



**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN BATARYA VE
ULTRAKAPASİTÖRDEN OLUŞAN HİBRİT ENERJİ
DEPOLAMA SİSTEMİNİN YÖNETİMİ**

Zülfü KUZU

Yüksek Lisans Tezi

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet İlyas BAYINDIR
TEMmuz-2017**

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Yrd.Doç.Dr. Mehmet İlyas BAYINDIR’a manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan emeklerini hiçbir zaman ödeyemeyeceğim kıymetli aileme teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, tez çalışmam sırasında beni yalnız bırakmayan emeği geçen tüm arkadaşlarıma da teşekkür ederim

Zülfü KUZU
ELAZIĞ-2017

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ.....	IX
KISALTMALAR	X
SEMBOLLER	XI
ÖZET	XII
SUMMARY	XIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı.....	3
1.2. Tezin Organizasyonu	4
2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR	5
2.1. Saf Elektrikli Araçlar	5
2.1.1. Mekanik Aktarımlı (Diferansiyelli) Sistem.....	7
2.1.2. Teker İçi Motorlu (Diferansiyelsiz) Sistem.....	7
2.1.3. Zincir Dişli veya Kayış Kasknaklı Sistem	8
2.2. Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar	8
2.3 Hibrit Elektrikli Araç Sistemleri	9
2.3.1. Seri Hibrit Araç Sistemi	10
2.3.2. Paralel Hibrit Araç Sistemi	11
2.4. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Elektrik Motorları.....	13
2.5. Yaygın Elektrikli Araç Modellerinin Değerlendirilmesi	16
3. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ ...	19
3.1. Bataryalara ait Temel ve Yönetimsel Tanımlar	19
3.2. Nikel Metal Hidrit Bataryalar	21

3.3.	Zebra Bataryalar	22
3.4.	Lityum İyon Bataryalar	23
3.5.	Lityum Tabanlı Batarya Teknolojilerindeki Gelişmeler	26
3.6.	Ultrakapasitörler	27
4.	ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ.....	30
4.1.	Koruma.....	30
4.2.	Durum ve Parametre Tahmini.....	31
4.3.	Dengeleme ve Yeniden Dağıtma	35
4.3.1.	Pasif Dengeleme Tekniği	36
4.3.2.	Aktif Dengeleme Tekniği.....	38
5.	HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ	41
5.1.	Pasif Paralel Bağlantı	43
5.2.	Şönt Bağlantı veya Bir DA/DA Dönüştürücü Aracılığıyla Paralel Bağlantı	44
5.2.1.	Batarya/UK Düzenlemesi	45
5.2.2.	UK/Batarya Düzenlemesi	46
5.3.	Çoklu Paralel Dönüştürücü Düzenlemesi	46
5.4.	Seri Paralel Yeniden Düzenlenebilir Yapı	47
6.	DÖNÜŞTÜRÜCÜLER.....	48
6.1.	Cuk Dönüştürücü	49
6.2.	SEPIC ve Luo Dönüştürücü	49
6.3.	Yarım Köprü Dönüştürücü	51
6.4.	Çift Yönlü Kaskat DA/DA Dönüştürücü	52
7.	BENZETİM ÇALIŞMALARI.....	56
7.1.	Araç Dinamiği	56
7.1.1.	Havanın Sürtünme (Aerodinamik) Kuvveti	57
7.1.2.	İvmelenme Kuvveti	59
7.1.3.	Yokuş Kuvveti.....	59
7.1.4.	Yuvarlanma Sürtünme Kuvveti	59

7.2.	Mekanik Kuplaj	60
7.3.	Elektrik Motoru Seçimi	63
7.4.	Batarya Parametreleri ve Ağırlığı	64
7.5.	Test Parkuru	65
7.6.	DA/DA Kaskat Dönüştürücü ve Enerji Yönetimi	66
7.7.	Saf Batarya ile Sürülen EA Simülasyonu	69
7.8.	Batarya ve Ultrakapasitörden Oluşan HEDS ile Beslenen EA Simülasyonu	80
7.8.1.	Batarya Gerilimine Bağlı HEDS yönetimi.....	86
7.8.2.	Akım Bölüştürmeye Dayalı HEDS Yönetimi.....	89
8.	SONUÇ	103
KAYNAKLAR		105

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No:

Şekil 2.1 Saf elektrikli araç.....	6
Şekil 2.2 Yakıt pilli elektrikli araç modeli	9
Şekil 2.3 Tipik seri hibrit araç.....	11
Şekil 2.4 Tipik paralel hibrit araç	12
Şekil 2.5 Elektrikli araç motoru ile içten yanmalı motorun Moment-hız karakteristیکlerinin karşılaştırılması.....	15
Şekil 3.1 Öne çıkan hücre teknolojileri	24
Şekil 4.1 Batarya ve UK eşdeğer seri devresi (a) batarya (b) Ultrakapasitör	34
Şekil 4.2 Dengeleme topolojileri (a)dağıtıcı,(b)hat boyu,(c)çevrimli, (d) endüktif,(e) kapasitif, (f) bireysel, (g) ortak.....	36
Şekil 4.3 Pasif dengeleme sırasında batarya gerilimleri	37
Şekil 4.4 Pasif dengeleme basit devre şeması	38
Şekil 4.5 Zaman anahtarlama kondansatör tekniğı	38
Şekil 5.1 Başlıca HEDS topolojileri	43
Şekil 6.1 Cuk çift yönlü dönüştürücü devresi	50
Şekil 6.2 SEPIC/Luo dönüştürücü devresi	51
Şekil 6.3 Yarım-köprü Çift Yönlü Dönüştürücü Topolojisi	52
Şekil 6.4 Kaskat bağlı çift yönlü yükseltici ve düşürücü tip DA-DA dönüştürücü.....	53
Şekil 6.5 Çift yönlü kaskat DA-DA dönüştürücü	54
Şekil 6.6 Kaskad topolojinin geri yönde çalışma durumu	54
Şekil 7.1 Elektrikli araç sisteminin başlıca bileşenleri	56
Şekil 7.2 Bir aracın maruz kaldığı kuvvetler	57
Şekil 7.3 Araç mekaniğinin matematiksel modeli	61
Şekil 7.4 MATLAB/ Simulink ortamında kullanılan mekanik kuplaj parametreleri	62

Şekil 7.5 MATLAB/ Simulink DA motor parametreleri	63
Şekil 7.6 MATLAB/ Simulink ortamında kullanılan batarya parametreleri	65
Şekil 7.7 Elektrikli araç test parkuru	66
Şekil 7.8 Kaskat dönüştürücü ileri yön düşürücü modu S1 (a)iletimde,(b)kesimde	68
Şekil 7.9 Kaskat dönüştürücü geri yön yükseltici modu S4 (a)iletimde,(b)kesimde	68
Şekil 7.10 MATLAB/SimuLink Programında Oluşturulan Kaskat dönüştürücü	69
Şekil 7.11 Bataryadan beslenen ve kaskat dönüştürücü aracılığı ile sürülen elektrikli araç sistemi	70
Şekil 7.12 Elektrikli aracın hız ve akım PI kontrolörleri	70
Şekil 7.13 Saf bataryadan beslenen elektrikli aracın enerji yönetiminin ve sürüş kontrolünün akış diyagramı	72
Şekil 7.14 Dönüştürücün sürüş/fren mod seçim histerisiz kontrolü	73
Şekil 7.15 Elektrikli aracın hızının referans hızı takip performansı	74
Şekil 7.16 Eğimsiz yol şartlarında bir parkurun araç hızının takip performansı	75
Şekil 7.17 Kaskat dönüştürücü anahtar modları;0-22 ve 26-24-28 sn ileri yön düşürücü; 22-24 ve 28-40 sn aralığında geri yön yükseltici	76
Şekil 7.18 Hız hatasının değişimine göre kaskat dönüştürücü anahatar modları	77
Şekil 7.19 Eğimsiz kısmın yüksek hız kesiminde(0-45 sn)motor değişkenleri	77
Şekil 7.20 Faydalı frenleme oluşan motor ve batarya akımlarının değişimi	78
Şekil 7.21 Kaskat dönüştürücü sürüş modu doluluk oranı gösterimi	78
Şekil 7.22 Motor akımı, batarya akımı, doluluk oranının değişimi	79
Şekil 7.23 Çoklu paralel bağlantılı Batarya/UK hibrit enerji sisteminden beslenen elektrikli araç sisteminin blok diyagramı	80
Şekil 7.24 Sürüş modu akım bölüştürme oranı	81
Şekil 7.25 Fren modu akım bölüştürme oranı	82
Şekil 7.26 Batarya ve UK'dan beslene elektrikli aracın enerji yönetimi ve sürüş kontrolü akış şeması	85

Şekil 7.27 Ultrakapasitör önündeki kaskat dönüştürücünün histerisiz çalışma şeması.....	87
Şekil 7.28 Elektrikli Aracın gerilim ve akım PI kontrolörleri	88
Şekil 7.29 Test parkurunun birinci kısmında hız profilini takip performansı	89
Şekil 7.30 Batarya gerilimi ve buna göre oluşan kaskat-2 anahtar modları, (8-14 sn sürüş modu, 20-24 ve 28-40 sn fren modu çalışma)	90
Şekil 7.31 Motor, batarya ve UK akım grafikleri	91
Şekil 7.32 Bataryanın SOC değişimi	92
Şekil 7.33 Oransal akım bölüştürme	92
Şekil 7.34 Batarya ve UK için akım referansı oluşturma.....	93
Şekil 7.35 Akım referansının oransal olarak bölüştürüldüğü çalışmada hız profilni takip performansı	94
Şekil 7.36 Batarya gerilimi ve buna göre oluşan kaskat-2 anahtar modları	95
Şekil 7.37 Motor, batarya ve UK akım grafikleri	96
Şekil 7.38 3° eğimli test parkurunun yüksek hızlı kesiminde(100-145 sn aralığında) hız referansı takibi, motor, batarya ve ultrakapasitör akımları	97
Şekil 7.39 3° eğimli test parkurunun yüksek hızlı kesiminde(100-120 sn aralığında) motor akımının grafiği	98
Şekil 7.40 Test parkurunda Saf batrya, gerilime bağlı ve akım bölüştürmeli stratejilere göre batarya SOC değerleri	98
Şekil 7.41 Test parkurunda Saf batrya, gerilime bağlı ve akım bölüştürmeli stratejilere göre batarya gerilimlerinin karşılaştırılması	99
Şekil 7.41 Test parkurunda Saf batrya, gerilime bağlı ve akım bölüştürmeli stratejilere göre batarya akımlarının karşılaştırılması	100
Şekil 7.43 Test parkurunda Saf batrya, gerilime bağlı ve akım bölüştürmeli stratejiden oluşan HEDS aracın aldığı yol	101
Şekil 7.44 UK SOC değişimi.....	102
Şekil 7.45 UK akım değişimi	102

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No:

Tablo-2.1. Sürekli mıknatıslı senkron motor kullanılan saf elektrikli ve hibrit araçlara ait değerler.....	17
Tablo-2.2. Hibrit araçlarda kullanılan IPM motorların güç yoğunluğu ve özgül güç değerleri	18
Tablo-3.1. Mevcut batarya ve UK hücrelerinin özellikleri.....	25
Tablo-3.2. Lityum-iyon batarya ve UK hücrelerinin özellikleri	25
Tablo 6.1. Kaskad Dönüştürücünün Çalışma Moduna Göre Anahtar durumları.....	55
Tablo 7.1. Çeşitli tiplerdeki araçların aerodinamik direnç katsayıları	58
Tablo-7.2. Elektrikli araç modelinde kullanılan değişkenler ve değerleri	60
Tablo-7.3. Benzetim çalışmalarında kullanılan batarya parametreleri	65
Tablo-7.4. Saf bataryadan beslenen elektrikli aracın kontrolörlerinin PI değerleri	71
Tablo-7.5. Ultrakapasitör parametreleri.....	83
Tablo-7.6. Akım bölüştürmesiz kontrolörün PI değerleri	86
Tablo-7.7 Akım bölüştürmeli kontrolün PI değerleri	93
Tablo-7.8. Üç farklı benzetim yaklaşımı için batarya ve UK akım stresleri	101

KISALTMALAR

AA	:Alternatif Akım
Ah	:Amper-saat (batarya kapasitesi)
ARM	:Anahtarlama Relüktans Motor
CAN	:Kontrolör Alan Ağı (Controller Area Network)
DA	:Doğru Akım
DGM	:Darbe Genişlik Modülasyonu
DOE	:ABD Enerji Bakanlığı
DSP	:Dijital Sinyal İşlemcisi
EA	:Elektrikli Araç
EDS	:Enerji Depolama Sistemi
EDLC	:Elektiriksel Çift Katman Kapasitörler
EEDS	:Elektiriksel Enerji Depolama Sistemi
EMI	:Elektromanyetik girişim
ESR	:Eşdeğer Seri Direnç
EYS	:Enerji Yönetim Sistemi
FHEA	:Fişe Takılan Hibrit Elektrikli Araç
HEA	:Hibrit Elektrikli Araç
HEDS	:Hibrit Enerji Depolama Sistemi
İYM	:İçten Yanmalı Motor
IPM	:Rotoru İçten Mıknatıslı Senkron Motoru
IAE	:Uluslar Arası Enerji Ajansı
NEV	:Yeni Nesil Elektrikli Araç
OCV	:Açık devre gerilimi
RLS	:En Küçük Kareler Filtreleri
RUL	:Kalan Faydalı Ömür (Remaining Useful Life)
SEI	:Solid-Electrolyte Interface
SMSM	:Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
SOC	:Yüzde Şarj Durumu
SOH	:Yüzde Sağlık Durumu
SOH_E	:Enerjiye göre Yüzde Sağlık Durumu
SOH_P	:Güce göre Yüzde Sağlık
SOF	:Yüzde İşgörebilirlik Durumu
SPM	:Rotoru Yüzeyde Mıknatıslı Senkron Motor
UK	:Ultrakapasitör
YHA	:Yakıt Hücreli Araçlar
XEA	: Herhangi Tür Elektrikli Araç

SEMBOLLER

CO	:Karbon monoksit
NiMH	:Nikel Metal Hidrür
LiFePO	:Lityum Demir Fosfat
Li₂O₂	:Lityum Hava
Li-S	:Lityum Sülfür



ÖZET

Dünyadaki petrol rezervlerinin azalması, egzoz gazı salınımının artması ve bunun sonucu olarak küresel ısınmaya sebep olması alternatif enerji kaynağı çalışmalarının yoğunlaşmasına sebep olmuştur. Bu yüzden son yıllarda elektrikli araç çalışmalarına yoğunluk verilmiştir. Elektrikli araç çalışmalarında ana güç kaynağı olarak bataryalar kullanılmasına karşın bataryaların güç yoğunluklarının düşük olup anlık yüksek akımı sağlayamazlar. Aşırı şarj ve derin deşarjların oluşması bataryalara zarar vermekte ve bataryaların ömrünü kısaltmaktadır. Bataryaların bu eksik yönlerini tamamlayıcı güç kaynağı olarak ultrakapasitörler (UK) üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır. UK ve batarya bileşiminden oluşan hibrit enerji kaynağının bu olumsuzlukları yok edeceği gösterilmiştir. Araçların frenleme durumlarında veya aşağı eğimli yolda hızı azaltılırken büyük bir kinetik enerjinin geri kazanım fırsatı doğmaktadır. Bu tezde söz konusu enerjinin geri kazanılıp iki yönlü dönüştürücüler vasıtasıyla bataryanın ve UK'nın şarj edilmesi amaçlanmaktadır.

Bu amaçla bu tez çalışmasında elektrikli araçların mekanik yapıları, güç aktarma organları ve matematiksel modelleri incelenmiştir. Batarya ve UK'lardan oluşan hibrit depolama sistemleri, bu sistemlerde koruma ve enerji yönetimi yöntemleri araştırılmıştır. Batarya ve UK arasında enerji akışı, yönetimi ve kontrolünü sağlayabilmek amacıyla dönüştürücüler üzerine çalışmalar incelenmiştir.

Bu çalışmada araçlara etki eden kuvvetler hesaplanmış ve 'MATLAB/Simulink' ortamında aracın matematiksel modelinin benzetimi yapılmıştır. Literatürdeki dönüştürücü çalışmaları incelenmiş ve iki yönlü kaskat dönüştürücüler kullanılmıştır. Bu benzetim çalışmasında ana güç kaynağı olarak batarya seçilmiştir. UK devreye alınarak batarya geriliminin fazla dalgalanmaması ve akımının bölüşülmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araç, hibrit enerji depolama sistemi, batarya, ultrakapasitör, kaskat DA/DA dönüştürücü

SUMMARY

Energy Management of Electric Vehicle Supplied from Battery /Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System

Researches about alternative energy resources have been increased due to declining petrol reserves, increasing emission of exhaust gases as global warming alerting. For this aim, studies on electric vehicles are strongly motivated in recent years. The main energy source of the electric vehicles are batteries but they don't have high specific power so they cannot give high currents that often needed. Batteries can be damaged and their life are shortened in case of deep discharge and excessive charge. Ultracapacitors are attracts interest of researchers to improve drawbacks of the batteries as an energy storage device. It is proved that hybrid energy storage systems consist of battery and ultracapacitor can improve these drawbacks.

In this study, regeneration of this energy and storing it in the battery and/or ultracapacitor via bidirectional converters are investigated. Firstly, electric vehicles are examined. Mechanic constructions of them, their power transmission devices and mathematical model of them are studied. Protection and management systems for hybrid energy storage systems consist of battery and ultracapacitor are studied. Power converters are investigated to manage energy flow between storage devices and to control vehicle via electric motor.

Forces acting on a vehicle dynamics are mathematically examined and simulated in 'MATLAB/Simulink' package program. Studies in literature about bidirectional power converters are investigated for energy management of hybrid energy storage systems. By controlling cascade converter coupling ultracapacitor with battery, the current of the motor is participated by ultracapacitor and voltage of battery is not allowed to excessive fluctuations. Peak battery currents are reduced for efficient use of battery.

Keywords: Electric vehicle, hybrid energy storage systems, battery, ultracapacitor, cascade DA/DA converter

1.GİRİŞ

Gelişmiş ülkelerin enerji kullanımı ve sera gazı salınımı öngörülerinde araç sahipliği ve kullanımı kaynaklı olarak, son yıllarda artırıma gidilmiştir. Uluslararası Enerji Ajansı (IAE), 2007-2030 arasında küresel taşımacılık enerji talebinde ortalama yıllık %1.6 artış öngörmüştür [1]. Herhangi bir politika değişikliği olmadığı takdirde, 2050 yılı itibariyle küresel ortalama sıcaklığı 6°C derece artıracak şekilde, yakıt tüketiminde %70, karbondioksit (CO₂) salınımında %130 artış olacağını IAE tahmin etmektedir. Küresel CO₂ salınımını 2050 yıl itibariyle 2008'deki seviyesine düşürmek için ABD de 17 trilyon dolar yatırımın 2050 ye kadar yapılması gerektiği öngörülmüştür. Bunun anlamı, yıllık ortalama 400 milyar dolar temiz enerji yatırımının 2050'ye kadar yapılması demektir [2]. Bu yüzden otomobillerde gereken enerjinin petrol dışı ürünlerden temini gittikçe artırılmaktadır. Otomotiv üreticileri daha yeşil araç tahrik sistemleri üretmeye yoğunlaşmaktadırlar. Böylece sosyal ve ekonomik bir talep olan temiz taşımacılığa ulaşmak hedeflenmektedir.

Bu öngörü ve yönelimlere göre, enerji verimliliği teknolojilerinin araştırılması, geliştirilmesi ve ticarileştirilmesi yönünde sadece özel sektörden değil kamu sektöründen de değerli yatırımlar yapılması gerekir. Bu teknolojilerin uygulanmasını hızlandıracak diğer etkenler ise yeni ve daha sıkı yönetmelikleri yürürlüğe koymak, hükümet politikaları ve kamusal seçeneklerde bir değişime gitmektir. Taşımacılık sektörü, yakıt talebi ve CO₂ salınımının artışında önemli bir paya sahiptir. IEA, 2050 yılı itibariyle CO₂ salınımlarını 2008'deki seviyesine indirmek için taşımacılık sanayisinde büyük değişim olması gerektiğini iddia etmektedir. Bu değişim kapsamında, düşük yoğunluklu taşıt piyasasına alternatif enerjili taşıtların hâkim olması ve 2050 yılı itibariyle yakıt ekonomisinde %50 iyileşme vardır [2].

Çin'de, hükümet ve enerji şirketleri arasında bir uzlaşma sonucu yeni enerjili taşıt (NEV=New Energy Vehicle) tanımı yapılmıştır. NEV kavramı ile alternatif yakıt teknolojileri ve elektrik teknolojileri kullanan araç tanımlanmaktadır. Bu teknolojilerin teşvik edilmesi sayesinde, otomotiv kaynaklı gaz salınımının düşürülmesi, ithal

enerjinin daha fazla artmaması, otomotiv sanayisinde NEV için kota ayrılarak daha kontrollü büyüme sağlanması vb. politikalar amaçlanmaktadır. Böylece, pazar potansiyeli kapmak için Ar-Ge çalışmalarında yoğun rekabet başlamıştır. NEV için üç yatay ve üç dikey seviyede teknik yol haritası ortaya çıkmıştır. Dikey seviyelerde hibrit elektrikli araç (HEA), elektrikli araç (EA) ve yakıt hücresel araç (YHA) bulunmaktadır. Yatay seviyeler ise motor, kontrol sistemi ve güç yönetim sistemidir. Bu üçünün birleşmesiyle çoklu enerjiye dayalı sürüş sistemi elde edilmektedir. Bu çerçevede elektrikli enerji depolama teknolojisi (EEDS) önde gelen araştırma konusudur [1].

Alternatif yakıtlı taşıtlar için, HEA, fişe takılan hibrit elektrikli araç (FHEA) ve EA türlerini kapsayan bir kısaltma da herhangi bir elektrikli araç (XEA) tanımıdır. XEA tarafından kullanılan elektrikli çekiş sistemi, içten yanmalı motorlara göre çok büyük enerji verimliliği sunar. Daha verimli olmasına ilaveten elektrikli çekiş sayesinde fren enerjisi, mekanik frende atık halinde kaybolmak yerine geri kazanılabilmektedir. Elektrikli çekiş sisteminin başlıca bileşenleri motor/generatör, enerji depolama sistemi olarak batarya/UK paketi ve elektrik makinasıyla enerji depolama sistemi arasında enerjinin transfer ve dönüşümünü sağlayan güç elektroniği sürücüsüdür [3-4]. Batarya teknolojisinin mevcut durumu, XEA'nin seri üretimle pazara girmesinin ana engellerinden birisidir. Bu yüzden batarya teknolojileri günümüzde geniş şekilde araştırılmakta ve sanayinin bakışı da hızla değişmektedir.

Yeşil taşımacılık alanında önümüzdeki birkaç yıl için, batarya teknolojileri üzerine araştırma en önemli boyut olarak görülmektedir. XEA için en önemli enerji depolama teknolojisi, bataryalarla sağlanmaktadır. Başlıca batarya çeşitleri kurşun-asit, Ni-Cd, Ni-Zn, Ni-MH, Lityum-iyon olarak sayılabilir. Yüksek enerjili batarya ile yüksek güçlü UK'nın hibrit kullanımı sayesinde sadece bataryadan beslenen sistemlerin zaaflarının çözülebileceği gösterilmiştir [5].

Lityum iyon bataryalar, XEA uygulamalarında gittikçe popüler hale gelmektedir. Örneğin uzun süreden beri araçların tercihi olan kurşun-asit bataryanın yerini almaktadır. Böylece kurşun plakalar ve asit elektrolit yerine daha hafif olan Lityum/karbon anot olarak Lityum/demir fosfat katot olarak tercih edilmektedir. Lityum-iyon bataryalar kurşun-asitlerle aynı gerilimi ürettiği için modifikasyon da

gerekmemektedir.

ABD’de Lityum iyon bataryalar, Nissan Leaf ve Tesla Roadstar gibi saf elektrikli araçları; gaz ve elektrikle çalışan hibrit Chevrolet Volt aracını beslemektedir. Ford, HONDA ve Mutsibushi de lityum iyon kullanmaktadır. Toyota firması Prius modelinde 2012'ye kadar Nikel metal hidrit bataryayı uygun görmekteyken bu firma da Lityum iyon bataryaya dönmüştür.

Yeni nesil XEA araçları için birincil güç seçeneği bataryasıdır. Bu doğrultuda, hükümetler ve taşıt üreticileri nezdinde, dolum istasyonları planlamalara girmiştir. Ayrıca kablosuz dolumu, batarya değişimini ve birkaç dakikalık hızlı dolumu sağlayan süper dolum istasyonlarının da şehirlerde yeterli sayıda kurulması gerekmektedir [6].

1.1.Tezin Amacı

Bu tezde, elektrikli araçlar için batarya ve UK’dan oluşan hibrit enerji depolama sisteminin yönetimi araştırılmıştır. Elektrikli araçların yapısı, enerji depolama sistemleri ve dönüştürücüler incelenmiştir. Hibrit elektrikli araç yapıları incelenmiştir. Enerji verimliliği ve yönetimi için dönüştürücüler araştırılmıştır. Bir elektrikli araç sisteminin tüm bileşenlerinin modellenmesi amacıyla araç dinamiği ve mekanik kuplaj araştırılarak modellenmiştir. Tüm sistemin benzetimi yapılırken MATLAB/Simulink yazılım paketinin bazı hazır modüllerinden faydalanılmıştır. Tezin odak noktası dönüştürücü aracılığıyla gerçekleştirilen sürüş kontrolü ve enerji yönetimidir. Öncelikle saf bataryadan oluşan elektrikli aracın tam modeli oluşturularak MATLAB/Simulink’te belirli bir test parkuru için benzetimi sunulmaktadır. Sonra, batarya ve UK’dan oluşan hibrit enerji depolama sisteminden beslenen elektrikli aracın benzetimi enerji yönetim stratejileri ile birlikte anlatılmaktadır. Daha sonra bu benzetimler karşılaştırılarak ultrapakasitörün bataryaya nasıl destek olduğu ve bataryanın ömrünü ve tüm sistemin verimliliğini nasıl artırdığı gösterilmiştir.

1.2.Tezin Organizasyonu

Bu tez çalışmasının 2. Bölümünde elektrikli araç türleri ve mekanik yapıları incelenmektedir. Satın alınabilir saf elektrikli ve hibrit elektrikli araçların ve motorlarının özellikleri incelenmektedir. 3. Bölümde enerji depolama birimi olarak batarya ve UK hücre teknolojileri araştırılmaktadır. Enerji depolama sistemlerinin çeşitleri güncel literatürdeki çalışmalar ve pratik çözüm seçenekleri sunulmaktadır. 4. Bölümde enerji yönetim sistemleri incelenerek, hücre koruma, dengeleme konuları literatür taramasıyla incelenmektedir. 5. Bölümde hibrit enerji depolama sistemlerinin yapıları literatür taramasıyla birlikte sunulmaktadır. 6. Bölümde enerji depolama birimlerini hibritlemek için kullanılan DA/DA dönüştürücüler ve çalışma modları incelenmektedir. 7.Bölümde ise MATLAB/Simulink'te saf elektrikli araç, batarya ve UK'dan oluşan hibrit enerji depolama sisteminden beslenen elektrikli araç benzetimleri sunulmaktadır. İki çeşit enerji yönetim yaklaşımının kullanıldığı hibrit enerji depolama sisteminden beslenen elektrikli araç benzetimlerinin sonuçları saf elektrikli araç ile karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmektedir.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Bir elektrikli araç sisteminin mekanik yapısı dışındaki temel bileşenleri, elektrik makinası, enerji depolama birimi, güç dönüştürücüsü ve kontrol sisteminden oluşur. Çekiş gücünü elektrik makinası ve sürücülerini sağlarken; enerji depolama birimini de batarya, UK'lar veya yakıt hücresi oluşturur. Bu bileşenlere odaklanarak elektrikli araçların maliyeti düşürme ve sürüş menzilini artırma amaçlı araştırma çalışmaları yoğun şekilde devam etmekte olup, dünyamızın geleceği için çevresel ve ekonomik birçok önemli beklentileri doğurmuştur.

Elektrikli araçların olumsuz çevresel etkilerinin tamamıyla yok edilmesi ve petrole bağımlılığın kaldırılmak istenilmesinden dolayı, gelecekteki araçların tamamının elektrikli sistemden meydana geleceği öngörülmektedir. Ancak bataryalı araçların, yüksek maliyetleri ve sürüş menzillerinin pek yeterli görülmemesi nedeniyle, tam anlamıyla seri üretime geçilememektedir. Dolu istasyonlarını yaygınlaştırmak, düşük maliyetli ve uzun menzilli modeller üretmek için birçok kamu ve özel sektör araştırmacıları yoğun bir şekilde çalışmaktadır. Bu çalışmalar, verimli ve güvenli enerji yönetimi üzerinde devam ederken frenleme anında ortaya çıkan enerjinin geri kazanımı üzerine yoğunlaşmaktadır.

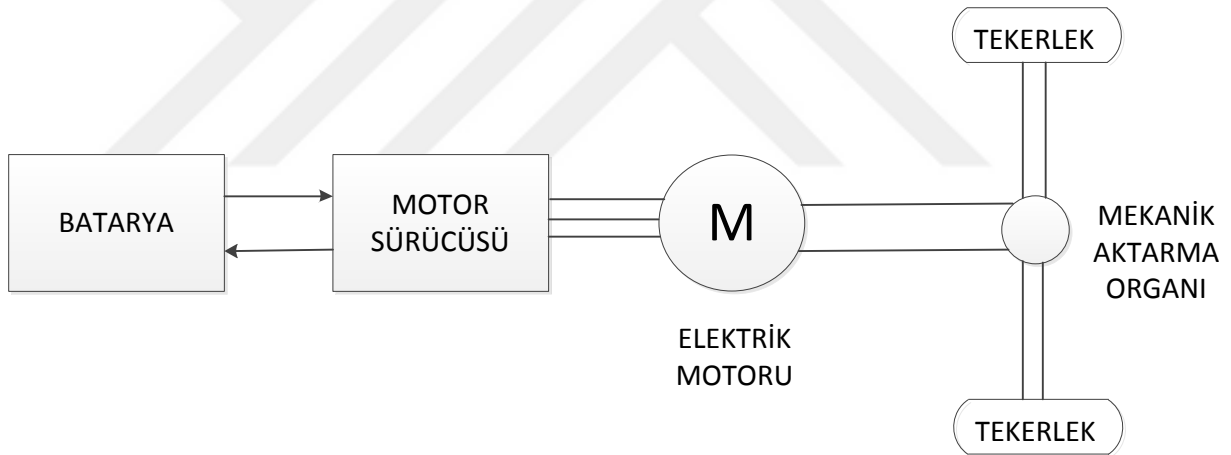
Elektrikli araçların mekanik ve elektriksel bileşenlerinin farklı bileşimlerine dayalı çeşitleri vardır. Enerjinin depolanması ve açığa çıkma şekli, mekanik enerjinin tekerlere aktarılma yöntemi gibi seçeneklere göre çeşitler tanımlanmıştır. Elektrikli araç teknolojilerinin genel bir sınıflandırması, sırasıyla bataryalı elektrikli araç (saf elektrikli), birden fazla tahrik gücüne sahip hibrit elektrikli araçlar ve bataryalı ya da bataryasız yakıt pilli araçlar olarak yapılabilir [7,8].

2.1. Saf Elektrikli Araçlar

Enerjisini alma yöntemine göre saf elektrikli araçlar iki gruba ayrılabilir:

- Enerji hattından beslenerek çalışanlar (tren, trolleybüs, tramvay, yeraltı treni gibi),
- Enerji depolama sistemi kullanarak çalışanlar (batarya, UK gibi),

Saf elektrikli araçlarda tekerler, elektrik motoru tarafından hareket ettirilmekte, elektrik motorunun dönmesi için gerekli olan elektrik enerjisi de bataryalardan elde edilmektedir. Elektrik motorunun hareketi ya doğrudan teker içinde ya da aktarma organı ile tekerlere iletilmektedir. Ana depolama birimi olan bataryaya yardımcı güç kaynağı olarak ivmelenme ve yokuş çıkma gibi ani güç gerektiren durumlarda kullanmak için UK kullanılabilir [9]. Şekil 2.1’de saf elektrikli bir aracın blok şeması verilmiştir. Sistem, batarya grubu, motor sürücüsü, elektrik motoru ve tekerlerden meydana gelmektedir.



Şekil 2.1. Saf elektrikli araç temel yapısı

Saf elektrikli araçlarda sadece elektrik motoru kullanıldığı için gayet sessiz çalışırlar. Elektrik motoru, regeneratif frenleme ile geri kazanılan enerjiyi bataryada depolamak için generatör olarak da kullanılmaktadır. Böylece, enerji depolama birimi olan batarya, hem şebekenin enerjisiyle hem de regeneratif frenleme ile şarj edilebilmektedir. Bu araçların yakıt ve bakım maliyetleri klasik araçlara göre çok daha düşüktür [10,11].

Tahrik sistemlerine göre saf elektrikli araçlar, mekanik aktarımlı ve teker içi motorlu sistemler olarak sınıflandırılabilir.

2.1.1. Mekanik Aktarımlı (Diferansiyelli) Sistem

Bu sistem içten yanmalı motorlarda kullanılan klasik yapıya sahiptir. İçten yanmalı motor ve yakıt deposunun yerini, elektrik motoru ve bataryalar almıştır. Ancak elektrik motoru, hız kontrol sistemi ile kontrol edildiğinden vites kutusuna (şanzıman) gerek kalmamaktadır. Sabit dönüştürme oranlı dişli kullanılabilir. Motorun mekanik enerjisini, çekiş yapan tekerleklerle iletmek amacı ile mekanik bir diferansiyel kullanılmaktadır [12,13]. Bu yapıda, mekanik gücü oluşturan motorun mil hızının ve momentinin tekerlere, tek bir dişli dönüştürme oranıyla aktarımı söz konusu olabilir.

2.1.2. Teker İçi Motorlu (Diferansiyelsiz) Sistem

Bu sistemde çekiş yapan tekerlekler öndeki veya arkadaki çift veya dördü birden bağımsız birer motor ile doğrudan tahrik edilmektedir. Elektrik motorları için uygun kontrol kuralları belirlenerek aracın farklı yol şartlarında optimum çekiş sağlar. Mekanik aktarma organlarının kullanılmamış olması verimi ve güvenilirliği artırırken bakım ihtiyacını da azaltmaktadır.

Saf elektrikli ve seri-hibrit sistemlerde araç tahriki için tekerlek içi motorların kullanımı son yıllarda ilgi çekmektedir. Bu yapıda, iki veya dört adet tekerlek-motoru kullanılarak aracın hareketi için gereken mekanik güç sağlanmaktadır. Bu durumda her motor için ayrı sürücü devre kullanılması gerekir. Tekerlek-içi motor kullanılan bu araç yapısında mekanik güç aktarım organına gerek duyulmamakta, böylece güç aktarım organlarında oluşan mekanik kayıplardan tasarruf edilmektedir. Ayrıca yüksek güçlü ve büyük hacimli tahrik motoru ortadan kalktığı için araç gövdesinde kullanılabilir hacim artmaktadır [11,12]. Ancak tekerlek ataleti arttığı için süspansiyon sistemi teker kaymalarının diferansiyel yerine elektronik olarak dengelenmesi sebebiyle de kontrol sistemi zorlaşmaktadır.

2.1.3. Zincir Dişli veya Kayış Kasnaklı Sistem

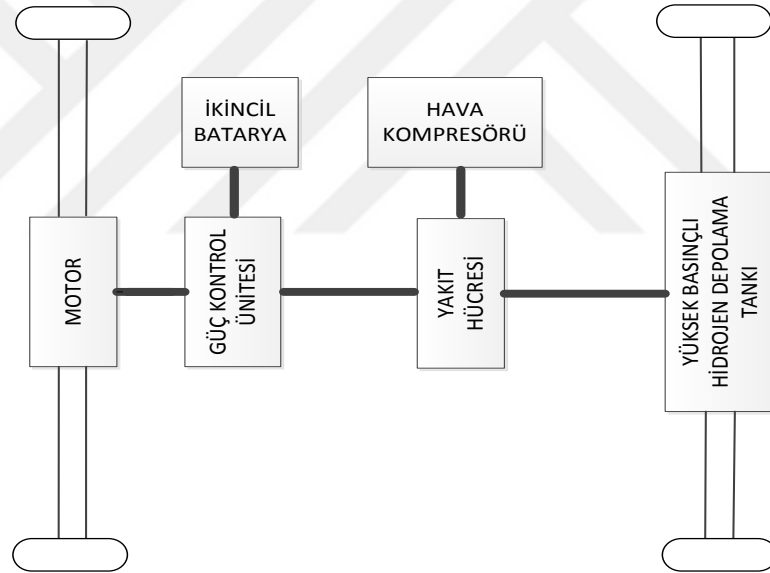
Genellikle golf arabası gibi küçük araçlarda yaygın olarak kullanılan bu sistemde, diferansiyel yerine iki teker arasında bir dişli veya kasnak bulunur ve elektrik motorunun ürettiği hareket, tekerleklere zincir dişli veya kasnak ile iletilir [12].

2.2. Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar

Yakıt hücresi, yakıtın kimyasal enerjisinden elektrik enerjisi üreten bir cihazdır. Yakıt hücreli elektrikli araçların yapısı saf elektrikli araçlara benzerken, farklı tarafı ana enerji kaynağı olarak batarya yerine yakıt hücresinin kullanılmasıdır.

Yakıt hücresi ile çalışan araçların menzili, yakıt hücresinde depolanan enerji miktarı ile doğru orantılıdır [8]. Yakıt hücresiyle çalışan elektrikli araçlar; sessiz çalışmaları, verimlerinin yüksek olması ve emisyon değerlerinin düşük olması gibi önemli avantajlara sahip olsa da, seri üretime geçme esnasında bazı teknik ve ekonomik problemler ile karşılaşmaktadırlar. Teknik sorunların en önemlisi, hidrojen depolama problemi ve yakıt sistemleridir. Yakıt hücreli elektrikli araçlar, yakıt depolama sistemi, yakıt hücresi, güç koşullandırma ünitesi ve kontrol sistemi ile tahrik sisteminden meydana gelmektedirler. Şekil-2.2'de yakıt depolama sisteminde depo edilen hidrojen, doğrudan veya fosil kökenli yakıtların işlenmesi süreci ile elde edilir. Bir yakıt hücresinin gerilimi 0,7 V civarındadır ve bu gerilim yakıt hücrelerinin seri olarak birbirine bağlanmaları ile artırılabilir [13]. Son yıllarda, ülkeler arasında yakıt hücrelerinin elektrikli araçlara uygulanması konusunda bir rekabet başlamıştır. Yakıt hücreli elektrikli araçların ticarileştirilmesi ile içten yanmalı motorların (İYM) yol açtığı çevre kirliliği büyük oranda azalacak ve aynı zamanda ekonominin gelişmesi sağlanacaktır. Son zamanlarda üretilen yakıt hücreli elektrikli araçlara; General Motors tarafından geliştirilen Precept, Ford tarafından geliştirilen Ford Focus FCV ve P2000, Nissan tarafından geliştirilen Xterra FCV örnek olarak verilebilir. Toyota'nın Mirai modeli ve Honda'nın FCX Clarity modeli, seri üretim yakıt hücreli elektrikli araç modelleri olarak dikkate sunulabilir.

Yakıt hücreli araçlarda, elektrikli araçta olduğu gibi ilk anda araca ivme kazandırmak için bir elektrik enerjisi depolama sistemine de ihtiyaç duyulur. Çünkü araç ilk çalıştığı zaman aracın yeterli ivmeye ulaşması için gerekli enerjiyi yakıt hücresinin sağlaması mümkün olmaz. Bunun yanında yeniden şarj edilebilir olmadığı için de yakıt hücresi tarafından üretilen fazla enerjinin veya rejeneratif frenleme sistemi tarafından kazanılan enerjinin depolanması için enerji depolama sistemine ihtiyaç vardır [10]. Yakıt hücresi ve elektrik motoru arasında gerilim değerinin yükseltilmesi amacı ile DA motor için DA-DA dönüştürücüye, AA motor için DA-AA dönüştürücüye; kontrol için mikroişlemci ya da Dijital Sinyal İşlemcisine (DSP) ve batarya birimine ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 2.2’de yakıt hücreli aracın prensip şeması gösterilmektedir [14].



Şekil 2.2. Yakıt pilli elektrik araç modeli

Yakıt hücresi teknolojisinde, günümüzdeki çalışmalar, maliyetin ve ağırlık/hacim oranının düşürülmesi ve güvenliğin artırılması üzerine sürdürülmektedir [14].

2.3. Hibrit Elektrikli Araçlar

Hibrit Elektrikli Araçlar, birden fazla ve farklı türdeki enerji kaynaklarının bir arada kullanılması ile oluşturulmaktadır. Literatürdeki tanımlamaya göre, iki ya da daha

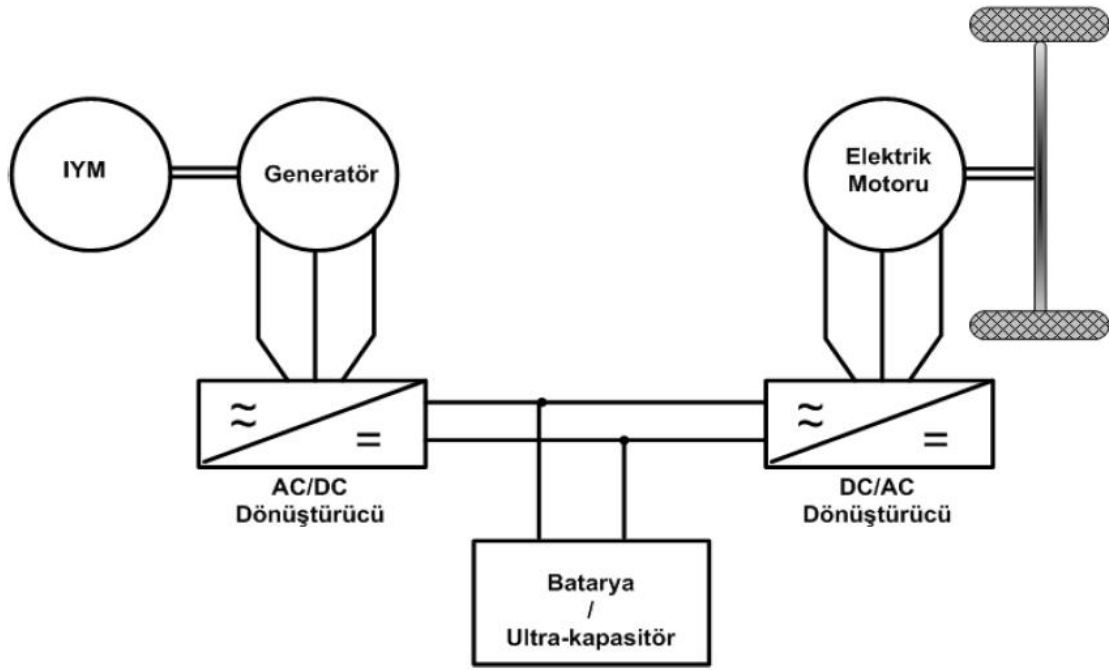
fazla enerji deposundan en az bir tanesinin elektrik enerjisi kaynağı olduğu bir araç Hibrit elektrikli araç (HEA) olarak ifade edilir [15].

Hibrit araç sistemleri, tahrik kaynağı genellikle İYM yanında bir elektrik motoru ve bataryadan meydana gelir. Bu şekilde oluşturulan bir yapı ile yakıt tüketiminin ve buna bağılı olarak İYM'nin olumsuz çevresel etkilerinin önemli oranda azaltılması amaçlanmaktadır. Hibritleştirme yöntemi, araç performansını oldukça etkiler. Ayrıca, elektrik makinası ve bataryanın kullanılması ile birlikte frenleme anlarında ortaya çıkan enerji geri kazanılabilir, bu sayede yakıt tasarrufu da artırılmaktadır. Özellikle, şehir içi kullanımda hibrit elektrikli araçlar önemli avantajlar sağlamaktadır. Fişe takılabilen hibrit elektrikli araç (FHEA, İngilizcesi Plug in HEV= PHEV) yapısı, eğer şarj istasyonu altyapısı mevcut ise daha cazip görülmektedir. Bu yüzden gelişmiş ülkelerde var olan şarj istasyonlarının ülkemizde de yaygınlaşması için bilimsel ve ar-ge çalışmaları teşvik edilmektedir.

2.3.1. Seri Hibrit Araç Sistemi

Seri hibrit yapı temel olarak, tahrik kaynağı olan elektrik motorunun enerjisini devamlı olarak batarya üzerinden karşılayacak şekilde oluşturulmuş bir yapıdır. Bu bağlantı şeklinde İYM, verimli olduğu çalışma noktası civarında çalıştırılarak generatörü tahrik eder ve doğrultucu aracılığıyla bataryayı şarj eder. Şekil 2.3'te seri hibrit aracın temel hibritleşme yapısı gösterilmektedir.

Seri hibrit yapıda kontrolör, batarya şarjlılık durumuna (State of Charge =SOC) göre sistemi yönetir. Batarya Şarj durumu (State of Charge=SOC) belirlenen minimum değerin altına indiğinde, İYM çalıştırılarak bataryalar şarj edilir [16-20]. Batarya şarjı istenilen noktaya ulaşınca, İYM tekrar kapatılır. Bataryanın şarjı belirli bir aralık arasında tutulmak üzere, İYM/generatör grubu kontrol edilir

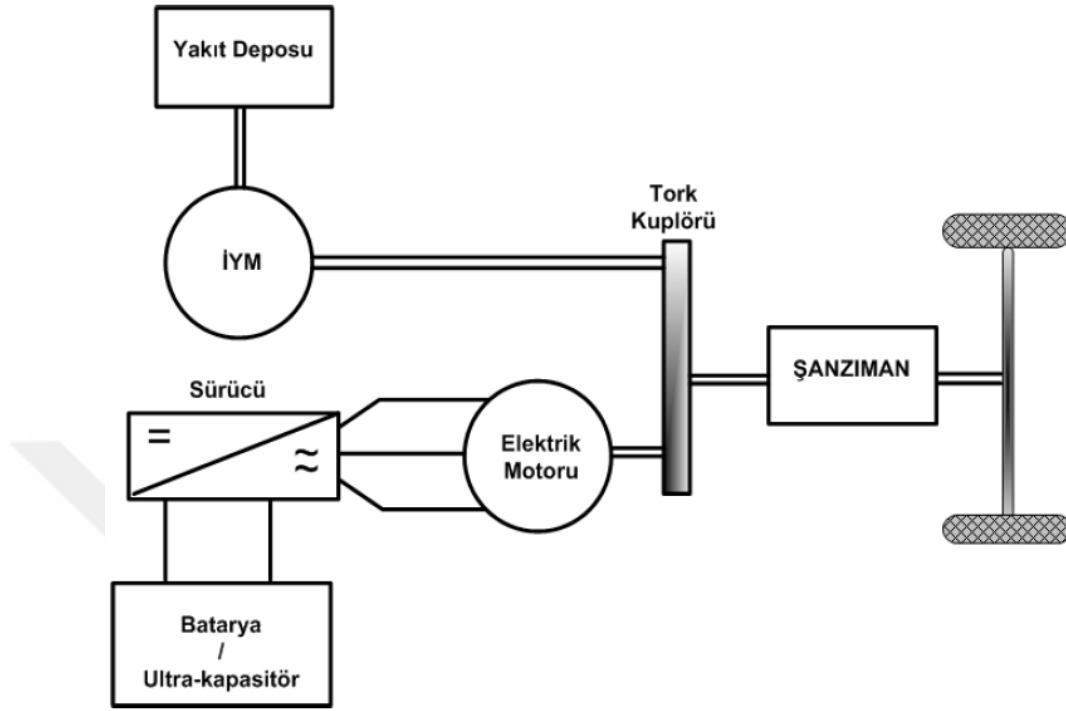


Şekil 2.3 Tipik seri hibrit araç yapısı

Seri hibrit topolojisinin en büyük avantajı, İYM'nin hız-moment karakteristiğindeki en verimli noktasında çalıştırılmasıdır. En verimli noktada çalışma demek, düşük yakıt tüketimi ve yüksek verim demektir. Ayrıca, seri hibrit araçlarda dikkat edilecek diğer bir husus, diferansiyel ile İYM arasında mekanik bir bağlantının olmamasıdır. Ancak, tekerlekler ile İYM arasındaki enerji iletiminde iki enerji dönüştürme aşaması (İYM/Generatör, Generatör/Motor) bulunduğundan, bu dönüştürme işlemleri esnasında enerjinin bir bölümü kaybolur. Şehir içi kullanımda avantajlı olan seri hibrit yapı, uzun sürüş mesafesinde bu dönüştürme kayıplarından dolayı avantajını kaybeder [21-22].

2.3.2. Paralel Hibrit Araç Sistemi

Paralel hibrit yapıda, hem İYM hem de tahrik motoru şaseye mekanik olarak bağlıdır. Temel paralel hibrit yapı Şekil 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2.4. Tipik paralel hibrit araç yapısı

Paralel hibrit yapıda, sadece İYM ile, sadece elektrik motoru ile, ya da her ikisi aynı anda çalıştırılmak üzere üç farklı şekilde tahrik edilebilir. Böyle bir yapı, aracın farklı zamanlardaki farklı moment taleplerini karşılamak için değişik mekanik bağlantıların oluşturulması imkânına sahiptir [23-25].

Paralel hibrit araçlarda, İYM ve tahrik motoru arasında farklı yük paylaşım yöntemleri mevcuttur. Bunların arasında en çok tercih edileni, düşük devirlerde daha verimli olduğu için elektrik motorunu, yüksek devirlerde ise İYM'yi tek başına kullanmaktır. İYM tek başına kullanıldığında, negatif eğim ve frenleme şartlarında tahrik motoru generatör olarak çalıştırılıp bataryalar şarj edilir.

Paralel Hibrit araçların bir avantajı da tork kuplörüne sahip olmasıdır. Bu özellik sayesinde İYM farklı tork taleplerinde, sürekli olarak en uygun çalışma noktasında çalıştırılabilir [24-25]. Böylece daha verimli yakıt kullanımı sağlanarak, yakıt tüketimi azaltılmış olur. Paralel yapının, seri yapı karşısındaki diğer bir avantajı ise, yapısında bir adet enerji dönüştürme ünitesi bulunduğundan daha az enerji kaybının olmasıdır.

Ayrıca yapılan bazı çalışmalar, paralel hibrit yapının diğer tüm hibrit araç yapılarına kıyasla daha fazla yakıt tasarrufu sağladığı gösterilmiştir [25].

Seri-paralel yapı, paralel yapıya oldukça benzeyen ama her iki yapının iyi yönlerini bulunduran diğer bir yapıdır. İYM'nin şanzımana doğrudan bağlı olmayıp seri hibrit yapıda olduğu gibi generatöre bağlı olması sayesinde İYM optimum verimde çalıştırılabilmektedir. Böylelikle araç düşük hızlarda seri hibrit yapıya benzer şekilde çalışmaktadır. Yüksek hızlarda ise İYM doğrudan tahrik yapar ve seri yapıdaki enerji dönüşümleri ile enerji kaybı oluşmaz. Bu yapının amacı hem paralel hem de seri sistemin avantajlarını kullanmaktır [24]. İYM ile birlikte bir elektrik motorunun kullanılmasına dayanan hibrit araçlar, sadece İYM kullanan geleneksel araçlara göre hem yakıt tüketimini hem de İYM'nin olumsuz çevre etkilerini belirli bir oranda azaltmıştır. Ancak bu çözüm tam anlamıyla yeterli görülmemektedir.

2.4. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Elektrik Motorları

Ticari olarak satılan binek tipi elektrikli araç(EA) ve hibrit elektrikli araç(EA) larda kullanılan tahrik motorları incelendiğinde azınlıkta kalacak şekilde bazı modellerin asenkron motor ile tahrik edildiği görülür. Buna örnek, Tesla markalı araçlar ve general motorun Chevy Spark modeli gösterilebilir. Bunlar haricindeki hemen hemen tüm diğer ticari modellerde tahrik motoru olarak, sabit mıknatıslı senkron motor türü kullanılmıştır. Bunlardan da sadece Hyundai Sonata modelinde yüzeyi mıknatıslı rotor (SPM) kullanılmış olup bunun haricindeki tüm modellerde büyük üretici şirketlerin tümü rotoru içten mıknatıslı senkron motoru (IPM) tercih etmiştir. Diğer tür motorlar da çalışılmıştır ancak seri üretime alınmamıştır. Binek türü olmayan elektrikli bisiklet ve henüz trafik lisansı çıkmamış bazı araçlarda anahtarlamalı relüktans motoru (ARM) da başarılı olarak denenmiştir [26,27].

Tahrik kaynağı olan elektrik motoru, EA'nın kalbi sayılır. EA'larda tekerlere iletilen moment, elektrik motoru tarafından üretildiği için EA'nın performansı tamamen tahrik

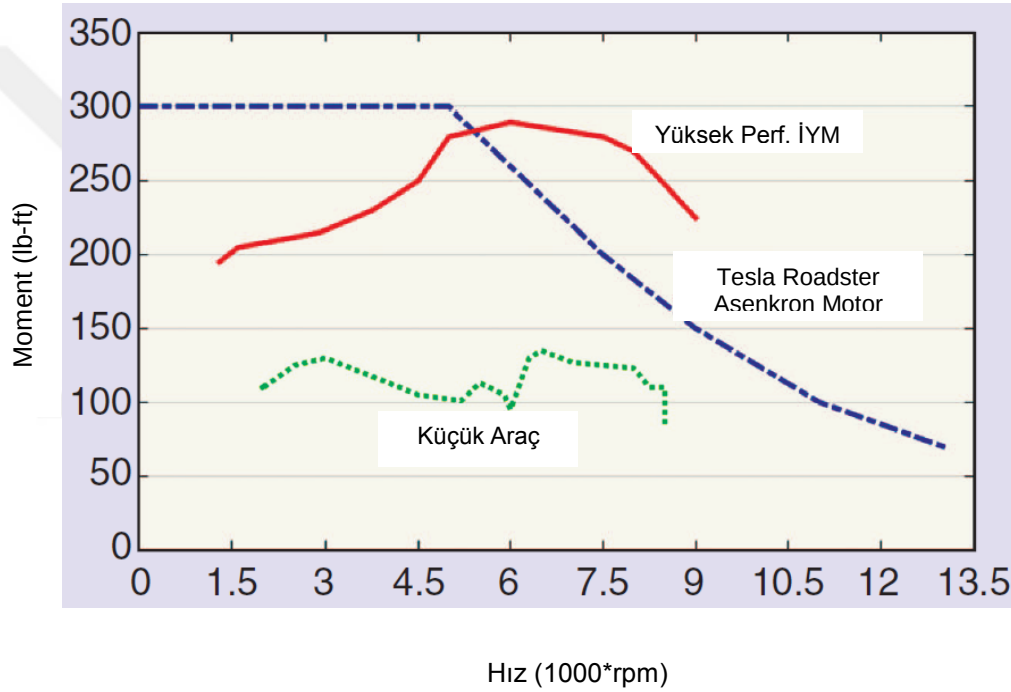
motorunun moment-hız veya güç-hız karakteristiği ile belirlenmektedir. Elektrik motorlarının EA başlıca iki çalışma modu vardır; aracı sürmek için elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirmek ve regeneratif frenleme modunda mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmektir.

EA yapısında, motor sürücüsü, şanzıman (hareketin iletilmesi, aktarma organı) ve tekerlekleri bulunur. Elektrik motoru, güç dönüştürücü ve elektronik kontrolörden oluşan motor sürücüsü, elektriksel itme işlemini (tahrik) sağlayan kısmın ana unsurlarıdır. Güç elektroniği ve magnetik malzemelerdeki hızlı gelişmeler nedeniyle, bu sistemler devamlı yenilenmektedir. Sürücü sisteminin seçiminde, kullanıcı beklentileri, araç gövdesinin ve enerji kaynağının özellikleri ve tercih edilen motorun türü belirleyici unsurlardır [28,29]. Motor ve sürücüsünün boyutlandırılması, sürüş performans kriterlerine, gövde boyutuna ve taşıma kapasitesine bağlı olarak yapılır.

Taşıt uygulamalarında kullanılan motorlar, endüstriyel uygulamalardan farklı olarak sık sık yol alma ve frenleme yaparlar. Bu nedenle yüksek derecede pozitif ve negatif ivmelenmeyi sağlamaları gerekir. Elektrik motorları hem düşük hızda yüksek moment ile tırmanabilmeli hem de düşük moment talebinde yüksek hızlara çıkabilmelidir. Yani geniş bir hız aralığında çalışabilmeleri gereklidir. Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorlarından temel beklentiler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

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

Şekil 2.5'te moment-hız karakteristiği olarak bir elektrik motorunun bir İYM ile kıyaslandığında nasıl üstün olduğu görülebilmektedir. Yani elektrik motorlarının düşük hızlarda yüksek moment sağlaması ivmelenme açısından çok iyi bir performans üstünlüğüdür. Ayrıca geniş bir hız aralığı ele alındığında enerji verimliliği yönünden elektrik motoru üstündür ve frenleme anında geri enerji kazanımı da mutlak bir üstünlüktür.



Şekil 2.5 Elektrikli araç motoru ile içten yanmalı motorun Moment- hız karakteristiklerinin karşılaştırılması

EA'lar söz konusu olduğunda genellikle ilk akla gelen motorlar doğru akım (DA) motorlarıdır. Bu motorların moment-hız karakteristikleri tahrik ihtiyaçları için gayet uygundur ve hız kontrolleri basittir. Doğru akım motorları, hız kontrolünün kolay olması nedeni ile uzun bir süre yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak üretim maliyetlerinin yüksek olması, tozlu çalışma şartlarında kolay aşınmaları gibi dezavantajları da vardır. Ayrıca doğru akım motorları fırça-kollektör düzeneği içerir ve bu nedenle fazla bakım

gerektirir. Ticari pazarda satışı olan bazı küçük elektrikli araçlarda halen DA motor kullanılmaktadır [30].

Asenkron motorlar, fırçasız rotor yapıları sayesinde çok az bakım gerektirdiği için yoğun çalışma şartlarının olduğu endüstrinin gözdesi olmuştur. Sabit mıknatıslı senkron motorlar da benzer avantajlara sahiptir, ancak mıknatıs malzemelerinin fiyatları nedeniyle endüstride pek tercih edilmeyen bu motorların elektrikli araçlar için daha öncelikli olan özgül güç ve güç yoğunluklarının yüksekliği, ticari EA piyasasında onları asenkron motordan daha cazip kılmıştır. ARM'da basit ve sağlam yapılarıyla yoğun olarak prototiplerde denenmektedir [28,31,32].

EA tahrik sistemlerinde başlıca dört tür elektrik motoru öne çıkmaktadır:

- DA motor
- Asenkron motor
- Sürekli mıknatıslı senkron motor
- Anahtarlama relüktans motoru

2.5. Yaygın Elektrikli Araç Modellerinin Değerlendirilmesi

Son yıllarda, ticari model çeşitleri ve satış sayıları gittikçe artan saf ve hibrit EA'ları iki ana grupta toplayabiliriz. Birinci grup asenkron motor tabanlı üretim yapan şirketlerdir. Bu gruptaki şirketlerin açık ara önde olanı ve yüksek performanslı araçlara yönelik üretim yapan Tesla şirkettir. Örneğin tahrik sisteminde Asenkron Motor kullanılan Tesla Model S'in maksimum gücü 215 kW'tır. Batarya seçenekleri 42, 65, 80 kW/saat iken menzilleri de sırasıyla 258, 370, 483 km'dir. Yedek batarya değişimi 1 dakika içerisinde mümkün olurken, toplam şarj süresi ise 45 dakika sürmektedir. Saatte 60 km hıza 5,6 saniye içerisinde ulaşabilmektedir. Maksimum hız sınırı ise saatte 130 km'dir. Emisyon değeri sıfır olup çevre dostudur [33]. Ancak şarjda kullanılan elektrik enerjisinin yenilenebilir olmayan enerji kaynaklarından elde edildiği durumlarda çevreye verilen zarar da göz ardı edilmemelidir.

İkinci ve büyük olan diğer grup sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM) kullanan gruptur. Hibrit EA türünün ekonomik olarak ilk başarılı modeli olan Toyota Prius da bu gruptadır. Bu iki grup arasında şirketlerin yer değiştirmesi veya bir eğilim değişimi için kritik olan konu, nadir elementlere bağımlı olduğu için fiyatı yüksek seyreden SMSM fiyatlarının düşüp düşmeyeceğidir. SMSM kullanılarak üretilmiş modellere ait bir inceleme aşağıda verilmektedir.

Bazı binek türü SMSM kullanan elektrikli ve hibrit araçların nominal değer ve performans özellikleri Tablo-2.1'de listelenmektedir. Burada gittikçe daha yüksek hızda elektrik motorlarını kullanma eğilimi olduğu görülmektedir. Çünkü devir sayısı yükseldikçe motor ağırlık ve hacmi daha fazla düşmektedir[30].

Tablo-2.1. Sürekli mıknatıslı senkron motor kullanılan saf elektrikli ve hibrit araçlara ait değerler

Parametre	2004 Prius	2006 Accord	2007 Camry	2008 LS600h	2010 Prius	2011 Sonata	2012 Leaf	2014 Accord	Chevy Volt
Güç(kW)	50	12.4	70	110	60	30	80	124	111
Moment (Nm)	400	136	270	300	207	205	280	Yok	368
Dönüş Hızı (rpm)	6000	6000	14000	10230	13500	6000	10400	Yok	Yok
Soğutma	Su/Glikol çevrimli soğutucu	Hava soğutmalı	Su/Glikol çevrimli soğutucu	Çift yüzlü, Su/Glikol çevrimli soğutucu	Doğrudan soğutma, tek yüzlü Su/Glikol çevrimli soğutucu	Su/Glikol çevrimli soğutucu	Su/Glikol çevrimli soğutucu	Yok	Yok

Farklı elektrikli ve hibrit araçlarda kullanılan IPM motorların güç yoğunluğu ve özgül güç değerleri Tablo-2.2'de gösterilmektedir. 2008 Lexus LS 600h haricinde, özgül güç tipik olarak 2 kW/kg altındadır. Bu çalışmaların kaynağı olan ABD enerji bakanlığı (DOE) geleceğe dönük tahmini güç yoğunluğunun 5.7 kW/lt özgül gücün 1,6 kW/kg olmasını 2020 itibariyle ortalama hedef olarak öngörmektedir [30,34].

Tablo-2.2. Hibrit araçlarda kullanılan IPM motorların güç yoğunluğu ve özgül güç değerleri

Parametre	2004 Prius	2006 Accord	2007 Camry	2008 LS600h	2010 Prius	2011 Sonata	2012 Leaf
Güç Yoğunluğu (kW/lt)	3,3	1,5	5,9	6,6	4,8	3,0	4,2
Özgül Güç (kW/kg)	1,1	0,5	1,7	2,5	1,6	1,1	1,4
Mıknatıs kütlesi (kg)	1,232	Yok	0,928	1,349	0,768	Yok	1,895
kW başına Mıknatıs kütle oranı (g/kW)	26,64	Yok	8,84	8,43	12,80	Yok	23,69

3. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN ENERJİ DEPOLAMA HÜCRELERİ

3.1 Bataryalara ait Temel ve Yönetimsel Tanımlar

Hücre: Depolanmış kimyasal enerjiden elektriksel enerji üretebilen veya elektriksel enerjiyi, kimyasal enerji halinde depolayabilen temel birimdir. Bir hazne içinde bulunan elektrolit, ayırıcı ve iki elektrottan (pozitif ve negatif) oluşur.

Anma kapasitesi: Amper-saat cinsinden, toplam şarjı gösteren ve üretici tarafından belirtilen bataryanın kapasite [Ah] değeridir.

Enerji yoğunluğu: Bir bataryanın hacimsel olarak enerji depolama yoğunluğunu gösteren ifadedir. Birim hacim litre başına watt-saat cinsinden gösterilir [Wh/l].

Güç Yoğunluğu: Bir bataryanın hacimsel olarak güç depolama yoğunluğunu gösteren ifadedir. Birim hacim litre başına watt cinsinden gösterilir [W/l].

Özgül Enerji: Birim kütle(kg) başına enerji depolama yoğunluğunu gösterir [Wh/kg].

Özgül Güç: Birim kütle(kg) başına güç yoğunluğunu gösterir [W/kg].

C-oranı: Ah olarak anma kapasitesine oranla belirtilen şarj veya deşarj akım değeridir. Önüne gelen çarpan ile daha düşük ya da daha yüksek akım değerlerini ifade eder. Örneğin C-oranının 600 mA olduğu bir durumda; C/2 300mA, 2C 1.2 A akım değerlerini ifade eder.

Çevrim ömrü: Belirli bir performans kriteri baz alınarak (genelde %80 Ah anma kapasite değeri) tanımlı şartlarında bir hücre veya bataryanın şarj ve deşarj edilme sayısıdır.

Kesme gerilimi: Hücre veya bataryanın deşarjının sona erdirilmesi gereken uç gerilimidir.

Maksimum Kapasite: Tanımlanmış deşarj şartlarında kaldırabileceği maksimum kapasite miktarıdır.

Kendi Kendine Boşalma: Hücredeki iç kimyasal reaksiyon nedeniyle geri alınabilir faydalı kapasite kaybıdır. Bu genellikle belli bir sıcaklıkta her ay yüzde olarak ifade edilen güç kaybı

oranıdır, çünkü bataryaların kendi kendine boşalması sıcaklığa çok bağımlıdır. Bu mekanizma elektrolitteki bozuklukların yol açtığı redoks sürecine dayanır. Kısa devre ve shuttle-molecules diğer önemli kendi kendine boşalma kaynaklarıdır.

Yayılma (spread): Aynı tip bataryaların özellikleri arasındaki farkları belirtir.

State of Health: Bir bataryanın genel durumu, taze bataryaya kıyasla verebildiği belirli performansı yansıtan ölçümdür.

Şarj durumu: Mümkün olan maksimum şarja oranla bataryanın mevcut olan şarjının yüzdesidir.

Boşalma derinliği: Bir bataryadan çekilen kapasite miktarı olup maksimum kapasitenin yüzdesi olarak ifade edilir.

Kalan çalışma süresi: Fonksiyonları durmadan önce geçerli deşarj koşulları altında bir araç için bir bataryanın akım sağlayabileceği tahmini zamandır.

SOC (State of Charge) : Çalışan bir sistemdeki bataryanın durumunu ölçmek, akımı üreten kimyasal reaksiyonların oranı ve veriminin sıcaklık, yaşlanma, üretim durumu gibi çok sayıda unsura bağlı olduğundan zordur. Bu yüzden bataryanın durumunu tanımlamak için farklı ölçütler kullanılmıştır.

Örneğin, kullanıma hazır toplam şarj miktarı batarya yaşlandıkça değişir. Hatta yeni bir hücre için bile üretim değişikliklerinden dolayı kapasite değeri farklılık gösterir ve bu da toplam şarj miktarını belirlemeyi zorlaştırır.

SOH ölçütü bir bataryanın enerji depolama yeteneğinin üst akım alışverişini uzun vadede kalan şarjını nominal ya da başlangıç kapasitesine oranlayarak ölçer. Bu değer batarya yaşlanması ve SOC ile çok bağımlıdır.

SOF belirli bir görevi yapma yeteneğidir. Bataryadan beslenen bir sistemin işlevselliği için çok yerinde bir ölçüttür. SOF bataryanın SOC, SOH ve çalışma sıcaklığı değerlerinin bir fonksiyonudur. Örneğin yeni bir batarya (yüksek SOH) küçük SOC değerinde ve daha

yüksek çalışma sıcaklığında daha eski olan (düşük SOH) daha yüksek SOC ve düşük sıcaklıktakinden daha iyi performans(daha yüksek SOF) gösterebilir.

Şekil-3.1’de, öne çıkan batarya hücre teknolojilerine ve UK’lara ait olan yedi başarımlı kriterlerinin USABC değerlerine göre en iyi ve en kötü sınır değer aralıkları örümcek grafiklerle verilmektedir. Ayrıca bu sekiz hücre teknolojileri tek tek ele alınacaktır.

3.2 Nikel Metal Hidrit Bataryalar (NiMH)

Kurşun-asit batarya performans verileri Şekil-3-1.a ve Tablo-3.1’de gösterilmektedir. Kurşun asit bataryaları düşük çevre sıcaklıklarından şiddetli bir şekilde etkilenmektedir. Özellikle 10°C’nin altındaki çalışma koşullarında hem enerji hem de güç yoğunluğunda belirgin ölçüde düşüş görülür. Bu batarya tipini kullanan elektrikli araçların daha düşük ortam sıcaklıklarına maruz kalması durumunda yardımcı bir batarya ısıtmasına ve izolasyonuna ihtiyaç duyulur. Bu olumsuzluklardan dolayı kurşun-asit bataryalar tercih edilmemektedir.

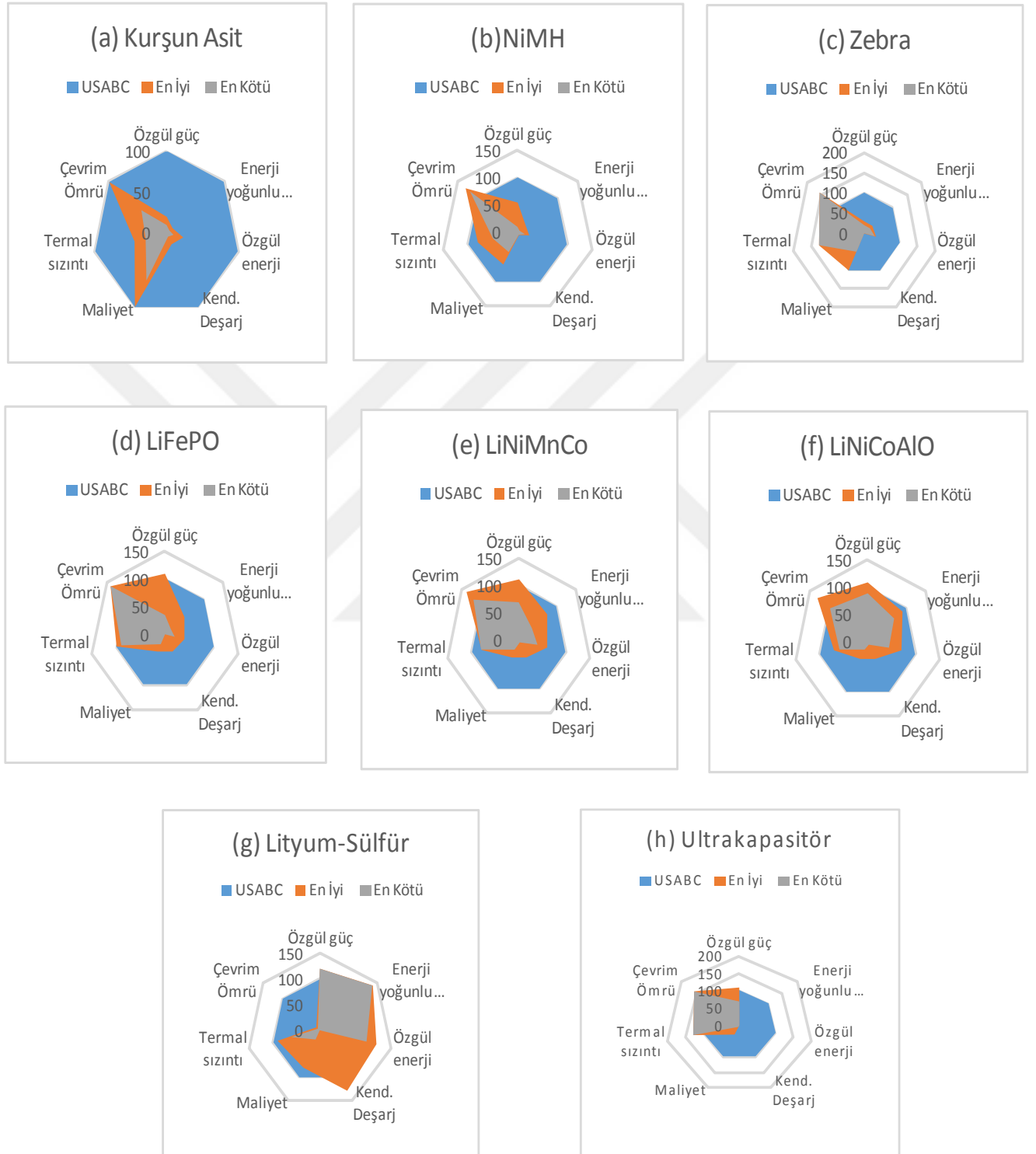
Ni-MH batarya performans verileri Şekil-3-1.b ve Tablo-3.1’de gösterilmekte olup 16 yıldan beri hibrit EA’larda kullanılmaktadır. Önde gelen NiMH hücre üreticileri PEVE ve Sanyo Electric (Panasonic) firmalarıdır. Bu teknoloji oldukça iyi geliştirilmiştir. Örnek olarak 10 yılı aşkındır çalışan RAV4 EA’larda sağlamlığını göstermiştir. Elektrokimyasal olarak negatif elektrot hidrojen olup metaller arası bir bileşikte yutulur ve salınır. Pozitif elektrot nikel bileşiklerinden oluşur ve elektrolit tipik olarak %30wt potasyum hidroksit sulu çözeltisidir. Mevcut ticari hücreler 1.2-1.35 V aralığında hem silindirik hem de prizmatik kapalı kasada üretilmektedir. Coulomb verimliliği yaklaşık %10 olup kurşun-asit bataryalarından düşüktür; ancak NiMH güç/enerji kapasitesi açık ara daha ileridedir, tipik olarak kurşun asitin 2 ila 3 katı kadar güç/enerji yoğunluğu vardır. NiMH teknolojisinin eksiklikleri öncelikle daha yüksek kendiliğinden deşarj oranında kendini gösterir. Bu yüzden enerji odaklı uygulamalarda (FHEA, EA gibi) ideal aday olmalarına engel teşkil eder. NiMH alanındaki yeni gelişmeler çift kutuplu hücre tasarımlarıyla gücü artırma çalışmalarına yönelmiştir.[35]

3.3 Zebra Bataryalar

Zebra batarya adıyla daha çok anılan Sodyum nikel bataryanın kökeni 1978 yılında bu teknolojinin ilk ödül aldığı Güney Afrika patentine kadar uzanır[36]. 1984 yılında enerjisi zebra bataryadan sağlanan ilk EA İngiltere'nin DERBY şehrinde sürüşe çıkmıştır. O zamandan beri gelişmekte olan bu teknoloji olgunlaşmıştır. Performans verileri Şekil-3.1.c[35]'de gösterilen ve ticari olarak elde edilebilen zebra bataryalar sodyum-nikel klorit (Na-Ni-Cl) tabanlıdır. Bu elektrokimyanın negatif elektrodu sodyum ve pozitif elektrodu nikel-klorittir. Zebra bataryalar 270-350 °C sıcaklıkta çalışırlar. Çünkü bu sıcaklıklarda sodyum eriyik halde bulunur [37]. Bunun sonucu olarak bu bataryalar eriyik tuz bataryaları olarak daha yaygın şekilde tanımlanırlar. Bu hücreler dik duran dikdörtgen kutu biçiminde üretilirler. Yüksek sıcaklıkta çalışabilmesi için özel paket tasarımı ve termik gereklilikleri sağlamak zorundadır. Sonuçta, çalışma sıcaklıklarını sürdürmek için gereken enerji bir kendiliğinden deşarj durumu oluşturur. Bu teknolojinin bazı avantajları, ortam sıcaklığına duyarsızlığı, arızaya tolerans göstermesi ve Tablo-1'de gösterildiği üzere görece yüksek 90-120 Wh/kg özgül enerji sunmasıdır[38-40] . Arıza toleransının nedeni hücre hasarı oluştuğunda kısa devre direncinin düşük olması ve böylece hücre arızası süresince çalışmaya devam edebilmesidir [36,38]. Böyle emniyetli çalışmaları, şiddetli iklimler için onları iyi bir aday haline getirir. İlave olarak %100 'e yakın coulomb verimliliğine [36,37] ve 2500'den fazla olduğu ölçülmüş bir çevrim ömrüne sahiptirler [36,41]. Bu bataryalar NiMH türüne göre daha iyi enerji yoğunluğu ve özgül enerjiye sahipken güç yetenekleri ve paket maliyetleri ise daha düşüktür. Ancak günlük %15 olarak ölçülen yüksek kendiliğinden deşarj oranları diğer incelenen elektrokimyalara göre daha yüksek basamaklı bir değere sahiptir. Zebra bataryaların kullanıldığı uygulamalar, ThinkEA, Iveco Electric Daily, ve Modec EA van modelleridir.

3.4 Lityum İyon Bataryalar

Batarya teknolojisi geçen birkaç on yıl içinde uzun bir yol kat etmiştir. Lityum-iyon batarya teknolojisi akıllı telefonlar ve dizüstü bilgisayarlardan günümüzün EA ve smart grid uygulamaları için enerji depolama sistemlerine kadar enerji sağlamaktadır. Lityum-iyon bataryalar yüksek enerji yoğunluğuna sahip oldukları için sadece elektrik enerjisiyle daha uzun sürüş menzili XEA uygulamalarında araca sağlar. Ancak bir aracın dinamik güç profilinden kaynaklanan büyük güç sıçramalarını karşılayabilecek özgül güce tipik olarak sahip değildir. Bir regeneratif frenleme süresince lityum-iyon bataryalar ele alabildikleri güç seviyesiyle sınırlı oldukları için geri kazanılan enerjinin büyük bir kısmı mekanik frenlerde kayba uğrar. Yüksek dinamik güç profilleri altında bir XEA'nin bataryası büyük oranda aşırı yüklenebileceğinden kullanım ömrü olumsuz etkilenecektir. Yüksek dinamik yük profillerinin batarya paketi tarafından yüklenilmesi, hücre seviyesinde bozulmalara dolayısıyla iç dirençte artışa sebep olur. Hücre ömürlerinin erken bitmesi ve çoğu zaman erken arıza çıkması sonucu kapasite kaybı ortaya çıkmaktadır [42] .



Şekil-3.1. Öne çıkan hücre teknolojilerinin karşılaştırılması [35]

Tablo-3.1. Mevcut batarya ve UK hücrelerinin özellikleri

Özellikler	USABC	Kurşun-asit	Nikel Metal Hidrit	ZEBRA	Ultrakapasitör
Özgül Güç (W/kg)	700	75-150 [4]	80-400 [4]	150-200 [5],[6]	500-100.000 [7],[8]
Enerji Yoğunluğu(Wh/L)	750	50-80 [7]	60-150 [7]	135-180 [5],[7]	10-30 [7]
Özgül Enerji (Wh/kg)	350	30-50 [7],[8]	45-80 [9]	100-120 [5],[7]	2.5-15 [7]
Kendiligidinden deşarj (%/gün)	0.03	0.29-0.57 [4]	1-1.43 [4],[10]	15 [7]	20-40 [7]
Maliyet (\$/kWh)	100	100-150 [11]	150-250 [2],[9]	100-200 [7]	300-2000 [7]
Çevrim Ömrü	1000	500-1000 [7]	1200-2000 [12]	>2500 [7],[8]	>100.000 [7],[8]
Çalışma Sıcaklığı (°C)	220°	60-100 [13],[14]	110-175 [8]	- ^b	- ^b [15]

Tablo-3.2. Lityum-iyon batarya ve UK hücrelerinin özellikleri

Özellikler	USABC	LiFePO ₄	LiNiMnCo	LiNiCoAlO ₂	Li-S
Özgül Güç (W/kg)	700	250-1600 [4]	500-2400 [4]	700-800 [5],[6]	1500-2000 [7],[8]
Enerji Yoğunluğu(Wh/L)	750	250-500 [7],[18]	230-550 [7],[18]	500-670 [7],[19]	1500-2600 [7],[19]
Özgül Enerji (Wh/kg)	350	80-140 [4],[16]	126-210 [16],[18]	145-240 [19],[20]	350-600 [17],[18]
Kendiligidinden deşarj (%/gün)	0.03	0.1-1.29 [4],[7]	0.1-0.71 [4],[7]	0.1-0.57 [4],[7]	0.025-32 [21]
Maliyet (\$/kWh)	100	300-600 [22]	300-600 [22]	300-600 [22]	> 130 ^a [19]
Çevrim Ömrü	1000	1000-2000 [16]	1200-1950 [16],[23]	1000-1280 [16],[20]	80-110 [16],[23]
Çalışma Sıcaklığı (°C)	220 ^b	195[24]	168[24]	136-160 [25]	125-200[26]

Lityum-iyon hücre elektrotlarının oluşturulmasında kullanılan değişik malzemeler vardır. Katot malzemeleri genellikle Lityum metal amalgamlarının oksit çeşitleridir. Bunlar genellikle ya mangan (LMO), kobalt(LCO), Nikel, demir-fosfat(LiFePO) ya da bunların

LiNiMnCo(NMC) ve LiNiCoAlO₂(NCA) alimünyum bağı olan karışımlarını içerir [43]. Anot malzemeleri tipik olarak grafitir ancak tüketici elektroniğinde sert karbon, silisyum-karbon bileşikler, lityum-titanat, kobalt alaşımları ve silisyum-karbon bileşikler de kullanılmaktadır. Tüm bu çeşitlerde lityum iyonları elektrotlar arasında ileri ve geri taşınır ve klasik molekülden moleküle kimyasal tepkime yerine, katmanlı bileşik yapısına girip çıkmaya dayalı bir tepkime içinde elektronları transfer eder. Lityum-iyon teknolojisinin faydaları, daha yüksek çevrim ömrü [44-48], yüksek coulomb verimliliği (%98'e kadar) [43] ve düşük kendiliğinden deşarj [38-40,49]. Elektrolit malzemelerinde, genellikle organik susuz formda katı tabanlıdan sıvı tabanlıya, geniş bir çeşitlilik de mümkündür. Hafif ağırlıktaki malzemelerin kullanımı ve lityum-iyon elektron transferinin yüksek gerilim potansiyeli, yüksek güç/enerji yoğunluklarının ve en yüksek değeri 3.2-3.8 V gibi elektrokimyasal nominal hücre gerilimlerinin ortaya çıkmasına destek vermiştir [50,51]. Şekil-1-d 'de gösterilen LiFePO türü daha yüksek termal sızıntı sıcaklığına sahip olduğundan dolayı lityum-iyon hücre kimyasının en sağlamları arasında gösterilir [43]. Bu arada NMC ve NCA hücreler, Şekil-1-e,f ve Tablo-2'de gözlenebileceği üzere diğer teknolojilere kıyasla daha üstün güç/enerji performanslarından dolayı günümüz EA pazarında baskındır. Bunun bir sonucu olarak Panasonic, Tesla, LG Chem ve Samsung SDI gibi şirketler ağırlıklı olarak bu iki hücre kimyasına yatırım yapmaktadır.

Günümüzde lityum-iyon kimyası, enerji ve güç yeteneklerini aynı zamanda çalışma gerilimlerini anlamlı şekilde artıracak kadar geniş şekilde araştırılmış ve geliştirilmiştir. Örneğin, NMC katotlarındaki iyileştirmeler 4.13'den 4.3 V a kadar çalışma geriliminde bir artış göstermiştir [52]. İlave olarak 4.7-4.8 V' a kadar çalışma gerilimleri lityum vanadyum fosfat katotlarında gözlenmiştir ve Subaru-64e prototipinde kullanılmıştır[53]. Araştırmacıların bir kısmı klasik lityum-iyon kimyasında düzeltmelere odaklanmasına rağmen çoğunluğu geleneksel lityum-iyon hücrelerden daha üstün yeteneklere sahip olacak yeni nesil lityum-iyon tabanlı batarya hücrelerini oluşturabilme iddiasına yoğunlaşmışlardır[35].

3.5 Lityum Tabanlı Batarya Teknolojilerindeki Gelişmeler

Geleneksel lityum-iyon batarya teknolojisi, teorik olarak 387 Wh/kg'lık bir özgül enerjiye sahiptir [54,55]. Günümüzde üretilen ticari hücreler 240 Wh/kg enerji yoğunluğuna ulaşmaktadır [51] ve bu yüzden mevcut lityum-iyon batarya teknolojisinin limitlerine ulaştığı açıktır. Seri üretimi yapılan EA'ların her şarj için 500 km üzerinde bir menzile erişebilme hedefi ancak ticari batarya teknolojisinin yeni bir çağı görmesi ile mümkün olabilir[35].

Lityum-hava (Li_2O_2) ve Li-S kimyaları sırasıyla 3582 ve 2567 Wh/kg çok yüksek teorik enerjilerinden dolayı araştırma dünyasının giderek ilgisini çekmektedir [55,56]. İlave olarak Lityum-hava ve Li-S katotları bolca bulunan, oksijen ve basit sülfür gibi malzemelerden oluştuğu için hücrelerin üreticiye maliyeti de daha düşük olmaktadır. Her iki batarya teknolojileri, dış devrede bir yük gözlendiği zaman lityumun oksitlendiği aynı metalik lityum anoda sahiptir. Lityum iyonlar, sırasıyla lityum-hava ve lityum-sülfür hücrelerin katodundaki oksijeni veya basit sülfürü redüklemek (indirgemek) için elektrolit boyunca hareket ederler. Bu bataryaların artırılmış teorik enerji yoğunluğunun çoğunluğu saf metalik lityum anodunun bir sonucudur. Bu anot yapısı klasik lityum iyon bataryalarda her birim kütlede bulunan lityum grafit anottan daha fazla yük taşıyabilir [55-57]. Bunun ötesinde, lityum iyon bataryalarda bulunan katot, LiCoO_2 hücrelerdeki gibi, Li_2O_2 veya Li_2S katotlarından daha az lityum depolayabilir.

Lityum hava hücrelerinde lityum iyonları çevredeki havadan redüklenen O_2^{-2} ile tepkimeye girer. İlk olarak lityum iyonları havadaki diğer moleküllerle tepkimeye girdiği için, CO_2 gibi istenmeyen deşarj ürünleri oluşur. Bunun sonucu olarak oksijen geçirgenliğini artırmak için lityum hava hücreler değişik türde membranla sarılır. Bu hücrelerin ticarileşmesine engel olan önemli ve anahtar faktör zayıf lityum çevrim verimliliğini ve kapasite kaybını doğuran elektrolit bozulmasıdır [55,57-59]. 2016 itibarıyla lityum hava hücreler üzerine yapılan araştırmalar, sadece 20 deşarj çevriminden sonra %50 kadar kapasite kaybının olduğunu göstermektedir.

Benzer şekilde Li-S hücreler, hızlı kapasite kaybına yol açan düşük sülfür çevrim verimliliği yönünden dezavantajlıdır [55,60]. İlave olarak sülfür iyi bir yalıtkan olduğu için zayıf elektrot kinetiği ve üzerindeki denemelerde 50 deşarj çevriminden sonra %50 kadar kapasite kaybını olduğu görülmüştür [55]. Bu ve diğer performans özellikleri Li-S Şekil-3.1.(g) ve Tablo-3.2’de gösterilmektedir. Sion Power firması bu teknolojiyi geliştiren birkaç özel şirketten biridir. 2016 yılı itibarıyla, 350 Wh/kg özgül enerjiye sahip Li-S hücreler geliştirmiş olduklarını ve bu değeri gelecekte 600 Wh/kg’a çıkaracaklarını iddia etmektedirler [61] .

Lityum-hava ve Li-S bataryaların gelişimini hızlandırmak için bazı ilerlemeler sağlanmıştır. Bu çalışmalar geleneksel karbon-S katotları grafin-S katotlarla değiştirmeye odaklanmıştır. Grafin yüksek elektriksel iletkenliğe ve geniş yüzey alanına sahiptir, bu ise çevrim ömrünü iyileştirebilir [54,62-66]. Grafin kullanılarak 100 çevrimden sonra %30 un altında bir kapasite kaybının görüldüğü bazı çalışmalarda rapor edilmiştir [54] . Yakın zamanlarda lityum tabanlı batarya teknolojisinin kapasite kaybı problemini çözmek üzere grafit tabanlı anot malzemelerine bir alternatif olarak silisyum da göz önüne alınmaktadır [67,70] . Bir çalışmada, siliyum karbon yapılarına nar şekli verilerek elektrodun yapılması sayesinde 1000 çevrimden sonra sadece %3 kapasite kaybı olduğu bildirilmiştir [68].

3.6. Ultrakapasitörler

Geleneksel kapasitörler, ortalarında katı bir dielektrik malzemeden yapılmış ayırıcı bulunan iki elektrottan oluşur. Katı dielektrik malzemeler tipik olarak seramikler ve metal oksit türlerinden seçilir [3]. Faradayik süreçlerin olmaması eksikliği nedeniyle SOC ile doğru orantılı bir uç gerilimi doğurur [69] . Plakalar yük depolarken, kendileri elektrik alanına antiparalel bulunan dielektrik malzemenin moleküler dipolleri elektrik alanı boyunca hizalayan bir moment hissedeceklerdir. Bunun sonucu olarak kapasitans, elektrodun yüzey alanına, dielektrik sabitine ve plakalar arasındaki uzaklığa

$$C=A.\epsilon/d \quad (3.1)$$

şeklinde bağımlıdır. Ultra veya süperkapasitörler geleneksel kapasitörlerden farklıdır. Çünkü iki çeşit enerji depolamayı kullanırlar: Elektrostatik ve elektrokimyasal depolama. Bunun ötesinde her iki elektrodu ayıran katı bir dielektrik malzeme yerine elektrolitik bir çözeltiye sahiptirler. Elektrostatik potansiyel şeklinde enerji depolamaya, elektrik çift tabaka kapasitansı denilir [70]. Buna bazen keşfeden kişinin adıyla Helmholtz çift katmanı da denilir. Çift katman elektrot yüzeyi ve elektrolit arasındaki arayüzde depolama yapar. Bir katman elektrot üzerinde yük şeklinde gelişir. Bu arada ikinci bir katman, elektrolitik çözeltiden elektrot yüzeyine nüfuz eden iyonlar şeklinde gelişir. Bu nüfuz süreci lityum iyon bataryalarda görülene çok benzerdir. Elektrot yüzeyindeki yük, elektronötraliyenin bir sonucu olarak elektrolit katmanında biriken yüke eşit ve zıt olmalıdır. Elektrot yüzeyinde oluşan yük katmanını tipik olarak 10^{-10} m'den biraz küçüktür. Oysa elektrolit bölgesi üzerindeki yük katmanını karmaşık yapısından dolayı modellemek çok daha zordur [71]. Her iki elektrodun ara yüz bölgesinde oluşan elektriksel çift katman bir kapasitans olarak modellenabilir[70].

Elektrokimyasal potansiyel şeklinde enerji depolama bazı UK'larda kullanılan ikinci enerji depolama şeklidir. Bu enerji depolama şekline yarı kapasitans da denilir ki elektrot kafes yapısı tarafından absorbe edilen elektrolitteki iyonların elektrot-elektrolit ara yüzüne nüfuz ettiği zaman ortaya çıkar [70-73]. Yarı kapasitansı oluşturmak için kullanılan diğer süreçler ise elektrolitteki iyonların redoks tepkimeleri ve elektroda aktif polimerlerin katılanmasıdır [70] . Tutunma ve nüfuz etme ve elektriksel konum değiştirme yoluyla oluşan yarı kapasitans elektrot kafesinde bulunan Li^+ gibi iyonların üretildiği yüzeyde ortaya çıkar. Tutunma oluşurken oksitlenme ve redüklenme tepkimeleri yoluyla iyonlar elektronları alır veya bırakır [69,74].

Elektriksel çift katman kapasitörler (EDLC) durumunda faradayik süreçlerden ziyade elektrik çift katmanda enerji depolanır. Elektrolitteki iyonlar elektrot yüzeyine doğru nüfuz ederler ve gözenekli kafese eklemlenebilirler [3,70] . Diğer taraftan yarı kapasitörler esas enerji depolama yöntemleri olarak sadece faradayik redoks tepkimelerini kullanırlar [70]. Yük transferi elektrolit ve elektrot arasında gözlenir. Yarı kapasitörler geleneksel EDLC'den daha yüksek enerji yoğunlukları sunarlar, fakat onların da zayıf olduğu yönler vardır. Bunlar, tutunma ve yük transferi sürecinde elektrodun yapısında çökme gibi, kafes yapısında

aşınma ve bozunmayı artırıp çevrim ömrünü kısaltan süreçlere bağlı olmalarından kaynaklanır. Artık üreticiler yarı kapasitif olan iki elektrodun sadece bir çıkışı olan hücreleri üretebilmektedirler. Bunlara karma asimetrik UK ismi yaygın olarak verilir. Günümüz piyasasında mevcut olan en gelişmiş karma UK hücrelerin ikisi 5000 F'lık Yunasko hücre ve 1100 F'lık JM enerji Ultimo hücredir. U.C. Davis Taşımacılık Çalışmaları Enstitüsünde yapılan bir çalışmaya göre bu hücrelerin sıralı paketlenmiş haliyle özgül enerjisi 30 ve 10 Wh/kg olup sırasıyla özgül gücü 3395 ve 2450 W/kg olarak sağlayabilmektedir [75]. UK'nın performans verileri Şekil-3.1(h) ve Tablo-2'de gösterilmiştir.

İleri kısımlarda ayrıntılarıyla tartışılacağı üzere UK'lar bataryaya tampon oluşturup karma enerji depolama sistemlerinin gücünü, ömür kapasitesini artırmak için ve daha büyük ivmelenme ve faydalı frenleme yetenekleri sağlamak için stratejik olarak kullanılırlar. Maxwell marka UK'lar hibrit otobüslerde ve PSA mikro hibritlerde kullanılmaktadırlar [53,76]. Yeni bir Mazda-6 modeli, 12V start stop bir mikro hibrit üzerinde faydalı frenleme yapmak için bir UK kullanmaktadır. Honda, Toyota ve AFS Trinity firmalarının her biri daha yüksek performansı UK kullanarak elde etmek için konsept ve prototip taşıtlar geliştirmiştir.

4. ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ

Bir enerji yönetim sistemi (EYS) güvenli olarak yüksek performansta çalışma ve uzun ömürlü olmasını sağlamak üzere bir batarya, UK veya HEDS'nin korumasını, tahminini ve kontrolünü yapan bir sistemdir [77-78]. EDS seri ve/veya paralel bağlanmış çoklu hücrelerden oluşur. Hücreler, nominal gerilime sahip bir grup oluşturmak için seri bağlanır. Paralel bağlantı bir grubun nominal kapasitesini yani depolanabilecek enerji ya da şarj miktarını artırır. Benzer şekilde paralel hücrelerin eklenmesi grubun nominal akımını yani gücünü de artırır.

XEА için büyük gruplar yüzlerce veya binlerce hücreden oluşur. Düzenlemeyi basitleştirmek için gruplar modüllere bölünür [79]. Modüller hücre seviyesinde EYS fonksiyonlarını gerçekleştirirken üst kontrol için bir bilgi sunar. İletişimler tipik olarak bir fieldbus sistemi, örneğin otomotiv için CAN(Controller Area Network) kullanılarak yapılır. HEDS'ler bir batarya veya UK grubundan farklı olarak güç elektroniği konverterini barındırır ve daha karmaşık bir topolojiye sahiptir. Batarya ve UK alt sistemi tipik olarak düzgünce ayrıştırılır batarya yönetim sistemi tarafından bireysel olarak ta işleme tabi tutulabilir bunda alt sistemler arasındaki enerji akışı hariçtir.

4.1. Koruma

EDS ciddi miktarda enerji depolar ve kontrolsüz salınmasını engellemek için pasif ve aktif güvenlik tedbirlerine ihtiyaç duyar. Grup seviyesinde son koruma hattını oluşturmak üzere elektromagnetik kontaktörler kullanılmasına rağmen grup içinde pasif ve aktif güvenlik mekanizmaları bataryanın güvenli çalışmasını sürdürmek üzere kullanılır. Pasif güvenlik mekanizmaları, elektriksel arıza, yüksek sıcaklık veya yüksek iç basınç durumlarındaki en kötü durum seneryosunu önlemek için kullanılır [80]. Her bir hücre tipik olarak bimetal devre kesiciler kullanılarak kısa devrelere, resetlenebilen pozitif sıcaklık katsaylı sigortalarla da aşırı akımlara karşı tipik olarak korunur [79]. Çoğu batarya hücreleri aşırı basıncı tahliye eden valflere de sahiptir. Modüller, muhtemel fiziksel yanlış kullanımlar (titreşim, çarpm vb)

ve termal sızıntının sürmesini önlemek için hücrelerin termal izolasyonu göz önünde bulundurularak tasarlanır [80]

EYS'ler EDS'leri aktif olarak korumak için kullanılır. Batarya ve UK hücreleri belirli bir gerilim ve akım aralığında çalışmak üzere tasarlanır. Enerji depolama hücreleri tipik olarak, Lityum-iyon bataryalar için $V_{min}=2.5$ V ile $V_{max}=4.3$ V arasında [51], elektrostatik EDLC için $V_{max}=2.7$ V a kadar [81] ve hibrit UK'lar için $V_{min}=2.2$ V ile $V_{max}=4$ V [82] aralığında çalışırlar. Hücreler bir nominal akıma sahip olarak tasarlanır fakat minimum ve maksimum akım sıcaklığa bağlıdır. Elektrostatik hücreler belirli bir sıcaklığın üzerinde bulundukları zaman yeniden bir nominal değer belirlenmesi gerekir. Elektrokimyasal hücrelerin sıcaklığa bağımlılığı doğrusal değildir, örneğin lityum-iyon hücreler belirli bir sıcaklığın altında şarj edilemez.

Bir grup oluşturmak için hücreler seri ve paralel bağlandığı zaman güvenli çalışma amaçlı tedbirler gündeme gelir. Özgün hücre özelliklerindeki farklılıklardan dolayı hücreler eşit şekilde şarj ve deşarj olmazlar. Buna örnek, iç direnç ve kendiliğinden deşarj oranıdır. Bu farklılıklar üretim toleranslarından hücredeki bozulmadan ve grup içindeki sıcaklık farklarından kaynaklanmaktadır. Her bir hücre çalışma limitleri içinde öyle sıkı çalıştırılmalıdır ki bir kısım hücrelerin gittikçe hasarlı hale gelmesi önlenesin. Her bir hücrenin korumaksızın bir batarya grubunun çalıştırılması, dizi boyutu arttıkça batarya ömrünün yaklaşık üstel olarak düşüşüne hemen hemen karşılık gelir [91-92]. Pasif korumaların dışında, sıcaklığa bağlı akım limitlerine bakılması veya şarj ediciler ve yükler arasında çalıştırmayı ayarlamak için iletişim kurmak ayrıntılı güvenlik mekanizmaları da EYS'ler de uygulanabilir.

4.2. Durum ve Parametre Tahmini

Hücreler, nominal kapasitesi Q_n ile karakterize edilir. Bu değer, belirli bir akım ve sıcaklıkta hücrenin sağladığı yük miktarını tanımlar. QI kapasitesi, yük akımına (C oranı) bağımlıdır ve $I^n t = \text{sabit}$ şeklinde Peukert kuralı ile tanımlanır. Burada $n \in [1,1.5]$ olup kimyasal bir amprik çarpandır [85,86]. Peukert denklemi oda sıcaklığında iyi sonuç vermesine rağmen farklı sıcaklıklarda ve batarya yaşlanmasını göz önüne alma anlamında

iyi sonuç vermez [86-89]. Genel olarak Q, sıcaklığa bağlıdır öyle ki sıcaklıktaki bir azalma Q'da bir düşüş meydana getirir [87]. Lityum-iyon hücreler için sıcaklıktaki bir azalma, hücre empedansında (elektrolit direncinde kütle taşınımında) artış meydana getirir [87-90]. Nominal sıcaklığın üstünde, sadece sınırlı bir miktarda kapasite artar (aynı anda hücre korozyonu ve güvenlik riskleri potansiyeli artar) . Hücre empedansındaki artış aynı zamanda aktif kütledeki düşüş, batarya yaşlanmasının da bir sonucudur [91,92]. Bu da kapasite kaybı olarak görülür ki [93-95] . SOC $x \in [0,1]$ değeri, bir hücrenin normalize edilmiş yükü olup hücrede depolanan $q=Q*x$ şeklinde yük miktarını tanımlar.

Modern bir EYS, gruptaki her bir hücrenin SOC değerini tahmin eder [96,97]. SOC doğrudan ölçülemez. SOC açık devre gerilimi (OCV) üzerine kurulur ve genellikle yaş ve sıcaklıkla nonlinear bir fonksiyon olarak değişir [90,98,99]. Bu fonksiyon batarya özelinde doğrusal değil iken UK durumunda doğası gereği doğrusaldır. Açık devre gerilimine dayalı SOC tahmini, kimyasal dengeyi tutturmak için dakikalar veya saatler (kimyasına bağlı olarak) süresince bir hücre dinlendirildikten sonra uç gerilimini ölçer ve look up tablolarıyla SOC'yi yeniden yapılandırır. Bu yaklaşımın temel sınırlamaları, çalışma esnasında kullanılamaması, OCV-SOC karakteristiği bir hücre yaşlandığı zaman değişime uğraması ve bazı lityum-iyon gibi batarya kimyalarında orta şarj seviyelerinde düz gerilim profili olduğu için SOC tahmininde büyük belirsizlikler çıkarmasıdır. Kavramsal olarak bundan ayrıışan bir yaklaşım Coulomb sayımıdır [90,96,100-104]. Bu yöntem her bir batarya hücresine giren veya çıkan akım akışının integralini alır. Kendiliğinden deşarj oranı düşük olan Lityum-iyon gibi hücre kimyaları için bu yöntem depolanan yük miktarının küçük değişimlerini doğru şekilde belirleyebilir. Bu yaklaşımın temel sınırlaması kapasite ve şarjın, yani deşarj verimliliğinin yeterli hassasiyette bilinmesi gerekliliğidir. Ek olarak, bu yöntem küçük ölçüm ya da katsayı hatalarından (offset) dolayı zamana bağlı olarak tahminlerde kaymalardan dolayı şüpheye açıktır. Bu yüzden, SOC tıpkı OCV bilgisinde olduğu gibi düzeltilmelidir [90,96,102,103,106-108]. Daha karmaşık yöntemler yukarıda bahsedilen tekniklerin eksikliklerini gidermek için geliştirilmiştir. Bu yöntemler, adaptif hücre modellerine dayalı olup tahmini düzeltmek üzere gerilim ve akım ölçümlerini kullanır. Tahmin prensiplerine göre şöyle sınıflandırılabilirler: Luanberger gözleyicisi [96,100,110-

112], adaptif gözleyici [96,113,114], kayma kipli gözleyici [100,96,115-119] ve Kalman filtreleridir [3,120-122].

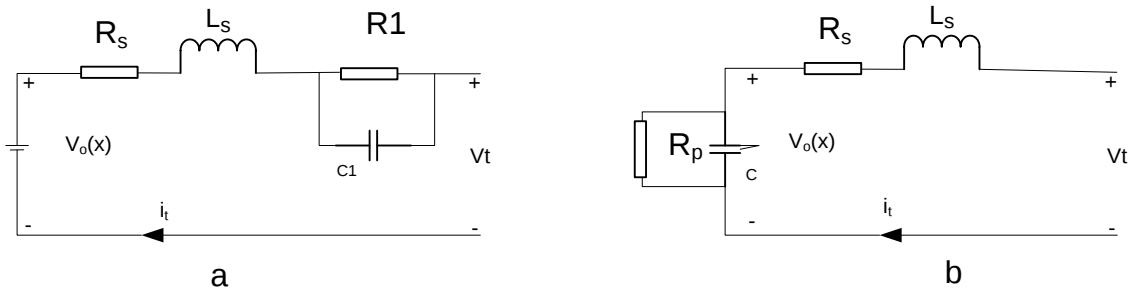
Doğru SOC tahmini, toplulaştırılmış(lumped) parametre modelleri ve elektrokimyasal modeller gibi hücre modelleri gerektirir [98,99,123]. Her bir model doğru temsili çıkarımı için deneysel verilere bakar [3,121,124] . Batarya ve UK hücreleri için basit toplulaştırılmış parametre modelleri Şekil-4.1’de gösterilmektedir [90,125]. Doğrusal ve doğrusal olmayan elemanlar belirli bir davranışı modellemek için veya doğruluğu artırmak için bu modellere eklenebilir [126,127]. Elektrokimyasal modeller lumped parametre veya eşdeğer devre tabanlı modellerden daha yüksek doğruluk sunarlar, ancak hesaplama maliyetleri çok daha pahalıya mal olur. Elektrokimyasal modeller diğerlerinden farklı olarak, kendi içinde yoğun parametre tahminini kullanır. UK ve batarya hücrelerinin özellikleri yaşlanmadan dolayı değişmeye eğilimlidir. Bu yüzden model doğruluğunu düzeltmek için ana parametrelerin tahmin edilmesi faydalıdır.

Parametre tahmini tipik olarak kapasite ve/veya empedans tahminine odaklanır. Kapasite hücrelerde depolanan enerji bilgisini düzeltmek için tahmin edilir, örnek olarak OCV-SOC bağıntısı [128-132] , güçlendirilmiş Kalman filtreleri [133-135] veya recursive en küçük kareler filtreleri(RLS) [137,138] gibi yöntemler kullanılır. SOC ve kapasite arasındaki yakın ilişkinin iki değer tahmini için yapılan kararlılık ve sayısal hesaplamalarda zorluklar çıkardığı bilinmelidir [138]. Empedans bataryadaki mevcut gücü sezmek ve şarj ve deşarj süresince oluşan kayıpları yaklaşık olarak bilmek için tahmin edilir [cemali 82,88]. Empedans laboratuvar şartlarında empedans spektroskopisi aracılığıyla ölçülebilir. Benzer teknikler yardımcı devreler aracılığıyla da çalıştırılabilir [139-141] veya empedans RLS [102,106,150-152] veya Kalman filtreleri [123,143-149] kullanılarak da empedans tahmin edilebilir. Akım ve gerilim ölçümlerinin bileşiminden çıkarılan empedans, güç durumu denilen mevcut gücü sezmek için kullanılabilir [90,96].

Yaklaşık parametre belirlenmesi de SOH değerini tahmin etmek için kullanılabilir. Belirli bir uygulama için bir hücre veya grubun durumunun iyiliği, yaşlanmadan dolayı ömrü boyunca gittikçe bozulur. SOH, üretildiği zamandaki ideal şartlara kıyasla bir modül veya hücrenin durumunu niteler. Fiziksel bir değere karşılık gelmeden bir başarıyı ifade eder.

Öyle ki 1 değeri yeni bir hücrenin performansını belirtir (üretici toleransları hariç), 0 değeri ise belirli bir uygulama için kabul edilebilir minimum seviyeyi gösterir. Eğer bir grubun SOH değeri sıfıra düşerse asgari yeterliliği sağlamak için, örneğin elektrikli aracın menzili, grubun değiştirilmesi gerekir. Ancak, aynı karakteristiğe sahip bir grup talebi daha düşük olan, örneğin akıllı bir evdeki enerji depolama elemanı olarak, ya da ikinci ömür çalışması denilen tekrar kullanılan bataryalar için gayet uygun olabilir [153].

SOH enerjiye göre (SOH_E) veya güce göre (SOH_P) belirlenebilir. Her iki indis bir veya daha fazla batarya parametresi göz önüne alınarak hesaplanır [90,96,153,154]. SOH_E hesaplaması için ana parametre kapasitedir [153,154]. Fakat enerji yeteneğini daha doğru yakalamak için gerilim ve/veya kendiliğinden deşarj oranları da göz önüne alınabilir. Diğer taraftan SOH_P direnç veya empedansa bağlı olarak belirlenir ve genelde SOH_R olarak tanımlanır ve başka parametreleri de göz önüne alabilir [90,96]. SOH_P bir HEV için önceliğe sahiptir. EA'lar da EDS nin güç ve menzil şartlarını karşılayabilmek için yeterli SOH_P ve SOH_E değerlerine sahip olması gerekir. SOH_P ve SOH_E değerleri iki veya daha fazla depolama aygıtını bir araya getiren bir HEDS göz önüne alındığında önemli parametreler haline gelir. SOH değerinin gidişatı kalan faydalı ömrün (Remaining Useful Life=RUL) tahmini için ekstrapolasyona da götürülebilir, böylece hücre veya grubun yaklaşan bakım ihtiyacı sezilebilir [90,96]. Alternatif olarak RUL batarya durumu ve batarya ömür modeli gözlenerek de tahmin edilebilir [96].

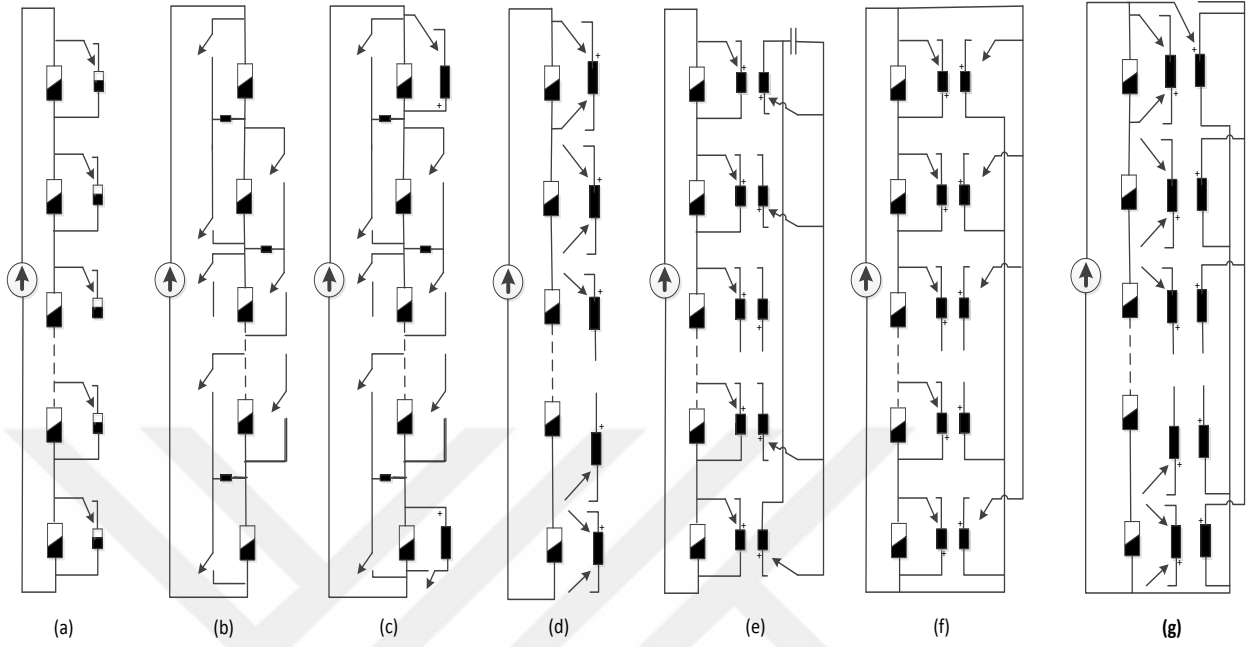


Şekil 4.1. Batarya ve UK eşdeğer seri devresi (a) batarya (b) Ultrakapasitör

4.3. Dengeleme ve Yeniden Dağıtma

Dengesiz bozulmuş bir grubun kapasitesi düşük olduğu söylenir, çalışma geriliminin emniyetli bölgesinin üstünde/altında hücreleri şarj/deşarj süreçleri için risk durumu artmış şekilde çalışır. Bu yüzden modern bir EYS, hücrelerin SOC değerlerini eşitleme tekniklerini çalıştırır. İki tür dengeleme donanımı vardır: harcamalı ve harcamasız. Harcamalı dengelemede aşırı şarj en yüksek SOC ye sahip hücrelerden çekilip paralel direnç veya transistör aracılığıyla harcanır. Harcamasız donanım, güç elektroniği bağlantılarını kullanarak hücreler arasındaki şarjı örneğin DC/DC dönüştürücülerle ile taşır [155-159]. Harcamasız donanım fonksiyonellik bakımından daha öte bir konuma sahiptir. Bir dizideki hücrelerin SOC değerlerinin eşitlenmesine “dengeleme” denilir ve tipik olarak şarj edilirken uygulanır. Dengeli bir dizinin faydalı kapasitesi en zayıf hücrenininki kadardır. Deşarj boyunca daha güçlü hücreler hala enerji içerse dahi en zayıf hücre boşaldığı zaman çalışma durdurulmak zorundadır. Yeniden dağıtma daha güçlü hücrelerden daha zayıf hücrelere çalışma süresince şarjı dinamik olarak öyle taşır ki yığında depolanan enerjinin hepsi kullanılabilir hale gelsin. Bu, harcamasız bir dengeleme şekli olarak görülebilir. Çünkü her bir link gerekli gücü sağlama yeteneği taşır.

Harcamalı dengeleme ya pasif ya da aktif olabilir. Pasif dengeleme, hücre gerilimi gibi sistem özelliklerine bakarak hücreleri dengelemeye çalışır. Bu düzenlemenin bir örneği Şekil-4.2(a) ‘da gösterilmekte olup dengeleme boyunca hücrelere paralel sabit dirençler bağlanır. Dengeleme düşük gerilimli diğer hücrelere kıyasla daha yüksek hücre gerilimine sahip hücrelerden daha yüksek akım çekilmesi sayesinde başarılıdır. Ancak pasif dengeleme tüm hücrelerin diğerlerine kıyasla SOC değeri düşük olanlar dahil, şarjını düşürür ve dengeleme için anlamlı bir süre gerektirir.



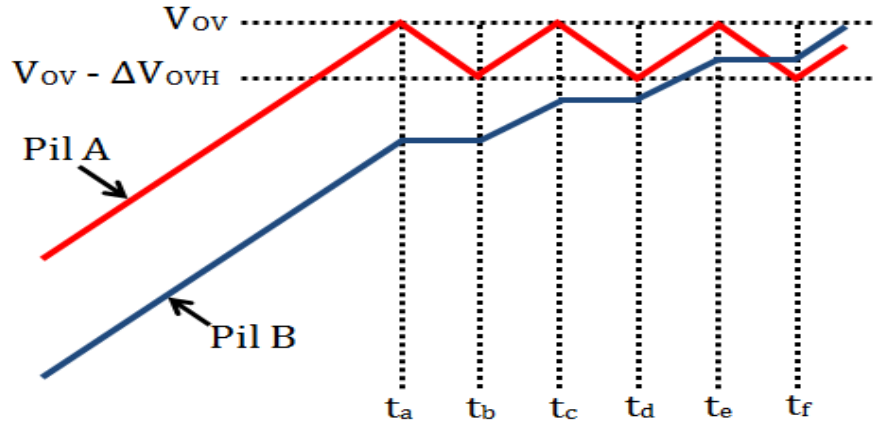
Şekil 4.2. Dengeleme topolojileri (a) dağıtıcı, (b) hat boyu, (c) çevrimli, (d) indüktif, (e) kapasitif, (f) bireysel, (g) ortak

Bu eksikliklerin varlığı, dengeleme anahtarlarının aktif olarak bir kontrol sistemi tarafından kontrolünün aynı topolojiyle birleştirilmesinden elde edilen aktif harcamalı dengeleme yöntemine gerekçe oluşturur. Kontrolör yüksek SOC değerlerine sahip hücreleri belirler, bir dirençte enerji harcayarak bu hücrelerin aşırı şarjını giderir.

4.3.1 Pasif Dengeleme Tekniği

Pasif dengeleme tekniği fazla enerjinin bir direnç üzerinden ısıya dönüştürülerek uzaklaştırılması mantığına dayanır. Bu işlem şarj işlemi bittikten sonra uygulanırsa en düşük enerjiye sahip olan batarya temel alınarak diğer bataryaların enerjilerinin bu seviyeye indirilmesi amaçlanır. Ayrıca bu dengeleme sistemi şarj sırasında uygulanacaksa bataryalardan biri tam şarj olma seviyesine gelmiş fakat bir başka batarya gelmemişse, şarj bir süreliğine durdurulur ve tüm bataryaların enerjisi paketteki en düşük enerjiye sahip olan bataryanın seviyesine çekilir, daha sonra da şarj işlemine devam edilir.

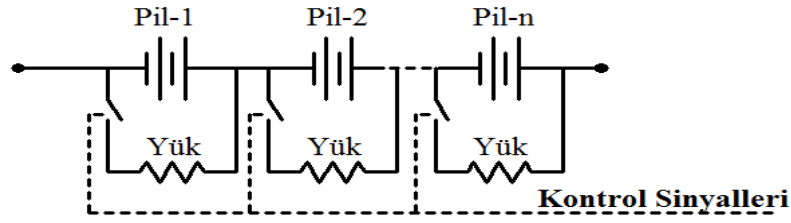
Şekil 4.3’de pasif dengeleme kullanılarak şarj edilmekte olan iki hücreli bir batarya sisteminde bataryaların gerilimlerinin zamana bağlı değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Pasif dengeleme sırasında batarya gerilimleri

Şekil 4.3’de başlangıçta farklı şarj seviyelerinde olan ve şarj miktarlarının gerilim seviyeleriyle anlaşılabilirdiği türde olan seri bağlanmış iki bataryanın (Pil-A ve Pil-B) şarj edilişi gösteriliyor. Başta daha fazla enerjisi bulunan Pil-A şarj işleminin kesileceği üst noktaya (V_{OV}) Pil-B’den daha önce, t_a anında varıyor. Bu noktada Pil-A ile Pil-B arasındaki enerji farkı fazla olduğundan, şarj işlemi kesilerek Pil-A üzerindeki enerjinin bir kısmı bir yük üzerinden boşaltılıyor ve t_b anında şarj işlemi tekrar başlıyor. Şarj işlemi durdurup pil-A üzerindeki enerjini bir yük üzerinden boşaltılması işlemi t_c ve t_d arasında ve t_e ile t_f arasında tekrar ediliyor. Şarj işlemi tamamlandığında her iki hücre arasındaki enerji farkı kabul edilebilir bir sınırın altında oluyor.

Şekil 4.4’de genel bir pasif dengeleme sisteminin blok şeması gösterilmiştir. Kontrol sinyalleriyle anahtarlar gerektiğinde açılarak ilgili bataryanın üzerindeki enerjinin boşaltılması sağlanır.



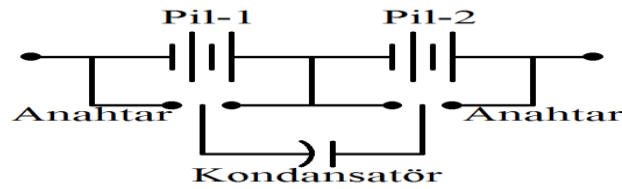
Şekil-4.4. Pasif Dengeleme Basit Devre Şeması

Pasif dengeleme tekniği çok basit olmasına rağmen enerjinin gereksiz yere kullanılmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple verimi düşüktür. Maliyetinin düşük olmasından dolayı da özellikle ucuz sistemlerde tercih edilen bir yöntemdir.

4.3.2. Aktif Dengeleme Tekniği

Aktif dengeleme tekniği, bir batarya sisteminde fazla enerjiye sahip olan bataryanın enerjisinin diğer bataryalara dağıtılması mantığına dayanmaktadır. Pasif dengelemeye göre verimi daha fazladır. Fakat pasif dengeleme tekniğine göre daha fazla eleman ve daha karmaşık bir algoritma gerektirir.

Enerjinin bir bataryadan diğer bataryalara dağıtılması işlemi, anahtarlama kondansatör tekniği (Şekil-4.5) gibi bir bataryanın örneklenmesi mantığına dayanan tekniklerle yapılabileceği gibi, dengeleme işleminin daha hızlı olmasını sağlayan gerilim yükseltici teknikleri kullanılarak da yapılabilir.



Şekil-4.5. Zaman Anahtarlama Kondansatör Tekniği

Anahtarlama kondansatör tekniğinde kondansatörün bacaklarının bağlı olduğu anahtarlar, bataryalardan enerjisi yüksek olan bataryanın enerjisini kondansatörün üzerine depolayacak şekilde sola ya da sağa çekilir. Mesela özdeş iki batarya olan Pil-1 ve Pil-2 bataryalarıyla oluşturulmuş bir sistemde, Pil-2 bataryasının enerjisinin Pil-1 bataryasından yüksek olduğunu farz edelim. Bu durumda Pil-2'nin enerjisinin bir kısmını Pil-1'e aktarmamız gerekecektir. Bunun için önce kondansatör sağa doğru hareket ettirilir ve Pil-2'deki enerjinin bir kısmı kondansatöre aktararak kondansatör geriliminin Pil-2'nin gerilimine eşit olması sağlanır. Daha sonra kondansatör sola doğru hareket ettirilerek gerilimi yüksek olan kondansatörden Pil-1 bataryasına enerjinin bir miktarının transfer edilmesi sağlanır. Kondansatörden Pil-1 bataryasına enerjinin transferi işlemi tamamlandıktan sonra bu işlem döngüsü iki özdeş bataryanın enerjileri (eğer bataryalar özdeş değilse sadece gerilimleri) eşit olana kadar devam eder.

Harcamasız topolojiler şarjı batarya hücreleri arasında taşır. Tipik olarak aktif çalışırlar, linklerdeki dengeleme akımını belirlemek için bir kontrol stratejisi kullanırlar. Hücreden hücreye, hücreden yığına ve yığından hücreye topolojileri olarak sınıflandırılabilirler. Güç elektroniği dönüştürücüleri yığın boyunca şarjı taşımak için ve dengeleme linklerini gerçekleştirmek için kullanılır. Şekil-4.3'te örnekleri gösterilmektedir.

SOC dengeleme donanımının performansı dengelemede geçen zamana ve enerji kaybına göre değerlendirilebilir [160]. Dengelemede geçen zaman, verilen en kötü başlangıç link akımı ve dengesizlik durumu için dengelenmiş bir SOC oluşturmak üzere dengeleme topolojisinin gerektirdiği zaman olarak tanımlanır. Dengeleme işleminin enerji kaybı ise, en kötü başlangıç dengesizlik durumunu, dengelerken ne kadar enerjinin ısı olarak kaybolduğunu tanımlar. Bir topolojinin en kötü başlangıç dengesizlik durumu maksimum yüzdelik dengesizlik olarak tanımlanan kabul edilebilir başlangıç dengesizliklerinin tümü üzerinde yinelenir [160]. Karşılaştırma yapılırsa, aktif harcamalı dengeleme her iki performans ölçeğine göre pasif dengelemeden daha fazla iyileştirme yapar, çünkü enerji harcaması seçicidir ve sadece aşırı şarja sahip hücrelere uygulanır. Bunun gibi aktif harcamalı dengeleme tüm kabul edilebilir başlangıç dengesizlikleri için sabit bir zaman gerektirmesi nedeniyle t_{2b} 'ye göre bir kıyaslama referansı olarak görülebilir. Bazı harcamasız topolojiler

bu t2b kıyaslama testini karşılar ve e2b'yi anlamlı şekilde düşürür[160]. Bunun örnekleri kapasitif depolama elemanı topolojisi ve genellikle büyük batarya yığınları için uygun olan çoklu indüktör topolojisidir.

Aktif harcamalı dengeleme HEV ve EV gibi uygulamalarda popülerdir. Çünkü grupların hücre gerilimleri, sıcaklıkları vb. parametrelerin izlenmesi gerekir. Bu yüzden SOC tahmini ve dengeleme algoritmalarının altyapısı mevcuttur. Harcamalı dengeleme genel olarak harcamasız dengelemeden daha uygun maliyetli olarak görülür. Çünkü alternatifi olan harcamasız yöntemler, DA/DA dönüştürücüler anlamında daha fazla elemanlı linkler gerektirir[78]. Ancak harcamasız topolojiler batarya grubunda ortaya çıkan atık ısıyı düşürdükleri için batarya grubunun soğutmasını kolaylaştırır. Bunun yanında yeniden dağıtma fonksiyonunun uygulanma yeteneği bir batarya grubunun dengesiz enerjisini kullanmaya imkan tanır, bu da bazı hücreler kapasitesini kaybettiği zaman batarya ömrünü artırır.

5. HİBRİD ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Üçüncü bölümde değinildiği üzere özgül enerji, özgül güç, güvenlik, satın alınabilirlik gibi faktörlerin hepsini ideal şekilde karşılayan mükemmel bir enerji depolama sistemi yoktur. Deşarj/şarj oranı yönünden bataryalar daha yavaştır, çünkü yük transferi sadece redükleme (indirgeme) ve oksitleme tepkimeleri yoluyla ortaya çıkar. UK'lar bir taşıtın dinamik güç profilini sürdürebilecek güç yoğunluğuna sahiptir. Fakat saf batarya ile uzunca bir sürüşe yetecek kadar yüksek enerji yoğunluğuna sahip değildir. UK'lar lityum iyon bataryalara göre neredeyse sonsuz bir çevrim ömrüne sahiptirler. Çünkü batarya hücrelerinin bozulmasına neden olan kimyasal reaksiyonlara pek bağlı olmadan çalışırlar [161,162].

İki ya da daha fazla türden EDS cihazı bir HEDS oluşturmak için bağlanıp mevcut EDS'lerin değişik avantajları bir araya getirilebilir. Batarya sistemlerinin herhangi bir bileşimi, UK'lar, Yakıt hücreleri veya flywheeller bir HEDS için dikkate alınabilir [163,164]. UK'lar bir yakıt hücresi cihazıyla, mevcut yakıt hücresi teknolojisinin yavaş dinamik cevap oranını iyileştirmek için bir araya getirilebilir [165,166]. Flywheel'ler ve bataryalar da bir araya getirilip daha yüksek güç yoğunluğu olan flywheel ile güç talebi için bir offset oluşturulabilir [167,168]. Yakın zamanda yapılmış bir çalışmada, bir karma hücre olarak batarya ve UK'nın hücre seviyesinde bağlanması önerilmiştir [169]. HEDS'ler mikrogrid sistemlerindeki dağıtık enerji üretim sistemleri içinde geniş şekilde araştırılmaktadır. Bu araştırmalarda, fotovoltaiik sistemler, rüzgâr tribünleri, yakıt hücresi sistemleri, bataryalar, gelgit enerjisi jeneratörleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının iki veya daha fazlasının bir arada kullanımına çalışılmaktadır [170-173].

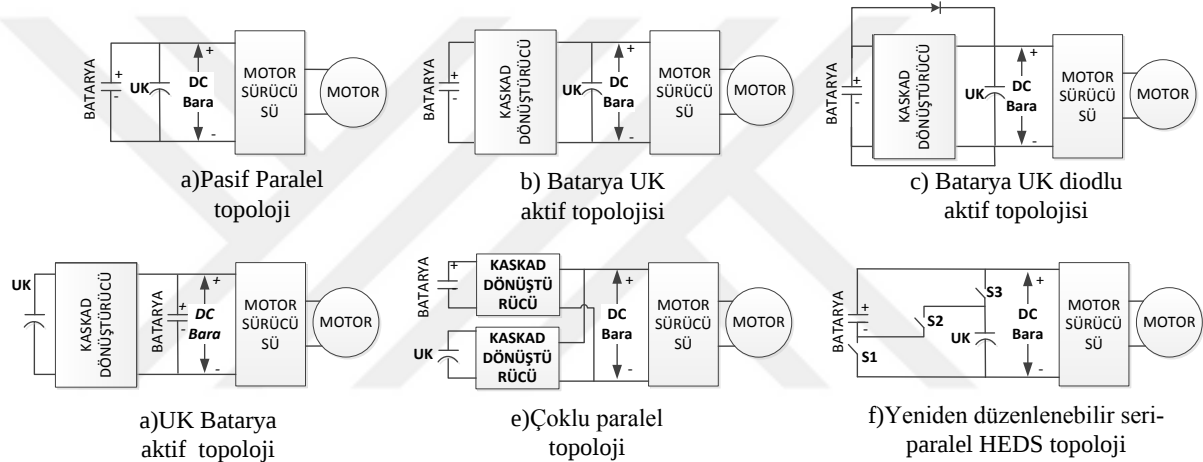
Otomotiv uygulamaları için yapılan çalışmalarda, bir batarya paketi ile bir UK grubunun bir arayüzle bileşimi sayesinde elektrikli taşıtlarda sürüş menzilinin anlamlı şekilde iyileştirilebildiği gösterilmiştir [174-177]. Bulanık kayma kipli bir kontrolör kullanarak batarya/UK üzerine yapılan bir çalışma sürüş menzilinde %30'dan fazla bir iyileştirmeye en çok umut vaad eden öneri olmuştur [175]. Ek olarak bir EA ve FHEA için batarya paketinin

maliyeti, taşıtın açık ara en pahalı bileşenidir. Bu yüzden bir UK grubu ile bir batarya paketinin bileşimi, üreticilere batarya paketinin boyutunu ve dolayısıyla maliyetini düşürme seçeneğini sunar. Prototiplerde kullanılan bazı dikkate değer HEDS çalışmaları, kurşun –asit bataryaların lityum-iyon, NiMH veya UK’lar ile mikro hibritlerde birleştirilmiştir [178]. Ek olarak kurşun-asit [162,163] ve zebra bataryalar da [179-182] elektrikli taşıtlarda gücü ve batarya ömrünü artırmak için UK’lar ile tamponlanabilir.

Bir HEDS’nin sağlayabileceği diğer bir üstünlük, bataryanın SOH değerini koruyabilmesi ve dolayısıyla batarya ömrünü uzatabilmesidir. Buradaki etki, DA baradaki tepe yük talebini UK üzerine offset yaparak bataryanın çoğu zaman sabit yük profilinde çalışmasına imkân tanınmasıdır. Daha önce tartışıldığı üzere Lityum iyon bataryalara tepe güç taleplerinin yüklenmesi bataryanın aşınmasını artırır yani bataryanın katı elektrolit ara yüzündeki Solid-Electrolyte Interface(SEI) çökelmelerini artırır [169]. Bu son tanımlama, batarya yaşlanmasına yol açan faktörlerin en önde gelenlerinden olarak bilinir [169,183-187]. Yakın zamanda yapılan bir çalışma ile fizik tabanlı batarya modelleri kullanılarak bir HEDS’deki lityum-iyon bataryanın SEI değerinin artmasıyla yaşlanması araştırılmıştır [169]. EA’lar için bir UK ile bataryanın bir araya getirildiği HEDS’de, enerjinin sınırlı bir miktarı UK ile depolanırken SOH_E bataryaya bağlı olarak hesaplanır. Benzer şekilde SOH_P hesaplaması UK’ya dayalı olarak hesaplanır. Çünkü bu tanım tepe gücü sağlamak için kullanılır. Batarya tabanlı bir enerji depolama sistemine kıyasla, bir HEDS SOH bozulmasını düşürecek ve batarya ömrünü iyileştirecek anlamlı bir potansiyele sahiptir [169,188,189]. UK’lar tarafından sağlanan SOH_P hemen hemen sabit kabul edilebilir. Çünkü uzun çevrim ömürleri vardır ve tepe güç taleplerine ve mikro çevrimlere karşı bataryaya koruma sağlayarak SOH_E bozulmasını sınırlarlar [190]. Araştırma eğilimleri bataryaların yaşlanma etkenlerini modellemeye odaklanmıştır [169,188,189]. Çünkü bataryaların çevrim ömürleri UK’lara göre kat kat daha düşüktür.

Batarya ve UK, 4. bölümde bahsedilen eşdeğer devre modeli [30,2,31-33] veya elektrokimyasal modeller[9] gibi yöntemler kullanılarak genellikle ayrı ayrı modellenir. SOC değeri, her iki depolama aygıtı için 4. bölümde bahsedilen Coulomb sayımı gibi yöntemler kullanılarak ayrı ayrı tahmin edilir[161,190-192] . İncelenen HEDS düzenlemesine bağlı

olarak bu iki çeşit model, güç elektroniği modelleri ara yüzüyle veya güç dönüştürücü tarafından iki kaynak arasındaki güç alışverişini taklit eden bir güç dengeleme fonksiyonu ara yüzüyle bir biriyle bağlanabilirler[190-192]. HEDS sistemleri başlıca iki ana grupta sınıflandırılır: Güç dönüştürücüsü gerektirmeyen pasif HEDS sistemleri ve DA/DA dönüştürücüler gerektiren aktif sistemler. Şekil-5.1'de başlıca HEDS topolojileri özetlenmiştir. Bu şekilde, ilk topoloji haricinde batarya ve UK grubu arasında bir güç elektroniği ara yüzü vardır.



Şekil 5.1. Başlıca HEDS topolojileri

5.1. Pasif Paralel Bağlantı

Bu topolojide Şekil-5.1(a) bağlantısında UK grubu batarya grubuna doğrudan paralel bağlanır. Her iki enerji kaynağının çıkış akımı, konverter mevcut olmadığından büyük oranda kendi dahili RC değerlerine bağlıdır [194,195]. Tipik olarak UK'ların empadansı daha düşük olduğu için ani büyük güç talebi olduğunda enerji önce tercihen UK'dan akacaktır. Bu bağlantının avantajları dönüştürücü bulunmaması nedeniyle daha küçük, hafif ve daha düşük maliyetli bir HEDS olmasıdır. Ek olarak DA bara gerilimindeki dalgalanmalar, DA baraya sadece batarya bağlı olmasına göre çok daha küçüktür.

Bu bağlantıda UK grubu, tepeleri zayıflatan ve düşüşleri düzelten alçak geçiren bir filtre gibi davranır. Batarya grubunun gerilimine sabitleneceği için UK uyumlu şekilde boyutlandırılmalıdır. Tipik olarak bu boyut alçak geçiren filtre karakteristiklerini kazandıran değerden daha yüksek olacaktır [196]. HEDS 'nin çıkışındaki gerilim, batarya grubunun tam şarjlı ve tam deşarjlı durumları arasında dalgalanabilen bataryanın deşarj eğrisini takip edecektir. Diğer bir dezavantaj UK gerilimi batarya grubununki ile sabitlendiği için UK'nın kullanılabilir gerilim aralığı düşürülecek ve böylece UK 'dan çıkacak güç sınırlanacaktır [194-196]. Bunun ötesinde UK yüke akım verir vermez gerilimi düşecektir, tam bu noktada UK'yı yeniden şarj için batarya akım sağlayacak aynı zamanda yükü de besleyecektir. Bu durumda, hem elektrik motorun tahrikini sağlayacak hem de kontrol devrelerini çalıştıracığından, nominal gücünden fazla beslemeyi batarya sağlayamayacaktır. Burada, temel olarak şarj/deşarj akımının sadece batarya/UK parametrelerine bağımlı olduğu bir RC devresi söz konusudur. Her ne kadar pasif paralel bağlantı basit, hafif, ucuz ve güç elektroniğinden kaynaklı karmaşıklık içermeme avantajları olsa da performanstan taviz verir ve tepe güç talebini bataryaya yükler [197].

5.2 Şönt Bağlantı veya Bir DA/DA Dönüştürücü Aracılığıyla Paralel Bağlantı

UK grubunun optimal kullanımı batarya grubu ile UK grubunun bir DA/DA dönüştürücü ara yüzü ile bağlanması ile mümkün olabilir. Önceden bahsedildiği üzere, bataryanın güç çıkışının sabit olması ideal olarak tercih edilir. Çünkü yüksek değişkenlikli sürüş çevrimleri boyunca gözlenen oldukça dinamik batarya akımı profilleri bataryanın aşınma ve bozulmasını artırabilecektir. Benzer şekilde UK'lar çok daha sağlam ve çok daha yüksek çevrim ömrüne sahip olduklarından faydalı frenleme ve ivmelenme periyotları boyunca ani yüksek güç taleplerini hemen hepsini UK'lara yüklemek faydalı olacaktır.

5.2.1. Batarya/UK Düzenlemesi

Aktif paralel bağlantının bu türünde Şekil-5.1(b), batarya grubu UK grubuna DA/DA dönüştürücü aracılığıyla bağlanır. Bu topoloji batarya grubuna DA baradan ayrışma imkanı tanır, böylece daha düşük uç geriliminde grup olabilir. Daha hafif ve daha ucuz olsun diye düşük gerilimli ve bu sayede daha küçük batarya grupları tercih edilir [196]. Bu düzenlemede UK grubu DA baraya doğrudan bağlanır. Bu yüzden UK alçak geçiren bir filtre gibi davranır [38]. Alçak geçiren bir filtre olarak davranmasına rağmen, UK'nın geriliminin tüm aralığı kullanılabilir çünkü batarya doğrudan kenetlenmemiştir. Örneğin, faydalı frenleme durumunda, batarya gerilimine göre UK grubunu daha düşük gerilimde tutmak doğal olarak enerjinin çoğunun UK'lara geri akmasına imkan tanıyacaktır. Aynı zamanda bu sistemin verimliliğini artıracaktır. Çünkü UK grubu tipik olarak batarya grubundan daha küçük bir eşdeğer seri direnç(ESR) oluşturacaktır. Ayrıca faydalı frenleme boyunca çoğunlukla görülen güç sıçramalarının çoğunu kabul edebilecektir. Ek olarak batarya ve UK gruplarının şarj ve deşarj oranları bir güç dönüştürücüsü kullanmak suretiyle kontrol edilebilir [34,39]. Batarya grubuna karşı UK'nın enerjisini, en uygun anlarda, batarya ve UK'nın deşarj/şarj olabileceği oranlarda desteklemesi için güç dönüştürücüsüne karar verme imkanı tanımak sistemin verimliliğine ve bir o kadar da bataryanın ömrünü uzatmaya anlamlı bir katkı sağlayabilir [30]. Fakat güç dönüştürücüsünün kontrol sisteminden kaynaklanan karmaşıklık bu düzenlemenin bir dezavantajı olabilir [194-198,200].

Aktif batarya/UK düzenlemesinin yeni bir çeşidi Şekil-5.1(c)' de gösterilmektedir [201]. Bir harici diyot içeren harici devre aracılığıyla bataryadan DA baraya enerji aktarılırken DA/DA dönüştürücü devre dışı (by pass) edilebilir. Batarya UK'yı, bataryanın geriliminden daha düşük gerilime sahip olduğu zaman şarj edecektir. Batarya, güç aktarımının ortalamasını sağlamak için böylece kullanılabilir ve buradaki oranın tipik olarak tepe gücün %10'u olduğu araştırmacılar tarafından iddia edilmektedir [198,201]. Böylece önceki aktif batarya/UK düzenlemesindeki güç dönüştürücüsüne göre bu topolojideki DA/DA dönüştürücü daha küçük olarak boyutlandırılabilir.

5.2.2. UK/Batarya Düzenlemesi

Bu tür aktif paralel bağlantıda UK Şekil-5.1(d)'de gösterildiği gibi DA/DA dönüştürücünün arkasına yerleştirilir. UK'nın bir DA/DA dönüştürücü kullanılarak DA baradan ayrıştırılması daha küçük UK grubunun tercih edildiği uygulamalarda arzu edilir [202]. Ayrıca bataryanın DA baraya doğrudan bağlanması kararlı bir DA bara gerilimini sürdürür. Zayıf yönü, bataryaya giren veya çıkan akım miktarının tam kontrol edilemediği büyük güç patlaması durumlarında ortaya çıkar. Bu tür bir seneryoda UK'yı doğrudan DA baraya bağlamak büyük enerji darbelerini daha iyi kabul ettiği için tercih edilebilir. Önemli fakat daha az göze çarpan bir zaaf ise DA/DA konverterin nominal gücüyle ilgilidir. UK grubu karışık sürüş senaryolarında taşıtlarda çok görülen büyük güç sıçramalarını besleyeceğinden dolayı, bu topolojideki güç konverteri çok daha yüksek nominal güce sahip olacak, yani aktif batarya/UK düzenlemesinden çok daha büyük boyutlu olması gerekecektir[203].

5.3. Çoklu Paralel Dönüştürücü Düzenlemesi

Hem batarya hem UK grubu birer DA/DA dönüştürücü ara yüzü ile DA baradan ayrıştırılabilir. Konverter çıkışları Şekil-5.1(e)'de gösterildiği gibi paralel bağlanır. Her iki enerji kaynağının gerilimleri ve güç akışları da birbirinden ayrıştırıldığı için bu düzenleme hem UK hem de bataryanın bağımsız kontrolüne imkan tanır. Bu sistemin başlıca avantajı hem batarya hem de UK gruplarının DA baradan daha düşük gerilime sahip olmalarına izin vermesidir. Böylece her iki enerji kaynağının boyutu ve maliyeti epeyce düşebilecektir [198]. UK ve batarya grupları DA baradan ayrıştırıldığı için bu düzenleme yukarıda bahsedilen aktif topolojilerin faydalarını birleştirir. Özel olarak bu düzenleme kararlı bir DA barayı sürdürürken UK'nın çalışılabilir gerilim aralığını maksimize eder [202]. Bu sistemde güvenilirlik artırılır çünkü depolama cihazlarından birisi arıza yapsa bile DA baradan güç sağlanabilecektir. Bu da iyi bir yedekleme stratejisi görevi yapacaktır [205]. Bu topolojinin temel eksiklikleri, kontrol sistemine karmaşıklık eklenmesi, iki güç konverterinin daha büyük

boyutlu olmasının gerekmesi ve güç elektroniğinin artışından kaynaklanan ilave maliyetidir [204].

5.4. Seri Paralel Yeniden Düzenlenebilir Yapı

Yenilikçi bir HEDS topolojisi yakın zamanda sunulmuş olup Şekil-5.1(f)'de gösterilmektedir [206]. Bu düzenleme, HEDS bağlantısını seriden paralele geçirmek için değişik çift yönlü anahtarları kullanır. Paralel düzenlemede düşük DA bara gerilimi gözlenir. Bu durumda batarya grubunun UK grubunu yeniden şarj etmesi mümkün hale gelir. Bu fonksiyonellik taşıt dururken çalıştığı esnada faydalıdır. Ek olarak, bu düzenleme ivmelenme ve faydalı frenleme süreçleri boyunca tipik olarak görülen yüksek talepler esnasında çok faydalıdır. Eğer S2 anahtarı kapatılırsa UK grubu batarya grubuna seri bağlı hale getirilir. Bu düzenleme DA bara geriliminin UK geriliminden daha yüksek veya eşit olması gerekirse faydalı olabilecektir. Çoğu durumlarda yüksek çalışma hızlarında tepe momentin elektrik motoru tarafından sürdürülmesine imkan tanınacaktır. Bu topolojiye bir güç konverterinin eklenmesi UK veya batarya grubunun DA baradan ayrıştırılmasına imkan tanıyacaktır. Böylece bu düzenleme, aktif batarya/UK ve UK/batarya topolojilerinin sağladığı faydaları birlikte sağlayabilecektir [206] . Böylesi bir düzenlemenin zayıf tarafı kontrolündeki karmaşıklık olduğu açıktır. Ancak az düşünülen diğer bir potansiyel eksiklik ise S1,S2 ve S3 anahtarlama modlarının potansiyel arıza ve aksaklıklarıyla ilişkili risklerdir. Bu topoloji ile ilgili kaynaklar sistemin DA barasının iki tarafına yerleştirilen anahtarların tam olarak ne olması gerektiğini belirtmemektedirler. Bu DA baralar yüzlerce volt ve amperleri işlemek için tasarlanırlar. Kontak erime ve aşınması arızalarıyla tanınan geleneksel elektromanyetik kontaktörlerin kullanımı sistemi riske atabilir. Yarı iletken anahtarlar kontrol karmaşıklığını artıracaktır fakat bu tür bir uygulamada daha güvenlidirler. Çünkü kontak erime riskleri yoktur.

6.DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

EA enerji depolama sistemleri kadar önemli olan bir diğer bileşen de güç elektroniği dönüştürücüleridir. Farklı gerilim seviyelerine sahip enerji depolama aygıtlarıyla DA bara arasında; DA bara ile motor sürücüsü arasında gerekli enerji akışı ve güç dönüşümünü sağlamak için yüksek güçlü DA-DA dönüştürücülere ihtiyaç duyulmaktadır.

EA enerji depolama aygıtlarının kontrolü için kullanılan güç biçimlendirme ünitelerinin tasarımı birçok yönden zorlu bir süreçtir. Bunlardan ilki, bu dönüştürücülerin yüksek güçte ve düşük gerilimde çalışması nedeni ile dönüştürücünün çalışma akımının oldukça yüksek değerlere çıkmasıdır. Bu yüksek akımlar sadece aktif ve pasif elemanlar üzerindeki elektriksel ve ısı stresi artırmakla kalmayıp, aynı zamanda dönüştürücünün veriminin düşmesine de sebep olmaktadır. İkincisi ise bu dönüştürücülerin geniş giriş gerilimi çalışma aralığıdır. Dönüştürücünün aktif ve pasif elemanları üzerindeki akım ve gerilim stresi çıkış ve giriş gerilimleri oranı (V_c/V_g) ile arttığı için bu dönüştürücülerde ihtiyaç duyulan geniş giriş gerilim aralığı, elemanlar üzerindeki akım ve gerilim streslerini artırmaktadır. Bu durum daha büyük boyutlarda aktif ve pasif elemanlar kullanılmasını gerektirmektedir. Ayrıca, yukarıda bahsedilen iki konuya EMI (Elektromanyetik girişim) gürültüleri de eklendiğinde bu dönüştürücüler yalnız ağır ve hantal değil, aynı zamanda yüksek maliyetli de olmaktadır. Bu nedenle EA kullanım için verimli, kompakt ve düşük maliyetli dönüştürücü tasarımlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Güç elektroniği teknolojisindeki ilerlemeye paralel olarak DA-DA dönüştürücüler ile ilgili yapılan çalışmalarda, ihtiyaçlara göre farklı dönüştürücü yapıları geliştirilmiştir.

Topolojisine göre tek yönlü veya çift yönlü, izoleli veya izolesiz, tek girişli veya çok girişli dönüştürücü devreleri bulunmaktadır. EA, enerji depolama sistemleri gibi birden fazla kaynağın birlikte kullanılmasına imkan tanıyan çift yönlü ve/veya çok girişli DA-DA dönüştürücüler önem kazanmaktadır. Özellikle EA'larda faydalı frenlemedeki

enerjinin geri kazanımı için kullanılan dönüştürücünün çift yönlü olması gerekmektedir. Bu dönüştürücüler izoleli ve izolesiz olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. İzolesiz olan dönüştürücülerin tasarımlarının sade olması nedeniyle güç elektroniği devre elemanı sayıları az ve kontrolleri de daha kolaydır. Bunun yanında izoleli olan türler, bir transformatör üzerinden elektriksel izolasyon sağlarken, yüksek maliyet ve kontrol kısıtlamalarını da içinde bulundurmaktadır. Çok girişli dönüştürücü topolojileri; kontrol zorlukları, karmaşık yapıları ve frenleme enerjisini kazanma sürecinde kısıtlı bir aralıkta çalışabilmeleri nedeni ile EA uygulamalarında tercih edilmemektedirler.

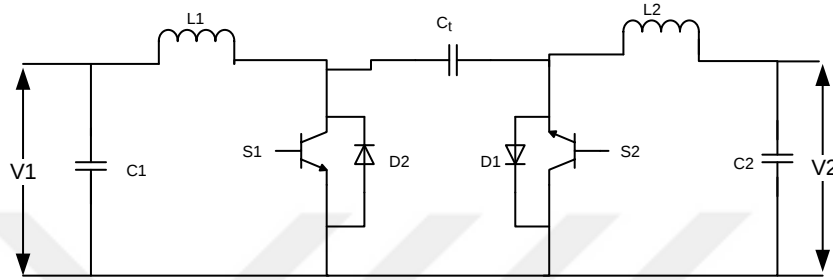
Bu nedenlerden dolayı, EA larda EDS'lerin basit topoloji ve ucuz maliyete sahip olan izolesiz ve tek girişli çift yönlü güç dönüştürücüleri ile birlikte kullanımı tercih edilir. Literatürde bu özelliklere sahip yaygın olarak kullanılan dört bağlantı topolojisi ön plana çıkmaktadır. Bu topolojiler aşağıda sırası ile incelenecektir

6.1. Cuk Dönüştürücü

Cuk dönüştürücünün temel devresi Şekil 6.1'de gösterilmektedir. Güç dönüştürücülerinin çoğu, giriş ve çıkış arasında indüktans kullanarak enerji transferi yapmaktadırlar. Bu nedenle dönüştürücülerde hesaplamalar, indüktans üzerindeki gerilim dengesine dayanmaktadır. Cuk dönüştürücü ise, kapasitif enerji transferini kullanır ve yapılan hesaplamalar kondansatörün akım dengesine dayanmaktadır.

Cuk dönüştürücü iki adet indüktans (L_1 , L_2), bir adet transfer kondansatörü (C_t), iki adet filtre kondansatörü (C_1 , C_2) ve iki adet güç anahtarından (S_1 , S_2) oluşmaktadır. Bu topoloji yükseltici ve düşürücü yapıların bir araya geldiği bir kombinasyona benzemektedir. Her iki yönde de (ileri ve geri) yükseltici ve düşürücü olarak çalışabilen bu dönüştürücünün en büyük dezavantajı, çıkış geriliminin giriş gerilimine göre terslenmesidir. Bir başka dezavantajı ise çıkış akımının C_t kondansatörü üzerinden geçmesidir. Bu durum hem kayıpların artmasına, hem de kondansatörün büyümesine yol açmaktadır. Bu nedenle C_t ,

yüksek dalgalanma akımı ile çalışabilen ve düşük bir eşdeğer seri dirence sahip olan bir kondansatör olarak seçilir.



Şekil 6.1. Cuk çift yönlü dönüştürücü devresi

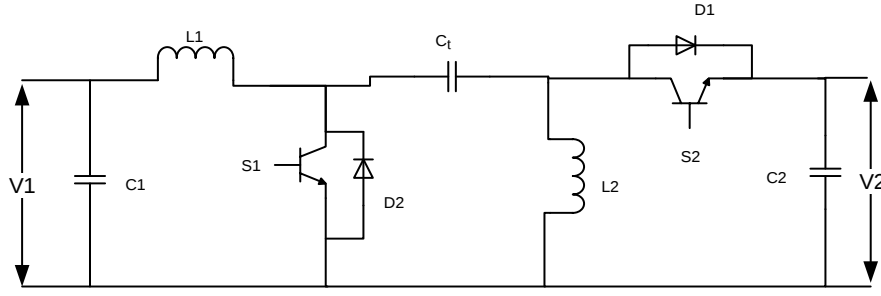
Bu topoloji girişten çıkışa güç aktarılırken (ileri yön) yükseltici modda çalışmaktadır. İleri yönde çalışma için, S1 ve D1 iletimde iken, S2 ve D2 kesimdedir. Devre çıkıştan girişe enerji aktarırken geri yönde düşürücü modda çalışır. Bu durumda ise S2 ve D2 iletimde iken, S1 ve D1 kesimdedir.

Dönüştürücünün giriş ile çıkış gerilimleri arasındaki ilişki Denklem (6.1)'den hesaplanabilir. Eşitlikte kullanılan negatif işaret, çıkış geriliminin girişe göre ters olduğunu göstermektedir. Devrenin yükseltici veya düşürücü çalışması, uygulanan darbe genişlik modülasyonunun doluluk oranına (δ) bağlıdır. Devre $\delta < 0,5$ seçildiğinde düşürücü; $\delta > 0,5$ seçildiğinde ise yükseltici olarak çalışmaktadır.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\delta}{1-\delta} \quad (6.1)$$

6.2. SEPIC ve Luo Dönüştürücüsü

İki farklı dönüştürücü yapısının (SEPIC ve Luo) birleştirilmesi ile elde edilmiş olan bu dönüştürücüye ait devre Şekil 6.2'de verilmektedir.



Şekil 6.2 SEPIC/Luo dönüştürücü devresi

Bu topoloji girişten çıkışa güç aktarılırken (ileri yön) yükseltici modda çalışmaktadır. İleri yönde çalışma için, S1 ve D1 iletimde iken, S2 ve D2 kesimdedir. Devre çıkıştan girişe enerji aktarırken geri yönde düşürücü modda çalışır. Bu durumda ise S2 ve D2 iletimde iken, S1 ve D1 kesimdedir.

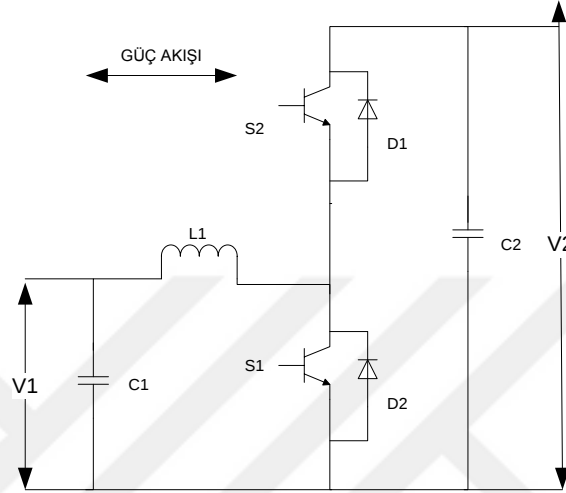
SEPIC/Luo dönüştürücüde, giriş ile çıkış arasında ilişki Denklem (6.1)'de verilmektedir. Eşitlikten açıkça görüldüğü üzere giriş ve çıkış kutuplanmaları aynıdır. Cuk dönüştürücüde olduğu gibi devrenin yükseltici veya düşürücü çalışması, 6.1'de ki eşitlikte görüldüğü üzere doluluk oranına (q) bağlıdır. Aynı şekilde $q < 0,5$ seçildiğinde düşürücü, $q > 0,5$ seçildiğinde ise yükseltici olarak çalışmaktadır.

6.3. İki Yönlü Yarım Köprü Dönüştürücü

Literatürde sıklıkla kullanılan diğer bir dönüştürücü devresi de Şekil 6.3'de verilen iki yönlü yarım köprü yapısıdır. Görüldüğü üzere, bu topoloji iki adet güç anahtarına, bir indüktansa, giriş ve çıkışa ait iki kondansatöre sahiptir. Güç akışı çift yönlü olup, yapısı itibariyle iki farklı çalışma moduna sahiptir. İleri yönde yükseltici olarak çalışan bu dönüştürücü, geri yönde yalnızca düşürücü olarak çalışabilmektedir.

Bu topoloji girişten çıkışa güç aktarılırken (ileri yön) yükseltici modda çalışmaktadır. İleri yönde çalışma için, S1 ve D1 iletimde iken, S2 ve D2 kesimdedir. Devre çıkıştan girişe

enerji aktarırken geri yönde düşürücü modda çalışır. Bu durumda ise S2 ve D2 iletimde iken, S1 ve D1 kesimdedir.



Şekil 6.3 Yarım-köprü Çift Yönlü Dönüştürücü Topolojisi

İleri yönde yükseltici olarak çalışma durumunda, çıkış ile giriş gerilimleri arasındaki ilişki Denklem (6.2)'de verilmektedir. DGM (Darbe Genişlik Modülasyonu) doluluk oranının altında bulunan rakamsal indisler, ait oldukları anahtarları göstermektedir.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{d_1}{1-d_2} \quad (6.2)$$

Geri yönde düşürücü olarak çalışması durumunda ise, çıkış ve giriş gerilimleri arasındaki bağıntı denklem (6.3) kullanılarak hesaplanabilmektedir:

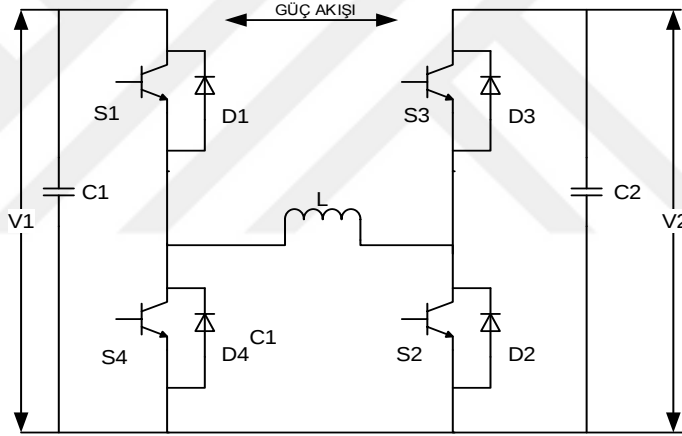
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = d_1 \quad (6.3)$$

6.4. Çift Yönlü Kaskat DA-DA Dönüştürücü

Bu topoloji, Şekil 6.4'de görüldüğü gibi iki adet yarım köprü yapının birleşiminden oluşmaktadır ve hem düşürücü hem de yükseltici olarak iki yönde de çalışabilmektedir.

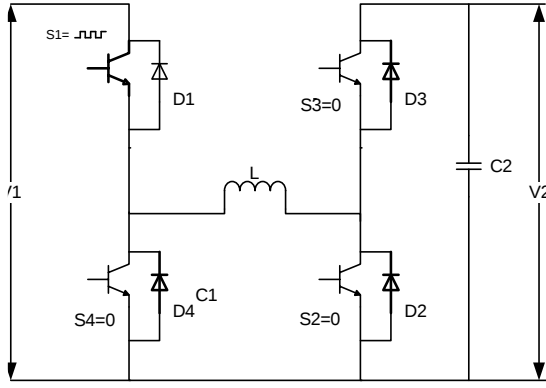
Tetikleme sinyali gönderilen güç anahtarlarına (S1,S2,S3,S4) bağlı olarak dört farklı durum ileri yönde düşürücü veya yükseltici, geri yönde düşürücü veya yükseltici oluşmaktadır.

Yarım köprü dönüştürücüden türetilen kaskat dönüştürücü, yarım köprü dönüştürücünün sağladığı yüksek verimi ve sahip olduğu ekonomik avantajı da barındırmaktadır. Bu sayede, literatürde kullanılan diğer çift yönlü topolojilere göre de üstünlük sağlamaktadır. EA motor sürücüsünde, hem ileri (motor sürme) yönünde hem geri (faydalı frenleme) yönünde yükseltici ve düşürücü olarak çalışabildiğinden, yarım köprü dönüştürücünün, faydalı frenleme enerjisini kazanmakta yetersiz kaldığı durumlarda (düşük hızlarda) iyi bir performans sergileyeceği öngörülmektedir

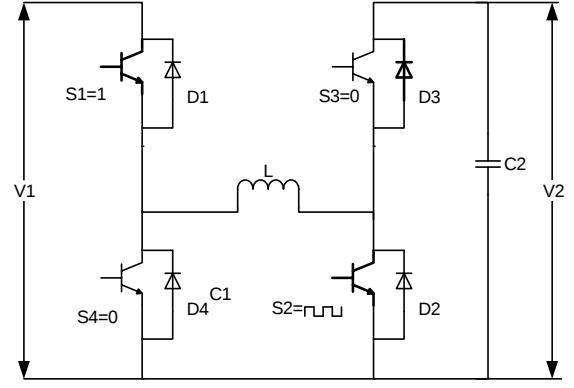


Şekil 6.4 Kaskat bağlı çift yönlü yükseltici ve düşürücü tip DA-DA dönüştürücü temel yapısı

Kaskat topolojinin ileri yönde çalışma durumları Şekil 6.5'de görülmektedir.



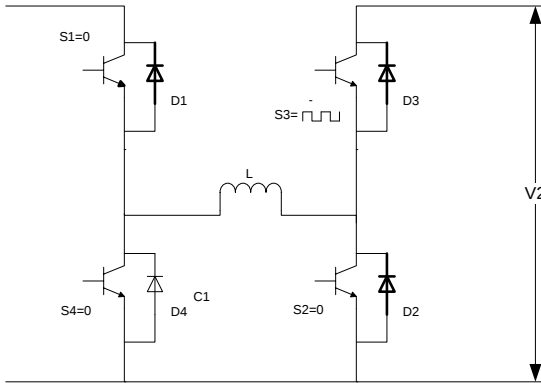
(a)İleri yönde düşürücü çalışma durumu



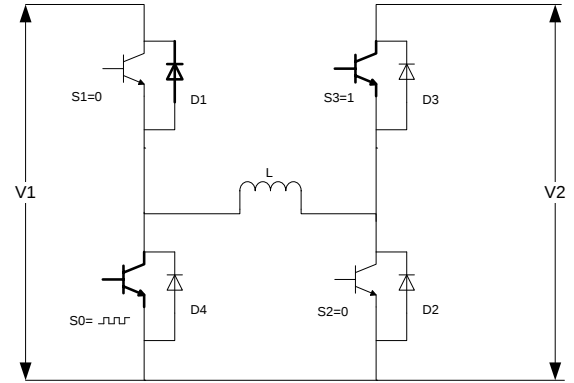
(b)İleri yönde yükseltici çalışma durumu

Şekil 6.5 Çift yönlü kaskat DA-DA dönüştürücü

Şekil 6.5-a'da görüldüğü gibi ileri yönde düşürücü olarak çalışma durumunda sadece S1 anahtarına tetikleme işareti (DGM) gönderilmektedir. İleri yönde yükseltici olarak çalışma durumunda, Şekil 6.5-b'de görüldüğü gibi S1 anahtarı sürekli iletimde kalmakta ve S4 anahtarına DGM işareti gönderilmektedir. Kaskat bağlı topolojinin geri yönde çalışması, ileri yöndeki çalışmaya benzer şekilde gerçekleşmektedir. Geri yöndeki çalışma durumları Şekil 6.6'da görülmektedir.



(a)Geri yönde düşürücü çalışma durumu



(b)Geri yönde yükseltici çalışma durumu

Şekil 6.6 Kaskad topolojinin geri yönde çalışma durumu

Sahip olduğu avantajları dikkate alındığında, bahsi geçen kaskad dönüştürücü tipinin, bir elektrikli aracın güç talebindeki tüm durumlara cevap verebilecek uygun bir seçim olacağı öngörülmektedir.

Bu topolojide çıkış ile giriş gerilimleri arasındaki oran Denklem (6.5) ile hesaplanır. Bu eşitlik, dönüştürücünün her iki yönde de çalışması durumunda geçerlidir. Burada DGM işaretlerinin doluluk oranlarının δ altında bulunan indisler, ilgili oldukları anahtarları göstermektedir. "d" ve "y" indisleri sırasıyla; düşürücü ve yükseltici anahtarları belirtmektedir.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\delta_d}{1-\delta_y} \quad (6.5)$$

Tablo-6.1’de iki yönlü DA-DA kaskat dönüştürücünün anahtarlama durumları ile oluşturulan çalışma modları gösterilmiştir. Kaskat dönüştürücü faydalı frenleme durumunda geri yönde yükseltici olarak da çalışarak açığa çıkabilecek enerji ile bataryayı şarj etmektedir. Kaskat dönüştürücü ileri yönde düşürücü çalıştırılarak motorun aracın yol parkuruna göre hareket etmesini sağlayacak şekilde motoru sürer. Kaskat dönüştürücü ileri yönde düşürücü çalıştığı durumda, akım kontrolörü çıkışına akım sınırlayıcı konularak bataryanın yol alma durumlarında aşırı akım çekerek zarar görmesi engellemektedir

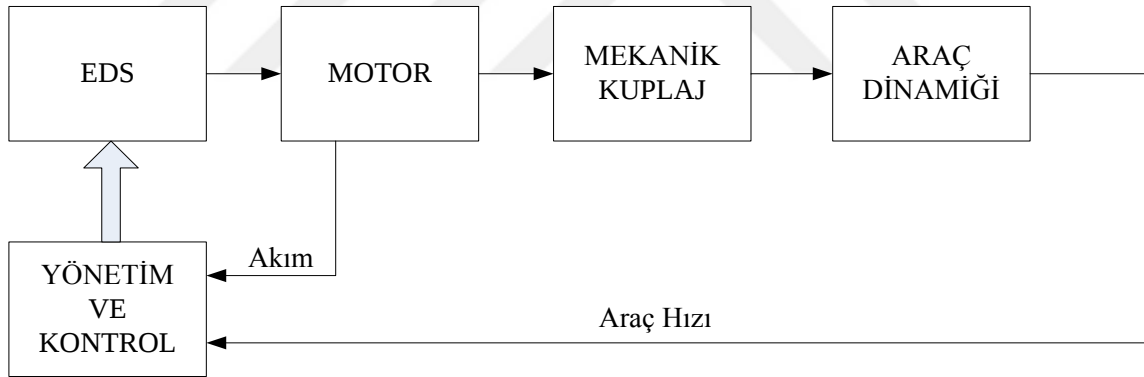
Tablo 6.1 Kaskad Dönüştürücünün Çalışma Moduna Göre Anahtar durumları

Anahtarlar	İleri Yön(Motor Sürme)		Geri Yön (Faydalı Frenleme)	
	Yükseltici Mod	Düşürücü Mod	Yükseltici Mod	Düşürücü Mod
S1	İletimde	DGM	Kesimde	DGM
S2	DGM	Kesimde	Kesimde	Kesimde
S3	Kesimde	Kesimde	İletimde	Kesimde
S4	Kesimde	Kesimde	DGM	Kesimde

7. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu bölümde iki yönlü DA/DA dönüştürücüler aracılığıyla hibritlenen batarya ve UK'dan oluşan bir HEDS'nin yönetimi tasarlanmış ve buradan beslenen bir EA sisteminin benzetimi amaçlanmıştır. Bu HEDS ile bir şönt DA motoru beslenmiştir. Bu motor, araç dinamiğine akuple edilerek belirli bir parkurda sürülmek üzere tüm bir EA sisteminin benzetimi ve performans incelemesi yapılmıştır.

Benzetim çalıştırılırken aracın otomatik sürüş altında referans hız profilini izlemek üzere kontrolü yapılmıştır. Hız kontrolöründeki hız hatası, sürücü tarafından gaz pedalı ile oluşturulan güç talebinin eşdeğeri olarak ele alınmıştır. EA sisteminin başlıca bileşenleri Şekil-7.1'de gösterilmektedir.



Şekil 7.1 Elektrikli araç sisteminin başlıca bileşenleri

7.1. Araç Dinamiği

Bir araç, hareketi sırasında birçok kuvvetin etkisine maruz kalmaktadır. Şekil 7.2'de gösterildiği gibi elektrikli aracın hareket edebilmesi için üstesinden gelmesi gereken kuvvetler gösterilmektedir. Bu kuvvetleri şöyle sıralayabiliriz: Yuvarlanma sürtünme kuvveti, havanın sürtünme kuvveti, yokuş direnci ve hızlanma kuvveti[207]. Burada;

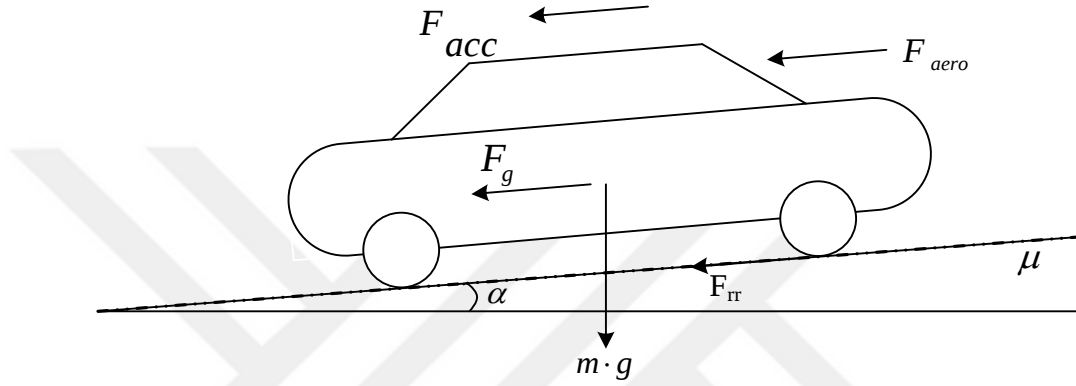
F_{aero} : Aerodinamik(havanın sürtünme) kuvvetini;

F_{rr} : Yuvarlanma sürtünme kuvvetini;

F_{acc} : İvmelenme kuvvetini;

F_g : Yokuş kuvvetini;

$F_{yük}$: Araca etki eden toplam kuvvettir.



Şekil 7.2 Bir aracın maruz kaldığı kuvvetler

Araçta oluşacak toplam yük kuvveti aşağıdaki şekildedir:

$$F_{yük} = F_{aero} + F_{acc} + F_g + F_{rr} \quad (7.1)$$

Motora gelecek toplam yük momenti şu şekildedir:

$$M_{yük} = F_{yük} * \frac{R}{G} \quad (7.2)$$

Burada R teker yarıçapını, G ise sabit oranlı vites kutusunun dönüştürme değeridir. Bu çalışmada dört tekere etki eden kuvvetler tek tekere indirgenip bileşke olarak toplam yük kuvveti hesaplanıp motora akuple edilerek benzetimler oluşturulmuştur.

7.1.1. Havanın Sürtünme (Aerodinamik) Kuvveti

Aracın hareketi sırasında, havaya karşı harekete bağlı olarak gelişen aerodinamik kuvvetler, taşıtın performansını etkilemektedir. Hava akışı, aracın hızına ve ortamın rüzgâr hızına bağlıdır. Taşıtın hızı, sayısal değer ve yön bakımından sürekli değişmektedir.

Rüzgârın hızı ise, bölgesel topoğrafya ve atmosferik koşullara bağımlı olarak değişmektedir. Tüm taşıt yüzeyine dağılmış olan basınçların bileşkesi olan aerodinamik kuvvet, basınç merkezi adı verilen bir noktaya etki etmekte, aracın kullanım ve yönlendirme karakteristiklerini olumlu veya olumsuz biçimde etkileyen bir yük kuvveti oluşturmaktadır. Aerodinamik kuvvet araç kararlılığı bakımından ihmal edilemeyecek önemli bir kuvvettir.

Araca etki eden aerodinamik kuvvet genellikle şu şekilde ifade edilmektedir.

$$F_{aero} = 0.5 * \rho * C * A * V^2 * \text{sign}(V)$$

(7.3) Burada ;

ρ : havanın yoğunluğu[kg/m³],

C: aerodinamik katsayı,

A: aracın karakteristik izdüşüm alanı [m²],

V: araç hızı,[m/sn] dir.

Aerodinamik kuvveti etkileyen ve belirli oranlarda araç imalatçısı tarafından kontrol edilen faktörler, aerodinamik direnç katsayısı ve taşıtın ön izdüşüm alanıdır. Tablo-7.1'de çeşitli tiplerdeki araçların aerodinamik direnç katsayıları verilmiştir [207].

Tablo 7.1 Çeşitli tiplerdeki araçların aerodinamik direnç katsayıları

TAŞIT	C katsayısı
Açık spor	0,5-0,7
Pikap	0,5-0,6
Arkası uzun araçlar	0,4-0,55
Farlar, arka tekerler, yedek lastik gövde içinde, kama biçimli gövde	0,3-0,4
Otobüs	0,6-0,7
Kamyon, treyler	0,8-1,5
Motosiklet	0,6-0,7

7.1.2. İvmelenme kuvveti

Newton'un II. Hareket Yasasına göre, bir kütlenin hızlanması veya yavaşlaması sırasında, bu hareketlere ters yönde atalet kuvvetleri oluşmaktadır. Newton'a göre bu kuvvet:

$$F_{acc} = m * a \quad (7.4)$$

Burada;

m: araç kütlesi[kg],

a: araç ivmesidir. [m/sn²]

7.1.3. Yokuş Kuvveti

Herhangi bir eğimli yolda karşılaşılan ve hareketi eğim açısına göre zorlayarak veya destekleyerek etki eden kuvvettir. Bu kuvvet:

$$F_g = m * g * \sin \alpha \quad (7.5)$$

Burada ;

m: araç kütlesi[kg];

g: yer çekim ivmesini [m/sn²]

α : yokuş eğim açısıdır[rad.].

7.1.4. Yuvarlanma Sürtünme Kuvveti

Tekerler, tahrik motorundan aldıkları dönüş kuvvetini aracın ağırlığı ile temasın sağlandığı zemine iletmektedirler. Bu temas anında hareket boyunca bir sürtünme kuvveti

oluşmakta ve alınan dönüş enerjisinin bir kısmı bu sürtünme sırasında kaybolmaktadır. Araç, teker ile temas ettiği yol arasında oluşan sürtünme aracılığıyla ilerleyişini veya frenlemeyle duruşunu sağlayabilmektedir. Bu sürtünme kuvveti aracın ağırlığına ve yola bağlıdır. Tekerlek yuvarlanma sürtünmesi de denilen bu kuvveti, yaklaşık sabit bir değer olarak kabul edilir ki buna Coulomb sürtünmesi de denir. Bu kuvvet :

$$F_{rr} = \mu_{rr} * m * g \quad (7.6)$$

Burada μ_{rr} , yuvarlanma sürtünme katsayısını belirtir.

Bir araç tahrik edilirken yukarıda bahsedilen balıca kuvvetleri yenerek hareket etmeye başlar. Bu çalışmada araç virajsız yol şartlarında test edileceğinden araç dinamiği için toplam yük kuvveti hakkında yukarıda verilen kuvvetler yeterli görülmektedir [208].

Tablo-7.2’de benzetim çalışmalarında kullanılacak araç parametreleri ve değerleri verilmiştir.

Tablo-7.2 Elektrikli araç modelinde kullanılan değişkenler ve değerleri [207]

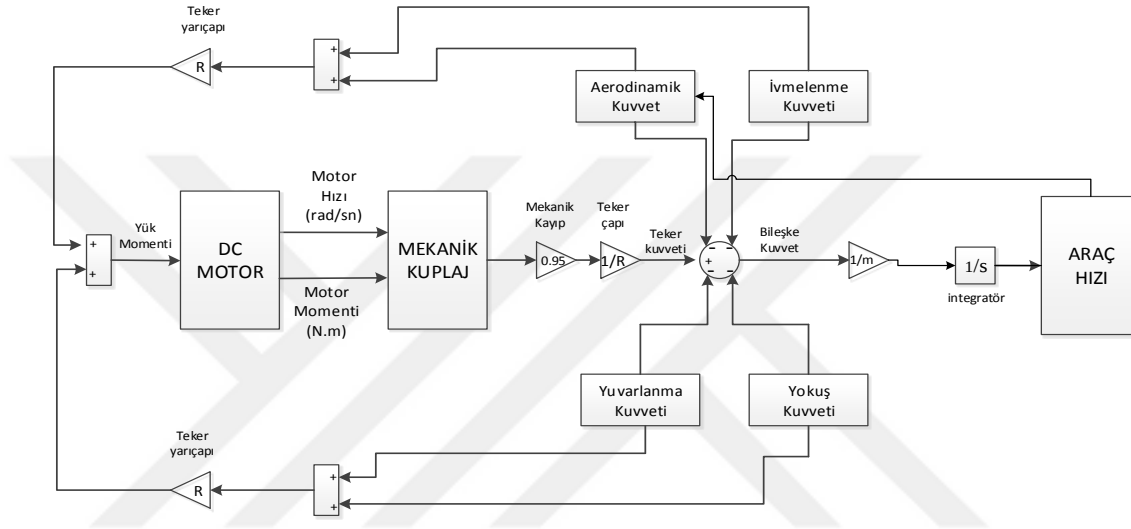
Parametre İsmi	Birim	Değer
Hava yoğunluğu(ρ)	kg/m ³	1,2
Aerodinamik katsayı (C)	-	0,3
Araç izdüşüm alan(A)	m ²	2,2
Araç kütlesi(m)(batarya kütlesi dahil)	kg	1100
Yer çekim ivmesi(g)	m/sn ²	9,81
Yuvarlanma sürtünme katsayısı(μ_{rr})	-	0,02
Teker yarıçapı (R)	m	0,3

7.2. Mekanik Kuplaj

Aktarma organı, elektrikli aracın tahrik motorundan elde edilen mekanik kuvveti tekerlere aktaran kısımdır. EA’lardaki aktarma organı, içten yanmalı motorlara sahip

araçlardan ve hibrit EA'lerden daha basittir. Bu sebeple yapılan çalışmada sabit oranlı vites kutusu kullanılmıştır.

Şekil-7.3'de elektrikli araca etki eden kuvvet bileşenleri ve bu bileşenlerin karşı koyduğu tahrik kuvvetinin teker hızını oluşturması blok şema halinde verilmektedir.



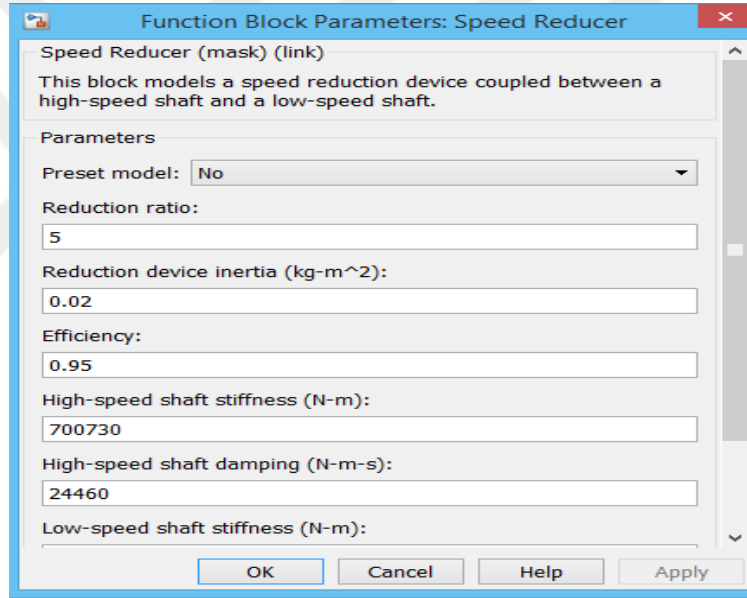
Şekil-7.3 Araç mekaniğinin matematiksel modeli

Yük kuvvetlerinin toplamı, teker yarıçapı ile çarpılarak tahrik motoruna yük momenti olarak bağlanıp mekanik sistem benzetimi kurulmuştur. Kısım 7.1'de anlatıldığı üzere araçlara etki eden 4 temel kuvvet vardır. Şekil-7.3' de görüldüğü gibi motor milinin ürettiği kuvvete karşı koyan dış kuvvetler (aerodinamik, ivmelenme, yokuş, yuvarlanma) çıkarılarak motora etki edecek yük kuvveti hesaplanır. Bu kuvvet teker yarıçapı ile çarpılarak motora etki edecek yük momenti hesaplanmış olur.

EA'larda, enerji kaynağı olarak batarya ve fren enerjisi (regeneratif frenleme) kullanılmaktadır. Araç, artı yönde ivmelenirken batarya elektrik motoruna enerji kaynaklığı yapmakta, araç eksi yönde ivmelenirken fren kuvveti elektrikli motorun bir generatör gibi çalışması ile bataryanın dolmasını sağlamaktadır. Bu şekilde iki yönlü mekanik ve elektriksel enerji akışının olması için mekanik kuplaj şarttır. Elektrik motorlarının hız kontrol aralığı geniş olduğu için sabit oranlı vites kutusu yeterli görülmüş ve dönüştürme oranı 5 olarak belirlenmiştir. Şekil-7.3'de elektrikli araca etki eden dış kuvvetler, tahrik motoru mekanik

kuplaja ait blok şema verilmektedir. MATLAB/Simulink ortamında benzetim çalışmasında mekanik kuplajı sağlamak için MATLAB'ın 'SimPowerSystems' toolbox içinden 'Speed Reducer' bloğu alınarak elektrik motoru ile araç mekaniği arasındaki mekanik kuplaj sağlanmıştır.

Şekil-7.4'de kullanılan mekanik kuplajın parametreleri verilmiştir. Sabit oranlı vites kutusunun dönüştürme oranı (Reduction ratio) kısmına 5 değeri girilmiştir. Mekanik kuplajda %5' lik bir kayıp değeri ile %95 verimle çalıştığı tipik değerlerle uyumlu olarak kabul edilmiştir [207].



Şekil-7.4 MATLAB/Sumilink ortamında kullanılan mekanik kuplaj parametreleri

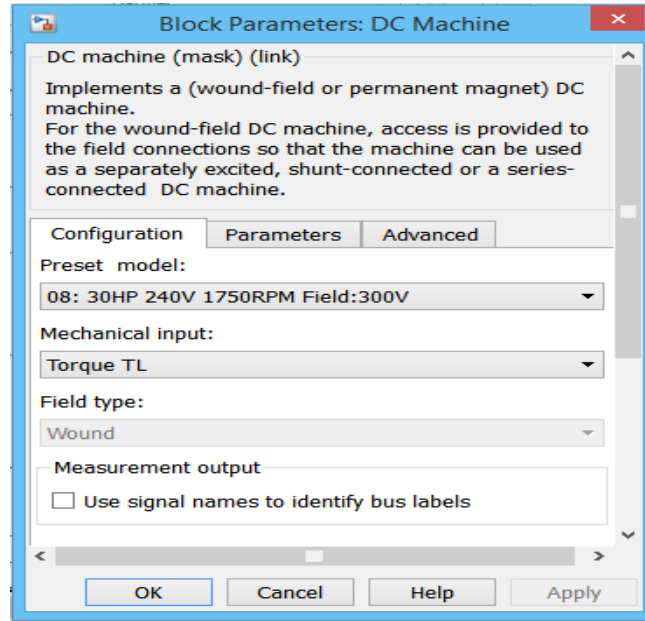
Mekanik kuplaj şu şekilde çalışmaktadır: Motor hızı ile araç hızı girilerek dönüştürme oranıyla ters orantılı olarak çıkışında tekerlere iletilen tahrik momentini üretir. Bu benzetim çalışmasında matematiksel model üzerinde tüm kuvvetlerin hesabı tek bir teker üzerine indirgenerek yapılmıştır. Şekil-7.3'de görüldüğü gibi motor momentinden elde edilen moment değerini teker yarıçapına bölerek motordan elde edilen kuvvet bulunmaktadır. Bir dişli kutusu (şanzıman) olan mekanik kuplaj biriminin dönüştürme oranı 5 olarak seçilmiştir. Dişli kutusu çıkış milinde mekanik kayıp da göz önünde bulundurmak üzere hız 5 kat düşmekte moment 5 kat artmaktadır. Bu sistemde diferansiyel ve aks gibi mekanik parçalar

kullanılmadığından %5 yeterli bir oran olarak kabul edilmiştir. Şekil-7.3'de görüldüğü gibi motor momenti 0.95 değeriyle çarpılıp teker yarıçapına bölünerek tekere iletilen kuvvet elde edilir.

7.3. Elektrik Motoru Seçimi

Bu çalışmada MATLAB/Simulink içerisinde DA şönt motora ait hazır model kullanılmıştır. Kullanılan motorun parametreleri Şekil 7.5'de verilmiştir.

EA'lar söz konusu olduğunda genellikle ilk akla gelen motorlar doğru akım motorlarıdır. Bu motorların moment-hız karakteristikleri tahrik ihtiyaçları için uygundur ve hız kontrolleri basittir. Doğru akım (DA) motorları, hız kontrolünün kolay olması nedeni ile uzun bir süre yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak üretim maliyetlerinin yüksek olması, tozlu çalışma şartlarında kolay aşınmaları gibi dezavantajları da vardır. Ayrıca doğru akım motorları fırça-kolektör düzeneği içerir ve bu nedenle fazla bakım gerektirir. Sargısız rotorlu AA motorlar ve özellikle asenkron motorlar sağlamlığıyla endüstride DA motorların yerini aldığı gibi EA'lar içinde benzer bir sağlamlık tercihinin olduğu söylenebilir. Ancak ticari pazarda satışta olan bazı küçük ve EA'larda halen DA motor kullanılmaktadır [30].



Şekil-7.5 MATLAB/Simulink DA motor parametreleri

Araç dinamiğini yeterince kontrol edebilecek mekanik enerjiyi en iyi moment kontrollü motor sağlayabilir. AA motorlarda vektör kontrol algoritması ile sağlanan moment kontrolü DA Şönt motorun doğasında vardır. Bu çalışmada, moment kontrolü sağlamak amacıyla DA şönt motorun uyarma sargısı doğrudan bataryadan ve yaklaşık nominal akımla beslenerek kullanılacaktır. Hız kontrolü ise doğrudan endüvi akımıyla amper başına maksimum moment alınarak sağlanacaktır.

7.4. Batarya Parametreleri ve Ağırlığı

Bu çalışmada EDS için standart Lityum-iyon batarya türü seçilmiştir. Seçilen bataryanın çalışma değerleri ve parametreleri aşağıdaki tabloda verilmektedir. Literatüre göre ortalama özgül enerji değeri 80 Wh/kg olarak alınmıştır[35]. Benzetim çalışmalarında kullanılan batarya parametrelerinin değerleri Tablo-7.3'de verilmiştir.

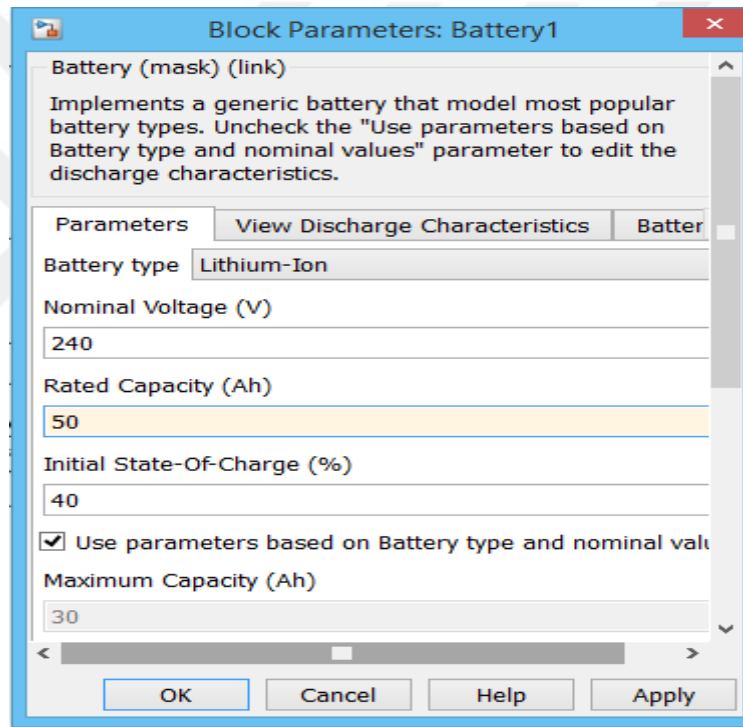
Şekil 7.6'da MATLAB/SimuLink ortamında benzetim çalışmasında kullanılan bataryanın parametreleri verilmiştir. Batarya eşdeğer devresi ve parametreleri, MATLAB/Simulink SimPowerSystems Toolbox içinde bulunan modelinden faydalanılarak oluşturulmuştur. Bu çalışmada gerilimi 1,2 V ve kapasitesi 5Ah olan Lityum iyon hücreler kullanılmıştır. Batarya çalışma gerilimi 240 V ve kapasitesi 50Ah olduğundan batarya grubundaki hücre sayıları:

- Seri koldaki hücre sayısı= Çalışma gerilimi/Hücre gerilimi= $240V/1.2V=200$ adet olarak;
- Paralel kol sayısı = Batarya kapasitesi /hücre kapasitesi= $50Ah/5Ah= 10$ paralel kol olarak hesaplanmıştır.

Böylece, batarya grubu her birinde 200 adet hücre olan 10 tane paralel koldan toplamda 2000 hücreden oluşmaktadır.

Tablo-7.3 Benzetim çalışmalarında kullanılan batarya parametreleri

Parametre	Değeri
Batarya Gerilimi(V)	240
Batarya Kapasitesi(Ah)	50
Özgül Güç (Wh/kg)	80
Kütle (kg)	150



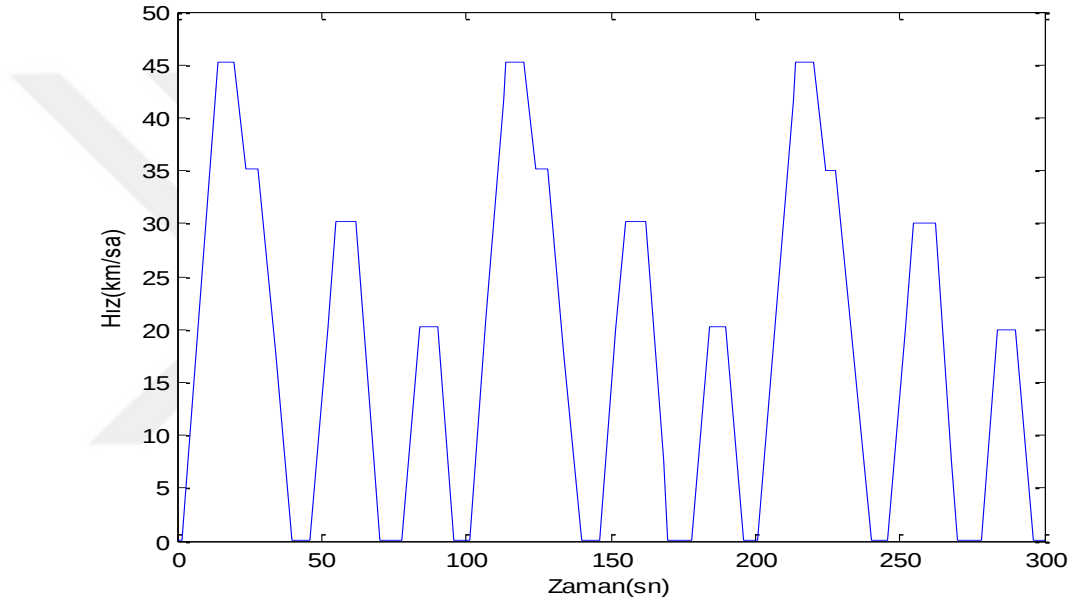
Şekil-7.6 MATLAB/Simulink ortamında kullanılan batarya parametreleri

7.5. Test Parkuru

Şekil-7.7’de kullanılan test parkurunun hız profili görülmektedir. Bu hız profili, ECE-15 standardı esas alınarak oluşturulmuştur. Bu çalışmada aynı hız profili yolun eğimi düz, iniş ve çıkış olduğu şartlar için üç defa yinelenip sürülmek üzere test parkuru oluşturulmuştur. Bu parkurda, araç mekaniğinde olduğu gibi, yolun virajsız olduğu kabul

edilmiştir. Bu test parkurunda; ilk 0-100 sn arasında araç düz yolda; 100-200 sn arasında araç, 3° eğimli bir rampada tırmanma hareketi; 200-300 sn arasında ise -3° eğimli bir rampada iniş hareketi esas alınarak benzetimlere gidilecektir.

Bu parkurda yapılan sürüş testlerinde batarya ve motor için ısıl zorlanma ihmal edilmektedir.



Şekil 7.7. Elektrikli araç test parkuru. (ECE-15 benzeri bir hız profili, 0-100sn eğimsiz, 100-200 sn. arası $+3^\circ$ eğimli, 200-300 sn. arası -3° eğimli olarak üç defa tekrarlanıyor.)

7.6. DA/DA Kaskat Dönüştürücü ve Enerji Yönetimi

Bu sistemde EDS(Batarya/UK) önünde iki yönlü bir DA/DA kaskat dönüştürücü kullanılmıştır. İki yönlü hem düşürücü hem de yükseltici çalışabilen kaskat dönüştürücünün şematik gösterimi Şekil-7.8’de görülmektedir. Kaskat dönüştürücü S1-S4 güç anahtarlarına gönderilen sinyale bağlı olarak dört farklı durumda (ileri yönde düşürücü veya yükseltici, geri yönde düşürücü veya yükseltici) çalışmaktadır.

Kaskat dönüştürücünün minimum L ve C değerleri aşağıdaki formüllerle hesaplanır

$$L_c = \frac{D*(1-D)*R}{2*f}; \quad (7.7)$$

$$C_c = \frac{D}{2*f*R}; \quad (7.8)$$

Doluluk oranı 0,5, çıkış direnci motorun hafif yüklü durumu için yaklaşık 10 Ω ve anahtarlama frekansı $f=10$ kHz seçilerek denklem (7.7 ve 7.8'e göre hesaplanan L_c ve C_c kritik değerleri;

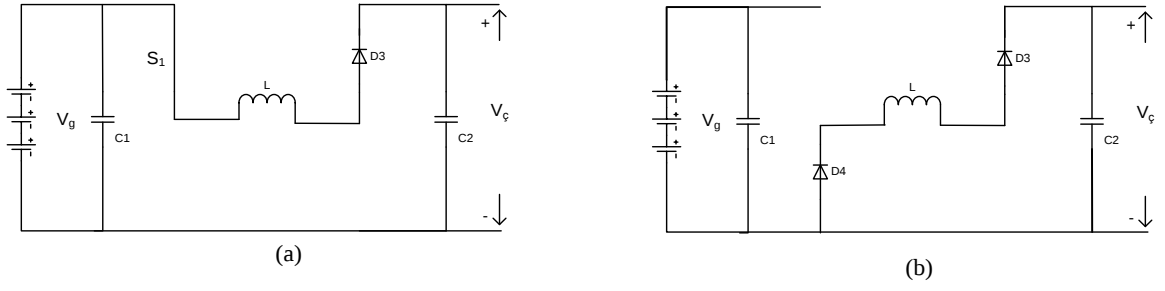
$$L_c = \frac{0.5*0.5*10}{2*10000} = 1,25\mu H;$$

$$C_c = \frac{0,5}{2*10000*10} = 25\mu F;$$

olarak bulunur.

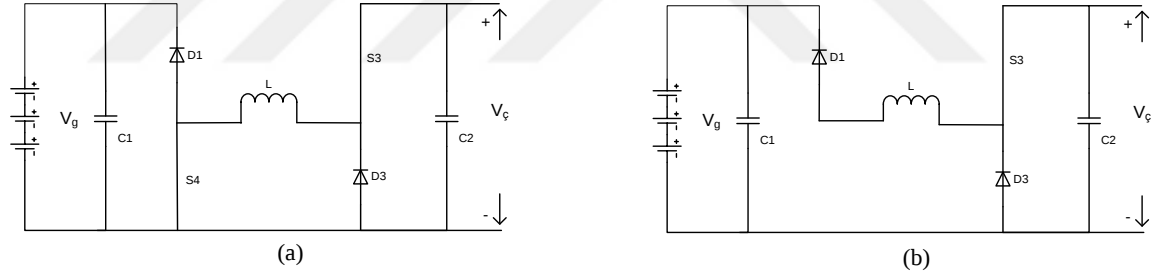
Çift yönlü DA/DA dönüştürücünün kritik L_c, C_c değerleri hesaplanırken akım dalgalanmasının düşük olması tercih edilmiştir. Böylece hem verimlilik hem de batarya ömrünün yüksek olması amaçlanmıştır. Deneme yanılma yoluyla ileri, geri ve düşürücü, yükseltici modlarda kaskat dönüştürücü motor ve araç mekaniği beslemek üzere testleri yapılmıştır. Akım ve gerilim dalgalanmalarının en az görüldüğü $L_c=5mH$, $C_c=2000\mu F$ değerleri seçilerek dönüştürücünün benzetim çalışmalarında kullanılmıştır [210].

Sürüş modunda, batarya gerilimi motorun endüvi geriliminin nominal değerine eşit olduğu için kaskat dönüştürücü ileri yönde düşürücü çalıştırılmalıdır. Bu durumda S1 anahtarı DGM modunda ve S2,S3,S4 anahtarlarının kesimde olması gerektiği Tablo-6.1'de görülmektedir. S1 anahtarı DGM işareti ile tetiklendiği kaskat dönüştürücünün iletim durumu Şekil-7.8(a)'da gösterilmiştir. S1 anahtarı iletimdeyken çıkış akımı D3 diyotu üzerinden iletim oluşmaktadır. Şekil-7.7(b)'de ileri yön düşürücü durumunda S1 anahtarının kesimde olması durumu gösterilmektedir. S1 kesimdeyken D3-D4 üzerinden akım dolaşmaktadır.



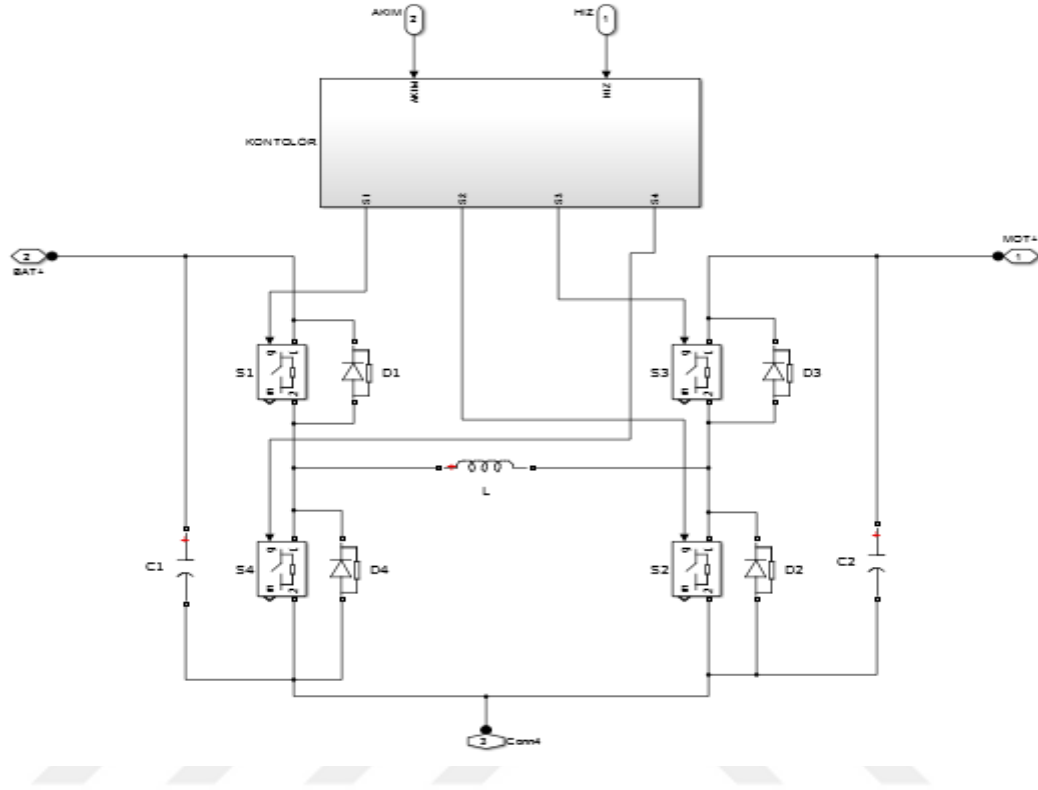
Şekil 7.8. Kaskat Dönüştürücü ileri Yön Düşürücü Modunda (a)S1 iletimde, (b).S1 Kesimde

Şekil-7.9(a)'da görüldüğü gibi geri yön yükseltici durumunda çıkış gerilimi S3 iletimdeyken S4 anahtarı tetiklenerek kontrol edilmektedir. Şekil-7.9(b)'de kaskat dönüştürücünün geri yön yükseltici durumunda S4 anahtarının kesimde olması durumunda enerji aktarımı D1-D3 diyotu üzerinden bataryaya doğru olmaktadır.



Şekil 7.9. Kaskat dönüştürücü geri yön yükseltici modunda (a) S4 İletimde, (b) S4 Kesimde

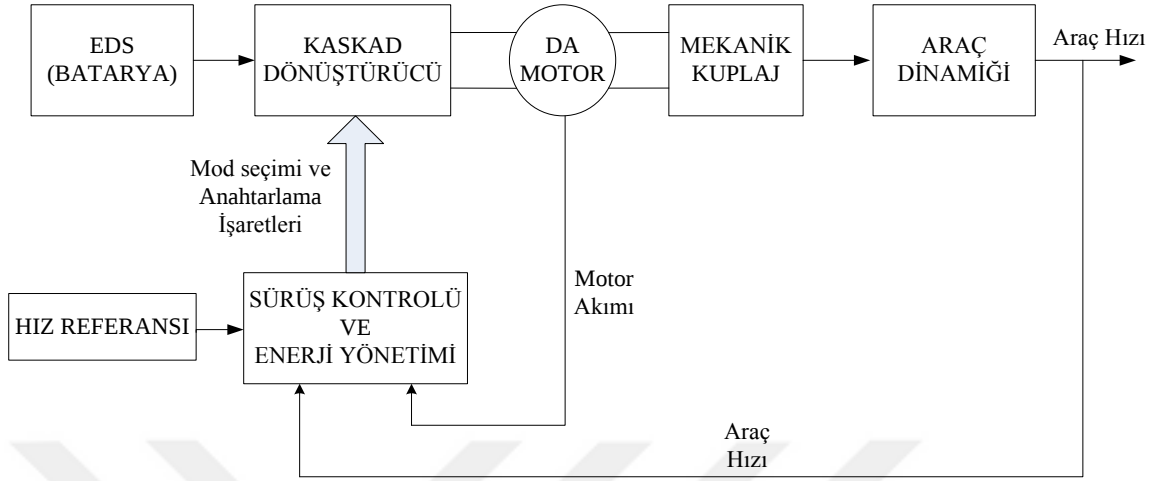
Şekil-7.10'de MATLAB/Simulink ortamındaki kaskat dönüştürücünün modeli verilmiştir. Bu çalışmada S1-S4 güç anahtarları ideal anahtar olarak seçilmiştir.



Şekil 7.10. MATLAB/SimuLink Programında Oluşturulan Kaskat dönüştürücü

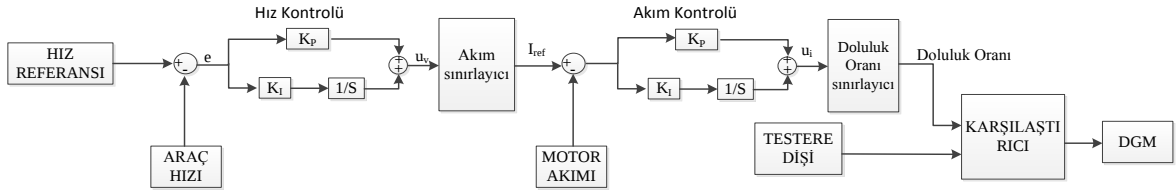
7.7. Saf Batarya ile Sürülen EA Benzetimi

Bu çalışmanın esas amacı olan karma enerji depolama sisteminden beslenen EA sisteminin karşılaştırmalı incelenebilmesi için, saf batarya ile beslenen EA sistemi öncelikle incelenmelidir. Sadece bataryadan beslenen ve kaskat dönüştürücü aracılığıyla enerji yönetimi ve sürüş kontrolü yapılan EA sisteminin blok diyagramı gösterimi Şekil-7.11’de gösterilmektedir. Bu sistem batarya, iki yönlü kaskat dönüştürücü, DA motor ve mekanik kuplajlı araç dinamiği ve kontrol birimlerinden oluşmaktadır.



Şekil 7.11. Sadece bataryadan beslenen ve kaskat dönüştürücü aracılığı ile sürülen elektrikli araç sistemi

Benzetimi yapılan EA Şekil-7.7’de verilen parkurdaki hız profilini takip etmektedir. Elektrikli aracın hızı ve motorun hız akım değerleri geribesleme alınarak, PI kontrolörler aracılığıyla motorun hızı ve akımı, iç içe iki tane çevrim ile kontrol edilmektedir. Elektrikli aracın kontrolör yapısı Şekil-7.12’de gösterilmiştir. Hız kontrolörünün çıkışında sınırlayıcı nominal akımın yaklaşık 1.25 katı değerinde akım referansını 125 A sınırlar. Bu sayede, aşırı akım çekmeyerek hem batarya hem motor korunarak yol alma ve sürüş sağlanmaktadır. Akım kontrolörünün çıkışında ise DGM işaretinin doluluk oranı 0.9 ile sınırlanarak belirlenir. 10 kHz testere dişi taşıyıcı dalga ile doluluk oranı karşılaştırılarak sabit frekanslı DGM işareti anahtarlara gönderilir.



Şekil 7.12. Elektrikli aracın hız ve akım PI kontrolörleri

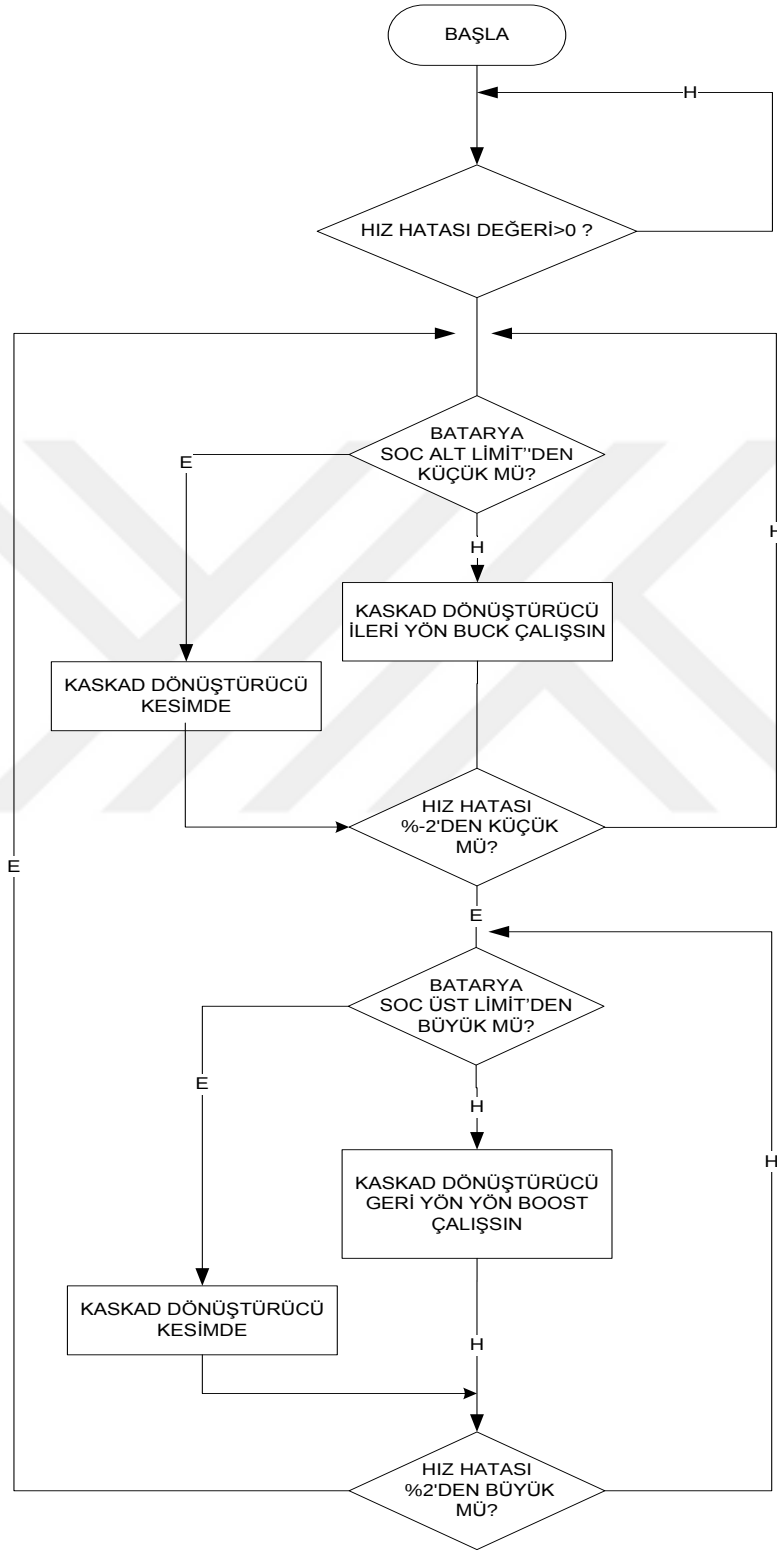
Şekil-7.12’deki kontrolör yapısının bir benzeri geri yön yükseltici içinde mevcuttur. Kontrolör kazançları ve sınırlayıcı değerler Tablo 7.4’te verilmiştir.

Tablo-7.4. Saf bataryadan beslenen elektrikli aracın kontrolörlerinin PI değerleri

	Hız Kontrol Çevrimi			Akım Kontrol Çevrimi		
	KP	KI	Akım Limiti	KP	KI	Doluluk oranı Limiti
Sürüş	100	0,001	120	0,03	10^{-4}	0,9
Fren	10	0,001	120	0,1	10^{-4}	0,9

Şekil-7.12’de görüldüğü gibi motorun hız ve akım değerleri, iç içe PI kontrolörler tarafından dönüştürücü anahtarlarının doluluk oranları belirlenmek suretiyle kontrol edilmektedir. Birinci çevrim hız; ikincisi de akım kontrol çevrimidir. Elektrikli aracın hız kontrolü, hız hatası PI kontrolör tarafından işlenerek çıkışı akım referansı olan ve gerilim kontrolüne eşdeğer sayılabilecek dış çevrimde yapılmaktadır. Otomatik sürüşte hız hatasının anlamı, araç sürücüsünün gaz pedalıyla oluşturduğu güç talebinin eşdeğeri demektir. Akım hatasının girildiği ikinci PI kontrolörün çıkışındaki kontrol işareti ile de dönüştürücünün DGM işaretinin doluluk oranı belirlenir. Doluluk oranı işareti testere dişi taşıyıcı dalga ile karşılaştırılarak elde edilen DGM işareti dönüştürücü anahtarlarına gönderilmektedir.

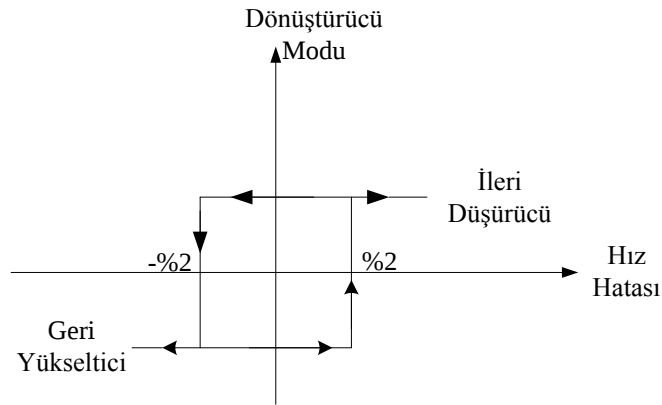
EA’ta sürüş ve frenleme modlarını içinde bulunduran, otomatik sürüş kontrolünün ve enerji yönetiminin akış diyagramı Şekil-7.13’de gösterilmektedir.



Şekil-7.13 Saf bataryadan beslenen elektrikli aracın enerji yönetiminin ve sürüş kontrolünün akış diyagramı

Elektrikli aracın enerji yönetim modu, hız hatasına bağlı olarak histerezis aralığı $\pm 2\%$ olan mod seçme kontrolörü tarafından yapılmaktadır. Hız hatası $+2\%$ 'den büyükse EA, ileri yönde düşürücü modda çalışan dönüştürücü ile sürüş modunda çalıştırılmaya başlar. Motor, dönüştürücünün ileri yön düşürücü modunda aracı sürdüğü zaman, PI kontrolör tarafından doluluk oranı belirlenen DGM tetikleme işareti, S1 anahtarına uygulanırken S2,S3,S4 anahtarları kesimdedir. Bu arada hız hatasının -2% 'den küçük olup olmadığı sürekli kontrol edilir. Histerezis çalışma bölgesinden çıkılmadığı sürece, yani hız hatasının değeri -2% değerinin altına düşmeyinceye kadar kaskat dönüştürücü ileri yön düşürücü modda yani sürüş modunda çalıştırılmaya devam eder. Bu mod seçim mantığını gösteren histerisiz kontrolör yapısı Şekil-7.14'de gösterilmektedir.

EA hızı referans hız değerini aşarak hız hatası -2% 'den daha küçük bir değer olduğu zaman, kaskat dönüştürücü geri yönde yükseltici çalışarak faydalı frenleme modunda çalıştırılmaktadır. Test parkurunda, araç hızının referanstan en az 2% fazla olduğu zaman dilimleri, örneğin hız referansının aşıldığı anlar Şekil-7.15-16'da görülmektedir. Bu grafikte, fren çalışma moduna geçildiği ve elektrikli aracın hızının düştüğü zaman dilimleri gözlenmektedir. Frenleme modunda, elektrik motoru generatör modunda çalışıp mevcut mekanik enerjisini elektrik enerjisine çevirir. Bu enerji bataryada depolanmaktadır.

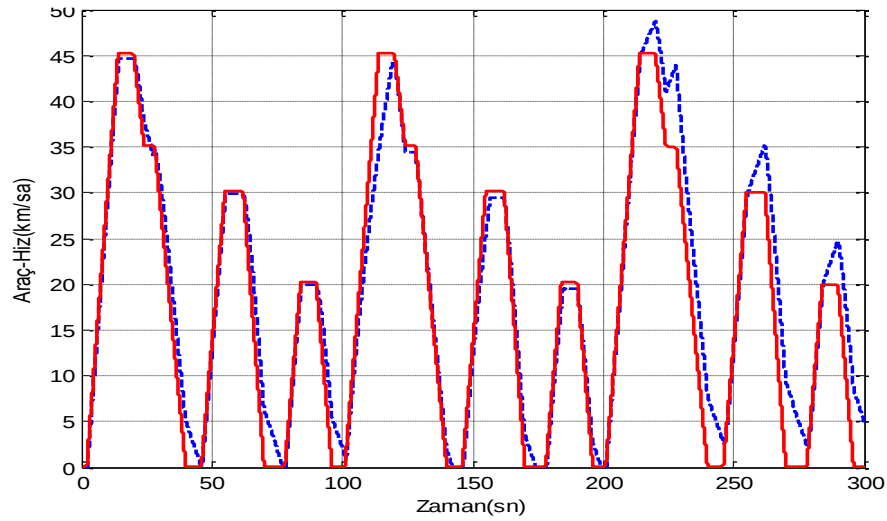


Şekil-7.14 Dönüştürücünün sürüş/fren mod seçim histerisiz kontrolü

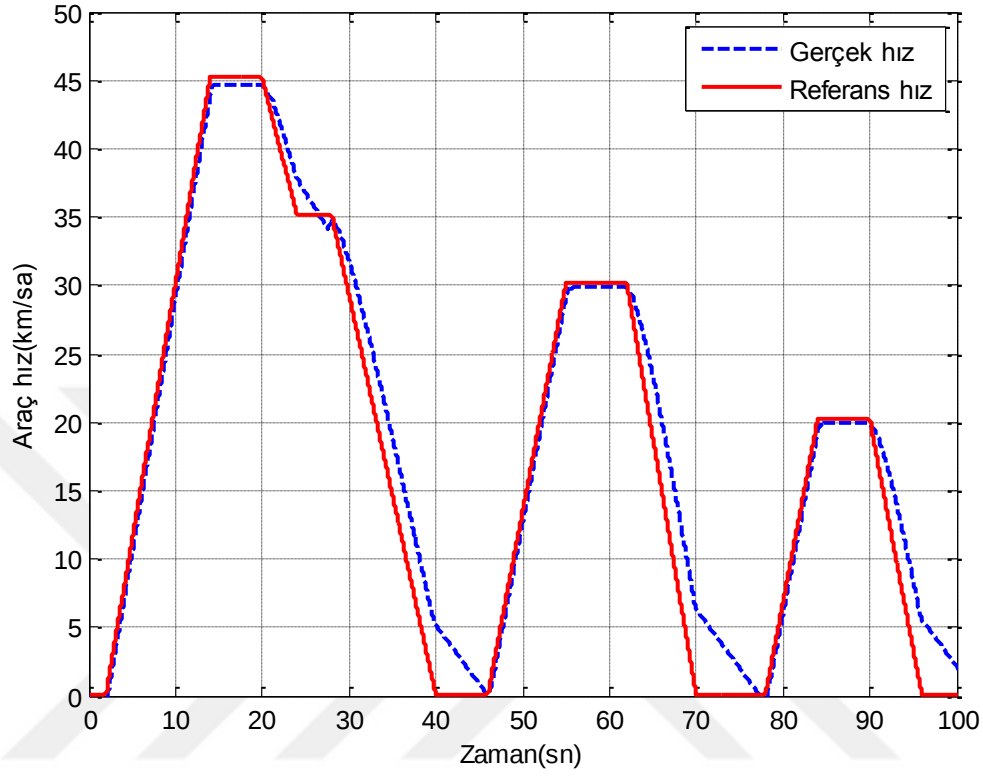
Tahrik motorunun regenerasyon yapabilmesi için motor uç geriliminin zıt emk değerinden düşük tutulması gerekir. Bu amaçla kaskat dönüştürücü geri yönde yükseltici modunda çalıştırılmaktadır. Kaskat dönüştürücünün geri yön yükseltici çalışması, Şekil 7.12’de gösterilen kontrolör yapısının benzeri olan ve parametreleri Tabo-7.4’de verilen iki adet PI kontrolör tarafından kontrol edilmektedir. Kaskat dönüştürücünün geri yön yükseltici modunda, S1,S2 anahtarları kesimde S3 anahtarı iletimde ve S4 anahtarı ise ikinci PI kontrolörün çıkışındaki kontrol işareti ile doluluk oranı sınırlandırılarak belirlenen DGM işareti ile tetiklenmektedir.

Şekil 7.15’de referans hız ile EA hızları üst üste çizdirilmiştir. Test parkuru, 0-100 sn aralığında düz yol, 100-200 sn aralığında %3’lük rampa ve 200-300 sn aralığında ise -%3’lük rampa olmak üzere üç defa tekrarlanan ECE-15 benzeri bir hız profilidir.

Şekil-7.16’da elektrikli aracın eğimsiz bölümünde (0-100 sn) referans hızı takip performansı görülmektedir. EA, parkurun üç defa tekrarlanan hız profilinin üçte birlik birinci bölümünde eğimsiz yolda yüksek, orta ve düşük hız olarak hareket ettirilmektedir. Dönüştürücü ileri yön düşürücü modunda çalışarak referans hızını takip etmek üzere motoru sürmektedir.



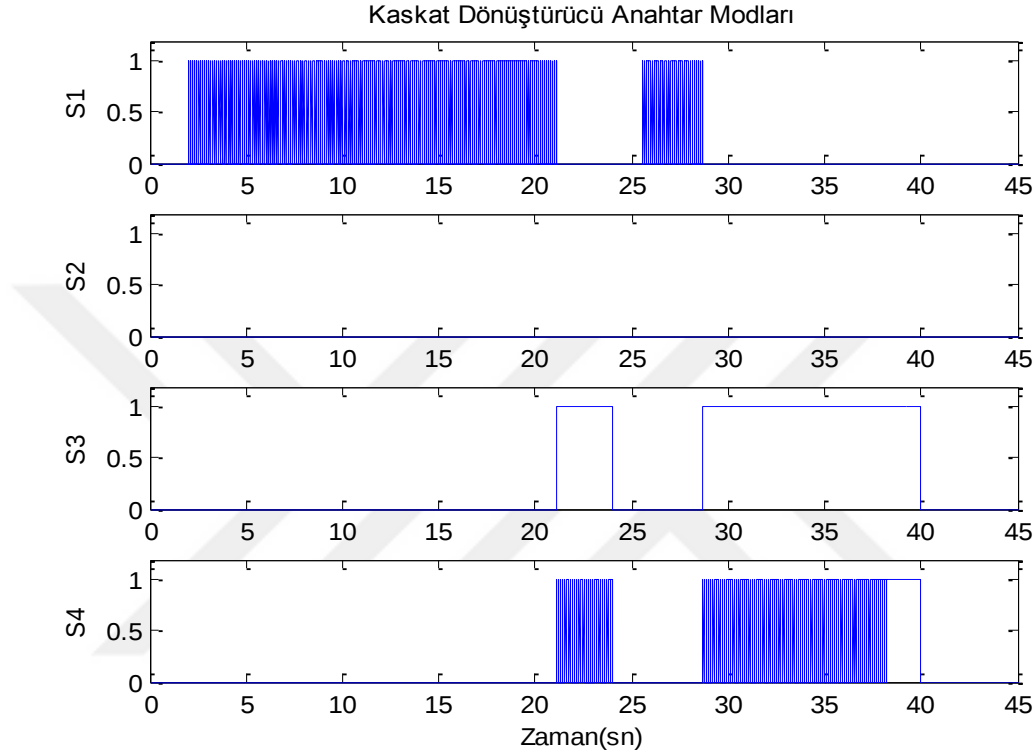
Şekil 7.15. Elektrikli araç hızının referans hızı takip performansı



Şekil 7.16. Eğimsiz yol şartlarında parkurun birinci etabında araç hızının takip performansı

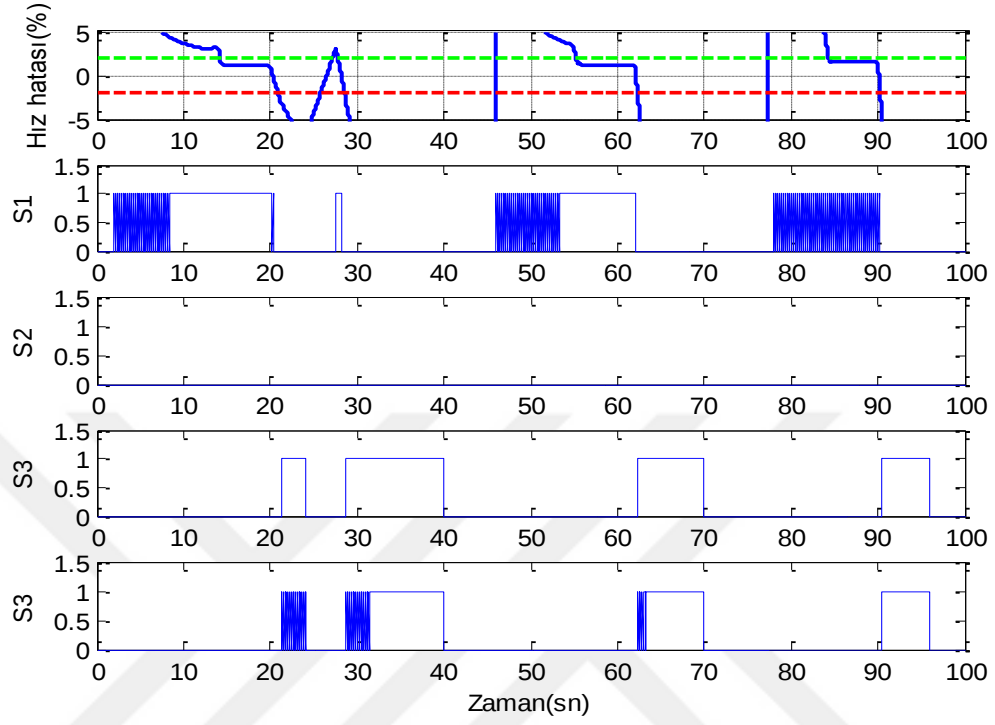
Şekil-7.17’de eğimsiz yolda parkurun yüksek hızlı (0-45 sn) kesiminde kaskat dönüştürücünün anahtar sinyalleri gösterilmiştir. Bu grafikte görüldüğü gibi EA 2-22 sn. arasında sürüş modunda bataryadan akım çekmektedir. Bu sırada, S1 anahtarı DGM tetiklemesi ile kontrol edilirken S2,S3,S4 anahtarları kesimde kalarak kaskat dönüştürücü ileri yönde düşürücü çalıştırılıp elektrik motorunu sürmektedir. Elektrik motorunun hızı azalmaya başladığı zaman birikmiş mekanik enerjinin regenerasyonu yani geri kazanım fırsatı doğmaktadır. Ortaya çıkan bu enerjinin sürtünme ve ısıya dönüşmesi yerine bataryanın şarj edilerek fren enerjisinin geri kazanılması amaçlanmaktadır. Şekil-7.19 da düz yolda test parkurunun yüksek hızda çalışma bölgesinde (0-45 sn aralığında) motorun hız referansını takip, endüvi akımı, uyarma akımı ve motor moment değerleri sırasıyla görülmektedir. Motor uyarma akımı doğrudan bataryadan beslenmekte olup sabit 2,5 A’lık bir değerdir. Bu kısımda

motor akımı denilirken endüvi akımı kastedilmektedir. Şekil-7.20’de faydalı frenleme anında elektrik

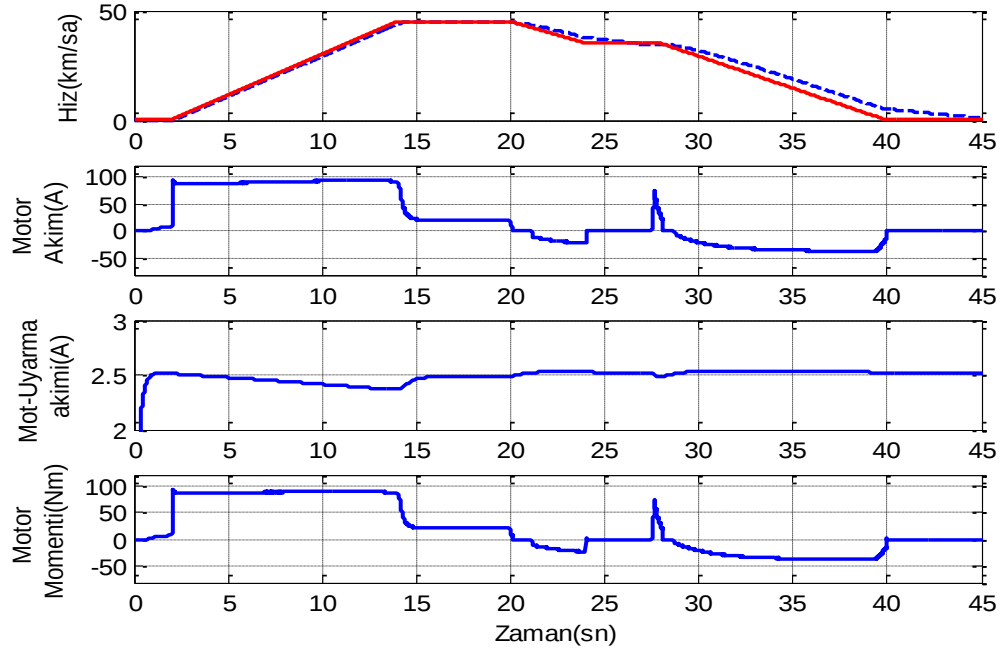


Şekil 7.17. Kaskat dönüştürücü anahtar modları; 0-22 ve 26-28 sn aralığında ileri yön düşürücü; 22-24 ve 28-40sn aralığında geri yön yükseltici

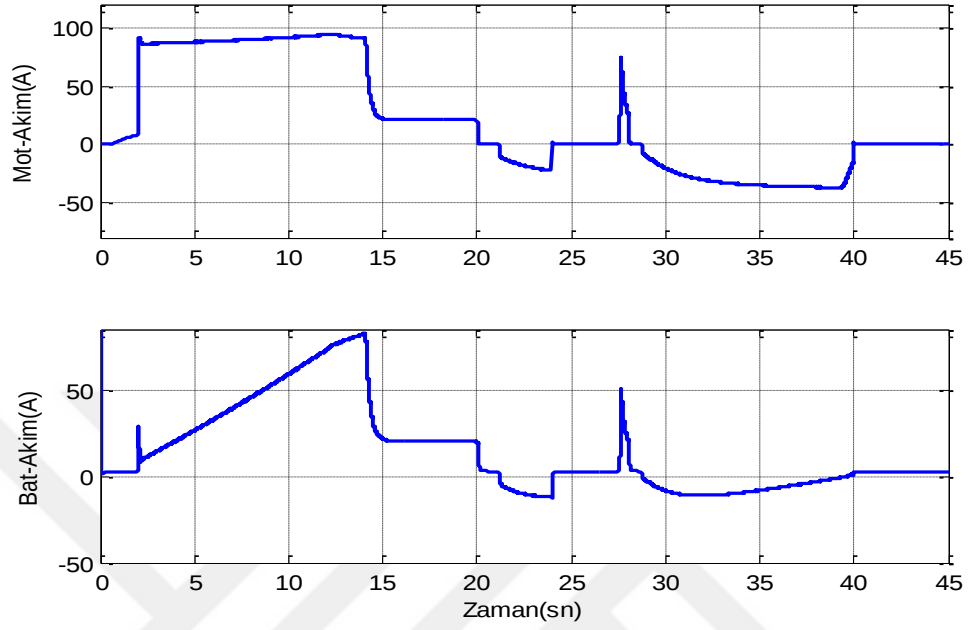
motoru ve bataryada oluşan akımlar görülmektedir. Batarya, 22-24 ve 28-40 sn aralığında ortaya çıkan faydalı fren enerjisi ile şarj edilmektedir. Şekil-7.18’de hız hatasının % değişimine göre kaskat dönüştürücünün anahatar modları verilmiştir. Bu çalışmada kaskat dönüştürücü hız hatasının durumuna göre ± 2 atalığında hiterezis çalışmaktadır. Arça yol maya başlayıp hız hatası $-\%2$ ’nin altına düştüğü(20.sn için) kaskat dönüştürücü mod değiştirerek geri yön yükseltici modunda çalıştığı görülmektedir.



Şekil 7.18. Hız hatasının değişimine göre kaskat dönüştürücü anahatar modları

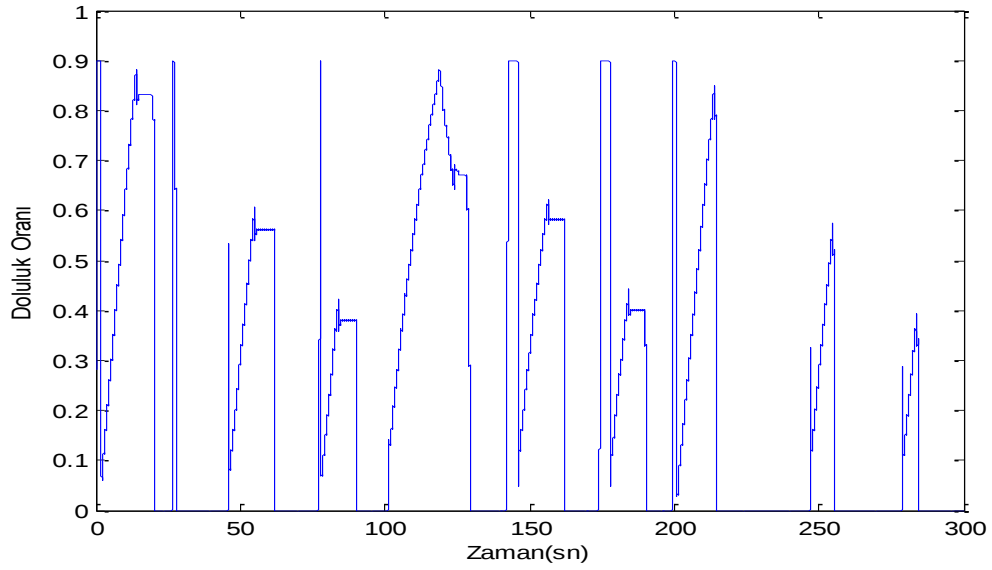


Şekil 7.19. Eğimsiz kısmın yüksek hız kesiminde(0-45 sn) motor değişkenleri



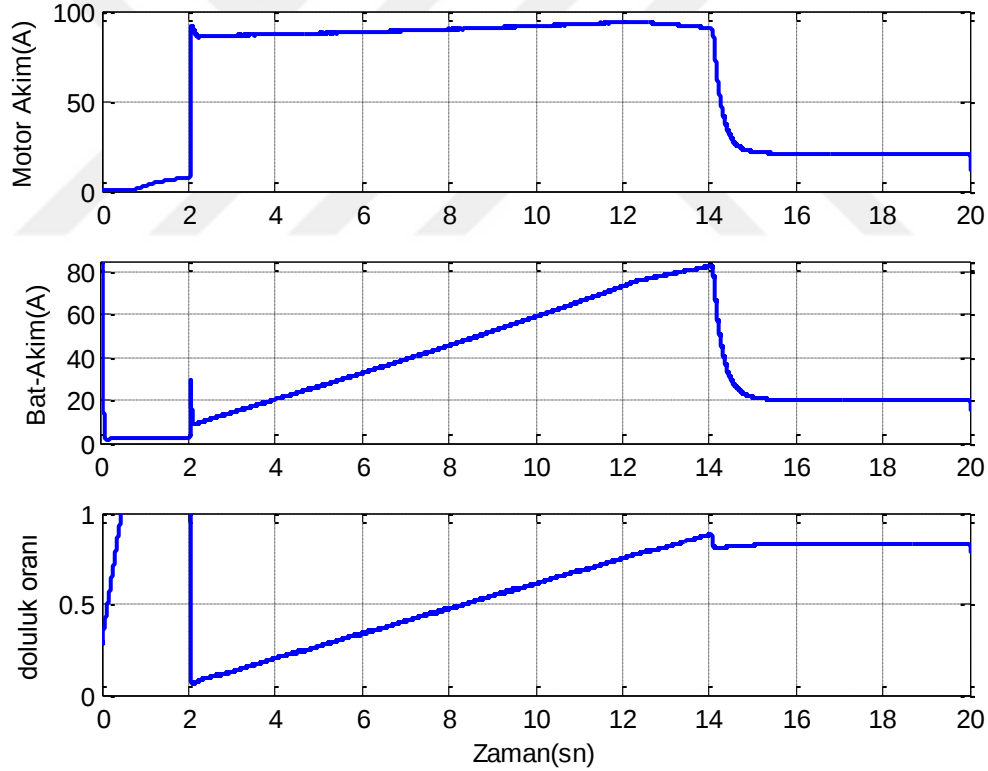
Şekil 7.20. Faydalı frenleme oluşan (22-24 ve 28-40 sn arasında) motor ve batarya akımlarının değişimi

Şekil-7.21’de kaskat dönüştürücünün sürüş modunda S1 anahatarının DGM işaretinin doluluk oranının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 7.21. Kaskat dönüştürücü sürüş modu doluluk oranı gösterimi

Şekil-7.22 de motor akımı, batarya akımı ve doluluk oranının değişimi gösterilmiştir. Bu çalışmada kaskat dönüştürücü ileri yön düşürücü modunda çalışmaktadır. Bu modda çıkış gerilimi giriş geriliminden daha düşük olur. Enerjinin korunumu kanununa göre sistemdeki kayıpları ihmal edersek giriş gücü çıkış gücüne yaklaşık eşit olması gereğince giriş akımı düşük; çıkış akımı yüksek olmaktadır. Örneğin Şekil-7.20' de 8. sn'de motor akımı 90 A iken doluluk oranı 0,5 ve batarya akımı 47 A değerlerindedir. Doluluk oranı değeri 0,5 olduğundan dolayı, çıkış akımı giriş akımının yaklaşık olarak 2 katı olmaktadır. Şekilden de anlaşılacağı üzere bataryanın motora sağladığı akımı incelerken giriş ve çıkış kondanstatör akımlarında göz önüne alınmalıdır.

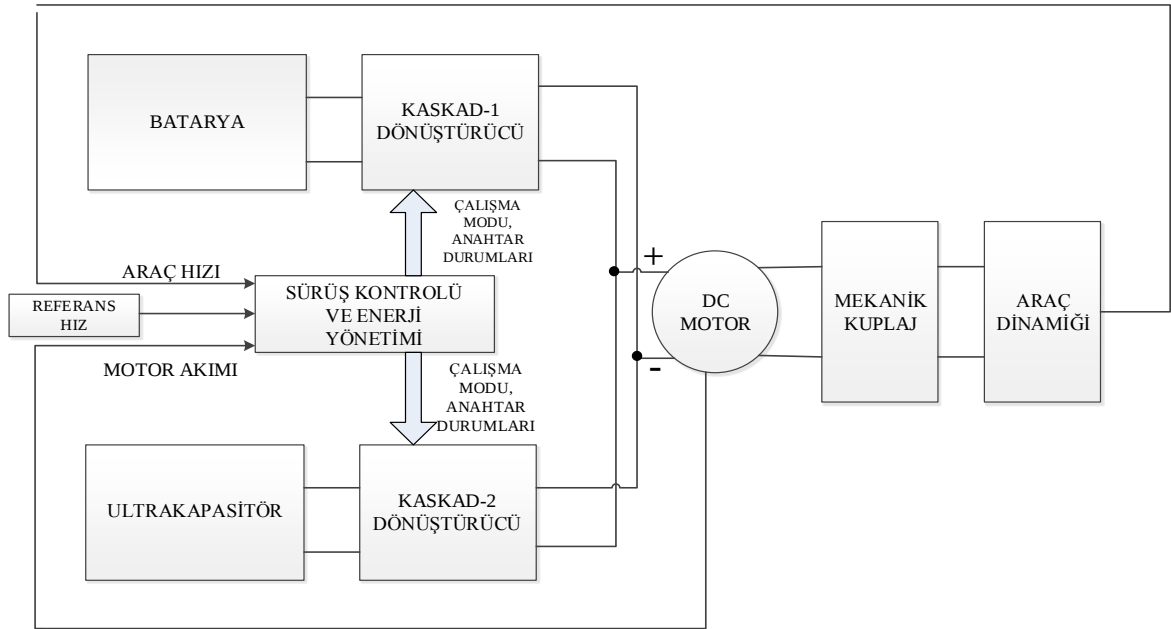


Şekil 7.22. Motor akımı, batarya akımı, doluluk oranının değişimi

7.8. Batarya ve Ultrakapasitörden Oluşan HEDS ile Beslenen EA Simülasyonu

Bu tez çalışmasında 5. Bölümde anlatılan Batarya/UK hibrit enerji yönetim sistemi düzenlemeleri içinden fonksiyonları daha fazla olması nedeniyle çoklu paralel bağlantılı yapı tercih edilmiştir. Bu yapının kontrol esnekliği ve yönetim fonksiyonları daha geniştir. 6. Bölümde anlatılan dönüştürücü devrelerden yine fonksiyonları daha çok olduğu için kaskat dönüştürücü tercih edilmiştir. Bu çalışmanın odak noktası da dönüştürücü aracılığıyla elektrikli aracın enerji yönetiminin benzetimini yapıp incelemeler yapmak olduğundan bu seçimler yapılmıştır.

Batarya, UK ve bunlara ait iki adet kaskat dönüştürücüden oluşan hibrit depolama sisteminin beslediği elektrikli aracın sürüş kontrolü ve enerji yönetiminin şematik gösterimi Şekil-7.23’de gösterilmektedir.



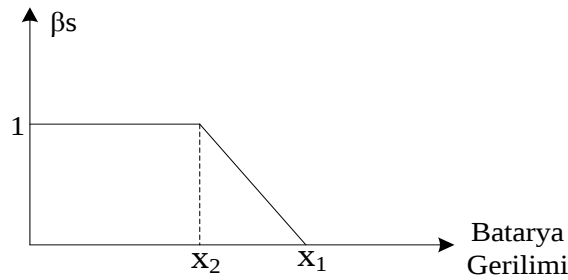
Şekil-7.23 Çoklu paralel bağlantılı Batarya/UK hibrit enerji sisteminden beslenen elektrikli araç sisteminin blok diyagramı

Bu sistemde ana enerji kaynağı batarya olarak belirlenmiştir. UK'nın devreye girip çıkması ise batarya gerilimine bağlı olarak yapılmaktadır. Literatürde batarya gerilimine bağlı olarak UK'nın devreye girip çıkması ile ilgili başlıca üç çeşit yöntem kullanılmaktadır [209].

Bu yöntemlerden birincisi ya hep ya hiç yöntemidir. Bu yöntemde bataryanın alt ve üst sınır gerilimleri seçilir. Batarya gerilimi alt sınır değerinin altına düştüğü zaman sistemin güç talebi için UK devreye girip yükü paylaşarak destek olur. Regenerasyon durumunda batarya gerilimi üst referans değerinin üstüne çıktığı zaman ise UK öncelikle şarj olup bataryayı aşırı şarjdan korur. UK devreye girdiğinde dönüştürücüsünün doluluk oranını ayrı bir kontrolör belirlemelidir.

Bu yöntemlerden ikincisi akım bölüştürme yöntemidir. Tekli alt ve üst değerler yerine ikili referans alt değerler ve ikili referans üst değerler belirlenir. Burada referans alt değerleri x_1 , x_2 ve referans üst değerleri y_1 , y_2 ile temsil edilecektir.

Motor sürüş modundayken bataryadan akım çeker ve batarya geriliminde düşüş görülür. Batarya gerilimi referans alt değerlerden büyük olanı x_1 değerinin altına düşmeye başlar. Batarya gerilimi x_1 değerinin altına düşünce bir oransal olarak β değeri tanımlanır. Şekil-7.24'de β_s doğrusal olmayan değerinin değişimi grafiklerle gösterilmiştir. Sürüş modunda kullanılan β_s değeri;



Şekil-7.24 Sürüş modu akım bölüştürme oranı

$$\beta_s = \frac{x_1 - \text{Batarya gerilimi}}{x_1 - x_2} \quad x_1 > x_2; \quad 0 \leq \beta \leq 1; \quad (7.9)$$

batarya gerilimi x_1 - x_2 aralığındayken (7.9) denklemi ile bölüştürme oranı hesaplanır.

Hız hatası PI kontrolörden geçirilerek akım referansı oluşturulur. Bu akım referansı I_{ref} motor için belirlenir. Batarya gerilimi x_1 değerinin altına düşünce kaskat-1 dönüştürücü içerisinde batarya için akım referansı $I_{bat(ref)}$, kaskat-2 dönüştürücü içerisinde UK için akım referansı $I_{UK(ref)}$ olarak tanımlanır:

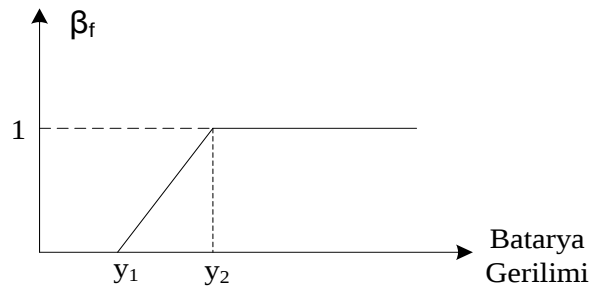
$$I_{bat(ref)} = (1 - \beta) * I_{ref} \quad (7.10)$$

$$I_{UK(ref)} = \beta * I_{ref} \quad (7.11)$$

olarak hesaplanır.

Kaskat-1 ve kaskat-2 dönüştürücü hesaplanan akım referanslarını kullanarak dönüştürücüler içerisinde akım hataları hesaplanır. Akım hataları PI kontrolörlerden geçirilerek kaskat-1 ve kaskat-2 DGM işaretleri oluşturulur. Bu şekilde sürüş yönünde batarya gerilimi referans x_1 değerinin altına düşünce motor akımı batarya ve UK arasında bölüşülerek bataryanın aşırı akım vermesi engellenir.

Motor regenerasyona geçtiği zaman kaskat-1 dönüştürücü geri yön yükseltici modunda çalışarak batarya şarj edilir. Bu şarj işleminde batarya gerilimi referans y_1 değerinin üstüne çıkar. Batarya gerilimi bu değerin üzerine çıkınca bir β_f değeri oluşmaya başlar. Şekil-7.25'de β_f değerinin değişimi grafiklerle gösterilmiştir. Bu β_f değeri;



Şekil-7.25 Sürüş modu akım bölüştürme oranı

$$\beta_f = \frac{Batarya\ gerilimi - y_1}{y_2 - y_1} \quad y_2 > y_1; \quad 0 \leq \beta \leq 1; \quad (7.12)$$

Şeklinde batarya gerilimi y_1 - y_2 aralğındayken 7.12 denkelemiyle bölüştürme oranı hesaplanır.

Kaskat-1 dönüştürücü regenerasyon modunda çalıştığı durumda dönüştürücülere ait kontrolörde ile hız hatası PI kontrolörden geçirilerek akım referansı oluşturulmuştur. Bu akım referansı I_{ref} olarak belirlenir. Batarya gerilimi x_1 değerinin altına düşünce kaskat-1 dönüştürücüye ait kontrolörde batarya için oluşacak akım referans $I_{bat(ref)}$, kaskat-2 dönüştürücü kontrolöründe UK için oluşacak akım referans $I_{UK(ref)}$ olarak tanımlanır. Bu $I_{bat(ref)}$, $I_{UK(ref)}$ değerleri eşitlik (7.10) ve (7.11) görülmek üzere kaskat-1 ve kaskat-2 akım referansları hesaplanır. Kaskat-1 ve kaskat-2 dönüştürücü kontrolörlerinde akım hataları hesaplanır. Akım hataları PI kontrolörden geçirilerek batarya ve UK için doluluk oranı hesaplanarak motorun regenerasyon akımı batarya ve UK arasında bölüştürülmüş olur.

Kullanılan üçüncü yöntem ise filtreleme yöntemidir. Bu yöntemde ise güç akım referansları filtreleme esasına göre oluşturulur. Motor akım referansının yüksek frekanslı bileşenleri filtrelenip UK için akım referansı oluşturulurken düşük frekanslı ortalama güç talepleri batarya tarafından karşılanır. Bu çalışmada anlatılan bu üç yöntemden ya gerilime bağlı hep ya hiç yöntemi ile akım bölüştürme yöntemleri üzerinde çalışılmıştır. Bu sistemde kullanılan UK parametreleri Tablo-7.6'da verilmiştir.

Tablo-7.6 Ultrakapasitör parametreleri

PARAMETRE	DEĞERİ
Ultrakapasitör Gerilimi(V)	240
Hücre kapasitesi(F)	360
UK grup kapastesi(F)	50
UK Enerjisi(Wh)	400
UK kütlesi(kg)	85
Özgül Enerji(Wh/kg)	5

UK grubu oluşturulurken hücresi gerilimi 2,4 V, kapasitesi 360 F ve ağırlığı 60 gr olan Maxwell BCAP0350 ultakasitörün değerleri dikkate alınmıştır. Bu değerlere göre;

- UK seri kol sayısı=grup gerilimi /Hücre gerilimi=240/2,4= 100 adet;
- Seri kol kapasitesi= UK hücre kapasitesi/seri hücre sayısı=360/100=3,6
- Paralel kol kapasitesi=UK kapasitesi/seri kol kapasitesi=50/3,6~14

Kullanılan UK grubu 100 adet seri kol ve 14 adet paralel kol olmak üzere 1400 hücreden oluşur.

- UK ağırlığı= birim hücre ağırlığı* hücre sayısı=60*1420 = 85,2 kg olarak hesaplanır.

$$E_{UK} = \frac{1}{2} * C * v^2 = 1440000(J);$$

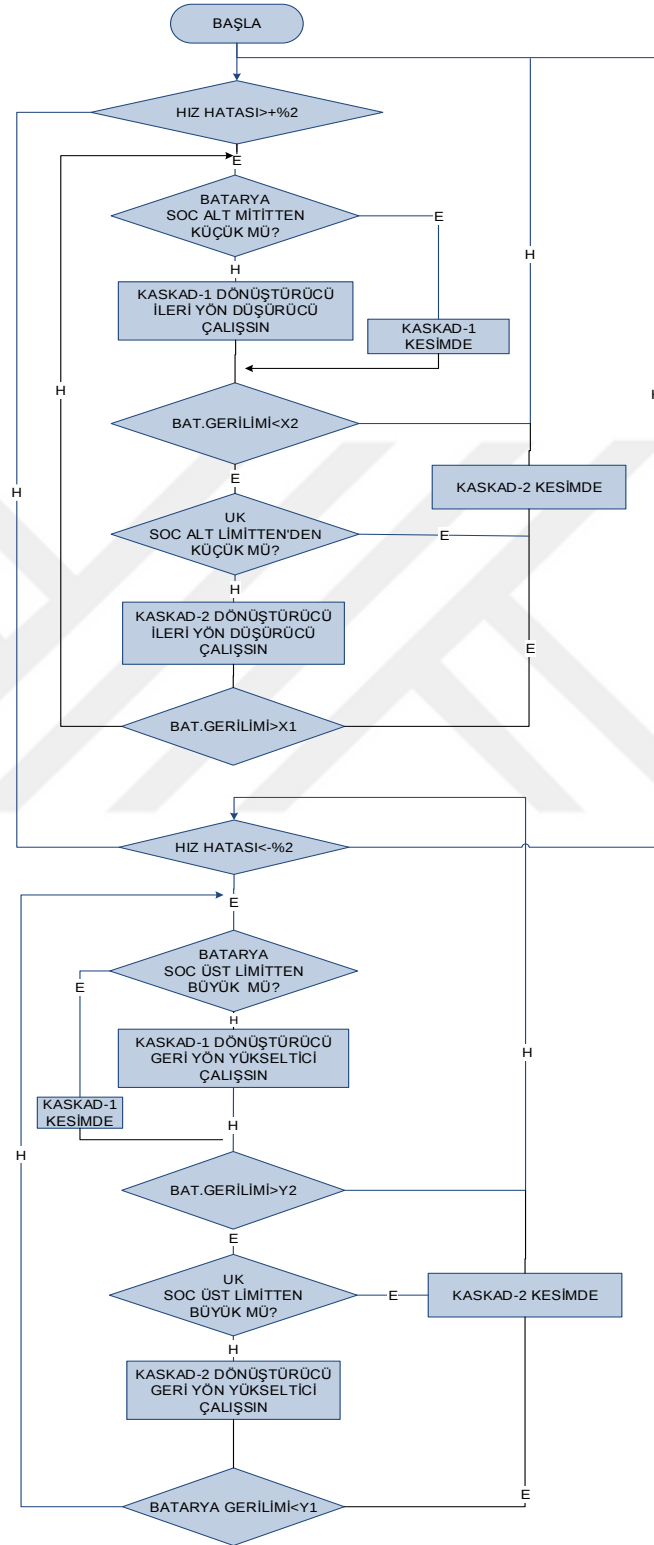
$$E_{UK} = 400Wh;$$

$$E_{BAT} = 240*50 = 1200Wh = 12kWh;$$

Bu çalışmada enerjisi 12 kWh olan batarya ile enerjisi 0,4kWh UK kullanılmıştır. UK'nın toplam enerjisi bataryanın enerjisinin %3'üne denk geldiği için UK %80 SOC ile kabul edilmiş ve %3'lük ilave enerji göz önüne alınarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Aracın UK nedeniyle kütlesi 85 kg artmıştır.

Saf bataryadan beslenen sistemde kullanılan Şekil-7.6'da gösterilen test parkuru karşılaştırmanın mümkün olması için bu kısımda da kullanılmıştır. Şekil-7.9'da MATLAB/Simulink ortamında kaskat dönüştürücünün modeli verilmiştir. EA hızı ve motorun akım değerleri geri besleme alınarak PI kontrolörler aracılığıyla yine hız ve akım, iç içe iki tane çevrim ile kontrol edilmektedir. Akım kontrolörünün çıkışında sınırlayıcı motorun nominal akımın yaklaşık 1.25 katı ile sınırlama yapmaktadır. Bu sayede motorun aşırı akım çekmemesi hem batarya hem motor korunarak yol alması sağlanmaktadır.

EA sürüş kontrolü ve enerji yönetiminin akış diyagramı Şekil-7.26'de gösterilmiştir.



Şekil-7.26 Batarya ve UK'dan beslenen elektrikli aracın enerji yönetiminin ve sürüş kontrolünün akış şeması

7.8.1. Batarya Gerilimine Bağlı HEDS yönetimi

Elektrikli aracın sürüş kontrolü, saf batarya ile beslenen sistemde kullanılan(Şekil-7.14) hız hatasına bağlı olarak histerezis aralığı ± 2 olan mod seçme kontrolörü tarafından yapılmaktadır. Hız hatası ± 2 'den büyükse, EA kaskat-1 dönüştürücü tarafından ileri yön düşürücü olarak sürülmeye başlar. Şekil-7.12'de gösterildiği gibi motorun hız ve akım değerleri, iç içe PI kontrolörler tarafından dönüştürücü anahtarlarının doluluk oranları belirlenmek suretiyle kontrol edilmektedir. Hız hatasının girildiği birinci PI hız kontrolörün çıkışındaki kontrol işareti ile akım referansı belirlenirken; bunu takiben oluşan akım hatasının girildiği ikinci PI akım kontrolörünün çıkışındaki kontrol işareti ile de dönüştürücü çıkışında gereken gerilim değerinin oluşturulmasını sağlayacak DGM işaretinin doluluk oranı belirlenir.

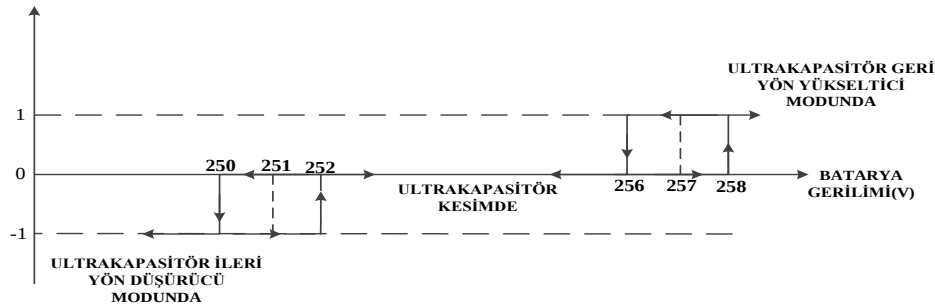
UK'nın batarya ile hibrit enerji kaynağı olarak yönetiminde ya hep ya hiç mantığına dayalı bir yaklaşım bu kısımda kullanılmaktadır. Öyle ki histersiz kontrollü olarak (Şekil-7.25), UK'ün batarya ile bağlantı modu seçilirken, batarya gerilimine bağlı olarak seçilen şarj ve deşarj modunda UK bir kontrolör aracılığıyla(Şekil-7.26) bataryaya destek olmaktadır.

UK önündeki kaskat-2 dönüştürücünün DGM işaretlerinin doluluk oranı ise şu şekilde belirlenir: Bataryanın referans gerilim değerinden anlık batarya gerilimi çıkarılarak birinci PI kontrolöre girilir ve çıkışında akım referansı oluşturulur. Akım referansı değerinden motor akımının değeri çıkarılarak ikinci PI kontrolörden geçilerek çıkış işareti sınırlanıp UK önündeki kaskat-2 dönüştürücünün DGM işaretinin doluluk oranı belirlenir. EA hareket ederken batarya gerilimi kontrol edilir. Batarya geriliminin 250-258 V aralığında tutulması amaçlanmaktadır. Batarya gerilimi 250 V'un altına düştüğü anda kaskat-2 dönüştürücüde ileri yön düşürücü modunda UK'yı devreye sokarak bataryayı destekleyip geriliminin daha fazla düşmesini engeller.

Elektrikli aracın hız referansı azalan olması durumlarında, hız hatası $-\pm 2$ 'nin altına düştüğü zaman, önce batarya önündeki kaskat-1 dönüştürücü geri yönde yükseltici çalışarak faydalı frenleme modunda çalıştırılmaktadır. Elektrikli aracın yavaşlaması istendiği zaman, frenleme yapmak için elektrik motoru generatör modunda çalışıp mevcut mekanik enerjisini

elektrik enerjisine çevirir. Bu enerji ile önce batarya şarj edilir. Batarya gerilimi faydalı frenleme sırasında sürekli kontrol edilir. Batarya gerilimi 258 V değerinin üzerine çıktığı zaman UK önündeki kaskat-2 dönüştürücü geri yön yükseltici modunda çalışıp devreye girer. UK önündeki kaskat-2 dönüştürücünün DGM işaretinin doluluk oranı ise şu şekilde belirlenir: Gerilim referansları Şekil 7.27'e göre histerisiz histerisiz çıkış değeri olarak geri yönde 256 V ve ileri yönde 252 V olarak belirlenmiştir. Gerilim hatası birinci PI kontrolörden geçirilerek çıkışında akım referansı sınırlanmış olarak oluşturulur. Bu referansa bağlı oluşan akım hatası ikinci PI kontrolörden geçirilerek çıkışında sınırlandırılıp kaskat-2 dönüştürücünün DGM doluluk oranı belirlenir. Bu sayede, aşırı şarj olup aşırı ısınma, verimsiz çalışma, çevrim ömrünün düşmesi gibi olumsuz durumlardan batarya korunur. Batarya şarj olmaya başlayıp SOC değeri %99 'un üzerine çıktığı zaman kaskat-1 dönüştürücü kesime giderek bataryanın aşırı şarj olup zarar görmesi engellenmiş olur. UK şarj olmaya başlayıp SOC değeri %90 ' değerinin üzerine çıktığı zaman kaskat-2 dönüştürücü kesime gider ve UK'nın aşırı şarj olup zarar görmesi engellenir.

Şekil-7.27'de batarya gerilimine bağlı olarak HEDS yönetiminde kaskat-2 dönüştürücünün histerezis mod seçimi gösterilmiştir. Kaskat-1 dönüştürücü sürüş modunda çalışırken batarya geriliminde, çekilen akımla orantılı olarak düşmeler görülür. Batarya gerilimi 250 V değerinin altına düştüğü zaman UK ileri yön düşürücü modunda çalışarak sürüş modunda bataryaya destek olur. Kaskat-2 dönüştürücünün kontrolü histerezis olarak yapılırken batarya gerilimi artmaya başlayıp 252 V değerinin üzerine çıktığı zaman kaskat-2 dönüştürücü devreden çıkarak kesime girmektedir. Böylece batarya derin deşarjdan korunur.



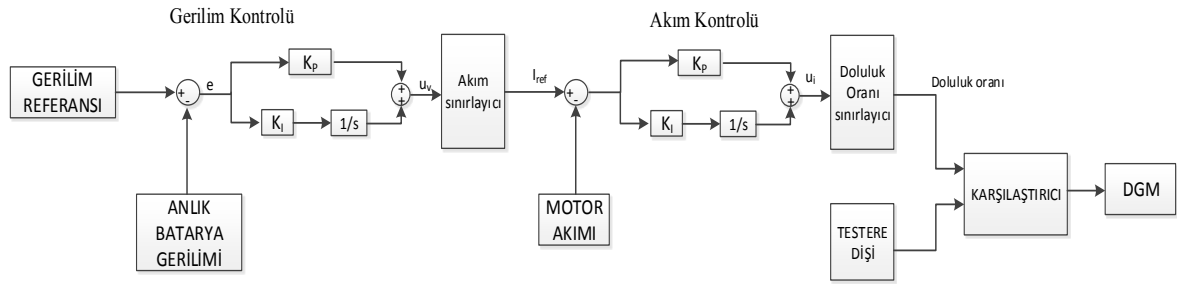
Şekil-7.27. Utrakapasitör önündeki kaskat dönüştürücünün histerisiz çalışma şeması

Araç hızının düşmesi istendiği zaman (Fren modu) kaskat-1 dönüştürücü geri yön yükseltici modunda çalışarak öncelikli olarak bataryayı şarj etmeye başlar. Şekil-7.27'den de görüldüğü gibi batarya gerilimi 258 V değerinin üzerine çıktığı zaman kaskat-2 dönüştürücü geri yön yükseltici modunda çalışarak UK'yı şarj etmeye başlar. Batarya gerilimi 256V değerinin altına düşünceye kadar kaskat-2 dönüştürücü geri yön yükseltici modunda çalışmaya devam eder. Bu sayede bataryanın aşırı şarj olarak zarar görmesi engellenmiş olur. Batarya gerilimi 256 V değerinin altına düşerse kaskat-2 dönüştürücü kesime girer.

Kaskat-1 dönüştürücü Şekil-7.12'deki yapı ile aynı yapıya benzer bir kontrolör tarafından kontrol edilmektedir. Kaskat-2 dönüştürücünün geri yön yükseltici çalışması, Şekil-7.28'de görüldüğü gibi iç içe PI kontrolörler tarafından kontrol edilmektedir

Faydalı frenleme durumunda biriken mekanik enerji önce bataryayı şarj etmeye başlar. Batarya gerilimi 258 V değerinin üzerine çıktığı zaman kaskat-2 dönüştürücü geri yön yükseltici şeklinde devreye girer ve UK de şarj olmaya başlar.

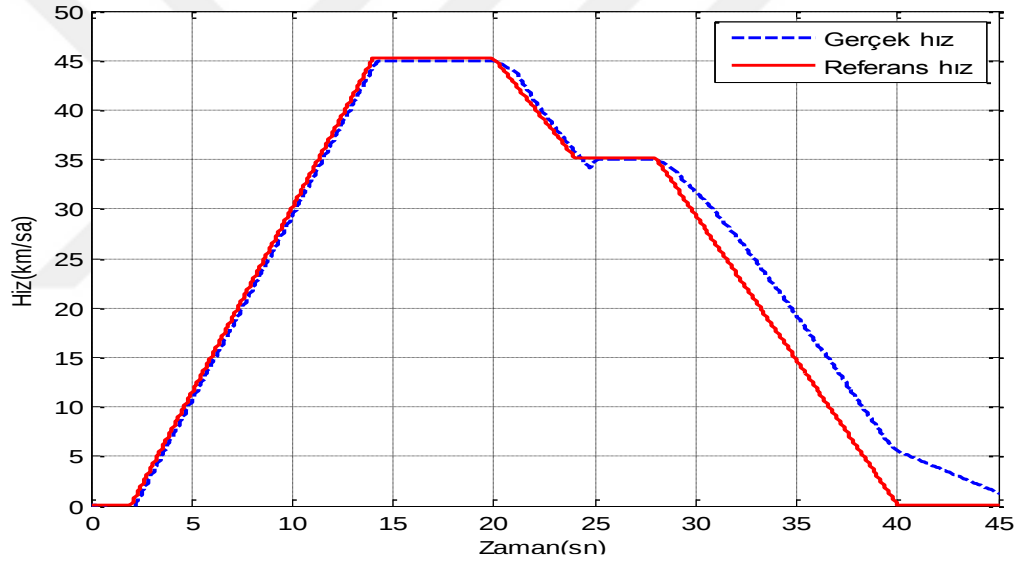
Tablo-7.5'de batarya geriimine dayalı kontrolörün PI değerleri verilmiştir. Batarya/UK'dan oluşan hibrit enerji depolama sisteminden beslenen elektrikli aracın referans hızına göre araç hızının değişim grafiği Şekil-7.29'da gösterilmiştir.



Şekil 7.28. Elektrikli Aracın gerilim ve akım PI kontrolörleri

Tablo-7.5 Batarya gerilimine bağı kontrolöre ait PI değerleri

		Hız Kontrol Çevrimi			Akım Kontrol Çevrimi		
		KP	KI	Akım Limiti	KP	KI	Doluluk oranı Limiti
KASKAT-1	Sürüş	120	10^{-4}	120	0,008	0,01	0,9
	Fren	10	10^{-4}	120	0,1	10^{-4}	0,9
KASKAT-2	Sürüş	250	10^{-4}	200	0,08	10^{-4}	0,9
	Fren	50	10^{-4}	200	0,008	10^{-4}	0,9

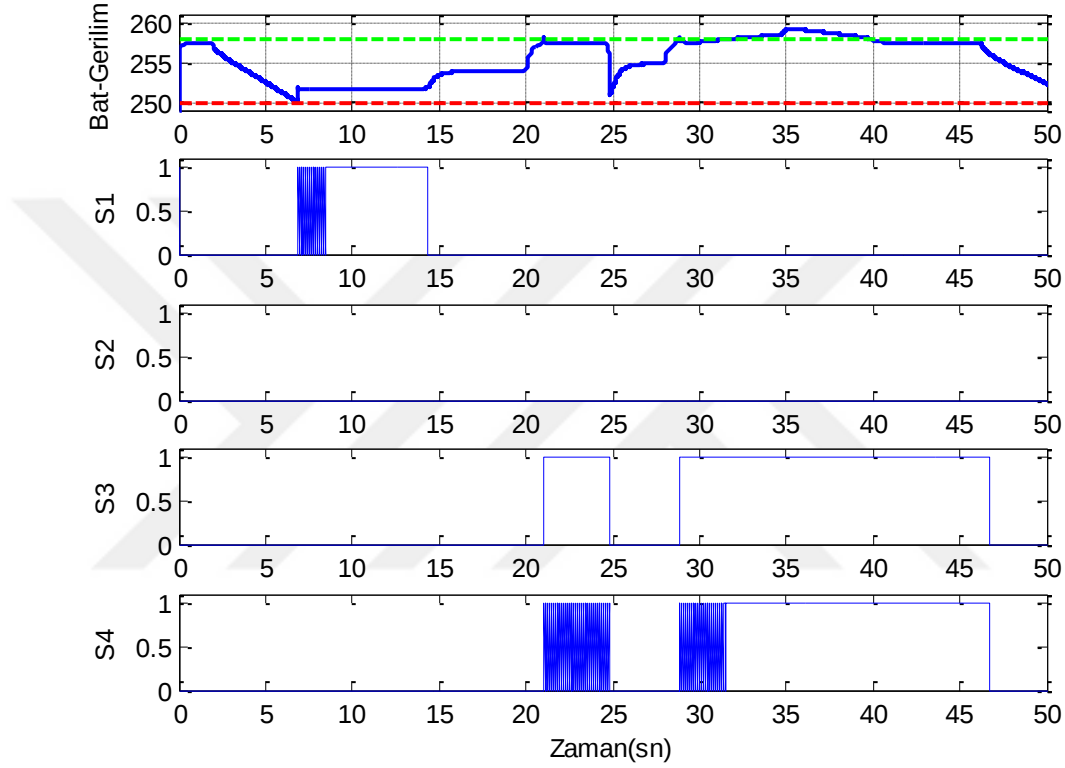


Şekil-7.29. Test parkurunun birinci (eğimsiz) kısmında hız profilini takip performansı

EA eğimsiz düz yolda Şekil-29'de görüldüğü gibi referans hızı az bir hatayla takip etmektedir. EA hızlanırken çektiği yüksek akım nedeniyle Şekil-7.30'da görüldüğü gibi batarya geriliminde düşüşler görülür. Bu çalışmada batarya gerilimi UK tarafından desteklenerek bataryanın geriliminin aşırı düşmesi ve aşırı yükselmesi engellenmek istenmektedir.

Şekil-7.30'de batarya gerilimi ve batarya geriliminin değişimine göre kaskat-2 dönüştürücünün anahtar modları verilmiştir. Bu grafikte görüleceği üzere batarya gerilimi 250 V değerinin altına düştüğü anda (7-14. sn aralığında) kaskat-2 dönüştürücü ileri yön

düşürücü modunda devreye girerek bataryaya destek olmuştur. Bara gerilimi 258 V değerinin üzerine çıkmaya başladığı zaman (22-24 sn ve 28-40. sn aralığında) kaskat-2 dönüştürücü geri yön yükseltici modunda devreye girerek bataryanın aşırı şarj olmasını engellemiş olur.

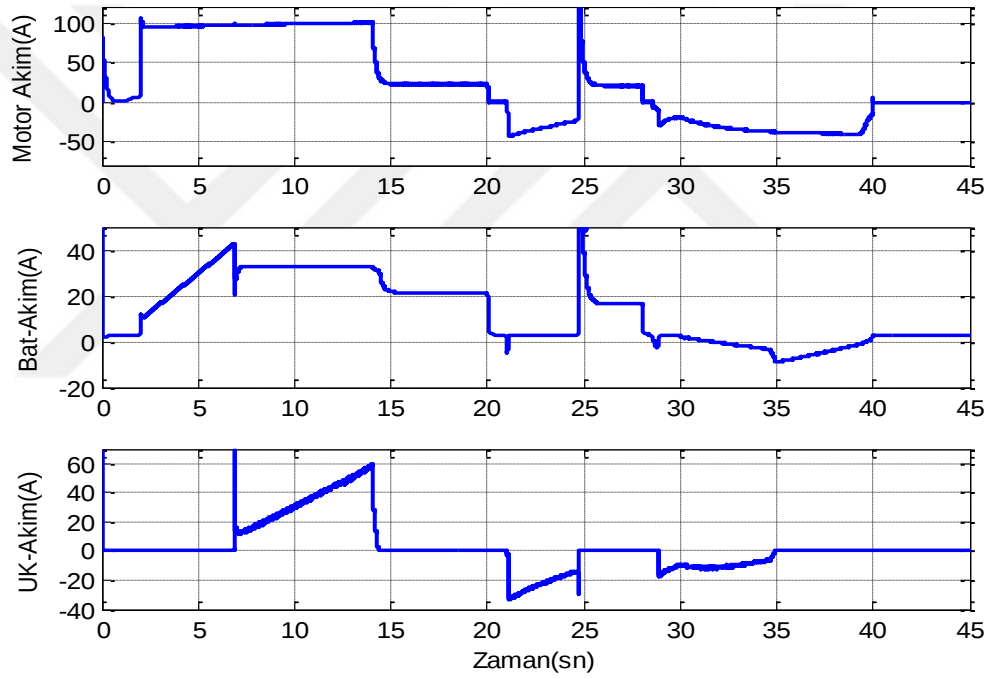


Şekil-7.30. Batarya gerilimi ve buna göre oluşan kaskat-2 anahtar modları ,(8-14 sn sürüş modu, 20-24 ve 28-40 sn fren modu çalışma)

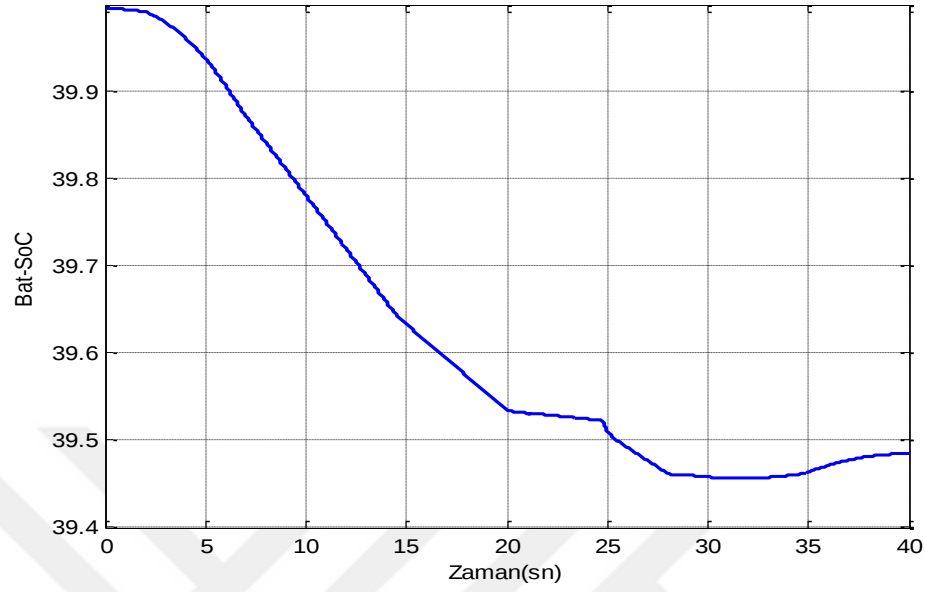
Şekil 7.31'de motor, batarya ve UK akım grafikleri görülmektedir. Araç yol almaya başladığı anda esas güç kaynağı olan batarya sürüş yönünde çalışıp motoru sürmektedir. Bara gerilimi 250 V'un altına düştüğü anda kaskat-2'dönüştürücü ileri yönde düşürücü modunda bataryaya sürüş yönünde destek olarak bataryanın aşırı akım çekmesi engellenmiştir. Şekil-7.31'de görüldüğü gibi motor 2. sn 'de yol almaya başlamaktadır. 7. sn' de batarya gerilimi 250 V 'un altına düştüğü için UK sürüş yönünde bataryaya destek olmaktadır. 20-24.sn ve 28-40. sn aralığında batarya regeneresyona girdiğinde ve batarya gerilimi 258 V değerinin

üzerine çıktığı zaman UK geri yön yükseltici modunda çalışarak bataryanın aşırı şarj olmasını ve bataryanın ömrünün ksalmasını engellemiştir. Şekil-7.31'de kaskat-2 'nin başarılı bir şekilde devreye girerek batarya akımına destek olarak motor akımının bir kısmını üstlendiği görülmektedir.

Şekil-7.32'de (0-40 sn aralığında) bataryanın SOC değişimi gösterilmektedir. Başlangıçta %40 olan SOC 40.sn'de %0,55 azalarak %39,45 olmuştur.



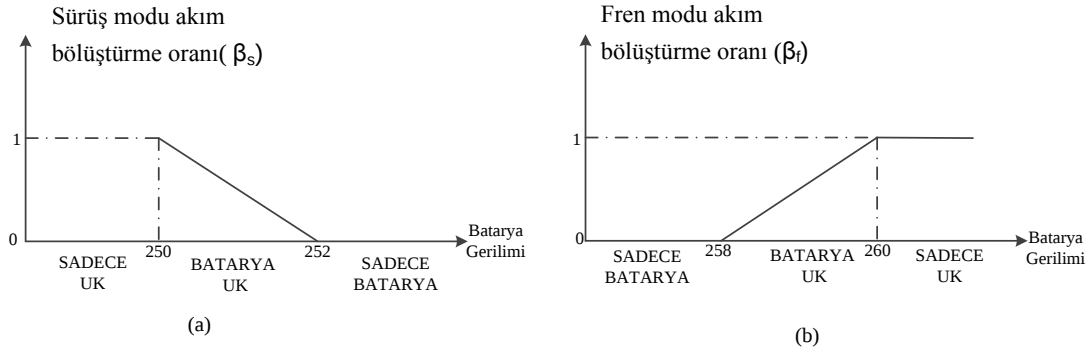
Şekil-7.31 Motor, batarya ve UK akımlarının değişimleri



Şekil-7.32, Bataryanın SOC değeri

7.8.2. Akım Bölüştürmeye Dayalı HEDS Yönetimi

Bu stratejide Şekil-7.27’de gösterilen mod seçimi geçerli olup kaskat-2 dönüştürücü akım bölüştürme stratejisi ile yönetilmektedir. Bölüm 7.8.1’deki gerilime bağlı strateji yerine bu kısımda oransal akım bölüştürme yöntemine geçilmiştir[209]. Şekil-7.33(a,b)’de görüldüğü üzere batarya gerilimi 252 V değerinin altında iken veya 256 V değerinin üzerinde olduğu zaman 0 ile 1 arasında sınırlı olarak bir β değeri üretilmektedir.



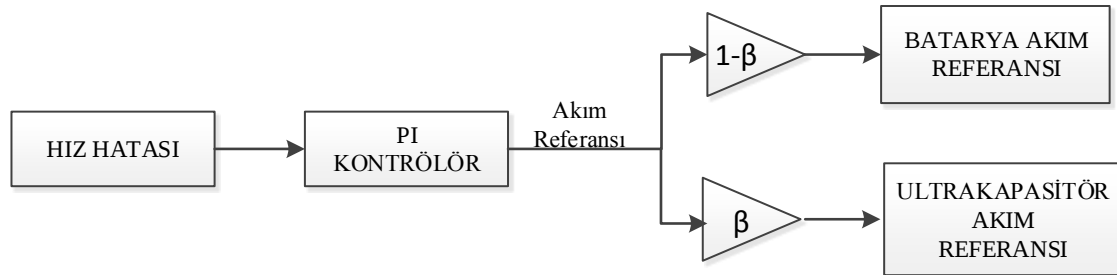
Şekil-7.33. Oransal akım bölüştürme

Tablo-7.6 Akım bölüştürmeli kontrolörün PI değerleri

	HIZ KONTROL ÇEVİRİMİ			Dönüştürücü İsmi	Çalışma Modu	AKIM KONTROL ÇEVİRİMİ		
	KP	KI	Akım Limiti			KP	KI	Doluluk Oranı Limiti
SÜRÜŞ	120	10^{-4}	120	KASKAT-1	Sürüş	0,007	0,01	0,9
					Fren	0,05	10^{-4}	0,9
FREN	120	10^{-4}	120	KASKAT-2	Sürüş	0,08	10^{-4}	0,9
					Fren	0,03	0	0,9

Şekil-7.34'de görüldüğü gibi hız hatası tek bir PI hız kontrolörüne girerek akım referansı oluşturulur. UK oransal olarak devreye girdiği için akım referansı batarya ve UK arasında β değerine bağlı olarak bölüştürülür. Sürüş modunda öncelikle ana enerji kaynağı olan batarya'dan akım sağlanmaktadır. Bataryadan akım çekilmesi sonucu olarak batarya gerilimi düşmeye başlar. Şekil-7.33'de gösterildiği gibi bataryanın akım referansı $1-\beta$ ile çarpılarak bataryadan çekilen akım azaltılmış olur. UK ileri yön düşürücü modunda devreye girerek β oranında akımı üstlenerek bataryadan aşırı akım çekilmesi engellenmiş olur.

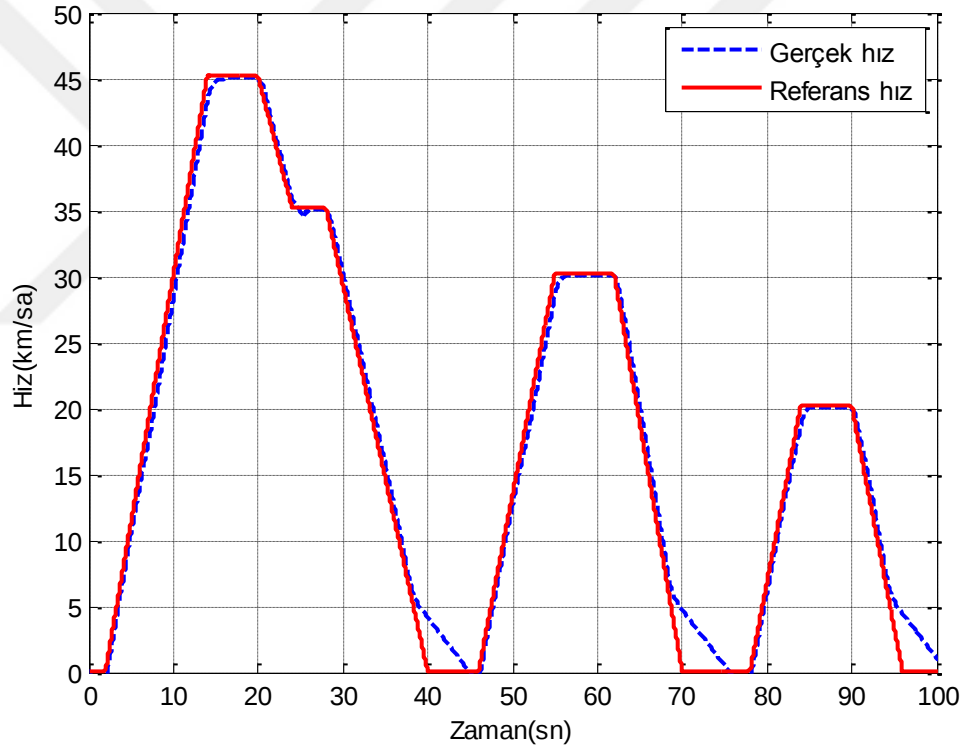
Araç hızı azalırken batarya fren enerjisi ile şarj olmaya başlar. Batarya gerilimi 256 V değerinin üzerindeyken akım referansı $1-\beta$ değeriyle çarpılarak bataryanın şarj miktarı azaltılırken, UK'nın akım referansı β ile çarpılıp artarak UK şarj olmaya başlar.



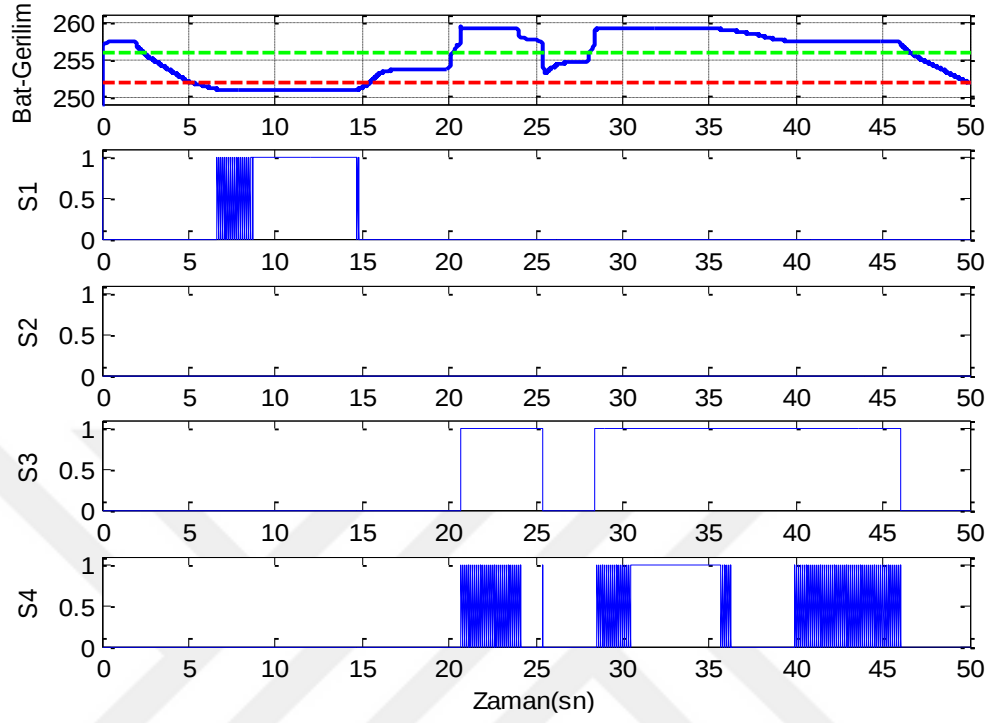
Şekil-7.34. Batarya ve UK için akım referansı oluşturma

Batarya ve UK'dan oluşan HEDS'den beslenen elektrikli aracın (0-100) sn arası parkurun eğimsiz kısmında referans hızına göre araç hızının değişim grafiği Şekil-7.35'de gösterilmiştir.

Şekl-7.36'da batarya gerilimi ve batarya gerilimine bağlı kaskat-2 dönüştürünün anahtar modları görülmektedir. Motor harekete başlayıp bataryadan akım çekmeye başladığında bara gerilimi 252 V değerinin altına düşünce kaskat-2 dönüştürücü ileri yön düşürücü modunda çalışmaya başlar.

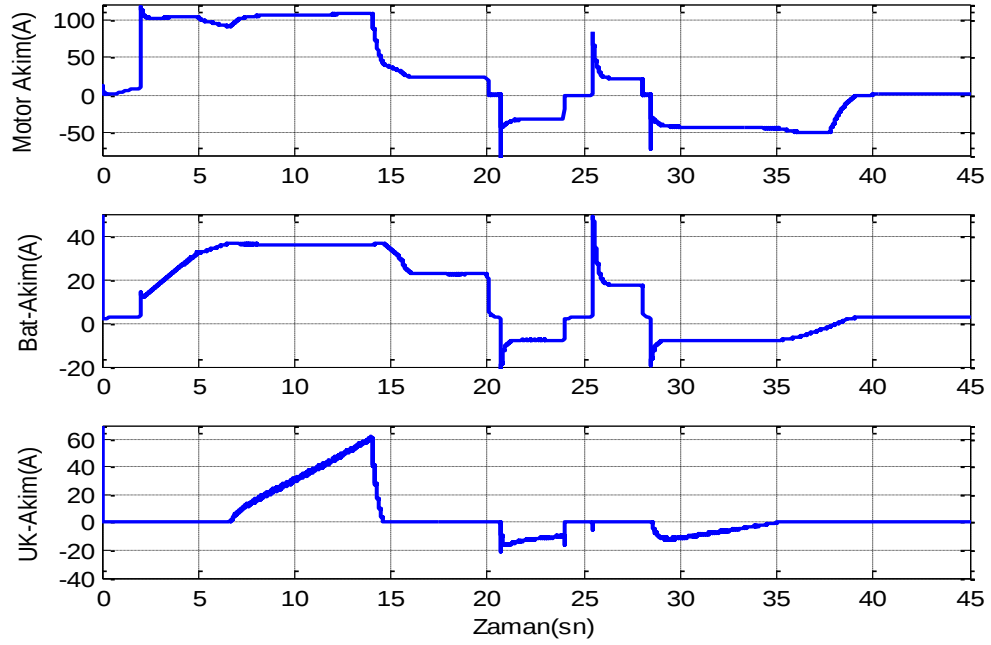


Şekil-7.35. Akım referansının oransal olarak bölüştürüldüğü çalışmada hız profilini takip performansı



Şekil-7.36. Batarya gerilimi ve buna göre oluşan kaskat-2 anahtar modları

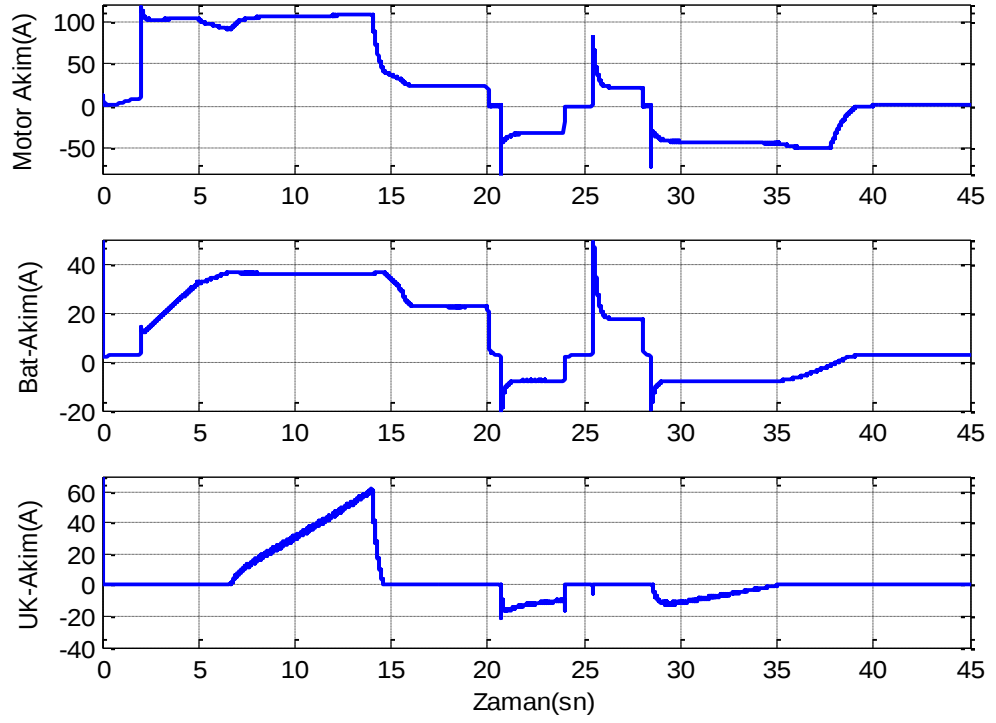
Şekil 7.37'de motor, batarya ve UK akımlarının değişimleri görülmektedir.



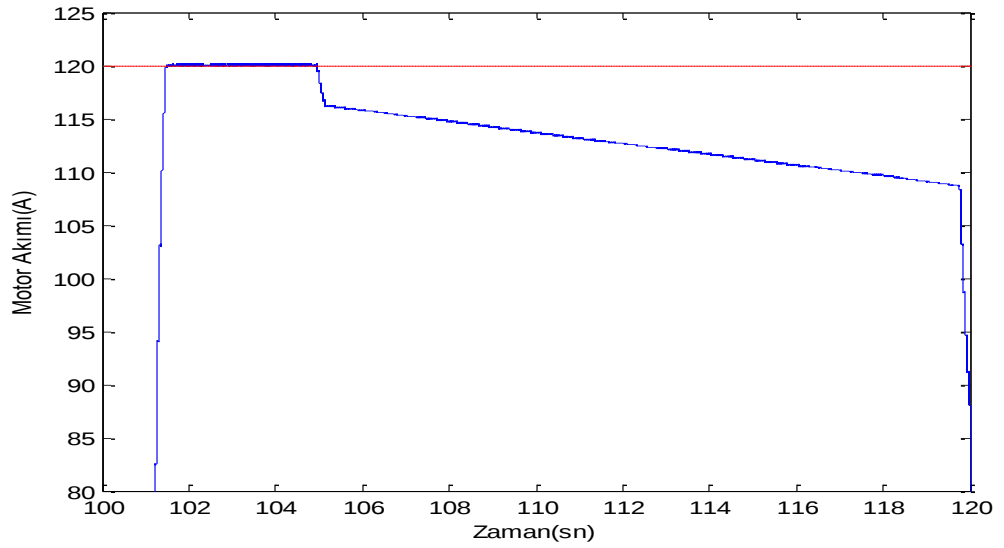
Şekil-7.37. Motor, batarya ve UK akım grafikleri

Şekil-7.38'da test parkurunun $+3^{\circ}$ eğimli rampa test parkurunun yüksek hız profiline ait kesimde (100-145 sn aralığında) hız takip performansı motor akımı, batarya akımı ve UK akımlarının değişimleri verilmiştir. Bu şekilden anlaşıldığı üzere batarya araç hızı referans hız profilini başarıyla takip edememektedir. Şekil-7.39'de 3°C eğimli yol parkurunun yüksek hızlı kesiminde 100-120 sn aralığında motor akımının büyütülmüş hali görülmektedir. Daha önceki kısımlarda anlatıldığı üzere kontrolör iki adet PI kontrolörden oluşarak motor akımının 1.25 katını geçmesini engelleyerek motorun aşırı akım çekmesini önlemek amaçlanmaktadır. Bu çalışmada 240V 30HP DA motor kullanılmaktadır. Motorun nominal akımı 93,128 A olarak hesaplandıktan sonra 1.25 katına yakın olan 120 A üst değeri ile sınırlandırılmıştır. EA 3°C eğimli yolda hızlanmaya başladığı anlarda (102-108 sn aralığında) motor akımı PI kontrolörler tarafından 120 A değerinde sınırlandırıldığı için motorun aşırı akım çekerek zarar görmesi engellenmiştir.

Bu çalışmada 50Ah 'lik batarya kullanılmıştır. Şekil 7.19'da saf batarya ile sürülen EA'ta bataryanın akımları görülmektedir. Şekil 7.37'de ise UK ve bataryadan beslenen aracın motor, batarya ve UK akımları görülmektedir. Aynı parkuru sürmek üzere saf bataryadan beslenen araç batarya akımı (Şekil-19) 80 A değerlerine ulaşırken, batarya ve UK'dan beslenen araç da görüldüğü gibi batarya akımı 40 A civarında olmaktadır. Bu sayede bataryanın aşırı akım çekmediği gösterilmiştir.



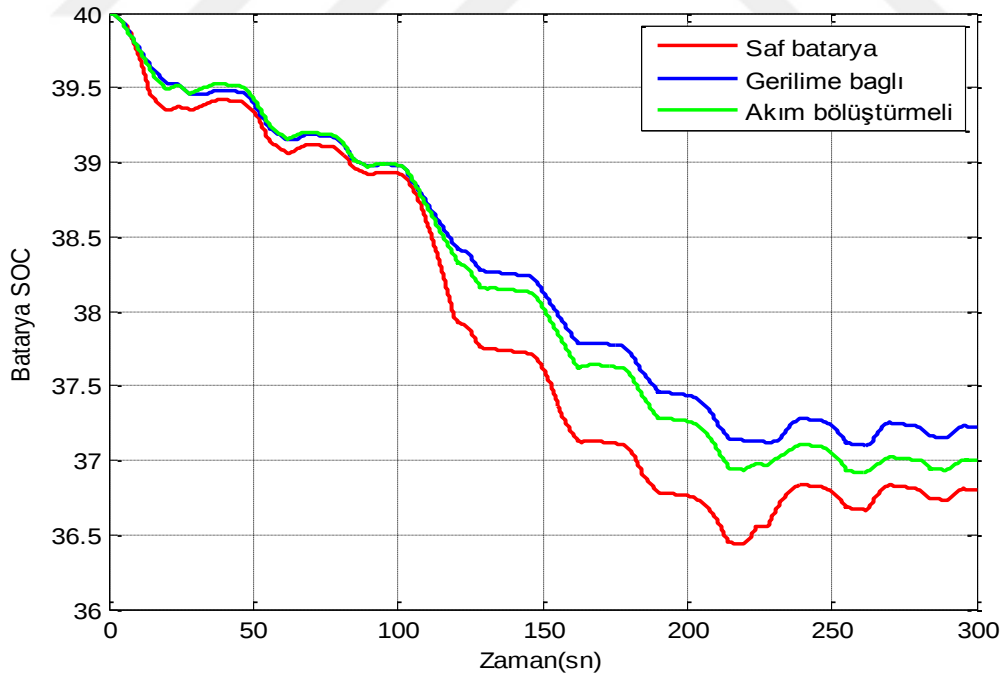
Şekil-7.38. 3° eğimli test parkurunun yük hızlı kesiminde (100-145 sn aralığında) hız referansı takibi, motor, batarya ve ultrakapasitör akımları



Şekil-7.39. 3° eğimli test parkurunun yük hızlı kesiminde (100-120 sn aralığında) motor akımının grafiği

Saf bataryayla, gerilime bağı ve akım bölüştürmeli stratejilere dayalı HEDS ile beslenen sistemlere ait batarya SOC değerlerinin aynı parkurda karşılaştırılması Şekil-7.40'da verilmiştir. Şekilden anlaşıldığı üzere Saf bataryalı benzetim çalışması durumunda SOC değeri daha çok düşerken, HEDS ile beslenme durumunda batarya SOC değerinin daha yüksek bir değerde kalması sağlanmıştır. HEDS yönetiminin gerilime bağı olduğu stratejinin SOC değerinde parkur sonunda daha başarılı kaldığı görülmüştür. Bu sonuç üzerinde, PI kontrolör kazançlarının etkisi olmaktadır. Bu kazançlar optimize edilerek daha iyi sonuçlar alınabilecektir.

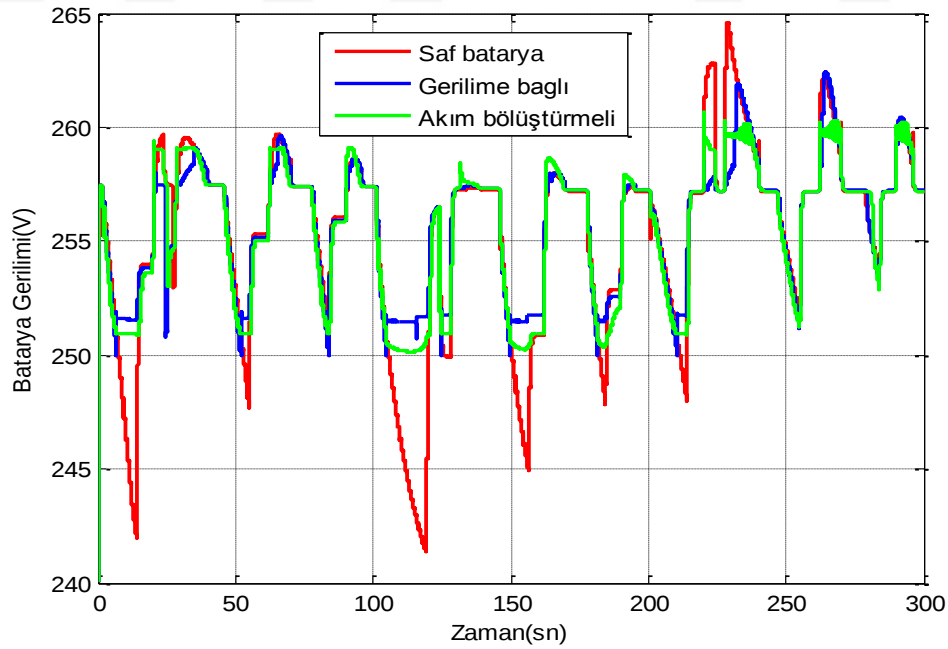
Şekil-7.40 dikkate alınacak olursa, Saf bataryanın 300 sn sonunda SOC değişimi %3,2, Gerilime bağı strateji ile sürülen EA'ta bataryanın SOC değişimi %2,75 ve akım bölüştürmeli strateji ile sürülen EA'ta %3 olmuştur. EA saf batarya yerine gerilime bağı strateji ile sürülecek olursa bataryanın SOC değerinde %15 tasarruf olurken, akım bölüştürmeli strateji ile batarya SOC değerinde yaklaşık olarak %7,5 tasarruf edileceği anlaşılmaktadır.



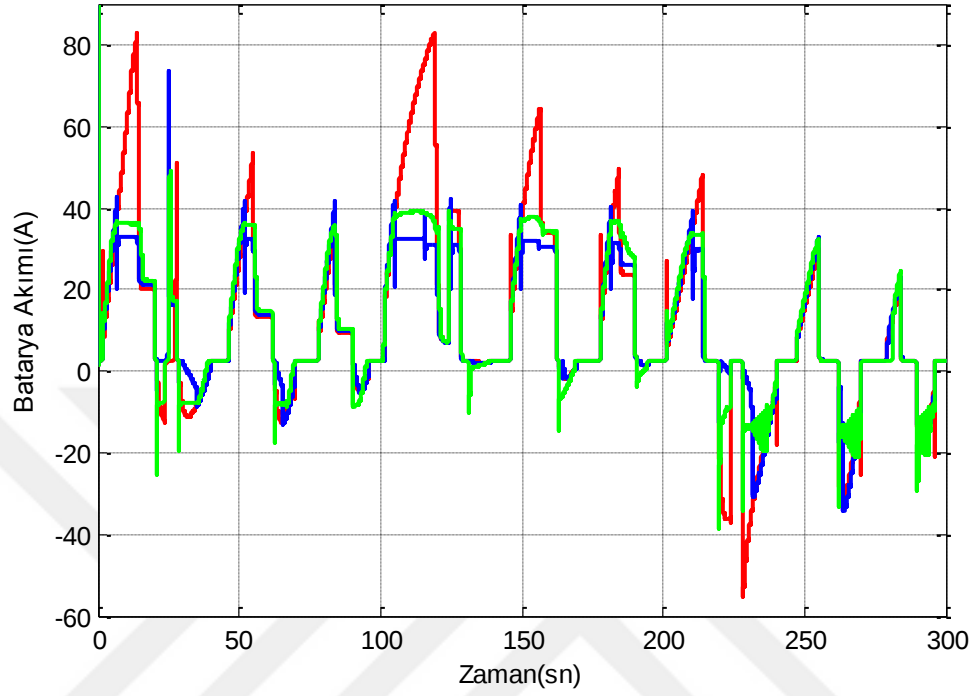
Şekil-7.40. Test parkurunda Saf batarya, gerilime bağı ve akım bölüştürmeli stratejilere göre batarya SOC değerleri

Şekil 7.41'de saf batarya, gerilime bağlı strateji ve akım bölüştürmeli strateji ile oluşan benzetim sonuçlarına göre batarya gerilimlerinin değişimleri görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere saf batarya ile beslenen sistemde batarya gerilimi 243-265 V aralığında dalgalanmaktadır. Gerilime bağlı stratejide ise 250-262 V aralığında batarya geriliminin değiştiği görülmektedir. Akım bölüştürmeli stratejinin benzetim çalışmalarına göre batarya gerilimi 250-259 V değerleri arasında çalışmaktadır. UK desteği ile batarya geriliminin derin şarj ve derin deşarjlardan korunarak bataryanın çevrim ömrünün uzaması kazanımı elde eilmektedir. UK desteği olmadığı zaman bataryanın aşırı şarj ve aşırı deşarj olayları nedeniyle hücreler arası dengesizlikler oluşmakta, bataryanın ömrü kısalmakta ve verimsiz kullanılmaktadır.

Şekil-7.42'de saf bataryadan beslenen, batarya gerilimine bağlı strateji ile HEDS'den beslenen ve akım bölüştürme stratejisi ile HEDS'den beslenen EA sistemlerinin batarya akımları verilmiştir.



Şekil-7.41. Test parkurunda Saf batarya, gerilime bağlı strateji ve akım bölüştürmeli stratejide batarya geriliminin karşılaştırılması



Şekil-7.42. Test parkurunda Saf batarya, gerilime bağlı strateji ile akım bölüştürmeli stratejiden oluşan HEDS batarya akımlarının karşılaştırılması

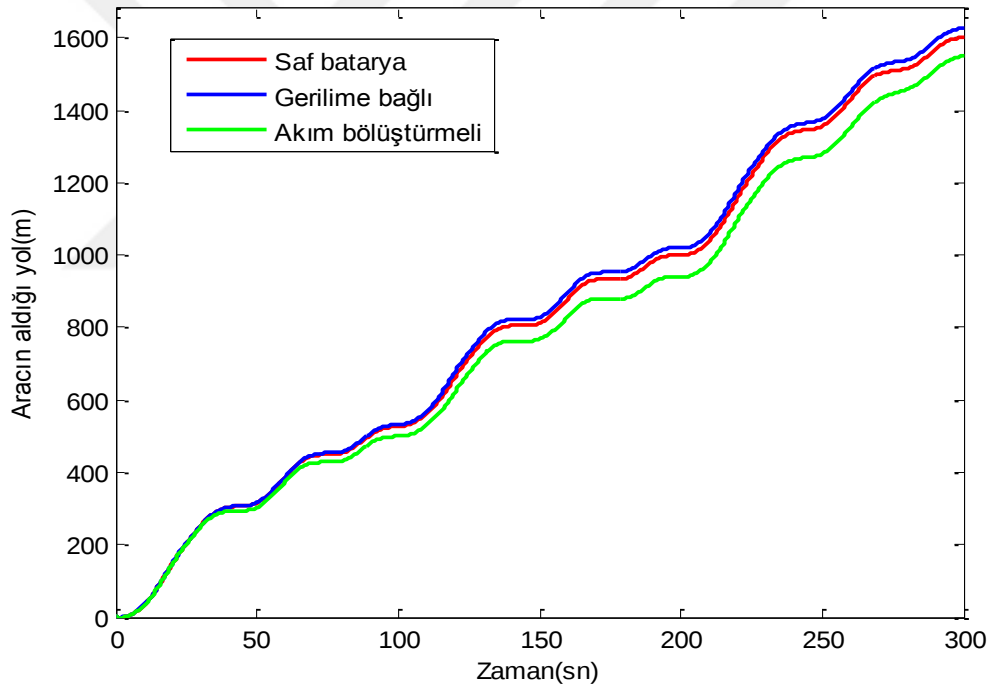
Şekil 7.42’den görüldüğü gibi saf batarya ile sürülen EA 80 A değerlerinde akımlar çekerken UK ilavesiyle bataryanın çektiği akım 50 A. değerinin yani 1C oranının altında seyretmektedir.

Tablo 7.7’de bataryanın korunması anlamında akım stresinin HEDS sayesinde önemli derecede azaltıldığı ve gerilime dayalı stratejinin daha düşük akım stresi oluşturduğu anlaşılmaktadır.

Şekil-7.43’de test parkurunda Saf batarya, gerilime bağlı stratejiyle, akım bölüştürmeli strateji ile yönetilen HEDS ile beslenen elektrikli aracın aldığı yol görülmektedir. Araç 300 sn süresince yaklaşık olarak 1,6 km yol almıştır. Batarya tam şarjlı olup aynı şartlar altında çalıştırdığımız zaman araç ortalama 50 km yol bu aracın menzili olacaktır.

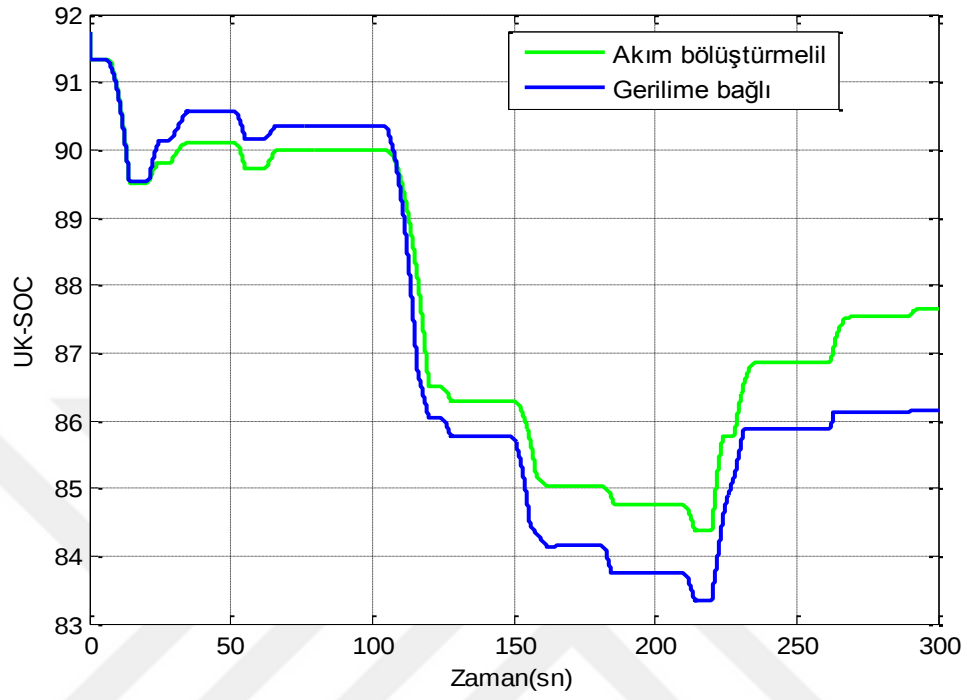
Tablo-7.7. Üç farklı benzetim yaklaşımı için batarya ve UK akım stresleri

Çalışma Şekli		Batarya	Ultrakapasitör
Saf Batarya	Maksimum şarj akımı	-55,26	x
	Maksimum deşarj akımı	82,90	x
Strateji-1 Gerilime bağlı HEDS	Maksimum şarj akımı	-30,06	-54,41
	Maksimum deşarj akımı	43,26	81,10
Strateji-1 Akım bölüştürmeli HEDS	Maksimum şarj akımı	-38,82	-62,09
	Maksimum deşarj akımı	49,04	66,35

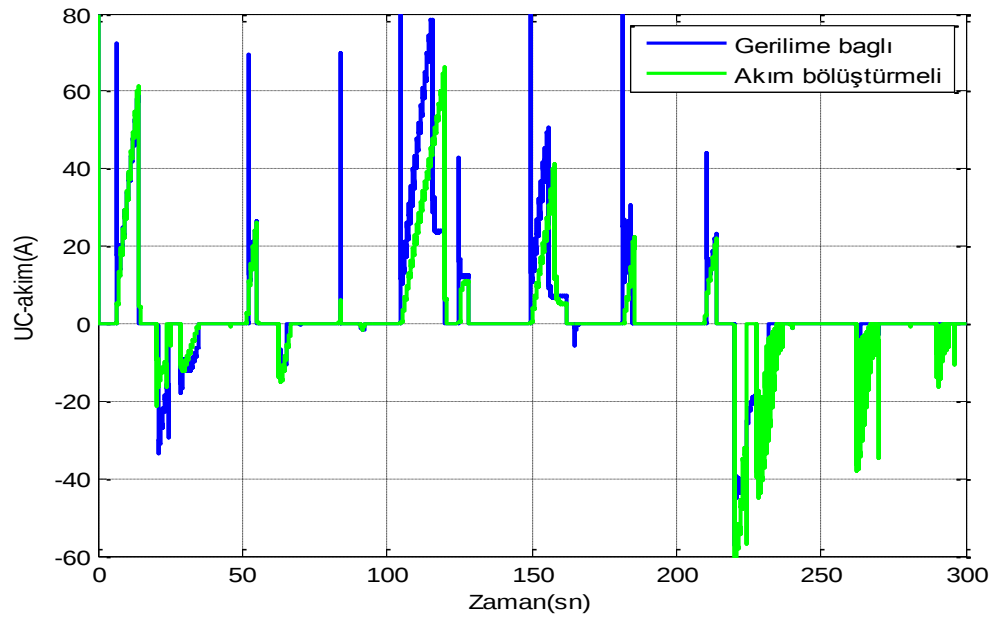


Şekil-7.43. Test parkurunda Saf batarya, gerilime bağlı strateji ile akım bölüştürmeli stratejiden oluşan HEDS aracın aldığı yol

Şekil-7.44,45’de test parkuru sonucunda, gerilime bağlı ve akım bölüştürmeli stratejilere dayalı yönetimler sonucunda UK’nın SOC ve akım değişimleri görülmektedir. Akım bölüştürmeli yaklaşımın UK için SOC değerini daha yüksek tuttuğu görülmektedir. Bu sonuç üzerinde de, PI kontrolör kazançlarının etkisi olduğundan, bu kazançlar optimize edilerek daha iyi sonuçlar alınabilecektir.



Şekil-7.44. UK SOC değişimleri



Şekil-7.45. UK akım değişimleri

8.SONUÇ

Bir elektrikli aracın elektriksel ve mekanik bileşenleri modellenerek saf bataryadan beslenme durumunda ortaya çıkabilecek problemlere UK'lı hibrit enerji depolama sisteminden besleme yaparak çözüm ve iyileştirme getirilebileceği gösterilmiştir.

Saf batarya ile beslendiğinde tepe akımının yüksek olması bataryanın hücreleri arasında dengesizlik oluşturabilmekte ve bataryanın çevrim ömrünü kısaltabilmektedir. Bu hem sürüş hem de regenerasyon modları için geçerlidir. Enerji yoğunluğu yüksek ama güç yoğunluğu düşük olan bataryanın hem ömrünü uzun tutmak hem de enerjisini verimli kullanmak için güç yoğunluğu yüksek ama enerji yoğunluğu düşük olan UK ile hibritleme yapılmıştır. Bu sayede hem sürüş hem de regenerasyonda yüksek akımları üzerine almak için UK görevlendirilmiştir. Enerji yönetimi ve sürüş kontrolü, kontrol esnekliği daha fazla olduğu için DA/DA kaskat tip iki yönlü dönüştürücü devre kullanılarak yapılmıştır. Öncelikle benzetimi yapılan EA sistemi önce saf batarya ile beslenerek belirli bir parkurda test edilmiştir. Bu test parkuru sonuçları gözetilerek, UK ve bataryadan oluşan hibrit enerji depolama sisteminden beslenerek enerji yönetimi yapılan sistemin etkinliği değerlendirilmiştir.

Sürüş ve fren modlarının arasında geçiş kuralı hız hatasına bağlı olarak histerisiz mantıkla tasarlanmıştır. Bunun anlamı literatürde sıkça kullanılan güç talebine bağlı olarak yönetim stratejisinin esas alınmasıdır. Sürücünün gaz pedalından vereceği komut yerine, ECE-15 benzeri bir hız profilinin farklı yol eğimi şartlarında üç defa tekrarlandığı bir parkur takip ettirilirken oluşan anlık hız hatası, güç talebine eşdeğer kabul edilmiştir.

UK'nın ana enerji kaynağı olan bataryayı iki strateji ile desteklemesi üzerinde çalışılmıştır. Bu stratejilerin temeli, batarya geriliminin ne fazla düşmesine ne de fazla yükselmesine izin vermemektir. Birinci stratejide UK, bataryanın gerilimine bağlı histerezis mantığıyla sürüş veya regenerasyon modu seçilerek, gerilim ve akım kontrolörlü olarak bataryaya destek olmuştur. İkinci stratejide, hız kontrolörünün oluşturduğu akım referansı, gerilim hatasıyla orantılı olarak paylaştırılmış yani akım bölüştürme stratejisi ile UK

bataryaya destek olmuştur. Her iki stratejide de kullanılan iç içe PI kontrolörlerin kazançları sistemlerin başarımı üzerinde etkili olmuştur. Bu kazançların belirli bir amaç fonksiyonu ve sınırlayıcılara göre optimizasyonu daha iyi sonuçlar sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasının odak noktası dönüştürücü aracılığı ile elektrikli aracın sürüş kontrolü ve enerji yönetimi olmuştur. Güç elektroniği dönüştürücüleri aracılığı ile farklı karakteristiklere sahip enerji depolama birimleri arasında verim ve ömür artırmaya yönelik hibritleme ve enerji yönetimi çalışmaları, sadece EA'lar için değil yenilenebilir enerji kaynakları gibi birçok uygulama için de yapılmaktadır. AA ve DA enerji kaynaklarının birlikte daha verimli depolama ve yük paylaşımı yapmasını sağlamak için, güç elektroniği dönüştürücüleri iyi çözümlenmelidir. Böylece akım ve gerilim değerleri başarılı bir şekilde kontrol edilip etkin bir yönetim oluşturulabilir.

Bu çalışmada Tablo-3.1 ve Tablo-3.2 değerleri referans alınarak 150 kg ve 40 L Lityum iyon batarya kullanılırken, 85 kg 20 L UK kullanılmıştır. Ayrıca UK ilavesi ile ek dönüştürücünün de bir maliyeti olmuştur. Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere %8'lik bir kütle artışı olmaktadır. UK ilavesi sisteminin maliyetini yaklaşık %5 civarında artırmaktadır. Ayrıca dönüştürücünün ilavesi ve kontrol karmaşıklığı da bu maliyeti artırmaktadır. Fakat UK ilavesi aşırı akım ve aşırı gerilim düşmelerine karşı bataryayı koruduğu grafiklerle gösterilmiştir. Bu çalışmada 300 sn gibi kısa zaman aralığında simülasyon sonuçları incelenmiştir. Kısa süreli çalışmalarda UK'nın devreye girip çıkma yöntemi ve kontrolör kazançları dikkate alındığında %7,5-%15 arasında bir tasarruf olduğu görülmüştür. Uzun süreli çalışma ile batarya ömrünün korunması sürüş menzilini artırmasından dolayı UK'nın getirmiş olduğu enerji ve maliyet artışı kabul edilip hibrit edenerji deplolama sistemi ile araçlar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Ren, Guizhou, GuoqingMa, and Ning Cong. "Review of electrical energy storage system for vehicular applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (2015): 225-236.
- [2] Energy Technology Perspective 2008, Int. Energy Agency, Paris, France, 2008.
- [3] A. Emadi, *Advanced Electric Drive Vehicles*. New York, NY, USA: CRC Press, 2015.
- [4] B. Bilgin et al., "Making the case for electrified transportation," *IEEE Trans. Transport. Electric.*, vol. 1, no. 1, pp. 4–17, Jun. 2015.
- [5] Kuperman A, Aharon I. Battery–ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15(2):981–92.
- [6] U. Bossel, "Does a hydrogen economy make sense?" *Proc, IEEE* Oct. 2006
- [7] Chan, C. C. and Chau, K. T., "Modern Electric Vehicle Technology", *Oxford University Press*, New York, 1-3 (2001).
- [8] Larminie, J. and Lowry, J., "Electric Vehicle Technology Explained", *John Wiley & Sons Ltd.*, England, 60-64, 184-220 (2003).
- [9] Keskin, A., "Hibrid taşıt teknolojileri ve uygulamaları", *Mühendis ve Makina*, 50 (597): 12-20 (2009).
- [10] Ertuç, Y., "Elektrikli taşıtların tasarımı ve simülasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 8-46 (2008).
- [11] Demirel, A. "Elektrikli taşıtlar için doğrudan sürüşlü ve bulanık patinaj önleyicili bir tahrik sistemi", Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 4-10 (1998).
- [12] Xue, X. D., Cheng, K. W. E. and Cheung, N. C., "Selection of electric motor drives for electric vehicles", *Australasian Universities Power Engineering Conference*, Hong Kong, 170-175 (2008).
- [13] Ünlü, N., Karahan, Ş., Tür, O., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A., Turhan, L., Akgün, F., ve Tırıs, M., (2003). "Elektrikli Araçlar", http://www.normenerji.com.tr/menus/elektrikliaraclar_190220120138391025288910.pdf, 25 Kasım 2013.
- [14] Husain, I., "Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals, 2nd Edition", *CRC Press*, New York, 2-5 (2003).

- [15] Ünlü, N., Karahan, Ş. ve Tür, O., “Elektrikli Araçlar”, *Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü*, Gebze, 6-22, 42-100 (2003).
- [16] Emadi, A., Rajashekara, K., Williamson, S.S. ve Lukic, S.M., (2005), “Topological Overview of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicular Power System Architectures and Configurations”, *IEEE Trans Vehicular Technology*, 54(3):763–770.
- [17] Wouk, V., (1995), “Hybrids: Then and Now,” *IEEE Spectrum*, 32(7):16–21.
- [18] Wyczalek, F. A., (2000), “Hybrid Electric Vehicles—Year 2000”, in *Proc. 35th IEEE Intersoc. Energy Conv. Eng. Conf.*, Jul. 2000, Las Vegas, NV, 1:349–355.
- [19] Albert, I. J., Kahrimanovic, E. ve Emadi, A., (2004), “Diesel Sport Utility Vehicles with Hybrid Electric Drive Trains”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 53(4):1247–1256.
- [20] Sciarretta, A., Back, M. ve Guzzella, L., (2004), “Optimal Control of Paralel Hybrid Electric Vehicles”, *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, 12(3):352–363.
- [21] Kalan, B. A., Lovatt, H. C., Brothers, M. ve Buriak, V., (2002), “System Design and Development of Hybrid Electric Vehicles”, in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, 2002, Australia, 2:768–772.
- [22] Welchko, B. A. ve Nagashima, J. M., (2003), “The Influence of Topology Selection on the Design of EV/HEV Propulsion Systems,” *IEEE Power Electronics*, 1(2):36–40.
- [23] Gale, A. R. ve Degner, M. W., (2002), “Voltage Trade-off Evaluation for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications”, in *Proc. IEEE Workshop Power Electron. Transport.*, Oct. 2002, Auburn Hills, 11–15.
- [24] Lin, C. C., Peng, H., Grizzle, J. W. ve Kang, J. M., (2003), “Power Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Truck,” *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, 11(6):839–849.
- [25] Delprat, S., Lauber, J., Guerra, T. M. ve Rimaux, J., (2004), “Control of a Paralel Hybrid Power Train: Optimal Control”, *IEEE Trans Vehicular Technology*, 53(3):872–881.
- [26] a. Emadi, y. J. lee, and K. rajashekara, “Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2237–2245, June 2008.
- [27] l. Parsa and h. a. toliyat, “Fault-tolerant interior-permanent-magnet machines for hybrid electric vehicle applications,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 56, no. 4, pp. 1546–1552, 2007.

[28] Chan, C. C. and Wong, Y. S., "Electric vehicles charge forward", *IEEE Power & Energy Magazine*, 2 (6): 24-33 (2004).

[29] Haddoun, A., Benbouzid, M. E. H. and Diallo, D., "Sliding mode control of EV electric differential system", *XVII. International Conference on Electrical Machines*, Chania, 400-405 (2006).

[30] C. C. Chan and K. T. Chau, "An overview of power electronics in electric vehicles," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 44, no. 1, pp. 3–13, Feb. 1997.

[31] Luo, F. L. and Yeo, H. G., "Advanced PM brushless DC motor control and system for electric vehicles", *Proceedings of IEEE*, 2: 1336-1343 (2000).

[32] Teat, J., "Short range electric vehicle motor controller", Yüksek Lisans Tezi, *University of Otago Master of Science*, Dunedin, 4-6 (2011).

[33] Santiago, J., Bernhoff, H. and Ekergard, B., "Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61 (2): 475-484 (2012).

[34] Vägverket, Presentation of the Swedish National Road Administration (SNRA). [Online]. Available: <http://www.piarc.org/library/aipcr/1/A1AB718mKU58ou7P8alHIN0l.pdf>

[35] Chemali, Ephrem, et al. "Electrochemical and electrostatic energy storage and management systems for electric drive vehicles: State-of-the-art review and future trends." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 4.3 (2016): 1117-1134.

[36] C.-H. Dustmann, "Advances in ZEBRA batteries," *J. Power Sour.*, vol. 127, nos. 1–2, pp. 85–92, 2004.

[37] K. B. Hueso, M. Armand, and T. Rojo, "High temperature sodium batteries: Status, challenges and future trends," *Energy Environ. Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 734–749, 2013.

[38] J. L. Sudworth, "The sodium/nickel chloride (ZEBRA) battery," *J. Power Sour.*, vol. 100, nos. 1–2, pp. 149–163, 2001.

[39] J. Dixon, I. Nakashima, E. F. Arcos, and M. Ortuzar, "Electric vehicle using a combination of ultracapacitors and ZEBRA battery," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 3, pp. 943–949, Mar. 2010.

- [40] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: A critical review," *Prog. Natural Sci.*, vol. 19, no. 3, pp. 291–312, 2009.
- [41] S. Sabihuddin, A. E. Kiprakis, and M. Mueller, "A numerical and graphical review of energy storage technologies," *Energies*, vol. 8, no. 1, pp. 172–216, 2014.
- [42] I. J. Fernández, C. F. Calvillo, A. Sánchez-Miralles, and J. Boal, "Capacity fade and aging models for electric batteries and optimal charging strategy for electric vehicles," *Energy*, vol. 60, pp. 35–43, Oct. 2013.
- [43] T. B. Reddy, *Linden's Handbook of Batteries*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2010, ch. 26.
- [44] G. Mulder et al., "Comparison of commercial battery cells in relation to material properties," *Electrochim. Acta*, vol. 87, pp. 473–488, Jan. 2013.
- [45] Y. V. Mikhaylik, I. Kovalev, R. Schock, K. Kumaresan, J. Xu, and J. Affinito, "High energy rechargeable Li-S cells for EV application: Status, remaining problems and solutions," *ECS Trans.*, vol. 25, no. 35, pp. 23–34, 2010.
- [46] *Advanced Battery Development—2013 Annual Progress Report*, U.S. Dept. Energy, Washington, DC, USA, 2013.
- [47] M. Hagen, D. Hanselmann, K. Ahlbrecht, R. Maça, D. Gerber, and J. Tübke, "Lithium–sulfur cells: The gap between the state-of-the-art and the requirements for high energy battery cells," *Adv. Energy Mater.*, vol. 5, no. 16, 2015.
- [48] H. Popp, J. Attia, F. Delcorso, and A. Trifonova, "Lifetime analysis of four different lithium ion batteries for (plug-in) electric vehicle," in *Proc. Transp. Res. Arena*, Paris, France, 2014.
- [49] N. Omar et al., "Rechargeable energy storage systems for plug-in hybrid electric vehicles—Assessment of electrical characteristics," *Energies*, vol. 5, no. 12, pp. 2952–2988, 2012.
- [50] D. A. Wetz, P. M. Novak, B. Shrestha, J. Heinzl, and S. T. Donahue, "Electrochemical energy storage devices in pulsed power," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 42, no. 10, pp. 3034–3042, Oct. 2014.
- [51] Panasonic. (2012). Panasonic Lithium Ion NCR18650 Specifications Version 13.11 R1. [Online]. Available: <http://industrial.panasonic.com/cdbs/www-data/pdf2/ACA4000/ACA4000CE240%.pdf>
- [52] Y. Su, S. Cui, Z. Zhuo, W. Yang, X. Wang, and F. Pan, "Enhancing the high-voltage cycling performance of $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ by retarding its interfacial reaction with an electrolyte by atomic-layer-deposited Al_2O_3 ," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 7, no. 45, pp. 25105–25112, 2015.

- [53] M. Anderman, "Assessing the future of hybrid and electric vehicles: The xEV industry insider report," Advanced Automotive Batteries, Tech. Rep., 2013.
- [54] M. Barghamadi, A. Kapoor, and C. Wen, "A review on Li-S batteries as a high efficiency rechargeable lithium battery," J. Electrochem. Soc., vol. 160, no. 8, pp. A1256–A1263, 2013.
- [55] P. G. Bruce, S. A. Freunberger, L. J. Hardwick, and J.-M. Tarascon, "Li–O₂ and Li–S batteries with high energy storage," Nature Mater., vol. 11, no. 1, pp. 19–29, 2012.
- [56] P. G. Bruce, L. J. Hardwick, and K. M. Abraham, "Lithium-air and lithium-sulfur batteries," MRS Bull., vol. 36, no. 7, pp. 506–512, 2011.
- [57] L. Chen and L. L. Shaw, "Recent advances in lithium–sulfur batteries," J. Power Sour., vol. 267, pp. 770–783, Dec. 2014.
- [58] F. Mizuno, S. Nakanishi, Y. Kotani, S. Yokoishi, and H. Iba, "Rechargeable Li-air batteries with carbonate-based liquid electrolytes," Electrochemistry, vol. 78, no. 5, pp. 403–405, 2010.
- [59] A. Kraytsberg and Y. Ein-Eli, "Review on Li–air batteries— Opportunities, limitations and perspective," J. Power Sour., vol. 196, no. 3, pp. 886–893, 2011.
- [60] Y. V. Mikhaylik, I. Kovalev, R. Schock, K. Kumaresan, J. Xu, and J. Affinito, "High energy rechargeable Li-S cells for EV application: Status, remaining problems and solutions," ECS Trans., vol. 25, no. 35, pp. 23–34, 2010.
- [61] X. Ji and L. F. Nazar, "Advances in Li–S batteries," J. Mater. Chem., vol. 20, no. 44, pp. 9821–9826, 2010.
- [62] H. Wang et al., "Graphene-wrapped sulfur particles as a rechargeable lithium–sulfur battery cathode material with high capacity and cycling stability," Nano Lett., vol. 11, no. 7, pp. 2644–2647, 2011.
- [63] S. Lu, Y. Cheng, X. Wu, and J. Liu, "Significantly improved longcycle stability in high-rate Li–S batteries enabled by coaxial graphene wrapping over sulfur-coated carbon nanofibers," Nano Lett., vol. 13, no. 6, pp. 2485–2489, 2013.
- [64] R. Chen et al., "Graphene-based three-dimensional hierarchical sandwich-type architecture for high-performance Li/S batteries," Nano Lett., vol. 13, no. 10, pp. 4642–4649, 2013.
- [65] M.-Q. Zhao et al., "Graphene/single-walled carbon nanotube hybrids: One-step catalytic growth and applications for high-rate Li–S batteries," ACS Nano, vol. 6, no. 12, pp. 10759–10769, 2012.
- [66] S. Evers and L. F. Nazar, "Graphene-enveloped sulfur in a one pot reaction: A cathode with good coulombic efficiency and high practical sulfur content," Chem. Commun. (Camb), vol. 48, no. 9, pp. 1233–1235, 2012.

- [67] N. Liu, L. Hu, M. T. McDowell, A. Jackson, and Y. Cui, "Prelithiated silicon nanowires as an anode for lithium ion batteries," *ACS Nano*, vol. 5, no. 8, pp. 6487–6493, 2011.
- [68] D. S. Jung, T. H. Hwang, S. B. Park, and J. W. Choi, "Spray drying method for large-scale and high-performance silicon negative electrodes in Li-ion batteries," *Nano Lett.*, vol. 13, no. 5, pp. 2092–2097, 2013.
- [69] A. Khaligh and Z. Li, "Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814, Jul. 2010.
- [70] T. B. Reddy, *Linden's Handbook of Batteries*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2010, ch. 39.
- [71] A. J. Bard and L. R. Faulkner, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley, 2001.
- [72] H.-L. Girard, H. Wang, A. L. d'Entremont, and L. Pilon, "Enhancing faradaic charge storage contribution in hybrid pseudocapacitors," *Electrochim. Acta*, vol. 182, pp. 639–651, Nov. 2015.
- [73] A. D. Pasquier, I. Plitz, S. Menocal, and G. Amatucci, "A comparative study of Li-ion battery, supercapacitor and nonaqueous asymmetric hybrid devices for automotive applications," *J. Power Sour.*, vol. 115, no. 1, pp. 171–178, Mar. 2003.
- [74] B. J. Kirby, *Micro- and Nanoscale Fluid Mechanics: Transport in Microfluidic Devices*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2010.
- [75] A. Burke, M. Miller, and H. Zhao, "Ultracapacitors in hybrid vehicle applications: Testing of new high power devices and prospects for increased energy density," in *Proc. 26th Electr. Vehicle Symp. (EVS)*, vol. 3, 2012, pp. 2213–2220.
- [76] A. Lajunen, "Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses," *Transp. Res. C, Emerg. Technol.*, vol. 38, pp. 1–15, Jan. 2014.
- [77] A. Affanni, A. Bellini, G. Franceschini, P. Guglielmi, and C. Tassoni, "Battery choice and management for new-generation electric vehicles," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 5, pp. 1343–1349, Oct. 2005.
- [78] S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez, and A. Emadi, "Energy storage systems for automotive applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2258–2267, Jun. 2008.
- [79] G. Berdichevsky, K. Kelty, J. B. Straubel, and E. Toomre, "The tesla roadster battery system," Tesla Motors, San Carlos, CA, USA, Tech. Rep., 2006.

- [80] D. H. Doughty and C. C. Crafts, "FreedomCAR electrical energy storage system abuse test manual for electric and hybrid electric vehicle applications," United States Council Automotive Res., Southfield, MI, USA, Tech. Rep. SAND2005-3123, 2005, pp. 3–48.
- [81] K2 Ultracapacitors—2.7V Series, document 1015370.5, Maxwell, 2014. [Online]. Available:http://www.maxwell.com/images/documents/K2Series_DS_1015370_5_20141104.pdf
- [82] JM Energy Corporation. (2014). Lithium Ion Capacitor ULTIMO. [Online]. Available: <http://www.jsrmicro.com/docs/ULTIMO%20Brochure-en.pdf>
- [83] N. H. Kutkut, H. L. N. Wiegman, D. M. Divan, and D. W. Novotny, "Charge equalization for an electric vehicle battery system," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 34, no. 1, pp. 235–246, Jan. 1998.
- [84] N. H. Kutkut, H. L. N. Wiegman, D. M. Divan, and D. W. Novotny, "Design considerations for charge equalization of an electric vehicle battery system," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 35, no. 1, pp. 28–35, Jan./Feb. 1999.
- [85] W. Peukert, "Über die Abhängigkeit der Kapazität von der Entladestromstärke bei Bleiakkumulatoren," Elektrotechnische Zeitschrift, vol. 20, pp. 20–21, 1897.
- [86] D. Doerffel and S. A. Sharkh, "A critical review of using the Peukert equation for determining the remaining capacity of lead-acid and lithium-ion batteries," J. Power Sour., vol. 155, no. 2, pp. 395–400, 2006.
- [87] A. Hausmann and C. Depcik, "Expanding the Peukert equation for battery capacity modeling through inclusion of a temperature dependency," J. Power Sour., vol. 235, pp. 148–158, Aug. 2013.
- [88] S. Peck and M. Pierce, "Development of a temperature-dependent Li-ion battery thermal model," SAE Tech. Paper 2012-01-0117, 2012.
- [89] L. Gao, S. Liu, and R. A. Dougal, "Dynamic lithium-ion battery model for system simulation," IEEE Trans. Compon. Packag. Technol., vol. 25, no. 3, pp. 495–505, Sep. 2002.
- [90] C. K. Dyer, P. T. Moseley, Z. Ogumi, D. A. J. Rand, and B. Scrosati, Encyclopedia of Electrochemical Power Sources. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2009.
- [91] J. Vetter et al., "Ageing mechanisms in lithium-ion batteries," J. Power Sour., vol. 147, nos. 1–2, pp. 269–281, 2005.
- [92] M. Broussely et al., "Main aging mechanisms in Li ion batteries," J. Power Sour., vol. 146, nos. 1–2, pp. 90–96, 2005.
- [93] A. Farmann, W. Waag, A. Marongiu, and D. U. Sauer, "Critical review of on-board capacity estimation techniques for lithium-ion batteries in electric and hybrid electric vehicles," J. Power Sour., vol. 281, pp. 114–130, May 2015.

- [94] S. M. Rezvanizani, Z. Liu, Y. Chen, and J. Lee, "Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility," *J. Power Sour.*, vol. 256, pp. 110–124, Jun. 2014.
- [95] A. Barré, B. Deguilhem, S. Grolleau, M. Gérard, F. Suard, and D. Riu, "A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications," *J. Power Sour.*, vol. 241, pp. 680–689, Nov. 2013.
- [96] W. Waag, C. Fleischer, and D. U. Sauer, "Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles," *J. Power Sour.*, vol. 258, pp. 321–339, Jul. 2014.
- [97] P. Malysz, R. Gu, J. Ye, H. Yang, and A. Emadi, "State-of-charge and state-of-health estimation with state constraints and current sensor bias correction for electrified powertrain vehicle batteries," *IET Elect. Syst. Transp.*, pp. 1–9, 2016.
- [98] R. Ahmed, M. El Sayed, I. Arasaratnam, J. Tjong, and S. Habibi, "Reduced-order electrochemical model parameters identification and SOC estimation for healthy and aged Li-ion batteries—Part I: Parameterization model development for healthy batteries," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 2, no. 3, pp. 659–677, Sep. 2014.
- [99] R. Ahmed, M. El Sayed, I. Arasaratnam, J. Tjong, and S. Habibi, "Reduced-order electrochemical model parameters identification and state of charge estimation for healthy and aged Li-ion batteries—Part II: Aged battery model and state of charge estimation," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 2, no. 3, pp. 678–690, Sep. 2014.
- [100] F. Codecà, S. M. Savaresi, and V. Manzoni, "The mix estimation algorithm for battery state-of-charge estimator—Analysis of the sensitivity to measurement errors," in *Proc. 48th IEEE Conf. Decision Control, 28th Chin. Control Conf. (CDC/CCC)*, Dec. 2009, pp. 8083–8088.
- [101] F. Codecà, S. M. Savaresi, and G. Rizzoni, "On battery state of charge estimation: A new mixed algorithm," in *Proc. 17th IEEE Int. Conf. Control Appl. (CCA)*, Sep. 2008, pp. 102–107.
- [102] M. A. Roscher, "Zustandserkennung von LiFePO₄-batterien für hybrid und elektrofahrzeuge," Ph.D. dissertation, RWTH Aachen Univ., Aachen, Germany, 2010.
- [103] M. A. Roscher and D. U. Sauer, "Dynamic electric behavior and open-circuit-voltage modeling of LiFePO₄-based lithium ion secondary batteries," *J. Power Sour.*, vol. 196, no. 1, pp. 331–336, 2011.
- [104] F. Baronti et al., "State-of-charge estimation enhancing of lithium batteries through a temperature-dependent cell model," in *Proc. Int. Conf. Appl. Electron. (AE)*, Sep. 2011, pp. 1–5.

- [106] M. A. Roscher, O. S. Bohlen, and D. U. Sauer, "Reliable state estimation of multicell lithium-ion battery systems," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, no. 3, pp. 737–743, Sep. 2011.
- [107] T. Kim, W. Qiao, and L. Qu, "Real-time state of charge and electrical impedance estimation for lithium-ion batteries based on a hybrid battery model," in *Proc. 28th Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC)*, Mar. 2013, pp. 563–568.
- [108] T. Kim, W. Qiao, and L. Qu, "Online state of charge and electrical impedance estimation for multicell lithium-ion batteries," in *Proc. IEEE Transp. Electrification Conf. Expo (ITEC)*, Jun. 2013, pp. 1–6.
- [109] X. Chen, W. Shen, Z. Cao, and A. Kapoor, "A comparative study of observer design techniques for state of charge estimation in electric vehicles," in *Proc. 7th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. (ICIEA)*, Jul. 2012, pp. 102–107.
- [110] J. Li, J. K. Barillas, C. Guenther, and M. A. Danzer, "A comparative study of state of charge estimation algorithms for LiFePO₄ batteries used in electric vehicles," *J. Power Sour.*, vol. 230, pp. 244–250, May 2013.
- [111] X. Hu, F. Sun, and Y. Zou, "Estimation of state of charge of a lithiumion battery pack for electric vehicles using an adaptive Luenberger observer," *Energies*, vol. 3, no. 9, pp. 1586–1603, 2010.
- [112] H. Chaoui and P. Sicard, "Accurate state of charge (SOC) estimation for batteries using a reduced-order observer," in *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol. (ICIT)*, Mar. 2011, pp. 39–43.
- [113] L. Liu, L. Y. Wang, Z. Chen, C. Wang, F. Lin, and H. Wang, "Integrated system identification and state-of-charge estimation of battery systems," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 1, pp. 12–23, Mar. 2013.
- [105] [114] Y.-H. Chiang, W.-Y. Sean, and J.-C. Ke, "Online estimation of internal resistance and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles," *J. Power Sour.*, vol. 196, no. 8, pp. 3921–3932, 2011.
- [106][115] M. Gholizadeh and F. R. Salmasi, "Estimation of state of charge, unknown nonlinearities, and state of health of a lithium-ion battery based on a comprehensive unobservable model," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 3, pp. 1335–1344, Mar. 2014.
- [116] I.-S. Kim, "The novel state of charge estimation method for lithium battery using sliding mode observer," *J. Power Sour.*, vol. 163, no. 1, pp. 584–590, 2006.
- [117] F. Zhang, G. Liu, and L. Fang, "A battery state of charge estimation method using sliding mode observer," in *Proc. 7th World Congr. Intell. Control Autom.*, 2008, pp. 989–994.

- [118] X. Chen, W. Shen, Z. Cao, A. Kapoor, and I. Hijazin, "Adaptive gain sliding mode observer for state of charge estimation based on combined battery equivalent circuit model in electric vehicles," in Proc. 8th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. (ICIEA), Jun. 2013, pp. 601–606.
- [119] X. Chen, W. Shen, Z. Cao, and A. Kapoor, "A novel approach for state of charge estimation based on adaptive switching gain sliding mode observer in electric vehicles," J. Power Sour., vol. 246, pp. 667–678, Jan. 2014.
- [120] G. L. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 1. Background," J. Power Sour., vol. 134, pp. 252–261, Aug. 2004.
- [121] G. L. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 2. Modeling and identification," J. Power Sour., vol. 134, no. 2, pp. 262–276, 2004.
- [122] G. L. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 3. State and parameter estimation," J. Power Sour., vol. 134, no. 2, pp. 277–292, 2004.
- [123] S. E. Samadani, R. A. Fraser, and M. Fowler, "A review study of methods for lithium-ion battery health monitoring and remaining life estimation in hybrid electric vehicles," SAE Tech. Paper 2012-01-0125, 2012.
- [124] M. Chen and G. A. Rincón-Mora, "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I–V performance," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 21, no. 2, pp. 504–511, Jun. 2006.
- [125] E. Chemali et al., "Minimizing battery wear in a hybrid energy storage system using a linear quadratic regulator," in Proc. 41st Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON), Nov. 2015, pp. 003265–003270.
- [126] S. Buller, M. Thele, R. W. De Doncker, and E. Karden, "Impedancebased simulation models of supercapacitors and Li-ion batteries for power electronic applications," in Proc. 38th IAS Annu. Meeting. Conf. Rec. Ind. Appl. Conf., vol. 3, Oct. 2003, pp. 1596–1600.
- [cemali-118] [127] D. Andre, M. Meiler, K. Steiner, H. Walz, T. Soczka-Guth, and D. U. Sauer, "Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. II: Modelling," J. Power Sour., vol. 196, no. 12, pp. 5349–5356, 2011.
- [cemali-121][128] H. J. Bergveld, "Battery management systems design by modelling," Ph.D. dissertation, Univ. Twente, Enschede, The Netherlands, 2001.
- [129] V. Pop, H. J. Bergveld, D. Danilov, P. P. L. Regtien, and P. H. L. Notten, Battery Management Systems: Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications. London, U.K.: Springer-Verlag, 2008.

- [130] J. T. B. A. Kessels, B. Rosca, H. J. Bergveld, and P. P. J. van den Bosch, "On-line battery identification for electric driving range prediction," in Proc. IEEE Vehicle Power Propuls. Conf. (VPPC), Sep. 2011, pp. 1–6.
- [131] E. Barsoukov, D. Poole, and D. Freeman, "Circuit and method for measurement of battery capacity fade," U.S. Patent 6892148, May 10, 2005.
- [132] X. Zhang, X. Tang, J. Lin, Y. Zhang, M. A. Salman, and Y.-K. Chin, "Method for battery capacity estimation," U.S. Patent 8084996, Dec. 27, 2011.
- [133] B. S. Bhangu, P. Bentley, D. A. Stone, and C. M. Bingham, "Nonlinear observers for predicting state-of-charge and state-of-health of lead-acid batteries for hybrid-electric vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 54, no. 3, pp. 783–794, May 2005.
- [134] B. S. Bhangu, P. Bentley, D. A. Stone, and C. M. Bingham, "State-of-charge and state-of-health prediction of lead-acid batteries for hybrid electric vehicles using non-linear observers," in Proc. IEEE 11th Eur. Conf. Power Electron. Appl., Sep. 2005, p. 10.
- [135] F. Zhang, G. Liu, and L. Fang, "Battery state estimation using unscented Kalman filter," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA), May 2009, pp. 1863–1868.
- [136] X. Tang, X. Mao, J. Lin, and B. Koch, "Capacity estimation for Li-ion batteries," in Proc. Amer. Control Conf., 2011, pp. 947–952.
- [137] X. Tang, Y. Zhang, A. C. Baughman, B. J. Koch, J. Lin, and D. R. Frisch, "Dynamic battery capacity estimation," U.S. Patent 0136594, May 31, 2012.
- [138] G. L. Plett, "Sigma-point Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 2: Simultaneous state and parameter estimation," *J. Power Sour.*, vol. 161, no. 2, pp. 1369–1384, 2006.
- [139] V. J. Bigorra, R. J. Giro, V. M. Puig, S. O. Ruiz, and M. J. Samitier, "System for dynamic evaluation of the state of health and charge of a vehicle battery," EP Patent 1357390, Oct. 29, 2003.
- [140] K. S. Champlin, "Method and apparatus for determining battery properties from complex impedance/admittance," U.S. Patent 6037777, Mar. 14, 2000.
- [141] J. S. Marti, M. P. Vidal, O. R. Sanchez, D. G. Murillo, J. B. Vives, and J. G. Roca, "Method for dynamically measuring the state of health and charge of a car battery and device for implementing said method," U.S. Patent 6876174, Apr. 5, 2005.
- [142] S. Pang, J. Farrell, J. Du, and M. Barth, "Battery state-of-charge estimation," in Proc. Amer. Control Conf. (ACC), vol. 2, Jun. 2001, pp. 1644–1649.
- [143] H. Dai, X. Wei, and Z. Sun, "State and parameter estimation of a HEV Li-ion battery pack using adaptive Kalman filter with a new SOC-OCV concept," in Proc. Int. Conf. Meas. Technol. Mechatronics Autom., vol. 2, Apr. 2009, pp. 375–380.

- [144] H. He, R. Xiong, and H. Guo, "Online estimation of model parameters and state-of-charge of LiFePO₄ batteries in electric vehicles," *Appl. Energy*, vol. 89, no. 1, pp. 413–420, Jan. 2012.
- [145] D. V. Do, C. Forgez, K. E. K. Benkara, and G. Friedrich, "Impedance observer for a Li-ion battery using Kalman filter," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 8, pp. 3930–3937, Oct. 2009.
- [146] G. Plett, "State and parameter estimation for an electrochemical cell," U.S. Patent 8103485, Jan. 24, 2012.
- [147] X.-S. Hu, F.-C. Sun, and X. Cheng, "Recursive calibration for a lithium iron phosphate battery for electric vehicles using extended Kalman filtering," *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, vol. 12, no. 11, pp. 818–825, 2011.
- [148] D. Haifeng, W. Xuezhe, and S. Zechang, "A new SOH prediction concept for the power lithium-ion battery used on HEVs," in *Proc. IEEE Vehicle Power Propuls. Conf. (VPPC)*, Sep. 2009, pp. 1649–1653.
- [149] R. Xiong, F. Sun, X. Gong, and C. Gao, "A data-driven based adaptive state of charge estimator of lithium-ion polymer battery used in electric vehicles," *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1421–1433, Jan. 2014.
- [150] H. He, X. Zhang, R. Xiong, Y. Xu, and H. Guo, "Online modelbased estimation of state-of-charge and open-circuit voltage of lithiumion batteries in electric vehicles," *Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 310–318, Mar. 2012.
- [151] J. Li, J. K. Barillas, C. Guenther, and M. A. Danzer, "Sequential Monte Carlo filter for state estimation of LiFePO₄ batteries based on an online updated model," *J. Power Sour.*, vol. 247, pp. 156–162, Feb. 2014.
- [cemali-145][152] P. Cicconi, D. Landi, A. Morbidoni, and M. Germani, "Feasibility analysis of second life applications for Li-ion cells used in electric powertrain using environmental indicators," in *Proc. IEEE Int. Energy Conf. Exhibit. (ENERGYCON)*, Sep. 2012, pp. 985–990.
- [153] W. Wang, J. Ye, P. Malysz, H. Yang, and A. Emadi, "Sensitivity analysis of Kalman filter based capacity estimation for electric vehicles," in *Proc. IEEE Transp. Electrific. Conf. Expo (ITEC)*, Jun. 2015, pp. 1–7.
- [154] P. Malysz, J. Ye, R. Gu, H. Yang, and A. Emadi, "Battery state-ofpower peak current calculation and verification using an asymmetric parameter equivalent circuit model," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 6, pp. 4512–4522, Jun. 2016.
- [155] N. H. Kutkut and D. M. Divan, "Dynamic equalization techniques for series battery stacks," in *Proc. Int. Telecommun. Energy Conf. (INTELEC)*, Oct. 1996, pp. 514–521.

- [156] C. S. Moo, Y.-C. Hsieh, I. S. Tsai, and J. C. Cheng, "Dynamic charge equalisation for series-connected batteries," *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 150, no. 5, pp. 501–505, Sep. 2003.
- [157] M. Tang and T. Stuart, "Selective buck-boost equalizer for series battery packs," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 36, no. 1, pp. 201–211, Jan. 2000.
- [158] S. Moore and P. Schneider, "A review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems," *SAE Tech. Paper 2001-01-0959*, 2001.
- [159] W. C. Lee, D. Drury, and P. Mellor, "Comparison of passive cell balancing and active cell balancing for automotive batteries," in *Proc. Vehicle Power Propuls. Conf. (VPPC)*, Sep. 2011, pp. 1–7.
- [160] M. Preindl, C. Danielson, and F. Borrelli, "Performance evaluation of battery balancing hardware," in *Proc. Eur. Control Conf. (ECC)*, Jul. 2013, pp. 4065–4070.
- [160] T. B. Reddy, *Linden's Handbook of Batteries*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2010, ch. 39.
- [162] L. C. Rosario, "Power and energy management of multiple energy storage systems in electric vehicles," Ph.D. dissertation, Dept. Aerosp. Power Sensors, Cranfield Univ., Cranfield, U.K., 2008.
- [163] A. Khaligh and Z. Li, "Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814, Jul. 2010.
- [164] E. Karden, S. Ploumen, B. Fricke, T. Miller, and K. Snyder, "Energy storage devices for future hybrid electric vehicles," *J. Power Sour.*, vol. 168, no. 1, pp. 2–11, May 2007.
- [165] N. Schofield, H. T. Yap, and C. M. Bingham, "Hybrid energy sources for electric and fuel cell vehicle propulsion," in *Proc. IEEE Conf. Vehicle Power Propuls.*, Sep. 2005, pp. 522–529.
- [166] A. S. Samosir and A. H. M. Yatim, "Implementation of dynamic evolution control of bidirectional DC–DC converter for interfacing ultracapacitor energy storage to fuel-cell system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 10, pp. 3468–3473, Oct. 2010.
- [167] A. Dhand and K. Pullen, "Characterization of flywheel energy storage system for hybrid vehicles," *SAE Tech. Paper 2014-01-1796*, 2014.
- [168] A. Dhand and K. Pullen, "Review of battery electric vehicle propulsion systems incorporating flywheel energy storage," *Int. J. Automotive Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 487–500, Jun. 2015.

- [169] R. Gu, P. Malysz, and A. Emadi, "A novel battery/ ultracapacitor hybrid energy storage system analysis based on physics-based lithium-ion battery modeling," in Proc. IEEE Transp. Electrification Conf. Expo (ITEC), Jun. 2015, pp. 1–6.
- [170] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 5, pp. 1184–1194, Sep. 2004.
- [171] M. E. Glavin, P. K. W. Chan, S. Armstrong, and W. G. Hurley, "A stand-alone photovoltaic supercapacitor battery hybrid energy storage system," in Proc. 13th Power Electron. Motion Control Conf. (EPE-PEMC), Sep. 2008, pp. 1688–1695.
- [172] W. Li and G. Joos, "A power electronic interface for a battery supercapacitor hybrid energy storage system for wind applications," in Proc. IEEE Power Electron. Specialists Conf. (PESC), Jun. 2008, pp. 1762–1768.
- [173] A. Etxeberria, I. Vechiu, H. Camblong, and J.-M. Vinassa, "Comparison of three topologies and controls of a hybrid energy storage system for microgrids," Energy Convers. Manage., vol. 54, no. 1, pp. 113–121, Feb. 2012.
- [174] H. A. Borhan and A. Vahidi, "Model predictive control of a powersplit hybrid electric vehicle with combined battery and ultracapacitor energy storage," in Proc. Amer. Control Conf. (ACC), Jun./Jul. 2010, pp. 5031–5036.
- [175] J. Cao, B. Cao, Z. Bai, and W. Chen, "Energy-regenerative fuzzy sliding mode controller design for ultracapacitor-battery hybrid power of electric vehicle," in Proc. IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom., Aug. 2007, pp. 1570–1575.
- [176] K. Kawashima, T. Uchida, and Y. Hori, "Development of a novel ultracapacitor electric vehicle and methods to cope with voltage variation," in Proc. 5th IEEE Vehicle Power Propuls. Conf. (VPPC), Sep. 2009, pp. 724–729.
- [177] V. A. Shah, S. G. Karndhar, R. Maheshwari, P. Kundu, and H. Desai, "An energy management system for a battery ultracapacitor hybrid electric vehicle," in Proc. Int. Conf. Ind. Inf. Syst. (ICIIS), Dec. 2009, pp. 408–413.
- [178] M. Anderman, "Assessing the future of hybrid and electric vehicles: The xEV industry insider report," Advanced Automotive Batteries, Tech. Rep., 2013.
- [179] J. Dixon, I. Nakashima, E. F. Arcos, and M. Ortuzar, "Electric vehicle using a combination of ultracapacitors and ZEBRA battery," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 3, pp. 943–949, Mar. 2010.
- [180] A. M. Jarushi and N. Schofield, "Battery and supercapacitor combination for a series hybrid electric vehicle," in Proc. 5th IET Int. Conf. Power Electron., Mach. Drives (PEMD), Apr. 2010, pp. 1–6.

- [181] C. Capasso, V. Sepe, O. Veneri, M. Montanari, and L. Poletti, "Experimentation with a ZEBRA plus EDLC based hybrid storage system for urban means of transport," in *Proc. Int. Conf. Elect. Syst. Aircraft, Railway Ship Propuls. (ESARS)*, Mar. 2015, pp. 1–6.
- [182] A. Brett, P. Aguiar, and N. P. Brandon, "System modelling and integration of an intermediate temperature solid oxide fuel cell and ZEBRA battery for automotive applications," *J. Power Sour.*, vol. 163, no. 1, pp. 514–522, Dec. 2006.
- [183] J. Vetter et al., "Ageing mechanisms in lithium-ion batteries," *J. Power Sour.*, vol. 147, nos. 1–2, pp. 269–281, 2005.
- [184] A. Barré, B. Deguilhem, S. Grolleau, M. Gérard, F. Suard, and D. Riu, "A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications," *J. Power Sour.*, vol. 241, pp. 680–689, Nov. 2013.
- [185] M. Safari, M. Morcrette, A. Teyssot, and C. Delacourt, "Multimodal physics-based aging model for life prediction of Li-ion batteries," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 156, no. 3, pp. A145–A153, 2009.
- [186] X. Lin, J. Park, L. Liu, Y. Lee, A. M. Sastry, and W. Lu, "A comprehensive capacity fade model and analysis for Li-ion batteries," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 160, no. 10, pp. A1701–A1710, 2013.
- [187] M. Safari, M. Morcrette, A. Teyssot, and C. Delacourt, "Life prediction methods for lithium-ion batteries derived from a fatigue approach," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 157, no. 7, pp. A892–A898, 2010.
- [188] X. Hu, L. Johannesson, N. Murgovski, and B. Egardt, "Longevityconscious dimensioning and power management of the hybrid energy storage system in a fuel cell hybrid electric bus," *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 913–924, Jan. 2015.
- [189] Y. Wang, X. Lin, Q. Xie, N. Chang, and M. Pedram, "Minimizing state-of-health degradation in hybrid electrical energy storage systems with arbitrary source and load profiles," in *Proc. Design, Autom. Test Eur. Conf. Exhibit. (DATE)*, Mar. 2014, pp. 1–4.
- [190] E. Chemali et al., "Minimizing battery wear in a hybrid energy storage system using a linear quadratic regulator," in *Proc. 41st Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON)*, Nov. 2015, pp. 003265–003270.
- [191] A. Santucci, A. Sorniotti, and C. Lekakou, "Power split strategies for hybrid energy storage systems for vehicular applications," *J. Power Sour.*, vol. 258, pp. 395–407, Jul. 2014.
- [192] M. B. Camara, H. Gualous, F. Gustin, and A. Berthon, "Design and new control of DC/DC converters to share energy between supercapacitors and batteries in hybrid vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 5, pp. 2721–2735, Sep. 2008.

- [193] Z. Song, H. Hofmann, J. Li, J. Hou, X. Han, and M. Ouyang, "Energy management strategies comparison for electric vehicles with hybrid energy storage system," *Appl. Energy*, vol. 134, pp. 321–331, Dec. 2014.
- [194] A. Ostadi, M. Kazerani, and S.-K. Chen, "Hybrid energy storage system (HESS) in vehicular applications: A review on interfacing battery and ultra-capacitor units," in *Proc. IEEE Transp. Electrific. Conf. Expo (ITEC)*, Jun. 2013, pp. 1–7.
- [195] L. Gao, R. A. Dougal, and S. Liu, "Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 1, pp. 236–243, Jan. 2005.
- [196] G. Nielson and A. Emadi, "Hybrid energy storage systems for highperformance hybrid electric vehicles," in *Proc. IEEE Vehicle Power Propuls. Conf.*, Sep. 2011, pp. 1–6.
- [197] A. Kuperman, I. Aharon, S. Malki, and A. Kara, "Design of a semiactive battery-ultracapacitor hybrid energy source," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 2, pp. 806–815, Feb. 2013.
- [198] J. Cao and A. Emadi, "A new battery/ultra-capacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid and plug-in hybrid electric vehicles," in *Proc. IEEE Vehicle Power Propuls. Conf.*, Sep. 2009, pp. 941–946.
- [199] A. Emadi, *Advanced Electric Drive Vehicles*. New York, NY, USA: CRC Press, 2015.
- [200] K. Zhuge and M. Kazerani, "Development of a hybrid energy storage system (HESS) for electric and hybrid electric vehicles," in *Proc. IEEE Transp. Electrific. Conf. Expo (ITEC)*, Jun. 2014, pp. 1–5.
- [201] J. Cao and A. Emadi, "A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 1, pp. 122–132, Jan. 2012.
- [202] J. M. Miller, U. Deshpande, T. J. Dougherty, and T. Bohn, "Power electronic enabled active hybrid energy storage system and its economic viability," in *Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC)*, Feb. 2009, pp. 190–198.
- [203] J. M. Blanes, R. Gutiérrez, A. Garrigós, J. L. Lizán, and J. M. Cuadrado, "Electric vehicle battery life extension using ultracapacitors and an FPGA controlled interleaved buck–boost converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 12, pp. 5940–5948, Dec. 2013.
- [204] C.-H. Tu and A. Emadi, "A novel series-parallel reconfigurable hybrid energy storage system for electrified vehicles," in *Proc. IEEE Transp. Electrific. Conf. Expo (ITEC)*, Jun. 2012, pp. 1–4.

- [205] S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez, and A. Emadi, "Energy storage systems for automotive applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 6, pp. 2258–2267, Jun. 2008.
- [206] C.-H. Tu and A. Emadi, "A novel series-parallel reconfigurable hybrid energy storage system for electrified vehicles," in Proc. IEEE Transp. Electrific. Conf. Expo (ITEC), Jun. 2012, pp. 1–4.
- [207] Prof.Dr. Selim ÇETİNKAYA , 'Taşıt Mekaniği, 3. basım, Ağustos-2004' Nobel Basımevi.
- [208] Serkan DÜŞMEZ ' Elektrikli Taşıtlarda Faydalı Frenleme Enerjisinin Daha İyi Kazanımı için Bir Güç Döüştürücü Tasarımı ve Uygulaması' İstanbul-2010
- [209] Allegre, A. L., A. Bouscayrol, and R. Trigui. "Influence of control strategies on battery/supercapacitor hybrid energy storage systems for traction applications." Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC'09. IEEE. IEEE, 2009.
- [210] Saleh, Mahmoud, et al. "Design and implementation of CCNY DC microgrid testbed." Industry Applications Society Annual Meeting, 2016 IEEE. IEEE, 2016.

ÖZGEÇMİŞ

Zülfü KUZU, 1991 yılında Kayseri'nin Develi ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğretimini Develi'de tamamladı. 2009 yılında Elazığ Mehmet Akif Ersoy Lisesi'nden mezun oldu. 2009 yılında kazandı.2013 yılında Mekatronik Mühendisliğinden mezun oldu.2014 yılı Haziran ayında askerden terhis oldu. Mekatronik Mühendsiliği Bölümü'nden mezun oldu. 2014 yılında Fırat Üniversitesi'nin Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2015 yılında ATCE Enerji ve Otomasyon Şirketinde üretim şefi olarak çalışmaya başladı. 2016 yılında TCS Uluslararası Belgelendirme Hizmetleri şirketinde asansör muayene mühendisi olarak çalışmaya başladı.