevre üzerine etkileridir.

Egzoz gazıyla çevreye yayılan kurşun elementi, petrol türevleri yakıldığında ortaya çıkan zehirli gazlar önemli ölçüde çevre kirliliğine yol açmaktadır. Son yıllarda motorlu araç sayısının hızlı artışı ve petrol kaynaklarının tükenme noktasına gelmesiyle farklı tahrik sistemleri kullanarak araçlar hareket ettirilme araştırmaları hızla artmaktadır [1-3].

Artan taşıt sayısı, yakıt tüketimi ve hava kirliliği özellikle son yıllarda araştırmacıları Elektrikli Araçlarla (EA) ilgili çalışmalara yönlendirmiştir. Çevreyi koruma ve enerji tüketimini azaltma çabalarının artışı da EA'larla ilgili çalışmalara yönelimi ve EA'ların gelişimini hızlandırmıştır [4]. Bu sebeple dünyada birçok araştırmacı ve üniversite, özel sektör veya hükümet destekli olarak motorlu taşıtlarda alternatif enerji sistemleri üzerine araştırmalarını sürdürmektedir.

EA'lar, atık gazlar yaymamaları ve motor yağı kullanmamalarından dolayı çevre dostu olmalarının yanında mekanik vites kutusuna ihtiyaç duymamaları, frenleme esnasında enerjiyi geri kazanabilmeleri, sessiz çalışmalarını gibi özellikleri ile içten yanmalı motorla çalışan otomobillere karşı önemli avantajlar sağlamaktadırlar [5].

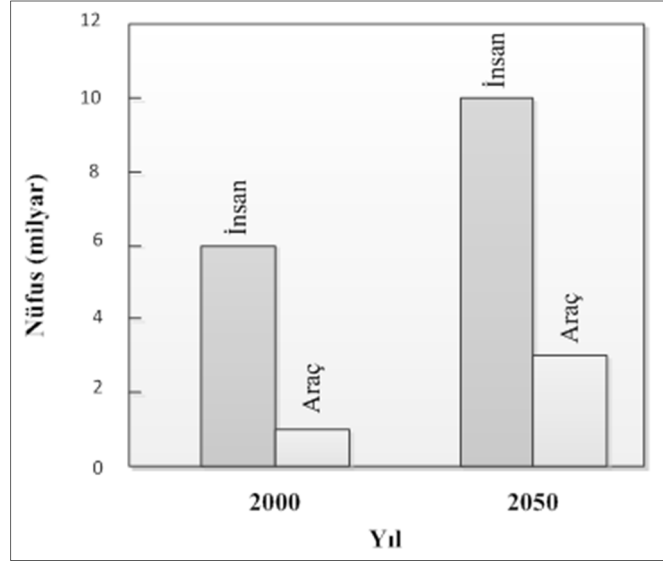
Ulaşım sektörü kaynaklı zararlı emisyonların azaltılması ve petrole bağımlılığın ortadan kaldırılması için en kısa vadeli çözüm EA'lar olarak görülmektedir.

EA'ların üretimi üzerine 1882'den beri çalışmalar yapılmasına rağmen maliyet ve yeterli enerji depolanmama sorunu gibi nedenlerden dolayı ticari olarak geleneksel araçlar ile yarışabilecek seviyede değildir [3]. Son yüzyılda enerji krizinin ortaya çıktığı bazı dönemlerde gündeme gelmiş olmasına rağmen krizin aşılmasıyla birlikte güncelliği azalmıştır. Günümüzde EA'lar için araştırmalar elektrik tahrik motoru ve enerji depolanması üzerine yoğunlaşmıştır.

EA'ların gelecekte kullanımının artmasına yol açacak etkenler özetle aşağıda verilmiştir [3]:

- Ulaşım maliyetlerinin azaltılması,
- Fosil kökenli yakıtların kullanımının azaltılması,
- Özellikle kentlerde hava kirleticilerinin azaltılması,
- Global ölçekte sera gazı oluşumunun bertaraf edilmesidir.

Şekil 1.1'de nüfus ve araba sayısı arasındaki tahmini değişim görülmektedir. Sonraki 40 yıl içinde dünya nüfusunun yaklaşık olarak 10 milyar olması beklenirken tahmin edilen araç sayısı ise 2,5 milyar olacaktır [6]. Eğer bütün bu araçların içten yanmalı motorlar tarafından tahrik edildiği düşünülürse, ihtiyaç duyulan petrolün nereden karşılanacağı, emisyon salınımının nereye gideceği ve gökyüzünün sürekli olarak gri renkte olmasının istenip istenmediği gibi soruların cevapları, yenilenebilir karayolu taşımacılığı için insanları mücadeleye zorlamaktadır.



Şekil 1.1. Nüfus ve araç büyüme grafiği [6].

Çevreyi koruma ve enerji tasarrufu gibi kaygıların arttığı bir dönemde EA teknolojisindeki gelişim, bu ihtiyaçları karşılamak için önemli bir görev üstlenmiştir. Çevresel atıklara neden olan ve insan sağlığına büyük ölçüde zarar veren içten yanmalı motorlu taşıtların yerine EA'lar kentsel ulaşımında kullanılabilir. EA'ların ihtiyaç duyduğu yakıtın sağlandığı enerji santrallerinden kaynaklanan emisyonlar dikkate alındığında EA'ların kullanımı küresel hava kirliliğini önemli ölçüde azaltabilir. Ayrıca EA'lar yüksek teknolojiye teşvik, yeni sanayi ortamı oluşturma ve ekonomik gelişmenin yanı sıra enerji, çevre ve ulaşım üzerinde büyük bir etkiye sahip olacaktır [7-9].

1.1. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDAKİ PROBLEMLER

Otomotiv üreticileri, müşterilerinin talep ettiği gibi yakıt tüketimi veya yakıt maliyeti daha az olan araçlar üretmeye çalışmaktadırlar. EA'lar yavaşlarken veya yokuş aşağı iniş sırasında kaybedilen enerjinin bir bataryada depolanarak gerektiğinde araç sürüşü için tekrar kullanılması istenir. Elde edilen bu geri kazanım, elektrik makinasının ne kadar iyi kontrol edildiğine bağlıdır [2,10]. Bu yapılan kontrol ise araçta kullanılan elektrik motorun/jeneratörün ve güç kaynağının yapısına, kontrol yöntemine ve yol şartlarına bağlıdır.

Yapılan çalışmalarda aracın gerçek veriminin ve sürüş koşullarının tespiti için mekanik ve elektriksel hesapların birlikte yapılması gerekmektedir. Ayrıca EA, sıfır emisyon ve diğer avantajları yönünden son yıllarda özel ilgi görse de şu özelliklere sahip olmalıdır: sürekli ve elverişli tepki, çalışma anında yüksek verim, frenleme esnasında enerji geri kazanımı, tekerlere yüksek güç aktarımı, farklı tahrik sistemleri ile montaj yeteneği, bakım masraflarının azaltılması, güvenilirlik, düşük başlangıç maliyeti, daha az gürültü, düşük ağırlık ve hacim, basit soğutma sistemi ve hızlı dinamik cevap [10,11].

Bir EA'nın tahrik sistemi temel olarak elektrik enerjisi kaynağı, elektrik motoru/jeneratörü ve kontrol sisteminden oluşmaktadır. EA'lar içten yanmalı araçlara göre daha kısa periyotlarda daha hızlı kontrol edilebilirler. Elektrik motorlarının moment tepkileri içten yanmalı motorlara göre yaklaşık 10-100 kat daha hızlıdır. Ayrıca elektrik motorları sessiz çalışırlar ve motor momenti tam olarak bilinebilir [5].

1.2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN TARİHSEL GELİŞİMİ

İlk EA modeli 1835 yılında Profesör Stratingh tarafından Hollanda'da yapılmıştır. 1834-1836 yılları arasında Thomas Davenport tarafından ABD'de elektrikli aracın geliştirildiği ve uygulamasının yapıldığı belirtilmektedir. Bu araç üç tekerlekli olmakla beraber şarj edilmeyen bataryalar kullanılmış ve bu sebeple ticari olarak varlık gösterememiştir. 4 yıl sonra Robert Davidson şarj edilemeyen batarya ile tahrik edilen elektrikli lokomotifini geliştirmiştir. Ancak 1859 yılında şarj edilebilir kurşun-asit bataryaların geliştirilmesi, ticari olarak satışa sunulan elektrikli araçları ortaya çıkarmıştır.

19. yüzyılın sonunda elektrik ve manyetik alanın keşfinden yararlanılarak elektrik ile çalışan araçların sayısı artmaya başlamıştır. Fosil yakıtlar ile çalışan ilk otomobillerin ortaya çıkması da hemen hemen aynı yıllara denk gelmektedir.

1890'ların sonlarında elektrikli araçlar caddelerde ve araba galerilerinde yerini almıştır. Fakat 1910'da benzin ile çalışan arabaların motorize montajının başarılması

üzerine finansmanı çok iyi olan araba üreticileri dışındaki araba firmaları yok olmuştur. Elektrikli araçların erken yok olmaları, beygir güçlerinin düşük olması ve uzun menzil ihtiyaçlarına cevap verememelerine bağlanmaktadır. O yıllarda, gürültülü çalışması ve havayı yüksek oranda kirletmesine rağmen dünya savaşları süresince, uzun menzilli olması ve yakıtının kolay bulunması nedeniyle içten yanmalı motorlu araç teknolojisi hızlı bir gelişim göstermiş, elektrik ile çalışan motorlu araç teknolojisi güç elektroniği ve bataryalar alanında yapılan gelişmelere kadar askıya alınmıştır. Elektrikli araçlarda teknolojik ilerlemeler olmasına rağmen üç temel problem aşılamamıştır: Kısa menzil, düşük hız ve yüksek üretim maliyeti. Ayrıca elektriğin alt yapısının şehir sınırları dışında hemen hemen hiç oluşmamış olması elektrikli araçlarla yolculuğun şehir sınırları içerisinde kalmasına sebep olmuştur [12-14].

1990'lardan sonra ise elektrikli araçlar üzerine çalışmalar artmıştır. Bunlara örnek olarak GM EV1, Ford Think City, Toyota RAV4, Nissan Hipermini ve Peugeot 106 Electric gibi modeller gösterilebilir. Ayrıca prototip ve deneysel amaçlı üretilmiş birçok elektrikli araçlar da bulunmaktadır. Şekil 1.2'de iki elektrikli araç gösterilerek, geçmişten günümüze elektrikli araç modellerindeki büyük değişimi görmek mümkündür. Yeni nesil EA'ların çoğunda Asenkron Motor veya Sürekli Miknatıslı (SM) Senkron Motor kullanılmıştır.



Şekil 1.2. Geçmişten günümüze elektrikli araçlar [3].

Elektrikli araçların içten yanmalı motorlarla karşılaştırıldığında en büyük problemi menzillerinin kısa olmasıdır. Ayrıca bu araçlar bataryaların yüksek ağırlıkları

nedeniyle çok ağır ve daha yavaşlardır. İçten yanmalı motorlu taşıtların tercih edilmesinin temel sebeplerinden biri de petrolün özgül enerjisinin bataryaların özgül enerjisine kıyasla oldukça yüksek olmasıdır. İçten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtın özgül enerjisi 9000 Wh/kg civarlarında iken, örneğin bir kurşun asit bataryanın özgül enerjisi 30 Wh/kg civarında bir değere sahiptir. İçten yanmalı motorun veriminin %20 civarında olduğu göz önüne alındığında içten yanmalı motor sistemine sahip bir taşıt yaklaşık 1800 Wh/kg'lık bir özgül enerjiye sahip olmaktadır. Yaklaşık %90 verime sahip olan elektrik motorunun kullanılması ile girişindeki bataryaların özgül enerjisi göz önüne alındığında ancak 27 Wh/kg civarında kullanılabilir enerjiye sahip olunacaktır [6,13,14]. Yani içten yanmalı motora sahip bir taşıtla aynı menzile sahip olabilmek için, içten yanmalı motorun yaklaşık 70 katı ağırlığa sahip bir batarya sistemi kullanılması gerekmektedir. Ayrıca bir batarya sistemini tamamen şarj edebilmek için uzun bir süre gerekirken, içten yanmalı motor için gereken yakıtın taşıta yüklenmesi birkaç dakika içerisinde gerçekleştirilebilmektedir.

1.3. LİTERATÜR ÖZETİ

Elektrikli araçların yaygın kullanımının önündeki başlıca sorunlar daha öncede belirtildiği gibi düşük menzilleri, bataryaların yüksek maliyetleri ve bataryaların kapasite sorunlarıdır. Yüksek maliyet probleminin, elektrikli taşıtlarda seri üretime geçilmesiyle; menzil probleminin ise, batarya teknolojisinin gelişimine paralel olarak kısmen çözümlenmesi beklenmektedir. Hızlı şarj edilebilme, çok büyük miktarlardaki gücü çok hızlı bir biçimde verebilme ve frenleme enerjisinden de verimli bir biçimde istifade edebilme kabiliyetinin de geliştirilmesi gerekmektedir.

Elektrikli araçların tahrik sisteminde kullanılan asenkron motorlar üzerine yapılmış birçok çalışma gözden geçirildiğinde görülen belli başlı bazı gelişmeler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Asenkron motorun patenti 1888 yılında alınmıştır. 1891 yılında da yeni tip elektrikli çekiş motoru çalışmalarına başlanmıştır. Charlottenburg'da Siemens-Halske şirketi tarafından çift fazlı teller ve raylar ile deney düzeneği yapılmış ve bu deney

düzenine 550 V uygulanarak sistem deneysel bir araç üzerinde gerçekleştirilmiştir. Asenkron motor uygulanması hakkında en kapsamlı faaliyetler Kalman Kando girişimiyle Budapeşte Ganz Fabrikasında yapılmıştır. İlk deneysel donanım, Kobanya Fayton Fabrikası yakınlarında 800 metre uzunluğunda 1 metre çapında deneme pistine kurulmuştur. Burada iki akslı bir araç 9 kW, 500 V, 42 Hz iki fazlı asenkron motor tarafından sürülmüştür [15].

Chan ve Lo 1987 senesinde, EA'larda kullanılan gelişmiş AC tahrik sistemleri üzerine çalışma yapmışlardır. Sistem Asenkron Motor, PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) transistörlü invertör, değişken oranlı dişli kutusu ve kontrol birimlerinden oluşmaktadır. Bu çalışmada elektrikli aracın performansını optimize edebilmek için kontrol stratejisi üzerinde durularak sürücü sisteminin özellikleri tartışılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kontrolörün, elektrikli aracın performansını iyileştirmek için batarya enerjisinin kullanımını en üst düzeye çıkarabildiği tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlar, kontrolörün güvenilir, sağlam ve maliyeti düşük olması gibi avantajlarının yanında kontrol stratejisinin son derece tatmin edici olduğunu göstermiştir [16].

Chang 1994 senesinde, mevcut EA'larda kullanılan AC tahrik motorlarını karşılaştırmıştır. AC motorların değerle teknik verilerinin parametreleri içinde verimlilik, güç yoğunluğu, moment dalgalanması, aşırı yük kapasitesi, boyut, maliyet ve maksimum motor hızı bulunmaktadır. Bu çalışma ile Asenkron Motor sürücülerinin düşük maliyetli, yüksek güvenilirlikli ve yüksek hızlı olması, düşük moment dalgalanması ve konum sensörlerinin kullanılmaması nedeniyle EA'nın tahrik edilmesi için uygun olduğu gösterilmiştir [17].

Chang ve Huang 2002 senesinde, Asenkron Motor ile tahrik edilen EA sistemini Oransal-İntegral (PI) kontrol ile gerçekleştirmişlerdir. Bir gerçek zamanlı ayarlama faktörü olarak oransal kontrol içine sistem hatası tanıtılarak sistemin dinamik performanslarını iyileştirmek için araç tahrik modelinde bilgisayar simülasyonu ve laboratuvar testleri gösterilmiştir. Sistem, duyarlılık, moment katsayısı, atalet momenti ve eğim açısı için analiz edilmiştir. Teorik duyarlılık analizinin sonuçları, önerilen kontrol algoritması olan Lyapunov'un ikinci yöntemi EA atalet momenti,

asenكرون motor momenti katsayısı ve EA yük momenti gibi parametreleri değiştirmek için geleneksel oransal ve integral kontrol algoritmasından daha az duyarlı olduğunu göstermiştir. Kontrol sistemi için kararlılık analizi değerlendirilmiş ve bilgisayar simülasyonları ile doğrulanmıştır. Deneyler ve teorik çalışma sonucunda PI kontrol metodu değişken hızlı elektrik tahrik sistemleri için önerilmiştir [18].

Yi ve Kaiqi 2005 senesinde, EA'larda Alan Yönlendirmeli Vektör Kontrolü yöntemi ile kontrol edilen Asenkron Motorun parametrik değişimlerini incelemişlerdir. Elektrikli araçlarda Asenkron Motorun parametre değişimi motorun akım ve momentinde dalgalanmalara neden olmaktadır. Diferansiyel işlemler içeren 3 fazlı asenkron motor modelini kullanan, kayma frekanslı kontrol uygulanarak yeni bir alan yönlendirmeli vektör kontrol yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem uygulanarak motorun alan zayıflama aralığında güvenli bir şekilde çalışabilmesi için birçok parametrik değişim tarafından üretilen motor hızı sınımları ortadan kaldırılmıştır. Kontrol düzeni tamamen yüksek güç ve hızda EA'nın gereksinimlerini karşılamak üzere ayarlanmıştır [11].

Elwer 2006 senesinde, yaptığı çalışmada Oransal İntegral Denetleyici (PI-Controller) parametrelerini optimize etmek için Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması kullanılarak asenkron motorlar için yeni bir yaklaşım sunmuştur. Sistem çeşitli çalışma koşullarında test edilmiştir. Motor PI kontrolörler kullanılarak hem hız hem de akımlar için kontrol edilmiştir. İlk olarak sabit yük altında motor hızı değiştirilerek test edilmiştir. Ayrıca sabit yük altında hızlanma ve yavaşlama içeren bir hız referansı kullanılarak test edilmiştir. Son olarak değişken yük ve referans hızı göre test edilmiştir. Bu testlerin sonucunda PI kontrolörde PSO'nun geleneksel yöntemlere göre daha verimli olduğu ve daha hızlı dinamik tepki verdiği sonucuna ulaşılmıştır [19].

Wang ve Chau 2007 senesinde, elektrikli araçlarda tahrik sistemi olarak kullanılan Asenkron Motordaki elektromanyetik girişimi (EMI) azaltmak için kaotik PWM evirici uygulamasını önerip uygulamışlardır. Uzay vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (SVPWM) eviricinin anahtarlama frekansını ayarlamak için bir kaotik

frekans modölatörü tasarlanmıştır. SVPWM'in anahtarlama frekansını ayarlamak için kaotik frekans modölyasyonlu bir sinyal kullanılmış ve sistemin elektrikli araçlar için kullanılan asenkron motorlardaki EMI'yi azalttığı yapılan analizler sonucunda anlaşılmıştır [20].

Deshmukh ve Joshi 2008 senesinde, iyi bir hızlanma/yavaşlama, araç parametrelerinin doğru şekilde kontrolü ve motor sürücü sisteminin daha iyi verimde çalışmasını sağlayan ve Alan Yönlendirmeli Vektör Kontrol tekniğı olarak adlandırılan yeni bir teknik üzerinde çalışmışlar ve simölyasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada birçok avantajından dolayı tahrik motoru olarak Asenkron Motor kullanılmıştır. Bu tekniğın motor sürücü sisteminin optimum performans ile kontrolünde kullanılması hedeflenmiştir. Analizler sonucunda rotor hız tepkisinin durdurma ve hızlandırma esnasında herhangi bir salınım yapmadığı tespit edilmiştir. Motor moment tepkisinin de herhangi bir dalgalanma içermediğı gözlemlenmiştir. Vektör kontrolünün Asenkron Motorlar üzerindeki hassas ve doğru kontrol gibi avantajları yakın gelecekte elektrikli araç uygulamaları için düşük maliyetli ve dayanıklı 3 fazlı asenkron motor sürücü sistemlerinin kullanılmasını sağlayacağını öngörmektedirler [21].

Li ve Hefei 2008 senesinde, yaptıkları çalışmada EA'larda Asenkron Motorun kontrolünü SVPWM ile gerçekleştirmişlerdir. SVPWM ilkesi ve algoritması analiz edilmiştir. EA için VSI invertörlü Asenkron Motor SVPWM sürücü kontrol sistemi yapılmıştır. Deney ve simölyasyon sonuçlarını teori analizi ile uyumlu çıkmıştır ve SVPWM modelinin doğru ve uygulanabilir olduğı gösterilmiştir. Dolayısıyla bu modelin EA'larda AC Asenkron Motor sürücü kontrol sistemlerinin çalışması için etkili bir yöntem olduğı tespit edilmiştir [22].

Xue at al. 2008 senesinde, yaptıkları çalışmada EA'ların tahrik sistemlerinde kullanılan altı tip elektrik makinası karşılaştırılmıştır. Verimlilik, ağırlık, maliyet, soğutma, maksimum hız, hata toleransı, güvenlik ve dayanıklılık gibi kriterler açısından Asenkron Motor, Anahtarlmalı Relüktans Motor, Sabit Miknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru, Fırçalı Doğru Akım Motoru ve Senkron Motor en uygun elektrik motor seçiminin tespiti için incelenmiştir. Analizler sonucunda Asenkron

Motorun Anahtarlama Relüktans Motordan sonra verimlilik, ağırlık ve maliyet bakımından EA'larda kullanılabilecek elektrik motor olduğunu tespit etmişlerdir [23].

Guzinski ve Abu-Rub 2010 senesinde, Asenkron Motor ile sürülen prototip EA üzerine deneyler yapmıştır. Oluşturulan sistemde bataryadan DC gerilimle beslenen 3 fazlı sincap kafesli asenkron motor kullanılmıştır. Kullanılan alan yönlendirmeli kontrol (FOC) algoritması ile moment ve akımın kapalı devre kontrolünün gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Motor hızı, hız gözlemci kullanılarak sürücü tarafından hesaplanmıştır. Yapılan deneylerin sonucunda kullanılan sürücü sisteminin modern EA'larda kullanımının pratik bir çözüm olabileceği öngörülmüş ve EA'larda diğer elektrikli motorlara nazaran sincap kafesli asenkron motorunun kullanımının daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir [24].

Khalid vd. 2011 senesinde, yaptıkları çalışmada Asenkron Motor ile sürülen EA'nın kontrolü için yeni bir asimptotik kararlı düzen önerilmiştir. Yüksek hızlı EA'nın gövde dinamiği ile birlikte Asenkron Motorun elektrikselsel ve mekanik dinamiğini içeren bir model dikkate alınarak sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan çalışma dört basamaktan oluşmaktadır. İlk olarak, motorun elektrikselsel dinamikleri ve EA'nın mekanik sistemi gibi doğrusal olmayan alt sistemlerin zincirleme bağlantılarını oluşturmak için iç kontrol döngüsü tasarlanmıştır. Motorun rotor akımının doğrusal olmayan gözlemleyiciler ile kontrolü için bölgesel kararlılık elde edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda motor modelinde $d-q$ eksenli denklemler elde edilmiştir. Mekanik (araç) ve elektromekanik (Asenkron Motor) olarak iki alt sistemin durağan özellikleri üzerine kontrolör tasarlanmıştır. Motor için stator akımları, araç için hız değerleri ölçülmüştür. Sonuçta kararlı hal bölgesinin çok geniş olduğu tespit edilmiştir. Bu kadar gelişmiş bir algoritmanın uygulanmasının gerçek zamanlı bilgisayar analiz yeteneğinin gelişmesi sayesinde mümkün olabileceği belirtilmiştir [25].

Farasat ve Karaman 2011 senesinde, EA'lar için Asenkron Motor kontrolünde hibrid sistem olarak alan yönlendirmeli kontrol ile doğrudan moment kontrolünü birlikte uygulanması üzerine bir çalışma yapmışlardır. EA'lar hızlı moment tepkisi ve yüksek

verimli sürücüye ihtiyaç duyarlar. Yapılan çalışmada sürücü performansı hızlanma, frenleme (yavaşlama) ve zayıf akı bölgesi için değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçları, hız sensörsüz sürücüsünün nominal hızın üstünde ve altında yapılacak uygulamalar için gerekli şartları yerine getirebileceğini göstermiştir. Motorun kararlı çalışmada optimum akının kullanımı sayesinde akım genliği azaltılmakta ve verimlilik artırılmaktadır. Frenleme esnasında EA'nın kinetik enerjiyi kısmen geri kazanmasıyla sistemin verimliliği artırılmıştır [26].

Huabin vd. 2011 senesinde, yaptıkları çalışmada EA uygulamaları için Asenkron Motorun sensörsüz kararlı moment izleme sorununu ele almışlardır. Sensörsüz vektör kontrolünün temel ilkeleri ve SVPWM ile analiz işlemleri yapılmıştır. Yapılan deneyler, sensörsüz vektör kontrol modelinin EA'lar için çok başarılı bir uygulama olduğunu göstermiştir. Bu sistemin, motor parametrelerinde belirsizlik olsa bile geniş hız aralığında hızlı ve iyi bir moment izleme imkânı sunduğunu tespit etmişlerdir [27].

Leijon vd. 2012 senesinde, EA'lardaki aktarma organları üzerine bir değerlendirme yapmışlardır. Sistemik bir akış açısı ile her elektrik motor türünün avantajları ve dezavantajları ele alınmıştır. Ticari EA'larda kullanılan elektrik motorları hakkında bir araştırma sunulmuştur. Çalışma sonucunda, araç üreticilerinin yeni teknolojinin paylaşımı noktasında çok tutucu olduklarını göstermiştir. Bu araştırma, tavsiye edilen bir değerlendirme planının olmaması ve parametrelerin çok sayıda olmasından dolayı farklı motorlar arasındaki karşılaştırmanın zor olduğunu göstermiştir. Piyasadaki EA'ların teknik açıdan değerlendirilmesiyle henüz bir teknoloji standardının oluşturulamadığı görülmüştür. EA' larda tahrik sistemi için en çok Asenkron Motorun kullanıldığının belirtilmesine rağmen anlık performansının düşük olduğu vurgulanmıştır. EA'ların performansını ölçebilmek için galon başına mil veya litre başına kilometre gibi bir eşdeğer yoktur. Tüketilen ilk galon ile tankta kalan son galon arasında verimlilik ve özellik açısından hiç bir fark yok iken EA'lardaki kalite SOC'a bağlıdır. EA'larda verimlilik SOC ile azalırken batarya ömrünün güç stratejisine bağlı olduğu görülmüştür. Rejeneratif frenleme verimliliği artırır fakat batarya ömrünü azaltır. Araştırmacılar, bataryadaki son gelişmelerin EA'ların

başarısını artıracakını ve enerji yoğunluğu ile fiyatın EA'ların geleceğini etkileyeceğini tahmin etmektedirler [28].

Bu çalışmada ise farklı sürüş çevrimlerinde Asenkron Motor ile sürülen bir EA modeli kullanılmış ve Asenkron Motor, Alan Yönlendirme Kontrol metodu ile denetlenmiştir. Sürücü sistemi olarak SVPWM kullanılarak gerilim kontrolü yapılmıştır. Tahrik motorunun hızı PI ve Bulanık Mantık metotlarıyla kontrol edilmiştir. Yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak kullanılan kontrol yönteminin tahrik motorunun performansını etkilediği göz önünde bulundurularak iki ayrı kontrol yönteminin uygulanmasıyla sırasıyla SOC, bataryanın enerjisi ve EA'nın hızındaki değişimler incelenmiştir. Elde edilen modelleme sonuçlarında Bulanık Mantık Kontrol yönteminin PI kontrol yöntemine göre daha verimli bir şekilde referans hız değerini takip ettiği ve rejeneratif frenleme esnasında daha fazla enerjinin geri kazanıldığı tespit edilmiştir. Elde edilen sayısal verilerin analiziyle hız kontrolünde Bulanık Mantık yöntemi uygulanan bir EA'nın daha fazla menzile sahip olacağı görülmüştür.

BÖLÜM 2

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Elektrikli araç sistemi, elektrik makinası, güç konvertörü, enerji kaynağından ve mekanik sistemden oluşmaktadır. İtici gücü olarak elektrik makinası ve sürücüler; enerji sistemini ise batarya ve ultra kapasitörler oluşturur. Enerji kaynağı olarak elektrik enerjisi kullanılır [8]. EA'larda fiyatı düşürmek ve sürüş mesafesini arttırmak için ileri teknolojiler kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin elektrikli itici güç sistemini geliştirmek için elektrik motorları kullanılmıştır.

2.1. ELEKTRİKLİ ARAÇ TÜRLERİ

EA'larda araç içerisine yerleştirilmiş enerjinin üretimi ve dağıtımını tahrik sistemi elemanları ile birlikte yapılmaktadır. Sistem içerisindeki elemanların birbirine bağlanma şekillerine ve enerji akışındaki farklılıklarına göre tahrik sistem yapısı tanımlanmıştır. Elektrikli araçlardaki teknolojiler sırasıyla bataryalı elektrikli araç (tümü-elektrikli), birden fazla tahrik gücüne sahip hibrit elektrikli araçlar ve bataryalı ya da bataryasız yakıt pilli araçlardır [6,14].

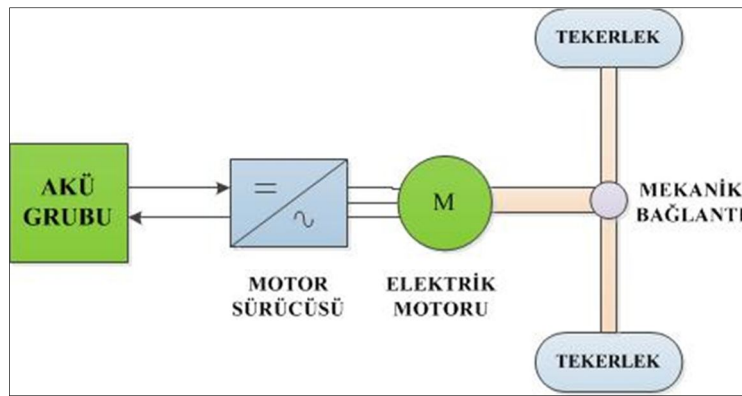
2.1.1. Tümü Elektrikli Araçlar

Elektrikli araçlar enerjiyi aldığı yere göre:

- Enerjiyi doğrudan hattan alarak (tren, trolleybüs, tramvay, yeraltı treni gibi) çalışanlar,
- Enerjiyi depolanmış bir sistemden kullanarak (bataryalı araçlar, ultra kapasiteli araçlar gibi) çalışanlar

olmak üzere gruplandırılabilir.

Tümü elektrikli araçlarda tekerlek, elektrik motoru tarafından hareket ettirilmekte, elektrik motorunun dönmesi için gerekli olan elektrik enerjisi bataryalardan elde edilmektedir. Elektrik motorunun hareketi ise aktarma organı ile tekerlere iletilmektedir. Ana bataryaya yardımcı güç kaynağı olarak ikinci bir batarya veya ivmelenme ve yokuş çıkma gibi ani güç gereksinimlerinde süper kapasitör kullanılabilir [29]. Şekil 2.1’de tümü elektrikli aracın blok şeması verilmiştir. Sistem, akü grubu, motor sürücüsü, elektrik motoru ve tekerlerden meydana gelmektedir.



Şekil 2.1. Tümü elektrikli araç.

Tümü elektrikli araçlarda sadece elektrik makinası kullanılması sebebiyle bu araçlar sessiz çalışmaktadır. Elektrik makinası, rejeneratif frenlemeden gelen enerjiyi bataryada depolamak için jeneratör olarak kullanılmaktadır. Böylece enerji deposu olarak kullanılan batarya, ya şebeke ya da rejeneratif frenleme ile şarj edilebilmektedir. Yakıt maliyeti de dâhil olmak üzere bakım maliyeti klasik araçlara göre çok daha düşüktür [30,31].

Tahrik sistemlerine göre tümü elektrikli taşıtlar aşağıdaki gibi gruplandırılabilir.

2.1.1.1. Akümülatör, Elektrik Motoru ve Diferansiyelli Sistem

Bu sistem içten yanmalı motorlarda kullanılan klasik sistemdir. İçten yanmalı motor ve yakıt deposunun yerini, elektrik motoru ve bataryalar almıştır. Elektrik motoru, hız kontrol sitemi ile kontrol edildiğinden vites kutusu kaldırılmıştır. Motor dönüş

hareketini, çekiş yapan tekerleklere iletmek amacı ile mekanik bir diferansiyel kullanılmaktadır [23,32].

2.1.1.2. Akümülatör ve İki veya Dört Elektrik Motoru Kullanılan Diferansiyelsiz Sistem

Bu sistemde çekiş yapan iki tekerlek (öndeki veya arkadaki çift) veya dört tekerlek bağımsız birer motor ile doğrudan tahrik edilmektedir. Elektrik motorlar için uygun kontrol kuralları belirlenerek aracın farklı yol şartlarında optimum çekiş sağlamanın yanında mekanik aktarma organlarının kullanılmamış olması verimi ve güvenilirliği arttırırken bakım ihtiyacını da azaltmaktadır.

Tümü-elektrikli ve seri-hibrid sistemlerde araç tahriki için tekerlek içi motorların kullanımı son yıllarda giderek yaygınlaşmaktadır. Bu yapıda, iki veya dört adet tekerlek-motoru kullanılarak aracın hareketi için gereken tahrik gücü sağlanmaktadır. Bu durumda her motor için ayrı sürücü devre kullanılması gerekir. Tekerlek-içi motor kullanılan taşıt yapısında mekanik güç aktarım elemanına gerek duyulmamakta, böylece güç aktarım organlarında oluşan mekanik kayıpların önüne geçilmektedir. Ayrıca yüksek güçlü ve büyük boyutlu tahrik motoru ortadan kalktığından dolayı araç içinde kullanılabilir hacim artmaktadır [23,31].

2.1.1.3. Akümülatör, Elektrik Motoru, Zincir Dişli veya Kayış Kasnaktan Oluşan Sistem

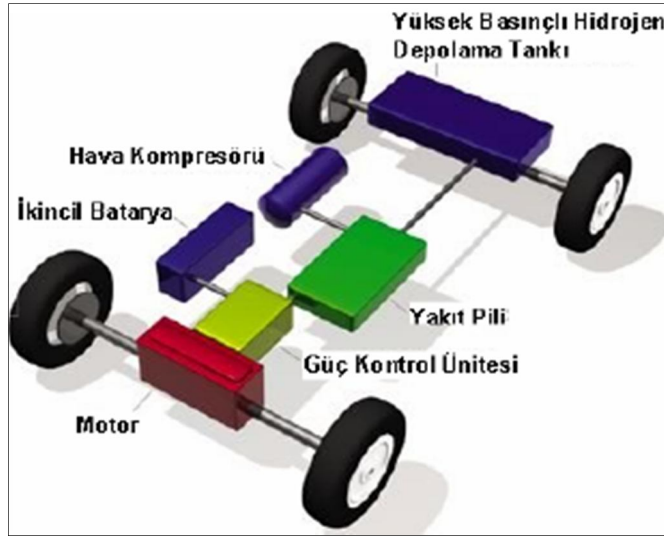
Genellikle daha küçük taşıtlarda yaygın olarak kullanılan bu sistemde, diferansiyel yerine iki teker arasında bir dişli veya kasnak bulunur ve elektrik motorundan gelen hareket, tekerleklere dişli veya kasnak ile iletilir [23].

2.1.2. Yakıt Pili Elektrikli Araçlar

Tümü elektrikli araçlardaki menzilin azlığı ve bataryanın uzun şarj süresi problemlerine karşı geliştirilen bir çözüm de yakıt pilli araçlardır. Taşınabilir bir sistem, anında elektrikli aracın ihtiyaç duyduğu enerjiyi üretmektedir. Yakıt pilli

araçta, elektrikli araçta olduğu gibi ilk anda araca ivme kazandırmak için bir elektrik enerjisini depolamaya ihtiyaç duymaktadır. Çünkü yakıt pilli araç çalışır çalışmaz taşıtın yeterli ivmeye ulaşması için gerekli enerjiyi sağlaması mümkün olmaz. Bunun yanında yeniden şarj edilebilir olmadığı içinde yakıt pili tarafından üretilen fazla enerjinin veya rejeneratif frenleme sisteminin ürettiği enerjinin depolanması için enerji depolama sistemine ihtiyaç vardır [33].

Yakıt pili ve elektrik motoru arasında gerilim değerinin yükseltilmesi amacı ile DC motor için DC-DC dönüştürücüye, AC motor için DC-AC dönüştürücüye; kontrol için mikroişlemci ya da Dijital Sinyal İşlemcisi (DSP)'ne, aşırı yükleme şartları ve rejeneratif frenleme için batarya depolama sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 2.2'de yakıt pilli araç modeli gösterilmektedir [34].



Şekil 2.2. Yakıt pilli elektrik araç modeli [34].

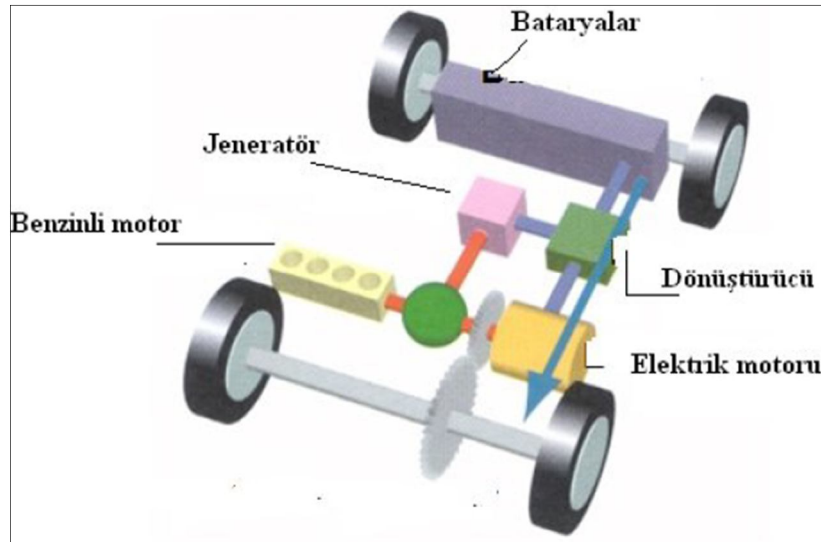
Yakıt pilli taşıtlar doğrudan enerji dönüşümlüdür ve enerji dönüşümü için hareketli parçaları yoktur, dolayısı ile kayıplar ve gürültü azdır. Enerji kullanımı ve emisyon yayını çok düşüktür. Yakıt pili teknolojisinde, günümüzdeki çalışmalar, maliyetin ve ağırlık/hacim oranının düşürülmesi ve güvenliğin artırılması üzerine sürdürülmektedir [30].

2.1.3. Hibrid Elektrikli Araçlar

Hibrid Elektrikli Araçlar birden fazla ve farklı yapılarda güç kaynağının kullanılması ile meydana gelmektedir. Literatür tanımlamasına göre HEA, enerjinin iki ya da daha fazla enerji deposundan sağlandığı ve bu enerji depolarından en az bir tanesinin elektrik enerjisi verdiği bir araç olarak ifade edilmiştir [3].

Hibrid elektrikli taşıt sistemleri, taşıtın tahrik edilmesinde içten yanmalı motorun yanında bir elektrik motoru ve bataryanın kullanılması ile birlikte yakıt tüketimini, buna bağlı olarak da içten yanmalı motorun olumsuz çevresel etkilerini önemli oranda azaltmaktadır. Ayrıca, elektrik makinası ve bataryanın kullanılması ile birlikte frenleme anlarında ortaya çıkan enerji geri kazanılabilir, bu sayede de yakıt tasarrufu artmaktadır.

Şekil 2.3'te gösterildiği gibi hibrit elektrikli aracın alt elemanları şunlardır: İçten yanmalı motor, aktarma organı, elektrik motoru/jeneratörü, evirici, yakıt tankı, bataryalar. Özellikle elektrik motoru şehir içi kullanımlarında hibrid elektrikli araçlar için önemli ölçüde avantajlar sağlamaktadır.



Şekil 2.3. Hibrid elektrikli araç [3].

2.2. GÜNÜMÜZDE ELEKTRİKLİ ARAÇ MODELLERİ

1990 yılından sonra birçok araç üreticisi elektrikli araç geliştirmeye başlamıştır. Hali hazırda EA'lara örnek olarak GM EV1, Ford Think City, Toyota RAV4, Nissan Hipermini ve Peugeot 106 Electric gösterilebilir. Bunlarla birlikte prototip ve deneysel amaçlı üretilmiş birçok elektrikli araç daha bulunmaktadır. Bu araçların çoğu Asenkron Motor veya Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor kullanmışlardır [3].

Öne çıkan bazı elektrikli araç modelleri aşağıda tanıtılmıştır. Özellikle bu araçların seçilme nedeni ise tahrik sistemlerinde elektrik motor tipi olarak Asenkron Motoru kullanmalarıdır.

2011 yılında piyasaya sunulan Fiat Doblo EA, toplam 300 bin km'lik menzile ve 10 yıl ömre sahip batarya ile donatılmıştır. Tofaş tarafından geliştirilen Fiat Doblo EA, hızlanma durumuna göre 106 HP ile 140 HP arasında güç üreten elektrikli motor yapısına sahiptir. 0-100 km/h hızlanmasını 9,6 saniyede tamamlayan ve elektronik olarak sınırlandırıldığı için 110 km/s hıza erişebilen Fiat Doblo EA, 0-50 km/h hızlanmasını ise 3,8 saniyede tamamlayabilmektedir. 150 km'lik menzile sahip Fiat Doblo EA'nın li-iyon bataryası, hızlı şarj ile 1 saatte, ev tipi elektrik kaynaklarıyla ise 7 saatte yeniden şarj edilebilmektedir. Şekil 2.4'te gösterilen Fiat Doblo EA'nın etkileyici yönlerinden birisi gaz pedalına basıldığı anda 317 Nm'lik momentin etkisiyle sessiz ve hızlı bir şekilde ivmelenmesidir [28].



Şekil 2.4. Fiat Doblo EA.

2011 yılında satışına başlanan ve Şekil 2.5'te gösterilen Ford Focus Electric isimli elektrikli araçta 100 kW'lık Asenkron Motor kullanılmıştır. Elektrikli araç, ihtiyacı olan enerjiyi kapasitesi 23 kWh olan lityum iyon bataryalardan karşılamaktadır. Bataryalardan alınan verimi artırmak için batarya sıcaklığını düzenleyen ve ömrünü artıran gelişmiş bir ısıtma ve soğutma sistemi kullanılmaktadır. Elektrikli motor tasarımı da enerji kayıplarını ve ısı üretimini azaltabilecek bir yapıda tasarlanmıştır. Yüksek voltajlı (240 V) bataryaları şarj etmek için şarj istasyonları kurulmuştur. Hızlı şarj ile yaklaşık 3 saatte şarj edilebilmektedir. Elektrikli aracın maksimum menzili 160 km'dir. Frenleme sırasında sistemin ısı olarak kaybettiği enerjinin %90'ından fazlası tekrar kazanılarak bataryayı şarj etmek için kullanılmaktadır [28].



Şekil 2.5. Ford Focus Electric.

RAV4 EA, Toyota tarafından üretilen RAV4 SUV model aracının elektrikli versiyonudur. Toyota, ikinci nesil EA'da batarya ve güç aktarma organları için Tesla Motor ile birlikte çalışmalar yapmışlardır. 2012 yılı itibariyle satışa sunulan bu modelde tahrik sistemi için Asenkron Motor kullanılmıştır. Kapasitesi 50 kWh olan lityum iyon bataryaların %74'lük kapasitesi kullanılarak 130 ile 190 km arasında bir menzile ulaşmaktadır. RAV4 EA 60 saniye içerisinde 160 km hıza ulaşabilmektedir. Şekil 2.6'da gösterilen bu aracın üretimi ilk üç yıl için sınırlı olacaktır [28].



Şekil 2.6. RAV4 EA.

Honda Fit EA'da 92 kW güce sahip Asenkron Motor kullanılmıştır. Şekil 2.7'de gösterilen ve 2012 yılında satışa sunulmuş elektrikli araçlardan olan Honda Fit EA'nın maksimum menzili 160 km'dir. Batarya çeşitlerinden Li-iyon kullanılmıştır. Dâhili 6,6 kW'lık şarj cihazı, 240 V gerilime sahip bir sürücü kullanarak tamamen tükenmiş bir bataryayı yaklaşık 3 saat içerisinde tekrar şarj edebilmektedir. Şarj miktarını gösteren lamba yanıp sönmeye başladığında ya çoklu bilgi ekranını ya da akıllı telefon uygulaması kullanılarak Fit EA'nın sürücüleri programlanabilmektedir. Bu uygulama elektrik şirketlerinin indirimli (talebin az olduğu) saatlerinden yararlanmak istediğinizde çok kullanışlı olabilmektedir [28].



Şekil 2.7. Honda Fit EA.

Tahrik sisteminde Asenkron Motor kullanılan ve Şekil 2.8'de gösterilen Tesla Model S'in maksimum gücü 215 kW'tır. Batarya seçenekleri saat başına 42, 65, 80 kW iken menzilleri de sırasıyla 258, 370, 483 km'dir. Yedek batarya değişimi 1 dakika içerisinde mümkün olurken, toplam şarj süresi ise 45 dakika sürmektedir. Saatte 60 km hıza 5,6 saniye içerisinde ulaşabilmektedir. Maksimum hız sınırı ise saatte 130 km'dir. Sıfır emisyonundan dolayı çevre dostudur. 2011 yılının sonunda tasarımı

gerçekleştirilen diğerk bir model serisi olan Tesla Model X'in 2013 yılının sonuna doğru yollarda olması beklenmektedir [28].



Şekil 2.8. Tesla model S EA.

2.3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN BAŞLICA ELEKTRİKLİ MOTORLAR

EA'larda tekerlere iletilen moment, elektrik motoru tarafından üretildiği için EA'nın performansı tamamen tahrik motorunun moment-hız veya güç-hız karakteristiği ile belirlenmektedir. Bu özellikten dolayı da elektrik makinasının seçimi büyük önem taşımaktadır. Elektrik motorlarının elektrikli araçlarda kullanılmalarının başlıca iki sebebi vardır; elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirmek ve rejeneratif frenlemeden meydana gelen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmektir [23,35].

Elektrikli araçlarda tahrik görevini sağlayan kısım, EA'ların kalbi sayılır. EA sistemi, motor sürücüsü, şanzıman (hareketin iletilmesi, aktarma organı) ve tekerlekleri içerir. Elektrik motoru, güç konvertörü ve elektronik kontrolörden oluşan motor sürücüsü, elektrikselse itme işlemini (tahrik) sağlayan kısmın ana unsurlarıdır. Güç elektroniği ve yeni manyetik malzemelerdeki hızlı gelişmeler nedeniyle, bu sistemler her geçen gün yenilenmektedir. Sürücü sisteminin seçimi ise kullanıcının beklentilerine, aracın özelliklerine ve enerji kaynağına bağlıdır.

Yürütme işlemini sağlayan elektrikselse kısmın seçimi üç faktöre bağlıdır. Bunlar sürücü istekleri (beklentileri), araçta mecburi kullanılması gereken kısımlar ve enerji kaynağıdır. Sürücü beklentileri; hızlanma, maksimum hız, tırmanma kapasitesi ve

frenlemeyi içerir. Mecburi kısımlar, araç tipi, araç ağırlığı ve yük durumlarını kapsar. Enerji konusu ise; batarya ve kapasiteler ile bunların kullanımını içerir [9,36].

2.3.1. Elektrikli Motorlardan Beklenen Temel Özellikler

Motorlar, taşıt uygulamalarında endüstriyel uygulamalardan farklı olarak sık sık duruş ve kalkış yaparlar. Bu nedenle yüksek derecede hızlanma ve yavaşlamayı sağlamak durumundadırlar. Elektrik motorları düşük hız ve yüksek moment ile tırmanabilmeli ve yüksek hız düşük moment ile hızlanabilmelidirler. Ayrıca geniş bir hız aralığında çalışabilmeleri de gereklidir. Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorlarından temel beklentiler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yüksek ani güç ve yüksek güç yoğunluğu,
- Yüksek hızda yüksek güç ihtiyacı yanında, düşük hızda yol alma (kalkma) ve tırmanma için yüksek moment,
- Sabit moment ve sabit güç bölgelerini içeren çok geniş hız aralığı,
- Hızlı moment cevabı,
- Rejeneratif frenlemede yüksek verimlilik,
- Farklı koşullarda yüksek güvenilirlik ve dayanıklılık,
- Olabildiğince hacminin küçük, ağırlığının az olması,
- Bakım ve onarımının kolay, hızlı ve ucuz olması,
- Makul fiyatlar.

Asenkron motorlar ve sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları EA'lar için en çok tercih edilen motorlardır. En popüler güç konvertör teknolojisi ise, IGBT kullanılan invertörlerdir [35,36].

2.3.2. Elektrik Motorunun Seçimi

EA'lar söz konusu olduğunda genellikle ilk akla gelen motorlar doğru akım motorlarıdır. Bu motorların moment-hız karakteristikleri çekme ihtiyaçları için uygundur ve hız kontrolleri basittir. Doğru akım (DC) makineleri hız kontrolünün kolay olması nedeni ile uzun bir süre yaygın olarak kullanılmıştır. DC makineleri bu

avantajlarının yanında üretim maliyetlerinin yüksek olması, çalışma şartlarında kolay aşınmaları gibi dezavantajları da vardır. Ayrıca doğru akım motorları komütatör içerir ve bu nedenle sürekli bakım gerektirir.

Asenkron motorlar, komütatörsüz motor tipleri olarak çok tercih edilmektedir. Bu motorlar gelişmiş, güvenilir ve bakım gereksinimi az olan motorlardır. Ayrıca, sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları da kullanılır. Anahtarlama relüktans motorlar da basit ve sağlam yapılarından dolayı kullanılabilirler [9,37,38].

Elektrikli araç tahrik sistemlerinde başlıca dört elektrik makinası kullanılmaktadır.

- DC motor
- Asenkron motor
- Sürekli mıknatıslı motor
- Anahtarlama relüktans motoru

2.3.2.1. Doğru Akım Motorları

DA motorlar, bir manyetik alan içerisinde bulunan bir iletkenin akım geçirilmesi sonucunda, o iletkene kuvvet etmesi prensibi ile çalışmaktadır. Doğru akım motorlarının kontrolü kolaydır. Hızları rahatlıkla değiştirilebilmektedir. Bu motorların en büyük problemi, kollektörü akımla besleyebilmek için fırçalı yapının kullanılması zorunluluğudur.

DC motorlarının ana parçaları: uyarım (alan) sargısı, endüvi, kolektör ve fırçalardır. Alan kutbu, makine içinde ana manyetik akıyı üretir. Alan sargıları kutuplar üzerine sarılır ve DC uyarım akımını taşırlar. Endüvi ise manyetik kuvvet çizgileri içerisinde dönerek hareket eden, elektrik enerjisinin veya mekanik enerjinin elde edildiği silindirik kısımdır. Endüvide elde edilen gerilimi dış devreye veya elektrik enerjisini endüviye ileten birbirinden ve gövdeden yalıtılmış, bakır dilimler topluluğuna “kollektör” denir [39].

Doğru akım motorları, kolay hız değiştirme özelliklerine sahip olduğundan hız kontrolünün yapılması istenen yerlerde kullanılmaktadırlar. EA'larda tahrik için DA motor kullanılması durumunda, hız kontrol bölgesinin arttırılabilmesi için endüvi kontrolü ve alan kontrolü birleştirilmelidir [40].

2.3.2.2. Sürekli (Sabit) Mıknatışlı Motorlar

1970'li ve 1980'li yıllarda modern sabit mıknatışların gelişimi ile birçok yüksek performanslı uygulamada rotoruna sabit mıknatış yerleştirilmiş senkron motorlar, fırçalı DC motorların yerini almaya başlamıştır. Sabit mıknatışlı makinaların rotorundaki sabit mıknatışlar manyetik akının kaynağıdır. Sürekli mıknatışlı motorlar (SM) genellikle iki gruba ayrılırlar [30,35]:

- SM Senkron Motorlar: Bu makineler, asenkron makinelerdeki gibi düzenli olarak dönen stator alanına sahiptir. İndüklenen dalga şekli sinüzoidaldir.
- Fırçasız Doğru Akım Motorları: Stator sargıları ayırık zamanlarda kare dalga ile beslenirler. İndüklenen gerilim trapezoidaldir.

Senkron Motorlar

Senkron motor, frekans sabitken belirli bir yüke kadar sabit hızda çalışan bir alternatif akım motor çeşididir. Büyük güçlerde üretilebilmesi, birim güç başına maliyetlerinin diğer motor çeşitlerine göre düşük olması, artan güç ile verimlerinin yükselmesi, ayrıca bakım ve kontrol ihtiyacının az olması jeneratör olarak tercih edilme nedenleridir [2].

Sürekli mıknatışlı senkron motorun hız kontrolünde vektör kontrol yöntemi kullanılabilir. Motor sürekli senkron hızda döndüğünden vektör kontrolün uygulanmasını kolaylaştırmaktadır. Asenkron motorlara göre kayma açısının olmaması nedeniyle kontrolü daha kolaydır. Rotorunda kafes bulunmaması eylemsizliği düşürerek elektriksel cevap süresinin azalmasını sağlar. Rotor bakır kayıpları olmaması soğutma açısından SM motorlara avantaj sağlamaktadır [3].

Fırçasız Doğru Akım Motorları

Fırçasız doğru akım motoru, sargılarının anahtarlanması elektronik olarak sağlanan bir motor çeşididir. Elektronik bir denetleme mekanizmasında, yüksek akımı anahtarlama görevi gören transistörler (IGBT) ve anahtarlama zamanını ayarlayan mikro denetleyici bulunmaktadır. Fırçasız doğru akım motorlarının verimleri, fırçalı doğru akım motorlarından daha yüksektir. Tüm kontrol işlemleri stator büyüklükleri değiştirilerek yapılabilmektedir [2].

Fırçasız doğru akım motoru, yüksek güç gerektiren uygulamalarda ise doğrudan sürüş olarak adlandırılan yöntemle, sanayide ve elektrikli araçlarda kullanılırlar. Bu şekilde kullanımlarda besleme gerilimindeki dalgalanmalardan (düşüş ve yükselişlerden) kaynaklanan sorunların giderilmesi ile sağlanmaktadır [2,30].

2.3.2.3. Anahtarlama Relüktans Motorları (ARM)

ARM son yıllarda düşük ve orta güçlü tahrik sistemlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Hem statorunda hem de rotorunda çıkıntılar (kutuplar) bulunan anahtarlama relüktans motoru ucuz, basit ve imalatı kolay bir motordur. Stator sargılarından akan akımlar rotor pozisyonuna bağlı olarak uygun zamanlarda anahtarlanarak sürekli bir dönme hareketi ve döndürme momenti elde edilmektedir.

ARM'nin hata toleransı çok iyidir. Basit yapısı ve düşük rotor ataletinden dolayı ARM'ler çok hızlı ivmelenme ve çok yüksek hızda çalışabilme yeteneğine sahiptir. ARM'ler elektrikli araç tahrik sistemi için moment-hız karakteristiğini karşılamaktadırlar. ARM'nin en büyük dezavantajlarından biri moment karakteristiğindeki dalgalanması ve gürültüsüdür [3,30].

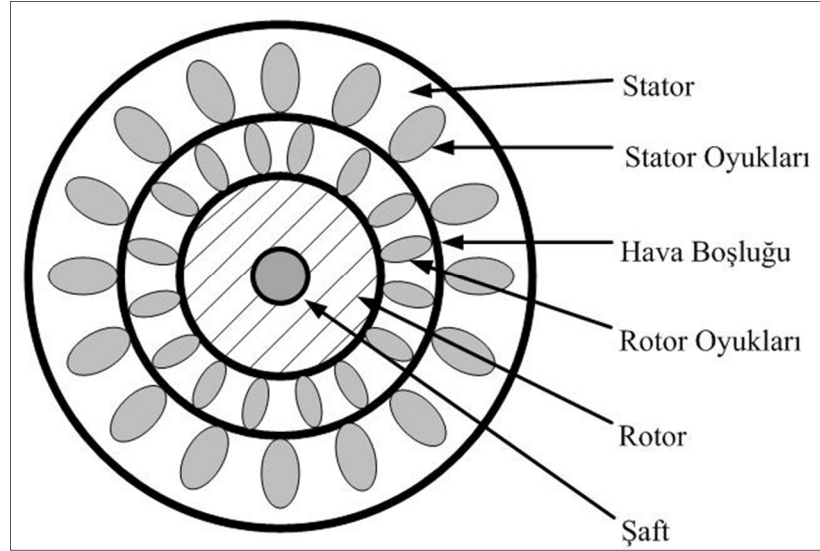
2.3.2.4. Asenkron Motorlar

Rotoru, statorun oluşturduğu endüksiyonla dönmesi sebebiyle asenkron motorlara endüksiyon motorları da denir. Asenkron motorlar dönüş esnasında elektrik arkları oluşturmazlar. Asenkron motorları senkron motorlardan ayırt eden en büyük

farklılık, sabit frekansta dönme hızlarının sabit olmamasıdır. Bu hız, motor modunda senkron hızdan küçük olup yük arttıkça azalır.

Elektrikli araç uygulamalarında sağlam yapısı nedeniyle kısa devre kafesli asenkron motorlar tercih edilmektedir. Bu motorun sakıncası, kalkış momentinin nispeten küçük ve kalkış anında akım ihtiyacının büyük olmasıdır [30].

Şekil 2.9'da kesiti gösterilen Asenkron Makina stator, rotor, gövde ve kapaklardan meydana gelmektedir. Stator sabit yani duran kısmı oluştururken rotor ise dönen kısmı oluşturmaktadır.



Şekil 2.9. Asenkron makinanın kesiti.

Çalışma Prensibi

Dışta AC gerilimin uygulandığı stator sargıları, içte ise akım taşıyan iletkenlerin bulunduğu rotordan oluşur. Stator sargısına uygulanan 3 fazlı AC gerilim, döner manyetik alan oluşturmaktadır. Manyetik alan içerisindeki döner rotor sargılarından akım geçirilir. Bu manyetik alan etkisi ve rotordaki manyetik alan etkisi rotorda dönme hareketi meydana getirmektedir [30].

Asenkron Motorun Kontrolü

Asenkron motorların hızı, ilk zamanlarda gerilim/frekans (v/f) oranının sabit tutulması prensibine dayanan klasik metod ile kontrol edilmişlerdir. Bu metod, stator frekansı ile stator geriliminin büyüklüğünün birbirlerine olan oranları sabit tutularak yapılan skalar kontrol yöntemidir [3]. Bu yöntem motorun kararlı çalışma durumu için uygundur. Fakat bu yöntem DA motorların hız kontrol performansını elde edememiştir. Asenkron motorların popülerliği vektör kontrol yönteminin bulunup uygulanmasıyla artmıştır. Vektör kontrol yöntemi, motora uygulanan gerilimin genliği ve faz açısının kontrolünü içermektedir [35]. Vektör kontrollü sürme yönteminde asenkron motorlar, DA motorlara benzer şekilde akı ve momenti bağımsız bir şekilde kontrol ederek sürülebilmektedir. En iyi dinamik performansa ulaşmak için alan yönlendirmeli kontrol yöntemi tercih edilmektedir.

2.4. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Elektrikli araçlarda hem tahrik motorunu sürmek hem de rejeneratif frenlemede elde edilen elektriği depo etmek için enerji depolama sistemlerine ihtiyaç vardır. Enerji depolama sisteminin verimliliği, elektrikli aracın verimliliğini doğrudan etkilemektedir [41]. Enerji depolama sistemlerini bataryalar, süperkapasitörler, volanlar ve yakıt pilleri olmak üzere dört ana grupta inceleyebiliriz. En yaygın olarak kullanılan enerji depolama çeşidi ise bataryalardır.

2.4.1. Bataryalar

Bataryalar, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen ve çeşitlerine göre elektrik enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürerek depolayabilen cihazlardır. Bu kimyasal dönüşüm tek taraflı ise batarya primer yapıda yani tek kullanımlık veya tekrar şarjı mümkün olmayan bir yapıya sahiptir. Dönüşüm her iki taraflı olabiliyorsa, yani elektrik enerjisi tekrar kimyasal enerjiye çevrilebiliyorsa ve bu şekilde uzun süreli enerji kullanımı sağlanabiliyorsa batarya sekonder yapıda veya diğer adıyla şarj edilebilirdir.

Bataryaların sahip oldukları elektrik enerjilerinin kullanımları sonucunda azalmasına boşalım veya deşarj denir. Bataryanın tam dolu iken sahip olduğu enerjisinin kullanılabilirlik oranı her batarya modeli için farklılık gösterir. Bu orana aynı zamanda boşalım oranı da denir ve genellikle yüzde (%) ile belirtilir. Bataryaların performansını etkileyen faktörleri şöyle sıralayabiliriz: şarj durumu (SOC), depolama kapasitesi, şarj-deşarj oranı, sıcaklık ve raf ömrüdür [2,42].

Elektrikli araç çalışmaları başladığından bu yana bataryalar en uygun enerji kaynağı olarak düşünülmektedir. Günümüzde yapısına göre birçok şarj edilebilir batarya çeşidi mevcuttur. Elektrikli araçlarda genel olarak en çok tercih edilen batarya çeşitleri; kurşun asit batarya, nikel kadmiyum batarya, nikel metal batarya, sodyum sülfür batarya ve lityum iyon bataryadır [30].

2.4.1.1. Kurşun-Asit Bataryalar

Kurşun asit bataryalar çoğunlukla sıralı altı adet hücre şeklinde, akü ismiyle otomobillerde yaygın olarak kullanılırlar. Bu tür bataryaların anot kısmı kurşundan, katot kısmı ise bir metal levha üzerine oturtulmuş kurşun dioksitten oluşmaktadır. Katot ile anot, elektrolit görevi yapan sülfürik asit çözeltisi içerisinde bulunmaktadır. Standart koşullarda bir hücre 2V'luk doğru gerilim üretebilmektedir. Kurşun asit bataryalar tekrar dolabilen bir yapıya sahiptirler.

Kurşun asit bataryalarının belirli bir kullanım ömürleri vardır. Zamanla batarya içerisindeki elektrotlarda geri dönüşü olmayan fiziksel değişiklikler oluşmaktadır ki bunlar bir süre sonra enerji depolama performansını bozmakta, daha sonra da bataryayı hiç kullanılamaz hale getirmektedir. Şarj durumundaki kazanım oranları diğer batarya modellerine göre daha düşüktür [2,3].

2.4.1.2. Nikel-Kadmiyum Bataryalar

Son yıllarda nikel-kadmiyum (Ni-Cd) bataryalar özgül enerji, özgül güç, çevrim ömrü ve güvenilirlik bakımından en iyi dengeyi sağlayan bataryalar olarak kabul edilmektedir. Nikel kadmiyum batarya, pozitif nikel elektrot, negatif kadmiyum

elektrot ve sulu elektrolit olarak potasyum hidroksitten oluşmuştur. Nikel kadmiyum bataryaları kurşun asit bataryalarına göre birim ağırlık başına bir miktar daha fazla enerji depolamaktadır.

Tam dolu iken en çok 1,44 Volt değerine ulaşabilmektedirler. Boş durumdayken 1,2 Voltun altında düşürülmemesi gerekmektedir. Verimlerinin azalmaması için 1,1 Volt geriliminde mutlaka şarj edilmelidirler [2,3].

2.4.1.3. Nikel-Metal Bataryalar

Nikel-metal hidrür bataryalar ticari olarak, 20. yüzyılın sonlarına doğru ortaya çıkmıştır. Bu bataryalarda kadmiyum elementinin yerine metal (krom, kobalt manganez ve demir) bileşeni kullanılmıştır.

Bu batarya çeşidi, Ni-Cd bataryalara göre daha yüksek enerji saklama kapasitesine sahiptir. Şarj edilmeleri Ni-Cd bataryadakine çok benzemektedir. İç dirençleri Ni-Cd bataryalardan daha düşüktür. Bu batarya çeşidi, iyi bir güç yoğunluğuna ve nominal gerilimine (1,25V) sahiptir [3,14].

2.4.1.4. Sodyum-Sülfür Bataryalar

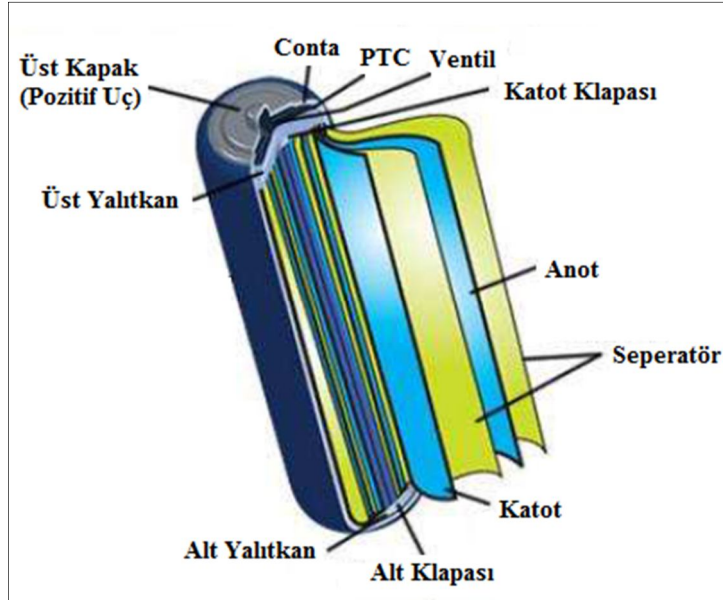
Sodyum sülfür batarya, ilk olarak 1960'li yıllarda Ford Araştırma Laboratuvarında elektrikli taşıtlarda gerekli enerji ve güç yoğunluğunu sağlamak için geliştirilmiştir. Batarya negatif sodyum elektrotundan ve pozitif sülfür elektrotundan oluşmaktadır.

Sodyum-sülfür bataryaların enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu yüksektir. Bataryanın optimum çalışma sıcaklığı 350°C'dir. 200°C'nin altında çalışması durmakta ve bu sıcaklığın altında sodyum elektrolit donmaktadır. Sodyumun donması, reaksiyonu yavaşlatarak mekanik gerilmelere yol açması nedeniyle bataryaya zarar vermektedir [3].

2.4.1.5. Lityum-İyon Bataryalar

Bu batarya çeşidi, diğer şarj edilebilen bataryalara göre daha yüksek kapasiteli ve daha verimlidir. Kendi kendine boşalmaları çok yavaştır. Lityum-iyon bataryalarda diğer bataryalardan farklı olarak hafıza etkisi bulunmaması sebebiyle en küçük kazanımlı frenleme esnasında tekrar şarj edilebilirler ve kullanılabilirler. Bu durum kullanım ömürlerini ve kullanılabilir kapasitelerini etkilememekte, diğer pillere göre daha uzun ömürlü olmalarını sağlamaktadır. Boşalmaları düzgündür ve bir anda boşalmazlar [2]. Bir yandan kullanılıp bir yandan da şarj edilebilmeleri büyük avantajdır.

Lityum aktif bir elementtir ve bu nedenle atomik bağları arasında bol miktarda enerji depolanabilir. Bu da yüksek enerji yoğunluğuna sahip bataryalar olmasını sağlar. Bu batarya çeşidinde verimli çalışma aralığı, her doluluk oranında şarj olabilmeleri, ömürlerinin diğer bataryalara göre uzun olması gibi avantajlar mevcut olduğu için EA'larda daha fazla tercih edilmelerini sağlamaktadır [3]. Şekil 2.10'da silindirik bir lityum-iyon bataryasının iç yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Lityum iyon bataryanın iç yapısı [3].

Lityum iyon bataryaların olumsuz yönleri ise öncelikle üretildikleri andan itibaren özelliklerini kaybetmeye başlamalarıdır. Özellikle aşırı sıcaklık yapısının bozulmasını hızlandırmaktadır [13]. Lityum-iyon batarya blokları, modern elektrikli araçlarda genellikle motorun ısısından en az etkileneceği arka bagaj kısmının altına yerleştirilmektedirler. Bu sayede çalışma performansları ile kullanım ömürlerinin daha uzun olması sağlanmış olur.

2.4.2. Süperkapasitörler

Kapasitörler, enerjiyi eşit pozitif ve negatif elektrostatik yüklerin ayrışmasıyla depo eden cihazlardır. Kapasitör, iki tane basit plaka olarak adlandırılan iletkenle bunları ayıran ve dielektrik olarak adlandırılan yalıtıkandan oluşmaktadır [3]. Süperkapasitörler ivmelenme ve yokuş çıkma gibi ani güç gereksinmelerinde bataryalara ya da yakıt piline yardımcı enerji kaynağı pozisyonunda da kullanılmaktadırlar.

Süperkapasitörler, klasik kapasitörlerden çok daha yüksek miktarda enerji depolayabilme özelliğine sahiptir. Şarj olma süreleri kısa ve çevrim ömürleri bataryalara göre daha fazladır. Süperkapasitörlerin çalışması kimyasal reaksiyonlara dayanmadığı için, geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilirler. Düşük sıcaklıklarda ise, biraz artan direnç kayıplarına rağmen, -40°C ' ye kadar güç verebilmektedirler [13]. Bu özelliğinden dolayı soğuk havalarda motor başlatma uygulamaları için kullanımları çok uygundur.

Süperkapasitörlerin çok düşük bir seri eşdeğer dirençle tasarlanmış olmaları, çok yüksek akımlar alıp vermelerini mümkün hale getirmektedir [43]. Bu durum, çok hızlı şarj olabilmelerine imkân sağlar ve bu da süperkapasitörleri geri kazanımlı frenleme uygulamaları için uygun kılmaktadır.

2.4.3. Volanlar

Volan veya yeni kullanılan adıyla magneto–dinamik enerji depolama (MDS) sistemi, mekanik enerjiyi depo eden bir kinetik enerji depolama ünitesidir. Volanlar, döner

bir ağırlık sayesinde kinetik enerjiyi depo eder. Volanlar elektrikli araçlarda primer enerji kaynağı olarak kimyasal bataryaların yerine veya bataryalarla birlikte kullanılabilirler. Mevcut volanların, karmaşık, büyük ve ağır olmalarından dolayı özgül enerji yoğunlukları düşüktür. Ancak çevrim ömrü, güç yoğunluğu, enerji depolama verimi oldukça yüksektir.

Volanlar, yüksek ivmelenme gibi ani güç gerektiren araç özelliklerinin geliştirilmesine oldukça uygundur. Volanların EA'larda enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi için özgül enerjisinin yüksek olması gerekmektedir [3,30].

2.4.4. Yakıt Pilleri

Yakıt pilleri, bataryalar gibi enerji depolayan elemanlar değil enerji üreten elemanlardır. Yakıt pilli araçlar, enerji kaynağı olarak sadece batarya kullanan tümü elektrikli araçlar gibi menzil ve uzun şarj süresi sorunu yaşamazlar.

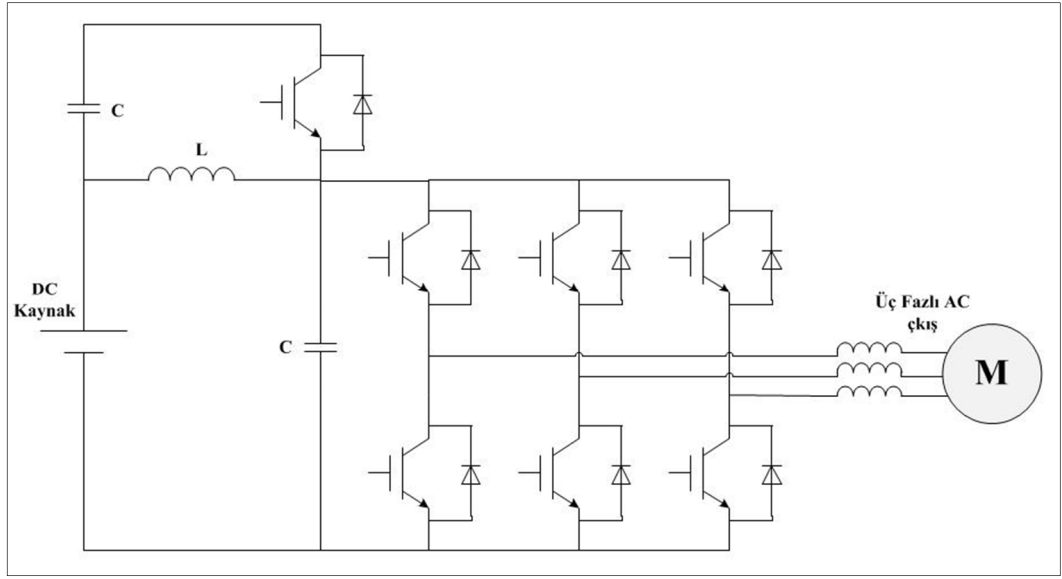
Yakıt pillerinde reaksiyona giren elementler hidrojen ve oksijendir. Yakıt pilinin çalışma mantığı, suyun elektrolizinin tersi gibi düşünülebilir. Hidrojen anot elektrotta, oksijen ise katot elektrodta gönderilir. Elektron geçişine izin vermeyen elektrolit yalnızca hidrojen iyonunun geçişine ve katot elektrotta ulaşmasına izin verir. Elektron ise harici bir devreden katoda iletilir. Katotta, buraya gönderilen O_2 , elektrolit üzerinde gelen hidrojen iyon ve dış devreden gelen elektron reaksiyona girerek çevrim tamamlanarak açığa emisyon olarak saf su çıkmaktadır. Dış devre üzerindeki elektron hareketi ise elektrik akımını oluşturur [3].

2.5. EVİRİCİLER

Eviriciler, doğru giriş gerilimini dalgalı çıkış gerilimine çeviren güç elektroniği devreleridir. Bataryalardaki DC çıkış gerilimini, genliği ve frekansı ayarlanabilen AC gerilime çevirmek için eviricilere ihtiyaç duyulmaktadır [3]. Bu sebeple Şekil 2.11'de gösterilen 3 fazlı gerilim beslemeli PWM eviriciler, elektrikli taşıt tahrik sistemlerinde Asenkron Motorun kontrolünde kullanılmaktadır. Günümüzde

anahtarlama elemanı olarak çoğunlukla yüksek güç ve frekansta anahtarlama yapabilen IGBT'ler tercih edilmektedir.

Asenkron Motor için ideal eviricinin çıkış akımı tam sinüzoidal dalga şeklinde olmalıdır. Ancak uygulamada tam sinüzoidal olmayıp harmonikler içermektedir [44]. Çıkış akımındaki harmonikler, yüksek hızlı yarı iletken anahtarların çeşitli anahtarlama teknikleri kullanılarak kontrol edilmesiyle azaltılabilmektedir.



Şekil 2.11. Üç fazlı evirici modeli.

DC hattındaki büyüklüğün türüne göre eviriciler temel olarak akım kaynaklı (CSI) ve gerilim kaynaklı (VSI) olmak üzere iki çeşittir. Gerilim kaynaklı eviriciler de akım ve gerilim kontrollü olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Eviriciler yapıları gereği iki yönlü çalışabilmektedirler. Araçtaki esas görevi, beslediği motorun ihtiyaçlarına göre istenen genlik ve frekansta, akım ve gerilimi sağlayabilmelidir.

PWM dalga şekillerinin farklı şekillerde elde edilebilmeleri için çeşitli modülasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Gerilim kaynaklı eviricilerde sinüzoidal PWM, Harmonik Eliminasyonlu PWM, Uzay vektör PWM, Histerezis Akım Kontrolü PWM, Delta Modülasyonu ve Sigma Delta Modülasyonu yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır [44].

2.5.1. PWM Eviriciler

Yüksek performanslı AC motor sürücüleri darbe genişlik modülasyonlu (PWM) gerilim beslemeli eviriciler (VSI) ile çalışmaktadır [45]. Bu yöntem kullanılarak evirici ile gerilimin kontrolü mümkündür. Eviricinin çıkış gerilimi, gerilim darbelerinin sayı ve/veya genişlikleri değiştirilerek kontrol edilir.

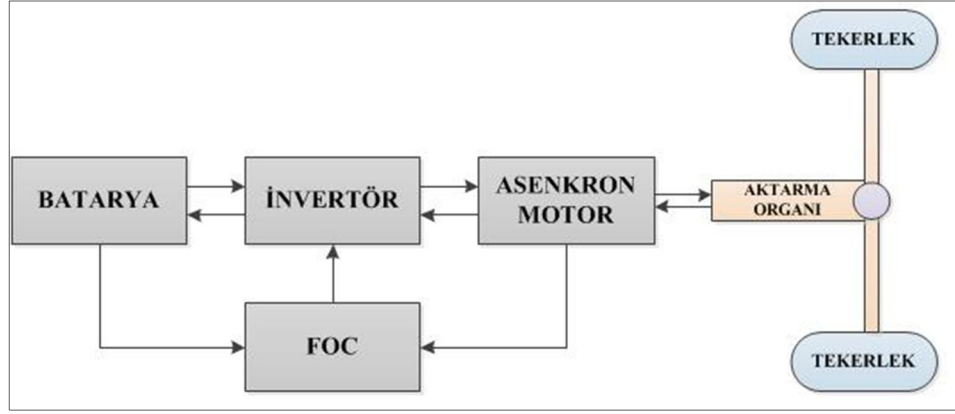
Bu evirici sistemi kendi arasında sinüzoidal PWM ve uzay vektör PWM olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Uzay vektör PWM, sinüzoidal PWM tekniğinde maksimum çıkış geriliminin düşük ve anahtarlama sayısının çok yüksek olması sebebiyle geliştirilen alternatif metotlardan birisidir. Ayrıca SVPWM, PWM tekniği ile karşılaştırıldığında sargı akımlarında ve çıkış gerilimlerinde daha az harmonik bozulma oluşturmakta ve DC kaynak geriliminin daha verimli kullanılmasına olanak sağlamaktadır [27,46]. Üç fazlı eviricinin kollarında bulunan üst ve alt anahtar aynı anda iletimde olamayacağından her kolda iki ayrı anahtar durumu olabilir. Sonuçta eviricide toplam 8 farklı anahtar durumu meydana gelmektedir [47]. Böylece her bir durum, bir uzay vektörü oluşturmakta ve oluşturulan uzay vektörleri de SVPWM yönteminde uygun sıra ile motora uygulanmaktadır.

BÖLÜM 3

MATLAB PROGRAMI İLE ELEKTRİKLİ ARACIN MODELLENMESİ

Elektrikli tahrik sistemi, elektrikli aracın en önemli kısmıdır. Sistem elektrik motoru, sürücüsü, aktarma organı ve tekerleklerden meydana gelirken, motor sürücüsü elektrik motoru, güç çevirici ve elektronik kontrolden meydana gelerek EA tahrik sisteminin çekirdeğini oluşturmaktadır [3].

Yapılan çalışmada Simulink gibi hızlı prototipleme kullanılmamıştır. Sadece denklemler, m-file ortamında Runge-Kutta 4 adımlı diferansiyel denklem çözümü yardımıyla çözümlenmiştir. Bu çalışmada oluşturulan modellemenin blok diyagramı Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Batarya, hem önceden şarj yöntemiyle doldurulan hem de jeneratör modunda çalışan motorun ürettiği elektriği depolamakta ve aracın elektrik enerjisi ihtiyacını sağlamaktadır. Yapılan çalışmada batarya çeşitlerinden Li-iyon batarya ve elektrik makinası çeşitlerinden de Asenkron Makina tercih edilmiştir. Kontrol bloğunda Asenkron Makina için Alan Yönlendirmeli Kontrol uygulanmakta olup sürücüden belirli bir referans gerilimi üretmesini talep etmektedir. İnvörtör bloğu ise uzay vektör modülasyonu ile bu referans gerilimi motora uygulamaktadır. Aktarma organı bloğunda sabit dişli geçiş oranıyla, araca etki eden kuvvetlerin motor tarafından moment, sürtünme katsayısı ve eylemsizlik momenti cinsinden algılanma biçimi modellenmiştir.



Şekil 3.1. Elektrikli araçta elektrik motorunun kontrol blok şeması.

3.1. Lİ-İYON BATARYA MODELİ

Günümüzde elektrikli taşıtlar ile ilgili sürdürülen çalışmalarda menzil ve performans artırımı, üzerinde en fazla çalışılan alanlardır. Elektrikli taşıtlarda ana kaynak olarak öne çıkan bataryalar, menzili belirleyen ana etkidir [35]. Bu sebeple mevcut batarya teknolojisi ile bir taşıtın menzilini artırmak için, taşıtın sahip olduğu batarya sisteminin kapasitesinin artırılması gerekmektedir.

Elektrik motorunun elektrik enerjisi ihtiyacının bataryalar tarafından sağlandığı göz önüne alındığında elektrik motorunun çalışma performansını ve süresini bataryaların belirlediği açıktır. Ayrıca geri kazanımlı frenleme ile üretilen elektrik enerjisi de bataryalarda depo edilerek menzilin ve performansın artırılması sağlanmaktadır.

Elektrikli araçlarda kullanılan birçok batarya çeşidi mevcuttur. Yapılan çalışmada Lityum-iyon batarya çeşidi kullanılmıştır. Bu batarya çeşidinin tercih edilmesinin başlıca sebepleri; yüksek enerji yoğunluğu, yüksek hücre gerilimi, düşük deşarj oranı ve uzun çevrim ömrü olarak sıralayabiliriz [48]. Bu batarya çeşidinin matematiksel model eşitlikleri ise şöyledir [49];

Deşarj Model ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (3.1)$$

Şarj Model ($i^* < 0$)

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0,1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (3.2)$$

| | |
|------------|--|
| E_{batt} | : Batarya gerilimi [V] |
| E_0 | : Sabit gerilim [V] |
| $\exp(s)$ | : Gerilim değerinin sınırları [V] |
| K | : Polarizasyon sabiti [Ah^{-1}] ya da Polarizasyon direnci [Ohm] |
| i^* | : Filtrelenmiş akım [A] |
| i | : Batarya akımı [V] |
| it | : Ayrıştırılmış kapasite [Ah] |
| Q | : Maksimum batarya kapasitesi [Ah] |
| A | : Değişken gerilim [V] |
| B | : Değişken kapasite [Ah^{-1}] |

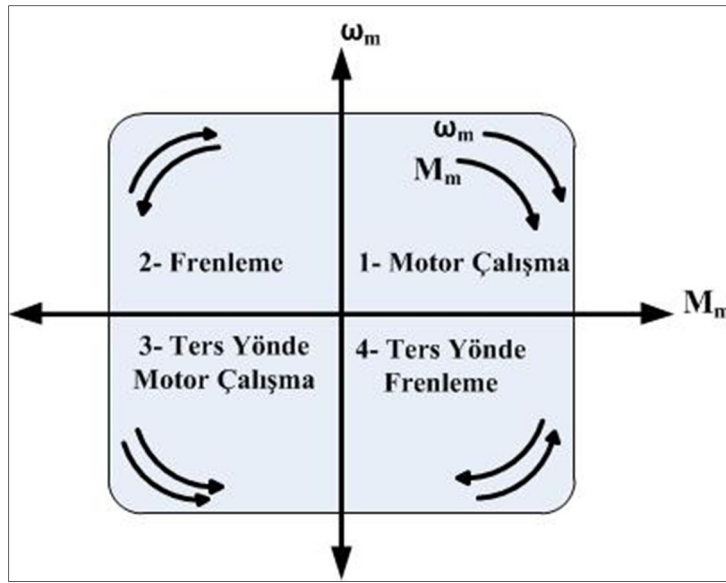
Yapılan modellemede yön (sel) olarak 1 şarj olma, 0 ise deşarj olma durumunu temsil etmektedir. Standart olarak her bir hücrenin gerilim değeri 3,2 V iken akım değeri 5 A ve kapasitesi 6,5 Ah'tir. Elektrik Makinasını sürüp EA'nın harekete geçirilmesi için % 80 kapasite ile 26 kWh'lik enerjiye sahip bir batarya bloğuna ihtiyaç vardır. Bu enerjinin karşılanabilmesi için batarya bloğu oluşturulurken öncelikle 156 hücre seri olarak bağlanmış ve bu her seri grup bir modül olarak nitelendirilmiştir. 10 adet modül paralel bağlanarak enerji depolama sistemi meydana getirilmiş ve toplamda 1560 adet hücre kullanılmıştır. Böylelikle batarya bloğunun toplam kapasitesi (Q_t) 65 Ah, toplam gerilimi (V_t) 500 V ve toplam akımı (I_t) 50 A olmaktadır.

3.2. ASENKRON MOTOR MODELİ

Asenkron motorlar farklı hız aralıklarında çalışabilmeleri, ucuz olmaları ve bakımlarının diğer motorlara nazaran daha az olmaları sebebiyle EA'larda tercih edilmektedir [50]. Yapılan çalışmada alan yönlendirmeli kontrol ile Asenkron Motor modeli kontrol edilerek motorun hem jeneratör hem de motor modlarında güvenli

akım sınırları içinde çabucak ve iyi bir enerji geri kazanımıyla istenilen hız referansına ulaşması amaçlanmıştır.

Motorun ve sürme devresinin seçimi yükün karakteristiğine bağlıdır. Elektrikli araç, sık sık hızlanan ve yavaşlayan yüksek ataletli, normal sürüş sırasında da sabit bir hızla gitmesi gereken, ani duruş ve kalkışlara gereksinim duyan bir yükür [51]. Bu nedenle tahrik motoru Şekil 3.2’de gösterilen açısal hız-moment (ω_m - M_m) grafiğinde gösterildiği gibi dört bölgede de çalışabilmelidir.

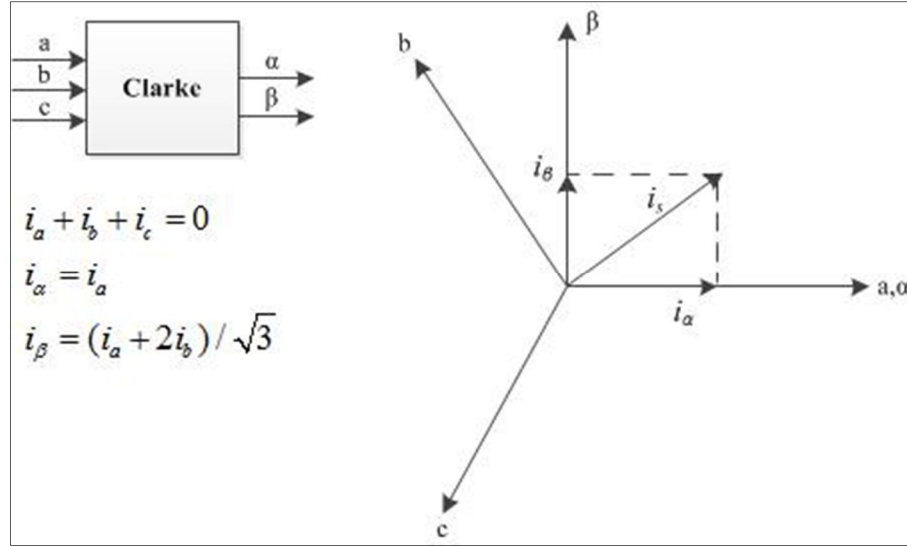


Şekil 3.2. Açısal hız-moment düzleminde asenkron motorun dört çalışma bölgesi.

3.2.1. Asenkron Motorda Koordinat Dönüşümleri

Asenkron motorların denetiminde iki faz eşdeğerlerinin kullanılması kolaylık sağlamaktadır. Üç fazlı bir sistemin iki fazlı hale dönüştürülmesiyle durgun referans çerçevesinden dönen bir referans çerçevesine geçiş yapılmaktadır [2]. Bu işlem gerçekleştirilirken gerilim, akım ve akı gibi motora uygulanan üç fazlı vektörel büyüklüklerin üç faz eksen (a, b, c) bileşenleri cinsinden ifadesi, iki faz eksen (α, β) bileşenleri şekline dönüşümü gerçekleştirilmektedir. Clarke dönüşümü denilen bu dönüşümün tersinin de alınabilmesi için α - β bileşenlerinden başka bir de “0” bileşeni tanımlanmaktadır. Burada a ve α ’nın aynı yönlü oldukları varsayılarak Şekil 3.3’e

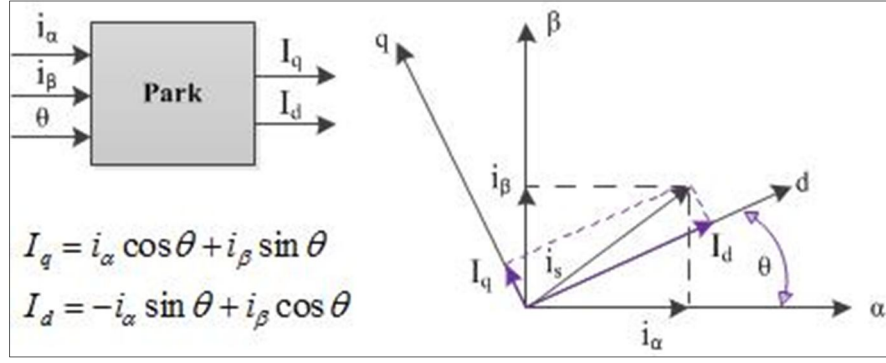
göre dönüşüm yapılmaktadır [52]. Bu durumda zaman ve hız bağımlılığı devam eden iki koordinatlı bir sistem elde edilmektedir.



Şekil 3.3. Clarke dönüşümü.

Üç fazdan iki faza ($abc \rightarrow \alpha\beta$) dönüşüm ilişkisi örnek olarak stator akım vektörü (i_s) üzerinde Şekil 3.3'te gösterildiği gibidir.

α - β eksenleri durgun olduğu ve motor vektörel büyüklükleri hızla döndüğü için vektörlerin α - β bileşenleri hızlı değişmektedirler. Bazen vektörlerle aynı hızda dönen bir koordinat sistemine göre hesap yapmak kolaylık sağlamaktadır. α - β eksenlerinden d - q eksenleri olarak adlandırılan bu eksenlere dönüşüm, Park dönüşümü olarak adlandırılmaktadır [52]. Bu dönüşüm, vektör denetiminin en önemli kısmıdır. Gerçekte, bu izdüşümü d - q dönen referans düzleminde iki fazlı bir sisteme dönüştürmektedir. d ekseninin rotor akısıyla uyarlandığını düşünürsek, diyagram akım vektörü için iki referans düzlemi arasındaki bağıntı Şekil 3.4'te gösterildiği gibi olacaktır. Asenkron motor bu dönüşüm ile artık akı ve momenti temsil eden zaman ve hızdan bağımsız iki eksenli bir koordinat sistemine aktarılmış olmaktadır.

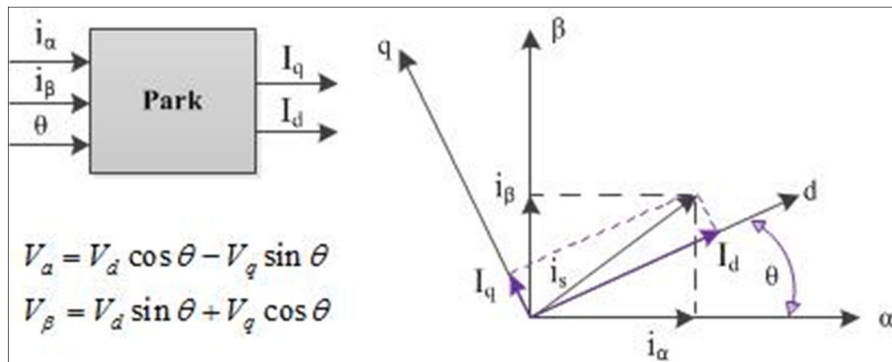


Şekil 3.4. Park dönüşümü.

Burada θ , d ekseninin α eksenine göre açısı olup dönüşüm sonucunda stator akım vektörünün elde edilişi gösterilmektedir. Bu dönüşüm ortogonaldır ve dönüşüm matrisinin tersi transpozuna eşittir. Diğer bir ifadeyle de şu şartı sağlar:

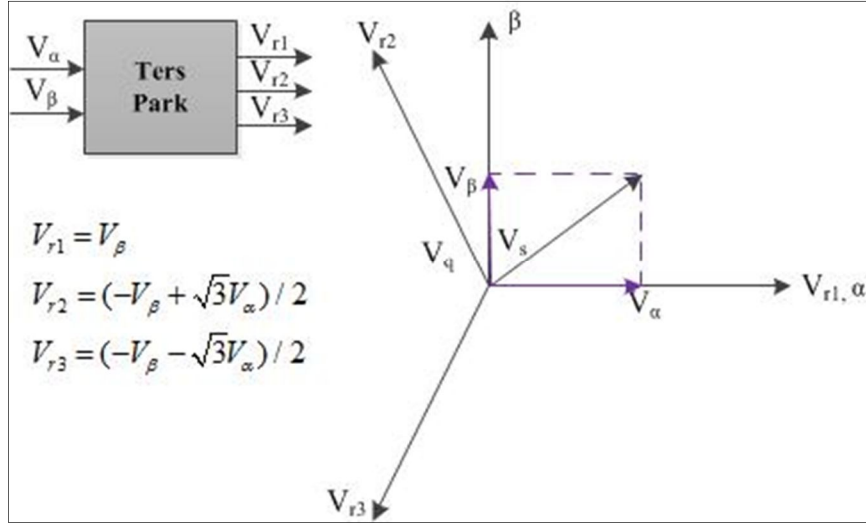
$$i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2 = i_{sd}^2 + i_{sq}^2 \quad (3.3)$$

Kontrol işleminden sonra dq düzleminde elde edilen iki gerilim vektörlerini (v_d, v_q) üç faz motor gerilimine dönüştürmek için önce iki eksenli keyfi referans düzleminde iki eksenli durağan referans düzlemine (v_α, v_β) geçirilmesi gerekmektedir [2]. Alan yönlendirmeli kontrolde bulunan ve $d-q$ eksenlerinde hesaplanmış gerilim referans vektörünün durgun $\alpha-\beta$ eksenlerine dönüşümü, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi Park dönüşümünün tersiyle yapılmaktadır [52]. Denklemdeki hesap bloğunun çıkışı motorun fazlarına uygulanan referans gerilim uzay vektörünün bileşenlerini oluşturmaktadır.



Şekil 3.5. Ters Park dönüşümü.

Son adım ise iki eksenli durağan referans düzleminde (v_α, v_β) statorun üç faz referans düzlemine yani başlangıç durumuna (v_a, v_b, v_c) geçilmektedir [52]. Bunun içinde Şekil 3.6'da gösterilen Ters Clarke dönüşümü uygulanmaktadır.

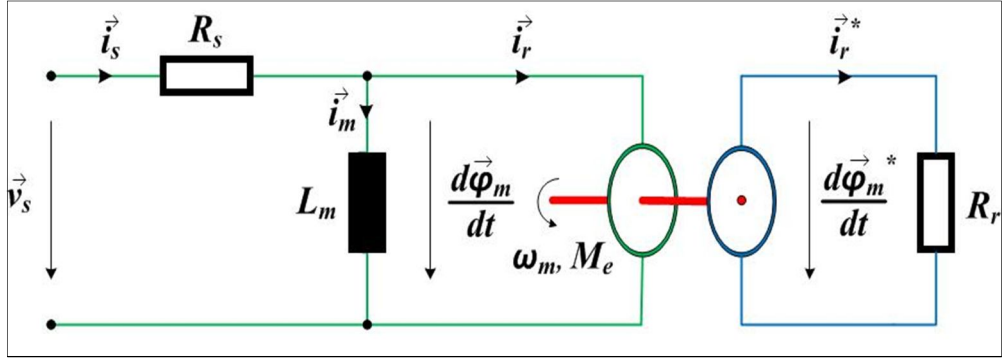


Şekil 3.6. Ters Clarke dönüşümü.

3.2.2. Asenkron Motorun Modeli

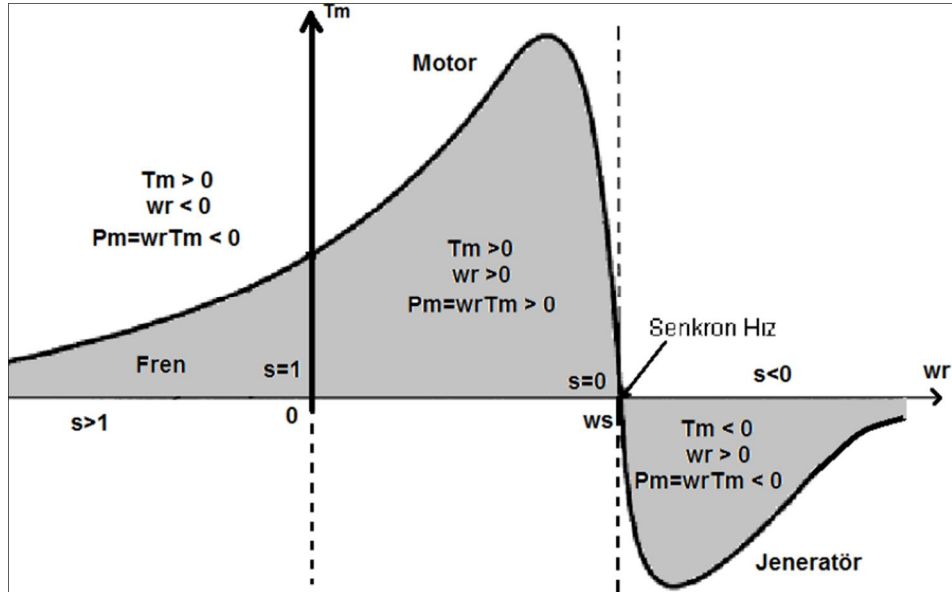
Asenkron Makine, moment ve açısal hız değerlerine göre üç ayrı modda çalışmaktadır. Bunlar frenleme, motor ve jeneratör bölgeleridir. EA'larda, motor ve jeneratör bölgelerinin sürücünün talebine göre en iyi şekilde ayarlanarak en kazançlı araç sürüşünün ve enerji tüketiminin sağlanması amaçlanmaktadır [51]. Elektrikli araçlarda asenkron motorun fren modunda çalışması pek istenmez; çünkü motorun fren modunda kullanılması için motora enerji verilmesi gerekir. Bu yüzden frenleme için mümkün olduğunca jeneratör bölgesi tercih edilir.

Asenkron Makinanın basitleştirilmiş dinamik modeli Şekil 3.7'de gösterilmekte ve modelde akım ve akıdan momentin nasıl oluşturulduğunu ve rotor ile stator arasındaki etkileşimin şaftı nasıl hareket ettirdiğini açıklanmaktadır [53]. Şekilde kırmızı renk ile gösterilen sembolik şaft, EA'lardaki mekanik kısım olan sabit oranlı dişli ile bağlantıyı sağlamaktadır. Mavi renk ile gösterilen halka rotor bağlantı noktasını, yeşil renk ile gösterilen halka ise stator bağlantı noktasını temsil etmektedir.



Şekil 3.7. Asenkron makinanın basitleştirilmiş modeli.

Asenkron Makinada kayma (s), rotorun senkron hızdan yavaş dönmesinden dolayı meydana gelmektedir. Şekil 3.8'deki moment-hız karakteristiğinde görüldüğü gibi asenkron motor, kayma 0-1 aralığında olduğu zaman motor modunda, kayma $s > 1$ olduğu zaman fren modunda ve kayma $s < 0$ olduğu zaman ise jeneratör (rejeneratif) modunda çalışmaktadır.



Şekil 3.8. Asenkron makinanın çalışma aralığı [51].

Asenkron motorlarda matematiksel model, elektriksel ve mekanik sisteme ait denklemlerden oluşmaktadır. Motorun davranışını gösteren bu modelde mekanik yanı ifade eden denklemler Newton hareket kanunlarından, elektriksel yanı ifade eden denklemler ise Kirschhoff akım kanunlarından çıkarılmaktadır. Asenkron

motorun herhangi bir ω_g açısal hızıyla dönen d - q eksenlerine göre modeli aşağıdaki gibidir [54];

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{L_r \cdot R_s + \frac{M^2}{\tau_r}}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot i_d + \omega_g \cdot i_q + \frac{M}{\tau_r \cdot \sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot \varphi_d + \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot \omega_r \cdot \varphi_q + \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \cdot v_d \quad (3.4)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{L_r \cdot R_s + \frac{M^2}{\tau_r}}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot i_q - \omega_g \cdot i_d + \frac{M}{\tau_r \cdot \sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot \varphi_q - \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot \omega_r \cdot \varphi_d + \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \cdot v_{dq} \quad (3.5)$$

$$\frac{d\varphi_d}{dt} = \frac{M}{\tau_r} \cdot i_d - \frac{1}{\tau_r} \cdot \varphi_d + (\omega_g - \omega_r) \cdot \varphi_q \quad (3.6)$$

$$\frac{d\varphi_q}{dt} = \frac{M}{\tau_r} \cdot i_q - \frac{1}{\tau_r} \cdot \varphi_q - (\omega_g - \omega_r) \cdot \varphi_d \quad (3.7)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{3}{2} \cdot \frac{n_p^2 \cdot M}{J \cdot L_r} (\varphi_d \cdot i_q - \varphi_q \cdot i_d) - \frac{B_f}{J} \cdot \omega_r - \frac{n_p}{J} \cdot T_c - \frac{n_p}{J} \cdot T_L \quad (3.8)$$

Burada L_r , L_s ve M sırasıyla motorun rotor, stator ve ortak endüktanslarıdır. R_r ve R_s rotor ve stator direnci, n_p kutup çifti sayısı, J eylemsizlik momentidir. T_L yük momenti (yolun eğiminin motor üzerinde algılanan etkisi), $\tau_r = L_r/R_r$ rotor zaman sabiti, $\sigma = (L_s \cdot L_r - M^2)/(L_s \cdot L_r)$ kaçak akı katsayısı, B_f ise sürtünme momenti katsayısıdır. T_c ise hareket halindeyken hız yönünde (başındaki eksi işareti ile hıza zıt yönde) sabit olan, durgun halde iken ise hareketin başlaması için aşılması gereken sürtünme momenti olup Coulomb sürtünmesi diye adlandırılır ve tekerlerin yuvarlanma sürtünmesinden de kaynaklanmaktadır. Ayrıca i_d ve i_q stator akımının v_d ve v_q statora uygulanan gerilimin φ_d ve φ_q rotor akısının d ve q bileşenleri, ω_r ise rotor elektriksel açısal hızıdır.

Endüklenen momente ait denklem ifadesi de mekanik açısal hıza bağlı olarak eşitlik 3.9'da ifade edilmektedir [54].

$$M_e = \frac{3 \cdot n_p \cdot M}{2 \cdot L_r} \cdot (\varphi_d \cdot i_q - \varphi_q \cdot i_d) = J \cdot \dot{\omega}_m + B_f \cdot \omega_m + T_C + T_L \quad (3.9)$$

3.3. ALAN YÖNLENDİRMELİ KONTROL YÖNTEMİ

Elektrikli araçlarda doğru kontrol yönteminin uygulanması verimliliği ve güç potansiyelini artırmaktadır. Vektör kontrolü yöntemlerinin gelişmesiyle, V/f kontrolündeki düşük asenkron motor performansının, asenkron motorun kendisinden kaynaklanmadığı ve motora gücün verilme veya kontrol edilme şekliyle kaynaklandığı anlaşılmıştır [24]. Yapılan çalışmada üç fazlı Asenkron Motor, başarılı sonuçlar elde edilen FOC yöntemiyle kontrol edilmektedir. Vektör kontrolünde temel amaç stator akısı ile rotor akısı arasındaki açığı 90° yaparak daima maksimum momenti üretmektir. Vektörel kontrol metodunun geniş bir aralıkta hız kontrolü, hassas hız ayarı, hızlı dinamik tepki gibi birçok avantajı vardır. Bu yöntem, koordinat dönüşümleri sonucunda asenkron motorun bir doğru akım motoru gibi kontrol edilmesini sağlayan bir yöntemdir [54].

Asenkron Makinada akıyı ve momenti ayrı ayrı kontrol edebilecek iki akım bileşeni mevcut değildir; dolayısıyla Asenkron Makinada kontrol edilmesi gereken büyüklük, genliği, fazı ve frekansı ile tanımlanan akım vektörüdür. FOC'un yapılabilmesi stator akımının akıyı ve momenti oluşturan iki bileşene ayrılmasıyla sağlanmaktadır. Stator akımının rotor akısıyla aynı yönlü bileşeni akı üreten bileşen, buna dik olan ise moment üreten bileşendir. Akıyı oluşturan ve akı ile aynı yönde olan akım bileşeni yardımcı ile akı sabit tutulup diğer akım bileşeni ile moment doğrusal olarak ayarlanabilmektedir. Böylece Asenkron Makina, hız referansı ve yük moment değişimlerine doğru akım motoru kadar hızlı cevap verebilmektedir.

Moment ifadesine bakılarak, FOC'de amaçlandığı gibi stator akımının bileşenlerinden birini mıknatıslanma akımı, diğerini de moment akımı haline getirmek için d ekseninin rotor akı vektörüyle hizalanması, yani $\varphi_q = 0$ olması istenir [19]. Böylece M_e ile i_q orantılı olacağından i_q moment akımı bileşeni olacaktır. Aynı zamanda φ_d 'nin denge değeri de $M \cdot i_d$ ifade edilmektedir; yani i_d

akı üreten bileşen (mıknatıslanma akımı) olmaktadır. Bu yüzden mıknatıslanma akımı referansı i_d^* , akı referansından (φ_d^*) şöyle hesaplanır:

$$i_d^* = \frac{\varphi_d^*}{M} \quad (3.10)$$

d eksenini rotor akı vektörüyle hizalamanın doğrudan yolu, rotor akısını ölçerek veya tahmin ederek onun açısına göre α ve d eksenleri arasındaki θ açısına karar vermektir. Ancak bu çalışmada dolaylı yol tercih edilmiştir. Buna göre θ açısı, motora uygulanan açısal frekansın (ω_s) integraliyle bulunmaktadır. ω_s ise

$$\omega_s = \omega_r + \frac{i_q}{\sigma_r \cdot i_d^*} \quad (3.11)$$

formülüne göre belirlenir. Bu değer

$$\omega_r + \frac{M \cdot i_q}{\sigma_r \cdot \psi_d} \quad (3.12)$$

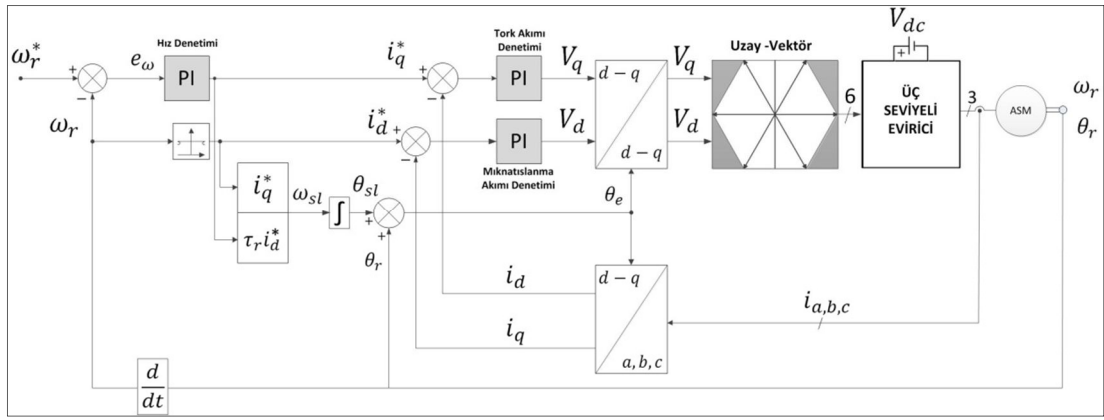
Eşitlik 3.12'nin denge değeridir. d - q eksenlerinin senkron hızda dönmesi $\omega_g = \omega_s$ seçimiyle sağlanarak

$$\varphi_d^* = -\frac{1}{\sigma_r} \cdot \varphi_q \quad (3.13)$$

elde edilir. Bu da başlangıçta istenildiği gibi kısa sürede $\varphi_q = 0$ denge noktasına ulaşılmasını sağlamaktadır.

Şekil 3.9'da alan yönlendirmeli kontrol metodunun blok şeması verilmiştir. Yapılan çalışmada çıkış referans gerilimini ayarlamak için üç adet PI düzenleyici kullanılmaktadır. Mıknatıslanma akımı referansı akı talebine göre; moment akımı referansı ise hız hatasıyla çalışan bir PI denetleyicinin hesapladığı moment talebine göre belirlenmektedir. Birinci PI, ölçülen mekanik rotor hızı ile hız ayar noktasını karşılaştırır ve q eksenine ait referans stator akımını (i_q^*) üretmektedir. d eksenine ait

referans stator akımı (i_d^*), nominal rotor akısını üretmek için genellikle ihtiyaç duyulan değerde sabit tutulmaktadır. İkinci ve üçüncü PI denetleyiciler ise bu referans akımları gerçek stator akımı bileşenleriyle karşılaştırarak ihtiyaç duyulan gerilimin $d-q$ bileşenlerini hesaplamaktadır. Ters Park dönüşümüyle bu değerler $\alpha-\beta$ eksenlerine dönüştürülmekte ve uzay vektör modülasyonu ile bu değerlerin gerçekleştirilmesi istenir. Ölçülen akım bileşenleri de önce Clarke dönüşümüyle $\alpha-\beta$ eksenlerine, sonra da Park dönüşümüyle $d-q$ eksenlerine dönüştürülerek kullanılmaktadır.



Şekil 3.9. Alan yönlendirmeli kontrol (FOC) metodunun blok şeması.

Asenkron makinelerde elektromekanik dönüşümün sağlanabilmesi için ya da motor ile iş yapılabilmesi için rotor akısına ihtiyaç duyulmaktadır [54]. Bu durumda bir referans akı değeri seçilmekte ve Asenkron Motorun nominal hız üzerinde çalışması için FOC tekniği ile rotor akısı azaltılmaktadır.

Kullanılacak darbe genişlik modülasyon stratejisi göz önünde bulundurulduğunda statora uygulanacak gerilimlerin duran eksen takımındaki izdüşümüne ihtiyaç vardır. İhtiyaç duyulan bu referans vektör Ters Park dönüşümü bloğunun çıkışında elde edilmektedir. Referans gerilim vektörü elde edildikten sonra SVPWM bloğu kullanılarak çıkışta üç fazlı gerilim oluşturulmaktadır. Genel olarak vektör kontrolü aşağıdaki adımlarla gerçekleşmektedir;

- Motor akım ve gerilim büyüklüklerinin ölçülmesi

- Bu büyüklüklerin Clarke Dönüşümü uygulanarak (α, β) 2 faz sisteme aktarılması
- Rotor akı vektörünün ve açısal pozisyonun hesaplanması
- Park dönüşümünü kullanarak stator akımlarının $d-q$ referans düzlemine aktarılması
- Stator akımlarının moment bileşeni (i_{sq}) ve akı bileşeninin (i_{sd}) ayrı ayrı kontrol edilmesi
- Referans gerilim değerleri v_d ve v_q 'nin hesaplanması
- Ters Clarke dönüşümünü kullanılarak v_a, v_b, v_c değerlerinin elde edilmesi
- Uzay vektör darbe genişlik modülasyonunu (SVPWM) kullanarak üç fazlı çıkış gerilimi üretilmesi.

3.4. BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ

Klasik denetim sistemlerin aksine, matematiksel modeline gerek duymadan, sadece istenilen çıkışı verecek şekilde girişe uygulanan işaret ayarlandığından, bulanık denetimin işlemesi tıpkı usta bir insanın o sistemi denetlemesine benzemektedir. Bulanık Mantık, var olan bilgiyi dilsel ifadeler haline getirip esnek algoritma mantığıyla Asenkron Makinanın kontrolünde başarılı sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Geleneksel mantıkta olduğu gibi "1" ve "0" değerleri mevcut iken ilaveten bunların ara değerlerini de kullanır. Bir bulanık mantık denetleyici temel olarak dört kısımdan oluşmaktadır. Bunlar bulanıklaştırma, bilgi tabanı, karar verme birimi ve durulaştırma birimidir [55].

Bulanık mantık denetleyiciler genellikle deneme yanılma ile tasarlanmakta ve ayarlanmaktadır. Bu sebeple üyelik fonksiyonları, kurallar ve ölçeklendirme faktörleri optimum bir performans elde edinceye kadar değiştirilmektedirler.

Bulanıklaştırma, sistemden alınan denetim giriş bilgilerini sözel değişkenler olan sembolik değerlere dönüştürme işlemidir. Bu çalışmada NB: Negatif Büyük, NO: Negatif Orta, NK: Negatif Küçük, S: Sıfır, PK: Pozitif Büyük, PO: Pozitif Orta, PB: Pozitif Büyük olmak üzere 7 sözel değişken kullanılmıştır.

Kural tabanı, uzman kişiler tarafından belirlenmiş bulanık mantık denetleyicinin davranışlarını tespit eden denetim kurallarını içermektedir. Bu kontrol algoritmasında 7x7'lik toplam 49 kural tanımlanmıştır.

Vektör kontrollü Asenkron Makinanın sürücü sisteminde motorun hız denetimini sağlamak için klasik PI denetleyiciye ilaveten bulanık mantık denetleyici de uygulanmıştır. Bulanık mantık denetleyicinin giriş değişkenleri referans hız ile motorun gerçek hızı arasındaki hız hatası (e_ω) ve hız hatasındaki değişim (de_ω) olarak tanımlanmıştır. Çıkış değişkeni olarak ise akımın moment bileşeni seçilmiştir.

PI denetleyici değişen çevre şartlarına bağımlılık gösterirken bulanık mantık denetleyicisi değişen çevre şartlarından bağımsız olarak çalışmaktadır.

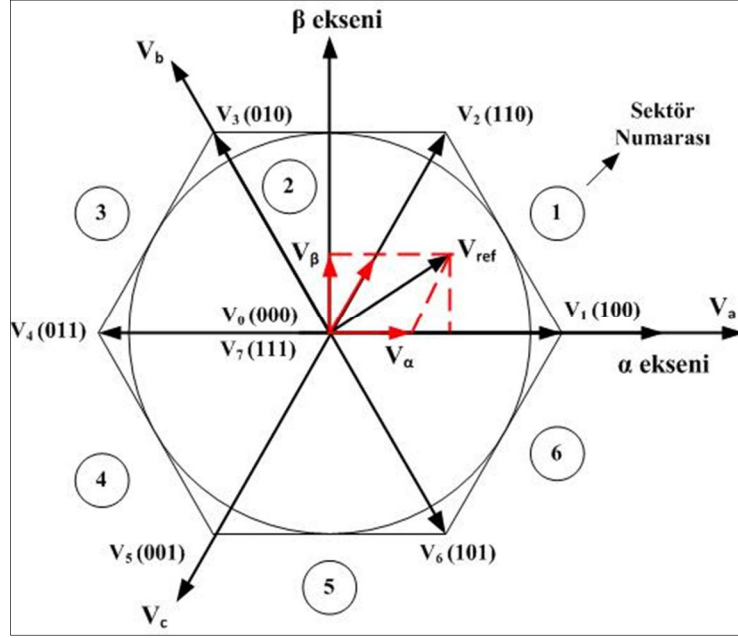
3.5. SÜRÜCÜ MODELİ

Alan yönlendirmeli kontrol ile üç fazlı elektrik motorlarını sürebilmek için motor sürücülerine ihtiyaç vardır. Motoru süren (a, b, c) anahtarlama sinyallerini üretebilmek için de darbe genişlik modülasyonundan yararlanılmaktadır [45]. Bu çalışmada ise darbe genişlik modülasyonu (PWM) türlerinden SVPWM kullanılmıştır. Bu modülasyon metodunun temel prensibi, üç fazlı gerilim beslemeli bir evirici tarafından üretilen sekiz ayrı gerilim uzay vektörünü kullanarak ideal gerilim vektörüne (v_{ref}) mümkün olduğu kadar yaklaşan bir ortalama gerilim vektörünü meydana getirmektir. Bu teknik ile gerilim vektörünün genliğini ve fazını istenilen yörüngede kontrol etmek mümkündür.

Bu modülasyon tekniğinin çalışması üç fazlı gerilim kaynağı olan evirici ile mümkün olan sekiz çalışma durumu için v_{ref} gerilim vektörünün durağan eksenlerde sıfır olmayan komşu altı vektör ve iki sıfır vektörü ile üretilmesi esasına dayanmaktadır [44]. v_{ref} vektörünün genliği ve frekansı kontrol edilerek, motor gerilimi ve frekansı kontrol edilebilir.

$$\vec{v}_{ref} = v_\alpha + jv_\beta = \frac{2}{3} \cdot \left(v_a + v_b \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + v_c \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) \quad (3.14)$$

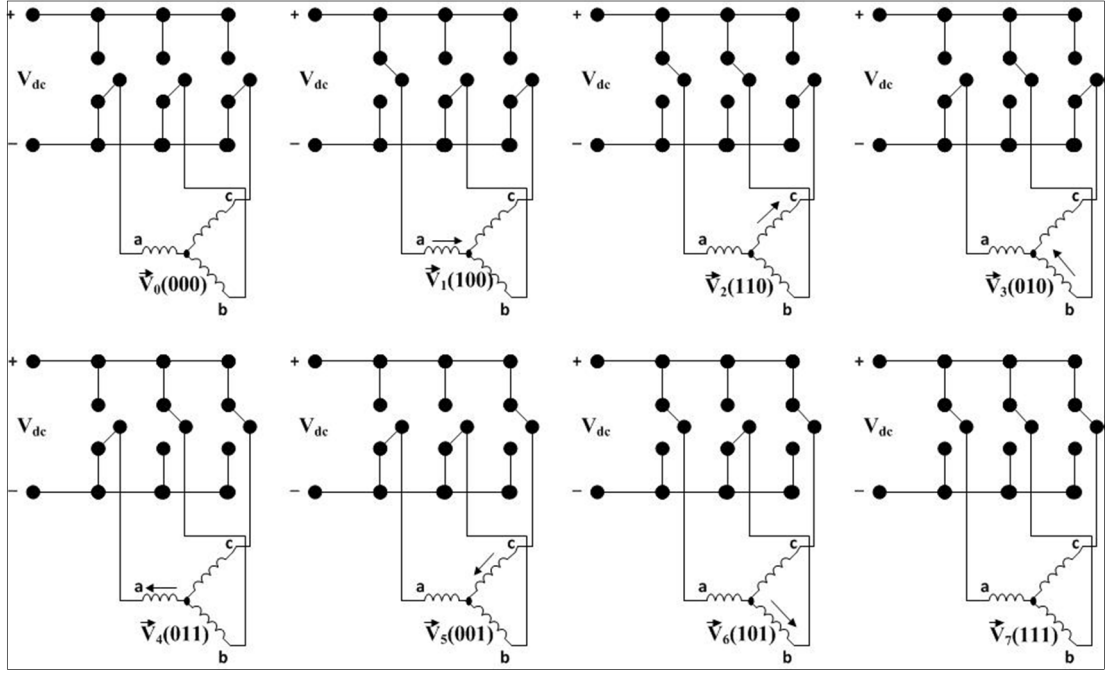
Durağan eksenlerde belirtilen referans gerilim vektörü ω_s açısal hızı ile dönmektedir. Üç fazlı bir eviricinin 8 olası durumu Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Bunlardan ikisi sıfır vektörü, altısı ise aktif durum vektörü olup bir altıgen şekli oluşturmaktadırlar.



Şekil 3.10. Evirici durumları ve referans vektörün sabit referans ekseninde gösterimi.

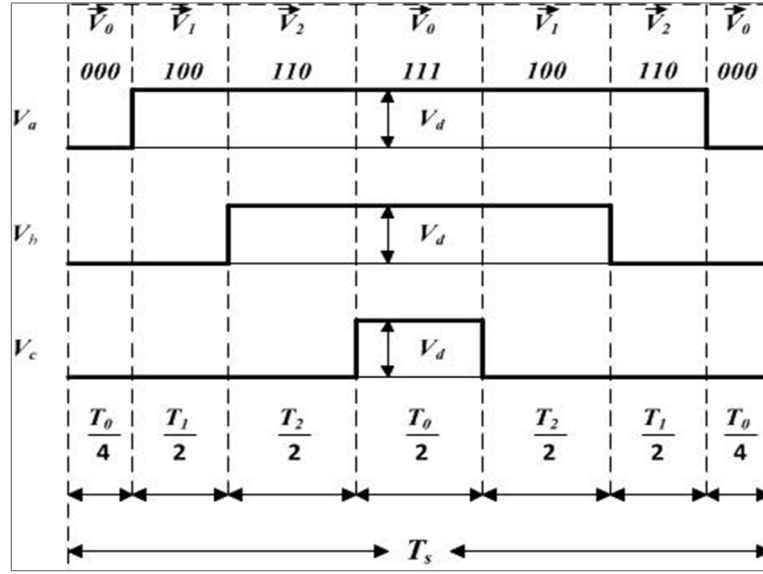
Uzay vektör modülasyonunun her bir anahtarlama döngüsünde kendisine en yakın olan iki aktif durum vektörünü ve sıfır durum vektörlerini anahtarlama suretiyle ortalama olarak dönen referans vektörü elde edilmektedir [44]. Uzay vektör modülasyonu ile elde edilebilir maksimum çıkış gerilimi evirici DC giriş geriliminin %90 değerine çıkarılır.

Şekil 3.11'de gösterilen anahtarların açık ve kapalı olma durumuna göre 6 aktif durum vektörü: $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ ile; 2 adet sıfır vektörü ise V_0 ve V_7 ile gösterilmektedir. İnvertöre $V_1 \dots V_6$ vektörlerinden biri uygulandığında, stator akısı uygulanan gerilim vektörü doğrultusunda artmaktadır. Bu nedenle $V_1 \dots V_6$ vektörleri aktif vektörler olarak adlandırılmaktadır. Sıfır gerilim vektörleri olarak adlandırılan V_0 ve V_7 gerilim vektörleri, stator sargılarını kısa devre eder ve stator akısında bir değişiklik oluşturmamaktadır.



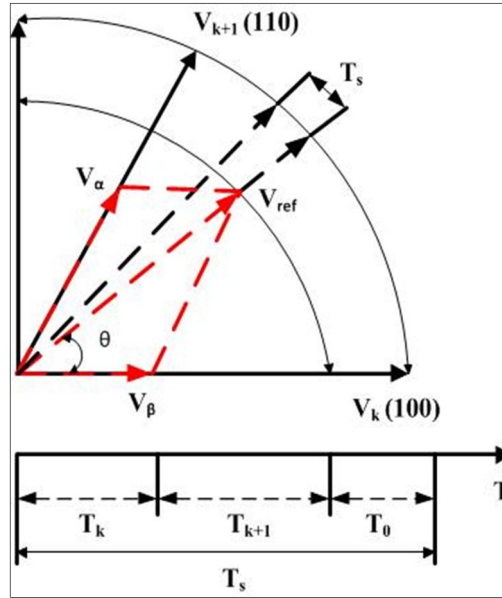
Şekil 3.11. Anahtar konumlarına karşılık gelen gerilim vektörleri.

Aktif vektörler düzenli altıgen içerisinde oluşmakta ve bu altıgen şekil altı eşit sektöre bölünmektedir. Her bir T_s anahtarlama periyodunda ortalama uzay vektörü v_{ref} olarak tanımlanır ve eğer T_s yeteri kadar küçük olursa bu zaman aralığında v_{ref} de sabit kabul edilmektedir. En iyi harmonik performansı ve her yeni bir referansı minimum sayıda anahtarlama ile elde edebilmek için anahtarlama sıralaması öyle ayarlanır ki bir durumdan bir sonraki duruma geçişte eviricinin sadece bir anahtarının konum değiştirmesi yeterli olmaktadır [44]. Örneğin v_{ref} tek numaralı bir vektörde iken uygulanan vektör düzeni $V_0, V_k, V_{k+1}, V_7, V_7, V_{k+1}, V_k, V_0$ şeklinde uygulanırken çift numaralı bir sektör durumunda ise aktif vektörlerin yerleri değiştirilerek $V_0, V_{k+1}, V_k, V_7, V_7, V_k, V_{k+1}, V_0$ şeklinde uygulanmaktadır. Böylece her anahtarlama yalnız bir anahtar konum değiştireceği için anahtar kayıpları az olmaktadır. Tek numaralı bir sektörde referans vektör için anahtarlama sinyalleri Şekil 3.12’de gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Birinci sektörde gerilim referans vektörü için anahtarlama sinyalleri.

Uzay vektör modülasyonunun en önemli bölümü, aktif ve sıfır durum sürelerinin her bir anahtarlama periyodunda hesaplanması stratejisidir. Şekil 3.13'te referans vektörün bileşenleri ve anahtarlama süresinin gösterimi mevcuttur.



Şekil 3.13. Referans vektörün bileşenleri ve anahtarlama süresinin gösterimi.

$v_\alpha + jv_\beta$ ile verilen referans vektörünün faz açısı $\alpha = \arctan(v_\beta/v_\alpha)$ ile elde edilmektedir. Sektörler $[0 \ 2\pi]$ aralığında $\pi/3$ 'lük açılarla belirlenmektedir [22].

Örneğin referans vektörünün sektör 1 içerisinde bulunması durumunda $0 \leq \gamma \leq \frac{\pi}{3}$ referans vektör bileşenleri Şekil 3.13’de gösterildiği gibi olmaktadır. T_1 ve T_2 süreleri yine aynı şekilde gösterildiği gibi referans vektörün sektördeki V_1 ve V_2 aktif durum vektörlerinin uygulama süreleridir.

$$\begin{bmatrix} T_k \\ T_{k+1} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{|\vec{v}_{ref}| T_s}{V_{dc}} \cdot \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{k \cdot \pi}{3} - \gamma\right) \\ \sin\left(\gamma - \frac{(k-1) \cdot \pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$T_0 = \frac{T_1}{2} - T_k - T_{k+1} \quad (3.16)$$

Eşitlikleri, Eşitlik 3.15 ve Eşitlik 3.16’da verilen T_k süresi, T_s periyodu boyunca V_k vektörünün uygulama süresinin yarısını; T_0 süresi ise sıfır durum vektörünün uygulama süresinin yarısını göstermektedir. v_{ref} vektörünün k . sektörde bulunduğu varsayıldığında en yakın iki aktif vektör V_k ve V_{k+1} olmakta, $k = 6$ için $k + 1$ değeri 1’e karşılık gelmektedir.

$$m = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{v_{ref}}{v_{dc}} \quad (3.17)$$

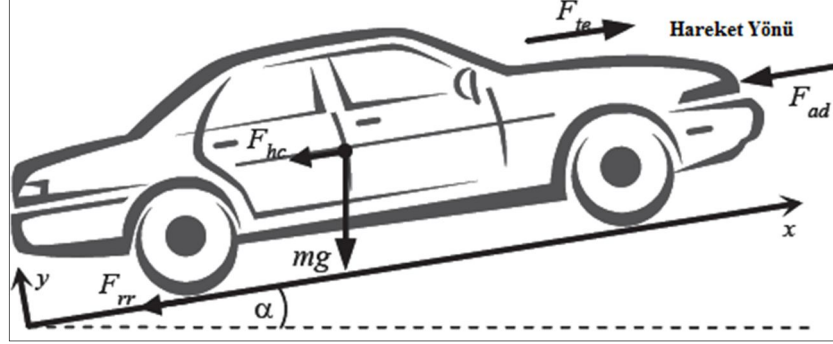
İstenen temel bileşen genliğinin, altı adım çalışmadaki temel çıkış bileşenin maksimum değerine oranı modülasyon indeksi olarak tanımlanmaktadır [22].

3.6. KUVVETLERİN HESAPLANMASI VE DÖNÜŞÜMLER

Aktarma organı sistemi, elektrikli aracın tahrik motorundan elde edilen mekanik kuvveti tekerlere aktaran kısımdır. EA’lardaki aktarma organı sistemi içten yanmalı motorlara sahip araçlardan ve hibrid elektrikli araçlardan daha basittir [14]. Bu sebeple yapılan çalışmada sabit oranlı vites kullanılmıştır.

Bir araç, hareketi sırasında birçok kuvvetin etkisine maruz kalmaktadır. Şekil 3.14’te gösterildiği gibi elektrikli aracın hareket edebilmesi için üstesinden gelmesi gereken

kuvvetler mevcuttur. Bu kuvvetleri şöyle sıralayabiliriz: Yuvarlanma sürtünme kuvveti, havanın sürtünme kuvveti, yokuş direnci ve hızlanma kuvveti.



Şekil 3.14. Bir araca etki eden kuvvetler [36].

3.6.1. Yuvarlanma Sürtünme Kuvveti

Tekerler, araçta oluşan dönüş kuvvetini aracın ağırlığı vasıtasıyla zemine iletmektedirler. Bu iletim anında bir sürtünme kuvveti oluşur ve üretilen dönüş enerjisinin bir kısmı bu sürtünme sırasında kaybolmaktadır. Araç, teker ile yol arasında oluşan sürtünme sayesinde ilerleyişini veya frenlemeyle duruşunu sağlayabilmektedir [2]. Bu sürtünme oranı aracın ağırlığına ve yola bağlıdır. Tekerlek yuvarlanma sürtünmesi de denilen bu kuvveti, motor sabit bir sürtünme momenti olarak görür ki buna Coulomb sürtünmesi de denir.

$$F_{rr} = \mu_{rr} \cdot m \cdot g \quad (3.18)$$

Bu denklemde μ_{rr} yuvarlanma sürtünme katsayısı, m aracın kütlesi [kg], g yerçekimi ivmesini [m/s^2], rr ise yuvarlanma sürtünmesini ifade etmektedir [14].

3.6.2. Havanın Sürtünme Kuvveti

Havanın sürtünme kuvveti, aracın hareketi sırasında oluşan hareketin tersi yönde hızın karesi ve yüzey alanı ile yüzey yapısına bağlı olarak artıp azalan kuvvettir ve her zaman aracın hareketinin tersi yönde etki etmektedir [14]. Modern araçların dış gövdesi tasarlanırken havanın sürtünmesi ve aracın çevresinde oluşan rüzgârın

etkisinden en az etkilenecek şekilde tasarlanmaktadır. Bu da araca önemli oranlarda yakıt tasarrufu sağlar.

$$F_{ad} = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 \quad (3.19)$$

Bu denklemde ρ havanın yoğunluğu [kg/m^3], A aracın ön yüzey alanı [m^2], C_d havanın sürtünme katsayısı ve v de elektrikli aracın hızını [m/san], ad ise havanın sürtünme kuvvetini temsil etmektedir [14].

3.6.3. Yokuş Direnci Kuvveti

Yokuş direnci kuvveti, yol eğimine ve araç ağırlığına bağlıdır. Hareket yönünden bağımsızdır.

$$F_{hc} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (3.20)$$

Denklemden α yokuş eğim açısını, hc ise tırmanma kuvvetini ifade etmektedir [14].

3.6.4. Hızlanma (İvmelenme) Kuvveti

Aracın hızı sürekli olarak değişmektedir. Bu sebeple ihtiyaç duyulan toplam gücün bulunabilmesi için toplam kuvvetin net olarak hesaplanması gerekiyor. Sürekli değişim gösteren ivmelenme kuvveti de aracın doğrusal hızlanmasında Newton'un ikinci kanunu kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$F_{la} = m \cdot a \quad (3.21)$$

Burada a aracın ivmesini [m/sn^2], la ise doğrusal ivmelenmeyi göstermektedir [14].

3.6.5. Toplam Kuvvetin Hesaplanması ve Dönüşümler

Elektrikli bir aracın tahriki için gerekli kuvvet ve güçlerin hesabında aşağıdaki bağıntılar kullanılmaktadır.

Elektrikli aracın harekete geçmesi için aşması gereken toplam kuvvet F_{te} ile gösterilir ve aşağıdaki formül ile bulunur.

$$F_{te} = F_{rr} + F_{hc} + F_{ad} + F_{la} \quad (3.22)$$

Elektrikli motorun moment değerinin hesaplanmasında

$$M_{te} = F_{te} \cdot \frac{r}{G} \quad (3.23)$$

formülü kullanılır ve burada r tekerlek yarı çapı [m] ve G ise sabit vites dönüşüm oranıdır.

Aracın harekete geçmesi için ihtiyaç duyulan toplam gücün hesaplanmasında

$$P_{te} = v \cdot F_{te} \quad (3.24)$$

formülü kullanılmakta ve denklemde ki v ifadesi aracın hızını, te ise çekiş gücünü ifade etmektedir [14].

3.7. REJENERATİF FRENLEME

Hareket halindeki araç yavaşlarken veya yokuş aşağı inerken, frenlemeden dolayı meydana gelen kinetik enerji tahrik motorunun jeneratör modunda çalıştırılmasıyla tekrar kazanılabilmektedir. Frenleme başlamadan önce motor ileri doğru dönmektedir. Fakat i_q akımının kutbunun negatif olarak değişimi, frenleme enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülerek bataryanın şarj edilmesini sağlamaktadır [56].

Rejeneratif frenleme esnasında elektrik motor parametre değerlerinin sırasıyla $s < 0$, $M_m < 0$, $\omega_r > 0$ olması gerekmektedir. s kayma, M_m elektrik motorunun momenti, ω_r ise elektrik motorunun açısal hızını ifade etmektedir. Bu ifadeler kullanılarak elektrik motoru gücünün

$$P_m = \omega_r \cdot M_m \quad (3.25)$$

formülünden negatif bir değer olarak elde edileceği sonucuna varılmaktadır [51]. Burada güç değerinin negatif olması elektrik makinasının ters yönde yani jeneratör modunda çalıştığını ve enerji akışının tekerlerden bataryaya doğru olduğunu göstermektedir.

Enerji akış yönünün değişmesiyle batarya, tahrik motorunu hareket ettirmek için gerekli olan enerji kaynağı olmak yerine elektrik makinasının üretmiş olduğu elektrik enerjisini depo etmek için kullanılan depolama sistemi görevini icra etmektedir. Elektrik makinası, jeneratör modunda çalışırken aşağıdaki eşitlik ile bataryanın elektrotlarına depo edilmek üzere gönderilen kapasite (Ah) miktarını belirtmektedir.

$$CR_{n+1} = CR_n - ((I_{batt}^k \cdot \delta t)/3600) \quad (3.26)$$

CR bataryanın elektrotlarından çekilen/verilen şarj miktarı, I_{batt} bataryanın akımı, k peukert etkisi, δt ise adım aralığını göstermektedir [14].

Bataryadan sağlanan şarj miktarındaki değişim CS (charge supplied) ise aşağıdaki gibi elde edilmektedir;

$$CS_{n+1} = CS_n + ((I_{batt} \cdot \delta t)/3600) \quad (3.27)$$

Rejeneratif frenleme modunda batarya akımının işareti negatif olacağı için yukarıdaki formüle göre bataryadan elektrik motoruna transfer edilen şarj miktarında bir azalma meydana gelecektir. Enerjinin geri kazanılmasıyla birlikte bataryadaki enerji miktarında bir artış olacaktır.

Ayrıca yokuş aşağı inerken rejeneratif frenlemeden elde edilecek geri kazanım, yokuş direnci kuvvetinin eğimden dolayı negatif olması sebebiyle daha fazla olacaktır.

$$F_L = F_{hc} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \text{ [N]} \quad (3.28)$$

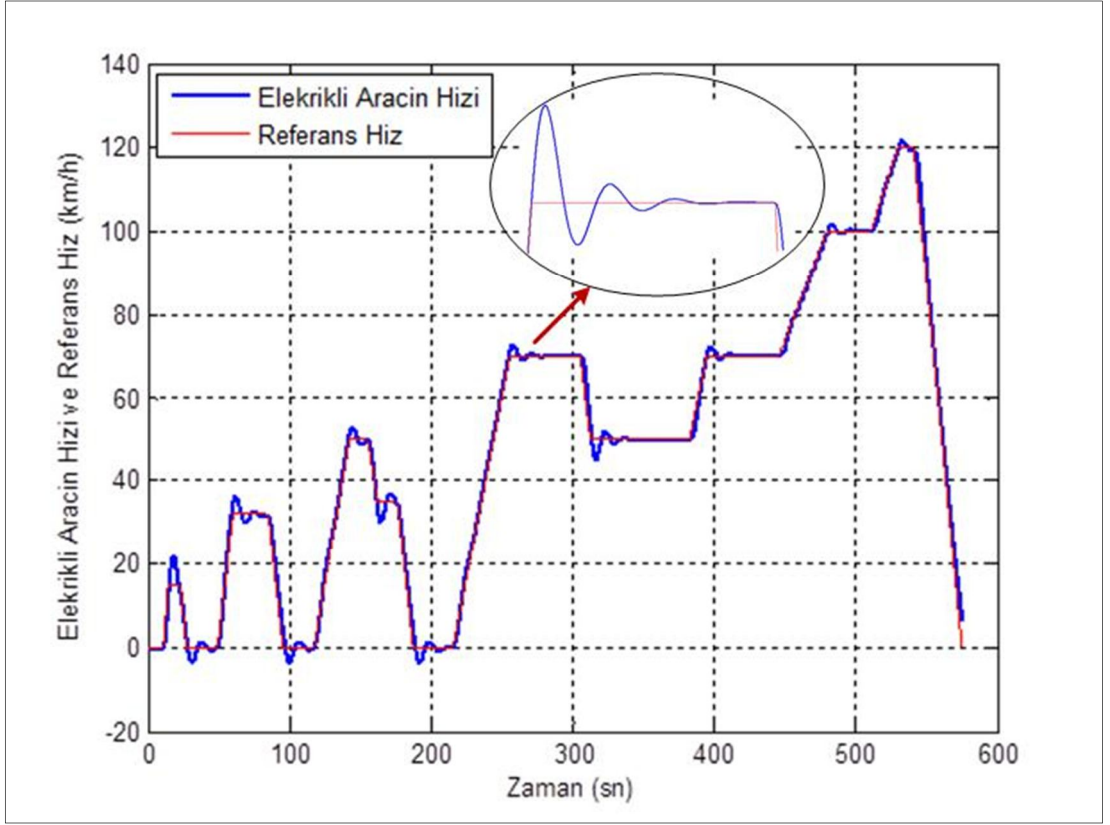
Burada F_L araç üzerine etkiyen yükü ifade etmektedir [14]. Düz yolda eğim sıfır olduğu için aracın harekete geçmesi için yenmesi gereken kuvvetler hesaplanırken F_L dikkate alınmamaktadır.

3.8. MODELLEME SONUÇLARI

Matlab programında kod yazımı ile modellemesi gerçekleştirilen elektrikli araç şehir içi kullanım şartları göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. EA iki kişilik olup toplam ağırlığı 700 kg olarak belirlenmiştir. Klasik içten yanmalı motorlara sahip araçlar gibi vites kutusuna ihtiyaç duymadığı için sabit oranlı dişli sistemi kullanılmış ve tahrik gücü bu aktarma organı vasıtasıyla tekerlere iletilmektedir. Ayrıca daha detaylı olarak Ek A'da EA'nın parametreleri verilmiştir. Referans hız olarak ECE15 sürüş çevrimi modeli kullanılmış ve EA'nın bu sürüş çevrimini takip etmesi sağlanmıştır. EA bir sürüş çevrimini 9,6 dakikada yaklaşık 7,5 km'lik bir mesafeyi tamamlamaktadır.

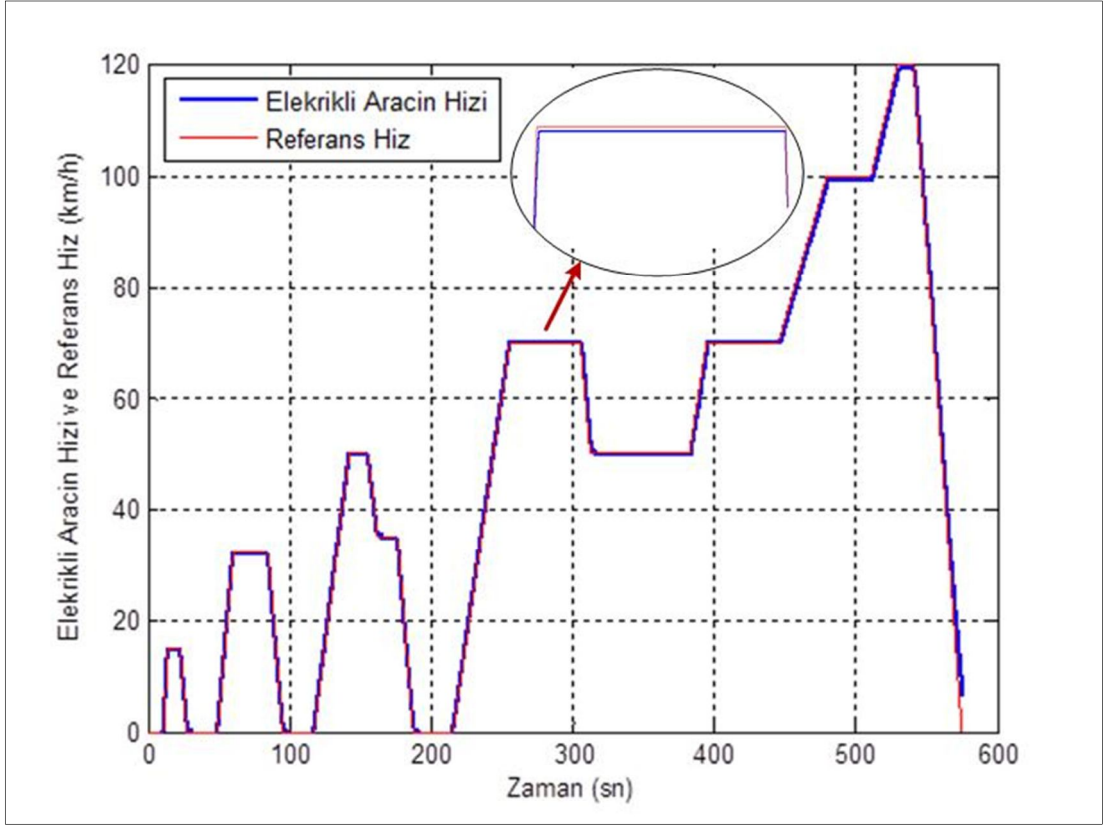
Gerekli bütün modellemeler yapılarak modelleme sonucunda elde edilen grafikler üzerinden bataryadaki enerji değişimi, bataryanın şarj durumu, rejeneratif frenleme ile tekrar kazanılan enerji miktarı ve tahrik motorunun performansı gözlemlenmiştir.

Modellemesi yapılmış elektrikli aracın ECE15 sürüş çevriminde verilen referans hız değerini takip etmesiyle elde edilmiş grafikler aşağıda verilmiştir. Şekil 3.15'te PI kontrol kullanılmış ve elektrikli aracın verilen referans hız değerini büyük ölçüde takip ettiği tespit edilmiştir.



Şekil 3.15. PI ile hızların zamana göre değişimi (ECE15).

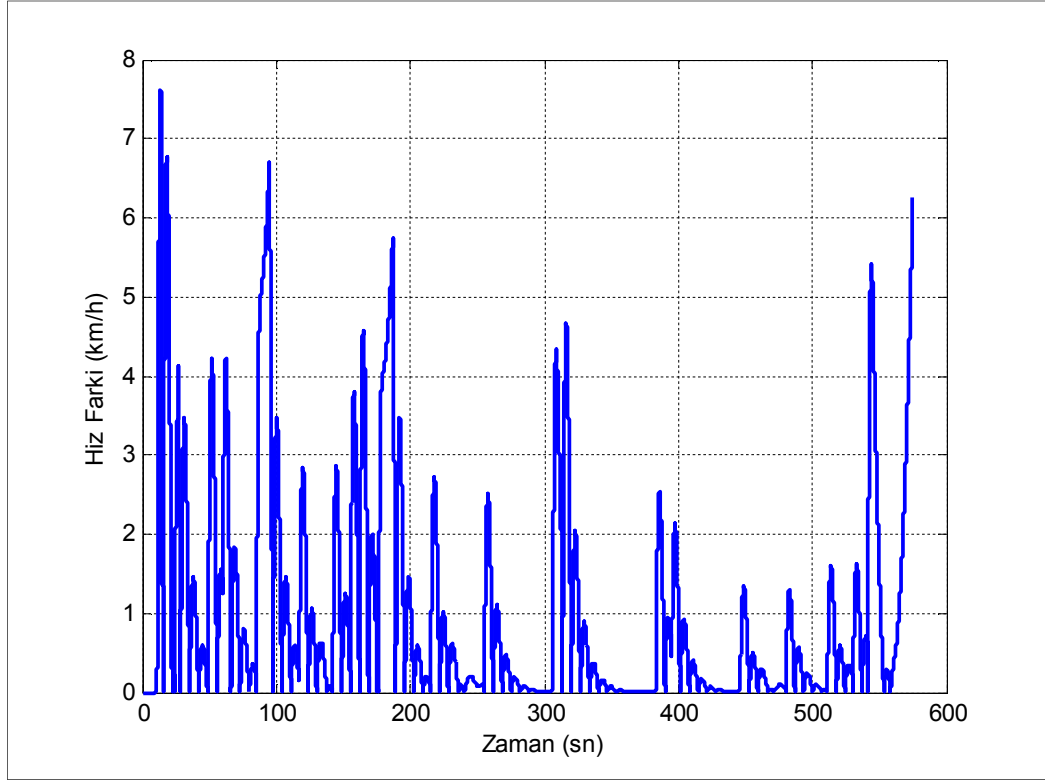
Şekil 3.16'da ise Bulanık Mantık kontrol yönteminin kullanılmasıyla elde edilen grafik gösterilmiştir. Bulanık Mantık kontrol yönteminin PI kontrol yöntemine göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında özellikle ani hız değişimlerinde Bulanık Mantık Kontrol yönteminin referans hızı daha iyi takip ettiği görülmüştür.



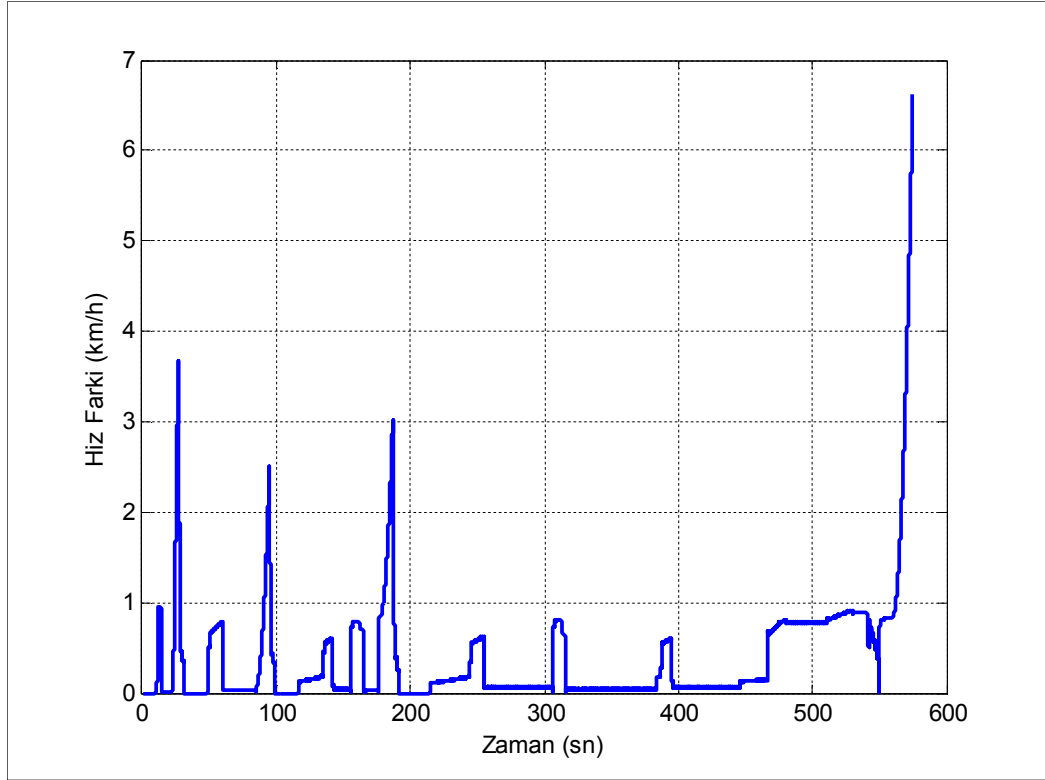
Şekil 3.16. Bulanık mantık ile hızların zamana göre değişimi (ECE15).

Referans hızın takip edildiği iki grafik karşılaştırıldığında farkın daha iyi anlaşılabilmesi için 255 ile 305. saniyeler arasında iki farklı kontrol yöntemi içinde yakın gösterim yapılmıştır. Bu zaman aralığında daha net görülebildiği gibi EA'nın ani hız değişiminde ve referans hızın takibinde Bulanık Mantık Kontrol yönteminin PI Kontrol yöntemine nazaran daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Yapılan modellemede kullanılan hız kontrol yöntemlerinden bulanık mantık metodunun daha iyi olduğu referans hız ile elektrikli aracın hızı arasındaki hatadan da anlaşılmaktadır. Şekil 3.17'de PI ile kontrol edilen EA hızının referans hız ile arasındaki farkları gösterilirken Şekil 3.18'de ise Bulanık Mantık kontrol ile elde edilen hız hatası gösterilmektedir. Bulanık Mantık ile hızı kontrol edilen EA, verilen referans hız değerini daha az hata farkı ile takip etmektedir.

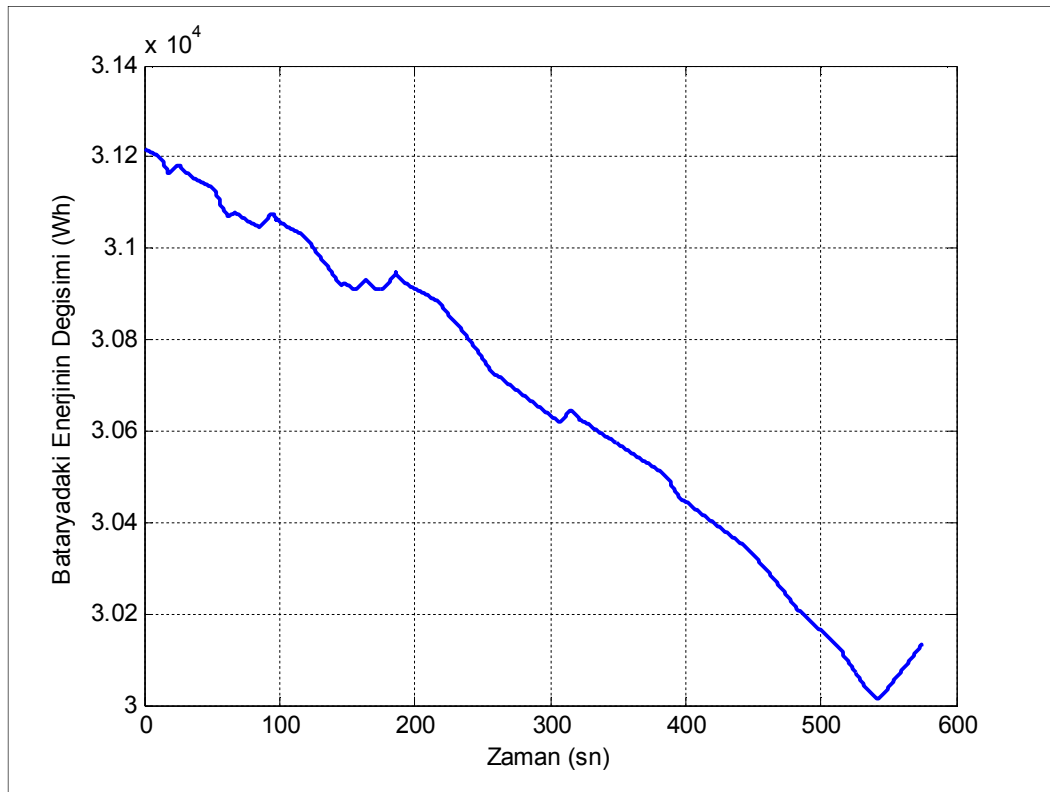


Şekil 3.17. Elektrikli aracın hızı ile referans hız arasındaki fark (PI).

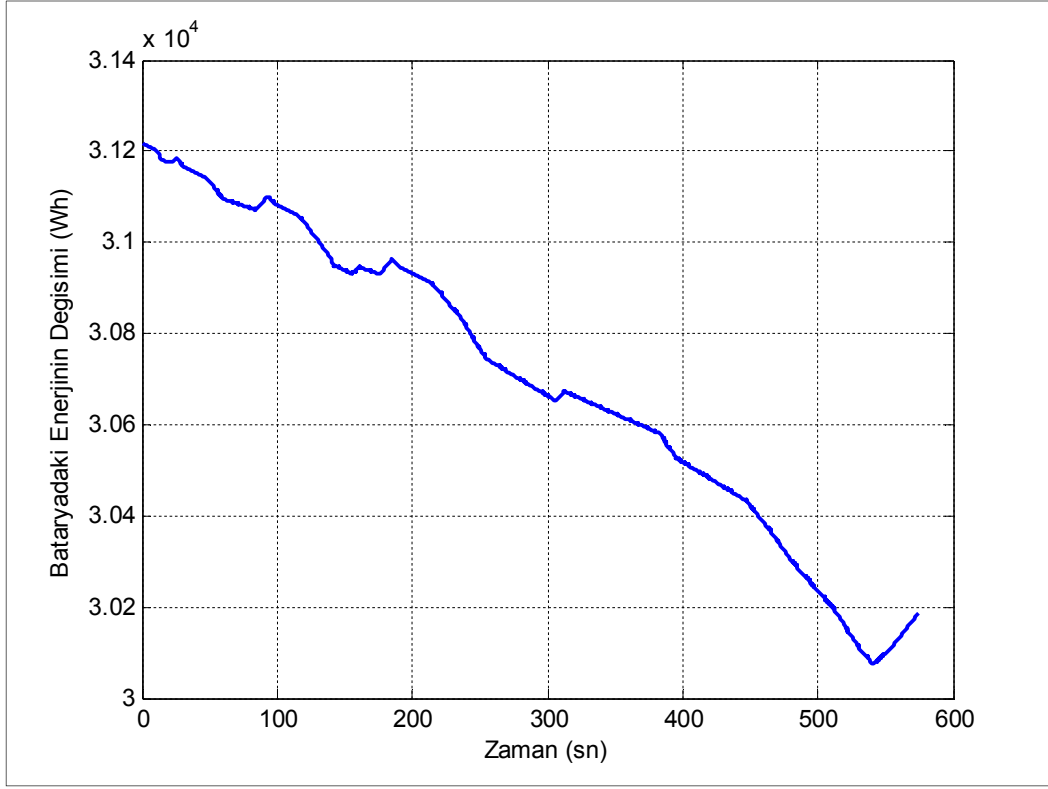


Şekil 3.18. Elektrikli aracın hızı ile referans hız arasındaki fark (Bulanık Mantık).

Rejeneratif frenleme esnasında Asenkron Makine, jeneratör modunda çalıştırılarak tekerlerde mevcut olan kinetik enerji tekrar kazanılıp bataryaya aktarılır. Batarya üzerinde hem enerji tüketiminin hem de rejeneratif frenleme ile kazanılan enerjinin değişimi PI için Şekil 3.19'da ve bulanık mantık için Şekil 3.20'de gösterilmektedir. Araç döngüsünü tamamladığında bataryadaki enerji miktarı PI için 30,10 kWh iken bulanık mantık için 30,19 kWh'tir. Bu son değerlerin farklı olması ile Bulanık Mantık için daha fazla çıkması EA'nın bu kontrol yöntem ile daha fazla menzile sahip olacağını göstermektedir. EA'nın hızı 120 km'den 0 km'ye doğru azalırken geri kazanılan enerji miktarı PI için 120 Wh iken bu değer Bulanık Mantık yöntemiyle 140 Wh olarak elde edilmektedir. Ve son frenleme (yavaşlama) zamanında iki kontrol yöntemi arasındaki tekrar kazanım farkı 20 Wh olarak belirlenmiştir. Böylelikle Bulanık Mantık kontrol yönteminin uygulanması durumunda geri enerji kazanımının daha fazla olacağı görülmektedir.



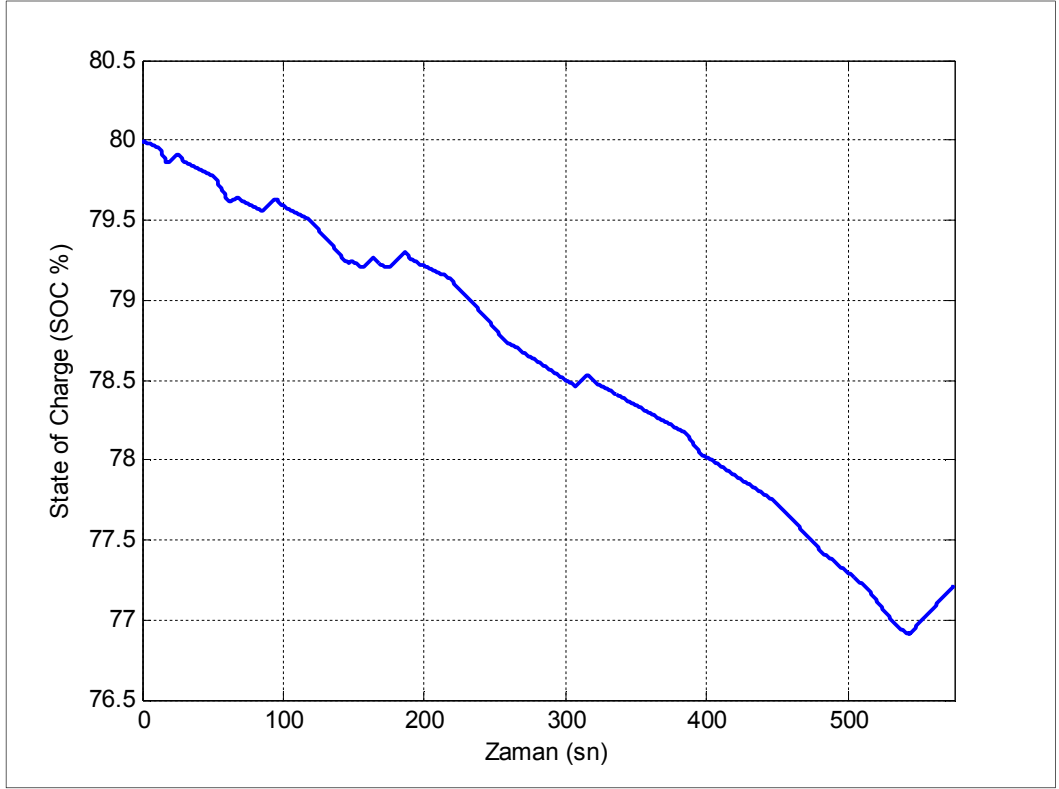
Şekil 3.19. Bataryadaki enerjinin zamana göre değişimi (PI).



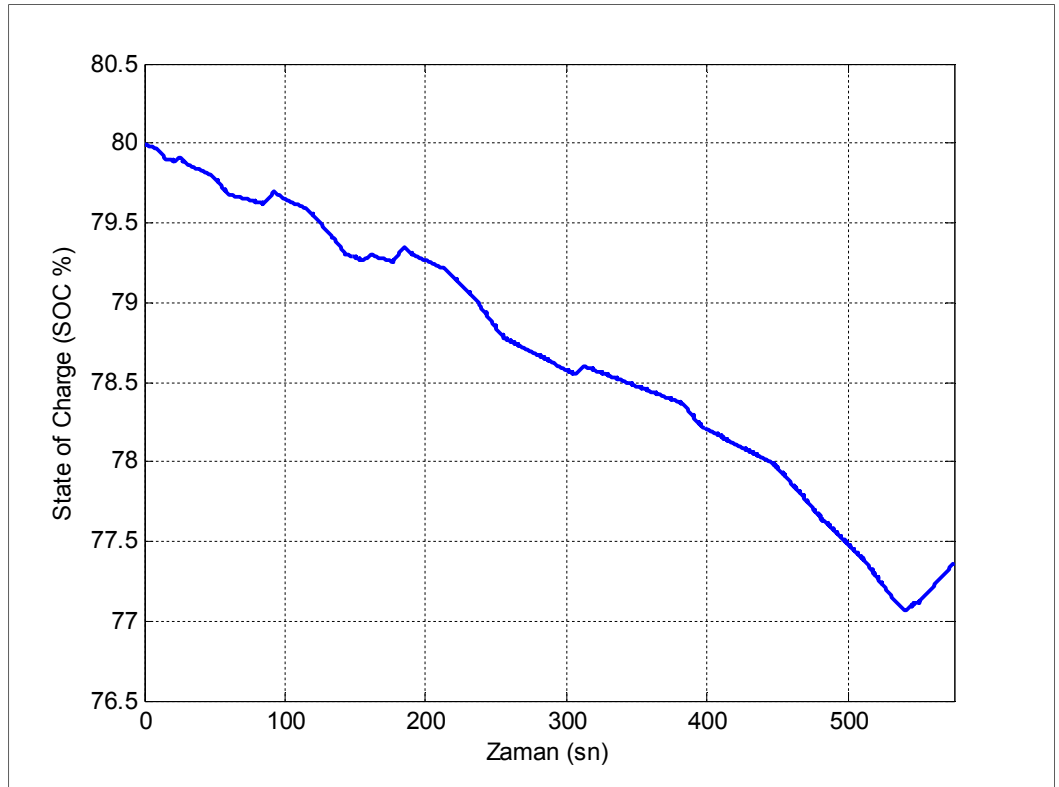
Şekil 3.20. Bataryadaki enerjinin zamana göre değişimi (Bulanık Mantık).

Batarya üzerindeki şarj miktarının değişim durumu olarak ifade edilen State of Charge (SOC)'ın sonuçları PI için Şekil 3.21'de, bulanık mantık için ise Şekil 3.22'de gösterilmektedir. Burada rejeneratif frenleme esnasında bataryanın şarj edildiği görülebilmektedir. Özellikle aracın hızlanmasında ve yavaşlamasında SOC'daki değişim daha iyi gözlemlenebilmektedir.

İki grafik incelendiğinde bulanık mantık kontrol yöntemi tercih edilirse elektrikli aracın daha fazla yol kat edeceği ortadadır. Aynı sürüş çevrimi ve aynı başlangıç şartları için simülasyon süresinin bitiminde SOC'ın son değeri PI için %77,13 iken Bulanık Mantık için %77,36 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca elektrikli araç, maksimum hızı olan 120 km'den sıfıra doğru giderken rejeneratif frenleme ile elde edilen enerji geri kazanımı her iki grafikte de daha iyi görülebilmektedir. Sayısal ifade ile PI için SOC'daki değişim % 0,3 iken bu değer Bulanık Mantık için % 0,35 olarak elde edilmektedir.

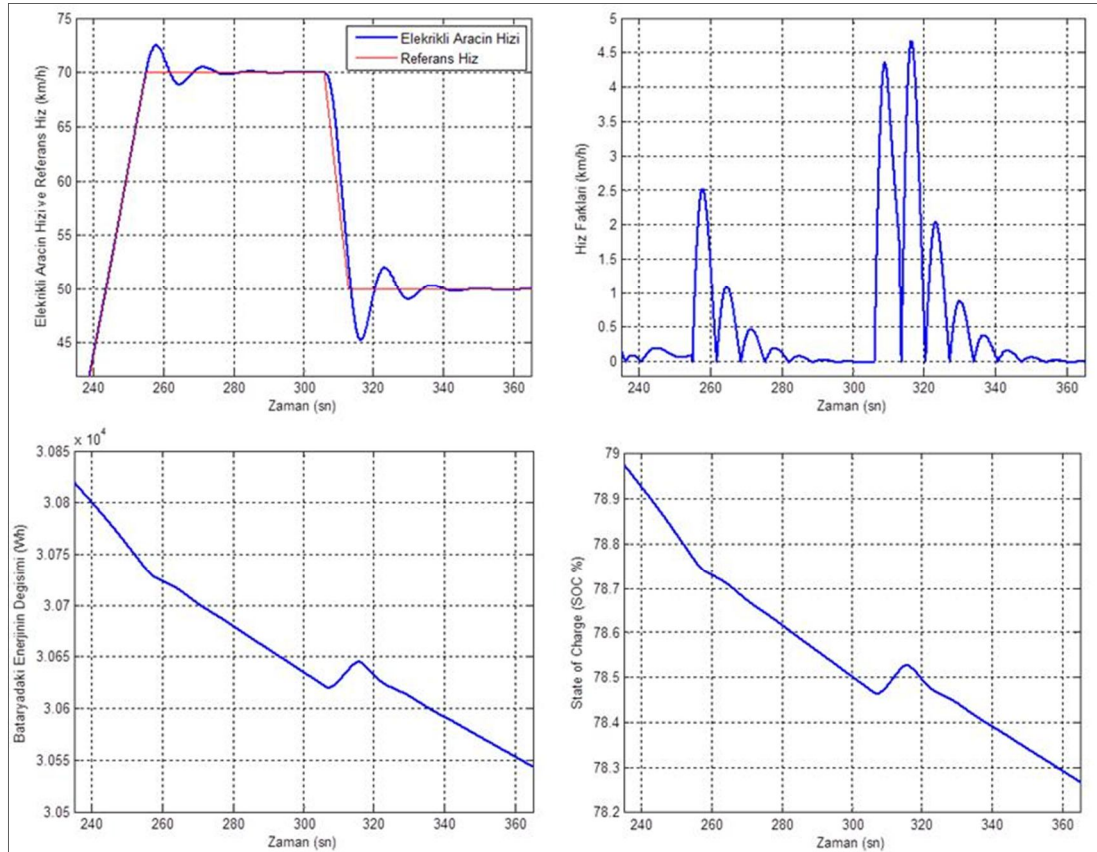


Şekil 3.21. SOC'm zamana göre değişimi (PI).



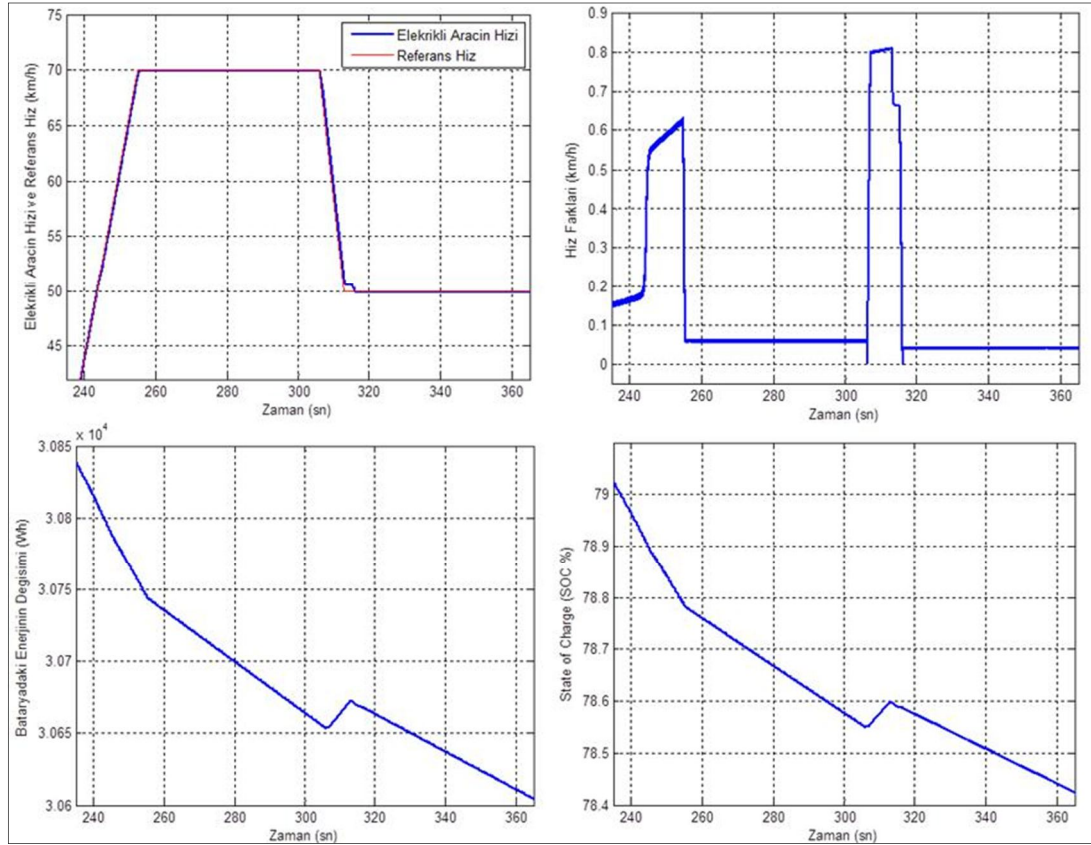
Şekil 3.22. SOC'm zamana göre değişimi (Bulanık Mantık).

ECE-15 sürüş çevriminde EA'nın takip etmesi gereken referans hız değerlerinde hızlanma, yavaşlama, sabit hız ve hızın sıfır olma durumları mevcuttur. Elde edilen simülasyon sonuçlarında EA'nın bütün bu davranışları görülebilirken özellikle sürüş çevriminin 240 ile 360. saniyeleri arasında PI ile kontrolde hızlanma, sabit hız ve yavaşlama durumları için sırasıyla EA'nın hızı, hız farkları, bataryadaki enerji ve SOC'ın değişimleri Şekil 3.23'te gösterilmektedir.



Şekil 3.23. Hızlanma, yavaşlama ve sabit hız anındaki değişimler (PI).

Aynı zaman aralığı için hızı Bulanık Mantık ile kontrol edilen EA'nın davranışları da Şekil 3.24'te gösterilmektedir. Daha detaylı analizin yapıldığı bu şekillerden de açıkça görülebileceği gibi daha az hız hatası ile referans hızın takibinde, daha az enerji tüketimi ve rejeneratif frenlemede daha fazla enerji kazanımıyla Bulanık Mantık Kontrol metodu ile PI Kontrol metoduna nazaran daha iyi sonuçlar elde edilebileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.24. Hızlanma, yavaşlama ve sabit hız anındaki değişimler (Bulanık Mantık).

İki farklı kontrol yöntemi için hızlanma, yavaşlama (rejeneratif frenleme) ve sabit hız ile yol alan elektrikli aracın referans hızı takip edebilmesi ve enerji tüketimi üzerine sonuçlar elde edilmiştir. Referans hızın takibinde Bulanık Mantık kontrol yönteminde seçilen zaman aralığında maksimum hız hatası 0,8 km/h olarak gerçekleşirken, bu hız hatası aynı zaman aralığında PI kontrol için 4,5 km/h olmaktadır. Yine seçilen zaman aralığında batarya üzerindeki enerjinin miktarı Bulanık Mantık ile kontrol edilen EA’da 30,60 kWh iken bu son değer PI kontrol için 30,55 kWh olarak tespit edilmiştir. EA’nın hızı 70 km/h’den 50 km/h’ye doğru azalırken 306 ile 313. saniyeler arasında rejeneratif frenlemeden dolayı elde edilen geri kazanımlarda net olarak görülebilmektedir.

ECE-15 sürüş çevriminde EA’nın harcamış olduğu enerji her iki kontrol yöntemi içinde yukarıda verilmişti. Aynı başlangıç ve yol şartlarında elde edilen bu iki grafikten (Şekil 3.19-20) EA’nın belirli sabit hızlarda gitmesi durumunda km başına ne kadar enerji harcadığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Özellikle bir aracın

performansını ölçmede referans alınan 50 km/h, 90 km/h ve 120 km/h hızları seçilmiştir. Çizelge 3.1’de belirli sabit hızlarda yol alan bir EA’nın iki farklı kontrol yönteminde km başına ne kadar enerji tükettiği gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde Bulanık Mantık ile kontrol edilen EA’nın az enerji tüketerek belli bir mesafe daha fazladan yol alacağı anlaşılmaktadır.

Çizelge 3.1. Sabit hızlarda km başına enerji tüketimi.

| EA’nın Hızı (km/h) | Kontrol Metodu | |
|-------------------------------|--|--|
| | Bulanık Mantık Kontrolü ile Tüketilen Enerji (Wh/km) | PI Kontrolü ile Tüketilen Enerji (Wh/km) |
| 50 | 124,5 | 129,5 |
| 90 | 103,2 | 104,8 |
| 120 | 96 | 99,6 |

Elde edilen bu değerler, rejeneratif frenleme ile tekrar kazanılan enerji miktarına, kullanılan sabit vites kutusu oranına ve aracın hızına bağlı olarak değişmektedir. Bu şartların değişmesi durumunda ise km başına tüketilen enerji miktarı da değişiklik gösterecektir.

Çizelge 3.1’deki verilerden istifade edilerek verilen referans hızlarla gidilecek maksimum menzil batarya bloğundaki toplam enerji miktarı için hesaplanmış ve Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Sabit hızlarda gidilebilecek maksimum menzil.

| EA’nın Hızı (km/h) | Kontrol Metodu | |
|-------------------------------|--|--|
| | Bulanık Mantık Kontrolü ile Gidilebilecek Maksimum Menzil (km) | PI Kontrolü ile Gidilebilecek Maksimum Menzil (km) |
| 50 | 180 | 175 |
| 90 | 220 | 217 |
| 120 | 236 | 228 |

Yapılan menzil hesabında aracın iki kişilik kapasiteye sahip olmasından dolayı ağırlığının az olduğu ve enerji yoğunluğu fazla olan bir batarya bloğunun kullanıldığı göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca Asenkron Makinanın kontrorlünde uygulanan sistemin ihtiyaç duyduğu mıknatıslanma akım değeri de 8,5 olarak alınmıştır. Bu sonuçlar ile hız kontrolünde doğru kontrol yönteminin kullanılması ile araç menziline klasik kontrol yöntemine nazaran yaklaşık % 3,5 artışı tespit edilmiştir.

EA'ların günümüzdeki sorunlarından birisi olan menzil, doğru kontrol yöntemi ile enerjinin az tüketilmesi ve rejeneratif frenlemeden elde edilen geri kazanım verimliliğinin yükseltilmesi sağlanarak artırılabilir. Bu durum göz önünde bulundurularak öncelikle farklı kontrol yöntemleriyle araç hızının kontrolü sağlanmış olup bu iki kontrol yönteminin araç performansına ve enerji tüketimi üzerine etkileri detaylı olarak incelenip rejeneratif frenleme ile enerjinin tekrar kazanılmasının menzile etkisi tespit edilmiştir.

BÖLÜM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, Asenkron Motor ile sürülen bir EA Matlab programında kod yazımı ile modellenerek benzetimi yapılmıştır. Tahrik motoru olarak kullanılan Asenkron Motor, FOC yöntemiyle sürülmüştür. Enerji depolama sistemi olarak Li-iyon batarya tercih edilmiştir. Elektrik makinasının hızı hem PI hem de Bulanık Mantık kontrol yöntemleriyle karşılaştırmalı olarak kontrol edilmiş ve arasındaki farklar yorumlanmıştır. Bulanık mantık kontrol yöntemi, PI kontrol yöntemine göre verilen referans hız değerini daha az hata ile takip ederek rejeneratif frenlemede daha fazla enerjinin geri kazanımını sağlamıştır.

Bir araca etkiyen kuvvetler ve araç kütlesi göz önünde bulundurularak motorun eylemsizlik momenti ve moment bileşenleri arasındaki ilişkiler modellenmiştir. Batarya üzerindeki enerji değişim grafiğinden rejeneratif frenleme ile belirli bir oranda enerjinin tekrar kazanıldığı tespit edilerek EA'nın rejeneratif frenlemedeki kazanım yüzdesi ile daha fazla menzile sahip olacağı gösterilmiştir.

Tahrik sistemi olarak kullanılan elektrik makinasının performansı, elektrikli aracın performansını etkileyeceği göz önüne alındığında elektrik makinasının sürülmesinde kullanılan kontrol tekniklerinin önemi daha da artmaktadır. Bu çalışmada SVPWM, evirici sisteminde; FOC, gerilim kontrolünde ve PI ile bulanık mantık yöntemleri de hız kontrolünde kullanılarak Asenkron Makinasının performansının artırılması sağlanmıştır.

İleride yapılacak çalışmalarda farklı batarya modelleri kullanılarak bir karşılaştırma yapılabilir. Bu çalışmada kullanılan Alan Yönlendirmeli Kontrol ile Doğrudan Moment Kontrol yöntemleri arasında bir karşılaştırma yapılarak araç performansı ve

batarya şarj durumları incelenebilir. Ayrıca PI ve Bulanık Mantık kontrol yöntemlerine ilave olarak PSO-PI ile de EA'nın performansı değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Hori, Y., "Future vehicle driven by electricity and control-research on four-wheel-motored", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51 (5): 1-14 (2004).
2. Demirci, Y., "Hibrit araçlarda elektrik motoru denetimi", Yüksek Lisans Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale, 21-50 (2010).
3. Ünlü, N., Karahan, Ş. ve Tür, O., "Elektrikli Araçlar", *Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü*, Gebze, 6-22, 42-100 (2003).
4. Koca, G. ve Akpolat Z. H., "Bulanık mantık ve erişim kuralı yaklaşımını kullanarak bir elektrikli aracın dayanıklı hız denetimi", *Politeknik Dergisi*, 9 (2): 93-103 (2006).
5. Husain, I. and Islam, M. S., "Design, modeling and simulation of an electric vehicle system", *International Congress and Exposition*, Michigan, 1149-1157 (1999).
6. Chan, C. C. and Chau, K. T., "Modern Electric Vehicle Technology", *Oxford University Press*, New York, 1-3 (2001).
7. Calef, D. and Goble, Robert., " The allure of technology: How France and California promoted electric and hybrid vehicles to reduce urban air pollution", *Policy Sciences*, 40 (1): 1-34 (2007).
8. Chan, C. C., "The state of the art of electric and hybrid vehicles", *Proceedings of IEEE*, 90 (2): 247-275 (2002).
9. Chan, C. C. and Wong, Y. S., "Electric vehicles charge forward", *IEEE Power & Energy Magazine*, 2 (6): 24-33 (2004).
10. Faiz, J., Hossieni, S. H. and Ghaneei, M., "Direct torque control of induction motors for electric propulsion systems", *Electric Power Systems Research*, 7796 (98): 95-101 (1999).
11. Yi, W. and Kaiqi, Z., "Field-oriented vector control of induction motor for electric vehicles", *Industrial Electronics Society 31st Annual Conference of IEEE*, Shenzhen, 1610-1614 (2005).

12. Boyalı, A., “Hibrid elektrikli yol taşıtlarının modellenmesi ve kontrolü”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1, 19 (2008).
13. Uğur, E., “Prototip bir elektrikli araç üzerinde enerji yönetim sisteminin uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 16-32 (2011).
14. Larminie, J. and Lowry, J., “Electric Vehicle Technology Explained”, *John Wiley & Sons Ltd.*, England, 60-64, 184-220 (2003).
15. Milicevic, Z. B., "Tesla's induction motor as a traction motor for electrical traction vehicles", *Sixth International Symposium Nikola Tesla*, Belgrade, 18-20 (2006).
16. Chan, C. C. and Lo, W. C., "Control strategy of PWM inverter drive system for electric vehicles", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 34 (4): 447-456 (1987).
17. Chang, L., "Comparison of AC drives for electric vehicles", *IEEE AES Systems Magazine*, 9 (8): 7-11 (1994).
18. Huang, H. and Chang, L., "Error driven PI control of ev propulsion systems based on induction motors", *Proceedings of IEEE*, 3: 1686-1690 (2002).
19. Elwer, A. S., "A novel technique for tuning PI-controllers in induction motor drive systems for electric vehicle applications", *Journal of Power Electronics*, 6 (4): 322-329 (2006).
20. Wang, Z. and Chau, K. T., "Design and analysis of a chaotic PWM inverter for electric vehicles", *Industry Applications Conference 42nd IAS Annual Meeting*, Louisiana, 1954-1961 (2007).
21. Joshi, P. J. and Deshmukh, A. P., "Vector control: A new control technique for latest automotive applications", *First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*, Kuttakuzhi, 911-916 (2008).
22. Li, Z., and Hefei, L., "Modeling and simulating of SVPWM control system of induction motor in electric vehicle", *IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL)*, Canada, 2026-2030 (2008).
23. Xue, X. D., Cheng, K. W. E. and Cheung, N. C., "Selection of electric motor drives for electric vehicles", *Australasian Universities Power Engineering Conference*, Hong Kong, 170-175 (2008).

24. Guzinski, J. and Abu-Rub, H., "Sensorless induction motor drive for electric vehicle application", *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2 (10): 20-34 (2010).
25. Bekkouche, D. D. and Bouhamida, M., "A non-linear control of electric vehicle driven by induction motors", *18th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, Lübnan, 669-672 (2011).
26. Farasat, M. and Karaman, E., "Speed sensorless electric vehicle propulsion system using hybrid FOC-DTC induction motor drive", *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Beijing, 1-5 (2011).
27. Huabin, W., Guorong, C. and Jinliang, S., "Sensorless vector control system for electrical vehicle", *Business Management and Electronic Information (BMEI) Conference*, China, 3: 121-124 (2011).
28. Santiago, J., Bernhoff, H. and Ekergard, B., "Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61 (2): 475-484 (2012).
29. Keskin, A., "Hibrid taşıt teknolojileri ve uygulamaları", *Mühendis ve Makina*, 50 (597): 12-20 (2009).
30. Ertaç, Y., "Elektrikli taşıtların tasarımı ve simülasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 8-46 (2008).
31. Demirel, A. "Elektrikli taşıtlar için doğrudan sürüslü ve bulanık patinaj önleyicili bir tahrik sistemi", Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 4-10 (1998).
32. Bael, C., "Electric vehicles: Market study and simulations", Yüksek Lisans Tezi, *Högskolan Halmstad School of Business and Engineering*, Halmstad, 18-20 (2011).
33. Ersan, K., Ar, I. and Bulut, S., "Improved new gas diffusion layer for PEM fuel cell" *Proceedings of 2nd International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC2007*, İstanbul, 13-15 (2007).
34. Husain, I., "Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals, 2nd Edition", *CRC Press*, New York, 2-5 (2003).

35. Grunditz, E. and Jansson, E., "Modelling and simulation of a hybrid electric vehicle for shell ecomarathon and an electric gokart", M.Sc. Thesis, **Chalmers University of Technology Electric Power Engineering**, Göteborg, 10-12 (2009).
36. Haddoun, A., Benbouzid, M. E. H. and Diallo, D., "Sliding mode control of EV electric differential system", **XVII. International Conference on Electrical Machines**, Chania, 400-405 (2006).
37. Luo, F. L. and Yeo, H. G., "Advanced PM brushless DC motor control and system for electric vehicles", **Proceedings of IEEE**, 2: 1336-1343 (2000).
38. Teat, J., "Short range electric vehicle motor controller", Yüksek Lisans Tezi, **University of Otago Master of Science**, Dunedin, 4-6 (2011).
39. Bal, G., "Doğru Akım Makinaları ve Sürücüleri", **Seçkin Yayıncılık**, Ankara, 57-60 (2001).
40. Artar, R. ve Ertuğrul, Ş., "AC asenkron motorun model tabanlı kontrolü", **İTÜ Dergisi**, 9 (5): 157-167 (2010).
41. Burke, A., "Ultracapacitors: why, how, and where is the technology", **Journal of Power Sources**, 91 (1): 37-50 (2000).
42. Zoroofi, S., "Modeling and simulation of vehicular power systems", M.Sc. Thesis, **Chalmers University of Technology Electric Power Engineering**, Göteborg, 4-6 (2008).
43. Zorpette, G., "Winner: Super charged", **Proceedings of IEEE**, 42 (1): 32-37 (2005).
44. Asker, M. E., Özdemir, M. ve Bayındır, M. İ., "Sinüsoidal DGM ile uzay vektör dgm yöntemlerinin karşılaştırmalı incelemesi", **5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)**, Karabük, 535-542 (2009).
45. Aktaş, M., "TMS320C6711 DSP tabanlı hız sensörsüz doğrudan moment kontrollü asenkron motor sürücü", Doktora Tezi, **KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, 17, 130-132 (2006)
46. Adam, A. A., "Sabit mıknatıslı senkron motorda moment dalgalanması ve gürültünün azaltılması", Doktora Tezi, **YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 26-33 (2007).

47. Bakan, A. F., “Asenkron motorda doğrudan tork kontrolünün incelenmesi ve gerçekleştirilmesi”, Doktora Tezi, *YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 60-62 (2002).
48. Danilov, D., Lyedovskikh, A. and Notten, P. H. L., “Voltage and temperature dynamic simulations for advanced battery management systems”, *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Chicago, USA, 1-6 (2011).
49. İnternet, Mathworks “Electrical Sources, Electric Drives/Extra Sources”, <http://www.mathworks.nl/help/physmod/powersys/ref/battery.html> (2012).
50. Aydeniz, M. G., “Asenkron motorların hız algılayıcısız kontrolünde yeni bir algoritmanın geliştirilmesi ve uygulaması”, Doktora Tezi, *YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 20-22 (2005).
51. Ehsani, M., Gao, Y. and Gay, S.E., “Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles”, *CRC Press*, New York, 155-166 (2005).
52. İnternet: Microchip Technology Inc., "Sensorless field oriented control of PMSM motors", <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01078A.pdf> (2012).
53. Doncker, D.R., Pulle, D.W.J. and Veltman, A., "Advanced Electrical Drives, 1st Edition", *Springer Press*, New York, 97, 241-242 (2011)
54. Sevinç, A., “Speed sensorless control of induction motors”, Ph.D. Thesis, *University of Bristol Department of Electrical Engineering*, England, 16-20, 29 (2001).
55. Bingöl, O., “Üç-Seviyeli evirici ile bir asenkron motorun bulanık mantık tabanlı vektör kontrolü”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10 (3): 452-459 (2006).
56. Nam, K. H., "AC Motor Control and Electric Vehicle Applications, 1st Edition", *CRC Press*, New York, 314-334 (2010).

EK AÇIKLAMALAR A.

PROGRAM KODLARI

Asenkron Motorun Matematiksel Modeli

```
function xd=IM_DE(t,x)

% Induction Motor Model

% a11=Lr/(Lr*Is-M^2); a12=M^2/Lr; a13=M/Lr; a33=Rr/Lr;
% a51=3*np*M/2/Ji/Lr; a52=Bf/Ji; a53=1/Ji;
% a51_Ji=a51*Ji; one_dt=1/dt;

global wg vmn vtn TL i dt
global a11 Rs a12 a13 M a33 a53 a51_Ji Bf TC

Te= a51_Ji*(x(2)*x(3)-x(1)*x(4));
Tnew=Te-TL(i);

xd=[a11*(vmn-(Rs+a12*a33)*x(1)+a13*(a33*x(3)+x(5)*x(4)))+wg*x(2);
    a11*(vtn-(Rs+a12*a33)*x(2)+a13*(a33*x(4)-x(5)*x(3)))-wg*x(1);
    a33*(M*x(1)-x(3))+(wg-x(5))*x(4);
    a33*(M*x(2)-x(4))-(wg-x(5))*x(3);
    wrd];
```

Li-iyon Bataryanın Parametreleri ve Şarj/Deşarj Modeli

```
function [Vbatt,soc,E,OV,ENG]=BATTERY_MODEL(i,dt,starting)

% Model of the battery for electric vehicle. 1180 li-ion cells
connected in series (156 cells=1 module) and parallels (10 modules)

% Sel=0 discharging, Sel=1 charging

% it: extracted capacity (0-->t)integral(i dt) > [Ah]
% i_f (i*): low frequency current dynamics > [A] (with tau time
constant)

% Battery Parameters
E0=500; % constant voltage > [v]
Rint=0.11618516; % total internal resistance,
Q=65; % maximum capacity > [Ah]
A=100.3729; % exponential voltage > [v]
K=0.04; % polarization constant [Ah-1]
B=4.913043; % exponential capacity > [Ah-1]
batt_eff=0.90; % battery efficiency 90%
one_cycle=10*3600;
energy_full=Q*(E0+A);

...

if Sel==0,
    Ebatt=E0-K*Q./(Q-it)*(i_f +it)+A*exp(-B*it); %
discharge
else
    Ebatt=E0-K*Q./(it+0.1*Q)*i_f-K*Q./(Q-it)*it+A*exp(-B*it); %
charge
end

if Ebatt<0 Ebatt=0; end

if Ebatt>E0+A Ebatt=E0+A; end

energy=energy-Ebatt*i*dt*((i>0)+batt_eff*(i<0));

if energy < 0.001 energy=0.001; end

EMF=E0-K*Q./(Q-it)*it+A*exp(-B*it);
E=EMF;
OV=K*Q./(Q-it)*i_f;

...
```

Araç Parametreleri

```
...  
% Vehicle Parameters  
m=700; % vehicle mass > [kg] (curb weight)  
A=1.8; % front area > [m^2]  
Cd=0.19; % aerodynamic drag coefficient  
Crr=0.00048; % rolling resistance coefficient  
rho_air=0.23; % air density > [kg/m^3]  
r=0.27; % wheel radius > [m]  
g=9.81; % free fall acceleration > [m/s^2]  
G=3; % gear ratio  
G_r=G/r; % gearing ratio  
reg_eff=0.50; % regenerative braking efficiency  
Paux=300; % auxiliary power for lights  
b1=10; % coefficient of friction > [Ns/m]  
gear_eff=0.95; % gearing ratio efficiency  
...
```


ÖZGEÇMİŞ

Turgut ÖZTÜRK, 1986 yılında Şarkışla'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladıktan sonra 2003 yılında Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. Lisans eğitimini 2007 yılında tamamladı. Ağustos 2008-2009 tarihleri arasında askerlik görevini Yedek Subay olarak tamamladı. 2010 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı ve halen bu görevini sürdürmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Yenimahalle Şehit Ahmet Şanlı Sok. Karakaş Sitesi A Blok No: 3/16
Safranbolu / KARABÜK
E-posta : turgutozturk@karabuk.edu.tr