

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

**PROTOTİP BİR ELEKTRİKLİ ARAÇ ÜZERİNDE
ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİNİN UYGULANMASI**

ENES UĞUR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. MEHMET UZUNOĞLU**

İSTANBUL, 2011

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PROTOTİP BİR ELEKTRİKLİ ARAÇ ÜZERİNDE ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİNİN
UYGULANMASI**

Enes UGUR tarafından hazırlanan tez çalışması 22.06.2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Haluk GÖRGÜN
Yıldız Teknik Üniversitesi



ÖNSÖZ

Öncelikle bu üniversite bünyesine katılmamdan, tezin fikir altyapısının oluşturulmasına ve tezin ortaya çıkışına kadar tüm süreçte değerli bilgileriyle, yardım ve desteklerini esirgemeyerek bu çalışmanın ortaya çıkmasını sağlayan saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Mehmet Uzunoglu'na, değerli vakitlerini ayırarak bu tezin uygulamalı bir tez olarak ortaya çıkmasında büyük pay sahibi olan ve zaman zaman karşılaştığım problemlerde tavsiye ve yönlendirmelerini esirgemeyerek sorunların üstesinden gelmeme yardımcı olan sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Bülent Vural'a ve çalışma arkadaşım Serkan Düşmez'e en kalbî teşekkürlerimi arz ederim. Tezin düzeltmesinde özenle emek sarf eden arkadaşlarım Ozan Erdiç ve Bünyamin Yağcıtekin'e şükranlarımı sunarım. Ayrıca bu tezi bir araç üzerinde gerçek yol koşullarında yapmama olanak sağlayan prototip aracı, koşulsuz kullanımına sunan Elektrik Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Yönetimi'ne katkılarından ötürü minnettarlığımı bildiririm. Son olarak, maddi manevi destekleriyle koşulsuz olarak her zaman arkamda olan aileme teşekkürü de bir borç bilirim.

Haziran, 2011

Enes UĞUR

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	x
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	2
1.3 Orijinal Katkı.....	3
BÖLÜM 2	4
ELEKTRİKLİ TAŞIT TEKNOLOJİSİ	4
2.1 Elektrikli Araçların (EA) Tarihçesi	5
2.2 Elektrikli Araç Sistemleri	9
2.3 Pazar Tahmini ve Beklentiler	13
BÖLÜM 3	19
TEKNOPARK	19
3.1 Bataryalar.....	19
3.1.1 Kurşun-Asit Bataryalar	21
3.1.2 Nikel-Metal Hidrür Bataryalar	23
3.1.3 Lityum-Katı Polimer Bataryalar.....	23
3.1.4 Lityum-İyon Bataryalar.....	24
3.1.5 İleri Batarya Araştırmaları.....	26

3.2	Ultrakapasitörler	28
3.3	Enerji Depolama Aygıtlarının Karşılaştırılması	36
BÖLÜM 4		43
GÜÇ KOŞULLANDIRMA ÜNİTELERİ		43
4.1	Cuk Dönüştürücü	44
4.2	SEPIC ve Luo Dönüştürücüsü	45
4.3	Yarım Köprü Dönüştürücü	46
4.4	Kaskad Çift Yönlü DC-DC Dönüştürücü	47
4.5	Uygun Dönüştürücü Seçimi	50
BÖLÜM 5		54
PROTOTİP ARAÇ TESTLERİ		54
5.1	Test Aracı ve Deneysel Kurulum	55
5.2	Yol Testleri	60
5.2.1	Batarya Testleri	60
5.2.2	Ultrakapasitör Testleri	61
5.2.3	Hibrit Sistem Testleri.....	63
BÖLÜM 6		67
SONUÇ VE ÖNERİLER		67
KAYNAKLAR		69
ÖZGEÇMİŞ		71

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Geçmişten günümüze elektrikli araçlar	5
Şekil 2. 2 1895 yılında yapılan Electrobats isimli elektrikli araç	6
Şekil 2. 3 Seri hibrit konfigürasyonu	12
Şekil 2. 4 Paralel hibrit konfigürasyonu	12
Şekil 3. 1 Bataryanın şematik gösterimi	20
Şekil 3. 2 Lityum-iyon hücrenin fiziksel yapısı	25
Şekil 3. 3 Tam bir koruma devreli lityum-iyon batarya paketi	26
Şekil 3. 4 Klasik kapasitörlerin şematik gösterimi	30
Şekil 3. 5 Ultrakapasitörlerin şematik gösterimi	31
Şekil 3. 6 Ultrakapasitörlerin şematik gösterimi	33
Şekil 3. 7 48 V'luk bir ultrakapasitör modülü	36
Şekil 3. 8 Muhtelif enerji depolama aygıtları için Ragone Grafiği	39
Şekil 4. 1 Cuk çift yönlü dönüştürücü topolojisi.....	45
Şekil 4. 2 SEPIC/Luo dönüştürücü topolojisi	46
Şekil 4. 3 Yarım-köprü çift yönlü dönüştürücü topolojisi	47
Şekil 4. 4 Kaskad bağlı çift yönlü yükseltici ve düşürücü tip dc-dc dönüştürücü yapısı..	48
Şekil 4. 5 Kaskad topolojinin ileri yönde çalışma durumları	48
Şekil 4. 6 Kaskad topolojinin geri yönde çalışma durumları	49
Şekil 5. 1 Prototip taşıtın genel görünümü	55
Şekil 5. 2 Prototip taşıtın tahrik sistemi	56
Şekil 5. 3 Güç dönüştürücü ünitesi	57
Şekil 5. 4 Güç dönüştürücünün kontrol algoritması	58
Şekil 5. 5 Hibrit sistem elemanlarının yerleşimi.....	59
Şekil 5. 6 Motorun batarya ile beslenmesi	60
Şekil 5. 7 Batarya testi akım gerilim grafikleri	61
Şekil 5. 8 Motorun ultrakapasitör ile beslenmesi	61
Şekil 5. 9 Ultrakapasitör testi akım gerilim grafikleri	62
Şekil 5. 10 Ultrakapasitör testi taşıt hız değişimi	62
Şekil 5. 11 Motorun batarya ve ultrakapasitör ile beraber beslenmesi	63
Şekil 5. 12 Hibrit sistem testi akım gerilim grafikleri	64
Şekil 5. 13 Hibrit sistem testi sürüş güzergahı	65
Şekil 5. 14 Hibrit sistem testi taşıt hız değişim grafiği	65

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1 Planlanan elektrikli araç üretimleri	17
Çizelge 3. 1 Ultrakapasitörlerin bilinen avantaj ve dezavantajları	40
Çizelge 3. 2 Ultrakapasitör ve bataryaların karakteristiklerinin karşılaştırılması	41
Çizelge 5. 1 Güç dönüştürücü elektriksel özellikleri	57
Çizelge 5. 2 Araç ve elemanların özellikleri.....	59

PROTOTİP BİR ELEKTRİKLİ ARAÇ ÜZERİNDE ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİNİN UYGULANMASI

Enes UĞUR

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU

Ulaşımında rakipsiz enerji sağlayıcısı olan petrolün kullanımı, kötü çevresel etkileri, artan fiyatları ve tükenme tehlikesi ile karşı karşıya olan rezervleri sebebiyle artık alternatif enerji kaynakları ile değiştirilmek istenmektedir. En güçlü alternatif ise yüksek verimleri ve düşük emisyon değerleri ile elektrikli araçlardır. Elektrikli araçların yaygın kullanımı önündeki en büyük engel ise ana güç kaynağı olarak kullanılan batarya ve yakıt hücrelerinin düşük güç yoğunluklarıdır. Bu nedenle, taşıt uygulamalarında ana güç kaynağının uygun bir enerji depolama ünitesi ile birlikte hibrit kullanımı, genel sistem performansı yanı sıra verimliliği de önemli ölçüde arttırmaktadır. Enerji depolama sistemlerinden biri olan ultrakapasitör sistemlerinin, çok büyük miktarlardaki gücü çok hızlı bir biçimde verebilme ve frenleme enerjisini de verimli bir biçimde kazanabilme kabiliyeti vardır. Bu durumlar göz önüne alındığında, bataryaların ultra-kapasitör sistemleri ile birlikte kullanılması, taşıtların yüksek güç taleplerine cevap verebilecek bir yapı oluşturmaktadır. Burada, uygun bir enerji yönetim sistemi ve iyi tasarlanmış bir kontrol stratejisi hem verimliliği hem de araç dinamikliğini artırmaktadır.

Bu tez çalışmasında, batarya ve ultrakapasitör arasında yük paylaşımı sağlayan bir dc-dc dönüştürücü, gerilim düzenleyici PI kontrolör üzerinden kontrol edilmiş ve bu sistem prototip araç üzerinde test edilmiştir. Aracın maksimum güç talebine uygun batarya boyutlandırmasının gerekli olduğu geleneksel tasarım ile karşılaştırıldığında bu yapıda, araçtan aynı performansı almak için çok daha küçük batarya boyutları

kullanılabilmektedir. Belirli bir güzergahta seyir eden araçta yük paylaşımı ve dinamik cevap araştırması yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Elektrikli taşıtlar; ultrakapasitör; batarya; enerji yönetim ünitesi

ABSTRACT

APPLICATION OF ENERGY MANAGEMENT ON A PROTOTYPE ELECTRIC VEHICLE

Enes UĞUR

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet UZUNOĞLU

Growing negative effects on environment, increasing prices every day and depleting of resources are forcing the re-examination usage of petroleum as unrivaled energy provider in transportation sector. The strongest alternative among all technologies is electric vehicles with their high efficiencies and low emissions. The biggest obstacle to widespread use of electric vehicles is low-power densities of batteries and fuel cells which are used as main power supply. Therefore, by hybrid usage of the main power sources with an appropriate energy storage unit, it is possible to achieve higher overall system performances, as well as the efficiencies. Ultra-capacitors, one of the energy storage systems, have the capability to supply high amounts of power swiftly and capturing regenerative braking energy efficiently. Considering the aforementioned issues, utilizing batteries together with ultra-capacitor systems will be efficient to meet high power demands of a vehicle. Besides, a proper power management system and well-designed control strategy applied to battery and ultra-capacitor hybrid system will increase the overall system efficiency and dynamics of the vehicle.

In this dissertation, a dc-dc converter provides load sharing between the battery and the ultra-capacitor and it is controlled by the voltage regulating based PI controller. The complete system has been tested on the prototype vehicle. Compared to the conventional design, which requires an appropriate battery sizing for the maximum power demand of the vehicle, the new design uses a much smaller battery size to get

the same vehicle performance. Load sharing and dynamic responses are investigated at the vehicle driven on the particular route during tests.

Key words: Electric vehicle, batteries, ultra-capacitor, energy management

1.1 Literatür Özeti

Mevcut petrol rezervlerinin azalması ve her geçen gün artan çevresel kaygılar, alternatif enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmalara büyük bir ivme kazandırmıştır. Dünya çapında birçok araştırmacı çalışmalarını, özellikle petrol türevi yakıtların oransal olarak en üst düzeyde kullanıldığı ulaşım sektöründe kullanılabilecek alternatif enerji teknolojileri üzerine yoğunlaştırmıştır. Ulaşım sektörü kaynaklı zararlı emisyonların azaltılması ve petrole bağımlılığın düşürülmesinin amaçlandığı bu çalışmalarda, yüksek verime sahip ve çevre dostu olan elektrikli taşıt teknolojileri en kısa vadeli çözüm olarak ön plana çıkmaktadır [1], [2], [3], [4]. Elektrikli araçların yaygın kullanımı önündeki engel ise araçların düşük menzilleri ve bataryaların yüksek maliyetleridir. Yüksek maliyet probleminin, elektrikli taşıtlarda seri üretime geçilmesiyle; menzil problemininse, batarya teknolojisinin gelişimine paralel olarak kısmen çözümlenmesi beklenmektedir. Ancak, aracın tahrik edilmesinde bütün yük talebinin bataryalardan karşılanması durumunda, hem batarya boyutunda hem de maliyetinde artış meydana gelmektedir. Bu nedenle batarya sisteminin, uygun bir enerji depolama ünitesiyle hibrit kullanımı, toplam maliyeti düşürdüğü gibi taşıt performansını da önemli bir ölçüde arttırılabilecektir [5], [6], [7], [8]. Enerji depolama sistemlerinden (EDS) biri olan ultrakapasitör sistemleri, çok büyük miktarlardaki gücü çok hızlı bir biçimde verebilme ve frenleme enerjisini de verimli bir biçimde kazanabilme kabiliyetine sahiptir [10], [11], [12], [13], [14].

Hibrit enerji depolama sistemlerinde ultrakapasitör ile bataryaları bir arada kullanarak daha yüksek ani şarj ve deşarj oranlarına ulaşılabilirken, aynı zamanda sistem boyutlarını küçültmek ve bataryaların çevrim ömrünü artırmak mümkün olmaktadır. Bu nedenle hibrit enerji depolama sistemleri elektrikli araçlar için büyük önem taşımaktadır. Ancak farklı gerilim seviyelerine ve özellikle de farklı dinamik yapılar sahip olan EDS'lerin sisteme doğrudan bağlanması bazı olumsuzluklar meydana getirmektedir. Bu nedenle farklı enerji depolama sistemlerinin hibrit kullanımı bir güç dönüştürücüsü aracılığı ile gerçekleştirilmektedir [19], [20]. Burada, uygun bir enerji yönetim sistemi ve iyi tasarlanmış bir kontrol stratejisi hem verimliliği hem de araç dinamikliğini artırmaktadır.

Elektrikli taşıtlarda hibrit EDS'lerde, basit topoloji ve ucuz maliyete sahip olan izolesiz ve tek girişli çift yönlü güç dönüştürücülerinin kullanımı tercih edilmektedir. Literatürde bu özelliklere sahip yaygın olarak kullanılan dört bağlantı topolojisi ön plana çıkmaktadır. Bu farklı dönüştürücü türleri arasındaki seçim için belirleyici etkenler, performans, maliyet ve hacimdir. Yakın zamanda yapılmış çalışmalarda, elektrikli taşıtlarda EDS'ler için kullanılan en yaygın topolojinin yarım köprü güç dönüştürücü olduğu görülmektedir. Ancak yarım köprü dönüştürücüler yapıları nedeniyle güç akışının ileri yönünde sadece yükseltici modda ve güç akışının geri yönünde ise sadece düşürücü modda çalışabilirler. Bu durum yarım köprü dönüştürücülerini dönüştürücü çıkış geriliminin giriş kaynak gerilimine eşit veya daha büyük olduğu durumlarda çalışabilecek şekilde kısıtlar. Bu sebeple, hem yarım-köprü dönüştürücü topolojisinin sağladığı yüksek verim ve sahip olduğu ekonomik avantajlarını taşıyan, hem de yapıları sayesinde geri yönde de yükseltici modda çalışabilen kaskad bağlı çift yönlü dc-dc dönüştürücünün kullanımı ön plana çıkmaktadır [9], [19],[20].

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, her iki çalışma yönünde de yükseltici ve düşürücü modlarda çalışabilen kaskad bağlı çift yönlü güç dönüştürücüsünün kullanıldığı enerji yönetim stratejisinin prototip bir elektrikli araç üzerinde uygulanarak test edilmesi amaçlanmıştır. Taşıtın verimini ve batarya ömrünü arttırmaya yönelik olarak ultrakapasitör ile birlikte kullanılması öngörülen güç dönüştürücü ünitesi yük paylaşımı

gerçekleştirebilecek şekilde tasarlanmıştır. Güç dönüştürücüsünün nominal gücü 5 kW olarak belirlenmiş ve tasarlanan dönüştürücünün kontrolü, giriş ve çıkış gerilimleri ile referans değerler karşılaştırılarak PI kontrolör kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

1.3 Orijinal Katkı

Gerçekleştirilen çalışma, elektrikli taşıtlarda temel bir araştırma konusu olan hibrit enerji depolama sistemlerinin enerji yönetim sistemi uygulanarak tasarlanmasını ve prototip bir araç ile gerçek yol koşullarında test edilmesini sağlamaktadır. Uygulanan enerji yönetim sisteminin gerekli analizleri deneysel olarak sunulmuştur. Yapılan çalışmada tasarlanan enerji yönetim sisteminin gerçek yol koşullarında test edilmesi ile literatürdeki bir eksiliğin doldurulması ve elektrikli taşıt teknolojisine ve literatürde yer alan çalışmalara katkı sağlanması hedeflenmiştir.

ELEKTRİKLİ TAŞIT TEKNOLOJİSİ

Petrol rezervlerinin azalması ve petrole bağlı çevresel felaketlerin artması insanları yeni alternatif enerji arayışları içerisine itmektedir. Bu durum özellikle, petrol türevi yakıtların oransal olarak en üst düzeyde kullanıldığı ulaşım sektörünü etkilemektedir. Ulaşım sektöründe son zamanlarda ortaya çıkan atılımların lokomotifleri olan A.B.D için bu sektör çok büyük önem arz etmektedir. Dünya çapında tüketilen 87 milyon varil petrolün %20'sini tüketen A.B.D'de, petrol tüketiminin %70'i ve sera gazı salınımının %27'si ulaşım sektöründen kaynaklanmaktadır [1]. Ulaşım sektörü kaynaklı zararlı emisyonların azaltılması ve petrole bağımlılığın düşürülmesi için en kısa vadeli çözüm ise elektrikli araçlardır. 2009 yılında Obama hükümeti elektrikli araçları fosil yakıtlara alternatif olarak tanımlamış ve 2015 yılına dek bir milyon elektrikli aracın yollara çıkması yönünde milli bir hedef belirlemiştir. Bu amaçla federal hükümet, eyaletler ve yerel hükümetler tarafından elektrikli araçları teşvik edici birçok yasal düzenleme yapılmıştır [1]. Bu durum dünya çapında hibrit ve elektrikli araçlara olan ilgiyi bir anda artırmıştır. Hibrit ve elektrikli araçlara olan ilgi, egzoz salınımlarının etkileyici oranda azalması veya tamamen ortadan kalkması ve bu araçların yüksek yakıt verimlilikleri sayesinde, petrol kullanımının azalması avantajlarından kaynaklanmaktadır [2]. Eğer ulaşım sektörü petrol kökenli yakıtlardan elektrik enerjisinin kullanımına kayarsa, petrol sondajları sebebiyle oluşan su kirliliğinin azalmasından, havadaki duman ve kurum oranının düşmesine ve sera gazı emisyonlarının azalması ile küresel ısınmanın yavaşlatılmasına kadar bir dizi çevresel avantajlar elde edilebilecektir [1].

2.1 Elektrikli Araçların (EA) Tarihçesi

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

Ticari olarak satılmaya başlanan ilk otomobilin ortaya çıkışından bu yana 125 yıl geçmiştir. Bu zamandan beri, ekonomik kısıtlar, teknolojik atılımlar, yeni enerji kaynakları, çevresel kaygılar ve yasal düzenlemeler otomobil evrimini şekillendiren kritik faktörler olarak görülmektedir. Aynı faktörler, gelecekte alternatif araçlara geçişte de belirleyici temel faktörler olacaktır. Bu sebeple elektrikli araçların tarihine göz atarken, yüzyıldan daha fazla bir süre önce karşılaşılan sorunların bugün de hala var olduğunu kaydetmek yerinde olacaktır [2].



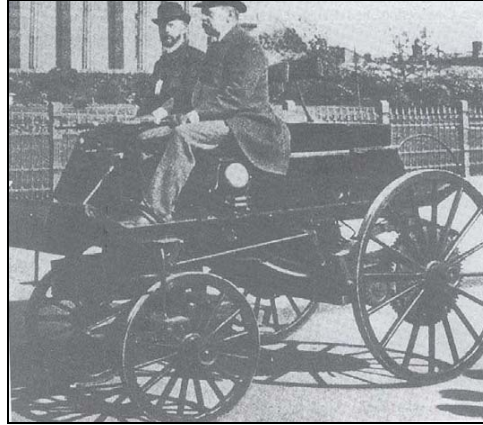
Şekil 2. 1 Geçmişten günümüze elektrikli araçlar [1]

Araçların elektrik enerjisi ile tahriğine olan ilgi son zamanlarda oldukça yükselmiştir. Ancak, bu fikir aslında hiç de yeni değildir. Elektrikli araçlar 1830'larda, benzinli motorun bulunuşundan yıllar önce icat edilmiştir [1]. İçten yanmalı motor (İYM) kullanan ilk araç 1807'de, François Isaac de Rivaz hidrojen-oksijen karışımı yakan bir motor geliştirdiği zaman ortaya çıkmıştır. 20 yıl sonra, 1828 yılında Macar Anyos Jedlik elektrikle çalışan model bir araç geliştirmiştir. 1832 yılında İskoçya'lı Robert Anderson elektrikli binek bir araç yapmıştır. 1835'de ise Hollandalı Profesör Stratingh ve Amerikalı Thomas Davenport birer elektrikli araç geliştirmişlerdir.

Bu ilk elektrikli araçlarda enerji kaynağı olarak tekrar şarj edilemeyen bataryalar kullanılmış ve bu sebeple ticari olarak varlık gösterememişlerdir. Ancak 1859 yılında tekrar şarj edilebilir kurşun-asit bataryaların geliştirilmesi, ticari olarak satışa sunulan elektrikli araçları ortaya çıkarmıştır.

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

19. yüzyılın son dönemlerine doğru Amerika, İngiltere ve Fransa’da birçok şirket elektrikli araç üretmeye başlamıştır. Bu üreticilerden en önemlisi Morris ve Salomon’un sahibi olduğu Electric Carriage and Wagon Company adlı şirkettir. Morris ve Salomon 1895 yılında 2 oturma koltuğu olan Electrobats isimli elektrikli aracı geliştirmişlerdir [4].



Şekil 2. 2 1895 yılında yapılan Electrobats isimli elektrikli araç [4]

İçten yanmalı motorlarda gelişmeler ilk yıllarda daha yavaş durumdadır. 1885’de Karl Benz Almanya’da Motor Wagen’ı tanıtana dek benzinle çalışan satın alınabilir bir otomobil üretilmemiştir. Bu buluştan sonra hem benzinli hem elektrikli araçlar yaygın olarak satılmaya başlanırken ikisi de farklı teknolojik kısıtlamalarla yüzleşmişlerdir [2].

İçten yanmalı motorlar aşırı gürültülü, kirli, kötü koku yayan ve mekanik problemlere eğilimli durumdaydı. Ayrıca daha büyük bir dezavantajları, çalışmalarını için krank kolu ile başlatılmalarının gerekmesiydi. Bu işlem hem güç hem de hızlı refleksler gerektiriyordu ve motor çalışmaya başladığında krank kolunun çevirene vurması nedeniyle

yaralanmalar oldukça sıradandı. Ayrıca içten yanmalı araç sürmenin vites değiştirmek gibi zor bir yanı da vardı [2].

İçten yanmalı motorlarla karşılaştırıldığında elektrikli araçların en büyük problemi menzillerinin kısa olmasıydı. Ayrıca bu araçlar bataryaların yüksek ağırlıkları nedeniyle çok ağır ve çok daha yavaştı.

Bu dezavantajlara rağmen, 1900'lü yıllarda Amerika'daki elektrikli araçların sayısı benzinle çalışan araçların sayısının neredeyse iki katıydı. 1912'de satışlar maksimuma ulaştı ve elektrikli araçlar bugün olduğundan bile daha yaygın bir hale geldi. 1918 yılında Amerika'da 50,000 civarında elektrikli araç yollarda idi [2].

Ancak ilerleyen yıllarda işin rengi değişmeye başladı. Elektrikli araçların menzil problemleri 1920'lerde Amerika'da şehirlerarasında yolların gelişmeye başlaması, tüketicilerde uzun menzil talebi oluşturdu. Bu soruna çözüm arayışlarından biri elektrikli araçlarla içten yanmalı motorların iyi yönlerini bir araya getiren hibrit araçlardı. Benzin-elektrik hibrit otomobil ilk olarak, Ferdinand Porsche tarafından Paris Fuarı'nda sergilediğinde çok olumlu tepkiler aldı. Ancak kısa süre sonra, sistemlerinin karmaşık olmaları ve yüksek üretim maliyetleri yüzünden hibrit elektrikli araçlar tarihe karıştı [2].

Sonuç olarak, 1900'lü yılların başındaki teknolojik ve lojistik gelişmeler sayesinde içten yanmalı motora sahip araçlar, bataryalı ve hibrit araçları gölgede bırakmıştır [2]. İlerleyen süreçte elektrikli araçların satışlarının sürekli olarak azaldığı ve sonunda da piyasadan tamamen yok olduğu görülmektedir [1].

Elektrikli araçların erken yok olmaları, beygir güçlerinin düşük olması ve uzun menzil ihtiyaçlarına cevap verememelerine bağlanmaktadır. Ayrıca petrol fiyatlarındaki düşüş ve kolay erişilebilir petrol rezervlerinin bulunması da bunda etkin rol oynamıştır. Bunların yanı sıra teknolojik gelişmeler de içten yanmalı motorların lehine gerçekleşmiştir. 1897'de susturucunun icadı motor gürültüsünün azalmasını, 1912'de marş motorunun icadı ise krank kolu gereksiniminin ortadan kalkmasını sağlamıştır. Elektrikli araçlarda da teknolojik ilerlemeler olmasına rağmen üç temel kısıt aşılamamıştır: Kısa menzil, düşük hız ve yüksek üretim maliyeti [1].

Henry Ford'un başlattığı seri üretim, içten yanmalı motorlu araçların 500-1000 \$ civarlarında satışına imkân verirken, gösterişsiz bir elektrikli aracın fiyatı 1000 \$'ın oldukça üzerinde idi [1].

İçten yanmalı motorlu taşıtların tercih edilmesinin temel sebeplerinden biri petrolün özgül enerjisinin bataryaların özgül enerjisine kıyasla oldukça yüksek olmasıdır. İçten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtın özgül enerjisi 9000 Wh/kg civarlarında iken, örneğin bir kurşun asit bataryanın özgül enerjisi 30 Wh/kg civarında bir değere sahiptir. İçten yanmalı motorun veriminin %20 civarında olduğu göz önüne alındığında içten yanmalı motor sistemine sahip bir taşıt yaklaşık 1800 Wh/kg'lık bir özgül enerjiye sahip olmaktadır. Yaklaşık %90 verime sahip olan elektrik motorunun kullanılması ile girişindeki bataryaların özgül enerjisi göz önüne alındığında ancak 27 Wh/kg civarında kullanılabilir enerjiye sahip olunacaktır. Yani içten yanmalı motora sahip bir taşıtla aynı menzile sahip olabilmek için, içten yanmalı motorun yaklaşık 70 katı ağırlığa sahip bir batarya sistemi kullanılması gerekmektedir. Ayrıca bir batarya sistemini tamamen şarj edebilmek için saatler gerekirken, içten yanmalı motor için gereken yakıtın taşıta yüklenmesi birkaç dakika içerisinde gerçekleştirilebilmektedir [5].

1935 yılında elektrikli araçlar tamamen ortadan kaybolmuş ve 25 yıl boyunca hiç konuşulmamıştır. 1960'lı yıllarda özellikle Los Angeles gibi, coğrafyanın hava kirliliğinin dağılmasına izin vermediği şehirlerde, hava kirliliğinden kurtuluş çaresi olarak elektrikli araçlara tekrar ilgi duyulmaya başlanmıştır [1].

1970'lerde petrol fiyatının dört katına çıkması ve Arap petrol ambargosu, özellikle Amerika'da alternatif yolların aranmasına neden olmuştur. 1975'de Amerika Posta Servisi, American Motors Corporations'dan 350 adet elektrikli dağıtım jipi almıştır. Bu araçlar 10 saatlik şarjla 80 km/h hıza ve 60 km menzile ulaşabiliyordu. Ancak düşük menzil ve bataryaların yüksek maliyeti, ticarileşme önünde en büyük engel olmayı sürdürmüştür [1].

Yine 1970'li yılların başında Amerika ve Avrupa'da kirliliğin çevreye ve insan sağlığına etkileri hakkında yeni ve gittikçe artan bir ilgi oluşmuştur. Bu konuda yazılan yazılardan biri, Çevresel Koruma Ajansı (EPA)'nın kurulmasına ve politikacıların olası bir çevresel felaketin önlenmesi için dünyanın 10 yılı kaldığı gibi meseleleri konuşmasına neden

olmuştur. Emisyonların bir tehdit olarak algılanması şeklindeki fikir değişikliği, birçok ülkede petrol temelli yakıtlara alternatiflerin araştırılması ve geliştirilmesi için baskı oluşturmıştır [2].

1990 yılında Kaliforniya Hava Kaynakları Meclisi (CARB), Kaliforniya’da 1998 yılında satılacak tüm araçların %2’sinin ve 2003 yılında satılacak tüm araçların %10’unun sıfır emisyonlu araçlar (Zero Emission Vehicle - ZEV) olması yönünde bir karar almıştır [3]. Kaliforniya’nın yaptığı düzenleme, Amerikan hükümetini ve endüstrisini daha temiz araçlar ve alternatif yakıt kaynakları geliştirilmesi konusunda motive edici olmuştur. Sonuç olarak, bazı hükümetler araçlara egzoz emisyonlarına göre vergilendirmeler yapmış ve petrol bazlı yakıtlardaki vergileri artırmış, bu da elektrikli araçlara olan ilginin hız kazanmasını sağlamıştır [2]. 1996 yılında General Motors (GM) ilk seri üretim elektrikli araç olan EV1’i Amerika’da piyasaya sürmüştür. Diğer otomotiv üreticileri piyasaya sürdükleri elektrikli araçlarıyla bu trendi izlemişlerdir. Ford Ranger EV pikabı, Honda EV Plus’ı ve Toyota RAV EV’yi piyasaya sürmüştür [3].

Ancak sadece batarya ile tahrik edilen elektrikli araçların düşük menzil problemleri nedeniyle, 1990’larda büyük taşıt üreticileri, tümü elektrikli taşıtların gelişmesi için batarya teknolojisinin de gelişmesi gerektiğini savunmuş ve çalışmalarını hibrit teknolojisi üzerine yoğunlaştırmışlardır. Özellikle Japon firmalarının Toyota Prius, Honda Insight ve Nissan Tino modelleri günümüzdeki hibrit teknolojinin gelişmesinde öncü olmuştur.

2.2 Elektrikli Araç Sistemleri

Elektrikli araçlarda, araç içerisine yerleştirilmiş enerji üretim, dağıtım ve tahrik sistem elemanları birlikte çalışmaktadır. Sistem içerisindeki elemanların birbirlerine bağlanma şekilleri, enerji akışındaki tercihleri ve farklılıklarına göre aktarma organları konfigürasyonları (drivetrains) tanımlanmıştır.

Elektrikli araçlar üç şekilde karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan ilki sadece batarya bulunduran Bataryalı Elektrikli Araçlar (BEV)’dir. Hem içten yanmalı motor hem de batarya bulunduran Hibrit Elektrikli Araçlar (HEV) ikinci kısmı teşkil etmektedir. Son yıllarda ortaya çıkan üçüncü kısım ise hibrit araçların benzeri olmasına rağmen

sahiplerine bataryaları dışarıdan da şarj etme olanağı sağlayan Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEV)'dir [3].

Bataryalı Elektrikli Araçlar, tüm itici gücü ana güç kaynağı olan bataryalardan sağlamaktadırlar. Bu tip araçlarda ana güç kaynağına ek olarak ikinci bir batarya veya ultrakapasitör kullanılabilir. Bu yardımcı güç kaynakları tepe çalışma noktalarında örneğin bir yokuşu tırmanırken veya ivmelenirken kısa periyotlar için yüksek güç sağlayabilmektedir. Yüksek enerji yoğunluğu uzun sürüş menzili, yüksek güç yoğunluğu ise ivmelenme ya da yokuş tırmanma ihtiyacını karşılayan dizayn parametreleridir. Bu durumun etkisi öncelikle yüksek enerji, düşük güç yoğunluğuna sahip batarya tipleri için önemlidir. İyi bir ivmelenme veya tırmanma performansı için yüksek güç yoğunluğuna ihtiyaç duyulması durumunda yüksek güç yoğunluğuna sahip yardımcı güç kaynağına gereksinim duyulmaktadır.

Yüksek bir ivmelenme için son yıllarda prototip olarak yapılan elektrikli araçlarda yardımcı güç kaynağı olarak ultrakapasitörler de kullanılmaktadır. Mevcut ultrakapasitörlerin enerji yoğunluğu yaklaşık 15 Wh/kg civarında olmasına rağmen güç yoğunluğu 1 kW/kg'dır. Yürütülen çalışmalarda önümüzdeki yıllarda bu değerin 4 kW/kg değerine yükseltilmesi hedeflenmektedir.

Bataryalar, enerjiyi doğru akım (DC) şeklinde vermektedirler. Bu sebeple ilk olarak elektrikli araçlarda DC motor kullanılırken, son zamanlarda yapılan araçların çoğu bir evirici yardımıyla AC motor kullanılmaktadırlar. Bu seçimde, AC motorların yüksek devirleri sayesinde vites kullanımı gereksinimini ortadan kaldırmaları ve kalkış sırasında tam yük talep etmemeleri gibi avantajlar etkilidir. Yine ilk olarak elektrikli araçlarda teker içi küçük hub motorlar tercih edilmiştir. Bu dizayn oldukça fizibil olmasına rağmen, tekerlerin şiddetli darbelere maruz kalması nedeniyle oldukça sorunludur. Örneğin tekerlerden biri tümseğe çarptığında oluşan şok, süspansiyon tarafından sönümlenmektedir. Ancak süspansiyon tekerleri korumadığı için, modern elektrik motorlarının çok dar hava aralıkları bu şoklardan etkilenmektedir. Bu nedenle araç üreticileri yeni üretimlerinde, dizaynları araç şasisine monte bir motorla değiştirmektedirler [3].

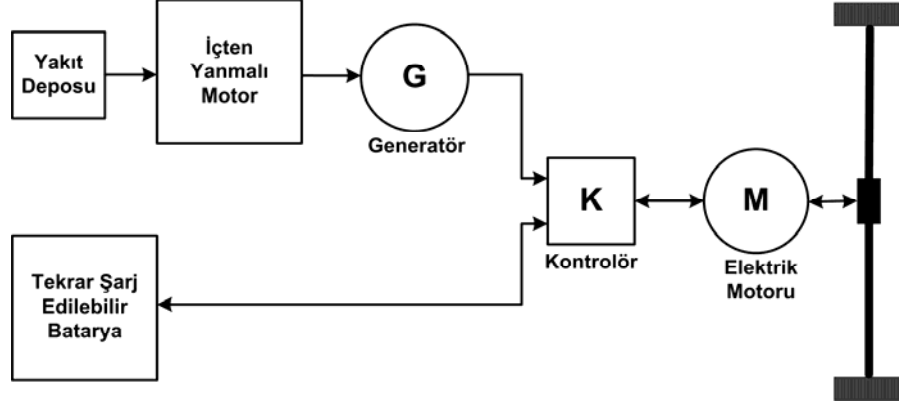
Elektrikli araçlar konvansiyonel araçlara göre daha verimlidir. Bir bataryalı elektrikli araç yaklaşık % 46 verimle çalışmasına karşın, konvansiyonel araçlar %18-25 arasında çalışmaktadırlar. Bir başka deyişle elektrikli araç bataryalarının şarjı için prizden çekilen enerjinin % 46'sı tekerleklerde kullanılabilir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

Hibrit bir taşıt, birden fazla güç kaynağının farklı konfigürasyonlar kullanılarak beraberce taşıtın güç ihtiyacını karşılaması ile oluşmaktadır. Uluslararası Elektroteknik Komisyonunun Teknik Komitesi tarafından verilen tanıma göre hibrit elektrikli araç, enerjinin iki ya da daha fazla enerji deposundan sağlandığı ve bu enerji depolarından en az bir tanesinin elektrik enerjisi verdiği bir araç olarak ifade edilmiştir. Hibrit elektrikli taşıt sistemleri, taşıtın tahrik edilmesinde içten yanmalı motorun yanında bir elektrik motoru ve bataryanın kullanılması ile birlikte yakıt tüketimini, buna bağlı olarak da içten yanmalı motorun olumsuz çevresel etkilerini önemli bir oranda azaltmaktadır. Ayrıca, elektrik motoru ve bataryanın kullanılması ile birlikte frenleme anlarında ortaya çıkan enerji geri kazanılabilmekte, bu sayede de yakıt tasarrufu artırılabilir.

Hibrit taşıt sistemlerinde, taşıt performansını etkileyen en önemli unsurlardan birisi kullanılan hibritleştirme konfigürasyonudur. Hibrit taşıtın oluşturulması üzerine yapılan çalışmalarda farklı konfigürasyonlardan yararlanılmıştır. Bu konfigürasyonlardan en önemlileri seri hibrit, paralel hibrit ve seri-paralel (karma) hibrit olarak ortaya konulmaktadır.

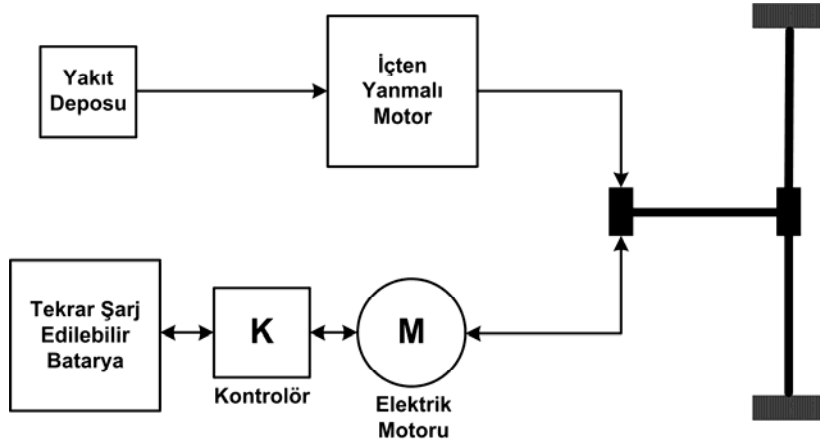
Şekil 2.3'de görülen seri hibrit konfigürasyonunda taşıtın tahrik edilmesi, bir elektrik motoru kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Burada elektrik motoru, girişindeki elektriksel gücü taşıtın tahrik edilmesinde kullanılmak üzere mekanik güce çevirmektedir. İçten yanmalı motorun çıkışındaki generatör, içten yanmalı motordan gelen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmektedir. Böylece üretilen elektrik enerjisi, batarya sisteminin elektrik enerjisiyle birlikte elektronik kontrolörde birleşir. Taşıtın o anki güç talebine göre elektronik kontrolör, hangi kaynaktan ne kadar enerjinin talep edileceğini belirler. Frenleme durumunda, taşıtın tahrik edilmesinde

kullanılan elektrik motoru, generatör olarak çalışır ve enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülerek faydalı hale getirilmesini sağlar. Kontrolör, aynı zamanda frenleme durumlarında içten yanmalı motor ve çıkışındaki generatörden oluşan sistemi devre dışı bırakır ve gücü, bataryaları şarj edecek şekilde yönlendirir. Bu sayede frenleme durumunda ortaya çıkan enerjinin geri kazanılması sağlanmış olmaktadır [5].



Şekil 2. 3 Seri hibrit konfigürasyonu

Seri hibrit araçlar son zamanlarda Uzatılmış Menzilli Elektrikli Araçlar (EREV) olarak da adlandırılmaktadırlar. Chevrolet 2010 yılında piyasaya sürdüğü iddialı modeli Volt'u bu şekilde tanımlamaktadır [3].



Şekil 2. 4 Paralel hibrit konfigürasyonu

Şekil 2.4'te görülen paralel hibrit konfigürasyonunda ise içten yanmalı motor ve elektrik motoru aynı mil üzerinden doğrudan mekanik bağlantı ile tekerlekleri paralel bir şekilde tahrik etmektedir. Paralel hibrit taşıtlarda iki kaynak da tahrik işlemini birlikte gerçekleştirdiğinden, seri hibrit yapıdaki taşıtlara göre daha küçük boyutta bir

içten yanmalı motor kullanılmaktadır. Kontrolör, taşıtın yük talebine göre hangi kaynaktan ne kadar güç çekileceğini belirlemektedir. Kontrolör bu işlemi gerçekleştirirken içten yanmalı motoru en verimli şekilde işleterek yakıt tasarrufunu azami hale getirmeyi hedeflemektedir. Paralel hibrit konfigürasyonda genellikle düşük hızlarda yalnızca elektrik motoru devrede iken, içten yanmalı motor, güç talebinin arttığı yüksek hızlarda devreye girmektedir. Bu sayede içten yanmalı motoru verimli çalıştığı yüksek devirlerde işletmek ve düşük hızlarda sadece elektrik motorunu kullanarak emisyon salınımını azaltmak mümkün olmaktadır [6].

Paralel hibrit taşıtlarda sistemin araca nasıl entegre edildiğine bağlı olarak %25 ila %60 arasında yakıt tasarrufu sağlanabilir. Ford Escape Hibrit'te bu teknoloji kullanılmıştır ve aracın PHEV modelinde de aynı mimarinin kullanılması beklenmektedir [3].

Bir diğer taşıt konfigürasyonu ise, seri ve paralel hibrit konfigürasyonlarının çeşitli özelliklerinin birleştirilmesiyle oluşturulan karma hibrit taşıt konfigürasyonudur. Bu konfigürasyonun yapısı paralel hibrite benzemekle birlikte, içten yanmalı motor ile elektrik motoru arasında seri hibrit yapısında olduğu gibi bir generatör üzerinden ayrı bir bağlantı da söz konusudur. Karma hibrit yapı, düşük hızlarda seri hibrit yapısındaki gibi çalışmaktadır. Yüksek hızlarda ise içten yanmalı motor, paralel hibrit yapısındaki gibi doğrudan tekerlere güç aktarmaktadır, bu sayede de yüksek güçlerde seri hibritteki dönüşüm kayıpları ile kaybedilen enerji asgari hale getirilmiş olur [6]. Bu hibrit konfigürasyon, Toyota tarafından Prius modelinin geliştirilmesinde kullanılmıştır.

Otomotiv endüstrisinde Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar bir sonraki teknolojiye geçiş için mihenk taşı olarak düşünülmektedir. Bazı çevreler bir sonraki teknolojinin Yakıt Hücreli Araçlar (FCV) olacağına inanırken, birçok kişi bunun bataryalı elektrikli araçlar olmasını beklemektedir. Yakıt hücreli elektrikli araçların ticarileşmesi için henüz süre varken; bataryalı elektrikli araçlar bu yıl içerisinde dünyanın birçok bölgesinde satışa çıkarılmıştır [3].

2.3 Pazar Tahmini ve Beklentiler

Son on yılda birçok faktör, elektriğin ulaşım sektöründe alternatif olarak düşünülmesini teşvik eder şekilde birleşmiştir. Hükümetlerce yapılan yasal düzenlemeler, elektrikli

araçların pazara çıkışı yönündeki umutları güçlendirmiştir. Bu yasalar, üreticiler ve tüketiciler için vergi indirimleri, elektrikli araçlar sektöründeki firmalar için vergi desteği, şarj altyapısı için yapılan hibeler, daha ileri batarya teknolojisi için yapılan Ar-Ge destekleri gibi düzenlemeleri içermektedir. Düzenlemeler Çin’de doğrudan elektrikli araçların teşvikine yönelmişken, Avrupa Birliği’nde yeni araçların karbon emisyonlarının sınırlandırılmasına, Amerika, Kore ve Japonya’da ise batarya Ar-Ge çalışmalarının desteklenmesine odaklanmış durumdadır [1].

Elektrikli araçların pazara çıkış hızı ve pazar başarısı, yasal düzenlemelerin yanı sıra dört ana faktörden etkilenmektedir. Bunlar; enerji fiyatları (petrol vs. elektrik), batarya karakteristikleri (güvenlik, dayanıklılık ve üretim maliyetleri), kullanışlı ve ekonomik erişilebilir şarj altyapısının oluşması ve elektrikli araç teknolojisinin diğer alternatif teknolojilere göre gelişimi olacaktır [1]. Elektrikli araçlara geçişi hızlandırmak için enerji fiyatları açısından göz önüne alınması gereken konulardan biri petrol arzıdır. Petrol arzı beklendiği gibi düzenli kalırsa, fosil yakıt fiyatları cazip olmayı sürdürecektir ve bu da elektrikli araçlara olan gereksinimi azaltacaktır [2].

Elektrikli araçların piyasaya çıkışı öncesi birçok husus belirsizliğini korumaktadır. Elektrikli araçların tam olarak ne kadar tasarruf sağlayacağı, bataryaların ne kadar güvenilir olacağı, araçların menzilleri, bataryaların şarj maliyetleri ve şarj istasyonu bulunabilirliği, araçların bakımlarının nasıl yapılacağı, aracın satılmak istendiğinde fiyatların ve arz-talep dengesinin oturduğu ikinci el pazarının olmaması gibi hususlara yanıt bulunması gerekmektedir.

Elektrikli araçların ekonomikliğini tespit etmek için elektrik ve benzin fiyatlarının karşılaştırılması yapılmalıdır. Her ikisinin fiyatlarında da değişimler olacağı muhakkaktır, ancak benzin fiyatları önceden kestirilemeyen değişimlere daha açıktır. Birçok tahmine göre yakıt fiyatları, önümüzdeki on yılda, global ekonominin iyileşmesi ve petrol arzından Çin ve Hindistan’ın her geçen yıl daha fazla pay talep etmeleri nedeniyle artacaktır. OPEC (Organization of Petroleum Exporting Countries – Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü) ülkelerinin de etkisi ile petrol varil fiyatının 100 \$ üzerinde olacağı tahmin edilmektedir. Benzin ve dizel fiyatları doğrudan petrol fiyatına bağlı olmalarına karşın elektrik fiyatlarının petrole olan bağımlılığı çok daha azdır. Amerika Enerji Bilgi

İdaresi (EIA)'nin tahminine göre benzin fiyatları 2020'ye dek %29 ve 2030'a dek %39 artacaktır. Elektrik fiyatları ise 2020'ye kadar %3 ve 2030'a kadar %14 artış gösterecektir [1].

Bataryalı elektrikli araçlar, eşdeğerleri olan benzinli ve dizel araçlara göre %30-60 daha yüksek fiyatlarla pazara çıkmakta, bu ise pazar potansiyelini azaltmaktadır. Bu sebeple birçok hükümet elektrikli araç pazarını teşvik etmek için vergi indirimlerini devreye sokmaktadır. Ancak, eğer elektrikli araçlar başarılı olarsa, birkaç yıllık vergi indirimi desteğinden sonra, pazarda kendi karlılıklarını sağlamak durumundadırlar [3].

Batarya fiyatlarının oldukça pahalı olması ve ömrü biten bataryaların geri dönüşüm sorunu, elektrikli araçlara ilişkin diğer problemlerdir. Bunun yanı sıra elektrikli araçların tüketicilere cazip gelebilmesi için aşması gereken bazı problemler vardır. Bunlar:

- Menzil endişesi: Bataryalı araçlar içten yanmalı motorlara sahip araçlarla karşılaştırıldığında önemli ölçüde kısıtlı menzillere sahiptirler.
- Altyapı desteği: Bataryaların şarjı için gerekli şarj altyapısı, bu teknolojiye büyük oranda geçişler için yeterli değildir.
- Güç ve performans: Bazı spor modeller hariç birçok elektrikli araç, geleneksel içten yanmalı motorlara sahip araçların sağladığı performansı sağlayamamaktadır.
- Yakıt tasarrufu: Kilometre başına maliyet açısından elektrikli araçların ne kadar tasarruf sağlayacağı henüz açık değildir.
- Sınırlı batarya ömrü ve değişim maliyeti: Araç ömrü süresince bataryaların pek çok kez yenilenmesi gerekecek, bu ise ekstra bir maliyet getirecektir.
- Uzun şarj süreleri
- Yüksek araç maliyetleri

Elektrikli araçlara ilişkin bütün bu endişeler sebebiyle elektrikli araçların kısa vadede çok büyük bir pazar başarısı göstermesi beklenmemektedir. Elektrikli araçların pazarda başarılı olabileceği potansiyel üç temel grup gözükmemektedir.

Bunlardan ilki, elektrikli araçların medyanın ilgisini de epey çekmesine sebep olan yüksek profilli spor araçlardır [3]. Elektrikli araçlarda bataryalar oldukça pahalı olmasına rağmen, performansı normal araçlara göre daha yüksek olduğu için spor araba konsepti elektrikli araçları beğenen müşteriler bulabilmek adına mantıklı bir başlangıçtır.

Elektrikli araç piyasasında en çok ilgi toplayan araç bir Silikon Vadisi firması olan Tesla Motors'un "Roadstar" modelidir. Firma, ilk modeli olan lüks spor bu araçla etkileyici performans istatistikleri ortaya koymuştur. Tesla Motors'un en önemli rakibi ise yine lüks spor araba alanında faaliyet gösterecek olan başka bir Silikon Vadisi firması olan Fisker Automotive'dir. Bu firma da, hibrit bir araç olan ve batarya ile 80 km menzile erişebilen "Karma" modeli ile varlıklı alternatif enerji tutkunlarını hedeflemektedir [1].

Elektrikli araçlar için kısa vadede başarı vadeden diğer bir market ise kısa menziller için kullanılan golf arabası benzeri veya iki kişilik hafif araçlardır. Küçük araçların hafifliği ve düşük aerodinamik direnç sahip olmaları, bu araçların tahrik için büyük modeller kadar enerji gerektirmeyeceği ve aracın en pahalı parçası olan bataryaların azaltılabileceği anlamına gelmektedir [3]. Bu ise bu araçların daha ekonomik olmalarını sağlamaktadır.

Norveçli TH!NK firması iki kişilik City EV modeli ile Norveç, Avusturya ve Hollanda pazarlarında başarılı sonuçlar elde etmiştir. Ayrıca bu konseptte birçok Çinli firmanın yanı sıra Nano modeli ile Hindistanlı Tata firması da boy göstermektedir.

Elektrikli araçların umut vaat ettiği diğer bir pazar ise şehir içi ticari taşıma araçlarıdır. Çoğunlukla sabit rotalara sahip olmaları ve kısa menzilleri elektrikli araçları bu alanda popüler kılmaktadır. Ayrıca bu araçlar genellikle filo uygulamalarında kullanıldığı için yakıt masraflarının azalması araç sahipleri için oldukça önemli bir avantajdır [1].

Hemen hemen bütün büyük araç üreticileri ve yeni kurulan bazı firmalar elektrikli araçları satışa sunmuştur veya yakında sunacaklardır. Plug-in elektrikli araç (PEV) pazarı 2009'da yalnızca tek spor araba modelini barındırırken, 2010'da bu pazara 2 binek araba daha eklenmiştir ve önümüzdeki iki yıl içinde en azından 11 yeni modelin eklenmesi beklenmektedir. Tablo 1'de önümüzdeki yıllarda pazara çıkması beklenen elektrikli araçların listesi yer almaktadır [1].

Çizelge 2. 1 Planlanan elektrikli araç üretimleri [1]

Şirket	PHEV	BEV	Model	Pazar Tarihi	Planlanan Üretim
Audi	√	√	E-tron, A1 E-Tron	2012	Sınırlı
BMW	-	√	MINI-E, Active-E, Megacity	Megacity: 2013 MINI-E and Active-E kiralıyor	N/A
BYD	√	√	E6, S6DM	E6: 2012	N/A
CODA Automotive	-	√	CODA Sedan	2011	Yılda 14,000 araç
Chrysler-Fiat	-	√	Fiat 500	2012	N/A
Daimler	-	√	Smart ED Fortwo	2012	Seri üretim
Fisker Automotive	√	-	Karma, Nina	Karma: spring 2011 Nina: mid-2012	Karma: 15,000 annually
Ford	√	√	Transit Connect Electric, Focus BEV	Transit Connect Electric: 2011 Focus BEV: 2011	Transit Connect Electric: Yılda 700 adet Focus BEV: Yılda 5,000-10,000 adet
GM14	√	-	Volt	Seri üretimde	2012: Yılda 60,000 adet
Honda	√	√	N/A	2012	N/A
Mitsubishi	√	√	iMiEV, PX-MiEV	iMiEV:2011 PX-MiEV:2013	N/A
Navistar	-	√	eStar	Seri üretimde	N/A
Nissan	-	√	LEAF, NV200, Infiniti EV	LEAF: Seri üretimde	LEAF: 2010'de yılda 500,000 adet
Renault	-	√	Fluence ZE, Twizy, ZOE, Kangoo Express ZE	Fluence, Twizy, Kangoo: 2011 ZOE: 2012	N/A
Smith Electric	-	√	Newton	Seri üretimde	2008'de haftada 30 üretim kapasitesi
Tesla	-	√	Roadster, Model S	Roadster: Seri üretimde Model S: 2012	Roadster: Yılda 1,200 adet Model S: Yılda 20,000 adet
TH!NK	-	√	City EV	Filo satışları yapılıyor	N/A
Toyota	√	√	Prius PHEV	2012	Prius PHEV: Yılda 10,000 adet
Volkswagen	√	√	Golf Twin Drive	2013	N/A
ZAP	-	√	Alias	N/A	Sipariş alınıyor

Elektrikli araçlarla ilgili şarj altyapısı, batarya güvenliği ve satış maliyetleri gibi belirsizlikler bile henüz kesinleşmemişken, Nissan LEAF modeli için Eylül 2010'da 20,000 ön sipariş almış ve sipariş alımını durdurmak zorunda kalmıştır. Chevrolet ise Volt marka plug-in hibrit aracının üretim ve satış hedefini 2011 yılı için 10,000 olarak duyurmuştur.

Elektrikli araç satışlarının önümüzdeki yıllarda hızla artması beklenirken, mevcut üretim planları ve tahmin raporlarına bakıldığında, Amerika'nın 2015 yılında 1 milyon plug-in elektrikli araç hedefinin tutturulması biraz zor gözükmemektedir. Ancak bu hedefin 2015 yılından sonra fazlasıyla aşılabacağı öngörülmektedir [1].

Elektrikli araç üreticilerinin birçoğu araç menzil testlerini EPA Federal Test Prosedürü'ne uygun olarak yapmakta ve araç menzili olarak bu rakamları bildirmektedirler. Fakat pratikte bu araçların test koşullarında eriştikleri menzillere ulaşabilmeleri mümkün gözükmemektedir. Araçlar test prosedürüne maksimum şarjda başlatılırken, araç duruncaya dek teste devam ettirilmektedir. Bu ise pratikte hem batarya sağlığı için hem de uygulanabilirlik açısından pek mümkün değildir. Ayrıca bu

testler ideal sürücü varsayımı altında ve tahrik dışındaki yükler olmaksızın yapılmaktadır. Elektrikli araçların gerçek menzillerinin duyurulan menzil rakamlarının %70'inden daha az olacağı düşünülmektedir [1].

Sonuç olarak tüketiciler elektrikli araç almadan önce birçok soru soracak ve satın almış olanların deneyimlerini gözlemlemek için bekleyeceklerdir. Muhtemel bazı sorular aşağıdaki gibidir:

- Elektrikli araçların sınırlı menzilleri tüketicileri tatmin edecek mi?
- Araç ekstrem koşullarda kullanıldığında ve zamanla araç yaşlandıkça bataryalar güvenilir, sağlam ve dayanıklı olacak mı?
- Yerel yönetimler elektrikli araçların yaygın kullanımını kolaylaştırmak için yeterli şarj altyapısı yatırımı yapacaklar mı?
- Bataryaların yüksek maliyetleri ve şarj altyapısı maliyetleri göz önüne alındığında, elektrikli araçlarda elektrik kullanmakla sağlaması beklenen tasarruf mali açıdan ne kadar cezbedici olacak?
- Elektrikli araçlar egzoz emisyonlarını ortadan kaldırmalarına rağmen, bu araçta kullanılacak elektriğin üretildiği güç santrali, çevresinde eski duruma göre daha fazla kirliliğe mi sebep olacak?
- Elektrikli araç kullanmanın kilometre maliyeti daha düşük olacağı için, insanlar daha fazla yol kat edecek ve bu ise daha fazla kirliliğe, sıkışıklığa ve daha fazla kazalara mı sebep olacak? [1].
- Elektrikli araçlara ilişkin bütün bu soruların en dikkat çekici olanları batarya teknolojisi hakkındaki sorulardır. Elektrikli araçların başarısı bataryaların ve diğer enerji depolama sistemlerinin başarısına bağlıdır. Bir sonraki bölümde elektrikli taşıtlarda enerji depolama sistemlerinin özellikleri anlatılarak karşılaştırılması yapılacaktır.

Bu bölümde en temel elektrik enerji depolama aygıtları incelenecek, bunların avantaj, dezavantaj ve teknolojilerinden bahsedilerek karşılaştırma yapılacaktır. Bu amaçla bu kısımda bataryalar ve ultrakapasitörler incelenecektir.

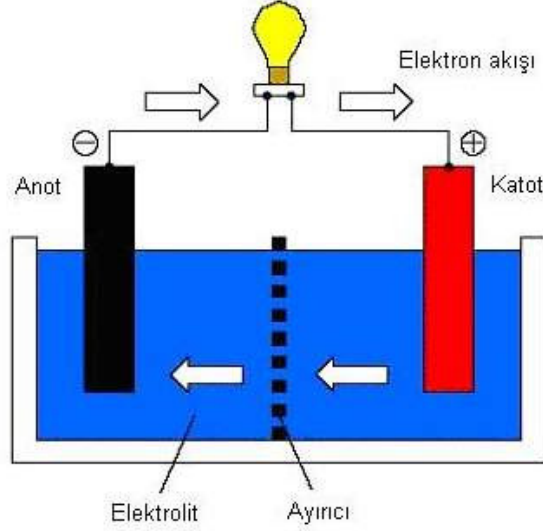
3.1 Bataryalar

Bataryalar, elektrik enerjisini kimyasal reaksiyon sonucu ortaya çıkacak şekilde depolayabilen elektrokimyasal cihazlardır. Enerjinin depolanması, harici bir elektrik kaynağından gelen elektrik enerjisinin, batarya iç yapısını oluşturan elektrokimyasal bileşiklerde kimyasal reaksiyonlar ile soğurulması ile yapılır. Bu işlem bataryanın şarj edilmesidir. Gerekğinde enerjinin kullanılması için kimyasal formda depolanmış olan enerji, ters kimyasal reaksiyonlarla elektrik enerjisine dönüştürülür [7]. Bataryalar, birbirine seri bağlanmış elektrolitik hücrelerden oluşurlar. Bir batarya hücresinin dört ana bileşeni vardır. Bunlar Şekil 3.1’de ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir [8].

1) Pozitif elektrot: Deşarj esnasında azalabilen, oksit, sülfid veya herhangi bir bileşikten oluşan bir elektrottur. Bu elektrot batarya deşarj olurken, dış devreden elektron tüketerek, elektriksel akımın oluşturulmasını sağlayan aktif bir maddedir. Kurşun-oksit ve nikel-oksit-hidroksit pozitif elektrotlara örnektir. Elektrot malzemeleri katı haldedir.

2) Negatif elektrot: Deşarj esnasında, oksitlenebilen metal veya alaşımdan oluşur. Bu elektrot batarya deşarj olurken, dış devrede elektron üreterek elektriksel akımın yaratılmasını sağlayan aktif bir maddedir. Kurşun ve kadmiyum negatif elektrotlara örnektir. Negatif elektrot malzemeleri de batarya hücresinde katı halde bulunur. Bazı

lityum-iyon bataryaların negatif elektrotları, oksitlenmeyi önlemek için alüminyumdan imal edilmektedir.



Şekil 3. 1 Bataryanın şematik gösterimi [8]

3) Elektrolit: Elektriksel akımı iletebilen ve hareket edebilen yüklü parçacıklardan oluşan bir çözeltidir. Elektrolitler sıvı, jel veya katı maddeler olabilirler. Ayrıca bataryanın tipine göre asidik veya alkalın olabilirler. Kurşun-asit bataryalarda elektrolit, sülfürik asidin sıvı formundadır. Nikel metal-hidrit ve lityum-iyon gibi daha geliştirilmiş bataryalar jel, macun veya reçine şeklinde elektrolit kullanmaktadır. Lityum-polimer bataryalar ise katı halde elektrolitler kullanır.

4) Ayırıcı: Farklı kutuplardaki elektrotları fiziksel olarak ayıran, elektriksel olarak yalıtıcı bir tabakadır. Ayırıcılar, elektrolitlerin iyonlarını geçirebilmeli ve elektroliti saklayıp hareketsiz tutabilecek fonksiyona sahip olmalıdır. Bugün kullanılan ayırıcılar sentetik polimerlerden yapılmaktadır [8].

Elektro-kimyasal bataryalar elektriksel olarak şarj olabilme yeteneklerine göre birincil (şarj-edilemez) ve ikincil (şarj-edilebilir) bataryalar olmak üzere iki sınıfta incelenebilir. Birincil tip bataryalar şarj-edilemez olduklarından bir kez deşarj olduktan sonra bir daha kullanılamazlar. İkincil veya şarj-edilebilir bataryalar ise bu özellikleri ile oldukça geniş kullanım alanlarına sahiptir.

İkincil bataryalar şarj-edilebilir olmalarının yanı sıra yüksek güç yoğunluğu, yüksek deşarj hızı ve düşük sıcaklıktaki iyi performansları ile karakterize edilebilirler. Birincil bataryalara göre daha düşük olan enerji yoğunlukları ve şarj tutma yetenekleri ise, negatif aktif malzeme olarak lityumun kullanılmasıyla oldukça makul düzeylere yükselmiştir [8].

Günümüzde batarya dizaynı genel olarak üç ana kimyaya odaklanmış durumdadır: Kurşun-asit, nikel metal hidrit ve lityum iyon.

Bugün yollardaki araçların çoğu, aracın aydınlatma aygıtlarına ve elektronik aksamına güç sağlayan kurşun asit bataryalara sahiptir. Söz konusu teknoloji yüz yılı aşkın süredir bilinmekte ve bu sistemler için yeterli güç akışını sağlamaktadır. Ancak bu bataryalar oldukça ağırdır ve çok düşük güç yoğunluğuna (180 W/kg) sahiplerdir.

Nikel metal hidrit bataryalar, hibrit elektrikli araçlarda en çok kullanılan batarya türleridir. İyi bir güç yoğunluğuna (480-980 W/kg) ve nominal voltaja (1,25V) sahiplerdir. NiMH bataryaların fiyatları yaygın kullanımları sayesinde düşmektedir. Güncel fiyatları ise 400-600 \$/kWh arasındadır [3].

Lityum iyon bataryaların kobalt oksit, nikel oksit ve demir oksit gibi birçok değişik kimyası vardır. Kimyasına bakılmaksızın bütün lityum iyon bataryalar yüksek güç yoğunlukları (300-1,500 W/kg) ve yüksek nominal gerilimleri sebebiyle araç uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Elektrikli araç üreticileri lityum iyon bataryaları; güç yoğunlukları, hafiflikleri ve dizaynları dolayısıyla en iyi seçenek olarak görmektedirler. Lityum iyon bataryaların maliyetleri seri üretimde şu an için 500-750\$/kWh civarındadır. Ancak gelecek birkaç yılda batarya üreticilerinin üretimleri artırması ile fiyatların düşmesi beklenmektedir [1].

Varlıkları 100 yıl öncesine kadar dayanmasına rağmen ilk keşfedilen kurşun-asit türü bataryalar, bugün hala en yaygın kullanılan türdür. İlk keşfedilen türünden, umut vaat eden son ürünlere kadar şarj edilebilir bataryalar gelecek kısımlarda anlatılmıştır.

3.1.1 Kurşun-Asit Bataryalar

Kurşun-asit batarya, 1859 yılında Gaston Plante tarafından icat edilmiş olup, tasarım değişikliklerine rağmen hala en yaygın olarak kullanılan batarya çeşididir. Sıradan bir

otomobil bataryası kurşun-asit tip batarya olup, özel kullanımlar için güvenilirlik ve düşük ücret gibi özelliklere sahip olabilmesi için yıllar boyunca geliştirilmiştir. Diğer kurşun-asit bataryalar forklift ve golf arabaları gibi elektrikli araçlarda, yedek batarya olarak telefon sistemlerinde ve diğer kesintisiz güç kaynaklarında kullanılmak üzere de geliştirilmiştir.

Bu tip bataryalar diğer teknolojilere göre yüksek iç empedanslarından (elektrotlar ve elektrolit arasındaki kontak direnci) ötürü düşük özgül güç değerine sahip olmalarına rağmen yüksek özgül enerji değerine sahiptirler. Bu tip bataryalarla ilgili yapılan araştırmalar, esas itibarıyla onların yapıları ile alakalı olmuştur.

Zamanla batarya içerisindeki elektrotlarda, kullanıldıkça geri dönüşü olmayan fiziksel değişiklikler oluşmaktadır ki bunlar bir süre sonra enerji depolama performansını bozmakta, daha sonra da bataryayı hiç kullanılamaz hale getirmektedir. Bataryanın tasarımına, kullanım sıklığına, yoğunluğuna ve şarj/deşarj derinliğine bağlı olarak ekonomik ömrü 200 ila 2000 döngü (şarj/deşarj periyodu) arasında değişmektedir [7].

Toplam batarya gerilimi ayrı ayrı hücre gerilimlerinin toplamına eşittir. Bir kurşun-asit hücresinde gerilim teorik olarak $V = V_p - V_n = 1.74 - (-0.27) \approx 2 \text{ V}$ 'tur. Normal olarak 2 V kabul edilen bir kurşun-asit hücresinde gerçek gerilim, elektrolit yoğunluğuyla bağlantılı olarak 2,05–2,15 V/hücre arasındadır. Hücre başına gerilim değeri 2 V alınarak hesaplanır. Araçlarda kullanılan bataryalar 6 veya 12 Voltluk bataryalar olup 3 veya 6 hücrenin seri bağlanmaları ile oluşmuşlardır [8].

Bu batarya 100 yıllık bir gelişme süreci geçirmesine rağmen 25-35 Wh/kg gibi düşük bir enerji yoğunluğuna sahiptir. Buna karşın güç yoğunluğu ise 150 W/kg gibi yüksek bir değerdir.

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. Kurşun asit bataryalarının ömrü yaklaşık % 80 derindeşarj koşulunda 1000 çevrimdir. Bu yaklaşık 3 yıla tekabül etmektedir [4].

3.1.2 Nikel-Metal Hidrür Bataryalar

Nikel-metal hidrür bataryalar ticari olarak, 20. yüzyılın sonlarına doğru ortaya çıktı. Nikel-kadmiyum bataryalarla benzer performansa sahip olmasına karşın, negatif elektrot olarak metal hidrür tarafından emilmiş hidrojen kullanması temel farkıdır. Zararlı olan kadmiyumu içermemesi sebebi ile önemli bir avantaja sahiptir [5]. Bu özelliği ile son zamanlarda birçok uygulamada nikel-kadmiyum bataryaların yerini almıştır. Taşınabilir cihazların birçoğu artık şarj edilebilir olan nikel-metal hidrür bataryaları kullanmaktadır.

Nikel-metal hidrür bataryaların hücre gerilimleri 1,2 voltur [5]. Nikel-metal hidrür bataryalar 70 Wh/kg'dan fazla enerji yoğunluğuna ve 200 W/kg'dan daha fazla güç yoğunluğuna sahiptir. Batarya % 80 derin deşarj durumunda 600'ün üzerinde tam şarj/deşarj çevrimine sahiptir ve hızlı bir şekilde % 80 tekrar şarj olması yaklaşık 35 dakikadır. Nikel-metal hidrür bataryalar, kurşun asit bataryaların yaklaşık 5 katı kadar daha pahalıdır [4].

3.1.3 Lityum-Katı Polimer Bataryalar

Lityum-katı polimer bataryada diğer yüksek sıcaklık bataryalarından farklı olarak, ergimiş tuz elektroliti yerine iletken polimerler kullanılmaktadır. 150 Wh/kg enerji ve 300 W/kg güç yoğunluğuna sahiptir. Bataryanın düşük güçte dış ortam sıcaklıklarında çalışması mümkün olmakla birlikte, optimum çalışma sıcaklığı 80°C ve 120°C aralığındadır [4].

Lityum-katı polimer bataryalarda negatif elektrot olarak lityum metali kullanılmaktadır. Meydana gelen kimyasal reaksiyon sonucunda lityum, lityum-metal oksit oluşturmak ve enerji açığa çıkarmak için metal oksitle bileşke oluşturur. Batarya yeniden şarj edildiğinde ters yönde gerçekleşir. Böylece lityum, hem tepken (reaktant) olarak hem de elektrolitik boyunca hareket eden hareketli iyon olarak davranır.

Lityum-polimer hücreler için katı lityum negatif elektrot bir problem kaynağıdır; güvenlik zorlukları vardır ve bazen metaldeki bozulmalar nedeni ile performans düşüşleri görülür. Bu sebeple bu tip bataryaların yerini büyük ölçüde lityum-iyon bataryalar almıştır [5].

3.1.4 Lityum-İyon Bataryalar

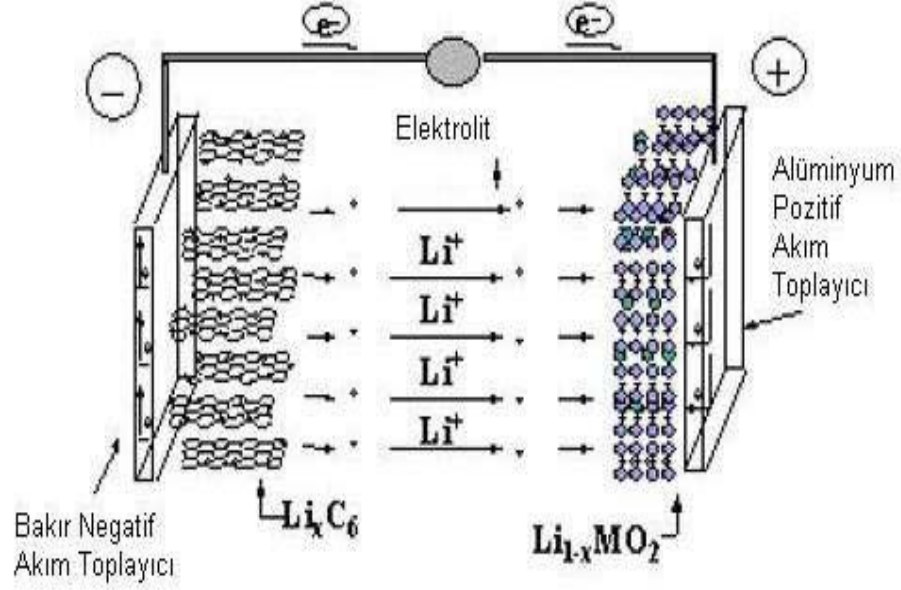
Gelişen teknoloji ile birlikte son yıllarda geliştirilen en teknolojik ve çevre dostu batarya lityum-iyon bataryalardır. Lityum-iyon bataryalarda yüksek-gerilim sağlayan, hafif ve iyi derecede iletken olan aktif lityum metali anot olarak kullanılır. Bu özelliklerinden dolayı lityum-iyon bataryalar hem şarj edilemez hem de şarj edilebilir olarak üretilebilirler.

Lityum-iyon bataryaların keşfi 1970'lerin sonunda Oxford Üniversitesi'nde lityum-kobalt oksit (LiCoO_2) ve lityum-nikel oksit (LiNiO_2) bileşikleri üzerinde yapılan çalışmalara dayanmaktadır. Bu oksit elektrotlar metalik lityum negatif elektrotuna karşı pozitif elektrot olarak organik bir elektrolitin içinde kullanıldığında 4 V'luk bir hücre gerilimi elde edilmiştir. İki elektrot arasında lityum iyonlarının gidip gelmesi ile bu kadar yüksek bir hücre geriliminin oluşabileceğini anlayan Sony şirketi araştırmacıları 1991 yılında lityum-iyon hücrelerini geliştirmişlerdir. Bu hücre, hiç lityum metali içermediğinden şarj edilirken güvenli olmaktadır. Negatif elektrot olarak soğurucu (intercalation) bir bileşimin kullanılması neticesinde kaçınılmaz olarak hücre geriliminin miktarı elektrotta bozulan lityumun serbest enerjisine karşılık daha azdır. Yine de, negatif elektrottaki 1 V kaybına rağmen hücre gerilimi 3 V olmuştur [8].

Lityum-iyon bataryalarda deşarj sırasında lityum iyonları negatif elektrottan organik elektrolit yardımıyla manganez, kobalt ya da nikel oksit pozitif elektrota geçer. Şarj esnasında da tam tersi süreç gerçekleşir. Lityum iyonları katot ve anot arasında sarkaç gibi hareket eder [4]. Lityum iyonları bir elektrottan diğerine ileri geri 'sallanma' (swing ya da rock) hareketi yaparlar. Bu hücreler bu sebeple, swing hücreler veya 'sallanan sandalye hücreleri' olarak da bilinir. Ancak şimdilerde 'lityum-iyon hücre' adının kullanımı tercih edilmektedir. Şekil 3.2'de bir lityum iyon hücrenin yapısı görülmektedir [8].

Lityum-iyon hücrelerin şarj edilmesi, şarj geriliminin maksimum değeri şarj kapasitesinin % 80'ine ulaşıncaya kadar sabit akımda gerçekleştirilir. Sonrasında sabit gerilimde akım düşük bir değere gelene kadar devam eder. Hücre 2 veya 3 saatte tamamen şarj olur. Bataryada seri veya paralel kombinasyonlar halinde kullanılan lityum-iyon hücreler, aşırı-şarj durumu veya hücrenin ters bağlanması gibi güvenlik problemleri nedeniyle özel bakıma ihtiyaç duyar. Birçok üretici lityum-iyon hücreleri

ayrı ayrı birimler halinde satmaz, ancak tam bir koruma devreli batarya paketleri halinde hazırlarlar [8].

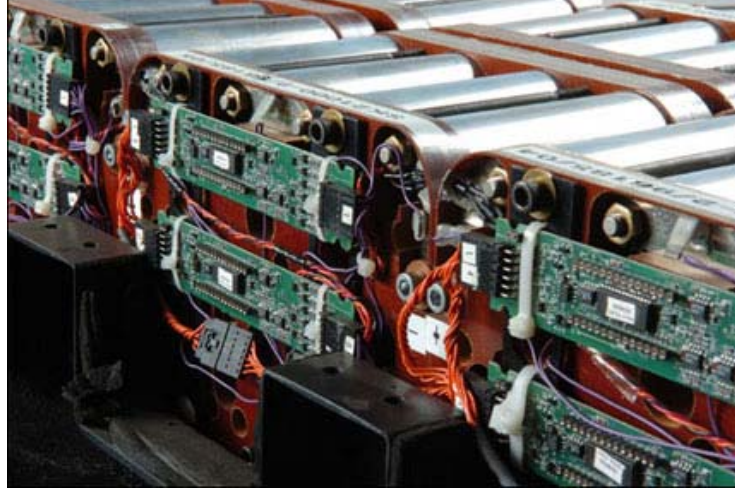


Şekil 3. 2 Lityum-iyon hücrenin fiziksel yapısı [8]

Batarya paketleri halinde büyük hücreleri kullanırken özel bakım gereklidir. Lityum-iyon hücreler kendi içinde aşırı şarjı önleyecek kapatma mekanizmasına sahip olmadıklarından, seri bağlı hücrelerin aşırı-şarj durumunda dengesi bozulur ve sonuç olarak korozyon, hücrenin ömründe azalma ve güvenlik problemleriyle karşılaşılır. Benzer olarak daha sonra meydana gelecek şarj döngülerinde kapasitenin azalması nedeniyle aşırı deşarj durumlarıyla karşılaşılır. Bu nedenle büyük hücreler için gerilim kesme koruması ve elektronik kontrol devresi gereklidir [8].

Lityum-iyon hücreler ilk kez Sony şirketi tarafından ticari olarak piyasaya sürüldükten kısa bir süre sonra, diğer Japon firmaları da piyasaya dâhil olmuştur. Bunları çeşitli Avrupa ve Amerika kökenli firmalar takip etmiş ve çok yüksek satış rakamları yakalanmıştır. 1998'e gelindiğinde yalnızca Japonya'da yılda 2,1 milyar dolar değerinde 190 milyon lityum-iyon hücre üretilmiştir. Üretilen bu hücreler temelde mobil telefonlar, taşınabilir bilgisayarlar ve kameralarda kullanım içindir. Günümüzde lityum-

iyon hücreler değişik ülkelerde üretilmektedir ve yıllık üretim yaklaşık 500 milyon birimdir [8].



Şekil 3. 3 Tam bir koruma devreli lityum-iyon batarya paketi [8]

Lityum-iyon bataryalar günümüzde cep telefonu ve taşınabilir bilgisayar bataryaları pazarının hemen hemen tamamını ele geçirmiştir. Elektrikli araçlar pazarında da benzer bir tablonun ortaya çıkması beklenmektedir. Elektrikli araçlar için dünyadaki ilk lityum-iyon seri üretim bandı, Nisan 2009'da GS Yuasa Corporation ve Mitsubishi Motors'un ortak girişimi ile açılmıştır [1].

Lityum-iyon bataryalar yaklaşık 120 Wh/kg enerji yoğunluğuna ve 1000 çevrimlik derin deşarj çevrimine sahiptirler. Bu bataryalar, 1 saatten daha kısa sürede % 80 doluluk oranına tekrar şarj edilebilmektedir.

3.1.5 İleri Batarya Araştırmaları

Elektrikli araçların performansı doğrudan bataryalara bağlı olduğundan, bataryaların depolayabileceği enerji miktarlarını ve güvenlik seviyelerini artırmak için birçok araştırma yapılmaktadır. Bu araştırmalar ağırlıklıla elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan lityum türevi bataryalar üzerinde yoğunlaşmıştır.

Üzerine araştırmaların yapıldığı batarya gruplarından biri lityum titanat bataryalardır. Bu bataryaların yakında piyasaya çıkmaları beklenirken yüksek maliyetleri geniş kullanımlarını engellemektedir. Bu bataryaların temel avantajı büyük bozulmalara maruz kalmadan hızlı bir şekilde şarj-deşarj olabilmeleridir. Bu bataryalar sayesinde

araçlarda saatler yerine dakikalar tutacak şarj süreleri sağlanabilir. Ancak enerji yoğunluklarının düşük olması (70-80Wh/kg) daha büyük batarya paketleri gerektirmektedir [3].

Lityum hava bataryalar, üzerine araştırmalar yapılan bir diğer kimyadır. Bu bataryalar bazı laboratuvarlarda örnekleri gerçekleştirilse de henüz teoriktir. Oksijeni elektrot olarak kullanan bu bataryalar, lityum iyonla diğer kimyasallardakine göre daha yüksek oranda bağlanma olanağı sağlarlar. Bu sayede, teoride enerji yoğunluğu yükselmesine rağmen, oksijenin aşırı yanıcı olması nedeni ile bu bataryalarda daha çok ısı problemi meydana gelmektedir. Buna rağmen enerji depolama kapasitelerini üçe, hatta dörde katlama potansiyelleri yüzünden bu bataryalar üzerinde araştırmalar devam etmektedir.

Diğer araştırma yapılan bir batarya kimyası ise, lityum sülfürdür. Sülfür, iki lityum iyonu ile birleşebileceği için bataryaların kapasitelerini artırılabilir. Ancak sülfür yalıtıcı bir materyal olduğu için çoğu zaman lityum iyonları sülfürle birleşmezler. Ayrıca bu bataryaların çevrim ömürleri 10-15 civarındadır. Bu teknoloji umut vaat edici olduğu halde, 2011 yılı başından itibaren araştırmalar daha çok lityum hava ve metal okside kaymıştır [3].

Araştırmaların ikinci kısmı ise bataryaların güvenlikleri üzerine yoğunlaşmıştır. Lityum iyon bataryalara temas etmek zararlı olduğu için hücreler içinde tutulmaktadır. Ancak bu durum yangın tehlikesi yanında ikinci sırada kalmaktadır. Kobalt oksitten yapılan bataryalar delindiğinde kimyasal reaksiyon nedeniyle alev alabilirler. Ancak bu bataryalar yüksek enerji yoğunluğuna sahip oldukları için hala çalışmakta ve kullanılmaktadır [3].

Bütün lityum iyon bataryaların aşırı şarj durumunda alev alma riski vardır. Cambridge Üniversitesi'nde yapılan bir araştırmaya göre, aşırı şarj veya hızlı şarj sırasında bataryanın içinde metal lifi oluşmakta ve bu lif batarya içinde kısa devreler meydana getirerek, aşırı ısınmalara ve yanmalara neden olmaktadır. Bu yüzden lityum iyon bataryaların başarısı batarya şarj kontrol sistemlerine doğrudan bağlıdır.

Ayrıca batarya paketleri ısı artışını azaltmak için ısı kontrol sistemlerine sahiptirler. Oluşan ısının yangına neden olmasını engellemeyi hedefleyen bu sistemler, sıvı veya hava soğutmalı olabilirler.

3.2 Ultrakapasitörler

En yaygın kullanılan enerji depolama aygıtları, kapasitörler ve bataryalardır. Ultrakapasitörler ise geleneksel kapasitörlerden daha büyük kapasite elde etmek için yüksek alanlı elektrot malzemelerden ve ince elektrolitik yalıtkanlardan faydalanılarak geliştirilirler. Bunu yaparken aynı zamanda, geleneksel kapasitörlerin yüksek güç yoğunluğu karakteristiklerini sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda geleneksel kapasitörlerden çok daha büyük enerji yoğunluğuna erişebilirler [10]. Ultrakapasitörler; aynı zamanda süper kapasitör, elektrokimyasal kapasitör ve çift-katman kapasitörler olarak da bilinir.

Bütün bu üstün özelliklerin nerden geldiğini anlamak için bir ultrakapasitörü sıradan bir kapasitörden, çok daha fazla faraddan başka, neyin ayırdığını anlamak gerekmektedir. İlk önce, klasik paralel-plakalı kapasitörleri; bir izolatör veya yalıtkan tarafından ayrılmış iki iletken plaka sandviçini düşünelim. Plakalar, bataryanın pozitif ve negatif kutbuna bağlandığında, zıt yükler birbirinden ayrılır ve her bir tabakanın yüzeyinde birikirler. Bu metal plakalar aygıtın terminalleri veya diğer bir deyişle elektrotları olarak davranırlar. Zıt yükler yalıtkan malzeme tarafından ayrı tutulurlar ve bu sayede, kapasitörlerin enerji depolamasına imkân veren elektrik alanı oluşur. Batarya gerilimi tarafından oluşturulan elektrik alanı, yalıtkan ortamdan geçerek batarya gerilime karşı gelen bir gerilim oluşturur[11].

Oluşan elektrik alan, tabaka yüzeyinde birikmiş olan zıt yükleri ayrı tutar ve bunu yapmakla enerji depolamış olur. Bu yüzden kapasitörler, enerjiyi kimyasal formda depolayan bataryalardan farklı olarak, hiçbir hareket eden parça veya kimyasal değişim durumu olmaksızın, elektrik alanda depolarlar. Kapasitörün enerjisini kullanmak için sadece elektrik alan tarafından biriktirilmiş yüklerin bir devreye doğru akmasına izin vermek yeterlidir [11].

Kapasite basitçe, verilen bir gerilim seviyesi için kapasitörün ne kadar yük depolayabileceğinin ölçüsüdür. Matematiksel olarak kapasite, plakalar üzerinde biriken yük miktarının plakalar arasındaki gerilim farkına bölümüdür [11].

$$C = \frac{Q}{V} \quad (3.1)$$

Bununla birlikte, plakaların yüzeyinde biriken yük, plakaların yüzey alanı ile orantılıdır; daha büyük yüzey alanına sahip plaka daha fazla yük biriktirebilir. Ayrıca plakalar arasındaki gerilim, plakalar arası uzaklıkla ilişkilidir; daha küçük aralığa sahip plakalar verilen bir gerilim için daha fazla yük tutulmasına olanak sağlar. Bu yüzden bir aygıttan daha yüksek kapasite elde etmek için, plakaların veya elektrotların geniş alana sahip olması ve bu plakaların çok küçük bir aralıkla ayrılması istenir [11].

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{D} \quad (3.2)$$

Üstteki eşitliğin sağ tarafındaki ilk iki terimin çarpımı oransal bir sabittir. Burada ϵ_0 havanın dielektrik sabitini, ϵ_r ise elektrotlar arasında bulunan yalıtkan malzemenin dielektrik katsayısını belirtir [10].

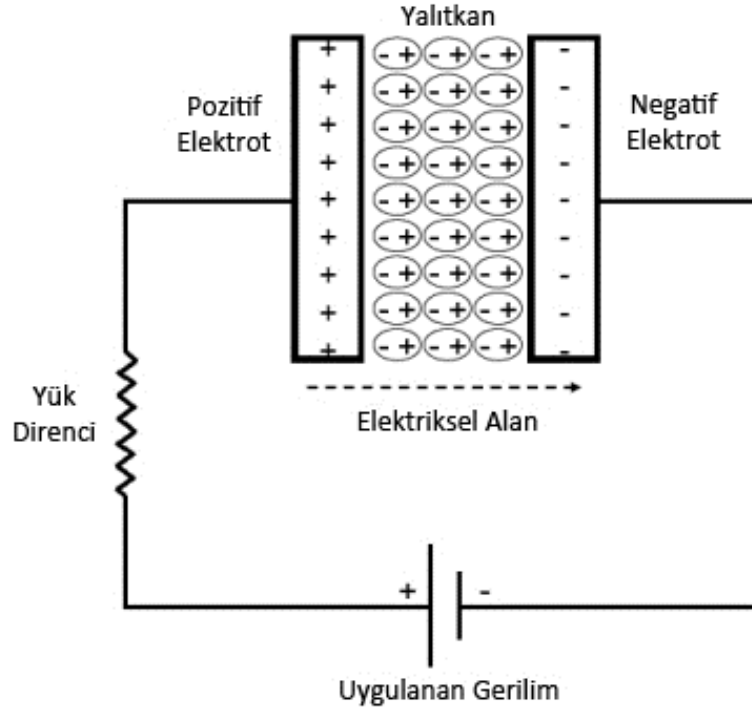
Kapasitörlerin iki ana özelliği enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğudur. İki ölçü içinde yoğunluk, birim kütle veya birim hacim başına düşen miktardan hesaplanabilir. Kapasitörde depolanan enerji, kapasitesi ile doğru orantılıdır:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3.3)$$

Genel olarak güç (P), birim zamanda harcanan enerjidir. Yinede bir kapasitörün gücünü tanımlamak için, kapasitörlerin Şekil 3.4'deki gibi, harici bir yük direnci (R) ile birlikte bir devre olarak temsil edildiğini göz önüne almak gerekir [10].

Kapasitörün dâhili elemanları (akım kolektörleri, elektrotlar, yalıtkan malzeme, v.s.) ayrıca bu dirence dâhil edilir. Bu dâhili elemanlar, seri eşdeğer direnç (ESR) olarak toplamda ölçülürler. Deşarj sırasındaki gerilim, bu dirençler tarafından belirlenir. Bir kapasitörün maksimum gücü, seri eşdeğer direnç yardımıyla hesaplanır:

$$P_{\max} = \frac{V^2}{4 \times ESR} \quad (3.4)$$



Şekil 3. 4 Klasik kapasitörlerin şematik gösterimi [10]

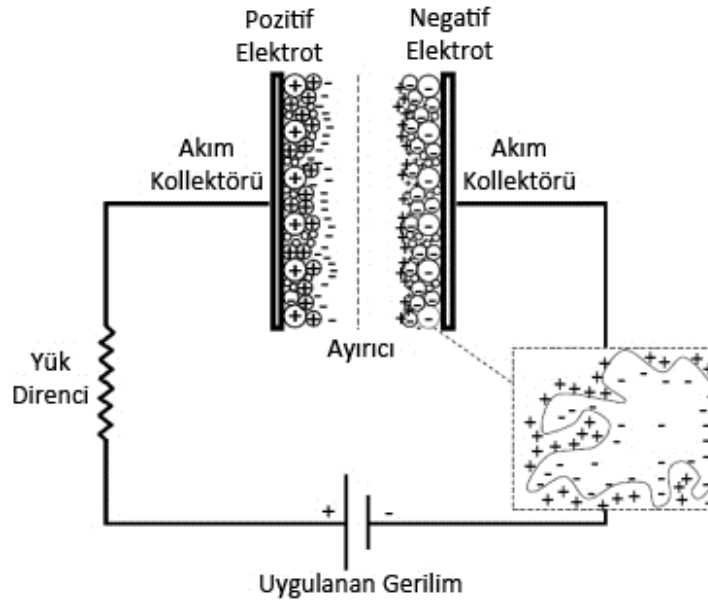
Denklem 3.4 kapasitörün maksimum güç kapasitesinin, nasıl seri eşdeğer direnç ile sınırlandığını göstermektedir. Geleneksel kapasitörler, elektrokimyasal bataryalar ve yakıt hücreleri ile karşılaştırıldığında, yüksek güç yoğunluğuna, buna karşın düşük enerji yoğunluğuna sahiplerdir. Başka bir deyişle bir batarya, kapasitörden daha fazla enerji depolar, fakat onu hızlı bir şekilde meydana çıkaramaz ve bu düşük güç yoğunluğu olduğu manasına gelir.

Diğer yandan kapasitörler, birim hacim veya kütle başına nispeten daha az enerji depolarlar, fakat bu enerjiyi yüksek miktarda güç üretmek için bir anda salabilirler. Bu yüzden güç yoğunlukları genellikle yüksektir [10]. Kapasitörlerin elektrotları arasındaki maksimum gerilim farkı, elektrotlar arasındaki dielektrik malzemenin bozulma karakteristiğine bağlıdır [12].

Ultrakapasitörler, geleneksel kapasitörlerle aynı temel prensipler ile çalışırlar. Bununla beraber ultrakapasitörler, çok daha yüksek yüzey alanlı elektrotlarla elektrotlar arası uzaklığı düşüren çok daha ince yalıtkanların bir araya gelmiş halidir. Böylece, Denklem

3.2 ve 3.3'ten de görülebileceği gibi, ultrakapasitörlerin kapasiteleri ve depolayabildiği enerji miktarı yüksek olur. Ultrakapasitörler ayrıca, geleneksel kapasitörlerden daha düşük seri eşdeğer direnç değeri sağlarlar [10].

Modern ultrakapasitörlerin kilit noktası, tabakaları bu kadar küçük bir aralıkla ayırmalarıdır. Yüksek kapasite, çift katmanının elektrot yüzeyindeki biçimlenmesinden kaynaklanır. Aktif karbonun iç kısmı tıpkı bir sünger gibi çukurlarla veya kabarcıklarla doludur. Aktif karbondan yapılmış bu yapı sayesinde ultrakapasitörler, kola kutusu kadar bir kabın içine, $1.000.000 \text{ m}^2\text{kg}^{-1}$ gibi çok yüksek yüzey alanı ve dolayısıyla 4000 F gibi bir kapasite sığdırabilirler [5].



Şekil 3. 5 Ultrakapasitörlerin şematik gösterimi [10]

Ultrakapasitörler daha çok bir batarya gibi inşa edilmişlerdir. Yapı, elektrotlar arası bir ayırıcı ile elektrolite batırılmış iki aktif karbondan yapılmış elektrottan oluşur. Elektrotlar yüksek yüzey alanlı, çapları nanometre aralığında olan gözeneklere sahip gözenekli malzemeden yapılır. Ultrakapasitörlerde kullanılan elektrot malzemelerinin yüzey alanları $500\text{--}2000 \text{ m}^2/\text{g}$ aralığında olup, bataryalarda kullanılanlardan çok daha fazladır. Şarj, katı elektrot malzeme ile elektrolit arasındaki ara yüzeyde veya ara yüzeyin yakınında bulunan, mikro gözeneklerde depolanır [12]. Elektrotları ayıran ayırıcı zar, yüklü iyonların hareketliliğine izin verir, fakat elektronik teması engeller. Yüklü durumda pozitif ve negatif yükler elektrotlara yakın konumlanırlar ve bu şekilde

aşırı şarjı dengelemiş olurlar. Bu şekilde karbonla elektrolit arasındaki sınır boyunca, zıt kutuplu iki yüklü tabaka oluşmuş olur [13]. Şekil 3.6'da ultrakapasitörlerin çift katmanlı ve gözenekli yapısı ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.

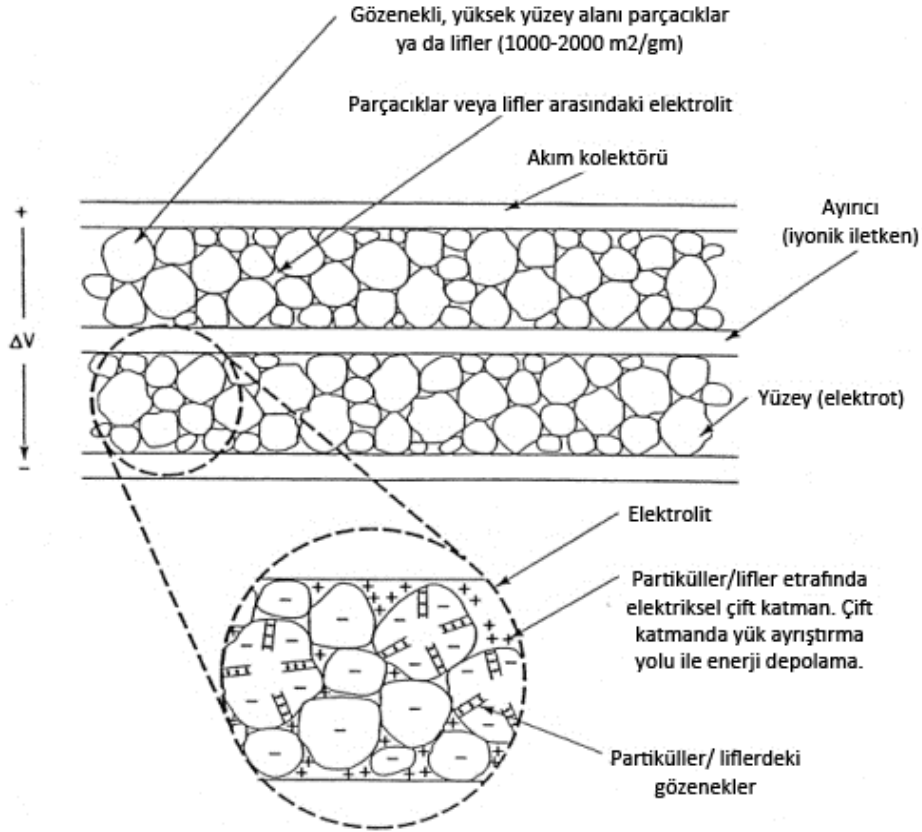
Ultrakapasitörde depolanan enerji ve güç, geleneksel kapasitörler için Denklem 3.3 ve 3.4'te verildiği gibi aynı ifadelerle bulunabilir. Ancak, ultrakapasitörün kapasitesinin hesabı, elektrotların gözeneklerinde cereyan eden karmaşık olgulara dayandığı için oldukça zordur [12].

Bir uygulamanın tüm enerji ihtiyacını tek bir enerji kaynağı ile karşılamak tasarımcıların ya güç temelli ya da enerji temelli bir tasarım yapmasını gerektirebilir. Gerekli gücün sağlanması temelinde yapılan bir tasarımda zaman zaman aşırı enerji tüketilebilir. Enerji verimliliği esas alınan uygulamalarda ise yetersiz güç sorunu oluşması oldukça muhtemeldir. Ultrakapasitörler, üstün özellikleri ile tasarımcıların, daha düşük bir maliyetle daha üstün performanslı güç sistemleri oluşturulabilmesine olanak sağlar. Bu üstün özelliklerin ikisinden; yani bir kapasitör olarak yüksek güç yoğunluğuna sahip olmasından ve yapısının getirdiği yüksek enerji yoğunluğundan daha önce bahsedilmişti. Ultrakapasitörler, bu iki özelliğinin haricinde uygulamalarda yer almalarını sağlayacak başka avantajlara da sahiptir.

Ultrakapasitörler çok yüksek verimli aygıtlardır. Ultrakapasitörlerde, şarj sırasında doldurulan toplam yükün deşarj sırasında çekilebilen yüke oranı olarak tanımlanan, şarj verimleri % 99'dan daha yüksektir. Çok yüksek akımlarda bile, şarj deşarj sırasında çok düşük bir yük kaybı olur. Düşük seri eşdeğer direnci sayesinde çalışma verimleri de aynı şekilde çok yüksektir. Bu durum yalnızca enerjinin daha verimli kullanılması anlamına gelmez, aynı zamanda daha az kayıp demektir. Bu ise daha az ısı oluşmasını ve enerji depolamak için daha az soğutma enerjisi sarf edilmesini sağlar[14].

Ultrakapasitörlerin, çok düşük bir seri eşdeğer dirençle tasarlanmış olmaları, onların çok yüksek akımlar alıp-vermelerini mümkün kılar. Bu durum, çok hızlı şarj olabilmelerine imkân sağlar ve bu da ultrakapasitörleri geri kazanımlı frenleme uygulamaları için uygun kılar. Ultrakapasitörlerin doğal karakteristiği, bataryaların sağlayamayacağı bir şekilde, aynı seviyede şarj ve deşarjına imkân verir. Enerji depolama aygıtı hızlı bir şekilde şarj edilmek istendiğinde, ultrakapasitörler düşük bir

dirençsel ısı ile sistemin izin verdiği ölçüde hızlı doldurulabilir. Ancak batarya temelli sistemlerde sadece bataryanın izin verdiği ölçüde şarj yapılabilir. Bu durum ne seviyede ve ne sıklıkla şarj yapabileceğinizi kısıtlar [14].



Şekil 3. 6 Ultrakapasitörlerin şematik gösterimi [12]

Ultrakapasitörler, kapasitör olmalarından dolayı dar bir gerilim bandında kısıtlı değildir. Tasarımcılar yalnızca sistemin gerilim bandını düşünmek zorundadırlar ki, bu bataryaların dar gerilim bandından çok daha geniş bir aralıktır. Ultrakapasitörler maksimum çalışma gerilimi ve onun altında herhangi bir gerilimle çalışabilir. Daha yüksek gerilimler için birçok hücre seri bağlanır ve toplam çalışma geriliminin oluşturduğu aralıkta çalışılır. Aşırı deşarjlarında hiçbir sakınca yoktur, hatta satış öncesi aşırı deşarj servis sırasında servis personeli için ekstra güvenlik getirir. Elektriksel riski azaltmak için tamamen deşarj edilebilirler.

Ultrakapasitörlerin çalışması kimyasal reaksiyonlara dayanmadığı için, geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilirler. Yüksek sıcaklıklarda 65°C'ye kadar çalışabilir ve 85°C'ye kadar ısı sürüklenme olmaksızın şarja dayanabilir. Düşük sıcaklıklarda ise, biraz artan

dirençsel kayıplara rağmen, -40°C 'ye kadar güç verebilirler. Mükemmel soğuk performansları ultrakapasitörleri, özellikle soğuk havalarda motor başlatma uygulamaları için uygun kılar [14].

Kabul edilebilir maksimum sıcaklıkları diğer enerji depolama aygıtlarından daha yüksektir. Üstelik yüksek sıcaklıklarda kapasitesi artar. Buna rağmen yüksek ortalama çalışma sıcaklığı parazit elektro-kimyasal reaksiyonları destekler. Elektrot yapısında oluşan değişimler nedeniyle meydana gelen elektrolitik oksitlenmesi, bunu izleyen kapasite düşüşlerine ve hızlandırılmış yaşlanmaya neden olur [15].

Enerji depolama aygıtlarının şarj durumunu (SOC) ve sağlık durumunu (SOH) bilmek önemli bir noktadır. Ultrakapasitörde depolanan enerji yalnızca gerilimin ve kapasitenin bir fonksiyonu olduğu için, basit bir açık devre gerilim farkı ölçümü şarj durumunu belirleme açısından yeterlidir. Zamanla kapasite ve seri eşdeğer dirençlerindeki değişim yavaş olduğundan, ultrakapasitörlerin sağlık durumunu öğrenmek için ara sıra yapılan kapasite ve seri eşdeğer direnç ölçümleri kullanılır. Herhangi bir sabit akımda hızlı bir deşarj (2–10 saniye) ultrakapasitörün kapasitesini ve seri eşdeğer direncini hesaplamak için yeterli veriyi sağlar [14].

Aşırı şarj sırasında oluşabilecek organik elektrolit bozulması sebebiyle iç basıncın yükselmesi tehlikeli durumlara yol açabilir. Bu sebeple güvenliği artırmak için ultrakapasitörlere, bir tahliye deliği açılır. Bu açıdan şarj durumunu izlemek son derece önemlidir. Ultrakapasitörlerde şarj durumunu öğrenmek kolay olduğu için, yalnızca gerekli durumlarda hücre seviyesi izleme sistemini gerçekleştirmek gereklidir [14].

Ultrakapasitörün enerji depolama mekanizmaları büyük ölçüde tersinir bir süreçtir, sadece yük ve iyonlar taşınır. Kimyasal bağlara batıp çıkmazlar. Bu nedenle çok az bir performans değişimi ile yüzlerce binlerce çevrimi tamamlayabilirler. Bu durum çevrim derinliği ile değişmez. Ayrıca istenilen sıklıkta veya seyreklikte de gerçekleşebilir.

Herhangi bir kimyasal reaksiyon olmaması nedeni ile ultrakapasitörlerin enerji depolama mekanizmaları son derece istikrarlı bir süreçtir. Bu sayede çok az bir performans değişimi ile birçok yıl boyunca sürekli çalışma yeteneğine sahiptirler. Uzun vadeli depolamalar sorunsuz bir şekilde gerçekleştirilebilir. Uzun çevrim ve uzun işletme ömürleri ultrakapasitörleri birçok uygulama için ömürlük eleman yapar.

Bataryaların gerektirdiği rutin bakımları gerektirmeyerek, ekstra maliyet ve zaman kaybını önlerler [14].

Birçok enerji depolama kaynağı, geçici durumlar için iyi performans gösteremezler. Hatta bazıları için geçici durumlar ömürlerini önemli ölçüde kısaltan bir etkidir. Ultrakapasitörlerle eşleşme halinde ise bu geçici yüklerin birçoğu ana enerji kaynağına etkimez. Bu ise hem diğer enerji kaynağının ömrünü uzatır hem de daha küçük enerji kaynakları kullanılmasına olanak sağlar. Toplam maliyet bu şekilde oldukça aşağı çekilebilir [14].

Ultrakapasitörler temelde bakım ihtiyacı duymazlar. Bellek etkileri yoktur, aşırı deşarj durumları söz konusu değildir ve maksimum gerilim değerlerinde ve bunun altında tutulabilirler. Geniş gerilim bandı ve geniş sıcaklık bandı içerisinde çalıştırılması durumunda herhangi bir bakım önerilmez [14].

Ultrakapasitörlerin bütün avantajlarına rağmen, bu teknolojinin en büyük problemi, kapasitörün uçları arasındaki gerilimin, 1-3 V arasında, çok düşük olmasıdır. Bunun oluşturacağı problem Denklem 3.3'ten açıkça görülebilir, bu durum ultrakapasitörün depolayabileceği enerji miktarını şiddetli bir şekilde sınırlar. Makul gerilim seviyesinde yük depolayabilmek için birçok kapasitör seri bir biçimde bağlanmak zorundadır. Bu ise sadece ek maliyet değil, bunun yanında birçok düzenleme gerektirir.

C1 ve C2 kapasiteli iki kapasitör seri bağlandığı zaman, çok iyi bilinir ki, bileşik kapasite C aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (3.5)$$

Bu yüzden, örneğin, iki tane 3 F'lık kapasitör seri bağlandığında 1.5 F'lık bir kapasite elde ederiz. Kapasitörleri seri bir biçimde bağlamak kapasiteyi düşürür. Mevcut durumda, artan gerilimden dolayı depolanabilen enerji karesel olarak artar, fakat Denklem 3.3'ten basit bir şekilde anlaşılabileceği gibi bu artış beklendiği kadar olmaz.

Ultrakapasitörleri seri bağlamakla ilgili asıl problem ise şarj dengesidir. Bu sebeple ultrakapasitörler çoğunlukla içinde şarj dengeleme devrelerini de bulunduran modüller halinde satılırlar.



Şekil 3. 7 48 V'luk bir ultrakapasitör modülü [12]

3.3 Enerji Depolama Aygıtlarının Karşılaştırılması

En yaygın enerji depolama cihazları bataryalardır. Bataryalar bu güne dek birçok uygulama için en uygun görülen teknoloji olmuştur. Çünkü nispeten küçük ağırlık ve hacimlerde yüksek miktarda enerji depolayabilirler ve birçok uygulama için yeterli güç seviyelerini sağlarlar. Birçok batarya tipi için raf ve çevrim ömürleri problem oluşturmaktadır, fakat insanlar alternatif yokluğundan ötürü, bu eksikliğe tolerans göstermeyi öğrenmişlerdir.

Son zamanlarda birçok uygulama için, güç gereksinimleri dikkat çekici bir biçimde artmış ve standart bataryaların kapasitesini aşmıştır. Bu durum, sık sık enerji yoğunluğu ve çalışma ömründen feragat edilerek, yüksek güçlü, özel ek bataryalar tasarlanmasına yol açmıştır. Ultrakapasitörler ise bu ek bataryalara alternatif olarak geliştirilmiştir. Dikkat çekici bir alternatif olabilmek için, ultrakapasitörler bataryalara göre çok daha yüksek güce ve çok daha uzun raf ve çevrim ömrüne sahip olmalıdır. “Çok”la kastedilen en az birkaç kat yüksek olmasıdır [12].

Ultrakapasitörler, bataryalardan çok daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptirler ve bu düşük enerji yoğunlukları, belirli bir yüksek güç uygulaması için ultrakapasitörlerin uygulanabilirliğini belirleyen faktördür. Ultrakapasitörler için enerji yoğunluğu ve RC zaman sabitleri arasındaki ödünleşim (trade-off) önemli bir tasarım hususudur. Genelde belirli bir materyalin, zaman sabitinde düşme elde etmek ve böylece güç

kapasitesinde büyük bir yükselme sağlamak için, enerji yoğunluğundan ödün vermek gereklidir. Ultrakapasitörlerin gelişimi ile nispeten yüksek enerji yoğunluklarına ulaşılmıştır ve artık yüksek güç gereksinimleri enerji yoğunluğunda çok büyük düşüşlere neden olmamaktadır.

Bataryalarda maksimum güç şu denklem ile hesaplanır:

$$P_m = V_{oc}^2 / 4R_b \quad (3.6)$$

Burada V_{oc} bataryanın açık devre gerilimini, R_b ise iç direnci ifade eder. Formülde deşarj verimi % 50 olarak alınmıştır. Kullandığı enerjinin önemli bir kısmını enerji depolama aygıtlarından alan uygulamaların verimliliği, şarj/deşarj döngüsünün verimliliğine bağlıdır. Böyle durumlarda, enerji depolama aygıtının kullanımı, şarj ve deşarj veriminin yüksekliği ile belirlenmelidir. Bataryalar için şarj/deşarj gücü verimin fonksiyonu olarak verilir:

$$P_{ef} = EF * (1 - EF) * V_{oc}^2 / R_b \quad (3.7)$$

Burada EF yüksek güç sinyallerinin verimidir. $EF=0,95$ olduğunda $P_{ef}/P_m=0,19$ olur. Bu yüzden verimin temel sorun olduğu uygulamalarda, bataryanın kullanılabilir gücü üretici tarafından fiyatlandırılan azami güç değerinin çok altında olur [7].

Ultrakapasitörlerde ise $V_o-V_o/2$ arasındaki deşarj için azami güç, şu denklem ile hesaplanır:

$$P_{uc} = \frac{9}{16} * (1 - EF) * V_o^2 / R_{uc} \quad (3.8)$$

Burada R_{uc} ultrakapasitörün iç direncidir ve bu denklemde deşarj sırasındaki gerilim düşüşü hesaba katılmıştır. Batarya ve ultrakapasitörlerin azami güç değerleri göz önüne alındığında, hemen hemen bütün durumlar için ultrakapasitörlerin güçlerinin bataryalarinkinden çok daha fazla olduğu görülmektedir. Her iki aygıtında güç kapasitesi öncelikle iç dirençlerine bağlıdır ve kullanılabilecek azami güç kapasitesinin belirlenmesi için direnç değerinin bilinmesi kilit öneme sahiptir. Bu yüzden puant işletme modunda cihazın direncinin ölçülmesi, azami güç kapasitesi tahmini için gereklidir [7].

Batarya ve ultrakapasitörlerin birçok farklılığı vardır. Fakat en temel fark, bataryalar enerjiyi şarj üretebilecek kimyasallarda depolarken, ultrakapasitörlerin enerjiyi elektriksel alanda şarj olarak depolamasıdır. Bu fark bataryaların deşarj hızında önemlidir. Deşarj hızı, batarya elektrotlarında gerçekleşen reaksiyon hızı ve taşınan kimyasal kütlesi tarafından sınırlanır ve bu durum yüksek zaman sabitlerine ve düşük güç performansına sebep olur. Ayrıca bu durum çoğu zaman deşarj hızından çok daha yavaş şarj hızı ortaya koyar. Bundan başka, batarya reaktantlarının termodinamiği, sistemi oldukça sabit olan işletme gerilimine zorlar, bu sebeple batarya gerilimi şarj durumundan bağımsızdır. Sonuç olarak, çoğu kez bataryaların şarj durumunu kesin olarak ölçmek zordur [16].

Bataryalara karşın, ultrakapasitörlerde kimyasal reaksiyonlar yoktur ve dolayısıyla şarj-deşarj hızlarını sınırlamazlar. Bu durum ultrakapasitörlere hem şarj hem de deşarj için fevkalade yüksek güç kapasitesi imkânı doğurur. Ayrıca ultrakapasitörlerin, gerilimleri sabit değildir, aksine sıfır şarj durumu için 0.0V'dan başlar ve şarj doluluk oranına göre lineer olarak yükselirler. Bu yüzden kapasitörlerin şarj durumu her zaman bilinebilir.

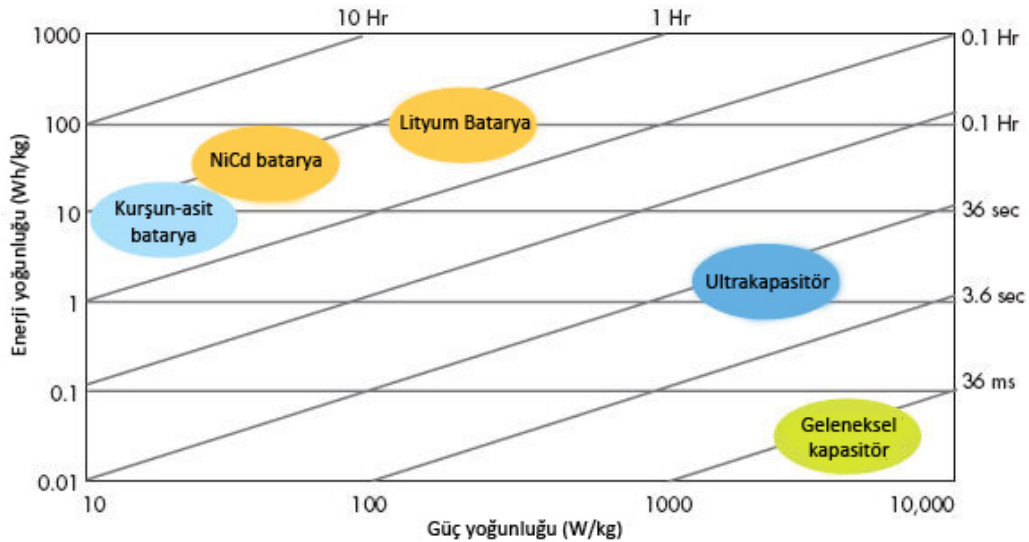
Batarya ve ultrakapasitörler arasındaki önemli bir özellik farkı da enerji yoğunluklarıdır. Bataryalardaki kimyasal reaksiyonlar yüksek enerji yoğunluğu, kapasitörlerdeki fiziksel şarj ise düşük enerji yoğunluğu manasına gelir. Bu farklılık için basit bir sebep, batarya elektrotlarındaki malzemenin çoğunun depolamaya katkıda bulunmasına karşın ultrakapasitörlerde sadece yüzeylerin depolamada etkili olmasıdır. Bataryaların özgül enerji değerleri 25 Wh/kg'dan başlayıp 100 Wh/kg üstüne kadar çıkabilirken, ultrakapasitörler 1–10 Wh/kg aralığında özgül enerji değerlerine sahiptirler [16].

Ultrakapasitörler, elektrolitik kapasitörlerin sahip olduğu özgül güç değerlerinden daha düşük özgül güç değerlerine sahiptirler. Özgül enerji değerleri ise elektrolitik kapasitörler ile elektrokimyasal depolama cihazları arasında bir yere denk gelir. Esasında, ultrakapasitörler elektrolitik kapasitörlerden 10 kat daha fazla enerji yoğunluğuna ve elektrokimyasal depolama cihazlarından 10 kat daha fazla güç yoğunluğuna sahiptir denebilir. Bu durum ultrakapasitörleri tam deşarjın yaklaşık 1–60 saniye boyunca gerekli olacağı durumlar için uygun bir güç kaynağı yapmaktadır. Bu

nedenle ultrakapasitörler depolama cihazları olarak kısa dönem ile uzun dönem enerji depolama cihazları arasında yerleştirilirler [7].

Ragone grafikleri, muhtelif enerji depolama aygıtlarının performans karşılaştırmalarında kullanılan bir grafikdir. Böyle bir grafikte enerji yoğunluğuna (Wh/kg) karşı güç yoğunluğu (W/kg) çizilir. Her iki eksen de çok farklı depolama cihazlarını karşılaştırabilmek amacı ile logaritmiktir. Bu şekilde örneğin, hem aşırı düşük hem de aşırı büyük güç değerlerine sahip aygıtlar grafikte rahat bir biçimde gösterilebilir. Ragone grafikleri, ilk olarak bataryalar için kullanılmıştır, fakat her türlü enerji depolama kaynağını karşılaştırmak için uygundur. Standart olarak, kullanılabilir enerji miktarı düşey eksende gösterilirken, yatay eksen bu enerjinin ne kadar hızlı salınabileceği, yani güç gösterilir. Şekil 3.8'den de görülebileceği gibi ultrakapasitörler bütün batarya türlerine göre daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Bu durum ultrakapasitörlerin uygulanabilirliğini sınırlamaktadır.

Ragone grafikleri sol tarafta toplanmış olan değişik bataryalarla, sağdaki kapasitörlerin farklarını göstermektedir. Ragone grafiği üzerinde batarya ve ultrakapasitörler bir arada çizildiğinde daha iyi görülmektedir ki, bu enerji depolama sistemleri birbirini alternatifinden daha ziyade birbirlerini tamamlayıcı yapmaktadır. Aslında pratikteki uygulamalar da sık sık bu şekildedir [17].



Şekil 3. 8 Muhtelif enerji depolama aygıtları için Ragone Grafiği [10]

Yüksek güç kapasitelerine ek olarak, belli uygulamalar için ultrakapasitörlerin tercih edilmesinin diğer nedeni, uzun raf ve çevrim ömürleridir. Bataryalarda gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar tümüyle tersinir değildir. Bu da şarj-deşarj çevrim ömrünü belli bir sayı ile sınırlamak demektir. Ayrıca bu sayı bataryanın ne kadar derindeşarj edildiğine de bağlıdır. Buna karşın ultrakapasitörler, yükü kimyasaldan daha ziyade fiziksel olarak depolarlar ve bu nedenle yapıda bir değişme meydana gelmez. O halde ultrakapasitörlerde yük depolama son derece tersinirdir ki bu da ultrakapasitörlere adeta sınırsız çevrim ömrü sağlar [16]. Bu özellikle karbon elektrotlar kullanılarak yapılan ultrakapasitörlerde doğrudur.

Birçok şarj-edilebilir batarya aylarca kullanılmadan rafta bırakılırsa, önemli derecede geriler ve aslında kendi kendine boşalma ve korozyon etkileri nedeniyle belli zamandan sonra kullanılamaz olur. Ultrakapasitörler belli bir zaman sonra düşük gerilimlere doğru kendi kendinedeşarj olurlar, fakat kapasitelerini kaybetmezler ve bu şekilde yeniden şarj edilerek orijinal hallerine dönebilirler. Deneyimler ultrakapasitörlerin, senelerce kullanılabileceğini ve orijinal hallerine yakın olarak kalacaklarını göstermiştir. Ultrakapasitörler çok yüksek hızlarda derin çevrim yaparak 500.000–1.000.000 çevrim yapabilirler. Bu süreç sonunda kapasite ve dirençte sadece %10-20 oranında gerileme yaşanır. Bu durum bataryalardadeşarj derinliği %10-20 arası tutulsa dahi mümkün değildir [12].

Çizelge 3.1 ve 3.2’de ultrakapasitör ve bataryaların karşılaştırılmasına ilişkin bilgiler özet halinde verilmiştir [18].

Çizelge 3. 1 Ultrakapasitörlerin bilinen avantaj ve dezavantajları [18]

Avantajları
Uzun çevrim ömrü, 100.000 çevrimden fazla, bazı sistemlerde 10^6 çevrime kadar
Yüksek güç yoğunluğu (Seri eşdeğer dirençle sınırlanır)
Basit prensibi ve yapım biçimi (Batarya yapım teknolojisi kullanılabilir)
Ucuz malzemeler (Sulu düzenlemeler için)

Şarj durumu izleme içermesi, $Q=f(V)$
Hibrit uygulamalar için şarj-edilebilir bataryalarla birleşebilmesi (elektrikli araçlar)
Dezavantajları
Sınırlı enerji yoğunlukları
Düşük hacimsel enerji yoğunlukları
Düşük çalışma gerilimleri (elektrolitik kapasitörlere göre)
Suluda 0–1,4 V aralığında, susuzlarda 4,5 V'a kadar, pratikte 3,5 V hücre gerilimi
Susuz uygulamaların saflık talebi, su içermeyen malzemeler pahalı
Yüksek gerilim işletmeleri için yığın gerekliliği
Bu yüzden, hücrelerin iyi uyumlu olması gerekliliği

Çizelge 3. 2 Ultrakapasitör ve bataryaların karakteristiklerinin karşılaştırılması [18]

Ultrakapasitörler		Bataryalar
1	Eğimli şarj ve deşarj eğrileri	Lityum soğurucu sistemler haricinde, ideal olarak sabit şarj ve deşarj gerilimi
2	(1) sebebi ile kendine özgü iyi bir şarj-durumu belirtisi	Lityum soğurucu sistemler haricinde, kendine özgü iyi bir şarj-durumu belirtisi
3	Oldukça düşük enerji yoğunluğu	Aktif elektrot malzemeye bağlı yüksek enerji yoğunluğu
4	Yüksek güç yoğunluğu	Kimyasal hıza bağlı, düşük güç yoğunluğu

5	Basit fiziksel yük şarj-deşarjı nedeniyle mükemmel çevrim ömrü	Tümüyle tersinir olmayan kimyasal reaksiyonlar nedeni ile 1/100–1/1000 oranında daha az çevrim ömrü
6	Akım kolektörlerinin korozyonu dışında uzun ömür beklentisi	Aktif malzemelerin bozulması nedeniyle daha az ömür
7	İyon soğrulması nedeni ile şarj sırasında elektrolitik iletkenliğinde azalma	Hücrenin kimyasal reaksiyonuna göre şarj sırasında elektrolit iletkenliğinde artma veya azalma
8	İki kutuplu biçimde düzenlenebilme	İki kutuplu biçimde düzenlenebilme

Hem bataryalar hem de ultrakapasitörler görece düşük hücre gerilimine sahip olduklarından, yüksek gerilim uygulamalarının gereksinimlerini karşılamak için, birçok hücrenin seri biçimde bağlandığı modüller oluşturulması gereklidir [16]. Bataryalar büyük ve ağır olmasına karşın, ultrakapasitörler genelde küçük ve hafiftirler [17].

Son olarak, ultrakapasitörlerin artı güç kaynağı olarak bataryalara göre avantajları; yüksek güç yoğunluğu, yüksek verimleri ve uzun raf ve çevrim ömürleridir. Ultrakapasitörlerin temel dezavantajı, bataryalarla karşılaştırıldıklarında nispeten düşük enerji yoğunlukları olmasıdır. Bu durum ultrakapasitörlerin kullanımını, ultrakapasitör tekrar şarj edilemeyecekse sadece düşük miktar enerji gerekli olan uygulamalarla sınırlamaktadır. Hâlbuki ultrakapasitörler, yüksek güç seviyeleri gereken durumlarda uygun bir enerji kaynağı varsa, bataryalara göre çok kısa zamanda (saniyeden az sürelerde) şarj edilebilirler.

Bir sonraki bölümde ultrakapasitörlerin bataryalarla beraber kullanımına olanak sağlayarak, her iki depolama aygıtının avantajlarına erişilebilmesini mümkün kılan güç biçimlendirme üniteleri incelenecektir.

GÜÇ KOŞULLANDIRMA ÜNİTELERİ

Elektrikli araçlarda enerji depolama sistemleri kadar önemli olan bir diğer kısım da güç elektroniği temelli güç biçimlendirme üniteleridir. Farklı gerilim seviyelerine sahip enerji depolama aygıtlarıyla dc bara arasında; dc bara ile motor sürücüsü arasında gerekli enerji akışı ve güç dönüşümünü sağlamak için yüksek güçlü dc-dc dönüştürücülere ihtiyaç duyulmaktadır.

Elektrikli araçlarda enerji depolama aygıtlarının kontrolü için kullanılan güç koşullandırma ünitelerinin tasarımı birçok nedenle oldukça zorlu bir husustur. Bu nedenlerden 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 ısıl stresi artırmakla kalmayıp, aynı zamanda dönüştürücünün veriminin düşmesine de sebep olmaktadır. İkinci neden 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 gerilimi aralığı, elemanlar üzerindeki akım ve gerilim streslerini artırmaktadır. Bu durum daha büyük boyutlarda aktif ve pasif elemanlar kullanılmasını gerektirmektedir. Son olarak, yukarıda bahsedilen iki faktöre EMI (Elektromanyetik girişim) gürültüleri de eklendiğinde bu dönüştürücüler yalnız ağır ve hantal değil, aynı zamanda yüksek maliyetli de olmaktadır. Bu sebeple elektrikli araçlarda kullanım için verimli, kompakt ve düşük maliyetli dönüştürücü tasarımlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Güç elektroniği teknolojisindeki ilerlemeye paralel olarak dc-dc dönüştürücüler ile ilgili yapılan çalışmalarda, gereksinimlere göre farklı dönüştürücü yapıları geliştirilmektedir.

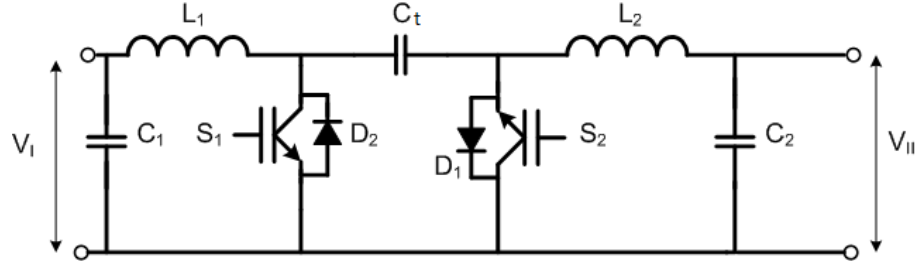
Sistemin topolojisine göre tek yönlü veya çift yönlü, izoleli veya izolesiz, tek girişli veya çok girişli dönüştürücü topolojileri bulunmaktadır. Elektrikli araçlarda, enerji depolama sistemleri gibi birden fazla kaynağın birlikte kullanılmasına olanak sağlayan çift yönlü ve/veya çok girişli dc-dc dönüştürücüler öne çıkmaktadır. Özellikle elektrikli taşıtlarda 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 eleman sayıları az ve kontrolleri de daha kolaydır [19]. Bunun yanında izoleli olan türler, bir transformatör üzerinden elektriksel izolasyon sağlarken, yüksek maliyet ve kontrol kısıtlamalarını da beraberinde getirmektedir. Çok girişli dönüştürücü topolojileri; kontrol zorlukları, karmaşık yapıları ve frenleme enerjisini kazanma noktasında kısıtlı bir aralıkta çalışabilmeleri nedeni ile elektrikli taşıt uygulamalarında tercih edilmemektedir. Bu hususlardan ötürü, elektrikli taşıtlarda 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 [20]. Bu topolojiler aşağıda sırası ile incelenecektir.

4.1 Cuk Dönüştürücü

Cuk dönüştürücüye ait temel devre Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Güç dönüştürücülerinin çoğu, giriş ve çıkış arasında endüktans kullanarak enerji transferi yapmaktadırlar. Bu nedenle dönüştürücülerde hesaplamalar, endüktans üzerindeki gerilim dengesine dayanmaktadır. CUK çevirici ise, kapasitif enerji transferini kullanır ve yapılan hesaplamalar kondansatörün akım dengesine dayanmaktadır.

Cuk dönüştürücü iki adet endüktans (L_1 , L_2), bir adet transfer kapasitörü (C_t), iki adet filtre kapasitörü (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 4. 1 Cuk çift yönlü dönüştürücü topolojisi

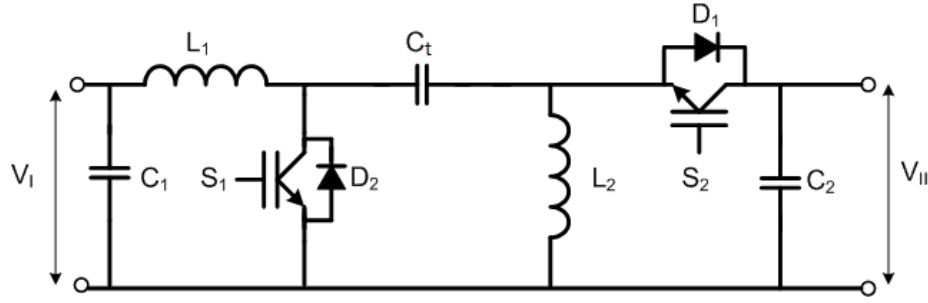
Bu topoloji girişten çıkışa güç aktarılırken (ileri yön) yükseltici modda çalışmaktadır. İleri yönde çalışma için, S_1 ve D_1 iletimde iken, S_2 ve D_2 kesimdedir. Devre çıkıştan girişe enerji aktarırken geri yönde düşürücü modda çalışır. Bu durumda ise S_2 ve D_2 iletimde iken, S_1 ve D_1 kesimdedir.

Dönüştürücünün giriş ile çıkış gerilimleri arasındaki ilişki Denklem (4.1)'den hesaplanabilir. Eşitlikte kullanılan negatif işaret, çıkış geriliminin girişe göre ters olduğunu göstermektedir. Devrenin yükseltici veya düşürücü çalışması, uygulanan darbe genişlik modülasyonunun doluluk oranına (d) bağlıdır. Devre $d < 0,5$ seçildiğinde düşürücü; $d > 0,5$ seçildiğinde ise yükseltici olarak çalışmaktadır.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{d}{1-d} \quad (4.1)$$

4.2 SEPIC ve Luo Dönüştürücüsü

İki farklı dönüştürücü yapısının (SEPIC ve Luo) birleştirilmesi ile elde edilmiş olan bu dönüştürücüye ait topoloji Şekil 4.2'de verilmektedir.



Şekil 4. 2 SEPIC/Luo dönüştürücü topolojisi

Bu topoloji girişten çıkışa güç aktarılırken (ileri yön) yükseltici modda çalışmaktadır. İleri yönde çalışma için, S_1 ve D_1 iletimde iken, S_2 ve D_2 kesimdedir. Devre çıkıştan girişe enerji aktarırken geri yönde düşürücü modda çalışır. Bu durumda ise S_2 ve D_2 iletimde iken, S_1 ve D_1 kesimdedir.

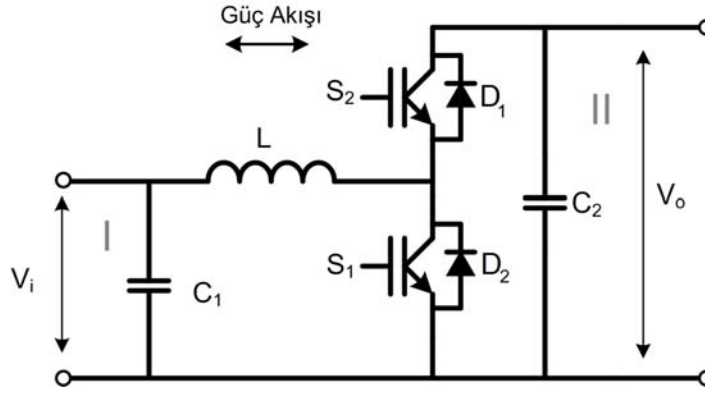
SEPIC/Luo dönüştürücüde, giriş ile çıkış arasında ilişki Denklem (4.2)'de verilmektedir. Eşitlikten açıkça görüldüğü üzere giriş ve çıkış kutuplanmaları aynıdır. Cuk dönüştürücüde olduğu gibi devrenin yükseltici veya düşürücü çalışması, aşağıdaki eşitlikte görüldüğü üzere doluluk oranına (d) bağlıdır. Aynı şekilde devre $d < 0,5$ seçildiğinde düşürücü, $d > 0,5$ seçildiğinde ise yükseltici olarak çalışmaktadır.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{d}{1-d} \quad (4.2)$$

4.3 Yarım Köprü Dönüştürücü

Literatürde sıklıkla kullanılan diğer bir dönüştürücü topolojisi de Şekil 4.3'de verilen yarım köprü (half bridge) topolojisidir. Görüldüğü üzere, bu topoloji iki adet güç anahtarına ve bir endüktansa 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, S_1 ve D_1 iletimde iken, S_2 ve D_2 kesimdedir. Devre çıkıştan girişe enerji aktarırken geri yönde düşürücü modda çalışır. Bu durumda ise S_2 ve D_2 iletimde iken, S_1 ve D_1 kesimdedir.



Şekil 4. 3 Yarım-köprü çift yönlü dönüştürücü topolojisi

İleri yönde yükseltici olarak çalışma durumunda, çıkış ile giriş gerilimleri arasındaki ilişki Denklem (4.3)'de verilmektedir. PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) doluluk oranının altında bulunan rakamsal indisler, ait oldukları anahtarları göstermektedir.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-d_2} \quad (4.3)$$

Geri yönde düşürücü olarak çalışması durumunda ise, çıkış ve giriş gerilimleri arasındaki bağıntı Denklem (4.4) kullanılarak hesaplanabilmektedir:

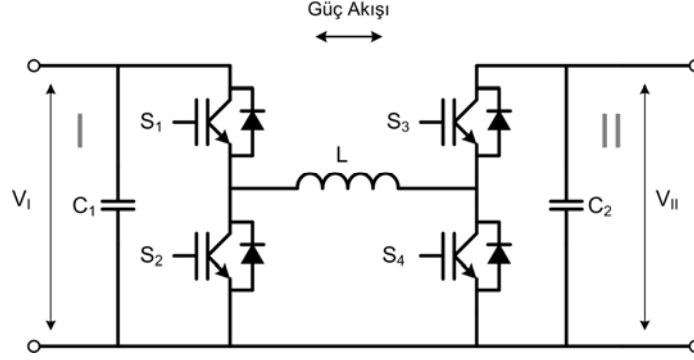
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = d_1 \quad (4.4)$$

4.4 Kaskad Çift Yönlü DC-DC Dönüştürücü

Bu topoloji, Şekil 4.4'de görüldüğü gibi iki adet yarım köprü (half-bridge) yapının birleşiminden oluşmaktadır ve hem düşürücü hem de yükseltici olarak çalışabilmektedir. Tetikleme sinyali gönderilen güç anahtarlarına ($S_{1,2,3,4}$) bağlı olarak dört farklı durumda (ileri yönde düşürücü veya yükseltici, geri yönde düşürücü veya yükseltici) çalışmaktadır.

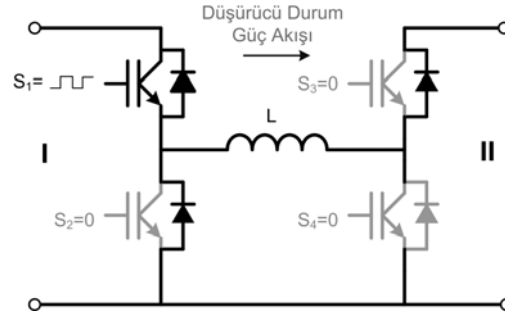
Yarım köprü dönüştürücüden türetilen bu yeni dönüştürücü, yarım köprü dönüştürücünün sağladığı yüksek verimi ve sahip olduğu ekonomik avantajı da beraberinde getirmektedir. Bu sayede, literatürde kullanılan diğer çift yönlü topolojilere göre de üstünlük sağlamaktadır. Ayrıca, hem ileri (motor sürme) 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.

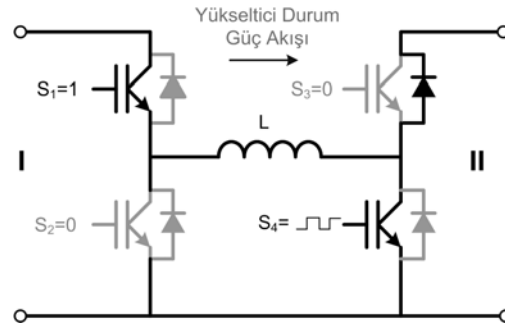


Şekil 4. 4 Kaskad bağlı çift yönlü yükseltici ve düşürücü tip dc-dc dönüştürücü yapısı

Kaskad topolojinin ileri yönde çalışma durumları Şekil 4.5’de görülmektedir.



a- İleri yönde düşürücü çalışma durumu

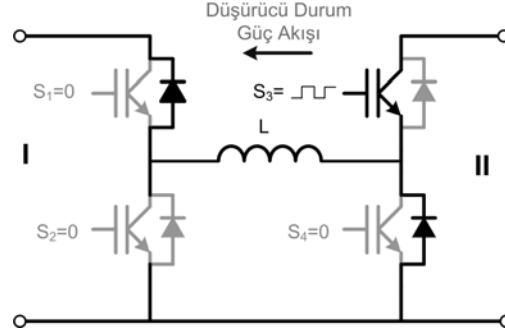


b- İleri yönde yükseltici çalışma durumu

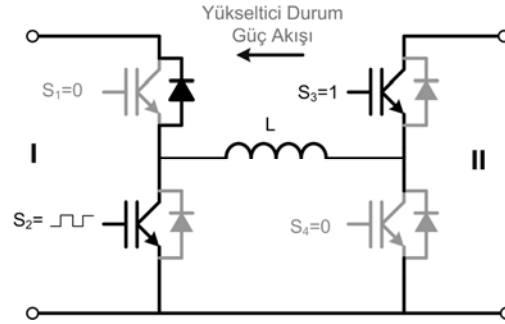
Şekil 4. 5 Kaskad topolojinin ileri yönde çalışma durumları

Şekil 4.5-a’da görüldüğü gibi ileri yönde düşürücü olarak çalışma durumunda sadece S_1 anahtarına tetikleme sinyali (PWM) gönderilmektedir. İleri yönde yükseltici olarak çalışma durumunda, Şekil 4.5-b’de görüldüğü gibi S_1 anahtarı sürekli iletimde kalmakta

ve S_4 anahtarına PWM sinyali gönderilmektedir. Kaskad bağılı topolojinin geri yönde çalışması, ileri yöndeki çalışmaya benzer şekilde gerçekleşmektedir. Geri yöndeki çalışma durumları Şekil 4.6’da görülmektedir.



a- Geri yönde düşürücü çalışma durumu



b- Geri yönde yükseltici çalışma durumu

Şekil 4. 6 Kaskad topolojinin geri yönde çalışma durumları

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

Bu topolojide çıkış ile giriş gerilimleri arasındaki oran Denklem (4.5)’ten hesaplanabilir. Bu eşitlik, dönüştürücünün her iki yönde de çalışması durumunda geçerlidir. Burada PWM işaretlerinin doluluk oranlarının (d) altında bulunan indisler, ilgili oldukları anahtarları göstermektedir. “d” ve “y” indisleri sırasıyla; düşürücü ve yükseltici anahtarları belirtmektedir.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{d_d}{1 - d_y} \quad (4.5)$$

4.5 Uygun Dönüştürücü Seçimi

Bu bölümde yukarıda bahsedilen dört dönüştürücü topolojisi arasında karşılaştırılmalar yapılacak ve gerçekleştirilecek uygulama için uygun topoloji seçilecektir. Bu karşılaştırma literatürde 75 kW, 300 V çıkış verebilen dönüştürücüler üzerinden yapılmıştır [9]. Karşılaştırma yapılırken kaskad çift yönlü dc-dc dönüştürücü için yarım köprü dönüştürücü temel alınmış olup iki dönüştürücü aynı topolojiyi ifade etmektedirler. Karşılaştırma için bütün dönüştürücülerin 75 kW maximum çıkış gücünde çalıştığı ve 300 Vdc sabit çıkış gerilimi ile 250 A çıkış akımına sahip olduğu düşünülmüştür.

Dönüştürücüler PWM sinyalleri doluluk oranları açısından karşılaştırıldıklarında Cuk ve SEPIC/Luo dönüştürücülerinin çıkıştan girişe güç aktarılırken (geri yön) aynı çıkış gerilimi – giriş gerilimi oranı (V_c/V_g) için yarım köprü dönüştürücüden daha az doluluk oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Girişten çıkışa güç aktarılırken ise (ileri yön) aynı V_c/V_g oranı için Cuk ve SEPIC/Luo dönüştürücülerin yarım köprü dönüştürücüden daha fazla doluluk oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Doluluk oranının daha fazla olması ise dönüştürücüde daha yüksek dalgalanmalara ve daha yüksek ortalama akımlara neden olmaktadır.

Dönüştürücülerin tasarımı sırasında belirlenen maksimum akım dalgalılığı için bütün dönüştürücü endüktanslarının ihtiyaç duyduğu enerji taşıma kapasitesi benzerdir. Bu kapasiteyi sağlamak için yarım köprü dönüştürücünün endüktansından geçen maksimum akım miktarı Cuk ve SEPIC/Luo dönüştürücülerin L_1 endüktansından geçen akımdan (540 A-527 A) biraz daha fazla olmaktadır [9].

Cuk ve SEPIC/Luo dönüştürücülerin L_2 endüktanslarından geçen ortalama akım çıkış akım değerine yakın olup, neredeyse sabit olmaktadır. Bu sebeple endüktansın iletim kayıpları da sabit olacaktır. Cuk ve SEPIC/Luo dönüştürücülerin L_1 endüktansları ile yarım köprü dönüştürücünün endüktasından geçen ortalama akım ise çıkış gerilimi – giriş gerilimi oranının (V_c/V_g) uç değerlerinde çıkış akımının iki katına kadar (500A)

yükselmektedir. Bu durumda aynı endüktans değerine ve enerji taşıma kapasitesi gereksinimine sahip L_1 ve L_2 endüktanslarından L_1 'in iletim kayıpları L_2 'den daha fazla olmaktadır. Bu sebeple L_1 endüktansında ısı dağıtımı L_2 'ye göre daha kritiktir. Bu durum Cuk ve SEPIC/Luo dönüştürücülerin verimlerini olumsuz olarak etkilemektedir. Ayrıca Cuk ve SEPIC/Luo dönüştürücüler, yarım köprü dönüştürücüdeki bir endüktans yerine yarım köprüdeki endüktansın iki katı büyüklüğünde iki endüktans gerektirmektedirler.

Cuk ve SEPIC/Luo dönüştürücülere ait anahtarlama elemanları ve diyotlar yarım köprü dönüştürücüdekilere göre daha yüksek akımlara maruz kalmaktadır (900 A-600 A). Bu sebeple Cuk ve SEPIC/Luo dönüştürücüler yarım köprü dönüştürücülere göre daha yüksek kapasiteli aktif elemanlara ihtiyaç duymaktadırlar. Ayrıca Cuk ve SEPIC/Luo dönüştürücülerdeki aktif elemanların ortalama akımları da yarım köprü dönüştürücülerden daha yüksektir. Bu sebeple yarım köprü dönüştürücülerin iletim kayıpları daha düşük olup, bu dönüştürücülere ilişkin soğutma problemleri de daha azdır. Bundan dolayı yarım köprü dönüştürücülerin verimleri Cuk ve SEPIC/Luo dönüştürücülere göre daha yüksek olmaktadır [9].

Sonuç olarak, yarım köprü dönüştürücülerin Cuk ve SEPIC/Luo dönüştürücülere karşı avantajları şöyle özetlenebilir:

- Yarım köprü dönüştürücüler, Cuk ve SEPIC/Luo dönüştürücülerdeki iki endüktans yerine bir endüktans gerektirirler.
- Bu tek endüktansın boyutu da Cuk ve SEPIC/Luo dönüştürücülerdekinin yarısı kadardır.
- Dönüştürücü aktif elemanları açısından, yarım köprü dönüştürücü 25 kW güç için 600 A, 300 V'lık aktif elemanlar gerektirirken, Cuk ve SEPIC/Luo dönüştürücüler 900 A, 600 V'luk elemanlar gerektirirler.
- Yarım köprü dönüştürücüler daha düşük iletim ve anahtarlama kayıpları sayesinde potansiyel olarak daha yüksek verimlere sahiptirler.

Yarım köprü dönüştürücülerin temel dezavantajları ise yükseltici modda çalışmaları sırasında çıkış akımlarının süreksizliğidir. Bu durum çıkış kapasitesinin boyutlarını artırmaktadır [9].

Cuk dönüştürücülerin temel avantajları hem kaynak hem de yük tarafında bulunan endüktanslar sayesinde düşük giriş ve çıkış akımı dalgalanmalarıdır. Bu durum Cuk dönüştürücülerini örneğin yakıt hücresi uygulamaları için iyi bir aday yapmaktadır. Bu dönüştürücülerin temel dezavantajları ise büyük endüktans ve transfer kapasitesi değerleridir.

SEPIC/Lou dönüştürücünün temel avantajı düşük transfer kapasitesi değeri olup, temel dezavantajları ise iki adet büyük endüktans gerektirmeleri, çıkış akımlarının süreksiz ve çıkış kapasitelerinin büyük olmasıdır.

Verim ve maliyet açısından oldukça avantajlı olan yarım-köprü dönüştürücü, bu özelliklerine ilave olarak basit topolojiye ve kontrol kolaylığına da sahiptir. Ancak yarım köprü dönüştürücüler yapıları nedeniyle güç akışının ileri yönüne sadece yükseltici modda ve güç akışının geri yönüne sadece düşürücü modda çalışabilirler. Bu durum yarım köprü dönüştürücülerini, dönüştürücü çıkış geriliminin giriş kaynak gerilimine eşit veya daha büyük olduğu durumlarda çalışabilecek şekilde kısıtlar.

Bir elektrikli taşıtın frenleme anında hızı düşüktüğü, generatör olarak çalışan elektrik motorunun ürettiği gerilim değerinde de azalma olacaktır. Bu gerilim değeri enerji depolama ünitelerinin gerilim seviyesinin altına düştüğünde, güç dönüştürme sisteminin frenleme enerjisi kazanmaya devam edebilmesi için frenleme yönünde yükseltici olarak çalışması gerekmektedir. Ancak yarım köprü dönüştürücüler geri yönde yükseltici çalışmadığı için, elektrikli taşıtın düşük hızlarına bağlı olarak bara geriliminin enerji depolama ünitesinin gerilim seviyesinin altına inmesi durumunda, faydalı frenleme enerjisinin kazanılması mümkün olmayacaktır.

Bu problemin çözümü için, yapıları sayesinde geri yönde de yükseltici modda çalışabilen ve bu sayede hem frenleme anında kaybolan enerjinin geri kazanımını sağlayan, hem de yarım-köprü dönüştürücü topolojisinin avantajlarını taşıyan kaskad bağlı çift yönlü dc-dc dönüştürücünün kullanımının uygun olacağı öngörülmüştür. Bir

sonraki bölümde bu topoloji kullanılarak tasarlanan dönüştürücü kullanılarak araç üzerinde yapılan testler ve sonuçları yer almaktadır.

PROTOTİP ARAÇ TESTLERİ

Günümüzde elektrikli taşıtlar ile ilgili sürdürülen çalışmalarda menzil ve performans artırımı, üzerinde en fazla yoğunlaşılan alanlardır. Elektrikli taşıtlarda ana kaynak olarak öne çıkan (lityum-iyon) bataryalar menzili belirleyen ana etkindir. Mevcut batarya teknolojisi ile bir taşıtın menzilini artırmak için, taşıtın sahip olduğu batarya sisteminin kapasitesinin (batarya hücre sayısının) arttırılması gerekmektedir. Bu da beraberinde taşıt maliyetinde artış meydana getirmektedir. Elektrikli taşıtlarda en önemli maliyet bileşeninin bataryalara ait olduğu düşünüldüğünde, taşıtın toplam maliyetindeki artış da kayda değer bir seviyede olacaktır. Elektrikli taşıtların menzilini arttırmanın diğer bir yöntemi de daha gelişmiş bir batarya teknolojisinin kullanılmasıdır ki, bu da tamamen batarya üreticilerinin yaptığı Ar-Ge çalışmalarına bağlıdır. Bu Ar-Ge çalışmalarının neticesinde çok iyi sonuçlar elde edileceğine dair bugün için kesin bir öngöründe bulunmak da pek mümkün değildir.

Elektrikli taşıtlara yönelik yapılan çalışmalardan biri de performans arttırılmasına yönelik çalışmalardır. Ana kaynak olarak batarya kullanılan elektrikli taşıtlarda performansı kısıtlayan en önemli bileşen yine bataryadır. Kullanılan batarya sisteminin güç yoğunluğu performansı önemli oranda etkilemektedir. Taşıtın hızlanma ve faydalı frenleme ile yavaşlama anlarında batarya sisteminden alınan veya verilen gücün azami seviyesi ve dolayısı ile taşıtın performansı doğrudan batarya sisteminin güç yoğunluğuna bağlıdır. Bataryanın güç yoğunluğunun düşük olması sadece performansı değil verimi de önemli oranda etkilemektedir.

Bilindiği üzere bataryalar yüksek akımlar (güçler) ile şarj-deşarj edildiklerinde önemli oranda kayıplar oluşmakta, bu da bataryaların gereğinden fazla ısınmalarına neden

olmaktadır. Bataryanın maruz kaldığı bu durum neticesinde ömründe da azalma meydana gelmektedir.

Bataryalar sahip oldukları özellikleri nedeni ile bugün tam elektrikli taşıtlarda ana kaynak olarak tercih edilmektedir. Ancak yukarıda da belirtildiği gibi birçok da kısıtlayıcı yönleri bulunmaktadır. Batarya üreticileri yeni teknolojiler ile bu sorunları çözmeye çalışırken, diğer araştırmacılar da mevcut sistemin verimini arttırmaya yönelik çalışmalar gerçekleştirmektedir. Bu tez çalışmasında da bataryalı elektrikli taşıtların verim ve performansını arttırmaya yönelik olarak bir prototip taşıt üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır.

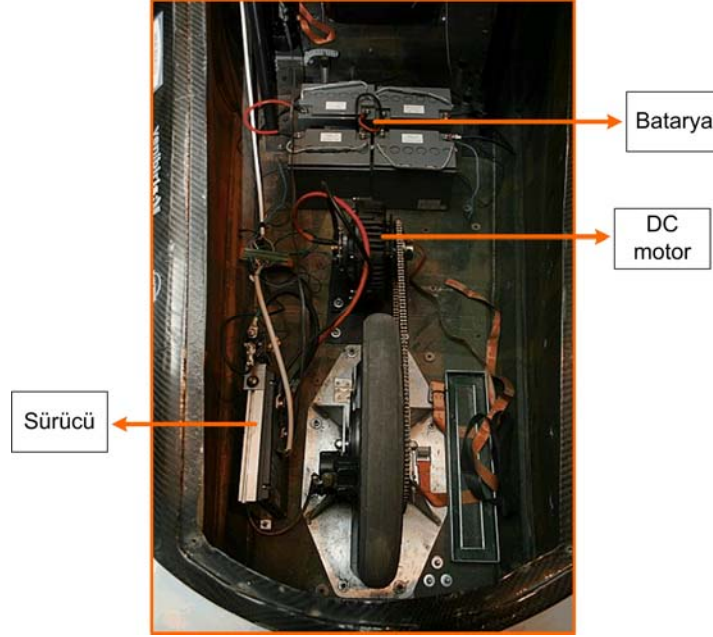
5.1 Test Aracı ve Deneysel Kurulum

Bu çalışmada ana güç kaynağı olarak bataryanın kullanıldığı bir prototip elektrikli taşıta, üstün yanları daha önceki kısımlarda detaylıca anlatılan ultrakapasitör eklenmiştir. Farklı gerilim seviyelerine ve özellikle de farklı eşdeğer seri iç direnç değerlerine sahip olan batarya ve ultrakapasitörleri doğrudan bağlamak pek güvenli olmamaktadır. Bu nedenle bir güç dönüştürücüsü aracılığıyla batarya ve ultrakapasitörün bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Bir önceki bölümde, elektrikli taşıt uygulamaları için uygun olan bu güç dönüştürücü topolojisi detaylıca anlatılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan prototip taşıt Şekil 5.1'deki gibidir.



Şekil 5. 1 Prototip taşıtın genel görünümü

Kullanılan prototip araç, özel alaşım bir gövde ve karbon fiber kabuğa sahip özel tasarım bir uygulamaya sahiptir. Taşıt arkadan itiş sistemine sahip olup, taşıtın tahrik sistemi için 7kW'lık bir DC motor ve dört bölge çalışabilen sürücü kullanılmıştır. Şekil 5.2'de görüldüğü üzere tahrik sistemi bir zincir ile taşıtın arkasında yer alan tek tekerleğe bağlanmıştır.

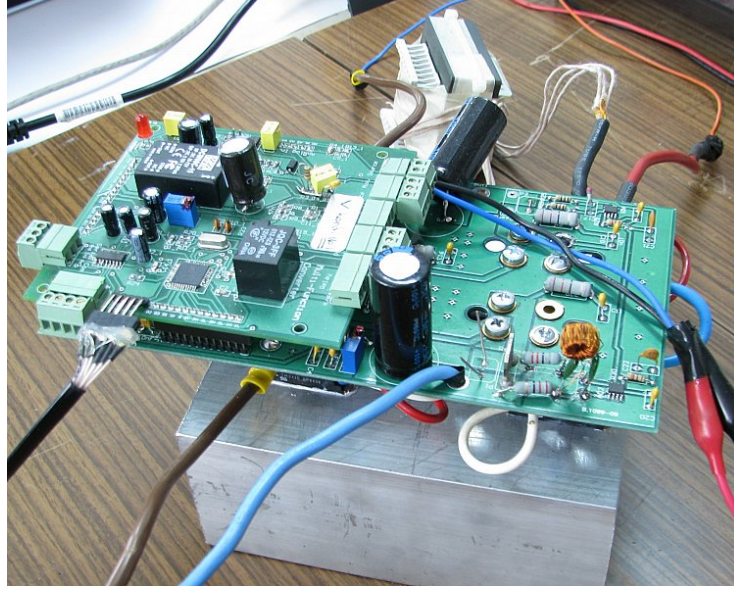


Şekil 5. 2 Prototip taşıtın tahrik sistemi

Taşıtta sürücünün bulunduğu ön kısımda ise direksiyon ile gaz ve fren (mekanik fren için) pedalları bulunmaktadır. Ayrıca, DC motor sürücüsü dört bölge çalışabildiğinden taşıtın ileri geri hareketini seçebilmek ve faydalı frenleme yapabilmek amacıyla taşıtın ön kısmında el ile kontrol edilebilen kumanda kolları mevcuttur.

Tez çalışmasında kullanılan prototip taşıt, daha önce birçok farklı yerde kullanıldığından ve uzun süre atıl bir durumda kaldığından, testlere başlamadan önce taşıtın tüm elektriksel ve mekaniksel kısımları kontrol edilerek, görülen bütün eksiklikler ve arızalar giderilmiştir.

Taşıtın kontrolleri tamamlandıktan sonra denemelerde kullanılacak olan batarya ve ultrakapasitör seçimleri yapılmış ve temin edilerek araç içerisine yerleştirilmiştir. Ardından batarya ve ultrakapasitörün birlikte kullanılması için gerekli olan güç dönüştürücünün (Şekil 5.3) tasarımı ve yapımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. 3 Güç dönüştürücü ünitesi

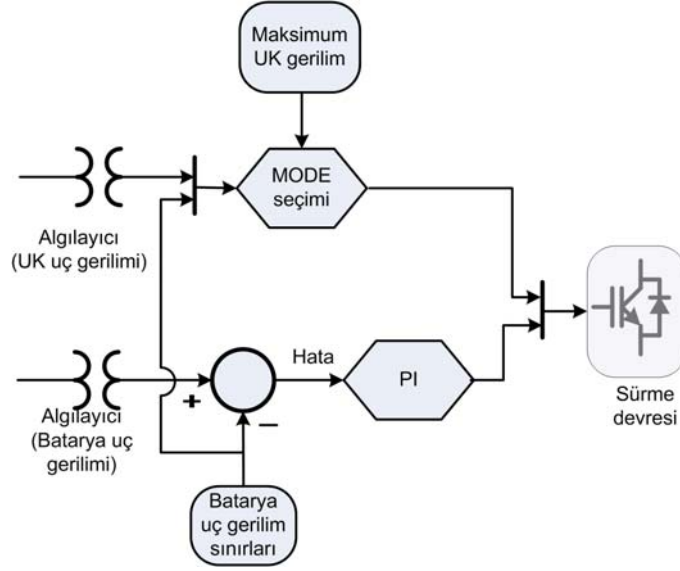
Taşıtın verimini ve batarya ömrünü arttırmaya yönelik olarak ultrakapasitör ile birlikte kullanılması öngörülen güç dönüştürücü ünitesi yük paylaşımı gerçekleştirebilecek şekilde tasarlanmıştır. Güç dönüştürücünün nominal gücü ilerleyen kısımda bahsedilecek olan batarya testleri ile 5 kW olarak belirlenmiş ve devre elemanları bu değere göre seçilmiştir. Dönüştürücüye ait elektriksel parametreler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5. 1 Güç dönüştürücü elektriksel özellikleri

Giriş gerilimi	0-45 V
Çıkış gerilimi	0-48 V
Akım	0-100 A
Nominal güç	5 kW

Taşıt üzerinde batarya ve ultrakapasitör arasında güç paylaşımı yapabilmek için tasarlanan dönüştürücünün kontrolü, giriş ve çıkış gerilimleri ile referans değerler karşılaştırılarak PI kontrolör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dönüştürücünün güç paylaşımına yönelik kontrolünde akımın referans alınması daha iyi sonuç verebilme potansiyeline sahip olmasına rağmen, (özellikle güç elemanlarının anahtarlamalarından

kaynaklanan) elektromagnetik bozucu etkiler nedeni ile akım işaretini doğru okumak oldukça zordur. Bu da kontrolü zorlaştırmakta ve dönüştürücünün istenen başarıyı göstermesini engellemektedir. Akım kontrolünün bu zorluğu nedeni ile blok şeması Şekil 5.4’de verilen gerilim referanslı kontrol yöntemi tercih edilmiştir.



Şekil 5. 4 Güç dönüştürücünün kontrol algoritması

Gerilim kontrolünde ise ultrakapasitörün maksimum gerilimi ile batarya uç geriliminin alt ve üst sınırları dikkate alınmıştır. Ultrakapasitörün maksimum gerilim seviyesi dikkate alınarak faydalı frenlemeler ile ultrakapasitörün aşırı şarj olması engellenmiştir. Batarya uç gerilimlerdeki alt ve üst sınırlar ise üretici verileri dikkate alınarak, bataryanın güvenli çalışma aralığı olarak belirlenmiştir. Batarya uç gerilim sınırlarını belirlemesine yönelik, sadece batarya kullanılarak taşıt ile gerçekleştirilen testlerden elde edilen sonuçlardan da yararlanılmıştır.

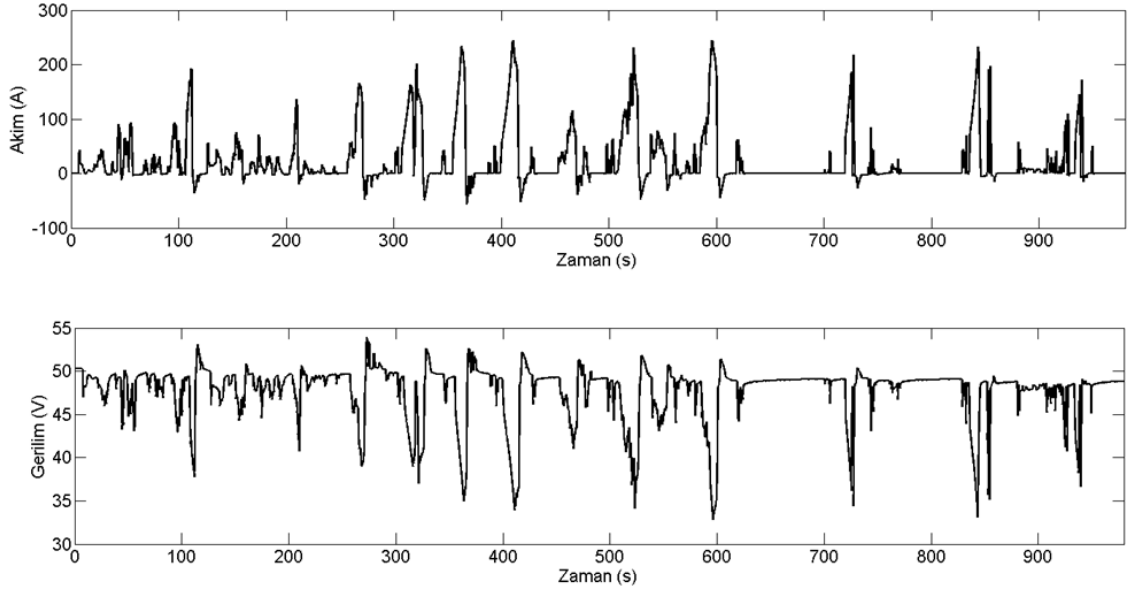
Güç dönüştürücüsünün tasarımı ve araç üzerine montajının ardından aracın son hali Şekil 5.5’de görülmektedir. Çizelge 5.2’de ise araç üzerinde bulunan testler sırasında kullanılan elemanların listesi verilmiştir.

Çizelge 5. 2 Araç ve elemanların özellikleri

Şasi	Monokok karbon fiber
Araç Ağırlığı	160 kg (Toplam)
Elektrik Motoru	PMG 132 Sabit Mıknatıslı DC Motor
Motor Gücü	7kW
Batarya	12V 33Ah VRLA Batarya (4 adet)
Ultrakapasitör	Maxwell BMOD0165 165F 48V
DC-DC Dönüştürücü	5kW Kaskad Çift Yönlü DC-DC Dönüştürücü



Şekil 5. 5 Hibrit sistem elemanlarının yerleşimi

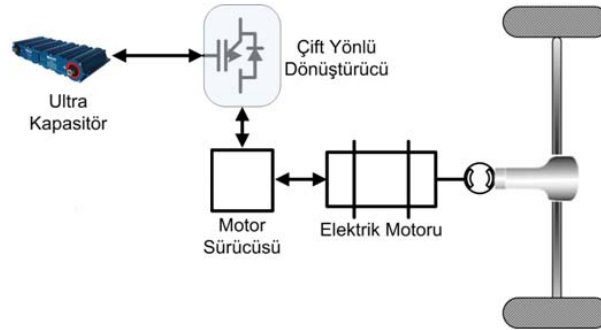


Şekil 5. 7 Batarya testi akım gerilim grafikleri

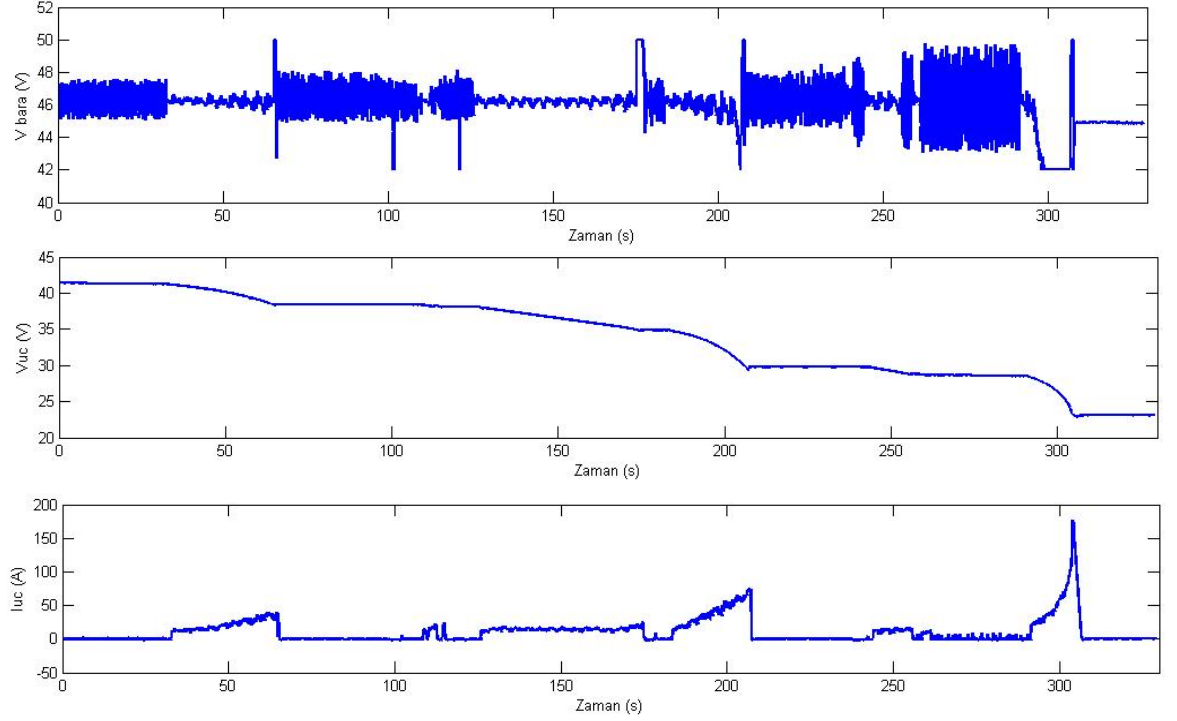
Bu değerler incelendiğinde iyi bir performans için bataryalardan ne kadar yüksek akımlar çekildiği de gözlemlenmiştir. Bu durumun ise, bataryaları olumsuz etkilediği ve batarya ömrünü kısalttığı bilinmektedir. Bu sebeple bu tez çalışmasında, batarya ve ultrakapasitörün motoru beraber beslediği bir hibrit sistemin kullanılması daha uygun görülmüştür.

5.2.2 Ultrakapasitör Testleri

Hibrit sistemin uygulanmasına geçiş öncesi tasarlanan dc-dc dönüştürücünün işlevini daha iyi gözlemek amacıyla taşıt, sadece dönüştürücü üzerinden ultrakapasitör ile beslenmiştir. Şekil 5.8’de buna ilişkin bağlantı şeması görülmektedir.

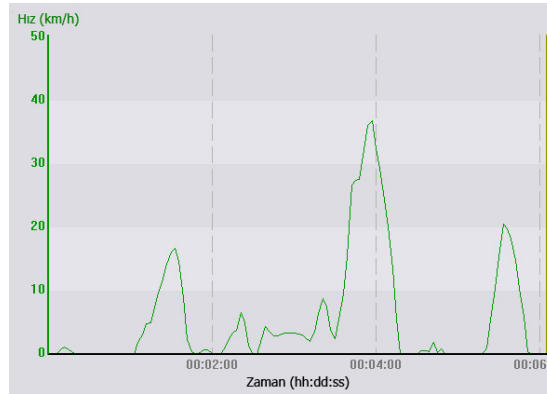


Şekil 5. 8 Motorun ultrakapasitör ile beslenmesi



Şekil 5. 9 Ultrakapasitör testi akım gerilim grafikleri

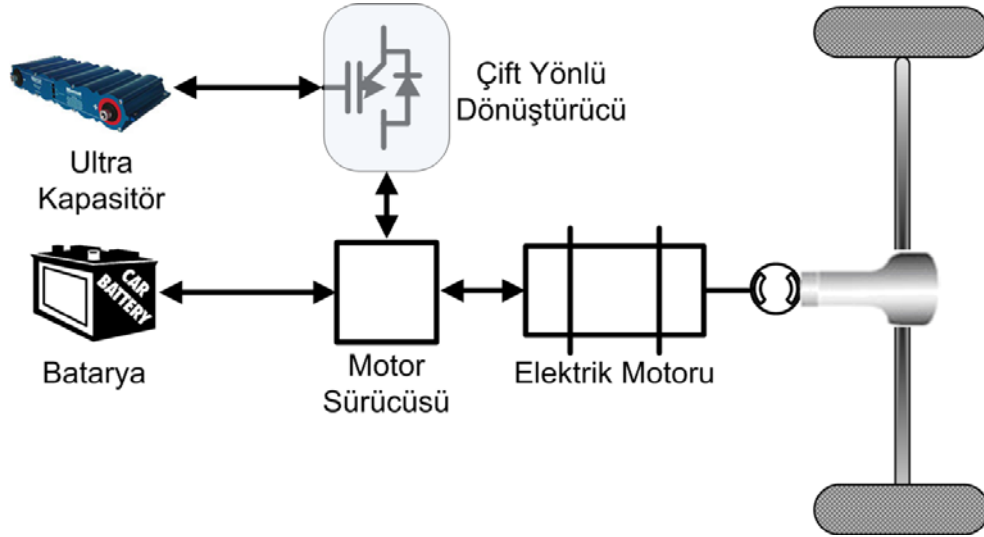
Motorun maksimum güç talebi dc-dc dönüştürücünün maksimum gücünden düşük olduğu için, taşıtın ultrakapasitör ile testi sırasında motorun çekeceği maksimum akım motor sürücüsü üzerinden sınırlandırılmıştır. Şekil 5.9’da bu teste ilişkin akım ve gerilim değerlerinin değişimi görülmektedir. Bara geriliminin değişimini veren eğride görüldüğü gibi tasarlanan kontrol algoritması ile dönüştürücü çıkış (bara) gerilimini verilen sınırlar (42-50 V) arasında başarı ile tutmaktadır. Şekil 5.10’da ise bu test sırasındaki taşıt hız değişim grafiği görülmektedir.



Şekil 5. 10 Ultrakapasitör testi taşıt hız değişimi

5.2.3 Hibrit Sistem Testleri

Prototip araçtan istenen performansın sağlanması durumunda bataryadan çekilen yüksek akımları sınırlamak amacıyla Şekil 5.11’de görülen topoloji uygulanmıştır. Bu topoloji de diğer topolojiler gibi Şekil 5.13’de verilen sürüş güzergahında test edilmiştir.

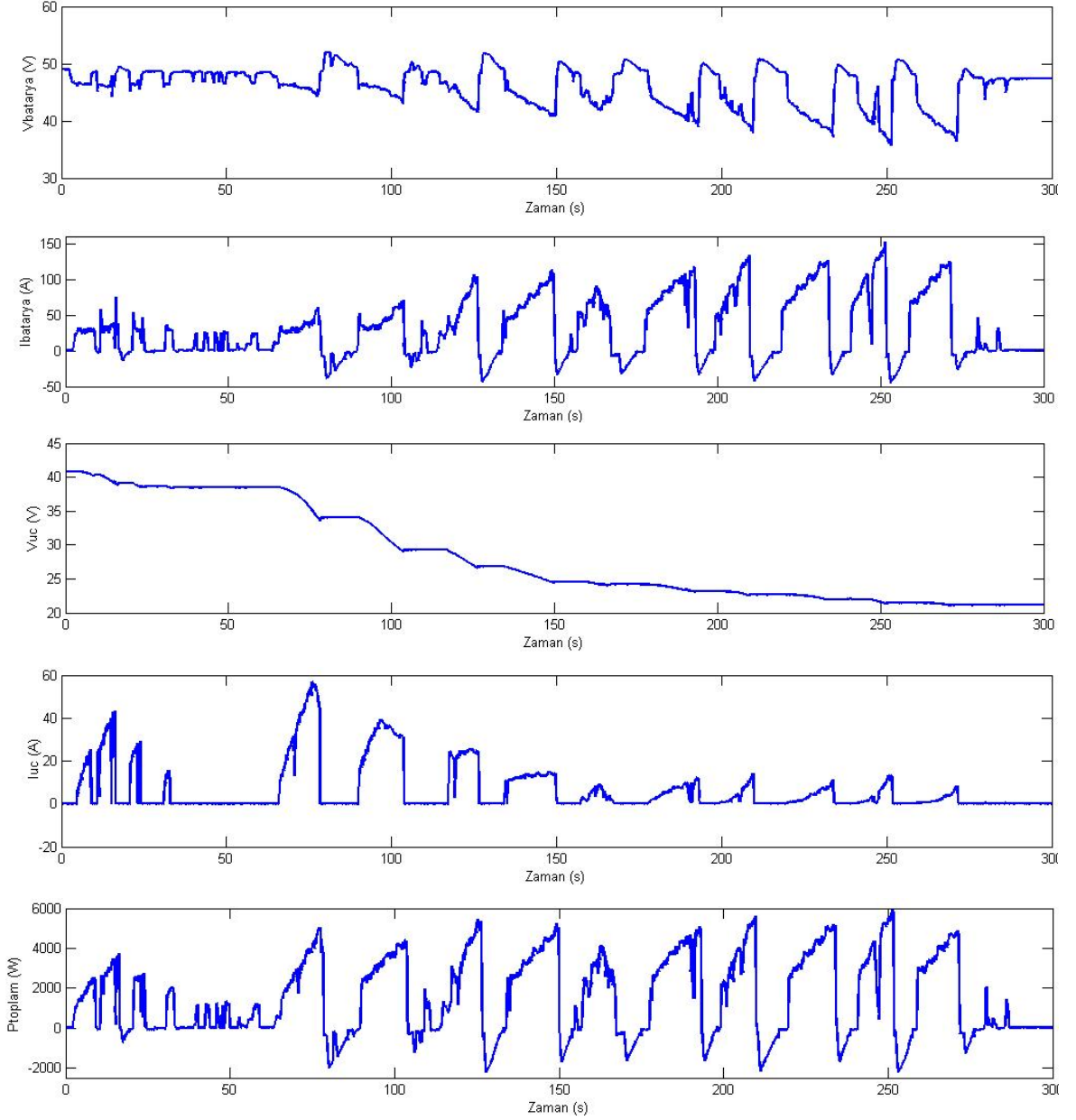


Şekil 5. 11 Motorun batarya ve ultrakapasitör ile beraber beslenmesi

Bu topolojide güç dönüştürücüsü şu prensiple çalışmaktadır: Motor sürücüsüne doğrudan bağlı olan ve bara gerilimini belirleyen batarya gerilimi sürekli izlenmekte ve batarya geriliminin belirli bir bant dışına çıkması durumunda güç dönüştürücüsü devreye girmektedir. Bu durum iki şekilde oluşmaktadır. Birincisi batarya geriliminin belirlenen seviyenin altına düştüğü durumdur. Bahsi geçen durum motorun yüksek güç talep ettiği anlarda batarya geriliminin düşmesiyle meydana gelmektedir. Bu durumda güç dönüştürücüsü devreye girerek ultrakapasitörden dc baraya güç akışı sağlamakta ve bu sayede bara gerilimini istenilen alt seviyede tutmaya çalışmaktadır. İkinci durum ise, aracın faydalı frenleme yapması sırasında batarya geriliminin yükselmesiyle geriliminin belirlenen seviyenin üstüne çıktığı durumdur. Bu durumda güç dönüştürücüsü yine devreye girip, dc baradan ultrakapasitöre doğru güç aktarımı sağlayarak bara gerilimini belirlenen üst seviyeyi aşmasına engel olmaya çalışmaktadır.

Şekil 5.7’deki batarya testleri sonuçlarından ideal gerilim aralığının (alt ve üst limit) değerlerini tespit etmek mümkündür. Bataryanın motora sağlayabileceği maksimum

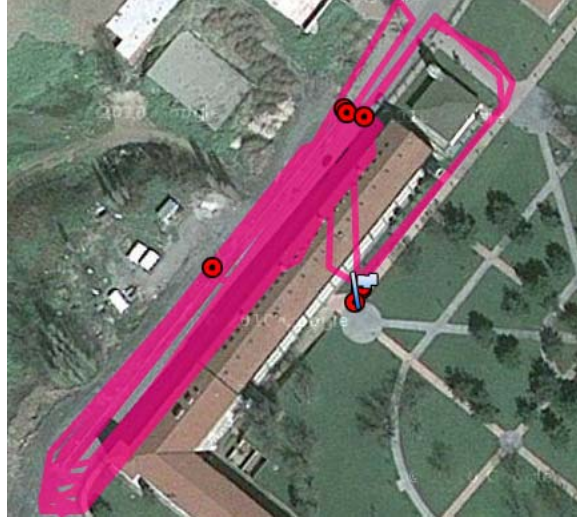
akım olarak bataryalar için üreticinin önerdiği 75 A belirlendiğinde, bu bandın alt değerinin, batarya geriliminin 75 A çekildiğinde düştüğü değer olan 42 V olduğu belirlenmiştir. Gerilim aralığının üst değerinin ise, faydalı frenleme anındaki gerilim yükselmeleri incelenerek 52 V olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5. 12 Hibrit sistem testi akım gerilim grafikleri

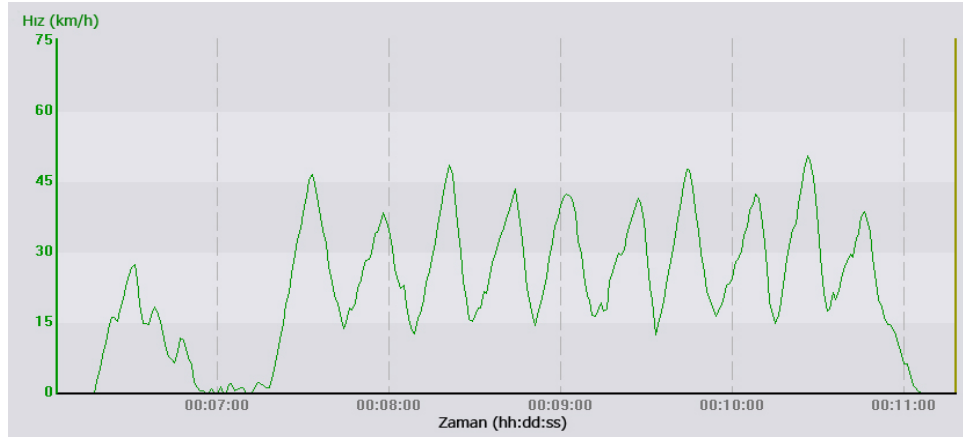
Yapılan gerilim bandı hesaplamalarına göre dönüştürücü kontrolör yazılımında gerekli ayarlamalar yapılarak hibrit sistem testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.12’da hibrit

sistem testine ilişkin akım ve gerilim değerleri görülmektedir. Şekil 5.14’da ise bu test sırasındaki taşıt hız değişim grafiği görülmektedir.



Şekil 5. 13 Hibrit sistem testi sürüş güzergahı

Test sonuçlarına bakıldığında sistemin beklendiği gibi çalıştığı açıkça gözükmemektedir. Saatte 55 km/h hıza ulaşan prototip araç maksimum 6kW’a kadar güçler talep etmektedir. Buna karşılık bataryadan çekilen akımlar sadece batarya ile çalışma sırasında çekilen akımlarla karşılaştırıldığında azalmıştır. Batarya gerilimi de incelendiğinde hibrit sistemde batarya (bara) geriliminin küçük sapmalar haricinde istenen aralıkta tutulduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 5. 14 Hibrit sistem testi taşıt hız değişim grafiği

Prototip araç testlerinin yapıldığı güzergâhın yapısının düz olması nedeniyle, faydalı frenlemelerde çok fazla enerji geri kazanma imkanı olmamaktadır. Hibrit test sırasında

faydalı frenlemelerde motor sürücüsü tarafından geri yönde aktarılan enerji çok fazla olmadığından batarya gerilimini belirlenen bandın üstüne çıkaramamıştır. Bu nedenle, hibrit sistem testleri sırasında yapılan frenlemelerde, dönüştürücü devreye girmemiş ve bu şekilde frenleme enerjisi bataryalarda depolanmıştır. Ayrıca ultrakapasitör gerilimi azaldıkça ultrakapasitör tarafından sağlanabilen güç azalmış ve test sonuna yaklaşıldıkça bataryalardan daha fazla akım çekilmiştir.

Sistem genel performansına bakıldığında bataryalardan çekilen maksimum akımlar azalmıştır. Bu sayede, bataryanın elektrokimyasal yapısına zarar verebilecek düzeyde akımlar çekilmeksizin araçta aynı performans sağlanabilmektedir. Diğer bir açıdan bakıldığında, araç üzerinde daha fazla batarya kullanımına gerek kalmaksızın aynı performans elde edilebilmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Modern uygarlığın en temel ihtiyaçlarından biri olan ulaşım, tekerleğin bulunmasından beri insanoğlunun her geçen gün daha fazla geliştirmek için çalıştığı alanlardan biridir. İçten yanmalı motorların bulunmasından beri petrolün kullanıldığı bu sektörde, petrol rezervlerinin azalması ve petrole bağlı çevresel felaketlerin artması insanları yeni alternatif enerji arayışlarına itmektedir. Alternatif taşıt teknolojisi geliştirmeye yönelik çalışmalarda ise düşük emisyon oranları ve yüksek verim gibi üstün yanları ile elektrikli taşıtlar öne çıkmaktadır. Ancak elektrikli taşıtlarda, yüksek maliyet ve menzil problemi başta olmak üzere çözüm ve iyileştirme bekleyen eksiklikler bulunmaktadır. Bu problemlerin çoğunluğu elektrikli araçlarda ana güç kaynağı olarak kullanılan bataryaların düşük kapasiteleri ve yüksek maliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, batarya sisteminin, ultrakapasitör gibi uygun bir enerji depolama ünitesi ile hibrit kullanımı, toplam maliyeti düşürdüğü gibi taşıt performansını da önemli ölçüde attırmaktadır. Bu tez çalışmasında da elektrikli taşıtlarda ultrakapasitör ve bataryaların hibrit kullanımı bir enerji yönetim stratejisi ile prototip bir elektrikli araç üzerinde denenmiş ve buna ilişkin deneysel sonuçlar değerlendirilmiştir.

Tasarlanan hibrit enerji depolama sisteminde bataryalar temel güç talebini karşılamakta kullanılırken, dönüştürücü üzerinden sisteme bağlı olan ultrakapasitör sisteminden ise aşırı güç taleplerinin karşılanması amacıyla yararlanılmıştır.

Tasarlanan dönüştürücü testlerde prototip aracın güç ihtiyacını ultrakapasitör ile tek başına sağlayabilmiştir. Ayrıca dönüştürücü hibrit sistem testlerinde oldukça başarılı bir performans göstermiştir. Bunu yanı sıra uygulanan kontrol yöntemi sayesinde, batarya gerilim seviyesi istenen değerler arasında tutulabilmektedir. Bu şekilde, bataryadan

aşırı akımların çekilmesi dolaylı olarak engellenebilmektedir. Sonuç olarak batarya ömrü ve verimliliği, buna bağlı olarak da genel sistem performansı önemli bir oranda arttırılabilmektedir.

Elektrikli taşıt uygulamaları için batarya-ultrakapasitör hibrit enerji depolama sisteminin çok iyi bir potansiyele sahip olduğu literatürde belirtildiği gibi bu çalışmada da kanıtlanmıştır. Gelecek çalışmalarda hibrit enerji depolama sistemi farklı topolojiler ve farklı kontrol algoritmaları ile denenerek karşılaştırmalar yapılması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] School of Public and Environmental Affairs at Indiana University, (2011). Plug-in Electric Vehicles: A Practical Plan for Progress, Indiana.
- [2] J.D. Power and Associates, (2010). Drive Green 2020: More Hope than Reality?, New York.
- [3] Hurst, D. ve Wheelock, C., (2010). Battery Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles: OEM Strategies, Demand Drivers, Technology Issues, Key Industry Players, and Global Market Forecasts, Pike Research, New York.
- [4] Tırıs, M., (2003). Elektrikli Araçlar, TÜBİTAK-MAM Yayını, Kocaeli.
- [5] Larminie, J. ve Lowry, J., (2003). Electric Vehicle Technology Explained, John Wiley&Sons, West Sussex, England.
- [6] Erdiñ, O., (2008). Dalgacık Dönüşümü/Bulanık Mantık Tabanlı Enerji Yönetim Stratejisi Kullanılarak Yakıt Hücresi/Ultra-Kapasitörlü Hibrit Taşıt Sisteminin Modellenmesi ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] Gemici, S.S., (2006). Elektrikli Ulaşım Sistemlerinde Enerji Depolama Yöntemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] Atabay, M., (2006). Lityum-iyon Bataryaların Fotovoltaik Sistemlerde Uygulanabilirliğinin Diğer Batarya Tipleri ile Karşılaştırılmalı Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [9] Schupbach, R.M. ve Balda, J.C., (2003). "Comparing DC-DC Converters for Power Management in Hybrid Electric Vehicles", IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC'03., 1-4 June 2003, Wisconsin.
- [10] Halper, M.S., ve Ellenbogen, J.C., (2006). Supercapacitors : A Brief Overview, Mitre, Virginia.
- [11] Zorpette, G., (2005). "Winner: Super Charged", IEEE Spectrum, 42(1): 32-37.
- [12] Burke, A., (2000). "Ultracapacitors: why, how, and where is the technology", Journal of Power Sources, 91:37-50.
- [13] R. Jablonski, M. Turkowski, Recent Advances In Mechatronics, Springer, New York, 2007.

- [14] Maxwell Technologies, Top 10 Reasons for Using Ultracapacitors in Your System Designs, http://www.maxwell.com/pdf/uc/white-papers/top_10_reasons.pdf, 21 Haziran 2011.
- [15] Conte, F. V., (2006). "Battery and battery management for hybrid electric vehicles: a review", *Elektrotechnik & Informationstechnik*, 123(10):424-431.
- [16] Miller, J.R., (2004), Capacitor Energy Storage for Stationary Power Application, <http://www.battcon.com/PapersFinal2004/MillerPaper2004.pdf>, 21 Haziran 2011.
- [17] Electronic Design, Get The Lowdown On Ultracapacitors, <http://electronicdesign.com/Articles/Index.cfm?ArticleID=17465>, 21 Haziran 2011.
- [18] Conway, B.E., (1999). *Electrochemical Capacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*, Kluwer Academic/Plenum, New York.
- [19] Vural, B., (2010). *Elektrikli Taşıtlarda Enerji Yönetim Stratejilerinin, Güç Dönüştürücülerinin ve Bağlantı Topolojilerinin Performans ve Verimlilik Üzerine Etkileri*, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [20] Amjadi, Z. ve Williamson, S. S., (2010), "Power-Electronics-Based Solutions for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Energy Storage and Management Systems", *IEEE Trans Industrial Electronics*, 57(2):608-616.
- [21] Haze Batteries, EV GEL-Electric Vehicle Range, <http://www.hazebattery.com/evgel/default.htm>, 21 Haziran 2011.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Enes UGUR
Doğum Tarihi ve Yeri :05/11/1986 İstanbul
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :enesugur@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik Mühendisliği	İstanbul Teknik Üniversitesi	2008
Lise	Fen Bilimleri	Ordu Atatürk Lisesi	2003

YAYINLARI

Bildiri

1. B. Vural, M. Uzunoglu, S. Dusmez, **E. Ugur**, O. Erdinc , “Small Scale Test Bench Based Performance Analysis of a Fuel Cell/Ultra-capacitor Hybrid Vehicular Power System with an Improved Power Conditioning Unit”, in Proc. *2nd IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET’10)*, December 2010, Kandy, Sri Lanka
2. B. Vural, M. Uzunoglu, S. Dusmez, **E. Ugur**, B. Yagcitekin, “Elektrikli Taşıtlarda Yakıt Hücresi, Batarya ve Ultra-kapasitörün Farklı Bağlantı Topolojileri İçin Deneysel Bir Karşılaştırma”, *Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ELECO’ 2010*, Kasım 2010, Bursa.