T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR HÜCRE DENGELEME SİSTEMİ TASARIMI

Davut KOÇYİĞİT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Programı

Danışman

Doç. Dr. Umut Engin AYTEN

Haziran, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR HÜCRE DENGELEME SİSTEMİ TASARIMI

Davut KOÇYİĞİT tarafından hazırlanan tez çalışması 17.05.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektronik ve Haberleşme Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Umut Engin AYTEN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Umut Engin AYTEN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Nihan KAHRAMAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Volkan SEZER, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Umut Engin AYTEN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Batarya Yönetim Sistemleri İçin Yeni Bir Hücre Dengeleme Sistemi Tasarımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Davut KOÇYİĞİT

İmza

Aileme

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca tecrübesi ve bilgi birikimiyle bana her zaman yol gösteren, çalışmamın planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Umut Engin AYTEN'e çok teşekkür ederim.

Her zaman maddi manevi destek vererek beni bugünlere getiren aileme, hiçbir konuda manevi desteklerini esirgemeyen arkadaşlarıma sevgilerimi sunarım.

Davut KOÇYİĞİT

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR iv
İÇİNDEKİLER v
SİMGE LİSTESİ ix
KISALTMA LİSTESİ x
ŞEKİL LİSTESİ xi
TABLO LİSTESİ xv
ÖZET xvi
ABSTRACT xviii
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 2
1.2 Tezin Amacı 5
1.3 Hipotez 6
2 ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİSİ 7
2.1 Elektrikli Araçlar 7
2.1.1 Paralel Hibrit Araçlar 10
2.1.2 Plug in Hibrit Araçlar 10
2.1.3 Menzili Uzatılmış Elektrikli Araçlar 11
2.1.4 Bataryalı Elektrikli Araçlar 11
2.1.5 Yakıt Hücreli Araçlar 11
3 BATARYALAR 12
3.1 Bataryaların Tarihçesi 12
3.1.1 Kurşun Asit Bataryalar 13
3.1.2 Nikel-Kadmiyum Bataryalar 15
3.1.3 Nikel Metal Hidrit Bataryalar 16
3.1.4 Lityum İyon Bataryalar 17
4 BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ 21
4.1 Batarya Yönetim Sistemleri 21
4.2 Batarya Yönetim Sisteminin Görevleri 22

4.2.1 İzleme Birimi…… 22
4.2.2 Ölçme Birimi…… 22
4.2.3 Hesaplama Birimi…… 22
4.2.4 Hata Algılama Birimi……23
4.2.5 Kontrol Birimi……...23
4.2.6 Hücre Dengeleme Birimi……..23
4.3 Batarya Yönetim Sistemi Topolojileri……... 24
4.3.1 Merkezi Kontrol Topolojisi…….. 24
4.3.2 Modüler Kontrol Topolojisi……..24
4.3.3 Ana-Uydu Topolojisi…… 25
4.3.4 Dağınık Kontrol Topolojisi……...25
5 BATARYA DENGELEME SİSTEMLERİ 27
5.1 Pasif Dengeleme……27
5.1.1 Sabit Direnç ile Dengeleme…….. 27
5.1.2 Anahtarlamalı Direnç ile Dengeleme……28
5.2 Aktif Dengeleme…… 28
5.2.1 Kapasitör Tabanlı Aktif Dengeleme 29
5.2.1.1 Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme…… 29
5.2.1.2 Çift Kısımlı Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme……30
5.2.1.3 Zincir Modele Sahip Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme…..31
5.2.1.4 Paralel Yapılı Anahtarlamalı Kondansatör ile Dengeleme…… 32
5.2.1.5 Seri-Paralel Yapılı Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme……. 32
5.2.1.6 Delta Yapılı Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme……... 33
5.2.1.7 Ağ Yapılı Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme……... 34
5.2.1.8 Zincir Yapılı Çift Katmanlı Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme…… 36
5.2.1.9 Modüler Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme……. 36
5.2.1.10 Modüler Çift Katmanlı Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme 37

5.2.1.11 Tek Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme……...38

5.2.2 İndüktör Tabanlı Aktif Dengeleme.....39

5.2.2.1 Çoklu İndüktör ile Dengeleme……...39

5.2.2.2 Zincir Yapılı Çoklu İndüktör ile Dengeleme……. 40

5.2.2.3 Çok Katmanlı İndüktör Yapısı ile Dengeleme……...41

5.2.2.4 Tek İndüktör Yapısı ile Dengeleme……... 43

5.2.3 Dönüştürücü Tabanlı Aktif Dengeleme Sistemleri.....45

5.2.3.1 Yükseltici Dönüştürücü ile Dengeleme……. 45

5.2.3.2 Alçaltıcı-Yükseltici Dönüştürücü ile Dengeleme…….. 47

5.2.3.3 Tek Dönüştürücü ile Dengeleme……48

5.2.3.4 Cuk Dönüştürücü ile Dengeleme……... 49

5.2.3.5 Quasi Rezonant Dönüştürücü ile Dengeleme…… 50

5.2.3.6 Geri Dönüşlü Dönüştürücü ile Dengeleme…… 51

5.2.3.7 Çoklu Geri Dönüşlü Dönüştürücü ile Dengeleme……. 52

5.2.3.8 Çoklu Sargıya Sahip Geri Dönüşlü Dönüştürücü ile Dengeleme.. 53

6 BATARYA HİBRİT DENGELEME SİSTEMİ TASARIMI VE SİMÜLASYONU 55

6.1 Hibrit Dengeleme Sistemine Genel Bakış……..55

6.2 Tasarımı Yapılan Dengeleme Sistemi…… 56

6.2.1 Batarya Paketi……...56

6.3 Simulink Ortamında Geliştirilen Modelin Detayları……..58

6.3.1 Pil Modeli……. 58

6.3.2 Anahtarlama Elemanı……58

6.3.3 Anahtarlama Süreci……...59

6.3.4 Batarya Şarj Devresi…… 59

6.4 Pasif Dengeleme Devresi……... 60

6.4.1 Pasif Dengeleme Devresi Kontrol Bloğu……..62

6.5 Kapasitör Tabanlı Hibrit Dengeleme Devresi…… 64

6.5.1 Kapasitör tabanlı Hibrit Dengeleme Devresi Kontrol Bloğu……68

6.6 Simülasyon Sonuçları ve Tartışma……73
6.6.1 Pasif Dengeleme Simülasyon Sonuçları……... 74
6.6.2 Hibrit Dengeleme Simülasyon Sonuçları……..82
7 SONUÇ VE ÖNERİLER **96**
KAYNAKÇA **98**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **105**

SİMGE LİSTESİ

i	Akım
Ah	Amper Saat
IT	Bataryadan Geçen Akım
R0	Batarya İç Direnci
OCV(SOC)	Batarya Şarj Durumuna Bağlı Açık Devre Gerilimi
°C	Celsius
R	Direnç
$IR1$, $IR2$	Direnç Üzerinden Geçen Akımlar
$R1$, $R2$	Eşdeğer Devre Modelindeki Direnç Değerleri
$C1$, $C2$	Eşdeğer Devre Modelindeki Kapasitans Değerleri
V	Gerilim
C	Kapasite
$IC1$, $IC2$	Kapasitans Üzerinden Geçen Akımlar
k Ω	Kiloohm
m Ω	Miliohm
Ω	Ohm
Pb	Kurşun
PbO2	Kurşun dioksit
LiCoO2	Lityum Kobalt Dioksit
Ni(OH)2	Nikel Hidroksit
KOH	Potasyum Hidroksit
$VR1C1$, $VR2C2$	RC Kollarında Oluşan Gerilimler
H2SO4	Sülfirik Asit
SOC(t)t	Zamanındaki Bataryanın Doluluk Oranı
W	Watt
Δt	Zaman Artışı

KISALTMA LİSTESİ

ADG	Açık Devre Gerilimi
ANN	Yapay Sinir Ağları
AR-GE	Araştırma ve Geliştirme
BD	Boşalma Derinliği
BŞD	Batarya Şarj Durumu
BYS	Batarya Yönetim Sistemi
EA	Elektrikli Araçlar
ECM	Eşdeğer Devre Modeli
EDS	Enerji Depolama Sistemi
GKF	Genişletilmiş Kalman Filtresi
HEV	Hibrit Elektrikli Araçlar
HPPC	Hibrit Darbe Güç Karakterizasyonu
ICEs	İçten Yanmalı Motorlar
LCO	Lityum Kobalt Oksit
LFP	Lityum Demir Fosfat
LIB	Lityum-İyon Batarya
Li-ion	Lityum İyon
LMO	Lityum Mangenez Oksit
NEDC	Yeni Avrupa Sürüş Döngüsü
NiCd	Nikel Kadmiyum
NiMH	Nikel Metal Hidrat
NMA	Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit
NMC	Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit
OCV	Açık Devre Gerilimi
PHEV	Plug-In Hibrit Elektrikli Araçlar
SOC	Şarj Durumu
SOH	Sağlık Durumu
LED	Işık Yayan Diyot

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Elektrikli araçlarda güç elektroniği elemanları ile kurulan örnek bir elektrikli aktarma organları mimarisi.....**9**

Şekil 2.2 Elektrikli tahrik sistemlerinin mimari gösterimi **10**

Şekil 3.1 Kazı çalışmalarında keşfedilen Bağdat pili [98] **12**

Şekil 3.2 Voltaik pil [99].....**13**

Şekil 3.3 Kurşun asit batarya [100] **15**

Şekil 3.4 Nikel-Kadmiyum Bataryalar [101] **16**

Şekil 3.5 NiMH pil [102].....**17**

Şekil 3.6 Bir lityum iyon pilin şarj ve deşarj esnasındaki durumu.....**18**

Şekil 3.7 Toyota firmasına ait elektrikli araç için oluşturulan lityum iyon batarya paketi.....**19**

Şekil 3.8 Çeşitli bataryaların enerji yoğunluklarının karşılaştırılması [41].....**20**

Şekil 4.4 Ana-Uydu Topolojisi.....**25**

Şekil 4.5 Dağınık Kontrol Topolojisi **25**

Şekil 5.1 Sabit direnç ile dengeleme devresi **27**

Şekil 5.2 Anahtarlamalı direnç ile dengeleme devresi **28**

Şekil 5.3 Anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi.....**30**

Şekil 5.4 Çift kısıma sahip anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi **30**

Şekil 5.5 Zincir yapılı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi.....**31**

Şekil 5.6 Paralel yapılı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi **32**

Şekil 5.7 Seri-Paralel yapılı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi.....**33**

Şekil 5.8 Delta yapılı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi.....**34**

Şekil 5.9 Ağ yapılı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi.....**35**

Şekil 5.10 Zincir yapılı çift katmanlı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi **36**

Şekil 5.11 Modüler anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi.....**37**

Şekil 5.12 Modüler çift katmanlı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi.**38**

Şekil 5.13 Tek anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi **39**

Şekil 5.14 Çoklu indüktör ile dengeleme devresi.....**40**

Şekil 5.15 Zincir yapılı çoklu indüktör ile dengeleme devresi.....**41**

Şekil 5.16 Çok katmanlı indüktör ile dengeleme devresi.....**42**

Şekil 5.18 Tek indüktör ile dengeleme devresi **44**

Şekil 5.19 Yükseltici dönüştürücü ile dengeleme devresi.....**46**

Şekil 5.20 Alçaltıcı-Yükseltici dönüştürücü ile dengeleme devresi **47**
Şekil 5.21 Tek dönüştürücü dengeleme devresi **48**
Şekil 5.22 Cuk dönüştürücü ile dengeleme devresi **49**
Şekil 5.23 Quasi rezonant dönüştürücü ile dengeleme devresi **50**
Şekil 5.24 Geri dönüşlü dönüştürücü dengeleme devresi **51**
Şekil 5.25 Çoklu geri dönüşlü dönüştürücü dengeleme devresi **52**
Şekil 5.27 Çoklu sargıya sahip geri dönüşlü dönüştürücü ile dengeleme devresi. **54**
Şekil 5.26 Çoklu sargıya sahip geri dönüşlü dönüştürücü ile dengeleme devresi. **54**
Şekil 6.1 Tasarımda kullanılan pil görseli **57**
Şekil 6.2 Simülasyonda kullanılan pil modeli ve özellikleri **58**
Şekil 6.3 Anahtarlama elemanı IGBT ve parametreleri **58**
Şekil 6.4 PWM sinyali görseli **59**
Şekil 6.5 Batarya şarj devresi **59**
Şekil 6.6 MATLAB Simulink ortamında tasarlanan pasif dengeleme modeli **60**
Şekil 6.8 Pasif dengeleme devresi kontrol bloğu **61**
Şekil 6.9 Pasif dengeleme devresi sonuç izleme bölümü **61**
Şekil 6.7 Modül içerisinde bulunan dört hücreli pasif dengeleme devresi **61**
Şekil 6.10 Pasif dengeleme devresi kontrol algoritması **62**
Şekil 6.11 Pasif dengeleme için simulink programında oluşturulan kontrol modeli **63**
Şekil 6.12 Anahtarlamalı kapasitör tabanlı modül dengeleme sisteminin elektrik devre şeması **65**
Şekil 6.13 Anahtarlama sırasında her bir modülün, modül düzeyinde elektriksel eşdeğer şeması **65**
Şekil 6.15 Modül içerisinde bulunan dört hücreli pasif dengeleme devresi **67**
Şekil 6.16 Kapasitif Birim **67**
Şekil 6.14 MATLAB/Simulink ortamında tasarlanan hibrit dengeleme modeli **67**
Şekil 6.17 Hibrit Dengeleme devresi sonuç izleme bölümü **68**
Şekil 6.19 Hibrit dengeleme devresi kontrol bloğu **70**
Şekil 6.18 Hibrit dengeleme devresi kontrol algoritması **70**
Şekil 6.20 Hibrit dengeleme devresi kontrol bloğu alt sistemi **71**
Şekil 6.21 Kapasitör tabanlı aktif dengeleme devresi kontrol bloğu alt sistemi **72**
Şekil 6.23 Pasif dengeleme grafikleri (1. durum) **75**
Şekil 6.22 Pasif dengeleme grafikleri (1. durum) **75**
Şekil 6.25 Pasif dengeleme grafikleri (1. durum) **75**
Şekil 6.27 Pasif dengeleme grafikleri (1. durum) **75**

Şekil 6.24 Pasif dengeleme grafikleri (1. durum).....**75**
Şekil 6.26 Pasif dengeleme grafikleri (1. durum).....**75**
Şekil 6.29 Pasif dengeleme grafikleri (2. durum).....**77**
Şekil 6.28 Pasif dengeleme grafikleri (2. durum).....**77**
Şekil 6.31 Pasif dengeleme grafikleri (2. durum).....**77**
Şekil 6.30 Pasif dengeleme grafikleri (2. durum).....**77**
Şekil 6.33 Pasif dengeleme grafikleri (2. durum).....**77**
Şekil 6.32 Pasif dengeleme grafikleri (2. durum).....**77**
Şekil 6.39 Pasif dengeleme grafikleri (3. durum).....**79**
Şekil 6.38 Pasif dengeleme grafikleri (3. durum).....**79**
Şekil 6.37 Pasif dengeleme grafikleri (3. durum).....**79**
Şekil 6.36 Pasif dengeleme grafikleri (3. durum).....**79**
Şekil 6.35 Pasif dengeleme grafikleri (3. durum).....**79**
Şekil 6.34 Pasif dengeleme grafikleri (3. durum).....**79**
Şekil 6.41 Pasif dengeleme grafikleri (4. durum).....**81**
Şekil 6.40 Pasif dengeleme grafikleri (4. durum).....**81**
Şekil 6.45 Pasif dengeleme grafikleri (4. durum).....**81**
Şekil 6.43 Pasif dengeleme grafikleri (4. durum).....**81**
Şekil 6.42 Pasif dengeleme grafikleri (4. durum).....**81**
Şekil 6.44 Pasif dengeleme grafikleri (4. durum).....**81**
Şekil 6.51 Hibrit dengeleme grafikleri (1. durum).....**83**
Şekil 6.50 Hibrit dengeleme grafikleri (1. durum).....**83**
Şekil 6.49 Hibrit dengeleme grafikleri (1. durum).....**83**
Şekil 6.48 Hibrit dengeleme grafikleri (1. durum).....**83**
Şekil 6.47 Hibrit dengeleme grafikleri (1. durum).....**83**
Şekil 6.46 Hibrit dengeleme grafikleri (1. durum).....**83**
Şekil 6.57 Hibrit dengeleme grafikleri (2. durum).....**85**
Şekil 6.56 Hibrit dengeleme grafikleri (2. durum).....**85**
Şekil 6.55 Hibrit dengeleme grafikleri (2. durum).....**85**
Şekil 6.54 Hibrit dengeleme grafikleri (2. durum).....**85**
Şekil 6.53 Hibrit dengeleme grafikleri (2. durum).....**85**
Şekil 6.52 Hibrit dengeleme grafikleri (2. durum).....**85**
Şekil 6.63 Hibrit dengeleme grafikleri (3. durum).....**87**
Şekil 6.62 Hibrit dengeleme grafikleri (3. durum).....**87**
Şekil 6.60 Hibrit dengeleme grafikleri (3. durum).....**87**

Şekil 6.61 Hibrit dengeleme grafikleri (3. durum) **87**
Şekil 6.58 Hibrit dengeleme grafikleri (3. durum) **87**
Şekil 6.59 Hibrit dengeleme grafikleri (3. durum) **87**
Şekil 6.69 Hibrit dengeleme grafikleri (4. durum) **89**
Şekil 6.68 Hibrit dengeleme grafikleri (4. durum) **89**
Şekil 6.67 Hibrit dengeleme grafikleri (4. durum) **89**
Şekil 6.66 Hibrit dengeleme grafikleri (4. durum) **89**
Şekil 6.64 Hibrit dengeleme grafikleri (4. durum) **89**
Şekil 6.65 Hibrit dengeleme grafikleri (4. durum) **89**
Şekil 6.75 Hibrit dengeleme deşarj grafikleri (3. durum)..... **91**
Şekil 6.74 Hibrit dengeleme deşarj grafikleri (3. durum)..... **91**
Şekil 6.73 Hibrit dengeleme deşarj grafikleri (2. durum)..... **91**
Şekil 6.72 Hibrit dengeleme deşarj grafikleri (2. durum)..... **91**
Şekil 6.70 Hibrit dengeleme deşarj grafikleri (1. durum)..... **91**
Şekil 6.71 Hibrit dengeleme deşarj grafikleri (1. durum)..... **91**
Şekil 6.76 Hibrit dengeleme deşarj grafikleri (4. durum)..... **92**
Şekil 6.77 Hibrit dengeleme deşarj grafikleri (4. durum)..... **92**
Şekil 6.80 Hibrit dengeleme gerilim grafikleri (2. durum)..... **93**
Şekil 6.81 Hibrit dengeleme gerilim grafikleri (3. durum)..... **93**
Şekil 6.78 Modül ve yük arasında oluşan gerilim farkları **93**
Şekil 6.79 Hibrit dengeleme gerilim grafikleri (1. durum)..... **93**
Şekil 6.82 Hibrit dengeleme gerilim grafikleri (4. durum)..... **93**

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 BYS topolojilerinin karşılaştırılması [103].....**26**
Tablo 6.1 Lityum-iyon hücre parametreleri.....**57**
Tablo 6.2 Hücreler arası dengesizliği gösteren dört adet durum **73**
Tablo 6.3 Enerji kayıpları ve %100 SOC değerine ulaşma süreleri **95**

ÖZET

Batarya Yönetim Sistemleri İçin Yeni Bir Hücre Dengeleme Sistemi Tasarımı

Davut KOÇYİĞİT

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Umut Engin AYTEN

Lityum iyon piller, günümüz elektrikli araçlarında yaygın olarak enerji depolama sistemleri (EDS) olarak kullanılmaktadır. Enerji depolama sistemlerinin kontrol edilmesi ve düzgün bir şekilde çalışması için depolama sistemlerine batarya yönetim sistemleri entegre edilir ve bu şekilde sistemin verimi arttırılmış olur. Günümüz teknolojisi baz alındığında, batarya yönetim sistemleri hücre ve modüllerden oluşan batarya paketlerinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Aynı zamanda, batarya yönetim sistemlerinde bulunan önemli fonksiyonlardan biri olan hücre dengeleme sistemleri günümüzde her batarya yönetim sistemine entegre edilir. Aşırı şarj ve deşarj durumlarından bataryayı korumak için seri bağlı hücreler veya modüller arasında dengeleme sistemleri oluşturulmuştur. Elektrikli araçlarda batarya hücrelerinin ve modüllerinin düzgün çalışabilmesi için hücreler arası ve modüller arası gerilimlerin sürekli şekilde dengede tutulması gereklidir. Hücre ve modüllerdeki kapasite, sıcaklık ve yaşlanma dengesizlikleri, araca verilebilecek enerji miktarını sınırlar. Bu tez çalışmasında, hibrit dengeleme adı verilen, hücre düzeyinde pasif dengeleme ve modül düzeyinde aktif dengelemenin maliyet etkinliğini sağlarken aynı anda batarya kapasitesinin maksimum düzeyde kullanılmasını sağlayan yeni bir batarya dengeleme sistemi önerilmiştir. Batarya

paketi bir dizi modülden oluşur, modüller ise kendi içerlerinde bir dizi seri bağlı hücreden oluşur, modüller arasında aktif dengelemeyi gerçekleştiren modül düzeyinde anahtarlamalı kondansatör ile birlikte bir modülün içerisinde seri bağlı hücreler düzeyinde pasif dengeleme gerçekleştirilir. Aktif ve pasif dengelemenin aynı anda çalıştığı bir dengeleme yapılır. Stratejiye hibrit dengeleme adı verilir, çünkü sıcaklık ve SOC dengelemesi ile birlikte enerji kayıplarının en aza indirilmesi dahil olmak üzere geleneksel dengeleme sistemlerinin ötesinde bir dengeleme stratejisi izler. Bu tez kapsamında, bir lityum iyon pil takımı üzerinde uygulanan hibrit dengeleme sistemi için tasarım detayları ve simülasyon sonuçları sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Hibrit batarya dengeleme sistemi, otomotiv sistemleri, batarya yönetim sistemi, pasif dengeleme, aktif dengeleme.

ABSTRACT

Design Of A New Cell Balancing System For Battery Management Systems

Davut KOÇYİĞİT

Department of Electronics and Communication Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Doç. Dr. Umut Engin AYTEN

Nowadays, lithium-ion batteries are widely used as energy storage systems (ESS) in electric vehicles. Battery management systems are integrated into the storage systems in order to control and properly operate the energy storage systems to reach the sufficient efficiency of the system. Based on today's technology, battery management systems have become an indispensable part of battery packs consisting of cells and modules. At the same time, cell balancing systems, one of the important functions in battery management systems, are integrated into every battery management system today. In order to protect the battery from over-charging and over-discharging, balancing systems have been created between cells or modules connected in series. Battery cells and modules must be constantly balanced in order to work properly. Capacity, temperature and aging imbalances in cells and modules limit the amount of power that can be supplied to the vehicle. Based on this problem, a hybrid balancing system has been proposed as a solution to this issue, combining passive balancing at the cell level with active balancing at the module level while maximizing battery capacity at the same time. The battery pack consists of a series of modules, while the modules themselves consist of a series of cells connected in series, passive balancing is performed at the level of cells connected in series inside a module, with a module-level switched capacitor which performs

active balancing between the modules. Active and passive balancing are performing the balancing process at the same time. The strategy is called hybrid balancing because it pursues goals beyond traditional state of charge equalization, including temperature and energy capacity equalization and minimizing energy losses. This thesis presents design details and simulation results for a hybrid balancing system on a lithium-ion battery pack.

Keywords: Hybrid battery balancing system, automotive systems, battery management system, passive balancing, active balancing.

1
GİRİŞ

Batarya hücrelerine dayalı orta ila büyük ölçekli enerji depolama sistemleri, dünya çapında sürdürülebilir enerjinin hızlı büyümesine yönelik artan ihtiyaçlara paralel olarak hayati bir teknolojiye dönüşmektedir. Hibrit elektrikli araçlar (HEV), plug-in hibrit elektrikli araçlar (PHEV) ve elektrikli araçlar (EV) veya daha genel olarak xEV'ler gibi elektrikli tahrikle çalışan araçlar, büyük batarya paketleri için en önemli uygulama alanlarıdır. Elektrikli aktarma organlarına yönelik eğilim son yıllarda daha da güçlenmiş bulunmaktadır, büyük markalara sahip otomobil üreticilerinin yanı sıra, giderek daha fazla sayıda şirket farklı xEV'ler sunmaya başlamıştır [1]. Yeterli düzeyde enerji depolamaya sahip, güvenli, az yer kaplayan bir elektrikli araç bataryası tasarlamak, elektrikli tahrikli otomobiller için çok önemlidir. Bir EV batarya paketi, tipik olarak, araç aktarma organlarına yüzlerce kilowatt güç sağlar. Gerekli voltaj ve güç aktarımını sağlamak için çok sayıda batarya hücresi hem paralel hem de seri olarak birbirine bağlanır. Ancak, hücre kümelerindeki hücrelerin parametreleri uyumsuzluklar gösterebilir ve büyük hücre kümelerinde hücre uyumsuzluğunu çözmek zor bir problemdir. Seri hücreler içeren bir batarya paketinde, bataryanın toplam geriliminin hücreler arasında eşit olarak bölünmeme olasılığı çok yüksektir. Eşit başlangıç kapasitesine sahip en iyi olarak üretilmiş hücreler, üretim hattından çıktıklarında doğal olarak farklı parametrelere sahip olacaktır. Bu nedenle, hücreler dengesiz olur ve bu hücrelerden biri ilk tam şarjlı hücre olup ve daha sonra aşırı şarj olacaktır. Şarj miktarındaki farklılık, kapasite uyuşmazlığı olarak bilinir [2]. Lityum İyon piller şarj edildiklerinde daha fazla akım çekemezler ve bunun yerine voltajları önemli ölçüde tehlikeli seviyelere, ısıl sürüklenme (thermal runaway) tehlikesine yükselir ve alev oluşumuna neden olur. Batarya paketindeki hücrelerin ömürleri genellikle farklılıklar gösterir, hücre ömürlerindeki değişiklikler, hücre kümelerindeki sıcaklık artışlarındaki değişikliklerin ana nedenidir. Bunlara çözüm olarak termal yönetim sistemleri geliştirilmektedir, fakat termal yönetim pahalı ve son derece dikkat edilmesi gereken bir konudur. Bir hücre aşırı şarj olurken, tüm hücre kümesinin toplam voltajı istenen seviyede tutulmalıdır. Şarj sistemleri bataryayı şarj ederken batarya voltajına güveneceğinden dolayı yanlış bir voltaj değerinde aşırı şarj problemleri meydana gelmektedir [3]. Batarya paketi üreticileri, bataryayı paketine yerleştirmeden önce hücreleri taramak ve en iyi eşleşmeyi seçmek için çaba harcarlar. Test için gereken süre nedeniyle fazla maliyet

uygulanır. Hücrelerin yaşlanması nedeniyle uzun bir süre sonra çok daha fazla kapasite kaybederler ve parametreleri farklılık gösterir. Bu gibi sebeplerden dolayı batarya yönetim sistemleri geliştirilmeye devam edilmektedir. BYS (Batarya Yönetim Sistemi) her hücreyi izler ve hücrenin tüm kapasitesini en üst düzeye çıkarmak için bataryanın hücrelerini dengeler ve herhangi bir hücrenin aşırı şarj edilmesini önler. BYS temel olarak hücrelerin çalışmasını takip eder, karşılaşılabilecek kötü durumlardan korur, hücrenin şarj durumunu tahmin eder ve hücre performansını iyileştirir [4].

Hücre dengesizlikleri, üretim sırasındaki değişikliklerden, dahili empedanstaki değişiklikten ve kendi kendine deşarj oranındaki farklılıktan kaynaklanır. Tüm hücrelerin zaman içinde %100 SOC (Batarya Şarj Durumu)'de başladığını ve iç sızıntı nedeniyle hücrelerin SOC değerinin en sonunda değişeceğini düşündüğümüzde, pratik olarak, bir hücre üretildiğinde, kapasite ve iç sızıntı nedeniyle hücreler zamanla daha dengesiz başlar [5].

Seri bağlı hücrelerde, şarj etme yeteneği tam şarjlı ilk hücre ile sınırlıdır ve deşarj olurken, akım çekme yeteneği tamamen boşalmış ilk hücre ile sınırlıdır. Bu iki nokta, seri hücreleri içeren bir batarya kapasitesini belirlemek üzere kullanılır. Daha fazla açıklığa kavuşturmak için, bir hücrenin kapasitesini tanımlayan SOC ve BD (Boşalma derinliği) adlı iki değişken vardır. SOC%, maksimum kapasitenin yüzdesi olarak mevcut hücre kapasitesidir ve BD%, boşalmış bir hücre kapasitesinin yüzdesidir. SOC yardımıyla bir hücreden veya en yüksek şarj durumuna sahip birden fazla hücreden tüm batarya paketine (seri bağlı tüm hücreler) fazla şarjı aktarabilir, böylece şarj durumu en düşük olan hücreler şarj olur ve tüm hücreler dengelenerek aynı seviyeye getirilir [6].

1.1 Literatür Özeti

Teknolojik gelişmeler ile birlikte yüksek verim ve düşük emisyon koşullarını sağlayan aynı zamanda enerji depolama sistemlerine oldukça yer veren sistemler önümüzdeki yıllarda en uygun seçenekler olarak kullanılacaktır. Elektrikli araç teknolojisinde bu ihtiyaçları karşılayan plug-in hibrit elektrikli araçlar ve batarya tabanlı elektrikli araçlar oldukça rağbet görmektedir. Elektrikli araçlarda genellikle lityum iyon piller kullanılmaktadır. Lityum iyon pillerin piyasada çok fazla tercih edilmesinin belli başlı sebepleri arasında enerji yoğunluklarının yüksek olması, çalışma ömürlerinin yeterince tatmin edici olması ve aynı zamanda kendi kendine deşarj olma oranlarının oldukça düşük

olması gibi kullanıcının isteklerine cevap veren özellikleri diğer pillere (Kurşun asit piller ve Nikel metal hidrit piller) kıyasla onları piyasada çok önemli bir konuma oturtmuştur.

Elektriğin yaygın bir şekilde kullanılması gelişen dünyamızda enerji depolama sistemlerinin oldukça geniş bir yelpazede kullanılmasına sebep olmuştur ve bu da lityum iyon gibi kullanışa elverişli pillerin kullanım alanlarını genişletmiştir [7]. Lityum iyon piller hücre bazında incelendiğinde nominal akım ve gerilim değerleri oldukça düşüktür, dolayısıyla bir lityum iyon hücresi ile herhangi bir elektrikli araç güç aktarım organını çalıştırmak neredeyse mümkün değildir. Bu tür problemlerin önüne geçebilmek için lityum iyon piller farklı kombinasyonlar kurularak bir araya getirilir. Elektrikli araç bataryası oluşturmak için hücreler birbirlerine seri bağlanarak gerekli gerilim ve akım değerleri sağlanır [8]. Enerji depolama sistemleri kurulduktan sonra, sistem içerisindeki parametreleri kontrol edebilecek ve batarya paketinin içerisindeki modül ve hücrelerin durumlarını sürekli izleyen ve herhangi olumsuz bir durumda uyarı vererek sistemin enerji akışını kesen aynı zamanda hücrelerin, modüllerin ve bataryanın sağlığını iyileştiren akıllı bir sistemin entegre edilmesi gerekiyor [9]. Batarya yönetim sistemleri batarya paketlerinin kontrol birimidir, BYS batarya paketinin akımını, voltajını, sıcaklığını, şarj durumunu, güç durumunu ve batarya paketinde bulunan hücrelerin güvenli bir biçimde çalışarak ömürlerinin uzamasına yardımcı olmaktadır [10]. Elektrikli araçların batarya paketleri kapasiteye, ısıya ve eskimeye eğilimlidir, araca güç dağıtımını sağlayan hücrelerdeki dengesizlikler bu eğilimi gittikçe arttırarak bataryanın ömrünün azalmasına sebep olmaktadır [11]. Elektrikli araçlarda sürüş gücünü sağlayan batarya modüllerinin ve hücrelerinin birbirlerine seri bağlandığında her hücre ve modül uyumsuzluk gösterdiğinden kapasite, iç direnç, çalışma süresi ve şarj durumu gibi özelliklerin iyileştirilmesi için hücre dengeleme sistemi batarya yönetim sistemine dahil edilmelidir [12]. Bununla birlikte, bu seri bağlantı, bir bataryada aynı tip hücreler kullanılmasına rağmen hücreden hücreye şarj durumu (SOC) dengesizliği olan zor bir sorunu beraberinde getirir. Oluşan bu dengesizlik genel olarak iki sebepten ortaya çıkar. Bunlar, hücre üretiminde yapılan hatalar ve hücreler arasındaki ısı dağılım yönetimi. Hücre üretiminde yapılan hatalar her hücrenin empedans, açık devre gerilimi, deşarj ve yaşlanma oranlarında farklılıklara neden olur [13]. Hücreler arasındaki ısı dağılım yönetiminin neden olduğu hatalar ise, hücre düzeyinde yapılan termal yönetimin yetersiz olması her hücrenin farklı koşullarda çalışmasına neden olur ve bu da hücrelerin şarj durumlarında değişimlere neden olur [14]. Termal yönetimden kaynaklı olarak yüksek

şarj durumuna sahip olan hücreler daha hızlı şarj olur ve uzun süre şarj akımına maruz hücrede bozulmalarına neden olabilir. Aynı şekilde düşük şarj durumuna sahip hücreler deşarj esnasında daha hızlı deşarj olurlar. Bu problemler şarj ve deşarj durumlarında bazı hücrelerin aşırı şarj ve deşarj olmasına neden olarak bataryanın ömrünün azalmasına ve hücrelerin zarar görmesine neden olur. Bu gibi durumlarda ortaya çıkabilecek bazı anormal durumlar; hızlı yaşlanma, lityum kaplama, elektrot yapısının bozulması, hatta kısa devreler ve yangınlar olarak söylenebilir [15], [16].

Batarya dengeleme sistemleri iki büyük kategoriye ayrılır: aşılan enerji dağılımının ısı şeklinde olup olmamasına bağlı olarak aktif dengeleme ve pasif dengeleme [17]. Pasif dengeleme yapılırken enerjinin ısı şeklinde dirençler üzerinden atılması hedeflenir. Yüksek şarj durumuna sahip olan hücreler enerjilerini direnç üzerinden ısıya dönüştürerek batarya paketindeki en düşük şarj durumuna sahip olan hücre ile aynı seviyeye gelir. Pasif dengeleme kullanımı ve düşük maliyeti sayesinde oldukça tercih edilen bir yöntemdir. Ancak, sistem veriminin düşük olması ve sürekli olarak batarya paketinin içerisinde istenmeyen bir ısının oluşması termal yönetime ek yükler bindirmektedir [18], [19]. Pasif dengeleme için iki yöntem bulunmaktadır; sabit direnç yardımı ile pasif dengeleme ve anahtarlamalı direnç yardımı ile pasif dengeleme. Bu iki tür arasındaki belirgin fark, hücrelere bağlı dirençlerin anahtarlama elemanları ile bağlanıp bağlanmamasıdır. Sabit dirençlerin bağlı olduğu yöntemde, her hücreye paralel bağlı dirençlerden geçen ve sürekli olarak devam eden bir akıma sahiptir [20]. Sistemde, dirençler üzerinden geçen akım, hücrelerin terminal gerilimleri ile orantıda olduğundan, herhangi bir anahtarlama elemanı kullanılmadan hücreleri dengelemeyi mümkün kılmaktadır. Ancak, sistemde sürekli çalışan bir dengeleme sistemi mevcut olduğundan ve direnç üzerinden geçen akımların sürekli ısı enerjisi yayması, sistem kayıplarının artmasına ve bataryanın termal yönetim sistemine ek yüklerin oluşmasına sebep olur. Aynı zamanda bu yöntemdeki hücre şarj durumlarının eşitlenmesi için geçen süreler oldukça uzayabilmektedir. Lityum-iyon bataryalardaki aşırı şarj ve aşırı deşarj durumları kolayca meydana gelir ve istenmeyen termal sürüklenme olaylarına sebep olabilir. Piyasadaki kullanım alanları incelendiğinde, Kurşun asit bataryalar ve Nikel metal hidrit bataryaların, sabit direnç ile yapılan pasif dengeleme yöntemini kullandıkları görülür [21]. Anahtarlamalı direnç ile dengeleme yöntemi ise her bir hücreye paralel bağlı bir direnç ve direnç ile hücreler arasına ise bir anahtarlama elemanı yerleştirilerek oluşturulan bir yöntemdir. Şarj edilme sırasında herhangi bir hücre şarj edilip tam şarj

olduğunda hücreye bağlı direncin devreye girip hücreyi koruması için anahtar kapatılır ve direnç üzerinden bir akım geçer. Hücreler aşırı şarj durumundan bu şekilde korunur ve diğer hücrelerin rahat bir şekilde şarj olmalarına imkân sağlar [22], [23]. Buna karşılık aktif dengeleme, yükleri hücreler arasında yeniden dağıtarak güç aktarım sisteminin genel verimliliğini artırabilir. Aktif dengeleme genel olarak kullanılan depolama elemanlarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Kapasitör, indüktör ve dönüştürücü kullanılarak oluşturulan aktif dengeleme sistemleri depolama elemanlarının çeşitliliğinden dolayı farklı stratejilerin ve kontrol algoritmalarının kullanılmasına imkân tanımıştır. Dengeleme yapılırken izlenen strateji; enerjinin yüksek şarj durumuna sahip hücreden daha düşük şarj durumuna sahip olan hücreye aktarılmasıdır. Bu strateji gerçekleştirilirken birkaç kez enerji dönüşümü gerekir ve bu da enerji kaybına sebep olur. Oluşturulan bu yöntemler enerji kayıplarına neden olsalar bile, batarya yönetim sistemine entegre edilmek zorundadır. Aksi takdirde dengeleme sisteminin olmadığı bir bataryada şarj ve deşarj esnasında hücreler zarar görür ve giderek batarya ömrünün azalmasına neden olur. Bu gibi sebeplerden dolayı aracın uzun mesafelerde yol alma kapasitesi düşerek verimi azalır. Bundan dolayı, farklı pasif ve aktif dengeleme yöntemleri geliştirilerek araç güç aktarma sistemlerindeki etkileri üzerine bazı araştırmalar yapılmaya başlanmıştır [24].

1.2 Tezin Amacı

Batarya dengeleme sistemleri bataryanın kullanım ömrünü ve efektif çalışmasını sağladığı için BYS içerisinde önemli bir fonksiyon haline gelmiştir. Endüstride oldukça yoğun bir şekilde kullanılan bataryaların, dengeleme sistemleri olmadan çalışması verimlilik ve maliyet açısından değerlendirildiğinde büyük bir dezavantajdır.

Bu tez çalışmasının amacı, günümüzde kullanılan farklı pasif ve aktif batarya dengeleme topolojilerini ve bunların kontrol metotlarını inceleyerek karşılaştırmak ve yeni bir hibrit dengeleme stratejisi önerildikten sonra dengeleme sistemi ve kontrolcü tasarımı MATLAB/Simulink ortamında modellenerek tasarım yapılmıştır. Simülasyon sonuçları ile test işlemleri gerçekleştirilmiş ve önerilen dengeleme sisteminin avantajları tartışılmıştır.

1.3 Hipotez

Tez çalışması kapsamında pasif ve aktif dengeleme yöntemlerinin avantajlarını batarya hücreleri ve modülleri seviyesinde kullanarak enerji kayıplarının düşük olduğu ve dengeleme süresinin iyileştirildiği bir batarya dengeleme sistemi tasarlanmış ve testleri gerçekleştirilmiştir. Amaç ve hedeflerin gerçekleştirilmesi doğrultusunda enerji tüketiminin optimum düzeyde tutulmasını hedefleyen donanım ve yazılım çözümlerinin kullanılması ve sistemin genişletilebilir olması ve farklı kontrol tekniklerinin de sistem üzerinde uyarlanabilir olması yapılan sistemin modüler bir sistem olduğunu ve literatüre yenilik kattığını göstermektedir. Hibrit dengeleme sisteminin, pasif dengeleme sistemine göre enerji kayıpları düşük ve aktif dengeleme sistemine göre maliyeti oldukça düşüktür.

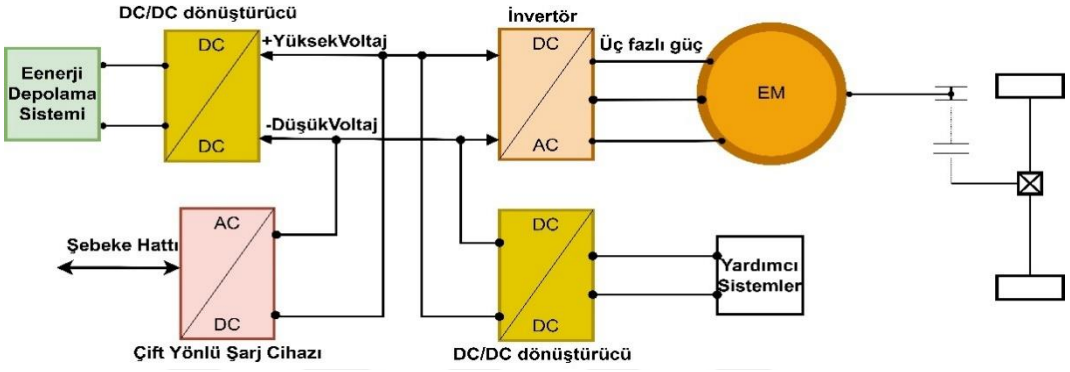
2
ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİSİ

2.1 Elektrikli Araçlar

Günümüzde önemli tartışma konularından biri iklim değişikliğidir. Ayrıca fosil yakıtların sürdürülebilir kaynaklar olmaması en büyük sorunlar arasında gösterilebilir. İnsanlığın böylesi zorluklarla gelecekte nasıl mücadele edeceği bir diğer tartışma konusudur. Bu tür tartışmaların bir sonucu olarak, içten yanmalı motorlara sahip araçların doğaya bıraktığı CO2 salınımlarının azaltılmasıyla ilgili olarak önümüzdeki yıllarda daha sert düzenlemelerin yürürlüğe girmesi öngörülmektedir. Örnek olarak Avrupa Birliği'nde (AB) araçların sera gazı olarak görülen ve doğaya salınan CO2 miktarının %12'sinden sorumlu olduğu bilinmektedir [25]. Avrupa Birliğinde 2009 yılında yürürlüğe giren ve komisyonun 2012 Temmuz ayında belirlenen CO2 ile ilgili çalışmaların 2015'e kadar tüm yeni araçlarda kilometre başına 130 gram CO2(g/km) olması ve 2021 yılına kadar 95 gram CO2(g/km) olması hedeflenmiştir [26]. Sürdürülebilir enerji kaynakları üzerinde artan talepler arasında güçlü kentleşme ve artan nüfusun çevresel konulara olan ilgisinin artması gösterilebilir. Artan talepler doğrultusunda içten yanmalı motorların oluşturduğu kirliliğin önlenmesi için farklı alternatif yöntemler ile araç tahrik sistemleri geliştirilmeye başlanmıştır [27]. Bunlara ek olarak insanlar arasında araç sahibi olmaya yönelik birtakım değişiklikler ve toplumun yeni mobil sistemlere olan ilgisi ve beğenisi elektrikle tahrik edilen mobil sistemlerin toplum tarafından kabul edilmesinin bir işareti olarak görülmektedir [28]. Yapılan çalışmalar sadece binek araçlarda değil, aynı zamanda otobüslerde ve arazi araçlarında da değişim ihtiyacı olduğunu göstermektedir. Bu tür araçların tamamı gelişen teknolojiyle birlikte elektrikli tahrik sistemlerinden faydalanabilir. Bunlara ek olarak artan akaryakıt fiyatları düşünüldüğünde, elektrikle tahrik edilen sistemlerin çalışma maliyetleri açısından daha avantajlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Temel olarak elektrikli tahrik sisteminin çalışmasını sağlayan belli başlı sistemler vardır. Bu sistemlerin piyasada fazlaca bilinenleri arasında; araç sistemlerine gerekli enerjiyi sağlayan enerji depolama sistemi, elektrik enerjisini dönüştürüp araç içerisinde ve sürüşünde kullanılabilir hale getiren güç elektroniği sistemleri, aracın yol almasında önemli rol oynayan elektrik makinesi ve depolama sistemine şebekedeki enerjiyi doğru bir şekilde transfer eden şarj ünitesidir. Enerji depolama sistemi bir elektrikli araçta performans ve menzil gibi teknik özelliklerin belirlenmesinde rol alır.

Kullanılan depolama sistemleri enerji kaynağına göre değişiklik gösterebilir. Bunlar, bataryanın şarj edilebilir olması, depolama sisteminin kapasitörlerden oluşması veya yakıt hücreli araçlarda kullanılan hidrojen yakıtına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bataryalar enerji ve güç yoğunlukları açısından farklı guruplara ayrılır. Enerji kaynakları sıralamasında bataryalar önemli ölçüde düşük enerji yoğunluğuna sahiptirler. Düşük yoğunluklu enerjiye sahip olan bataryaların oluşturduğu enerji açığı güç elektroniği sistemleri ile verimi arttırılarak belirli bir düzeye kadar getirilebilmektedir. Ancak, diğer enerji kaynaklarının sağladığı enerji yoğunluğuna kıyasla yetersizdir [29]. Bu tür sorunlardan yola çıkarak elektrikli araçların menzil problemini aşması için birden fazla batarya araca takılmaktadır, ancak bu sistemde aracın toplam ağırlığının artmasına sebep olmaktadır [30]. Enerji depolama sistemi seçilirken dikkat edilmesi gereken konular arasında güç yoğunluğu, kullanım ömrü, kapasitesi ve sistem maliyetidir. Sistem performansını iyileştirmek için ve kullanılabilirliği arttırmak için enerji depolama sistemi içerisinde birden fazla sistem geliştirilmiştir, bunlar arasında batarya yönetim sistemleri ve termal yönetim sistemleri de yer almaktadır. Geliştirilen elektrikli tahrik sistemine uygun olarak enerji depolama sistemi seçilmelidir, geliştirilen bu sistemler tahrik sisteminin mimarisine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Örneğin elektrikli araçlarda bulunan elektrik motoru içten yanmalı motorla birlikte çalışabilir veya tamamen içten yanmalı motorun yerine geçebilir, sistem veriminin arttırılması hedeflenerek farklı mimariler ortaya çıkmıştır. Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motoru içten yanmalı motorlara kıyasla çok daha yüksek tork sağlama özelliğine sahiptir. Bu nedenle elektrik motoru elektrikli araçların tahrik sistemi olarak tercih edilmektedir. Aynı zamanda elektrik motorları yüksek verimlilik, sağlamlık, uzun ömürlü olması, düşük bakım maliyetleri ve düşük gürültü seviyesine sahip olması açısından tercih edilmektedir. Elektrik makineleri doğru akım ve alternatif akım makineleri olarak üzere ikiye ayrılır. Elektrikli araç uygulamalarında alternatif akım ile çalışan elektrik makineleri tercih edilmektedir. Alternatif akım ile çalışan elektrik makineleri üç fazlı alternatif akım ile çalıştırılır ve üç fazlı sistem fazlar arası 120 derece ile dengeli bir şekilde motor içerisinde bulunan stator sargılarına besleme gerilimi sağlar ve makinenin rotoru tarafından takip edilir. Elektrik motorunun alternatif akım ile çalışması bataryadan gelen doğru akımın dönüştürülmesi gerektiği gerçeğini sunar. Bunun için güç elektroniği devrelerine ihtiyaç duyarız. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda güç elektroniği sitemleri elektrikli araçlarda vazgeçilmez bileşenler olmuşlardır. Bu sistemler doğru akımın alternatif akıma dönüştürülmesinin yanında, farklı gerilim seviyelerinin araç içerisinde elde edilmesinde

ve araç şarj işlemlerinde kullanılan vazgeçilmez elemanlar olmuşlardır. Şarj için kullanılan güç elektroniği elemanları, aracı harici olarak şebekeden şarj etme işini üstlenir. Kullanılan eleman şarj sırasında aracın bataryasını şarj etmek için gerilim seviyesini akıma göre ayarlamak zorundadır, aksi takdirde istenilen şarj işleminin gerçekleşmesi mümkün değildir. Piyasada kullanılan iki tip araç şarj sistemi vardır. Bunlardan biri araç içerisine kurulan yerleşik şarj sistemidir (on board charger). Diğeri ise şarj istasyonlarında bulunan harici bir cihaz (off board charger) olarak kurulur. Araç

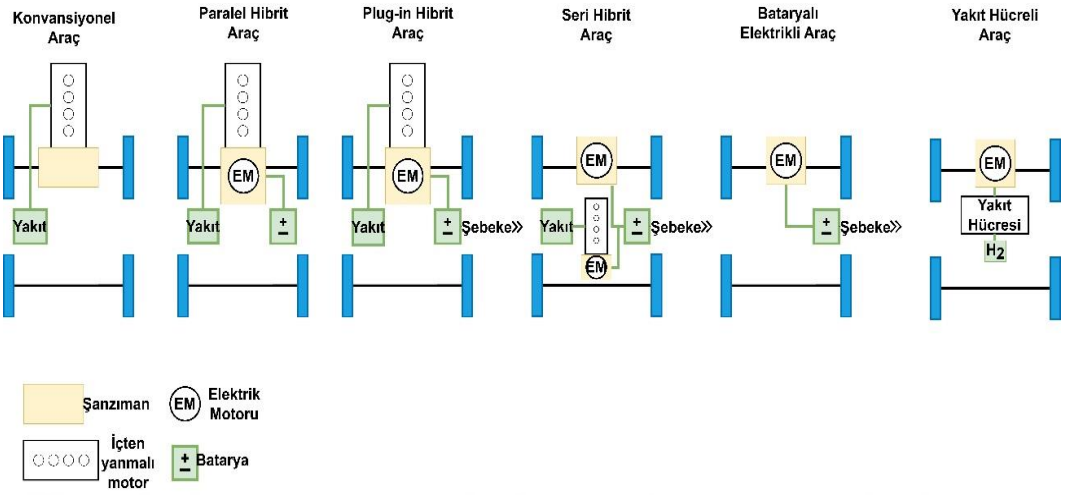


Şekil 2.1 Elektrikli araçlarda güç elektroniği elemanları ile kurulan örnek bir elektrikli aktarma organları mimarisi

içerisinde kurulan şarj cihazları elektrikli araç sektöründe oldukça kullanılmaktadır. Araç içinde kurulan konseptlerde genellikle güç aralığı 3.6-22 kW olarak belirlenir. Ancak yeni kombinasyonlarda bu rakamlar oldukça değişiklik gösterebilir. Harici şarj cihazları çoğunlukla 50 kW veya daha fazla olabilen hızlı şarj etme durumlarında kullanılır. Şekil 2.1'de elektrikli araçlarda güç aktarma organlarının güç elektroniği elemanları vasıtasıyla tasarımı gösterilmiştir.

Araç tahrik sistemleri, yalnızca içten yanmalı motoru veya elektrikli tahrik cihazlarını kullanan geleneksel sistemler olarak geniş bir şekilde sınıflandırılabilir. Batarya veya yakıt hücresi sistemiyle çalıştırılıp çalıştırılmadığına bakılmaksızın, tamamen elektrik enerjisiyle gidilen mesafesinin en azından bir kısmını kapsayabilen tüm tahrik konseptleri, Şekil 2.2'deki gibi sınıflandırılır. Elektrik motoru ile yapılan tahrik sistemlerinin yelpazesi geniştir ve hibridizasyon çeşitliliği; mikro hibrit, orta düzeyli ve tam hibrit veya plug-in hibrit mimarileri ile ayırt edilebilir. Konfigürasyona bağlı olarak

üç tip olarak ayrılabilir: güç dağıtımlı, seri veya paralel hibrit. Şekil 2.2'de elektrikli araçlara ait tahrik sistemlerinin mimarileri gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Elektrikli tahrik sistemlerinin mimari gösterimi

2.1.1 Paralel Hibrit Araçlar

Elektrikli araç sektöründe oldukça fazla kullanılan mimarilerdendir. Temel olarak elektrik motoru içten yanmalı motoru destekleyerek güç organları çalıştırılır. Elektrik motoru kısa mesafeler için yalnız çalışarak yakıt tasarrufu yapar. Yüksek tork gerektiren koşullarda elektrik motoru ve içten yanmalı motor birlikte çalışarak gerekli gücü sağlarlar. Elektrik motoru bazı durumlarda bataryayı besleyerek şarj olmasını sağlar, motorun gücüne bağlı olarak aracın orta dereceli veya tam hibrit olduğu sınıflandırılır. Orta dereceli hibrit araçlardaki motor gücü genellikle 5 ile 20 kW arasında olurken tam hibrit araçlarda 30 ile 50kW olmaktadır. Bunlara uygun olarak batarya için belirlenen kapasite 1 ile 2 kWh olarak tasarlanır [31].

2.1.2 Plug in Hibrit Araçlar

Plug-in hibrit araçlardaki (PHEV) tahrik mekanizması içten yanmalı motor ile elektrik motorunun birlikte görev yapmasıyla oluşur. Bataryanın boyutlarına göre elektrikle sürüş yeterli bir menzile kadar mümkündür. Normal hibrit araçlara ek olarak şebeke üzerinden şarj edilme imkânı vardır. Orta dereceli veya tam hibrit araçlara oranla elektrik motorunun tahrik gücü daha yüksektir. Motor gücü genellikle 30kW ile 80kW arasındadır. Batarya kapasitesi klasik hibrit araçlara oranla daha yüksektir, genellikle 3 ile 10 kWh aralığındadır [31].

2.1.3 Menzili Uzatılmış Elektrikli Araçlar

Bu tür elektrikli araçlarda daha güçlü elektrik motorları kullanılır. Genellikle küçük bir içten yanmalı motor vasıtası ile jeneratör üzerinden batarya şarj edilir. Elektrik motoru ve içten yanmalı motorun aynı tahrik aksı üzerinde olmaması aracın seri hibrit kategorisine koymaktadır. İçten yanmalı motorun tek görevi jeneratör üzerinden bataryayı şarj etmektir. Aynı zamanda bataryayı şebeke üzerinden şarj etme imkânı sunulmuştur. Son zamanlarda piyasada kullanılan menzili uzatılmış elektrikli araçların tahrik motoru gücü genellikle 100kW dan fazladır aynı zamanda 15kWh'lik batarya kapasitesine sahiplerdir [31].

2.1.4 Bataryalı Elektrikli Araçlar

Batarya tabanlı elektrikli araçlar enerji kaynağı olarak sadece batarya kullandığından daha güçlü bir elektrik motoru ve bataryaya sahiptirler.

Aracın tahrik mekanizması sadece elektrik motoru olduğundan hibrit araçlardaki gibi ekstra kombinasyonlara gerek yoktur. Batarya enerjisini şebeke vasıtasıyla ve geri kazanım enerjisiyle alır. Bu tür araçlarda hibrit araçlar gibi içten yanmalı motor ve elektrik motoru kombinasyonları olmadığından batarya ve elektrik motoru boyutları ile oynayarak farklı tür araç konseptleri elde edilir. İlk çıkan ve kullanılmaya başlanan batarya tabanlı elektrikli araçlar yaklaşık olarak 15- 25kWh kapasiteye sahipken, günümüzde, daha üst düzeyli konsept tasarımlarında 60-110 kWh veya daha fazla kapasiteye ulaşabilirler [31].

2.1.5 Yakıt Hücreli Araçlar

Yakıt Hücreli araç sistemlerinde bir hidrojen tankı ve hidrojeni elektrik enerjisine dönüştüren yakıt hücresi mekanizması vardır. Bu mekanizma vasıtası ile elektrik motoru beslenerek tahrik işlemi sağlanır. Kullanılan sistem içerisinde enerji dönüştürücü eleman olarak yakıt hücresi kullanılır. Günümüzde kullanılan yakıt hücreli araçlarda motor gücü yaklaşık olarak 30-100 kW aralığındandır. Aynı zamanda bu tür araçlarda küçük kapasiteye sahip bir batarya bulunur. Araçtaki batarya geri kazanılan enerjinin depolanmasında görev alır ve kapasitesi yaklaşık olarak 1-2 kWh'tir [31].

3
BATARYALAR

3.1 Bataryaların Tarihçesi

Günümüzde yaygın olarak kullanılan bataryaların tarihi oldukça eskiye dayanmaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalardan sonra batarya olarak kullanılan ve bilinenin aksine ilk keşfedilmiş ve kullanılmış olan bataryalardan farklı olarak daha eski bir tarihe dayanan ve Mezopotamya bölgesinde keşfedilen testi benzeri bir yapıya sahip olan bağdat pili olarak adlandırılmış bir sistem keşfedildi. Şekil 3.1'de bağdat pilinin bir görseli bulunmaktadır.



Şekil 3.1 Kazı çalışmalarında keşfedilen Bağdat pili [98]

Yapılan arkeolojik çalışmalardan çıkan sonuçlar göz önüne alındığında bağdat pillerinin yaklaşık 2000 yıllık olduğu belirlenmiştir. Ancak, "Elektrikli Pil" tabiri ilk olarak 1749 yılında Benjamin Franklin tarafından bugün kullandığımız bataryalara benzer şekilde şarj edilip deşarj olabilen bir cihaza atıfta bulunmak için kullanılmıştır. Franklin'in "Elektrik Pili" aslında modern anlamda bir pil yerine camdan, kurşun levhalardan, ipekten ve kurşun telden yapılmış bir kapasitör oluşumuydu [32]. Luigi Galvani, bir kurbağanın bacağını pirinç bir kanca ile bağlayıp keserken demir bir neşterle dürttüğünde, kurbağa bacağının seğirdiğini fark etmesiyle, Luigi Galvani'nin arkadaşı olan ve aynı zamanda bir bilim adamı olan Alessandro Volta, fenomenin iki metali nemli bir ara madde aracılığıyla birleştirdiğinde meydana geldiği teorisini ortaya attı. Daha sonra 1800 yılında Volta; ilk pili üst üste istiflenmiş ve tuzlu suya batırılmış kumaşla ayrılmış bakır ve çinko disklerden oluşturulan bir sistem aracılığıyla icat etti. Bu sistem daha sonra "voltaik pil" adını aldı.



Şekil 3.2 Voltaik pil [99]

1860 yılında, Fransız Gaston Planté ilk kullanılabilir kurşun asitli şarj edilebilir pili icat etti [33]. O zamandan beri, kurşun asit bataryalar, araçların kalkış anındaki ateşleme motorlarına sağlanan elektrik enerjisinde ve telgraf direklerine güç sağlamak da dahil olmak üzere çeşitli amaçlar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kurşun asitli bataryaların avantajları arasında, yüksek akım verme kapasitesi ve kontrollü aşırı şarj yoluyla kendi kendini dengeleme kapasitelerinin olmasından dolayı piyasada daha fazla kullanılmalarına olanak sağlamıştır [34]. 1991 yılında lityum-iyon piller artık ticari olarak satılmaya başlandı. Yüksek enerji ve güç yoğunlukları lityum-iyon pillerin piyasada yer almasının sağladı. Lityum-iyon pillerin çoğu, seri olarak bağlanmış çok sayıda hücreden oluşur, çünkü lityum-iyon pillerin nominal voltajı, belirli bir kimyaya bağlı olarak yaklaşık 3,5-0,2 V' tur. Hücre bozulmaları ve termal kaçaklar, aşırı şarj sırasında meydana gelebilecek olumsuz durumlardandır. Aynı zamanda aşırı deşarj durumunda hücrenin kısa devre yapmasına neden olabilir. Bu iki sorun genellikle pilin hacmini, maliyetini ve karmaşıklığını artıran bir batarya yönetim sistemi kullanılarak önlenir [35].

3.1.1 Kurşun Asit Bataryalar

Kurşun asit bataryaların icat edilmesi 1800'lü yıllara dayanmaktadır. Gaston Plante bu bataryaların icat edilmesiyle önemli bir depolama sistemini insanlık tarihine kazandırmıştır. 1859 yılında icat edilen kurşun asit bataryalar bu tarihlerde birçok akademi de sergilenerek farklı bilim insanlarının yorumuna ve görüşlerine sunulmuştur.

Dayanıklı olmaları ve darbelere karşı dirençli olmaları sayesinde otomotiv sektöründe aydınlatma ve ateşleme sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Günümüzde kurşun asit bataryaların kullanımı devam etmektedir.

Yüksek güç gerektiren uygulamalar için kullanılmaları halinde boyutları ve ağırlıkları çok yüksek seviyelere ulaşabilmektedir. Aynı zamanda bu bataryaların çevrim ömürleri daha kısa ve sadece %50 deşarj derinliğine kadar kullanılabilirlikleri mevcuttur. Bu dezavantajlarına rağmen kurşun asit bataryalar maliyetinin düşük olması ve maksimum 36 volt ve 2kWh kapasite gerektiren durumlar için kullanımını sürdürmektedir [36]. Kimyasal olarak incelendiğinde kurşun asit batarya içerisinde pozitif ve negatif elektrot ile birlikte bir elektrolit sıvı vardır. Pozitif ve negatif elektrot sırasıyla kurşun dioksit (PbO2), kurşun (Pb)' dur, elektrolit olarak ise sülfürik asit (H2SO4) kullanılır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan iki çeşit kurşun asit batarya bulunmaktadır. Bunlar, sulu ve valf ayarlı kurşun asit batarya olmak üzere ayrılırlar.

Bataryada gerçekleşen deşarj sırasında enerji üretilirken yan olarak kurşun sülfat ve su üretilir.

Deşarj işlemi sırasında, negatif elektrotta (anotta) aşağıdaki yarım denklem gerçekleşir:

$$Pb + HSO_{4-} \rightarrow PbSO_4 + H^+ + 2e^- \quad (3.1)$$

Metalik kurşun, kurşun sülfatın iletken olmayan katı bir ürünü olan PbSO4'ü oluşturmak için H2SO4 ile reaksiyona girer. Metalik kurşun, yukarıdaki reaksiyonda elektronları kaybeder ve kurşun katyonları haline gelir ve şarj sürecinde reaksiyon geri dönüşümlüdür. Bu arada, diğer yarı reaksiyon pozitif elektrotta gerçekleşir, reaksiyon aşağıdaki gibidir:

$$PbO_2 + 3H^+ + HSO_4^- + 2e^- \rightarrow PbSO_4 + 2H_2O \quad (3.2)$$

Bu reaksiyon aynı zamanda geri dönüşümlüdür. Yukarıdaki iki yarım reaksiyona göre, toplam reaksiyon denklemi:

$$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \rightleftharpoons 2PbSO_4 + 2H_2O \quad (3.3)$$

İdeal durumda, deşarj kapasitesi hücre çevriminden sonra sabit kalmalıdır.

Gerçekleşen döngüler sırasında bazı durumlar bataryanın bozulmasına sebep olur ve verimini düşürür [37].

Düşük maliyetli, güvenilir, uzun yılları aşan bir gelişim süreci mevcuttur, dayanıklı ve kötü durumlara karşı toleransı yüksek, aşırı şarj durumlarına karşı toleranslı, düşük iç dirence sahip olmaları, çok yüksek akım seviyelerine çıkabilmeleri, iletken sıvı olmadan depolandıklarında uzun raf ömrüne sahip olmaları ve tedarikçi bulmadaki kolaylıkları başlıca avantajları olarak görülür [36].



Şekil 3.3 Kurşun asit batarya [100]

3.1.2 Nikel-Kadmiyum Bataryalar

1899'da İsveçli mucit Waldemar Jungner tarafından icat edildi, ancak 1960'ların başına kadar yaygın olarak dağıtılıp kullanılmadı. Portatif aletler ve diğer tüketici uygulamaları için kompakt boyutları ve yüksek deşarj oranı kapasiteleri sayesinde günlük yaşamın bir parçası haline geldi. Bataryada kullanılan elektrolit sıvısının azalmasını önlemek için ve bataryanın uzun süre kullanılması için hücreler iyi bir şekilde kombine edilerek kaçakların önüne geçilir. Portatif ürünlerde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmış olan bu bataryalar günümüzde nikel metal hidrit ve lityum iyon tabanlı piller ile yer değiştirmiş gibi görünüyor [36].

Alkalin elektrolit bataryalar, kurşun-asit bataryalara nazaran iki kat daha fazla enerji yoğunluğuna sahiptir. Günümüzde kullanılan piller arasında en yaygın olarak kullanılan alkalin piller nikel kadmiyum piller olarak bilinmektedir. Kimyasal olarak incelendiğinde nikel kadmiyum bataryalarda pozitif ve negatif elektrot ile birlikte bir elektrolit sıvı da bulunur.

Pozitif ve negatif elektrot sırasıyla; nikel hidroksit (Ni(OH)2), kadmiyum (Cd)' dur, elektrolit sıvı olarak ise potasyum hidroksit (KOH) kullanılır.

Pozitif elektrotta gerçekleşen reaksiyonun denklemi aşağıdaki gibi belirtilir [37]:

$$2NiOOH + 2H_2O + 2e^- \rightleftharpoons 2Ni(OH)_2 + 2OH^- \quad (3.4)$$

Negatif elektrotta meydana gelen yarı hücre reaksiyonu:

$$Cd + 2OH^- \rightleftharpoons Cd(OH)_2 + 2e^- \quad (3.5)$$

Toplam reaksiyon aşağıdaki formülle açıklanabilir:

$$2NiOOH + Cd + 2H_2O \rightleftharpoons Ni(OH)_2 + Cd(OH)_2 \quad (3.6)$$

Düşük iç direnci, şarj ve deşarj oranlarındaki yüksek kapasitesi, geniş sıcaklık aralığına sahip olması, 500'ün üzerinde çevrim ömürlerinin olması, çok çeşitli boyut ve kapasitelerde bulunabilmeleri, hızlı şarj edilebilme özelliğine sahip çeşitlerinin olması, yüksek deşarj durumlarına tolerans gösterebilmeleri belirli avantajları arasında yer alır.



Şekil 3.4 Nikel-Kadmiyum Bataryalar [101]

3.1.3 Nikel Metal Hidrit Bataryalar

NiMH batarya patenti 1986 yılında Ovonics'in kurucusu Stanford Ovshinsky tarafından alındı.1970'lerde, farklı bir enerji kaynağı olarak kullanılmak üzere hidrojenin depolanması üzerine yapılan çalışmalar esnasında Nikel-metal hidrit hücre negatif elektrotunun temel konsepti ortaya çıktı. Yapılan araştırmalar sonucunda, metaller ile yapılan alaşımlarda hidrojenin tutulmasında önemli gelişmeler yaşandı ve oluşturulan hidritlerin hidrojen tutmada çok üstün performans sergiledikleri gözlendi.

Alaşım bileşenlerinin ve oranlarının dikkatli bir şekilde seçilmesiyle, termodinamik, absorpsiyon ve salma işleminin oda sıcaklıklarında ve basınçlarında ilerlemesine izin verecek şekilde dengelenebildiği gösterildi. NiMH piller, teknolojinin makul bir olgunluğa ulaşmasıyla artık yüksek gerilime sahip otomotiv uygulamalarında kullanılmaya başlandı. Enerji yoğunluğu, NiCad pillerden %40 daha yüksek ve kurşun asit pillerin iki katından fazladır. Mikro döngülerin yanı sıra daha yüksek şarj ve deşarj oranlarına izin vererek, daha önce mümkün olmayan uygulamalar için olanaklar sağlamıştır. Nikel metal hidrit piller, nikel kadmiyum pillerle benzerliklere sahiptir,

NiMH incelendiğinde kadmiyum negatif elektrot yerine sadece hidrojen emici negatif elektrot kullanır. Bu nedenle, pozitif elektrottaki reaksiyon ile aynıdır. Negatif elektrottaki yarı hücre reaksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$H_2 + 2OH^- \rightleftharpoons 2H_2O + 2e^- \tag{3.7}$$

Bu nedenle, toplam reaksiyon:

$$2NiOOH + H_2 \rightleftharpoons 2Ni(OH)_2 \tag{3.8}$$

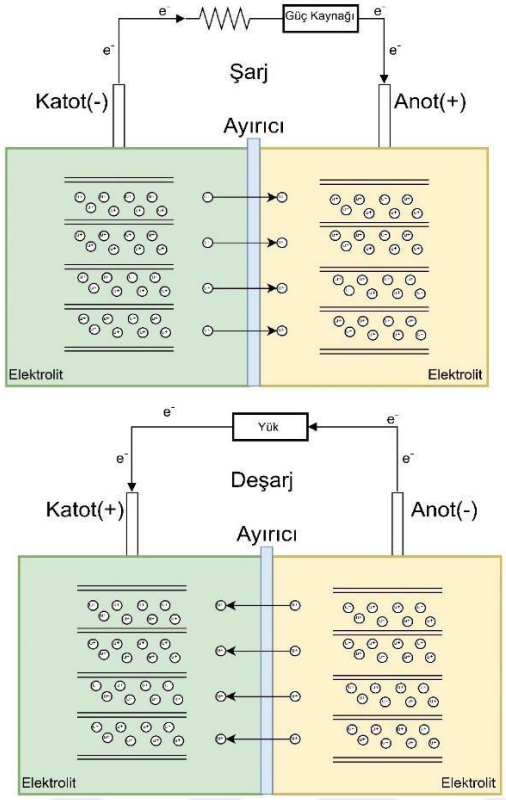
Yüksek enerji yoğunluğunun (W/kg) NiCad'lardan yaklaşık %50 daha iyi olması, ancak Lityum iyon bataryaların yaklaşık %60'ı kadar olması, Nikel Kadmiyum kadar düşük olmasa da düşük dahili empedansının olması, tipik döngü ömrünün 3000 döngülere kadar olması, dayanıklı olmaları ve aşırı şarj ve aşırı deşarj koşullarına da tolerans göstermeleri, geniş çalışma sıcaklığı aralığına sahip olmaları, 1 saatte hızlı şarjın mümkün olması, çevre dostu olmaları (kadmiyum, cıva veya kurşun içermez), yüksek güç ve otomotiv uygulamalarında önemli bir özellik olan daha iyi huylu aktif kimyasalların kullanılması nedeniyle bir kaza veya kötüye kullanım durumunda lityum bazlı hücrelerden çok daha güvenli olmaları belli başlı avantajları arasında yer alır [38].



Şekil 3.5 NiMH pil [102]

3.1.4 Lityum İyon Bataryalar

Lityum, yapılan çalışmalar doğrultusunda en hafif metal olarak bilinmesinin yanı sıra çok yüksek elektrokimyasal potansiyele de sahiptir. Buna benzer belirgin farklar, lityum metalinin güç ve enerji yoğunluğu açısından gayet başarılı olmasını ve batarya üretiminde önemli roller almasını sağlamıştır. Lityum iyon piller, yukarıdaki üç tip pilde olduğu gibi yalnızca redoks reaksiyonunu kullanmak yerine interkalasyona da bağlıdır. Aşağıda gösterilen şekilde lityum iyonları ana elektrotta oluşturulan kafeslere yerleştirilir.



Şekil 3.6 Bir lityum iyon pilin şarj ve deşarj esnasındaki durumu

Kimyasal olarak incelendiğinde, lityum iyon pillerde pozitif ve negatif elektrot ile birlikte bir elektrolit bulunur. Pozitif ve negatif elektrot sırasıyla; karbon, lityum kobalt dioksit (LiCoO2)'dir, elektrolit olarak ise lityum tuzu (LiPF6) olan susuz organik bir çözücü kullanılır.

Pozitif elektrottaki yarı hücre reaksiyonu:

$$xLi + xe^{-} + Li_{1-x}CoO_2 \rightleftharpoons LiCoO_2 \tag{3.9}$$

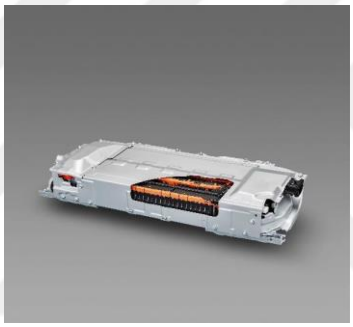
Negatif elektrottaki reaksiyon:

$$Li_xC \rightleftharpoons xLi^{+} + xe^{-} + C \tag{3.10}$$

Özetle, toplam reaksiyon

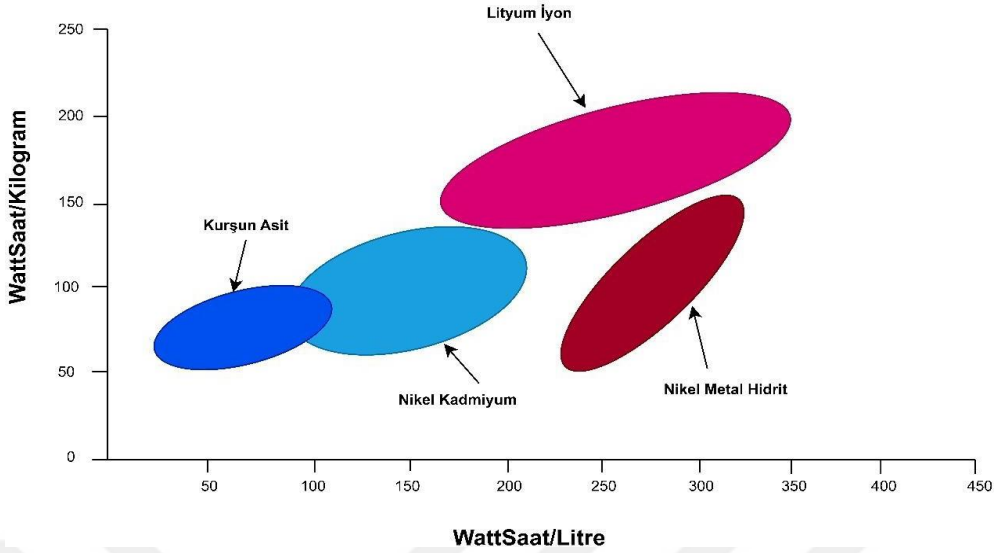
$$Li_{1-x}CoO_2 + LiC \rightleftharpoons LiCoO_2 + C \tag{3.11}$$

Deşarj sırasında, lityum iyonları ayrışır, elektrolit boyunca hareket eder ve karbon yapısına eklenir. Bu esnada dış devreden dengeleme görevi gören elektron akışı gerçekleşir. Bu reaksiyon tersine çevrilebilir olduğundan, lityum iyonları şarj ve deşarj sırasında elektrotlar arasında gidip gelir. Aynı zamanda pilin kapasitesini etkileyen ve ömrünü azaltan eskime durumları da lityum iyon pillerin etkilendiği hususlar arasındadır [39]. Lityum iyon piller premium alkalin pillere göre iki katı enerji yoğunluğuna sahiptir. Aynı zamanda düşük ağırlığa sahip olmaları ve hücre gerilimlerinin yükseltilebilir olması onları elektrikli araç sektöründe vazgeçilmez depolama elemanları yapmıştır, özellikle kendiliğinden deşarj olma oranının düşük olması diğer pillere nazaran gayet iyi bir kullanım alanı sağlamıştır. Aynı zamanda farklı çalışma sıcaklıklarında da verim göstermeleri tercih edilme sebepleri olarak görülebilir [40].



Şekil 3.7 Toyota firmasına ait elektrikli araç için oluşturulan lityum iyon batarya paketi

Enerji yoğunluğu, bataryadaki birim ağırlık veya birim hacim başına enerji depolama oranıdır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan dört adet bataryanın enerji yoğunluğunun karşılaştırılması Şekil 3.2'de açıkça görülebilir. Görüldüğü üzere lityum iyon piller enerji yoğunluğu açısından oldukça iyi bir yere sahiptir. Birim hacim ve birim ağırlık başına en iyi enerji yoğunluğunun lityum iyon pillerde olduğu en düşük enerji yoğunluğunun ise kurşun asit bataryalarda olduğu görülmektedir.

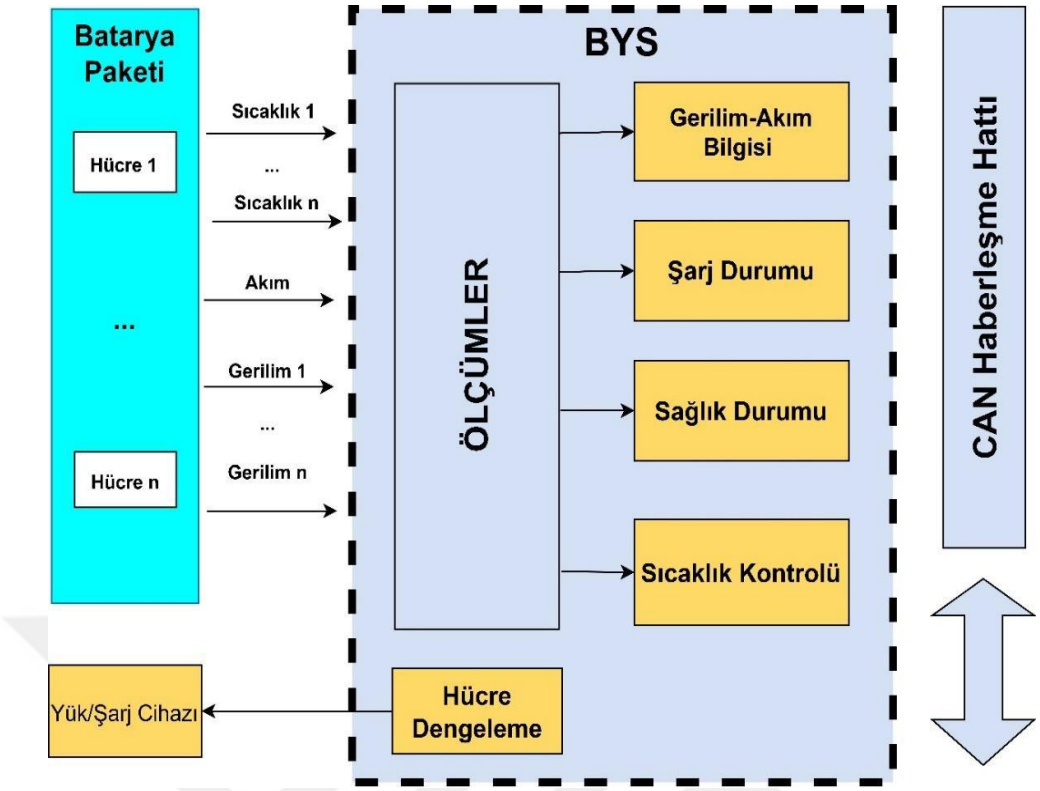


Şekil 3.8 Çeşitli bataryaların enerji yoğunluklarının karşılaştırılması [41]

4
BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ

4.1 Batarya Yönetim Sistemleri

BYS, bulunduğu sistemdeki depolama biriminin şarj ve deşarj sırasındaki gerilim ve akımları gibi temel çalışma parametrelerini ve bataryanın iç ve ortam sıcaklığını izleyen bir elektronik donanımdır. İzleme devreleri genellikle, sistemin içerisinde bulunan hayati öneme sahip herhangi bir parametre maksimum limit değerini aşarsa, alarm veren veya bataryayı yük veya şarj cihazından ayıran koruma cihazlarına gerekli sinyalleri sağlar. Bataryanın düzgün çalışması için çeşitli parametrelerin sürekli izlenerek BYS'nin aksiyon alıp çeşitli görevleri yerine getirmesi gerekir. Genel olarak, BYS hem donanım hem de yazılım bileşenlerinden oluşur. Yazılım bileşeni; batarya özelliklerini, pil durumlarını (SOC, SOH), hücre dengelemeyi, hata algılamayı ve bir kullanıcı arabirimini içerir, donanım kısmı ise; sensör sistemlerini, güvenlik devrelerini, şarj kontrolünü, termal yönetimi ve iletişimi de içerebilir. BYS' ler ile ilgili ilk zorluk, hücre gerilimlerinin kesin doğrulukta ölçümlerini elde etmektir. Bu, ölçülecek çok sayıda hücre olduğu zaman, düşük ölçüm doğruluğu ile sağlanır. İkincisi; SOC, SOH vb. batarya durumlarını, kesin olarak tahmin etmektir. Üçüncüsü; hücreler çeşitli oranlarda ve yoğunluklarda şarj oldukları için dengelenmelidir. Batarya sorunu teşhisi de dahil olmak üzere bu görevler, BYS tarafından gerçekleştirilmelidir. Batarya yönetim sistemi otomotiv sektöründe çok daha karmaşık, yüksek hızlı bir enerji yönetim sisteminin parçasıdır. Aynı zamanda BYS, araç içerisindeki diğer sistemler ile iletişim kurarak herhangi olumsuz bir durumda bütün sistemlerin senkronize çalışmasını sağlamalıdır [42]. BYS'nın blok şeması Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 BYS Blok Şeması

4.2 Batarya Yönetim Sisteminin Görevleri

4.2.1 İzleme Birimi

İzleme birimi, bataryanın seviyesini kontrol ederek ve hücrelerin özelliklerini izleyerek sistemin yönetilmesini sağlamaktadır. İzleme ile hücrelerin sınır değerlerinin aşılmadığı belirlenir. Herhangi bir sistem hatasından kaynaklanan yanlış durum alarmları veya gürültüleri bildirmeden önce bir gecikme süresi konularak hatanın sürekli gelip gelmediği belirlenip sisteme doğru bilgiyi başarılı bir şekilde iletmelidir. İzleme biriminde ölçülen büyüklükler arasında; basınç, sıcaklık, voltaj ve akım gibi parametreler vardır [43].

4.2.2 Ölçme Birimi

Batarya paketinin voltaj, sıcaklık, akım ve diğer parametreleri BYS' de sıklıkla ölçülen büyüklüklerdir ve ölçülen parametrelerin değerleri de sürekli olarak görüntülenir [43].

4.2.3 Hesaplama Birimi

Batarya paketinden alınan parametrelerin ve batarya hücresi özelliklerinin ölçüm verilerini kullanma durumudur [43].

4.2.4 Hata Algılama Birimi

İzleme, ölçme ve hesaplamadan başka bir birime veya alt sisteme veri veya bilgi sağlamak için iletişime ihtiyaç vardır. Bazı parametrelerin seviyesinin aşıldığını iletmek için yanıp sönen bir lamba veya ışık yayan diyot (LED) kullanılabilir, böylece sistemde herhangi bir hatanın olduğu bildirilir [43].

4.2.5 Kontrol Birimi

BYS' nin şarj ve deşarj dönemlerinde, akım, voltaj ve sıcaklığın batarya paketinin veya hücrelerinin minimum veya maksimum sınırlama seviyesini aştığı durumlarda bataryanın bağlanması ve bağlantısının kesilmesi gibi batarya hücreleri ve paketi üzerinde kontrol mekanizmasının olmasıdır [43].

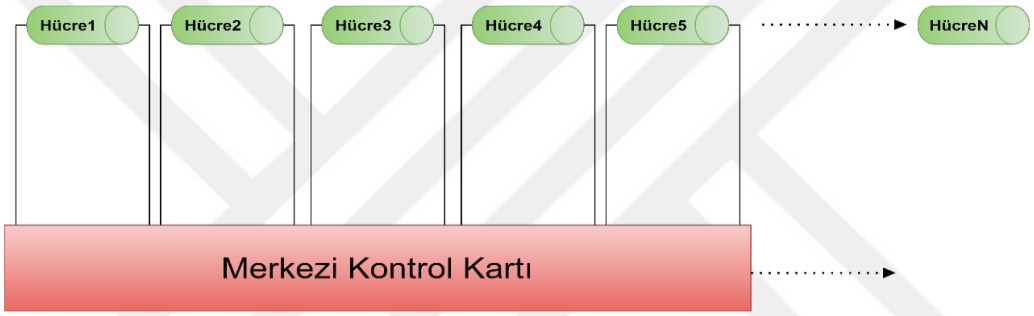
4.2.6 Hücre Dengeleme Birimi

Dengeleme sistemi, hücrenin kimyasal yapısına bağlı olarak bütün batarya tiplerine uygulanabilecek bir özellik değildir. İç empedanslardaki küçük farklılıklar veya hücrenin içerisinde diğer faktörlerinden dolayı dengesizlikler meydana gelebilir [44]. Seri bağlı hücrelerdeki farklı yaşlanma özellikleri ve farklı sıcaklıklar, hücre takımında dengesizliğe neden olabilir. Birbirine zincirle bağlı çok sayıda hücreden oluşan bir batarya paketinin şarjı sırasında, hücrelerden birinin diğerinden önce şarj edilmesi paketteki yüksek sıcaklık ve basınçtan dolayı hücrenin zarar görmesine neden olur. Bunun nedeni, tam şarjlı hücrenin aşırı şarj olurken, diğer hücrelerin şarj olmaya devam etmesidir. Deşarj sırasında ise zayıf hücreler diğer hücrelere oranla daha hızlı boşalır ve boşalma işleminin devam ettiği süre boyunca hücrelerin boşalması devam edeceği için aşırı deşarj durumu gerçekleşir. Batarya içerisindeki zayıf hücreler şarj ve deşarj durumlarında gittikçe zayıflar ve belirli bir süre sonra enerji verme özelliğini kaybederek batarya paketine zarar vermeye başlar, aynı zamanda hücre ömürlerinin azalmasına neden olur [44].

4.3 Batarya Yönetim Sistemi Topolojileri

4.3.1 Merkezi Kontrol Topolojisi

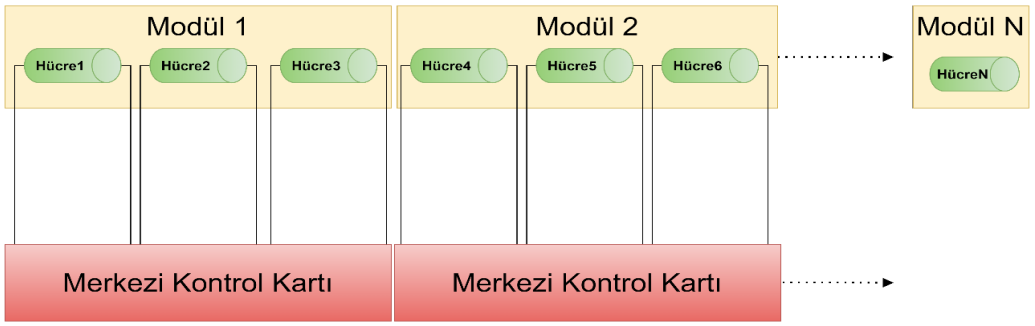
BYS sadece bir kart üzerinden bütün sistemi kontrol eder. Bu topolojide hücre bağlantıları, gerçekleştirilen ölçümler, sensör bağlantıları vb. tüm aktiviteler tek kart üzerine yapılır. Sistemde sadece bir adet kontrol kartı kullanıldığı için maliyet açısından uygundur ve herhangi bir arıza olması durumunda sadece bir kart kontrol edileceği için arıza tespiti kolay bir şekilde yapılır. Ancak, hücre sayısındaki artış kullanılan kartın işlem yükünü çok fazla arttıracağı için veri aktarımı ve alınan ölçümlerde gecikmeler gözlenir. Aynı zamanda sistemde kullanılacak kontrol algoritmaları hücre sayısının artışıyla karmaşık bir hal alır [103]. Merkezi kontrol topolojisinin genel gösterimi Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 Merkezi Kontrol Topolojisi

4.3.2 Modüler Kontrol Topolojisi

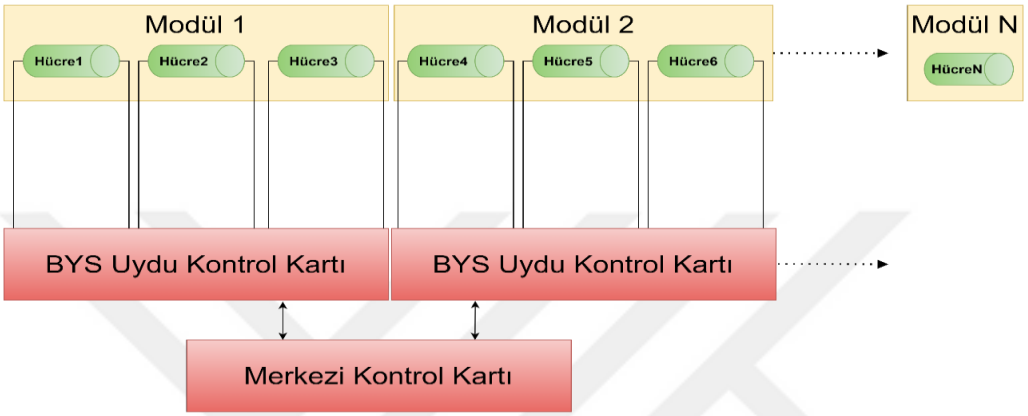
Birden fazla BYS kontrol kartı kullanılarak geliştirilen topolojidir. Kart sayısının fazla olması işlem yükünün hafiflemesini sağlar ve sistem daha doğru sonuçlar elde eder. Aynı zamanda kontrol algoritmaları kolay ve anlaşılır bir hal alır. Ancak, çok fazla kartın olması maliyetin artmasına neden olur [103]. Modüler kontrol topolojisinin genel gösterimi Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3 Modüler Kontrol Topolojisi

4.3.3 Ana-Uydu Topolojisi

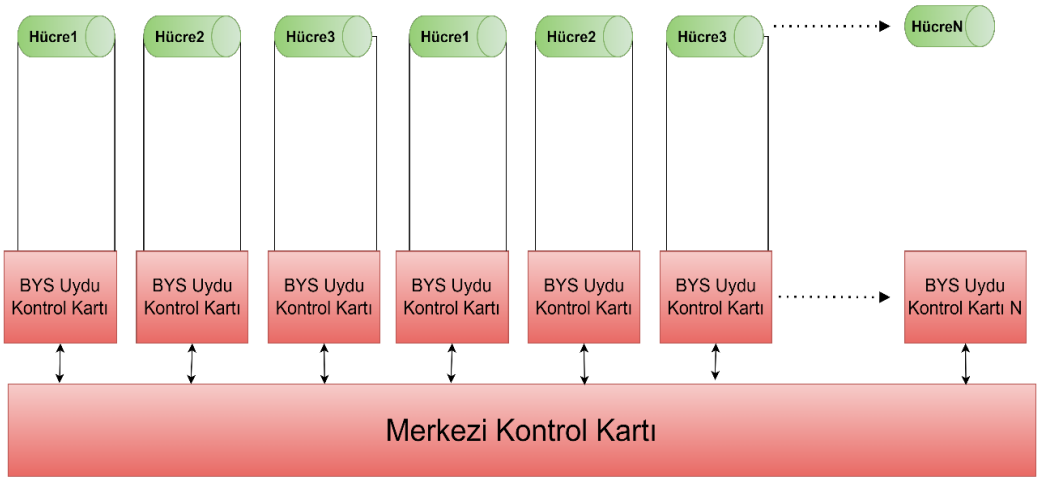
Bu topoloji sistemdeki ölçümlerin ayrı bir kart aracılığı ile toplanıp merkezi kontrol kartına gönderilmesi ile işlem yükünde iyileşmeler sağlamıştır. Sistemde yardımcı kartların olması maliyetin artmasına sebep olsa da modüler topolojiye göre daha avantajlıdır. Genellikle, piyasada yüksek enerji yoğunluğuna sahip bataryalar bu topolojiyi kullanmaktadır [103]. Ana-Uydu topolojisinin genel gösterimi Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4 Ana-Uydu Topolojisi

4.3.4 Dağınık Kontrol Topolojisi

Bu topolojide her hücre ayrı bir yardımcı kart aracılığı ile izlenir ve verileri merkezi kontrol kartına aktarılır. Sistemde hücre düzeyinde ölçümler yapıldığı için sistem verimi artmış olur. Kart maliyetleri belirli bir düzeyde artmış olsa bile sistemdeki kablolama yükünden ciddi oranda kurtulmuş oluruz. Ancak diğer topolojilerle kıyaslandığında kart sayısı ve maliyeti yüksektir [103]. Dağınık kontrol topolojisinin genel gösterimi Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5 Dağınık Kontrol Topolojisi

Tablo 4.1'de BYS topolojilerinin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Kontrol topolojilerinin avantajlı olduğu her kalem için artı işareti konulmuştur. Artı işaretlerinin fazla olması belirtilen topolojinin ilgili kalemde çok avantajlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.1 BYS topolojilerinin karşılaştırılması [103]

Topoloji	Ölçüm Kalitesi	Esneklik	Güvenlik	Elektronik Donanım Maliyeti	Kurulum Maliyeti	Bakım Maliyeti
Merkezi	++	+	+	+	+++	+++
Modüler	++	++	+	++	++	++
Ana-Uydu	+++	++	+	++	++	++
Dağınık	+++	+++	+++	+++	+	+

5
BATARYA DENGELEME SİSTEMLERİ

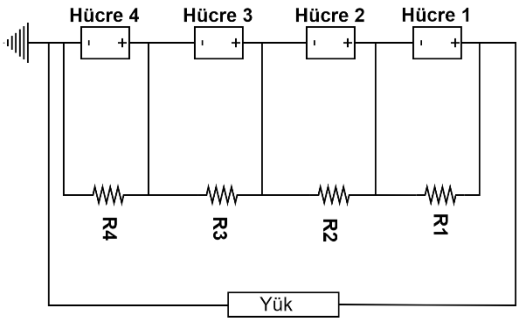
5.1 Pasif Dengeleme

Şönt dirençlerin paralel bağlanması ile oluşturulan sistemlerdir, pasif dengeleme yüksek SOC' ye sahip hücrelerin fazla enerjisini ortadan kaldırır. Pasif dengelemenin faydaları arasında düşük maliyetler, düşük karmaşıklık ve basit kontrol yöntemleri bulunur. Bununla birlikte, hücre döngüsü verimliliği azalır ve dengesiz batarya enerjisi tamamen ısı olarak dağıldığı için dengeleme akımları çok yüksek ise termal sorunlar da ortaya çıkabilir.

İki farklı pasif dengeleme türü bulunmaktadır, sabit direnç ile dengeleme ve anahtarlamalı direnç ile dengeleme olmak üzere, paralel dirençlerin sisteme bağlayabilme ve bağlantısını kesebilme yeteneği, bu iki yaklaşım arasındaki ana farktır [45].

5.1.1 Sabit Direnç ile Dengeleme

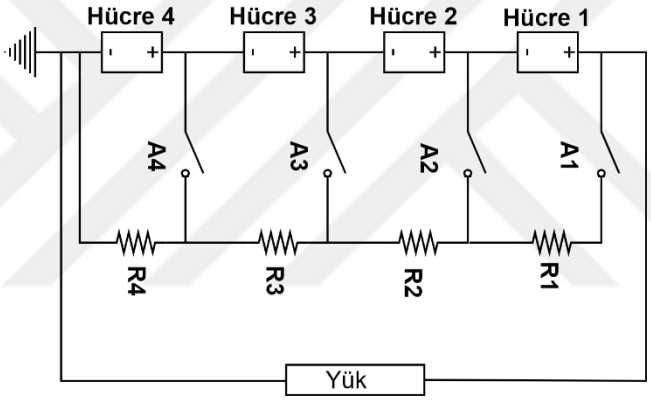
Sabit direnç ile dengeleme sırasında, her hücreye paralel bağlı bir şönt dirençten sabit bir akım geçer. Dengeleme sistemindeki bypass akımları hücrelerin son gerilimleri ile orantılı olduğundan, hücrelerin enerji seviyeleri kontrol önlemleri olmadan dengelenebilir. Ancak, şönt dirençler her zaman sisteme bağlıdır ve sürekli olarak güç kaybı oluşturur. Aynı zamanda kullanılan bu yöntem dengeleme sürelerinde uzamaya neden olur. Lityum iyon piller için kabul edilemez olan aşırı şarj ve deşarj süreci kolayca gerçekleşir. Günümüzde bu yöntem ile dengeleme işlemi yapan bataryalar arasında genellikle kurşun asit ve nikel metal hidrit bataryalar bulunur [46], [47]. Şekil 5.1'de sabit direnç ile dengeleme devresi verilmiştir.



Şekil 5.1 Sabit direnç ile dengeleme devresi

5.1.2 Anahtarlamalı Direnç ile Dengeleme

Bu yöntemde, her bir şönt dirence ek bir anahtarlama elemanı bağlanır. Şarj işlemi sırasında hücre ilk tam şarj olduğunda paralel bağlı anahtar kapatılır ve bağlı olan şönt direnç üzerinden dengeleme akımı geçer. Bu hücre aşırı yüklenmeye karşı korunurken diğer hücreler daha fazla şarj edilebilir. Bataryada bulunan bütün hücreler şarj olduktan sonra şarj işlemi kesilir. Deşarj işlemi sırasında hücre tamamen boşaldığında pil güç sağlamayı durdurur. Diğer elemanlara paralel bağlanan anahtarlar kapatılarak fazla enerjinin şönt dirençlere boşaltılmasına izin verilir. Tüm hücreler tamamen boşalana kadar deşarj işlemi devam eder. Ek olarak, tüm hücrelerdeki şarj durumları farkının eşik değerinden büyük olduğu tespit edilirse, şarj veya deşarj akımı olmadığında bile hücreler stabilize edilebilir [48], [49]. Şekil 5.2'de anahtarlamalı direnç ile dengeleme devresi verilmiştir.



Şekil 5.2 Anahtarlamalı direnç ile dengeleme devresi

5.2 Aktif Dengeleme

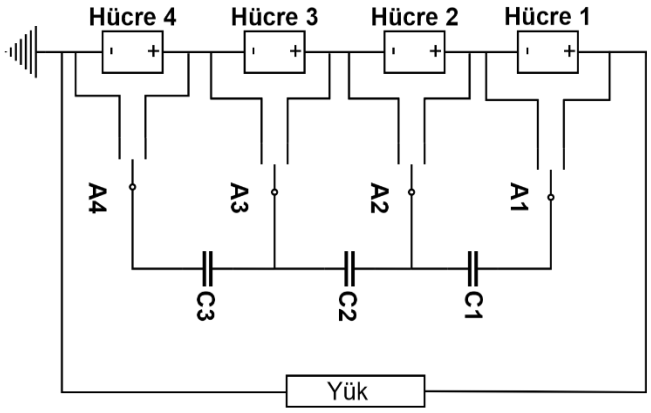
Pasif dengeleme yöntemlerindeki aşırı enerji kayıplarının önüne geçmek için birden fazla aktif dengeleme yöntemi geliştirilmiştir. Bu sistemlerdeki temel amaç, yükleri hücreler arasında yeniden dağıtarak güç aktarım sisteminin genel verimliliğini arttırmaktır. Aktif dengeleme genel olarak kullanılan depolama elemanlarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Kapasitör, indüktör ve dönüştürücü kullanılarak oluşturulan aktif dengeleme sistemleri depolama elemanlarının çeşitliliğinden dolayı farklı stratejilerin ve kontrol algoritmalarının kullanılmasına imkân tanımıştır. Aktif dengeleme sisteminin avantajı, çok daha fazla pil gücünün sisteme verilerek enerji kaybının minimuma indirilmesidir, ancak her zaman daha karmaşık sistemler ve kontrol algoritmaları ile tasarım gerçekleştirilmektedir [50], [51].

5.2.1 Kapasitör Tabanlı Aktif Dengeleme

Kapasitör tabanlı aktif dengeleme sisteminde, genellikle hücrelere paralel olarak bağlanan enerji depolama elemanları olarak kapasitörler kullanır [52]. Anahtarlama elemanları kullanılarak oluşturulan dengeleme sistemi, daha az kapasitör ve basit kontrol algoritmaları ile geliştirilen ilk yöntemdir, ancak özellikle birkaç hücre seri olarak bağlandığında dengeleme süresi oldukça uzamaktadır [53]. Dengeleme hızını artırmak için, çift katmanlı devre yapısı, zincir yapısı, paralel yapı, delta yapısı, ağ yapısı gibi herhangi bir konumdaki hücreler arasında yük aktarımı için daha fazla olanak sağlamak için anahtarlamalı kapasitör dengeleme yapısına ek olarak verim arttıracak sistemler eklenmiştir. Oluşturulan bu sistemlere ek olarak, ekstra kapasitörler kullanılarak modüler sistemlerde tasarlanmıştır. Bunlar; modüler anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme ve modüler çift katmanlı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme olarak ikiye ayrılır. Bu sistemlere ek olarak tek kapasitör ile dengeleme sistemi de geliştirilmiştir. Ancak, tek kapasitör ile dengeleme sisteminde en yüksek SOC ye sahip hücreler ile en düşük SOC ye sahip hücreler doğrudan dengelenirken çok karmaşık kontrol algoritmaları gerekmektedir.

5.2.1.1 Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme

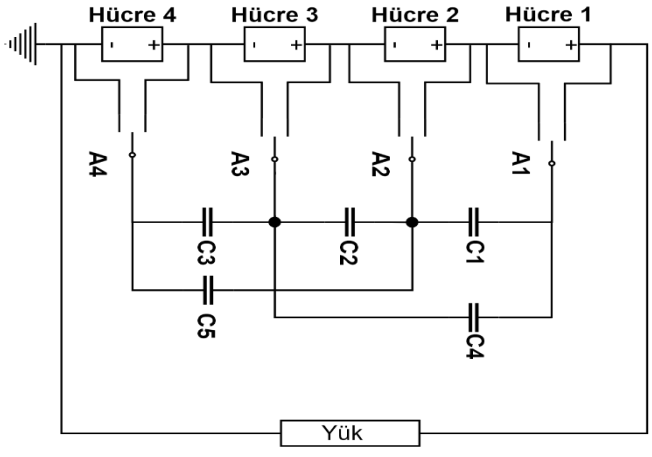
Anahtarlama elemanları kullanılarak kapasitör ile dengeleme devresi Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Dengeleme süreci başladığında, tüm anahtarlara aynı PWM sinyalleri verilir ve tüm anahtarlar aynı çalışma frekansında açılır ve kapanır [54]. Sistemde bulunan kapasitörler bitişik hücrelerin terminallerinden enerji akışını sağlayacak şekilde bağlanır. Anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme yöntemi, hücre şarj durum bilgisine ihtiyaç duymayan çok kolay kontrol yöntemlerine sahiptir. Bu yöntemde dengeleme süresi oldukça uzundur ve bunun başlıca iki nedeni vardır. Bunlardan ilki, hücre dengelemesi bittikten sonra, birbirine yakın hücreler arasındaki gerilim farkı çok küçük seviyededir. Bu küçük gerilim farkı, şarj ve yük transferi için yeterince büyük değildir. Bir diğer neden olarak da bir dengeleme döngüsünde enerji yalnızca iki bitişik hücre arasında iletilebilir. Enerjinin birbirinden uzak olan hücreler arasında aktarımının yapılabilmesi için birden fazla dengeleme döngüsüne ihtiyaç duyulmaktadır [55]



Şekil 5.3 Anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi

5.2.1.2 Çift Kısımlı Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme

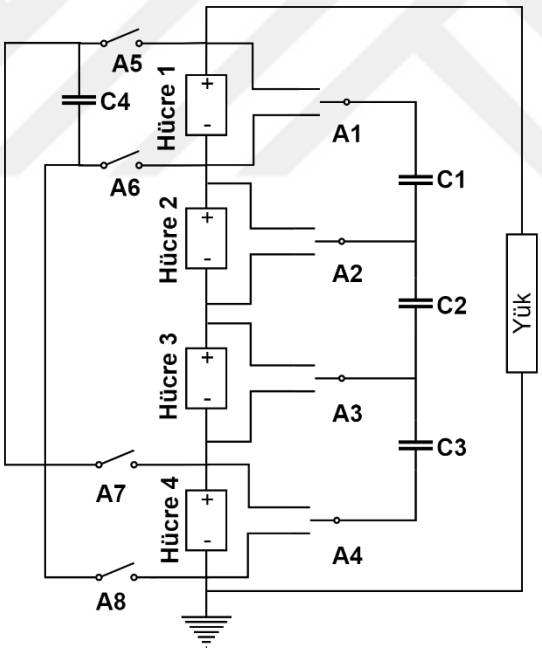
Çift katmanlı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme yöntemi, ikili kapasitörlü bir yapıya sahiptir [56]. Şekil 5.4'de C1, C2 ve C3 kondansatörleri ilk kısmı oluştururken, C4 ve C5 kondansatörleri ikinci kısmı oluşturmaktadır. Tüm anahtarlama elemanlarına aynı anda PWM sinyalleri verilir. Hücre 1 ve hücre 3 arasında herhangi bir şarj farklılığı olduğunda, enerji C1 ve C2 olmaksızın doğrudan C4 üzerinden gönderilir. Yük aktarmak için oluşturulan bu kısa yollar, yalnızca dengeleme hızında bir artış sağlamaz, aynı zamanda daha az enerji dönüşümü yapılacağı için dengeleme verimliliği daha yüksek seviyelere ulaşır. Dezavantaj olarak daha fazla depolama elmanı kullanılacağı için devre maliyetleri artar ve kullanılan kapasitörlere bağlı olarak pil boyutları artar [57]. Şekil 5.4'de çift katmanlı anahtarlamalı kondansatör ile dengeleme devresi verilmiştir.



Şekil 5.4 Çift kısıma sahip anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi

5.2.1.3 Zincir Modele Sahip Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme

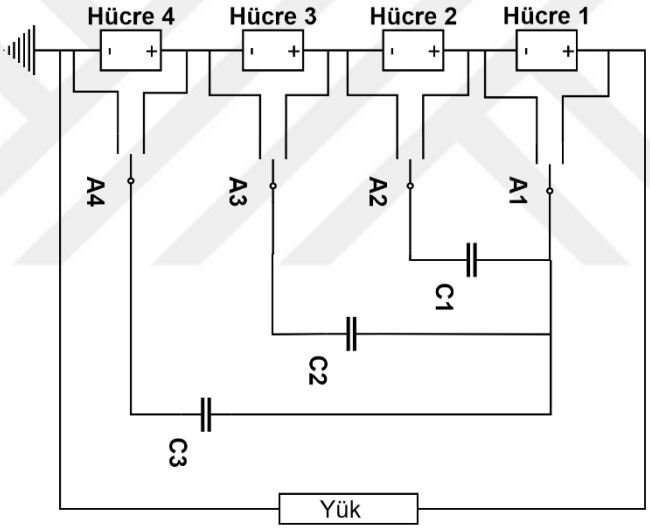
Anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme çalışmasında, birinci hücre ve sonuncu hücre dengelenme ihtiyacı duyuyorsa, yüklerin her kapasitörden teker teker geçmesi gerekiyor. Bu işlemi daha hızlı yapmak için, zincir yapıdaki anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme yöntemi geliştirilmiştir, hücreleri iki uçta doğrudan bağlayan ek bir kapasitöre sahiptir. Dengelemeye ihtiyaç duyulduğunda ilk olarak A1-A4 yukarı yönde kapatılır, A7 ve A8 kapatılır ve A5 ve A6 açılır. İkinci olarak, A1-A4 aşağı yönde kapatılır, A7 ve A8 açılır ve A5 ve A6 kapatılır. Hücre 1 ve Hücre 4, C4 kondansatörü aracılığı ile dengeye getirilir. Yan yana bulunan hücreler de C1, C2 ve C3 ile dengeye getirilir. Dengeye ulaşmış iki hücre arasındaki mesafe azalarak yarıya düşer. Ancak, bu dengeleme sistemi henüz iki hücreyi herhangi bir konumda dengeleyemez, bu da artan seri bağlı hücre sayısı ile dengeleme hızının ve dengeleme verimliliğinin düşeceği anlamına gelir [58]. Şekil 5.5'de zincir yapılı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi verilmiştir.



Şekil 5.5 Zincir yapılı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi

5.2.1.4 Paralel Yapılı Anahtarlamalı Kondansatör ile Dengeleme

Paralel yapılı anahtarlamalı kondansatör ile dengeleme yöntemi, herhangi bir pozisyonda bulunan iki hücreyi dengeleme yeteneğine sahiptir. Şekil 5.6'daki görselden de görüleceği üzere, ilk hücre ve diğerleri arasına bağlı kapasitörler bulunur. Dengeleme yöntemi anahtarlamalı kapasitör yöntemi ile aynı stratejiyi izler. Bu devre kullanılarak sistemde bulunan hücrelerden rastgele seçilen iki tanesi kapasitörler aracılığı ile birbirine enerji aktarımı yapabilir. Sistemdeki dengeleme süresi bu strateji ile hızlandırılır. Fakat sistemdeki birinci hücre diğer hücreler ile bir adet kapasitör kullanılarak dengeye getirilebilir. Sistemde bulunan başka hücreler, eşdeğer direncin yükselmesine sebep olacak ve daha fazla enerji kaybına neden olacak olan seri bağlı iki kapasitör ile dengelenmek zorundadır [59]. Şekil 5.6'da paralel yapılı anahtarlamalı kondansatör ile dengeleme devresi verilmiştir.

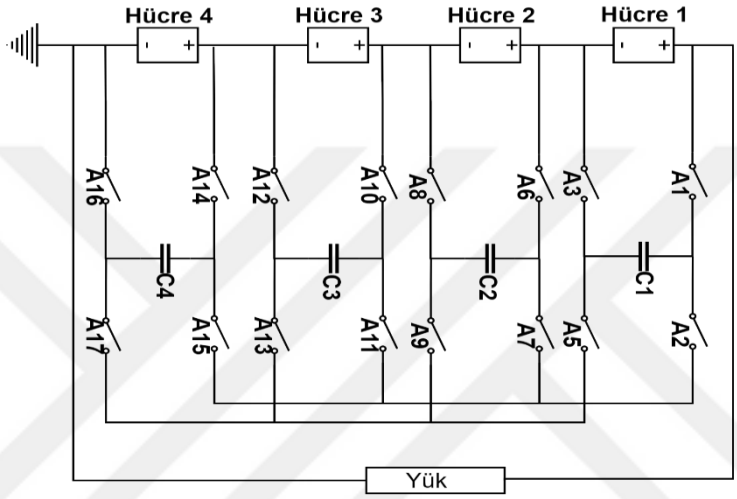


Şekil 5.6 Paralel yapılı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi

5.2.1.5 Seri-Paralel Yapılı Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme

Seri-paralel yapılı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme yönteminde, hücreleri şarj etmek veya boşaltmak için tüm hücrelerin ortalama gerilimi kullanılır. Dengeleme işlemi sırasında her hücre için yapılan işlem birinci hücre ve kapasitör için anlatılmıştır. Öncelikle A1 ve A3 kapatılırken, A2 ve A5 açılır. Hücreler tek tek bir adet kapasitöre paralel bağlanarak aynı voltaj düzeyine gelene kadar devam eder. İkincisi, A1 ve A3 açılırken A2 ve A5 kapatılır. Tüm kapasitörler paralel bağlı konuma geçmiş olur, bu da

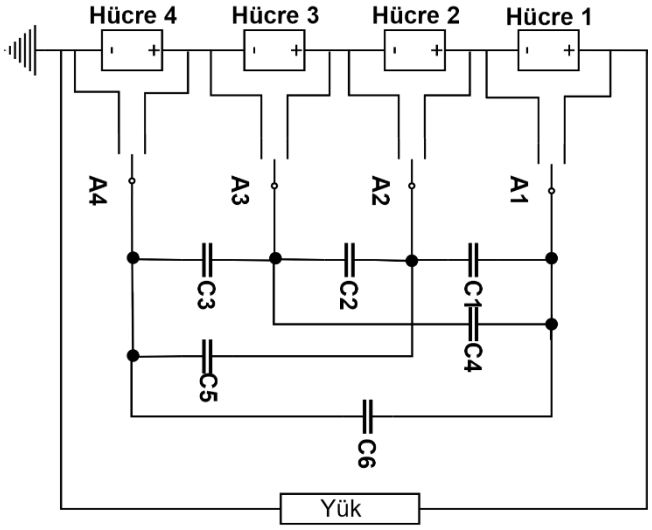
aynı gerilimi paylaşana kadar birbirleriyle enerji alışverişi yaparak dengelenmelerini sağlar. Sistemde bulunan hücrelerden gerilimi düşük olanlar var ise, bu hücreler kapasitörlere paralel bağlanarak şarj edilmeleri sağlanır. Eğer sistemde gerilimi yüksek olan hücreler var ise, bunlar da kapasitörleri şarj ederek dengeye ulaşacaklardır. Bu yöntem, hücrelerin konumlarına bağlı olarak bir sınırlama getirmez iken, kullanılan anahtarların fazla olması sistemin fazla maliyete ve anahtarlama kayıplarının fazla olmasına sebep olmaktadır [60]. Şekil 5.7'de seri-paralel yapılı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi verilmiştir.



Şekil 5.7 Seri-Paralel yapılı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi

5.2.1.6 Delta Yapılı Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme

Delta yapılı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme yönteminde, şekilde gösterildiği gibi, herhangi iki hücreyi bir kapasitöre bağlayarak bu iki hücreyi herhangi bir konumda doğrudan dengeleme yöntemi geliştirilmiştir. Bu strateji, yeterli dengeleme hızına ve sistem verimine sahiptir. Ancak gerekli kapasitör sayısı hücre sayısı ile doğru orantılı artar. Seri olarak daha fazla hücre bağlanırsa kapasitör sayısı çok hızlı artar ve bu da yüksek maliyetlere neden olur. Ek olarak, dengeleme devresinde daha fazla kapasite elemanı kullanılacağından, depolanan enerjinin boyutu da artar ve bu da pil boyutlarında artışa neden olur [61]. Şekil 5.8'de delta yapılı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi verilmiştir.

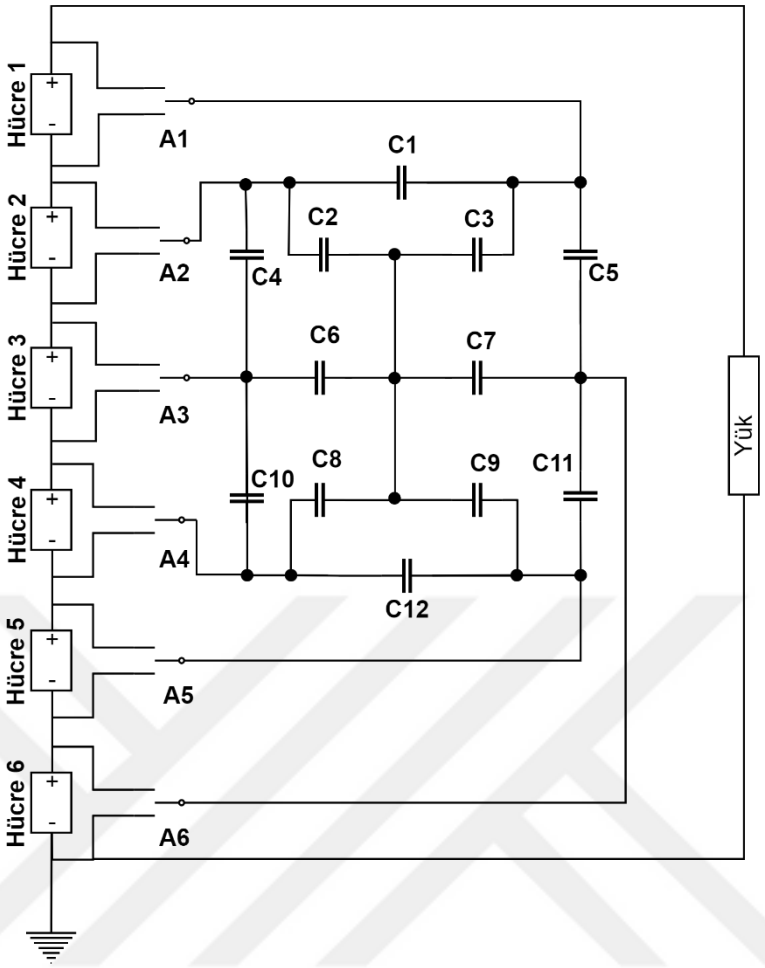


Şekil 5.8 Delta yapılı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi

5.2.1.7 Ağ Yapılı Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme

Ağ yapılı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi Şekil 5.9'da gösterilmektedir. Dengeleme işlemi sırasında tüm anahtarlara aynı PWM sinyalleri verilerek anahtarların aynı anda açılıp kapanması sağlanır. Yan yana olan hücreler ve birbirinden uzak olan hücrelerin dengelenmesi için gerekli devre bağlantıları vardır. Tasarımı yapılan sisteme bakıldığında bağlantıların bir kısmında iki hücre arasında sadece bir kapasitör bulunurken, diğer kısmında iki adet kapasitör bulunur. Sistemde kullanılan toplam kapasitör sayısına bakıldığında hücre sayısının iki katı kadar kapasitör kullanılmaktadır.

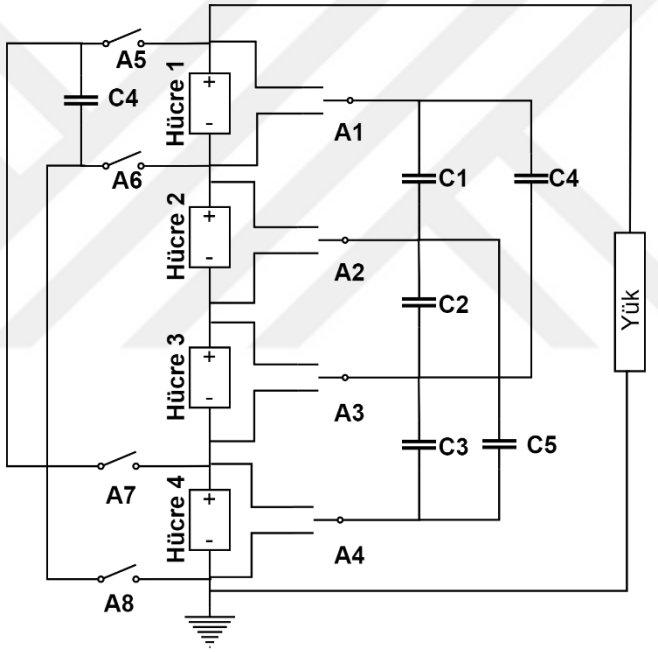
Ağ yapılı dengeleme devresi, paralel yapı ve delta yapılı dengeleme devrelerinden bazı yönleriyle daha iyi bir yapıdır. Paralel yapılı sisteme göre kayıplar daha az düzeyde olmaktadır. Delta yapıya göre ise kullanılan kapasitörlerin saysın da azalma görülür. Ağ yapılı devre daha az kapasitör kullanır. Ancak bu dengeleme yöntemi, büyük pil boyutlarına ihtiyaç duyar ve oldukça karmaşık bir dengeleme devresine sahiptir [62].



Şekil 5.9 Ağ yapılı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi

5.2.1.8 Zincir Yapılı Çift Katmanlı Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme

Zincir yapılı çift katmanlı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme yönteminde, zincir yapılı kapasitör ile dengeleme ve çift katmanlı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme yöntemlerinin birleşiminden ortaya çıkarılmış yeni bir dengeleme devresi modelidir. İki yönteminde özelliklerinden faydalanır ve sistemin iyileştirilmesine katkı sağlanır. Bundan dolayı dengeleme hızı ve sistemin verimliliği her iki yöntemden daha iyidir. Dengeleme sürecindeki çalışma prensibi zincir yapılı sistem ile aynıdır. Sistemde kullanılan yöntemlerin her ikisi de eleman sayısını arttıracağı için sistem maliyetleri yüksek boyutlara çıkabiliyor ve batarya boyutlarında da artış gözlenebilir [63]. Şekil 5.10'da zincir yapılı çift katmanlı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi verilmiştir.

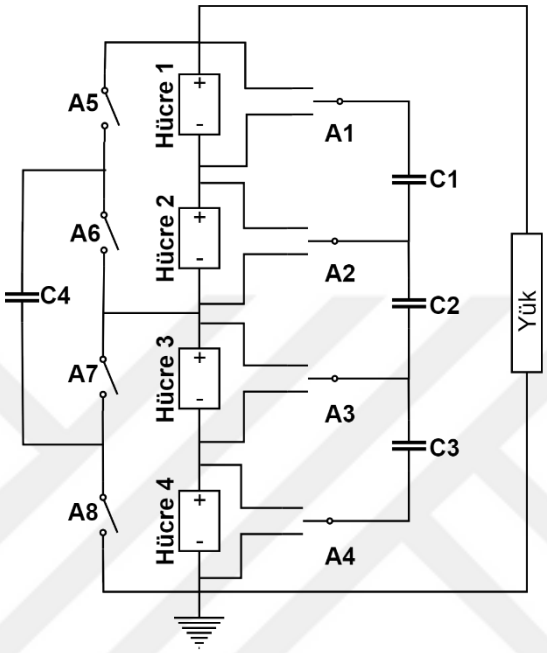


Şekil 5.10 Zincir yapılı çift katmanlı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi

5.2.1.9 Modüler Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme

Modüler anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme yöntemi, dengeleme performansını iyileştirmek için geliştirilen başka bir yöntemdir. Dengeleme işlemi sırasında öncelikle A1-A4 yukarı yönde kapatılır, A6 ve A8 açılır, A5 ve A7 kapatılır. İkinci olarak, A1-A4 aşağı yönde kapatılır, A6 ve A8 kapatılır, A5 ve A7 açılır. Anahtarlamalı kapasitör dengelemesinde yapılan dengeleme işlemi gerçekleştirilir. Hücre 1 ve hücre 2, ilk anahtarlama işleminde bir grup olarak birliktedir ve aynı şekilde hücre 3 ve hücre 4'te ikinci anahtarlama işleminde bir grup olur. İki grupta anahtarlama işlemleri sırasında C4

kapasitörü aracılığıyla dengelenebilir. Dengeleme hızı ve dengeleme verimliliği modülerleştirilmiş bu yapı ile daha da iyileştirilir. Dahası, bu yapı bataryadaki pillerin modülerleştirme tasarımında yardımcı olur, özellikle çok sayıda hücrenin seri olarak bağlanması gereken durumlarda faydası görülür [64], [65]. Şekil 5.11'de modüler anahtarlamalı kondansatör ile dengeleme devresi verilmiştir.

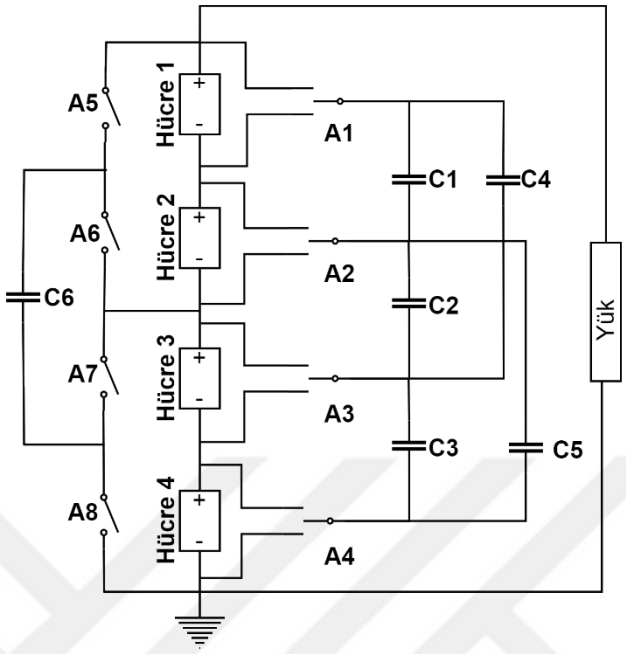


Şekil 5.11 Modüler anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi

5.2.1.10 Modüler Çift Katmanlı Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme

Modüler çift katmanlı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme yöntemi, modülerleştirme tasarımının çift katmanlı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme yapısına uygulanmasıdır. Şekil 5.12'de görüldüğü üzere C1, C2, C3 kapasitörleri ilk kısmın oluşmasına katkı sağlarken, C4, C5 kapasitörleri ikinci kısmın oluşmasına katkı sağlamaktadır. C6 kapasitörü, modüler sistemdeki hücre gruplarında olduğu gibi bu sistemde de aynı şekilde hücre 1 ve hücre 2 ilk grubu, hücre 3 hücre 4 ise ikinci grubu dengelemek için kullanılır. Dengeleme işlemleri, modüler anahtarlamalı kapasitör dengeleme ile aynıdır, sistem daha fazla kapasitöre ihtiyaç duyduğu için maliyet artışı gözlenir. Ancak daha fazla kapasitör

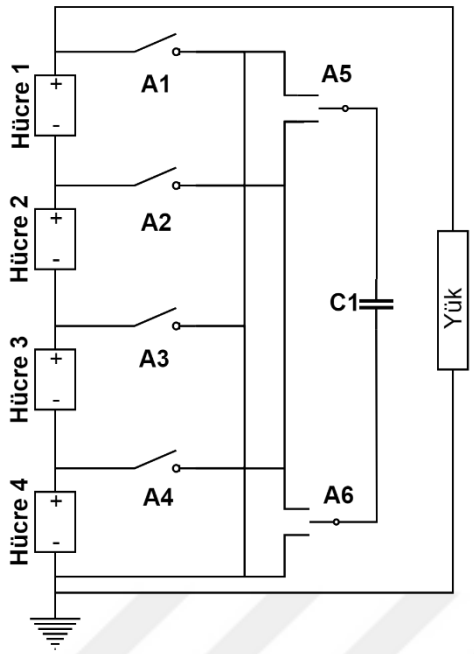
ve daha fazla dengeleme yolu nedeniyle dengeleme hızı ve verimliliği daha da geliştirilmiş olur [65].



Şekil 5.12 Modüler çift katmanlı anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi

5.2.1.11 Tek Anahtarlamalı Kapasitör ile Dengeleme

Tek anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme yöntemi, geliştirilen kontrol algoritmalarının sisteme uyarlanması daha kolaydır ve tek kapasitör olması algoritma geliştirirken büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Bu sistemde hücre şarj durumları hesaplanarak sistem üzerinden izlenir. Tüm hücreler arasındaki maksimum şarj durumu farkı belirlenen eşik değerinden büyükse, dengeleme işlemi başlatılır. Sistemde bulunan en yüksek ve en düşük şarj durumuna sahip hücreler seçilerek, seçilen hücreler ile kapasitörü birbirine bağlamak için ilgili anahtarlara kapatma sinyalleri gönderilir. Daha sonra A5 ve A6 anahtarları belirli bir frekansta yukarı ve aşağı yönde açılıp kapanır. En yüksek şarj durumuna sahip hücreden gelen fazla enerji en düşük şarj durumuna sahip hücreye transfer edilir. Sistemin dengeleme süreci, tüm hücreler belirlenen eşik şarj durumu değerinden daha küçük bir şarj durumu farkına sahip olduğu anda tamamlanır. Sistemin dengeleme hızı iki hücre üzerinden ilerleyeceği için yüksek şarj durumu farkına sahip iki hücre için hızlı olacaktır. Ancak, bir dengeleme döngüsü sırasında yalnızca iki hücre dengelenebileceğinden, tüm hücreler arasında bir şarj durumu farkı varsa, dengeleme süresi hücre sayısına ve dengesiz hücre durumlarına göre çok daha fazla olabilmektedir [66]. Şekil 5.13'de tek anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi verilmiştir.



Şekil 5.13 Tek anahtarlamalı kapasitör ile dengeleme devresi

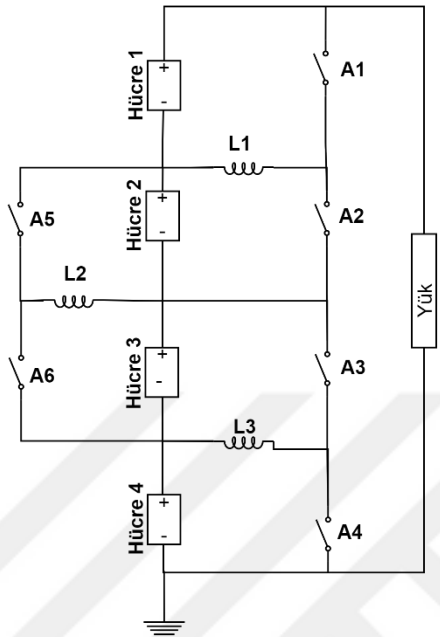
5.2.2 İndüktör Tabanlı Aktif Dengeleme

İndüktör tabanlı dengeleme yöntemi, indüktörden geçen akımın manyetik alan olarak depolanıp ve bu enerjinin kontrollü bir şekilde transfer edilmesine dayanıyor. Oluşturulan farklı indüktör ve anahtar kombinasyonu ile farklı tiplerde dengeleme devreleri oluşturulmuştur. Bunlar; çoklu indüktör yapısı ile dengeleme, zincir yapılı indüktör ile dengeleme, çok katmanlı indüktör modeli ile dengeleme ve tek yapılı indüktör modeli ile dengeleme yöntemleridir [67], [68].

5.2.2.1 Çoklu İndüktör ile Dengeleme

Çoklu indüktör dengeleme yapısı birden fazla çift hücreli yapıyı eşzamanlı olarak dengeleyebilir. İki hücre arasında yüksek SOC değerine sahip bir hücreden dolayı dengeleme ihtiyacı duyulduğunda, hücre 1 ve hücre 2 dikkate alınırsa hücre 1'in SOC değerinin yüksek olduğu düşünüldüğünde A2 anahtarı açıkken önce A1 anahtarı açılır ve akım L1 indüktörünü fazla SOC değeri ile şarj etmeye başlar. L1 indüktörünün akımı üst sınıra ulaştıktan sonra A1 anahtarı açılır ve A2 anahtarı kapatılır ve L1 indüktörü 2. hücreyi şarj etmek için enerji transferi gerçekleştirir. Bu çalışma sistemi aynı şekilde, L2 ve L3 indüktörlerinin sırasıyla hücre 2 ve hücre 3 grubunu ve hücre 3 ile hücre 4 gurubunu dengelemek için kullanılır. Çoklu indüktör yönteminde bitişik hücreler çok iyi bir şekilde ve uygun dengeleme hızlarında dengelenirken, birbirine uzak hücrelerin dengelenmesinde enerjinin her hücre üzerinden akarak uzak mesafedeki hücrelere

ulaşması, enerji dönüşümünün fazla olmasına ve dolayısıyla enerji kayıplarının fazla olmasına sebep olurken aynı zamanda dengeleme hızının süresini arttırmaktadır [69]. Şekil 5.14'de çoklu indüktör ile dengeleme devresi verilmiştir.

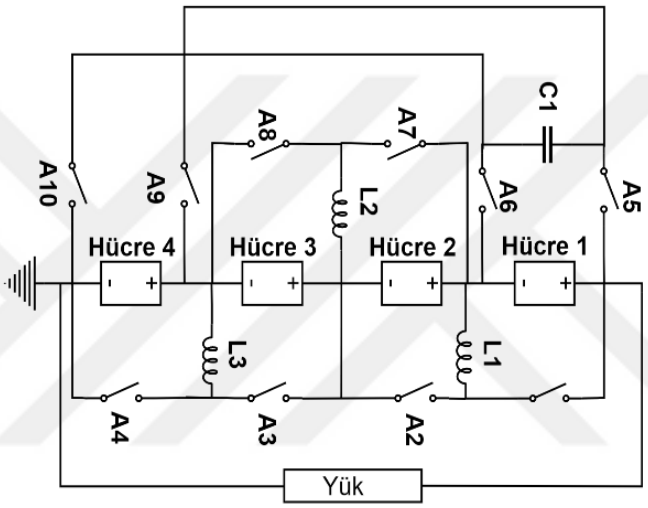


Şekil 5.14 Çoklu indüktör ile dengeleme devresi

5.2.2.2 Zincir Yapılı Çoklu İndüktör ile Dengeleme

Zincir yapılı çoklu indüktör ile dengeleme sistemi şekilde görüldüğü gibi çoklu indüktör yapısına bir kondansatör eklenmesiyle oluşturulmuştur. C1 kondansatörü, uzak mesafelerde bulunan hücrelerin birbiri arasında enerji transferini kolaylaştırmayı sağlamaktadır. Eklenen kondansatör sayesinde dengeleme hızında ciddi iyileşmeler gözlenir. Dengeleme işlemi sırasında, anahtarların açılması ve kapanması durumları çoklu indüktör yapısındaki mantık ile aynıdır. Bitişik hücreler enerji transferini indüktörler aracılığı ile kolayca gerçekleştirirler.

Bu işlem gerçekleştiği sırada A9 ve A10 anahtarı ilk olarak kapatılır, A5 ve A6 anahtarı ise açılır. C4 kondansatörü bu işlemden sonra paralel bağlanmış olan hücre 4 üzerinden şarj olur. İkinci olarak ise A9 ve A10 anahtarları açılır, A5 ve A6 anahtarları kapatılır; bu işlemden sonra C4 kondansatörüne paralel bağlanan hücre 1 voltajının düşük olması durumunda şarj edilmiş olur. Bu dengeleme sistemi ile uzak mesafedeki hücrelerin kısa bir yol ile dengelenmesi sağlanır ve dengeleme hızında artış gözlenir, ancak devre boyutları ve pil boyutları artan depolama elemanlarından dolayı artış gösterir [70]. Şekil 5.15'te zincir yapılı çoklu indüktör ile dengeleme devresi verilmiştir.

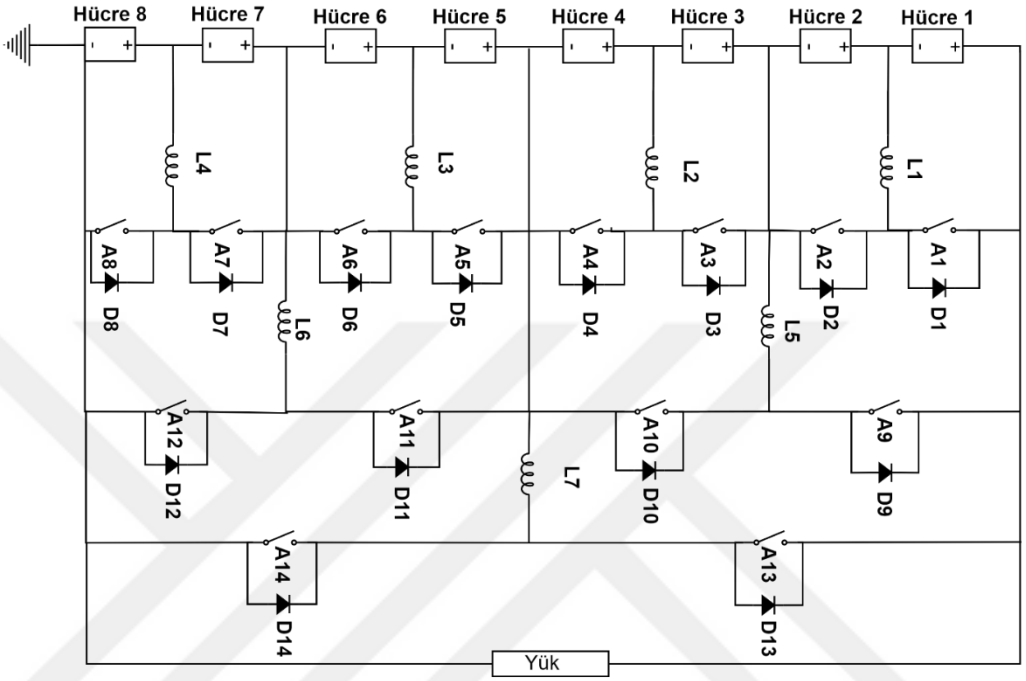


Şekil 5.15 Zincir yapılı çoklu indüktör ile dengeleme devresi

5.2.2.3 Çok Katmanlı İndüktör Yapısı ile Dengeleme

Çok katmanlı indüktör yapısı ile dengeleme yönteminde, uzak noktalarda bulunan hücreler arasında yük alışverişini sağlamak için daha fazla imkân sağlar. Dengeleme işlemi sırasında önce A1-A13 kapatılır, A2-A11 açılır. L1-L7 indüktörleri sistemde bulunan hücre 1, hücre 3, hücre 5 ve hücre 7 aracılığı ile enerji transferi yapılarak doldurulur. Daha sonra A1-A13 açılır ve A2-A11 açık tutulur. L1-L4 indüktörlerinde depolanan enerji, D2-D8 diyotları vasıtasıyla hücre 2, hücre 4, hücre 6, hücre 8'e transfer edilir. L5 ve L6 indüktörlerinde depolanan enerji, D10 ve D12 diyotları vasıtasıyla hücre 3 ve hücre 4, hücre 7 ve hücre 8'e transfer edilir. L7 indüktöründe depolanan enerji, D14 diyotu vasıtasıyla hücre 5, hücre 6, hücre 7 ve hücre 8'e transfer edilir. Sistem içerisinde enerji aktarımını sağlayan ve dengeleme hızını arttıran yaklaşık olarak yedi adet yol

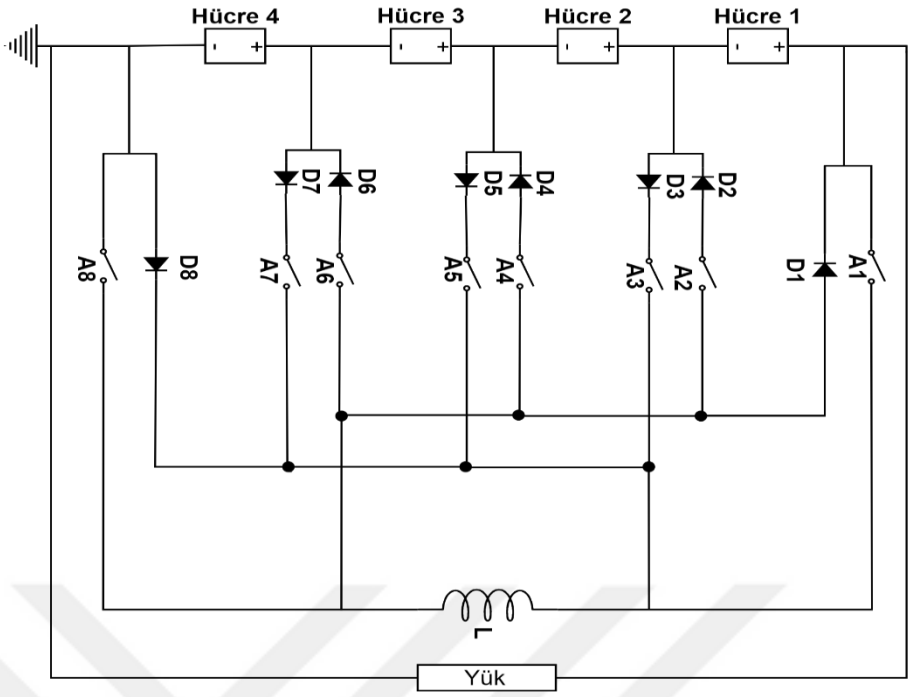
bulunur. Ancak hücre sayısının artışı ile indüktör sayısında da ciddi bir artış gözlenirken pil boyutları da artar [71]. Şekil 5.16'da çok katmanlı indüktör ile dengeleme devresi verilmiştir.



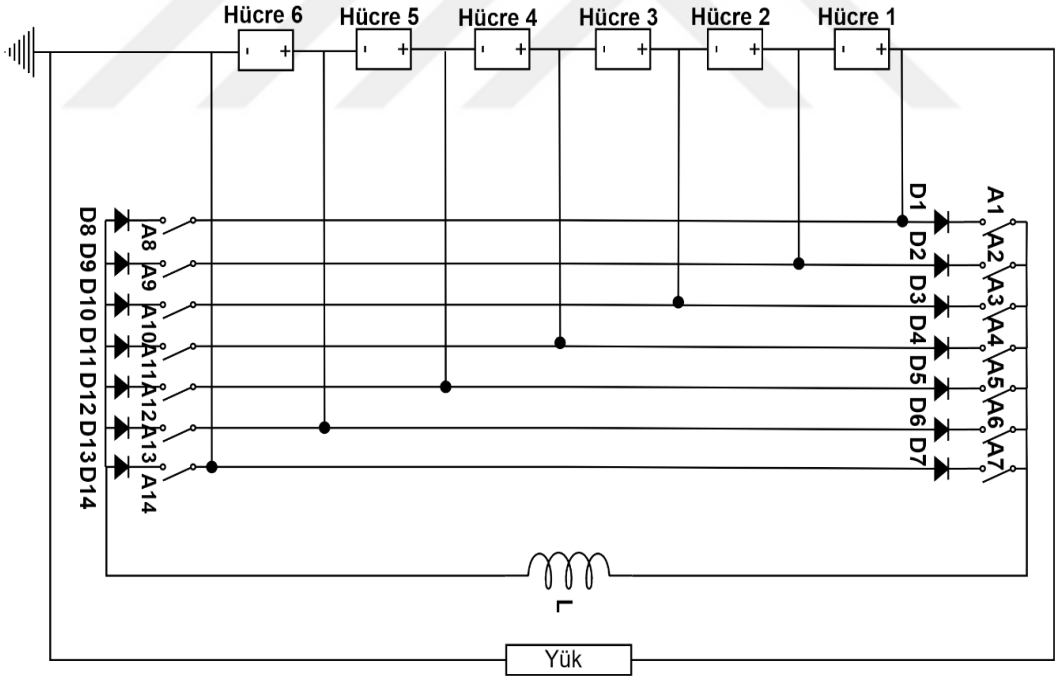
Şekil 5.16 Çok katmanlı indüktör ile dengeleme devresi

5.2.2.4 Tek İndüktör Yapısı ile Dengeleme

Tek indüktör yapısı ile dengeleme yöntemi anahtarlama elemanları kullanılarak hayata geçirilen kontrol algoritmalarının tek bir enerji depolama elemanı vasıtasıyla hücre dengeleme mantığına dayanır. Enerji aktarma doğrultusuna göre iki tür sistem geliştirilmiştir. İlk sistem tek kapasitörlü dengeleme devresinin çalışma tekniği ile aynı teknikte çalışır. Bu çalışma mantığı enerjinin en yüksek SOC değerine sahip hücreden en düşük SOC değerine sahip hücreye aktarılması mantığına dayanır. Şekilden de görüleceği üzere hücre 1 ve hücre 2 ele alındığında, hücre 1'in maksimum SOC ve hücre 2'nin minimum SOC değerine sahip olduğu düşünülürse, ilk olarak A1 ve A2 anahtarları kapatılır ve L indüktörü hücre 1 aracılığı ile şarj edilir, indüktörden geçen akım üst sınır değerine ulaşıncaya kadar artmayı sürdürür. Belirli bir süre sonra A1 anahtarı açılır ve A5 anahtarı kapatılır, bu sayede indüktör üzerinde depoladığı enerjiyi hücre 2' ye aktarmasını sağlar. İkinci sistemde ise düşük SOC değerine sahip hücrenin şarj edilmesi için tüm sistem kullanılır. En düşük SOC değerine sahip hücrenin hücre 6 olduğu düşünülürse ve sistem dengeleme ihtiyacı duyduğunda A7 ve A13 anahtarları dengeleme süreci boyunca kapalı tutulur. A1 ve A14 anahtarları kapatıldığında indüktör batarya paketi tarafından şarj edilir. Enerji depolanan indüktör, A1 ve A14 anahtarlarının açılması ile, indüktör enerjisini hücre 6'yı şarj etmek için kullanacaktır. Sistemde bulunan diyotlar ters akımı önlemek için ve olası kısa devre durumlarının önüne geçmek için kullanılmıştır. Gösterilen iki yöntemde hücreleri seçerek dengeler ancak bunun için karmaşık kontrol algoritmaları gerekir. Sistem çalışmaya başladığında dengeleme döngü sayısının dengelediği hücre sayısına oranı düşük olduğu için dengeleme süreleri uzayabilmektedir ancak yine de orta seviyede bir dengeleme hızına sahiptir [72], [73]. Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de tek indüktör ile dengeleme devresi ve verilmiştir.



Şekil 5.17 Tek indüktör ile dengeleme devresi



Şekil 5.18 Tek indüktör ile dengeleme devresi

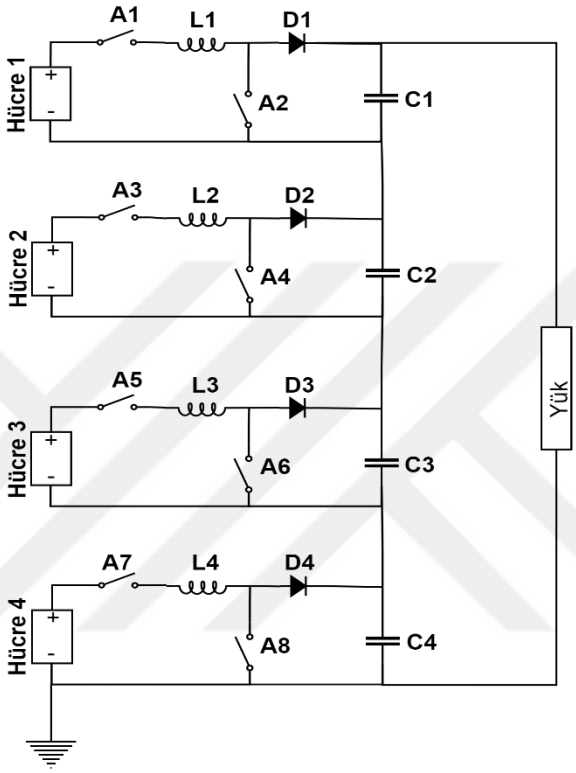
5.2.3 Dönüştürücü Tabanlı Aktif Dengeleme Sistemleri

Bu bölümde aktif dengeleme yöntemlerinin dönüştürücüler aracılığı ile nasıl gerçekleştirildiğini ve hangi tür dönüştürücü yapılarının aktif dengeleme sistemlerinde kullanıldığı anlatılacaktır. Kısaca ele alınacak olan dönüştürücü tabanlı aktif dengeleme yöntemleri; yükseltici tip dönüştürücü ile dengeleme, yükseltici-alçaltıcı dönüştürücü ile dengeleme, tek dönüştürücü ile dengeleme, cuk dönüştürücü ile dengeleme, quasi rezonant dönüştürücü ile dengeleme, tekli geri dönüşlü dönüştürücü ile dengeleme, çoklu geri dönüşlü dönüştürücü ile dengeleme, çoklu sargıya sahip geri dönüşlü dönüştürücü ile dengeleme olarak ayrılmaktadır. Dönüştürücü tabanlı aktif dengeleme, dengeleme işlemlerini kontrol etmek için çok geniş bir yelpazeye sahip olmakla beraber dengeleme hızında ciddi iyileştirmeleri de beraberinde getirmektedir, ancak maliyet söz konusu olduğunda, özellikle çok hücreli batarya paketlerinde ciddi maliyetler ortaya çıkabilir [74], [75].

5.2.3.1 Yükseltici Dönüştürücü ile Dengeleme

Yükseltici dönüştürücü ile dengeleme sisteminde her hücre bir yükseltici tip dönüştürücüye bağlanır. Dönüştürücü ve bağlandığı hücre ayrı bir birim gibi davranarak çıkış gücünü sağlamaya çalışır. Hücreler seri bağlı olduğu için dönüştürücü akımları eşittir. Ancak çıkış gerilimleri farklılıklar gösterir, çıkış gerilimlerindeki bu farklılıklar hücrelerdeki gerilim farklılıklarından ve dönüştürücülerin gerilim çevirme oranlarından kaynaklanır. Neticede her hücre farklı bir çıkış gücüne sahip olur. Her bir dönüştürücüye ait gerilim dönüştürme oranları kontrol edildiğinde hücre gerilimleri de kontrol edilmiş olur dolayısıyla hücre SOC değerleri de gerilime bağlı olarak kontrol altına alınmış olur. Kontrol edilmesi gereken gerilimler anahtarlama elemanlarının PWM sinyalleri ile tetiklenmesi vasıtasıyla SOC değerleri kontrol edilir. Hücrelerde bulunan SOC'ler arasında belirli bir eşik değerden fazla fark varsa dengeleme sistemi devreye girer ve PWM sinyalleri anahtarlama elemanlarını tetikler, SOC eşik değerinden küçük farklar olduğunda ise dengelemeye ihtiyaç duyulmaz, çünkü çok küçük enerji kayıplarında sistemi gereksiz yere çalıştırmak ve enerji dönüşümünü yapmak daha fazla kayıplara yol açabilir. Tüm hücreler dengeye ulaştığında, batarya dengeleme işleminden çıkarak normal durumuna geçer. Dönüştürücüleri ve hücreleri birbirinden ayıran anahtarlar (A1, A2, A3, A4), hatalı durumların önüne geçmek için eklenmiştir. Eğer herhangi bir hücre bozulduysa bypass etmek için bozuk olan hücrenin anahtarı açılarak şarj ve deşarj akımlarının o hücreden geçişi engellenir. Bu durumlarda kontrol algoritmalarında

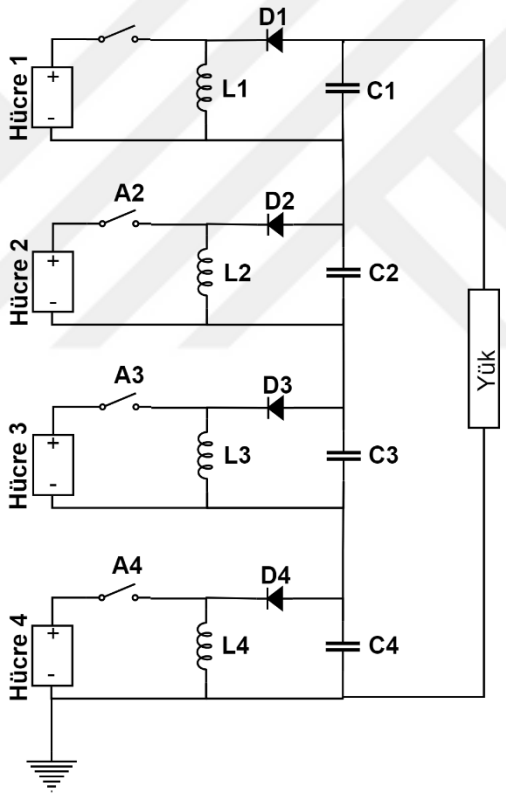
kullanılan fonksiyonların bataryanın çıkış voltajını verecek şekilde diğer dönüştürücülerin gerilim dönüştürme oranlarının arttırılması dikkate alınmalıdır. Bu husus batarya paketinin içerisinde bulunan hücrelerden birkaçının bozulması durumunda bile bataryanın sisteme kesintisiz bir şekilde güç sağlamasına ve ömrünün artmasını sağlayacaktır [76]. Şekil 5.19'da yükseltici dönüştürücü ile dengeleme devresi verilmiştir.



Şekil 5.19 Yükseltici dönüştürücü ile dengeleme devresi

5.2.3.2 Alçaltıcı-Yükseltici Dönüştürücü ile Dengeleme

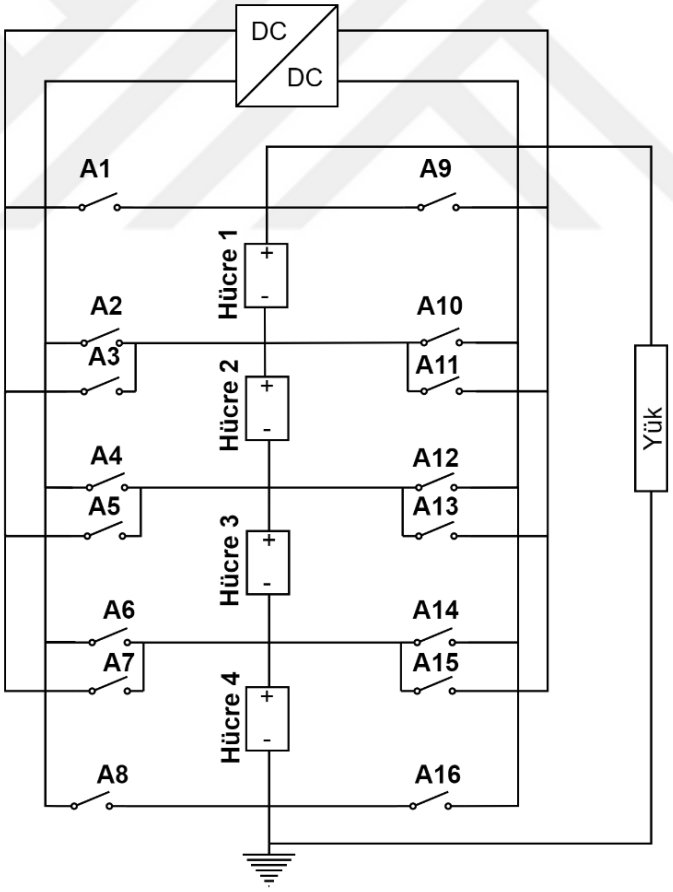
Alçaltıcı-yükseltici dönüştürücü ile dengeleme sistemi yükseltici tip dönüştürücü ile yapılan sisteme benzer bir mantık ile çalışmaktadır. Her hücre bir adet alçaltıcı-yükseltici dönüştürücü ile bağlanarak yükseltici dönüştürücü sisteminde olduğu gibi hücre bazlı dengeleme uygulanır. Aynı şekilde PWM sinyalleri de hücrelerin gerilimlerine bağlı olarak dönüşüm yapan alçaltıcı-yükseltici dönüştürücülerin gerilim dönüştürme oranına bağlı olarak verilir. Yükseltici dönüştürücüden farklı olarak gerilim dönüştürme oranının 1'den büyük ve 1'den küçük olması kontrol algoritmalarının geniş yelpazede kullanılmasına olanak sağlamaktadır [77], [78]. Şekil 5.20'de alçaltıcı-yükseltici dönüştürücü ile dengeleme devresi verilmiştir.



Şekil 5.20 Alçaltıcı-Yükseltici dönüştürücü ile dengeleme devresi

5.2.3.3 Tek Dönüştürücü ile Dengeleme

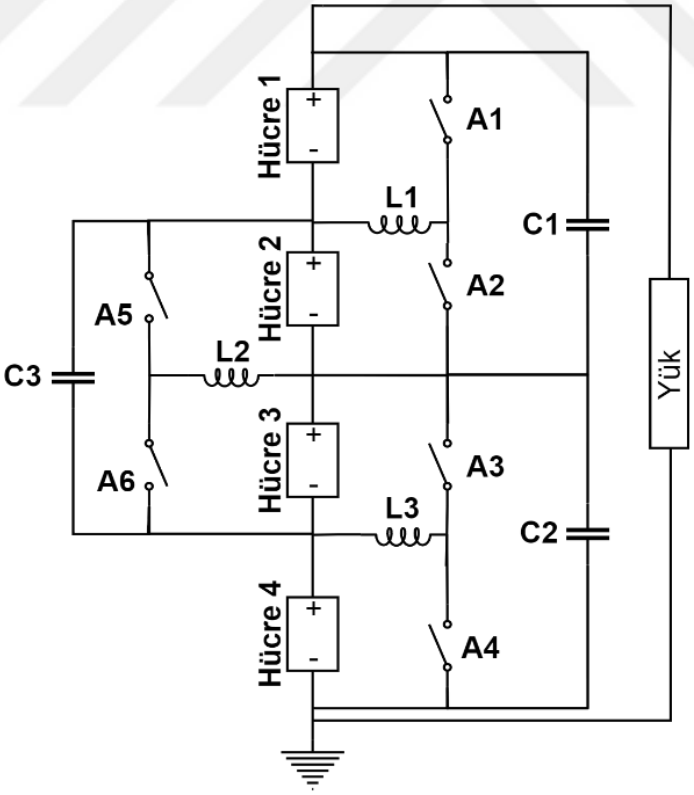
Tek dönüştürücü yapısı ile dengeleme sisteminde bir DC/DC dönüştürücü ve her hücreye bağlı hücre sayısının dört katı kadar anahtar bulunmaktadır. Sistemde dengeleme başladığında en yüksek ve en düşük SOC değerlerine sahip hücreler belirlenerek DC/DC dönüştürücünün giriş ve çıkışları olmak üzere ayarlanırlar. Yüksek SOC' ye sahip hücre, dönüştürücü aracılığı ile düşük SOC' ye sahip hücreye enerji aktarımını gerçekleştirir. Sistemin verimi dönüştürücü verimine bağlı olarak belirlenir. Aynı zamanda enerji transferi her döngüde yalnızca iki hücre arasında gerçekleşeceği için, bütün bir sistemde farklı SOC değerlerine sahip olan hücreler topluluğunun olması dengeleme süresini uzatacaktır, çünkü iki hücre arasındaki dengeleme belirli bir süre alacağı için her döngü bu şekilde uzamış olacaktır [79][80]. Şekil 5.21'de tek dönüştürücü ile dengeleme devresi verilmiştir.



Şekil 5.21 Tek dönüştürücü dengeleme devresi

5.2.3.4 Cuk Dönüştürücü ile Dengeleme

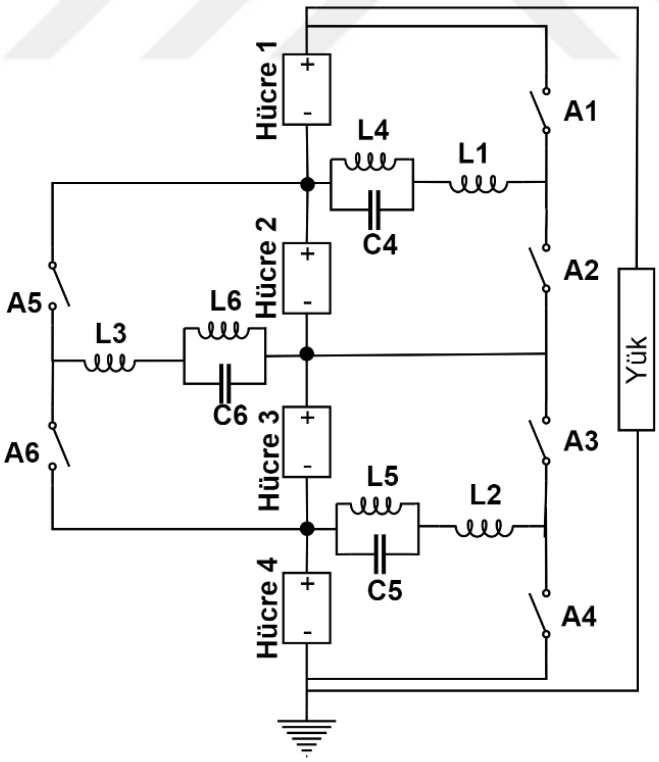
Cuk dönüştürücü ile dengeleme sistemi, çoklu indüktör yapısına ait bazı özellikler taşımaktadır. Yan yan dizilmiş seri bağlı hücrelerden herhangi bitişik ikili hücre arasına bir cuk dönüştürücü yerleştirilerek sistem tasarımı yapılır. hücre 1 ve hücre 2 düşünüldüğünde, hücre 1 yüksek bir SOC değerine sahipse hücre 2'ye enerji transferini gerçekleştirmek için A1 anahtarı açılıp kapatılır. Enerji kayıplarının önüne geçmek için anahtarlar üzerindeki gerilim 0V iken açılması sistem verimini önemli ölçüde etkilemektedir. Cuk dönüştürücü DCVM (discontinuous capacitor voltage mode) modunda çalıştırılarak anahtarlama kayıpları en aza indirilir. Ancak sistemde çok fazla hücre kullanılacağı durumlarda çok fazla cuk dönüştürücü gerekeceği için sistem maliyetleri ciddi boyutta artışlar gösterebilir. Aynı zamanda sistemde enerji transferi sadece yan yana olan hücreler arasında gerçekleşeceği için farklı konumlardaki hücreler için dengeleme sürelerinde artışlar gözlenecektir [81], [82]. Şekil 5.22'de cuk dönüştürücü ile dengeleme devresi verilmiştir.



Şekil 5.22 Cuk dönüştürücü ile dengeleme devresi

5.2.3.5 Quasi Rezonant Dönüştürücü ile Dengeleme

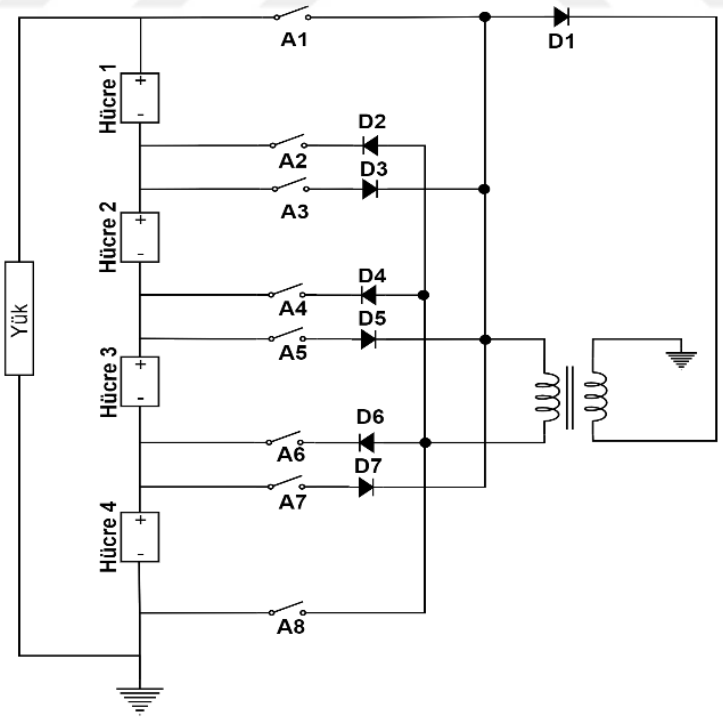
Quasi rezonant dönüştürücü ile dengeleme sistemi, yan yana seri bağlı hücrelerden bitişik olan hücreler arasına bağlanan ve enerji transfer işlemlerini gerçekleştiren dönüştürücü yapısıdır. Dengeleme işlemi başladığında sistemdeki anahtarlama elemanları uygun PWM sinyalleri ile tetiklenerek enerji transferleri gerçekleştirilir. Quasi rezonant dönüştürücüde indüktörler, kondansatörler ve anahtarlama elemanları, anahtarlama sırasında anahtarlama elemanları üzerindeki akımı sıfır amper değerinde tutarak sistemin verimini arttırıp enerji kayıplarını minimum düzeye indirmektedir. Sistemdeki anahtarlama kayıplarının düşmesi büyük sistemlerde ciddi boyutlarda enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ancak sistem çalışırken dengeleme işlemi bitişik olan hücreler arasında gerçekleşeceği için, bütün bir sistem dengelemesi ve birbirinden uzak hücrelerin dengelenmesi söz konusu olduğunda dengeleme hızında düşüşler gözlenir. Aynı zamanda sisteme daha fazla seri bağlı hücre eklendiğinde quasi rezonant dönüştürücülerin sayısındaki artışlar ciddi maliyet sorunlarına sebep olacaktır [83][84]. Şekil 5.23'de quasi rezonant dönüştürücü ile dengeleme devresi verilmiştir.



Şekil 5.23 Quasi rezonant dönüştürücü ile dengeleme devresi

5.2.3.6 Geri Dönüşlü Dönüştürücü ile Dengeleme

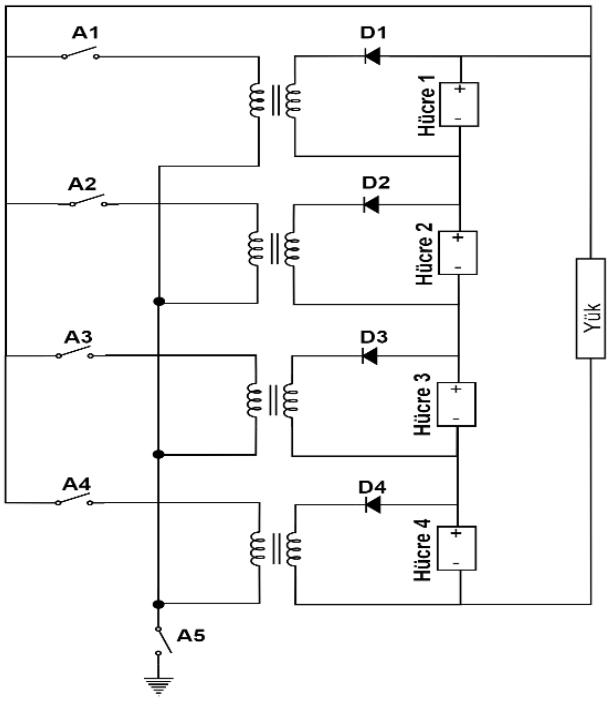
Geri dönüşlü dönüştürücü ile dengeleme sistemi, dengeleme işlemini gerçekleştirmek için bir transformatör kullanır. Herhangi bir yüksek SOC değerine sahip hücre belirlenerek bütün bir batarya paketi transformatör aracılığı ile yüksek SOC değerine sahip hücre tarafından şarj edilir. Hücre 1 yüksek bir SOC değerine sahip olduğu düşünüldüğünde, A1 ve A2'ye PWM sinyalleri verilerek A1 ve A2 kapatılarak transformatöre enerji aktarımı gerçekleşir. D1 diyotu hücrelere zarar verebilecek ters akımı önlemek için bariyer görevi görür. İkinci bir durum olarak, A1 ve A2 anahtarları açılır ve transformatörde depolanan enerji bütün bir batarya paketini şarj etmek için tüm batarya paketine transfer edilerek enerjinin sistem içerisinde dönüşü sağlanır. Bu çalışma mantığı sayesinde tüm hücrelerin SOC değerleri dengeli bir duruma gelir. Sistemde kullanılan diyotların temel amacı ters akımlardan ve olası kısa devrelerden hücreleri ve tüm sistem elemanlarını korumaktır. Sistemde sadece bir adet geri dönüşlü dönüştürücü kullanıldığı için sistemin maliyeti düşüktür. Dengeleme döngüsü hücre ve tüm hücreler arasında gerçekleştiği için sistemdeki dengeleme hızında artış gözlenir [85]. Şekil 5.24'de geri dönüşlü dönüştürücü ile dengeleme devresi verilmiştir.



Şekil 5.24 Geri dönüşlü dönüştürücü dengeleme devresi

5.2.3.7 Çoklu Geri Dönüşlü Dönüştürücü ile Dengeleme

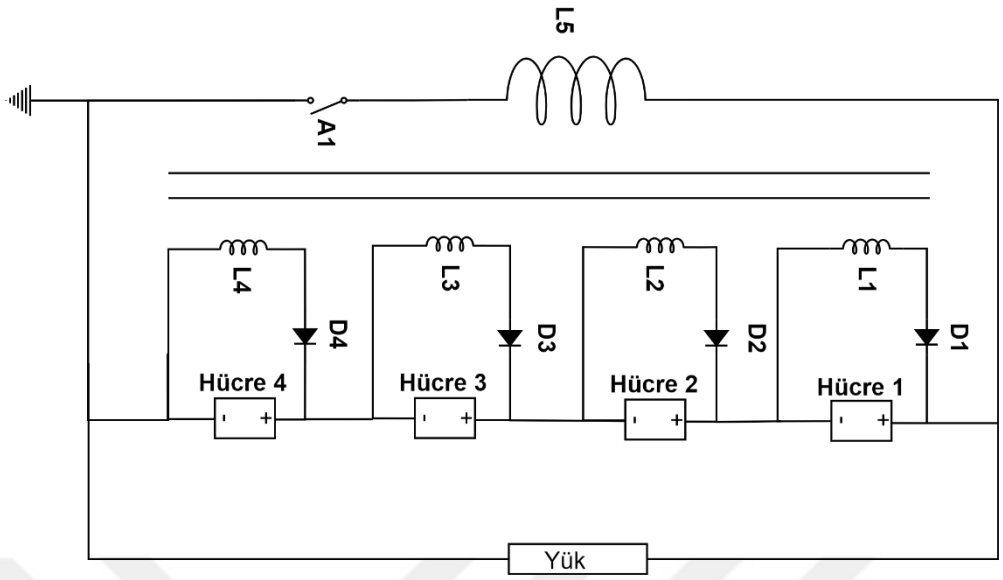
Çoklu geri dönüşlü dönüştürücü ile dengeleme sisteminde her bir hücre için ayrı bir dönüştürücü düşünülmüştür. Tekli yapıdan farklı olarak hücreler çıkış tarafına bağlanarak sistem kurulur. Giriş tarafında ise bir uç anahtarlama elemanlarına bağlanırken diğer uç her bir dönüştürücü için ortaklanarak bir anahtar yardımı ile toprağa çekilir. Hücre 1'in SOC değerinin en düşük olduğu düşünülürse, sistem çalışmaya başladığında A5 ve A1 anahtarları kapatılır ve A2, A3, A4 anahtarları açık tutulur. Bu esnada batarya paketi, ilk olarak transformatörü bütün batarya paketinin sağlamış olduğu enerji ile şarj etmiş olur. Aynı zamanda D1 diyotu transformatörün sekonder tarafındaki akımın ilerlemesini engelleyerek primer sargının şarj olmasını destekler. Daha sonra A5 anahtarı açılır ve A1 kapalı kalmaya devam eder, aynı zamanda A2, A3, A4 anahtarları da açık tutulur. Böylece transformatörde bulunan enerji hücre 1'in şarjını sağlar. Sistemdeki dengelemeye bakılacak olursa bir hücre bütün bir batarya tarafından dengelenir. Sistemin dengeleme prensibi tek adet geri dönüşlü dönüştürücünün kullanıldığı sistem ile neredeyse aynı özelliklere sahiptir. Ancak sistemin kurulumu için çok fazla transformatör ve güç elektroniği ekipmanı gerektiği için maliyetleri arttırır [86], [87]. Şekil 5.25'te çoklu geri dönüşlü dönüştürücü ile dengeleme devresi verilmiştir.



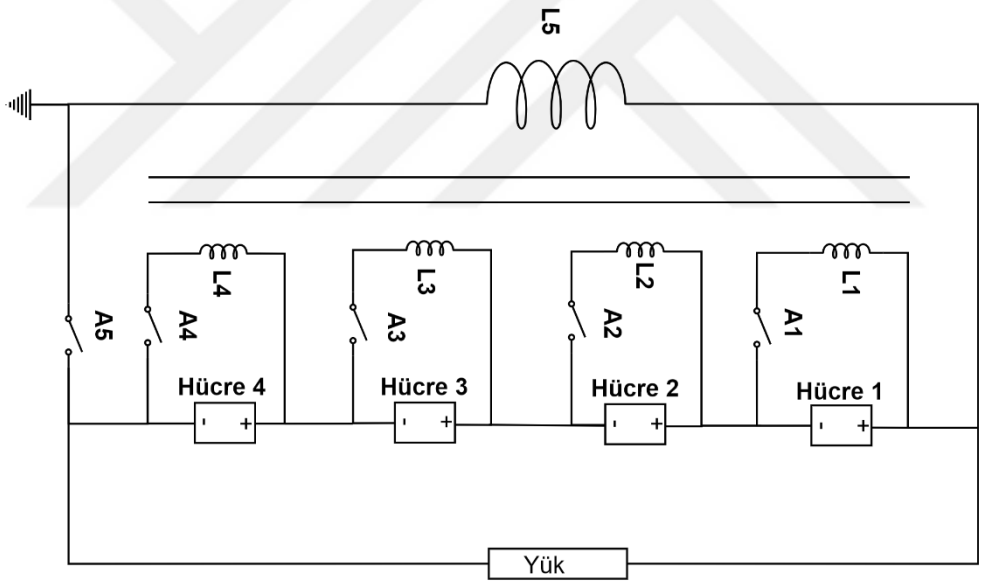
Şekil 5.25 Çoklu geri dönüşlü dönüştürücü dengeleme devresi

5.2.3.8 Çoklu Sargıya Sahip Geri Dönüşlü Dönüştürücü ile Dengeleme

Çok sargılı geri dönüşlü dönüştürücü ile dengeleme sisteminde devre yapılarındaki ufak farklılıklara bağlı olarak iki tür sistem ile karşılaşılır. İlk sistemde hücreler transformatörün sekonder tarafına bağlıdır ve primer sargının uçları ise bütün batarya paketinin artı ve eksi kutuplarına bağlıdır. Şekil 5.26'dan da görüldüğü gibi sistem primer tarafta tek sargı ve sekonder tarafta çok sargılı olarak tasarlanmıştır ve dengeleme açısından incelendiğinde enerji alışverişinin batarya paketi ve hücreler arasında gerçekleştiği görülür. Düşük SOC değerine sahip bir hücre şarj edilmek isteniyorsa batarya ilk olarak transformatörün primer sargısını şarj eder ve daha sonra düşük SOC değerine sahip hücre gerekli anahtar tetiklemeleri sayesinde sekonder sargı üzerinden şarj edilir. Yüksek bir SOC değerine sahip hücrenin sisteme enerji aktarması ise sekonder sargının şarj edilip daha sonra primer sargıya enerjiyi aktararak bütün bir batarya paketinin şarj olması olarak gerçekleşir [88]. İkinci sistemde ise A1 anahtarı kapatılarak bütün batarya paketinin transformatörün primer sargısını şarj etmesi sağlanır, daha sonra A1 anahtarı açılır ve primerdeki depolanan enerji sekonderlerden geçerek tüm hücreleri şarj eder. Hücreler arasında SOC farkları olduğu durumlarda, sistemdeki sekonder sargıların dönüş oranları sabit olduğundan dolayı en düşük SOC değerine sahip hücre daha fazla akım ile şarj edilecektir, böylece tüm hücreler dengeye gelene kadar sistem çalışmasını sürdürür. Ancak her iki sistemde de ortak kullanılan transformatör çekirdeğinin sekonder sargılarını ayarlamak zor bir işlemdir ve manyetik olarak sistem büyüyeceği için kaçak endüktans durumları meydana gelir ve enerji kayıpları ile sonuçlanır [89]. Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'de geri dönüşlü dönüştürücü ile dengeleme devresi verilmiştir.



Şekil 5.26 Çoklu sargıya sahip geri dönüşlü dönüştürücü ile dengeleme devresi



Şekil 5.27 Çoklu sargıya sahip geri dönüşlü dönüştürücü ile dengeleme devresi

6
BATARYA HİBRİT DENGELEME SİSTEMİ TASARIMI VE SİMÜLASYONU

6.1 Hibrit Dengeleme Sistemine Genel Bakış

Çoğu aktif dengeleme yöntemi, SOC değeri yüksek olan hücrelerden enerjiyi alarak depolama elemanları vasıtasıyla ilk önce depolayıp daha sonra düşük SOC' li hücrelere aktarmak için çeşitli dengeleme stratejilerine sahiptir. Ancak bu, birçok kez enerji dönüşümü nedeniyle sistemde istenmeyen enerji kayıplarını beraberinde getirir. Piyasadaki uygulamaların çoğunda batarya hücrelerinin düşük terminal voltajı nedeniyle hücreler gruplandırılarak kullanılır, istenen voltaj seviyesini elde etmek için pillerin seri bağlanmasıyla batarya modülleri veya paketleri oluşturulur. Bununla birlikte, bir hücre grubu hücreleri arasında yaygın olarak bilinen bir dengesizlik oluşur. Hücreler arasındaki SOC dengesizliği bunun başlıca nedenidir. Batarya hücreleri arasındaki farklılıklar genel olarak iç ve dış sebeplerden ortaya çıkabilir. Bütün özellikleri birbirine benzeyen eş hücreleri oluşturmak neredeyse imkânsız bir işlemdir. Hücrelerin performansları, deşarj oranlarındaki ve iç dirençlerdeki farklılıklar nedeniyle çalışma sırasında değişiklik gösterir.

Elektrikle çalışan araçlar (EV, PHEV, HEV), seri bağlı birden fazla batarya hücresinden oluşan yüksek gerilime sahip batarya paketlerini kullanır. Her hücrenin kapasitesi, iç direnci, çalışma zamanı, şarj durumu (SOC) birbirinden farklıdır, dolayısıyla bir batarya yönetim sistemi hücre dengeleme sistemini kendi içerisinde barındırmalıdır. Pratikte, pasif dengeleme sistemleri, elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon tabanlı batarya paketlerinin dengelenmesinde kullanılan maliyeti düşük ve uygulaması kolay sistemler olarak kabul edilir. Ancak, pasif dengeleme sistemlerindeki dezavantajlar arasında bulunan, batarya paketi enerji kapasitesinin sistemdeki en zayıf hücreler tarafından belirlenmesi olgusu bu sistemlerin tercih edilebilir olma potansiyelini gün geçtikçe azaltmaktadır. En zayıf hücre sorunu, hücreler arasındaki eşit olmayan bozulma nedeniyle zamanla daha da kötüye gider ve batarya ömrünün azalmasına neden olur. Öte yandan, günümüzde popüler hale gelen aktif dengeleme sistemleri, enerjiyi bir hücreden diğerine aktarmak için yüksek verimli güç dönüştürücüler, süper kapasitörler, kapasitörler ve indüktörler kullanılarak en zayıf hücre etkisi hafifletilir. İncelenen çok sayıda aktif dengeleme mimarisi ve gerçekleştirmesi vardır. Bununla birlikte, aktif dengeleme

stratejisi, uygulamalar için ek maliyetler oluşturan ekstra güç elektroniği elemanlarına ihtiyaç duyar, bu bilgilerden yola çıkılarak anahtarlamalı kapasitör tabanlı aktif dengeleme yöntemi ile, anahtarlamalı direnç ile pasif dengelemenin avantajları bir araya getirilerek yeni bir dengeleme stratejisi geliştirilmiştir. Bu dengeleme stratejisi hibrit batarya dengeleme sistemi olarak adlandırılır. Sistemin çalışma prensibi; hücre seviyesinde anahtarlamalı direnç ile pasif dengeleme yapılırken modül seviyesinde kapasitör tabanlı aktif dengeleme uygulanmıştır. Her iki yöntemin de maliyeti düşük ve performansının yeterince kabul edilebilir boyutlarda olması pratikte kullanılmasına olanak sağlamaktadır.

6.2 Tasarımı Yapılan Dengeleme Sistemi

6.2.1 Batarya Paketi

Hibrit batarya dengeleme stratejisi MATLAB/Simulink'te test edilmiştir. Dört modülden oluşan ve her modül içerisinde seri bağlı dört hücre bulunan bir batarya paketi, %10 ile %100 arasında düzgün bir ilk şarj dağılımı ile sistem tasarlanmıştır. Lityum iyon hücre ve kapasitif birim parametreleri Tablo 6.1'de verilmiştir. Simülasyon ortamında yapılan çalışmalarda kullanılan batarya paketi 16 adet lityum iyon pilden oluşmaktadır. Batarya paketinde 16 adet pil 4 modüle ayrılmış ve her modül içerisinde seri bağlı 4 hücre bulunmaktadır, aynı zamanda modüller birbirine seri olarak bağlanmıştır.

Tablo 6.1 Lityum-iyon hücre parametreleri

Nominal Hücre Voltajı	3.63 V
Maksimum Hücre Voltajı	4.2 V
Nominal Hücre Kapasitesi	3350mAh
Minimum Hücre Kapasitesi	3250mAh
Standart Şarj Akımı	0.3C (975mA)
Maksimim Şarj Voltajı	4.2 ± 0.05V
Maksimum Şarj Akımı	0.5C (1625mAh)
Standart Deşarj Akımı	0.2C (650mAh)
Maksimum Deşarj Akımı	1.5C (4875mAh)
Çalışma Sıcaklığı	Şarj: 0 - 45 C^o Deşarj: -10 - 60 C^o

Batarya paketi için kritik değerler aşağıdaki gibi belirtilmiştir:

Batarya paketi nominal voltajı: 58,08 V

Batarya Paketi Maksimum Voltajı: 67,2 V

Kapasite: 3350mAh

Hücrelere bağlı seri direnç: 30 ohm

C rate olarak bilinen C değeri: 1C değeri, 1 saatlik şarj veya deşarj olarak literatürde bilinir. 0.5C ya da C/2 2 saat süren bir şarj veya deşarja denk gelir. C değerinin bir birimi olmamasına rağmen hesaplamalarda 1/Ah olarak hesaplanır. Sistemde kullanılan batarya paketi için hesaplandığında $C = \frac{1}{3.35} = 0.29$ olarak bulunur ve 0.29C değeri 3.35 saate denk gelir. Temel olarak batarya paketimiz için 0.29C oranı ile şarj veya deşarj işlemi 3.35 saat sürmektedir.

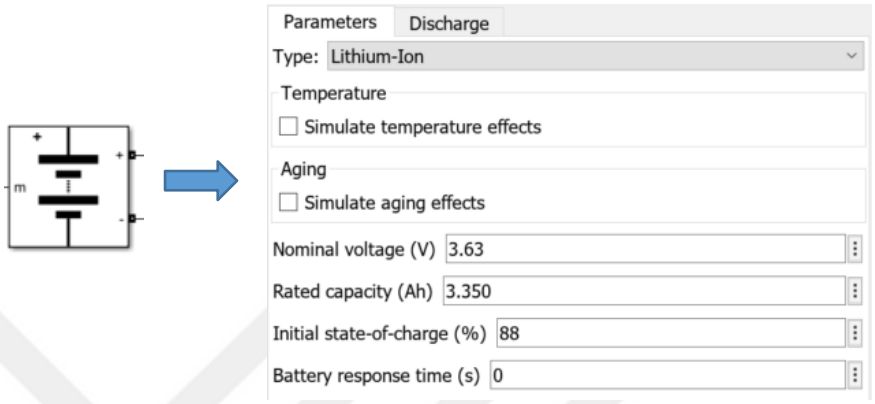


Şekil 6.1 Tasarımda kullanılan pil görseli

6.3 Simulink Ortamında Geliştirilen Modelin Detayları

6.3.1 Pil Modeli

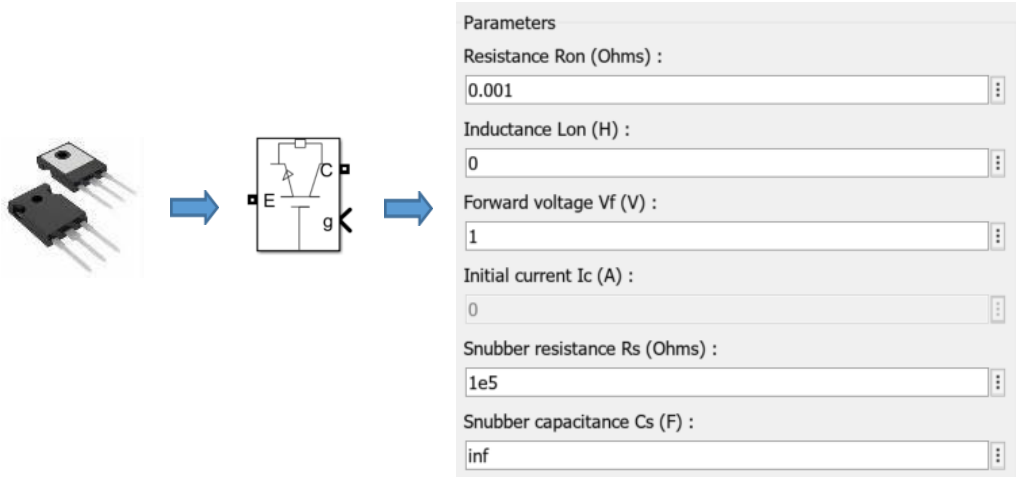
Tasarımı yapılan dengeleme devrelerindeki lityum iyon pilin simulink ortamındaki eşdeğer modeli baz alınarak simülasyon yapılmıştır. Baz alınan pil modeline ait görsel ve parametreler Şekil 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Simülasyonda kullanılan pil modeli ve özellikleri

6.3.2 Anahtarlama Elemanı

Simülasyon ortamında kontrol algoritmalarının gerçekleştirilmesini sağlayan ve anahtarlama yapılarak hücreler üzerindeki fazla enerjiyi dirençler üzerinden atılmasına yardımcı olan güç elektroniği elemanı olarak IGBT kullanılmıştır. IGBT görseli ve parametreleri Şekil 6.3'de gösterilmiştir.

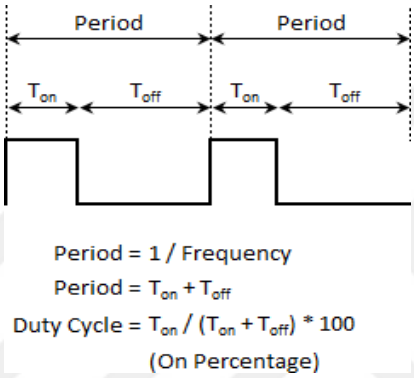


Şekil 6.3 Anahtarlama elemanı IGBT ve parametreleri

6.3.3 Anahtarlama Süreci

Dengeleme devresinde kullanılan IGBT' lerin anahtarlama işlemi PWM sinyali ile gerçekleştirilmiştir. Anahtarlama elemanı çalışmaya başladığında belirli frekanslarda tetiklenerek akım geçişine izin verilmektedir. Şekil 6.4'ten de görüleceği üzere PWM sinyalleri doluluk oranlarına bağlı olarak açma ve kapama işlemlerinin süresini belirler. Doluluk oranı yüzde olarak hesaplanır ve anahtarlama elemanı bu doğrultuda ne kadar süre açık kalacağını belirler. Doluluk oranı Denklem 6.1 aracılığı ile hesaplanır.

$$D = \%\frac{T_{on}}{T} * 100 \tag{6.1}$$

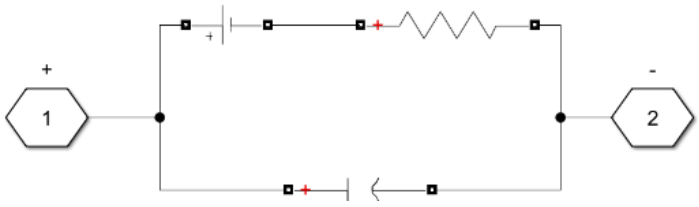


Şekil 6.4 PWM sinyali görseli

Sistemde pasif dengeleme devresinde kullanılan PWM sinyali 5 V genlik, 500 Hz frekans ve %5 doluluk oranına sahiptir. Aktif dengeleme devresinde kullanılan PWM sinyali 5 V, 500 Hz frekans ve %70 doluluk oranına sahiptir.

6.3.4 Batarya Şarj Devresi

Simülasyon yapılırken batarya hücrelerini besleyen enerji kaynağına ihtiyaç vardır. Bu ihtiyaçtan yola çıkarak DC güç kaynağı, direnç ve kapasitörden oluşan bir şarj devresi oluşturulmuştur. DC güç kaynağı gerilimi maksimum hücre gerilimi baz alınarak hesaplanmıştır. Şekil 6.5'de şarj devresi gösterilmiştir.



Şekil 6.5 Batarya şarj devresi

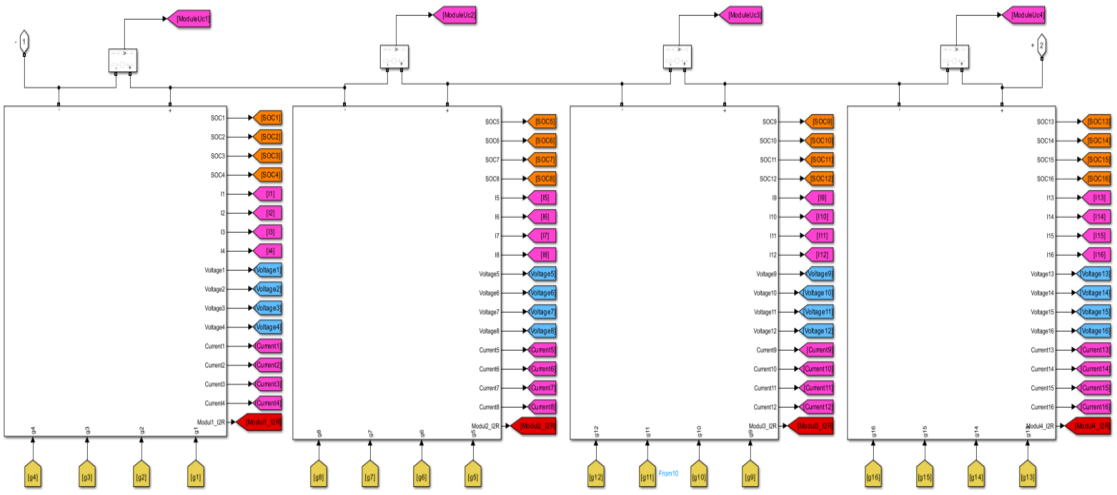
DC güç kaynağı: 67.2 V

Güç kaynağına bağlı seri direnç: 30 ohm

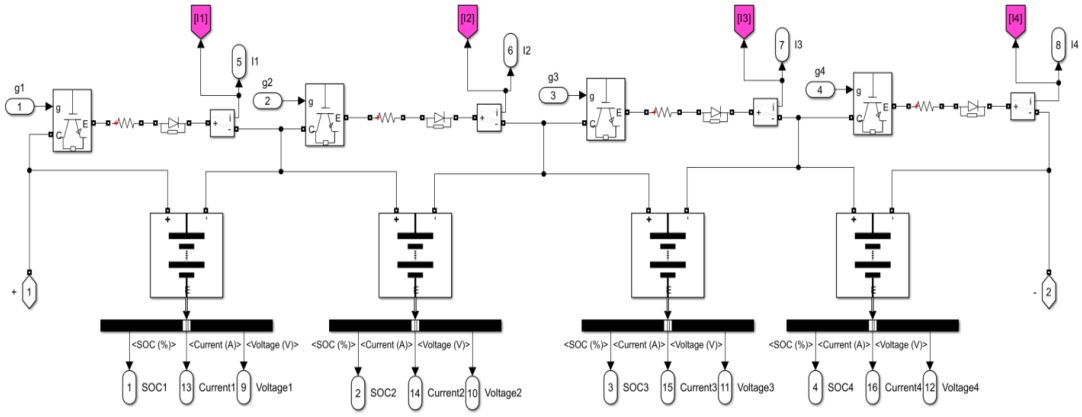
Kapasitör kapasitans değeri: 0.001 F

6.4 Pasif Dengeleme Devresi

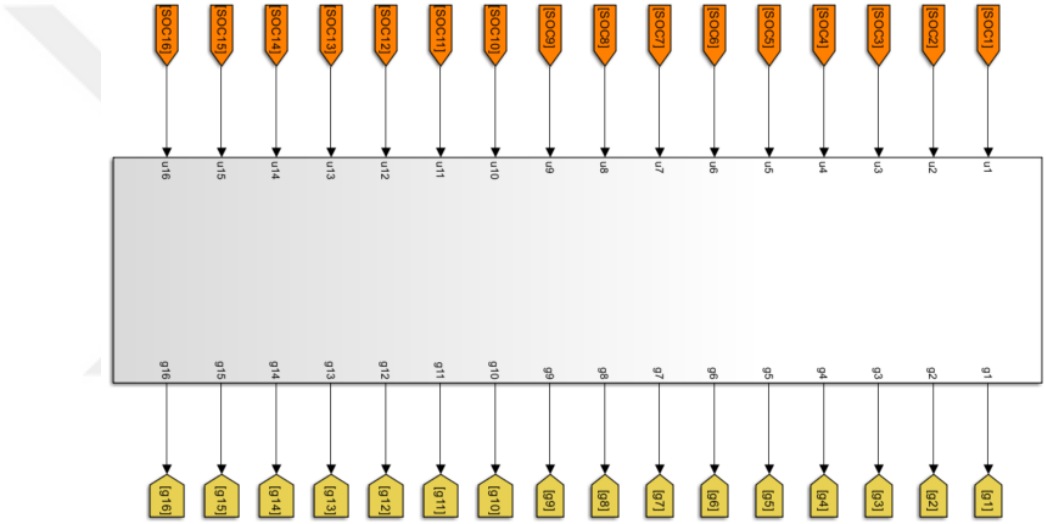
Pasif dengeleme için oluşturulan modelin görseli Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Dengeleme modeli dört adet modülden oluşmaktadır. Modüller birbirlerine seri olarak bağlanmıştır ve her modülün gerilimini ölçen gerilim ölçer bloğu modüllere bağlanmıştır. Şekil 6.7'de modül içerisini gösteren ve hücre seviyesinde pasif dengelemenin gerçekleştirildiği kısım görülmektedir. Her hücre kendisine paralel bağlı bir direnç ve IGBT vasıtasıyla fazla enerjiyi ısıya dönüştürür. Her hücreden alınan SOC, gerilim ve akım değerleri modül seviyesine çıkarılarak Şekil 6.8'de bulunan kontrol bloğuna gönderiliyor. Kontrol bloğundan gelen PWM sinyalleri ile IGBT' ler tetiklenerek dengeleme işlemi gerçekleştiriliyor. Hücrelerden alınan değerler Şekil 6.9'da görüntüleme bloklarına gönderilerek her hücrenin şarj durumları, gerilimleri, akımları ve hücrelere paralel bağlı olan dirençler üzerinde harcanan enerjinin zamana bağlı grafikleri pasif dengeleme grafikleri bölümünde dört adet dengesizlik durumu için yorumlanmıştır.



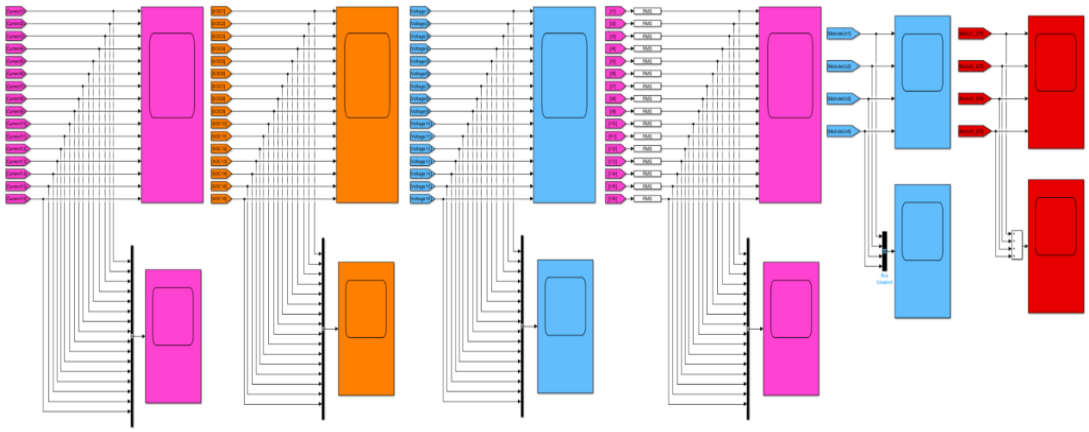
Şekil 6.6 MATLAB Simulink ortamında tasarlanan pasif dengeleme modeli



Şekil 6.7 Modül içerisinde bulunan dört hücreli pasif dengeleme devresi



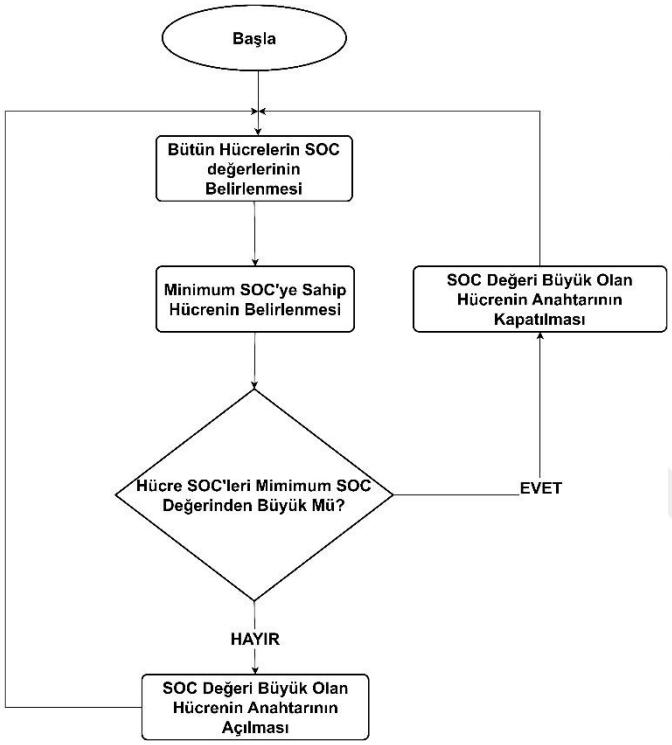
Şekil 6.8 Pasif dengeleme devresi kontrol bloğu



Şekil 6.9 Pasif dengeleme devresi sonuç izleme bölümü

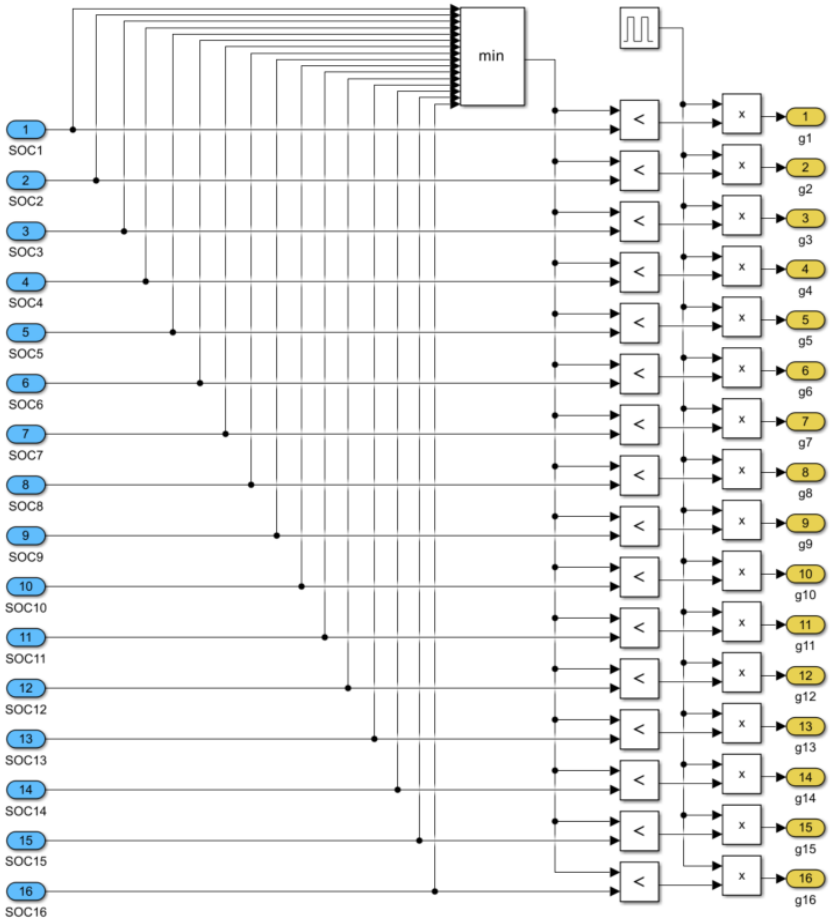
6.4.1 Pasif Dengeleme Devresi Kontrol Bloğu

Pasif dengeleme devresini kontrol etmek için Şekil 6.10'deki kontrol algoritması simulink blokları aracılığı ile Şekil 6.11'de oluşturulmuştur. Giriş sinyalleri olarak hücrelerden gelen SOC değerlerini, çıkış sinyalleri olarak ise IGBT'ler için PWM sinyalleri eklenmiştir.



Şekil 6.10 Pasif dengeleme devresi kontrol algoritması

Şekil 6.11'de modellemesi yapılan kontrol ünitesinde girişlerden alınan SOC değerleri minimum bloğuna girerek en düşük SOC değeri belirlenir. Belirlenen minimum SOC değeri bütün hücrelerin SOC değerleri ile karşılaştırılarak SOC değeri minimum değerin yukarısında olan hücrelerin IGBT elemanına PWM sinyali gönderilir. Böylece yüksek SOC' ye sahip hücreler direnç üzerinden deşarj edilir.



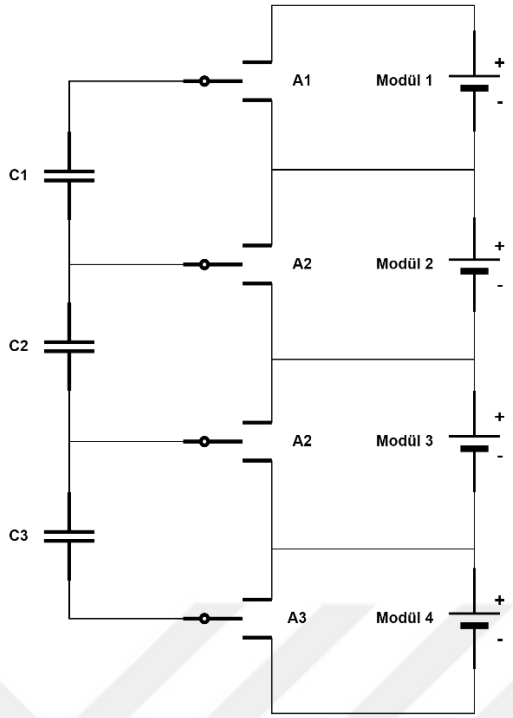
Şekil 6.11 Pasif dengeleme için simulink programında oluşturulan kontrol modeli

PWM sinyalinin oluşturulması için simulink kütüphanesinde bulunan ‘pulse generator’ bloğu kullanılmıştır. Pulse generator bloğunun frekansı 500 Hz, genliği 5V ve doluluk oranı ise %5 olarak belirlenmiştir. Hücrelerin SOC değerleri minimum SOC değerinden büyük olduğu zaman karşılaştırma bloğu çıkış 1 vererek PWM sinyali ile çarpılır. Çıkış sinyali olarak 5V değerinde bir PWM sinyali IGBT’ leri tetiklemek için dengeleme devresine girer. Aynı şekilde Hücre SOC değeri minimum SOC değerinden küçük ise karşılaştırma bloğunun çıkışı 0 olur ve PWM sinyali 0 ile çarpılarak anahtarlama sinyali 0 olarak gönderilir. Böylece bütün hücreler minimum SOC’ ye sahip hücreye eşitleninceye kadar deşarj edilir.

6.5 Kapasitör Tabanlı Hibrit Dengeleme Devresi

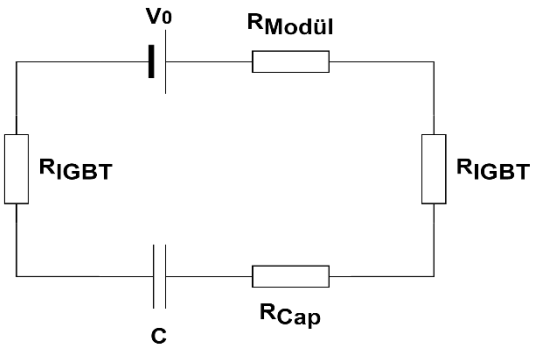
Elektrikli ve hibrit araç uygulamalarında aktif dengelemenin en önemli avantajlarından biri batarya ömrünün uzatılmasıdır. Boyutları büyük olan EV/HEV batarya paketlerinde, paket boyunca sıcaklık değişimleri meydana gelmektedir, batarya ömrünün kısalmasındaki ana nedenlerden biri olan hücreler arası sıcaklık değişimleri son derece dikkate alınması gereken bir husustur. Batarya paketi içerisindeki hücre takımları birbirine ne kadar yakın olsalar dahi hücrelerdeki sıcaklık değişimleri daha düşük seviyelerde olur ve bu da hücre düzeyindeki kayıpların düşük olması anlamına gelir. Bu tez kapsamında sunulan hibrit dengeleme stratejisi de bu yaklaşıma dayanarak geliştirilmiştir. Modül seviyesindeki kayıpların daha az olması için kapasitör tabanlı aktif dengeleme uygulanarak büyük enerji kayıplarının önüne geçilmiştir [92]. Böylece hücre seviyesinde pasif dengeleme her modülün içinde uygulanırken aynı zamanda hücre gurupları ile oluşturulan modüller aktif dengeleme için kullanılmıştır [93].

Hibrit dengeleme devresi temelde bir aktif dengeleme yönteminin pasif dengeleme sistemine entegre edilmesiyle oluşturulmuş bir sistemdir. Pasif dengeleme sırasında ortaya çıkan enerji ve süre kayıplarının önüne geçebilmek için tasarım yapılmıştır. Sistemin tasarımı yapılırken birçok aktif dengeleme yöntemi avantajları ve dezavantajları açısından incelenmiştir. İncelenen aktif dengeleme yöntemlerinden devre elamanlarının az olduğu ve maliyetin düşük olduğu kapasitör tabanlı dengeleme yöntemi seçilmiştir. Hibrit dengeleme yapılırken batarya paketi modüllere ayrılmak zorundadır. Çünkü bu yöntemde hücre seviyesinde pasif dengeleme yapılırken modül seviyesinde aktif dengeleme yapılmaktadır. Sistemin bu şekilde tasarlanmasındaki temel düşünce; hücre seviyesinde gerçekleşen düşük enerji farkları direnç vasıtası ile ısıya dönüştürülür. Modül seviyesinde ise aktif dengeleme yapılarak modüller arasındaki yüksek enerji farkları kapasitör aracılığı ile enerjisi düşük olan modüller arasında paylaştırılır. Anahtarlamalı kapasitör tabanlı modül dengeleme sistemi Şekil 6.12'de gösterilmektedir.



Şekil 6.12 Anahtarlamalı kapasitör tabanlı modül dengeleme sisteminin elektrik devre şeması

Şekil 6.12'de gösterilen şemada mosfetler açık konumdadır ve dönüşümlü olarak üst ve alt kontaklara bağlanır. Kapasitörün ileri geri değiştirilmesi, batarya modülleri arasında tam olarak aynı gerilimi verir. Fiziksel olarak, dinamikler kapasitansa, modülün içindeki hücrelere, anahtarlara, kapasitörler dahil olmak üzere eşdeğer dirence ve modülün içindeki hücrelerin kimyasına bağlıdır [86].



Şekil 6.13 Anahtarlama sırasında her bir modülün, modül düzeyinde elektriksel eşdeğer şeması

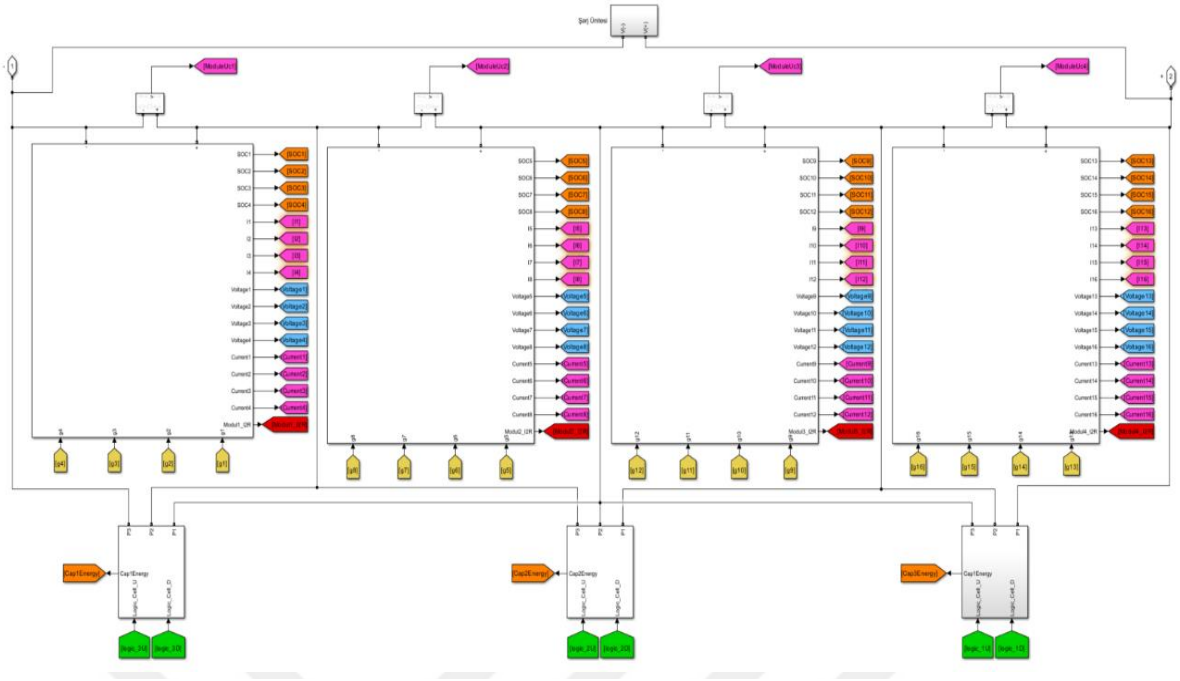
Şekil 6.13'te gösterilen devre incelendiğinde; $[t_k, t_{k+1}]$ olan anahtarlama periyodunda bir kondansatör ve bir modül arasındaki elektrik bağlantısı şekilde $t_{k+1} - t_k = T_s$ ile gösterilmiştir. Denklemler (6.1) ve (6.2) sürekli zaman domeninde elektrik devresinin düzenlenmesi aşağıdaki gibi çıkarılabilir [86].

$$C_{dt}^{dv} = I = \frac{V_{0_i} - V}{R_{tot}} \tag{6.1}$$

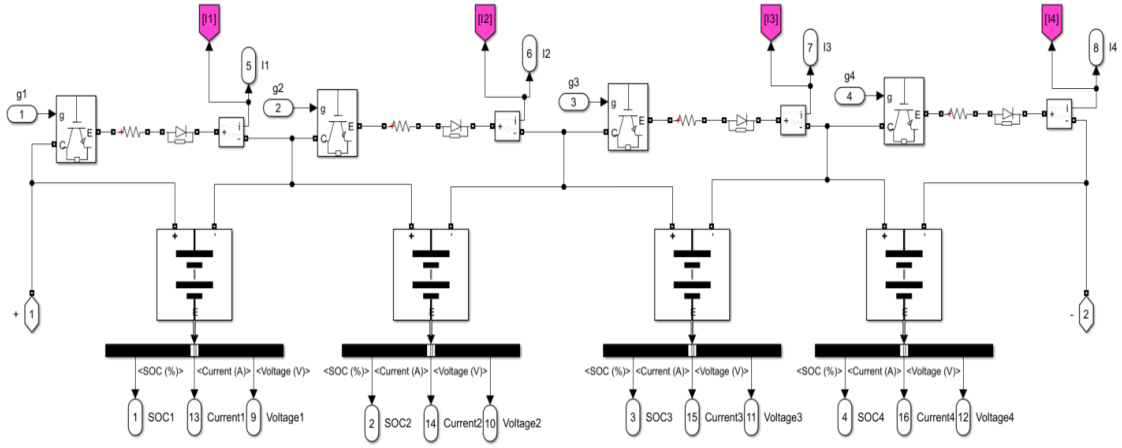
$$\frac{dQ_i}{dt} = -I = -\frac{V_{0_i} - V}{R_{tot}} \tag{6.2}$$

Denklemde V kapasitör gerilimidir (birimi Volt'tur), Qi modül deşarjı/şarjıdır (birimi Cloumdur) ve simetrik olarak kapasite şarjı/deşarjıdır, V0i modül açık devre gerilimidir (V cinsinden), modül şarjını Qi, $Rtot$ ise modül, kapasitör ve IGBT'lerin dirençlerinin toplamıdır [86].

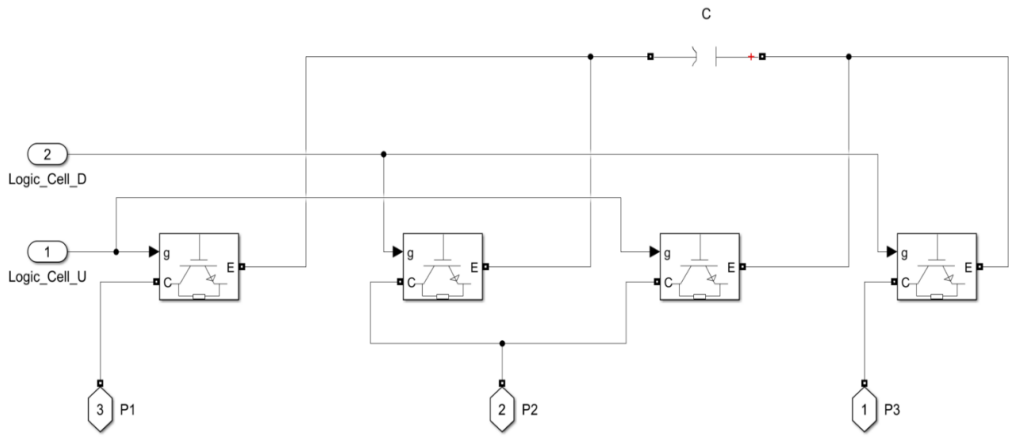
Şekil 6.14'de hibrit dengeleme sistemi için MATLAB/Simulink ortamında yapılan tasarımın görseli bulunmaktadır. Sistemde dört adet modül ve modüller içerisinde birbirine seri bağlı dört adet hücre bulunmaktadır. Şekil 6.14'de görüldüğü gibi her hücre akım, gerilim ve SOC değerini çıkış olarak veriyor. Aynı zamanda hücrelere paralel bağlı dengeleme dirençleri üzerinden geçen akım ölçülerek dengeleme dirençleri üzerinde ısıya dönüşen enerjinin hesaplanması için kullanılmıştır. Modül seviyesi incelendiğinde, modüller birbirine seri bağlanmıştır. Modüller arası enerji transferini gerçekleştirmek için sisteme üç adet kapasitif birim entegre edilmiştir. Şekil 6.16'da kapasitif birim görseli bulunmaktadır. Kapasitif birim içerisinde dört adet anahtarlama elemanı kapasitöre bağlanmıştır. Anahtarlama elemanları kapasitörün ileri geri hareket etmesini sağlayarak modüller arasında enerji transferinin gerçekleştirilmesini sağlar. Aynı zamanda sistemde simülasyon sonuçlarını izlemek için sonuç izleme bölümü Şekil 6.17'de gösterilmiştir.



Şekil 6.14 MATLAB/Simulink ortamında tasarlanan hibrit dengeleme modeli

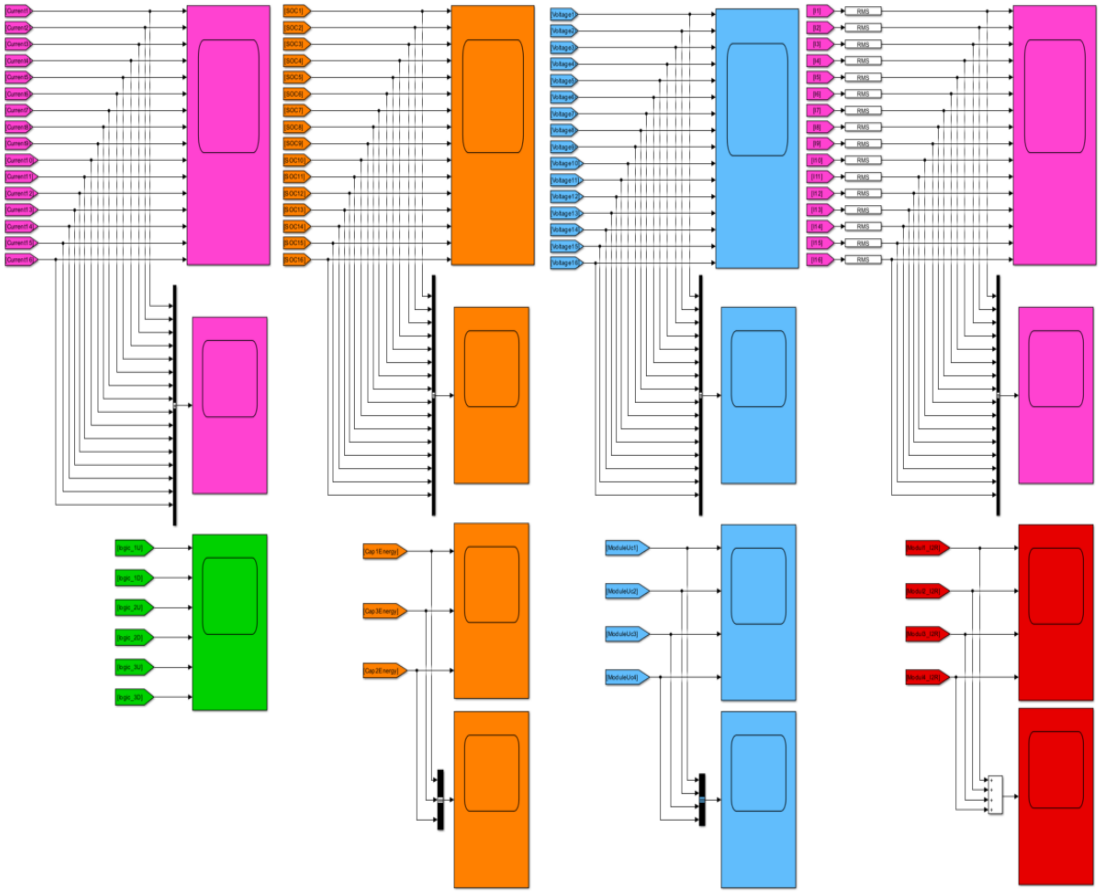


Şekil 6.15 Modül içerisinde bulunan dört hücreli pasif dengeleme devresi



Şekil 6.16 Kapasitif Birim

Şekil 6.16'da gösterilen kapasitif birim dört adet IGBT ve bir adet 0.1 F değerinde kapasitöre sahiptir. Sistem çalışmaya başladığında kapasitör IGBT'ler sayesinde ileri geri hareket ettirilerek enerji transferi gerçekleştirilir.

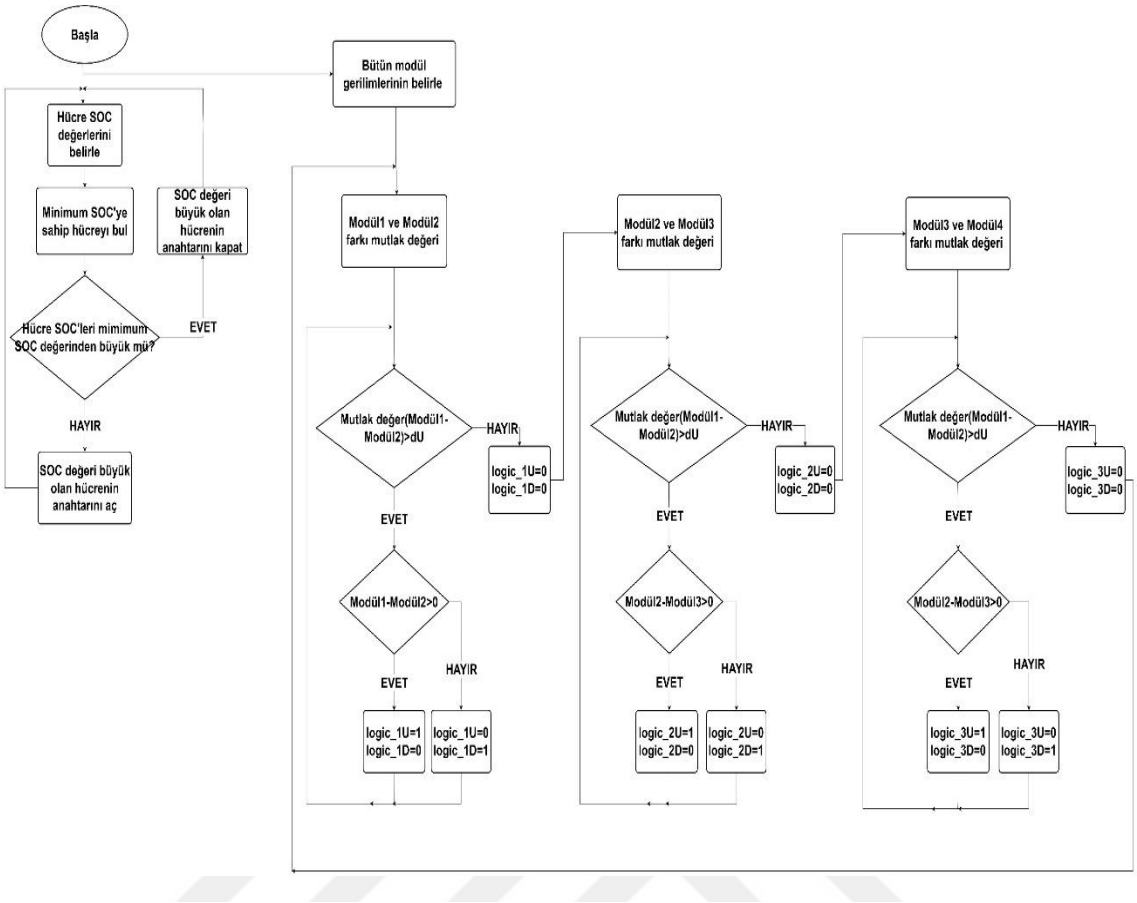


Şekil 6.17 Hibrit Dengeleme devresi sonuç izleme bölümü

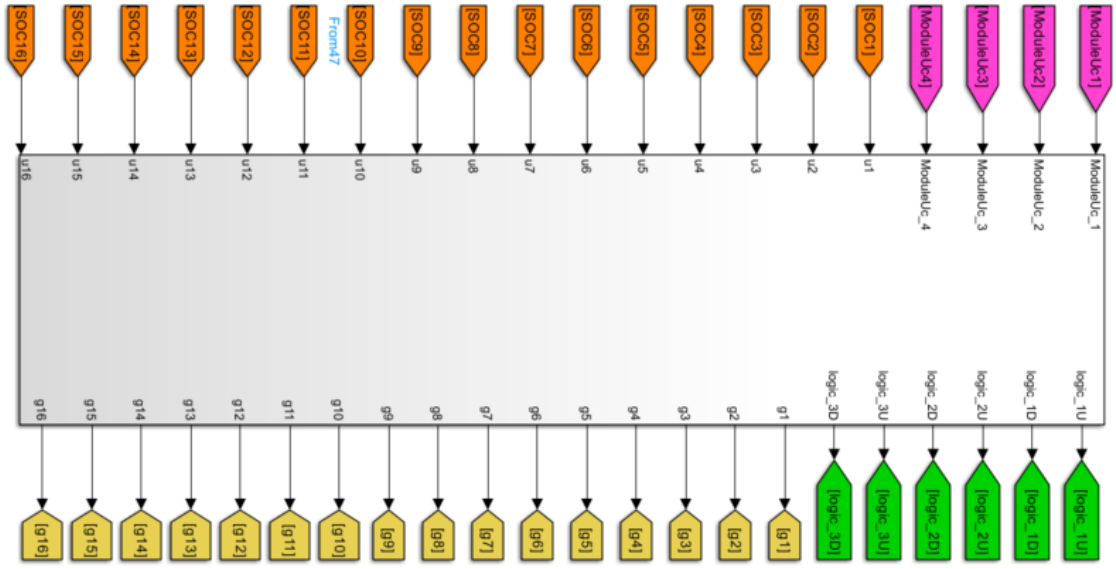
6.5.1 Kapasitör tabanlı Hibrit Dengeleme Devresi Kontrol Bloğu

Hibrit dengeleme sisteminin kontrolünü sağlayan algoritma Şekil 6.18'de verilmiştir. Kontrol algoritmasında pasif ve aktif dengelemenin bir arada çalıştığı görülmektedir. Pasif dengeleme için hücrelerden alınan SOC değerleri birbirleri arasında karşılaştırılarak en küçük SOC değeri bulunur ve hücre seviyesinde SOC değeri yüksek olan hücreler SOC değeri düşük olan hücrenin seviyesine getirilmek için hücrelere bağlı anahtarlama elemanlarına PWM sinyalleri gönderilir ve fazla enerjinin direnç üzerinden ısıya dönüştürülmesi sağlanır. Bu işlemler devam ederken modül seviyesinde sisteme bağlı kapasitörler modüller arası gerilim farkını minimum değere indirmek için modüller arası enerji transferi yaparlar. Dikkat edilirse sistemde hücre seviyesindeki dengeleme SOC tabanlı, modül seviyesindeki dengeleme ise voltaj tabanlıdır. Modül seviyesinde

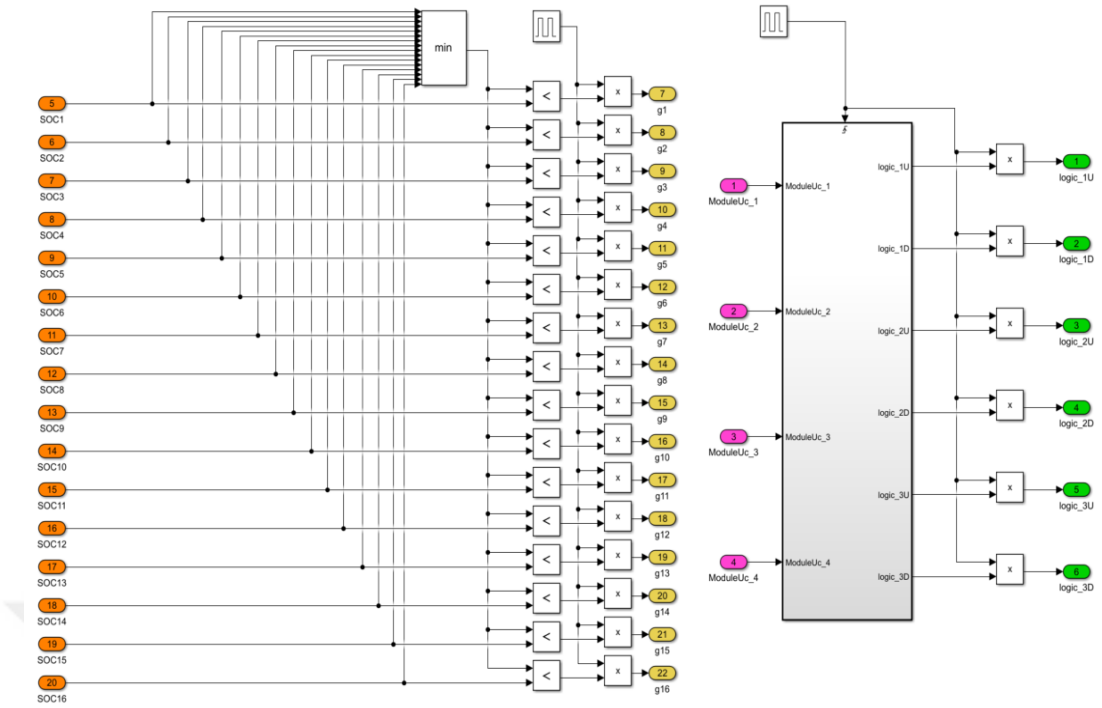
dengeleme yapılması için modül gerilimleri ölçülerek kontrol algoritmasına giriş olarak verilir. Daha sonra her bir modül ikişerli olarak birbirleriyle karşılaştırılır. Sistem çalışmaya başladığında ilk önce modül 1 ve modül 2 arasındaki gerilim farkının mutlak değeri bulunur. Bulunan gerilim farkı belirlenen gerilim eşik değeri ile karşılaştırılır, gerilim eşik değeri olarak dU = 0.01 V seçilmiştir. Modül 1 ve Modül 2 arasındaki gerilim farkı dU değerinden büyük ise enerji transferi Modül 1 ve Modül 2 arasında başlar. Ancak hangi modülün geriliminin küçük olduğunu bulmak için iki modülün gerilimlerinin farkı sıfır değeri ile karşılaştırılır. Eğer Modül 1 gerilimi Modül 2 geriliminden büyük ise logic_1U değeri lojik-1 yapılarak kapasitörün Modül 1 ile paralel bağlantı yapılması sağlanır. Modül 1 fazla enerjisini kapasitöre aktardıktan sonra logic_1D değeri lojik-1 yapılarak dolu haldeki kapasitörün Modül 2 ile paralel bağlantı yapılması sağlanır. Sistem bu şekilde diğer modüllerin gerilim değerlerini kontrol ederek aynı işlemleri gerçekleştirir. Şekil 6.19'da dengeleme sisteminin kontrol bloğunda giriş olarak SOC turuncu renk ile, modül voltajları mor renk ile gösterilmiştir. Kontrol bloğunda çıkış olarak pasif dengeleme için hücre seviyesine gönderilen PWM sinyalleri sarı renk ile, modül seviyesine gönderilen ve kapasitif birim içerisindeki anahtarları tetikleyen sinyaller ise yeşil renk ile gösterilmiştir.



Şekil 6.18 Hibrit dengeleme devresi kontrol algoritması

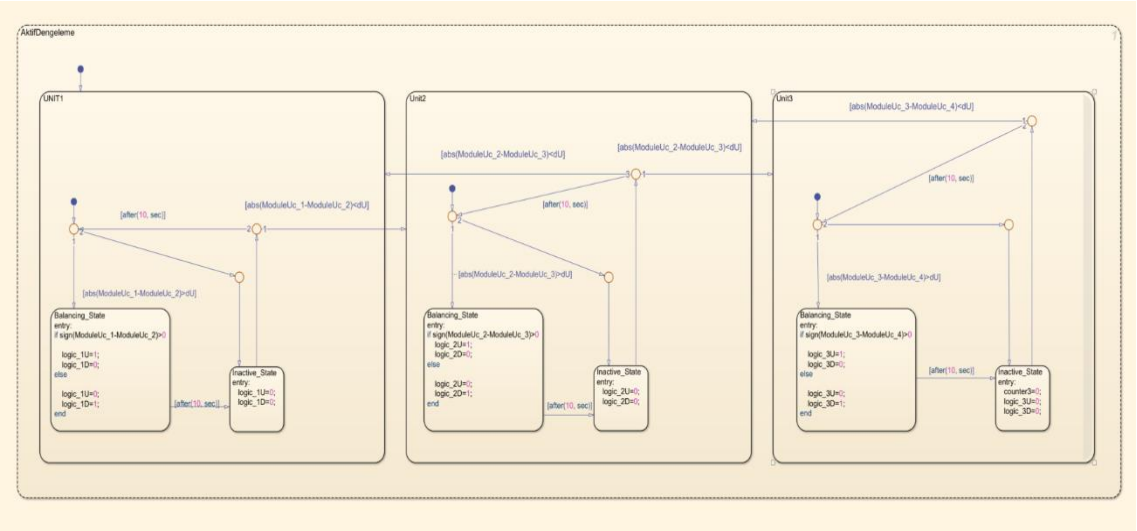


Şekil 6.19 Hibrit dengeleme devresi kontrol bloğu



Şekil 6.20 Hibrit dengeleme devresi kontrol bloğu alt sistemi

Şekil 6.20'de kontrol bloğunun içerisindeki pasif ve aktif dengeleminin paralel olarak çalıştığı ve hibrit dengeleme kontrol algoritmasının simulink blokları ile tasarlanmış hali görülmektedir. Sistemde kullanılan ve PWM üreten blokların her biri farklı doluluk oranında çalışmaktadır. Pasif dengeleme için doluluk oranı %5 değerinde, aktif dengeleme için %70 değerinde belirlenmiştir. Pasif dengeleme devresinde daha küçük bir doluluk oranı seçilmesi, dirençler üzerindeki enerji kaybını minimum düzeyde tutmak için belirlenmiştir. Aktif dengeleme devresinde ise mümkün olduğunca enerji transferini yapabilmek için anahtarlama elemanlarına %70 değerinde bir doluluk oranı verilmiştir.



Şekil 6.21 Kapasitör tabanlı aktif dengeleme devresi kontrol bloğu alt sistemi

Şekil 6.21'da hibrit dengeleme sisteminin bir parçası olan aktif dengeleme sisteminin kontrol algoritmasının simulink/stateflow ile tasarımı görülmektedir. Sistem temel olarak üç adet kapasitif birime PWM sinyalleri göndermek için tasarlanmıştır. Algoritma çalışmaya başladığında UNIT1 bloğu aktif olur ve Modül 1 ve Modül 2 gerilimleri karşılaştırılarak mutlak değeri alınır. Gerilim farkı dU eşik değerinden büyük ise dengeleme durum bloğuna girer, dengeleme durum bloğu içerisinde hangi modülün geriliminin büyük olduğunu belirlemek için sıfır değeri ile karşılaştırma yapılır. Örneğin Modül 1 gerilim değerinin büyük olduğu düşünülürse logic_1U değeri lojik-1 yapılarak Modül 1 ve Modül 2 arasında bulunan kapasitif birim içerisindeki anahtarlama elemanları tetiklenerek boş halde bulunan kapasitörün modül 1 ile paralel bağlanması sağlanır. Modül 1 üzerindeki fazla enerji kapasitöre aktarılır, eğer Modül 2 gerilim değerinin büyük olduğu düşünülürse logic_1D değeri lojik-1 yapılarak kapasitörün Modül 2'ye paralel bağlanması sağlanır ve Modül 2 fazla enerjisini kapasitöre aktarır. Kapasitöre aktarılan fazla enerji modüller arasında gerilim farkı olması durumunda dengelemek için dolu tutulur. Herhangi bir modül geriliminde azalma olduğunda kapasitör tekrar paralel bağlanarak modülün şarj edilmesini sağlar.

6.6 Simülasyon Sonuçları ve Tartışma

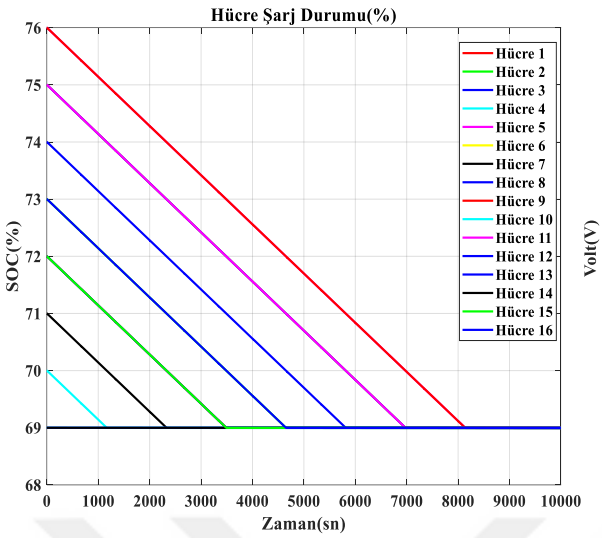
Bu kısımda, tasarımı yapılan pasif ve hibrit dengeleme modellerinin aynı batarya paketi üzerindeki etkileri incelenerek simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Pasif ve hibrit dengeleme modellerinde Tablo 6.2'de verilen dört dengesizlik durumu için ayrı ayrı dengeleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Dengeleme işlemleri sırasında hücre şarj durumları, hücre voltajları, hücre akımları, modül gerilimleri, her bir modüle ait enerji kaybı ve batarya paketindeki toplam enerji kaybı gösterilmiştir.

Tablo 6.2 Hücreler arası dengesizliği gösteren dört adet durum

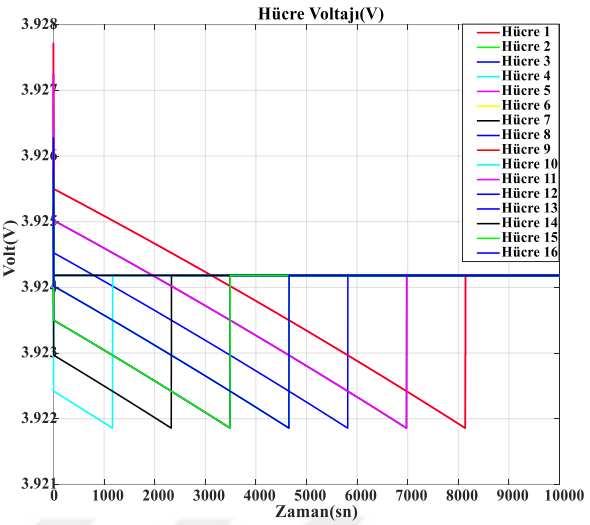
Hücreler	Durum 1 SOC(%)	Durum 2 SOC(%)	Durum 3 SOC(%)	Durum 4 SOC(%)	Modül i
Hücre1	72	45	90	90	Modül 1
Hücre2	73	80	89	89	
Hücre3	74	75	88	88	
Hücre4	70	70	87	87	
Hücre5	76	65	86	87	Modül 2
Hücre6	75	60	85	88	
Hücre7	71	75	84	89	
Hücre8	75	50	83	90	
Hücre9	76	65	82	90	Modül 3
Hücre10	69	10	81	87	
Hücre11	75	35	80	89	
Hücre12	69	85	79	88	
Hücre13	72	25	78	88	Modül 4
Hücre14	69	50	77	87	
Hücre15	72	15	76	89	
Hücre16	73	70	75	90	

6.6.1 Pasif Dengeleme Simülasyon Sonuçları

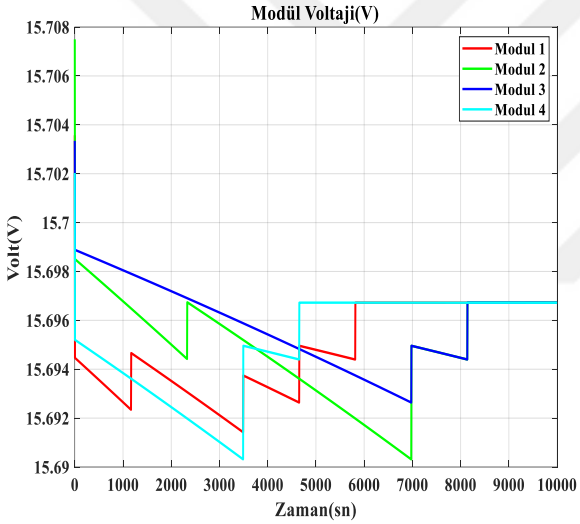
Pasif dengeleme modelinde Tablo 6.2'de gösterilen dört adet dengesizlik durumu model üzerinde test edilmiştir. Pasif dengeleme yapılırken şarj durumu küçük olan hücre tespit edilir ve diğer hücrelerin enerjileri en küçük enerjiye sahip hücreye eşit olana kadar fazla enerjileri direnç vasıtasıyla ısıya dönüştürülerek hücre şarj durumları eşitleninceye kadar dengeleme işlemi devam eder. Dengeleme işlemi batarya şarj edilmeden önce yapılarak hücrelerin hepsi aynı şarj durumuna geldikten sonra şarj işlemi başlatılır. Tablo 6.2'de gösterilen dengesizlik durumları; durum 1, durum 2, durum 3 ve durum 4 için Şekil 6.22-Şekil 6.45 ile verilen simülasyon sonuçları, pasif dengeleme sisteminde hücre şarj durumu, hücre voltajı, modül voltajı, hücre akımları, modül enerji kayıpları ve toplam enerji kayıplarını göstermektedir.



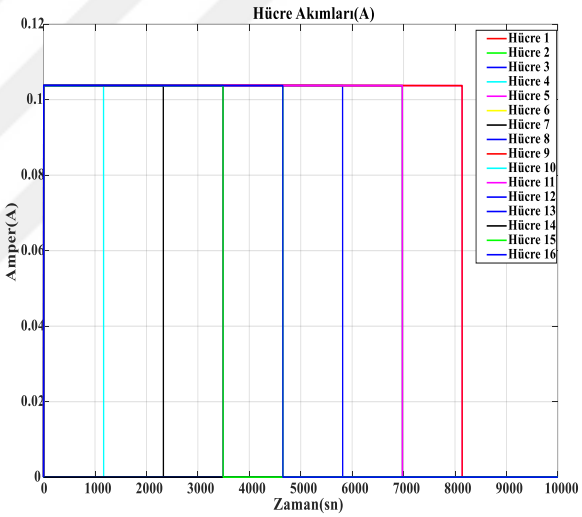
Şekil 6.22 Pasif dengeleme grafikleri (1. durum)



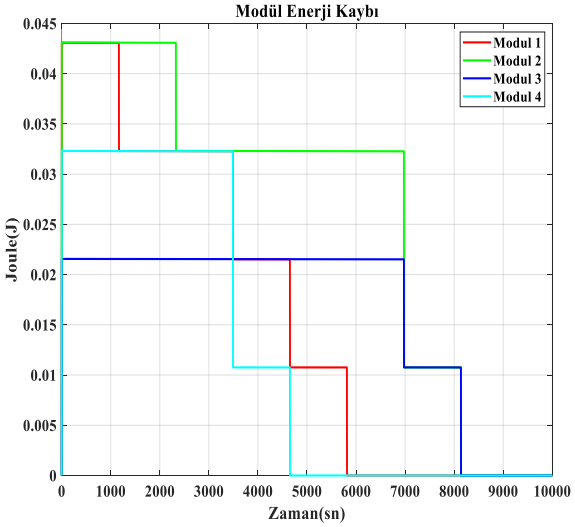
Şekil 6.23 Pasif dengeleme grafikleri (1. durum)



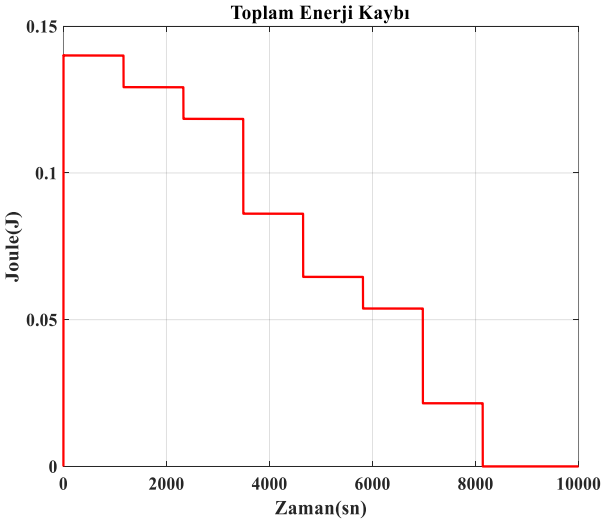
Şekil 6.24 Pasif dengeleme grafikleri (1. durum)



Şekil 6.25 Pasif dengeleme grafikleri (1. durum)

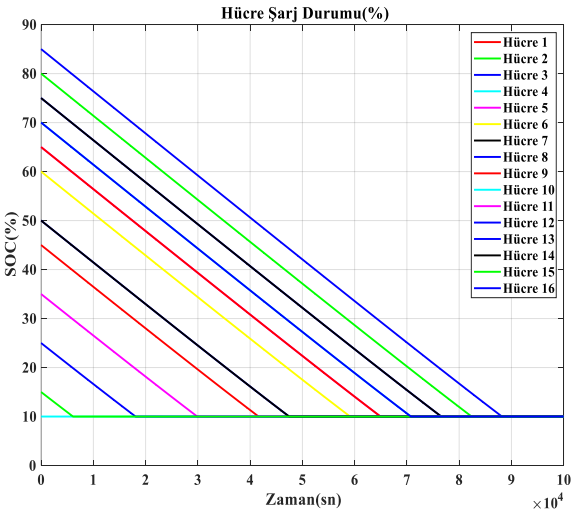


Şekil 6.26 Pasif dengeleme grafikleri (1. durum)

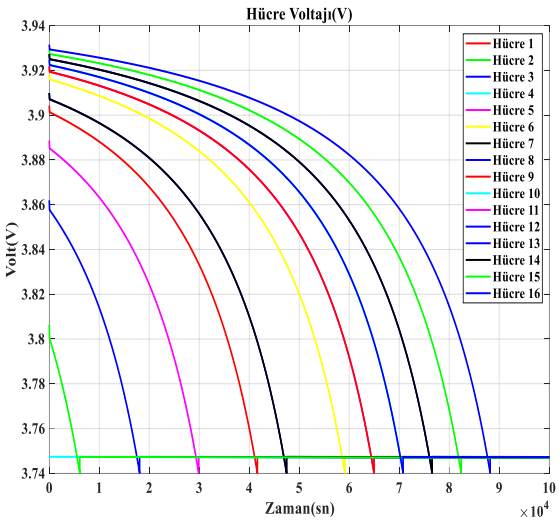


Şekil 6.27 Pasif dengeleme grafikleri (1. durum)

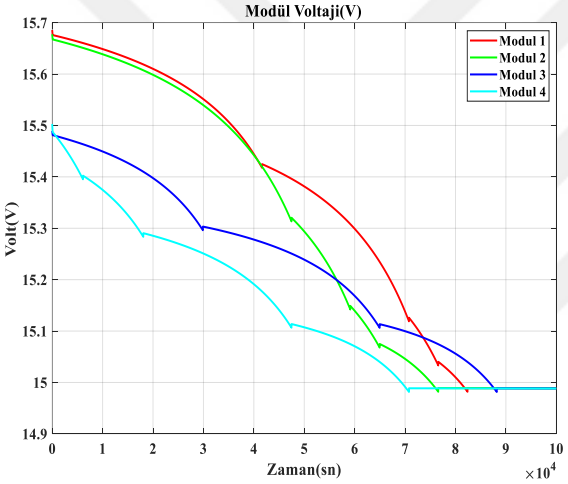
Şekil 6.22-Şekil 6.27 ile verilen simülasyon sonuçları 1. durum için pasif dengeleme sisteminde sırasıyla hücre şarj durumu, hücre voltajı, modül voltajı, hücre akımları, modül enerji kayıpları ve toplam enerji kayıplarını göstermektedir. Birinci duruma bakıldığında en yüksek SOC değerinin %76, en düşük SOC değerinin %69 olduğu görülüyor ve toplamda batarya paketi içerisindeki hücreler arasındaki maksimum SOC farkının %7 olduğu görülüyor. Pasif dengeleme algoritması, her hücre üzerindeki fazla SOC değerini ısıya dönüştürmek için hücrelere paralel bağlı anahtarlama elemanını aktifleştirir ve hücre SOC'leri %69 değerine ulaşıncaya kadar anahtarlar iletimde kalır. Dengeleme işlemi bittiğinde anahtarlar açılır ve enerji kaybı önlenir. Şekil 6.23'de gösterilen hücre gerilimleri grafiği SOC değeri düşük olan hücrelerin hücre gerilimlerinin de düşük olduğunu görülmektedir ve SOC değerleri eşitlendiğinde gerilimlerinde eşit olduğu görülüyor. Modül seviyesine bakıldığında benzer bir şekilde gerilim değerleri SOC değerlerinin eşit olmasıyla birlikte eşitleniyor. Enerji kaybı açısından bakıldığında direnç üzerinden ısıya dönüştürülen enerjinin SOC farkının yüksek olması ile büyük bir ilişkisinin olduğu açık bir şekilde görülüyor. Modüller için enerji kayıpları incelendiğinde Modül 2 en yüksek enerji kaybına sahip modül olarak karşımıza çıkıyor, bunun sebebi olarak Modül 2 içerisinde bulunan hücrelerin SOC değerlerinin yüksek olması ve en düşük SOC ye sahip hücreye eşitlemek için çok fazla enerjinin direnç üzerinden ısıya dönüşmesidir. Dengeleme işlemi sırasında kullanılan direncin 30 ohm değerinde olması dengeleme süresinin artmasına sebep olmuştur. Ancak literatür taraması sonuçları ve piyasa araştırmaları sonucu 30 ohm değerinin en ideal dengeleme direnci değeri olduğu belirlenmiştir. Dengeleme süresi dirençten bağımsız olarak SOC farkının artmasına bağlı olarak da artış gösterir. Farklı durumlarda yapılan test sonuçları bunu doğrulamıştır.



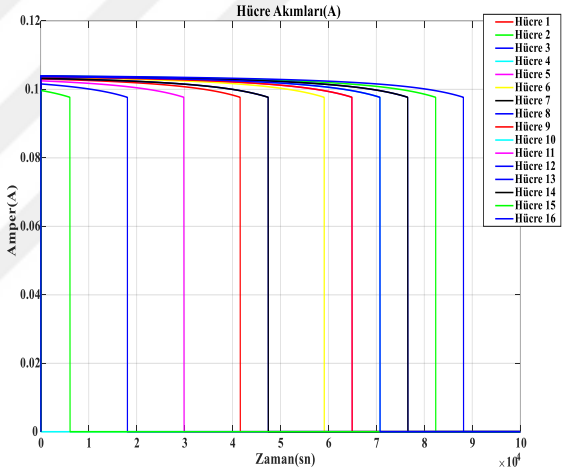
Şekil 6.28 Pasif dengeleme grafikleri (2. durum)



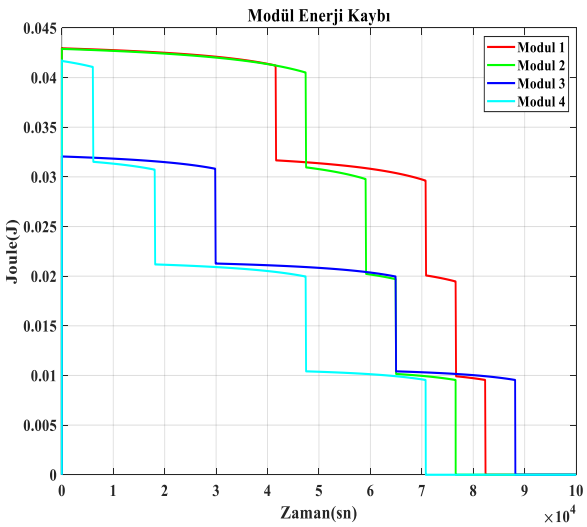
Şekil 6.29 Pasif dengeleme grafikleri (2. durum)



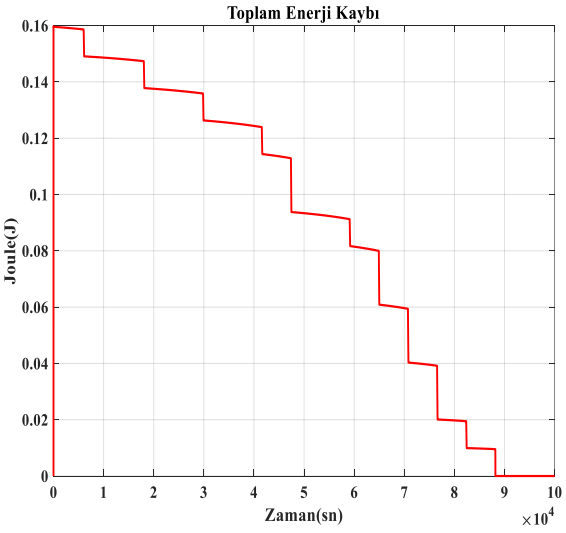
Şekil 6.30 Pasif dengeleme grafikleri (2. durum)



Şekil 6.31 Pasif dengeleme grafikleri (2. durum)

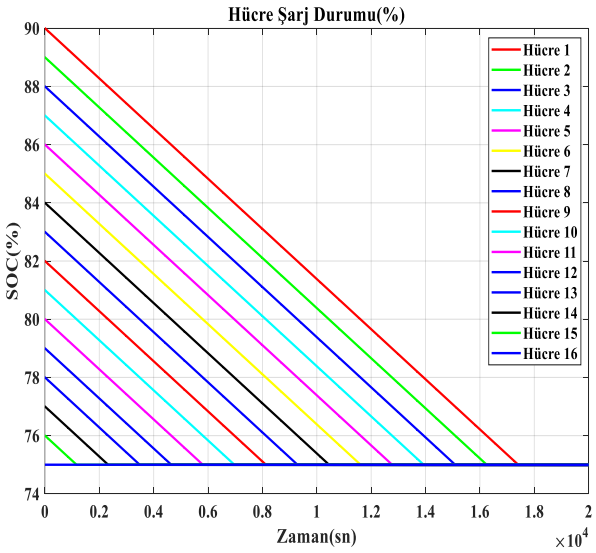


Şekil 6.32 Pasif dengeleme grafikleri (2. durum)

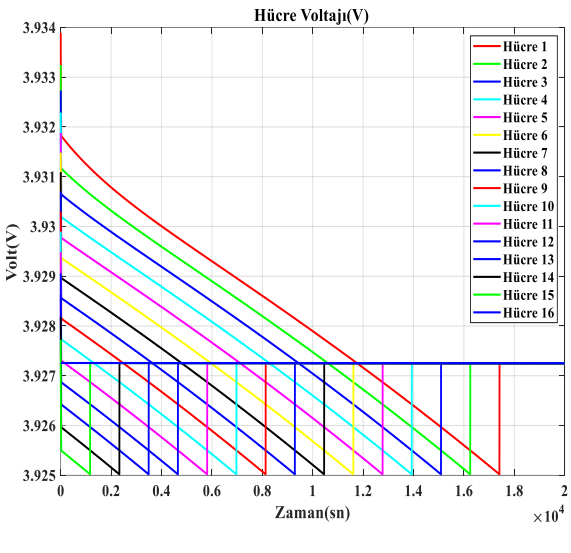


Şekil 6.33 Pasif dengeleme grafikleri (2. durum)

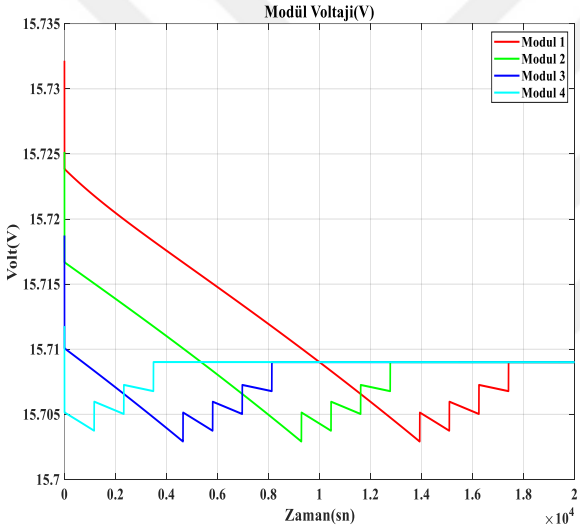
Şekil 6.28-Şekil 6.33 ile verilen simülasyon sonuçları 2. durum için pasif dengeleme sisteminde sırasıyla hücre şarj durumu, hücre voltajı, modül voltajı, hücre akımları, modül enerji kayıpları ve toplam enerji kayıplarını göstermektedir. Durum iki için simülasyon sonuçları incelendiğinde; en yüksek SOC değerinin %85, en düşük SOC değerinin %15 olduğu görülüyor. Hücreler arası maksimum SOC farkı %60 olarak dengeleme işlemi başlatılmıştır. Simülasyon sonuçlarından ilk göze çarpan dengeleme süresindeki artış olmuştur. Birinci duruma göre SOC farkının fazla olması dengeleme süresini ciddi boyutlarda arttırmıştır. Hücre gerilimleri zamana bağlı olarak parabolik bir düşüş göstererek en düşük SOC ye sahip hücrenin gerilim değerine eşitlenmiştir. Enerji kayıplarına bakıldığında SOC farkının fazla olması direnç üzerinden ısıya dönüştürülen enerjinin çok fazla olmasına sebep olmuş ve neredeyse bataryanın bütün enerjisi ısı olarak açığa çıkmıştır. Bu durum batarya üzerindeki ısının artmasına ve hücreler arası termal dengesizliklere de yol açabilir.



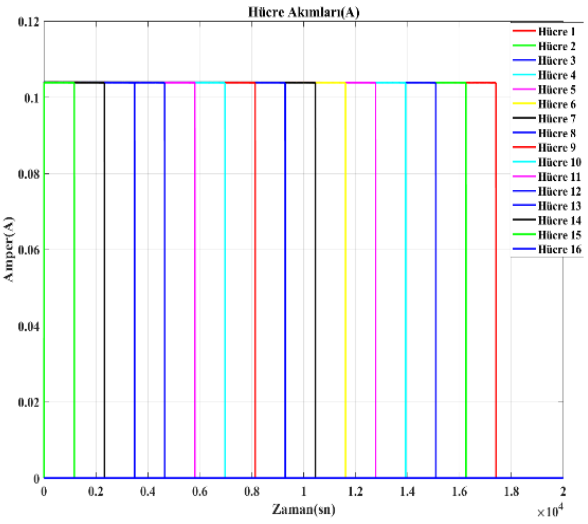
Şekil 6.34 Pasif dengeleme grafikleri (3. durum)



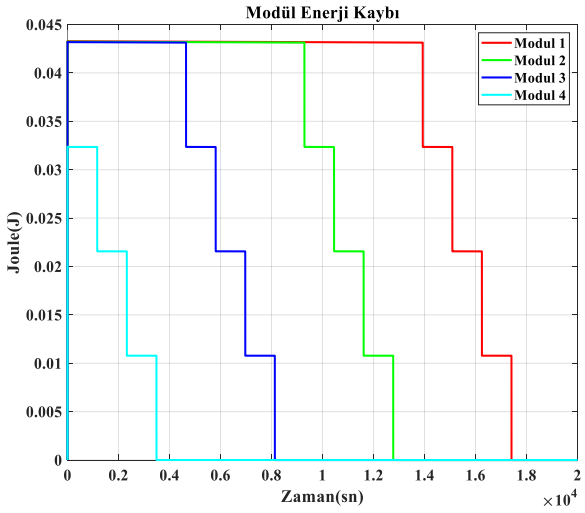
Şekil 6.35 Pasif dengeleme grafikleri (3. durum)



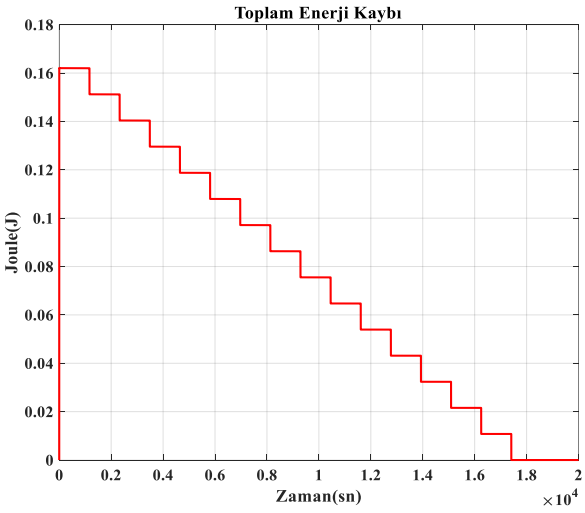
Şekil 6.36 Pasif dengeleme grafikleri (3. durum)



Şekil 6.37 Pasif dengeleme grafikleri (3. durum)



Şekil 6.38 Pasif dengeleme grafikleri (3. durum)

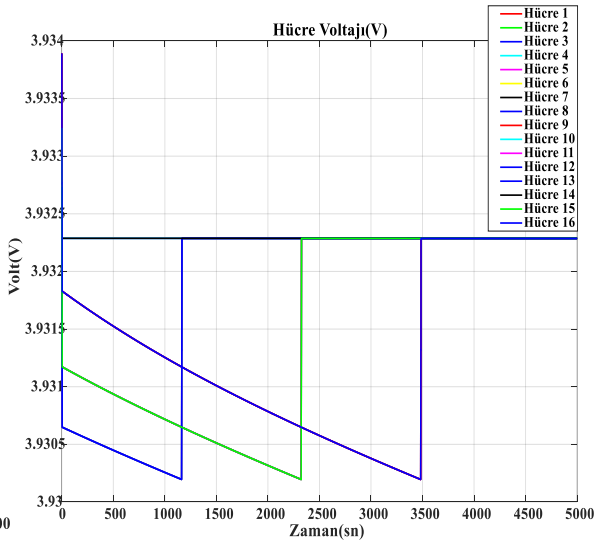


Şekil 6.39 Pasif dengeleme grafikleri (3. durum)

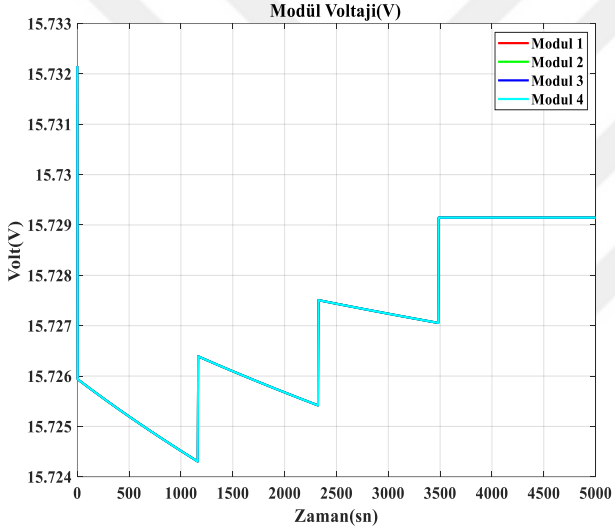
Şekil 6.34-Şekil 6.39 ile verilen simülasyon sonuçları 3. durum için pasif dengeleme sisteminde sırasıyla hücre şarj durumu, hücre voltajı, modül voltajı, hücre akımları, modül enerji kayıpları ve toplam enerji kayıplarını göstermektedir. Durum üç için simülasyon sonuçları incelendiğinde; en yüksek SOC değerinin %90, en düşük SOC değerinin %75 olduğu görülüyor. Hücreler arası maksimum SOC farkı %15 olarak dengeleme işlemi başlatılmıştır. Simülasyon sonuçlarına bakıldığında dengeleme süresinin durum 2'den daha düşük ancak durum 1'den daha yüksek olduğu görülüyor, dengeleme süresinin uzaması maksimum SOC farklarının her durum için farklı olmasından kaynaklanıyor. Hücre gerilimlerinin en düşük SOC değerine sahip hücre gerilimine eşitlendiği görülüyor. Enerji kayıplarına bakıldığında SOC farkının durum 2 ye göre düşük olması toplam enerji kaybı grafiğinde altta kalan alanın durum 2 ye göre daha az olduğunu gösteriyor.



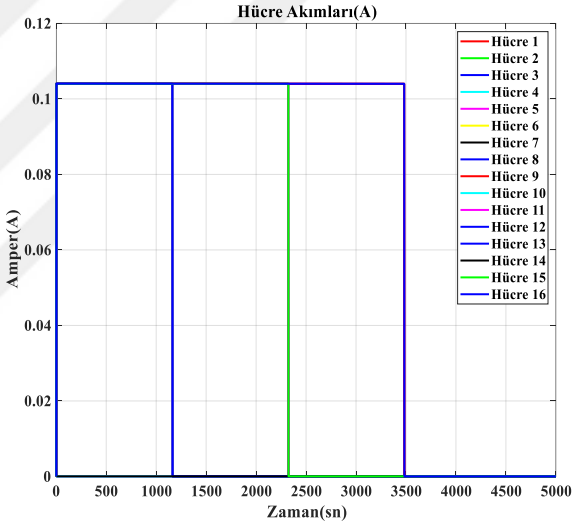
Şekil 6.40 Pasif dengeleme grafikleri (4. durum)



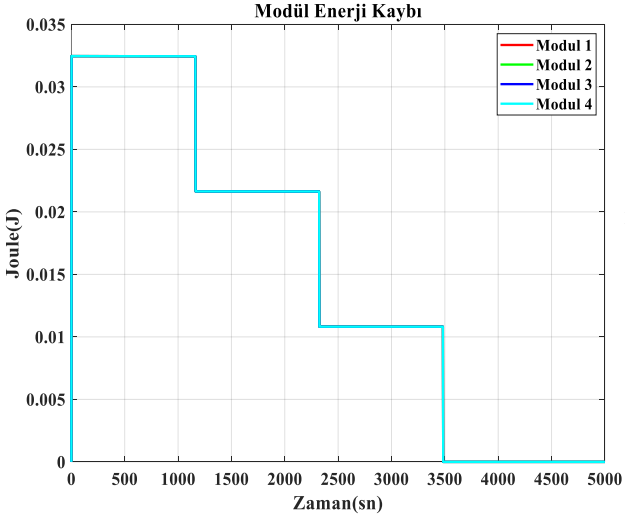
Şekil 6.41 Pasif dengeleme grafikleri (4. durum)



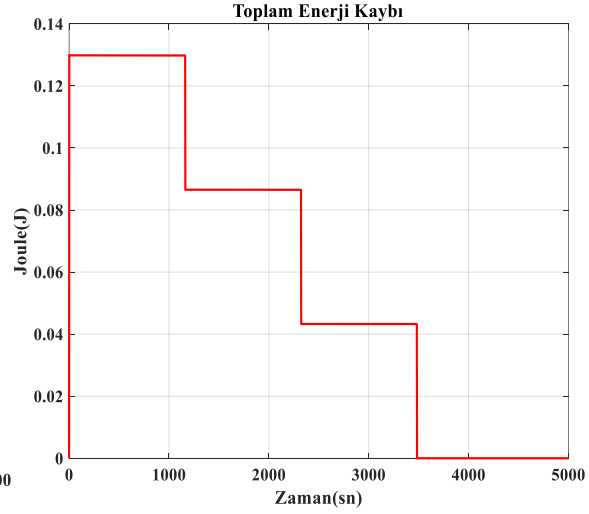
Şekil 6.42 Pasif dengeleme grafikleri (4. durum)



Şekil 6.43 Pasif dengeleme grafikleri (4. durum)



Şekil 6.44 Pasif dengeleme grafikleri (4. durum)

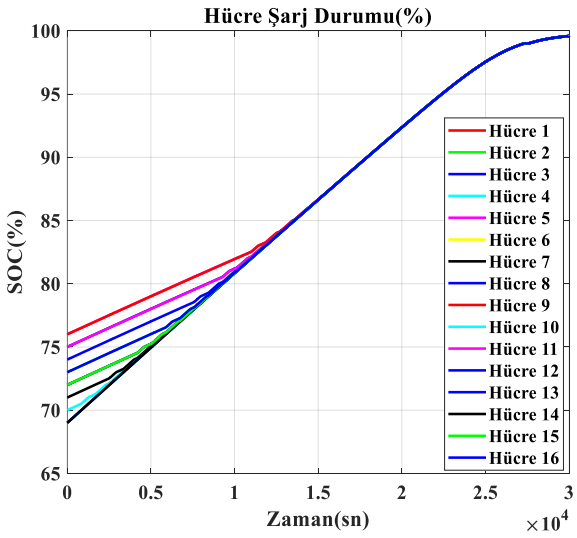


Şekil 6.45 Pasif dengeleme grafikleri (4. durum)

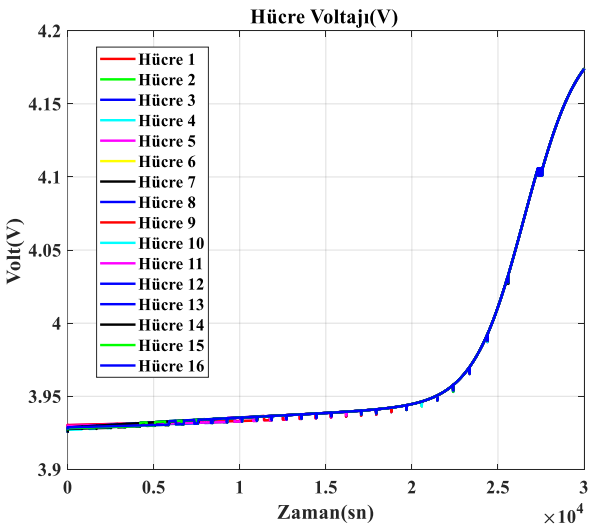
Şekil 6.40-Şekil 6.45 ile verilen simülasyon sonuçları 4. durum için pasif dengeleme sisteminde sırasıyla hücre şarj durumu, hücre voltajı, modül voltajı, hücre akımları, modül enerji kayıpları ve toplam enerji kayıplarını göstermektedir. Durum dört için simülasyon sonuçları incelendiğinde; en yüksek SOC değerinin %90, en düşük SOC değerinin %87 olduğu görülüyor. Hücreler arası maksimum SOC farkı %3 olarak dengeleme işlemi başlatılmıştır. Simülasyon sonuçlarına bakıldığında dengeleme süresinin diğer durumlardan daha kısa olduğu görülüyor, dengeleme süresinin kısa olması hücreler arası maksimum SOC farkının %3 olmasından kaynaklanıyor. Hücre gerilimleri diğer durumlar ile aynı şekilde minimum SOC ye sahip hücrenin geriliminde eşitleniyor. Modül gerilimlerine bakıldığında neredeyse dört modülün geriliminin birbirine eşit olduğu görülüyor, bunun sebebi her modül içerisinde bulunan maksimum SOC farkının %3 değerine çok yakın olmasıdır. Bu yüzden modüllerin enerji kayıplarının birbirine eşit olduğu görülüyor. Toplam enerji kaybı ise diğer durumlara oranla daha az olarak gözlemleniyor. Pasif dengeleme işlemindeki istenmeyen bir durum olan enerji kaybı bataryanın termal dengesini bozabilir ve enerji maliyetlerinin ciddi oranda artmasına sebep olabilir. Simülasyon sonuçları arasında durum dört, en düşük enerji kaybının olduğu durum olarak karşımıza çıkıyor

6.6.2 Hibrit Dengeleme Simülasyon Sonuçları

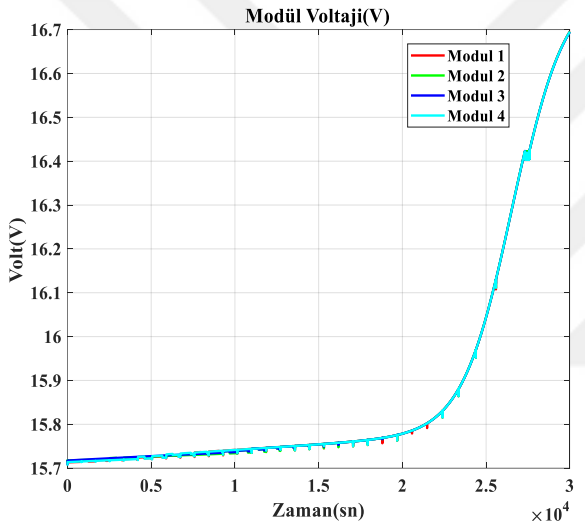
Tasarımı yapılan hibrit dengeleme modeli, pasif dengeleme ve aktif dengelemenin bir arada kullanıldığı bir yapıdır. Modül seviyesinde kapasitör tabanlı aktif dengeleme ve hücre seviyesinde pasif dengeleme uygulanmıştır. Dengeleme bataryanın şarj olduğu esnada uygulanmıştır ve batarya kapasitesi tam dolu hale gelene kadar şarj işlemi devam etmiştir. Tablo 6.2'de gösterilen dengesizlik durumları; durum 1, durum 2, durum 3 ve durum 4 için Şekil 6.46-Şekil 6.69 ile verilen simülasyon sonuçları, hibrit dengeleme sisteminde hücre şarj durumu, hücre voltajı, modül voltajı, hücre akımları, modül enerji kayıpları ve toplam enerji kayıplarının göstermektedir. Şekil 6.70-Şekil 6.77 ise hibrit dengeleme sisteminde dört durum için deşarj grafiklerini göstermektedir. Aynı zamanda sistemin stabil çalıştığını göstermek için modül ve yük arasında oluşan gerilim dalgalanmalarını gösteren simülasyon sonuçları Şekil 6.79 – Şekil 6.82 ile gösterilmiştir.



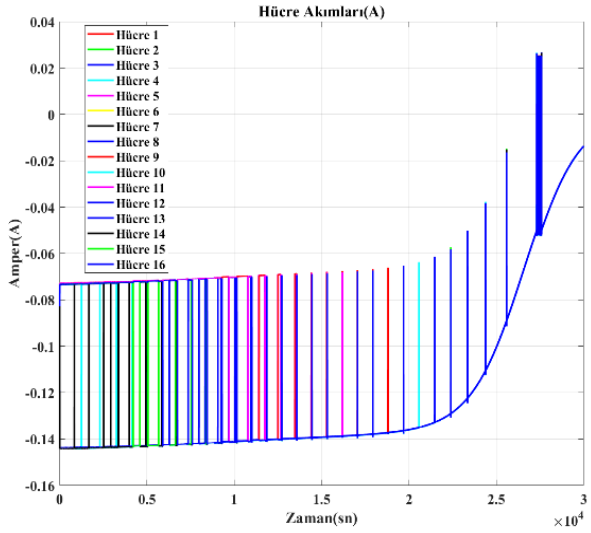
Şekil 6.46 Hibrit dengeleme grafikleri (1. durum)



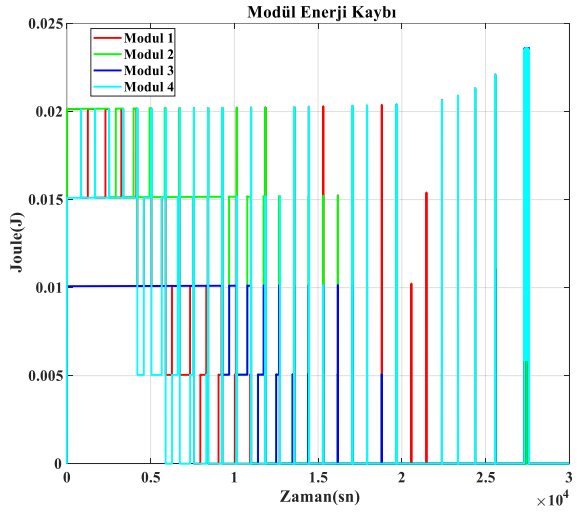
Şekil 6.47 Hibrit dengeleme grafikleri (1. durum)



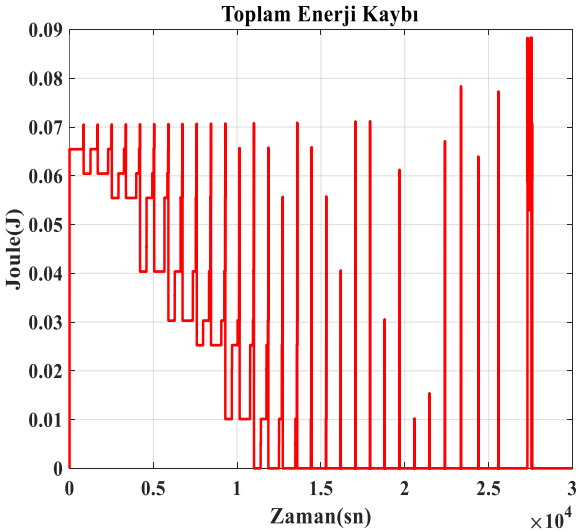
Şekil 6.48 Hibrit dengeleme grafikleri (1. durum)



Şekil 6.49 Hibrit dengeleme grafikleri (1. durum)

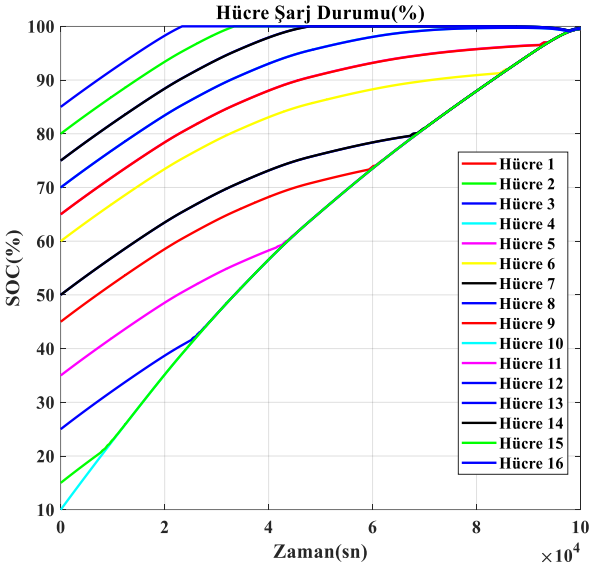


Şekil 6.50 Hibrit dengeleme grafikleri (1. durum)

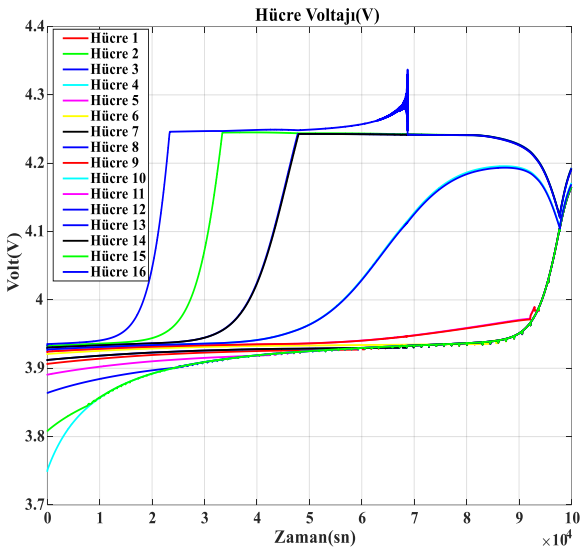


Şekil 6.51 Hibrit dengeleme grafikleri (1. durum)

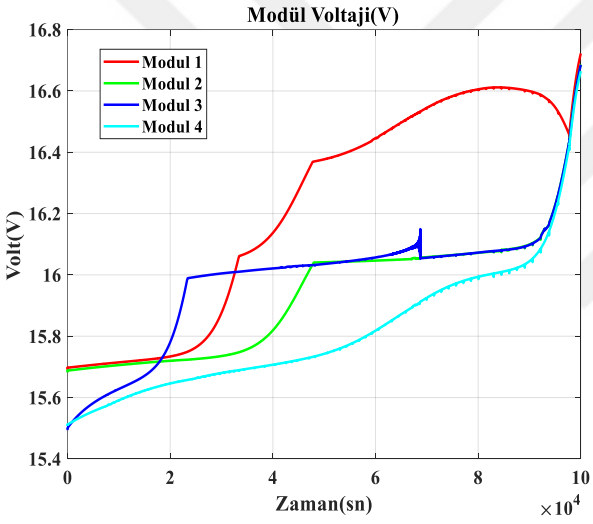
Şekil 6.46-Şekil 6.51 ile verilen simülasyon sonuçları 1. durum için hibrit dengeleme sisteminde sırasıyla hücre şarj durumu, hücre voltajı, modül voltajı, hücre akımları, modül enerji kayıpları ve toplam enerji kayıplarını göstermektedir. Birinci durum için simülasyon sonuçları incelendiğinde en yüksek SOC değerinin %76, en küçük SOC değerinin ise %69 olduğu görülmektedir. Batarya şarj edilmeye başlandığında modül içerisindeki hücreler aşırı şarj olma durumundan kaçınmak için hücrelere paralel bağlı anahtarları açıp kapatarak hücre SOC değerlerinin belirli bir noktada eşitlenmesini sağlar, modüller içerisindeki hücrelerde bu işlemler olurken modül düzeyinde ise kapasitörler aracılığıyla fazla enerjinin bir modülden başka bir modüle aktarılması sağlanır. Aynı zamanda modül düzeyinde uygulanan kapasitör tabanlı dengeleme sistemi, modüllerin gerilim değerlerini sürekli olarak aynı değerde tutmaya çalışır. Simülasyon sonucuna bakıldığında hücre şarj durumlarının %83 gibi bir değerde birbirilerine eşitlenip şarj işlemine devam ediliyor. Hücre gerilimlerine bakıldığında, başlangıçta ufak gerilim farkları olsa da hücrelerin SOC' lerinin eşitlendiği yerde gerilimlerinde eşitlendiği görülüyor. Hücre akımlarına bakıldığında, şarj işlemi gerçekleştiği için başlangıçta eksi değerlerde gözüküyor daha sonra hücre şarj durumları %100 seviyelerine geldiğinde akımın pozitif değerlere çıktığı görülüyor. Modüller üzerindeki enerji kayıplarına bakıldığında, dengeleme süresi içerisinde enerji kayıplarının olduğu görülüyor ancak 1. durum için pasif dengeleme ile kıyaslandığında enerji kayıplarının oldukça düştüğü gözlemlenir. Dengeleme süresinden sonra oluşan iğne palsi şeklindeki enerji kayıpları anahtarlama işlemi sırasında gerçekleşen kayıplardır. Batarya %100 dolduktan sonra oluşan kayıplar ise, bataryayı aşırı şarjdan önlemek için şarj cihazından gelen enerjinin direnç üzerinden doğrudan ısıya dönüştürülmesinden dolayı oluşan kayıplardır. Sistemin bu şekilde tasarlanmasının amacı, hücre düzeyince oluşabilecek enerji kayıplarının çok düşük olmasından dolayı direnç üzerinden ısıya dönüştürülmesi ve modül düzeyinde uygulanan sistemin ise modül düzeyindeki yüksek enerji kayıplarının bir modülden başka bir modüle transfer edilerek hücreleri beslemesi sağlanmıştır. Batarya %100 doluluk oranına ulaştığında şarj cihazının bataryadan ayrılması gerekir, bunun için uyarı sistemleri geliştirilmiştir.



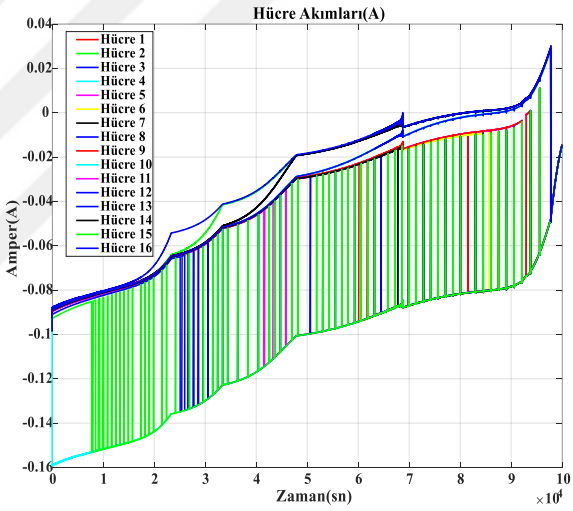
Şekil 6.52 Hibrit dengeleme grafikleri (2. durum)



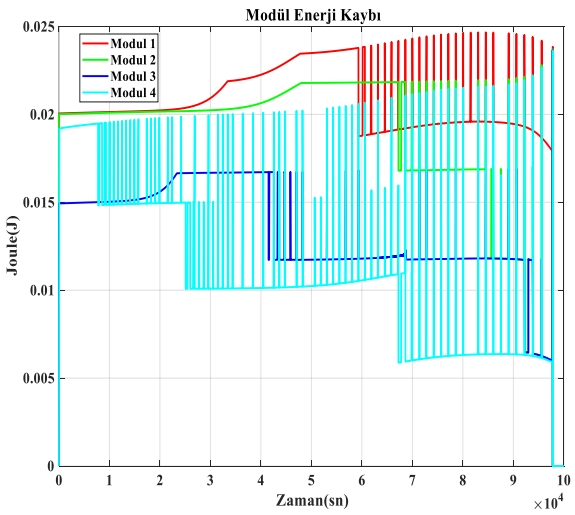
Şekil 6.53 Hibrit dengeleme grafikleri (2. durum)



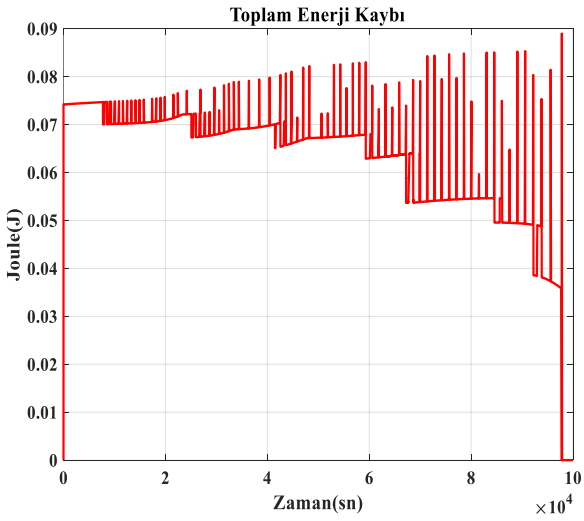
Şekil 6.54 Hibrit dengeleme grafikleri (2. durum)



Şekil 6.55 Hibrit dengeleme grafikleri (2. durum)

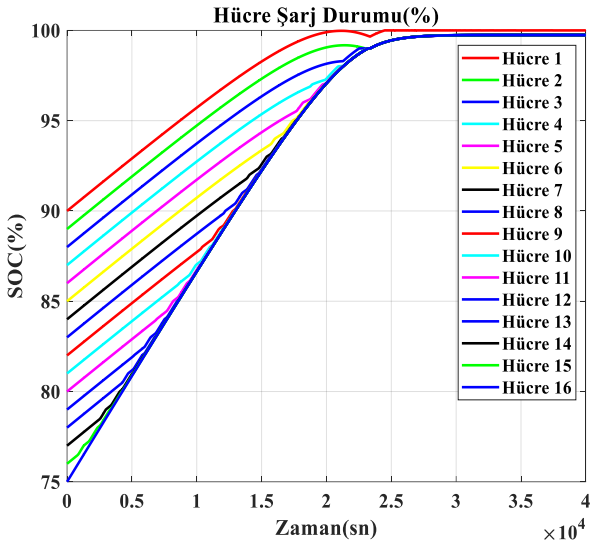


Şekil 6.56 Hibrit dengeleme grafikleri (2. durum)

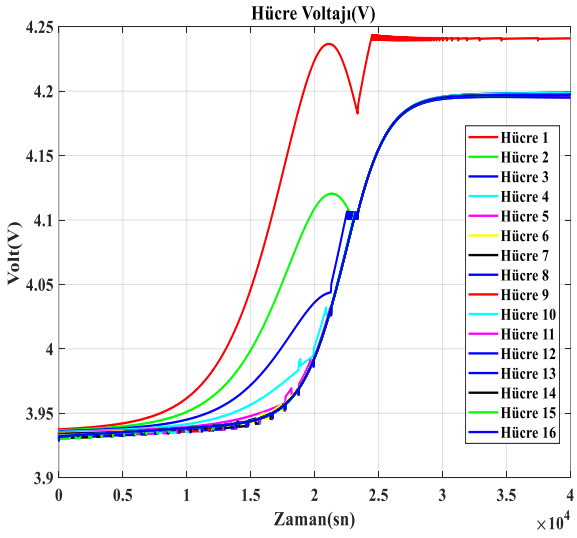


Şekil 6.57 Hibrit dengeleme grafikleri (2. durum)

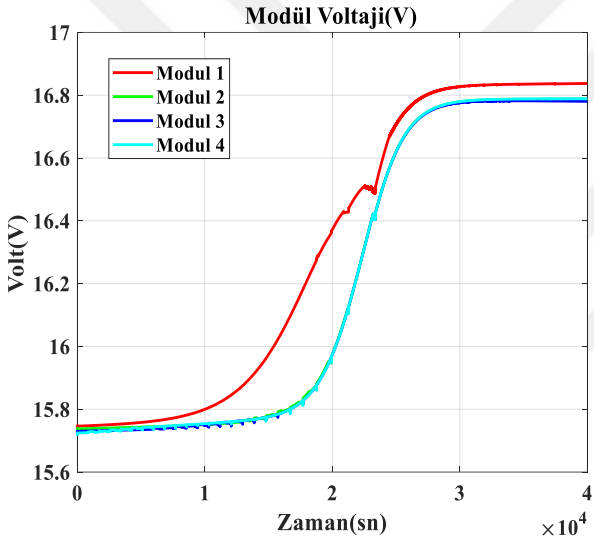
Şekil 6.52-Şekil 6.57 ile verilen simülasyon sonuçları 2. durum için hibrit dengeleme sisteminde sırasıyla hücre şarj durumu, hücre voltajı, modül voltajı, hücre akımları, modül enerji kayıpları ve toplam enerji kayıplarını göstermektedir. İkinci durum için simülasyon sonuçları incelendiğinde, göze ilk çarpan kısmın dengeleme süresindeki artış oluyor. Dengeleme süresindeki bu artışın temel sebebi; hücreler arası maksimum SOC farkının çok yüksek olmasından kaynaklanıyor. Hücre şarj durumlarına bakıldığında en düşük SOC değerinin %15 ve en büyük SOC değerinin ise %85 olduğu görülüyor. Maksimum SOC farkı %60 olduğundan dolayı dengeleme süresi ciddi oranda artış göstermiştir. Hücre gerilimlerine bakıldığında bazı hücrelerin 4.2 V değerini biraz aştığı görülüyor. Bu durum, başlangıç SOC değeri yüksek olan hücrelerin ilk olarak %100 SOC değerine ulaşması durumundan kaynaklanıyor. Bu esnada pasif dengeleme algoritması devreye girerek anahtarlama elemanlarına sinyal gönderip fazla enerjiyi direnç üzerinden ısıya dönüştürüyor. Modül seviyesinde aktif dengeleme için oluşturulan algoritma fazla enerjiyi kapasitör yardımıyla başka modüllere aktarma işlemi yaparken asıl gerçekleştirdiği işlem modül gerilimlerini eşitlemektir. Her bir modülün gerilim değerlerinin eşitlenmesi modül gerilimlerinin olduğu simülasyon sonucunda görülüyor. Bütün hücrelerin SOC değerlerinin %100 değerine ulaşmadan önce gerilim değerlerinin modül seviyesindeki aktif dengeleme algoritması sayesinde eşitlendiği görülüyor. Modül seviyesindeki enerji kayıplarına bakıldığında kapasitörlerin pasif dengeleme sırasında açığa çıkan enerjinin büyük bir çoğunluğunu sisteme kazandırdığı açık bir şekilde görülebiliyor. Toplam enerji kaybının pasif dengeleme durumuna göre ciddi oranda azaldığı görülüyor.



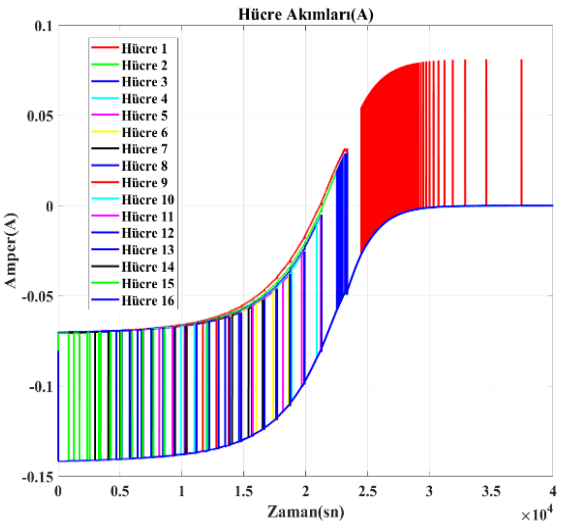
Şekil 6.58 Hibrit dengeleme grafikleri (3. durum)



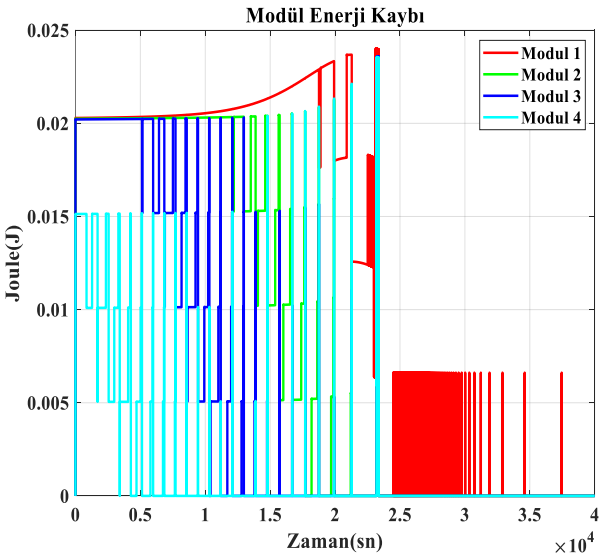
Şekil 6.59 Hibrit dengeleme grafikleri (3. durum)



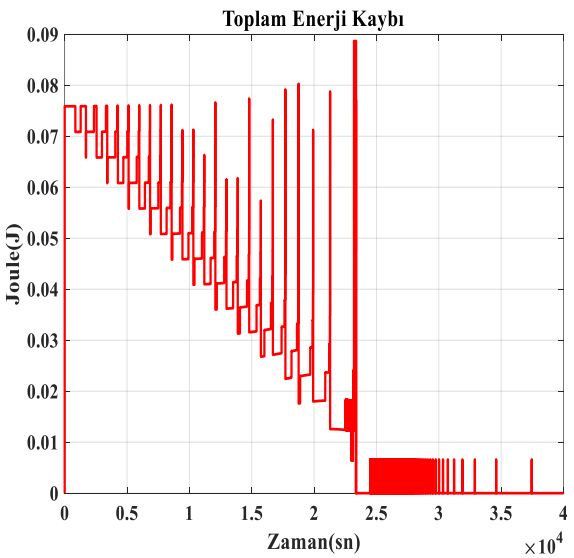
Şekil 6.60 Hibrit dengeleme grafikleri (3. durum)



Şekil 6.61 Hibrit dengeleme grafikleri (3. durum)

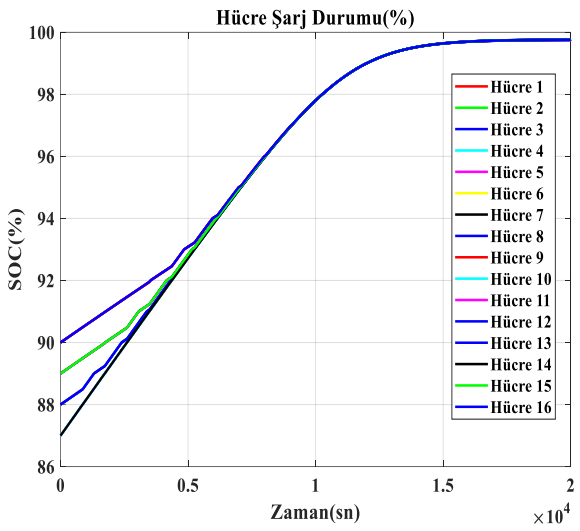


Şekil 6.62 Hibrit dengeleme grafikleri (3. durum)

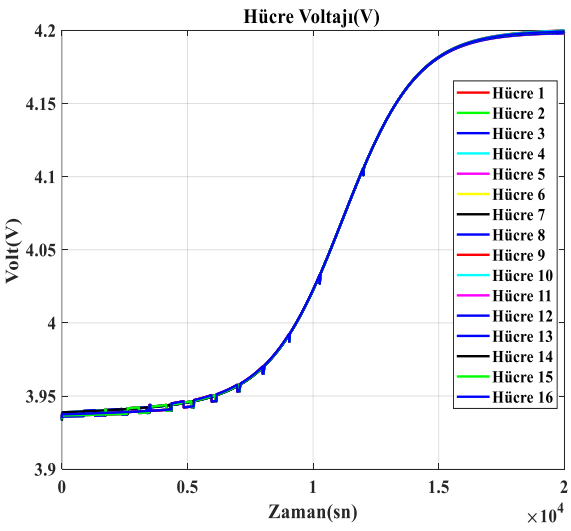


Şekil 6.63 Hibrit dengeleme grafikleri (3. durum)

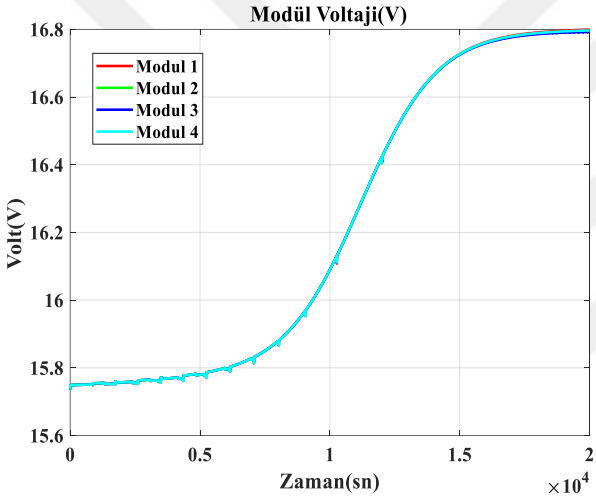
Şekil 6.58-Şekil 6.63 ile verilen simülasyon sonuçları 3. durum için hibrit dengeleme sisteminde sırasıyla hücre şarj durumu, hücre voltajı, modül voltajı, hücre akımları, modül enerji kayıpları ve toplam enerji kayıplarını göstermektedir. Üçüncü durum için simülasyon sonuçları incelendiğinde dengeleme süresi ilk baktığımız kısım oluyor ve bir artış olduğu gözleniyor. Dengeleme süresindeki bu artışın temel sebebi; hücreler arası maksimum SOC farkının yüksek olmasından kaynaklanıyor. Hücre şarj durumlarına bakıldığında en düşük SOC değerinin %75 ve en büyük SOC değerinin ise %90 olduğu görülüyor. Maksimum SOC farkı %15 olduğundan dolayı dengeleme süresinde bir artış gözlemlenmiştir. Hücre gerilimlerine bakıldığında bazı hücrelerin 4.25 V değerine yaklaştığı görülüyor. Bu durum, başlangıç SOC değeri yüksek olan hücrelerin ilk olarak %100 SOC değerine ulaşması durumundan kaynaklanıyor. Bu esnada pasif dengeleme algoritması devreye girerek anahtarlama elemanlarına sinyal gönderip fazla enerjiyi direnç üzerinden ısıya dönüştürüyor. Modül seviyesinde aktif dengeleme için oluşturulan algoritma fazla enerjiyi kapasitör yardımıyla başka modüllere aktarma işlemi yaparken asıl gerçekleştirdiği işlem modül gerilimlerini eşitlemektir. Her bir modülün gerilim değerlerinin eşitlenmesi modül gerilimlerinin olduğu simülasyon sonucunda görülüyor. Bütün hücrelerin SOC değerlerinin %100 değerine ulaşmadan önce gerilim değerlerinin modül seviyesindeki aktif dengeleme algoritması sayesinde eşitlendiği görülüyor. Modül seviyesindeki enerji kayıplarına bakıldığında kapasitörlerin pasif dengeleme sırasında açığa çıkan enerjinin büyük bir çoğunluğunu sisteme kazandırdığı açık bir şekilde görülebiliyor. Toplam enerji kaybının pasif dengeleme durumuna göre ciddi oranda azaldığı görülüyor. Hücre voltajlarının maksimum değere ulaştıktan sonra oluşan kayıplar şarj cihazının sistemden kaldırılmadığını gösteriyor. Çünkü maksimum SOC değerine ulaşan hücreler aşırı şarjdan korunmak için pasif dengeleme algoritması vasıtası ile anahtarlama elemanlarına sinyal göndererek iletime geçmesini sağlar ve fazla enerjinin dirençler üzerinden ısıya dönüştürülmesi sağlanır.



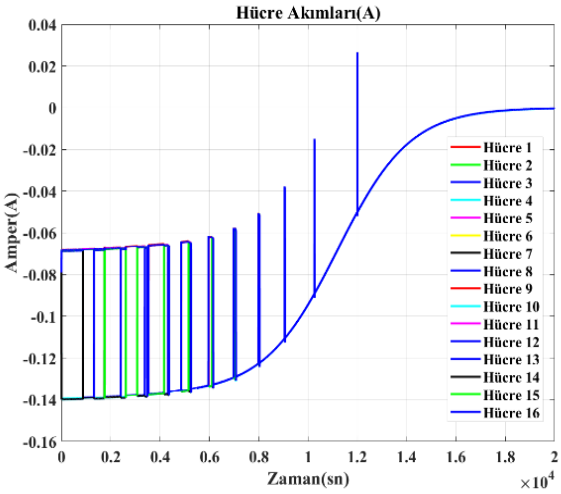
Şekil 6.64 Hibrit dengeleme grafikleri (4. durum)



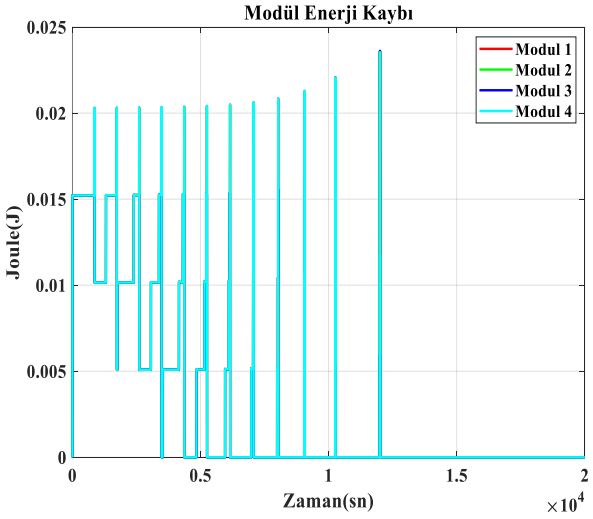
Şekil 6.65 Hibrit dengeleme grafikleri (4. durum)



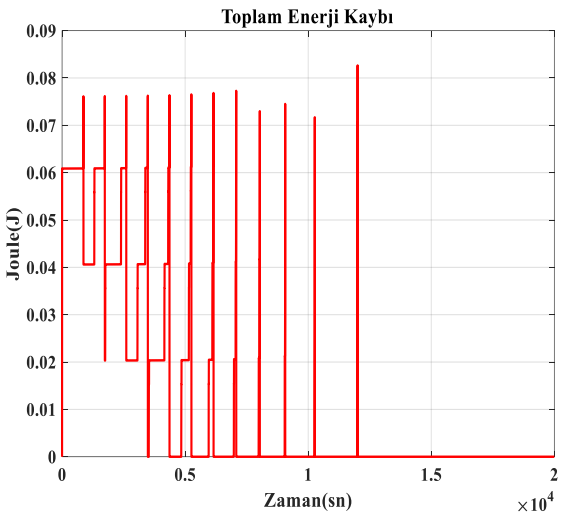
Şekil 6.66 Hibrit dengeleme grafikleri (4. durum)



Şekil 6.67 Hibrit dengeleme grafikleri (4. durum)

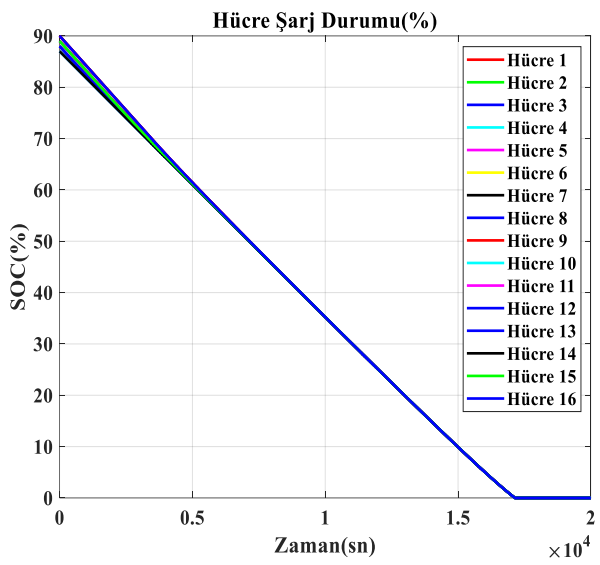


Şekil 6.68 Hibrit dengeleme grafikleri (4. durum)

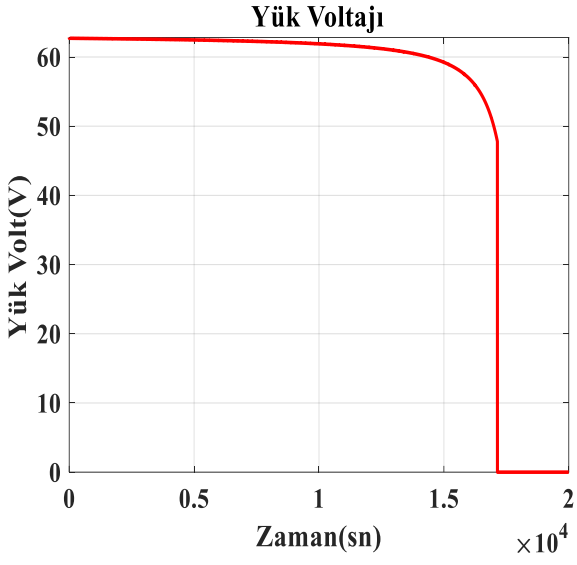


Şekil 6.69 Hibrit dengeleme grafikleri (4. durum)

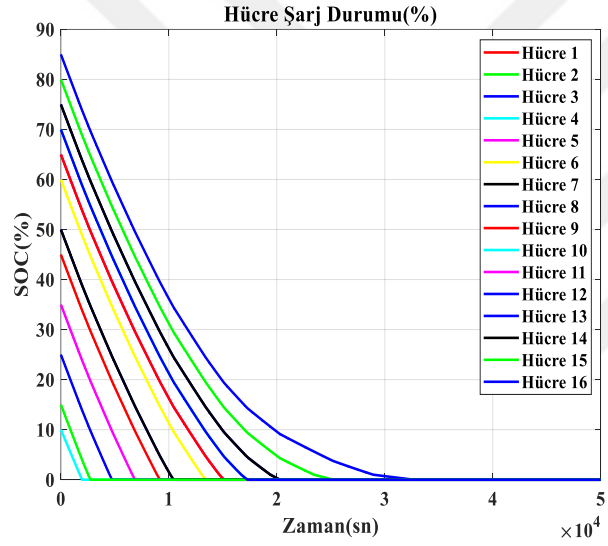
Şekil 6.64-Şekil 6.69 ile verilen simülasyon sonuçları 4. durum için hibrit dengeleme sisteminde sırasıyla hücre şarj durumu, hücre voltajı, modül voltajı, hücre akımları, modül enerji kayıpları ve toplam enerji kayıplarını göstermektedir. Dördüncü durum için simülasyon sonuçları incelendiğinde dengeleme süresinde diğer durumlara oranla ciddi bir azalma gözlenmiştir. Dengeleme süresindeki bu düşüşün temel sebebi; hücreler arası maksimum SOC farkının düşük olmasından kaynaklanıyor. Hücre şarj durumlarına bakıldığında en düşük SOC değerinin %87 ve en büyük SOC değerinin ise %90 olduğu görülüyor. Maksimum SOC farkı %3 olduğundan dolayı dengeleme süresinde bir düşüş gözlemlenmiştir. Hücre voltajlarına bakıldığında hücrelerin 4.2 V olan maksimum hücre voltajında %100 SOC değerine ulaştığı görülüyor. Modül gerilimleri incelendiğinde her bir modülün gerilimi; modül seviyesinde uygulanan aktif dengeleme algoritması sayesinde birbirlerine eşit ve düzgün bir artış gösteriyor. Modül seviyesindeki enerji kayıplarına bakıldığında pasif dengelemeye oranla kayıpların dengeleme süresine kadar çok az olduğu görülüyor ve tüm hücreler dengeye ulaştığında kayıpların sıfıra doğru yaklaştığı görülüyor.



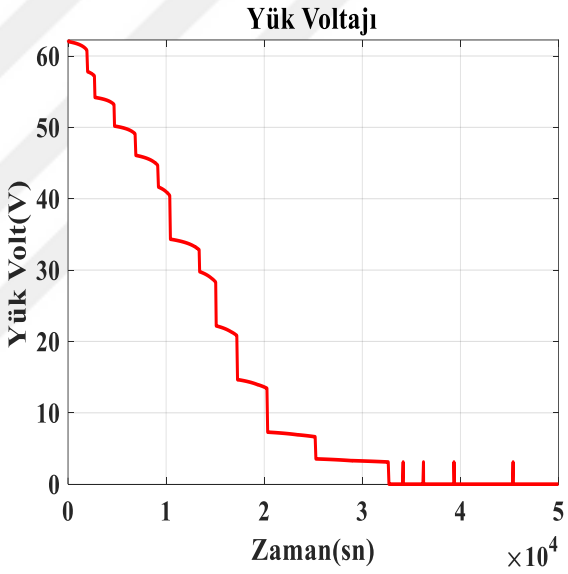
Şekil 6.70 Hibrit dengeleme deşarj grafikleri (1. durum)



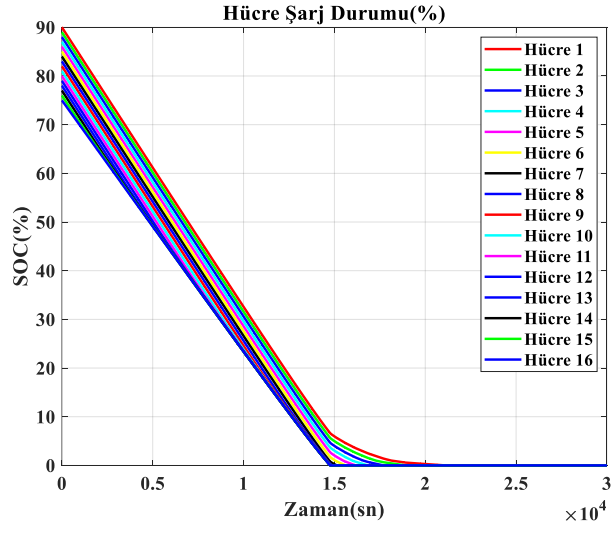
Şekil 6.71 Hibrit dengeleme deşarj grafikleri (1. durum)



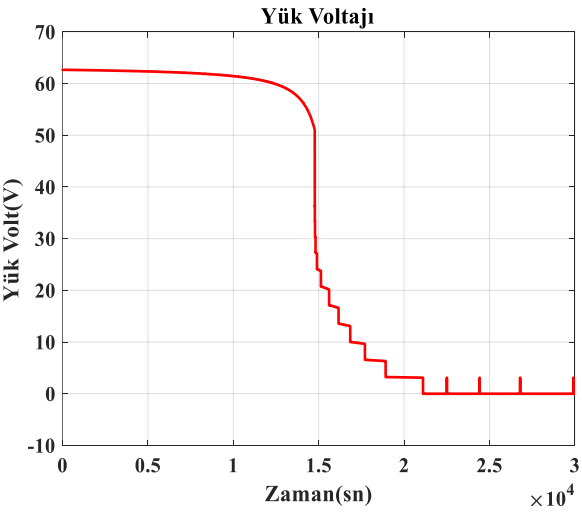
Şekil 6.72 Hibrit dengeleme deşarj grafikleri (2. durum)



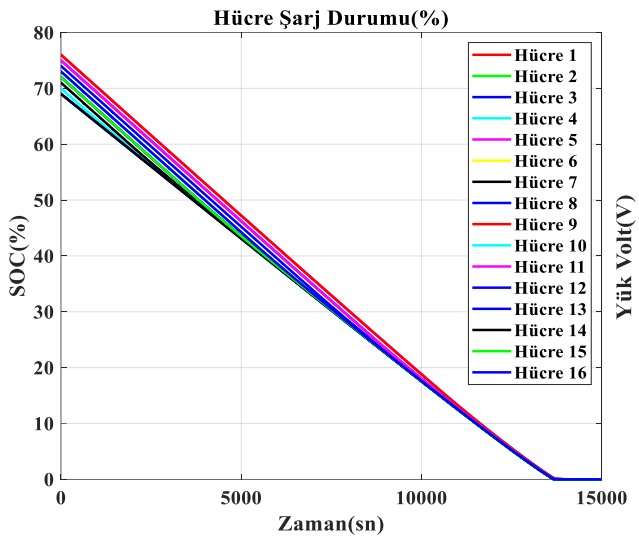
Şekil 6.73 Hibrit dengeleme deşarj grafikleri (2. durum)



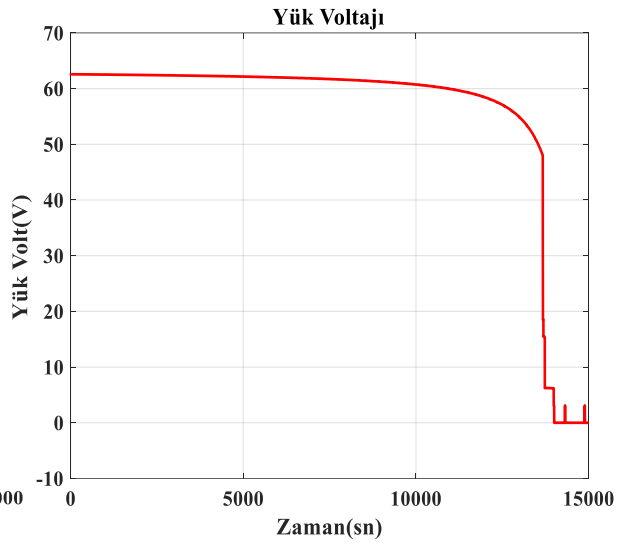
Şekil 6.74 Hibrit dengeleme deşarj grafikleri (3. durum)



Şekil 6.75 Hibrit dengeleme deşarj grafikleri (3. durum)

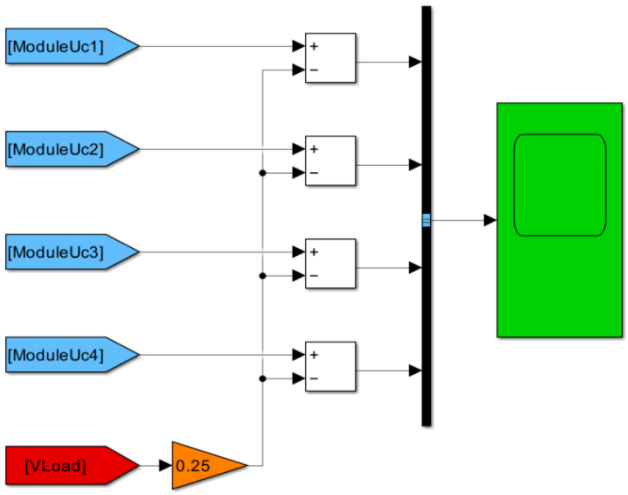


Şekil 6.76 Hibrit dengeleme deşarj grafikleri (4. durum)

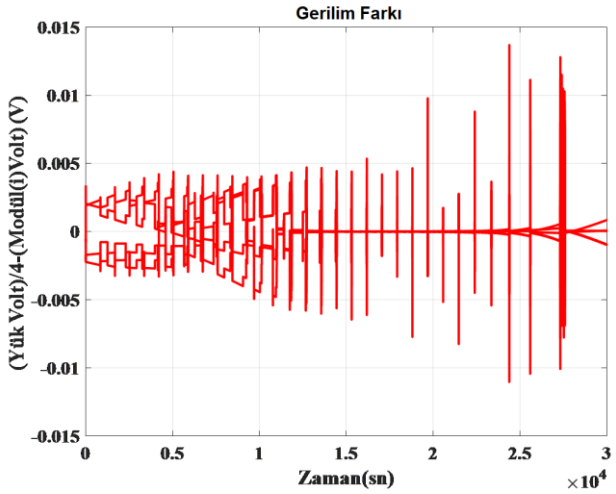


Şekil 6.77 Hibrit dengeleme deşarj grafikleri (4. durum)

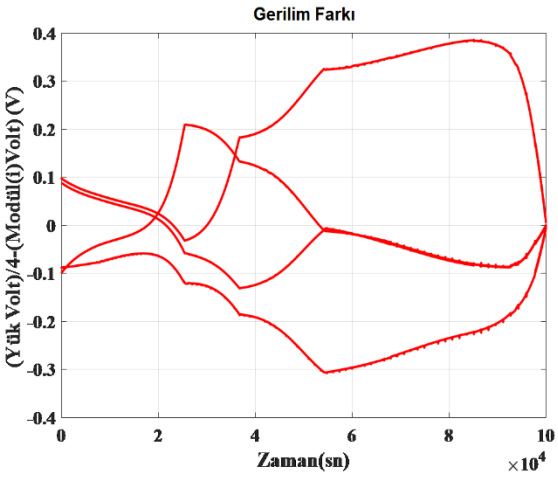
Şekil 6.70-Şekil 6.77 grafikleri hibrit dengeleme sisteminin dört adet durum için deşarj grafiklerini göstermektedir. Deşarj işlemi 100 ohm değerine sahip omik bir yük üzerinden gerçekleştirilmiştir. Deşarj işlemi sırasında yük geriliminin hücreler arası SOC farkının büyük olmasına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. SOC değeri düşük olan hücrelerin sıfır değerine ilk olarak ulaştığı şekil 6.72'de görülmektedir. İkinci durumda bataryada bulunan hücreler arası SOC farkının çok yüksek olmasından dolayı dengeleme sisteminin deşarj durumunda dengeleme işleminde geciktiği görülmektedir. Bu durum en düşük SOC' ye sahip hücrenin aşırı deşarj olmasına neden olmaktadır. Bunun önüne geçmek için hücreleri aşırı deşarjdan koruyan sistemler dengeleme sistemine entegre edilerek hücre sağlığı iyileştirilir. Şekil 6.76'ya bakıldığında hücreler arası SOC farkının %3 olmasından kaynaklı olarak çok düzgün bir şekilde deşarj olduğu görülüyor. Bütün hücreler belirli bir noktada aynı SOC değerine getirilerek deşarj işlemi devam ediyor.



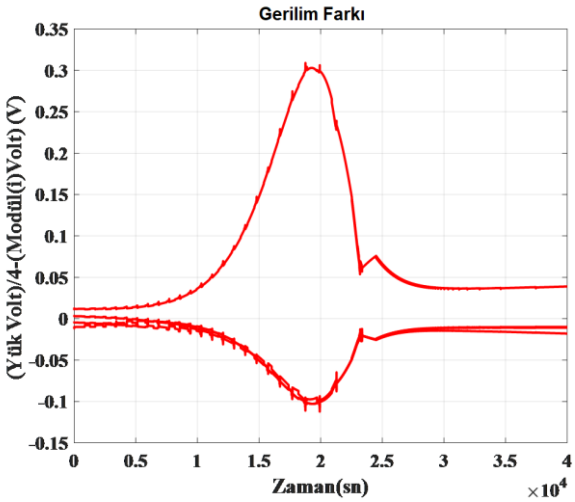
Şekil 6.78 Modül ve yük arasında oluşan gerilim farkları



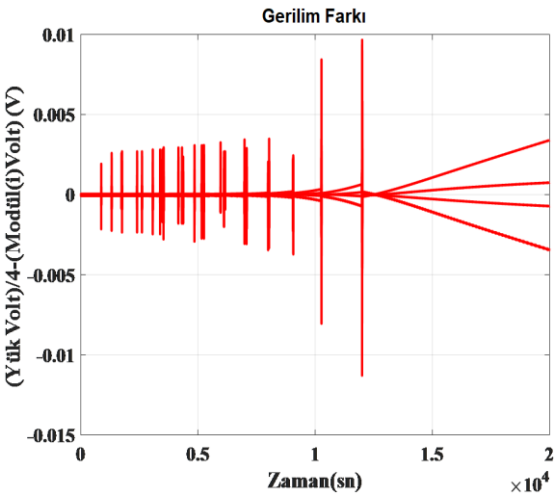
Şekil 6.79 Hibrit dengeleme gerilim grafikleri (1. durum)



Şekil 6.80 Hibrit dengeleme gerilim grafikleri (2. durum)



Şekil 6.81 Hibrit dengeleme gerilim grafikleri (3. durum)



Şekil 6.82 Hibrit dengeleme gerilim grafikleri (4. durum)

Şekil 6.78’de 100 ohm değerinde omik bir yükün dörtte bir geriliminin modüllerden çıkarılarak sistemin ne kadar stabil çalıştığı gösterilmiştir. Sistemdeki modüllerden gelen gerilimlerin yük üzerinde nasıl bir etki gösterdiği Şekil 6.79-Şekil 6.82 aracılığıyla gösterilmiştir. Sistem şarj olurken modül gerilimlerinin yük üzerindeki etkileri her dört adet durum için incelenmiştir. İlk durumda yük ve modüller arası gerilim farklarının çok düşük olduğu görülmektedir. Bunun başlıca sebebi birinci durum için modüller arası SOC farkının düşük olmasıdır. SOC farkının düşük olması modüllerde oluşan gerilim seviyelerinin neredeyse aynı olmasını sağlamaktadır. Aynı durum Şekil 6.82’de de görülmektedir. Dördüncü durum için modüller arası SOC farkı düşük olduğu için yük üzerinde oluşan gerilim değerlerinin modülleri izlediği görülmektedir. Şekil 6.80’de modül ve yük gerilim farklarının 0.4 V değerlerine çıktığı görülmektedir. Bunun başlıca sebebi ikinci durum için sisteme verilen yüksek SOC dengesizlikleridir. Ancak sistemin yeterince stabil davranarak 0.4 V gibi kabul edilebilir bir gerilim farkı ile zorluğu aştığı görülmektedir.

Tablo 6.3 Enerji kayıpları ve %100 SOC değerine ulaşma süreleri

Durumlar i	Pasif Dengeleme ile %100 SOC değerine ulaşma Süresi(sn)	Pasif Dengeleme Toplam Enerji Kaybı(J)	Hibrit Dengeleme ile %100 SOC değerine ulaşma Süresi(sn)	Hibrit Dengeleme Toplam Enerji Kaybı(J)
Durum 1 SOC(%)	22557	142.7	17668	102.1
Durum 2 SOC(%)	141688	1761	97430	1240
Durum 3 SOC(%)	32579	300.8	29785	210.7
Durum 4 SOC(%)	10123	60.29	9050	41.64

Tablo 6.3'de dört durum için simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Pasif dengeleme ve hibrit dengeleme sistemlerinde oluşan enerji kayıpları ve şarj sırasında %100 SOC değerine ulaşma süreleri sayısal olarak gösterilmiştir. Tablodaki veriler incelendiğinde hibrit dengeleme sisteminin her iki kalemde de avantajlı olduğu ortaya çıkmıştır. Enerji kayıpları açısından bakıldığında farklı durumlar için hibrit dengeleme pasif dengelemeye oranla ciddi iyileştirmelere neden olmuştur. Sistemde kayıplar yönünden %40'lara varan bir iyileştirme gerçekleşmiştir. Bataryanın %100 SOC değerine ulaşma süreleri dört durum için incelendiğinde hibrit dengelemenin pasif dengelemeye oranla daha hızlı çalıştığı görülmüştür. Sistemin genel olarak hibrit dengeleme ile birlikte veriminin ciddi boyutlarda artış gösterdiği görülmüştür.

7
SONUÇ VE ÖNERİLER

Hücre dengeleme, batarya yönetim sisteminin çok önemli bir işlevidir. Batarya paketinin ömrünün uzun olmasını sağlar, batarya sisteminin güvenliğini artırır ve batarya paketinin toplam kapasitesini en üst düzeye çıkarır. Modül düzeyinde aktif dengeleme ve hücre düzeyinde pasif dengeleme ile yeni bir hibrit dengeleme sistemi önerilmiş ve tasarlanmıştır. Sistem, dört modülden oluşan ve her modüle seri bağlı dört hücreden oluşan bir lityum-iyon pil paketi üzerinde gösterilerek test edilmiştir. Önerilen kontrol stratejisinin avantajları; sistem boyutunu, dengeleme süresini, maliyeti ve enerji kayıplarını azaltmıştır. Modül düzeyinde aktif dengeleme, anahtarlamalı kapasitör ile gerçekleştirilmiştir. Hibrit sistem, uygun maliyet/performans dengelerine sahiptir ve bir dizi hücre ve modül düzeyinde kontrol stratejisi uygulama yeteneğine sahiptir. MATLAB/Simulink programı ile simüle edilen dengeleme yöntemleri tasarımı yapılan batarya paketine dört farklı dengesizlik durumu için uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları olarak alınan; SOC değerleri, hücre voltajları, hücre akımları, modül voltajları, her bir modülde oluşan enerji kaybı ve toplam enerji kaybı olmak üzere alınan değerler her bir dengeleme yöntemi için avantajlı ve dezavantajlı kısımlar ortaya çıkarılmıştır. Yapılan tasarım çalışmaları ve simulasyon sonuçlarına bakıldığında, dengeleme yöntemlerinin ikisi de sistemdeki SOC dengesizliğini ortadan kaldırmıştır, ancak hibrit dengeleme yönteminin pasif dengeleme yöntemine göre daha verimli olduğu ortaya çıkmıştır. Hibrit sistemin stabil çalışabildiğini göstermek için yük üzerinde şarj testleri yapılarak, yük üzerinde oluşan voltaj farklılıkların çok düşük değerlerde olduğu ortaya çıkarılmıştır. Tablo 6.3'de girilen sayısal değerler hibrit sistemin hızlı çalıştığını ve enerji kayıplarını yeterince kabul edilebilir bir seviyeye indirdiğini göstermiştir.

Tasarımı yapılan hibrit dengeleme sistemi aktif dengeleme yöntemlerinin daha az karmaşık olan, kapasitör tabanlı aktif dengeleme yönteminin pasif dengeleme sistemine entegrasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Ancak, kapasitör tabanlı yapılan aktif dengeleme sistemleri arasında algoritma olarak karmaşık ancak sistem verimini önemli ölçüde arttırabilen devrelerde bulunmaktadır. Sistem verimini daha fazla iyileştirmek için faklı devre topolojileri uygulanabilir veya sistemde bulunan kapasitörler süper kapasitörler ile yer değiştirilerek sistemin daha hızlı çalışması sağlanabilir. Bu tür sistemler tasarlanırken sistemin verimi, özünde lityum iyon bataryanın kimyası, kapasitör boyutu ve anahtarlama

frekansı tarafından belirlenir. Anahtarlama frekansı ve kondansatör boyutunun seçimi enerji transferinin yüksek SOC' li modülden düşük SOC' li modüle aktarılmasında büyük rol oynar ve yapılan literatür çalışmalarında bu tür optimizasyon problemlerinin olduğu görülmüştür.

KAYNAKÇA

[1] Hawkins, T. R., Gausen, O. M., & Strømman, A. H. (2012). Environmental impacts of hybrid and electric vehicles a review. The International Journal of Life Cycle Assessment, 17(8), 997-1014.

[2] Xing, Y., Ma, E. W., Tsui, K. L., & Pecht, M. (2011). Battery management systems in electric and hybrid vehicles. Energies, 4(11), 1840-1857.

[3] Wang, Y., Tian, J., Sun, Z., Wang, L., Xu, R., Li, M., & Chen, Z. (2020). A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 131, 110015.

[4] Pattipati, B., Pattipati, K., Christopherson, J. P., Namburu, S. M., Prokhorov, D. V., & Qiao, L. (2008). Automotive battery management systems (pp. 581-586). IEEE.

[5] Brandl, M., Gall, H., Wenger, M., Lorentz, V., Giegerich, M., Baronti, F., ... & Prochazka, W. (2012, March). Batteries and battery management systems for electric vehicles. In 2012 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE) (pp. 971-976). IEEE.

[6] Habib, A. A., Hasan, M. K., Mahmud, M., Motakabber, S. M. A., Ibrahimya, M. I., & Islam, S. (2021). A review: Energy storage system and balancing circuits for electric vehicle application. IET Power Electronics, 14(1), 1-13.

[7] Wu, J., Emadi, A., Duoba, M. J., & Bohn, T. P. (2007, September). Plug-in hybrid electric vehicles: Testing, simulations, and analysis. In 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 469-476). IEEE.

[8] Kuhn, B. T., Pitel, G. E., & Krein, P. T. (2005, September). Electrical properties and equalization of lithium-ion cells in automotive applications. In 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 5-pp). IEEE.

[9] Gabbar, H. A., Othman, A. M., & Abdussami, M. R. (2021). Review of Battery Management Systems (BMS) Development and Industrial Standards. Technologies 2021, 9, 28.

[10] Ren, H., Zhao, Y., Chen, S., & Wang, T. (2019). Design and implementation of a battery management system with active charge balance based on the SOC and SOH online estimation. Energy, 166, 908-917.

[11] de Castro, R., Araujo, R. E., Barreras, J. V., & Pinto, C. (2020). Smart and Hybrid Battery Balancing For Electric Vehicles. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline).

[12] Zhang, F., Rehman, M. M. U., Zane, R., & Maksimović, D. (2017, October). Hybrid balancing in a modular battery management system for electric-drive vehicles. In 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (pp. 578-583). IEEE.

[13] Ramadass, P., Haran, B., White, R., & Popov, B. N. (2002). Performance study of commercial LiCoO2 and spinel-based Li-ion cells. Journal of Power Sources, 111(2), 210-220.

[14] Chen, D., Jiang, J., Kim, G. H., Yang, C., & Pesaran, A. (2016). Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells. Applied Thermal Engineering, 94, 846-854.

[15] Maleki, H., & Howard, J. N. (2006). Effects of overdischarge on performance and thermal stability of a Li-ion cell. Journal of power sources, 160(2), 1395-1402.

[16] Ramadass, P., Haran, B., White, R., & Popov, B. N. (2002). Performance study of commercial LiCoO2 and spinel-based Li-ion cells. Journal of Power Sources, 111(2), 210-220.

[17] Wei, L., Jie, L., Wenji, S., & Ziping, F. (2017, October). Study on passive balancing characteristics of serially connected lithium-ion battery string. In 2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI) (pp. 489-495). IEEE.

[18] Perişoară, L. A., Guran, I. C., & Costache, D. C. (2018, October). A passive battery management system for fast balancing of four LiFePO4 cells. In 2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME) (pp. 390-393). IEEE.

[19] Gallardo-Lozano, J., Romero-Cadaval, E., Milanes-Montero, M. I., & Guerrero-Martinez, M. A. (2014). Battery equalization active methods. Journal of Power Sources, 246, 934-949.

[20] Caspar, M., Eiler, T., & Hohmann, S. (2016). Systematic comparison of active balancing: A model-based quantitative analysis. IEEE transactions on vehicular technology, 67(2), 920-934.

[21] Daowd, M., Omar, N., Van Den Bossche, P., & Van Mierlo, J. (2011, September). Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation. In 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 1-7). IEEE.

[22] Ismail, K., Nugroho, A., & Kaleg, S. (2017, October). Passive balancing battery management system using MOSFET internal resistance as balancing resistor. In 2017 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA) (pp. 151-155). IEEE.

[23] Wei, L., Jie, L., Wenji, S., & Ziping, F. (2017, October). Study on passive balancing characteristics of serially connected lithium-ion battery string. In 2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI) (pp. 489-495). IEEE.

[24] Qi, J., & Lu, D. D. C. (2014, September). Review of battery cell balancing techniques. In 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC) (pp. 1-6). IEEE.

[25] Herrmann, F., & Rothfuss, F. (2015). Introduction to hybrid electric vehicles, battery electric vehicles, and off-road electric vehicles. In Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles (pp. 3-16). Woodhead Publishing.

[26] Herrmann, F., & Rothfuss, F. (2015). Introduction to hybrid electric vehicles, battery electric vehicles, and off-road electric vehicles. In Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles (pp. 3-16). Woodhead Publishing.

[27] Buettner, T. (2015). Urban estimates and projections at the United Nations: The strengths, weaknesses, and underpinnings of the world urbanization prospects. Spatial Demography, 3(2), 91-108.

[28] Bratzel, S., Lehmann, L., 2010. Jugend und Automobil. In: unter Mitarbeit von Adler, K. et al., Eine empirische Studie zu Einstellungen und Verhaltensmustern von

18 bis 25-Jährigen in Deutschland, FHDW Center of Automotive, Bergisch Gladbach: Arbeitspapier 2010-03.

[29] Herrmann, F., & Rothfuss, F. (2015). Introduction to hybrid electric vehicles, battery electric vehicles, and off-road electric vehicles. In Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles (pp. 3-16). Woodhead Publishing.

[30] Spath, D., Bauer, W., Voigt, S., Borrmann, D., Herrmann, F., Brand, M., Rally, P., Rothfuss, F., Sachs, C., Frieske, B., Propfe, B., Redelbach, M., Schmid, S., Dispan, J., 2012. Elektromobilität und Beschäftigung–Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf Beschäftigung und Standortumgebung (ELAB). Abschlussbericht, Fraunhofer Verlag, Stuttgart. ISBN 978-3-8396-8755-0.

[31] Bratzel, S. (2014). Die junge Generation und das Automobil–Neue Kundenanforderungen an das Auto der Zukunft?. In Automotive Management (pp. 93-108). Springer Gabler, Berlin, Heidelberg.

[32] Nentwich, M., Störr, B., & Hanzig, J. (2019). Battery concepts: The past, the present, and research highlights. Physical Sciences Reviews, 4(1).

[33] Dibner, Bern. Galvani-Volta : a controversy that led to the discovery of useful electricity. s.l. : Burndy Library, 1952.

[34] Kurzweil, P. (2010). Gaston Planté and his invention of the lead–acid battery—The genesis of the first practical rechargeable battery. Journal of Power Sources, 195(14), 4424-4434.

[35] Moore, S. W., & Schneider, P. J. (2001). A review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems. Sae Publication, 2001010959.

[36] https://www.mpoweruk.com/leadacid.htm

[37] Wakihara, M. (2001). Recent developments in lithium ion batteries. Materials Science and Engineering: R: Reports, 33(4), 109-134.

[38] Deng, D. (2015). Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. Energy Science & Engineering, 3(5), 385-418.

[39] Deng, D. (2015). Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. Energy Science & Engineering, 3(5), 385-418.

[40] Zhang, Q., Li, C., & Wu, Y. (2017). Analysis of research and development trend of the battery technology in electric vehicle with the perspective of patent. Energy Procedia, 105, 4274-4280.

[41] https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html

[42] http://www.mpoweruk.com/bms.htm battery management system 2011-05-20 entry

[43] Pistoia, G. (Ed.). (2010). Electric and hybrid vehicles: Power sources, models, sustainability, infrastructure and the market. Elsevier.

[44] http://www.mpoweruk.com/bms.htm battery management system 2011-05-20 entry

[45] Moore, S. W., & Schneider, P. J. (2001). A review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems. Sae Publication, 2001010959.

[46] Kutkut, N. H., & Divan, D. M. (1996, October). Dynamic equalization techniques for series battery stacks. In Proceedings of Intelec'96-International Telecommunications Energy Conference (pp. 514-521). IEEE.

[47] Daowd, M., Omar, N., Van Den Bossche, P., & Van Mierlo, J. (2011, September). Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation. In 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 1-7). IEEE.

[48] Ismail, K., Nugroho, A., & Kaleg, S. (2017, October). Passive balancing battery management system using MOSFET internal resistance as balancing resistor. In 2017 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA) (pp. 151-155). IEEE.

[49] Wei, L., Jie, L., Wenji, S., & Ziping, F. (2017, October). Study on passive balancing characteristics of serially connected lithium-ion battery string. In 2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI) (pp. 489-495). IEEE.

[50] Qi, J., & Lu, D. D. C. (2014, September). Review of battery cell balancing techniques. In 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC) (pp. 1-6). IEEE.

[51] Carter, J., Fan, Z., & Cao, J. (2020). Cell equalisation circuits: A review. Journal of Power Sources, 448, 227489.

[52] Caspar, M., Eiler, T., & Hohmann, S. (2016). Systematic comparison of active balancing: A model-based quantitative analysis. IEEE transactions on vehicular technology, 67(2), 920-934.

[53] Pascual, C., & Krein, P. T. (1997, February). Switched capacitor system for automatic series battery equalization. In Proceedings of APEC 97-Applied Power Electronics Conference (Vol. 2, pp. 848-854). IEEE.

[54] Pascual, C., & Krein, P. T. (1998). U.S. Patent No. 5,710,504. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

[55] Baughman, A., & Ferdowsi, M. (2005, September). Double-tiered capacitive shuttling method for balancing series-connected batteries. In 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 109-113). IEEE.

[56] Takeda, Y., & Koizumi, H. (2017, October). Modularized double-tiered switched capacitor voltage equalizer. In IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 2782-2787). IEEE.

[57] Fukui, R., & Koizumi, H. (2013, November). Double-tiered switched capacitor battery charge equalizer with chain structure. In IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 6715-6720). IEEE.

[58] M. Kim, C. Kim, J. Kim, and G. Moon, “A chain structure of switched capacitor for improved cell balancing speed of lithium-ion batteries,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 8, pp. 3989–3999, 2014.

[59] Kim, M. Y., Kim, C. H., Kim, J. H., & Moon, G. W. (2013). A chain structure of switched capacitor for improved cell balancing speed of lithium-ion batteries. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61(8), 3989-3999.

[60] Ye, Y., & Cheng, K. W. E. (2015). Modeling and analysis of series–parallel switched-capacitor voltage equalizer for battery/supercapacitor strings. IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, 3(4), 977-983.

[61] Shang, Y., Zhang, C., Cui, N., & Mi, C. C. (2018). A delta-structured switched-capacitor equalizer for series-connected battery strings. IEEE Transactions on Power Electronics, 34(1), 452-461.

[62] Shang, Y., & Zhang, Y. (2018, June). A mesh-structured switched-capacitor equalizer for lithium-ion battery strings of electric vehicles. In 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC) (pp. 1071-1074). IEEE.

[63] Fukui, R., & Koizumi, H. (2013, November). Double-tiered switched capacitor battery charge equalizer with chain structure. In IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 6715-6720). IEEE.

[64] Park, H. S., Kim, C. H., Park, K. B., Moon, G. W., & Lee, J. H. (2009). Design of a charge equalizer based on battery modularization. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 58(7), 3216-3223.

[65] Y. Takeda and H. Koizumi, "Modularized double-tiered switched capacitor voltage equalizer," pp. 2782–2787, 2017.

[66] Daowd, M., Antoine, M., Omar, N., Lataire, P., Van Den Bossche, P., & Van Mierlo, J. (2014). Battery management system—Balancing modularization based on a single switched capacitor and bi-directional DC/DC converter with the auxiliary battery. Energies, 7(5), 2897-2937.

[67] Daowd, M., Omar, N., Van Den Bossche, P., & Van Mierlo, J. (2011, September). Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation. In 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 1-7). IEEE.

[68] Carter, J., Fan, Z., & Cao, J. (2020). Cell equalisation circuits: A review. Journal of Power Sources, 448, 227489.

[69] Phung, T. H., Crebier, J. C., Chureau, A., Collet, A., & Nguyen, V. (2011, March). Optimized structure for next-to-next balancing of series-connected lithium-ion cells. In 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) (pp. 1374-1381). IEEE.

[70] Hua, C. C., Fang, Y. H., & Huang, J. F. (2015, October). Inductor based equalizer with a chain structure of switched capacitor to improve balancing speed. In 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (pp. 2151-2154). IEEE.

[71] Moghaddam, A. F., & Van Den Bossche, A. (2018, July). An active cell equalization technique for lithium ion batteries based on inductor balancing. In 2018 9th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE) (pp. 274-278). IEEE.

[72] Park, S. H., Kim, T. S., Park, J. S., Moon, G. W., & Yoon, M. J. (2007, October). A new battery equalizer based on buck-boost topology. In 2007 7th Internatonal Conference on Power Electronics (pp. 962-965). IEEE.

[73] Liu, H., & Xia, C. (2013, August). An efficient battery balancing scheme in electric vehicle. In 2013 International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment (Vol. 2, pp. 541-544). IEEE.

[74] Caspar, M., Eiler, T., & Hohmann, S. (2016). Systematic comparison of active balancing: A model-based quantitative analysis. IEEE transactions on vehicular technology, 67(2), 920-934.

[75] Qi, J., & Lu, D. D. C. (2014, September). Review of battery cell balancing techniques. In 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC) (pp. 1-6). IEEE.

[76] Yu, L. R., Hsieh, Y. C., Liu, W. C., & Moo, C. S. (2013, July). Balanced discharging for serial battery power modules with boost converters. In 2013 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE) (pp. 449-453). IEEE.

[77] Wu, T. H., Moo, C. S., & Hou, C. H. (2017). A battery power bank with series-connected buck–boost-type battery power modules. Energies, 10(5), 650.

[78] Koch, R., Jossen, A., & Kuhn, R. (2013). Novel bidirectional multiple-input multiple-output converter for simultaneous direct battery module balancing. World Electric Vehicle Journal, 6(3), 495-501.

[79] ELVIRA, D. G., BLAVÍ, H. V., MONCUSÍ, J. M. B., PASTOR, À. C., CASTILLO, J. A. G., & SALAMERO, L. M. (2019, June). Active battery balancing via a switched dc/dc converter: Description and performance analysis. In 2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA) (pp. 1-6). IEEE.

[80] Nie, Z., & Mi, C. (2009, September). Fast battery equalization with isolated bidirectional DC-DC converter for PHEV applications. In 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 78-81). IEEE.

[81] Lee, Y. S., Duh, C. Y., Chen, G. T., & Yang, S. C. (2005, June). Battery equalization using bi-directional Cuk converter in DCVM operation. In 2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference (pp. 765-771). IEEE.

[82] Moghaddam, A. F., & Van den Bossche, A. (2019, May). A battery equalization technique based on Ćuk converter balancing for lithium ion batteries. In 2019 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST) (pp. 1-4). IEEE.

[83] Lee, Y. S., Tsai, C. E., Ko, Y. P., & Cheng, M. W. (2010, June). Charge equalization using quasi-resonant converters in battery string for medical power operated vehicle application. In The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA- (pp. 2722-2728). IEEE.

[84] Lee, Y. S., & Cheng, G. T. (2006). Quasi-resonant zero-current-switching bidirectional converter for battery equalization applications. IEEE Transactions on Power electronics, 21(5), 1213-1224.

[85] Shin, J. W., Seo, G. S., Chun, C. Y., & Cho, B. H. (2010, June). Selective flyback balancing circuit with improved balancing speed for series connected lithium-ion batteries. In The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA- (pp. 1180-1184). IEEE.

[86] Kim, C. H., Park, H. S., Kim, C. E., Moon, G. W., & Lee, J. H. (2009). Individual charge equalization converter with parallel primary winding of transformer for series connected lithium-ion battery strings in an HEV. Journal of power electronics, 9(3), 472-480.

[87] Ran, F., Xu, H., Ji, Y., Qin, J., & Li, W. (2015, November). An active balancing circuit for lithium battery management system with optoelectronic switches. In TENCON 2015-2015 IEEE Region 10 Conference (pp. 1-5). IEEE.

[88] Bonfiglio, C., & Roessler, W. (2009, September). A cost optimized battery management system with active cell balancing for lithium ion battery stacks. In 2009 IEEE vehicle power and propulsion conference (pp. 304-309). IEEE.

[89] Moghaddam, A. F., & Van den Bossche, A. (2019, May). Flyback converter balancing technique for lithium based batteries. In 2019 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST) (pp. 1-4). IEEE.

[90] Xiong, R., Zhang, Y., Wang, J., He, H., Peng, S., & Pecht, M. (2018). Lithium-ion battery health prognosis based on a real battery management system used in electric vehicles. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 68(5), 4110-4121.

[91] Website: https://batteryuniversity.com/learn/article/what_is_the_c_rate

[92] Rehman, M. M. U., Zhang, F., Evzelman, M., Zane, R., Smith, K., & Maksimovic,

D. (2016, September). Advanced cell-level control for extending electric vehicle battery pack lifetime. In 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (pp. 1-8). IEEE.

[93] Pognant-Gros, P., Di Domenico, D., Olszewski, D., & Barsacq, F. (2014, October). Switched Capacitor Balancing Time Estimation and Dependency. In 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) (pp. 1-6). IEEE.

[94] Rehman, M. M. U., Zhang, F., Evzelman, M., Zane, R., Smith, K., & Maksimovic,

D. (2016, September). Advanced cell-level control for extending electric vehicle battery pack lifetime. In 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (pp. 1-8). IEEE.

[95] Plett, G. L. (2011). Recursive approximate weighted total least squares estimation of battery cell total capacity. Journal of Power Sources, 196(4), 2319-2331.

[96] Zhang, F., Rehman, M. M. U., Zane, R., & Maksimović, D. (2017, October). Hybrid balancing in a modular battery management system for electric-drive vehicles. In 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (pp. 578-583). IEEE.

[97] KOCYIGIT, D., & AYTEN, U. E. (2022). Hybrid Battery Balancing System for Electric Drive Vehicles. The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics, 19, 47-54.

[98] https://tr.wikipedia.org/wiki/Ba%C4%9Fdat_pili

[99] https://tr.wikipedia.org/wiki/Voltaik_pil

[100] https://suzukibattery.com/about-the-structure-of-lead-acid-battery/]

[101] https://www.aspilsan.com/cozumler/havacilik-bataryalari/f-20-40h1ctf-nikel/

[102] NiMHpil[https://www.varta-ag.com/en/search?q=NiMH

[103] https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=ocN7jrtEvoZqWnxpl9S

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirisi

1. Davut Koçyiğit *, Umut Engin Ayten, ‘HYBRID BATTERY BALANCING SYSTEM FOR ELECTRIC DRIVE VEHICLES’ The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), 2022, IConTech 2022: International Conference on Technology, Amara Premier Palace Hotel on November 16-19, 2022 in Antalya, Turkey