



## Tam elektrikli araçlar için özgün bir enerji yönetim sistemi uygulaması

Türev Sarıkurt\*, Abdulkadir Balıkcı

Gebze Teknik Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü, 41400, Kocaeli, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- Elektrikli araçlarda kullanılmak üzere bir enerji yönetim sistemi tanıtılmıştır.
- Enerji yönetim sistemi için çift yönlü bir DC/DC dönüştürücü tasarlanmıştır.
- Önerilen enerji yönetim sistemi LTO ve NMC hücreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir

### Makale Bilgileri

Geliş: 11.02.2016  
Kabul: 26.04.2016

### DOI:

10.17341/gazimmfd.322153

### Anahtar Kelimeler:

Lityum-İyon bataryalar,  
elektrikli araçlar,  
tam elektrikli araçlar,  
batarya gerilim  
dengelenmesi,  
enerji yönetim sistemi

### ÖZET

Tam Elektrikli Araçlar (TEA) tüm gücünü elektriksel kaynaklardan alan elektrikli araçlardır. Fosil yakıt kullanılmaması sebebiyle en temiz ulaşım alternatifidir ve gelecekte daha da yaygınlaşması beklenmektedir. TEA'ların en belirgin dezavantajları menzillerinin kısa olması, yüksek performans istenen durumlarda yetersiz kalmaları ve batarya ömürlerinin kısaldığıdır. Bu çalışmada özgün bir batarya-batarya hibrit enerji sistemi tanıtılmaktadır. Sistem modülerlik ve uyumluluk esaslarına bağlı olarak hücre seviyesinde enerji yönetim stratejisine sahiptir. Ayrıca önerilen sistem ile aktif batarya gerilim dengelemesi de yapılmaktadır. Sistem basit bir kontrol şeması içeren yarı aktif hibridizasyon stratejisine sahiptir ve yol bilgisinden bağımsız olarak verimli bir enerji yönetimi sağlanmaktadır. Çalışmada sistem ve kontrol stratejisi detaylı olarak aktarılmıştır. Hem batarya dengeleme hem de enerji yönetimi özelliklerinin gösterilebilmesi için farklı senaryolar altında sistemin benzetimi yapılmıştır. Sistemin bataryaların çalışma süresini yaklaşık 2 kat uzattığı benzetim sonuçları ile desteklenmiş, enerji transferi esnasında sistemin verimliliğinin % 95'in üzerinde olduğu deneysel sonuçlar ile gösterilmiştir.

## A novel energy management system for full electric vehicles

### HIGHLIGHTS

- An energy management system for electric vehicles is proposed.
- A bidirectional DC/DC converter for the energy management system is introduced.
- The proposed energy management system is applied by using LTO and NMC cells.

### Article Info

Received: 11.02.2016  
Accepted: 26.04.2016

### DOI:

10.17341/gazimmfd.322153

### Keywords:

Lithium-Ion batteries,  
electric vehicles,  
full electric vehicles,  
battery voltage balancing,  
energy management system.

### ABSTRACT

A Battery Electric Vehicle (BEV) is a type of Electric Vehicle (EV) in which all power is derived from electrical sources. They are the cleanest transportation alternatives, and expected to spread. Main disadvantages of BEVs are short driving range, low performance in demanding conditions, and low battery lifetimes. In this paper a novel battery-battery hybrid system is proposed. The system has a cell-scale energy management strategy in order to maintain modularity and compatibility. Also the system has ability of active battery voltage balancing without any extra effort. System has a semi-active hybridization strategy with a simple control scheme. Furthermore system provides an efficient energy management, independent from route conditions. Both system and the control strategy are introduced in details. Simulations are performed with different scenarios in order to demonstrate both voltage balancing and energy management capabilities of the system. It is supported with simulations that the system extends the battery life almost two times and experimental results are also included. Efficiency of the system during energy transfer is over 95%.

\* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: turev@gtu.edu.tr / Tel: 0262 605 32 75

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrikli araçlar (EA), Hibrit elektrikli araçlar (HEA), Fişli hibrit elektrikli araçlar (FHEA) ve Tam elektrikli araçlar (TEA) olarak sınıflandırılabilir. HEA’larda elektrik motoru içten yanmalı bir motor ile birlikte kullanılmaktadır. FHEA’lar ise harici bir kaynak ile şarj edilebilen HEA’lardır. TEA’ların hareket mekanizması sadece elektrikli motorlardır ve hareket için gereken güç sadece elektriksel kaynaklar ile karşılanmaktadır. Günümüzde petrol nedenli küresel hava kirliliğindeki artış ve petrol rezervlerinin azalması alternatif ulaşım metodlarına ilginin armasına neden olmuştur [1]. Bu bağlamda en temiz ulaşım alternatifi olması beklenen TEA’ların en önemli dezavantajları tek bir şarjla kısa bir menzile sahip olmaları, düşük performansları ve bataryaların kullanım ömrünün kısalığıdır. Bu sorunları çözebilmek için en yaygın kullanılan yöntem EDLC (Electrochemical Double Layer Capacitor) olarak da adlandırılan süperkapasitörlerin [2] bataryalarla birlikte kullanılmasıdır [3]. Ancak süper kapasitörler bataryalarla karşılaştırıldığında daha düşük enerji yoğunluğuna, daha yüksek kendiliğinden boşalma oranına sahiptir ve gerilim dengesizliklerine daha açıktır [4]. Ticari olarak satılan, tekrar şarj edilebilen ikincil batarya türleri göz önünde bulundurulduğunda lityum-iyon bataryalar genelde diğer batarya türlerinden daha hafiftir [5]. Bunun bir sonucu olarak hacimsel enerji ve güç yoğunlukları daha yüksektir [6]. Ayrıca açık devre gerilimleri daha yüksek [7], kendiliğinden boşalma oranları ise daha düşüktür [8]. Hem elektrikli araç gibi büyük [9], hem de robotlar gibi küçük güçlerde uygulamaları bulunmaktadır [10]. Bu çalışmada batarya-süperkapasitör yerine batarya-batarya hibrit enerji sistemi önerilmiştir. Kullanılan bataryalardan biri yüksek güç yoğunluğuna sahip lityum-titanat (LTO) bir bataryadır. Bu bataryanın güç yoğunluğu 1675 W/kg, ömrü ise 16000 çevrimdir. Diğer batarya ise yüksek enerji yoğunluğuna sahip lityum-nikel-manganez-kobalt-oksit (NMC) bir bataryadır. Bu bataryanın enerji yoğunluğu 160 Wh/kg ve ömrü 1400 çevrimdir. Sistemin amacı LTO bataryanın performans gerektiren koşullarda çalıştırılması, NMC bataryanın ise belli bir akım limitini aşmadan LTO bataryayı desteklemesidir. Bu şekilde NMC batarya daha dengeli bir yük profiline maruz kaldığı için daha az çevrim geçirecek, bu sayede sistemin ömrü uzatılmış olacak. Ayrıca yük doğrudan LTO bataryaya bağlanılacak, bu şekilde sistemin genel performansı artırılmış olacaktır. EA’ların enerji yönetimi önemli bir sorundur. HEA’larda enerji yönetimi genellikle yakıt tasarrufu üzerine kuruludur. Bununla birlikte birçok çalışmada yol bilgisinin bilinmesi gerekmektedir. Yol bilgisine, dolayısıyla yük profili bilgisine sahip olmak şehir içi araç kullanımında mümkün değildir. Bunu aşabilmek amacıyla optimizasyon temelli (enerji [11], yakıt [12]) yöntemler, farklı kontrol [13] ve enerji yönetimi stratejileri [14] ve stokastik yaklaşımlar [15] tercih edilmektedir. Bu yöntemlerin işlem yükü çok fazladır ve bu yöntemlerin çalıştırıldığı sistemlerin ileri kontrol tekniklerine sahip olması gerekmektedir. TEA’larda yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu batarya-süperkapasitör hibritleri için gerçekleştirilmiştir ve bu çalışmalarda ana

amaç tek şarj ile kat edilebilen sürüş mesafesini uzatmak ve performansı arttırmak üzerinedir. Bu alandaki çalışmalar pasif, yarı aktif ve aktif enerji yönetim sistemleri olmak üzere üç başlık altında toplanabilir [16]. Pasif hibridizasyon, sürüş süresini [17] veya güç ve sistem ömrünü [18] arttırmak amacıyla süperkapasitör ve bataryaların birbirlerine ve yüke paralel bağlanması temeline dayanmaktadır [19]. Yarı aktif hibritler iki kaynağın gerilimlerinin birbirlerine göre ayarlanabilmesi için bir adet DC/DC gerilim dönüştürücü içerir. Yarı aktif hibrit başlığı altında üç farklı konfigürasyon bulunmaktadır. Batarya yarı aktif hibritlerde batarya ve süperkapasitör kaskat bağlıdır [20]. DC/DC dönüştürücü batarya ve yük arasında bulunmaktadır [21]. Bu konfigürasyonun amacı bataryadan çekilen akımın kontrol edilmesidir [22]. Kapasitör yarı aktif hibritlerde DC/DC dönüştürücü süperkapasitör enerjisinin kullanımını iyileştirmek amacıyla [23] süperkapasitör ile yük arasına yerleştirilmiştir [24]. Üçüncü topoloji bazı kaynaklarda paralel, bazılarında ise yük yarı aktif hibridizasyonu olarak adlandırılmaktadır. Bu topolojide batarya ve süperkapasitör paralel bağlanmıştır. DC/DC dönüştürücü bu paralel blok ile yük arasındadır. Bu yapı yüksek gerilim ihtiyacının sınırlı kaynaklarla karşılanmasına olanak tanımaktadır [25]. Aktif hibrit topolojilerde her kaynağa bir DC/DC dönüştürücü bağlıdır ve seri veya paralel aktif olarak kategorize edilebilir. Seri aktif hibrit topolojisi yarı aktif hibrit topolojilerindeki boştaki kaynağa da bir DC/DC dönüştürücü ekleyerek elde edilir [26]. Paralel aktif hibridizasyonda ise her iki kaynak ve yük birbirine paralel olmakla birlikte her birinin arasında DC/DC dönüştürücü bulunmaktadır [27]. Tüm bu çalışmalar batarya-süperkapasitör hibridizasyonu için geçerlidir. Daha önce batarya-batarya hibridizasyonu için yaptığımız bir pasif hibridizasyon çalışması bulunmaktadır [28]. Bu çalışma batarya-batarya hibridizasyonu konusunda yapılmış tek çalışmadır.

Bu çalışma LTO-NMC bataryaların pasif hibridizasyonu için yüksek değerli bir Choke bobini kullanma gerekliliğini göstermiştir. Önerilen sistem modülerlik ve uyumluluk esaslarına bağlı olarak hücre seviyesinde enerji yönetim stratejisine sahiptir. Basit bir kontrol şeması içeren yarı-aktif bir batarya-batarya hibridizasyon stratejisi kullanılmaktadır. Sistemin kontrol şeması farklı operasyon modlarında değişmemektedir. Dolayısıyla sistem herhangi bir yol bilgisi gerektirmeden ve yol durumundan bağımsız olarak aynı basit kontrol stratejisi ile çalışmaktadır. Bu basitlik ve bağımsızlık literatürdeki enerji yönetim sistemleri ile karşılaştırıldığında sistemin en önemli iki avantajıdır. Ayrıca benzetim sonuçlarıyla desteklendiği üzere sistem herhangi bir ekstra çaba gerektirmeden batarya gerilimlerinin dengelenmesini de sağlamaktadır. Sistemin boşta çalışma modunda enerji transferindeki verimliliği % 95’in üzerindedir.

## 2. ÖNERİLEN SİSTEM (PROPOSED SYSTEM)

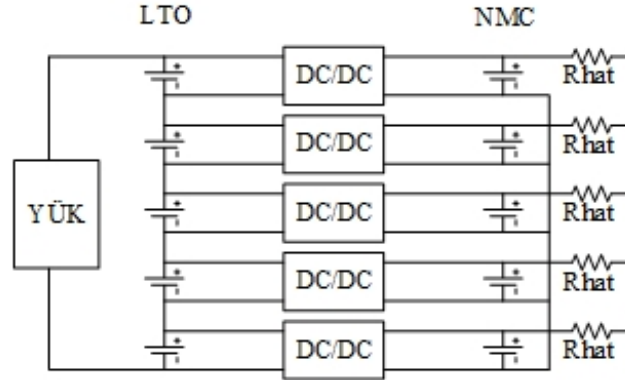
Önerilen sistem iki farklı batarya tipinin kullanıldığı bir batarya-batarya hibrit sistemidir. Çalışmada kullanılan

bataryaların özellikleri Tablo 1'de listelenmiştir: Önerilen sistemin her bir seviyesinde bir LTO batarya bir DC/DC dönüştürücü ve bir NMC batarya bulunmaktadır. Önerilen sistemin 5 seviyeli durumu için devre şeması 1'de gösterilmektedir. Şekil 1'de görüldüğü üzere LTO bataryalar birbirlerine seri bağlıdır ve bu paket doğrudan yüke bağlıdır.

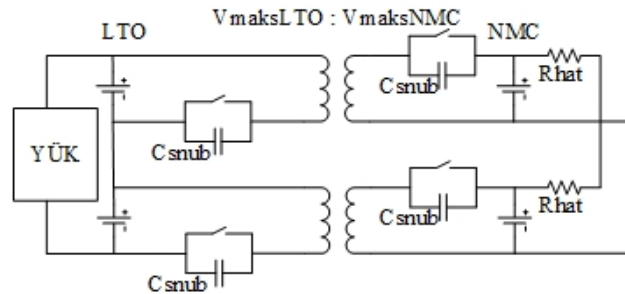
NMC bataryalar ise dönüştürücünün diğer tarafında bulunmaktadır. NMC bataryaların katotları doğrudan birbirlerine bağlıken anotları bir direnç üzerinden birbirlerine bağlıdır. Bataryaların anotları ve dirençlerle oluşan bu yapı paylaşım hattı, dirençler ise hat dirençleri olarak adlandırılmaktadır [29]. Bataryaların gerilim

**Tablo 1.** Çalışmada kullanılan bataryaların özellikleri (Specifications of the batteries)

Parametre	Batarya Modeli	
Model	(Kokam SLPB55205130H)	(Altairnano 13 Ah)
Yapı	$LiNiMnCO_4$ (NMC)	$Li_4Ti_5O_{12}$ (LTO)
Nominal Gerilim	3.7 V	2.25 V
	(Mak. 4.2 V – Min. 2.8 V)	(Mak. 2.8 V – Min. 2.0 V)
Nominal Kapasite	11 Ah	13 Ah
Maksimum Sürekli Şarj	33 A	130 A
Maksimum Sürekli Deşarj	88 A	130 A
Maksimum Anlık Deşarj	110 A	260 A
Ağırlık	280 g	400 g
Enerji	42 Wh	29 Wh
Maksimum Güç	380 W	670 W
	(%50 şarj durumunda)	(%50 şarj durumunda)
Enerji Yoğunluğu	150 Wh/kg	73 Wh/kg
Güç Yoğunluğu	1357 W/kg	1675 W/kg
Ömür	1400 çevrim	16000 çevrim



**Şekil 1.** Önerilen sistemin blok diyagramı (Block diagram of the proposed system)



**Şekil 2.** Dönüştürücünün devre şeması (Circuit diagram of the converter)

dengelemesi paylaşım hattı üzerinden gerçekleşir. Paylaşım hattında kullanılan dirençlerin görevi akım sınırlandırmasıdır ve benzetimlerde  $1 \Omega$  olarak seçilmiştir. DC/DC dönüştürücünün içeriğinde bulunan transformatörden dolayı sistemin LTO bataryalar ve yükten oluşan kısmı birincil, NMC bataryalar ve paylaşım hattından oluşan kısmı ikincil olarak adlandırılmıştır. Şekil 2'de DC/DC dönüştürücünün devre şeması verilmiştir. Dönüştürücü temel olarak izoleli çift yönlü bir DC/DC dönüştürücüdür. Transformatörün gerilim oranı LTO ve NMC bataryaların oda sıcaklığındaki maksimum gerilimlerine bağlı olarak 2,8 V'a 4,2 V olarak seçilmiştir. Transformatörün anahtarlama elemanları çift yönlüdür ve tüm çalışma süresince 0,5 çalışma oranında anahtarlansaktadır. Anahtarlara paralel olarak bastırma (snubber) kapasitörleri bulunmaktadır. Kapasitörlerin değerleri transformatörlerin indüktansı ve sistemin çalışma frekansı kullanılarak 1524 nF olarak belirlenmiştir. Bu şekilde anahtarlar kesimden bir rezonans devresi oluşmaktadır. Anahtarlar iletimdeyken transformatörün tahrik akımı yükselir. Anahtarlar kesime getirildiğinde anahtar üzerinden geçen akım sıfıra düşer ve tahrik akımı kapasitöre yönelir. Bu sayede transformatörün indüktöründe depolanmış olan enerji kapasitöre aktarılmış olur. Elemanların değerleri rezonans frekansı ve sistemin çalışma frekansının eşit olacak şekilde belirlendiği için kapasitör üzerindeki enerji komütasyon anında tekrar

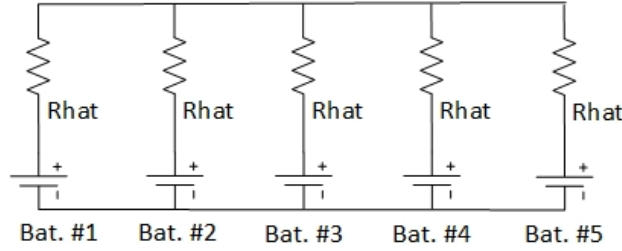
indüktöre aktarılmış olacaktır. Kapasitör gerilimi tekrar sıfır olduğunda anahtar tekrar iletme geçmiş olacak, bu şekilde neredeyse kayıpsız bir anahtarlama sağlanmış olacaktır. Sistem Simulink ortamında kurulmuş ve farklı senaryolar ve çalışma durumları için benzetimleri yapılmıştır. Benzetim devresinde kullanılan batarya modelleri Simulink'teki batarya şablonu kullanılarak oluşturulmuştur.

### 3. ÇALIŞMA MODLARI (MODES OF OPERATION)

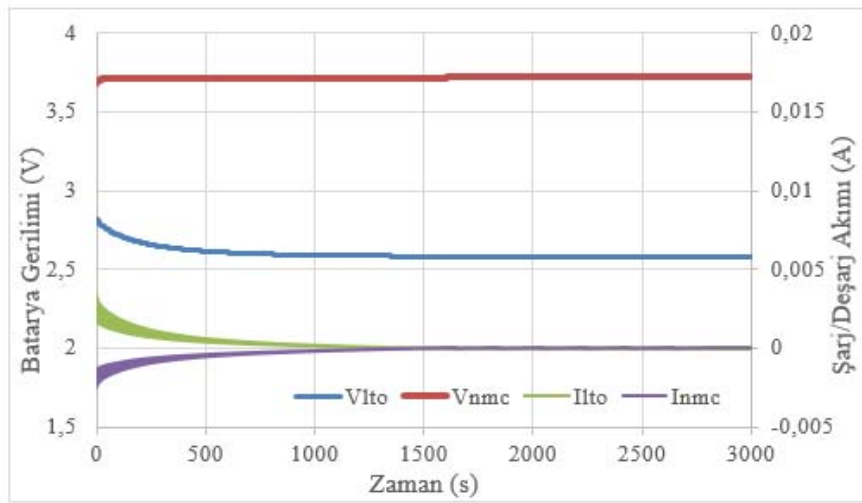
Önerilen sistemin boşta çalışma, şarj ve deşarj olmak üzere üç çalışma modu vardır.

#### 3.1. Boşta Çalışma Modu (Idle Mode)

Bu modda sistem aktif bir batarya dengeleme sistemi gibi çalışmaktadır. Literatürdeki benzerlerinden farklı olarak hem birincil hem de ikincil kısımdaki bataryalar arasındaki dengesizlikler giderilebilmektedir. Beş seviyeli bir sistemin ikincil kısmında bulunan baş bataryadan oluşan paketin bağlantısı Şekil 3'te gösterilmiştir. NMC bataryaların anotları direnç üzerinden bir paylaşım hattı oluşturacak şekilde bağlanmıştır. Paketteki bazı bataryaların gerilimlerinin diğerlerinden farklı olması durumunda gerilim seviyesi yüksek olan bataryalardan düşük olanlara doğru bir akım akışı gerçekleşecektir. Bu transfer tüm hücreler ortak



Şekil 3. Sistemin ikincil kısmı (Secondary side of the system)



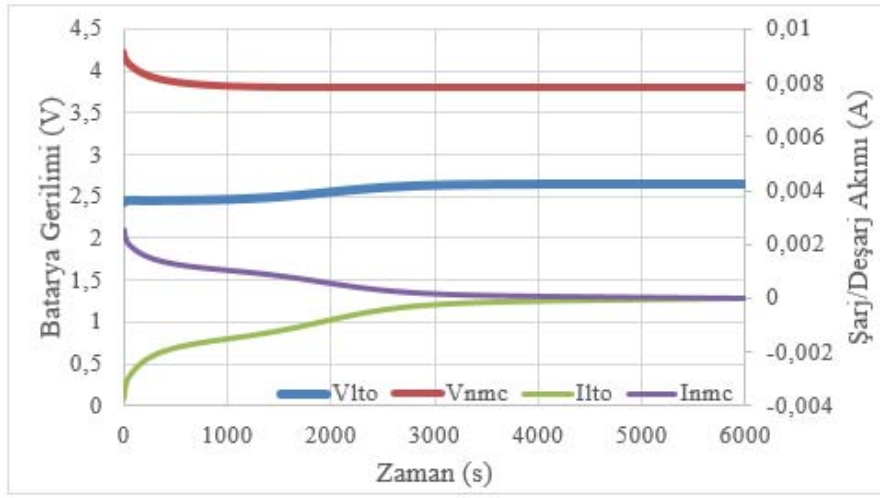
Şekil 4. LTO-NMC yönünde enerji aktarımında gerilim ve akımların değişimi (Battery voltages and currents during energy transfer in LTO-NMC direction)

bir gerilim seviyesinde ( $V_{ort}$ ) buluşana kadar gerçekleşecektir. Hat direnci  $R_{hat}$ ) dengeleme akımının kontrolü için kullanılmaktadır. Dengeleme akımı Eş. 1 ile hesaplanabilir.

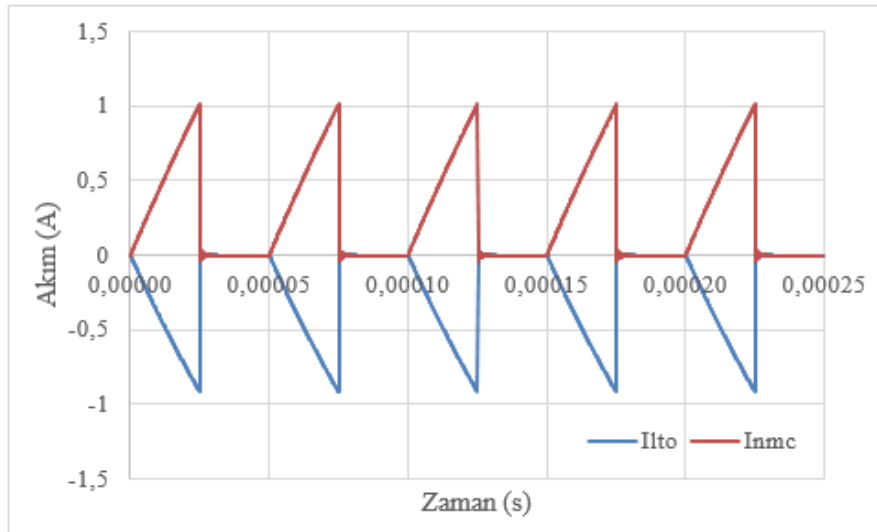
$$I_{dengeleme} = \frac{V_{batarya} - V_{ort}}{R_{hat}} \quad (1)$$

Eğer dengesizlik sistemin birincil tarafında meydana gelirse transformatörler aracılığıyla ikincil kısma aktarılmış olacaktır. Dengeleme ikincil kısımdaki (buna bağlı olarak birincil kısımdaki) tüm bataryalar dengelenene kadar devam edecektir. Çalışma sonucunda teorik olarak tüm bataryaların gerilimlerinin dengelenmiş olması beklenmektedir. Öncelikle tek seviyeli sistemin benzetimleri yapılmıştır.

Benzetimde Şekil 2'deki devrenin tek seviyeli, her iki tarafta birer bataryadan oluşan bir benzeri kullanılmıştır. İlk benzetimde LTO-NMC yönünde enerji akışının görülebilmesi için LTO bataryanın şarj durumu %100, NMC bataryanın şarj durumu ise % 50 seçilmiştir. Şekil 4'te bu süreçte bataryaların gerilimleri ve akımlarındaki değişim görülmektedir. Şekilde mavi ve kırmızı grafikler sırasıyla LTO ve NMC bataryalara ait gerilimlerin, yeşil ve mor grafikler ise sırasıyla LTO bataryanın deşarj ve NMC bataryanın şarj akımlarının değişimini göstermektedir. Başlangıçta  $V_{LTO}=2,81$  V ve  $V_{NMC}=3,67$  V olmakla birlikte dengeleme sonunda  $V_{LTO}'=2,58$  V ve  $V_{NMC}'=3,72$  V'tur. Bataryaların gerilim oranları 1,44 ve transformatörün çevrim oranı ile farkı %3,93'tür. Sağdaki dikey eksen akımların değerleridir ve akımların yönü bataryadan dışarı olacak



Şekil 5. NMC-LTO yönünde enerji aktarımında gerilim ve akımların değişimi  
(Battery voltages and currents during energy transfer in NMC-LTO direction)



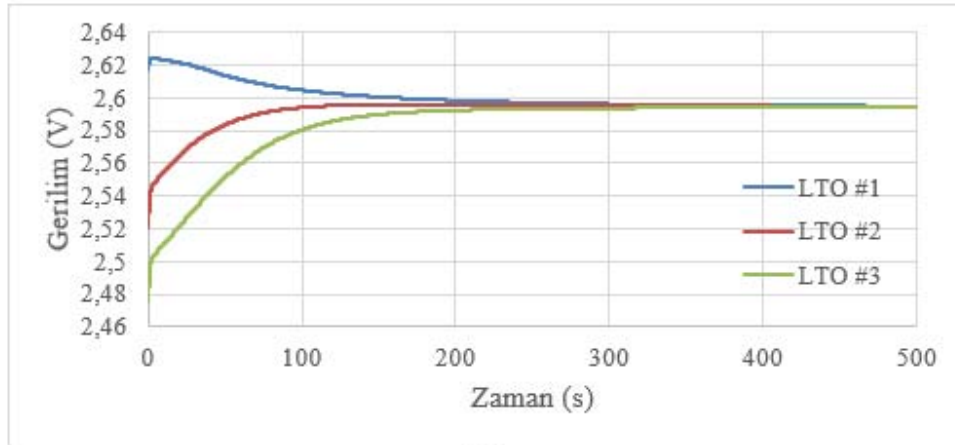
Şekil 6. NMC-LTO yönünde enerji aktarımında batarya akımlarının dalga formu  
(Battery current waveforms during energy transfer in NMC-LTO direction)

şekildedir. Şu durumda LTO bataryadan çekilen akım NMC bataryaya doğru akmaktadır. Dengeleme gerçekleştikçe transfer edilen akımın genliği azalmaktadır. Benzetim NMC batarya % 100 dolu, LTO batarya %50 olacak şekilde tekrar edilmiştir. Bu şekilde NMC-LTO yönünde enerji aktarımı gözlenmiştir. Başlangıçta  $V_{NMC}=4,218$  V ve  $V_{LTO}=2,427$  V iken dengeleme sonunda bu değerler  $V_{NMC}'=3,798$  V ve  $V_{LTO}'=2,646$  V olarak gözlemlenmiştir. Dengelemeden sonra batarya gerilimlerinin oranı 1,435 ve transformatörün çevrim oranı ile farkı % 4,29'dur. Bu senaryoda bataryalara ait gerilim ve akım değişimleri Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 4 ile benzer şekilde ikincil dikey eksen akımların değerleri içindir ve akım yönleri bataryalardan dışarı doğrudur. Şekil 6'da ise NMC-LTO yönünde enerji aktarımında batarya akımlarının dalga formu görülmektedir. Akımların yönü bataryadan dışarıya doğrudur. NMC batarya deşarj olurken LTO batarya şarj olmaktadır. Tek seviyeli çalışmanın benzetimlerinin yanı sıra 3 seviyeli sisteme ait benzetimlerde gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Şekil 2'de görülen benzetim devresinin 3 seviyeli benzeri kullanılmıştır. LTO bataryaların gerilimleri  $V_{LTO1}= 2,6166$  V,  $V_{LTO2}=2,5209$

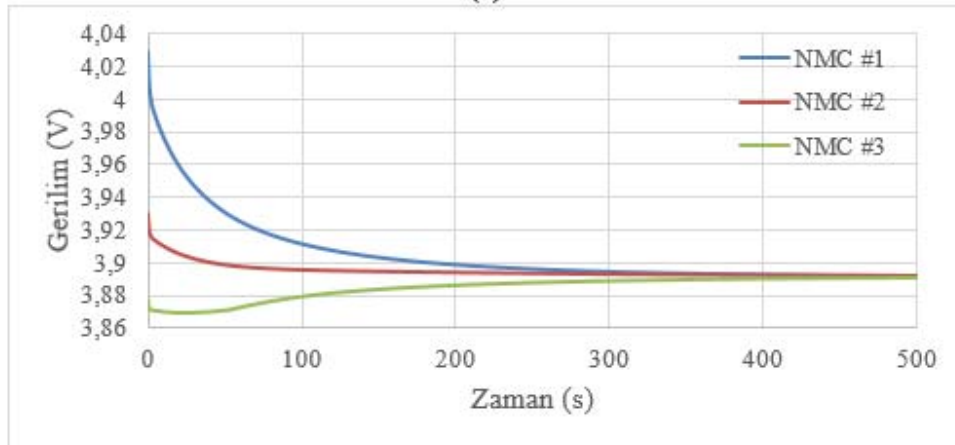
V ve  $V_{LTO3}=2,4754$  V, NMC bataryaların gerilimleri ise  $V_{NMC1}=4,0283$  V,  $V_{NMC2}=3,9297$  V ve  $V_{NMC3}=3,8776$  V olarak seçilmiştir. Her iki kısımdaki ortalama gerilimler ise sırasıyla  $V_{LTOort}=2,5376$  V ve  $V_{NMCort}=3,9452$  V'dur. Dengeleme sonucunda elde edilen yeni gerilim değerleri LTO batarya için 2,5931 V ve NMC batarya için 3,9452 V'dur. Benzetim sonuçları Şekil 7'de verilmiştir.

### 3.2. Deşarj Modu (Discharge Mode)

Deşarj modunda sistemin birincil kısmındaki LTO bataryalara yük uygulanmıştır. Bu çalışma esnasında eğer bir dengesizlik durumu varsa giderilmeye devam etmektedir. Aksi durumda NMC hücreler transformatörün sarım oranına bağlı olarak LTO hücreleri dengelemektedir. Bu modun analizi için bir grup benzetim yapılmıştır. İlk olarak sistemin etkisini gözlemlemek için tamamen dolu 3 LTO batarya seri bağlanmış ve 80 A'lık sabit yük çekilerek kaydedilmiştir. Ardından aynı benzetim 3 seviyeli sistem kullanılarak tekrarlanmıştır. Sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8'de görüldüğü üzere sistem olmadan LTO bataryalar 469



(a)



(b)

Şekil 7. Boşta çalışma moduna ait (a) LTO, (b) NMC bataryalar için benzetim sonuçları (Simulation results of idle mode operation for (a) LTO, (b) NMC cells)



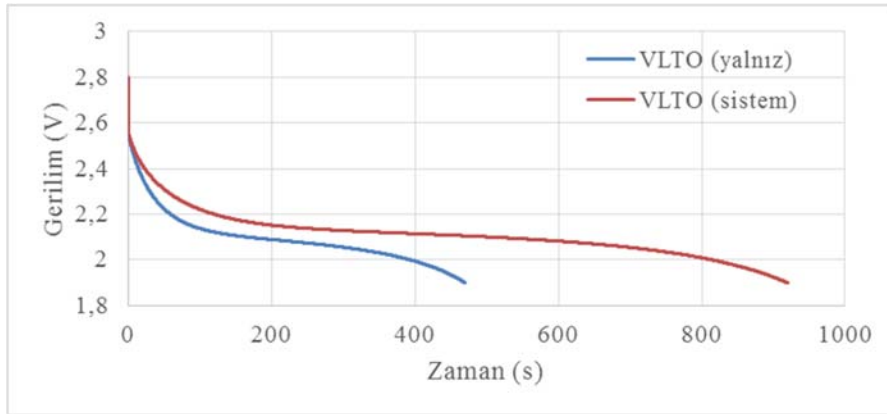
saniyede boşalmaktadır. Sistem ile bu süre 919 saniyeye çıkarılmaktadır. Bir diğer benzetim sistemin deşarj esnasında dengeleme özelliğini göstermek üzere değişik gerilim seviyelerinde bataryalara sahip 3 seviyeli bir sistemle tekrarlanmıştır. Batarya gerilimleri NMC bataryalar için  $V_{NMC1}=4,21$  V,  $V_{NMC2}=3,9297$  V ve  $V_{NMC3}=3,8494$  V, LTO bataryalar için ise  $V_{LTO1}=2,5547$  V,  $V_{LTO2}=2,2569$  ve  $V_{LTO3}=2,1895$  V olarak seçilmiştir. Sonuçlar Şekil 9'da verilmiştir.

### 3.3. Şarj Modu (Charge Mode)

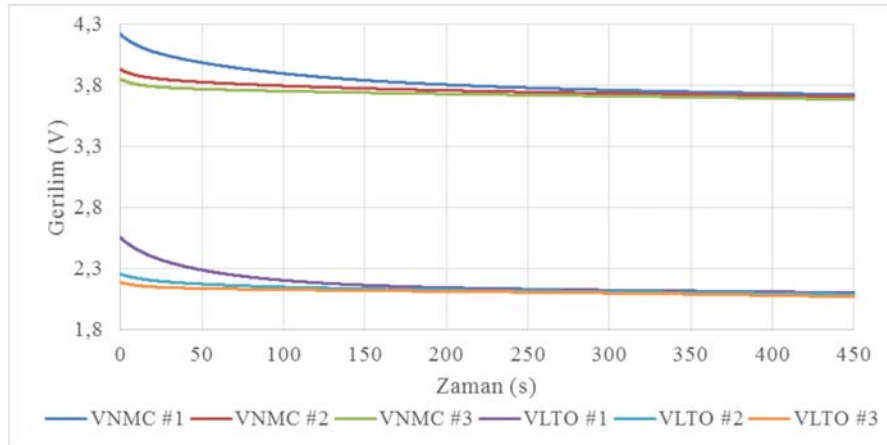
Şarj modunda çalışma ile deşarj modunda çalışma birbirine oldukça benzerdir. Bu nedenle son olarak hem şarj hem deşarj bölümlerine sahip değişken bir yük profili ile benzetim yapılmıştır. Yük profili sırasıyla 50 şer saniyelik 40 A'lık şarj, boşta çalışma, 40 A'lık deşarj ve 80 A'lık deşarj bölümlerinden oluşmakta ve sürekli tekrarlanmaktadır. Şekil 10'da yük sinyalinin iki periyotluk bir bölümü verilmiştir. LTO bataryaların gerilimleri sırasıyla  $V_{LTO1}=2,9506$  V,  $V_{LTO2}=2,6529$  V ve  $V_{LTO3}=2,5854$  V olarak ayarlanmış NMC bataryaların üçü de tamamen şarj edilmiştir. Benzetim sonuçları Şekil 11'de verilmiştir.

## 4. DENEYLER (EXPERIMENTS)

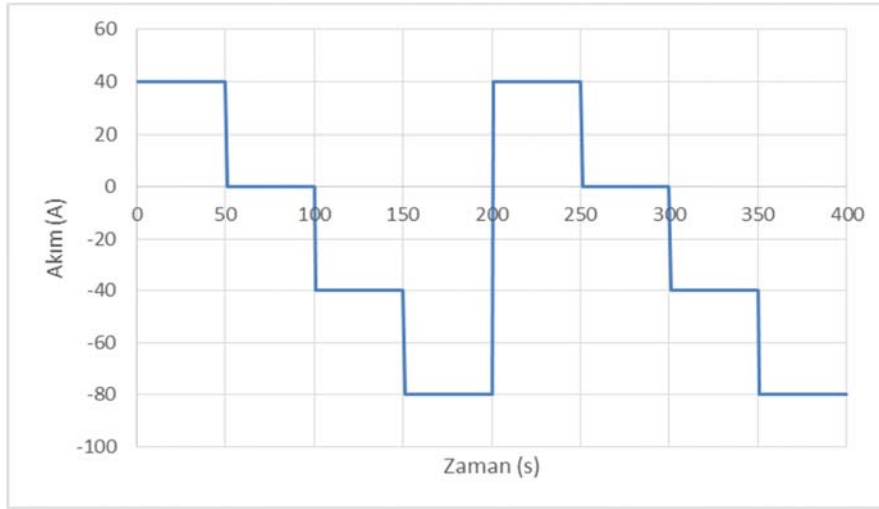
Sistemin tek seviyeli çalışmasını gözlemlemek için deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla kurulan deney düzeneği çift yönlü DC/DC dönüştürücü, LTO ve NMC bataryalardan oluşmaktadır ve düzenek Şekil 12'de görülmektedir. Anahtarlama elemanı olarak MOSFET kullanılmıştır. Tercih edilen MOSFET IRL540N'dir. Bunun başlıca nedenleri ekonomik olması lojik yapısı dolayısıyla kolay sürülebilmesidir. Anahtarlama sinyali fonksiyon jeneratörü ile üretilmiş, iki anahtarın kapıları birbirinden bire bir sarımlı trafolar yardımıyla elektriksel olarak izole edilmiştir. Anahtarlara uygulanan darbe genlik modülasyon sinyalinin frekansı 20 KHz, görev oranı %50'dir. Veri toplama ve işleme için Labview yazılımı ve NI 9206 kartları kullanılmıştır. Transformatorün gerilim seviyeleri oranı 2,9 V'a 4,2 V olarak seçilmiştir. Dolayısıyla transformatorün çevrim oranı,  $N=0,69$ 'dur. İlk deneyde enerji transferinin yönü NMC bataryadan LTO bataryaya olacak şekilde seçildi ve batarya gerilimleri LTO ve NMC bataryalar için sırasıyla 2,535 V ve 4,047 V olarak ayarlandı. Şekil 13'de bu çalışma esnasında görülen bataryalar akımlarının osiloskop çıktıları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Akımlara ait dalga formları



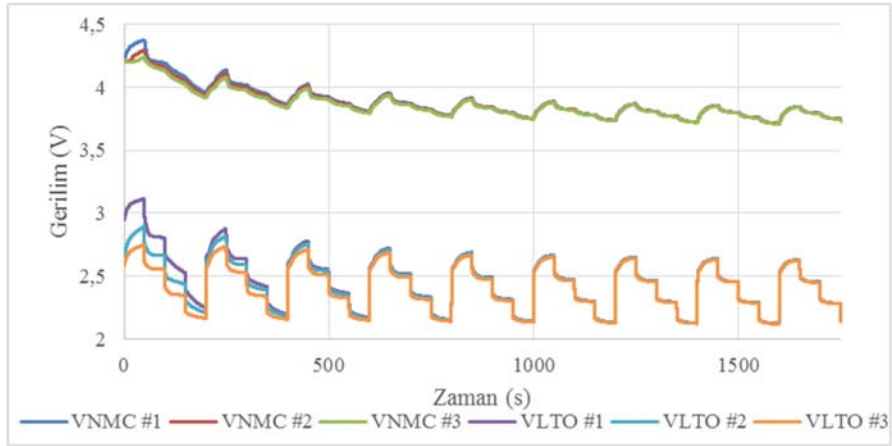
Şekil 8. LTO bataryaların yalnız ve sistem içerisindeki deşarj sürelerinin karşılaştırılması (Comparison of discharge times of LTO cells within the system or alone)



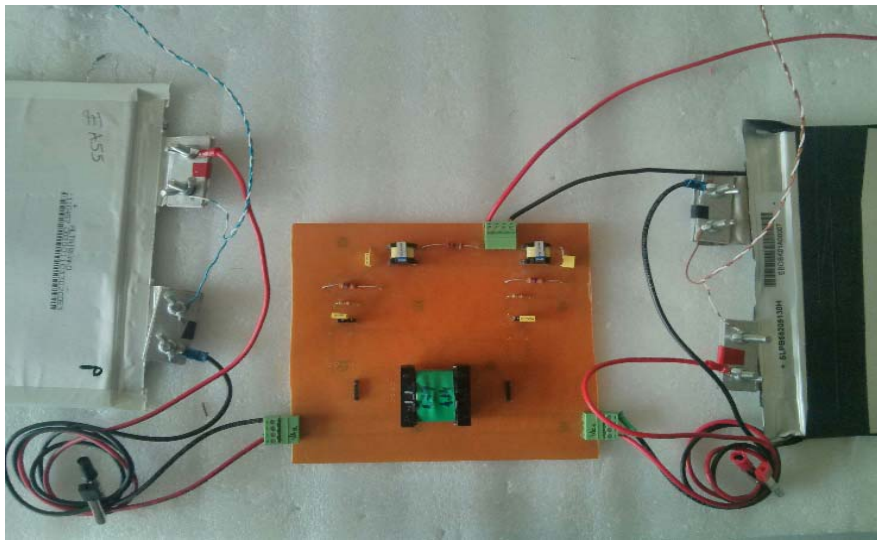
Şekil 9. Deşarj esnasında dengeleme (Balancing during discharge)



Şekil 10. Yük profili (Load profile)



Şekil 11. Değişken yük profili altında dengeleme (Balancing under variable load profile)



Şekil 12. Deney düzeneği (Experimental setup)

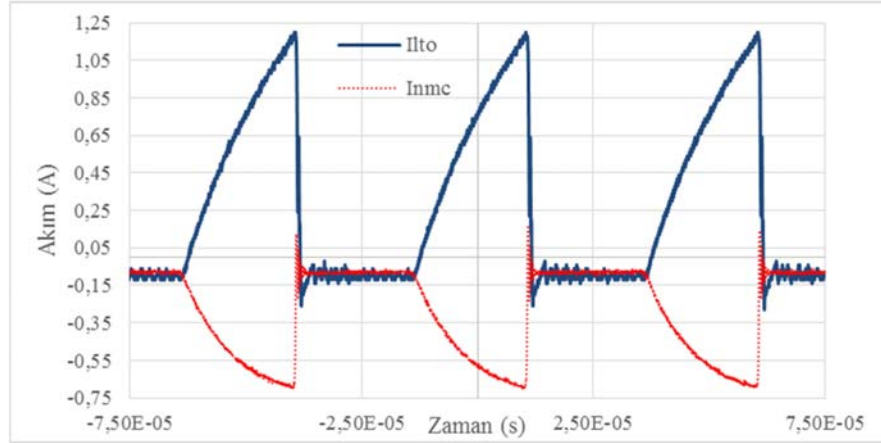


ile Şekil 6'da verilmiş benzetim sonuçları arasındaki paralellik gözlenmektedir. Şekil 13'de görülebileceği üzere LTO bataryaya gelen şarj akımının maksimum değeri 1,16 A'dır. NMC bataryadan çekilen deşarj akımının maksimum değeri ise 0,696 A'dır. NMC bataryadan çekilen akımın tepe değeri LTO bataryaya aktarılan akımın tepe değerinden düşük olmakla birlikte LTO bataryanın akım dalga formundaki negatif bileşen göz önünde bulundurulmalıdır. Bu negatif bileşen nedeniyle LTO bataryaya aktarılan akımın ortalama değeri 0,274 A iken NMC bataryadan çekilen akımın ortalama değeri -0,281 A'dır. Ayrıca bu negatif bileşen nedeniyle transformatörün doyma noktasına gelmesi de geciktirilmiş olur. Şu durumda verim % 95,4'tür. Sistemin çoğunlukla deşarj modunda çalışacağı ve enerji aktarımının NMC bataryadan LTO bataryaya yönüne olacağı öngörülürse bu değer sistemin verimliliği olarak kabul edilebilir. Dengeleme sürecinden sonra yeni gerilim değerleri NMC bataryaya için 3,952 V, LTO bataryaya için ise 2,688 V olarak kaydedilmiştir. Batarya gerilimleri arasındaki oran 0,68'dir. Transformatörün dönüştürme oranı ile karşılaştırıldığında hata %1,4'tür. Şekil 14'de NMC bataryadan LTO bataryaya enerji akışı sürecinde kaydedilmiş gerilim değerleri

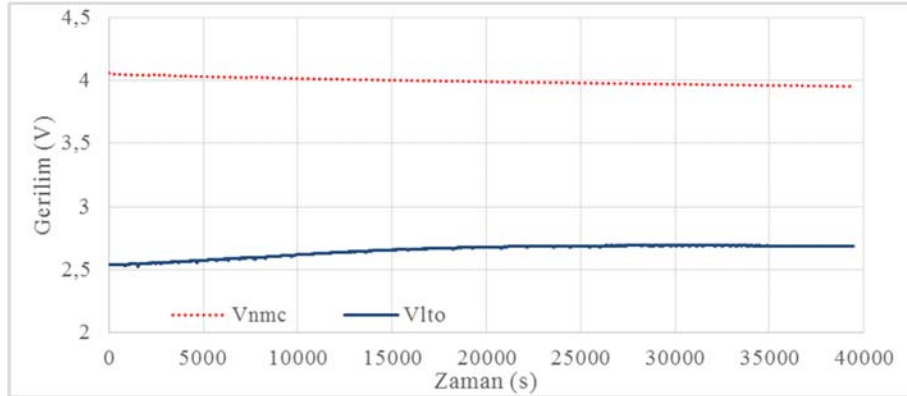
verilmiştir. İkinci deney için batarya gerilimleri NMC ve LTO bataryalar için sırasıyla 3,329 V ve 2,669 V olarak ayarlanmıştır. Bu deneyde enerji akış yönü LTO bataryadan NMC bataryaya doğrudur. Dengelenmenin sonunda yeni gerilim değerleri NMC ve LTO bataryalar için sırasıyla 3,374 ve 2,488 V olarak kaydedilmiştir. Bu deney sonunda batarya gerilimlerinin oranı 0,73'tür. Transformatörün dönüştürme oranına göre hata ise %5,7 seviyesindedir. İkinci deneyde kaydedilmiş gerilim değişimine ait grafik Şekil 15'de verilmiştir.

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

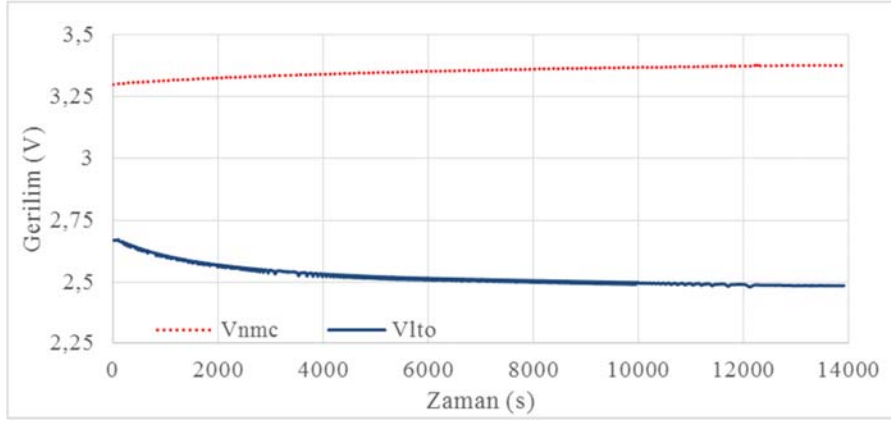
TEA'lar taşımacılık alanında en temiz alternatiflerdir. Gerek ekonomik gerekse çevresel etmenlerden dolayı gelecek yıllarda daha da yaygınlaşması beklenmektedir. Bununla birlikte bu araçların kısa sürüş menzili, düşük performans gibi dezavantajları bulunmaktadır. Ayrıca bu araçlarda kullanılan bataryaların ömürleri de oldukça kısadır. Bu çalışmada bu sorunların önüne geçebilmek için özgün bir batarya-batarya hibrid enerji sistemi tanıtılmıştır. Sistem güç yoğunluğu yüksek olan LTO bataryaların ana güç kaynağı



Şekil 13. İlk deneyde akım dalga formlarına osiloskop çıktılarının karşılaştırılması  
(Comparison of scope outputs of the current waveforms of the first experiment)



Şekil 14. Birinci deney için batarya gerilimleri (Battery voltages for the first experiment)



Şekil 15. İkinci deney için batarya gerilimleri (Battery voltages for the second experiment)

olarak kullanılması, enerji yoğunluğu yüksek olan NMC bataryaların ise çalışma esnasında LTO bataryaları desteklemesi esasına dayanmaktadır. Değişken yükün uzun ömürlü LTO bataryalar tarafında üstlenilmesi sayesinde NMC bataryaların kullanım süresi uzatılmıştır. Ayrıca bu şekilde performans gerektiren durumlarda LTO bataryalar tarafından daha yüksek güç sağlanmıştır, NMC bataryaların desteği ile de sürüş menzili uzatılmıştır. Sistemin bir diğer önemli özelliği kontrolünün basitliğidir. Sistem tüm koşullarda aynı anahtarlama stratejisi ve görev oranı ile çalışmaktadır. Böylece sistem yol koşullarından bağımsız olmakta, enerji yönetimi için herhangi bir yol bilgisi gerekmemektedir. Bunun yanında önerilen çift yönlü DC/DC dönüştürücü topolojisi ile ekstra bir çaba gerektirmeden gerilim dengesizlikleri de giderilebilmektedir. Benzetim sonuçları bataryanın kullanım ömrünün sabit yük altında iki kata yakın bir süre arttırdığını göstermiştir. Ayrıca farklı çalışma modları için dengeleme şemasının geçerliliği de gösterilmiştir. Sistemin tek seviyeli çalışmasına dair deneysel sonuçlar da eklenmiştir. Konseptin geçerliliği benzetim sonuçları yardımıyla gösterilmiş olup, sistemin uygulanabilirliği deneysel çalışmalarla gösterilmiştir. NMC bataryadan LTO bataryaya doğru enerji aktarımı sırasında verim %95 seviyesindedir. Sistemin çoğunlukla bu yönde çalışacağı düşünülürse sistemin verimliliğinin genel olarak bu seviyede olduğu kabul edilebilir. Sistemin gerçekleşmesi konusunda çalışmalar devam etmektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 110E209 numaralı proje ile desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Sezer İ., Theoretical investigation of the effects of diesel fuel, biodiesel fuel and their blends on internal combustion engines, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (4), 799-812, 2016.
- Balbaş M., Şahin A., Symmetrical supercapacitor application with low activated carbon content, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (4), 683-692, 2015.
- Nazri G.A., Pistoia G., *Lithium Batteries*, Science and Technology, Springer Science & Business, New York, A. B. D., 2008.
- Obreja V.V.N., On the performance of supercapacitors with electrodes based on carbon nanotubes and carbon activated material-A review, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 40 (7), 2596-2605, 2008.
- Ceylan M., Sarıkurt T., Balıkçı A., A novel lithium-ion polymer battery model for hybrid/electric vehicles, 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), İstanbul-Türkiye, 366-369, 01-04 Haziran, 2014.
- Sarı Kurt T., Ceylan M., Balıkçı A., An analytical battery state of health estimation method, 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), İstanbul-Türkiye, 1605-1609, 01-04 Haziran, 2014.
- Köhler U., Kümpers J., Ullrich M., High performance nickel-metal hydride and lithium-ion batteries, *J. Power Sources*, 105 (1), 139-144, 2002.
- Winter M., Brodd R.J., What are batteries, fuel cells, and supercapacitors?, *Chem Rev.*, 104 (10), 4245-4269, 2004.
- Sarı Kurt T., Ceylan M., Balıkçı A., A hybrid battery model and state of health estimation method for lithium-ion batteries, IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), Dubrovnik-Hırvatistan, 1349-1356, 13-15 Mayıs, 2014.
- Kılıç A., Kapucu S., Design and construction of a modular reconfigurable robot module OMNIMO, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (3), 521-530, 2016.
- Paganelli G., Ercole G., Brahma A., Guezennec Y., Rizzoni G., General supervisory control policy for the energy optimization of charge-sustaining hybrid electric vehicles, *JSAE Review*, 22 (4), 511-518, 2001.
- Johnson V., Wipke K., Rausen, D., HEV Control Strategy for Real-Time Optimization of Fuel Economy

- and Emissions, SAE Transactions, 109 (3), 1677-1690, 2000.
13. Sciarretta A., Guzzella L., Control of Hybrid Electric Vehicles, IEEE Control Syst. 27 (2), 60-70, 2007.
  14. Koot M., Kessels J.T.B.A., de Jager B., Heemels, W.P.M.H., van den Bosch, P.P.J. Steinbuch, M., Energy Management Strategies for Vehicular Electric Power Systems, IEEE Trans. Veh. Technol., 54 (3), 771-782, 2005.
  15. Lin C., Pengl H., Grizzle J.W., A Stochastic Control Strategy for Hybrid Electric Vehicles, American Control Conference, Boston-A.B.D, 4710-4715, 30 Haziran-2 Temmuz 2004.
  16. Kuperman A., Aharon, I., Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review, Renew Sustain Energy Rev., 15 (2), 981-992, 2011.
  17. Penella M.T., Member S., Gasulla M., Runtime Extension of Low-Power Wireless Sensor Nodes Using Hybrid-Storage Units, IEEE Trans. Instrum. Meas., 59 (4), 857-865, 2010.
  18. Dougal R.A., Liu S., White R.E., Power and Life Extension of Battery – Ultracapacitor Hybrids, IEEE Trans. Components Packag. Technol., 25 (1), 120-131., 2002.
  19. Kuperman A., Aharon I., Kara A., Malki, S., A frequency domain approach to analyzing passive battery–ultracapacitor hybrids supplying periodic pulsed current loads, Energy Convers. Manag., 52 (2), 3433-3438, 2011.
  20. Gao L., Dougal R.A., Liu S., Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid, IEEE Trans. Power Electron., 20 (1), 236-243, 2005.
  21. Govindaraj A., Lukic S.M., Emadi A., A novel scheme for optimal paralleling of batteries and ultracapacitors, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE, 1410-1416, 2009.
  22. Khaligh A., Li Z., Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art, IEEE Trans. Veh. Technol., 59 (6), 2806-2814, 2010.
  23. Ortúzar M., Moreno J., Dixon J., Ultracapacitor-based auxiliary energy system for an electric vehicle: Implementation and evaluation, IEEE Trans. Ind. Electron., 54 (4), 2147-2156, 2007.
  24. Camara M.B., Gualous H., Gustin F., Berthon, A., Design and new control of DC/DC converters to share energy between supercapacitors and batteries in hybrid vehicles, IEEE Trans. Veh. Technol., 57 (5), 2721-2735, 2008.
  25. Gao Y., Ehsani M., Parametric design of the traction motor and energy storage for series hybrid off-road and military vehicles, IEEE Trans. Power Electron., 21 (3), 749-755, 2006.
  26. Amjadi Z., Williamson S.S., Power-Electronics-Based Solutions for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Energy Storage and Management Systems, IEEE Trans. Ind. Electron., 57 (2), 2010.
  27. Wang L., Li H., Maximum fuel economy-oriented power management design for a fuel cell vehicle using battery and ultracapacitor, IEEE Transactions on Industry Applications, 46 (1), 1011-1020, 2010.
  28. Sarıkurt T., Balıkcı A., A novel battery system for electric vehicles, Progress in Clean Energy, Novel Systems and Applications, Editörler Dinçer, İ., Çolpan, C.O., Ezan, M.A., Springer International Publishing, New York, 2 (2), 29-40, 2015.
  29. Altemose G., Hellermann P., Mazz T., Active cell balancing system using an isolated share bus for Li-Ion battery management: Focusing on satellite applications, IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference, LISAT, New York-A.B.D. 6 Mayıs, 2011.

