



**T. C.
CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HİBRİT VE ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA
SÜPERKAPASİTÖR VE LİTYUM İYON BATARYALARIN
KONTROL EDİLEREK GÜÇ SİSTEMLERİNDE KULLANILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Feyyaz ALPSALAZ

(201492181042)

Enerji Bilimi Ve Teknoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Yavuz TÜRKEY

**SİVAS
EKİM 2018**

FEYYAZ ALPSALAZ'ın hazırladığı ve “**Hibrit ve Elektrikli Araçlarda Süperkapasitör ve Lityum İyon Bataryaların Kontrol Edilerek Güç Sistemlerinde Kullanılması** ” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ENERJİ BİLİMİ VE TEKNOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Yavuz TÜRKAY

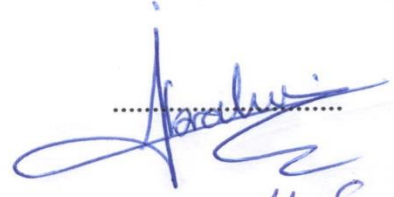
Cumhuriyet Üniversitesi



Jüri Üyesi

Doç. Dr. İbrahim CAN

Cumhuriyet Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ŞEKER

Mehmet Akif ERSOY Üniversitesi



Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. İsmail ÇELİK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.



Bütün hakları saklıdır.
Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Feyyaz ALPSALAZ, 2018



Bu tezimi eşim Süheyla DEMİRTAŞ ALPSALAZ’a ithaf ediyorum.

ETİK

Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)’nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

30/10/2018

Feyyaz ALPSALAZ

ÖZET

HİBRİT VE ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA SÜPERKAPASİTÖR VE LİTYUM İYON BATARYALARIN KONTROL EDİLEREK GÜÇ SİSTEMLERİNDE KULLANILMASI

Feyyaz ALPSALAZ

Yüksek Lisans Tezi

Enerji Bilimi Ve Teknoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yavuz TÜRKAY

2018, 90+xvii sayfa

Bu çalışmada süperkapasitör ve lityum iyon bataryaların bir arada kullanıldığı hibrit ve elektrikli araçlarda optimum batarya yönetimi, enerji yönetim ve güç dağıtım sistemlerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Lityum iyon akü ve süperkapasitör bataryaları içeren paralel hibrit, seri hibrit ve tam elektrikli araçlar için kural optimizasyon tabanlı yeni batarya yönetim sistemleri(BYS) ve kural optimizasyon tabanlı yeni enerji yönetim sistemleri(EYS) önerilmiştir. Önerilen BYS’lerde performans kriteri maksimum yapılırken, depolama sistemleri aşırı şarj/deşarj akımlarına karşı korunmuştur. Önerilen EYS’lerde ise araç parametrelerinin performanslarının test edilebileceği Matlab/SIMULINK tabanlı yeni bir model ile benzetim mimarisi geliştirilmiş ve bu mimari üzerinde seri hibrit, paralel hibrit ve tam elektrikli araç modeli oluşturulmuştur.

Geliştirilen araç model ve mimarilerinde enerji yönetim sistemi, süperkapasitör ve lityum iyon akü tek enerji depolama kaynağı olarak değerlendirilmiştir. BYS’nin süperkapasitör ve lityum iyon batarya arasındaki güç paylaşımı şarj yönetimi modeli ile yapılmıştır. Amerikan Kentsel Dinamometre Sürüş Standardı (UDDS) ve Yeni Avrupa Sürüş Döngüsü (NEDC) sürüş çevrimleri kullanarak, önerilen DC/DC konvertör modeli, batarya yönetim ve enerji yönetim sistemi performanslarına göre her iki çevrim kıyaslanmıştır. Elde edilen bulgular neticesinde NEDC sürüş çevrimi UDDS sürüş çevrimine göre yüksek verimliliğin yanında, daha az yakıt ve düşük emisyon miktarına sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hibrit ve elektrikli araç, lityum iyon akü, süperkapasitör, batarya yönetim sistemi, optimizasyon, enerji yönetim sistemi, verim, modelleme.

ABSTRACT

USING SUPERCAPACITORS AND LITHIUM-ION BATTERIES IN HYBRID AND ELECTRIC VEHICLES POWER SYSTEMS

Feyyaz ALPSALAZ

Master of Science Thesis

Department of Energy Science and Technology Engineering

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Yavuz TÜRKAY

2018, 90+xvii pages

In this study; we aim to develop optimal battery management, energy management and power distribution systems in hybrid and electric vehicles where supercapacitors and lithium ion batteries are used together. New rule-based battery management systems (BMS) and energy management systems (EMS) for parallel hybrid, serial hybrid and full electric vehicles with lithium-ion battery and supercapacitors have been proposed. While the performance criteria are maximized in the proposed BMS, storage systems are protected against over charge / discharge currents. In the proposed EMS, simulation architecture has been developed with a new model based on Matlab / SIMULINK where the performance of vehicle parameters can be tested and serial hybrid, parallel hybrid and full electric vehicle model has been formed on this architecture.

Energy management system, supercapacitor and lithium ion battery are the only sources of energy storage considered in developed vehicle models and architectures. The power sharing between the BMS and the supercapacitor and the lithium-ion battery was achieved by using a charge management model. The proposed DC/DC converter model was compared with two different driving cycles such as the American Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) and the New European Driving Cycle (NEDC) according to battery management and energy management system performances. According to the results, it was concluded that NEDC driving cycle has a higher efficiency, less fuel consumption and low emissions compared to UDDS driving cycle.

Key Words: Hybrid and electric vehicle, lithium ion battery, supercapacitor, battery management system, optimization, energy management system, efficiency, modeling.

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Yavuz TÜRKAY'a teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
TABLolar LİSTESİ	xiv
SİMGELER DİZİNİ	xv
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1 Elektrik Tahrikli Araçların Modellenmesi ve Simülasyon Araçları	4
1.2 Enerji Yönetimi, Batarya Yönetimi ve Güç Dağıtım Sistemleri	6
1.2.1 Optimizasyon tabanlı kontrol stratejileri.....	7
1.2.2 Kural Tabanlı Kontrol Stratejileri	8
1.3 Hibrit ve Elektrikli Araçlardaki Elektriksel Dönüştürücüler	9
2. HİBRİT VE ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA GENEL TANIM VE SİNİFLANDIRMALAR.....	11
2.1 Hibrit Elektrikli Araçlar.....	11
2.1.1 Seri hibrit araçlar	12
2.1.2 Paralel hibrit araçlar	13
2.1.3 Seri-paralel hibrit.....	13
2.1.4 Kompleks hibrit.....	13
2.2 Tam elektrikli Araçlar.....	14
2.3 Yakıt Hücresi Hibrit Elektrikli Araçlar	14
3. ELEKTRİK TAHRİKLİ MAKİNELER VE DEPOLAMA SİSTEMLERİ	15
3.1 Elektrik makineleri	15
3.2 Enerji depolama Sistemleri	16
3.2.1 Süperkapasitör teknolojileri	17
3.2.2 Akü teknolojileri	19
3.2.3 Süperkapasitörün diğer akü sistemleriyle birlikte kullanımı.....	26
4. HİBRİT ve ELEKTRİKLİ ARACIN SİMÜLASYON MODELLEMESİ.....	31
4.1 Önerilen Mimarisi Modelleme ve Simülasyon Modeli	31
4.1.1 Araç kütüphanesi.....	34
4.1.2 Mimarinin avantajları.....	35

4.2 Modellemenin Alt Bileşenleri.....	35
4.2.1 Sürüş çevrimi.....	36
4.2.2 Araç dinamiği.....	38
4.2.3 Tekerlek modeli.....	40
4.2.4 Diferansiyel modellemesi.....	41
4.2.5 Şanzıman modellemesi.....	42
4.2.6 Elektrik motor modellemesi	43
4.2.7 İçten yanmalı motor modellemesi	44
4.2.8 Jeneratör seti modellemesi	47
4.2.9 Lityum iyon akü modellemesi.....	48
4.2.10 Süperkapasitör modellemesi	51
5. BATARYA YÖNETİM, ENERJİ YÖNETİM VE GÜÇ KONVERTÖRLERİ .	56
5.1 Enerji Yönetim Sistemi Model Optimizasyonu.....	56
5.2 Batarya Yönetim Sistemi Model Optimizasyonu	58
5.3 DC/DC Konvertör Tasarım Modeli	60
6. HİBRİT VE ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI .	64
6.1 Paralel Hibrit Elektrikli Araç Simülasyonu	64
6.2 Seri Hibrit Elektrikli Araç Simülasyonu.....	71
6.3 Tam Elektrikli Araç Simülasyonu	78
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	83
KAYNAKÇA.....	86
ÖZGEÇMİŞ	90

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	Elektrik tahrikli araçlarda kullanılan batarya ve enerji yönetim stratejileri...	6
Şekil 1.2	DC/DC Konvertör Hücresi.....	9
Şekil 2.1	Elektrikli araç teknolojileri	11
Şekil 2.2	Hibrit elektrikli araç mimarileri	12
Şekil 3.1	Bir süperkapasitör yapısı.....	17
Şekil 3.2	Kurşun-asit akünün şematik gösterimi.....	20
Şekil 3.3	NiMH şematik gösterimi.....	21
Şekil 3.4	Lityum iyon akünün şematik gösterimi.....	22
Şekil 3.5	12V akü için örnek SOC ve voltaj eğrisi	24
Şekil 3.6	Tam köprü(Full-bridge) enerji dönüştürücü hücre dengeleme topolojisi. ..	28
Şekil 3.7	Süperkapasitör / Lityum iyon akü konvertör konfigürasyonu	28
Şekil 3.8	Lityum iyon akü / Süperkapasitör konvertör konfigürasyonu	29
Şekil 3.9	Kaskad konvertör konfigürasyonu	29
Şekil 3.10	Çoklu konvertör konfigürasyonu	30
Şekil 3.11	Çok girişli konvertör konfigürasyonu	30
Şekil 4.1	Önerilen seri hibrit elektrikli araç mimarisi	32
Şekil 4.2	Seri HEA simülasyon ortamı	32
Şekil 4.3	Önerilen paralel hibrit elektrikli araç mimarisi	32
Şekil 4.4	Paralel HEA simülasyon ortamı	33
Şekil 4.5	Önerilen tam elektrikli araç mimarisi	33
Şekil 4.6	EA simülasyon ortamı.....	33
Şekil 4.7	Araç model kütüphanesi.....	34
Şekil 4.8	UDDS sürüş çevrimi hız profili	36
Şekil 4.9	NEDC sürüş çevrimi hız profili	37
Şekil 4.10	Araca etki eden kuvvetler.....	38
Şekil 4.11	PMSM'nin a) d-ekseni ve b) q-ekseni eşdeğer devreleri	43
Şekil 4.12	Geo Metro 1.0 L SI (41Kw) motorun maksimum tork eğimi	46
Şekil 4.13	Lityum iyon akünün eşdeğer devresi	49
Şekil 4.14	Süperkapasitörün eşdeğer devresi	52
Şekil 5.1	Önerilen kural tabanlı optimizasyon stratejisi	57
Şekil 5.2	Önerilen batarya yönetim stratejisi	59
Şekil 5.3	Td ve Td* anahtarlama aralığı	61
Şekil 6.1	Paralel hibrit elektrikli araç batarya dizini akımı.....	65
Şekil 6.2	Paralel hibrit elektrikli araç batarya dizini çıkış gücü.....	65
Şekil 6.3	Paralel hibrit elektrikli araç batarya dizini kayıpları.....	66
Şekil 6.4	Paralel hibrit elektrikli araç elektrik motoru giriş gücü	66
Şekil 6.5	Paralel hibrit elektrikli araç elektrik motoru çıkış torku	67
Şekil 6.6	Paralel hibrit elektrikli araç elektrik motoru kayıpları.....	67
Şekil 6.7	Paralel hibrit elektrikli araç tork kuplajı giriş gücü	68
Şekil 6.8	Paralel hibrit elektrikli araç tork kuplajı çıkış torku	68
Şekil 6.9	Paralel hibrit elektrikli araç egzoz emisyon değerleri	69
Şekil 6.10	Seri hibrit elektrikli araç batarya dizini akımı	72
Şekil 6.11	Seri hibrit elektrikli araç batarya dizini çıkış gücü	72
Şekil 6.12	Seri hibrit elektrikli araç batarya dizini kayıpları	73
Şekil 6.13	Seri hibrit elektrikli araç elektrik motoru giriş gücü	73
Şekil 6.14	Seri hibrit elektrikli araç elektrik motoru çıkış torku.....	74

Şekil 6.15	Seri hibrit elektrikli araç elektrik motoru kayıpları	74
Şekil 6.16	Seri hibrit elektrikli araç jeneratör giriş torku	75
Şekil 6.17	Seri hibrit elektrikli araç jeneratör çıkış gücü	75
Şekil 6.18	Seri hibrit elektrikli araç egzoz emisyon değerleri	76
Şekil 6.19	Tam elektrikli araç batarya dizini akımı	78
Şekil 6.20	Tam elektrikli araç batarya dizini çıkış gücü	79
Şekil 6.21	Tam elektrikli araç batarya dizini kayıpları	79
Şekil 6.22	Tam elektrikli araç elektrik motoru giriş gücü.....	80
Şekil 6.23	Tam elektrikli araç elektrik motoru çıkış torku	80
Şekil 6.24	Tam elektrikli araç elektrik motoru kayıpları	81
Şekil 6.25	Tam elektrikli araç bataryaları SOC değişimi.....	81



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1	Elektrikli Tahrikli Araçların Karakteristikleri.....	3
Tablo 3.1	Farklı enerji kaynaklarının ortalama enerji yoğunlukları.....	16
Tablo 3.2	HEA'larda kullanılan akü teknolojilerinin karşılaştırılması.....	19
Tablo 3.3	Farklı üç tip akünün ortalama değerlerinin karşılaştırılması.....	22
Tablo 4.1	UDDS sürüş çevriminin özellikleri.....	36
Tablo 4.2	NEDC sürüş çevriminin özellikleri.....	37
Tablo 6.1	Paralel hibrit elektrikli araç modeli parametreleri.....	64
Tablo 6.2	PHEA güç ve frenleme enerji kullanım tablosu(UDDS).....	69
Tablo 6.3	PHEA güç ve frenleme enerji kullanım tablosu(NEDC).....	70
Tablo 6.4	Seri hibrit elektrikli araç modeli parametreleri.....	71
Tablo 6.5	SHEA güç ve frenleme enerji kullanım tablosu(UDDS).....	76
Tablo 6.6	SHEA güç ve frenleme enerji kullanım tablosu(NEDC).....	77
Tablo 6.7	Tam elektrikli araç modeli parametreleri.....	78
Tablo 6.8	Tam elektrikli güç ve frenleme enerji kullanım tablosu(UDDS).....	82
Tablo 6.9	Tam elektrikli güç ve frenleme enerji kullanım tablosu(NEDC).....	82

SİMGELER DİZİNİ

C	: Kapasitans
v	: Hız
F	: Kuvvet
M_v	: Aracın Kütlesi
ζ	: Eğim
H	: Araç Yüksekliği
L	: Dingil Mesafesi
g	: Yerçekimi Kuvveti
ω	: Açısal Hız
μ	: Yere Yapışma(Sürütme) Katsayısı
W	: Yapılan İş
a	: İvme
α	: Açı
I_i	: Akım
r_{wh}	: Tekerlek Yarı Çapı
ζ	: Dişli (vites) Sayısı
η	: Verim
δ	: Güç Aktarma Katsayısı
γ	: Şanzıman/Teker Açısal Hız Oranı
ρ_a	: Malzeme Yoğunluk Oranı
c_r	: yuvarlanma Katsayısı
c_d	: Sürüklenme Katsayısı
T	: Tork
R	: Direnç
J	: Atalet Momenti
Ψ	: Manyetik Akı
d ve q	: Motor Eksenleri
p	: Kutup Sayısı
p_m	: Basınç Sabiti
C_m	: Piston Hızı
U, ε, V	: Gerilim
u	: Durum Değişkeni
σ	: Kıvrık İlerlemesi
P	: Güç
Q	: Elektrik Yüğü
c_p	: Özgöl Isı
h_c	: Isı Transfer Katsayısı
C	: Kapasitans
P_{BAT}	: Batarya gücü
P_{SC}	: Süperkapasitör Gücü
$M_{Tekerler}$	: Tekerlek Momenti
T_d, T_d^*	: Anahtarlama Aralıkları
x, y	: Statik Denklemler
D, D^*	: Ortalama Değerler

KISALTMALAR DİZİNİ

BYS	: Batarya Yönetim Sistemi
EYS	: Enerji Yönetim Sistemi
HEA	: Hibrit Elektrikli Araç
EA	: Tam Elektrikli Araç
SC	: Süperkapasitör
Li-ion	: Lityum İyon Batarya
İYM	: İçten Yanmalı Motor
EDS	: Enerji Depolama Sistemi
GENSET	: Jeneratör ve İçten Yanmalı Motor Seti
SOC	: Şarj Durumu
DOD	: Şarj Derinliği
SHEA	: Seri Hibrit Elektrikli Araç
PHEA	: Paralel Hibrit Elektrikli Araç
EM	: Elektrik Motoru
AYS	: Akü yönetim sistemi
SYS	: Süperkapasitör Yönetim Sistemi
DC	: Doğru Akım
PMSM	: Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor
UDDS	: Amerikan Kentsel Sürüş Takvimi
NEDC	: Yeni Avrupa Sürüş Döngüsü
EKÜ	: Elektrik Kontrol Ünitesi

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun artmasına bağlı olarak trafiğe çıkan araç sayısı da artış göstermektedir. Araçlarda, fosil yakıtların kullanımı sonucu çevreye salınan sera gazlarının miktarını da arttırmıştır [1]. Atmosfere salınan zehirli gazların tümü içinde karbon monoksitin (CO) %65'ni, azot oksitinin (NO_x) %55'ni ve hidrokarbonun (C_xH_y) %45'ni araçlarda kullanılan fosil yakıtlardaki egzoz emisyonları oluşturmaktadır. Egzoz emisyonlarını azaltmak amacıyla, son yıllarda elektrikli araçlara doğru bir yönelme olmuştur [2].

Elektrik tahrikli araçlar yaklaşık 1800'lü yılların başından itibaren başlamış olup otomobilin icadından beri mevcuttur. Akü ile beslenen ilk elektrikli araç Tomas Davenport tarafından yapılmıştır. Elektrik tahrikli araçlar alanda hızlanma 1970'li yıllarda olmuştur. 1900'lerin başlarında içten yanmalı motorlar (İYM) ağırlık/güç oranının düşük oluşu ve petroldeki enerji yoğunluğunun yüksek olması nedeniyle daha çok önem kazanmıştır. 1970'li yıllara kadar İYM'lere göre birçok üstünlüğü bulunmasına rağmen elektrik tahrik prensipli araçlarda bataryaların enerji yoğunluğunun az olması bu alanda daha az ilgi görmüştür. 1970'li yıllarında patlak veren büyük petrol krizi, petrol fiyatlarının aşırı artması ve paralel olarak yakıt bağımlılığının artmasıyla birlikte yakıt tasarruf politikalarının izlenmesi popülerliği olmayan elektrikli araçlar (EA) yeniden gündeme gelmiştir. Bu amaçla, Japon Toyota firmasının ürettiği Prius modeli 1997 yılında gerçek anlamda ilk kez seri üretimi alınan modern hibrit elektrikli araç (HEA) olarak pazara sunulmuştur. Daha sonra 1999 yılında Amerika'da Honda Insight üretilmiştir. Hemen akabinde yine Honda firması Civic hibrit elektrikli aracını üretmiştir. Elektrikli araçlarla ilgili üç değişik tahrik teknolojisi vardır. Bunlar bataryalı elektrikli araç (tam elektrikli), birden fazla tahrik gücüne sahip (Elektrik ve İçten yanmalı motorları) hibrit elektrikli araçlar ve bataryalı ya da bataryasız yakıt hücreli araçlardır [3-5].

Benzin fiyatlarının yükselmesinden dolayı HEA'lara olan talep artmaktadır. HEA'lar, en az iki farklı enerji kaynağından beslenir (enerji depolama ve yakıt kaynakları). HEA en az iki motordan oluşur, bunların en az biri içten yanmalı motor diğeri elektrik motoru olmalıdır. Bu araçlar enerji akış kontrolleri için iki serbestlik derecesine sahip olduğundan, geçmiş yıllarda araştırmacılar için daha fazla ilgi alanı olmuştur.

HEA’larda, araç frenleme ya da yavaşlama durumunda iken batarya kaynakları, jeneratör seti veya rejeneratif frenleme yoluyla şarj edilir. Fakat jeneratör seti hem bataryayı şarj etmek için hem de aracı sürmek için kullanıldığından, bu döngüde yakıt kullanılırken büyük kayıplar söz konusudur [17].

HEA aynı zamanda ana enerji kaynağına (petrol ve gaz), volanlar, süperkapasitör(SC) ve bataryalar gibi ters enerji depolama cihazlarını bir araya getiren sistemlerdir. SC’ler ve aküleri birleştiren teknolojiler, SC’lerin yüksek dinamik performansları ve akü ömründen yaklaşık on yıl daha uzun ömürlü olmaları nedeniyle kısa ve orta vadede çok daha kullanışlıdır. SC’lerin güç yoğunluğu, çok daha küçük bir enerji yoğunluğuna sahip bir akününkinden 10 ila 100 kat daha büyüktür. Dahası, bu yüksek güçlü depolama cihazları bataryalardan daha az kirlilik riski sunmaktadır. HEA, termik motorlara sahip araçlar (otonomi ve esneklik) ve EA (kirlilik olmaması) avantajlarını birleştirir, ancak bu modelleri birleştirmek kolay değildir, çünkü cihazlar optimize edilmelidir [11].

Diğer bir ana kaynak olan akülerin, geçiş durumlarda aküden talep edilen güç, uzun süre sonra akünün ömrünü azaltır. Aynı zamanda akü ve süperkapasitörün hibridizasyon problemini çözmek için, bu cihazlar arasında iyi bir enerji yönetimi olmalıdır. Bu durumda akü boyutunun azaltılmasını ve ömrünün uzamasını sağlar. Akü ve SC enerji bağlantısı, aracın otonomisini ve performansını artırır. Optimizasyon problemleri için şimdiye kadar kullanılan çekiş aküsü, gelecekteki araçların enerji ihtiyacını karşılayamamaktadır.

EA’larda ise yüksek enerji verimi, sessiz çalışma ve egzoz emisyonu olmayışı gibi avantajlarına rağmen, EA’ların ticari olarak yaygın olmayışının altında iki temel etken yatmaktadır. Bu etkenler ilk üretim maliyetinin fazla olması ve menzilin düşük olmasıdır. Özellikle enerji depolama sistemlerinin (EDS) pahalı ve daha uzun şarj süresinin petrol tabanlı yakıtlara nazaran enerji kapasitelerinin düşük olması gibi problemleri bulunması, sektörü hibrit elektrikli araçlara yönlendirmiştir. Akü teknolojilerinin gelişmesine ve süperkapasitör teknolojisinin devreye girmesiyle birlikte hibrit elektrikli araçlar yaygınlaşmaya başlamıştır [6].

EA, hibrit araçlara göre kısa menzil ve daha düşük egzoz emisyonuna sahip olmasının yanında rejeneratif frenleme yaparak, aracın kinetik enerjisinin önemli bir kısmını depolayarak geri kazanmaktadır [12].

Tablo 1.1 Elektrikli Tahrikli Araçların Karakteristikleri [6].

Elektrik Araç Tipi	Tam Elektrikli Araç	Hibrit Elektrikli Araç	Yakıt Hücresli Araç
Tahrik Sistemi	-Elektrik motoru	-EA -İYM	-Elektrik motoru
Enerji Sistemi	-Batarya -Süperkapasitör	-Batarya -Süperkapasitör -İYM enerji üretici (GENSET)	-Yakıt Hücresi -Başlangıç yük yoğunluğu arttırmak için gerekli olan Batarya / Süperkapasitör
Enerji Kaynağı ve Altyapısı	-Elektrik şebekesi şarj tesisatı	-Yakıt tankı -Elektrik şebekesi şarj tesisatı(Plug-in Hibrit)	-Hidrojen -Hidrojen üretimi ve aktarma altyapısı
Karakteristikleri	-Sıfır emisyon -Yüksek enerji verimliliği -Petrolde tam bağımsızlık -Göreceli kısa menzil -Yüksek Fiyat -Piyasaya sürülmüştür.	-Düşük emisyon -Yüksek enerji verimliliği -İYM araçlara göre daha fazla yakıt tasarrufu -Uzun sürüş mesafesi -Petrole bağımlılık (plug-in hariç) -İYM araçlara göre yüksek fiyat -Piyasaya sürülmüştür.	-Sıfır ya da çok düşük emisyon -Yüksek enerji verimliliği -Petrolde tam bağımsızlık (Hidrojen üretmek için benzin kullanmıyorsa) -Yüksek fiyatt -Geliştirme aşamasında
Büyük Sorunlar	-Batarya ve batarya yönetimi -Şarj tesisi ya da tesisatı -Maliyet	-Birden fazla olan enerji kaynaklarının kontrolü, optimizasyonu ve yönetimi. -Batarya boyutlandırması ve yönetimi	-Yakıt hücresi maliyeti, ömür süresi ve güvenilirlik -Hidrojen altyapısı

Tablo 1.1’de görüldüğü üzere HEA’ların diğer elektrik araçlara nazaran daha uzun sürüş menzilli ve yakıt tasarrufuyla birlikte enerji maliyetlerin azalması dolayısıyla daha çok tercih edilmektedir. HEA’lar, İYM araçların ilk kalkış ya da trafikteki yoğunluk anlarında dur-kalk yapmasıyla yüksek enerji ihtiyacından kaynaklı anlık maksimum yakıt tüketiminde bulunmasını engellemek için, kalkış anında elektrik motoru kullanır. Bu çalışma şeklinde en verimli nokta aranır bunu sağlayabilmek için yüksek yük yoğunluğuna sahip EDS gereklidir.

Hâlihazırda kullanılan lityum iyon akülerin sahip oldukları enerji yoğunlukları 120-200 Wh/kg kademlerinde olmasına karşın İYM'lerde bulunan yakıtın enerji yoğunluğu 12500 Wh/lt den daha fazla olduğu düşünülürse, lityum iyon bataryaların bu seviyelere çıkması pek mümkün görülmemektedir. SC ise li-ion batarya gibi ya da diğer aküler gibi kimyasal reaksiyon gerçekleştirmezler. Süperkapasitörlerin güç yoğunlukları 2000-5000 W/kg seviyelerine çıkmalarına rağmen enerji yoğunlukları 2-5 Wh/kg gibi düşük değerdedir. Bu sebepten dolayı Süperkapasitör ve lityum iyon bataryalarının kullanımı performans ve verim adına bir arada kullanılması büyük avantaj sağlar.[7]

Bu çalışmada süperkapasitör ve lityum iyon bataryaların bir arada kullanıldığı HEA'larda, optimum batarya yönetimi, enerji yönetim ve güç dağıtım sistemlerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. HEA sistemleriyle ilgili 3 alanda yeni yaklaşımlar sunulmuştur.

1- Benzetim modeli

2- Batarya yönetim, enerji yönetim ve güç dağıtım optimizasyon yöntemi

3- Konverter tasarımı

3 farklı alanda literatür taraması yapılmış olup detaylı bir şekilde incelenip bu çalışmada yeni yaklaşım ve yöntemler ortaya konulacaktır.

1.1 Elektrik Tahrikli Araçların Modellenmesi ve Simülasyon Araçları

Elektrik tahrikli araçlarda bataryalar, motorlar, konvertörler, güç dağıtım, batarya yönetim ve enerji yönetim sistemleriyle birlikte yardımcı elektronik ve mekanik aktarma organları bulunur. Bu sistemler seçilirken maliyet, verim ve performans bileşenlerini seçebilmek önemlidir. İhtiyaçları karşılayacak şekilde bir motor seçimi yerine daha büyük bir motor seçilmesi durumunda bunu karşılayacak bir enerji sistemi de kullanmak gerektiğinden dolayı maliyetlerin aşırı atmasına neden olur ya da aracın aşırı yüklenmesi durumunda daha fazla enerji harcanarak fazladan yakıt harcanmış olur. Bu gibi durumlar modelleme ve simülasyon yoluyla performans, verim ve maliyet gibi durumlarını nitelendirmekte büyük bir kolaylık sağlamaktadır. Prototip üzerinde doğrudan bu yöntemleri uygulamak daha çok vakit kaybı ve maliyetli olacağından simülasyon ortamı bu kolaylıkları sağlamakla birlikte önemli verileri elde etmemizde önemli sonuçlar verecektir.

Simülasyon ortamındaki sistemin modellenmesi ne kadar gerçeğe yakın olursa o kadar doğru sonuçlar almamızı sağlar. Bu modellemenin doğruluğunu göstermiş olur. Modellemeler için dinamik, yarı kararlı ve kararlı olarak gruplayabiliriz.

Dinamik modelleme için kullanılan BCVTB (Building Controls Virtual Test Bed) sistemin tüm çalışma davranışlarını modeller, ancak BCVTB dinamik modelleme dışındaki modellemelerin matematiksel hesaplamalarını yapmasına karşın sistem davranışını analiz etmek konusunda bir yardım sağlamaz. BCVTB ve PSIM (power simulation) dinamik modellemede tüm sistemlerin tasarımı yapılabilir[8].

Yarı kararlı hal modellemede ise Argonne Ulusal Laboratuvarı ve Birleşmiş Milletler Enerji Departmanı tarafından geliştiren PSAT paket programı kullanılır. PSAT Matlab/Simulink tabanlı sistemi tarafından kullanılan C dilinin görsel programlamasıyla hazırlanmış kullanıcı girişine sahiptir [9].

Elektrik tahrik prensibiyle elektrikli araçların tamamının mimarisini barındıran 200'den fazla araç yapılandırılması mevcuttur. Diğer bir modelleme ise kararlı hal (steady-state) modellemesidir. Bu modellemede Birleşmiş Milletler Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından geliştirilen ADVISOR paket programıdır. Matlab/Simulink tabanlı kullanılan bu program, elektrik tahrikli tüm araçlarda yakıt, emisyon, performans ve verim analizlerinin yapıldığı sürekli simülasyon ve modelleme aracıdır. Tüm ana sistemlerle birlikte yardımcı sistemlerinde birbirine ardışık bağlı olduğu sistemleri kendi simülasyon ortamına taşır [10].

Bu çalışmada yeni bir modelleme ve simülasyon mimarisi önerilmiştir. Önerilen mimari bölüm 4'te ayrıntılı olarak incelenecek olup bundan sonraki araştırmalarda sistem bileşenlerini ölçeklendirme, yakıt tüketimi, performans eğrileri yeni bir enerji yönetim ve güç dağıtım optimizasyonu gibi sonuç karşılaştırmalarında oldukça önemli bilgiler verecektir. Önerilen modelleme ve mimari yukarıda verilen SIMULINK tabanlı yapı ana ve yardımcı alt sistemler ile kaskat bağlı bir prensibe dayanır. Böylece sistemlerin tamamı kolay araştırılabilir, yeni ve farklı araç mimarileri simülasyon ortamında oluşturulabilir.

1.2 Enerji Yönetimi, Batarya Yönetimi ve Güç Dağıtım Sistemleri

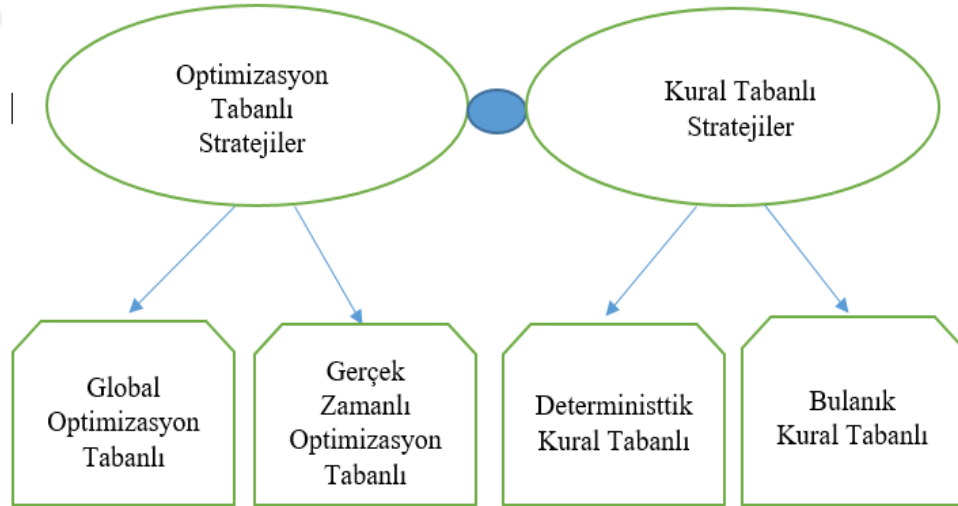
Elektrik tahrikli araç teknolojisinde akü, batarya sistemleri ve enerji kaynaklarından edilmeye çalışılan teknoloji gelişmeye daha açık olarak görülmektedir. Jeneratör ve motor teknolojileri yıllardan beri süre gelen bir gelişim içerisinde olduğu için bu alan geliştirmeye ihtiyaç duyulan bir alan olarak tercih edilmemektedir [11]. Batarya ve enerji kaynakları teknolojilerinden gerekli verimi ve daha iyi performansı alabilmek için bu yönetim merkezlerinin optimizasyonu gerekmektedir. Elektrik tahrikli araçlarda istenilen optimizasyonların kriterlerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

1-Yakıt tüketim miktarını azaltmak ve maksimum verime ulaşmak

2-Zararlı emisyonları azaltmak

3-Konfor/Maliyet oranını arttırmak

Elektrik tahrikli araçlardan özellikle birden fazla motor bulunan HEA'ların güç dağıtımının en iyi şekilde yapılabilmesi her iki motorunun, jeneratörünün ve bataryalarının-enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamaktır. Bu çalışmada süperkapasitör ve lityum iyon bataryanın birlikte kullanımında optimal kontrol stratejisi amaçlanmıştır.



Şekil 1.1 Elektrik tahrikli araçlarda kullanılan batarya ve enerji yönetim stratejileri[11].

Yapılan optimizasyonların temel amacı gerekli gücün ve enerjinin optimal bir şekilde kullanılmasıdır. Şekil 1.1’de görüldüğü üzere elektrik tahrikli araçlarda kontrol stratejileri optimizasyon tabanlı ve kural tabanlı olarak 2 ana gruba ayrılmıştır.

1.2.1 Optimizasyon tabanlı kontrol stratejileri

Optimizasyon tabanlı kontrol stratejisi, global ve gerçek zamanlı optimizasyon olarak iki başlıkta inceleyebiliriz. Bu tabanlı kontrol performans kriterli maliyet fonksiyonun minimum veya maksimum yapılmasını amaçlamaktadır. Sürüş çevrimi önceden biliniyorsa batarya veya enerji yönetim sistemlerinde çevrim boyunca önceki ya da sonraki talep edilen gücün bilinmesinde global optimizasyon ile çözüm elde edilir. Gerçek zamanlı bir sistemde ise yol ve sürüş çevrimi önceden bilinmediğinden global bir çözüm elde edilmez.

Global optimizasyon, sürüş çevrimini tam olarak bilinmediğinden çok fazla hesaplama işlemleri gerektirir. Ancak, farklı batarya ve enerji sistemlerinin karşılaştırılmasında kullanılabilir. Global optimizasyon teknikleri içerisinde lineer ve dinamik programlama teknikleri en çok kullanılanlardır. Dinamik programlama (DP), kontrol problemine en uygun çözümü bulmak için uygun bir tekniktir. Ne yazık ki, optimal kontrol problemini çözmek için bu yaklaşım, sürüş koşullarına (DP geri dönüş algoritmasının uygulanması için gerekli olan) dair önceden bilgi gerektirmektedir ve bu nedenle HEA gerçek zamanlı kontrol için uygun değildir.

Küresel optimal kontrol politikası, mevcut durumda sadece sistem değişkenlerine bağlı olarak “iyi tanımlanmış” bir maliyet fonksiyonunun anlık olarak en aza indirgenmesi kullanılarak elde edilebileceği gösterilebilir. Böyle bir maliyet fonksiyonunun tanımı, elektrik enerjisinin yakıt enerjisi ile karşılaştırılması için bir eşdeğerlik faktörü gerektirir. Bu yaklaşım, eşdeğer tüketim minimizasyonu stratejisi (ECMS) olarak bilinir. Eşdeğerlik faktörünün en uygun değeri, sadece sürüş döngüsü biliniyorsa, sistematik bir optimizasyon yoluyla bulunabilir. [14]’teki yapılan çalışmada adaptif ECMS (A-ECMS) adı verilen yeni bir kontrol stratejisi sunulmuştur. HEA için bu gerçek zamanlı enerji yönetimi, ECMS çerçevesine sürüş koşullarına göre eşdeğerlik faktörünün tahmini için anında bir algoritma eklenmesiyle elde edilmektedir. Ana fikir, kontrol parametresinin mevcut yol yüküne göre periyodik olarak yenilenmesidir, böylece batarya durumu sınırlar dahilinde tutulur ve yakıt tüketimi en aza indirilir. A-ECMS ile elde edilen sonuçlar, elde edilebilecek yakıt ekonomisinin sadece çok düşük düzeyde olduğunu ve operasyonların şarj sürdürme olduğunu göstermektedir.

Gerçek zamanlı optimizasyonda sürüş çevriminin önceden bilinmesine ihtiyaç yoktur. Bu yöntem ile küresel anlamda tam kullanışlı bir çözüm sunmaya bilir. [12]'de paralel bir HEA'ta küresel tabanlı bir optimizasyona dayanmayan, ancak mevcut sistem işletimine dayanan bir gerçek zamanlı yakıt optimal kontrolü geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem, bu uygulamadaki batarya durumu, şarj durumu (SOC) ve akülerin ark durumu, maliyet - yakıt tüketimi üzerindeki açık kısıtlamalarla karakterize edilen problemler için gerçekleştirilmiştir. Optimal kontrol, gerçek zamanlı olarak en aza indirilecek bir maliyet fonksiyonunun uygun bir tanımıyla bulunur.

1.2.2 Kural Tabanlı Kontrol Stratejileri

Kural tabanlı kontrol stratejisi, yakıt ekonomisini en üst düzeye çıkarmak ve egzoz emisyonlarını azaltmak gibi performans hedeflerine ulaşmak için, taşıt alt sistemlerinin çalışmasını koordine eder. Bu yüksek seviyeli kontrol problemi, genellikle güç yönetimi problemi olarak adlandırılır. Kural tabanlı enerji yönetimi yaklaşımlarında yer alan ana unsur, hibrit ve elektrikli araçlardaki güç akışının gerçek zamanlı denetiminde etkili olmalarıdır. Geçmişte sezgisel kontrol stratejileri sezgisel kullanım kullanılarak önceden tanımlanmış birkaç sürüş çevrimine dayanarak geliştirilmiştir. Kurallar; sezgisel, deneysel, insanların tecrübelerine ve hatta matematiksel modellere dayalı olarak ve genellikle önceden tanımlanmış bir sürüş döngüsü hakkında önceden bilgi sahibi olmaksızın tasarlanmıştır [41].

Kural tabanlı stratejilerin ana fikri, genellikle “yük dengeleme” kavramına dayanmaktadır. Hibrit ve elektrikli araçlarda enerji yönetimi için yük dengeleme fikrinin tanıtımı, daha sonraki yaklaşımların dayandığı bir altyapı bulmuştur [42]. Yük dengeleme stratejisi, gerçek İYM çalışma noktasını mümkün olan en yakın verime, yakıt ekonomisine veya belirli bir motor devrindeki emisyonu mümkün olan en yakın noktaya kaydırmaktır. Genel olarak, bu sistem için en iyi yakıt tasarrufu, en düşük verimlilikte daha düşük bir torkta ve daha düşük bir motor hızında bulunur. Bu, daha küçük hızlandırıcı komutları ile daha iyi yakıt ekonomisine ulaşılacağı anlamına gelir. Sürücünün komut gücü ve İYM tarafından üretilen güç arasındaki fark, EM tarafından telafi edilir veya şarjın ölçülen durumuna (SOC) göre bataryanın yenilenmesinde kullanılır.

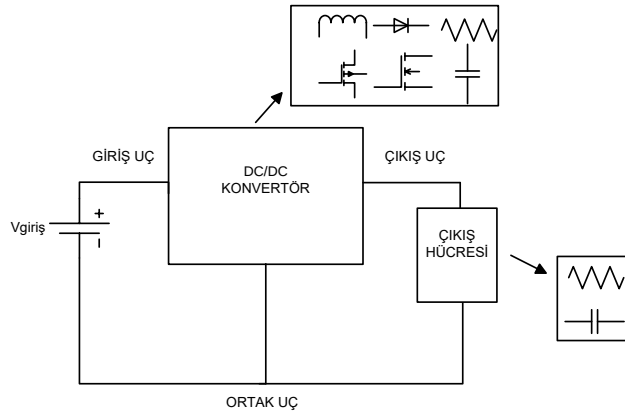
Açıktır ki, fiili çalışma noktasının yerini verimlilik haritasına değiştirmek, motor devri ve motor torkunun değiştirilmesini gerektirecektir. Motor devri vites oranı ve araç hızı

tarafından belirlenir. Ayrıca, silindirlere enjekte edilen yakıt miktarı veya İYM tarafından üretilen tork, motor kontrol ünitesi tarafından ayarlanmaktadır. Bu stratejiler, deterministik ve bulanık kural tabanlı yöntemlere sınıflandırılabilir [11].

Bulanık ve Deterministik kural tabanlı olmak üzere iki başlık altında incelemek mümkündür. Bunlardan bulanık mantık enerji yönetimi ve güç dağıtımı uygulanması noktasında bu yönetime başvurulmaktadır.

1.3 Hibrit ve Elektrikli Araçlardaki Elektriksel Dönüştürücüler

Hibrit ve elektrikli araçlarda kullanılan elektriksel dönüştürücülerden en önemlisi olan DC/DC konvertörler, güç elektroniğine gerek duyulan otomotiv, bilgisayar sistemleri, tıp, uzay bilimi ve telekomünikasyon gibi birçok alanda kullanır. Özellikle otomotiv sektörünün HEA ve EA teknolojilerinde multi-disiplin kullanılan konvertörler elektrik tahrik ve enerji sistemlerinin kontrolünde önemli bir role bürünmüştür. Genel olarak bu alanda birçok çalışma olmasına rağmen bir anahtar yapısı içerisinde birden fazla topolojik yaklaşımlara imkanına el vermemektedir. Üç (3) uçlu olarak tanımlanan DC/DC konvertörler anahtarlama ve pasif devre elemanlarının tamamını barındırır. Şekil 1.2'deki gibi giriş ve çıkış büyüklükleri haricindeki üç (3) uçlu kombinasyonlarını kullanarak bile farklı konvertör tasarımı üretilmiş olur.



Şekil 1.2 DC/DC Konvertör Hücresi

DC/DC konvertörlerin bir çalışma periyodunda devre elemanlarında ki depoladığı ya da çıkış transferindeki sürekli (CCM) veya sürekli olmayan(DCM) akım modunda çalıştırılmıştır. Kapalı form zaman alanı ifadeleri, indüktör akımları, voltaj kazancı, ortalama akım, iletim zamanı ve güç verimliliği fraksiyonel düzen indüktörünün etkisi kuvvetli olarak bulunur. Örneğin, kararlı durumda tepe indüktör akımı, indüktör sırasını düşürerek artar. [16]'daki çalışmada Gelişmiş Tasarım Sistemleri (Advanced

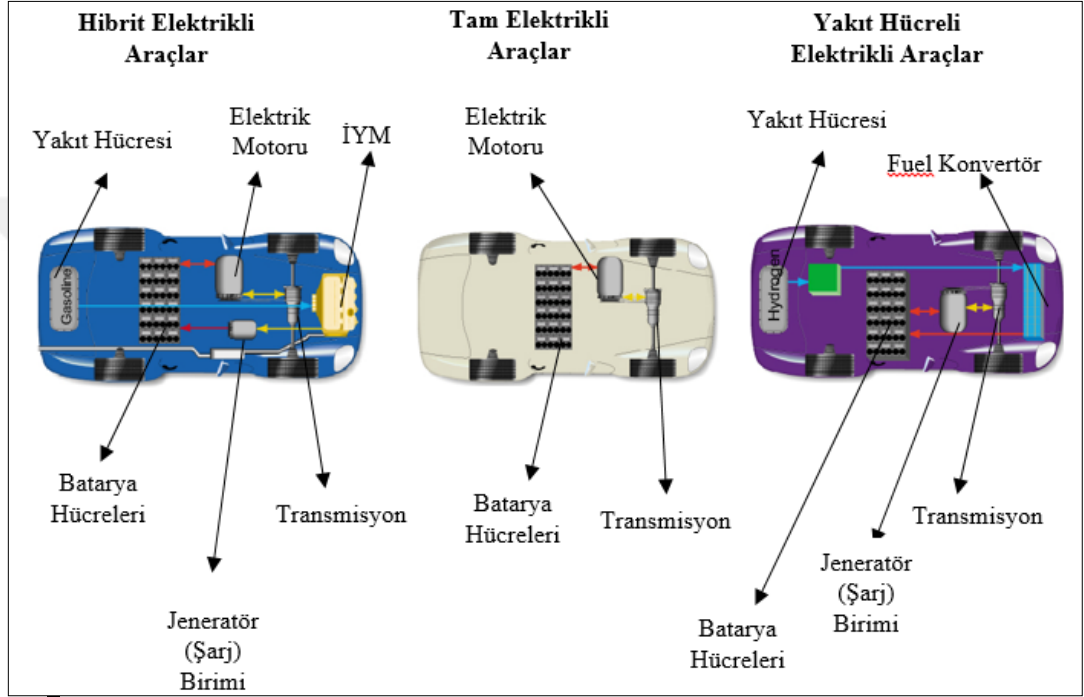
Design Systems, ADS) devre simülasyonları, türetilmiş formülleri doğrulamak için kullanılır, burada kısmi düzen indüktörü, Valsa Sabit Faz Elemanı (Constant Phase Element,CPE) yaklaşımı ve Genelleştirilmiş Empedans Dönüştürücü (Generalized Impedance Converter, GIC) kullanılarak simüle edilirler .

Genel olarak anahtarlama dönüştürücüleri ve özellikle de güç aşamalarının modellenmesinde, biri durum-uzay modellemesine dayanan ve diğeri ortalama alma tekniği kullanan iki ana yaklaşım kapsamlı olarak geliştirilmiştir, ancak bunlar arasında çok az ilişki vardır. İlk yaklaşım, kesinlikle denklem yönlendirmeleri alanında kalmaktadır. Dolayısıyla sayısal metotlara ve bilgisayarlı uygulamalara büyük ölçüde bağımlıdır. Birincil avantajı, iki anahtarlı modelin tam durum-uzay denklemlerinin kullanımı yoluyla, türden bağımsız olarak (güç, takviye, yükselme ya da herhangi bir başka varyasyon) tüm güç aşamalarının birleşik tanımındadır [18]. Öte yandan, ortalama alma tekniği kullanan yaklaşım, eşdeğer devre yaklaşımlarına dayanmakta olup, güç aşamasının tek bir eşdeğer doğrusal devre modeli ile sonuçlanmaktadır. Bu, devre tasarımcısına, orijinal anahtarlama devrenin davranışına fiziksel bir bakış açısı kazandırılması ve anahtarlama dönüştürücülerini içeren düzenleyicilerin tasarımında en üst düzeyde kullanılacak doğrusal devre analizi ve sentezinin güçlü araçlarına izin verme avantajına sahiptir[17].

Bu çalışmada bir DC/DC Buck-Boost güç devresi kullanarak süperkapasitör ve lityum iyon bataryanın bir arada sabit hız, ivmelenme ve rejeneratif frenleme ile aşırı şarj/deşarj akımlarından korumak ve yüksek verim sağlamaya çalışılmaktadır. DC/DC konvertörün performansları farklı sürüş tekniklerinden yararlanarak enerji, batarya ve güç sistemlerinin davranışları simüle edilecektir.

2. HİBRİT VE ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA GENEL TANIM VE SINIFLANDIRMALAR

Elektrikli araçlar teknolojisi sadece elektrik motoru ile olabildiği gibi içten yanmalı motorlar ile birlikte yardımcı ve alt sistemleriyle kullanılmaktadır. Farklı enerji kaynakları ve enerji yönetim sistemleriyle birlikte yeni nesil teknolojilere yatkın oluşu geleneksel (konvansiyonel) araçlara göre sektörde önemli bir yer kazanmaktadır.



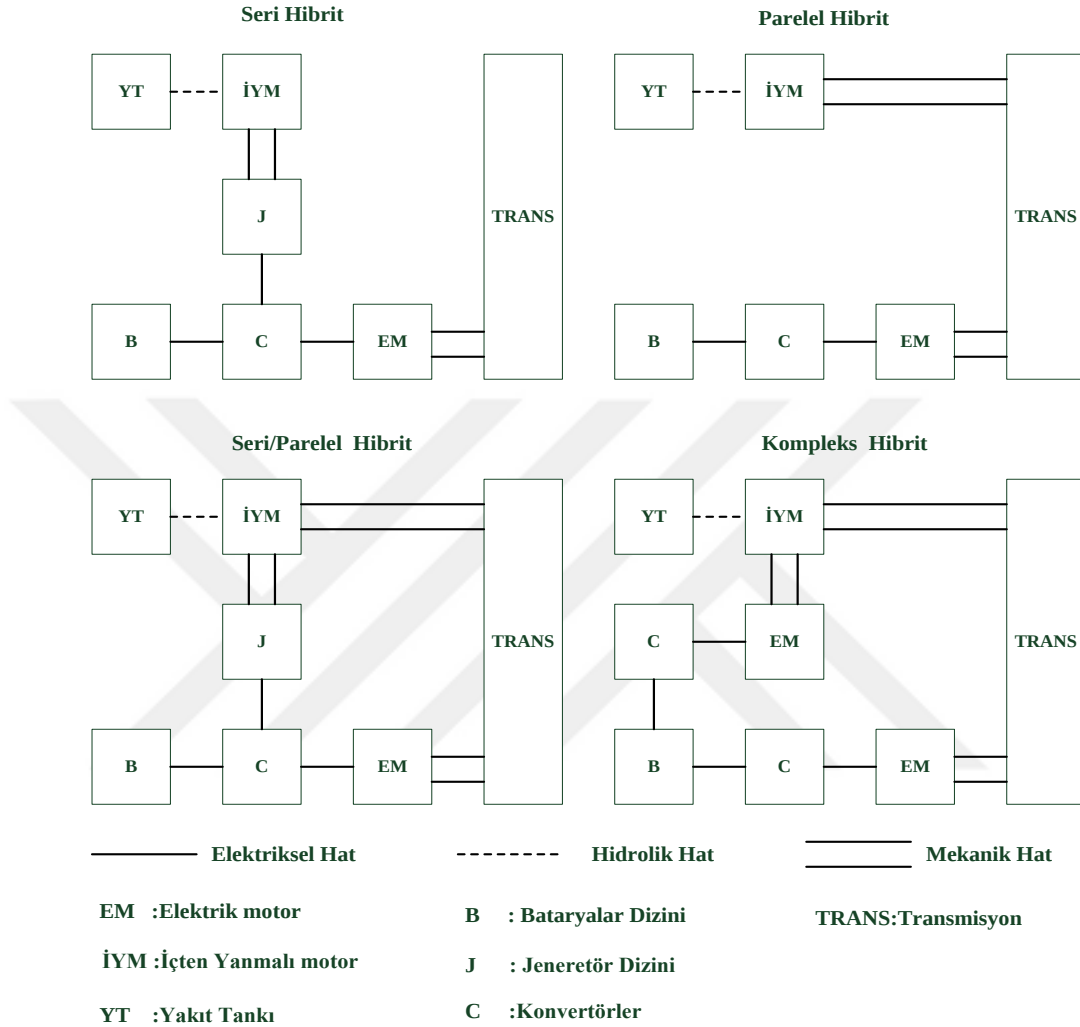
Şekil 2.1 Elektrikli araç teknolojileri

Hibrit ve elektrikli araçlarda akü dizini, lityum iyon batarya, süperkapasitör dizinleri, hidrojen tarzı yakıtlar ve petrol türevleri gibi birçok enerji veya enerji kaynakları araç mimarisinde kullanılmaktadır. Temel olarak elektrik tahrikli araçlar 3 kısımda incelenebilir. Elektrik tahrikli örnek araç teknolojileri Şekil 2.1’de teknolojileri gösterilmiştir. Bu araç teknolojileri genel olarak 3 ana başlıkta toplanır. Bunlar HEA’lar, yakıt hücreli hibrit elektrikli araçlar (YHEA) ve Tam EA olarak sınıflandırılır.

2.1 Hibrit Elektrikli Araçlar

HEA, tahrik enerjisinin iki veya daha fazla çeşitte enerji kaynağının konvertörden temin edilebildiği ve en az birinin elektrik enerjisi sağlayabileceği araçtır [22]. Genellikle menzili arttırılmış EA araçlarda denilebilir. EM ile İYM’nin birlikte kullanılması menzil problemini ortadan kaldırmasına rağmen egzoz emisyon değerleri oluşturması negatif bir durum ortaya çıkarır. İYM kullanımı enerji depolama

anlamındaki sıkıntıları ortadan kaldırdığı için maliyetleri EA'lara göre maliyetleri azaltmıştır. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi HEA mimarilerini 4 ana grup altında toplanmıştır.



Şekil 2.2 Hibrit elektrikli araç mimarileri [3].

2.1.1 Seri hibrit araçlar

Seri Hibrit, en basit HEA türüdür. Motor mekanik çıkışı ilk olarak bir jeneratör kullanılarak elektriğe dönüştürülür. Dönüştürülen elektrik ya aküyü şarj eder ya da tekerlekleri aynı elektrik motorunun ve mekanik şanzımanın üzerinden ilerletmek için aküden bağımsız DC bara üzerinden elektrik motoruna iletir. Kavramsal olarak, sürüş aralığını İYM araçlarıyla karşılaştırılabilecek şekilde genişletmeyi amaçlayan motor destekli bir elektrikli araçtır. Mekanik bağlantı boyunca debriyajların bulunmaması nedeniyle, motor-jeneratör setinin yerini belirlemek için gerekli olan esneklik avantajına sahiptir. Seri hibrit elektrikli araçların basitliğinin bir avantajı olmasına rağmen, üç itiş cihazına (içten yanmalı motor, jeneratör ve elektrik motoru) ihtiyaç

duyulması dezavantaj olarak görülür. Diğer bir dezavantajı ise HEA serisi uzun bir mesafelerde kullanılmak üzere tasarlanırsa, tüm bu itiş cihazlarının maksimum sürekli güç için boyutlandırılmasını gerektirmektedir. Öte yandan, sadece işe gidip gelmek gibi kısa yolculuklara ihtiyaç duyulduğunda, ilgili motor jeneratör seti daha düşük bir boyutta tasarlanabilir [3],[23].

2.1.2 Paralel hibrit araçlar

Seri HEA'dan farklı olarak paralel HEA, hem motorun hem de elektrik motorunun, hareket için paralel olarak güç sağlamasına izin verir. İYM ve EM genellikle iki debriyaj vasıtasıyla tekerleklerin tahrik miline bağlandığından, tahrik gücü sadece İYM tarafından tek başına veya her iki motor tarafından sağlanabilir. Kavramsal olarak, daha düşük emisyon ve yakıt tüketimi sağlamak için doğası gereği elektrik destekli bir İYM gibidir. Elektrik motoru, sürüş için gerekli olan momentumdan daha büyük olduğunda, rejeneratif frenleme veya motordan gelen emiş gücü ile aküyü şarj etmek için bir jeneratör olarak kullanılabilir. Paralel hibrit, seri hibrit araçlara göre iki tahrik motorunun oluşu büyük avantaj olarak görülür. Seri hibrit araçlara göre dezavantajı ise, pil bitene kadar aynı performansı elde etmek için daha büyük İYM ve daha büyük bir elektrik motorunun kullanılabilmesidir. Diğer bir dezavantajı ise uzun menzilde sadece İYM maksimum sürekli güce sahip olması gerekirken, seri hibrite göre elektrik motorunun yaklaşık iki katı kadar olmasıdır [3],[24].

2.1.3 Seri-paralel hibrit

Seri-paralel hibrit elektrikli araç konfigürasyonu seri ve paralel HEA'ların özelliklerini birlikte içerir, fakat seri hibrit ile karşılaştırıldığında ek bir mekanik bağlantıyı ve ayrıca paralel hibrit ile karşılaştırıldığında ek bir jeneratörü içerir. Seri ve paralel HEA'ların avantajlı özelliklerine sahip olmasına rağmen, seri-paralel HEA nispeten daha karmaşık ve maliyetlidir. Bununla birlikte, kontrol ve üretim teknolojilerindeki ilerlemelerle, bazı modern HEA'lar bu sistemi benimsemeyi tercih etmektedir [22],[25].

2.1.4 Kompleks hibrit

Bu sistem, yukarıda bilgileri verilen üç türden farklı olarak sınıflanamayan karmaşık bir yapı içerir. Kompleks (karmaşık) hibrit, seri-paralel hibrit ile benzer yapıda görünmektedir. Benzerlikteki ana faktör jeneratör ve elektrik motoru aynı elektrikli makinelerdir. Bununla birlikte, temel farklılık, karmaşık hibritteki elektrik motorunun

çift yönlü güç kaynağı, seri-paralel hibritte jeneratörün tek yönlü güç kaynağı olmasıdır. Bu iki yönlü güç kaynağı, çok yönlü çalışma modlarına özellikle de seri/paralel hibrit, paralel hibrit tarafından yapılamayan üç tahrik gücüne (motor ve iki elektrik motoru nedeniyle) izin verebilir. Seri-paralel HEA'lara benzer olarak, karmaşık hibrit daha yüksek karmaşıklık ve maliyet dezavantajı sağlar. Bununla birlikte, bazı yeni tanınmış HEA'lar bu sistemi çift aks tahrikine uyarlanırlar [3],[26].

2.2 Tam elektrikli Araçlar

Tam elektrikli araçlar, tahrik gücünü bir ya da birden fazla elektrik motoruyla sağlayan ve bünyesinde enerji depolama birimlerini (akü dizinleri, Süperkapasitörler, vb.) barındıran araçlardır. İhtiyaç duyduğu mil gücünün tamamını bünyesindeki enerji depolama sistemlerinden karşılar. Depolama sistemlerindeki bataryaların şarj edilme durumları göz önüne alındığı zaman petrol ve petrol ürünlerinden kaynaklanan zehirli egzoz emisyonunu oluşmasına neden olmazlar. Bundan dolayı EA'lar çevre dostu araçlar olarak tanımlamaktadır [27]. Sessiz çalışmaları, konvansiyonel araçlara ucuz yakıt, az sayıda mekanik donanım ve rejeneratif frenleme durumunda enerjinin geri kazanımıyla birlikte büyük bir ekonomik kolaylık sağlamaktadır. Yıllık batarya vergilerinin getirdiği yükümlüklerden ve menzil problemi nedeniyle henüz piyasalarda beklenen ilgiyi tam olarak görmemiştir.

2.3 Yakıt Hücreli Hibrit Elektrikli Araçlar

Son yıllarda, araçlarda yakıt hücrelerinin uygulanması, artarak dikkat odağı olmuştur. Bir kimyasal akünün aksine, yakıt hücresi depolamak yerine elektrik enerjisi üretir ve yakıt beslemesi devam ettiği sürece bunu yapmaya devam eder. Batarya ile çalışan elektrikli araçlarla karşılaştırıldığında, yakıt hücresiyle çalışan araç, uzun bir batarya şarj süresi olmadan daha uzun bir sürüş menzili avantajına sahiptir. İçten yanmalı motor araçlarla karşılaştırıldığında, yakıtta bulunan serbest enerjinin doğrudan yanma geçirmeden elektrik enerjisine dönüştürülmesi nedeniyle yüksek enerji verimliliği ve daha düşük emisyon avantajları vardır [28]. Bu alanda çalışmalar geliştirme aşamasında seri üretim ve topluma arz durumu söz konusu olmamakla birlikte, yüksek maliyet, yakıt istasyonu, pil çalışma sıcaklığı ve hidrojenin yüksek basıncından dolayı güvenlik nedenleriyle daha fazla araştırma ve laboratuvar çalışmalarına gereksinim duyulmaktadır.

3. ELEKTRİK TAHRİKLİ MAKİNELER VE DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Bu bölümde elektrik makinaları ve enerji depolama sistemleri hakkında önemli bilgiler verilmiştir. Çalışmada kullanıcak elektrik makinalarından, elektrik motoru ile jeneratör seçilirken dikkat edilmesi gereken avantaj ve dezavantajlar sunulmuştur. Ayrıca enerji depolama sistemlerinde kullanılan akülerin yapıları, kullanımları ve seçilme kriterleri belirlenmiştir. Son olarak süperkapasitör ile kullanacak akü sistemini konfigürasyonları bahsedilmiştir.

3.1 Elektrik makineleri

Elektrik makineleri konvansiyonel araçlarda, genellikle marş veya alternatör olarak kullanılır. Marş motoru, içten yanmalı motorun kendiliğinden çalışmasını sağlamak için rölanti devrinde motoru döndürür. Alternatör, aküyü 12 V voltaj ile şarj etmek ve motor çalışırken aracın elektrik yüklerine güç sağlamak için kullanılır. Elektrikli makineler, elektrikli ve HEA'lar için önemlidir. Elektrikli araçta veya paralel HEA'ta, genellikle aşağıdaki işlevleri yerine getirmek için bir çekiş motoru kullanılır:

- 1- Bataryalardan gelen elektrik gücünü, tekerlekleri tahrik etmek için mekanik güce dönüştürmek;
- 2- Rejeneratif frenleme periyodu sırasında mekanik gücü, lityum iyon aküyü ve süperkapasitörü şarj etmek için elektrik gücüne dönüştürmek;
- 3- Güç bölmeli operasyonlarda gerektiğinde bataryaları şarj etmek için mekanik gücün bir kısmını motordan elektrik gücüne dönüştürmek

Bu sebepten elektrikli makinelerdeki ve güç dönüştürücülerindeki kayıpları, taşıt tahrik sistemi üzerinde katlanarak artma etkisine sahiptir. Elektrikli veya hibrit elektrikli araçlardaki elektrikli makinelerin diğer temel gereksinimleri arasında düşük maliyet, yüksek güç, küçük boyut, yüksek güvenilirlik, düşük hata toleransı, düşük gürültü, iyi kontrol edilebilirlik ve kararlılık sayılabilir.

Elektrikli makineler Doğru Akım (DC) ve Alternatif Akım (AC) olarak sınıflandırılabilir. EA ve HEA için indüksiyon motorları, fırçasız DC motorlar ve sabit mıknatıslı senkron makineler popüler seçimlerdir. Ancak fırçalı DC motorlar, güvenilirlik endişeleri, hantal boyut ve düşük verimlilik gibi birçok dezavantaj nedeniyle kullanılmamaktadır. Bir elektrik jeneratörü, bir EM'nun tersi olarak hareket

ettiğinden ve prensipler ayrı bir tartışma gerektirmeden aynıdır. Hâlihazırda EA'larda ve HEA'larda uygulanan kalıcı mıknatıslı senkron motorlar (PMSM) ve Fırçasız DC motor (BLDC) kullanılmaktadır.

Elektrik tahrikli araçlardaki motor ve jeneratörleri ile ilgili eşdeğer devreleri, matematik modellemesi ve simülasyon modellemesi 4.bölümde daha ayrıntılı olarak bilgi verilmiştir.

3.2 Enerji depolama Sistemleri

Enerji depolama sistemleri, hareket için gerekli enerjiyi sağlayabilmek için bir kaynağa ihtiyaç duyar. Bu kaynak yakıt enerjileri olabildiği gibi enerji depolayan batarya sistemleri de olabilmektedir. Tablo 3.1'de farklı enerji kaynaklarının enerji yoğunlukları verilmiştir.

Tablo 3.1 Farklı enerji kaynaklarının ortalama enerji yoğunlukları [31].

Enerji Kaynağı	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)
Hidrojen	33000
Benzin	12500
Doğal gaz	9350
Kömür	8200
Metanol	6050
Lityum polimer batarya(EDS)	200
Lityum iyon batarya(EDS)	120
Nikel metal hidrit batarya(EDS)	50
Kurşun asitli batarya(EDS)	35
Volan (karbon fiber) (EDS)	30
Süperkapasitör(EDS)	3,3

Tablo 3.1 incelendiğinde yakıt enerji depolama kaynaklarının diğer enerji kaynaklarına göre göre dezavantajlı olduğu görülmektedir. Bu dezavantajlı durumlara rağmen yenilenebilir, basit, ucuz ve yüksek verimlerinden dolayı enerji depolama kaynaklarını kullanıcıya daha cazip gelmektedir. Bunlara ek olarak elektrikli araçlarda tahrik gücünü karşılayabilmek için bataryalarda aranan özelliklerinden bazıları aşağıdaki gibi listelenmiştir.

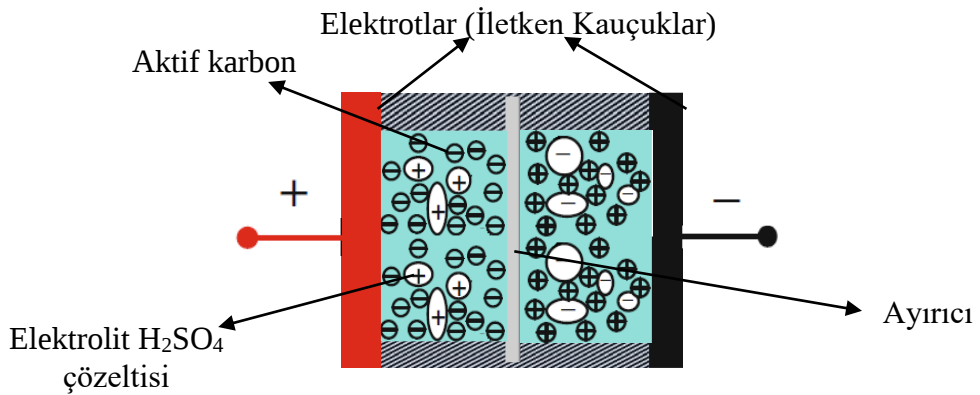
- Yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek güç yoğunluğu, aracın hızlanmasını ve enerjinin yenilenmesini sağlamak;

- Güvenilirlik ile dayanıklılık için; yüksek güvenlik ve uzun ömürlü batarya tercih etmek;
- Çevre koruması için pillerin geri dönüşümünü sağlamak
- Bir şarj döngüsünde uzun menzil performansı sağlamak için yüksek enerji yoğunluğuna ulaşılabilmek.

Bu çalışmada yüksek güç yoğunluğuna sahip süperkapasitörler ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip lityum iyon akülerin enerji depolama sistemleri teknolojileri üzerinde durulmuştur.

3.2.1 Süperkapasitör teknolojileri

Süperkapasitör (ya da diğer bir deyişle ultrakapasitörler) çok daha az bakım gereksinimi duyulan, düşük sıcaklıkta yüksek performans ve çevre dostu olma özelliği ile çok uzun bir kullanım ömrüne sahiptir. Süperkapasitörlerin tek dezavantajı, başlangıçtaki maliyetleri ve akülere kıyasla nispeten düşük enerji yoğunluğudur [29]. Akülerin aksine, süperkapasitörler ile elektrik enerjisinin depolanması ve geri çekilmesi için hiçbir kimyasal reaksiyona gerek yoktur ve bu nedenle enerji verimliliği daha yüksektir. Süperkapasitörün SOC değerini tahmin etmek oldukça kolaydır çünkü SOC, Gerilimin karesiyle orantılıdır [31]. Ayrıca, süperkapasitörler belirli bir değere şarj edilebilir, kullanım ömrü ve şarj mekanizması nedeniyle, bu şarjı neredeyse hiç kayıp olmadan tutabilirler. Aküler bunu başarmaktan acizdir. Kurşun asit veya Li-ion pilin tekrarlanan tükenme döngüleri, kullanım ömrüne zarar verebilir, ancak bu durum bir süperkapasitör için böyle değildir. Şekil 3.1’de süperkapasitörün yapısı görülmektedir.



Şekil 3.1 Bir süperkapasitör yapısı

Genel olarak, bir kapasitörün enerji kapasitesi, depolanan yüklerin miktarına ve plakaları arasında şarj etme potansiyeline bağlıdır. Elektrik alanının sürdürülebilir olduğu dielektrik kalitesi, şarj potansiyeli üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bununla birlikte, bir süperkapasitörde, dielektrik terimi, bu noktada kondansatörden daha fazla bir bataryaya benzediğinden elektrolit ile değiştirilebilir. Elektrolit, aslında aynı substrattan iki tabaka olan plakaları ayırır. Yüklü plakalar, elektroliti kutuplaştırır, bu da pozitif iyonları bir yöne hareket ettirir, kalanlarını negatif iyonlar haline getirir ve ikinci bir şarj setinin oluşmasına neden olur. Bu nedenle “ elektrik çift katlı ” denen şey, kayıpları depolamak için yüksek bir yüzey alanı sağlar. Geleneksel yalıtım bariyerinin yerine gözenekli toz halinde aktif karbon gibi yüksek yüzey alanlı malzemenin kullanılması, çok yüksek şarj potansiyeli veya kapasitans ile sonuçlanır. Bununla birlikte, bir aküden farklı olarak, bir süperkapasitörde hiçbir kimyasal reaksiyon söz konusu değildir, pozitif ve negatif yükler tamamen statik elektrik tarafından yaratılır [27].

Süperkapasitörler hızlı şarj ve deşarj sağlar. HEA'larda hızlı ve verimli rejeneratif enerji geri kazanımı hızlı şarj edilmesi için özellikle önemlidir. Basit şarj yöntemleri karmaşık bir SOC tespit algoritmasına ihtiyaç duymadan kullanılabilir ve voltaj izin verilen maksimum değer altında olduğu sürece fazla şarj olma tehlikesi vardır. Süperkapasitörler, yüzbinlerce deşarj / şarj döngüsünde çok az bozulma ile uzun bir çevrim ömrüne sahiptir (bir milyon çevrim sırasına göre). Karşılaştırma yapıldığında, şarj edilebilir piller sadece birkaç yüz derin döngü için geçerlidir.

Süperkapasitörler değişken voltajlar gerektiğinde, süperkapasitörlerden oluşan hibrit bir topoloji gereklidir. Acil durumlarda veya genel kullanımda kullanılabilecek portatif yakıt hücresi ya da akü sistemleri ile süperkapasitör birlikte kullanımı depolama sistemlerinde büyük fayda sağlamaktadır. Böyle sistemler tarafından geniş bir dizi yük veya cihaz çalıştırılabilir. Sıradan kapasitörlerde olduğu gibi, depolanan enerji voltajın karesidir. Verimli depolama ve enerji geri kazanımı, güç elektroniği şalterlerini içeren karmaşık elektronik kontrol ve dengeleme devrelerini gerektirir. Kendi kendine deşarj oranı, bir elektrokimyasal bataryanınkinden çok daha yüksektir ve bu nedenle sadece kısa süreli enerji depolama için uygundur [35].

Süperkapasitörden bir saniyede çok büyük miktarda enerji açığa çıkabilir ve bu önlemler alınmazsa yaşamı tehdit edebilir. Süperkapasitörün iç direnci çok düşüktür

ve bu da yüksek çevrim verimliliğine (% 95 veya daha fazla) neden olur. Çevreci olarak, süperkapasitörler, aşındırıcı elektrolitler veya diğer yüksek derecede toksik maddeler içermediğinden daha güvenlidir. Bu arada, şarj edilebilir pillerin, reaktif kimyasal elektrolitleri atma ve güvenlik sorununa çözüm sunmaktadır.

Süperkapasitörün enerji yoğunluğu bir elektrokimyasal bataryanınkinden çok daha düşüktür (bir süperkapasitör için 3-5 Wh / kg, bir kurşun asit batarya için 30-40 Wh/kg ve Li-ion batarya için 120-200 Wh/kg) ve hacimsel enerji yoğunluğu, benzinin sadece 1/1000'i kadardır [36].

3.2.2 Akü teknolojileri

Hibrit ve elektrikli araçlarda kullanılan farklı enerji depolama kaynakları vardır. Bunlardan en yaygın kullanılanları Kurşun-asit (Lead-acid) ,Nikel metal hidrit (NiMH) ve Lityum iyon(Li-ion) akülerdir. Tablo 3.2’de HEA’larda kullanılan akü teknolojileri karşılaştırılmıştır.

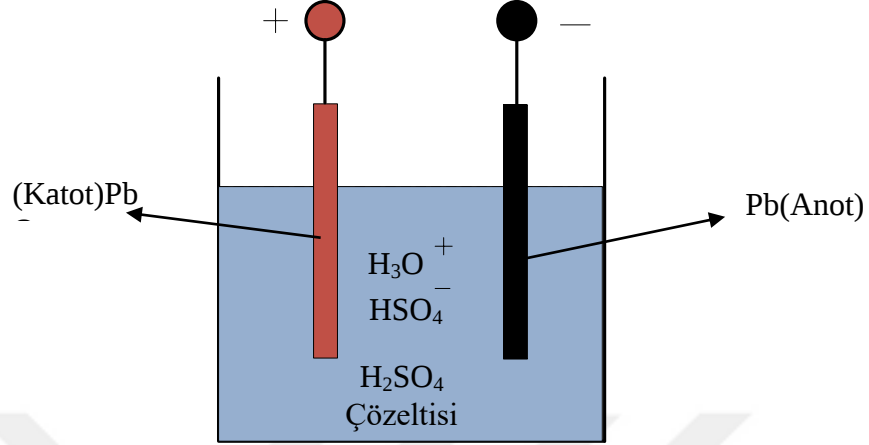
Tablo 3.2 HEA’larda kullanılan akü teknolojilerinin karşılaştırılması [31]

Akü teknolojisi	Çevrim Ömrü	Verimlilik (%)	Güç yoğunluğu (W/kg)	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)
Kurşun-asit	500-800	50-92	150-400	30-40
Lityum iyon	400-1200	80-90	300-1500	150-250
NiMH	500-100	66	250-1000	30-80

Tablo 3.2 incelendiğinde akü teknolojilerinin, birbirlerine göre belli üstünlükleri bulunmaktadır. Örneğin lityum iyon aküler diğer akülere göre yüksek enerji yönünden diğerlerinden üstünken, nikel metal hidrit (NiMH) aküler ortalama çevrim ömrü diğerlerinden fazladır. HEA’da kullanılacak kurşun-asit, lityum iyon ve nikel metal hibrit aküler hakkında bazı belirleyici özelliklerin bulunması gerekmektedir.

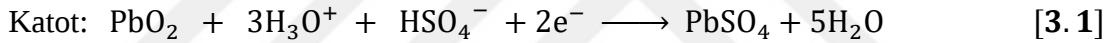
Kurşun-asit bataryaları, pozitif plakalar arasına sıkıştırılmış negatif plakalar içerir. Negatif plakalar, kurşundan (veya kurşun alaşımından) yapılırken, pozitif plakalar, katkı maddesi olarak kalsiyum veya antimon ile kurşundan (veya bir kurşun alaşımından) yapılır. Yalıtkan olarak mikro gözenekli malzeme ile kimyasal reaksiyonun gerçekleşebilmesi için izin verirken, kısa devreden dolayı oluşan durumları elektrotlar engeller. Her bir hücre, sülfürik asit (H_2SO_4) elektrolitinde kurşun metal (Pb) ve kurşun (+4 değerlik) dioksit (PbO_2) elektrotlarını içerir. Kurşun asitli bir akünün şeması, şekil 3.2’de gösterilmiştir. Akü boşaldığında, her iki elektrot

kurşun (+2 değerlik) sülfat (PbSO_4) haline gelir ve elektrolit çözünen H_2SO_4 'ü kaybolur ve su olur. Elektrolitin donması muhtemeldir çünkü su donma noktasına ulaşır ve H_2SO_4 'ün konsantrasyonu azalır [37].



Şekil 3.2 Kurşun-asit akünün şematik gösterimi

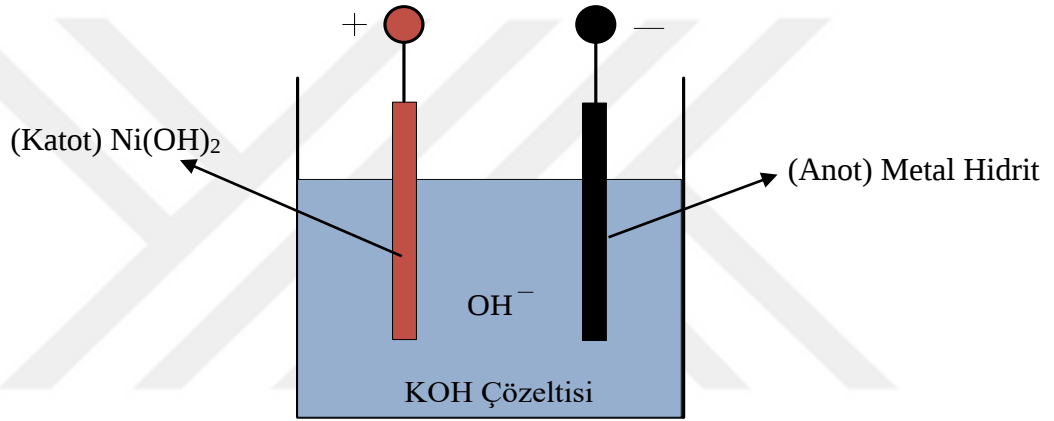
Şarj olurken, hücreyi birincil duruma geri kazanmak için PbSO_4 ve su miktarı azalır. Kurşun-asit akünün kimyasal reaksiyon denklemleri aşağıdaki gibidir.



Yukarıdaki elektrokimyasal reaksiyon, hücrenin potansiyelini veya hücre voltajını (Pozitif ve negatif plakaların potansiyel farkı) oluşturur. Plaka levhaların üzerine şarjını veya polarizasyonunu korumak için bir şamandıra şarjı yerleştirilir. Kurşun-asit akülerin bir türü olan Valf çıkışlı kurşun-asit akü (VRLA), elektrolit seviyesinin düzenli olarak kontrol edilmesini gerektirmez. Herhangi bir sıvı (su) gerektirmedikten VRLA pilinin verimliliği % 95–99'dur. Bununla birlikte, VRLA hücreleri elektrolit kaybolduğunda “kuru” diye adlandırılabilir, bu nedenle hücrelerin kapasiteyi kaybetmesini önlemek için normal iç direnç, iletkenlik veya empedans ölçümleri gereklidir. VRLA akülerinin elektriksel özellikleri, sulu kurşun-asit bataryalardan biraz farklıdır ve bunları şarj etmek ve boşaltmak için dikkatli olunmalıdır [38].

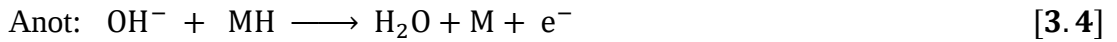
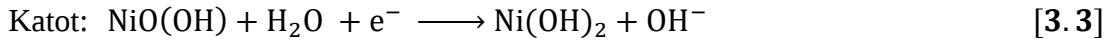
HEA’larda kullanılan diğer bir enerji depolama sistemi olan nikel-metal hidrit (NiMH) aküler, nikel-kadmiyum (NiCd) akülerin yerini pazar payını büyük kapasiteye bağlı olarak aşamalı olarak devralmaktadır. NiCH batarya ile karşılaştırıldığında NiMH

batarya, kadmiyum yerine negatif elektrot için hidrojen emici bir alaşım kullanır. Bir NiMH hücresi, eşdeğer boyuttaki bir NiCd hücresinin kapasitesinin iki ila üç katı kadardır. NiMH pilindeki katot için aktif madde aslında hidrojenidir. Hidrojen iyonları (protonlar), katot olarak da kullanılan metal hidrit yapısında depolanır. Bir NiMH aküdeki “ M ” harfi aslında bir intermetalik bileşiktir. En yaygın olarak kullanılan bileşikler AB₅'e aittir, burada A lantan, seryum, neodimyum praseodimun nadir bir toprak karışımını temsil eder ve B ise nikel, kobalt, manganez ve alüminyum anlamına gelir. Elektrolit, anot reaksiyonuna girmez, böylece iletkenlik, pilin kullanılabilir kapasitesi boyunca yüksek bir seviyede kalır. Ek olarak, nikel aktif madde, daha uzun ömür ve daha iyi bir tolerans sağlayan KOH elektrolitinde çözünmez [39].



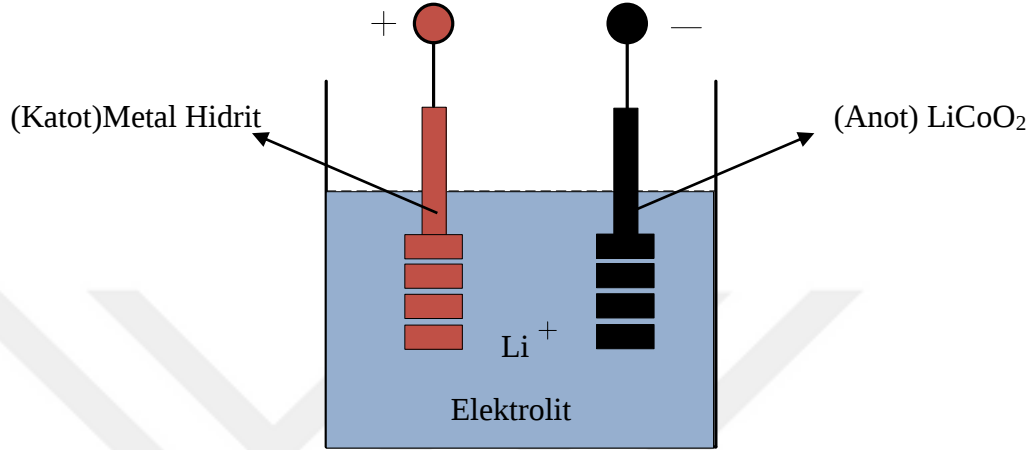
Şekil 3.3 NiMH şematik gösterimi

Çok küçük yoğunluk değişikliklerine ve döngü sırasında anodun geliştirilmiş mekanik stabilitesine yol açan şarj / deşarj reaksiyonuna sadece bir proton katılır. Şekil 3.3'te NiMH pilinin şemasını göstermektedir. Kimyasal reaksiyon denklemleri aşağıdaki gibidir.



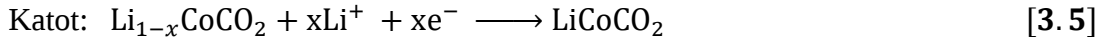
Katalizörler, kapasitansın 1/10'na kadar olan akımlarla fazla şarja bağlı olarak oluşan gazların etkisini azaltmak için NiMH'in hücrelerinde kullanılır. NiMH piller önemli ölçüde ısınacaktır, bu da şarj işleminin bittiği anlamına gelir. Bununla birlikte, hidrojen artışı hücrenin patlamasına neden olabilir. Böylece ciddi aşırı yükleme işlemi sırasında hidrojenin bu havalandırmadan yayılmasına izin vermek için bir havalandırma deliğine ihtiyaç vardır [40].

Son olarak lityum iyon (Li-ion) üküler, lityum iyonunun anot ve katot arasında hareket ettiği bir tür şarj edilebilir pildir. Boşaltım sırasında, lityum iyonları anottan serbest bırakılır ve katoda doğru organik bir elektrolit ile ilerler. Lityum iyonları katoda ulaştığında, katot malzemesine hızla dahil edilirler. Şarj ederken, işlem tersine çevrilebilir. Lityum iyonları katottan anota doğru hareket eder.



Şekil 3.4 Lityum iyon akünün şematik gösterimi

Bir Lityum iyon pilin şeması, Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Anot ve katotun, tabakalar arasında hareket etmek için lityum iyonları için yapılar oluşturduğu gözlenmiştir. Kimyasal reaksiyon denklemleri şöyle ifade edilir;



Genel olarak, anot malzemeleri, çeşitli yapıları, özellikle grafit ve hidrojen içeren karbon materyallerdir. Katot için kobalt, nikel ve manganez oksitleri kullanılmıştır. Kobalt oksitin performansı üç tip arasında en iyisidir, maliyeti ise nikel oksit ve manganez oksitten daha yüksektir.

Tablo 3.3 Farklı üç tip akünün ortalama değerlerinin karşılaştırılması [27].

Karakteristik tipi	Kurşun-asit	Nikel Metal Hidrit	Lityum iyon
Gravmatik enerji yoğunluğu (Wh/kg)	35	70	180
Volimertik enerji yoğunluğu (Wh/L)	70	140	180
Enerji/Tüketim Fiyatı (Wh/\$)	7	2,75	2,8
Elektriksel verim (%)	90	66	85
Kendiliğinden boşalma oranı (% / ay)	20	30	5
Dayanıklılık (döngü)	800	1000	1200

Tablo 3.3 detaylı incelendiğinde Li-ion bataryaların, diğer eşdeğer diğer bataryalar ile karşılaştırıldığında, ağırlık avantajı vardır. Ayrıca, Li-ion aküler sulu akülere (kurşun-asit, NiMH, vb.) kıyasla yüksek bir açık devre voltajına sahiptir ve Li-ion pilleri hafıza etkisinden etkilenmez. Ayrıca, aylık% 5'lik kendiliğinden deşarj oranı, diğer aküler için ayda% 20 ve üzeri olduğu düşünüldüğü zaman çok büyük avantaj sağlamaktadır. Ancak, Li-ion piller NiMH piller kadar güvenli değildir. Aşırı sıcaklık için kapama ayırıcısı, iç basınç için yırtma çıkıntısı, aşırı basınç için hava tahliyesi ve aşırı ısınma için çeşitli kesilmelere sahip birkaç güvenlik cihazı Li-ion akülere yerleştirilmelidir[27]. Sonuç olarak li-ion aküler diğer pillere göre bariz avantajlarının olduğu görülmektedir. Çalışmada seçilecek akülerin belirlenmesinde, karakteristik özellikleriyle ilgili bilinmesi gereken önemli parametreler aşağıda tanımlanmıştır.

Kapasite (C): Akü kapasitesi, bir akünün tamamen deşarj edilmeden önce sağlayabileceği elektrik şarjı miktarını belirtir. Pil kapasitesinin SI birimi coulomb'dur. Batarya kapasitesi için daha genel ile amper-saat (Ah) ve bir birim 1 Ah = 3600C 'dir. Örneğin, 20 Ah'lık bir batarya 20 saat boyunca 1 A akım veya 10 saat boyunca 2 A veya 1 saat teoride 20 A sağlayabilir. Fakat genel olarak, batarya kapasitesi deşarj oranına bağlıdır. Akü deşarj oranını belirtmenin iki yolu vardır: C oranı amper cinsinden orandır, nC oranı ise 1 / n saat içinde bir aküyü boşaltır. Örneğin, C / 2 oranı bir bataryayı 2 saat içerisinde boşaltır ve 5C'lik bir hız, bir bataryayı 0.2 saatte boşaltır. 2 Ah akü için, C / 5 oranı 400 mA iken, 5C oranı 10 A'dır.

Depolanan Enerji (E): Bir bataryada depolanan enerji batarya voltajına ve içinde depolanan şarj miktarına bağlıdır. Depolanan enerji, için SI birimi Watt saattir(Wh).

Şarj seviyesi (SOC): Bataryanın kalan kapasitesinin bir ölçüsüdür. Yani tam olarak ifade edilmesi gerekirse o anki enerji miktarının, tam dolu olduğu enerji miktarına oranıdır. Bu oran State Of Charge (SOC) diye ifade edilir. Ancak çevrim ömrünü nerdeyse tamamlamış bataryalarda bu oran %100 yerine %80'ler civarındadır. Dolayısıyla hesaplamalarda State Of Health (SOH) yani yaşlanma etkisi yapılan hesaplama ve uygulamalarda göz önünde bulundurulmalıdır. Matematiksel olarak tanımlamak için tamamen boşalmış bir bataryayı düşünün. Akü, $I_b(t)$ şarj akımı ile şarj edilir; Böylece t0'dan t'ye kadar, bir batarya elektrik yükünü tutacaktır.

$$Q = \int_{t_0}^t I_b(\tau) d\tau \quad [3.7]$$

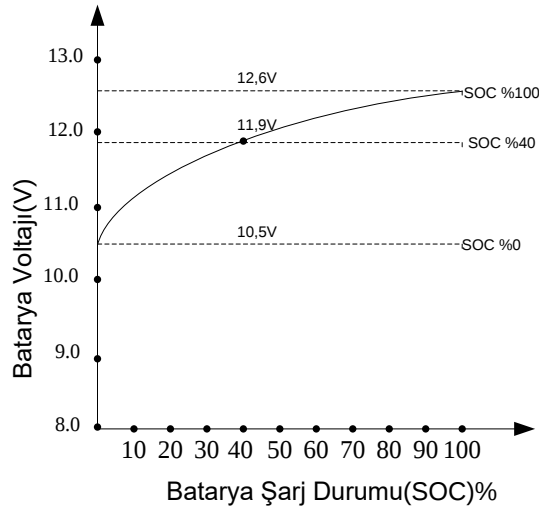
Bataryanın tutabileceği toplam şarj:

$$Q_0 = \int_{t_0}^{t_2} I_b(\tau) d\tau \quad [3.8]$$

Akünün artık daha fazla şarj almaması durumunda t_2 kesme süresidir. Daha sonra SOC şöyle ifade edilebilir:

$$SOC(t) = \frac{\int_{t_0}^t I_b(\tau) d\tau}{Q_0} \times 100\% \quad [3.9]$$

Tipik olarak, akü SOC % 20 ile % 95 arasında tutulur. Kullanıcıların bir pilin şarjı hakkında yapabilecekleri yaygın bir hata, bir pil “ölü” olduğunda, voltaj 12'den 0V'a (12V'luk bir pil için) iner. Gerçekte, bir bataryanın SOC % 0 ile % 100 ve voltajı 10.5V ile 12,6 V arasında değişir. SOC'nin % 40'ın altına düşmemesi önerilir, bu da 11,9 V'luk bir voltaja karşılık gelir. Tüm aküler, üreticinin verilerine bakılarak veya deneysel olarak belirlenebilen SOC'ye karşı gerilim eğrisine sahiptir. Bir kurşun asit bataryasının SOC ve voltaj eğrisinin bir örneği, Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Bir lityum-iyon pil için eğrinin özellikle % 40-80 SOC arası orta aralığı için daha düz olabileceğini unutmayın.



Şekil 3.5 12V akü için örnek SOC ve voltaj eğrisi

Deşarj derinliği (DOD): Deşarj derinliği, akünün boşaldığı akü kapasitesinin yüzdesidir. Genel olarak, bir pilin düşük bir DOD'a sahip olması önlenir. Pil kapasitesinin en az % 80'inin çekilmesi, derin bir deşarj olarak kabul edilir. DOD denklemi şöyle ifade edilmektedir:

$$DOD(t) = \frac{Q_0 - \int_{t_0}^t I_b(\tau) d\tau}{Q_0} \times 100\% \quad [3.10]$$

Önemli bir önlem, bataryadaki şarjın hiçbir zaman sıfır voltaja kadardeşarj olmamasıdır, aksi takdirde batarya kalıcı olarak hasar görebilir. Bu nedenle, bu durumda, batarya voltajı için bir kesinti voltajı tanımlanır, böylece batarya terminallerindeki voltaj asla bu kesme geriliminin altına düşmez. Bu nokta% 100 DOD olarak adlandırılır.

Enerji yoğunluğu: Enerji yoğunluğu, birim pil başına ne kadar elektrik enerjisinin depolanabileceği anlamına gelir. Bu miktarın SI birimi kilogram başına watt saattir (Wh/kg). Akünün enerjisini akünün kütlesine bölerek kolayca elde edilebilir. Yine, depolanan enerjideşarj oranına göre değiştiğinden, enerji yoğunluğu sabit bir parametre değildir.

Volümetrik enerji yoğunluğu: Metre küp batarya hacmi başına ne kadar elektrik enerjisinin depolanabileceği anlamına gelir. Pilde depolanan enerjiyi pil hacmine bölerek hesaplanır. Enerji yoğunluğu için SI birimi, metreküp başına watt saattir (Wh/m³).

Güç yoğunluğu: Özgül güç, bir kilogram pil için ne kadar güç sağlanabileceği anlamına gelir. Bu miktarın batarya tarafından sunulan yüke bağlı olduğunu ve bu nedenle yüksek oranda değişken ve anormal olduğunu unutmayın. Özel gücün SI birimi kilogram başına watt'tır (W/kg). Özel güç, bataryanın enerjiyi beslemesidir. Daha yüksek bir özgül güç, hızlı bir şekilde enerji verebildiğini ve alabileceğini gösterir. Belirli bir güce, güç birimi veya birim güç yoğunluğu da denir. Bu da, birim batarya hacmi başına güç miktarını (enerji aktarımının zaman oranı) belirtir.

Amper-Saat (veya Şarj) Verimliliği: Bir bataryayı boşaltırken verilen elektrik şarjı ile bataryanın önceki şarj seviyesine geri dönmesi için gereken elektrik yükü arasındaki orandır. Uygulamada, bu iki değer asla eşit olmayacak ve verimliliği% 100'e sınırlayacaktır. Aslında, şarj verimliliğinin tipik değerleri % 65 ila 90 arasındadır. Verim, pil tipi, sıcaklık ve şarj oranı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır.

Enerji verimliliği: Bu önemli miktar, bataryanın iç direncine büyük ölçüde bağlı olan bataryanın enerji dönüşüm verimliliğini gösterir. Bir batarya tarafından sağlanan elektrik enerjisinin, bataryanın boşaltılmadan önce bir önceki SOC'ye geri dönmesi

için gerekli olan şarj etme enerjisi miktarına oranı olarak hesaplanabilir. Pil boşaldığında ve çok çabuk bir şekilde şarj edilirse verim önemli ölçüde azalır. Tipik olarak, bir pilin enerji verimliliği % 55-95 aralığındadır.

Çevrim sayısı ve Pil Ömrü: EA ve HEA’larda pilin% 80’i kadar DOD’a kadar birkaç yüz döngüden geçebilir. Farklı pil tipleri ve tasarımı farklı sayılarda derin döngülere neden olur. Ayrıca, kullanım şekli, bir batarya arızasından önce devam edebilecek derin döngü sayısını etkileyecektir. Amerika Birleşik Devletleri Gelişmiş Pil Konsorsiyumu (USABC), elektrovoltaj piller için orta vadeli 600 derin döngü hedefine sahiptir. Bu özellik çok önemlidir çünkü il, pil ömrü süresini, derin döngü sayısı açısından etkiler. Bu nedenle, genel olarak, araçların işletme maliyetini sınırlamak için EA ve HEA’ların kontrol stratejisinde DOD şansını azaltmalıyız.

3.2.3 Süperkapasitörün diğer akü sistemleriyle birlikte kullanımı

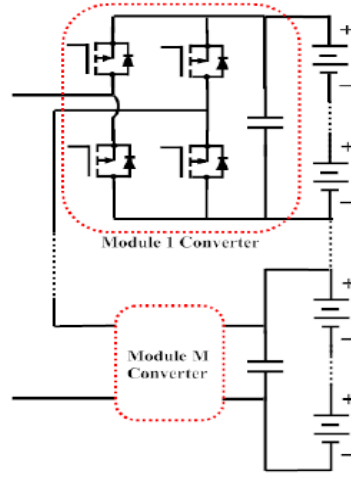
Elektrik tahrikli araçların önemli bir kısmında enerji depolama için piller kullanır, ancak süperkapasitörlerin tek başına veya pille birlikte kullanıldığı araç tasarımları, aracın verimliliğini artırabilir ve önemli ölçüde daha uzun pil ömrü sağlar. Süperkapasitörler, enerji depolama gereksiniminin 150 Wh'den az olması durumunda, HEA’larda tek başına kullanılabilir. Süperkapasitörlerin HEA’larda tek başına kullanıldığında, enerji depolama alanının şarj/deşarj verimliliğinin % 95-98 olduğunu ve açma / kapama işlemindeki motor verimliliğinin en yüksek verimlilik değerine yakın tutulabileceğini göstermektedir [33],[42].

[43]’teki çalışmada araç simülasyonları, yüksek enerji yoğunluğuna sahip (300 Wh / kg’den büyük) gelişmiş aküler kullanan şarj edilebilen (Plug-in) hibrit araçlar için de denenmiştir. Elektrikli araçlarda süperkapsitörler aküler kombinasyon halinde ideal bir şekilde çalıştığı ve yakıt ekonomisinin diğer kullanımlara göre iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bunlara ek olarak, yüksek akım darbeleri nedeniyle akülerdeki dinamik gerilim, süperkapasitör kullanılarak büyük ölçüde azaltılmıştır. Süperkapasitörler, kalkışlarda ihtiyaç duyulan yüksek tahrik gücünü karşıladığı gibi rejeneratif frenleme durumunda yüksek fren eylemindeki enerjiyi geri kazanmada oldukça başarılıdır. Aracın sabit hız ve rölanti sürüş durumlarında yüksek enerji yoğunluğuna sahip aküler gerekli ihtiyacı karşılamıştır[30].

Süperkapasitörler ile birlikte kullanılacak akünün seçimi de oldukça önemlidir. Akü sistemleri içerisinde birçok yönden üstün olan lityum iyon aküler bazı önemli

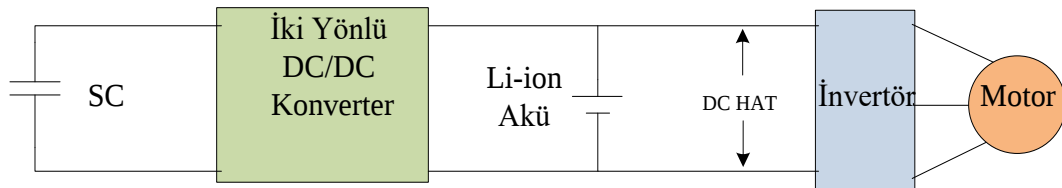
dezavantajlarda sahiptir. Çevrim ömrü problemini süperkapasitör ile kısmen çözebilmelerine karşın ısınma veya güneşe doğrudan maruz kalma durumlarından dolayı patlama veya tutuşma riskleri vardır. Bundan dolayıdır ki birden fazla lityum akünün kullanılmasında büyük yarar vardır. Lityum iyon akülerde akülerin eşlemesi verimin düşmemesi için dengeleme gerekir. Akü hücrelerini dengelemede genellikle iki yaklaşım uygulanır. Bunlardan ilki orta düzey dengeleme diğeri ise üst düzey dengelemedir. Orta düzey dengeleme daha basit ve ucuz olan yöntem olmakla birlikte hücrelere paralel bağlanıp hücrelerin %50'nin üzerinde şarj seviyelerinin olması sağlanır. Üst düzey dengelemde ise yine aküler paralel bağlanır ve tüm hücreler şarj cihazına bağlanır. Bu işlem sonunda tüm hücreler üst seviyede (%100) dengelenmiş olur. Fakat BYS'nin görevi olan en yüksek verim için üst düzeyde dengeleme kullanılmalıdır. Üst düzeyde dengeleme sistemi daha komplike olmakla birlikte akülerin hızlıca kullanıma hazır hale gelecektir [44].

Aküler kullanımdan önce özellikle elektrikli araçlarda, tam doluluk oranına sahiptir. Fakat her zaman tam doluluk oranına sahip olduğundan emin olunmayabilir. Bu durumda hücre dengelemesi istemeden çalışabilir. Bu durumda bataryalar istenmeyen bir anda bitebilir. Bu nedenle şarj sonu dengelemede çok önemlidir. Şarj sonu dengeleme iki farklı şekilde yapılır. Bunlar aktif ve pasif dengeleme olmak üzere ikiye ayrılır. Aktif dengeleme akım ve gerilimlerin dönüşümüyle hücrelerin kendi aralarından enerji aktarılmasıyla olur. Aktif dengeleme yüksek verim, şarj/deşarj esnasında dengeleme ve kısa dengeleme zamanı gibi avantajları bulunurken dezavantajları yüksek maliyetle birlikte şarj süresini azaltmak için kontrol devresi kullanılmasıdır. Diğer yöntem olan pasif dengeleme ise özellikle HEA'lar için uygundur. Avantajları düşük maliyet ve anlaşılabilir olmasının yanında dezavantajları ise aktif dengelemeye göre düşük enerji kapasitesi ve düşük verimidir [45]. Şekil 3.6'da tam köprü enerji dönüştürücü hücre dengeleme topolojisi sunulmuştur.



Şekil 3.6 Tam köprü (Full-bridge) enerji dönüştürücü hücre dengeleme topolojisi

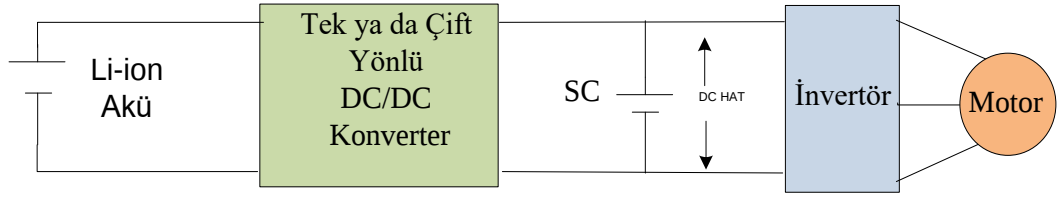
Yukarıdaki bahsedilen avantajlar ve dezavantajlar göz önüne alındığında Süperkapsitör ve lityum iyon uyumu en uygun ikili olarak görülmektedir. Süperkapsitör / Lityum iyon akü konfigürasyonu en çok çalışılan ve araştırılan hibrit enerji depolama sistemi (HEDS)'dir. Şekil 3.7'de, HEDS konfigürasyonunun şemasını göstermektedir. SC'yi bağlamak için çift yönlü bir DC/DC dönüştürücü kullanarak, SC'nin voltajı geniş bir aralıkta kullanılabilir. Bununla birlikte, çift yönlü dönüştürücünün SC'nin gücünü elde etmek için daha büyük bir boyutta olması gerekir. Bu konfigürasyonun en büyük avantajı az sayıda SC kullanılabilmesi, dezavantajı ise çok zor rejeneratif frenleme enerjisinin kontrolünün çok zor olmasıdır. Ek olarak, SC dizinin nominal voltajı daha düşük olabilir. Pil doğrudan doğruya DC hat (bara) bağlanır; Sonuç olarak, DC hat gerilimi değiştirilemez [46].



Şekil 3.7 Süperkapsitör / Lityum iyon akü konvertör konfigürasyonu

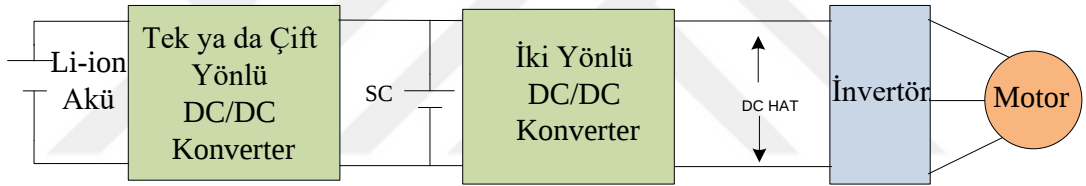
Li-ion akü ve SC'nin SC / akü konfigürasyonundaki konumlarını değiştirerek, Li-ion / SC konfigürasyonunu Şekil 3.8' de gösterildiği gibi elde edilir. Bu konfigürasyonda, akünün voltajı SC'nin voltajından daha düşük veya daha yüksek seviyede tutulabilir. SC, doğrudan düşük geçiş filtresi olarak çalışan DC baraya bağlanır. Bu topolojiye uygulanan kontrol stratejisinin en büyük avantajı daha az sayıda li-ion akü

kullanılması, en büyük dezavantajı ise DC bara voltajının SC enerjisinin daha etkin bir şekilde kullanılabilmesi için bir aralık içinde değişmesine izin verir [47].



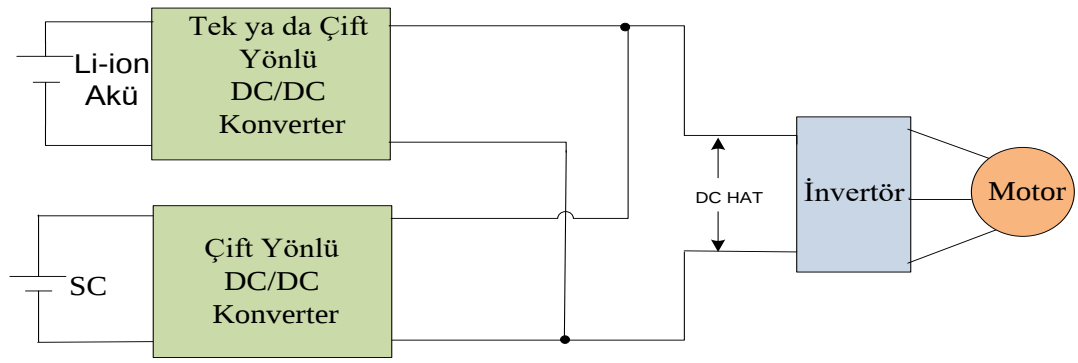
Şekil 3.8 Liyum iyon akü / Süperkapasitör konvertör konfigürasyonu

Li-ion / SC konfigürasyonundaki, SC'nin daha etkin bir çalışma aralığını sağlamak için SC dizinin ve DC bara bağlantısı arasında başka bir çift yönlü dc / dc dönüştürücü eklenmiştir. Bu, Şekil 3.9' da görülebileceği gibi basamaklı bir dönüştürücü topolojisi oluşturur. Bu topolojinin dezavantajı fazladan eklenen DC/DC konvertörün maliyeti arttırması ile birlikte iki DC/DC konvertörün eş zamanlı kontrolünün oldukça zor oluşudur[48].



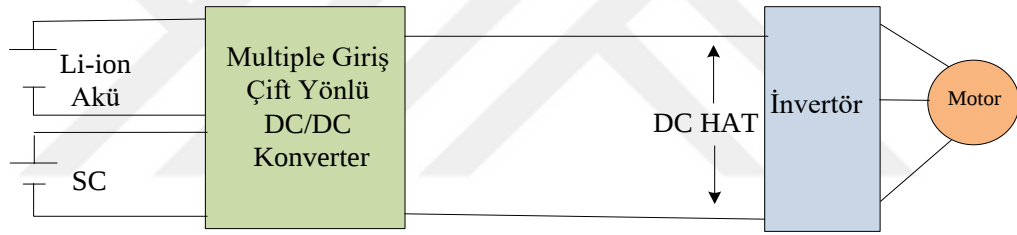
Şekil 3.9 Kaskad konvertör konfigürasyonu

İki dönüştürücünün basamaklı bağlantısı yerine, çoklu dönüştürücü yöntemi iki dönüştürücünün DC bara girişine paraleldir. Şekil 3.10'da, çoklu konvertör topolojisinin diyagramını göstermektedir. İki dönüştürücünün çıkışları, DC bara gerilimi ile aynıdır. Hem Li-ion akünün hem de SC'nin voltajları, DC bara voltajından daha düşük tutulabilir; UC'nin voltajı geniş bir aralıkta değişebilir, bu nedenle kapasitör tamamen kullanılır. Bu yöntemin dezavantajı, iki tam boyutlu dönüştürücü gerektiğinden maliyetin fazla olmasıdır [49-50].



Şekil 3.10 Çoklu konvertör konfigürasyonu

Çoklu konvertör konfigürasyonu hem Li-ion ve süperkapasitörü daha etkin bir biçimde kullanılmayı sağlar. Bu konfigürasyonu kullanmak maliyeti pahalıdır çünkü hem batarya hem de SC birbirine bağlamak için iki adet tam boyutlu iki yönlü dönüştürücü gerektirir. Genel sistem maliyetini azaltmak için çoklu giriş dönüştürücü topolojileri [48]'de önerilmiştir. Çoklu giriş dönüştürücülerinin sistem diyagramı Şekil 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 3.11 Çok girişli konvertör konfigürasyonu[50]

Süperkapasitörlerin ve bir önceki başlıkta detaylı bilgi verilen akülerin birbirlerine göre zayıf ve kuvvetli yönleri bulunmaktadır. Akülerin ve süperkapasitörlerin sıralı ya da bir algoritmaya göre çalışması ve yüksek verim elde etmek gerektiğinden batarya yönetim sistemi (BYS) ihtiyacı doğar. Bu çalışmada akü yönetim sistemi (AYS) ve süperkapasitör yönetim sistemi (SYS) ayrı ayrı yönetmek yerine BYS şarj/deşarj durumları ivmelenme, sabit hız ve rejenaratif frenleme durumlarında optimizasyon stratejileriyle algoritmaya dayanarak yönetilecektir. Bu konu 5.bölümde ayrıntılı yer verilecektir.

4.HİBRİT ve ELEKTRİKLİ ARACIN SİMÜLASYON MODELLEMESİ

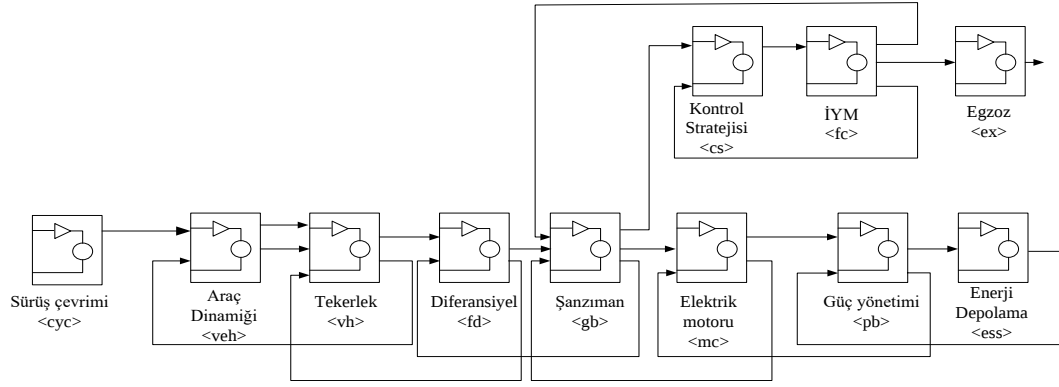
Bu bölümde seri hibrit elektrikli araç, paralel hibrit elektrikli araç ve tam elektrikli araç mimarileri ele alınmıştır. Matlab/SIMULINK tabanlı ADVISOR paket programı üzerinden batarya yönetim sistemi ve enerji yönetim sistemi başta olmak üzere yeni bir mimari ve simülasyon modeli ortaya konmuştur. Ele alınan araç mimarilerinde İYM, elektrik motoru, jeneratör, lityum iyon akü ve süperkapasitör sistemlerini içermektedir. Bu sistemlerin yanında süperkapasitör ile lityum iyon sistemleri için iki yönlü DC/DC konvertör, jeneratör (yalnız seri HEA için) sistemleri için AC/DC konvertör ve elektrik motorları için DC/AC konvertör üniteleri kullanılmıştır. Araç mimarilerinde ayrıca klima vb. sistemlerin beslemesi için 24V aküler kullanılmıştır.

Araç mimarilerinde akü yönetim sistemi (AYS) ve süperkapasitör yönetim sistemi (SYS) batarya yönetim sistemi (BYS) altında birleştirilmiştir. Bununla birlikte seri hibrit araçlarda Jeneratör/İYM elektronik kontrol sistemi (GENSET EKÜ), elektrikli araçlarda şarj bölümü (ŞB) ve konvertörlerin senkronize çalışabilmesi için uygun frekans değerleri üretilmiştir. Mimaride ayrıca DC bara üzerinden tahrik ve şarj/deşarj enerji akışı sağlanmaktadır. İhtiyaç duyulan tahrik gücü ise paralel hibrit araçta süperkapasitör ile lityum iyon akü DC bara üzerinden EM ve İYM tarafından paralel olarak sağlanır. Seri HEA’larda tahrik gücü süperkapasitör ile lityum iyon akü ve gücü genset üzerinden DC baraya aktarılır. EA’larda ise tahrik gücü doğrudan bataryalardan sağlanmıştır.

Önerilen modellemeler ADVISOR paket programında ana mimari ve alt sistem modellerinin birbirine fiziksel bağlantı ile ardışık mimariyle ortak veri tabanı üzerinden bağlanmıştır. Aşağıdaki bölümlerde önerilen mimari yapısı ve modellemeler ile önemli avantajlar sunulmuştur.

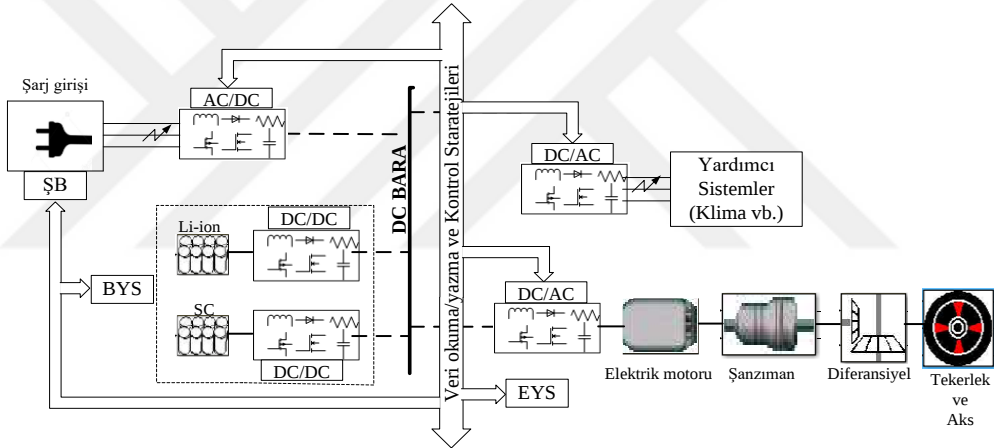
4.1 Önerilen Mimarisi Modelleme ve Simülasyon Modeli

Şekil 4.1’de seri bir hibrit elektrikli aracın araç mimarisinde paralel hibrit elektrikli araçlara göre tahrik enerjisinin yalnız elektrik motoru ile sağlanmasıyla birlikte jeneratör seti (genset) yardımı ile batarya şarj işlemi DC bara üzerinden sağlanmaktadır. Şekil 4.2’de önerilen seri hibrit elektrikli aracın simülasyon modeli gösterilmiştir.

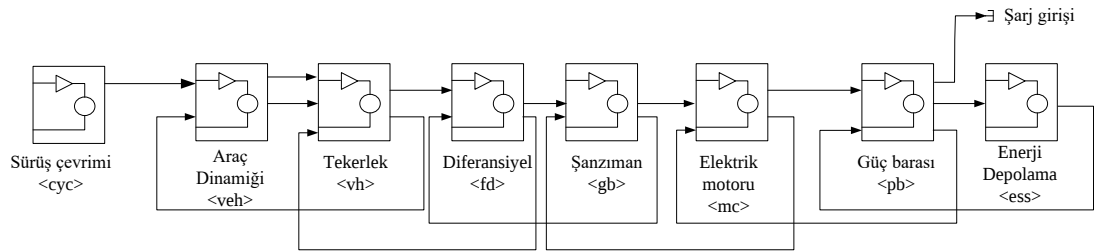


Şekil 4.4 Paralel HEA simülasyon ortamı

Şekil 4.5’de önerilen tam elektrikli araç mimarisinde içten yanmalı motor ve yine aynı şekilde genset bulunmadığından araç mimarisi daha basit ve hareket için gerekli olan tahrik enerjisi yalnız elektrikli motordan sağlanır. Şekil 4.4’de önerilen paralel hibrit elektrikli aracın simülasyon modeli gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Önerilen tam elektrikli araç mimarisi



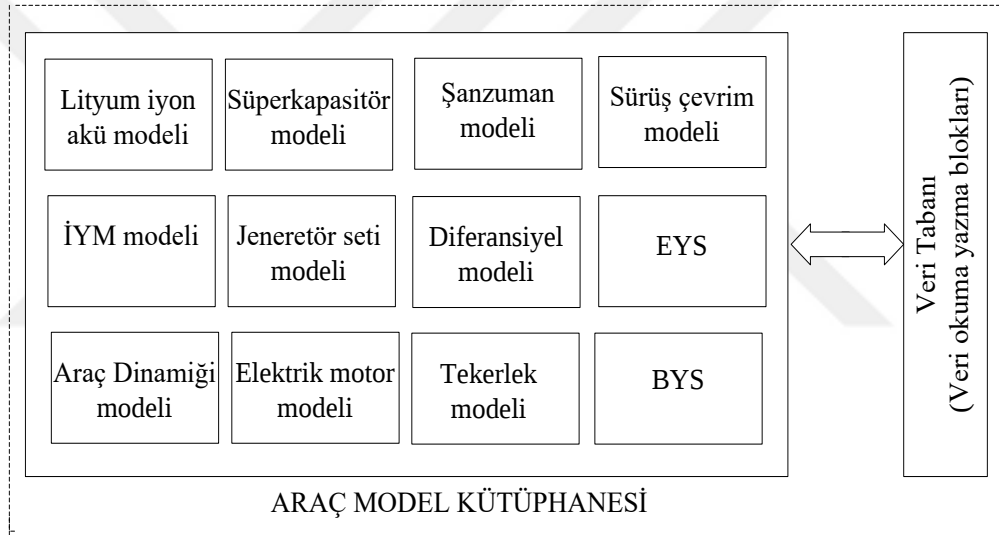
Şekil 4.6 EA simülasyon ortamı

Modelin simülasyon ortamındaki alt bloklar fonksiyon çağırma üreticisi (Function call generator , FCG) ve fonksiyon çağırma sistemi (Function call system , FCS) , veri hafıza bölgesinden (Data store memory) oluşmaktadır. Simülasyon ortamındaki bu

yapılar (ADVISOR vb.) Matlab/SIMULINK tabanlı paket programlarda kaskad bağılı olarak kullanılır.

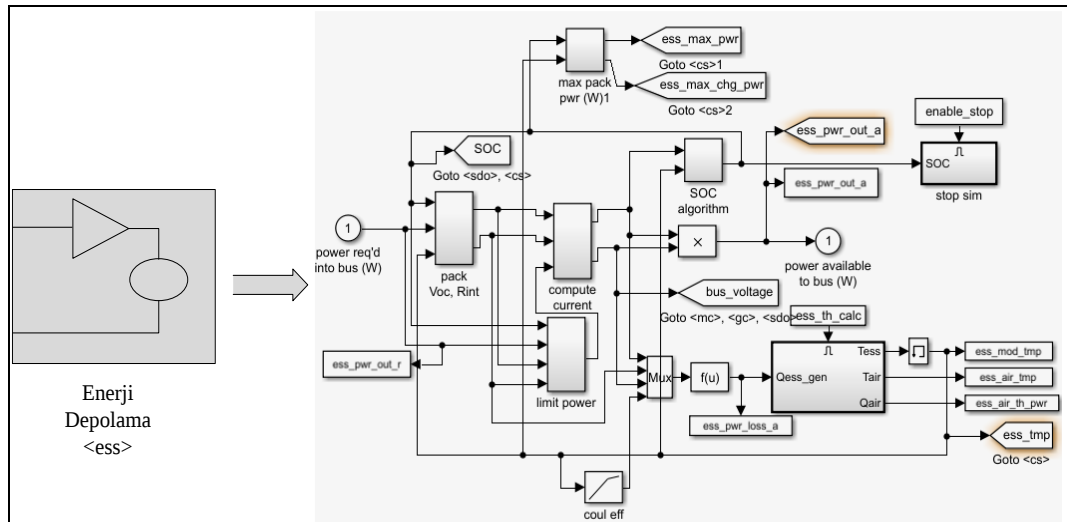
4.1.1 Araç kütüphanesi

Araç model kütüphanesi (Vehicle model library, VML) elektrik, mekanik veya kimyasal farklı alt sistemlerin matematiksel olarak ifade edilmekle birlikte, veri tablolarıyla veya analitik yollarla modellenirler. Şekil 4.7’de hibrit elektrikli bir aracın alt sistem modellerini (İYM, elektrik motoru, lityum iyon akü, süperkapasitör vb.) içeren örnek model kütüphanesi görülmektedir. Araç model kütüphanesinde her alt sistem kendine özgü bir veri okuma-yazma hafıza bloklarına sahiptir. Dolayısıyla kütüphanede bu veri okuma-yazma hafıza blokları ile tüm alt sistemlerin paylaşımına açık ve ortak bir veri tabanı oluşturulmuştur.



Şekil 4.7 Araç model kütüphanesi

Alt sistemler simülasyon ortamında bu veri tabanı üzerinden kendi aralarında alışverişinde bulunurlar. Kütüphane içerisinde her bir alt sistem modeli, aşağıdaki işlem basamakları takip edilerek oluşturulmaktadır.



Şekil 4.8’de simülasyon ortamında örnek olarak alt sistem modeli olan süperkapasitör modeli ve lityum iyon batarya modelini içeren enerji depolama sisteminin standart çıktısı ele alınmıştır.

4.1.2 Mimarinin avantajları

Mevcut halde bulunan Matlab/SIMULINK tabanlı modellemeler veya simülasyon araçlarında kaskat olmayan mimarilere karşı yeni yaklaşım olarak önerilen mimari ve modellemenin başlıca ve önemli üstünlükleri aşağıdaki gibidir;

- 1- Önerilen mimari ve modelleme kaskat bağlı olduklarından yeni eklenecek veya yerleri değiştirilecek alt sistemler aynı okuma yazma verileriyle kolayca işlenebilecektir.
- 2- Önerilen mimari kaskat olmayan mimarideki birden fazla giriş-çıkış standart tanımlama çıktısı (elektrik_motor_ileri, elektrik_motor_geri vs.) karmaşasını ortadan kaldırır.
- 3- Mimaride akü yönetim sistemi (AYS) ve süperkapasitör yönetim sistemi (SYS) yerine batarya yönetim sistemi (BYS) tek çatı altında toplanması hem daha kolay kontrol hem de daha basit ve anlaşılır bir mimari sunmaktadır.

4.2 Modellemenin Alt Bileşenleri

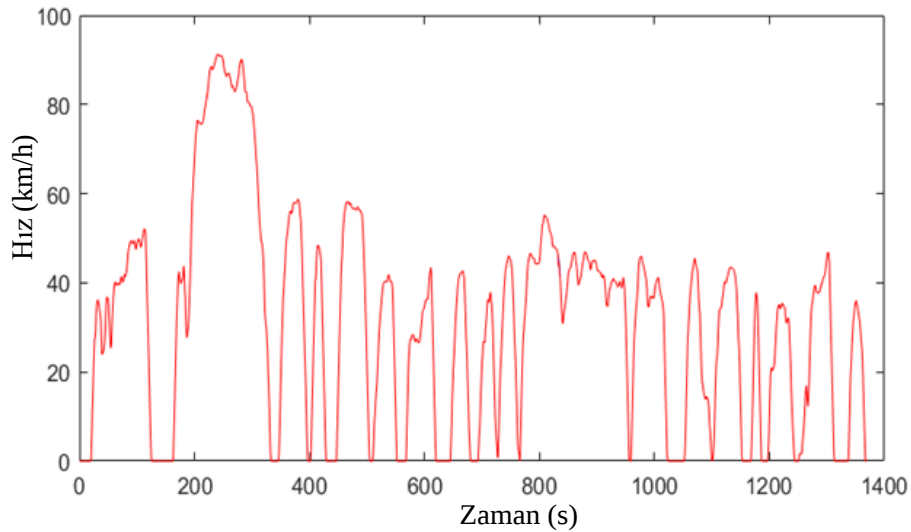
Önerilen modellemenin alt bileşenlerindeki simülasyon modellemeleri, sürüş, araç dinamiği, tekerlek, diferansiyel, şanzıman elektrik motor, İYM, jeneratör seti, lityum iyon akü ve süperkapasitörün matematiksel ifadeleri modellenmiştir.

4.2.1 Sürüş çevrimi

Bir sürüş çevrimi, bir araca göre zamanın hızını temsil eden bir dizi veri noktasıdır. Sürüş döngüleri, araç performansını değerlendirmek için çeşitli ülkeler ve kuruluşlar tarafından kurulmuştur. Sürüş çevrimlerinden yararlanarak, yakıt ekonomisi ve egzoz emisyonları hakkında önemli bilgiler elde edilebilir. Şasi dinamometreleri, gerçek dünya sürüş koşullarının tekrarlanması için gereken sürüş çevrimlerini hesaba katarak yakıt tüketimi ve emisyon testlerini gerçekleştirmek için kullanılabilir. Ek olarak, araç döngüleri kullanılarak araç simülasyonları uygulanabilir. Araç sevk sistemi, tahrik döngülerinin simülasyon için çok önemli bir rol oynadığı uygun bir alan olarak kabul edilir. Tahrik sistemi modellenabilir ve içten yanmalı motorların, şanzımanların, elektrikli tahrik sistemlerinin, bataryaların ve yakıt hücresi sistemlerinin performansları ilk tasarım aşamasında tahmin edilebilir[54].

Tablo 4.1 UDDS sürüş çevriminin özellikleri

Parametreler	Değerler
Süre	1369 s
Menzil	11.99 km
Maksimum hız	91.25 km/h
Ortalama hız	31.51 km/h
Maksimum hızlanma	1.48 m/s ²
Maksimum yavaşlama	-1,48 m/s ²
Ortalama hızlanma	0,5 m/s ²
Ortalama yavaşlama	-0,58 m/s ²
Boşta kalma süresi	259 s
Dur/Kalk sayısı	17



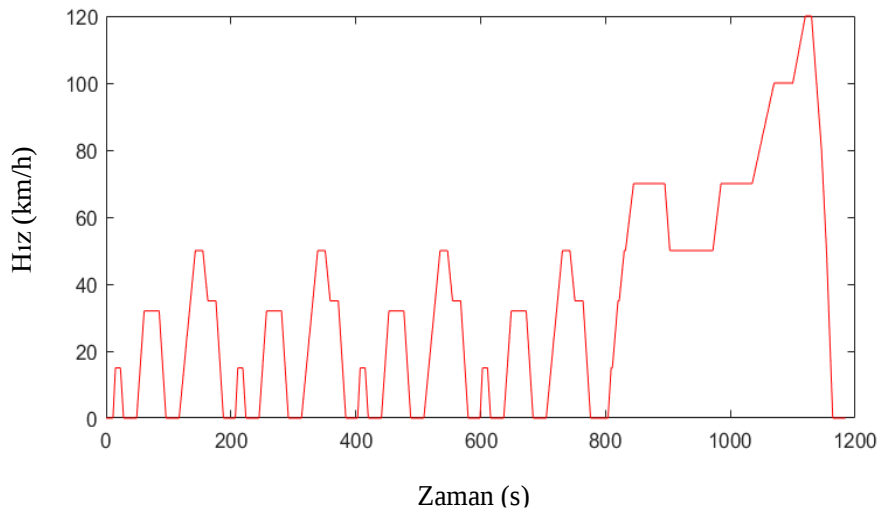
Şekil 4.9 UDDS sürüş çevrimi hız profili

Sürücü çevrimleri farklı şekillerde oluşturulmuştur. Bazıları teorik olarak türetilirken, diğerleri gerçek dünya sürüş testlerinden elde edilen ölçüm verilerine dayanarak elde edildi. Sürücü çevrimleri iki farklı tipte sınıflandırılır. Birincisi geçici sürücü çevrimidir. Bu çevrimde çevrimlerindeki hız, tipik sürüş koşullarına bağlı olarak çok değişir. Amerikan Kentsel Dinamometre Sürüş Takvimi (UDDS) ve Federal Test Prosedürü (FTP) sürücü çevrimleri bu türe aittir. İkincisi ise, sabit hızlarda uzun süreler içeren modal sürüş döngüleridir. Yeni Avrupa Sürüş Döngüsü (NEDC) ve Japon 10–15 Mod döngüleri bu türdedir [55].

Bu çalışmada Şekil 4.9 gösterilen ve Tablo 4.1’de bilgileri verilen UDDS sürüş çevrimi; Şekil 4.10 gösterilen ve Tablo 4.2’de NEDC bilgileri verilen sürücü çevrimleri kullanılacaktır.

Tablo 4.2 NEDC sürüş çevriminin özellikleri

Parametreler	Değerler
Süre	1184 s
Menzil	10.93 km
Maksimum hız	120 km/h
Ortalama hız	33.21 km/h
Maksimum hızlanma	1.06 m/s ²
Maksimum yavaşlama	-1,39 m/s ²
Ortalama hızlanma	0,54 m/s ²
Ortalama yavaşlama	-0,79 m/s ²
Boşta kalma süresi	298 s
Dur/Kalk sayısı	13



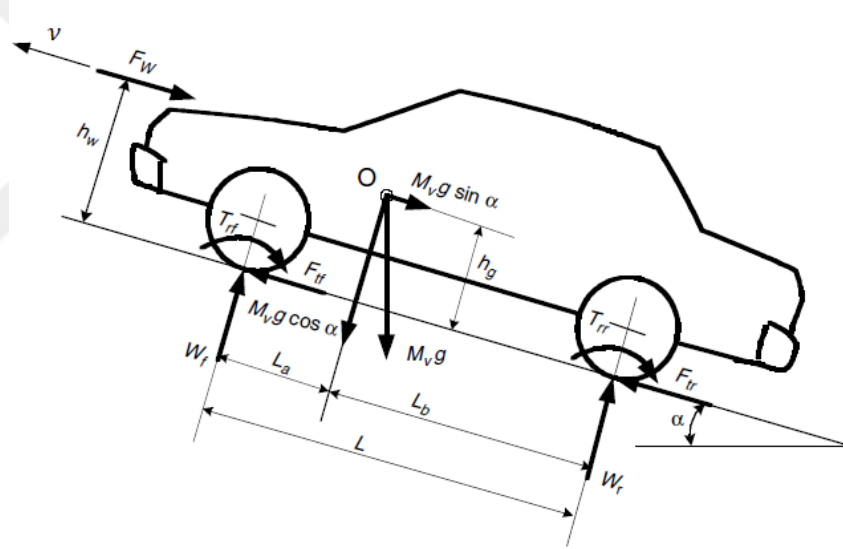
Şekil 4.10 NEDC sürüş çevrimi hız profili

4.2.2 Araç dinamiği

Boyuna araç dinamiği üzerindeki normal kuvvet dağılımı, taşıt üzerindeki net adım torkunun sıfır olduğu varsayılarak belirlenebilir. Başka bir deyişle, aracın eğim açısının sabit bir durum değerine ulaştığı kabul edilir. Araç hareket ederken, hareketini durdurmaya çalışan dirençler vardır. Direnç genellikle lastik yuvarlanma direnci, aerodinamik sürtünme ve yokuş yukarı direncini içerir [51]. Şekil 4.11'e göre Newton'un ikinci yasasına göre, araç hızlandırması şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_{tr}}{\delta M_v} \quad [4.1]$$

v 'nin araç hızı olduğu durumda, $\sum F_t$ aracın toplam çekiş gücü, $\sum F_{tr}$ toplam direnci, M_v aracın toplam kütlesi ve δ güç aktarma organındaki dönen bileşenlerin etkisi olan kütle faktörüdür.



Şekil 4.11 Araca etki eden kuvvetler

Şekil 4.11'e göre ζ araç eğimi (slope) ve F_g yolun eğim kuvvetidir. Araç eğimi çok yüksek olmadığı varsayılırsa aşağıdaki denklemler elde edilir;

$$F_g = M_v g \sin a \quad [4.2]$$

$$\zeta = \frac{H}{L} = \tan a \cong \sin a \quad [4.3]$$

Lastik yuvarlanma direnci F_f ve yolun eğim kuvveti F_g direnci birlikte ifade edilen yol direnci yani F_{rd} olarak adlandırılmaktadır.

$$F_{rd} = F_f + F_g = M_v g (f_f \cos \alpha + \sin \alpha) \quad [4.4]$$

$$F_{rd} = F_f + F_g = M_v g (f_f + \zeta) \quad [4.5]$$

Boyuna yönde, Şekil 4.11'de gösterildiği gibi, iki dingilli bir taşıt üzerinde hareket eden dış kuvvetler, yuvarlanma direnci momenti T_{rf} ve T_{rr} , aerodinamik sürtünme F_w ile temsil edilen F_{rf} ve F_{rr} ön ve arka lastiklerin yuvarlanma direnci, ön ve arka lastiklerin çekiş gücü F_{tf} ve F_{tr} 'dir. Arkadan çekişli bir araç için F_{tf} sıfır, önden çekişli bir araç için ise F_{tr} sıfırdır. Yuvarlanma direnci katsayısı f_f , Araç hareketinin boyuna doğrultudaki dinamik denklemi;

$$M_v \frac{dv}{dt} = (F_{tf} + F_{tr}) - (F_{rf} + F_{rr} + F_w + F_g) \quad [4.6]$$

[4.6] 'nın sağ tarafındaki ilk terim toplam çekiş ve ikinci terim dirençlerdir. Lastik-zemin temasının destekleyebileceği maksimum çekme kuvvetini bulabilmek için, ön ve arka akslardaki normal yükler belirlenmelidir. L dingil mesafesi, L_a ön tekerleğin ağırlık merkezine olan uzaklığı ve L_b arka tekerleğin ağırlık merkezine olan uzaklığı ve yakın R noktası (lastik-zemin alanının merkezi) ile ilgili tüm kuvvetlerin momentlerini toplayarak, ön dingildeki W_f normal yükü olarak belirlenebilir.

$$W_f = \frac{M_v g L_b \cos \alpha - (T_{rf} + T_{rr} + M_v g h_g \sin \alpha + F_w h_w + M_v h_g (dv/dt))}{L} \quad [4.7]$$

$$W_r = \frac{M_v g L_a \cos \alpha + (T_{rf} + T_{rr} + M_v g h_g \sin \alpha + R_w h_w + M_v h_g (dv/dt))}{L} \quad [4.8]$$

Binek otomobiller için, h_w aerodinamik direncin uygulama merkezinin yüksekliği, h_g aracın ağırlık merkezinin yüksekliğine yakın olduğu kabul edilir, [4.9] ve [4.10] denklemleri aşağıdaki gibi basitleştirilebilir.

$$W_f = M_v g \cos \alpha \frac{L_b}{L} - \frac{h_g}{L} \left(F_w + F_g + M_v g f_r \frac{r_d}{h_g} \cos \alpha + M_v (dv/dt) \right) \quad [4.9]$$

$$W_r = M_v g \cos \alpha \frac{L_a}{L} + \frac{h_g}{L} \left(F_w + F_g + M_v g f_r \frac{r_d}{h_g} \cos \alpha + M_v (dv/dt) \right) \quad [4.10]$$

[4.6],[4.9] ve [4.10] 'e göre yeniden yazılırsa;

$$W_f = M_v g \cos \alpha \frac{L_b}{L} - \frac{h_g}{L} \left(F_t - F_r \left(1 - \frac{r_d}{h_g} \right) \right) \quad [4.11]$$

$$W_r = M_v g \cos \alpha \frac{L_a}{L} + \frac{h_g}{L} \left(F_t - F_r \left(1 - \frac{r_d}{h_g} \right) \right) \quad [4.12]$$

Burada $F_t = F_{tf} + F_{tr}$, aracın toplam çekiş gücüdür ve F_r , aracın toplam yuvarlanma direncidir. Lastik zemin temasının destekleyebileceği maksimum çekiş gücü (bu maksimum çekiş gücünün üzerindeki küçük bir miktar lastiğin zeminde dönmesine neden olur) genellikle ürünün normal yük ve yol yapışma katsayısı μ veya bazı kabullerde sürtünme katsayısı olarak anılacaktır. Sırasıyla önden çekişli ve arkadan çekişli araçlar için maksimum kuvvet denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$F_{t_maks} = \mu W_f = \frac{\mu M_v g \cos \alpha [L_b - f_r (h_g - r_d)] / L}{1 + \mu h_g / L} \quad [4.13]$$

$$F_{t_maks} = \mu W_r = \frac{\mu M_v g \cos \alpha [L_a + f_r (h_g - r_d)] / L}{1 + \mu h_g / L} \quad [4.14]$$

Bu çalışmada simüle edilecek araç 1994 model Saturn SL(VEH_SMCAR) aracının modellemesi kullanılmıştır.

4.2.3 Tekerlek modeli

Tekerlek aksına tork uygulandığında, şanzıman yardımıyla aracın öne ya da geriye doğru hareket etmesini sağlar. Tekerlek modeli sürtünme, yuvarlanma ve aerodinamik kayıpların hesaplanması açısından önemli role sahiptir. Arkadan çekişli bir aracın diyagramından Şekil 4.11'de gösterilen, eğim açısının sıfır olduğu bir yolda tekerleklerin sürtünme kuvvetleri aşağıdaki gibi hesaplanır [28],[31]:

$$W_r = \frac{M_v g \cdot L_b + M_v a H_w}{L_a + L_b} \quad [4.15]$$

$$W_f = M_v g - W_r \quad [4.16]$$

[4.15] ve [4.16] denklemleri, sırasıyla arka tekerlek ve ön tekerlek üzerindeki tepki kuvvetlerini verir. Ön ve arka tekerleklerdeki sürtünme kuvvetleri aşağıdaki denklemlerle elde edilir:

$$F_r = \mu \cdot W_r \quad ve \quad F_f = \mu \cdot W_f \quad [4.17]$$

Güç aktarma organlarından çekiş gücü:

$$F_{wh} = \frac{T}{r_{wh}} = \frac{T_{çekiş} - T_{fren}}{r_{wh}} \quad [4.18]$$

Araç hızı:

$$v = r_{wh} \cdot \omega_{wh} \quad [4.19]$$

Güç aktarma organlarından transfer edilen aks üzerindeki araç yükü ve 4 tekerlek lastiği ile birlikte eşdeğer kütle:

$$M_{equ} = \frac{J_{aks} + 4 \cdot J_{wh}}{r_{wh}} \quad [4.20]$$

Yol yükü herhangi bir aracın herhangi bir kuvvet etki etmeden aracı hareket ettirmek için lastikler üzerindeki asgari itici kuvvet gereksinimine ihtiyaç duyar. Eğimin olmadığı düz yolda sabit hızda yük denklemi:

$$R_L = F_w + F_{rf} + F_{rr} = f_f g \cdot M_v + \frac{1}{2} c_r \cdot c_d \cdot A_d \cdot F_w \quad [4.21]$$

Şekil 4.11’da gösterilen araç dinamiğine bağlı, kademeli bir yolda bir taşıtın yol yükünü aşağıdaki gibidir:

$$R_L = F_w + F_{rf} + F_{rr} + F_g = f_f g \cdot M_v \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2} c_r \cdot c_d \cdot A_d \cdot F_w + g \cdot M_v \cdot \sin \alpha \quad [4.22]$$

4.2.4 Diferansiyel modellemesi

Diferansiyel (final drive), bir iletimden tekerleklerle giden gücü transfer eden bir dizi sert mekanik cihazdır. Sistem performansını simüle etmek ve analiz etmek için aşağıdaki basit modeller kullanılabilir. Sırasıyla çıkış hızı, çıkış torku ve çıkış ataleti aşağıdaki gibidir.

$$\omega_{fd_çıkış} = \frac{1}{f_d} \cdot \omega_{fd_giriş} \quad [4.23]$$

$$T_{fd_çıkış} = f_d \cdot \eta_{fd}(\omega_{fd_giriş}, T_{fd_giriş}) T_{fd_giriş} \quad [4.24]$$

$$J_{fd_çıkış} = f_d^2 \cdot J_{fd_giriş} + J_{fd} \quad [4.25]$$

f_d diferansiyel oranı, $\eta_{fd}(\omega_{fd_giriş}, T_{fd_giriş})$ diferansiyel verimliliği olup, bu da giriş hızının ile giriş torkunun bir fonksiyonudur ve gerçek testlerle elde edilebilir. $J_{fd_çıkış}$ son tahrik çıkış ataletidir, $J_{fd_giriş}$ şanzımanın giriş ataleti ve J_{fd} nihai sürücünün kendisinin ataletidir [27],[54].

4.2.5 Şanzıman modellemesi

Bir şanzıman, bir güç kaynağındaki hızı ve torku başka bir cihaz için gereken farklı bir hız ve tork seviyesine dönüştürür. Vites kutusunun en yaygın kullanımı araçlardadır. Vites kutusunun işi, motorun en verimli hızda çalışmasını sağlamak ve bu arada aracın çok çeşitli hızlarda çalışmasını sağlamaktır.

ς dişli oranı ve tüm güç kayıplarını ihmal etsin, motor hızı ω_{iYM} ile T_{iYM} torku arasındaki ilişki ve ω_2 ile tork T_2 arasındaki fark diferansiyel tarafından sağlanır. Sırasıyla

$$\omega_{iYM} = \varsigma \cdot \omega_2 \quad [4.26]$$

$$T_{iYM} = \frac{1}{\varsigma} \cdot T_2 \quad [4.27]$$

Çekile bilirliliği (yokuş tırmanma kabiliyeti) hesaplamak için yuvarlanma direncini ve aerodinamik direnci göz ardı edip, aracın hızlanmadığını varsayıyoruz. Bu varsayımlar en düşük dişli oranını hesaplamak için kullanılır. Tekerlekteki araç torku;

$$T_v = F_{U_maks} \cdot r_w \approx M_v \cdot g \cdot \zeta \cdot r_{wh} \quad [4.28]$$

r_{wh} tekerlek yarıçapını, g yerçekimi kuvvetini, ζ yolun eğimini, F_U yokuş yukarı sürtünme kuvveti, γ 'nın şanzımanın açısal hızının tekerleklerin açısal hızına oranı olduğunu, çekme gereksinimlerini karşılamak için seçilen en büyük dişli oranının (1. vites) aşağıdaki denklemle hesaplanabileceğini varsayılır.

$$\varsigma_1 = \frac{T_{v_maks}}{\gamma \cdot T_{iYM_maks}} = \frac{F_{U_maks} \cdot r_{wh}}{\gamma \cdot T_{iYM_maks}} = \frac{M_v \cdot g \cdot \zeta \cdot r_{wh}}{\gamma \cdot T_{iYM_maks}} \quad [4.29]$$

Güç kayıplarını ihmal edersek, bu durumda motor devri (maksimum eğim eğimiyle yokuş yukarı çalışma), araç hızı ile orantılı olur.

$$\omega_{lYM} = \zeta_1 \cdot \gamma \cdot \frac{v_{min}}{r_{wh}} \quad [4.30]$$

ρ_a melzeme yoğunluğu, c_r yuvarlanma (rolling) katsayısı, c_d sürüklenme (drag) katsayısı ve ζ_1 1.vites oranını temsil ettiği için maksimum motor torku motor hızına bağlı olarak belirlenebilir. İkinci en küçük dişli oranı (4. vites) maksimum araç hızına göre seçilebilir. Böylece, C_r 'nin bir sabit olduğu düşünüldüğünde, maksimum araç hızı, ilk olarak aşağıdaki ilişkiyle çözümlenmelidir.

$$P_{maks} = F_{maks} \cdot v_{maks} = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot c_d \cdot A \cdot v_{maks}^2 + c_r \cdot v_{maks} \cdot M_v \cdot g \right) \cdot v_{maks} \quad [4.31]$$

Sonuç olarak, maksimum araç hızı ve azami motor hızı biliniyorsa, 4. vites aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

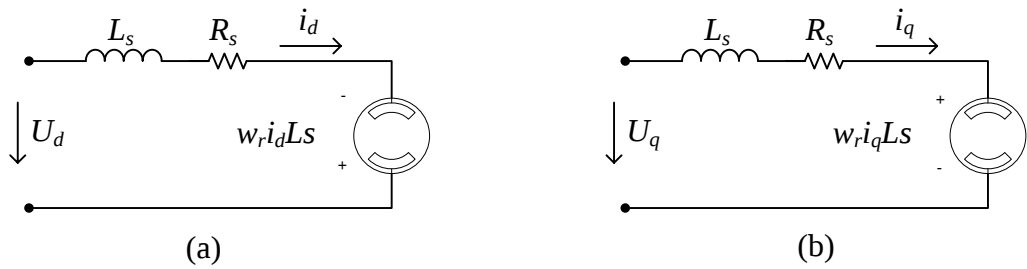
$$\zeta_4 = \frac{r_{wh} \cdot T_{lYM_maks}}{\gamma \cdot v_{maks}} \quad [4.32]$$

Aracın en sık kullanılan şehir hızında çalıştığı beşinci vitesin, zorlu çalışma sınırlarının gereklerini karşıladığını seçmek mümkündür. Bu arada, komşu dişlilerin oranının sabit bir sınır içinde kalması ve farklı dişli oranları nedeniyle oluşturulan vites kutusu boşluklarının çok büyük olamayacağını garanti etmek için sıklıkla başka bir yöntem kullanılır,

$$\zeta_k \approx \zeta_1 \cdot \left(\frac{2}{3} \right)^{k-1}, k = 1, 2, \dots, 5 \quad [4.33]$$

4.2.6 Elektrik motor modellemesi

Bölüm 3'te ayrıntılı bilgi verilen (PMSM) elektrik motorunun rotor sargılarının eşdeğer devre modelleri Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12 PMSM'nin a) d-ekseni ve b) q-ekseni eşdeğer devreleri

PMSM'nin açısal hızı w_r , kutup çift sayısı p , stator direnci R_s , statorun d ve q eksenindeki; U_d ve U_q voltaj, i_d ve i_q akım, Ψ_d ve Ψ_q manyetik akımıdır. Sırasıyla denklemler yazılırsa;

$$U_d = \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q w_r + R_s i_d \quad [4.34a]$$

$$U_q = \frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d w_r + R_s i_q \quad [4.34b]$$

L_s stator endüktansını, Ψ_r kalıcı mıknatıs akısını gösterir kalıcı manyetik alanın varlığı ile $\Psi_d = L_s i_s + \Psi_r$ ve $\Psi_q = L_s i_q$ denklemleri stator akımı i_d sıfıra ulaşmak için kontrol edilirse rotor milinde üretilen elektromanyetik tork şu şekilde elde edilir;

$$\tau_2 = \frac{3p}{2} (i_q \Psi_d - i_d \Psi_q) = \frac{3p}{2} (i_q \Psi_r) \quad [4.35]$$

Newton'un ikinci yasasına dayanan mekanik denklem yazılırsa;

$$\frac{J_{EM}}{P_{EM}} \frac{dw_r}{dt} = T_{EM} - T_{yük} \quad [4.36]$$

Elektrik motorunun yük üzerindeki torku $T_{yük}$, J_{EM} motorun atalet momentini, $P_{EM_giriş}$ giriş gücü ve $P_{EM_çıkış}$ çıkış gücüdür. [4.35], [4.36] ve [4.37] denklemleri ile mekanik yükün torku ve verim aşağıdaki gibi yazılır.

$$\tau_2 = \frac{3p}{2} \Psi_r \frac{R_s U_q - w_r (R_s \Psi_r + L_s U_d)}{R_s^2 + w_r^2 L_s^2} \quad [4.37]$$

$$\eta = \frac{P_{EM_çıkış}}{P_{EM_giriş}} = \frac{1}{1 + \frac{2}{3p\Psi_r^2} \left(\frac{R_s \tau_2}{w_r} + \frac{L_s^2 w_r \tau_2}{R_s} \right)} \quad [4.38]$$

İndüksiyon ve DC motorların tartışılmasına benzer şekilde, sürtünme ve windage kaybı, manyetik kayıp ve kaçak yük kayıpları yukarıdaki ifadeye dahil değildir. Bu çalışmada 75Kw ve 91kg Westinghouse (MC_AC75) elektrik motoru simule edilmiştir.

4.2.7 İçten yanmalı motor modellemesi

Hibrit elektrikli araçlarda tahrik kısmının büyük kısmını İYM'ler sağlar. İçten yanmalı motorun çalışma ve hız aralığı belirlenecektir. Motor kararlı durum koşullarında

çalıştığında, İYM'lerin termodinamik verimliliği η_E esas olarak motor hızı ω_E ve içten yanmalı motor torku T_{iYM} tarafından karar verilir: Bu parametrelerin ilişkisi;

$$\eta_E = \frac{\omega_{iYM} \cdot T_{iYM}}{P_k} \quad [4.39]$$

Burada P_k , yakıt ve kimyasal enerjiyi taşıdığı için alt simge olan k “kimyasal” anlamına gelir.

$$M_f = \frac{P_k}{H_l} \quad [4.40]$$

Denklem [4.40] tanımlanan yakıt kütle akışı M_f ile ilgili entalpi akımıdır. H_l , yakıtın daha düşük ısınma değerini temsil eder. ω_{iYM} ve T_{iYM} değişkenlerinin aralığı, net bir fiziksel yoruma sahip olsa da, modellenecek spesifik motora bağlıdır. Böylece iki normalleştirilmiş motor değişkeni; C_m ortalama piston hızı ve p_m ortalama etkili basınç sabit çalışma koşullarında motor çalışma noktasını gösterebilir. Bu iki değişken

$$C_m = \frac{\omega_{iYM} \cdot S}{\pi} \quad [4.41]$$

$$p_m = \frac{N \cdot T_{iYM} \pi}{S_d} \quad [4.42]$$

S motor stroku ve S_d motor silindir hacmidir. Denklem [4.42]’de, $N = 2$ ve $N = 4$, sırasıyla iki zamanlı bir motor ve dört zamanlı bir motor içindir. Motor boyutlarını tahmin etmek için P_{maks} değerinin bilinmesi gerekir. P_{maks} değeri aşağıdaki gibi bulunur;

$$P_{maks} = \frac{\pi}{16} K \cdot B^2 \cdot p_m \cdot C_m \quad [4.43]$$

Burada k silindir sayısı ve B silindir çapıdır. Sonuç olarak, nominal motor gücü P_{max} belirlendikten sonra, Denklemi kullanarak silindir sayısı ve silindir deliği ile ilgili motor boyutunu tahmin etmek mümkündür.

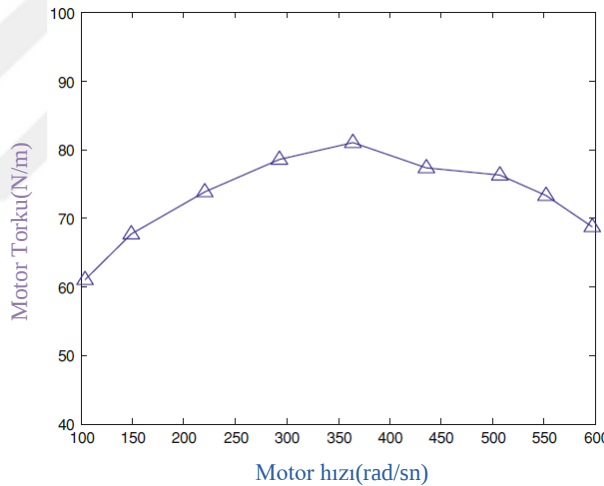
Motor modeli ve boyutları için motorun etkili basınç değerine yaklaştığı etkin Willans tanımını kullanarak motor modelini basitleştirmek mümkündür.

$$p_m \approx \eta(\omega_{iYM}) \cdot P_f - P_{me}(\omega_{iYM}) \quad [4.44]$$

Burada $\eta(\omega_{iYM})$, kimyasal enerjiden silindirin içindeki hıza kadar olan termodinamik enerjinin, silindirin içindeki basınca dönüşümüdür; $P_{me}(\omega_{iYM})$, ω_{iYM} hızındaki motordaki tüm mekanik sürtünme kayıplarını temsil eder ve $P_{me}(\omega_E)$, genellikle ön hesaplamalar için sabit olarak kabul edilir. P_f ; ortalama yakıt basıncı,% 100 verime sahip bir motorun, daha düşük bir ısıtma değeri H_l olan bir kütle m_f yakıtı yakılarak üretildiği ortalama etkili basınçtır ve şu şekilde ifade edilir.

$$P_f = \frac{H_l \cdot m_f}{S_d} \quad [4.45]$$

Simülasyonda kullanılacak 41 kW gücünde bir Geo Metro 1.0 L SI motorun deneysel veriler doğrultusunda; Motor torku, M_a hava yükünün kütesine bağlı olarak Hava / yakıt karışım oranı $\frac{A}{F}$, σ kıvılcım ilerlemesi (üst ölü merkezden önceki derece) ve motor hızı ω_E , aşağıda gösterildiği gibi ampirik bir ilişki ile hesaplanabilir.



Şekil 4.13 Geo Metro 1.0 L SI (41Kw) motorun maksimum tork eğimi

$$\begin{aligned} T_{iYM} = & -181,36 + 379,36 \cdot M_a + 21,91 \left(\frac{A}{F} \right) - 0,85 \left(\frac{A}{F} \right)^2 + 0,26 \cdot \sigma + 0,0028 \cdot \sigma^2 \\ & + 0,027 \cdot \omega_{iYM} + 0,000107 \cdot \omega_{iYM}^2 + 0,00048 \cdot \omega_{iYM} \cdot \sigma + 2,55 \cdot \sigma \cdot M_a \\ & - 0,5 \cdot \sigma^2 \cdot M_a \end{aligned} \quad [4.46]$$

J_{iYM} motorun dönme momenti ataleti anlamına gelir ve $T_{YÜK}$ yük torkudur. Maksimum motor torku maksimum gaz kelebeği açısında (% 100) elde edilebilir. Gaz kelebeği açısı değiştiğinde, gerçek motor torku orantısal olarak değişecektir. Böylece, motor torku şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{d\omega_{iYM}}{dt} = \frac{1}{J_E} T_{iYM} - \frac{1}{J_E} T_{YÜK} \quad [4.47]$$

Motor hızlanması gaz kelebeği açısı u , durum denklemi için kontrol değişkeni olarak kabul edilir ve $T_{iYM} = u \cdot T_{iYM_{maks}}$ hızlanma denklemidir. Motor üreticisi tarafından sağlanan verilere dayanarak maksimum tork eğrisi, $T_{iYM_{maks}} = f(\omega_{iYM})$ fonksiyonuna bağlı olarak Şekil 4.13’de görüldüğü gibidir. Motor torkunu ve hızı, motor çıkış kapasitesini bozmadan böylesi bir alanda kısıtlayarak, motor yakıt verimliliğini artırmaya yardımcı olan yüksek çalışma verimliliğini gösterir. Bu maksimum 41 kW gücünde bir Geo Metro 1.0 L SI motor optimizasyon alanı aşağıda niceliksel olarak ifade edilir:

$$237 \text{ rad/s} < \omega_{iYM} < 380 \text{ rad/sn} , 52Nm < T_{YÜK} < 60Nm \quad [4.48]$$

Bu çalışmada 41 kW Geo Metro 1.0 L SI içten yanmalı motoru simülasyonda kullanılacaktır.

4.2.8 Jeneratör seti modellemesi

Bir seri hibrit elektrikli araçta ana taşıyıcı elektrik motorudur. Elektrik motorunun yapısal ve matematiksel modellemelerinin aynısı jeneratör sistemleri içinde söylenir. Bundan dolayı ayrıntılı olarak bilgi verilmesine ihtiyaç yoktur. Jeneratör setinin yeterli elektrik gücü ve batarya üzerindeki şarj/deşarj etkisinin bilinmesi yeterlidir.

Gerekli motor gücü, tahrik milinde gerekli olan güce eşittir:

$$P_{fd} = P_{veh}/\eta_{fd} \quad [4.49]$$

$$P_{iYM} = P_{veh}/\eta_{drive} \quad [4.50]$$

P_{iYM} gerekli motor gücü olduğunda, P_{veh} aracın gerekli gücüdür, P_{fd} şaftta hesaplanan gerekli güçtür, η_{drive} aktarma organı verimidir ve η_{fd} son sürüş verimidir. Tekerlek ve aktarma organları oranları verilirse, motor hızına karşı araç hızı aşağıdaki denklemden hesaplanabilir:

$$\omega_{iYM} = \frac{v}{r_{wh} \cdot r_{drive}} \cdot \frac{60}{2\pi} \quad [4.51]$$

ω_{iYM} motor hızı (rpm) olduğunda, v araç hızıdır (m / s), r_{wh} tekerleğin yarıçapıdır (m) ve r_{drive} motor şaftından tahrik tekerleğine giden aktarma organı oranıdır. Motor hızı, araç hızından geriye doğru hesaplandığında, torku şu şekilde hesaplanabilir:

$$T_{iYM} = \frac{P_{iYM}}{\omega_{iYM}} \quad [4.52]$$

Seri hibrit araç sistemlerinde, motor / jeneratör grubu (genset), aracı sürmek ve aynı anda enerji depolama sistemini aynı anda çalıştırmak için motora güç sağlayabilmesi için yeterli elektrik gücü üretebilmelidir; Bu nedenle, jeneratörden gereken güç aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$P_{genset} = \frac{P_{iYM} (1 + k_{sarj}(P_{veh}))}{\eta_{gen} \cdot \eta_{iYM} \cdot \eta_{genset}} \quad [4.53]$$

P_{genset} motorun verilen araç hızındaki gücü (W) olduğu zaman, η_{iYM} motorun verimidir, η_{gen} jeneratörün verimliliğidir, η_{genset} motorun/jeneratörün verimliliğidir ve $k_{sarj}(P_{veh})$ normal sürüşteki şarj gücü marjı faktörüdür.

Seri HEA'nın batarya dizini üzerindeki şarj/deşarj etkisi;

$$P_{bat} = \frac{P_{iYM}}{\eta_{iYM}} - \eta_{gen} \cdot P_{gen} \quad [4.54]$$

$$P_{bat} = \frac{k_{fd} \cdot T_{fd} \cdot \omega_{iYM}}{\eta_{fd}} - k_{gen} \cdot T_{iYM} \cdot \eta_{gen} \cdot \omega_{gen} \quad [4.55]$$

$$P_{bat} = \frac{k_{fd} \cdot T_{fd} \cdot \omega_{iYM}}{\eta_{fd}} - k_{gen} \cdot (T_{veh} - T_{fd}) \omega_{iYM} \cdot \eta_{gen} \quad [4.56]$$

P_{bat} batarya gücü, k_{gen} jeneratörün oransal katsayısıdır, k_{fd} son sürüş oransal katsayısıdır. Bu çalışmada GC_ETA95 jeneratör ekü simülasyon modeli kullanılacaktır.

4.2.9 Lityum iyon akü modellemesi

Pilleri modellerken, özellikle de şarj /deşarj oranları yüksek olduğunda, yukarıda belirtilen kapasitif etkileri tanımlamak için bir dirençle paralel olarak tek bir kapasitedeki kapasite kullanılır. Şarj durumu (SOC), nominal kapasite ile ilgili batarya için bir yakıt göstergesi eşdeğeridir.

$$SOC = \frac{Q}{Q_0}, \dot{Q} = -i \quad [4.57]$$

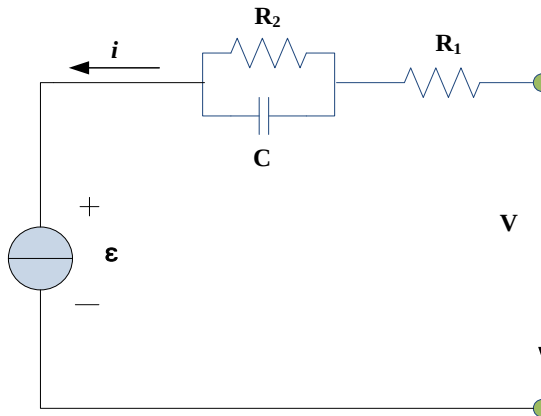
Burada Q , elektrik yüküdür; Q_0 , genellikle Ah (amper-hours) cinsinden ifade edilen batarya kapasitesidir; i terminal akımıdır. Şarj derinliği (DOD) durumu için bir alternatif sıklıkla kullanılır ve $DOD = 1 - SOC$ diye ifade edilir. Akü gerilimi, belirli bir süre t_d 'den sonra kesme voltajına (ör., 0.8 E) düştüğünde; Pil deşarj olduğu düşünülebilir. Tahliye süresi t_d , deşarj oranının i bir fonksiyonudur t_d ve i arasındaki ilişki, Peukert denklemini kullanarak şöyle açıklanabilir:

$$t_d = Ki^{-q} \quad [4.58]$$

Burada K bir sabit ve q Peukert üstel katsayısı olup 1 ile 1.5 arasında bir aralığa sahiptir (tipik lityum iyon aküler için, $q = 1.2$). Batarya kapasitesini belirli bir deşarj oranında i^* için Q^* dir. Daha sonra bir deşarj akımı i için akü kapasitesi Q_0 olarak ifade edilebilir.

$$Q_0 = \frac{K_c Q^*}{1 + (K_c - 1)(i/i^*)^\delta} \quad [4.59]$$

Burada ; $\delta = q - 1$ ve K_c yine bir sabittir. $i_0 = \frac{Q_0}{h}$, yani bir saatteki C-oranı olarak adlandırılan boyutsal olmayan bir değer $c(t) = \frac{i}{i_0} = \frac{1}{k}$ diye ifade edilir. C-oranı genellikle, pilin veya k saatinde tam olarak şarj edildiği bir akımla ilgili C / k olarak yazılır.



Şekil 4.14 Lityum iyon akünün eşdeğer devresi

Akülerin geçici dinamiklerinin ek detaylarını hesaba katmak için daha yüksek bir RC devreleri kullanılabilir. Bununla birlikte, çoğu durumda, bu bölümde açıklandığı gibi

tek bir kapasite yeterlidir. Akünün açık devre voltajı ε , R_1 ve R_2 komponent direç içeren bir iç direnç R_{int} 'i ve şarj çift katlarının geçici yanıtını karakterize eden etkili bir kapasitans C 'den oluşan bataryanın eşdeğer elektrik şeması Şekil 4.14'te gösterilmektedir. Deşarj durumu (SOD) cinsinden belirtilebilecek elektrotlarda mevcut olan aktif malzemenin sıcaklığına ve miktarına bağlıdır. Akünün açık devre voltajı modellemek için iki adımlı bir prosedür gereklidir. Eşdeğer elektrik şebekesi, geçici terminal potansiyelini terminal akımına bağlayan aşağıdaki denklemi verir.

$$i = \frac{V - \varepsilon - R_1 i}{R_2} + C \frac{d}{dx} [V - \varepsilon - R_1 i] \quad [4.60]$$

SOD'un $\alpha(i)$ orana bağımlılığı, referans eğrisi için değer birliğine sahip olan bir oran faktörü tarafından. SOD'un $\beta(T)$ sıcaklığa bağımlılığı, referans değeri için bir birleşme değerine sahip olan bir sıcaklık faktörü tarafından hesaba katılır. Ortam sıcaklığı değişikliğinden kaynaklanan varyasyonu telafi etmek için potansiyel bir düzeltme terimi $\Delta E(T)$ kullanılır. Böylece, potansiyel, terminal voltajı ve SOD arasındaki ilişkiyi ifade eden aşağıdaki denklemleri elde ederiz,

$$\varepsilon[i(t), T(t), t] = V[i(t), T(t), t] - R_{int}(t) \quad [4.61]$$

$$V[i(t), T(t), t] = \sum_{k=0}^n C_k SOD^k[i(t), T(t), t] + \Delta \varepsilon(T) \quad [4.62]$$

$$SOD[i(t), T(t), t] = \frac{1}{C_r} \int_0^t a[i(t)] \cdot \beta[T(t)] \cdot i(t) dt \quad [4.63]$$

Burada C_k , referans eğrisi için polinom ifadesinde k th mertebesi teriminin katsayısıdır ve C_r , batarya kapasitesidir. $k = 0$ için; $\varepsilon = C_0$, referans eğrisi için deşarj referans sıcaklığında başladığı zaman açık devre voltajıdır. Akünün açık devre voltajı sıcaklığa bağlı olması nedeniyle, sıcaklık her zaman adımında denge potansiyelinin hesaplanması için dinamik olarak çözümlenmelidir. Pil sıcaklığı değişimi, aşağıdaki gibi ifade edilen termal enerji dengesi [27] ile belirlenir.

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT(t)}{dt} = i(t)^2 R_1 + \frac{1}{R_2} [v(t) - \varepsilon[i(t), T(t), t] - i(t) R_1]^2 - h_c A [T(t) - T_a] \quad [4.64]$$

Burada m akünün kütlesi, c_p özgül ısı, h_c ısı transfer katsayısı ve T_a ortam sıcaklığı anlamına gelir.

Bir lityum iyon akünün global verimliliği, akünün yüklere ilettiği toplam enerjinin, pilin tamamen şarj edilmesi için gereken enerjiye oranı olarak tanımlanır. Batarya voltaj denklemi [4.61], global verimlilik, sabit bir şarj / deşarj akımıyla "Peukert" durumunda da değerlendirilebilir [28]. Toplam deşarj süresi $t_d = Q_0/i$; Böylece bataryanın yüklere verebileceği enerji,

$$\varepsilon_{desarj} = \int_0^{t_d} P_s dt = t_d(\varepsilon - R_{int} \cdot i) \cdot i \quad [4.65]$$

Bataryayı tükenmek üzere aynı oranda tamamen şarj etmek için gereken enerji;

$$\varepsilon_{sarj} = \int_0^{t_d} P_d dt = t_d(\varepsilon + R_{int} \cdot i) \cdot i \quad [4.66]$$

Böylece E_{sarj} 'in E_{desarj} 'e oranı olarak tanımlanan küresel verimlilik;

$$\eta_B = \frac{\varepsilon_{desarj}}{\varepsilon_{sarj}} = \frac{\varepsilon - R_{int} \cdot i}{\varepsilon + R_{int} \cdot i} \quad [4.67]$$

Batarya sabit bir güçte P şarjlı / boşalmışsa (Ragone vakası), akü verimliliği için analiz metodu aynıdır. [4.61]'teki ilk denklemde $i = P/V$ eşitliği tekrar düzenlenirse terminaller arası voltajı, P 'nin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir:

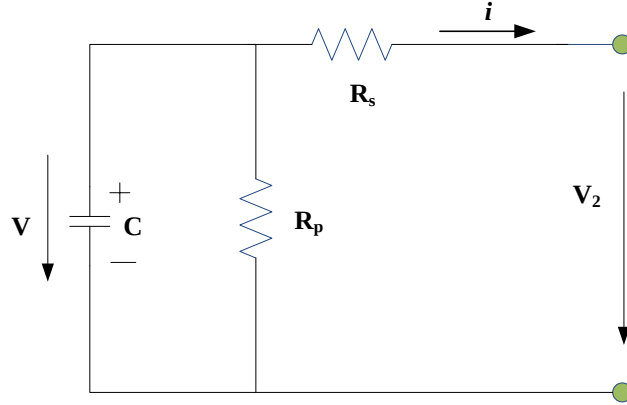
$$V^2 - \varepsilon \cdot V + P \cdot R_{int} = 0 \quad [4.68]$$

$$V = \frac{\varepsilon}{2} + \sqrt{\frac{\varepsilon^2}{4} - P \cdot R_{int}} \quad [4.69]$$

Böylece simülasyonda kullanılacak Saft firmasının 6Ah Li-ion (ESS_Li7_temp) rint model eşdeğer devre modeli çıkarılmıştır.

4.2.10 Süperkapasitör modellemesi

Şekil 3.14'te gösterildiği gibi, seri direnç olan R_s , şarj / deşarj direncidir. Paralel direnç R_p , kendiliğinden oluşan deşarj kayıplarını temsil eder. Süperkapasitör C kapasitansına sahiptir. Ancak, R_p sadece uzun süreli enerji depolama performansı üzerinde etkilidir.



Şekil 4.15 Süperkapasitörün eşdeğer devresi

Deşarj sırasında süperkapasitör için anlık gerilim $V(t)$, C 'ye bağlı bir zaman sabiti ile; R_{ESR} ve harici yük;

$$V(t) = V_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [4.70]$$

V_0 başlangıç voltajıdır. Toplam şarj Q tarafından elde edilir ve deşarj akımını gösterir.

$$Q = V \cdot C \quad \text{yada} \quad Q = Q_0 - \int_0^t i \, dt \quad [4.71]$$

Deşarj akımı ve süperkapasitörün terminal voltajı arasındaki ilişki

$$V_2 = V - i \cdot R_p \quad [4.72]$$

$$i = P_2 / V_2 \quad [4.73]$$

[4.71] , [4.72] ve [4.73] denklemleri yeniden yazılırsa;

$$V_2^2 = (Q/C)V_2 - P_2 R_s \quad [4.73]$$

Bu nedenle süperkapasitörün terminal voltajı için son ifade şu şekilde elde edilir:

$$V_2 = \frac{1}{2} \frac{Q}{C} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{Q}{C} \right)^2 - P_2 \cdot R_s} \quad [4.74]$$

Süperkapasitörün şarj durumu (SOC), terminal çıkış voltajına bağlı olan nominal enerji kapasitesinin yüzdesi olarak tanımlanabilir.

$$SOC = \frac{E_0 - E_1}{E_0} \quad [4.75]$$

E_1 , süperkapasitörden gelen enerji akış miktarını, E_0 ise nominal enerji kapasitesini temsil eder. Süperkapasitörden gelen enerji akışı doğrudan aşağıdaki denklemden ifade edilen kapasite ve voltaj değişimi ile belirlenir.

$$E_1 = \frac{1}{2} C (V_0^2 - V^2) \quad [4.76]$$

Gerçek süperkapasitör bankası, paralel ve seri olarak çoklu süperkapasitör hücreleri kullanılarak modellenir. Süperkapasitör bankasının toplam direnci ve kapasitansı;

$$R_{SC_bank} = \frac{n_1}{n_2} R_s \quad [4.77]$$

$$R_{SC_bank} = \frac{n_2}{n_1} C \quad [4.78]$$

Burada n_1 , serideki kapasitörlerin sayısıdır; n_2 paralel olarak kapasitörlerin kollarının sayısıdır.

Bir akünün verimlilik ve eşdeğer analizine benzer şekilde süperkapasitörün de analizi, süperkapasitörün tamamen şarj edilmesi için gereken enerjiye verilen enerjinin oranı olarak tanımlanır. Süperkapasitörün sabit bir akımda şarj edildiği veya boşaltıldığı test, Peukert testi olarak adlandırılırken, Ragone testinde süperkapasitör sabit bir güçle şarj edilir veya boşaltılır. Peukert deşarj testinde, deşarj akımı i sabittir, bu nedenle [4.73]-[4.74], denklemlerine göre süperkapasitörün terminal voltajı;

$$V_{2_desarj} = V - i \cdot R_s = \frac{Q_0 - i \cdot t}{C} - i \cdot R_s \quad [4.79]$$

Benzer şekilde, sabit akım-şarj durumu için terminal voltajı olarak ifade edilir;

$$V_{2_sarj} = V + i \cdot R_s = \frac{i \cdot t}{C} + i \cdot R_s \quad [4.80]$$

Elde edilen toplam enerji ve süperkapasitörü şarj etmek için toplam enerji;

$$E_{desarj} = \int_0^{t_d} V_{2_desarj} \cdot i \, dt \quad [4.81]$$

$$E_{sarj} = \int_0^{t_d} V_{2_sarj} \cdot i \, dt \quad [4.82]$$

Sırasıyla $t_d = Q_0 / i$ toplam şarj /deşarj süresidir. Bu nedenle, süperkapasitörün global verimliliği,

$$\eta = \frac{E_{desarj}}{E_{sarj}} = \frac{\int_0^{Q_0/i} \left(\frac{Q_0 - it}{C} - i.R_s \right) dt}{\int_0^{Q_0/i} \left(\frac{it}{C} + i.R_s \right) dt} = \frac{Q_0 - 2C.i.R_s}{Q_0 + 2C.i.R_s} \quad [4.83]$$

Süperkapasitörde, Ragone testi daha sonra analiz edilir. 4.17'deki denklemin iki tarafı için 4.14 ve 4.15 ifadeler yeniden diferansiyel denklem ilişkileri kullanılarak yeniden elde edilir.

$$\left(1 - \frac{R_s P_2}{V_2^2} \right) \cdot \left(\frac{d(V_2^2)}{dt} \right) = - \frac{2P_2}{C} \quad [4.84]$$

Böylecedeşarj süresi, boşaltma gücü cinsinden ifade edilir;

$$t = \frac{C[P_2 R_s (\ln(V_2^2) - (\ln(V_{20d}^2))) + V_{20d}^2 - V_2^2]}{2P_2} \quad [4.85]$$

V_{20d} elektrik yükü Q_0 'a ulaştığında terminal voltajını temsil eder (ddeşarj demektir). Benzer şekilde, şarj sürecinde güç yönünün tersine döndüğü dikkate alındığında, şarj süresi şarj gücü ile şu şekilde temsil edilir:

$$t = \frac{C[P_2 R_s (\ln(V_2^2) - (\ln(V_{2ec}^2))) + V_2^2 - V_{2ec}^2]}{2P_2} \quad [4.86]$$

Burada V_{2ec} şarj işlemi için başlangıç terminal voltajını belirtir (cdeşarj demektir).[4.86] denklemi yeniden yazılırsa elektrik yükünü vedeşarjın sonunda terminal voltajı;

$$Q = 2 C . \sqrt{P_2 . R_s} \quad [4.87]$$

$$V_{2ed} = \sqrt{P_2 . R_s} \quad [4.88]$$

Deşarjın başlangıcında (yani, elektrik yükü Q_0 'a eşittir),[4.86]'deki terminal gerilimi ve toplamdeşarj süresi(t_d);

$$V_{20d} = \frac{1}{2} \frac{Q_0}{C} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{Q_0}{C} \right)^2 - P_2 . R_s} \quad [4.89]$$

$$t_d = \frac{C[P_2 R_s (\ln(P_2 R_s) - (\ln(V_{20c}^2))) + V_{20c}^2 - P_2 R_s]}{2P_2} \quad [4.90]$$

Deşarj durumunun analizine benzer şekilde, şarj işlemi için başlangıç terminal voltajı (en baştaki elektrik yükü sıfıra eşittir) olarak hesaplanır.

$$V_{2ec} = \sqrt{P_2 \cdot R_s} \quad [4.91]$$

Süperkapasitör şarj olduğunda (elektrik yükü Q_0 'a ulaşır), terminal voltajı artar. Böylece;

$$V_{20c} = \frac{1}{2} \frac{Q_0}{C} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{Q_0}{C} \right)^2 + P_2 \cdot R_s} \quad [4.92]$$

[4.90] nolu denklem baz alındığında toplam şarj süresi(t_d) aşağıdaki gibi elde edilir;

$$t_c = \frac{C[-P_2 R_s (\ln(P_2 R_s) - (\ln(V_{20c}^2))) + V_{20c}^2 - P_2 R_s]}{2P_2} \quad [4.93]$$

Bundan dolayı Ragone testindeki süperkapasitör için global verimlilik;

$$\eta = \frac{E_{desarj}}{E_{sarj}} = \frac{t_d \cdot P_2}{t_c \cdot P_2} = \frac{P_2 R_s (\ln(P_2 R_s) - (\ln(V_{20d}^2))) + V_{20d}^2 - P_2 R_s}{-P_2 R_s (\ln(P_2 R_s) - (\ln(V_{20c}^2))) + V_{20c}^2 - P_2 R_s} \quad [4.94]$$

Süperkapasitörün güç oranını temsil eden verimlilik aşağıdaki gibidir. Bu genel ifade

$$\eta = \frac{P_{desarj}(t)}{P_{sarj}(t)} = \frac{V(t) - R_s(t) \cdot i(t)}{V(t) + R_s(t) \cdot i(t)} \quad [4.95]$$

Bu çalışmada Saft America firmasının Rechargeable (VL 6 A - Very high power cell) lityum akü modülü ve Maxwell firmasına ait yüksek güç yoğunluğuna sahip PC2500 süperkapasitörler modülleri rint modeli simülasyonda kullanılacaktır.

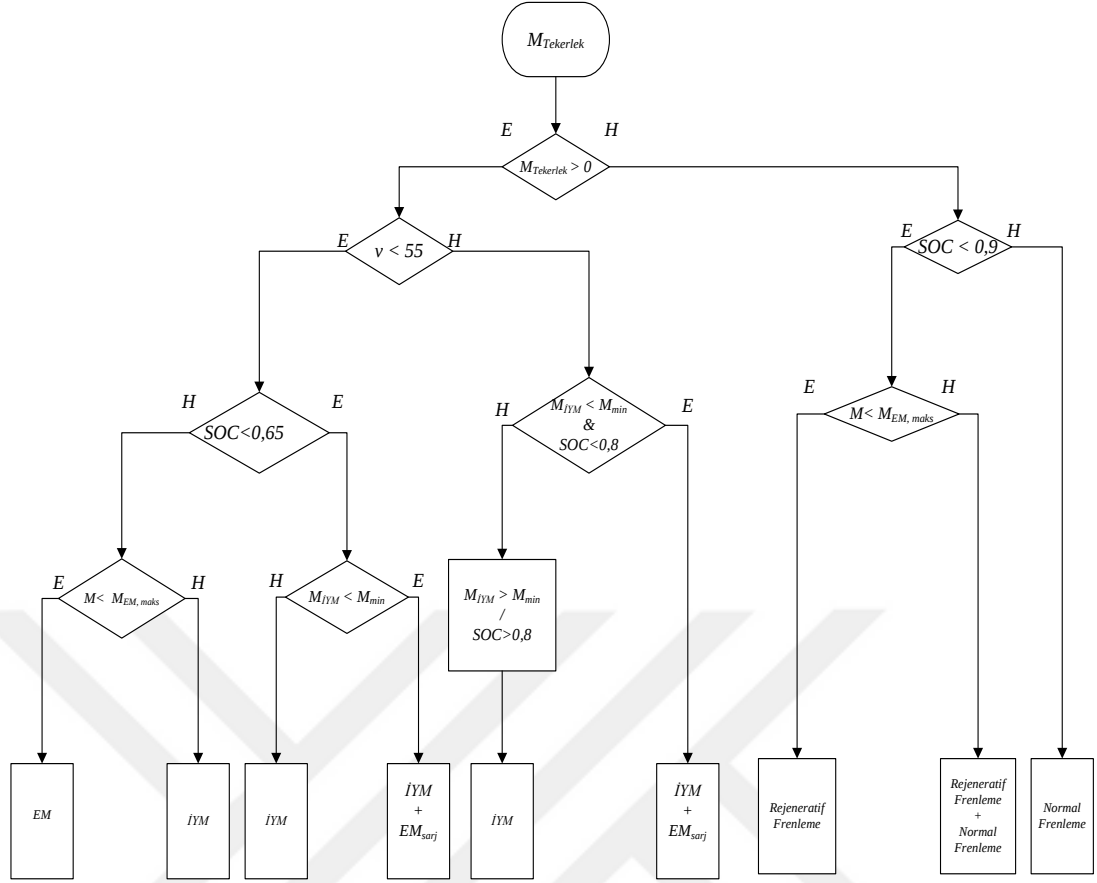
5. BATARYA YÖNETİM, ENERJİ YÖNETİM VE GÜÇ KONVERTÖRLERİ

Bu bölümde seri hibrit, paralel hibrit ve tam elektrikli araçlar için jeneratör seti (sadece SHEA için), lityum iyon ve süperkapasitör batarya arasındaki yük ve enerji paylaşımını yöneten, literatürdeki kural tabanlı yeni bir EYS ve BYS geliştirilmiştir. Önerilen EYS ve BYS verilen sürüş çevriminde talep gücüne göre genset (sadece SHEA için), lityum iyon batarya ve süperkapasitör arasında optimum şekilde paylaşmaktadır. Paralel hibrit elektrikli ve tam elektrikli araçlarda EYS ve BYS enerji dağıtımı EM motorunun verimli olduğu bölge esas alınırken, seri hibrit elektrikli araçlarda İYM verimli çalışma bölgesi esas alınır. Bu sebepten dolayı EM ve İYM verim haritaları önemlidir. Farklı kaynaklar için önerilen EYS’de tahrik sistemine transferi olan enerjinin maksimum verimi, önerilen BYS’de ideal SOC değerleri ve maksimum verimde enerji transferi amaçlanmaktadır [34]. Böylece İYM ve EM’un verimli çalışması sağlamış ve aynı zamanda toplamdaki enerji verimliliği sağlanmış olur.

5.1 Enerji Yönetim Sistemi Model Optimizasyonu

Bu çalışmada enerji yönetim sisteminde kural tabanlı bir optimizasyon önerilmiştir. Bu amaçla aracın optimizasyon çalışmasında , İYM ile EM’nun çalışma bölgelerini ve çalışma durumlarını belirleyen kurallar oluşturulur. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Bataryanın Max. şarj seviyesi (SOC_{maks})
- Bataryanın Min. şarj seviyesi (SOC_{min})
- İYM’un çalışacağı minimum moment değerleri
- Tekerleğin Şarj momenti
- Talep edilen güç ve fren bölgeleri



Şekil 5.1 Önerilen kural tabanlı optimizasyon stratejisi

Tablo 5.2’de gösterilen önerilen kontrol stratejisinde referans olarak tekerlek momentinden elektrikli aracın tahrik ya da frenleme durumunu gösterir. Araç tahrik durumunda ise;

- 1- ($M_{tekerlek} > 0$) hız kontrolüne ihtiyaç bulunmadığını ileriiki işlemlerde hız kontrolü yapılır. Emisyon değeri sıfır olması istenen hız değerinden küçük olduğu durumunda ($v < 55$ km/s) ve şarj seviyesi ($SOC > 0.65$) ise talep edilen moment EM momentinden küçük ($M < M_{em,max}$) tahrik gücünü EM den sağlar , eğer talep edilen moment EM den büyük ise ($M < M_{em,max}$) yalnızca İYM ile tahrik sağlar. Şarj seviyesi ($SOC < 65$) ise yani yeterli değil ise, talep edilen moment içten yanmalı motorun minimum momentinden büyük ise ($M_{İYM} < M_{min}$) jeneratör ile batarya şarj edilir. Talep edilen moment minimum moment değerinden fazla ise ($M_{İYM} > M_{min}$) İYM ile tahrik sağlanmaktadır.
- 2- ($M_{tekerlek} > 0$) ve aracın belirlenen hız limitinden büyük ise ($V > 55$ km/s), şarj seviyesi sınır değerden küçük ve talep edilen moment minimum moment değerinden küçük ise ($M_{İYM} < M_{min}$ ve $SOC < 0.8$) jeneratör devreye girerek

batarya şarj edilirken ve moment İYM tarafından karşılanır. Diğer durumda şarj seviyesi sınır değerden büyük ve ya talep edilen moment minimum moment değerinden fazla ise ($M_{İYM} > M_{min}$) Araç frenleme durumunda ($M_{İYM} < M_{min}$ ve ya $SOC > 0.8$) sadece İYM ile tahrik sağlanmaktadır.

- 3- ($M_{tekerlek} < 0$) ve batarya seviyesi belli bir maksimum değer altında ($SOC < 0.9$) ve fren momenti EM maksimum momentinden küçük ise ($M < M_{EM,max}$) rejeneratif frenleme yapılarak batarya şarj edilir. ($M_{tekerlek} < 0$) ve batarya seviyesi belli bir maksimum değer altında ve fren momenti EM maksimum momentinden büyük ise ($M > M_{EM,max}$) normal frenleme ve rejeneratif frenleme yapılır, batarya rejeneratif frenleme ile şarj edilir.
- 4- ($M_{tekerlek} < 0$) ve batarya seviyesi belli bir maksimum değer altında ($SOC > 0.9$) Şarj doluk değeri maksimum değer üzerinde ($SOC > SOC_{max}$) ise normal frenleme yapılır.

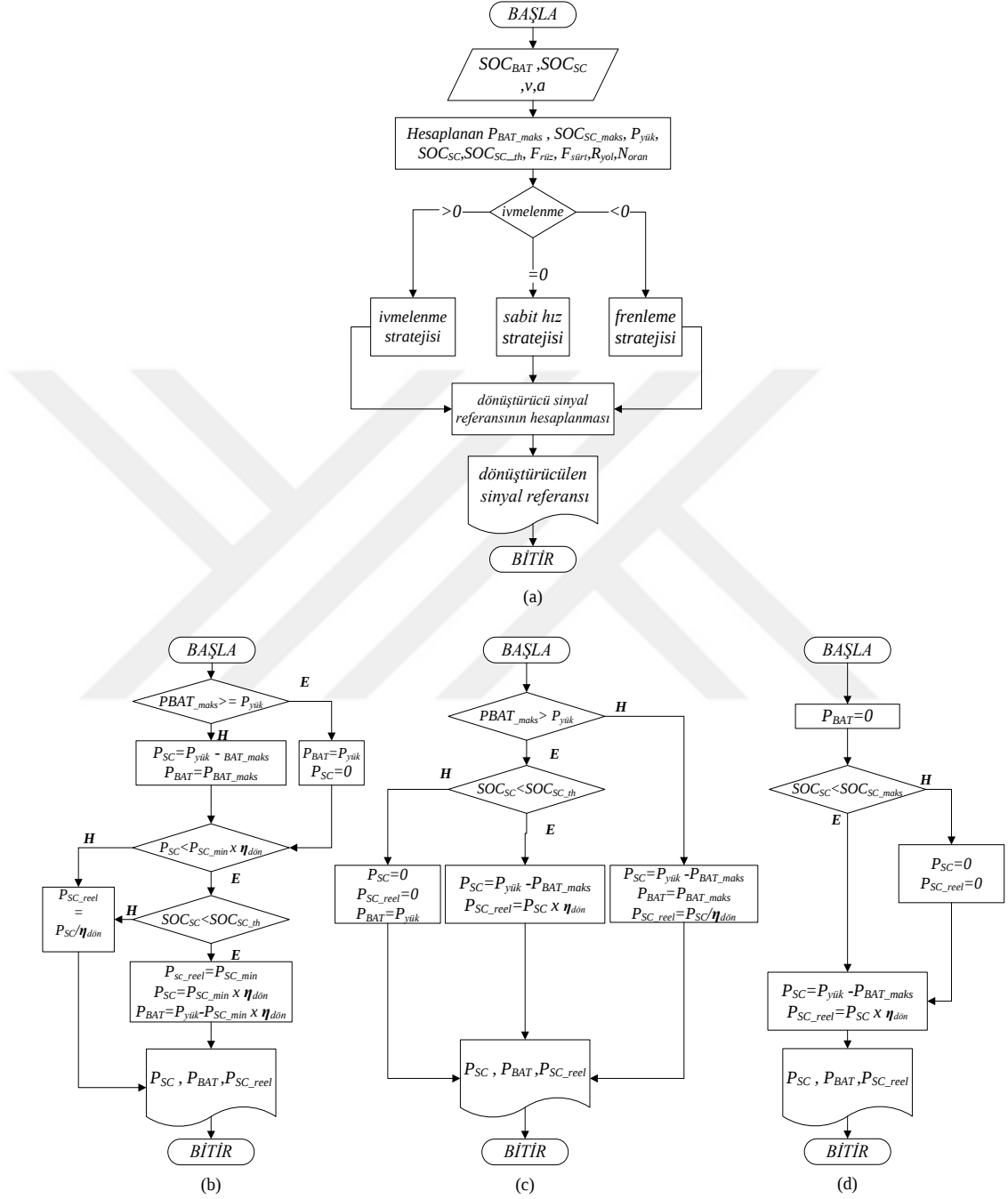
Stratejinin uygulanmasında tüm çevrimler için limit hız değeri (v) 55 km/saat olarak alınmıştır. Batarya seviyeleri de tüm çevrimler için aynıdır. Yalnızca M frenleme kuvvetinin tamamı normal frenler ile sağlanmaktadır [13]. Önerilen EYS tam elektrikli araçlarda İYM motor olmayışından dolayı SOC durumları ve dışardan yeniden şarj veya rejeneratif frenleme bölgesinde çalışacaktır.

5.2 Batarya Yönetim Sistemi Model Optmizasyonu

Batarya yönetim sistemi, hibrit ve elektrikli araçlardaki depolama sistemlerinde şarj yönetimini sağlar. Genel olarak şarj koruma yönetimi ve şarj tüketim yönetimi olmak üzere iki ana başlıkta toplanır. Şarj koruma hibrit enerji depolama sistemleri (HEDS) şarj seviyelerini belli bir aralıkta korumaya çalışır. Bu sistem dışardan şarj edilemeyen seri hibrit ve paralel hibrit elektrikli araçlar için uygundur. Şarj yönetim sistemi ise dışardan şarj imkânı bulan eklentili (plug-in) hibrit ve tam elektrikli araçlar için uygundur.

Bu çalışmada batarya şarj yönetimi Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Burada lityum iyon bataryanın şarj durumu SOC_{BAT} , süperkapasitörün şarj durumu SOC_{SC} , süperkapasitör eşik şarj durumu $SOC_{SC_{th}}$ aracın hızı v , aracın ivmesi a , lityum iyon bataryanın maksimum gücü $P_{BAT_{maks}}$, süperkapasitörün maksimum gücü $P_{SC_{maks}}$, lityum iyon bataryanın minimum gücü $P_{BAT_{min}}$, süperkapasitörün maksimum gücü $P_{SC_{min}}$, yükün

batarya yönetiminden talep ettiği güç $P_{yük}$, rüzgar kuvveti $F_{rüz}$, sürtünme kuvveti $F_{sür}$, yol direnci R_{yol} , süperkapasitör dönüştürme verimi $\eta_{dön}$, P_{SC_reel} süperkapasitör eşdeğer gücüdür.



Şekil 5. 2 Önerilen batarya yönetim stratejisi

Batarya yönetim stratejisi, bataryanın şarj seviyesi ile gücüne, süperkapasitörün gücü ile şarj seviyesine ve ivmelenme stratejisi üzerine kurulmuştur.

İvmelenme stratejisi: Şekil 5.1a'da görüldüğü gibi yük için gerekli güç,

- 1- Bataryanın maksimum gücü karşılıyorsa ($P_{BAT_maks} \geq P_{yük}$) , yük batarya($P_{BAT}=P_{yük}$) tarafından karşılanır.
- 2- Bataryanın maksimum gücü karşılamıyorsa ($P_{BAT_maks} < P_{yük}$) yük iki güç kaynağı tarafından karşılanır. Bu durumda süperkapasitörün gücü($P_{SC_reel} = P_{SC} / \eta_{dön}$) ölçü alınır ve rejeneratif geri kazanma için yeterli depolama alanı sağlar. Eğer süperkapasitör için belirlenen minimum değerinden küçük ($P_{SC} < P_{SC_min} \times \eta_{dön}$) ve süperkapasitör şarj durumu belirlenen eşik değerinin altında ($SOC_{SC} < SOC_{SC_th}$) ise yük için gerekli gücü sağlayamıyor demektir ve yeniden şarj gereklidir. ($SOC_{SC} < SOC_{SC_th}$) değilse süperkapasitörün gücü($P_{SC_reel} = P_{SC} / \eta_{dön}$) ölçü alınır.

Sabit hız stratejisi: Şekil 5.1b'de görüldüğü gibi yük için gerekli güç,

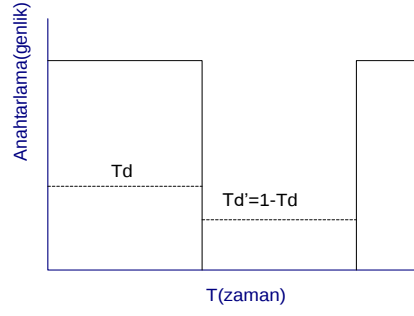
- 1- Bataryanın maksimum gücü karşılıyorsa ($P_{BAT_maks} > P_{yük}$) ve süperkapasitörün şarj durumu eşik şarj durumdan küçük değilse($SOC_{SC} \geq SOC_{SC_th}$), yük batarya($P_{BAT} = P_{yük}$) tarafından karşılanır. Batarya gücü sağlasa bile süperkapasitörün şarj durumu eşik şarj durumdan küçük ise($SOC_{SC} < SOC_{SC_th}$) ise süperkapasitör rejeneratif frenleme ya da yeniden şarj ihtiyacı doğar.
- 2- Bataryanın maksimum gücü karşılamıyorsa ya da eşitse ($P_{BAT_maks} \leq P_{yük}$) batarya yeniden şarj ihtiyacı duyar.

Frenleme stratejisi: Şekil 5.1c'de görüldüğü gibi frenleme stratejisi,

- 1- Bataryanın gücüne bakılmaksızın şarj seviyesi kontrolüne göre tam dolu olana kadar rejeneratif frenleme ya da yeniden şarj edilir.
- 2- Eğer süperkapasitörün şarj seviyesi maksimum değerinin altında($SOC_{SC} < SOC_{SC_max}$) ise yeniden şarj ya da rejeneratif frenleme yapılır. Aksi durumda şarj seviyeleri yeterli görülür ve fazla şarj edilmesine izin verilmez.

5.3 DC/DC Konvertör Tasarım Modeli

Bu bölümde süperkapasitör ve lityum iyon batarya ile çalışan iki yönlü DC/DC konvertör tasarımı yapılmıştır. Tasarımda yukarıda söz edilen durum uzayı ortalama metodu ile sürekli akım modunda çalışan diğer konvertörler gibi anahtarlama periyodu T'dir. Anahtarlama anahtarının kapalı olduğu o



Şekil 5.3 Td ve Td* anahtarlama aralığı

Şekil 5.3'te Td anahtarın kapalı olduğu zaman aralığını, Td* ise anahtarın açık durumda ki olduğu zaman aralığı gösterir.

Td aralığı için;

$$\dot{x} = A_1x + b_1V_g$$

$$y_1 = c_1^T x$$

Td* aralığı için;

$$\dot{x} = A_2x + b_2V_g \quad [5.1a]$$

$$y_2 = c_2^T x \quad [5.1b]$$

[5.1]'deki denklemlerde "x" zamana bağlı durum denklemlerini, "y" zamana bağlı devrenin çıkışını, A₁ ve A₂ sistemin matrislerini, V_g giriş voltajını, b₁ ve b₂ sistemin giriş matrislerini, c₁ ve c₂ ise çıkış matrislerini ifade eder. Statik denklemler y₁ = c₁^Tx ve y₂ = c₂^Tx, çıkış miktarının, durum değişkenlerinden herhangi biri ile uyuşmadığı durumları hesaba katmak için gerekli olduğundan, durum değişkenlerinin belirli bir doğrusal birleşimi elde etmek için ortalama yöntemi uygulanır. [5.1]'deki denklemler hem dinamik hem de statik durumları d ve d* doluluk oranı ortalamalarıyla çarpılır ve toplanır.

$$\dot{x} = d(A_1x + b_1V_g) + d^*(A_2x + b_2V_g) \quad [5.2a]$$

$$y = dy_1 + dy_2 = (dc_1^T + d^*c_2^T)x \quad [5.2b]$$

Uygulanacak ortalama yöntemin geçerli olabilmesi için AC dalgalanmaların çok düşük olduğu varsayımı geçerli olmalıdır. Bundan dolayı standart lineer sürekli sistem durum alanı tanımıyla yeniden düzenlendikten sonra [5.2] denklemleriyle, temel ortalama durum uzayı tanımını elde ederiz. Bu model, tüm diğer türevler için başlangıç modeli olan temel ortalama modeldir (hem alan hem de devre yönelimli). (bir periyot için T):

$$\dot{x} = (dA_1 + d^*A_2)x + (db_1 + d^*b_2)V_g \quad [5.3a]$$

$$y = (dc_1^T + d^*c_2^T)x \quad [5.3b]$$

Buna karşılık, dc elemanların (L, C) bağımsız olarak elde etmek ve sadece dc doluluk oranına bağlı olmak için gerekli olan yaklaşım aynı olarak gösterilmiştir. Aynı zamanda, $fc / fs \ll 1$ ise eşdeğer olan düşük çıkış voltajı dalgalanması DC bir çalışma bölgesinde çalıştırmak anlamına gelir. Bu durumda anahtarlama frekansından çok daha düşük etkili filtre köşe frekansına denk gelmektedir.

[5.3]'teki denklemler tarafından temsil edilen model, tek periyod T üzerinde ortalama bir modeldir. Şimdi, doluluk oranının d döngüden çevrilirse, yani $d = D$ sabit olduğunu varsayarsak:

$$\dot{x} = Ax + bV_g \quad [5.4a]$$

$$y = c^T x \quad [5.4b]$$

Sistem matrisleri D ve D^* ortalamalarıyla çarpılırsa elde edilen yeni ortalama modelleme parametreleri aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$A = DA_1 + D^*A_2 \quad [5.5a]$$

$$b = Db_1 + D^*b_2 \quad [5.5b]$$

$$c^T = Dc_1^T + D^*c_2^T \quad [5.5c]$$

Artık [5.4]'teki durum denklemlerinde lineer bir sistem olduğundan, süper pozisyon yönetimi ile $v_g = V_g + \hat{v}_g$ olursa hat voltajı varyasyonlarının girilmesiyle engellenebilir, burada V_g dc hattı giriş voltajıdır ve bu durum durum vektöründe bir sapmaya neden olur. $x = X + \hat{x}$ burada yine X, durum vektörünün dc değeridir ve üst üste bindirilmiş sapmasıdır.

$$\dot{\hat{x}} = Ax + bV_g + A\hat{x} + b\hat{v}_g \quad [5.6a]$$

$$Y + \hat{y} = c^T x + c^T \hat{x} \quad [5.6b]$$

Benzer şekilde $y = Y + \hat{y}$ sapmasının olması statik durum (dc) ve dinamik (ac) durum modelleri birebirinden ayrılmış olur. [19]

Dc model;

$$AX + bV_g = 0 ; Y = c^T X$$

$$Y = -\frac{c^T}{A} bV_g$$

Ac model;

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + b\hat{v}_g \quad [5.7a]$$

$$\hat{y} = c^T \hat{x} \quad [5.7b]$$

[5.7] 'de sabit durum (dc) vektörünün X genel olarak sadece orijinal modeldeki dc durum oranı D'ye ve dirençlere bağlı olduğunu, ancak depolama elemanı değerlerine (L'ler ve C'ler) bağlı olmadığını belirtmek ilginçtir. Bunun nedeni, X'in L'nin ve C'nin orantısallık sabitleri olduğu lineer denklemler $AX + bV_g = 0$ çözümünün çözümü olmasıdır. Dinamik (ac) modelden, hat-vektör transfer fonksiyonlarına hat voltajı aşağıdaki gibi kolayca elde edilebilir:

$$\frac{\hat{x}(s)}{\hat{v}_g(s)} = (sI - A)^{-1}b \quad [5.8a]$$

$$\frac{\hat{y}(s)}{\hat{v}_g(s)} = c^T (sI - A)^{-1}b \quad [5.8b]$$

Şimdi, durum oranının döngüden döngüye değiştiğini, yani $d(t) = D + \hat{d}$ olduğunu, burada D'nin önceki gibi sabit durum (dc) görev oranı olduğunu ve d'nin üst üste (ac) bir ardışık olduğunu varsayarsak, karşılık gelen sapma tanımını ile $x = X + \hat{x}$, $y = Y + \hat{y}$ ve $v_g = V_g + \hat{v}_g$ olur:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} = & (Ax + bV_g) + (A\hat{x} + b\hat{V})_g + [(A_1 - A_2)X + (b_1 - b_2)V_g]\hat{d} \\ & + [(A_1 - A_2)\hat{x} + (b_1 - b_2)\hat{v}_g]\hat{d} \end{aligned} \quad [5.9a]$$

$$\hat{y} + Y = c^T x + c^T \hat{x} + (c_1^T - c_2^T)X\hat{d} + (c_1^T - c_2^T)\hat{x}\hat{d} \quad [5.9b]$$

Eğer, küçük sinyal yaklaşımını, yani kararlı durum değerlerinden ayrılmalara, kararlı durum değerlerini $\frac{\hat{v}_g}{V_g} \ll 1$, $\frac{\hat{d}}{D} \ll 1$, $\frac{\hat{x}}{X} \ll 1$ göre ihmal edilebileceğini varsayarsak, [1.9] denklemini [19]'da esas alınan ideal bir Buck-boost Güç devresi durum uzayı aşağıdaki gibi çıkarılır.

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{t}}{dt} \\ \frac{d\hat{v}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{D}{L} \\ \frac{D^*}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{t} \\ \hat{v} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \hat{v}_g + \begin{bmatrix} \frac{V_g - V}{L} \\ -\frac{V}{D^*RC} \end{bmatrix} \hat{d} \quad [5.10]$$

6. HİBRİT VE ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Bu bölümde seri hibrit, paralel hibrit ve elektrikli araçlar için geliştirilen farklı BYS ve EYS'lerin, Matlab/SIMULINK tabanlı ADVISOR programı kullanılarak karşılaştırmalı incelemesi yapılmıştır.

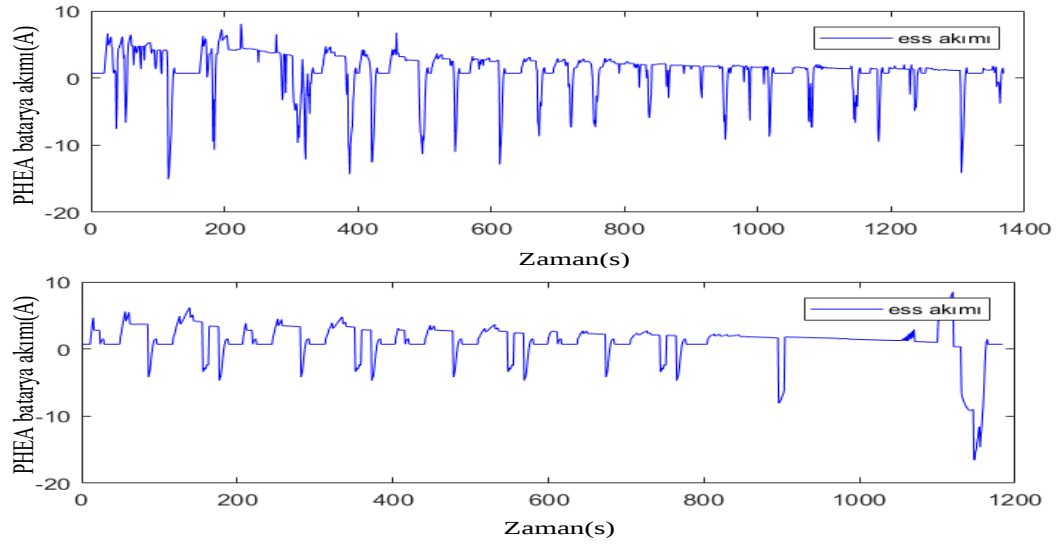
6.1 Paralel Hibrit Elektrikli Araç Simülasyonu

Simülasyon çalışmasında standart ölçüleri belirlenmiş aracın paralel hibrit araç modelinin parametreleri Tablo 6.1'da gösterilmiştir.

Tablo 6.1 Paralel hibrit elektrikli araç modeli parametreleri

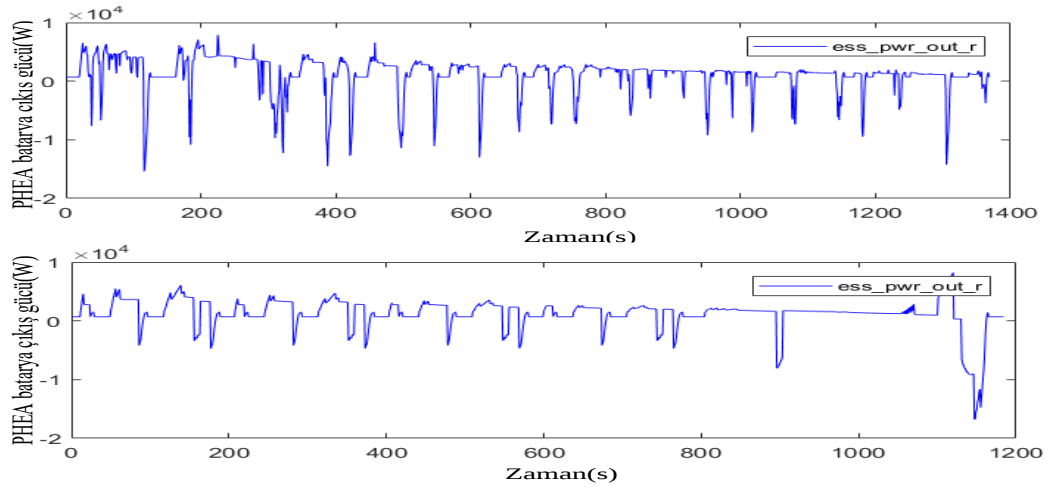
	Parametereler	Değer
ARAÇ (1994 model Saturn SL) (VEH_SMCAR)	Araç ağırlığı(kg)	592
	Tekerlek yarıçapı(m)	0.335
	Diferansiyel oranı	3.63
	Ön bölge(m ²)	2
	Ağırlık merkezi yüksekliği(m)	0.06
	Dingil açıklığı(m)	2.6
	Aerodinamik sürtünme katsayısı	0.59
Elektrik motoru (Westinghouse indüksiyon motoru) (MC_AC75)	Maksimum güç(kW)	75
	Maksimum tork(Nm)	200
	Maksimum verimlilik(%)	92
	Ağırlık(kg)	91
	Maksimum dönüş hızı(rpm)	2970
İçten yanmalı motor (41 kW Geo Metro 1.0 L SI) (FC_SI41_emis)	Maksimum güç(kW)	41
	Maksimum tork(Nm)	81
	Ağırlık(kg)	142
	Maksimum dönüş hızı(rpm)	5700
Süperkapasitör (Maxwell PC2500) (ESS_UC2_Mxwell)	Maksimum güç(kW)	120
	Maksimum akım(A)	290
	Nominal voltaj(V)	310
	Ağırlık(kg)	85
Li-ion batarya (SAFT VL 6A) (ESS_Li7_temp)	Maksimum güç(kW)	90
	Maksimum akım(A)	260
	Nominal voltaj(V)	350
	Ağırlık(kg)	102

Paralel hibrit elektrikli araç modelinde lityum iyon akü ve süperkapasitör dizinleri ayrı ayrı ölçmek yerine enerji depolama sistemi baz alınmıştır. Simülasyon çalışmalarında grafik çıktıları sırasıyla UDDS ve NEDC çevrimi kullanılarak kıyaslanmıştır.



Şekil 6.1 Paralel hibrit elektrikli araç batarya dizini akımı

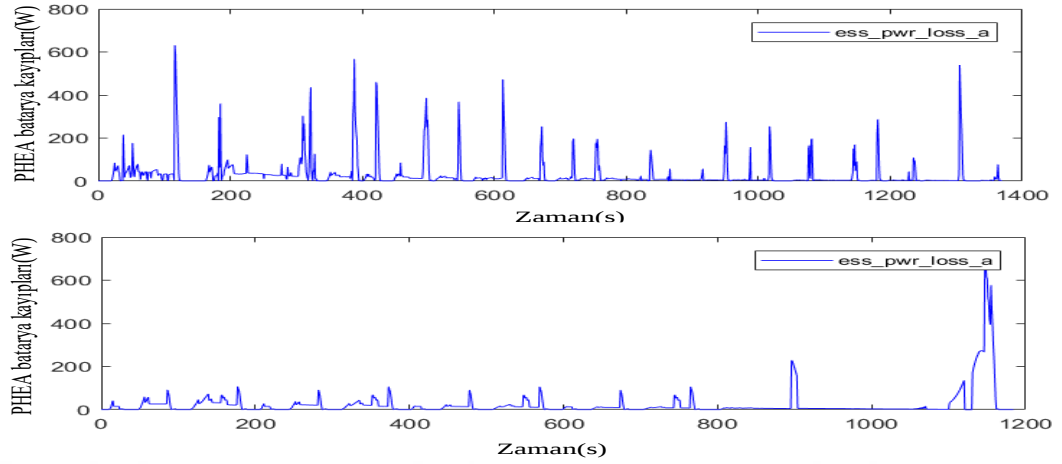
Önerilen BYS performansına göre, Şekil 6.1 incelendiğinde UDDS sürüş çevrimindeki bataryaların akımı 9A ile -17A, NEDC sürüş çevriminde 8A ile -16A aralığında olduğu saptanmıştır. UDDS sürüş çevrimi bataryadan çekilen akım sıklığı, genliği ve şarj/deşarj işlemi, NEDC sürüş çevrimine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuç UDDS çevriminin dur/kalk sayısının NEDC çevriminden fazla olmasının bir sonucudur.



Şekil 6.2 Paralel hibrit elektrikli araç batarya dizini çıkış gücü

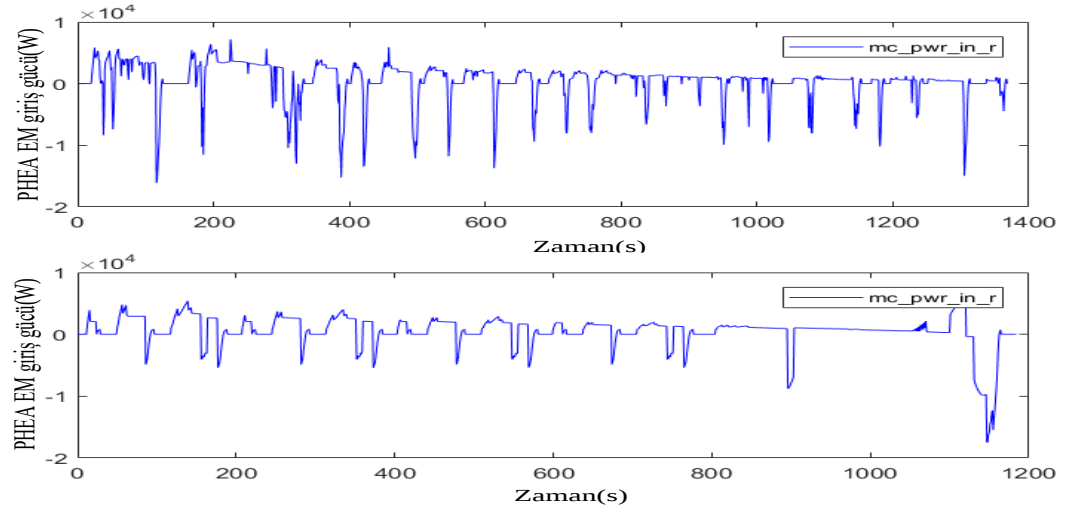
Önerilen BYS performanslarına göre, Şekil 6.2 incelendiğinde UDDS sürüş çevrimindeki bataryaların gücü 8936W ile -16124W, NEDC sürüş çevriminde 8244W ile -17678 W aralığında olduğu tespit edilmiştir. UDDS sürüş çevriminde batarya, NEDC sürüş çevrimine göre sık kullanılmıştır. Bu nedenle UDDS sürüş çevrimi

NEDC sürüş çevrimine göre rejeneratif geri kazanım ve daha fazla sıklıkla şarj edildiği görülmektedir.



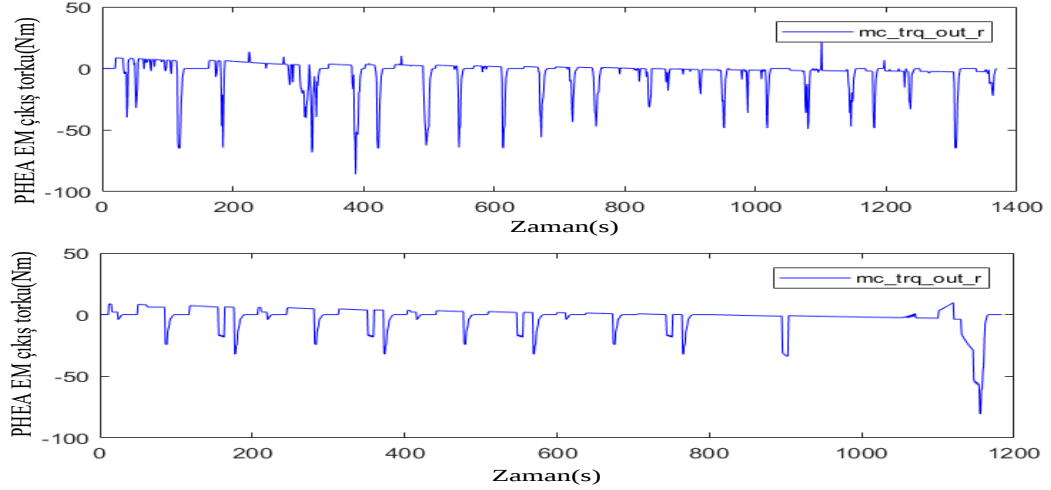
Şekil 6.3 Paralel hibrit elektrikli araç batarya dizini kayıpları

Önerilen BYS ve DC/DC konvertörün performanslarına göre, Şekil 6.3 incelendiğinde UDDS sürüş çevriminin NEDC sürüş çevrimine göre kullanım sıklığı ve batarya kayıplarının daha fazla olduğu görülmektedir. NEDC sürüş çevrimi batarya kayıpları ortalama 0-200 W olurken, UDDS sürüş çevriminde 150-350W aralığında değişmektedir. Kayıpların sebebi sürekli ivmelenmeye bağlı olduğu şeklinde açıklanabilir.



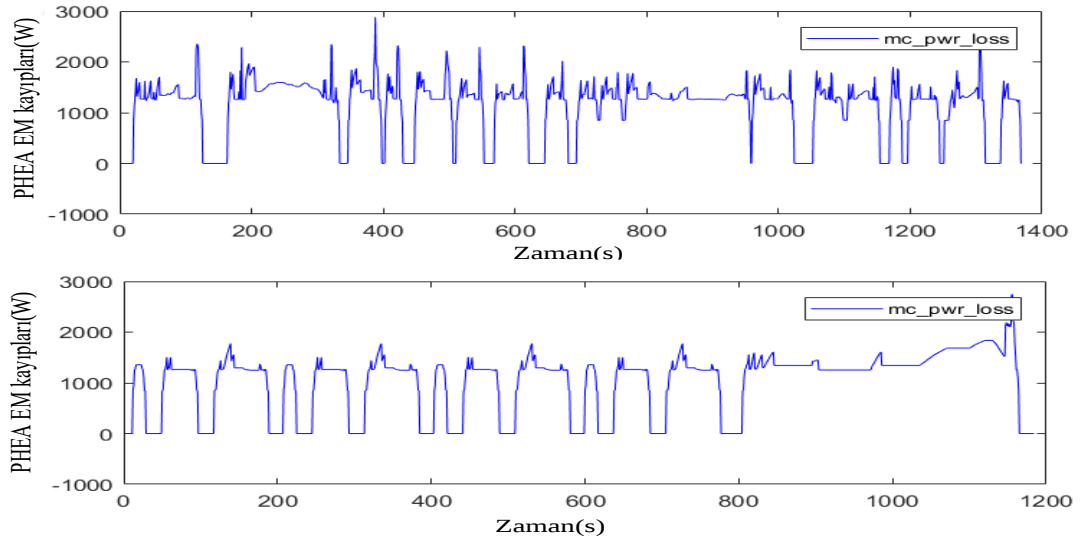
Şekil 6.4 Paralel hibrit elektrikli araç elektrik motoru giriş gücü

Önerilen BYS ve EYS performanslarına göre, Şekil 6.4 incelendiğinde EM için gerekli giriş gücü DC bara üzerinden bataryalardan karşılanmış ve ani yüksek tork noktalarında EM devrede olduğu diğer durumlarda İYM karşılamıştır. Dolayısıyla UDDS sürüş çevriminde EM'den daha fazla yararlanılmıştır.



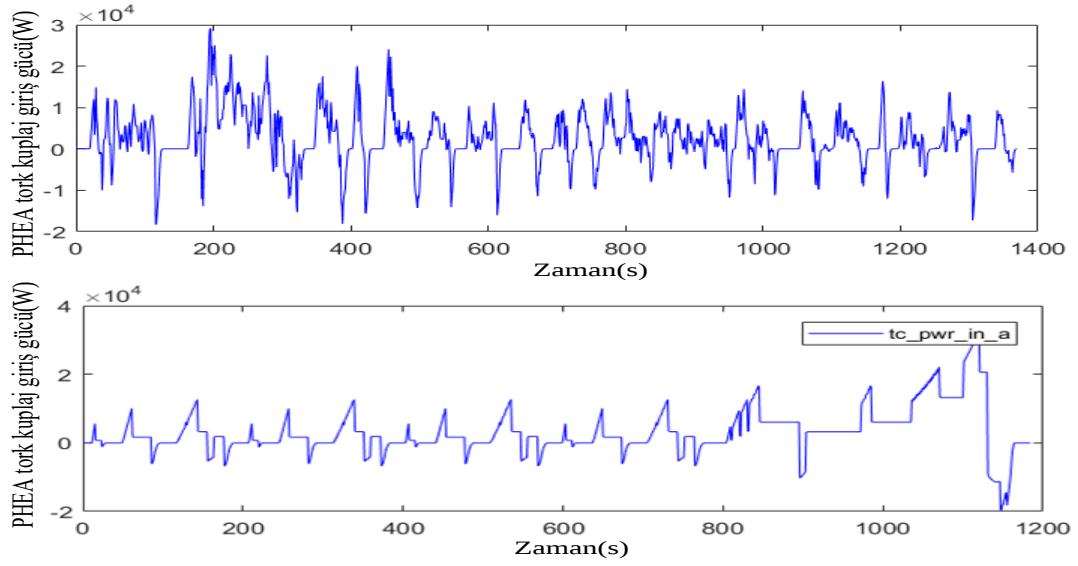
Şekil 6.5 Paralel hibrit elektrikli araç elektrik motoru çıkış torku

Önerilen BYS ve EYS performanslarına göre, Şekil 6.5 EM çıkış torku İYM'a göre çok az seviyelerde olup genellikle güç İYM'den sağlandığı görülmüştür. Sürüş çevrimlerine bağlı olarak UDDS sürüş çevriminde rejeneratif geri kazanım daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bunun sonucu olarak EM yalnız hızlanma durumlarında kullanıldığı ve bataryanın SOC değerlerinin rejeneratif olarak sürekli dolduğu saptanmıştır.



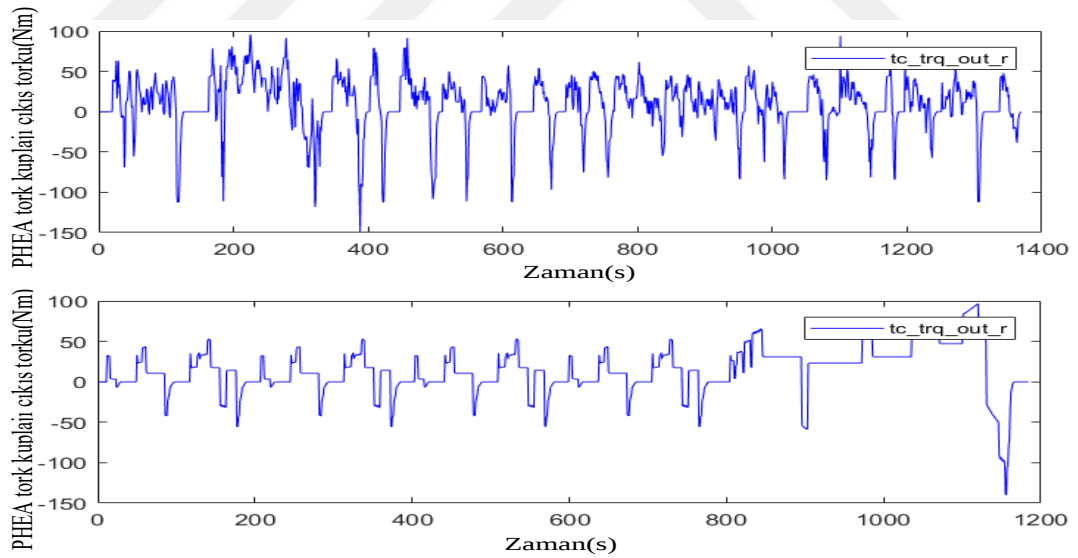
Şekil 6.6 Paralel hibrit elektrikli araç elektrik motoru güç kayıpları

Önerilen BYS ve EYS performanslarına göre, Şekil 6.6 incelendiğinde EM kayıpları UDDS çevriminde ortalama 1786 W, NEDC çevriminde 1412 W olduğu görülmüştür. Dolayısıyla sürekli bir EM motoru kullanılmamasına rağmen dolayı demir ve bakır kayıpları önemli kayıplara neden olmuştur.



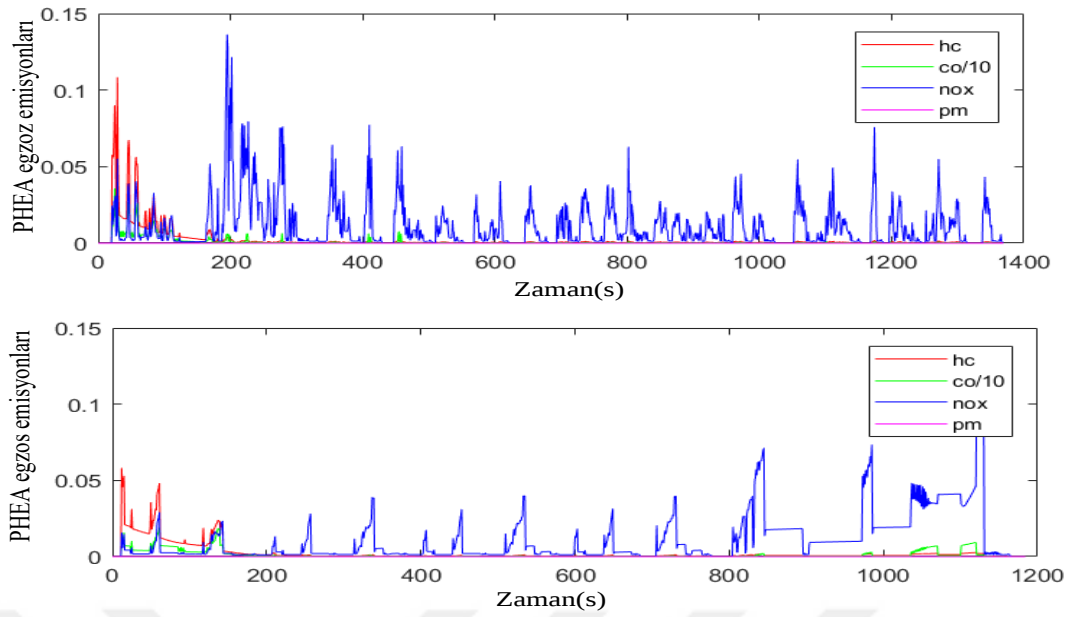
Şekil 6.7 Paralel hibrit elektrikli araç tork kuplajı giriş gücü

Önerilen EYS performanslarına göre, Şekil 6.7 incelendiğinde tork kuplajının giriş gücünün, UDDS sürüş çevriminde %63'ü ve NEDC sürüş çevriminde % 69'ü İYM'den sağlandığı görülmektedir. Dolayısıyla kalkış ve hızlanmadaki fosil yakıtın kullanımını yerine bataryalardan elektriksel güçten yararlanıldığı görülmüştür.



Şekil 6.8 Paralel hibrit elektrikli araç tork kuplajı çıkış torku

Önerilen EYS performanslarına göre, Şekil 6.7 incelendiğinde tork kuplajındaki çıkış torkunun, UDDS sürüş çevriminde %80'i ve NEDC sürüş çevriminde 83'ü İYM tarafından karşılanmaktadır. Ayrıca tork kuplajı rejeneratif geri kazanımda UDDS sürüş çevriminde daha sık kullanıldığı belirlenmiştir.



Şekil 6.9 Paralel hibrit elektrikli araç egzoz emisyon değerleri

Önerilen EYS performansına göre, Şekil 6.9 incelendiğinde egzoz emisyon değerleri; UDDS sürüş çevriminde HC 0.245 g/km, CO 1.072 g/km ve NOx 1.224 g/km, NEDC sürüş çevriminde HC 0.257 g/km, CO 1.363 g/km ve NOx 1.181 g/km olarak bulunmuştur. Sonuçlara dayanarak UDDS sürüş çevriminde ivmelenme ve dur/kalk sayısı NEDC sürüş çevrimine göre fazla olmasına rağmen, UDDS sürüş çevriminde EM daha aktif kullanıldığından dolayı egzoz emisyon değerleri düşük çıkmıştır.

Tablo 6.2 PHEA güç ve frenleme enerji kullanım tablosu(UDDS)

UDDS SÜRÜŞ CEVRİMİ								
Parametreler	Güç Modu				Rejeneratif Frenleme Modu			
	Giriş	Çıkış	Kayıp	Verim	Giriş	Çıkış	Kayıp	Verim
Yakıt	0	21067	-	-	-	-	-	-
Yakıt dönüştürücü	21067	4447	16620	0,21	-	-	0	-
Debriyaj	4447	4367	80	0,98	-	0	0	-
Tork kulplajı	4841	4841	0	1	1409	1409	0	1
Bataryalar	914	2482	39	0,97	-	-	-	-
Bataryalarda depolanan	-1608	-	-	-	-	-	-	-
Motor / kontrolör	1658	619	1039	0,37	1555	1048	507	0,67
Şanzıman	4841	4511	330	0,93	1503	1409	94	0,94
Diferansiyel	4511	4511	0	1	1503	1053	0	1
Tekerlek/Aks	4511	4189	323	0,93	1834	1825	9	0,99
Frenleme	-	-	-	-	-	-	321	-
Elektriksel yükler	958	0	958	0	-	-	-	-
Hava	-	-	1056	-	-	-	-	-
Dönme	-	-	1299	-	-	-	-	-

Tablo 6.3 PHEA güç ve frenleme enerji kullanım tablosu(NEDC)

NEDC SÜRÜŞ CEVRİMİ								
Parametreler	Güç Modu				Rejeneratif Frenleme Modu			
	Giriş	Çıkış	Kayıp	Verim	Giriş	Çıkış	Kayıp	Verim
Yakıt	0	20075	-	-	-	-	-	-
Yakıt dönüştürücü	20075	4253	15822	0,21	-	-	0	-
Debriyaj	4253	4213	39	0,99	-	0	0	-
Tork kuplajı	4497	4497	0	1	889	889	0	1
Bataryalar	584	2024	27	0,97	-	-	-	-
Bataryalarda depolanan	-1457	-	-	-	-	-	-	-
Motor / kontrolör	1285	458	828	0,36	1063	684	379	0,64
Şanzıman	4497	4189	309	0,93	946	889	56	0,94
Diferansiyel	4189	4189	0	1	946	946	0	1
Tekerlek/Aks	4189	3900	288	0,93	1117	1121	-5	1
Frenleme	-	-	-	-	-	-	175	-
Elektriksel yükler	829	0	829	0	-	-	-	-
Hava	-	-	1600	-	-	-	-	-
Dönme	-	-	1184	-	-	-	-	-

Önerilen EYS, BYS ve DC/DC konvertörün performansları, Tablo 6.2 ve Tablo 6.3 incelendiğinde frenleme, ivmelenmeye ve dur/kalk durumlarına bağlı olarak UDDS sürüş çevrimi, NEDC sürüş çevrimine göre daha fazla enerji üretimi, rejeneratif geri kazanım ve kayıp enerji miktarı olduğu görülmektedir.

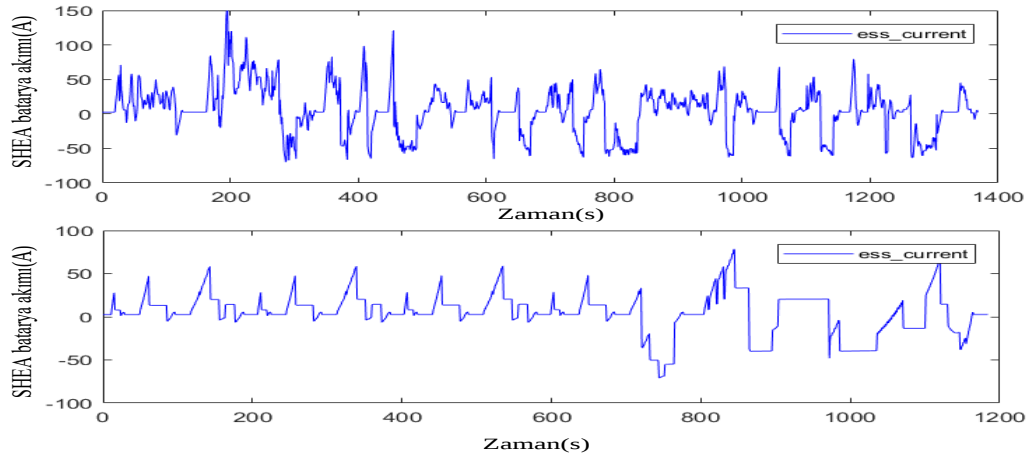
6.2 Seri Hibrit Elektrikli Araç Simülasyonu

Simülasyon çalışmasında standart ölçüleri belirlenmiş aracın paralel hibrit araç modelinin parametreleri Tablo 6.1 gösterilmiştir.

Tablo 6.4 Seri hibrit elektrikli araç modeli parametreleri

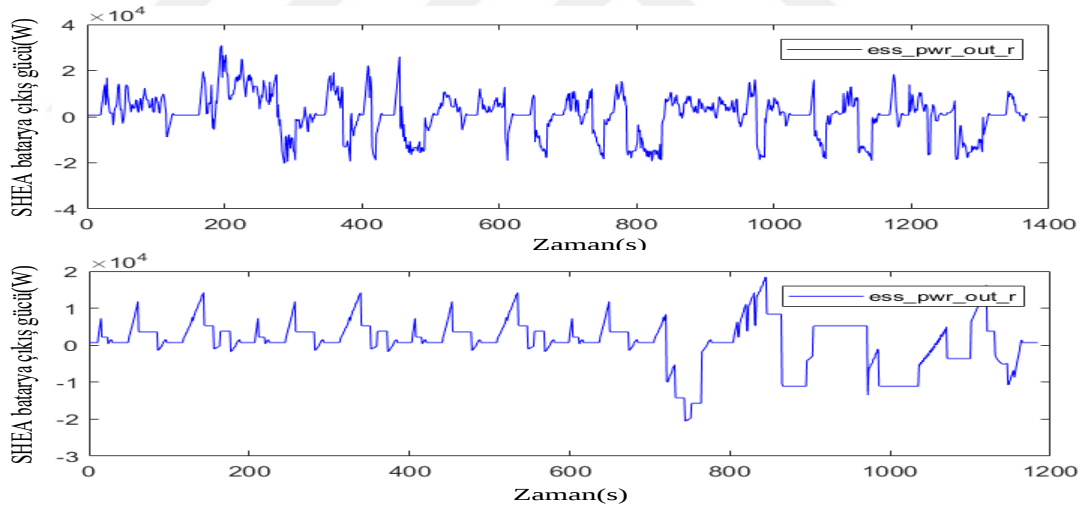
	Parametereler	Değer
ARAÇ (1994 model Saturn SL) (VEH_SMCAR)	Araç ağırlığı(kg)	592
	Tekerlek yarıçapı(m)	0.335
	Diferansiyel oranı	3.63
	Ön bölge(m ²)	2
	Ağırlık merkezi yüksekliği(m)	0.06
	Dingil açıklığı(m)	2.6
	Aerodinamik sürtünme katsayısı	0.59
Elektrik motoru (Westinghouse indüksiyon motoru) (MC_AC75)	Maksimum güç(kW)	75
	Maksimum tork(Nm)	200
	Maksimum verimlilik(%)	92
	Ağırlık(kg)	91
	Nominal dönüş hızı(rpm)	2970
Genset(GC_ETA95)	Maksimum akım(A)	480
	Minimum voltaj(V)	120
	Maksimum güç(kW)	75
	Maksimum tork(Nm)	200
	Maksimum verimlilik(%)	95
	Ağırlık(kg)	87
İçten yanmalı motor (41 kW Geo Metro 1.0 L SI) (FC_SI41_emis)	Maksimum güç(kW)	41
	Maksimum tork(Nm)	81
	Ağırlık(kg)	142
	Nominal hızı(rpm)	5700
Süperkapasitör(Maxwell PC2500)(ESS_UC2_Mxwell)	Maksimum güç(kW)	50
	Maksimum akım(A)	220
	Nominal voltaj(V)	160
	Ağırlık(kg)	20
Li-ion batarya (SAFT VL 6A) (ESS2_LI7_temp)	Maksimum güç(kW)	35
	Maksimum akım(A)	240
	Nominal voltaj(V)	200
	Ağırlık(kg)	40

Seri hibrit elektrikli araç modelinde lityum iyon akü ve süperkapasitör dizinleri ayrı ayrı ölçmek yerine enerji depolama sistemi baz alınmıştır. Simülasyon çalışmalarında grafik çıktıları sırasıyla UDDS ve NEDC çevrimi kullanılarak kıyaslanmıştır.



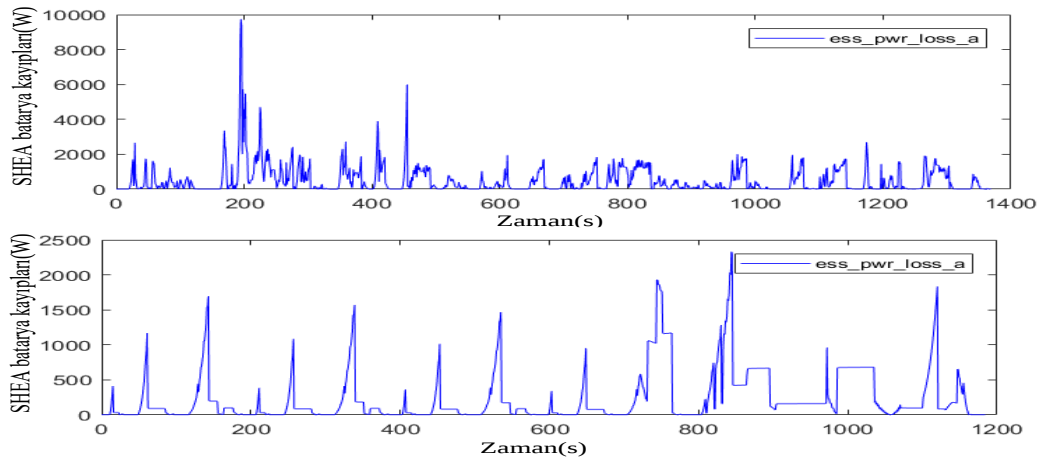
Şekil 6.10 Seri hibrit elektrikli araç batarya dizini akımı,

Önerilen BYS performansına göre, Şekil 6.10 incelendiğinde UDDS sürüş çevriminde batarya akımı 150A ile -67 A, NEDC sürüş çevriminde ise 87A ile -61A aralığında olduğu belirlenmiştir. Bataryadan çekilen akım ve şarj/deşarj sıklığı UDDS sürüş çevriminde daha fazla olduğu görülmektedir. Akım değerlerinin PHEA göre fazla olmasının ana sebebi transmisyon işleminin EM üzerinden sağlandığı görülmektedir.



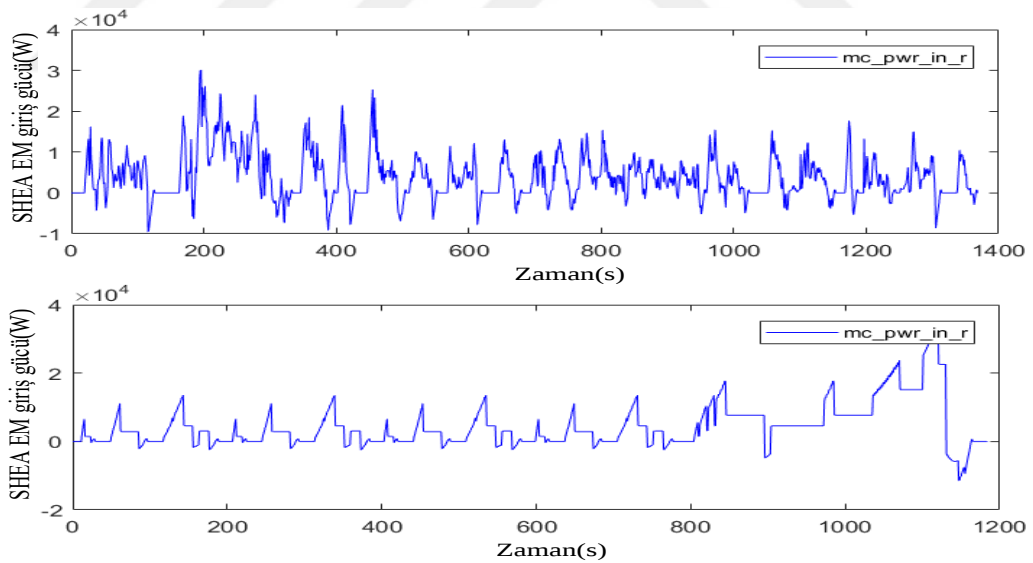
Şekil 6.11 Seri hibrit elektrikli araç batarya dizini çıkış gücü

Önerilen BYS performansına göre, Şekil 6.11 incelendiğinde batarya çıkış gücü UDDS çevriminde yaklaşık 38kW ile -20kW aralığında ve NEDC sürüş çevriminde yaklaşık 19kW ile -19kW aralığında olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla UDDS sürüş çevriminde daha çok ivmelenme ve dur/kalk olmasından dolayı çıkış gücü daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca SHEA araca transmisyon işlemi EM sağlandığından dolayı DC bara üzerinden sürekli rejeneratif frenlemeye ihtiyacı karışılmasına bakmaksızın bataryalar için şarj gerekli olduğunda DC bara üzerinden sağlanır.



Şekil 6.12 Seri hibrit elektrikli araç batarya dizini kayıpları

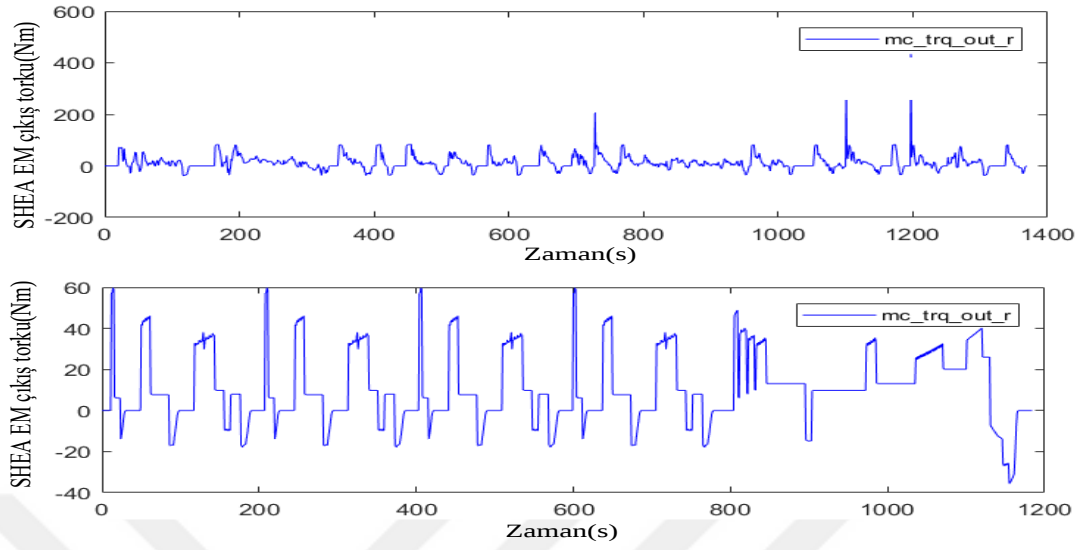
Önerilen BYS ve DC/DC konvertör performanslarına göre, Şekil 6.11 incelendiğinde ani ivmelenmelerde batarya kayıplarının yükselmesinin nedeni SOC değerinin ani düşmesi ve çekilen akım miktarının artmasına bağlı olarak sıcaklık değerlerinin artmasına bağlıdır. NEDC sürüş çevriminde ivmelenmenin süresinin fazla olduğu noktalarda kayıplarının süreklilik aralığı daha fazla olduğu görülmüştür. UDDS sürüş çevriminde batarya kayıplarının daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 6.13 Seri hibrit elektrikli araç elektrik motoru giriş gücü

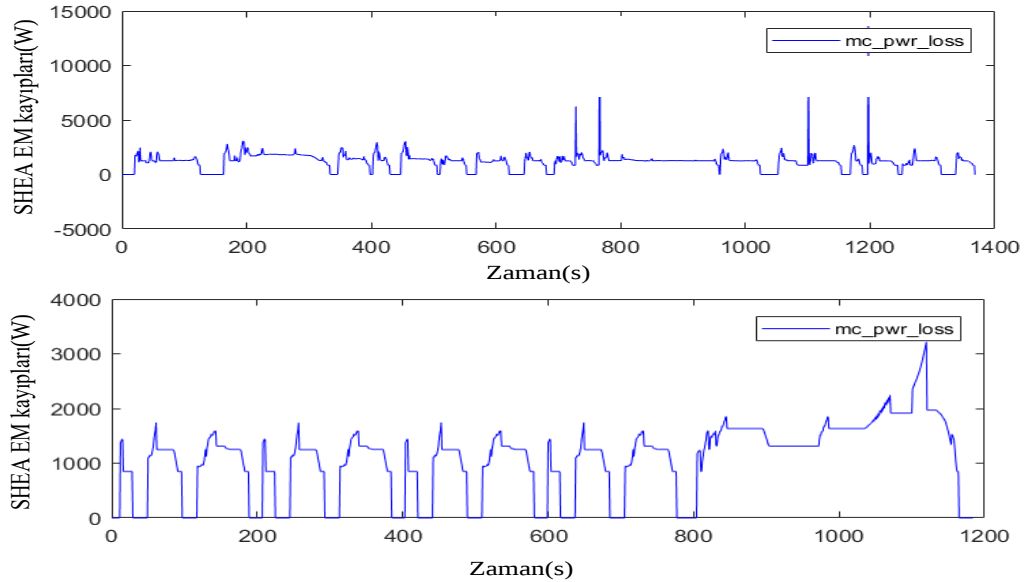
Önerilen BYS ve EYS performanslarına göre Şekil 6.13 incelendiğinde EM çıkış gücü, UDDS sürüş çevriminde 31kW ile -10kW aralığında ve NEDC sürüş çevriminde ise 27kW ile -15kW aralığında olduğu belirlenmiştir. Burada İYM motorun jeneratör seti ile birlikte DC bara üzerine gerekli enerjiyi sağladığı transmisyon işleminin büyük bir

kısmını EM üstlendiği görülmüştür. UDDS sürüş çevrimi hızlanma eğrilerine bağlı olarak daha fazla güç ihtiyacı olmuştur.



Şekil 6.14 Seri hibrit elektrikli araç elektrik motoru çıkış torku

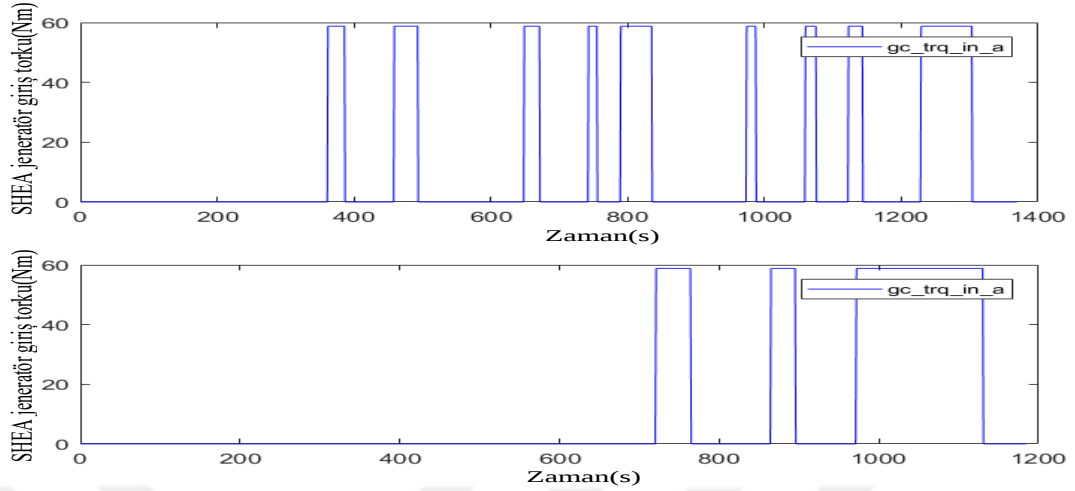
Önerilen BYS ve EYS performanslarına göre Şekil 6.14 incelendiğinde EM çıkış torku UDDS sürüş çevriminde çıkış torku ortalaması 91 Nm ve NEDC sürüş çevriminde ise 41 Nm olarak hesaplanmıştır. EM çıkış torkunda, aşırı hızlanma zamanlarında Genset ve bataryalardan yüksek tork elde edildiği görülmüştür.



Şekil 6.15 Seri hibrit elektrikli araç elektrik motoru kayıpları

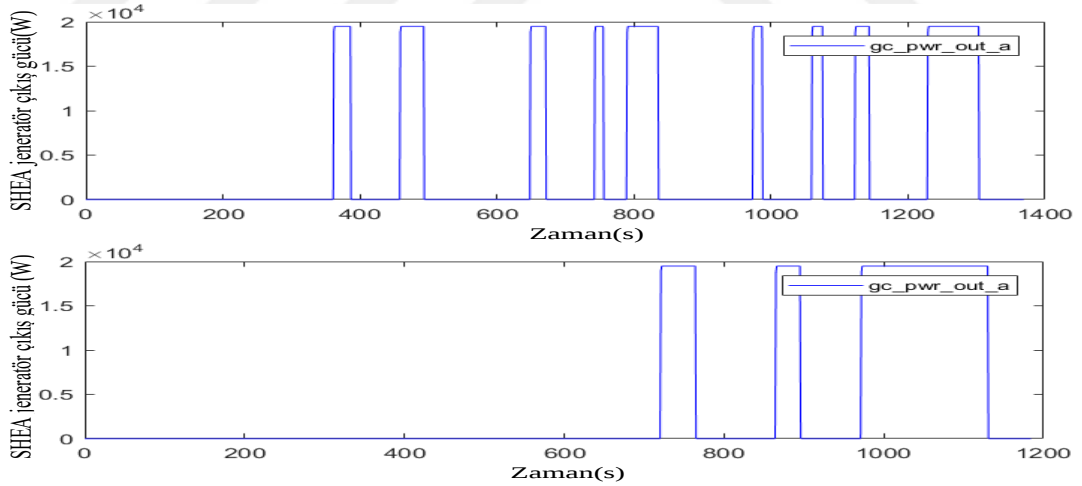
Önerilen BYS ve EYS performanslarına göre Şekil 6.15 incelendiğinde sürüş çevrimle paralel olarak EM kayıpları UDDS sürüş çevrimi ortalama 2300W, NEDC sürüş çevriminde ortalama 1710W olarak hesaplanmıştır. Kayıplarının ana kaynağı

hızlanmaya bağı olarak uzun süreli kullanım sonucu bakır ve demir kayıpları olarak saptanmıştır.



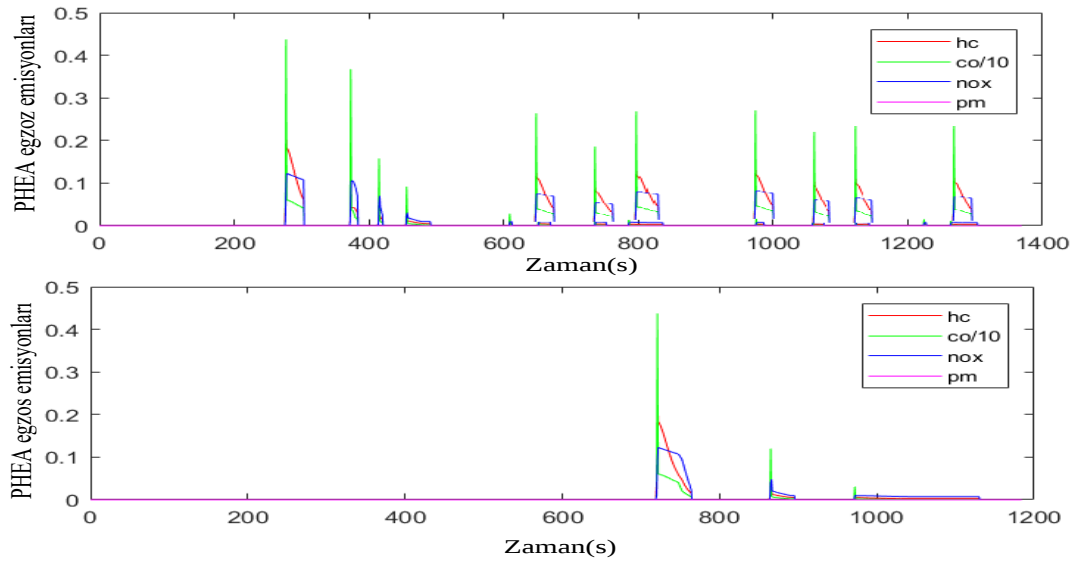
Şekil 6.16 Seri hibrit elektrikli araç jeneratör giriş torku

Önerilen EYS ve DC/DC performanslarına göre Şekil 6.16 incelendiğinde jeneratör giriş torku hızlanmaya bağı olarak, yükün tahrik milindeki ihtiyaç duyulan gücü karşıladığı görülmüştür. BYS deki bataryanın gücü ve SOC değerlerine bağı olarak ani ivmelenme bağı jeneratör devreye girdiği görülmüştür.



Şekil 6.17 Seri hibrit elektrikli araç jeneratör çıkış gücü

Önerilen BYS, EYS ve DC/DC konvertör performanslarına göre 6.17 incelendiğinde her iki çevrimde, EM ihtiyacı olan ani ivmelenme durumlarında jeneratör ivmelenme aralığı jeneratör maksimum gücü 20kW boyunca beslediği görülmüştür. Dolayısıyla bu aralıklarda bataryaların şarj edilmiştir.



Şekil 6.18 Seri hibrit elektrikli araç egzoz emisyon değerleri

Önerilen EYS performansına göre, Şekil 6.18 incelendiğinde egzoz emisyon değerleri; UDDS sürüş çevriminde HC 0.421 g/km, CO 2.269 g/km ve NOx 0.525 g/km, NEDC sürüş çevriminde HC 0.448 g/km, CO 1.341 g/km ve NOx 0.552 g/km olarak bulunmuştur. Sonuçlara dayanarak UDDS sürüş çevriminde ivmelenme ve dur/kalk sayısı NEDC sürüş çevrimine göre fazla olmasına rağmen, NEDC sürüş çevriminde EM daha aktif kullanıldığından dolayı egzoz emisyon değerleri düşük çıkmıştır.

Tablo 6.5 SHEA güç ve frenleme enerji kullanım tablosu(UDDS)

UDDS SÜRÜŞ CEVRİMİ								
Parametreler	Güç Modu				Rejeneratif Frenleme Modu			
	Giriş	Çıkış	Kayıp	Verim	Giriş	Çıkış	Kayıp	Verim
Yakıt	0	13277	-	-	-	-	-	-
Yakıt dönüştürücü	13277	4172	9105	0,31	-	-	0	-
Jeneratör	4172	3962	211	0,95	-	0	0	-
Bataryalar	3455	5868	510	0,89	-	-	-	-
Bataryalarda depolanan	-2923	-	-	-	-	-	-	-
Motor / kontrolör	5991	4684	1307	0,78	849	575	274	0,68
Şanzıman	4684	4315	369	0,92	939	849	90	0,9
Diferansiyel	4315	4315	0	1	939	939	0	1
Tekerlek/Aks	4315	4002	313	0,93	1720	1719	1	1
Frenleme	-	-	-	-	-	-	781	-
Elektriksel yükler	958	0	958	0	-	-	-	-
Hava	-	-	1056	-	-	-	-	-
Dönüş	-	-	1226	-	-	-	-	-

Tablo 6.6 SHEA güç ve frenleme enerji kullanım tablosu(NEDC)

NEDC SÜRÜŞ CEVRİMİ								
Parametreler	Güç Modu				Rejeneratif Frenleme Modu			
	Giriş	Çıkış	Kayıp	Verim	Giriş	Çıkış	Kayıp	Verim
Yakıt	0	17435	-	-	-	-	-	-
Yakıt dönüştürücü	17435	5597	11837	0,32	-	-	0	-
Jeneratör	5597	5317	280	0,95	-	0	0	-
Bataryalar	2609	3194	247	0,92	-	-	-	-
Bataryalarda depolanan	-832	-	-	-	-	-	-	-
Motor / kontrolör	5456	4405	1051	0,81	569	382	187	0,67
Şanzıman	4405	4038	367	0,92	627	569	58	0,91
Diferansiyel	4038	4038	0	1	627	627	0	1
Tekerlek/Aks	4038	3759	279	0,93	1042	1050	-8	1,01
Frenleme	-	-	-	-	-	-	423	-
Elektriksel yükler	829	0	829	0	-	-	-	-
Hava	-	-	1600	-	-	-	-	-
Dönüş	-	-	1118	-	-	-	-	-

Önerilen EYS, BYS ve DC/DC konvertörün performansları, Tablo 6.5 ve Tablo 6.6 incelendiğinde frenleme, ivmelenmeye ve dur/kalk durumlarına bağlı olarak NEDC sürüş çevrimi, UDDS sürüş çevrimine göre daha fazla enerji üretimi, rejeneratif geri kazanım ve kayıp enerji miktarı olduğu görülmektedir.

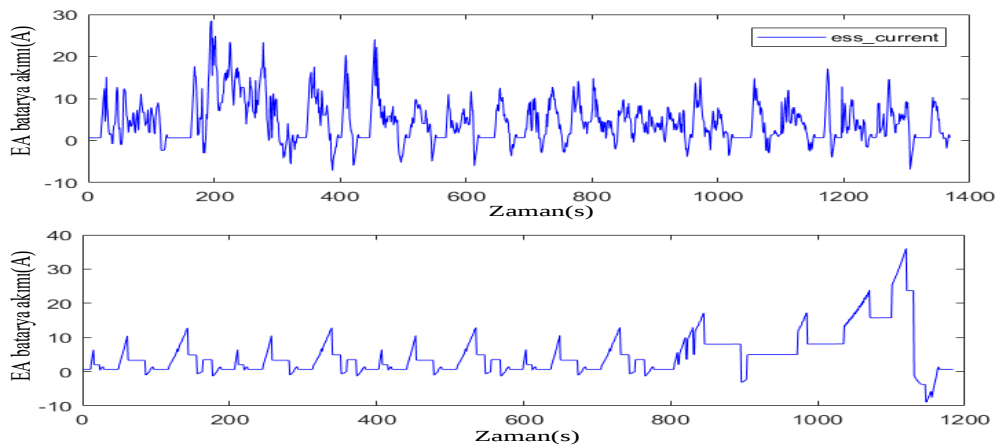
6.3 Tam Elektrikli Araç Simülasyonu

Simülasyon çalışmasında standart ölçüleri belirlenmiş aracın elektrikli araç modelinin parametreleri Tablo 6.7 gösterilmiştir.

Tablo 6.7 Tam elektrikli araç modeli parametreleri

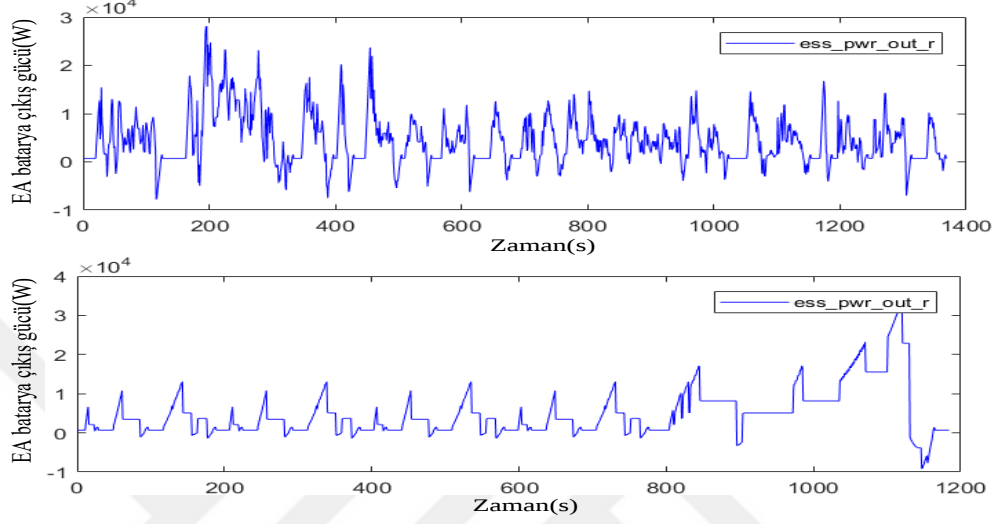
	Parametereler	Değer
ARAÇ (1994 model Saturn SL) (VEH_SMCAR)	Araç ağırlığı(kg)	592
	Tekerlek yarıçapı(m)	0.335
	Diferansiyel oranı	3.63
	Ön bölge(m ²)	2
	Ağırlık merkezi yüksekliği(m)	0.06
	Dingil açıklığı(m)	2.6
	Aerodinamik sürtünme katsayısı	0.59
Elektrik motoru (Westinghouse indüksiyon motoru) (MC_AC75)	Maksimum güç(kW)	75
	Maksimum tork(Nm)	200
	Maksimum verimlilik(%)	92
	Ağırlık(kg)	91
	Maksimum dönüş hızı(rpm)	2970
Süperkapasitör (Maxwell PC2500) (ESS_UC2_Mxwell)	Maksimum güç(kW)	120
	Maksimum akım(A)	290
	Nominal voltaj(V)	310
	Ağırlık(kg)	49
Li-ion batarya (SAFT VL 6A) (ESS2_LI7_temp)	Maksimum güç(kW)	90
	Maksimum akım(A)	260
	Nominal voltaj(V)	350
	Ağırlık(kg)	102

Paralel hibrit elektrikli araç modelinde lityum iyon akü ve süperkapasitör dizinleri ayrı ayrı ölçmek yerine enerji depolama sistemi baz alınmıştır. Simülasyon çalışmalarında grafik çıktıları sırasıyla UDDS ve NEDC çevrimi kullanılarak kıyaslanmıştır.



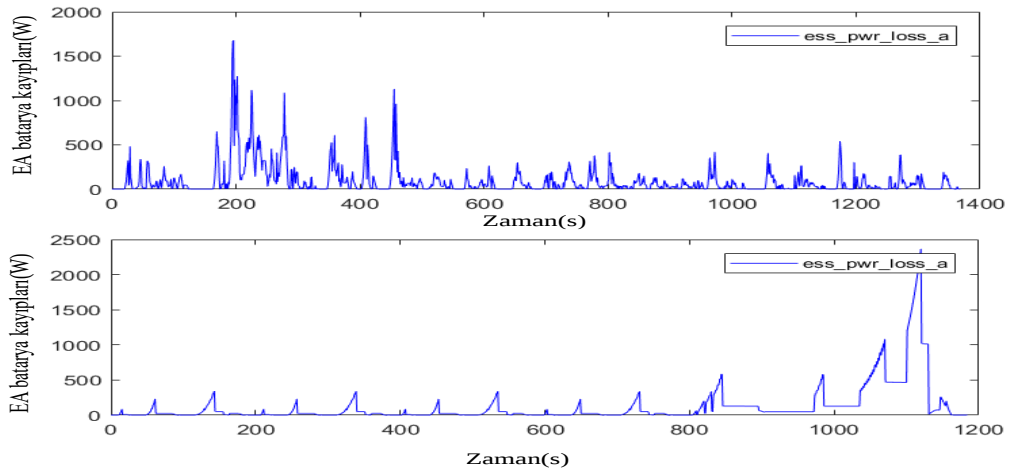
Şekil 6.19 Tam elektrikli araç batarya dizini akımı

Önerilen BYS performansına göre, Şekil 6.19 incelendiğinde bataryaların akımı UDDS sürüş çevrimindeki 30A ile -10A, NEDC sürüş çevriminde 40a ile -10 A aralığında olduğu görülmüştür. Grafikte sıfır altına düşme noktaları rejeneratif frenleme bölgelerini ifade etmektedir. Dolayısıyla batarya akımı ivmelenmedeki sürekliliğine göre değerinin arttığının bir sonucu olarak belirlenmiştir.



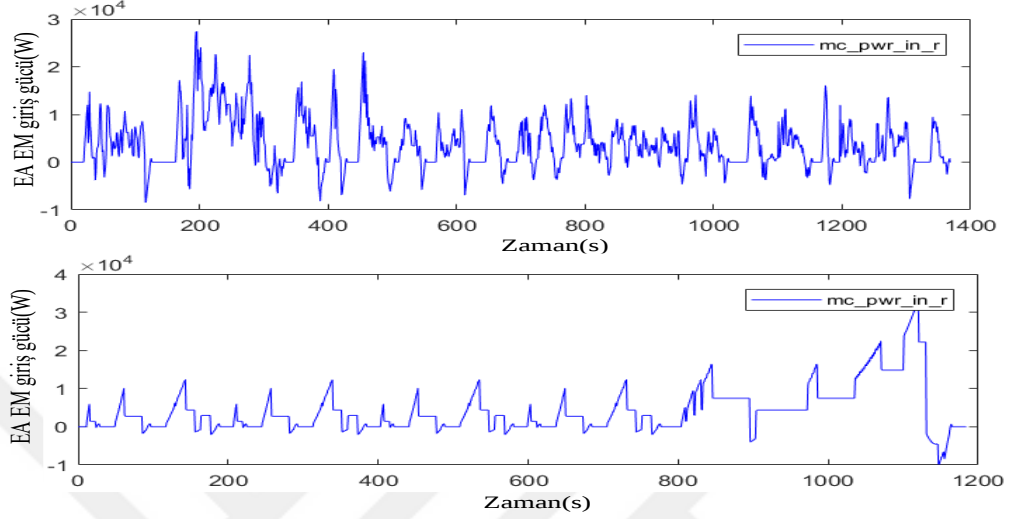
Şekil 6.20 Tam elektrikli araç batarya dizini çıkış gücü

Önerilen BYS performansına göre, Şekil 6.20 incelendiğinde çıkış gücü aralığı UDDS sürüş çevriminde 30kW ile -9kW, NEDC sürüş çevriminde ise 33kW ile -9kW aralığında olduğu belirlenmiştir. Talep edilen güç bataryalardan sağlandığı, frenleme ve yavaşlama esnasında rejeneratif geri kazanım sağladığı görülmektedir. Bataryalardan fazla akım çekildiği bölgeler ivmelenmenin sürekli olduğu bölgeler hakkında bilgi vermektedir.



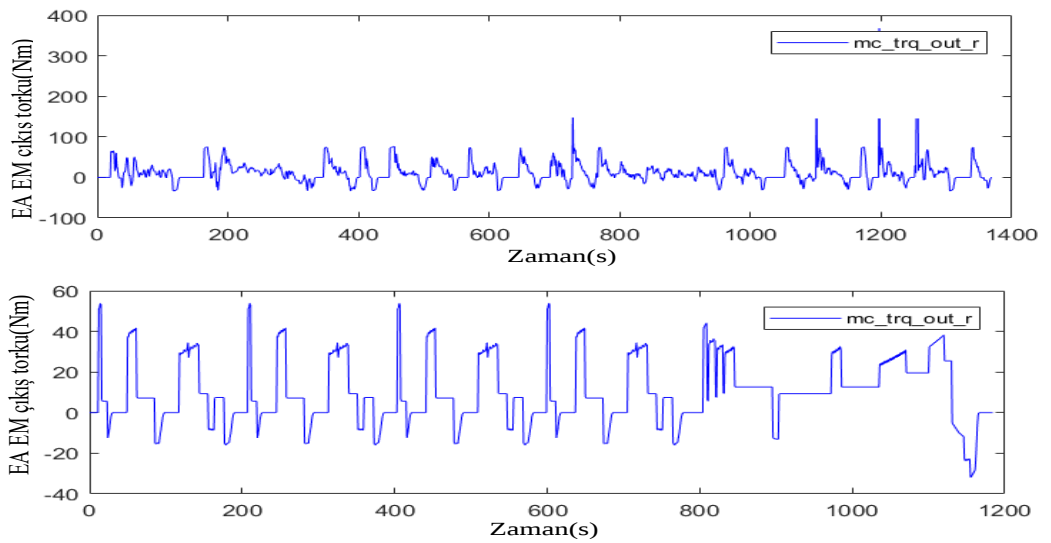
Şekil 6.21 Tam elektrikli araç batarya dizini kayıpları

Önerilen BYS ve DC/DC konvertör performanslarına göre Şekil 6.21 incelendiğinde bataryanın ortalama güç kayıpları UDDS sürüş çevriminde 236W, NEDC sürüş çevriminde 149W olarak hesaplanmıştır. Güç kayıplarının temel sebebi tahrik milindeki uzun süreli tork talebi olduğu belirlenmiştir.



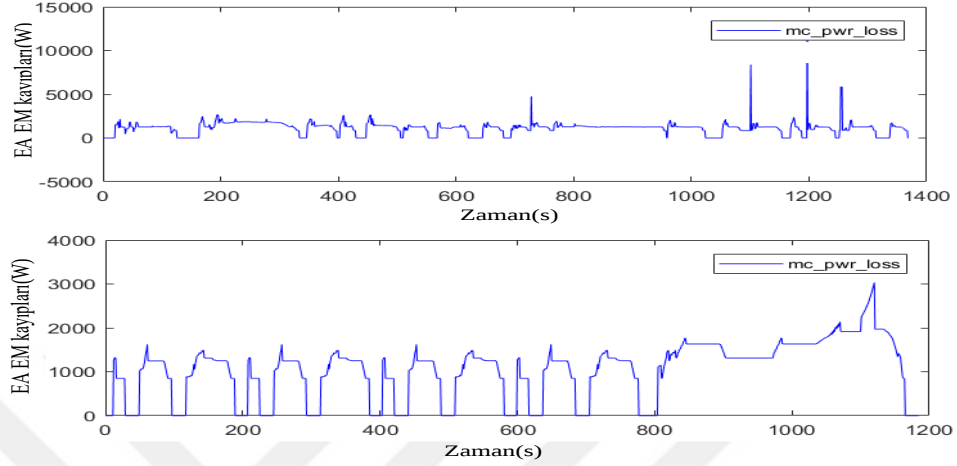
Şekil 6.22 Tam elektrikli araç elektrik motoru giriş gücü

Önerilen BYS ve EYS performanslarına göre Şekil 6.22 incelendiğinde EM giriş gücü UDDS sürüş çevriminde 30kW ile -9kW, NEDC sürüş çevriminde ise 31kW ile -9kW aralığında olduğu belirlenmiştir. NEDC sürüş çevriminde EM aşırı güç çekme sebebi hızlanma eğrilerine bağlı olduğu görülmüştür. Dolayısıyla ani ivmelenmeler yüksek enerji çekmesine sebep olmuştur.



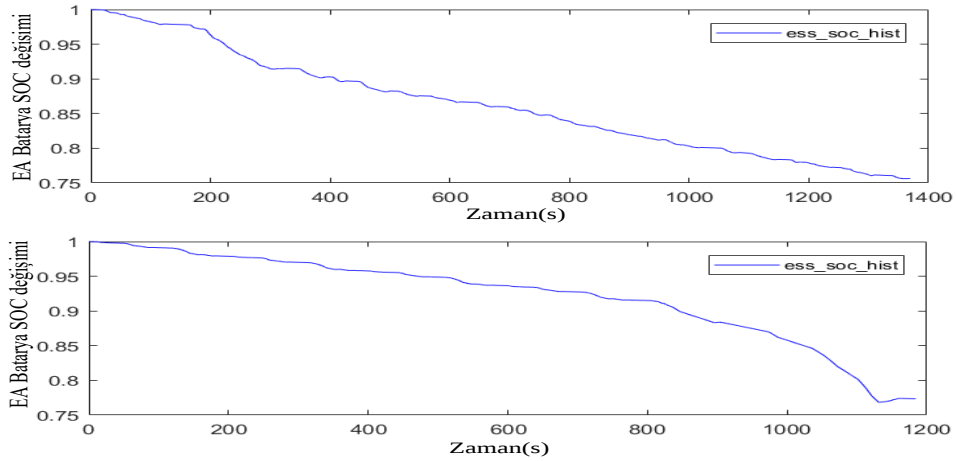
Şekil 6.23 Tam elektrikli araç elektrik motoru çıkış torku

Önerilen BYS ve EYS performanslarına göre Şekil 6.23 incelendiğinde çıkış torku UDDS çevriminde ortalama çıkış torku 51Nm, NEDC sürüş çevriminde ise 39Nm olarak hesaplanmıştır. UDDS sürüş çevriminde NEDC sürüş çevrimine göre ivmelenme sürekliliğine bağlı olarak daha fazla çıkış torku ihtiyacı olmuştur.



Şekil 6.24 Tam elektrikli araç elektrik motoru kayıpları

Önerilen EYS ve BYS performanslarına göre Şekil 6.24 incelendiğinde EM kayıpları UDDS sürüş çevriminde ortalama 2410W, NEDC sürüş çevriminde ise 1982W olarak hesaplanmıştır. EM kayıpları hızlanma eğrilerine bağlı olarak arttığı görülmektedir.



Şekil 6.25 Tam elektrikli araç bataryaları SOC değişimi

Önerilen BYS ve DC/DC konvertör performanslarına göre Şekil 6.25 incelendiğinde tahrik milinden istenen tork miktarına bağlı olarak bataryalarda SOC düşümleri gözlenmiştir. SOC değerlerinin ani düşüşler olmaması, rejeneratif geri kazanıma bağlı olduğu görülmüştür. SOC değerinin belli değerlerden sonra şarj edilmesi gerektiği görülmektedir. Dolayısıyla UDDS sürüş çevriminde SOC değerinin azalması NEDC

sürüş çevrimine göre daha hızlı olmuştur. Ayrıca ani SOC düşüşlerinin önlendiği görülmüştür.

Tablo 6.8 Tam elektrikli güç ve frenleme enerji kullanım tablosu(UDDS)

UDDS SÜRÜŞ CEVRİMİ								
Parametreler	Güç Modu				Rejeneratif Frenleme Modu			
	Giriş	Çıkış	Kayıp	Verim	Giriş	Çıkış	Kayıp	Verim
Bataryalar	6547	6422	125	0,96	-	-	-	-
Motor / kontrolör	5580	4289	1292	0,77	705	453	252	0,64
Şanzıman	4289	3924	365	0,91	788	705	82	0,9
Diferansiyel	3924	3924	0	1	788	788	0	1
Tekerlek/Aks	3924	3631	293	0,93	1495	1501	-7	1
Frenleme	-	-	-	-	-	-	714	-
Elektriksel yükler	958	0	958	0	-	-	-	-
Hava	-	-	1056	-	-	-	-	-
Dönüş	-	-	1080	-	-	-	-	-

Tablo 6.9 Tam elektrikli güç ve frenleme enerji kullanım tablosu(NEDC)

NEDC SÜRÜŞ CEVRİMİ								
Parametreler	Güç Modu				Rejeneratif Frenleme Modu			
	Giriş	Çıkış	Kayıp	Verim	Giriş	Çıkış	Kayıp	Verim
Bataryalar	6098	5857	141	0,96	-	-640	-	-
Motor / kontrolör	5118	4092	1026	0,8	483	299	184	0,62
Şanzıman	4092	3736	356	0,91	538	483	55	0,9
Diferansiyel	4038	4038	0	1	538	538	0	1
Tekerlek/Aks	3756	3477	259	0,93	893	905	-12	1,01
Frenleme	-	-	-	-	-	-	366	-
Elektriksel yükler	829	0	829	0	-	-	-	-
Hava	-	-	1600	-	-	-	-	-
Dönüş	-	-	984	-	-	-	-	-

EYS, BYS ve DC/DC konvertör incelendiğinde Tablo 6.8 ve Tablo 6.9 incelendiğinde UDDS sürüş çevrimi NEDC sürüş çevrimine göre toplam enerji, enerji depolama kayıpları, aktarma organları kayıpları daha fazla olduğu görülmüştür. Enerji kayıplarının asıl nedeni UDDS sürüş çevrimindeki ivmelenme ve dur/kalk parametrelerinin daha fazla olmasıdır.

7.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada lityum iyon akü, süperkapasitör, elektrik motoru ve İYM(Tam elektrikli hariç) içeren seri hibrit, paralel hibrit ve tam elektrikli araç sistemleri ele alınmıştır. Bu sistemler Matlab/SIMULINK tabanlı ADVISOR platformunda geliştirilen yeni bir modelleme ve benzetim mimarisi üzerine kurulmuştur. Bu mimari, hibrit ve elektrikli araçların modelleme ve simülasyon çalışmalarının yürütüldüğü devlet destekli araç projeleri, ARGE merkezleri, otomotiv kuruluşları, üniversiteler ve araştırma kurumları için oldukça kullanışlı yeni bir yaklaşım olarak sunulmuştur. Önerilen mimarinin en önemli özelliği, araç alt sistemlerinin mevcut platformlarda olduğu gibi birbirlerine kaskat bağlantılı olmasıdır. Önerilen mimarinin kaskat olmayan mimariye göre en önemli avantajlarından, birincisi birçok alt sistemin tek alt sistemle sağlanması, ikincisi ise lityum iyon akü ve süperkapasitör ayrı ayrı kullanımı yerine tek bir batarya dizini şeklinde optimize edilerek kullanıcıya daha anlaşılır ve kolay bir benzetim ortamı sunulmasıdır. Dolayısıyla farklı araç modellerinin daha rahat kurulmasını sağlar.

Bu çalışmada ayrıca paralel hibrit ve tam elektrikli araç sistemleri için, bataryalar dizini(süperkapasitör ve lityum iyon akü) ve genset (Tam elektrikli hariç) arasında optimum güç paylaşımını gerçekleştirecek kural tabanlı yeni bir enerji yönetim ve güç dağıtım sistemi (EYS) ile kural tabanlı batarya yönetim sistemi (BYS) stratejileri geliştirilmiş ve literatürde kullanılan mevcut yöntemlere alternatif bir yaklaşım olarak sunulmuştur. Önerilen YYS ve YYS stratejisinde güç paylaşımı iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir

İlk aşamada, talep gücü genset (Sadece seri hibrit) ve lityum iyon akü/süperkapasitör hibrit enerji kaynağı arasında paylaştırılmıştır. İlk aşamanın performansı farklı batarya şarj seviyesi aralıkları, UDDS sürüş çevrimleri ve NEDC sürüş çevrimleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Benzetim çalışmalarında, önerilen alternatif yöntemlere göre İYM ile EM daha verimli çalıştırıldığı ve daha kısa sürede karşılaştırılabilir optimum çözümlerin elde edildiği görülmüştür.

İkinci aşamada, enerji depolama sistemlerinde, hibrit enerji kaynağından talep edilen güç, lityum iyon akü ve süperkapasitör arasında paylaştırılmıştır. Bu paylaşım akülerin ani ve yüksek akımlarla şarj/deşarj olmasını önleyecek, akım baskılarını azaltacak

dolayısıyla lityum iyon akünün etkin ömrünü koruyacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bunun için bir şarj yönetim stratejisi önerilmiştir, UDDS sürüş çevrimleri ve NEDC sürüş çevrimleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapılan simülasyon çalışmaları ile önerilen şarj yönetim stratejisinin alternatif yöntemlere göre, ivmelenme veya yük kalkma durumlarına göre akülerden daha yumuşak ve düzgün bir akım çekilmesini sağladığı, akülerdeki ani akım sıçramalarını önlediği ve yüksek akım ile şarj/deşarj oranlarını azalttığı dolayısıyla akülerin etkin ömrünün korunması açısından daha üstün bir performans sergilediği gösterilmiştir.

Bu çalışmada son bölümünde, süperkapasitör ve lityum iyon akü ile DC bara arasında enerji transferi için kullanılan iki yönlü DC/DC konvertörün kontrol sistemlerine yeni bir yaklaşım olarak tasarlanmıştır. Bunun için öncelikle iki yönlü DC/DC konvertörün durum uzayı ortalama modeli çıkartılmıştır. Ardından bu devre modeli için boyut ve güç durumları tasarlanmıştır. Simülasyon çalışmaları sürüş çevrimleri için performansları incelenmiştir.

Çalışmadan elde edilen bulgular neticesinde önerilen performanslara bağlı olarak batarya çıkış gücü, EM giriş/çıkış gücü, tork kuplajı çıkış torku, jeneratör giriş torku/çıkış gücü, egzoz emisyonları, tüketilen enerji ve rejeneratif enerji değerleri NEDC sürüş çevrimi UDDS sürüş çevrimine göre yüksek verimliliğin yanında, daha az yakıt ve düşük emisyon miktarına sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Yapılan simülasyon çalışmalarıyla elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, aşağıdaki önerilerin yapılması uygun görülmüştür.

1. Bu çalışmada seri hibrit, paralel hibrit ve tam elektrikli araç modelleri geliştirilmiştir. İstenirse, önerilen modelleme ve benzetim mimarileri üzerine Şarj edilen (plug-in) veya konvansiyonel bir araç modeli de geliştirilebilir.
2. Önerilen batarya yönetim ve enerji yönetim sistemi kararlı hal (steady-state) modellemesi için incelenmiştir. İstenirse dinamik ya da yarı kararlı hal(quasi-steady) modellemesi platformlarında BYS ve EYS ile senkronize bir şekilde çalıştırabilir, süperkapasitör ve lityum iyon performansları incelenebilir.
3. Enerji kaynağı olarak, lityum iyon akü ve süperkapasitör sistemi ele alınmıştır. Bu tercihin sebebi lityum iyon akü ve süperkapasitör sistemlerinin enerji ve güç yoğunluğu açısından birbirlerini iyi tamamlamasıdır. Birlikte kullandıklarında üstün bir performans sergilemesidir. İstenirse, diğer akü

tipleri ya da alternatif enerji kaynakları kütüphanede tanımlanarak benzetim platformunda kullanılabilir. Enerji kaynakları arasında güç paylaşımı gerçekleştirilebilir.

4. Önerilen BYS ve EYS'nin performansı, hafif ticari olmayan araçla yapılmıştır ve literatürde kullanılan sürüş çevrimleri için değerlendirilmiştir. İstenirse, diğer ticari araç türleri için farklı sürüş çevrimleri ve yol koşulları için performans değerlendirmesi yapılabilir.



KAYNAKÇA

- [1] **Kerem , A.** (2014). Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi ve Gelecek Beklentiler Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(1), 1-13.
- [2] **Keskin, A.** (2009). Hibrid taşıt teknolojileri ve uygulamaları. *Engineer & the Machinery Magazine*, 50(597):12-20
- [3] **Chau, K. T., & Wong, Y. S.** (2002). Overview of power management in hybrid electric vehicles. *Energy conversion and management*, 43(15), 1953-1968.
- [4] **Ünlü, N., Karahan, Ş., Tür, O., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A., ... & Tırıs, M.** (2003). Elektrikli Araçlar. *Enerji Enstitüsü*.
- [5] **Fontaras, G., Pistikopoulos, P., & Samaras, Z.** (2008). Experimental evaluation of hybrid vehicle fuel economy and pollutant emissions over real-world simulation driving cycles. *Atmospheric environment*, 42(18), 4023-4035.
- [6] **Chan, C. C.** (2007). The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 704-718.
- [7] **Du Pasquier, A., Plitz, I., Menocal, S., & Amatucci, G.** (2003). A comparative study of Li-ion battery, supercapacitor and nonaqueous asymmetric hybrid devices for automotive applications. *Journal of Power Sources*, 115(1), 171-178.
- [8] **Onoda, S., & Emadi, A.** (2004). PSIM-based modeling of automotive power systems: conventional, electric, and hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 53(2), 390-400.
- [9] **Rousseau, A., Sharer, P., & Pasquier, M.** (2001). *Validation process of a HEV system analysis model: PSAT* (No. 2001-01-0953). SAE Technical Paper.
- [10] **Gokce, C., Ustun, O., Yilmaz, M., & Tuncay, R. N.** (2006). Modeling and Simulation of a Serial-Parallel Hybrid Electrical Vehicle. *Np: Istanbul Technical University*.
- [11] **Salmasi, F. R.** (2007). Control strategies for hybrid electric vehicles: Evolution, classification, comparison, and future trends. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 56(5), 2393-2404.
- [12] **Sciarretta, A., Back, M., & Guzzella, L.** (2004). Optimal control of parallel hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on control systems technology*, 12(3), 352-363.
- [13] **Kocagül, M.** (2009). Hibrid taşıtlarda seyir çevrimine göre yakıt tüketimi ve emisyonların optimizasyonu. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (Yüksek Lisans), 73s, İstanbul.
- [14] **Ni, L., Patterson, D. J., & Hudgins, J. L.** (2010, September). A high power, current sensorless, bi-directional, 16-phase interleaved, DC-DC converter for hybrid vehicle application. In *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE* (pp. 3611-3617). IEEE.
- [15] **Hossain, M. Z., & Rahim, N. A.** (2018). Recent progress and development on power DC-DC converter topology, control, design and applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 205-230.
- [16] **Radwan, A. G., Emira, A. A., AbdelAty, A. M., & Azar, A. T.** (2017). Modeling and analysis of fractional order DC-DC converter. *ISA transactions*.

- [17] **Gökce, K.** (2014). Seri hibrit elektrikli araçta enerji yönetim ve güç dağıtım sistemleri. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (Doktora Tezi),173s, Sakarya.
- [18] **Gautam, D. S., Musavi, F., Eberle, W., & Dunford, W. G.** (2013). A zero-voltage switching full-bridge DC--DC converter with capacitive output filter for plug-in hybrid electric vehicle battery charging. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(12), 5728-5735.
- [19] **Middlebrook, R. D., & Cuk, S.** (1976, June). A general unified approach to modelling switching-converter power stages. In *Power Electronics Specialists Conference, 1976 IEEE* (pp. 18-34). IEEE.
- [20] **Cao, J., & Emadi, A.** (2012). A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on power electronics*, 27(1), 122-132.
- [21] **Garcia, F. S., Ferreira, A. A., & Pomilio, J. A.** (2009, February). Control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system. In *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE* (pp. 826-832). IEEE.
- [22] **Amjad, S., Neelakrishnan, S., & Rudramoorthy, R.** (2010). Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 1104-1110.
- [23] **Ripaccioli, G., Bernardini, D., Di Cairano, S., Bemporad, A., & Kolmanovsky, I. V.** (2010, June). A stochastic model predictive control approach for series hybrid electric vehicle power management. In *American Control Conference (ACC), 2010* (pp. 5844-5849). IEEE.
- [24] **Zeng, X., & Wang, J.** (2015). A parallel hybrid electric vehicle energy management strategy using stochastic model predictive control with road grade preview. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 23(6), 2416-2423.
- [25] **Xiong, W., Zhang, Y., & Yin, C.** (2009). Optimal energy management for a series-parallel hybrid electric bus. *Energy conversion and management*, 50(7), 1730-1738.
- [26] **Millo, F., Rolando, L., Fuso, R., Bergshoeff, E., & Shafiabady, F.** (2014). Analysis of different energy management strategies for complex hybrid electric vehicles. *Computer-Aided Design and Applications*, 11(sup1), S1-S10.
- [27] **Zhang, X., & Mi, C.** (2011). *Vehicle power management: modeling, control and optimization*. Springer Science & Business Media.
- [28] **Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K.** (2018). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*. CRC press.
- [29] **Nzisabira, J., Louvigny, Y., & Duysinx, P.** (2008). Comparison of Ultra capacitors and Batteries Technologies to Optimize Hybrid Electric Vehicle Efficiency. In *Proceeding of 3rd European Symposium on Supercapacitors and Application (ESSCAP08)*.
- [30] **Cheng, Y. H., & Lai, C. M.** (2017). Control strategy optimization for parallel hybrid electric vehicles using a memetic algorithm. *Energies*, 10(3), 305.
- [31] **Mi, C., & Masrur, M. A.** (2017). *Hybrid electric vehicles: principles and applications with practical perspectives*. John Wiley & Sons.

- [32] **Divya, K. C., & Østergaard, J.** (2009). Battery energy storage technology for power systems—An overview. *Electric Power Systems Research*, 79(4), 511-520.
- [33] **Armenta, J., Núñez, C., Visairo, N., & Lázaro, I.** (2015). An advanced energy management system for controlling the ultracapacitor discharge and improving the electric vehicle range. *Journal of Power Sources*, 284, 452-458.
- [34] **Mesbahi, T., Khenfri, F., Rizoug, N., Bartholomeüs, P., & Le Moigne, P.** (2017). Combined optimal sizing and control of Li-ion battery/supercapacitor embedded power supply using hybrid particle Swarm–Nelder–Mead algorithm. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(1), 59-73.
- [35] **Andersson, B. T. J. P., & Johansson, P.** (2008). Comparison of Simulation Programs for Supercapacitor Modelling.
- [36] **Burke, A.** (2010). Ultracapacitor technologies and application in hybrid and electric vehicles. *International Journal of Energy Research*, 34(2), 133-151.
- [37] **Manwell, J. F., & McGowan, J. G.** (1993). Lead acid battery storage model for hybrid energy systems. *Solar Energy*, 50(5), 399-405.
- [38] **Shahriari, M., & Farrokhi, M.** (2013). Online state-of-health estimation of VRLA batteries using state of charge. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(1), 191-202.
- [39] **Fetcenko, M. A., Ovshinsky, S. R., Reichman, B., Young, K., Fierro, C., Koch, J., ... & Ouchi, T.** (2007). Recent advances in NiMH battery technology. *Journal of Power Sources*, 165(2), 544-551.
- [40] **Windarko, N. A., Choi, J., & Chung, G. B.** (2010, September). Improvement of electrical modeling of NiMH battery for application of Microgrid System. In *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE* (pp. 4243-4248). IEEE.
- [41] **Hochgraf, C. G., Ryan, M. J., & Wiegman, H. L.** (1996). *Engine control strategy for a series hybrid electric vehicle incorporating load-leveling and computer controlled energy management* (No. 960230). SAE Technical Paper.
- [42] **Baumann, B. M., Washington, G., Glenn, B. C., & Rizzoni, G.** (2000). Mechatronic design and control of hybrid electric vehicles. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 5(1), 58-72.
- [43] **Burke, A., Miller, M., & Zhao, H.** (2010). Lithium batteries and ultracapacitors alone and in combination in hybrid vehicles: Fuel economy and battery stress reduction advantages. *JSR*, 21(23), 15.
- [44] **Cao, J., Schofield, N., & Emadi, A.** (2008, September). Battery balancing methods: A comprehensive review. In *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC'08. IEEE* (pp. 1-6). IEEE.
- [45] **Daowd, M., Omar, N., Van Den Bossche, P., & Van Mierlo, J.** (2011). A review of passive and active battery balancing based on MATLAB/Simulink. *International Review of Electrical Engineering*, 6(7), 2974-2989.
- [46] **Ortúzar, M., Moreno, J., & Dixon, J.** (2007). Ultracapacitor-based auxiliary energy system for an electric vehicle: Implementation and evaluation. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 54(4), 2147-2156.
- [47] **Gao, L., Dougal, R. A., & Liu, S.** (2005). Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid. *IEEE transactions on power electronics*, 20(1), 236-243.

- [48] **Ostadi, A., Kazerani, M., & Chen, S. K.** (2013, June). Hybrid Energy Storage System (HESS) in vehicular applications: A review on interfacing battery and ultra-capacitor units. In *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2013 IEEE* (pp. 1-7). IEEE.
- [49] **Di Napoli, A., Crescimbeni, F., Capponi, F. G., & Solero, L.** (2002, May). Control strategy for multiple input DC-DC power converters devoted to hybrid vehicle propulsion systems. In *Proc. IEEE ISIE* (Vol. 3, pp. 1036-1041).
- [50] **Lukic, S. M., Wirasingha, S. G., Rodriguez, F., Cao, J., & Emadi, A.** (2006, September). Power management of an ultracapacitor/battery hybrid energy storage system in an HEV. In *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006. VPPC'06. IEEE* (pp. 1-6). IEEE.
- [51] **Shakouri, P., Ordys, A., Askari, M., & Laila, D. S.** (2010). Longitudinal vehicle dynamics using Simulink/Matlab.
- [52] **Rajamani, R.** (2011). *Vehicle dynamics and control*. Springer Science & Business Media.
- [53] **Wipke, K. B., Cuddy, M. R., & Burch, S. D.** (1999). ADVISOR 2.1: A user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach. *IEEE transactions on vehicular technology*, 48(6), 1751-1761.
- [54] **Liu, W.** (2017). *Hybrid electric vehicle system modeling and control*. John Wiley & Sons.
- [55] **Holder, C., & Gover, J.** (2006, September). Optimizing the hybridization factor for a parallel hybrid electric small car. In *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006. VPPC'06. IEEE* (pp. 1-5). IEEE.
- [56] **SAE J2711.**, Recommended practice for measuring fuel economy and emissions of hybrid-electric and conventional heavy-duty vehicles. 2018.

ÖZGEÇMİŞ

Van iline bağlı Erciř ilçesinde d nyaya geldi. İlk, orta ve lise  ğretimini Erciř'te tamamladı. 2010'da başladığı Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Elektrik-Elektronik M hendislięi programını 2014 yılında tamamladı. Cumhuriyet Üniversitesi Enerji Bilimi ve Teknoloji Mühendisliği programında tezli yüksek lisansa 2014'te başladı. 2014-2017 yılları arasında TEİAŐ'ta İşletme Mühendisi çalıştı. 2017'den beri Bozok  niversitesinde  ğretim Görevlisi olarak çalışmalarını sürdürmektedir.

