



T.C.

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HİBRİT İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINA (İHA) YÖNELİK
JENERATÖR SİSTEMLERİ İÇİN BATARYA YÖNETİM
SİSTEMİ TASARIMI**

MEHMET YOZGAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Emrah ÇETİN

HAZİRAN- 2023

YOZGAT

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HİBRİT İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINA (İHA) YÖNELİK
JENERATÖR SİSTEMLERİ İÇİN BATARYA YÖNETİM
SİSTEMİ TASARIMI

MEHMET YOZGAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Emrah ÇETİN

HAZİRAN- 2023

YOZGAT



YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
LİSANSÜSTÜ TEZ ONAY FORMU

T.C.

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Enstitümüzün Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı 70111520019 numaralı öğrencisi Mehmet YOZGAT'ın hazırladığı “**HİBRİT İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINA (İHA) YÖNELİK JENERATÖR SİSTEMLERİ İÇİN BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI**” başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince 20/06/2023 Salı günü saat 09.30'da yapılmış, tezin onayına oy birliği ile karar verilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAZ

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Emrah ÇETİN
(Danışman)

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Hilmi GÜRLEYEN

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun /..... /..... tarih vesayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

..... /...../.....

Prof. Dr. Hasan Güner BERKANT
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdığı yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan eder, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğini beyan ederim.

Mehmet YOZGAT

20/06/2023

ÖN SÖZ

Günümüzde hibrit veya elektrikli sistemlere yönelik eğilim artmaktadır. Bu sistemde kullanılan pil ömrünün uzatılmasına yönelik çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Pil ömrünü uzatmanın bir yolu, batarya paketlerindeki dengesizlikleri önlemektir. Üretim kaynaklı ve değişken çalışma koşullarından kaynaklı yapısal farklılıklardan oluşan dengesizlikler, mevcut enerjinin kullanımını sınırlar. Bu dengesizlikleri önlemek için dengeleme yöntemleri tercih edilmektedir. Hibrit olarak tasarlanan insansız hava aracı (İHA) için hem emniyet hem de güvenilirlik önemlidir. Bu sistemde jeneratör ve batarya, enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Hibrit olarak tasarlanmasının amacı hem birlikte hem de belirli süre de olsa jeneratör ve bataryanın birbirine alternatif olarak çalışabilmesidir. Bu tasarımda sekiz hücreli olarak batarya paketi tasarlanmış, geliştirilen algoritma ile hücreler hem dengeli kullanılmış hem de sistem kesintisiz enerjilendirilmiştir.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde emeği olan hocam Dr. Öğr. Üyesi Emrah ÇETİN'e (Yozgat Bozok Üniversitesi) teşekkür ederim.

Mehmet YOZGAT

20/06/2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HİBRİT İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINA (İHA) YÖNELİK JENERATÖR SİSTEMLERİ İÇİN BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

MEHMET YOZGAT

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ EMRAH ÇETİN

Fosil yakıt kaynaklarının sürdürülebilir olmaması ve fosil yakıtlarla çalışan içten yanmalı motorlu araçların çevreye verdikleri zararlar gibi sebeplerle elektrikli itki/motor sistemlere eğilim giderek artmaktadır. Elektrikli itki sistemleri; daha güvenilir, çevreci, sürdürülebilir ve esnek tasarım imkânı gibi hedeflere ulaşabilmek için umut verici bir seçenektir. Elektrikli araçlar için itki sistemleri geliştirilirken bununla birlikte batarya teknolojilerinin de geliştirilmesi gereklidir. Bu sebeple bataryalar, elektrikli tahrik sistemini geliştirmek için havacılıkta stratejik bir öneme sahiptir. Batarya teknolojisinde lityum iyon bataryalar, diğer elektrik enerji depolama sistemlerine göre daha yüksek enerji yoğunluğu ve özgül enerji sağlamaktadır. Batarya paketinde bulunan hücreler arası dengesizlikleri giderebilmek ve hücreleri verimli çalıştırabilmek için takip edilmesi ve yönetilmesi önemlidir. Ayrıca güç elektroniğindeki hızlı gelişmeler, batarya yönetim sistemlerinin (BYS) geliştirilmesine ve insansız hava araçlarında (İHA) batarya teknolojisinin daha verimli kullanılmasına imkân sağlamıştır. Havacılık uygulamalarında BYS uygulaması kritiktir.

Bu çalışmada İHA'larda elektrikli itki sistemine enerji sağlayabilmek amacıyla 8 hücreli batarya paketi tasarlanmıştır. Ayrıca batarya paketini yönetebilmek için indüktör tabanlı aktif hücre dengeleme metodu temel alınarak Batarya Yönetim Sistemi (BYS) MATLAB Simulink programında tasarlanmıştır.

2023, xiv + 64 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Batarya Yönetim Sistemi, Hücre Dengeleme, Aktif Dengeleme, İndüktör Bazlı Aktif Dengeleme, Jeneratör Sistemi, İnsansız Hava Araçları

ABSTRACT

MASTER THESIS

BATTERY MANAGEMENT SYSTEM DESIGN FOR THE GENERATOR SYSTEMS INTENDED TO HYBRID UNMANNED AERIAL VEHICLES

MEHMET YOZGAT

**YOZGAT BOZOK UNIVERSITY
SCHOOL OF GRADUATES STUDIES**

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

SUPERVISOR: ASST. PROF. DR. EMRAH ÇETİN

The tendency towards electric propulsion/motor systems is increasing due to reasons such as the unsustainability of fossil fuel sources and the environmental damage of internal combustion engine vehicles working with fossil fuels. Electric propulsion systems; It is a promising option to achieve goals such as more reliable, environmentally friendly, sustainable and flexible design possibilities. While developing propulsion systems for electric vehicles, battery technologies also need to be developed. For this reason, batteries have a strategic importance in aviation to improve the electric propulsion system. In battery technology, lithium-ion batteries provide higher energy density and specific energy compared to other electrical energy storage systems. It is important to monitor and manage the cells in the battery pack in order to eliminate the imbalances between the cells and to operate the cells efficiently. In addition, rapid developments in power electronics have allowed the development of battery management systems (BMS) and the more efficient use of battery technology in unmanned aerial vehicles (UAV). In aviation applications, the BMS application is critical.

In this study, an 8-cell battery pack was designed to provide energy to the electric propulsion system in UAVs. In addition, in order to manage the battery pack, the Battery Management System (BYS) was designed in MATLAB Simulink program, based on the inductor-based active cell balancing method.

2023, xiv + 64 Pages

Keywords: Battery Management System, Cell Balancing, Active Balancing, Inductor Based Active Balancing, Generator System, Unmanned Aerial Vehicles

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAY SAYFASI.....	ii
TEZ BEYANI.....	iii
ÖN SÖZ.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar LİSTESİ	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. BATARYALAR	6
2.1. Batarya Sistemleri	6
2.1.1. Birincil (Primary) Tip Bataryalar	6
2.1.2. İkincil (Secondary) Tip Bataryalar	7
2.2. Batarya Türleri.....	7
2.1.3. Kurşun-Asit Bataryalar.....	7
2.1.4. Nikel-Kadyum Bataryalar (Ni-Cd).....	8
2.1.5. Nikel-Metal Hidrit Bataryalar (Ni-MH).....	8
2.1.6. Lityum-İyon Batarya (Li-ion).....	9
2.1.7. Lityum-İyon Polimer Batarya (LiPo)	10
2.1.8. Lityum Demir Fosfat Batarya (LiFePO ₄)	10
2.1.9. Lityum Sülfür Batarya (Li-S)	11
2.2. Lityum İyon Hücre Tipleri	12
2.2.1. Silindirik Tip	12

2.2.2.	Prizmatik Tip	13
2.2.3.	Kese Tip.....	13
2.3.	Lityum İyon Bataryalar İçin Eşdeğer Devre Modelleri.....	14
2.3.1.	Rint modeli	14
2.3.2.	RC modeli.....	14
2.3.3.	Thevenin modeli	15
2.3.4.	PNGV modeli	16
2.4.	Bataryalarla İlgili Temel ve Yönetimsel Tanımlar.....	16
2.4.1.	Hücre	16
2.4.2.	Gerilim Değeri.....	16
2.4.2.1.	Nominal Gerilim.....	16
2.4.2.2.	Kesme Gerilimi	17
2.4.3.	Depolama Kapasitesi	17
2.4.4.	Enerji Kapasitesi (Wh)	18
2.4.5.	Enerji Yoğunluğu (Wh/L)	18
2.4.6.	Spesifik Enerji ve Spesifik Güç.....	18
2.4.7.	Batarya Çalışma Sıcaklığı	18
2.4.8.	Şarj Durumu (SOC).....	19
2.4.9.	Deşarj Derinliği (DOD).....	19
2.4.10.	Sağlık Durumu (SOH).....	19
2.4.11.	Batarya Çevrim Ömrü	19
2.5.	Batarya Yönetim Sistemleri (BYS)	20
2.5.1.	Batarya Yönetim Sisteminin Görevleri	20
2.5.1.1.	Batarya İzleme Görevi.....	20
2.5.1.2.	Bataryayı Koruma Görevi	21
2.5.1.3.	Veri Yönetme Görevi	21

2.5.1.4.	Teşhis ve Kestirim Görevi.....	21
2.5.1.5.	Şarj/Deşarj Yönetimi Görevi.....	21
2.5.2.	Batarya Yönetim Sistemi Topolojileri.....	21
2.5.2.1.	Merkezi Topoloji	21
2.5.2.2.	Modüler Topoloji.....	22
2.5.2.3.	Merkezi Olmayan Topoloji	22
2.5.2.4.	Dağıtık Topoloji	23
2.6.	Hücre Dengeleme Yöntemleri.....	23
2.6.1.	Pasif Dengeleme	24
2.6.1.1.	Sabit Dirençli Pasif Dengeleme Yöntemi.....	25
2.6.1.2.	Anahtarlamaalı Dirençli Pasif Dengeleme Yöntemi	25
2.6.2.	Aktif Dengeleme.....	26
2.6.2.1.	Kapasitör Temelli Aktif Dengeleme Yöntemleri	26
2.6.2.2.	Anahtarlamaalı Kapasitör ile Aktif Dengeleme Yöntemi	27
2.6.2.3.	Tek Anahtarlamaalı Kapasitör ile Aktif Dengeleme Yöntemi.....	27
2.6.2.4.	Çift Katmanlı Kapasitörle Aktif Dengeleme Yöntemli.....	28
2.6.2.5.	İndüktör/Transformatör Temelli Aktif Dengeleme Yöntemleri.....	29
2.6.2.5.1.	Tek/Çoklu İndüktörlü Aktif Dengeleme Yöntemi.....	29
2.6.2.5.2.	Tek Sargılı Transformatörlü Aktif Dengeleme Devresi	30
2.6.2.5.3.	Çok Sargılı Transformatörlü Aktif Dengeleme Yöntemi	31
2.6.2.6.	Çoklu Transformatörlü Aktif Dengeleme Yöntemi.....	32
2.6.2.7.	Dönüştürücü Temelli Aktif Dengeleme Yöntemleri	33
2.6.2.7.1.	Cuk Dönüştürücülü Aktif Dengeleme Yöntemi	33
2.6.2.7.2.	Buck/Boost Dönüştürücülü Aktif Dengeleme Yöntemi	34
2.6.2.7.3.	Flyback Dönüştürücülü Aktif Dengeleme Yöntemi	34
2.6.2.7.4.	Ramp Dönüştürücülü Aktif Dengeleme Yöntemi	35

2.6.2.7.5.	Tam Köprü Dönüştürücülü Aktif Dengeleme Yöntemi	36
2.6.2.7.6.	Yarı Rezonans Dönüştürücülü Aktif Dengeleme Yöntemi	37
3.	HİBRİT SİSTEMİN ÇALIŞMA PRENSİBİ VE JENERATÖR SİSTEMİNİN SİMULİNK MODELLEMESİ	38
3.1.	Hibrit Sistem Çalışma Prensibi	38
3.2.	Jeneratör Sistem Tasarımı	39
4.	BATARYA YÖNETİM SİSTEMİNİN SİMULİNK MODELLEMESİ	41
4.1.	Tasarımlarda Kullanılan Ekipmanlar	41
4.1.1.	Tasarlanan Batarya Paketi	41
4.1.2.	Kullanılan Pil Modeli	42
4.1.3.	Anahtarlama Elemanları	42
4.1.4.	Anahtarlama İşlemi.....	43
4.2.	Simulinkte Tasarlanan Aktif Hücre Dengeleme Modeli	44
5.	BULGULAR VE TARTIŞMA	46
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER	53
7.	KAYNAKLAR	54
	EKLER	60

TABLÖLER LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. Pil türlerinin karşılaştırılması	12
Tablo 2.2. C oranlarının kıyaslanması	18
Tablo 2.3. Batarya türlerine ait çalışma sıcaklığı	19
Tablo 2.4. Batarya yönetim sistemi görevleri	20
Tablo 3.1. PID denetleyici katsayıları	40
Tablo 4.1. Batarya paketine ait parametreler	42
Tablo 4.2. Batarya paketinde kullanılan ekipmanlar	42
Tablo 4.3. Pil hücresine ait parametreler	42
Tablo 4.4. Fonksiyon bloklarında bulunan kodlar	45
Tablo 5.1. Sistemin akım ve gerilim değerleri.....	47
Tablo 5.2. Döngü miktarına göre verim tablosu	49

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Pil yapısı.....	6
Şekil 2.2. Kurşun-Asit batarya yapısı.....	7
Şekil 2.3. Nikel-kadyum (Ni-Cd) batarya yapısı.....	8
Şekil 2.4. Nikel-metal hidrit (Ni-MH) pil yapısı.....	9
Şekil 2.5. Lityum iyon pil yapısı	9
Şekil 2.6. Lityum iyon pil hücreleri	10
Şekil 2.7. Lityum polimer pil yapısı.....	10
Şekil 2.8. Lityum demir fosfat pil yapısı.....	11
Şekil 2.9. Lityum sülfür pil yapısı.....	11
Şekil 2.10. Silindirik tasarımlı pil hücresi.....	12
Şekil 2.11. Prizmatik tasarımlı pil hücresi	13
Şekil 2.12. Kese tasarımlı pil hücresi.....	13
Şekil 2.13. Rint modelinin şematik diyagramı	14
Şekil 2.14. RC modelinin şematik diyagramı	15
Şekil 2.15. Thevenin modeli şematik diyagramı.....	15
Şekil 2.16. PNGV modeli şematik diyagramı	16
Şekil 2.17. Batarya eşdeğer devresi.....	17
Şekil 2.18. Merkezi batarya yönetim sistemi topolojisi	22
Şekil 2.19. Modüler batarya yönetim sistemi topolojisi.....	22
Şekil 2.22. Batarya dengeleme yöntemleri topolojisi.....	24
Şekil 2.23. Pasif dengeleme	25
Şekil 2.24. Sabit dirençli pasif dengeleme	25
Şekil 2.25. Anahtarlamalı dirençli pasif dengeleme devresi	26
Şekil 2.26. Aktif dengeleme	26
Şekil 2.27. Anahtarlamalı kapasitör ile aktif dengeleme devresi	27
Şekil 2.28. Tek anahtarlamalı kapasitör aktif dengeleme devresi.....	28
Şekil 2.29. Çift katmanlı kapasitörle aktif dengeleme devresi.....	28
Şekil 2.30. Tek indüktörlü aktif dengeleme devresi.....	29
Şekil 2.31. Çoklu indüktörlü aktif dengeleme devresi	30
Şekil 2.32. Tek sargılı transformatör ile aktif dengeleme devresi.....	30
Şekil 2.33. Çok sargılı transformatörle aktif dengeleme flyback devresi	31

Şekil 2.34. Çok sargılı transformatörle aktif dengeleme forward devresi.....	32
Şekil 2.35. Çoklu Transformatör ile aktif dengeleme yöntemi (paketten hücreye)	32
Şekil 2.36. Çoklu Transformatör ile aktif dengeleme yöntemi (hücreden pakete)	33
Şekil 2.37. Cuk dönüştürücü ile aktif dengeleme devresi	33
Şekil 2.38. Çift yönlü buck/boost dönüştürücü	34
Şekil 2.39. Tek yönlü flyback dönüştürücülü aktif dengeleme devresi	35
Şekil 2.40. Çift yönlü flyback dönüştürücülü aktif dengeleme devresi	35
Şekil 2.41. Ramp dönüştürücülü aktif dengeleme devresi	36
Şekil 2.42. Tam köprü dönüştürücülü aktif dengeleme devresi	36
Şekil 2.43. Yarı rezonans dönüştürücülü aktif dengeleme devresi	37
Şekil 3.1. Sistem çalışma prensibi.....	38
Şekil 3.2. Sistem tasarımı	38
Şekil 3.3. Jeneratör sistem tasarımı	39
Şekil 3.4. Jeneratör hız kontrolü.....	39
Şekil 3.5. PID denetleyici algoritması.....	40
Şekil 3.6. Motor kontrol algoritması	40
Şekil 4.2. Tasarımda kullanılan pil hücre modeli.....	42
Şekil 4.3. Anahtarlama elemanı ve çalışma prensibi.....	43
Şekil 4.4. PWM sinyallerinin görev döngüleri.....	43
Şekil 4.5. Batarya paketi tasarımı.....	44
Şekil 4.6. Batarya paketi göstergeleri.....	44
Şekil 4.7. Batarya paketi kontrol bloğu ve içeriği	45
Şekil 5.1. Şarj konumunda hücrelerin dengeleme grafiği	46
Şekil 5.2. Deşarj konumunda hücrelerin dengeleme grafiği	46
Şekil 5.3. Batarya paketi şarj deşarj grafiği	47
Şekil 5.4. Sistemin akım ve gerilim grafiği.....	47
Şekil 5.5. Hücrelerin akım ve gerilim grafiği.....	48
Şekil 5.6. Hücrelerin akım grafiği	48
Şekil 5.7. Hücrelerin gerilim grafiği	48
Şekil 5.8. Farklı döngü miktarlarında sıcaklık değişim grafiği.....	49
Şekil 5.9. Farklı döngü miktarlarında kapasite değişim grafiği	49
Şekil 5.10. Pillerin farklı C oranlarında ve farklı sıcaklıklarda çevrim ömürleri.....	50
Şekil 5.11. Batarya hücrelerinin şarj deşarj işleminde sıcaklık değişim grafiği	50
Şekil 5.12. Batarya hücrelerinin akım ve gerilim değerlerinin genel grafiği	51

Şekil 5.13. Batarya hücrelerinin şarjdeşarj işleminde sıcaklık değişimleri genel grafiği ..	52
Şekil 5.14. Batarya paketine ait şarjdeşarj genel grafiği	52



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	: Amper
Ah	: Amper Saat (Şarj Kapasitesi)
D	: Duty Cycle (Görev Döngüsü)
Ohm	: Elektrik akımına karşı iletkenin gösterdiği direnç
V	: Volt
W	: Watt
Wh	: Watt Hour (Enerji Kapasitesi)

Kısaltmalar	Açıklamalar
BYS	: Batarya Yönetim Sistemi
CuSO₄	: Bakır Sülfat
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
İHA	: İnsansız Hava Aracı
Li-ion	: Lityum-İyon Batarya
LiFePO₄	: Lityum Demir Fosfat Batarya
LiPo	: Lityum-İyon Polimer Batarya
Li-S	: Lityum Sülfür Batarya
MOSFET	: Metal oksit yarı iletken alan etkili transistör
Ni-Cd	: Nikel-Kadyum Batarya
Ni-MH	: Nikel-Metal Hidrit Batarya
Ni (OH)₂	: Nikel Hidroksit
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
SOC	: State Of Charge (Şarj Seviyesi)
SOH	: State Of Health (Sağlık Durumu)
ZNSO₄	: Çinko Sülfat

1. GİRİŞ

Dünya genelinde artan nüfusa bağlı olarak insanoğlunun yaşamını sürdürebilmesi için ihtiyaçları geçmişten günümüze her geçen gün artmaktadır. Bu ihtiyaçlar yiyecek, barınma, savunma ve seyahat gibi doğrudan veya dolaylı olarak enerji kaynaklarıyla ilişkilidir. Geleneksel enerji kaynaklarından olan fosil yakıtların (kömür, doğalgaz, petrol vb.) çevreye olan kirletici etkisi nedeniyle alternatif kaynaklardan olan elektrik enerjisine yönelmek kaçınılmazdır. Gelişen teknolojinin unsurlarından olan insansız hava araçları (İHA), bilgisayar, telefon, uzay teknolojileri, tıbbi teknolojiler ve tamamen batarya veya batarya desteğiyle çalışması için tasarlanmış sistemlerde hafif, ucuz, güvenilir, yüksek enerji potansiyeline sahip ve kolay ulaşılabilir enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. (Efe ve Azra Güngör, 2021) Böylece geçmişten günümüze enerji kaynağı olarak en çok kullanılagelen, çevreyi kirletici etkisi olan fosil yakıtların sınırlı kapasiteye sahip olması alternatif enerji kaynaklarına yönelimi ve fosil yakıtlı içten yanmalı motorlara da alternatif teknoloji ürünlerine ihtiyacı zorunlu hale getirmiştir. Böylece elektrikli itki-motorlar geliştirilmeye başlanmıştır. Bütün bu gelişmeler kimyasal enerji depolayan bataryaların ön plana çıkmasını da sağlamıştır. Bu sebeple yaygınlaşmaya başlayan batarya teknolojisi üzerine yapılan bilimsel çalışmalar artmaya başlamıştır (Cao ve ark., 2008).

Batarya teknolojisi ve özellikle lityum tabanlı bataryalar kapasite, enerji yoğunluğu ve ağırlık bakımından halen geliştirilmektedir. İstenilen seviyede enerji düzeyi elde etmek için batarya hücreleri birbirine seri ve paralel bağlanarak batarya paketleri oluşturulur. Fakat batarya üretim süreci çoğu seri olarak üretilen diğer birçok ürünlerde olduğu gibi belirli toleranslar çerçevesinde gerçekleşir. Bu tolerans, batarya hücresinin fiziksel ve kimyasal yapısında küçük farklılıklara sebebiyet verir. Bu farklılıklar yüksek kapasiteli batarya paketi tasarımlarında kullanımlarına bağlı olarak hücrelerin elektriksel özelliklerinin farklılık göstermesine sebep olur. Bu farklılık da hücrelerde şarj ve deşarj işlemleri sırasında aşırı ısınma, şişme, kimyasalın hücre dışına akması şeklinde bozulmalara yol açar. Bu bozulmalar önlenmezse fiziksel olarak hücrelerin alev alması gibi istenmeyen durumlar yaşanabilir. Ayrıca aşırı deşarj pilde geri döndürülemez şekilde pilin bozulmasına yol açar (Cadar ve ark., 2010; Baykal, 2013). Bu gibi durumların yaşanmaması için Batarya Yönetim Sistemleri (BYS) kavramı ortaya çıkmıştır. Bu sistemde temel prensip batarya paketinde bulunan tüm hücrelerin gerilimleri ayrı ayrı izlenir, batarya paketinin akımı ölçülür, tüm hücrelerin veya belirli noktalarda hücrelerin

sıcaklıkları izlenerek hem kullanıcıya batarya paketi hakkında bilgi verilir hem de dengeleme sistemi ile birbirleri arasındaki dengesizlik giderilir.

Batarya yönetim sistemleriyle ilgili geçmişten günümüze dek birçok çalışma yapılmış ve her geçen gün hız kazanarak devam etmektedir. Bu çalışmalardan bazılarını aşağıda tarih sırasına göre değinilmiştir.

(Lindemark, 1992) Bağımsız Hücre Voltajı Dengeleyici (ICE), iki terminalli voltaj kontrollü bir akım şönt'ü tasarlamış, elde ettiği veriler ile batarya performansını incelemiştir.

(Kutkut ve Divan, 1996) seri bağlı batarya hücreler arasında enerjisini tüketen ve tüketmeyen hücre dengeleme yöntemlerini anlatan bir çalışma yapılmıştır.

(Kobzev, 2000) anahtarlama kapasitör yöntemini inceleyerek avantajlarını dile getirmiştir.

(Kong ve ark., 2006) şarj/deşarj esnasında hücre dengeleme devresi seçiminde yardımcı olması için yapılan çalışmada, dengeleme devrelerini yapılarına göre 4 gruba ayırarak detaylı analizlerini yapmışlardır.

(Cao ve ark., 2008) hücre dengeleme yöntemlerini, özelliklerine göre 3 gruba ayırarak yöntemleri birbirlerine göre karşılaştırarak analiz yapmışlardır.

(Speltino ve ark., 2010) anahtarlama kapasitör hücre dengeleme yönteminde dengeleme yapılacak hedef hücreyi tespit edebilmek için hücrelerin şarj durum tahminini Genişletilmiş Kalman Filtre yöntemini kullanarak gerçekleştirmiştir.

(Cadard ve ark., 2010) Yarım köprü dönüştürücü yöntemi kullanarak indüktörler üzerinden hücreler arasında enerji aktarımı yapan bir sistem tasarlamıştır.

(Daowd ve ark., 2011a) Birçok hücre dengeleme yöntemini MATLAB ile tasarlayarak bu yöntemleri inceleyip karşılaştırılmasını içeren bir çalışma yapmışlardır.

(Barlak ve Özkazanç, 2013) Tekrar şarj edilebilir bataryalar için şarj kapasitesinin radyal tabanlı fonksiyon kullanılarak tahminine yönelik yöntem önerilmiştir. Batarya modelinde elektriksel devre modeli kullanılmakta ve model parametrelerinin tahmini için ise kalman filtre tabanlı bir algoritma kullanılmıştır. Radyal tabanlı fonksiyonlar kullanılarak elde edilen bataryaya ait kapasite tahmin sonuçları, deneysel olarak ölçülen batarya kapasite değerleri ile karşılaştırılmaktadır.

(Balagopal ve Chow, 2015) Lityum iyon pillerin sağlık durumunu (SOH) ve işlev durumunu (SOF) tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan teknikleri ve bunların sınırlamalarını tartışmaktadırdır. Pil sağlığı (SOH) ve işlev durumunu (SOF) etkileyen faktörler tartışılmaktadır. Pilin sağlığı, esas olarak kapasite düşüşü ve i dirençteki artış ile temsil edilir. Pilin sağlığını temsil edebilecek diğer endeksler de kısaca tartışılmıştır.

(Soydaş, 2015) Hücre dengelemesi yapılması için aktif ve/veya pasif hücre dengeleme yöntemleri ile farklı tasarımlar yapılmıştır. Bu tasarımların bir kısmı çeşitli güneş enerjili ve elektrikli araç yarışlarında teste tabi tutulmuş ve neticesinde başarılı sonuçlar elde edilerek verimli batarya kullanımını gerçekleştirilmiştir.

(Shang ve ark., 2015) Hücreden hücreye doğrudan bir dengeleme yöntemi tasarlamış; bu tasarımda çalışma prensibi, hücre dengeleme performansı, eşitleme süresi tahmini gibi sonuçları karşılaştırmalı olarak ortaya çıkarmıştır.

(Lin ve Hua, 2017) Seri bağlı hücre bağlantılarını AC-bağlantı tekniği kullanarak akım beslemeli-itme-çekme dönüştürücü ile bir şarj dengeleyici tasarlamıştır.

(Sarıkurt ve Balıkcı, 2018) Batarya sağlığı için göreceli kapasite (GK) cinsinden basit bir tahmin yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem, güncel ve nominal kapasite değerlerinin karşılaştırılmasıdır.

(Tezde ve Okumuş, 2018) Coulomb sayma yöntemi kullanılmıştır. MATLAB Simulinkte batarya tasarımı oluşturularak SOC tahmini benzetimi yapılmıştır. Laboratuvarıda ise bataryanın şarj ve deşarj durumları için gerçek testler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre bataryanın şarj/deşarj karakteristik verileri elde edilmiştir. Böylece bataryanın şarj ve deşarj işlemleri için SoC tahmini yapılmıştır

(Ekici, 2019) Farklı kimyasal yapılara sahip (Lityum Demir Fosfat, Nikel Metal Hidrit, Nikel Kadmiyum ve Kurşun Asit) olan dört farklı pil hücreleri ile tasarlanan batarya paketleri aynı batarya yönetim sistemi ile iki farklı şekilde kontrol edilmiştir. İlk yöntemde bataryalar DC besleme ile şarj edilmiştir. İkinci yöntemde ise bataryalar hibrit elektrikli araç sistemine entegre edilip kullanılarak şarj ve deşarj işlemine tabi tutulmuştur. İki yöntemde de batarya yönetim sisteminin çalışması analiz edilmiştir. Yani farklı kimyasal yapılara sahip bataryaların tek bir batarya yönetim sistemi ile kontrol edilmesi incelenmiştir

(Tosun, 2019) Elektrikli bisiklet için on hücreli seri bağlı olarak tasarlanmış batarya paketine, BYS gerçekleştirilmiş ve bu batarya yönetim sistemi içerisinde pasif dengeleme yöntemi uygulaması yapılmıştır.

(Kıvrak ve ark., 2020) Dört hücreli batarya paketi elektrikli araçlarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Batarya yönetim sisteminde dengeleme yöntemi olarak direnç tabanlı pasif kontrol yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde kullanılması gereken direnç yerine P kanallı metal oksit yarı iletken anahtarlama elemanı kullanılarak gerilim dengeleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

(Yurdakul ve ark., 2020) PV sistemlerinde kullanılan bataryaların verimini artırmak, şarj ve deşarj'ın kontrollü olması için arduino tabanlı şarj kontrol ünitesi tasarlanmış ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Matlab/Simulink üzerinde DA-DA azaltan dönüştürücülü tasarım yapılmıştır. Tasarlanan sistem kapalı çevrim üzerinden PI (Oransal-İntegral) denetleyici ile gerçekleştirilmiştir.

(Aktaş ve ark., 2020) Elektrikli araçlarda kullanılmak amacıyla yirmi hücreli batarya paketi için pasif hücre dengeleme tabanlı Batarya Yönetim Sistemi (BYS) tasarlanmıştır. Üç hücreli BYS uygulaması da gerçekleştirilmiştir.

(Menak ve ark., 2021) Batarya yönetim sisteminde paketin ve hücrelerin termal yönetimi ve tasarımları, dengelenmesi ve güvenliği için yapılan çalışmalar derlenmiştir. Bu yöntemlerin, avantaj-dezavantajları ve birbirlerine göre karşılaştırmaları yapılmıştır.

(Conway, 2021) Eşit dönüş oranına sahip iki diyotlu küçük ve izolasyonlu transformatöründen oluşan aktif dengeleme ünitesi ve izleme sistemi tasarlanmıştır.

(Üçgün ve ark., 2021) İnsansız Hava Araçlarında (İHA) kullanılan Lityum Polimer (LiPo) bataryaların şarj işlemi sırasında bir arayüz tasarımı ile gerçek zamanlı olarak takip edebilmeyi imkân sağlayacak şekilde sistem gerçekleştirilmiştir. İHA'nın bacak uçlarına yerleştirilen bakır konnektörlerin, şarj pedine teması halinde güç aktarımı sağlanmıştır. Ayrıca BMS kartı ile LiPo bataryanın balanslı bir şekilde şarj edilmesi de sağlanmıştır.

(Tarhan, 2022) Farklı iki batarya tipi içinde kullanılabilen BYS tasarlanmış pasif dengeleme yöntemi uygulaması yapılmıştır.

(Kara ve ark., 2023) Li-ion pillerin yüzey sıcaklığını ve ortam sıcaklığını giriş verisi olarak çıkış akımını belirleyen bulanık mantık denetleyici tasarlanmıştır. Bu yöntemde Panasonic NCR-18650B lityum iyon pil üzerinde fiziki testler yapılmış 5°C, 23°C ve 36°C

ortam sıcaklığında pilin şarj kapasitesinde sırasıyla %0,2, %2,5, %1,2 oranlarında kazanç sağlanmıştır.

Bu tezde yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Birinci bölümde, Batarya yönetim sisteminin alt bileşenlerinden bahsedilmiştir. Bu alt bileşenlerden olan hücre dengelemenin önem ve amacından bahsedilerek konuyla ilgili yapılan çalışmaların geçmişten günümüze literatür taraması yapılmıştır.

İkinci bölümde, bataryalar hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Batarya paketlerinde kullanılan pil teknolojileri, Batarya Yönetim Sistemi'nin (BYS) görevleri ve topolojileri anlatılmıştır. Daha sonra BYS'de kullanılan hücre dengeleme yöntemleri ile birlikte bu yöntemlerin olumlu ve olumsuz yönlerinden bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde, İHA'larda kullanılabilecek güç kaynağının bir parçası olan jeneratör sistemi tasarlanmış ve bu sistemin MATLAB-Simulink ortamında modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Jeneratör sisteminde kontrollü gerilim üretimi için PID denetleyici kullanılarak aşırı akım gerilim yükselmesinin önüne geçilmiştir.

Dördüncü bölümde, İHA'larda kullanılabilecek güç kaynağının diğer bir parçası olan Batarya Yönetim Sistemi'nde (BYS) kullanılmak üzere indüktif tabanlı aktif hücre dengeleme sistemi tasarlanmış ve bu sistemin MATLAB-Simulink ortamında modellenmesi gerçekleştirilmiştir.

Beşinci bölümde ise bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve öneriler ifade edilmiş ve tasarlanan bu sistemin geliştirilebilmesi için yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

Bu araştırmanın amacı, insansız hava araçlarına yönelik jeneratör sistemleri için batarya yönetim sistemi (BYS) tasarımının yapılması ve bu tasarımın simülasyon ortamında gerçekleştirilerek sonuçlarının karşılaştırılmasıdır.

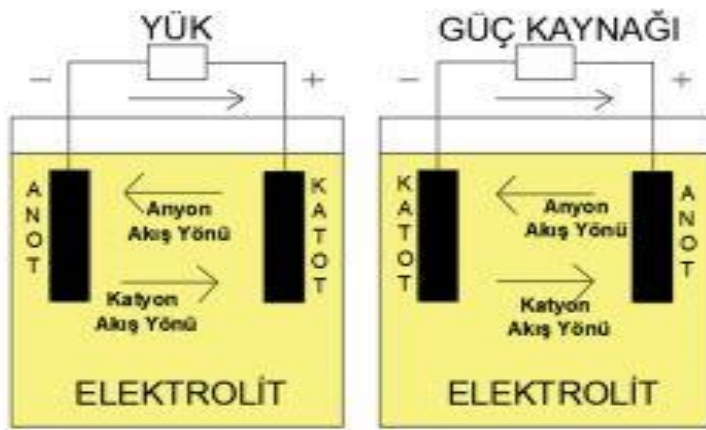
Bu çalışmada tasarlanan batarya yönetim sisteminde indüktör tabanlı aktif hücre dengeleme uygulaması yapılmıştır. Simülasyon ortamında tasarım ve test çalışmaları gerçekleştirilmiş sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca sıcaklık ve batarya hücresi döngü miktarının performans üzerindeki etkisi de test edilerek sonuçlar elde edilmiştir.

2. BATARYALAR

Bu bölümde, bataryalara ait literatür kavramları ve batarya teknolojisinde kullanılan pil çeşitlerine değinilmiştir. Batarya pil hücrelerine ait özellikler ve batarya dengeleme yöntemlerinin bazılarından bahsedilmektedir.

2.1. Batarya Sistemleri

Pil, içerisinde barındırdığı kimyasal enerjiyi, elektriksel bir forma dönüştürülebilmesi için indirgenme-yükseltgenme (redoks) reaksiyonları ile elektron akışı üreten belirli sayıda hücre içeren bir elektriksel sistemdir. Bu yapıyı oluşturan temel bileşenler pozitif (katot) elektrot, negatif (anot) elektrot ve bu iki elektrot arasında iyonları taşıyabilen genellikle sıvı veya jel yapıda olan elektrolittir. Bu temel bileşenler geçmişten günümüze birçok araştırmanın konusu olmuş ve gelişime uğramıştır. Bu gelişmeler ile farklı yapı, elektrokimya, nominal voltaj ve enerji yoğunluğuna sahip çok sayıda pil üretilmiştir. Pilin çalışma prensibi Şekil 2.1’de görülmektedir (Efe ve Azra Güngör, 2021).



Şekil 2.1. Pil yapısı

Batarya paketleri, pil hücrelerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulan pil gruplarıdır. Bataryalar şarj edilebilme durumuna göre birincil ve ikincil tip olmak üzere iki kısma ayrılırlar.

2.1.1. Birincil (Primary) Tip Bataryalar

Birincil tip bataryalar, hücredeki elektrokimyasal reaksiyon tersine çevrilemediği için yeniden şarj edilemeyen yani yeniden kullanılamayan tek kullanımlık bir pil türüdür.

Enerji yoğunlukları yüksek, güç yoğunlukları düşüktür. Alkali piller örnek olarak gösterilebilir (Berecibar ve ark., 2016).

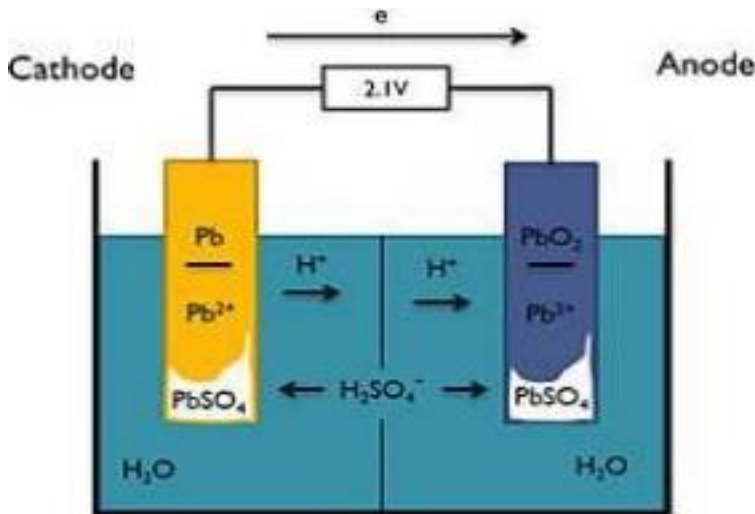
2.1.2. İkincil (Secondary) Tip Bataryalar

İkincil tip bataryalar, kullanımdan sonra şarj edilebilen yani boşaltıldıktan sonra tekrar şarj edilebilen bir pil türüdür. Yüksek güç yoğunluğu ve yüksek deşarj oranına sahiptir. (Çetin ve ark., 2021) Aynı zamanda depolama bataryaları ve akümülatörler olarak da adlandırılırlar. Akümülatör terimi, tersine çevrilebilir bir elektrokimyasal reaksiyon yoluyla enerji toplayıp depoladığı için kullanılır (Berecibar ve ark., 2016).

2.2. Batarya Türleri

2.1.3. Kurşun-Asit Bataryalar

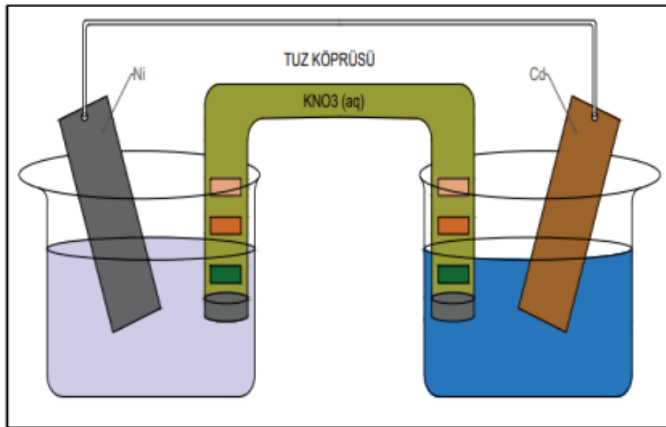
Çevrim ömrü ve enerji yoğunluğu düşük, yüksek hız performansı olan kurşun-asit bataryalar en eski batarya çeşitlerinden biridir. Kurşun asitli bataryalar süngerimsi metal kurşun metali, kurşun dioksit ve sülfürik asit çözeltisinden oluşur. Kullanılan kurşun materyallerinden dolayı kurşun asit batarya ismini almıştır. Ayrıca bu materyallerden dolayı sağlık açısından zararlıdır. Diğer batarya tiplerine kıyasla daha uzun ömürlü ve düşük maliyet açısından avantajlıdır. Günümüzde araçların elektriksel sistemlerinde, forklift, golf arabası, kesintisiz güç kaynaklarında kullanılmaktadır (Yong ve ark., 2015) . Şekil 2.2’de kurşun asit batarya yapısı verilmiştir (Huang ve ark., 2016).



Şekil 2.2. Kurşun-Asit batarya yapısı

2.1.4. Nikel-Kadyum Bataryalar (Ni-Cd)

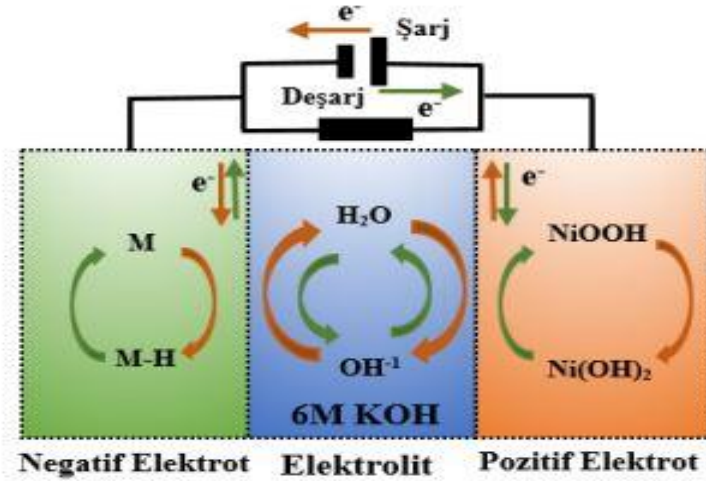
Elektrot olarak katot için nikel hidroksit, anot için kadmiyum ve elektrolit olarak alkalin potasyum hidroksit kullanır. Maliyet bakımından uygun olmaları ve emniyet açısından uygun olmaları sebebiyle uzay araştırmalarını başlatmak için uzay gemilerinde kullanılmıştır. Ayrıca taşınabilir elektrikli cihazlar, telekomünikasyon sistemi, acil aydınlatmalar, güneş enerji istasyonları gibi alanlarda kullanılan batarya tipidir. Yüksek akımlarda şarj edilebilmeleri ve az ısınmaları gibi avantajları olsa da düşük şarj-deşarj verimliliği, kendi kendinedeşarj olması, hafıza etkisine sahip olması ve soğuk havalarda performans kaybı gibi dezavantajları vardır. Ağır metal türü olan kadyum sağlık açısından zararlıdır. Bu sebepler neticesinde nikel metal hidrit bataryalar geliştirilmiştir (Yong ve ark., 2015). Nikel kadmiyum batarya yapısı Şekil 2.3'te verilmiştir (Efe ve Azra Güngör, 2021).



Şekil 2.3. Nikel-kadyum (Ni-Cd) batarya yapısı

2.1.5. Nikel-Metal Hidrit Bataryalar (Ni-MH)

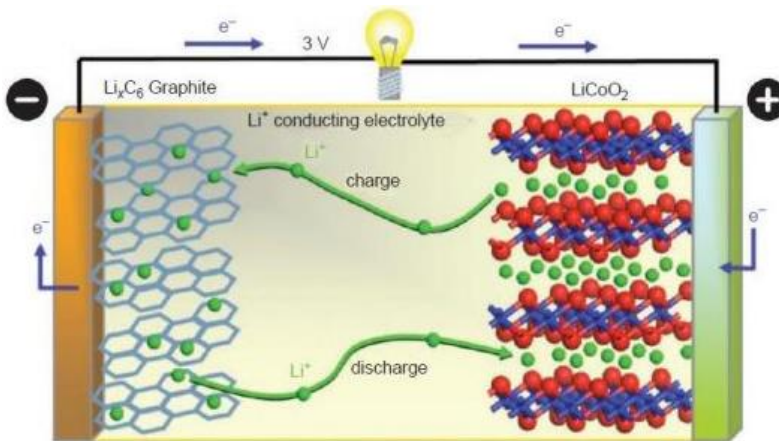
Elektrot olarak katotta Ni(OH)_2 , anotta metal hidrür bulunmakta ve elektrolit olarak potasyum çözeltisi kullanılmaktadır. Nikel metal hidrit (NiMH) bataryalar, Nikel-kadmiyum pile göre %40 daha fazla enerji yoğunluğu, %30-40 daha fazla kapasite ve çevre dostu olması içerisinde çevreyi kirlletmeyen bileşimler olması önemli özelliğidir. Hafıza etkisine nikel-kadmiyum pillerden daha az eğimlidir. (Yong ve ark., 2015) Lityum iyon pil teknolojisinden önce birçok sektörde özellikle elektrikli araç sektöründe tercih edilmiştir. (Kiehne ve Dekker, 2003). Nikel-metal hidrit (Ni-MH) pil yapısı Şekil 2.4'te verilmiştir (Küçükdeveci, 2018).



Şekil 2.4. Nikel-metal hidrit (Ni-MH) pil yapısı

2.1.6. Lityum-İyon Batarya (Li-ion)

Yük taşıyıcı olarak lityum iyonlarının kullanıldığı enerji depolama birimlerine Li-ion batarya denmektedir. Çalışma prensibi lityum iyonlarını şarj esnasında pozitif elektrot negatif elektrota sağlar. Deşarj esnasında ise lityum iyonları negatif elektrot pozitif elektrota sağlar (Horiba, 2014). Bu batarya teknolojisi 1991 yılında Sony tarafından ticarileştirilmiştir. Bu bataryalar günümüzde dizüstü bilgisayar, cep telefonu ve daha birçok mobil elektronik cihazlarda kullanılmaktadırlar. Hafif olmaları, yüksek enerji ve güç yoğunluğu, yüksek çevrim sayıları, kendi kendine düşük deşarj oranı, yüksek güvenilirlik, hızlı şarj-deşarj oranları gibi birçok avantaj sayesinde tercih edilmektedir. Sınırlı üretim kapasitesi ve patlama riskleri gibi dezavantajları vardır. Lityum iyon pil yapısı Şekil 2.5'te verilmiştir (Darikas, 2018).



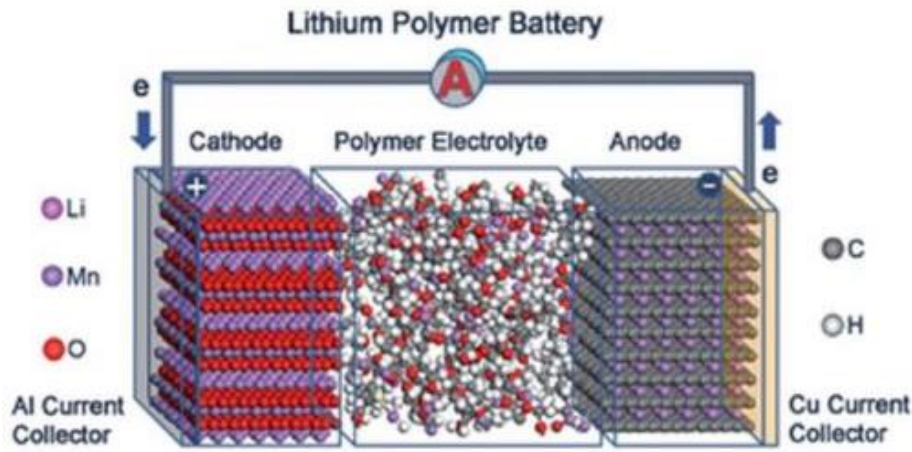
Şekil 2.5. Lityum iyon pil yapısı



Şekil 2.6. Lityum iyon pil hücreleri

2.1.7. Lityum-İyon Polimer Batarya (LiPo)

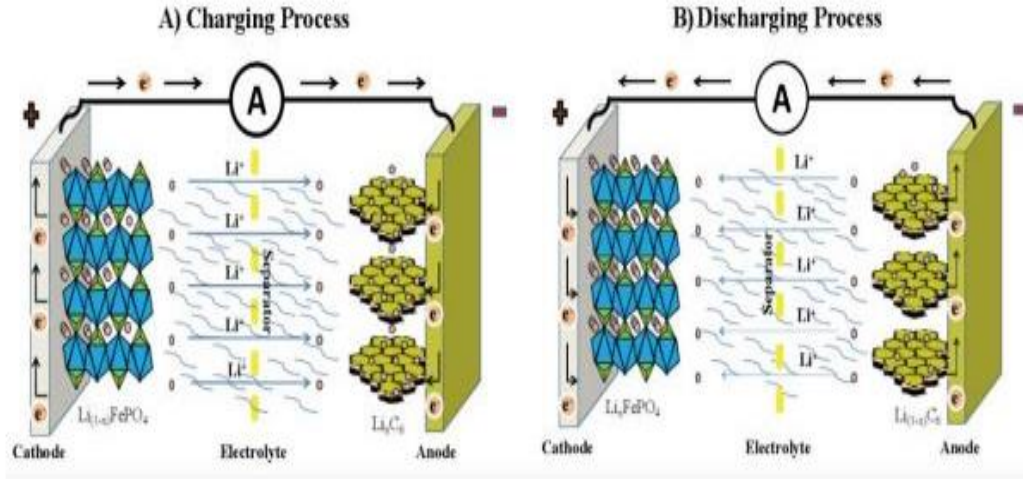
Lityum iyon polimerler, lityum-iyon pillerle pozitif ve negatif elektrot malzemeleri olarak aynı özelliklere sahiptir. Farkları ise elektrolit çözeltisinde polimer malzeme kullanılmasıdır. Kendi kendine deşarj olması en düşük olan lityum iyon polimer bataryalar diğer lityum türlerine göre avantajlıdır. Elektrolit olarak kullanılan polimer ise bataryaların kolay ve çeşitli şekillerde üretim olanağı sağlamıştır (Baygüneş, 2019). Ayrıca polimer elektrolit batarya üretiminde hız ve esneklik sağlanmıştır (Rigan, 2020). Lityum polimer pil yapısı Şekil 2.7’de verilmiştir (Long ve ark., 2016).



Şekil 2.7. Lityum polimer pil yapısı

2.1.8. Lityum Demir Fosfat Batarya (LiFePO₄)

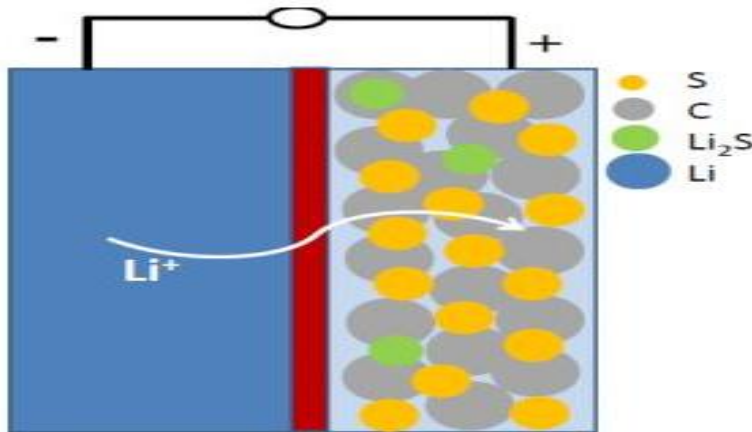
Lityum Demir Fosfat bataryalarda yüksek güç yoğunluğu, güvenlik ve çevrim sayısı olan batarya türüdür. Li-ion bataryalara göre daha düşük enerji yoğunluğuna ve kapasiteye sahip olması dezavantaj olarak görülmektedir (Yong ve ark., 2015). Lityum demir fosfat pil yapısı Şekil 2.8’de verilmiştir (Toprakçı ve ark., 2011).



Şekil 2.8. Lityum demir fosfat pil yapısı

2.1.9. Lityum Sülfür Batarya (Li-S)

Lityum Sülfür bataryalarda anot; lityum metali, katot ise sülfür ve gözenekli karbondan oluşmaktadır. Lityum ve Sülfür arasında indirgenme ve yükseltgenme (redoks) reaksiyonları ile enerji üretimi meydana gelir. Lityum sülfür bataryalar bakım gerektirmezler. Ayrıca yüksek kapasite ve uzun raf ömrüne sahiptirler. Bunlarla birlikte, kendi kendine yüksek deşarj oranı, sınırlı çevrim ömürleri, düşük şarj verimi ve güvenlik açısından zayıf olması dezavantajlarıdır (Efe ve Azra Güngör, 2021).



Şekil 2.9. Lityum sülfür pil yapısı

Li-ion batarya teknolojisinde geliştirilen tasarımlar sayesinde farklı türler oluşturulmuştur. Bu türlerinden bazıları ve diğer pil türlerinin karşılaştırması Tablo 2.1’de verilmiştir (Yong ve ark., 2015).

Tablo 2.1. Pil türlerinin karşılaştırılması

Batarya Türleri	Nominal Gerilimi (V)	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Çevrim Ömrü	Maliyet	Hafıza Etkisi
Pb-acid	2,0	35	1000	Düşük	Hayır
Ni-Cd	1,2	50-80	2000	Düşük	Evet
Ni-MH	1,2	70-95	<3000	Düşük	Nadir
Zebra	2,6	90-120	>1200	Düşük	Hayır
Zn-air	1,65	460	200	Düşük	Hayır
LCO	3,7-3,9	150	500-1000	Orta	Hayır
NCA	3,65	130	500	Orta	Hayır
NMC	3,8-4,0	170	1000-2000	Orta	Hayır
LMO	4	120	300-700	Orta	Hayır
LiFePO ₄	3,3	130	1000-2000	Yüksek	Hayır
LTO	2,3-2,5	85	3000-7000	Yüksek	Hayır
Li-S	2,5	350-650	300	Düşük	Hayır
Li-air	2,9	1300-2000	100	-	Hayır

2.2. Lityum İyon Hücre Tipleri

Hücre tipleri silindirik, prizmatik ve kese olmak üzere üç gruba ayrılır.

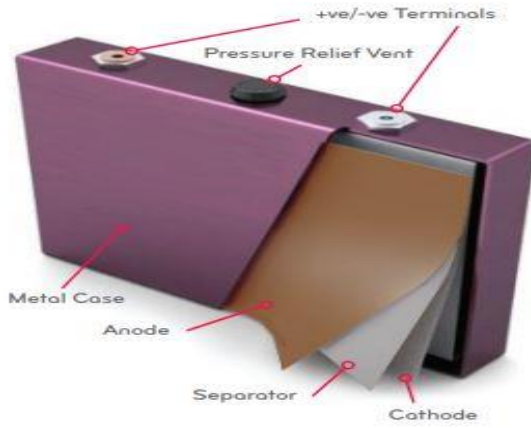
2.2.1. Silindirik Tip

Lityum-iyon pil türlerinin en ucuz tasarımıdır. Akıllı telefonlar, elektrikli aletler ve elektrikli motosikletler gibi birçok uygulamada en yaygın kullanılan 18650 olarak bilinen biçimidir. 18650 pildeki; 18, 18 mm'lik bir çapı; 65, 65 mm'lik bir uzunluğu ve 0, silindirik bir pili gösterir (Darikas, 2018). Silindirik tasarımlı pil hücresi Şekil 2.10'da verilmiştir (J. M. B. Systems, 2012).

**Şekil 2.10.** Silindirik tasarımlı pil hücresi

2.2.2. Prizmatik Tip

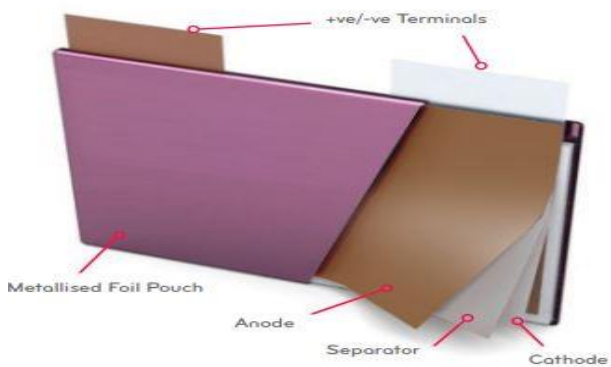
Lityum-iyon prizmatik hücrelerin muhafazası için alüminyum veya çelik kutular kullanılır. Metal kasa, hücreye mekanik sağlamlık ve nem koruması sağlar. Ayrıca kese tipi hücrelerde kullanılamayan basınç tahliye delikleri gibi güvenlik amaçlı tasarıma imkân sağlar (Darikas, 2018). Prizmatik tasarımlı pil hücresi Şekil 2.11’de verilmiştir (J. M. B. Systems, 2012).



Şekil 2.11. Prizmatik tasarımlı pil hücresi

2.2.3. Kese Tip

Lityum-iyon kese hücreleri, iç elektrot yığınının yumuşak bir plastik-alüminyum paket içerisinde bulunan hücrelerdir. Akım toplayıcılar, dış bağlantıyı sağlamak için contalardan çıkıntı yapan terminal sekmelerine bağlanır. (Darikas, 2018). Kese tasarımlı pil hücresi Şekil 2.12’de verilmiştir (J. M. B. Systems, 2012).



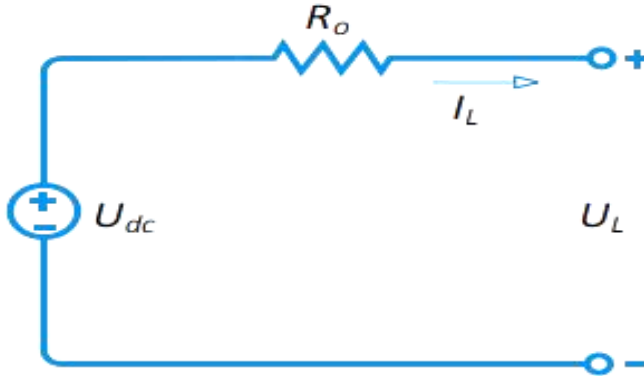
Şekil 2.12. Kese tasarımlı pil hücresi

2.3. Lityum İyon Bataryalar İçin Eşdeğer Devre Modelleri

Uygulamalarda lityum iyon bataryaların kullanılabilirliğini iyileştirmek için farklı eşdeğer devre modelleri oluşturulmuş ve değerlendirmeleri yapılmıştır. Bataryanın çalışma prensipleri ve dinamik özelliklerine göre eşdeğer devre modeli oluşturmak için dirençler, kapasitörler ve voltaj kaynakları kullanılarak geliştirilmiştir. Eşdeğer devre modelleri olarak “Rint”, “RC”, “Thevenin” ve “PNGV” modelleri kullanılmaktadır (He ve ark., 2011).

2.3.1. Rint modeli

Rint modeli, Şekil 2.12’de ve eşitlik (2.1)’de gösterildiği gibi U_{dc} gerilim kaynağı ve R_0 direnci ile oluşturulmuştur. U_{dc} ideal şartlarda batarya için açık devre voltajını ifade eder. Direnç R_0 ve açık devre gerilimi olan U_{dc} ; SOC, SOH ve sıcaklığın fonksiyonlarıdır. I_L , deşarj anında pozitif ve şarj anında negatif değerli olan yük akımıdır. U_L ise şarj esnasında terminal gerilimidir. Rint modelinin şematik diyagramı Şekil 2.13’te verilmiştir (He ve ark., 2011).

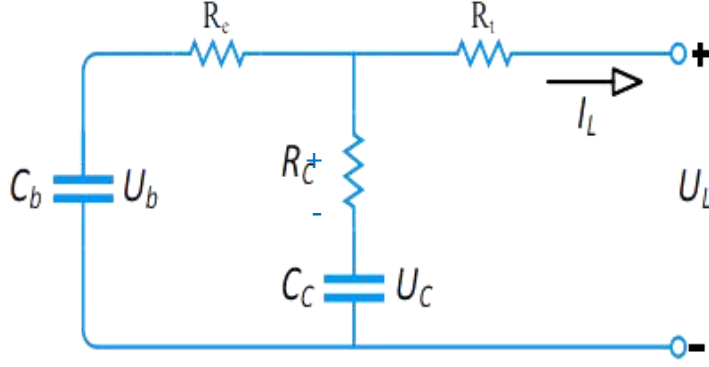


Şekil 2.13. Rint modelinin şematik diyagramı

$$U_L = U_{dc} - I_L \times R_0 \quad (2.1)$$

2.3.2. RC modeli

RC modeli, ünlü batarya üretim şirketi olan SAFT tarafından tasarlanmıştır. Şekil 2.13’te, eşitlik (2.2)’de gösterildiği gibi üç direnç (R_t , R_e , R_c) ve iki kapasitörden (C_c , C_b) oluşmaktadır. Büyük kapasiteli C_b kondansatörü, bataryanın yükü depolayabilme kapasitesini ifade eder. Şarj miktarı (SOC), kapasitördeki toplam voltaj ile belirlenebilir. Dirençler R_t , R_e , R_c olarak R_t terminal direncini, R_e uç direncini ve R_c kapasitör direncini ifade eder. RC modelinin şematik diyagramı Şekil 2.14’te verilmiştir (He ve ark., 2011).



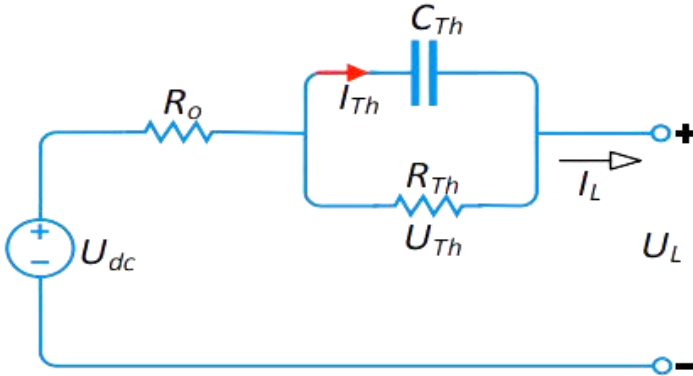
Şekil 2.14. RC modelinin şematik diyagramı

$$\begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_b(R_e+R_c)} & \frac{1}{C_b(R_e+R_c)} \\ \frac{1}{C_c(R_e+R_c)} & \frac{-1}{C_c(R_e+R_c)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_c}{C_b(R_e+R_c)} \\ \frac{-R_e}{C_c(R_e+R_c)} \end{bmatrix} \times [I_L] \quad (2.2)$$

$$[U_L] = \begin{bmatrix} \frac{R_c}{(R_e+R_c)} & \frac{-R_c}{(R_e+R_c)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -R_t - \frac{R_e \times R_c}{(R_e+R_c)} \end{bmatrix}$$

2.3.3. Thevenin modeli

Thevenin modeli, Rint modeli geliştirilmesiyle yani paralel bir RC, seri olarak eklenerek elde edilir. Şekil 2.14'te ve eşitlik 2.3'te gösterildiği gibi iç dirençler, açık devre gerilimi U_{dc} ve eşdeğer kapasiteler ile üç bölümden oluşturulmuştur. R_0 Omik direnç, R_{TH} polarizasyon direnci, C_{TH} Eşdeğer kapasitans, I_{TH} ise C_{TH} 'ın çıkış akımıdır. Thevenin modeli şematik diyagramı Şekil 2.15'te verilmiştir (He ve ark., 2011).



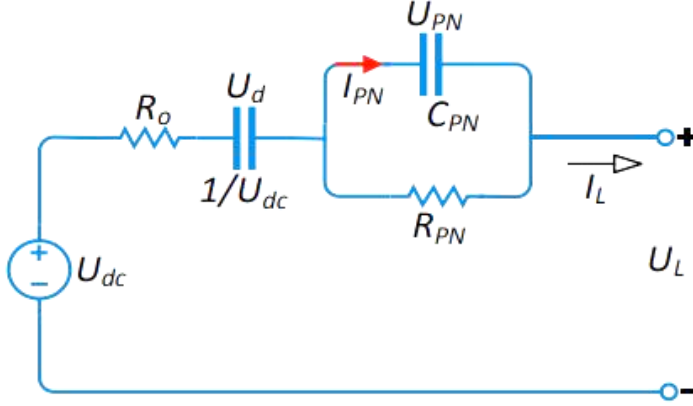
Şekil 2.15. Thevenin modeli şematik diyagramı

$$U_{TH} = \frac{U_{Th}}{R_{Th} \times C_{Th}} + \frac{I_L}{C_{Th}} \quad (2.3)$$

$$U_L = U_{dc} - U_{Th} - I_L \times R_0$$

2.3.4. PNGV modeli

PNGV modeli Şekil 2.15'te ve eşitlik 2.4'te gösterildiği gibi Thevenin modelinin geliştirilmesiyle yani bir kapasitör eklenerek elde edilmiştir. I_{PN} , C_{PN} 'nin çıkış akımıdır. PNGV modeli şematik diyagramı Şekil 2.16'da verilmiştir (He ve ark., 2011).



Şekil 2.16. PNGV modeli şematik diyagramı

$$\begin{aligned} U_d &= U_{dc} \times I_L \\ U_{PN} &= \frac{U_{PN}}{R_{PN} \times C_{PN}} + \frac{I_L}{C_{PN}} \\ U_L &= U_{dc} - U_d - U_{PN} - I_L \times R_0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

2.4. Bataryalarla İlgili Temel ve Yönetimsel Tanımlar

Bataryalar konusunda kullanılan kavramlar şunlardır: hücre, gerilim değeri, şarj kapasitesi, enerji kapasitesi, enerji yoğunluğu, spesifik enerji ve spesifik güç, batarya çalışma sıcaklığı, deşarj derinliği ve batarya çevrim sayısıdır. Bu kavramlar sırasıyla bundan sonraki kısımlarda incelenmektedir.

2.4.1. Hücre

Kimyasal depolanmış enerjiden elektriksel enerji üretebilen ve elektriksel enerjiyi de kimyasal enerji halinde depolayabilen en temel birimdir. Bir hazne içerisinde bulunan pozitif ve negatif iki elektrot, ayırıcı (separatör) ve sıvı elektrolitten oluşur.

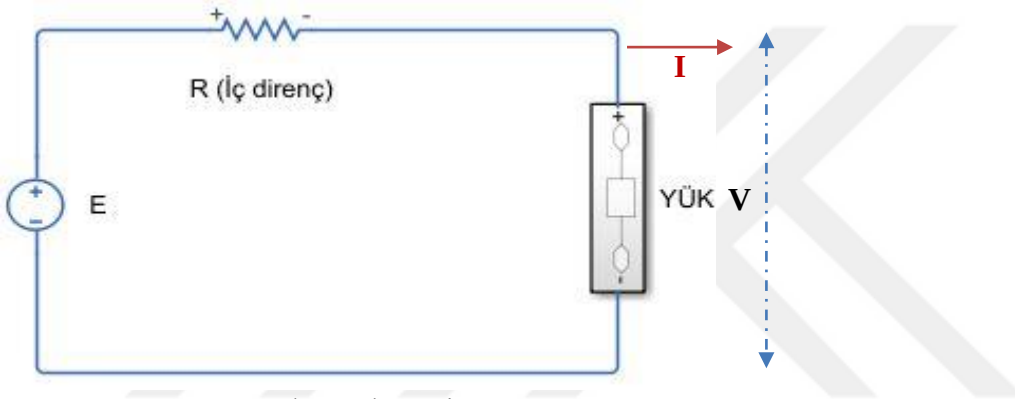
2.4.2. Gerilim Değeri

2.4.2.1. Nominal Gerilim

Hücrenin kimyasal yapısına bağlı olarak anma gerilimi olarak da ifade edilen üreticinin belirttiği etiket değeri olan ortalama çalışma gerilimidir.

2.4.2.2. Kesme Gerilimi

Kesme gerilimi (Cutoff Voltage) ise hücre veya bataryanın deşarj işleminin sona erdirilmesi gereken uç gerilimidir. Yani deşarj esnasında izin verilen minimum gerilim değeridir. Genellikle pilin “boş” durumunu tanımlar. Bataryanın eşdeğer devresi Şekil 2.17’de gösterilmiştir. Batarya paketi oluşturulurken her bir hücre aynı parametrelere sahip belirli düzende seri, paralel veya seri-paralel gruplar halinde bağlanmasıyla oluşturulur. Hücreler aynı parametrelere sahip olsa bile üretim toleransı sebebiyle yapısal farklılıklara sahiptir. Bu yapısal farklılık batarya hücrelerinin iç dirençlerinin farklı olmasına sebep olur. İç direnç batarya içerisindeki reaksiyonların hızını temsil eden eşdeğer dirençtir. Batarya deşarj oldukça iç direnç artış gösterir.



Şekil 2.17. Batarya eşdeğer devresi

Şekil 2.17’deki eşdeğer devresinden anlaşılacağı gibi yük’e sağlanan gerilim terminal gerilimi V iken bataryanın sağlayabildiği gerilim E olacaktır. Batarya’nın yüke sağladığı akım I ise eşitlik 2’de gösterilen denklem elde edilir. Batarya boşta iken $I=0$ olacağı için $V=E$ olacaktır. Deşarj esnasında I akımı pozitif değerli olacak ve terminal gerilimi olan V değeri $I \cdot R$ kadar azalacaktır. Şarj esnasından I akımı negatif değerli olacağı için terminal gerilimi olan V değeri $I \cdot R$ kadar artacaktır (Kundakçı, 2016). Eşitlik 2.5’de ifade edilen denklemde E , etiket değeri olan nominal gerilimdir. V ise terminal gerilimidir.

$$V = E - I \cdot R \quad (2.5)$$

2.4.3. Depolama Kapasitesi

Bataryaların belirli bir miktar akımı ne kadar süre ile verebileceğini ifade eden parametredir. C-oranı, $C_{Ah} = I \times t$ (Akım x Zaman) bir pilin maksimum kapasite ile şarj/deşarj hızının ölçüsünü ifade eder.

Tablo 2.2’de 48 Ah kapasiteli bir batarya farklı C oranlarına göre karşılaştırılması verilmiştir. 48 Ah kapasiteli batarya paketi 1 saat boyunca 48 A, 2 saat boyunca 24 A, 30 dk boyunca ise 96A sağlayabilir. Bataryalar 1C oranında şarj edildiğinde en verimli ve yüksek çevrim ömrüne sahip olmaktadır (Rezvanizani ve ark., 2014).

Tablo 2.2. C oranlarının kıyaslanması

C Oranı (C)	Kapasite (Ah)	Akım (Amper)	Zaman (Saat)
0,5C	48 Ah	24	2
1C	48 Ah	48	1
2C	48 Ah	96	0.5
4C	48 Ah	192	0.25

2.4.4. Enerji Kapasitesi (Wh)

Bataryaların enerji kapasitesi, bataryada depolanan elektrik enerjisi miktarıdır. Batarya geriliminin şarj kapasitesi ile çarpılmasıyla elde edilmekte olup birimi Wh’dır. Örneğin 100 Ah kapasiteli 12 V’luk bir bataryanın enerji kapasitesi 1200 Wh’dır (Kundakçı, 2016).

2.4.5. Enerji Yoğunluğu (Wh/L)

Bataryaların enerji yoğunluğu, birim hacimde depolanan enerji miktarıdır. Birimi Wh/L’tir. Hacim olarak küçük olmasının yanı sıra yüksek enerji miktarı sunması pillerde önemli bir özelliktir (Erdoğan, 2020).

2.4.6. Spesifik Enerji ve Spesifik Güç

Bataryaların önemli parametrelerden olan spesifik (özellik) enerji, birim kütlede depolanan enerji miktarıdır. Birimi Wh/kg’dır. Spesifik (özellik) güç ise, maksimum gücün kütleye oranıdır. Birimi W/kg’dır. Yüksek güç ihtiyacının karşılanabilmesi için spesifik güce sahip bataryalar tercih edilirken uzun süreli enerji talebinin karşılanabilmesi için spesifik enerjisi yüksek bataryalar tercih edilmektedir (Kundakçı, 2016).

2.4.7. Batarya Çalışma Sıcaklığı

Tablo 2.3’te verilen bataryaların türlerine göre çalışma sıcaklıkları farklıdır (Yong ve ark., 2015). Yüksek performans elde edebilmek için bataryaların uygun çalışma sıcaklığında çalıştırılması gerekir.

Tablo 2.3. Batarya türlerine ait çalışma sıcaklığı

Batarya Türleri	Çalışma Sıcaklığı (°C) (Min-Max)
Pb-acid	-15, +50 °C
Ni-Cd	-20, +50 °C
Ni-MH	-20, +60 °C
Zebra	+245, +350 °C
Zn-air	-10, +55 °C
Li-ion	-20, +60 °C
LiPo	-20, +60 °C
LiFePO ₄	-45, +70 °C
Li-S	-60, +60 °C
Li-air	-10, +70 °C

2.4.8. Şarj Durumu (SOC)

Batarya kapasitesinin toplam şarj durumunun ne kadarının dolu olduğunu ifade eder. Bir başka ifadeyle doluluk durumudur. Birimi yüzde (%)’dir.

2.4.9. Deşarj Derinliği (DOD)

Bataryanın depolama kapasitesinin ne kadarının harcandığını ifade eder. Bir başka ifadeyle maksimum kapasitenin yüzde olarak ne kadarının boşaldığını ifade eder (Erdoğan, 2020). En az %80 bir deşarj derin deşarj olarak adlandırılır.

2.4.10. Sağlık Durumu (SOH)

Genel olarak bataryanın mevcut andaki tam kapasitenin, üretildiği andaki ilk kapasiteye oranıdır. Başka bir ifadeyle SOH, pil ömrünün sonlanmasının ne kadar süreceğini belirtmektedir. Esas olarak kapasitenin, iç direncin, şarj tutma kabiliyetinin, kendi kendine deşarj olmasının bir ölçüsüdür.

2.4.11. Batarya Çevrim Ömrü

Yeniden şarj edilebilir (sekonder) bir pilin şarj kabul etme yeteneğini kaybetmeden çevirebileceği şarj-deşarj sayısıdır. Piller şarj-deşarj edildikçe kimyasal deformasyona uğrarlar. Çevrim ömrü belirli koşullarda tahmin edilmektedir. Pil tipine, kimyasal yapısına, deşarj derinliğine, sıcaklık ve nem gibi dış etmenlere de bağlıdır.

2.5. Batarya Yönetim Sistemleri (BYS)

Batarya paketi oluşturulurken her bir hücre aynı parametrelere sahip belirli düzende seri, paralel veya seri-paralel gruplar halinde bağlanmasıyla oluşturulur. Hücreler aynı parametrelere sahip olsa bile üretim toleransı sebebiyle yapısal farklılıklara sahiptir (Tian ve ark., 2018). Bu yapısal farklılıklar hücrenin şarj-deşarj döngüsü esnasında hücrelerin şarj seviyesi durumlarının değişimine yol açar. Hücrelerin şarj seviyelerinin farklı olması batarya ömrünü ve kapasitesini sınırlandırmaktadır. Seri bağlı batarya paketindedeşarj noktasını en düşük gerilime sahip hücre belirlemektedir ve paket ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Yüksek gerilime sahip hücre ise şarj sırasında denge kaybına neden olur böylece düşük gerilime sahip hücrenin tam dolmasına engel olur. Bu problemi ortadan kaldırmak için dengeleme sistemine ihtiyaç duyulur. Dengeleme devresi bir koruyucu gibi çalışma durumlarını kontrol ederek her bir hücrenin optimum düzeyde çalışmasını ve dengeyi korumasını sağlar (Karadeniz ve ark., 2012).

2.5.1. Batarya Yönetim Sisteminin Görevleri

Uygulama alanlarına göre özelliklerinden dolayı çeşitli görevler üstlenerek depolama sistemlerini yönetir. Batarya yönetim sistemlerinin birçok görev arasından genel olarak izleme, koruma, veri yönetimi, teşhis-kestirim ve şarj-deşarj yönetimi temel ve genel görevlerindendir. Tablo 2.4'te bu görevler detaylı olarak verilmiştir (Andrea, 2010).

Tablo 2.4. Batarya yönetim sistemi görevleri

Batarya İzleme	Batarya Koruma	Teşhis-Kestirim	Şarj Deşarj Yönetimi	Veri Yönetimi
Paket Gerilimi	Gerilim Sınırları	Gerilim Sınırları	Şarj Kontrolü	Haberleşme
Paket Akımı	Akım Sınırları	Akım Sınırları	Deşarj kontrolü	Telemetri
Hücre Gerilimi	Kısa Devre	Kısa Devre	Dengeleme	Kayıt Tutma
Sıcaklık	Sıcaklık Sınırları	Sıcaklık Sınırları	Ön Şarj	
İzolasyon	İzolasyon	İzolasyon		
İnterlock				

2.5.1.1. Batarya İzleme Görevi

Batarya yönetim sistemi temel görevlerinden ilki izleme yapmaktır. Bu sayede elde edilen akım, gerilim, sıcaklık, anahtarlama elemanlarının konumları gibi veriler ile batarya yönetimi gerçekleştirilir (Gül, 2018).

2.5.1.2. Bataryayı Koruma Görevi

Batarya yönetim sistemi enerji depolama sisteminin aktif kullanımı esnasında aşırı yüksek sıcaklık, aşırı akım, aşırı gerilim gibi durumlarda acil durdurma moduna geçerek yük akışını durdurur. Depolama sistemini izole ederek koruma moduna geçer.

2.5.1.3. Veri Yönetme Görevi

Batarya yönetimi sistemi sayesinde birçok veri toplanır. Yönetim birimi bu verileri kontrol algoritması tarafından işleyerek gerekli aksiyonları almak için sistem içerisinde bulunan bütün elemanlar ile haberleşir. Ayrıca diğer sistemlerle ve kullanıcı ile gerekli bilgi paylaşımını sağlayabilir (Gül, 2018).

2.5.1.4. Teşhis ve Kestirim Görevi

Batarya yönetim sistemi, paket içerisindeki mevcut sensörler sayesinde alınan verileri değerlendirerek çeşitli bilgileri hesaplayıp teşhis ve kestirimler yapar. Bunlar batarya doluluk oranı (State of Charge-SOC), Batarya Sağlığı (State of Health-SOH) bu bilgilerden bazılarıdır (Gül, 2018).

2.5.1.5. Şarj/Deşarj Yönetimi Görevi

Batarya yönetimi sistemi, kontrol algoritması ile şarj deşarj akımları ve batarya hücrelerine ait gerilimleri düzenler. Hücrelerin doluluk oranlarını izleyerek dengeli kalmasını sağlar.

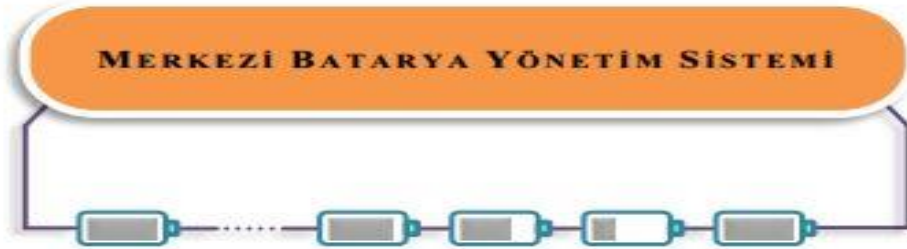
2.5.2. Batarya Yönetim Sistemi Topolojileri

Batarya yönetim sistemleri 4 temel sınıfta gruplanabilir (Gül, 2018).

2.5.2.1. Merkezi Topoloji

Tek bir modül üzerinden batarya yönetim sistemi görevlerinin tamamının gerçekleştirildiği tasarımdır. Merkezi topolojide; hücrelere ait bütün bağlantılar bir kart üzerinde toplanır. Bu tümleşik tasarımda maliyet düşüktür. Batarya paketinde bulunan hücre sayısının artmasıyla veri akışı artacağı için veri hızı yavaşlayarak karmaşık hal alacaktır. Bu sebeple yüksek hücre sayılı paket tasarımlarında tercih edilmemektedir (Gül, 2018). Ayrıca bu topolojinin bir başka dezavantajı da çok sayıda kablo bağlantısı içermesiyle kısa devre ve

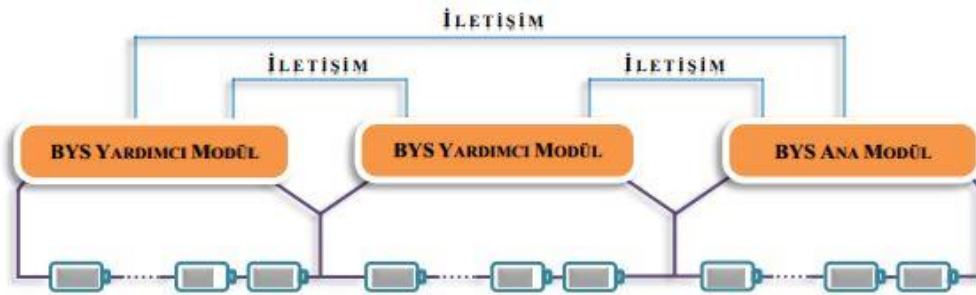
yanlış bağlantı riskini artırmaktadır (Reindl ve ark., 2020). Merkezi batarya yönetim sistemi topolojisi Şekil 2.18’de verilmiştir (Dikmen, 2022).



Şekil 2.18. Merkezi batarya yönetim sistemi topolojisi

2.5.2.2.Modüler Topoloji

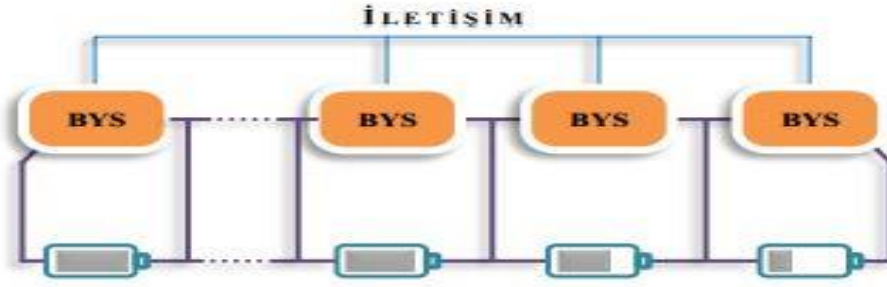
Modüler batarya yönetim sistemleri, birkaç özdeş modülden bataryalara veya hücrelerine ayrı ayrı bağlanmıştır. Yardımcı modüller yalnızca ölçülen verileri kaydederek ana üniteye iletmekte iken ana modül, tüm batarya paketini kontrol etmekte ve sistem ile iletişim sağlamaktadır. Bu yöntemin maliyeti merkezi topolojiye göre daha yüksektir (Rahimi-Eichi ve ark., 2013). Modüler batarya yönetim sistemi topolojisi Şekil 2.19’da verilmiştir (Dikmen, 2022).



Şekil 2.19. Modüler batarya yönetim sistemi topolojisi

2.5.2.3.Merkezi Olmayan Topoloji

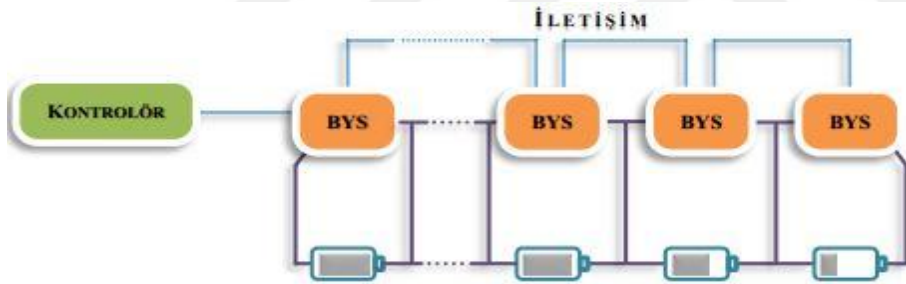
Merkezi kontrol tasarımların dezavantajlarını azaltmak için kullanılmaktadır. Ayrı batarya yönetim sistemi birimleri ayrı ayrı bağımsız olarak çalışabilmektedirler (Faika ve ark., 2018). Merkezi olmayan yönetim sistemi topolojisi Şekil 2.20’de verilmiştir (Dikmen, 2022).



Şekil 2.20. Merkezi olmayan batarya yönetim sistemi topolojisi

2.5.2.4. Dağıtık Topoloji

Dağıtık batarya yönetim sistemlerinde, batarya hücreleri veya grupları tek tek Şekil 2.21’de gösterildiği gibi ayrı ayrı BYS yardımcı modülü ile kontrol edilmektedir. Bu yardımcı modüller dengeleme, iletişim ve çalışma parametrelerinin ölçülmesini ve kontrolünü sağlamaktadır. Maliyet dağıtık topolojide kullanılan elektronik kart miktarı fazla olacağı için diğer yöntemlere göre daha fazladır (De Souza ve ark., 2019). Dağıtık yönetim sistemi topolojisi Şekil 2.21’de verilmiştir (Dikmen, 2022).

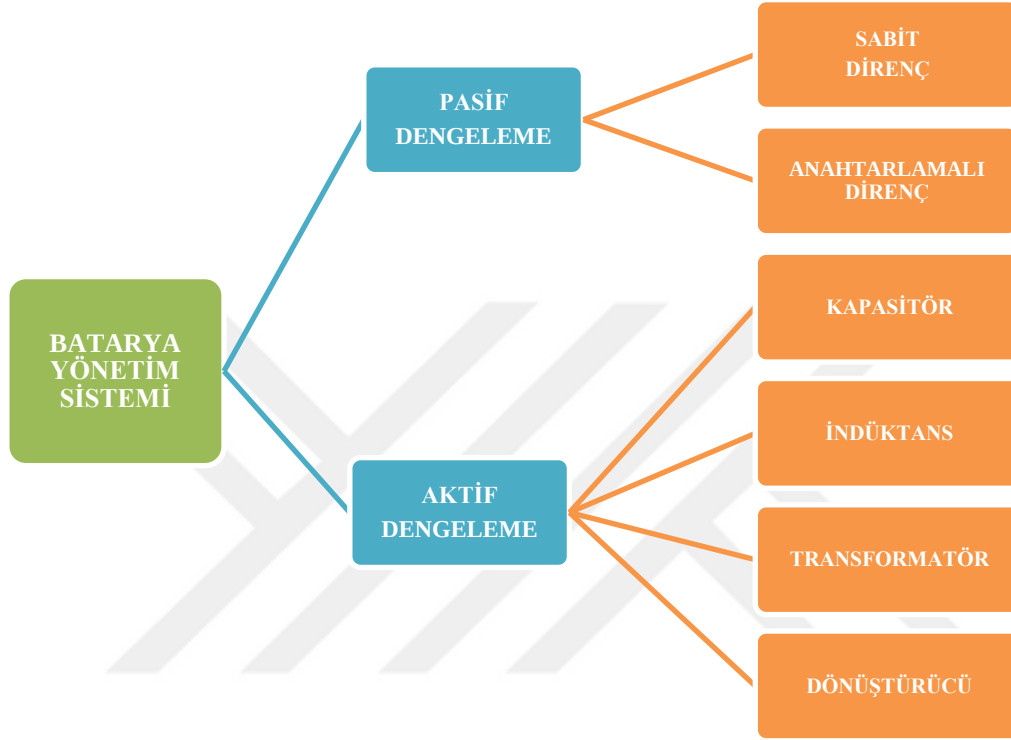


Şekil 2.21. Dağıtık batarya yönetim sistemi topolojisi

2.6. Hücre Dengeleme Yöntemleri

Hücre dengelemesi hücre grup bağlantısında kullanılır. Kullanılan hücreler aynı model, marka ve eşit kapasiteye yani özdeş bataryalar olsa bile hücreler kimyasal yapılarından ve çalışma koşullarından dolayı farklı özellikler göstermektedir. Bu sebeple bataryalar arasında gerilim farkı değişiklik göstermektedir. Bu farklılık batarya paketinde dengesizliğe sebep olmaktadır. Paralel bağlı batarya hücrelerinde hücreler aynı gerilim değerlerine kendiliğinden gelebilmekte yani eşitlenebilmektedir. Ancak yüksek akım ve kapasite için oluşturulan seri bağlı paketlerde kendiliğinden aynı gerilim seviyesine gelebilmesi mümkün değildir. Bunun sebebi seri bağlı hücrelerin farklı zamanlarda maksimum şarj düzeyine ulaşmasıdır. Yani bazı batarya hücrelerinde şarj doluluk oranı

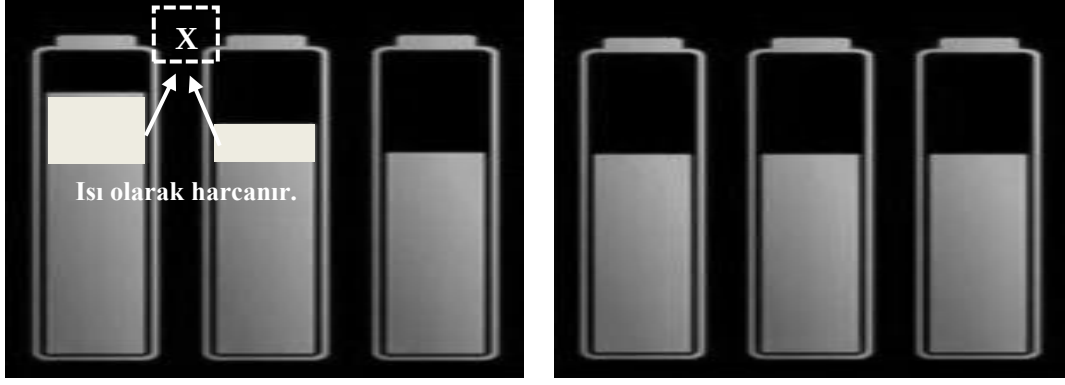
%100 iken diğerlerinde bu oran %100 den azdır. Böylece batarya paketi deşarj konumuna geçtiğinde gerilim dengesizliği olduğu için tam dolmayan hücreler daha erken tükenecektir. Batarya dengeleme yöntemleri Şekil 2.22’de gruplandırılmıştır. Hücre dengeleme yöntemi, aktif ve pasif dengeleme olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır.



Şekil 2.22. Batarya dengeleme yöntemleri topolojisi

2.6.1. Pasif Dengeleme

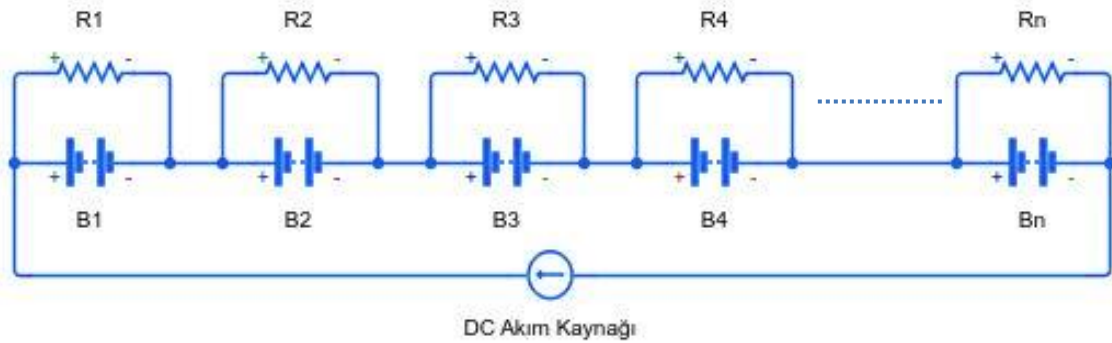
Hücreye paralel bağlanan direnç (manevra direnci) vasıtasıyla sistemdeki en yüksek şarj miktarına sahip hücre, sistemdeki en düşük şarj miktarına sahip hücreye eşit oluncaya dek fazla enerjinin uzaklaştırılması yani direnç üzerinde harcanması esasına dayanır. Sistem bu şekilde dengede tutulmaktadır (Rahimi-Eichi ve ark., 2013). Pasif dengeleme yöntemindeki esas dezavantaj, yüksek hücrelerden gelen fazla enerji ısı olarak dağılır ve deşarj esnasında uygulanırsa pilin çalışma süresini kısaltır. Çekilen akımın 10 mA veya 10Ah'den az olan düşük güçler için uygulanabilir. Pasif dengeleme sisteminde bataryanın gerilim değerlerindeki değişimler Şekil 2.23'te gösterilmiştir.



Şekil 2.23. Pasif dengeleme

2.6.1.1.Sabit Dirençli Pasif Dengeleme Yöntemi

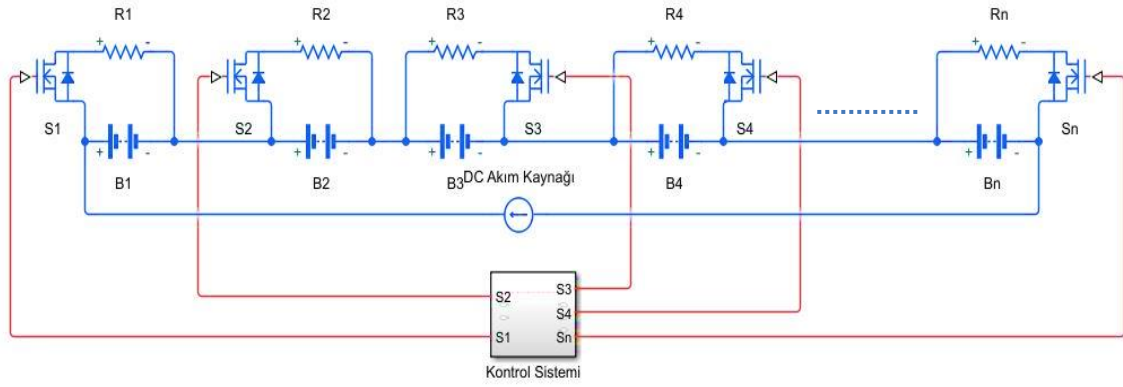
Bu yöntemde her hücrenin karşısında bypass direnci bulunmaktadır. Bu dirençler üzerinde bypass akımını kullanır ve direnç hücrelerin voltajını sınırlamak için ayarlanır. Direnç üzerinde harcanan enerji hücre voltajları ile doğru orantılıdır. Tüm hücreler için paket içerisinde ısı olarak dağılan bir enerji açığa çıkarır. Hücre hasarına sebebiyet vermeden aşırı şarj koşullarına getirebildikleri için sadece kurşun-asit ve nikel bazlı bataryalar için kullanıma uygundur. Şekil 2.24'te sabit dirençli pasif dengeleme yöntemi devresi görülmektedir



Şekil 2.24. Sabit dirençli pasif dengeleme

2.6.1.2.Anahtarlama Dirençli Pasif Dengeleme Yöntemi

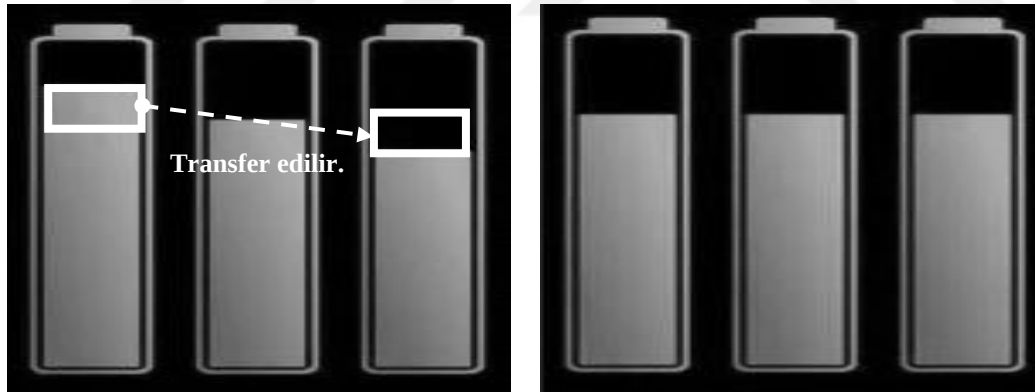
Bu yöntemde her bir hücrenin karşısına yerleştirilen bypass direnci ve direncin hücre ile bağlantısını sağlayarak kontrol eden anahtarlama elemanları bulunmaktadır. Enerjinin anahtarlama elemanı ile kontrollü harcanması esasına dayanır. Batarya yönetim sistemi dengesizlik durumunda hangi direnci devreye alması gerektiğine karar verir. Bu metot sabit direnç metoduna göre daha basit, verimli, güvenilir ve lityum iyon piller için kullanılabilir. Şekil 2.25'te anahtarlama dirençli pasif dengeleme yöntemi devresi görülmektedir.



Şekil 2.25. Anahtarlama dirençli pasif dengeleme devresi

2.6.2. Aktif Dengeleme

Aktif dengeleme devresi kontrol algoritması vasıtasıyla batarya hücrelerinin gerilim seviyelerini hesaplayarak enerjisi fazla olan hücreden enerjisi düşük enerjili hücreye enerji transfer edilmesi esasına dayanır. Enerji seviyeleri ortalama bir seviyede dengelenmektedir. Pasif dengelemede ısı olarak tüketilen boşa tüketilen enerji, aktif dengeleme ile düşük enerji seviyeli batarya hücrelerine aktarılarak daha verimli bir dengeleme yapılmış olmaktadır (Rahimi-Eichi ve ark., 2013). Aktif dengelemede batarya gerilim seviyelerindeki değişim Şekil 2.26’da gösterilmiştir.



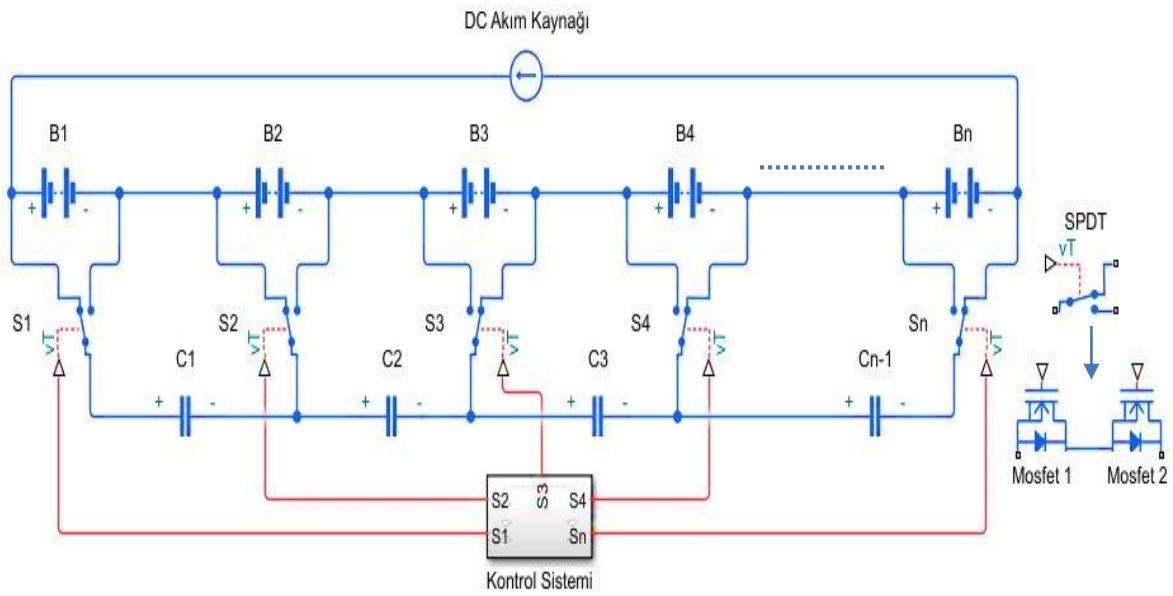
Şekil 2.26. Aktif dengeleme

2.6.2.1. Kapasitör Temelli Aktif Dengeleme Yöntemleri

“Yük Aktarma” yöntemi olarak da bilinir. Temel olarak bir harici enerji depolama cihazları, dengeleme amacıyla paket hücreler arasında enerjiyi taşımak için kapasitör(ler) kullanır. Diğer aktif dengeleme yöntemlerine göre bu yöntemin hızı düşüktür. Anahtarlama kapasitör, tek anahtarlama kapasitör, çift katmanlı kapasitör olmak üzere üç çeşit kapasitör temelli dengeleme yöntemi bulunmaktadır (Daowd ve ark., 2011b).

2.6.2.2. Anahtarlamalı Kapasitör ile Aktif Dengeleme Yöntemi

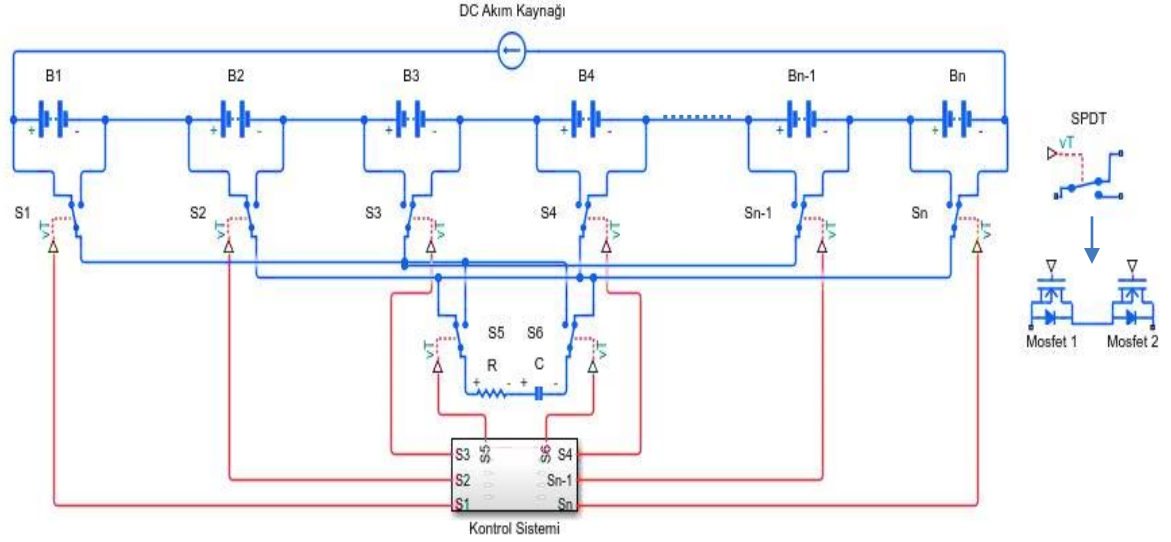
Batarya paketinde bulunan n adet hücreyi dengelemek için $n-1$ adet kapasitör ve $2n$ adet anahtar gerektirir. Kontrol yöntemi basittir çünkü sadece iki durumu vardır. Karmaşık kontrole ihtiyaç duymaz. Hem şarj hem de deşarj işleminde çalışabilir. Bu yöntemde batarya doluluk oranına bakılmaksızın yüksek gerilim seviyeli hücrelerden düşük gerilim seviyeli hücrelere anahtarlamalar ile enerji transferi gerçekleştirilir ve gerilim dengelenmesi sağlanır. Basit ve enerji kaybı az olan bu yöntemin dengeleme hızı düşüktür (Kong ve ark., 2006). Şekil 2.27’ de anahtarlamalı kapasitör ile aktif dengeleme devresi görülmektedir.



Şekil 2.27. Anahtarlamalı kapasitör ile aktif dengeleme devresi

2.6.2.3. Tek Anahtarlamalı Kapasitör ile Aktif Dengeleme Yöntemi

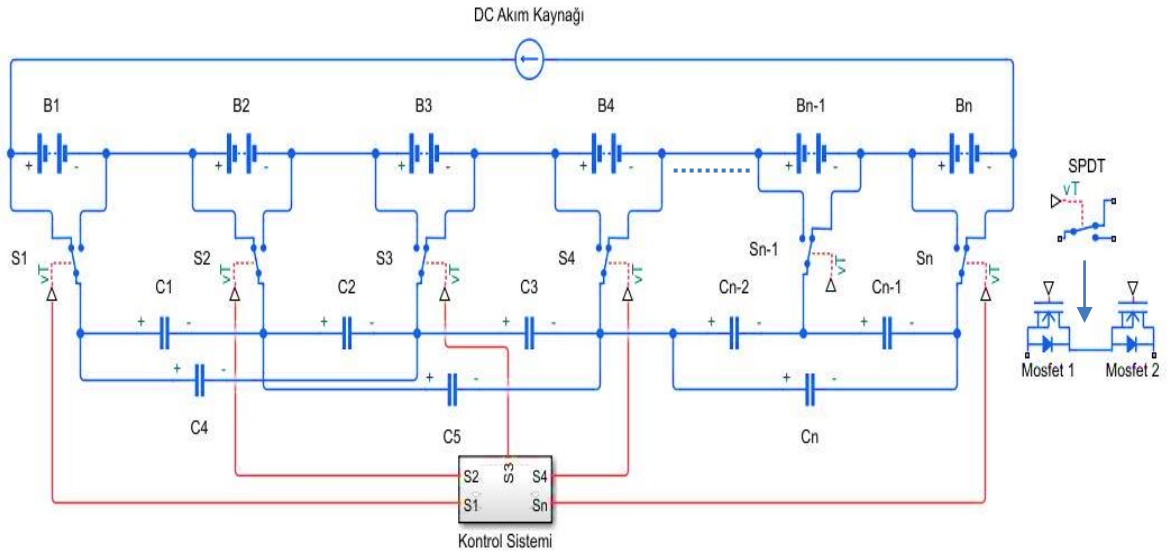
“Hareketli kondansatör yöntemi” olarak da bilinir. Tek anahtarlı kondansatör, n adet hücreyi dengelemek için yalnızca 1 adet kapasitöre ve $n+5$ adet anahtara ihtiyaç duyar. Basit bir kontrol yöntemi vardır. Kontrolör, dengeleme yapabilmek batarya grubundaki en yüksek gerilime sahip hücreden en düşük gerilime sahip hücreye enerji transferi sağlar. Yani başka bir ifade ile en yüksek gerilimli hücre kondansatörü şarj eder. Kondansatörde en düşük gerilimli hücreyi şarj ederek hücrelerin dengelenmesi sağlar. Hem şarj hem de deşarj işleminde kullanılabilir (Cao ve ark., 2008). Şekil 2.28’de tek anahtarlamalı kapasitör ile aktif dengeleme devresi görülmektedir



Şekil 2.28. Tek anahtarlamalı kapasitör aktif dengeleme devresi

2.6.2.4.Çift Katmanlı Kapasitörle Aktif Dengeleme Yöntemli

Anahtarlamalı kapasitör yönteminin farklı tasarımıdır. Bu fark, enerji transferi için iki kapasitör katmanı kullanmasıdır. n adet hücreyi dengelemek için n adet kapasitöre ve $2n$ adet anahtara ihtiyaç vardır. Anahtarlamalı kondansatör yöntemine göre avantajı ikinci kondansatör kademesinin dengeleme süresini çeyrek süreye indirgemesidir. Hem şarj hem de deşarj işleminde kullanılabilir (Baughman ve Ferdowsi, 2008), (Daowd ve ark., 2011b). Şekil 2.29’da çift katmanlı kapasitör ile aktif dengeleme devresi görülmektedir



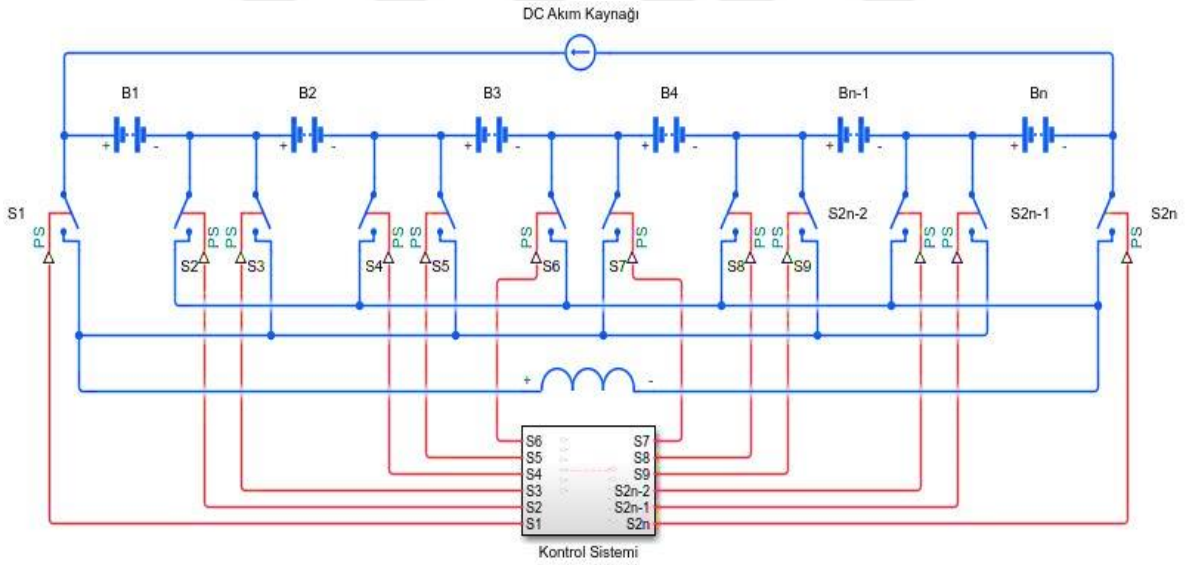
Şekil 2.29. Çift katmanlı kapasitörle aktif dengeleme devresi

2.6.2.5. İndüktör/Transformatör Temelli Aktif Dengeleme Yöntemleri

Dengeleme işleminin indüktör veya transformatör kullanılarak gerçekleştirildiği yöntemlerde enerjiyi bir hücreden veya hücre grubundan başka bir hücre veya hücre grubuna taşımak için indüktör veya transformatör kullanılmaktadır. Bu dengeleme yöntemlerinde işlem süresi kısa sistem maliyeti yüksektir. Tek/Çoklu İndüktör, tek sargılı transformatör ve çok sargılı transformatör olmak üzere üç çeşit yöntem kullanılmaktadır (Daowd ve ark., 2011b).

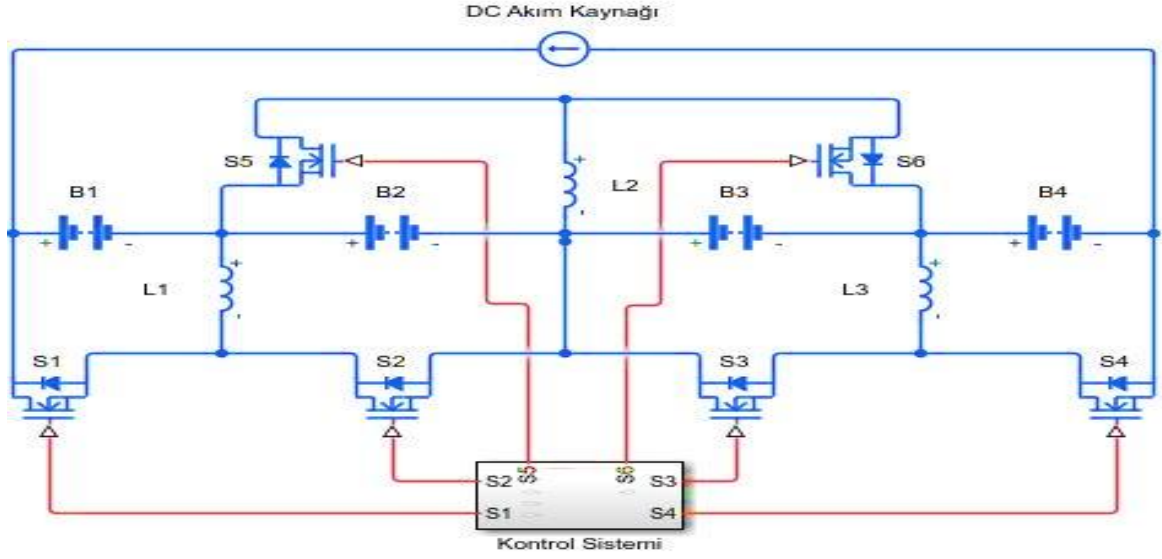
2.6.2.5.1. Tek/Çoklu İndüktörlü Aktif Dengeleme Yöntemi

Tek indüktörlü dengeleme sisteminde pakette bulunan hücreler arasında tek yönlü geçiş sağlayacak anahtarlama elemanları bağlanır ve enerji transferi için bir adet indüktör kullanılır. Kontrol sistemi hücrelerin şarj yüzdesini algılar ve indüktörden enerji aktarımı için kullanılacak iki hücreyi seçer. Şarj seviyesi yüksek olan hücreden indüktöre, indüktörden ise şarj seviyesi düşük olan hücreye enerji transferi yapılır (Park ve ark., 2007). Şekil 2.30’da tek indüktörlü aktif dengeleme devresi görülmektedir.



Şekil 2.30. Tek indüktörlü aktif dengeleme devresi

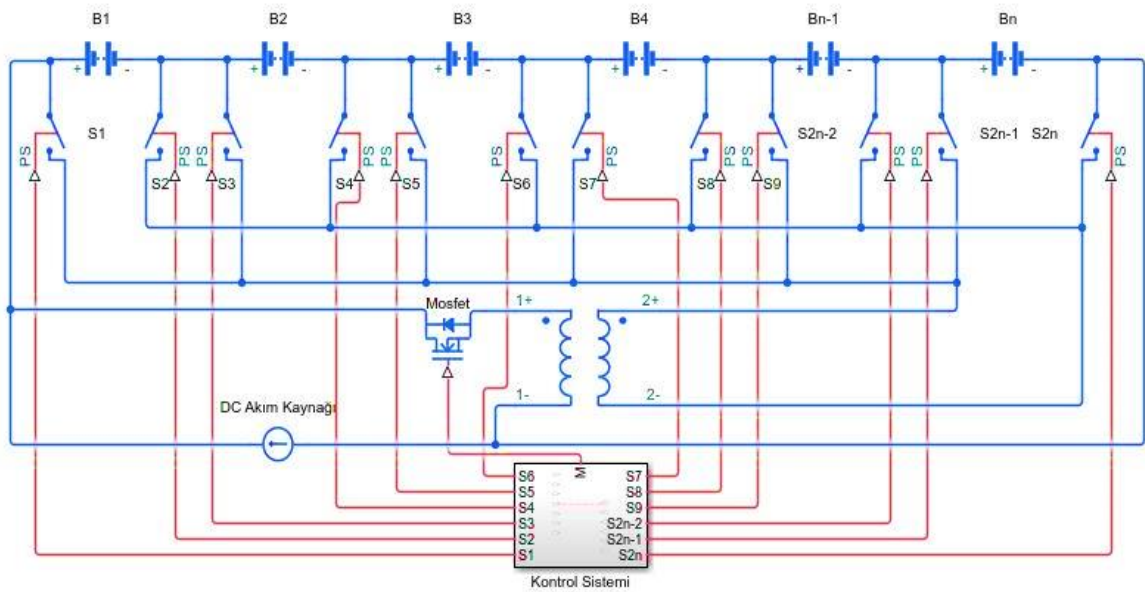
Çoklu indüktörlü dengelemede ise n adet hücreyi dengelemek için n-1 adet indüktör kullanılır. Kontrol sistemi iki komşu hücrenin şarj yüzdesini algılar ve enerji aktarımı için ilgili anahtarlama elemanlarına açma kapama süresini belirleyen PWM sinyalini uygular. Böylece anahtarlama elemanları ile şarj seviyesi yüksek olan hücreden indüktöre indüktörden ise şarj seviyesi düşük olan hücreye enerji transferi yapılır (Phung ve ark., 2011). Şekil 2.31’de çoklu indüktörlü aktif dengeleme devresi görülmektedir.



Şekil 2.31. Çoklu indüktörlü aktif dengeleme devresi

2.6.2.5.2. Tek Sargılı Transformatörlü Aktif Dengeleme Devresi

Anahtarlama transformatör olarak da bilinir. Enerjinin bir hücreden diğer bir hücreye transformatör ile taşınan bir dengeleme yöntemidir. Anahtarlama kapasitör yöntemi ile benzer topolojiye sahiptir. Batarya paketinden çekilen akım, transformatörün primer sargılarına gelir. Kontrol sistemi tarafından belirlenen düşük voltajlı hücreye transformatörün sekonder sargılarından çıkan akım yönlendirilir. Böylece batarya paketinden çekilen enerji hızlı şekilde düşük voltajlı hücrelere aktarılarak dengeleme yapılmaktadır. Şekil 2.32’de tek sargılı transformatörlü aktif dengeleme devresi görülmektedir (Moore ve Schneider, 2001).

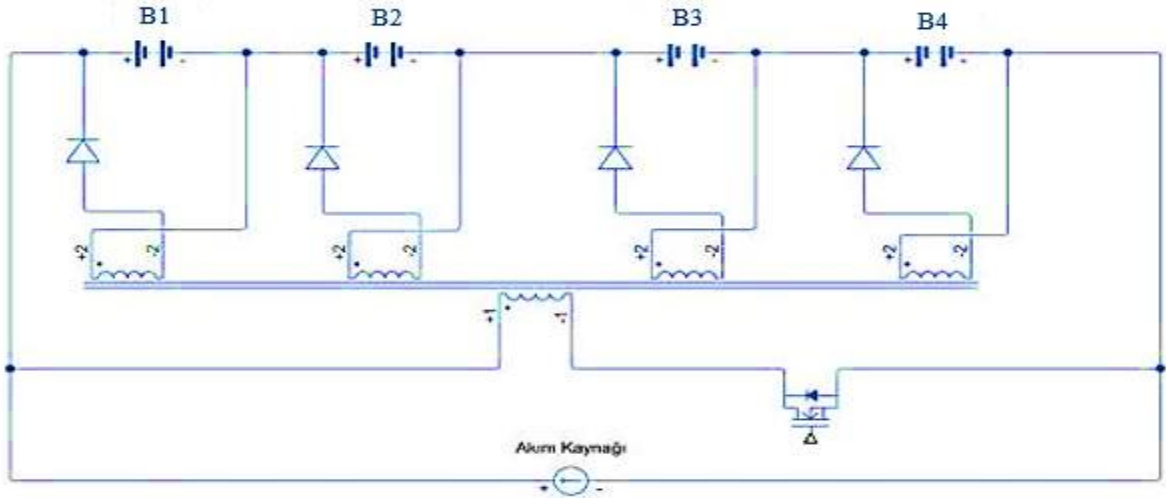


Şekil 2.32. Tek sargılı transformatör ile aktif dengeleme devresi

2.6.2.5.3. Çok Sargılı Transformatörlü Aktif Dengeleme Yöntemi

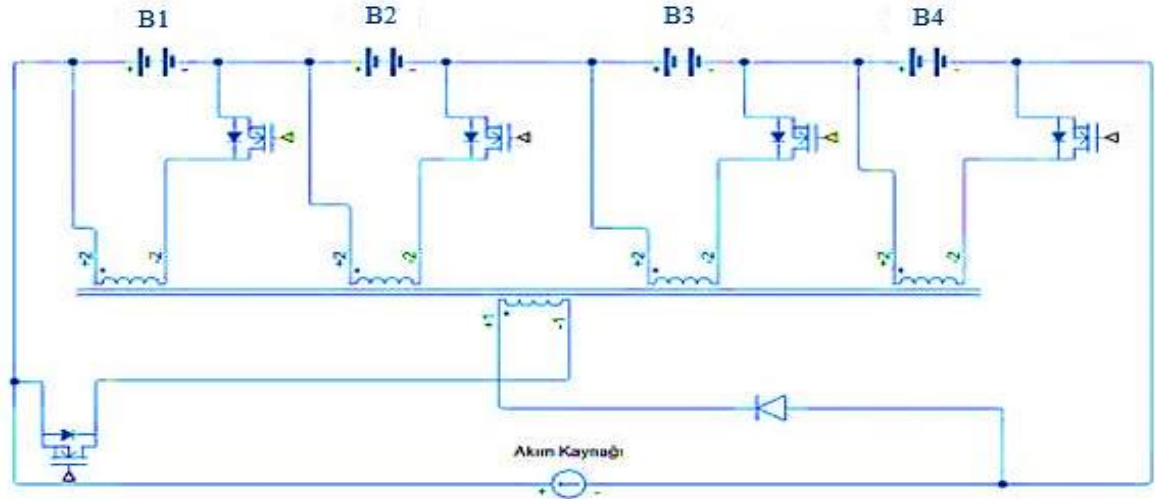
Ortak veya paylaşımlı transformatör olarak adlandırılan tek çekirdekli transformatör veya çoklu transformatör denilen hücre sayısı kadar çekirdeğin kullanıldığı iki çeşit tasarımı bulunan dengeleme yöntemidir. Ortak veya paylaşımlı transformatör olarak adlandırılan tek çekirdekli transformatörde primer tarafında tek sargı var iken sekonder tarafta her bir hücre için ayrı ayrı sekonder sargısı bulunmaktadır. Bu tasarımın Flyback ve forward (ileri çalışma durumu) olmak üzere kullanılan iki çalışma durumu vardır (Kong ve ark., 2006).

Flyback (geri yönlü) çalışma durumunda transformatörün primer sargısında bir anahtarlama elemanı, hücrelere bağlı olan sekonder sargılarında ise diyot bulunmaktadır. Transformatörün primer sargısında bulunan anahtarlama elemanı pasif konuma geldiğinde batarya paketinden gelen enerji transformatör sargılarında enerji depolanır. Primer tarafta bulunan anahtar tekrar kapatılarak enerji transformatörün sekonder sargısına aktarılır. İndüklenen akımın büyük çoğunluğu diyotlar aracılığıyla düşük gerilimli hücrelere aktarılır. Şekil 2.33'te çok sargılı transformatörlü aktif dengeleme flyback (geri yönlü) devresi görülmektedir (Einhorn ve ark., 2011).



Şekil 2.33. Çok sargılı transformatörle aktif dengeleme flyback devresi

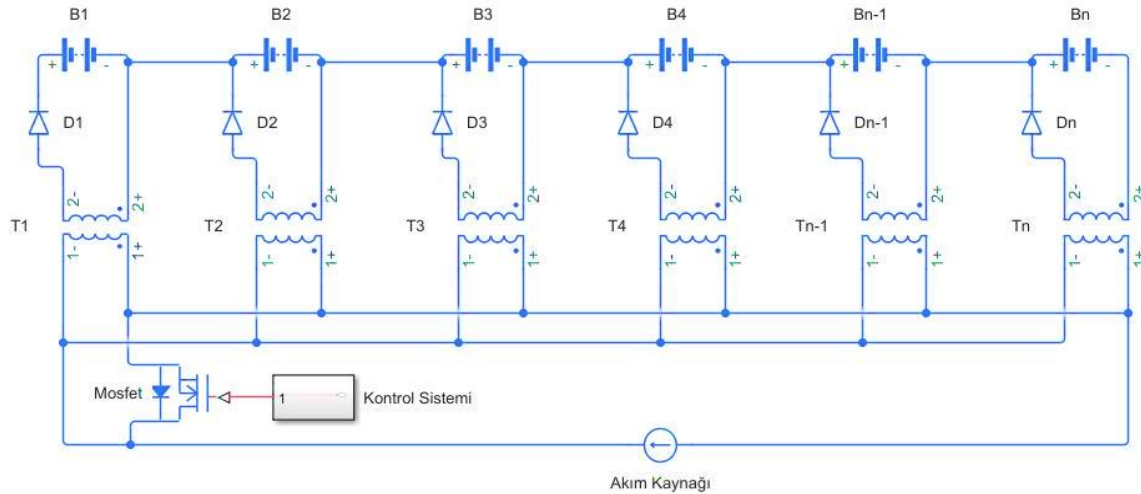
İkinci çalışma durumu olan forward (ileri çalışma) durumunda transformatörün primer sargısında bir diyot, hücrelere bağlı olan sekonder sargılarında ise anahtarlama elemanları bulunmaktadır. Hücreler arasında gerilim farklılıkları tespit edildiğinde; yüksek gerilimli hücreye bağlı anahtarlama elemanı aktif konuma geçerek mevcut fazla enerji transformatör ve sekonder tarafında ters bağlantılı diyot sayesinde diğer hücrelere aktarılır. Şekil 2.34'te çok sargılı transformatörlü aktif dengeleme forward (ileri yönlü) çalışma devresi görülmektedir (Kong ve ark., 2006).



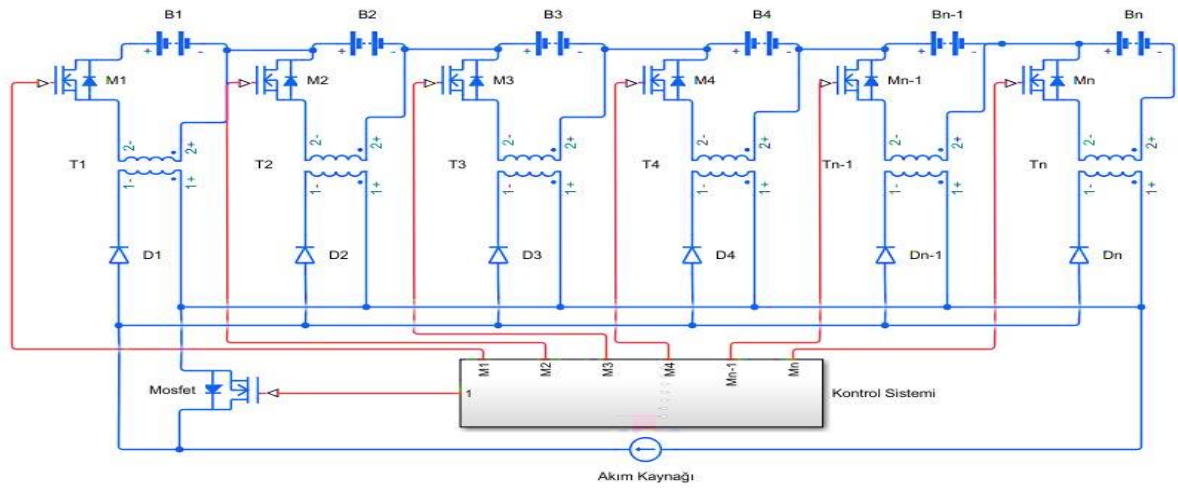
Şekil 2.34. Çok sargılı transformatörle aktif dengeleme forward devresi

2.6.2.6. Çoklu Transformatörlü Aktif Dengeleme Yöntemi

Çoklu transformatör yönteminde Şekil 2.35'te bulunan paketten hücreye ve Şekil 2.36'da bulunan hücreden pakete ait tasarımlarda görüldüğü gibi her bir hücrenin kendisine ait transformatörün kullanıldığı yöntemdir. Pil paketi anahtarlama bileşenlerindeki voltajı ve/veya akım stresini azaltacak şekilde pil takımını gruplara veya modüllere bölerek modüller tekniğini kullanır. Çok sargılı transformatör yöntemine göre basit bir tasarıma sahiptir ve ayrıca daha kullanışlıdır (Daowd ve ark., 2011b).



Şekil 2.35. Çoklu Transformatör ile aktif dengeleme yöntemi (paketten hücreye)



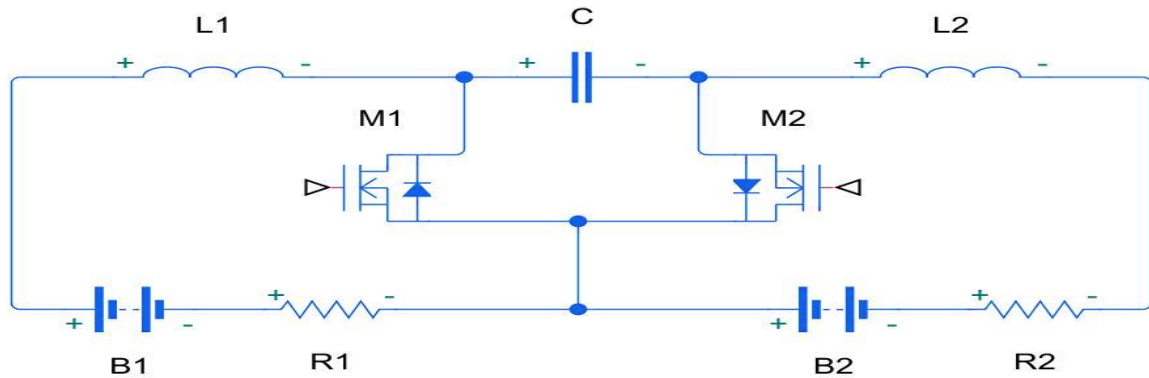
Şekil 2.36. Çoklu Transformator ile aktif dengeleme yöntemi (hücreden pakete)

2.6.2.7. Dönüştürücü Temelli Aktif Dengeleme Yöntemleri

Hücre dengeleme amacıyla kullanılan enerji dönüştürücüler: Cuk, Buck/Boost, Flyback, Ramp, Tam Köprü ve Yarı rezonans dönüştürücülerdir. Dengeleme sürecinin tam kontrolü ön plandadır. Sistem yüksek maliyetli ve karmaşık yapıya sahiptir.

2.6.2.7.1. Cuk Dönüştürücülü Aktif Dengeleme Yöntemi

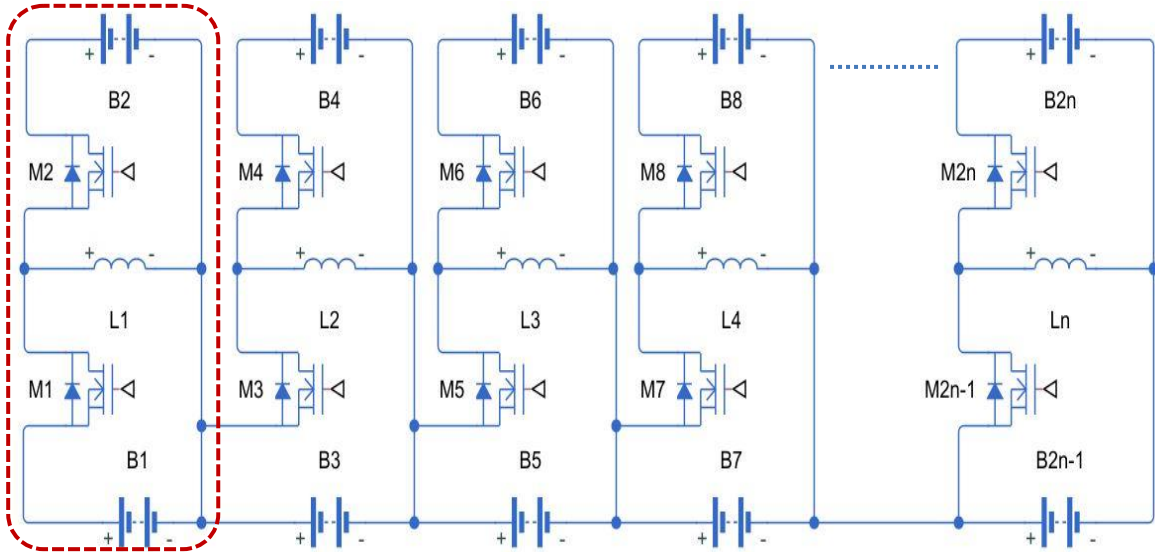
Bu yöntemde dönüştürücü devresi kapasitör ve indüktörlerden oluşur. Kapasitif veya indüktör/trafo tabanlı dengeleme devrelerinden farkı yük aktarımı için tek tür eleman yerine iki elemanda kullanılır. Bu yöntemin önemli özelliği, devrenin dengeleme için çift yönlü güç sağlamasıdır. Cuk dönüştürücü devresinde n adet hücreyi dengelemek için n-1 adet dengeleme devresi gereklidir. Şekil 2.37’de gösterildiği gibi her dengeleme devresi için iki adet indüktör, iki adet anahtar ve bir adet kapasitör bulunur (Daowd ve ark., 2011b). Cuk dönüştürücü, enerjiyi iki komşu hücresi arasında aktardığı için özellikle çok hücreli paketlerde dengeleme süresi uzundur (Omariba ve ark., 2019).



Şekil 2.37. Cuk dönüştürücü ile aktif dengeleme devresi

2.6.2.7.2. Buck/Boost Dönüştürücülü Aktif Dengeleme Yöntemi

Buck (Düşürücü) ve Boost (Yükseltici) ve Buck-Boost enerji dönüştürücüler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlardan bir tanesi çift yönlü buck/boost dönüştürücüdür. Şekil 2.38’de verilen devre tasarımında işaretli alan incelenirse B_1 hücre voltajı B_2 voltajından fazla olması durumunda M_1 anahtarı ilettime, M_2 anahtarı kesime geçer ve B_1 hücresindeki fazla enerji L indüktörüne aktarılır. Daha sonra M_1 anahtarı kesime ve M_2 anahtarı ilettime geçerek indüktör üzerindeki enerji B_2 hücresine aktarılır. Enerji transfer durumu tersi yönde de gerçekleştirilebilmektedir (Wang ve ark., 2022).

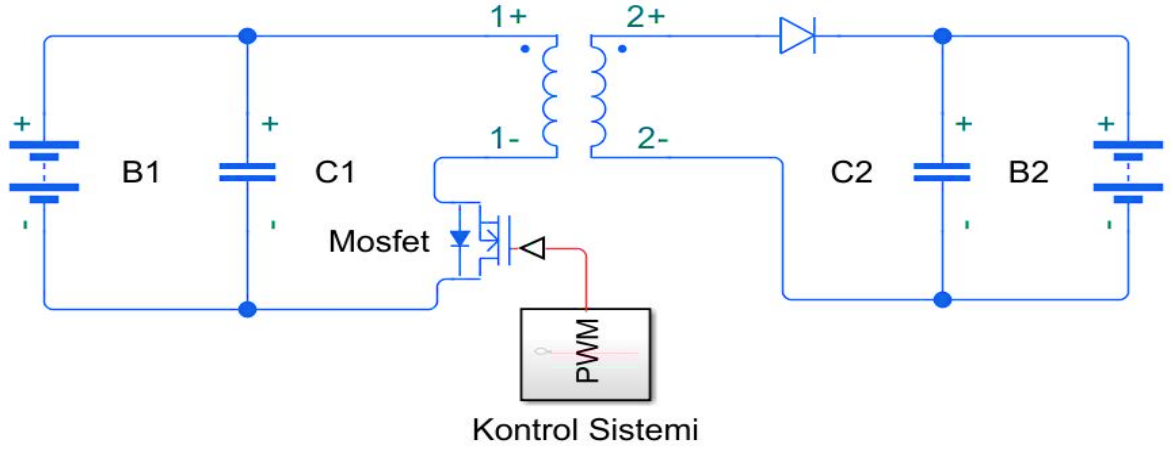


Şekil 2.38. Çift yönlü buck/boost dönüştürücü

2.6.2.7.3. Flyback Dönüştürücülü Aktif Dengeleme Yöntemi

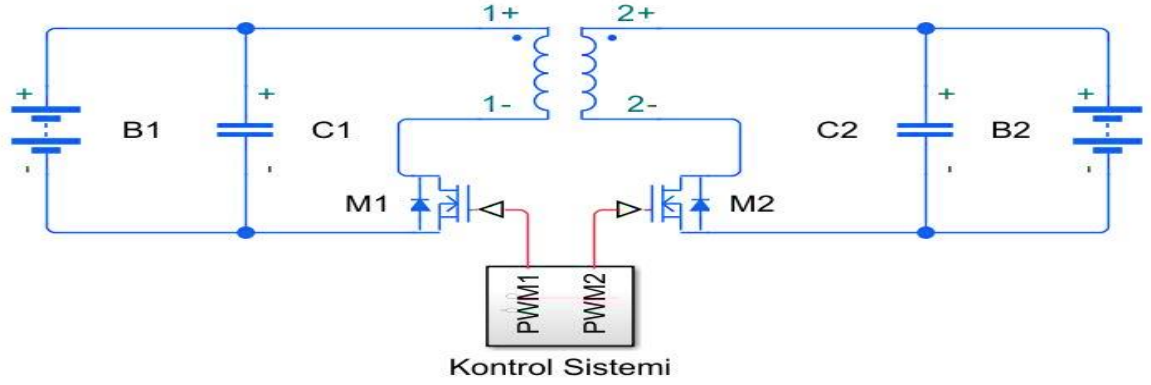
Flyback dönüştürücüler, primer ve sekonderin yalıtımlı yani izole yapılı olarak kullanılırlar. Flyback dönüştürücüler tek yönlü ve çift (iki) yönlü olmak üzere iki şekilde kullanılmaktadırlar (Şahin ve Kılınç, 2022).

Tek yönlü bir flyback dönüştürücüde enerji primer taraftan sekonder tarafa iletmektedir. Yüksek voltaj primer tarafa uygulanır enerjinin aktarıldığı sekonder tarafa ise tarafa diyot yerleştirilir. Anahtarlama elemanına PWM sinyali uygulanarak kontrol yapılır. Anahtar iletimde iken trafonun primer tarafında enerji depolanır. Anahtar kesime geçtiğinde sekonder tarafa enerji aktarılır. Ayrıca bu tasarımda trafo sargılarının polariteleri, birinden akım geçerken diğerinden geçmeyecek şekilde ters yönlüdür (Şahin ve Kılınç, 2022). Şekil 2.39’da tek yönlü flyback dönüştürücülü aktif dengeleme devresi görülmektedir.



Şekil 2.39. Tek yönlü flyback dönüştürücülü aktif dengeleme devresi

Çift yönlü flyback dönüştürücü tasarımında ise transformatörün iki tarafına da anahtarlama elemanı bulunmalıdır. Çift yönlü flyback dönüştürücü, enerjinin paketten hücrelere de aktarılabilirdiği enerji iletiminde daha esnektir. Primer sargılardan sekonder sargılara enerji aktarılırken primer taraftaki anahtarlama elemanına PWM kontrolü yapılır. Sekonder taraftaki anahtarlama elemanı kesimde tutulur. Sekonder taraftan primer tarafa enerji aktarımı yapılacağıında aktarılırken primer taraftaki anahtarlama elemanı kesimde tutularak sekonder taraftaki anahtarlama elemanına PWM kontrolü yapılır (Şahin ve Kılınç, 2022). Şekil 2.40’da çift yönlü flyback dönüştürücülü aktif dengeleme devresi görülmektedir.

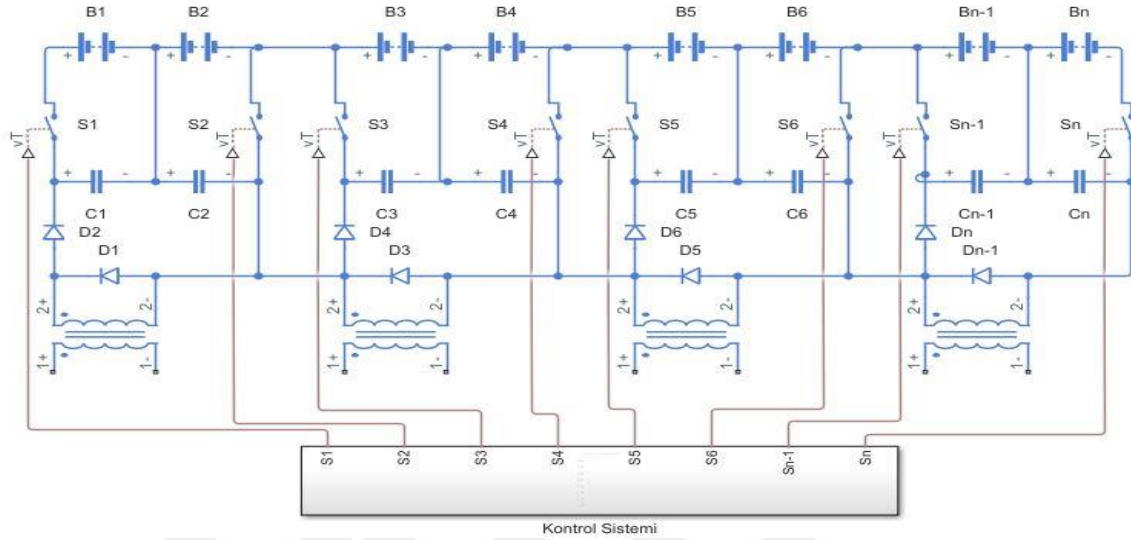


Şekil 2.40. Çift yönlü flyback dönüştürücülü aktif dengeleme devresi

2.6.2.7.4. Ramp Dönüştürücülü Aktif Dengeleme Yöntemi

Rampa dönüştürücülü hücre dengeleme tasarımı çok sargılı transformatörlerle benzer çalışma prensibine sahiptir. Sekonder tarafta bir sargı olmasına karşın primer tarafta hücre başına bir değil her bir hücre çifti için yalnızca bir sargı gerektirir. Çalışma prensibi kısaca ilk yarım döngüde, akımın çoğu tek sayıdaki en düşük voltajlı hücreleri şarj edecek diğer

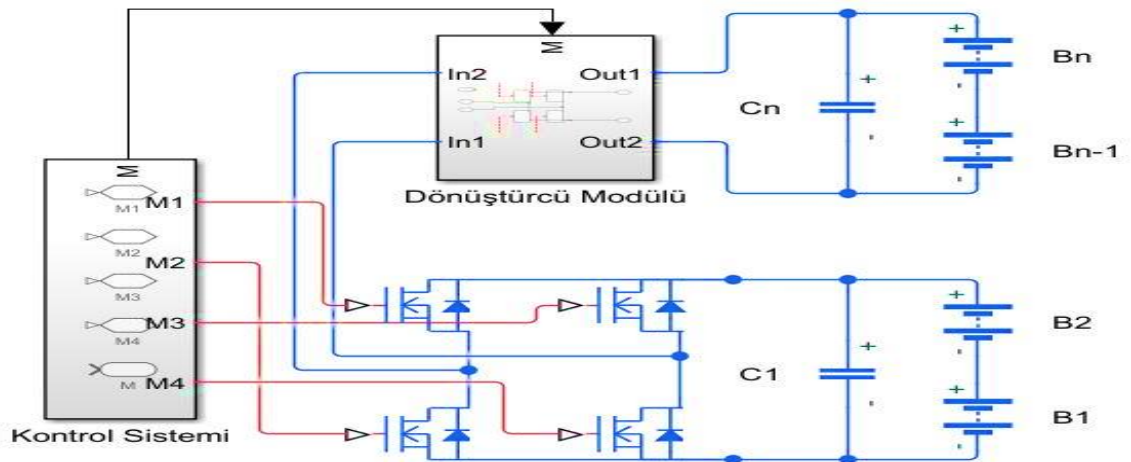
yarım döngüde ise çift sayıdaki hücreleri şarj edecek şekilde tasarlanmıştır (Daowd ve ark., 2011b). Şekil 2.41’de ramp dönüştürücülü aktif dengeleme devresi görülmektedir.



Şekil 2.41. Ramp dönüştürücülü aktif dengeleme devresi

2.6.2.7.5. Tam Köprü Dönüştürücülü Aktif Dengeleme Yöntemi

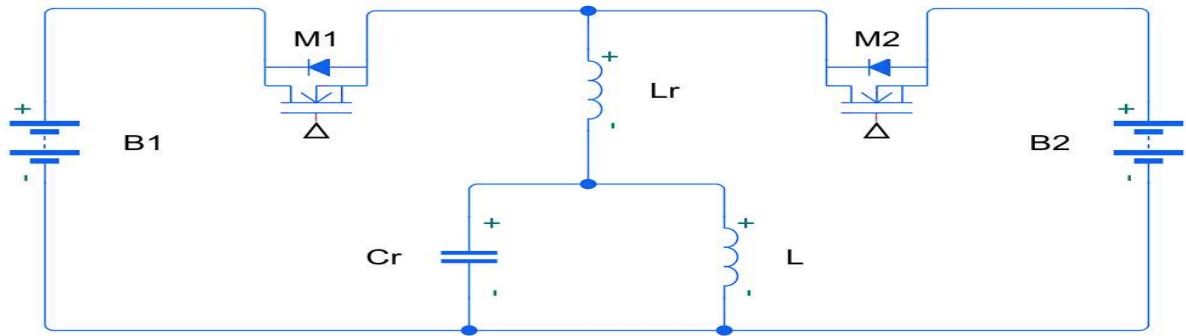
Tam köprü dönüştürücüler AC-DC dönüştürücü veya DC-DC dönüştürücü olarak modüllere ayrılmış pil paketleri ile PWM sinyalleri ile tam kontrollü olarak kullanılabilirler. Tam köprü dönüştürücünün esas dezavantajı, nispeten yüksek maliyet ve karmaşık kontrol algoritmasıdır (Daowd ve ark., 2011b). Şekil 2.42’de tam köprülül dönüştürücülü aktif dengeleme devresi görülmektedir.



Şekil 2.42. Tam köprü dönüştürücülü aktif dengeleme devresi

2.6.2.7.6. Yarı Rezonans Dönüştürücülü Aktif Dengeleme Yöntemi

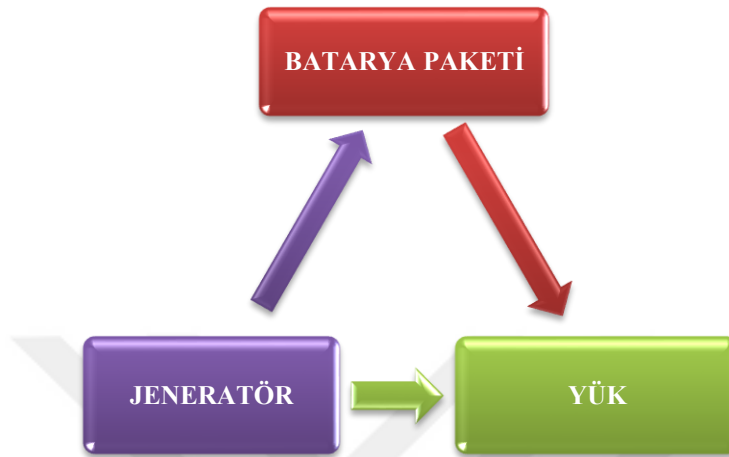
Sıfır akım veya sıfır voltaj yarı rezonans dönüştürücüler olarak ifade edilen bu dengeleme devresinde PWM sinyalleri üretmek için akıllı kontrol kullanmak yerine yükleri aktarmak ve anahtarları çalıştırmak için rezonans devreleri kullanılır. Bu topolojinin dezavantajları pahalı, yüksek kontrol karmaşıklığı ve büyük boyutlu olmasıdır (Daowd ve ark., 2011b). Şekil 2.43'te yarı rezonans dönüştürücülü aktif dengeleme devresi görülmektedir.



Şekil 2.43. Yarı rezonans dönüştürücülü aktif dengeleme devresi

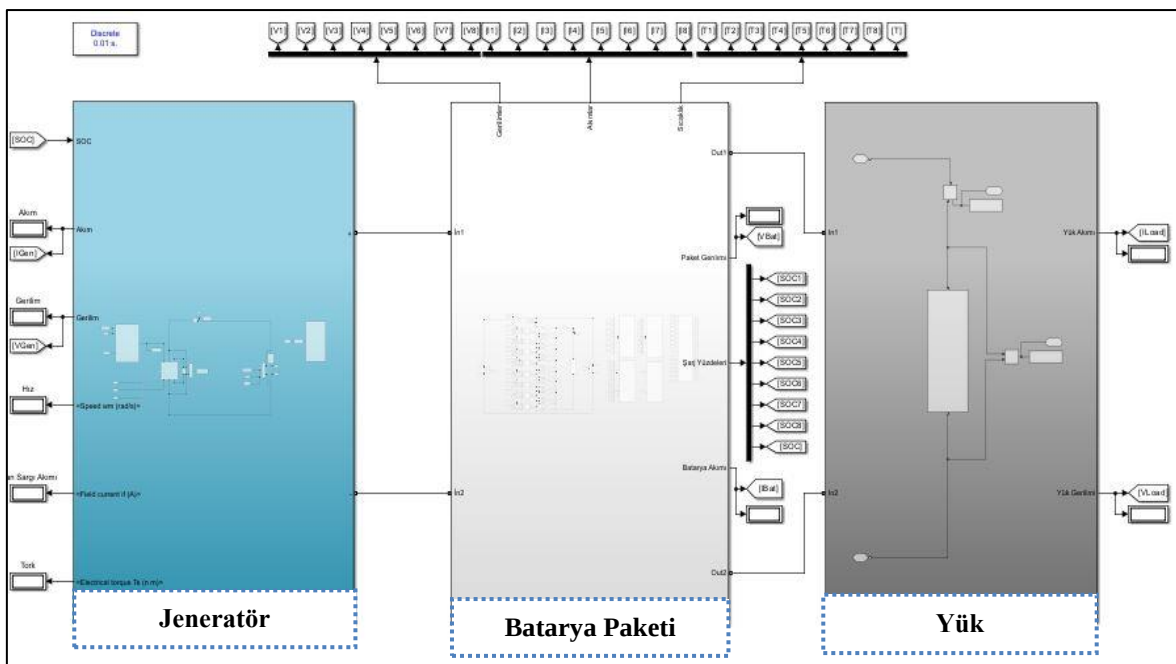
3. HİBRİT SİSTEMİN ÇALIŞMA PRENSİBİ VE JENERATÖR SİSTEMİNİN SİMULİNK MODELLEMESİ

3.1. Hibrit Sistem Çalışma Prensibi



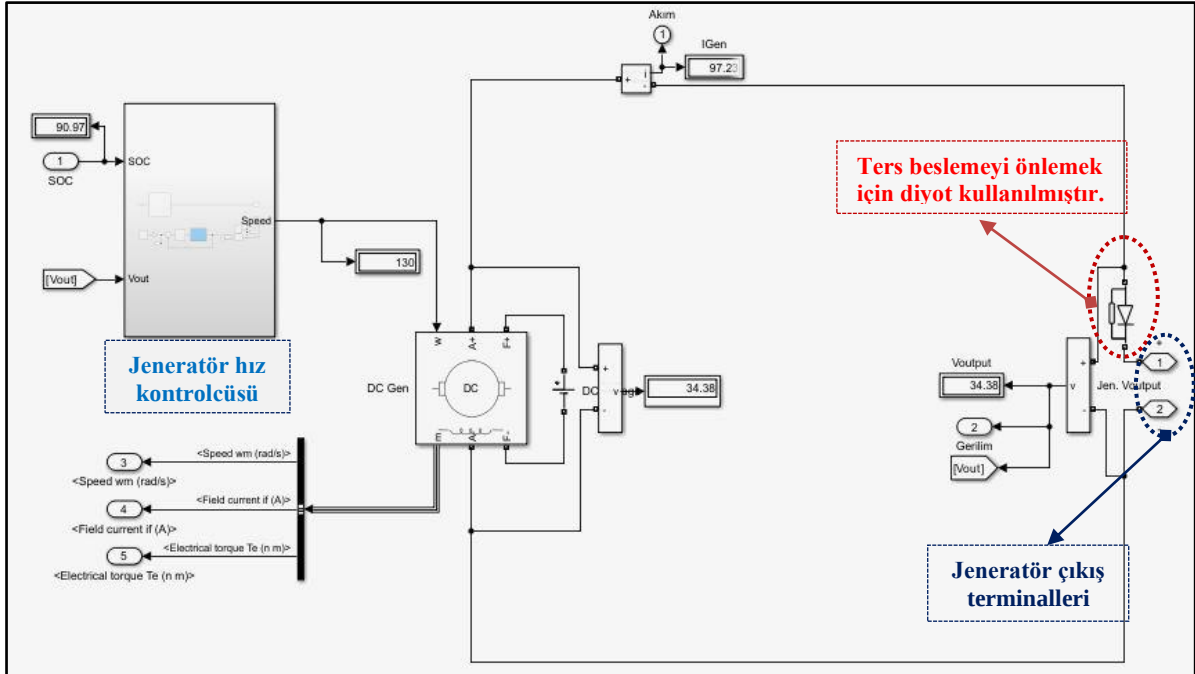
Şekil 3.1. Sistem çalışma prensibi

Şekil 3.1’de bulunan sistem çalışma prensip şeması baz alınarak tasarlanan hibrit sistemde, jeneratör ile hem batarya paketi şarj edilmekte hem de yük beslenmektedir. Batarya sistemi şarj ve deşarj işlemi boyunca kontrol sistemi tarafından takip edilerek aktif dengeleme işlemine tabi tutulmaktadır. Sistemin genel tasarımı Şekil 3.2’de verilmiştir.

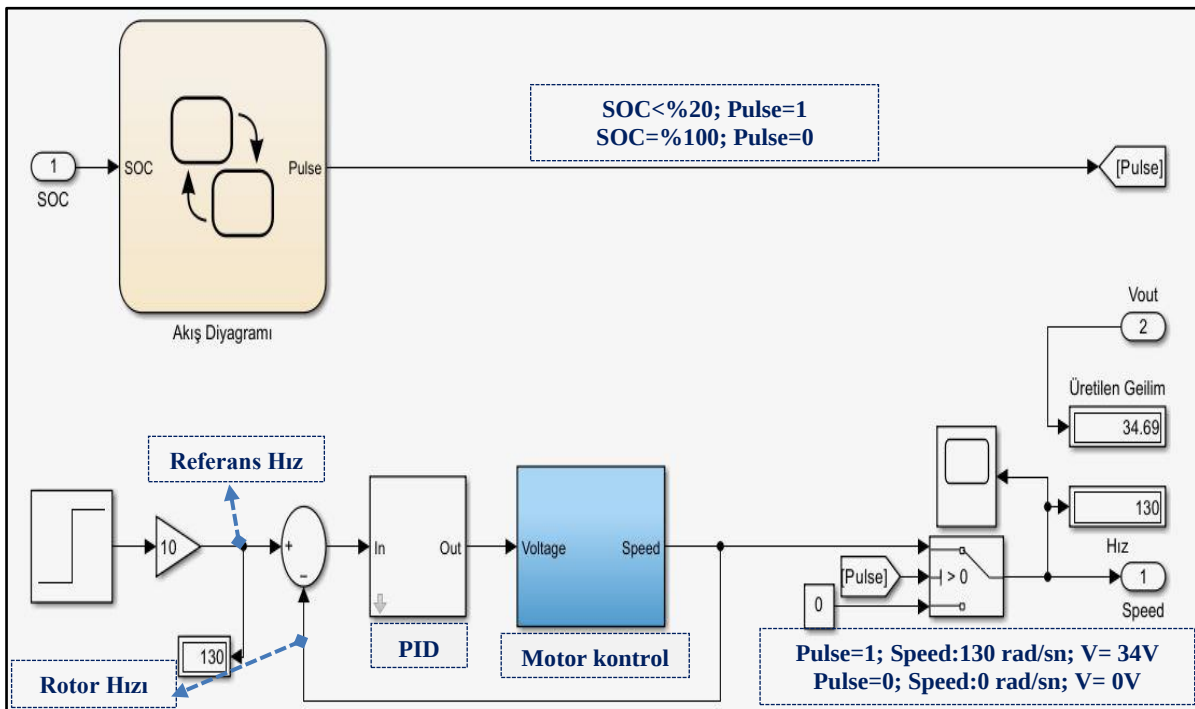


Şekil 3.2. Sistem tasarımı

Tasarlanan sistemde DC generator kullanılmıştır. Şekil 3.3'te verilen jeneratör tasarımı Şekil 3.4'te verilen jeneratör hız kontrolü tasarımı ile kontrollü gerilim üretimi sağlanmıştır.

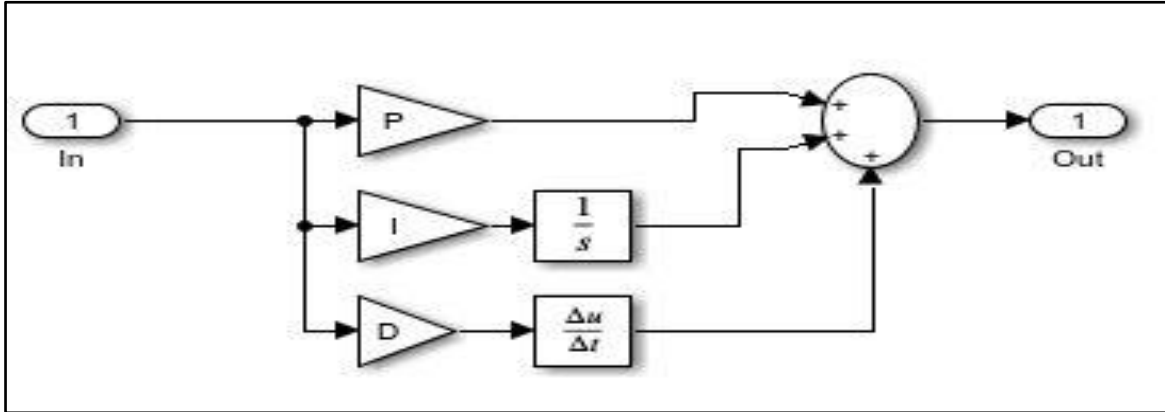


Şekil 3.3. Jeneratör sistem tasarımı



Şekil 3.4. Jeneratör hız kontrolü

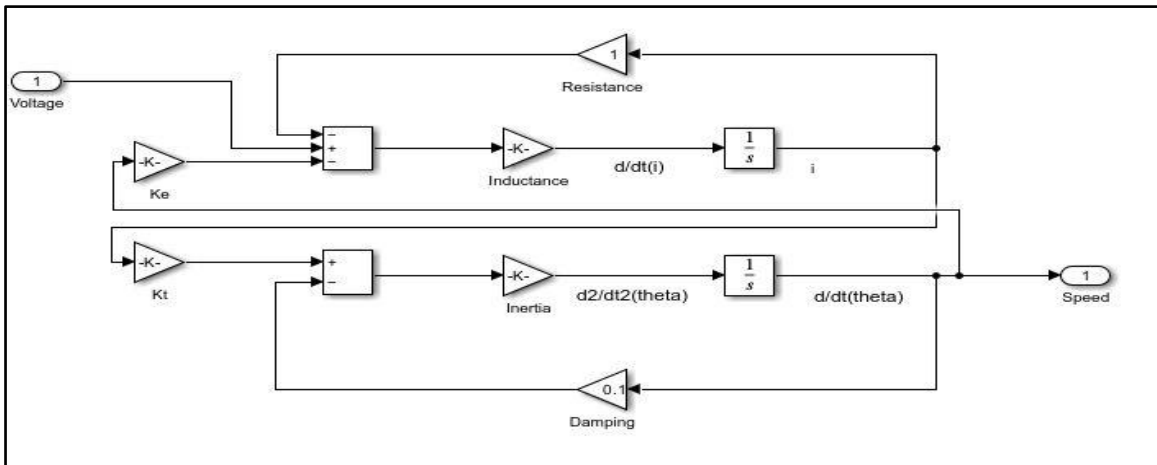
Hız kontrolünde hata sinyalini en az düzeyde tutmak için PID denetleyicisi ve hız kontrolü için motor hız kontrol algoritması tasarlanmıştır. PID denetleyici algoritması Şekil 3.5, motor hız kontrol algoritması Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Jeneratör sistemi, batarya paketine ait şarj yüzde parametresini referans alarak çalışmaktadır. Şarj yüzdesi %100'e ulaştığında jeneratör durmakta ve yükü batarya paketi beslemektedir. Şarj yüzdesi %20'e düştüğünde jeneratör devreye girerek hem batarya paketini şarj etmekte hem de yükü beslemektedir.



Şekil 3.5. PID denetleyici algoritması

Tablo 3.1. PID denetleyici katsayıları

Katsayılar	Değerler
Kp	110
Kd	110
Ki	5



Şekil 3.6. Motor kontrol algoritması

4. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİNİN SİMULİNK MODELLEMESİ

Bu bölümde batarya yönetim sisteminin en önemli bölümü olan hücre dengeleme işlemini yapan tek indüktörlü aktif dengeleme devresi tasarlanmıştır. Tek indüktörlü dengeleme yöntemi için belirlenen akış şeması Şekil 4.1’de verilmiştir. İlk olarak kontrol sistemi tarafından paketteki hücre şarj yüzdelerinin anlık değeri belirlenmektedir. Şarj yüzdesi en yüksek ve en düşük olan hücreler seçilmekte şarj yüzdesi en yüksek olan hücreye ait anahtarlar PWM₁ sinyali ile kontrol edilerek bobin enerjilendirilir. Daha sonra şarj yüzdesi en düşük olan hücre anahtarı PWM₂ sinyali ile kontrol edilerek bobinde depolanan enerji şarj yüzdesi en düşük olan hücreye aktarılmaktadır. Bu işlem dinamik olarak sürekli yapılarak dengeleme işlemi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.1. Akış şeması

4.1. Tasarımlarda Kullanılan Ekipmanlar

4.1.1. Tasarlanan Batarya Paketi

Batarya paketinde lityum iyon teknolojisine sahip yaygın olarak kullanılan oksit türlerinden olan lityum nikel oksit (LiNiO₂) yapılı 3,6V 48 Ah parametrelili hücreler tercih edilmiştir. Pakette sekiz hücre seri olarak (8S) tasarlanmıştır. Batarya paketine ait parametreler Tablo 4.1’de verilmiştir. Batarya paketinde kullanılan ekipman listesi de Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Batarya paketine ait parametreler

Nominal Gerilim	Maksimum Gerilim	Kapasite
28,8V	32 V	48.000 mAh

Tablo 4.2. Batarya paketinde kullanılan ekipmanlar

Eleman	Parametre	Adet
Batarya Hücresi	3,6V 48Ah	8
İndüktör	0,001 H	1
Direnç	0,01 Ohm	1
Anahtarlama elemanı		16

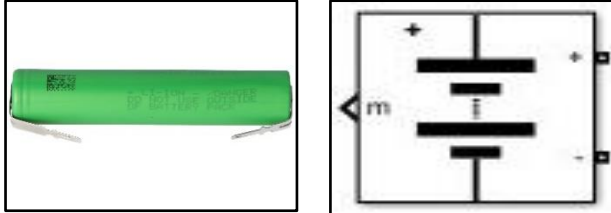
4.1.2. Kullanılan Pil Modeli

Tasarlanan paket sisteminde bulunan hücreler için Matlab Simulink kütüphanesinde mevcut olan lityum iyon (Li-ion) pil modeli kullanılmıştır. Pil hücresine ait parametreler Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Pil hücresine ait parametreler

Nominal Gerilim	Maksimum Gerilim	Kesme Gerilimi	Nominal Kapasite	Maksimum Kapasite	Nominal Deşarj Akımı	Pil İç Direnci
3.4 V	4 V	2.55 V	48 Ah	50 Ah	24 A	0.000688 Ω

Lityum iyon tabanlı bataryalar nikel tabanlı bataryalara göre daha yüksek enerji yoğunluğu ve nominal gerilime sahiptir. Tasarımda kullanılan pil hücresi Şekil 4.2'de verilmiştir.

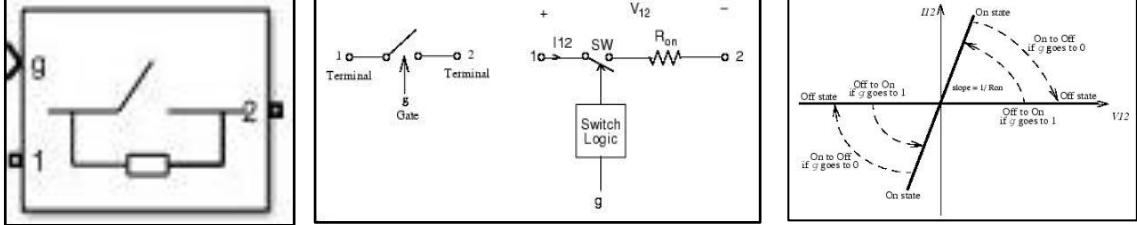
**Şekil 4.2.** Tasarımda kullanılan pil hücre modeli

4.1.3. Anahtarlama Elemanları

Tasarlanan paket sisteminde hücreler arasındaki enerji transferini gerçekleştirmek için anahtarlama elemanı eklenmiştir. Yüksek güç ve frekans değerlerinde anahtarlama elemanı olarak tercih edilen MOSFET ve GTO (Tristör) ile çalışma prensibi aynı olan ideal switch tercih edilmiştir. Şekil 4.3'te simülasyonda kullanılan anahtarlama elemanı ve çalışma prensibi verilmiştir (Web1, 2023).

İdeal anahtar bloğu tamamen kapı (gate) sinyali ile kontrol edilir ($g > 0$ veya $g = 0$).

- $g = 0$ olduğunda uygulanan herhangi bir ileri veya geri gerilimi engeller.
- $g > 0$ olduğunda yaklaşık sıfır voltaj düşüşü ile herhangi bir çift yönlü akımı iletir.
- Tetiklendiğinde açık ve kapalı durumları arasında anında geçiş yapar.



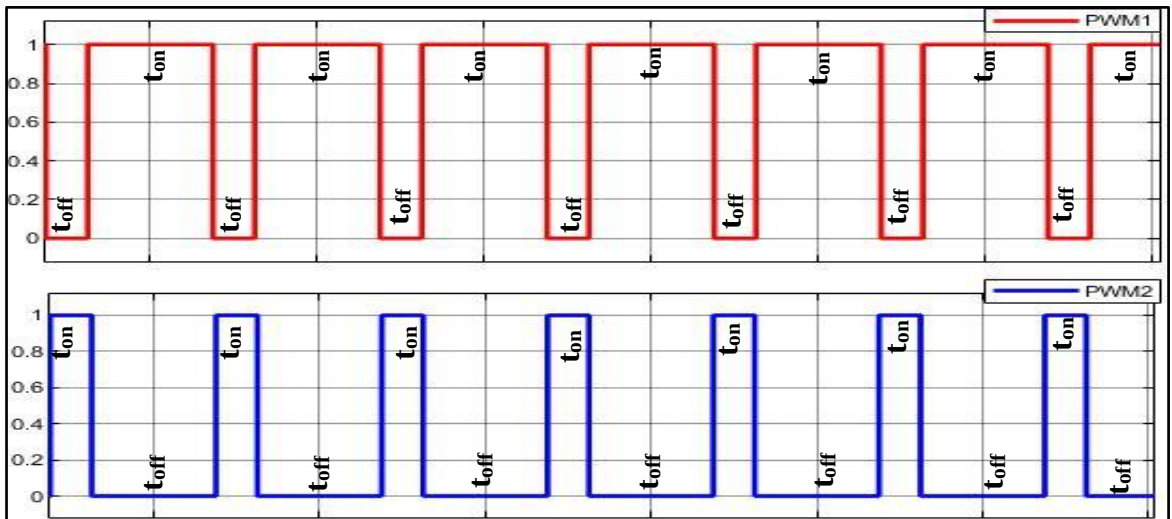
Şekil 4.3. Anahtarlama elemanı ve çalışma prensibi

4.1.4. Anahtarlama İşlemi

Anahtarlama elemanını anahtarlamak için PWM sinyali kullanılmaktadır. PWM sinyali, belirli frekanslarda açma-kapama yapılmasını sağlamaktadır. Açma-kapama süresini PWM sinyalinde kullanılan görev döngüsü oranı belirlenmektedir. Görev Döngüsü (D) eşitlik 4.1'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$D = \% \cdot \frac{t_{on}}{T} \cdot 100 \quad (4.1)$$

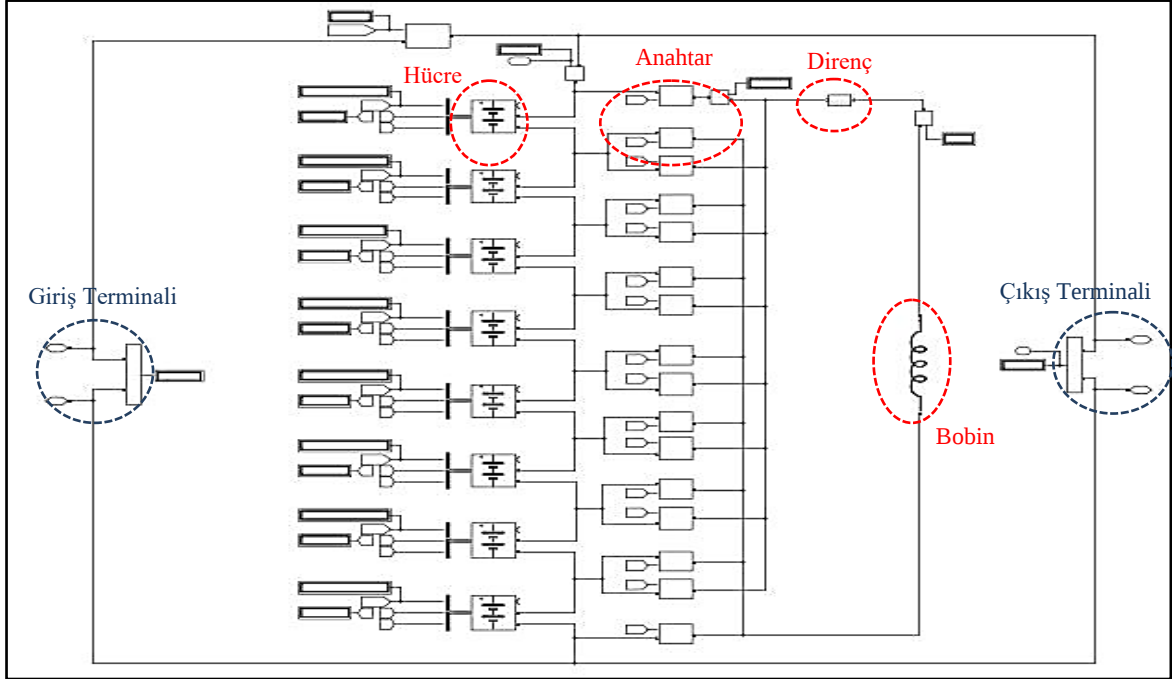
Farklı görev döngülerine sahip PWM1 ve PWM2 sinyallerine ait grafik Şekil 4.4'te verilmiştir. PWM sinyali görselinde anahtarlama elemanı t_{on} süresince iletimde t_{off} süresince kesimdedir. PWM sinyali ile sistem akımları kontrol edilir. Ayrıca belirlenen süre boyunca enerji transferi gerçekleştirilir. Görev döngüsü oranı %70'dir.



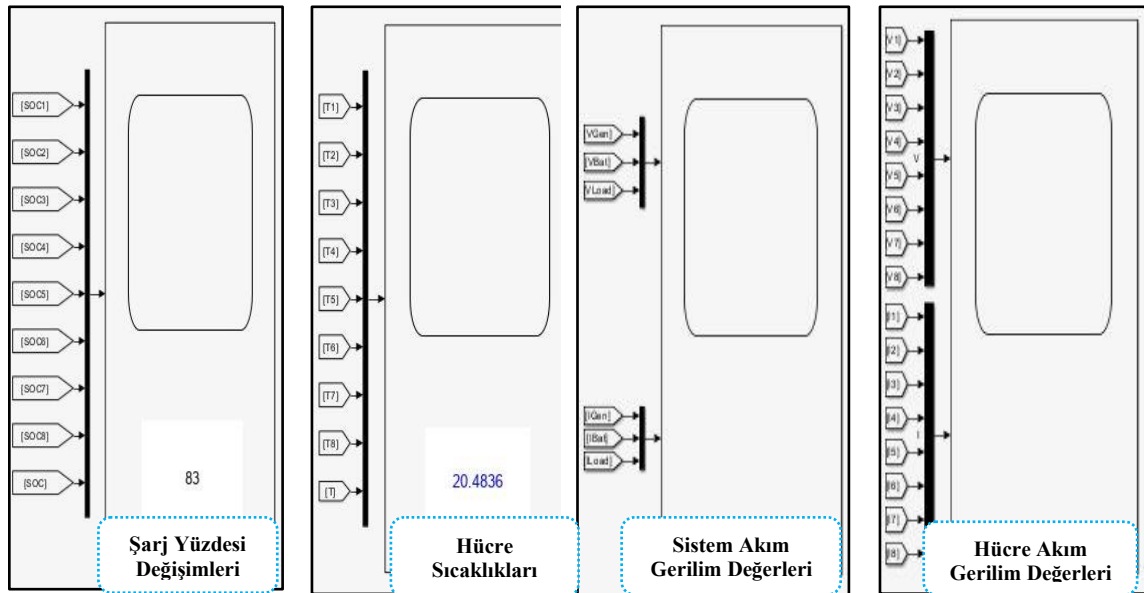
Şekil 4.4. PWM sinyallerinin görev döngüleri

4.2. Simulinkte Tasarlanan Aktif Hücre Dengeleme Modeli

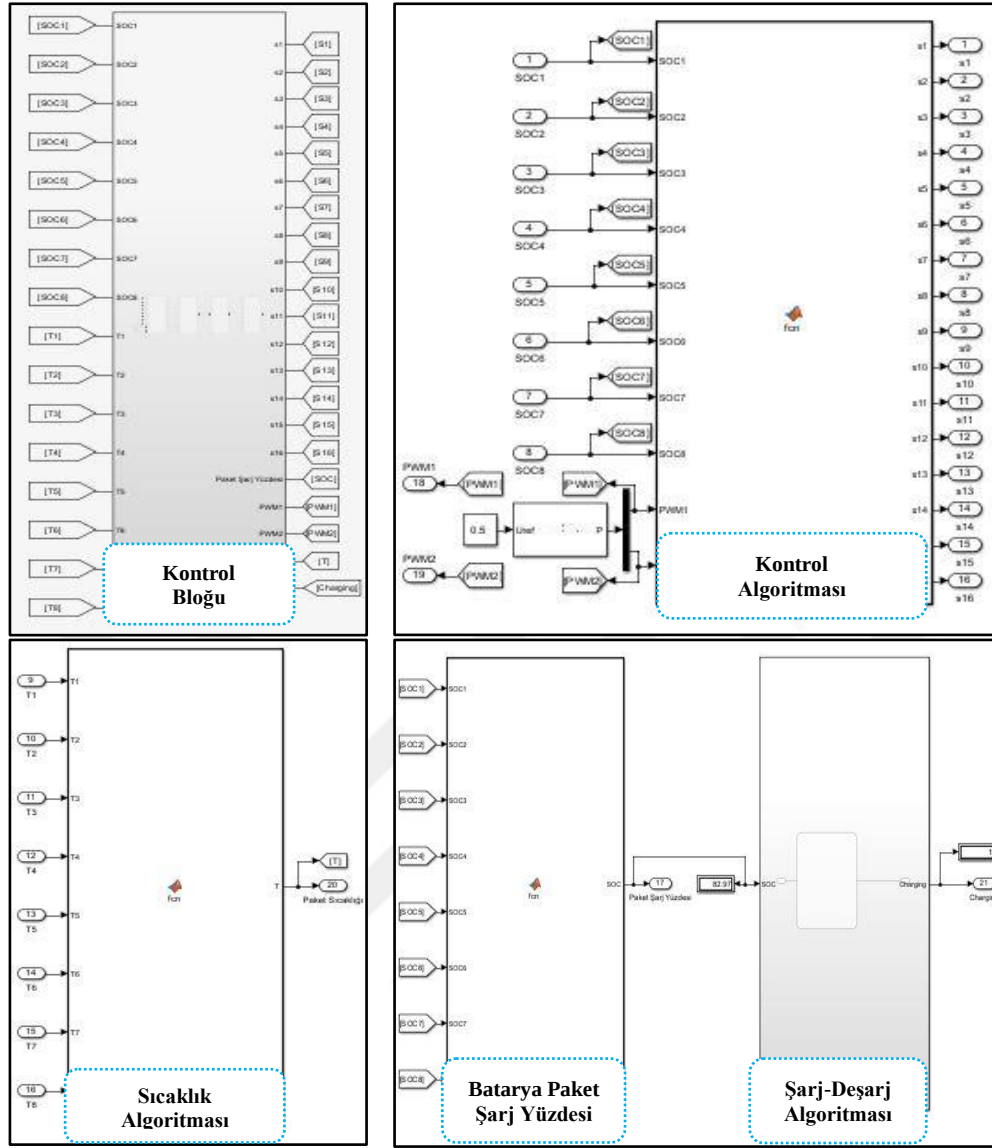
Tasarımda 8 adet hücre, 16 adet anahtarlama elemanı, 1 adet indüktör ve 1 adet direnç kullanılmıştır. Tasarımda tek indüktörlü aktif dengeleme metodu kullanılmış ve bu tasarım Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Batarya paketi tasarımı



Şekil 4.6. Batarya paketi göstergeleri



Şekil 4.7. Batarya paketi kontrol bloğu ve içeriği

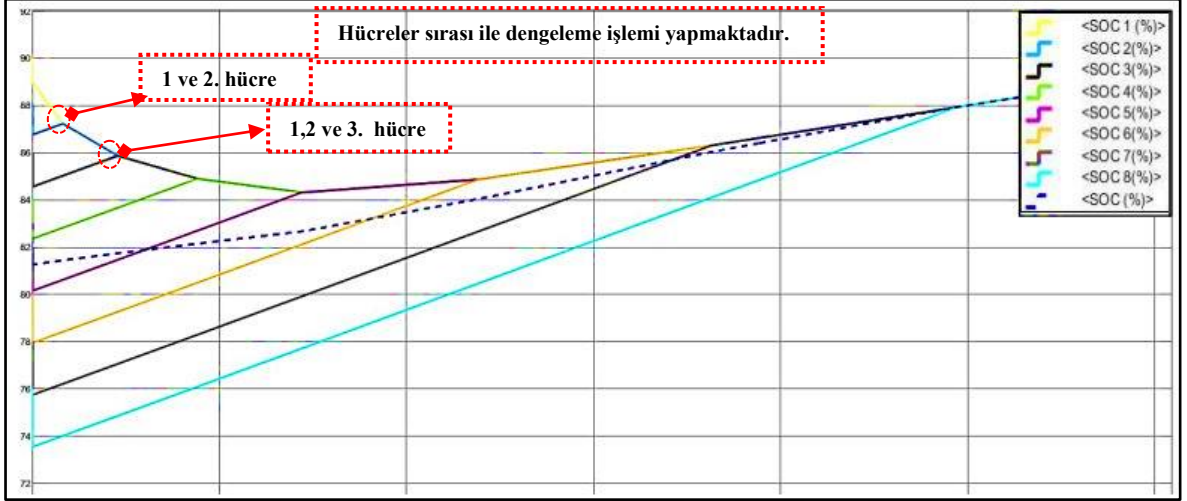
Kontrol algoritması bloğunda bulunan algoritma kodu Tablo 4.4’te verilmiştir. Kontrol algoritmasında 56 farklı durum dikkate alınarak kodlama yapılmıştır. Tablo 4.4’te ise 2 farklı durum örneği verilmiştir.

Tablo 4.4. Fonksiyon bloklarında bulunan kodlar

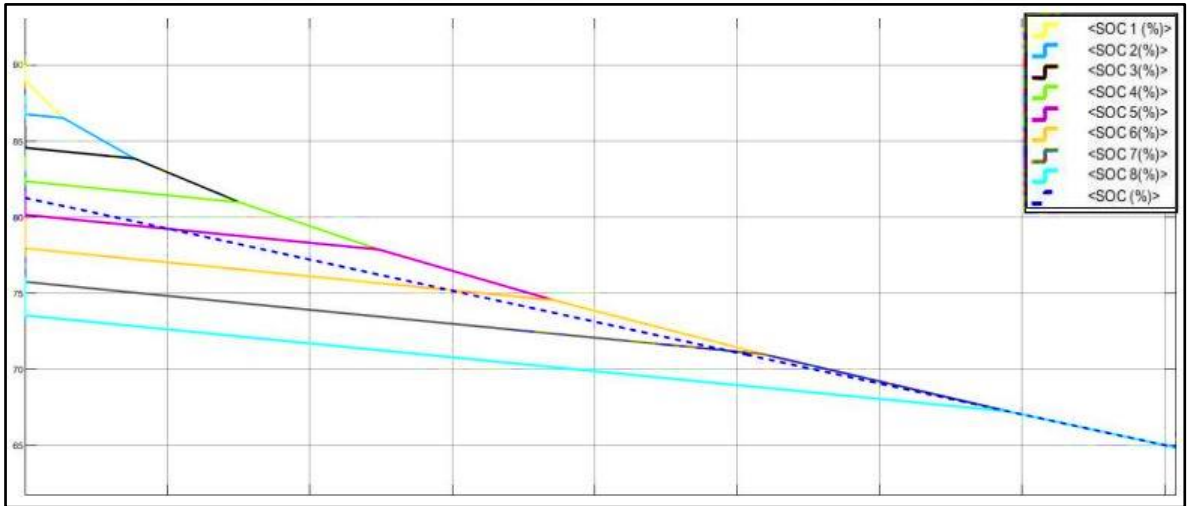
Fonksiyon Bloğu	Algoritma
	function [s1, s2, s3, s4, s5, s6, s7, s8, s9, s10, s11, s12, s13, s14, s15, s16] = fcn (SOC1, SOC2, SOC3, SOC4, SOC5, SOC6, SOC7, SOC8, PWM1, PWM2) High = max ([SOC1, SOC2, SOC3, SOC4, SOC5, SOC6, SOC7, SOC8]); Low = min ([SOC1, SOC2, SOC3, SOC4, SOC5, SOC6, SOC7, SOC8]);
Kontrol Bloğu	if High ==SOC1&& Low ==SOC2 s1=PWM1; s2=PWM1; s3=PWM2; s4=PWM2; s5=0; s6=0; s7=0; s8=0; s9=0; s10=0; s11=0; s12=0; s13=0; s14=0; s15=0; s16=0; elseif High ==SOC1&& Low ==SOC3 s1=PWM1; s2=PWM1; s5=PWM2; s6=PWM2; s3=0; s4=0; s7=0; s8=0; s9=0; s10=0; s11=0; s12=0; s13=0; s14=0; s15=0; s16=0; ...

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tek indüktörlü aktif dengeleme tasarım ve testleri MATLAB Simulink programında yapılmıştır. Bir hücrenin komşu hücresiyle şarj seviyesi eşit oluncaya kadar enerji transferi yapılarak dengeleme işlemi yapılmıştır. Bütün hücrelerin şarj seviyesi eşit olana kadar bu işlem sırasıyla devam etmektedir. Şekil 5.1’de paket hücrelerine ait şarj konumunda dengeleme işlemi ve Şekil 5.2’de deşarj konumunda dengeleme işlemi grafiği verilmiştir.



Şekil 5.1. Şarj konumunda hücrelerin dengeleme grafiği



Şekil 5.2. Deşarj konumunda hücrelerin dengeleme grafiği

Şekil 5.4’te hibrit sisteme ait çalışma esnasında akım ve gerilimlere ait değerlere ait grafik verilmiştir. Şarj esnasında jeneratör hem yükü hem de batarya paketini beslemektedir. Deşarj anında ise jeneratör durmakta batarya paketi yükü beslemektedir. Şekil 5.4’te t anında deşarj konumuna geçişte akım ve gerilim değişimi gösterilmiştir. Bu konumda jeneratör durmuş yük batarya tarafından beslenmektedir. 2t anında ise şarj konumuna

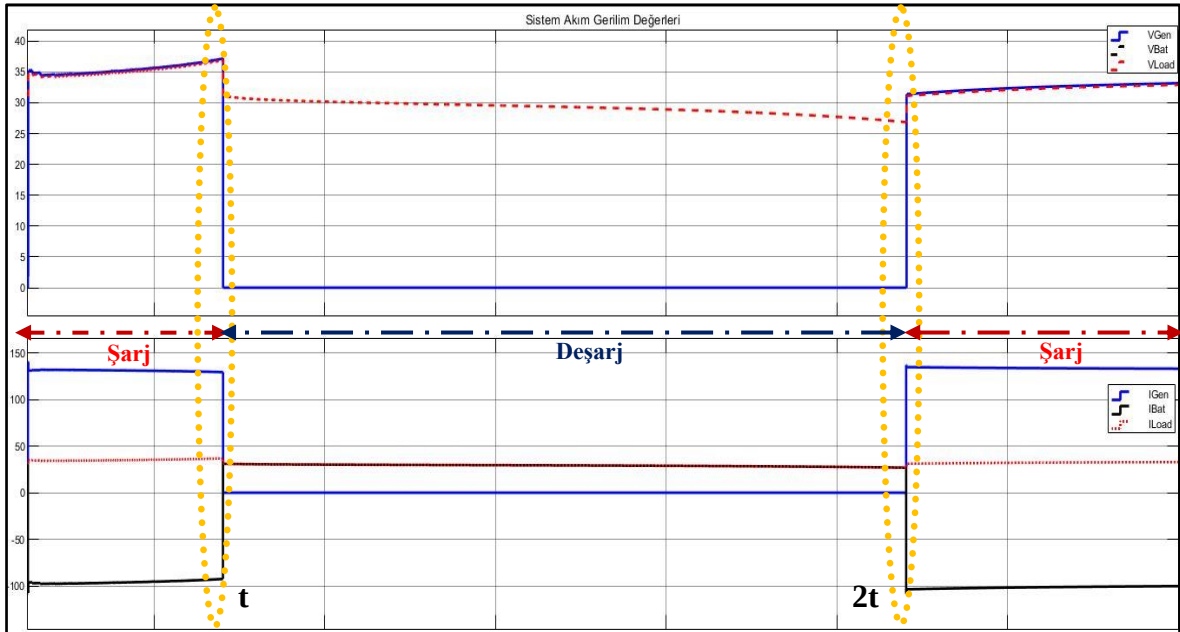
geçişte akım gerilim değişimi gösterilmiştir. Şekil 5.3'te batarya şarj deşarj grafiğinin genel görünümü verilmiştir. Batarya paketi akımı 2C (C-Rate) oranı baz alınarak 96 amper olarak ayarlanmıştır. Batarya gerilimi ise 34V'tur. Sisteme ait parametre değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Sistemin akım ve gerilim değerleri

Batarya Mod	Jeneratör Gerilimi	Jeneratör Akımı	Batarya Gerilimi	Batarya Akımı	Yük Gerilimi	Yük Akımı
Şarj	35 V	130 A	34 V	-96 A	34 V	34 A
Deşarj	0 V	0 A	34 V	+34 A	34 V	34 A

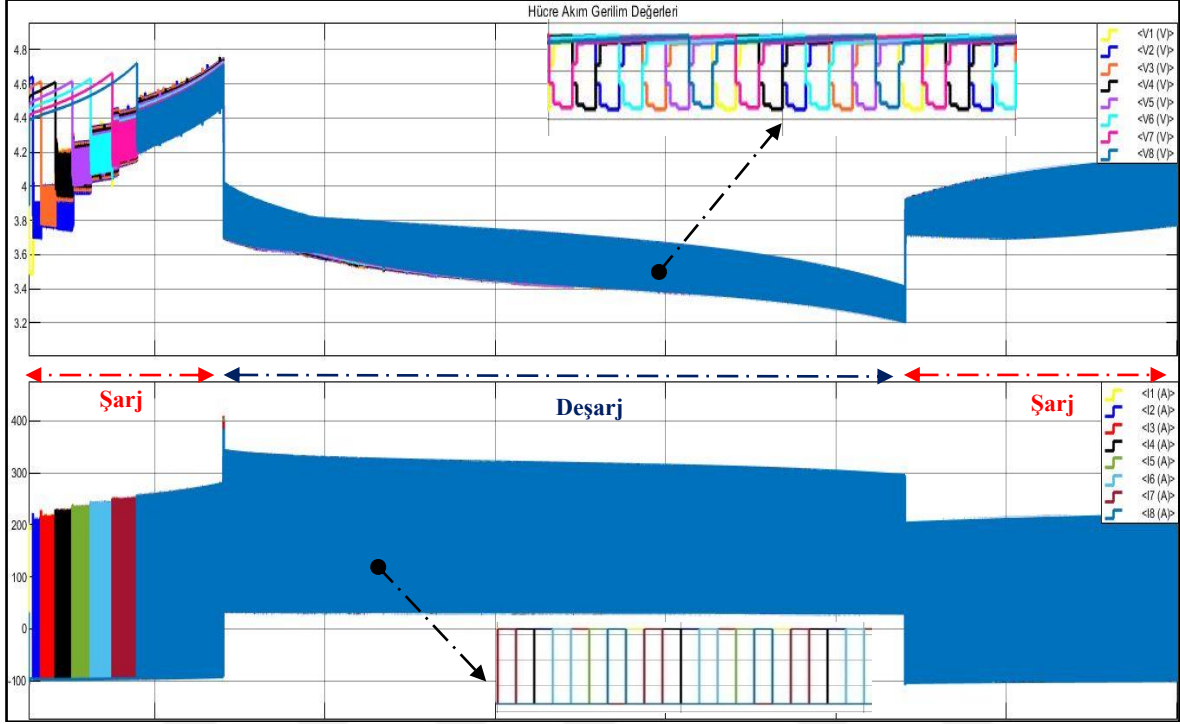


Şekil 5.3. Batarya paketi şarj deşarj grafiği

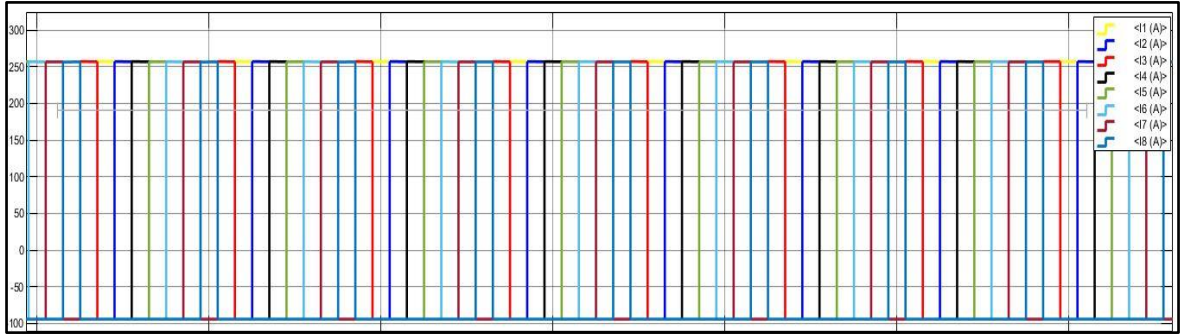


Şekil 5.4. Sistemin akım ve gerilim grafiği

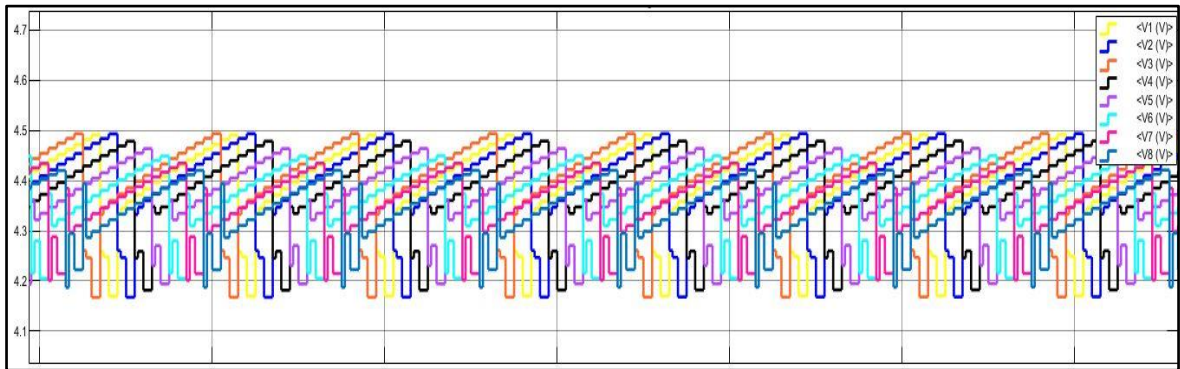
Şekil 5.5'te dengeleme esnasında paket hücrelerine ait akım ve gerilim grafikleri ayrıntılı ve genel görünümü verilmiştir. Şekil 5.6'da hücrelerin akım grafiği, Şekil 5.7'de hücrelerin gerilim grafiği detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 5.5. Hücrelerin akım ve gerilim grafiği

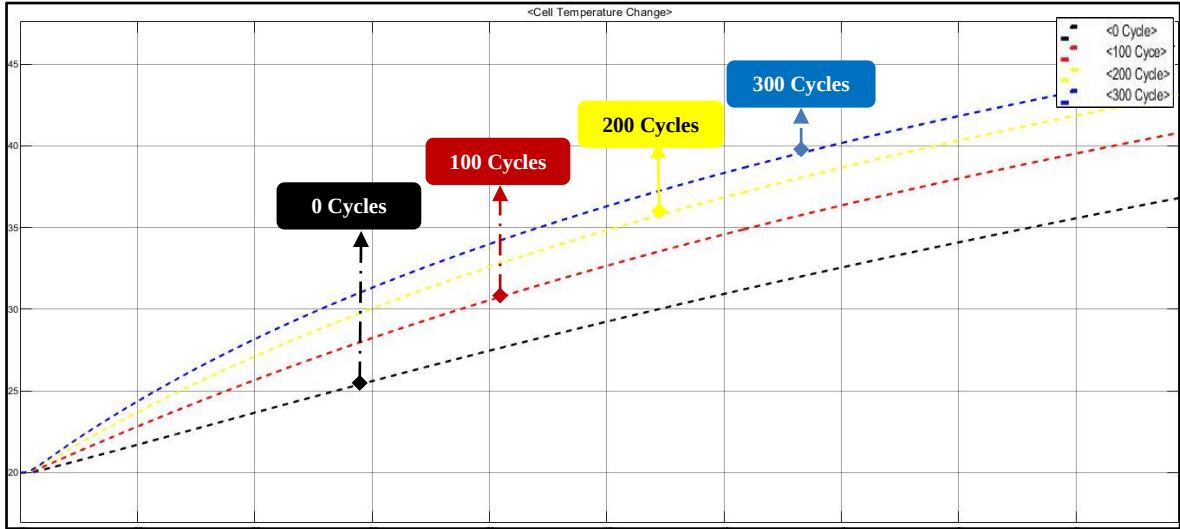


Şekil 5.6. Hücrelerin akım grafiği

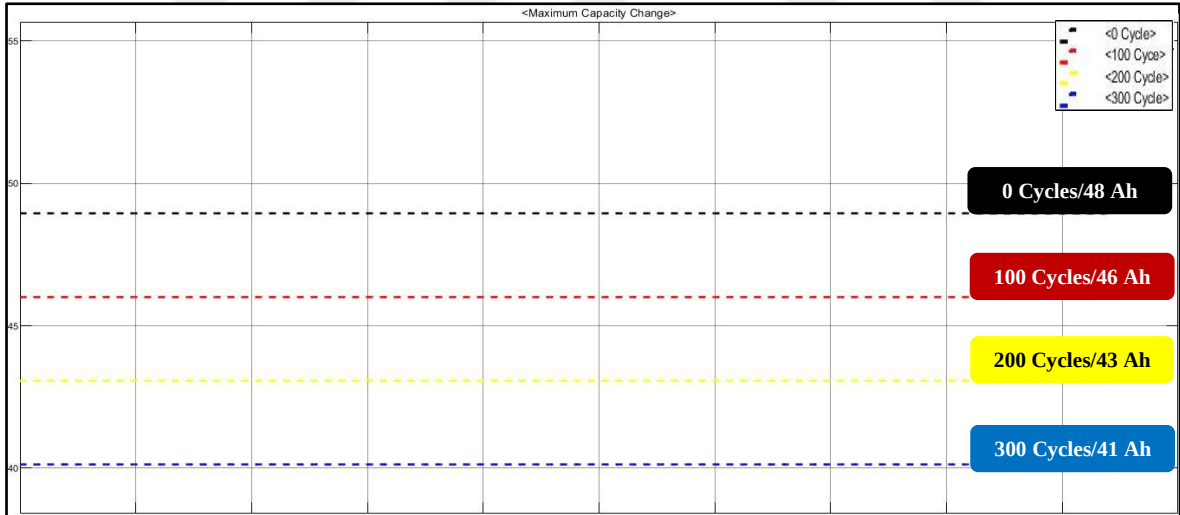


Şekil 5.7. Hücrelerin gerilim grafiği

Lityum iyon bataryalarda iç direnç, hücre yaşlandıkça artmaktadır. (Wang ve ark., 2017). Bataryaların iç direnç değişimlerinin performans etkisini gözlemleyebilmek için bir adet batarya hücresine yaşlandırma işlemi yapılmıştır. İşlem öncesi hücre döngü miktarı 0 ve kapasite değeri 48 Ah'tir. Yaşlandırma işlemi sonrası hücre sıcaklık değişimleri Şekil 5.8'de, hücre kapasite değişimi Şekil 5.9'daki grafiklerde ve Tablo 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.8. Farklı döngü miktarlarında sıcaklık değişim grafiği



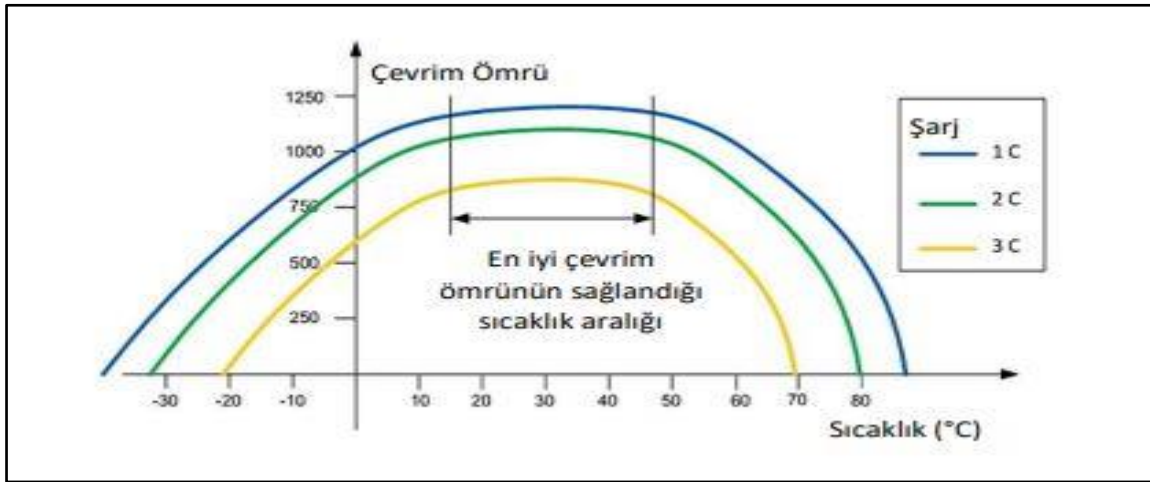
Şekil 5.9. Farklı döngü miktarlarında kapasite değişim grafiği

Tablo 5.2. Döngü miktarına göre verim tablosu

Adım	Döngü (Cycle)	Kapasite (Ah)	Verim (%)
1	0	48	100
2	100	46	95,83
3	200	43	89,58
4	300	41	85,41

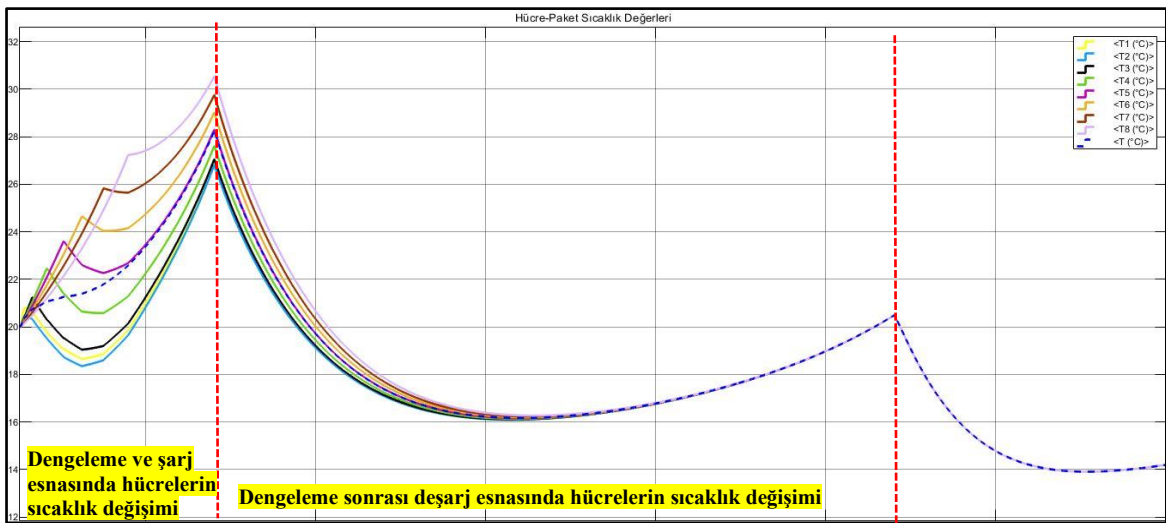
Performans bakımından değerlendirildiğinde döngü sayısı artan hücrelerde iç direnç miktarı arttığı için hücrenin daha çabuk ısındığı gözlemlenmiştir. 100 döngü sonunda %4,17, 200 döngü sonunda %10,42, 300 döngü sonunda %14,59 oranında hücre kapasitesinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Bataryalar 1C oranında şarj edildiğinde en verimli ve yüksek çevrim ömrüne sahip olmaktadır. Şekil 5.10'da 2C ve 3C akım oranlarında pil çevrim ömrünün azaldığı görülmektedir (Rezvanizani ve ark., 2014).



Şekil 5.10. Pillerin farklı C oranlarında ve farklı sıcaklıklarda çevrim ömürleri

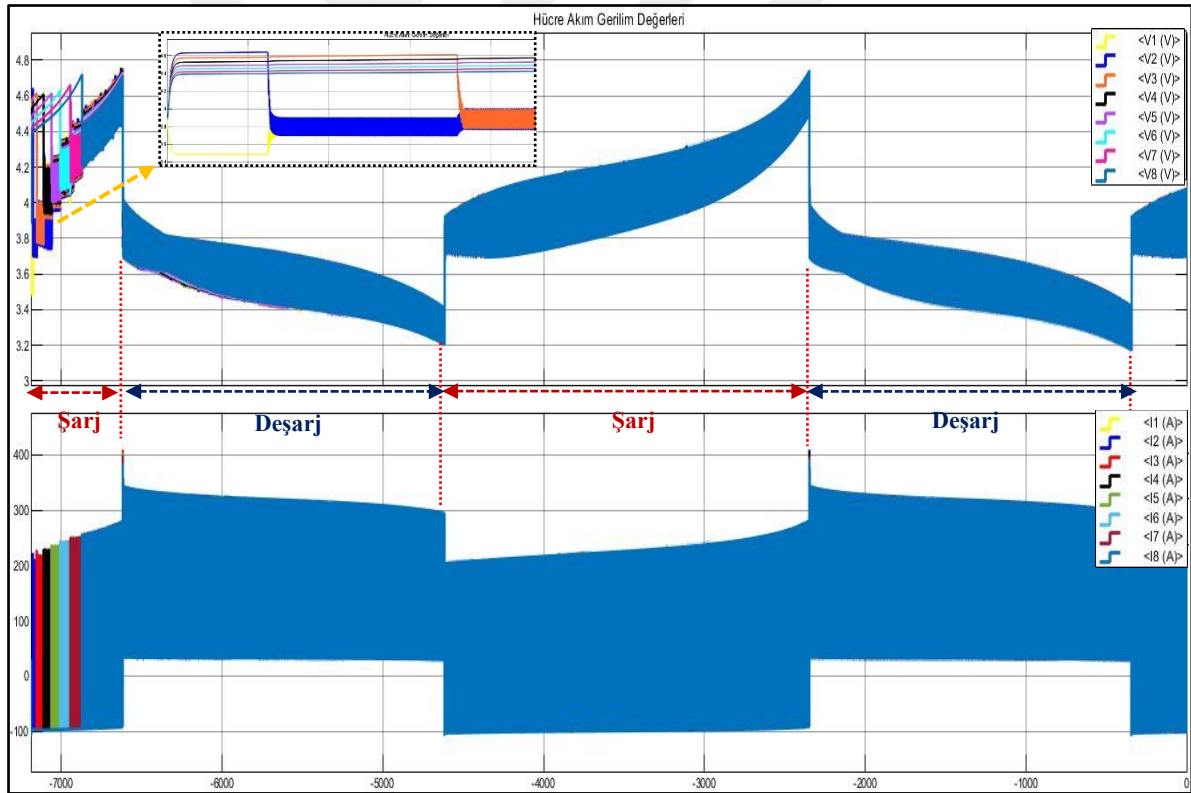
Buna göre şarj deşarj işlemine tabi tutulan batarya paketinde şarj ve deşarj esnasında hücre sıcaklıkları 14-31 °C aralığında Şekil 5.11'de gösterildiği gibi güvenli sınırlarda kaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.11. Batarya hücrelerinin şarj deşarj işleminde sıcaklık değişim grafiği

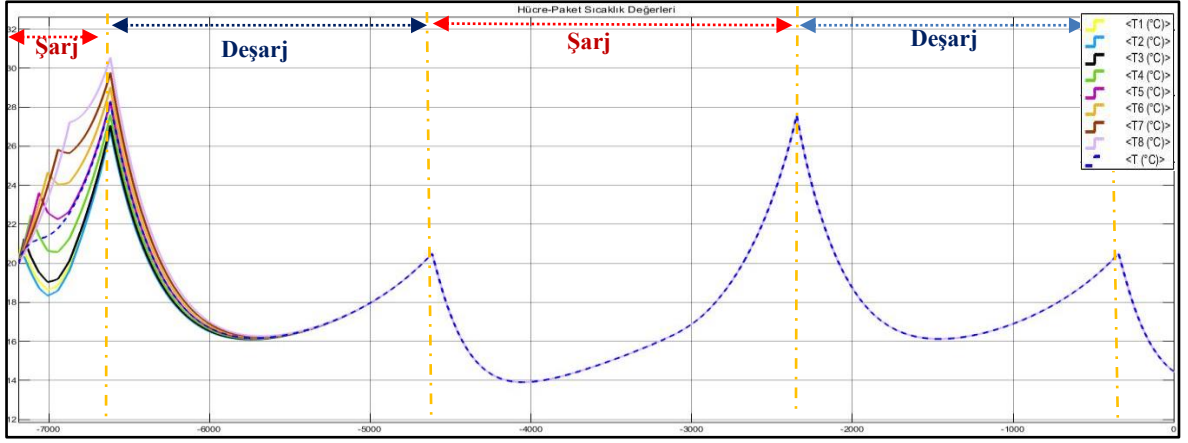
Simülasyon ortamında deşarj esnasında hücre sıcaklıklarının birbirine yakın olması, hücre iç dirençlerinin birbirine yakın olması ayrıca eşit döngü miktarına sahip olmasından kaynaklanır. Gerçekte seri üretilen batarya hücrelerinde iç direnç tolerans aralığı vardır. Bu tolerans, batarya hücresinin fiziksel ve kimyasal yapısında küçük farklılıklara sebep olur. Bu farklılıklar yüksek kapasiteli batarya paketi tasarımlarında kullanımlarına bağlı olarak hücrelerin elektriksel özelliklerinin farklılık göstermesine de sebep olur. Bu nedenle hücrelerin birbirine göre şarj deşarj esnasında sıcaklık değerleri bir miktar farklılık gösterebilir.

Batarya paketinin çalışma esnasındaki hücrelerin akım gerilim değerlerine ait genel verilerini içeren grafik Şekil 5.12’de verilmiştir. İşaretlenen noktadan anlaşılacağı üzere hücre 1 ile hücre 2 kendi arasında enerji transferi yaparak dengelenmiş ve daha sonra bir sonraki komşu hücre olan hücre 3 ile dengelenmişlerdir. Böylelikle komşu hücreler arasında sırasıyla dengeleme yaparak eşitlenmektedir.



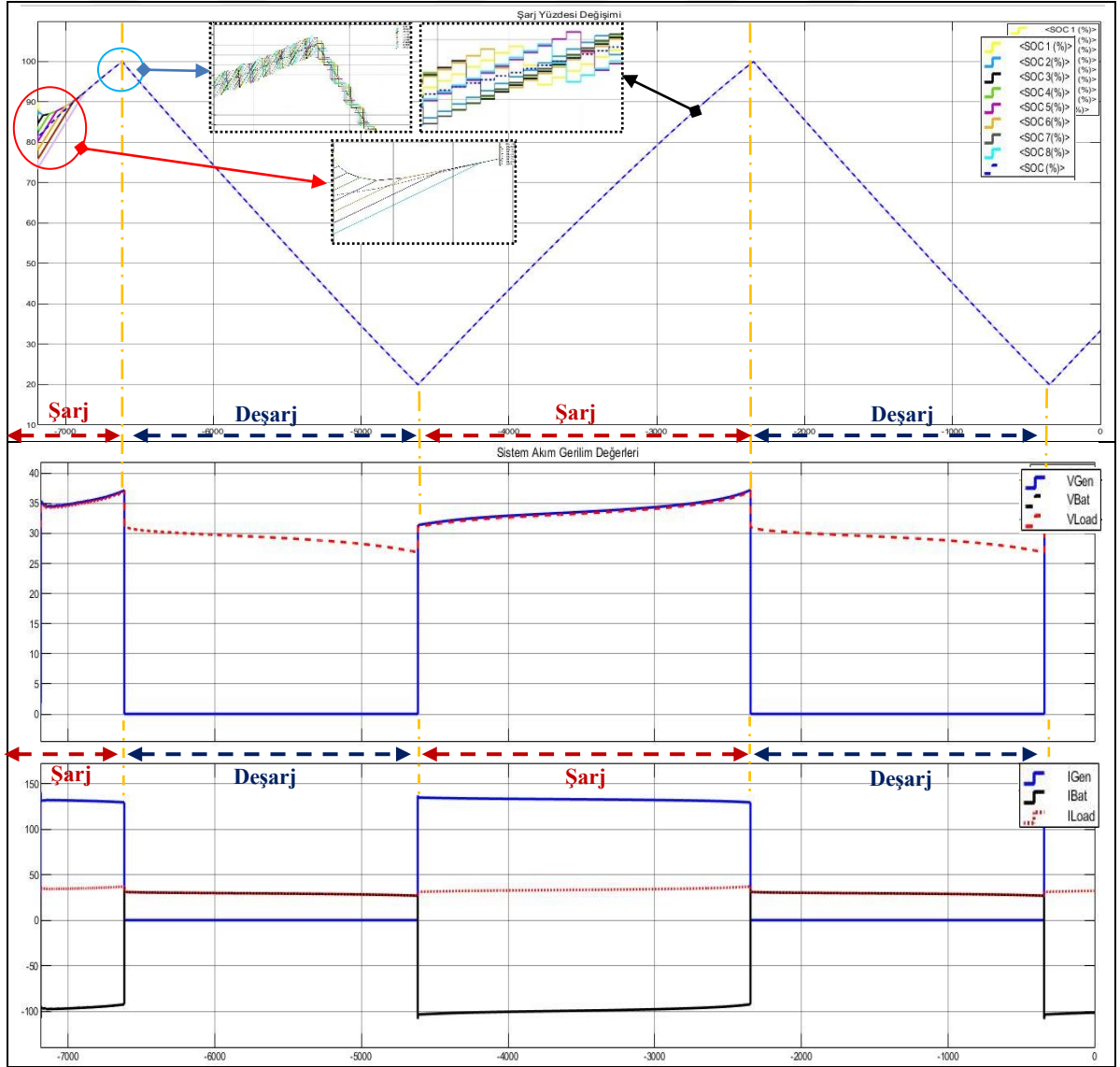
Şekil 5.12. Batarya hücrelerinin akım ve gerilim değerlerinin genel grafiği

Batarya paketinin çalışma esnasındaki hücrelerin sıcaklık değerlerine ait genel verilerini içeren grafik Şekil 5.13’de verilmiştir. Şarj esnasında hücrelerin sıcaklıkları artış göstermiştir. Deşarj esnasında ise hücre sıcaklıkları şarj konumuna göre daha az olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.13. Batarya hücrelerinin şarj deşarj işleminde sıcaklık değişimleri genel grafiği

Batarya paketinin çalışma esnasındaki şarj ve deşarj konumuna ait genel verilerini içeren grafik ve akım ve gerilim verilerini içeren grafik Şekil 5.14'te verilmiştir.



Şekil 5.14. Batarya paketine ait şarj deşarj genel grafiği

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, İnsansız hava araçlarında (İHA) jeneratör sistemleri için MATLAB-Simulink ortamında indüktör tabanlı aktif hücre dengeleme tasarımı yapılmıştır. İndüktör tabanlı tasarım diğer yöntemlere göre dengeleme süresi daha kısadır. Jeneratör, batarya paketi ve yükün akım-gerilim verileri ve hücrelerinin sıcaklık verileri elde edilmiştir. Bütün veriler grafiksel olarak anlık olarak izlenmektedir. Tasarımda kullanılan parametreler gözlemlendiğinde sıcaklık verilerinin güvenli sınırlar içinde kaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca bir pil hücresine yaşlandırma işlemleri uygulanarak kapasite ve sıcaklık verilerinin değişimi gözlemlenmiş ve verimlilik açısından detaylı olarak incelenmiştir. Aktif hücre dengeleme tasarımları ile yapılan çalışmalar incelendiğinde elde edilen sonuçların ve tasarımın başarılı olduğu görülmektedir. Ayrıca maksimum ve minimum şarj seviyeleri kontrol altında tutularak istenmeyen durumlara karşı (verim kaybı, ekzotermik reaksiyonlar vb. olumsuz durumlar) önlem alınmıştır. Sonuç olarak güvenlik ve maksimum verim hedefine ulaşılmıştır.

Sistemin daha sürdürülebilir ve verimli olabilmesi için ayrıca batarya soğutma sistemi tasarlanarak batarya paketi sıcaklığının kontrol altında tutulması için gerekli çalışmalar yapılmalıdır.

Tasarlanmış olan dengeleme devresi lityum iyon pillerden oluşturulmuştur. Farklı çalışmalarda diğer pil türleri ile tasarımlar yapılarak sonuçlar kıyaslanabilir. Ayrıca fiziki olarak uygulaması yapılan batarya paketinin gerçek çalışma koşullarında sistemin tepkileri gözlemlenebilir. Bu sonuçlara bakılarak tasarımda ve fiziki uygulamada gerekli iyileştirmeler yapılabilir.

Bataryalar 1C oranında şarj edildiğinde en verimli ve yüksek çevrim ömrüne sahip olmaktadır. 2C ve 3C akım oranlarında pil çevrim ömrünün azaldığı görülmektedir. Bu sebeple bataryaların şarj oranı 1C düzeyinde tutularak pil verimliliğinin maksimum düzeyde olması sağlanmalıdır.

7. KAYNAKLAR

- Aktaş, M., Baygüneş, B., Kıvrak, S., Çavuş, B. ve Sözen, F. (2020) “Elektrikli araç için düşük maliyetli bir batarya yönetim sistemi tasarımı ve gerçekleştirilmesi”, *European Journal of Science and Technology*, 227-238.
- Andrea, D. (2010) *Battery Management Systems for Large Lithium-ion Battery Packs*. London.
- Balagopal, B. ve Chow, M. Y. (2015) “The state of the art approaches to estimate the state of health (SOH) and state of function (SOF) of lithium Ion batteries”, *Proceeding-2015 IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2015*, 1302-1307.
- Barlak, C. ve Özkazanç, Y. (2013) “Batarya kapasite kestirimi”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26(1), 185-191.
- Baughman, A. C. ve Ferdowsi, M. (2008) “Double-tiered switched-capacitor battery charge equalization technique”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6), 2277-2285.
- Baygüneş, B. (2019) *Elektrikli araçlarda batarya yönetim sistemi*. Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
- Baykal, T. (2013) *Lityum-polimer bataryalar için batarya yönetim sistemi bileşenleri/ Lityum polimer piller için pil yönetim sistemi tasarımı*. İstanbul Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Berecibar, M., Gandiaga, I., Villarreal, I., Omar, N., Van Mierlo, J. ve Van Den Bossche, P. (2016) “Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 572-587.
- Cadar, D. V., Petreus, D. M. ve Patarau, T. M. (2010) “An energy converter method for battery cell balancing”, *ISSE 2010-33rd International Spring Seminar on Electronics Technology: Polymer Electronics and Nanotechnologies: Towards System Integration-Conference Proceedings*, 290-293.
- Cao, J., Schofield, N. ve Emadi, A. (2008) “Battery balancing methods: A comprehensive review”, *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2008*.
- Conway, T. (2021) “An isolated active balancing and monitoring system for lithium ion battery stacks utilizing a single transformer per cell”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(4), 3727-3734.

- Çetin, M. S., Karakaya, B. ve Gençoğlu, T. (2021) “Elektrikli araçlar için lityum iyon bataryaların modellenmesi”, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(2), 755-763.
- Daowd, M., Omar, N., Van Den Bossche, P. ve Van Mierlo, J. (2011a) “Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation”, *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2011*.
- Daowd, M., Omar, N., Van Den Bossche, P. ve Van Mierlo, J. (2011b) “Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation”, *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2011*.
- Darikas, G. (2018) *Design and implementation of a battery management System for lithium-ion batteries suitable for automotive applications*. Aristoteles Üniversitesi.
- Dikmen, İ. C. (2022) *Elektrikli araçlar için akıllı batarya yönetim sisteminin tasarımı ve uygulaması*. İnönü Üniversitesi.
- Efe, Ş. ve Azra Güngör, Z. (2021) “Geçmişten günümüze batarya teknolojisi”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 32(32), 947-955.
- Einhorn, M., Roessler, W. ve Fleig, J. (2011) “Improved performance of serially connected Li-ion batteries with active cell balancing in electric vehicles”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(6), 2448-2457.
- Ekici, Y. E. (2019) *Batarya yönetim sistemleri*. İnönü Üniversitesi.
- Erdoğan, B. (2020) *Active balancing system for large battery pack*. Çukurova Üniversitesi.
- Faika, T., Kim, T. ve Khan, M. (2018) “An internet of things (IoT)-Based network for dispersed and decentralized wireless battery management systems”, *2018 IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo, ITEC 2018*. Long Beach, CA, ABD, 342-346.
- Gül, H. S. (2018) *Elektrikli araçlar için batarya yönetim sistemi tasarımı*. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- He, H., Xiong, R. ve Fan, J. (2011) “Evaluation of lithium-Ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach”, *Energies 2011*, Vol. 4, Pages 582-598, 4(4), 582-598.
- Horiba, T. (2014) “Lithium-ion battery systems”, *Proceedings of the IEEE*, 102(6), 939-950.
- Huang, P. H., Kuo, J. K. ve Huang, C. Y. (2016) “A new application of the ultra battery to hybrid fuel cell vehicles”, *International Journal of Energy Research*, 40(2), 146-159.
- J. M. B. Systems (2012) *Our Guide to Batteries*. London.

- Kara, F., Yücedağ, İ., Uğur DOĞAN, M., Çoruh Üniversitesi Artvin Meslek Yük. Bilgisayar Tek Böl, A. ve Yerleşkesi, S. (2023) “Lityum iyon pillerde bulanık kurallara dayalı optimum şarj stratejisi”, *Journal of Balıkesir University Institute of Science and Technology*, 25(1), 150-163.
- Karadeniz, M., Sezenoğlu, C. ve Balıkcı, A. (2012) “Elektrikli araç batarya sistemleri için aktif hücre dengeleme sistemi”, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa*, 450-454.
- Kıvrak, S., Özer, T. ve Oğuz, Y. (2020) “STM32f103C8 Mikroişlemcisi kullanılarak elektrikli araçlar için pasif dengeleme metodu tabanlı batarya yönetim sistemi tasarımı ve uygulaması”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), 426-433.
- Kiehne, H. A. ve Dekker, M. (2003) *Battery Technology Handbook*. New York.
- Kobzev, G. A. (2000) “Switched-capacitor systems for battery equalization”, *Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-Graduates and Young Scientists: Modern Techniques and Technology, MTT 2000*, 57-59.
- Kong, Z. G., Zhu, C. B., Lu, R. G. ve Cheng, S. K. (2006) “Comparison and evaluation of charge equalization technique for series connected batteries”, *PESC Record-IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*.
- Kundakçı, İ. M. (2016) *Elektrikli araç tasarımı ve batarya dengeleme sistemi*. Kocaeli Üniversitesi.
- Kutkut, N. H. ve Divan, D. M. (1996) “Dynamic equalization techniques for series battery stacks”, *INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings)*, 514-521.
- Küçükdeveci, N. (2018) “Şarj edilebilir Nikel-Metal Hidrür (Ni-MH) pillerinde kullanılan hidrojen depolama alışımlarındaki son gelişmeler”, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 454-472.
- Lin, W. Y. ve Hua, C. C. (2017) “Active battery balancing circuit with AC-link technique based on current-fed-push-pull converter”, *2017 IEEE Conference on Energy Conversion, CENCON 2017*, 2018-January, 339-342.
- Lindemark, B. (1992) “Individual cell voltage equalizers (ICE) for reliable battery performance”, *INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings)*. Kyoto, 196-201.

- Long, L., Wang, S., Xiao, M. ve Meng, Y. (2016) "Polymer electrolytes for lithium polymer batteries", *Journal of Materials Chemistry A*, 4(26), 10038-10069.
- Menak, R., Karadağ, T., Altuğ, M. ve Tan, N. (2021) "Elektrikli araçlarda batarya yönetim sistemleri üzerine bir derleme çalışması", *Gazi University Journal of Science*, 234-275.
- Moore, S. W. ve Schneider, P. J. (2001) "A review of cell equalization methods for lithium Ion and lithium polymer battery systems".
- Omariba, Z. B., Zhang, L. ve Sun, D. (2019) "Review of battery cell balancing methodologies for optimizing battery pack performance in electric vehicles", *IEEE Access*, 7, 129335-129352.
- Park, S. H., Kim, T. S., Park, J. S., Moon, G. W. ve Yoon, M. J. (2007) "A new battery equalizer based on buck-boost topology", *7th International Conference on Power Electronics, ICPE'07*, 962-965.
- Phung, T. H., Crebier, J. C., Chureau, A., Collet, A. ve Nguyen, V. (2011) "Optimized structure for next-to-next balancing of series-connected lithium-ion cells", *Conference Proceedings-IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC*, 1374-1381.
- Rahimi-Eichi, H., Ojha, U., Baronti, F. ve Chow, M. Y. (2013) "Battery management system: An overview of its application in the smart grid and electric vehicles", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7(2), 4-16.
- Reindl, A., Meier, H. ve Niemetz, M. (2020) "Scalable, decentralized battery management system based on self-organizing nodes", *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 12155 LNCS, 171-184.
- Rezvanizani, S. M., Liu, Z., Chen, Y. ve Lee, J. (2014) "Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility", *Journal of Power Sources*, 256, 110-124.
- Rigan, M. (2020) *Elektrikli araçlarda batarya yönetim sistemi tasarımı*. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi.
- Sarıkurt, T. ve Balıkçı, A. (2018) "Elektrikli araç uygulamalarında kullanılan lityum bataryalar için göreceli kapasite tahmin yöntemi", *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(5), 809-816.

- Shang, Y., Zhang, C., Cui, N. ve Guerrero, J. M. (2015) “A cell-to-cell battery equalizer with zero-current switching and zero-voltage gap based on quasi-resonant lc converter and boost converter”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(7), 3731-3747.
- De Souza, J. V., Momesso, A. E. C., Monteiro, F. M. D. S., Otto, R. B. ve Asada, E. N. (2019) “Intelligent management of battery system for energy arbitrage”, *2019 IEEE Milan PowerTech, PowerTech 2019*. Milano, İtalya.
- Soydaş, Ş. (2015) *Lityum tabanlı batarya paketleri için batarya yönetim sistemi tasarımı*. Karabük Üniversitesi.
- Speltino, C., Stefanopoulou, A. ve Fiengo, G. (2010) “Cell equalization in battery stacks through State Of Charge estimation polling”, *Proceedings of the 2010 American Control Conference, ACC 2010*, 5050-5055.
- Şahin, F. ve Kılınç, E. (2022) “Elektrikli araç batarya aktif dengeleme sistemleri için çift yönlü flyback dönüştürücü tasarımı”, *Politeknik Dergisi*, 25(4), 1487-1494.
- Tarhan, B. (2022) *Elektrikli uçaklar için lityum tabanlı batarya yönetim sistemi modellemesi ve tasarımı*. Eskişehir Teknik Üniversitesi.
- Tezde, E. İ. ve Okumuş, H. İ. (2018) “Batarya modelleri ve şarj durumu (SoC) belirleme”, *EMO Bilimsel Dergi*, 8(1), 21-25.
- Tian, L., Hong, M., He, Z. ve Gao, M. (2018) “Active battery balancing circuit based on optimized flyback convertor for large lithium-ion battery packs”, *2018 IEEE 4th International Conference on Control Science and Systems Engineering, ICCSSE 2018*, 212-216.
- Toprakçı, O., Toprakçı, H. A. K., Ji, L. ve Zhang, X. (2011) “ChemInform Abstract: Fabrication and electrochemical characteristics of LiFePO₄ powders for lithium-ion batteries”, *ChemInform*, 42(43).
- Tosun, G. (2019) *Design and implementation of battery management system*. Okan University.
- Üçgün, H., Yüzgeç, U. ve Bayılmış, C. (2021) “İHA bataryasının şarj pedi ile dengeli şarj edilmesi ve gerçek zamanlı izleme sistemi”, *Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science*, 8(1), 398-407.
- Wang, D., Bao, Y. ve Shi, J. (2017) “Online lithium-ion battery internal resistance measurement application in state-of-charge estimation using the extended kalman filter”, *Energies 2017, Vol. 10, Page 1284*, 10(9), 1284.
- Wang, S. C., Chen, G. J., Liu, Y. H., Luo, Y. F. ve Yang, Z. Z. (2022) “An active balancer with rapid bidirectional charge shuttling and adaptive equalization current control for

lithium-ion battery strings”, *International Journal of Energy Research*, 46(1), 223-238.

Web1(2023). <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/idealswitch.html> (Erişim: 25 Nisan 2023).

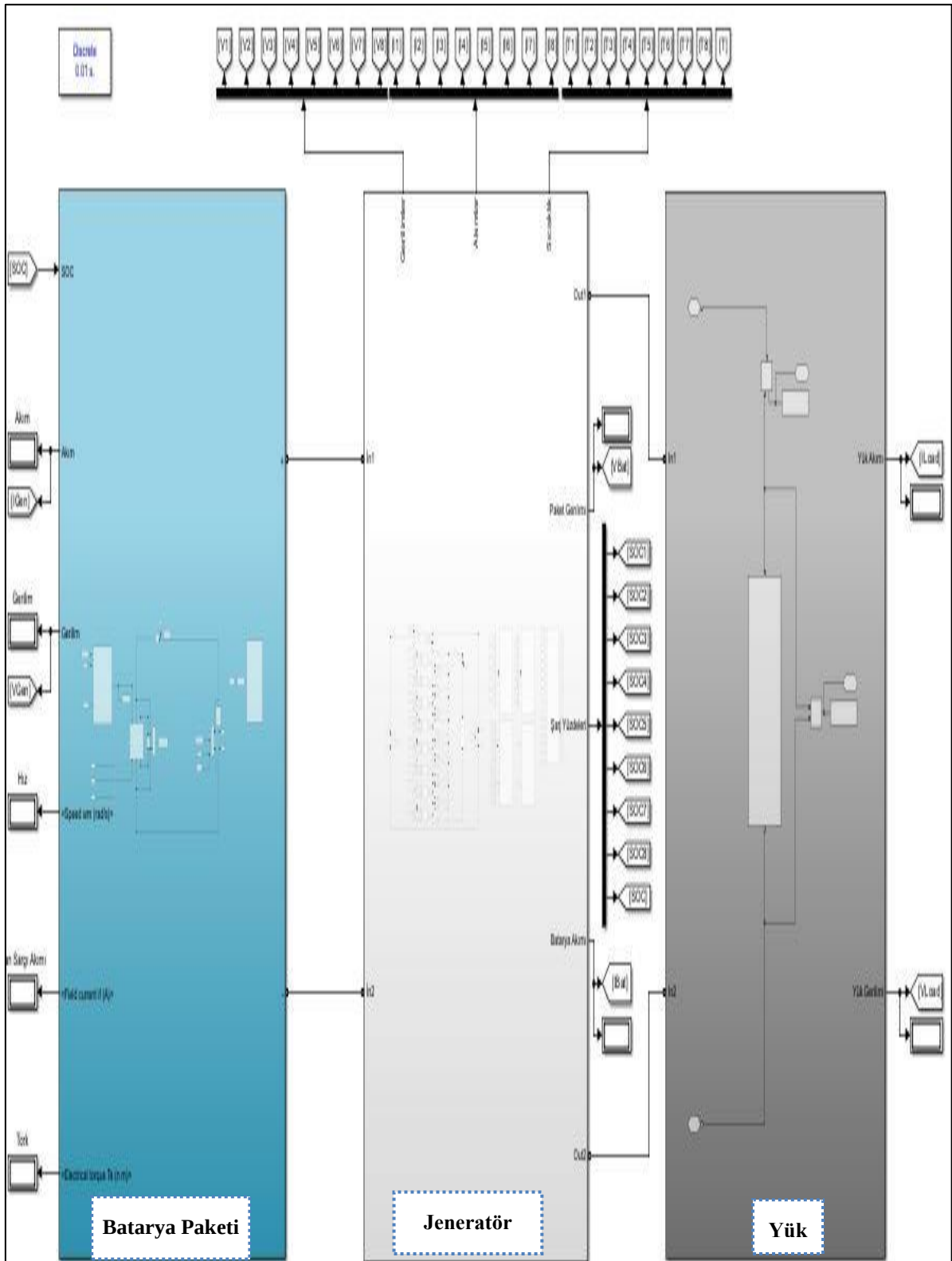
Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M. ve Mithulananthan, N. (2015) “A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365-385.

Yurdakul, H., Delitay, E. C., Akyazı, Ö. ve şahin, E. (2020) “Güneş enerji sistemleri için arduino tabanlı Matlab/Simulink programı üzerinden denetlenen bir akü şarj ünitesi tasarımı ve uygulaması”, *Journal of Investigations on Engineering & Technology*, 3(1), 17-22.



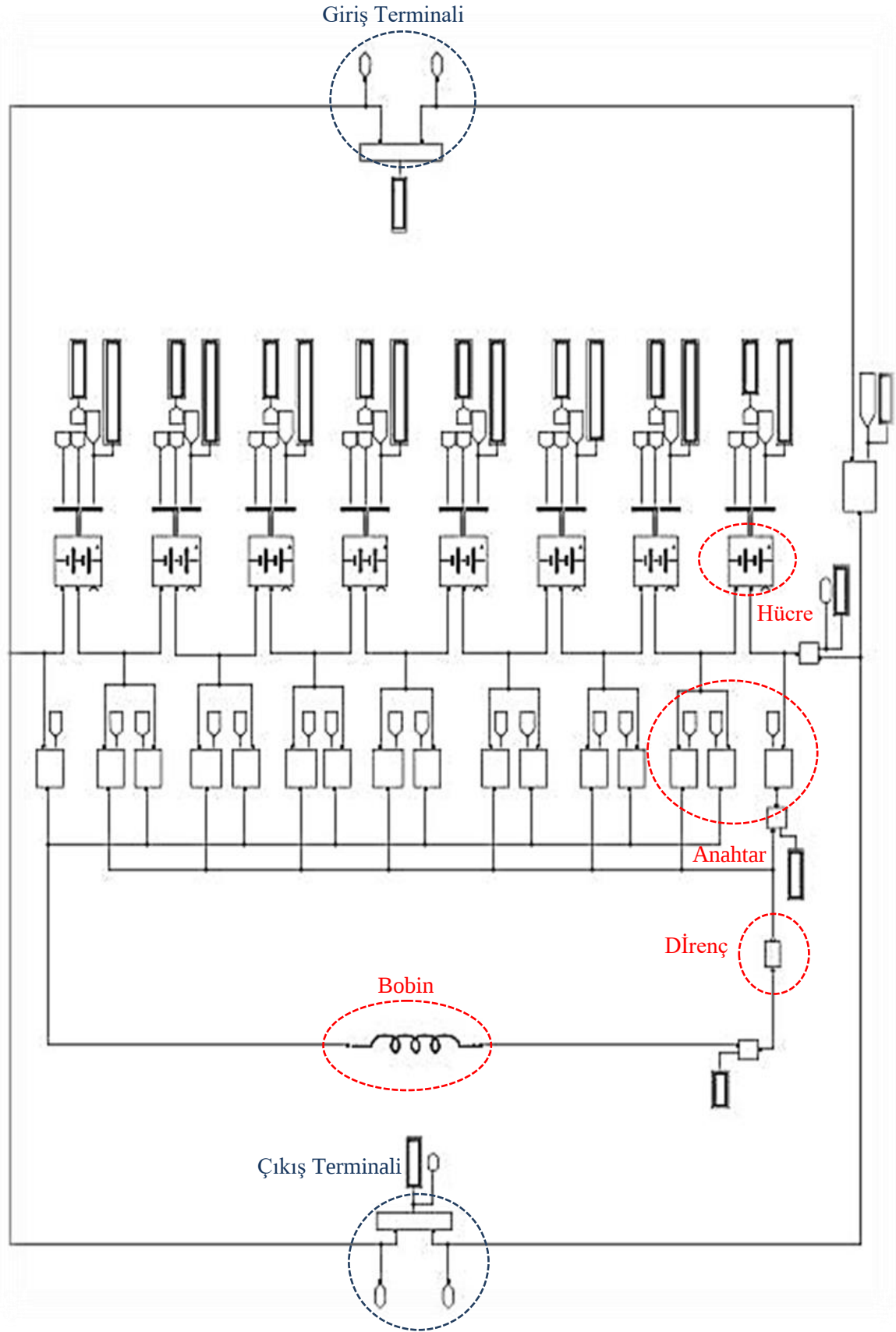
EKLER

Ek-1 Sistem tasarımı



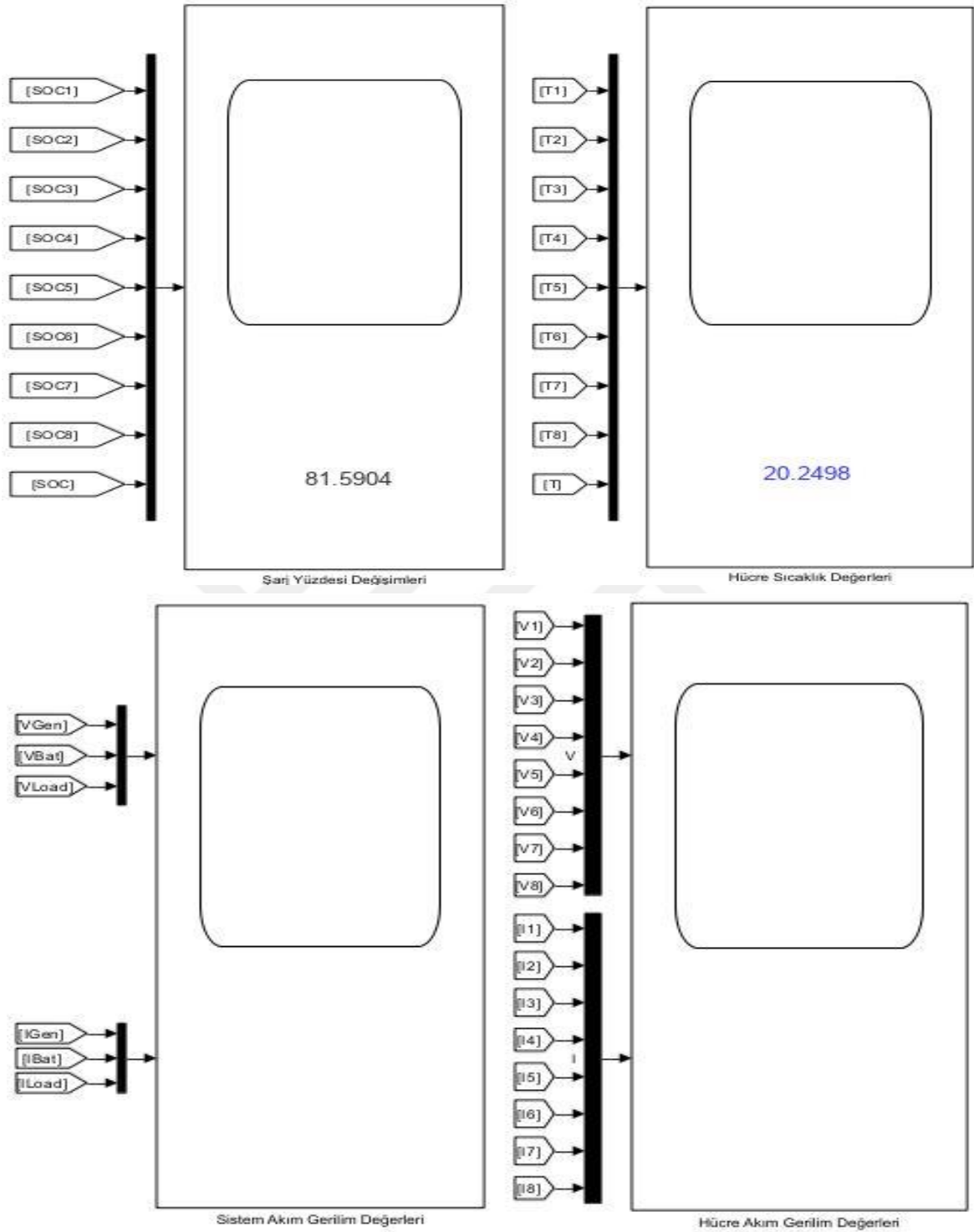
Şekil Ek-1. Sistem tasarımı

Ek-2 Batarya paketi tasarımı



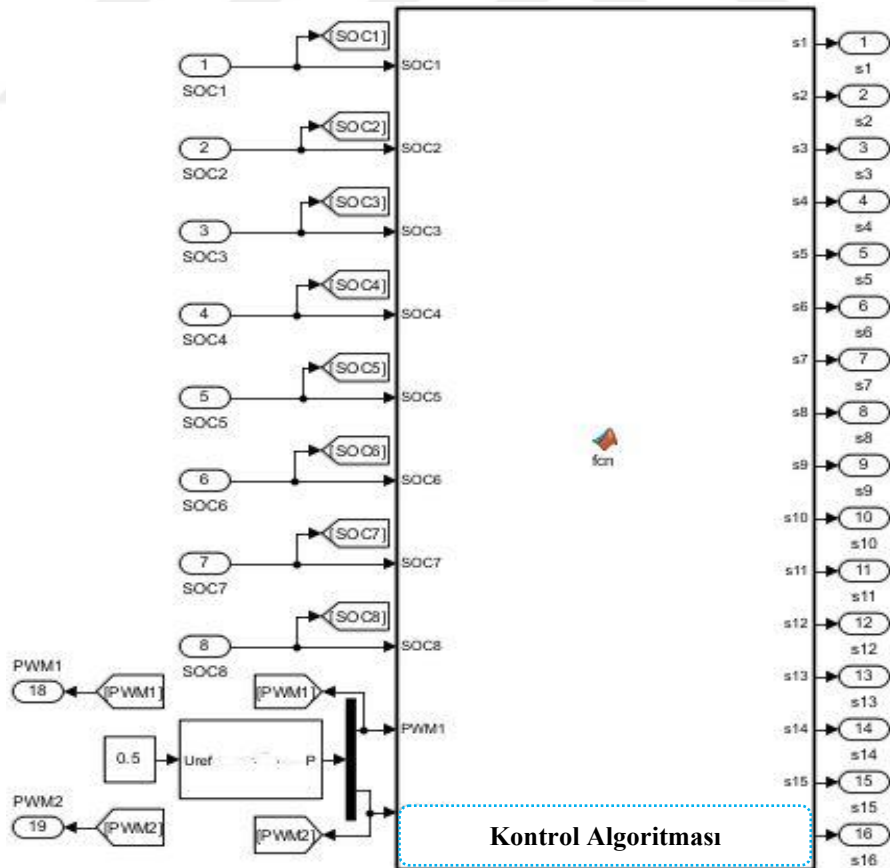
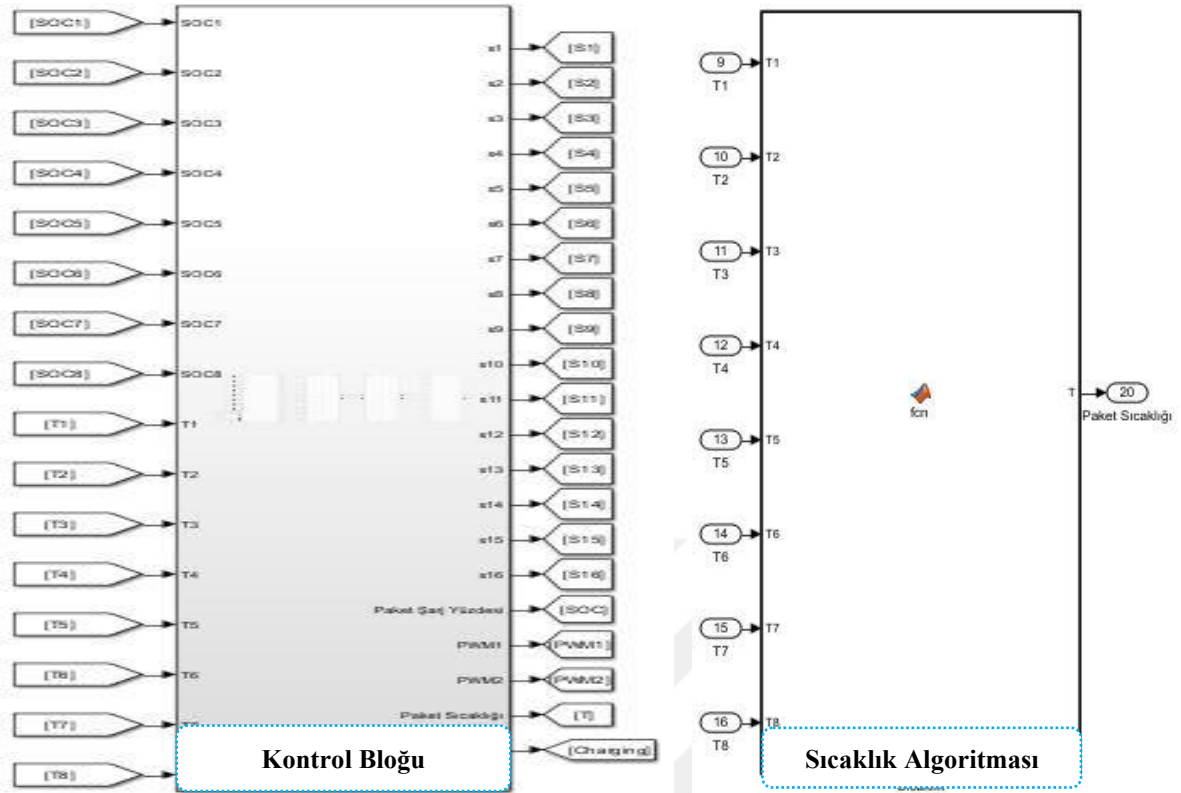
Şekil Ek-2. Batarya paketi tasarımı

Ek-3 Batarya paketi göstergeleri

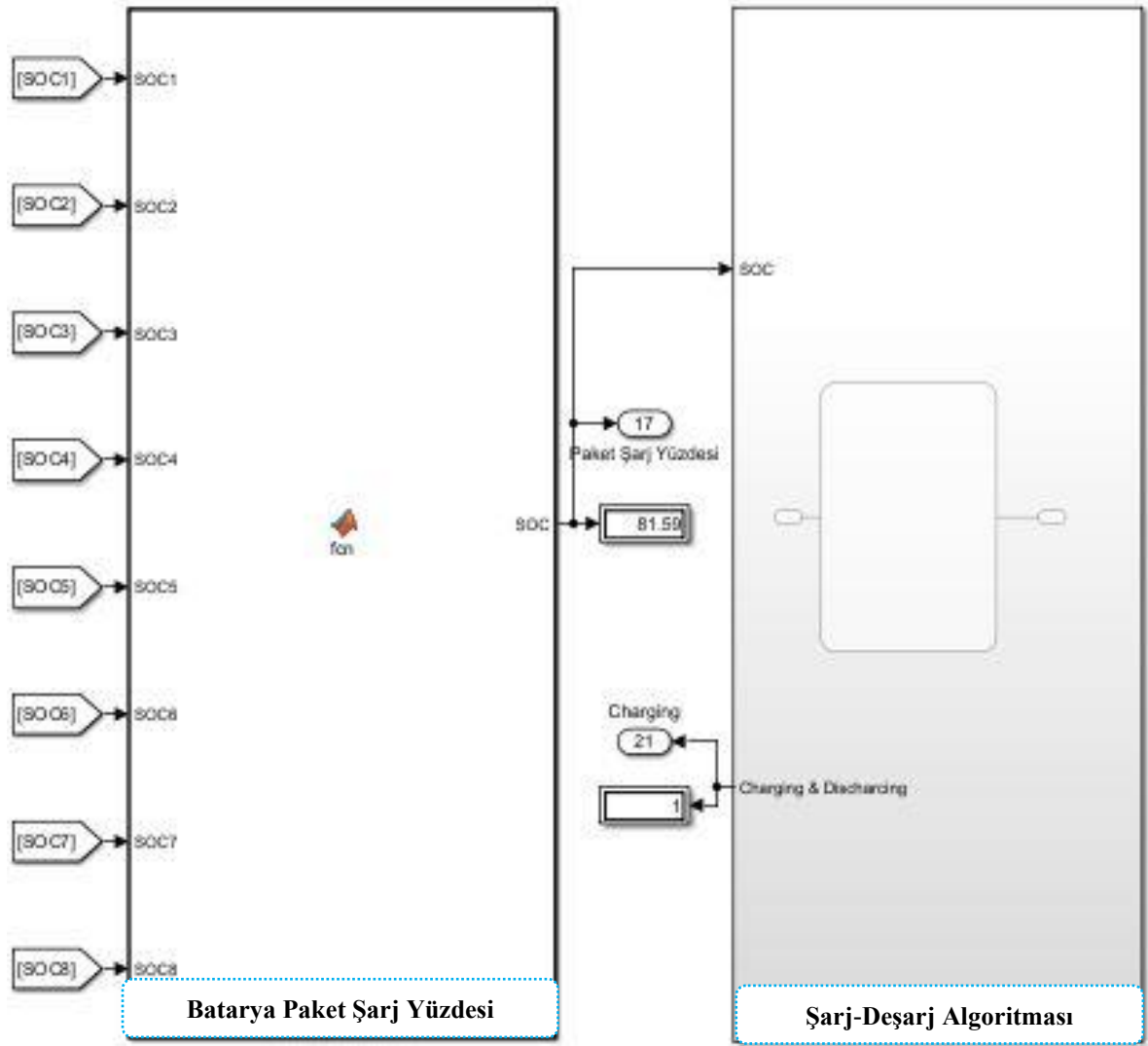


Şekil Ek-3. Batarya paketi göstergeleri

Ek-4 Batarya kontrol bloğu



Şekil Ek-4.1. Batarya kontrol bloğu



Şekil Ek-4.2. Batarya kontrol bloğu