



BATARYA YÖNETİMİ SİSTEMİ TASARIMI

Gökhan SEVİM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Gökhan SEVİM

08/01/2024

BATARYA YÖNETİMİ SİSTEMİ TASARIMI
(Yüksek Lisans Tezi)

Gökhan SEVİM

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

Bataryalar, elektrikli ev aletlerinin, elektrikli araçların ve yenilenebilir enerji kaynaklarının vazgeçilmez birer parçasıdır. Bataryalar kimyasal yapılarına göre çeşitlilik gösterse de genel kullanım amaçları enerjiyi depo etmektir. Bataryaların kullanımı esnasında hücreler arasındaki enerjiyi eşit dağıtan, bataryaların şarj ve sağlık durumlarını kestiren ve olumsuz durumlarda bataryaları ve sistemi koruma altına alan sistemlere batarya yönetim sistemi denmektedir. Dengeleme sistemi ve kestirimler için birçok yöntem vardır. Bu çalışmada dengeleme yöntemi için aktif dengeleme yöntemlerinden flyback çevirici yöntemi kullanılmıştır. Bataryanın şarj durumu (SoC) ve sağlık durumu (SoH) Kalman filtresi yardımı ile kestirilmeye çalışılmıştır. MATLAB programında oluşturulan bir batarya modelinin SoC ve SoH değerleri kestirilmeye çalışılmıştır. MATLAB/Simulink’de var olan bataryanın SoC değeri önerilen yöntem ile kestirilmiş ve MATLAB/Simulink modelinin verdiği değer ile karşılaştırılmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarında önerilen yöntem ile elde edilen değer ile Simulink modelinin verdiği değer arasındaki hata değerinin maksimum ± 0.03 olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde SoH kestirimi ile elde edilen değerlerin maksimum sapma miktarının ± 0.03 olması beklenmektedir. Simülasyon sonuçlarıyla elde edilen veriler ile elektronik bir devre tasarlanarak mikroişlemci yardımıyla dengeleme ve kestirim işlemleri yapılmıştır.

Bilim Kodu : 90522
Anahtar Kelimeler : Şarj durumu, sağlık durumu, kestirim, kalman filtre, dengeleme, aktif dengeleme
Sayfa Adedi : 79
Danışman : Prof. Dr. Necmi ALTIN

BATTERY MANAGEMENT SYSTEM DESIGN

(M. Sc. Thesis)

Gökhan SEVİM

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2024

ABSTRACT

Batteries are an indispensable part of electrical appliances, electric vehicles and renewable energy sources. Although batteries vary according to their chemical structures, their general purpose is to store energy. Systems that distribute the energy equally between cells during battery use, estimate the charge and health status of batteries, and protect the batteries and the system in adverse situations are called battery management systems. There are many methods for balancing systems and predictions. In this study, the flyback converter method, one of the active balancing methods, was used for the balancing method. The state of charge (SoC) and state of health (SoH) of the battery were tried to be estimated with the help of Kalman filter. An attempt was made to estimate the SoC and SoH values of a battery model created in the MATLAB program. The SoC value of the existing battery in MATLAB/Simulink was estimated with the recommended method and compared with the value given by the MATLAB/Simulink model. In the simulation studies, it was determined that the error value between the value obtained by the proposed method and the value given by the Simulink model was maximum ± 0.03 . Similarly, the maximum deviation of the value obtained by SoH estimation is expected to be ± 0.03 . An electronic circuit was designed with the data obtained from the simulation results and balancing and estimation operations were carried out with the help of a microprocessor.

Science Code : 90522

Key Words : State of charge, state of health, estimation, Kalman filter, balancing, active balancing

Page Number : 79

Supervisor : Prof. Dr. Necmi ALTIN

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleŐmesinde akademik hayatım boyunca teorik bilgimin oluŐmasında etkili olan tım hocalarıma, projeyi gerçekleŐtirme sũrecinde bana sũrekli ıŐık tutan, bilgisini ve zamanını paylaŐan saygıdeğer danıŐmanım Prof. Dr. Necmi ALTIN'a, yoğun çalıŐmalarım sırasında sabır gũsterdiđi ve bana katlandığı için sevgili eŐim Dilhan'a, çalıŐmama izin verdiği için biricik oğlum Gũkalp Han'a, maddi manevi bana her zaman destek olan aileme, sağladığı mũkemmел çalışma ortamı ve manevi desteği için Tolga AMLIKAYA'ya ve Linkas Teknoloji ailesine , yũksek çalışma temposu içinde bana vakit ayıran Enes BAYAR' a ve Uğur KURD' a sonsuz teŐekkũrlerimi sunarım.

Tez alıŐmama FYL-2022-5797 proje numarası ile maddi destek olan Gazi Őniversitesi BAP birimine teŐekkũrlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. BATARYALAR VE ELEKTRİKSEL MODELLERİ.....	3
2.1. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Çeşitleri	3
2.1.1. Kurşun asit (Pb-Acid) bataryalar	4
2.1.2. Nikel kadmiyum (NiCd) bataryalar	5
2.1.3. Nikel metal hidrit (NiMH) bataryalar	5
2.1.4. Lityum ion (Li-ion) bataryalar	6
2.1.5. Lityum iyon polimer (LiPo) bataryalar	7
2.1.6. Lityum demir fosfat (LiFePO ₄) bataryalar	7
2.1.7. Lityum sülfür (Li-S) bataryalar	8
2.2. Bataryaların Elektriksel Modelleri	8
2.2.1. İç direnç modeli.....	9
2.2.2. RC modeli	9
2.2.3. Thevenin modeli.....	10
2.2.4. Çift polarizasyon (DP) modeli	11
3. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ	13

	Sayfa
3.1. Batarya Yönetim Sisteminin Görevleri	16
3.1.1. Ölçüm.....	17
3.1.2. Yönetim.....	20
3.1.3. Kestirim.....	23
3.1.4. Haberleşme.....	25
3.1.5. Veri kayıt.....	27
4. BATARYA DENGELEME YÖNTEMLERİ.....	29
4.1. Pasif Dengeleme Yöntemleri	29
4.1.1. Sabit şönt direnç	30
4.1.2. Anahtarlama şönt direnç	30
4.2. Aktif Dengeleme Yöntemleri.....	31
4.2.1. Kapasitör tabanlı	32
4.2.2. İndüktör tabanlı	34
4.2.3. Dönüştürücü tabanlı	39
5. KESTİRİM YÖNTEMLERİ.....	47
5.1. Direkt Ölçüm Yöntemleri	47
5.1.1. Açık devre gerilim yöntemi	48
5.1.2. Terminal gerilimi yöntemi	48
5.1.3. Empedans yöntemi	49
5.1.4. Empedans spektroskopisi yöntemi.....	49
5.2. Kayıt Tutma Yöntemleri.....	50
5.2.1. Coulomb sayma yöntemi	51
5.2.2. Düzeltilmiş Coulomb sayma yöntemi.....	51
5.3. Uyarlanabilir Yöntemler	52

	Sayfa
5.3.1. Yapay sinir ağıları yöntemi	52
5.3.2. Bulanık mantık yöntemi	53
5.3.3. Destek vektör makinesi yöntemi	53
5.3.4. Kalman filtresi yöntemi	54
5.4. Hibrit Yöntemler	56
5.4.1. Coulomb sayma ve elektromotor kuvvet yöntemi	56
5.4.2. Coulomb sayma ve kalman filtresi yöntemi.....	56
6. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI.....	59
6.1. Simülasyon Tasarımı	59
6.2. Elektronik Devre Tasarımı.....	65
7. SONUÇ	73
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ	79

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Elektrikli araçlarda kullanılan bazı bataryaların parametreleri	4
Çizelge 3.1. BYS'lerin karşılaştırılması	16
Çizelge 3.2. AD dönüştürücü için doğruluk, çözünürlük ve tolerans değerleri	18
Çizelge 4.1. Dengeleme yöntemlerinin karşılaştırılması	45
Çizelge 6.1. VoC eşitliği polinom katsayı değerleri	59



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Lityum bataryaların kimyasal yapısı	6
Şekil 2.2. İç direnç modelinin elektriksel devresi.....	9
Şekil 2.3.RC modelinin elektriksel devresi.....	10
Şekil 2.4.Thevenin modelinin elektriksel devresi.....	10
Şekil 2.5. DP modelinin elektriksel devresi.....	11
Şekil 3.1. (a) Hücre (b) Blok (c) Modül (d) Batarya paketi.....	13
Şekil 3.2. Merkezi BYS blok diyagramı.....	14
Şekil 3.3. Modüler BYS blok diyagramı	14
Şekil 3.4. Master-Slave BYS blok diyagramı.....	15
Şekil 3.5. Dağıtılmış BYS blok diyagramı	15
Şekil 3.6. BYS'nin görev blok şeması.....	17
Şekil 3.7. (a) Şönt direnç (b) Alan etkili sensör.....	19
Şekil 3.8. Sıcaklık ölçümü (a) Her hücre için (b) Tüm batarya paketi için	19
Şekil 3.9. Lityum tabanlı bir pilin akım sınır değerleri.....	21
Şekil 3.10. (a) Minimum gerilim değeri (b) Maksimum gerilim değeri.....	21
Şekil 3.11. Bataryaların çalışma sıcaklık değerleri.....	22
Şekil 3.12. Dengelenmiş ve dengelenmemiş hücreler	23
Şekil 3.13. CAN BUS bağlantısı.....	27
Şekil 4.1. Batarya dengeleme yöntemleri	29
Şekil 4.2. Sabit şönt direnç blok şeması	30
Şekil 4.3. Anahtarlama şönt direnç blok şeması.....	31
Şekil 4.4. Anahtarlama kapasitör yöntemi blok şeması.....	32
Şekil 4.5.Tek anahtarlama kapasitör blok şeması.....	33

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. Çift katmanlı anahtarlamalı kapasitör blok şeması.....	34
Şekil 4.7. Tek indüktör blok şeması.....	35
Şekil 4.8. Çok indüktör blok şeması	36
Şekil 4.9. Tek sarımlı transformatör blok şeması	36
Şekil 4.10. Çok sarımlı transformatör blok şeması.....	37
Şekil 4.11 Çok transformatör blok şeması.....	38
Şekil 4.12. Cuk dönüştürücü blok şeması.....	39
Şekil 4.13. Buck-Boost dönüştürücü blok şeması	40
Şekil 4.14. Flyback dönüştürücü blok şeması.....	41
Şekil 4.15. Ramp dönüştürücü blok şeması	42
Şekil 4.16. Full-bridge dönüştürücü blok şeması.....	43
Şekil 4.17. Quasi-resonant dönüştürücü blok şeması	44
Şekil 5.1. Kestirim yöntemleri	47
Şekil 5.2. Batarya empedansının Nyquist diyagramı (Hz)	50
Şekil 5.3. Yapay sinir ağları ile SoC kestiriminin yapısı.....	52
Şekil 5.4. Kalman filtre kestirim yaklaşımı	54
Şekil 6.1. MATLAB Simulink modeli.....	61
Şekil 6.2. Bataryaya uygulanan akım	61
Şekil 6.3. Batarya terminal gerilimi	62
Şekil 6.4. SoC değerleri	62
Şekil 6.5. SoC hata oranı.....	63
Şekil 6.6. Kestirilen R0 değeri.....	63
Şekil 6.7. Kestirilen SoH değeri	64
Şekil 6.8. U1 gerilimleri ve hata oranı.....	64

Şekil	Sayfa
Şekil 6.9. U2 gerilimleri ve hata oranı	65
Şekil 6.10. STM32F407G-DISC1 geliştirme kartı	66
Şekil 6.11. Elektronik devrenin blok diyagramı	66
Şekil 6.12. Gerilim ölçüm devresi	67
Şekil 6.13. Akım ölçüm devresi.....	67
Şekil 6.14. Dengeleme devresi.....	68
Şekil 6.15. Tasarlanan devrenin görselleri.....	68
Şekil 6.16. Uygulama devre şeması.....	69
Şekil 6.17. Hücre gerilimleri.....	69
Şekil 6.18. Tetikleme sinyali ve batarya akımı.....	70
Şekil 6.19. Batarya akımları ve SoC değerleri.....	70
Şekil 6.20. USB ara yüz görüntüsü.....	71
Şekil 6.21. SoH değeri	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
U_{oc}	Açık devre gerilimi
I	Akım
a	Alfa
A	Amper
Ah	Amper saat
S	Anahtar
Q	Anahtarlama elemanı
B	Batarya hücresi
C_b	Batarya kapasitesi
β	Beta
o_j	Çıkış katmanındaki nöron sayısı
δ	Delta
R	Direnç
D	Diyot
x_k	Durum değeri
Z	Empedans
γ	Gama
w_{ij}	Giriş çıkış katmanları arasındaki ilişki katsayısı
x_j	Giriş katmanındaki nöron sayısı
P_k	Hata kovaryansı
Hz	Hertz
R_0	İç direnç
L	İndüktör
w_k	İşlem gürültüsü
K_k	Kalman kazancı
C	Kapasite
R_c	Kapasite direnci

Simgeler**Açıklamalar**

U_c	Kapasite gerilimi
kg	Kilogram
L	Litre
mA	Mili amper
mAh	Mili Amper saat
mV	Mili volt
Ω	Ohm
y_k	Ölçülebilir durum değeri
v_k	Ölçüm gürültüsü
π	Pi
R_{Th}	Polarizasyon direnci
U_{Th}	Polarizasyon gerilimi
C_{Th}	Polarizasyon kapasitesi
R_{pa}	Polarizasyon karakteristiği direnci
U_{pa}	Polarizasyon karakteristiği gerilimi
C_{pa}	Polarizasyon karakteristiği kapasitesi
R_{pc}	Polarizasyon konsantrasyonu karakteristiği direnci
U_{pc}	Polarizasyon konsantrasyonu karakteristiği gerilimi
C_{pc}	Polarizasyon konsantrasyonu karakteristiği kapasitesi
Const	Sabit değer
$^{\circ}C$	Santigrat derece
I_L	Şarj-deşarj akımı
R_t	Terminal direnci
U_L	Terminal gerilimi
u_k	Tetikleme sinyali
V	Volt
W	Watt
Q_n	Yeni bataryanın kapasitesi
$\%$	Yüzde
C_c	Yüzey kapasitesi

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AC	Alternatif akım
ADC	Analog dijital dönüştürücü
BYS	Batarya yönetim sistemi
DP	Çift polarizasyon
CAN BUS	Denetleyici alanı ağ veri yolu
DC	Doğru akım
EMF	Elektromotor kuvvet
USB	Evrensel seri veri yolu
CC	Sabit akım yöntemi
CV	Sabit gerilim yöntemi
SoH	Sağlık durumu
SoC	Şarj durumu

1. GİRİŞ

Ekolojik ve çevresel konulardaki farkındalığın artmasıyla birlikte fosil yakıt kullanan araçlar yerine çevre dostu araçlara ilgi daha yoğunlaştı. Araçlarda sıfır karbon emisyonu hedeflenmeye başlandı. Bu durumda içten yanmalı motorlar yerine elektrikli araçlar tercih edilmeye başlandı. Elektrikli araçların gücü, enerji depolama cihazları tarafından elde edildiği için temiz bir enerji sayesinde sıfır karbon emisyonunu ile çalışması mümkündür. Günümüzde enerji depolama cihazları yerine bataryalar, süper kapasitörler ve yakıt hücresi teknolojileri giderek büyüyor. Ulaşımında kullanılan enerji depolama sistemlerinde yüksek özgül enerjiye ihtiyaç vardır. Bataryalar bu sistem için iyi bir seçimdir. Çünkü bataryalarda uygun özgül güç, yüksek özgül enerji yoğunluğu ve uzun bir deşarj süresi vardır (Habib, 2023). İkinci bölümde bataryalar hakkında bilgi verilmiş ve bazıları aralarında kıyaslamalar yapılmıştır.

Bataryaların kimyasal yapılarından dolayı her hücre için eşit enerji dağılımı sağlanamaz bu da hücrelerin dengesiz şarj-deşarj olmasına sebep olur. Dengesiz şarj olan bir bataryada en düşük enerjiye sahip hücre bataryanın bitme eşiğini en yüksek enerjiye sahip hücre ise bataryanın dolma eşiğini belirler. Diğer hücreler tam şarj veya deşarj olmadan batarya dolu veya boş uyarısı verecektir. Bataryanın kullanım ömrü dengesiz şarj deşarj sebebiyle kısalmış olur. Pasif dengeleme yöntemi ve aktif dengeleme yöntemi olmak üzere temel iki çeşit dengeleme yöntemi vardır. Pasif yöntemde fazla enerji olan hücrenin enerjisi bir direnç yardımı ile düşük enerji seviyeli hücreye eşitlenir. Aktif yöntemlerde ise fazla enerji düşük enerjili hücreyi şarj etmek için kullanılır (Lee, 2023). Dördüncü bölümde dengeleme yöntemleri hakkında bilgi verilmiş ve bazıları arasında kıyaslamalar yapılmıştır.

Elektrikli araçların kullanım esnasında aracın ne kadar yok gideceğini tahmin etmek için bataryanın şarj durum kestirmek gerekir. Aynı zamanda bataryayı verimli kullanabilmek için ne zaman değiştirilmeli sorununa ise bataryanın sağlık durumu kestirilerek kullanıcı bilgilendirilir. Bu kestirim işlemleri doğrudan ölçülebilen değerler değildir. Doğruluğu kesin olmamakla beraber tahmin yapılır. Beşinci bölümde kestirim yöntemleri hakkında bilgi verilmiş ve bazıları arasında kıyaslamalar yapılmıştır.

Bataryalar aşırı şarj, aşırı deşarj, yüksek sıcaklık, aşırı gerilim gibi bazı çevresel etmenlere maruz kaldıklarında patlayabilirler bu da elektrikli bir araçta can güvenliğinin sağlanmasını

önemli kılar. Bu sebeple bataryanın çevresel şartlarını ölçüp sürekli izleyecek ve sınır limitlerine yaklaşımdan koruma işlemi yapacak bir sisteme ihtiyaç vardır. Bataryaların koruma, dengeleme, kestirim ve aracın diğler donanımlarına batarya hakkında bilgi sağlamak için haberleşme ihtiyaçlarını karşılayan sistemler batarya yönetim sistemi olarak isimlendirilirler. Üçüncü bölümde batarya yönetim sistemleri hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir.

Bütün yöntemler incelendikten sonra lityum bir batarya için, uyarlanabilir kestirim yöntemlerinden Coulomb sayma ve Kalman filtresi kestirim yöntemi olarak seçilmiş bir batarya yönetim sisteminin kestirim adımı ilk önce Matlab simulink programında yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre kestirim yöntemi olarak seçilmiştir. Aktif dengeleme yöntemlerinden olan flyback dönüştürücü metodu dengeleme yöntemi olarak seçilmiştir. Altıncı bölümde tasarlanan simülasyon ve elektronik devre hakkında bilgi verilmiştir.

2. BATARYALAR VE ELEKTRİKSEL MODELLERİ

Bataryalar elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depo edebilen ve gerektiğinde bu enerjiyi tekrar elektrik enerjisine çevirebilen devre elemanlarıdır. Bataryaların yalnızca iyonların geçişine izin veren elektrolit adı verilen bir ortamla ayrılmış bir negatif elektrot ve bir de pozitif elektrotları bulunmaktadır. Anotta oluşan oksidasyon reaksiyonu ile katotta oluşan indirgeme reaksiyonu sonucu iki elektrot arasında bir potansiyel fark oluşur. İlk elektrik enerjisi üretebilen pil Alessandro Volta tarafından icat edildi. Volta, elektrot olarak çinko ve bakır kullanırken elektrolit olarak tuzlu su kullanmıştır. Bu pilin düşük gerilim üretmesi, bakır üzerinde biriken hidrojenden dolayı tepkimenin yavaşlaması gibi bazı sorunları vardı. Bu pil ve türevleri şarj edilemediği için cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar gibi teknolojik aletlere uygun değildi. İlk şarj edilebilir batarya (Pb-Acid) 1859 yılında Fransız bir bilim adamı olan Gaston Planté tarafından icat edildi. (Jafari, 2020). Bataryaların verimlerini, kapasiteleri, enerji yoğunluklarını geliştirmek için yapılan çalışmalar günümüzde de devam etmektedir.

Bataryalar seri veya paralel bağlanarak kullanılabilir. Bataryaları seri bağlayarak gerilim değeri artırılırken akım değerini arttırmak için ise paralel bağlantı yapılır. Bataryalar güvenli ve daha uzun ömürlü kullanılması için aşırı şarj, derin deşarjdan kaçınılmalı ve en uygun ortam sıcaklığı değerlerinde kullanılmalıdır.

2.1. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Çeşitleri

Elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan bazı batarya çeşitlerinin parametreleri Çizelge 2.1'de verilmiştir. Kurşun asit bataryaların ve nikel tabanlı bataryaların enerji yoğunlukları düşük olması sebebiyle elektrikli araçların ihtiyaçlarını karşılamak için oluşturulan batarya grupları araçların ağırlıklarının büyük bir bölümünü oluşturmaktadır (Jafari, 2020).

Elektrikli bir aracın enerji ihtiyacını karşılamak için gerekli olan bataryanın ağırlığını hesaplamada kullanılan kütle enerji yoğunluğu kullanılır. Hacimsel enerji yoğunluğu ise bir elektrikli araç için kullanılması gereken bataryanın boyutunu hesaplamada kullanılır. Güç yoğunluğu ise birim kütle başına bataryanın maksimum güç miktarıdır (Özcan, 2021).

Çizelge 2.1. Elektrikli araçlarda kullanılan bazı bataryaların parametreleri

Batarya Türü	Nominal Gerilim (V)	Kütleli Enerji Yoğunluğu (Ah/kg)	Hacimsel Enerji Yoğunluğu (Ah/L)	Güç Yoğunluğu (W/kg)	Yaşam Döngüsü	Öz boşalım (aylık%)
Kurşun Asit (Pb-Acid)	2,0	35	100	180	1000	<5
Nikel Kadmiyum (NiCd)	1,2	50-80	300	200	2000	10
Nikel Metal Hidrit (NiMH)	1,2	70-95	180-200	200-300	<3000	20
Lityum İyon (Li-ion)	3,6	118-250	200-400	200-430	2000	<5
Lityum iyon polimer (LiPo)	3,6	100-200	-	-	<1000	-
Lityum Demir Fosfat (LiFePO ₄)	3,2	90-140	220	2000-4500	>3000	<5
Lityum Kükürt (LiS)	2,5	350-650	350	-	300	8-15

2.1.1. Kurşun asit (Pb-Acid) bataryalar

Kurşun asit bataryalar yaygın olarak kullanılmasına rağmen eski bir teknolojiye sahiptir. Kurşun asit batarya 1859 yılında Gaston Plante tarafından icat edildi. Kurşun asit bataryalarda elektrolit olarak sülfürik asit (H₂SO₄), pozitif elektrot olarak kurşun dioksit (PbO₂) ve negatif elektrot olarak kurşun kullanılmaktadır (Akgündoğdu, 2017).

Araçlarda ilk olarak ateşleme ve aydınlatma için kullanılmıştır. İlk elektrikli araç üreticisi olan General Motors kurşun asit bataryayı tahrik motoruna güç sağlamak amacı ile kullanmıştır. Düşük maliyeti en büyük avantajı olmakla beraber düşük öz boşalımını da tercih sebepleri arasında dikkat çekmektedir. Fakat kütleli enerji yoğunluğunun çok düşük olması gerekli batarya ağırlığının diğer batarya çeşitlerine göre çok daha fazla olacağını göstermektedir. Bunun yanında zamanla özelliklerini kaybeden elektrot ve elektrolitin değişimine gerek duyduğundan bakım maliyetlerinin yüksek olmasına sebep olmaktadır. Yaşam ömrünün kısa olması da dezavantajları arasındadır. Günümüzde kurşun asit

bataryalar hızın ve menzilin sorun olmadığı golf arabaları, forkliftler, tekerlekli sandalyeler gibi mikro-hibrit araçlarda kullanılmaktadır. Elektrikli araçlarda büyük ölçüde kullanılması beklenmemektedir (Özcan, 2021).

2.1.2. Nikel kadmiyum (NiCd) bataryalar

Nikel kadmiyum bataryalarda elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH), pozitif elektrotta nikel hidroksit (Ni(OH)₂) veya nikel oksihidroksit (NiOOH) ve negatif elektrotta kadmiyum (Cd) / kadmiyum hidroksit (Cd(OH)₂) kullanılmaktadır (Akgündoğdu, 2017).

Nikel kadmiyum bataryalar 1899 yılında Waldemar Jungner tarafından icat edildi. Yüksek hacimsel enerji yoğunluğuna sahip olması diğer batarya çeşitlerine göre araç içerisinde daha az yer kaplayacağı için artı yönüdür. Kadmiyum ve nikelin pahalı olması maliyet bakımından dezavantaj olmakla beraber kadmiyumun son derece zehirli bir madde olması sebebiyle çevreye verebileceği olası zararları ve geri dönüşüm maliyetlerini de tercih edilirken göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Aynı zamanda nikel tabanlı bataryalarda görülen ve hafıza etkisi olarak bilinen kısmen boşaldıktan sonra tekrar şarj edildiklerinde maksimum enerji kapasitelerini kademeli olarak kaybettikleri durum da dezavantajları arasındadır. Günümüzde radyolar, biyomedikal ekipmanlar ve profesyonel kameralar kullanım alanlarıdır. Elektrikli araçlarda büyük ölçüde kullanılması beklenmemekle beraber bazı üreticiler tarafından tercih edilmiştir (Özcan, 2021).

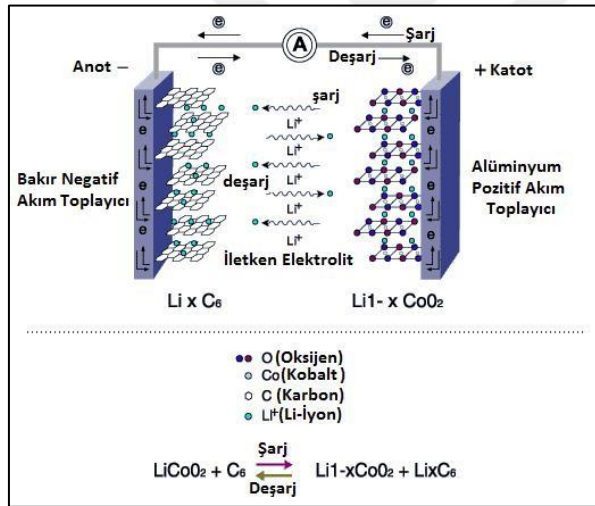
2.1.3. Nikel metal hidrit (NiMH) bataryalar

Nikel metal hidrit bataryalar nikel kadmiyum bataryalara alternatif olarak üretilmiştir. Negatif elektrot olan kadmiyum yerine metal hidrit kullanılmıştır (Akgündoğdu, 2017). 1991 yılında piyasaya sürülen nikel metal hidrit bataryalar en yaygın nikel tabanlı batarya olmuştur. Nikel metal hidrit bataryaların yüksek hacimsel enerji yoğunluğuna sahip olması, kadmiyum içermemesiyle çevreye zararlı etkilerinden kurtularak güvenli olması ve yaşam ömrünün uzun olması onu daha avantajlı hale getirmiştir. Dezavantajları ise nikel tabanlı bataryalarda ortak olan hafıza etkisi, nikel maliyetinin yüksek olması ve öz boşalımının yüksek olmasıdır. Günümüzde kesintisiz güç kaynakları ve telekom gibi sabit uygulamalarda kullanılmaktadır. Birçok hibrit araçta kullanılmasına rağmen nikel metal

hidrit bataryaların elektrikli araçlarda büyük ölçüde kullanılması beklenmemektedir (Özcan, 2021).

2.1.4. Lityum iyon (Li-ion) bataryalar

Lityum iyon bataryalar 1970'lerde M. Stanley Whittingam tarafından icat edilmiştir. Ticari olarak ilk kez 1991 yılında Sony Corporation tarafından kullanılmıştır (Özcan, 2021). Lityum iyon bataryalarda katot malzeme pozitif elektrot, anot malzeme ise negatif elektrot olarak kullanılır. Katot malzeme yerine karbon kullanılırken anot malzeme yerine lityum metalinin alaşımları kullanılır. Şarj/deşarj sırasında lityum iyonları pozitif ve negatif elektrotlar arasında karşılıklı olarak yer değiştirirler (Akgündoğdu,2017). Şekil 2.1'de lityum bataryalarda şarj vedeşarj sırasında kimyasal değişimler gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Lityum bataryanın kimyasal yapısı

Lityum iyon bataryalar, nikel tabanlı bataryalar ve Pb-asit bataryalar ile kıyaslandığında kütle ve hacimsel enerji yoğunluklarının daha yüksek olmasından dolayı birim ağırlık ve hacim başına depolanabilen enerji miktarının daha fazla olması onları daha tercih edilebilir hale getirmektedir. Ayrıca lityum iyon bataryaların öz boşalımı ayda %5' in altındadır. Lityum iyon bataryaların ömürleri sıcaklıkla ters orantılıdır. Sıcaklık ne kadar artarsa bataryanın ömrü o kadar kısalmaktadır.

Lityum iyon bataryaların ömürleri aşırı şarj ve derindeşarj durumlarına da çok hassastır. Bu sebeple bataryaları güvenli bölgede çalışmasını sağlamak için bir izleme devresine

ihtiyaç duyarlar. İzleme devreleri hücrelerin tepe gerilim değerlerini sınırlar ve deşarj durumunda hücre gerilimlerinin aşırı düşmesini engeller aynı zamanda batarya sıcaklığını izleyerek aşırı ısınmasını önler. Bazı devrelerde bataryaların şarj ve deşarj akımları da sınırlıdır. Lityum iyon bataryalar günümüzde birçok uygulamada kullanılmaktadır. Elektrikli araç endüstrisinde birçok firma tarafından tercih edilmektedir (Özcan, 2021).

Anot malzeme için ilk denemelerde sadece lityum kullanıldığı görülmektedir. Bu daha yüksek enerji yoğunluğu sağlarken su ile tepkimeye girdiğinde ani ve yakıcı bir reaksiyon verdiği için bataryanın kullanımı sırasında lityum çok güvenilir görülmemiştir. Bu sebeple lityum metalini diğer metaller ile alaşım yapıp güvenli seviyede tutmak istenirken enerji yoğunluğunda oluşacak kaybında en az tutulması için yeni batarya tasarımları önerilmiştir (Polat, 2012).

2.1.5. Lityum iyon polimer (LiPo) bataryalar

Lityum iyon polimer bataryalarda elektrolit olarak polimer metali kullanılır. Bu metalin kullanılması ile elde edilen elektrolitin iletkenliği, diğer metallerin kullanılmasıyla elde edilen elektrolitlerin iletkenliğinden daha fazladır. Polimer metalinin kullanılması lityum iyon polimer bataryaların daha hızlı ve kolay bir şekilde üretilmesine olanak sağlamaktadır (Akgündoğdu, 2017).

Lityum iyon polimer bataryalar, lityum iyon bataryalarla neredeyse aynı özelliklere sahiptir. Lityum iyon bataryalara göre daha güvenli ve daha uzun ömürlüdür fakat aşırı şarj ve derin deşarj durumlarında fonksiyonel olarak daha kararsız bir yapıya sahiptir. (Özcan, 2021).

2.1.6. Lityum demir fosfat (LiFePO₄) bataryalar

Katot malzemesi lityum demir fosfat olan bataryalardır. Diğer lityum tabanlı bataryalara göre öz boşalımı yüksek olması dezavantajıdır. Fakat çevrim ömrünün yüksek olması, hacimsel enerji yoğunluğunun ve güç yoğunluğunun diğer lityum tabanlı bataryalara göre daha yüksek olması sebebiyle avantajlıdır. Kimyasal ve termal tepkileri daha iyi olmakla beraber düşük maliyeti sebebiyle elektrikli araçlarda kullanımı daha yaygındır (Özcan, 2021).

2.1.7. Lityum sülfür (Li-S) bataryalar

Pozitif elektrot olarak sülfür kullanılan lityum tabanlı batarya gruplarındandır. Ortalama çevrim ömrüne sahip olan bu bataryalar yüksek enerji yoğunluğuna ve yüksek şarj verimine sahiptir (Akgündoğdu, 2017). Geliştirilmekte olan batarya teknolojilerinin arasında yer alan lityum sülfür bataryaların maliyetleri düşük olması ve diğer lityum tabanlı pillere göre sıcaklık çalışma aralığının daha yüksek olması göze çarpmaktadır. Ancak döngü esnasında kapasitede azalma, düşük çevrim ömürleri ve yüksek öz boşalım gibi dezavantajları vardır. Bu olumsuzlukları göze alındığında uzun menzilli elektrikli araçlarda kullanılması mümkün görülmemektedir (Özcan, 2021).

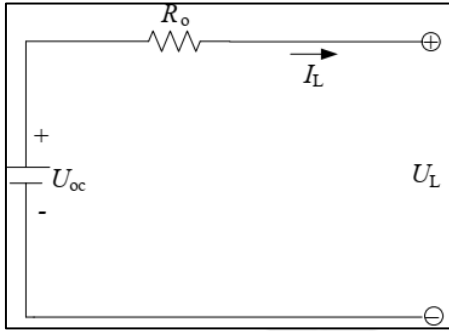
2.2. Bataryaların Elektriksel Modelleri

Yinelenabilir enerji kaynaklarına yönelim, fosil yakıtların sınırlı erişilebilirliği ve çevreye verdiği zararlar sebebiyle giderek artmaktadır. Bu sebeple elektrik enerjisinin depo edilmesi konusu da bir gereksinim halini almaktadır. Bataryalar, karmaşık sistemlerin enerji depolama görevini üstlenen önemli bir parçasıdır. Bataryaların performanslarının tahmininde ve tasarımında batarya modelleme önemli bir rol oynamaktadır. Bataryalar sistemin performansını etkileyen bazı çevresel etmenler ve kendi içinde girdiği belirli döngülerin oluşumuyla doğrusal olmayan davranışlar sergilerler. Bu nedenle gerçek bir pilin özelliklerini doğru bir şekilde yansıtacak bir model gerekmektedir (Madani, 2019). Batarya modellerinin birçok çeşidi olmakla beraber günümüzde de gerekli şartlara göre elektriksel modellemeler yapılmaktadır. Bataryaların matematiksel işlemlerini yapabilmek için elektriksel eşdeğer devreleri çıkartılır. Bataryaların dinamik karakteristikleri ve çalışma prensiplerine göre eşdeğer bir devre oluşturmak için dirençler, kapasitörler ve gerilim kaynaklarından oluşan bir devre modeli geliştirilir.

Bu eş değeri devrelerin yardımı ile bataryaların şarj durumu (SoC) ve sağlık durumu (SoH) gibi parametrelerin kestirilmesinde kullanılmaktadır. Batarya üzerinde yapılan şarj-deşarj testleri ile elektriksel devre parametreleri oluşturulur. Bu parametrelerin bazıları sabit kabul edilmesine rağmen bu değeri gerçekte sabit değildir. Batarya sıcaklığına, şarj durumuna, akıma, kapasiteye ve batarya ömrüne göre batarya parametreleri değişmektedir (Tezde, 2018).

2.2.1. İç direnç modeli

Bataryaların en temel elektriksel eş değer devresidir. Şekil 2.2’de ve Eş. 2.1’de gösterildiği gibi bataryanın açık devre gerilimi ideal bir gerilim kaynağı U_{oc} olarak tanımlanmıştır. Bataryanın iç direnci R_0 , şarj-deşarj akımı I_L ve batarya terminal gerilimi ise U_L olarak tanımlanmıştır. I_L değeri pozitif iken bataryadeşarj olurken değeri negatif iken şarj durumundadır. R_0 ve U_{oc} değerleri SoC, SoH ve sıcaklığın bir fonksiyonudur (He, 2011).



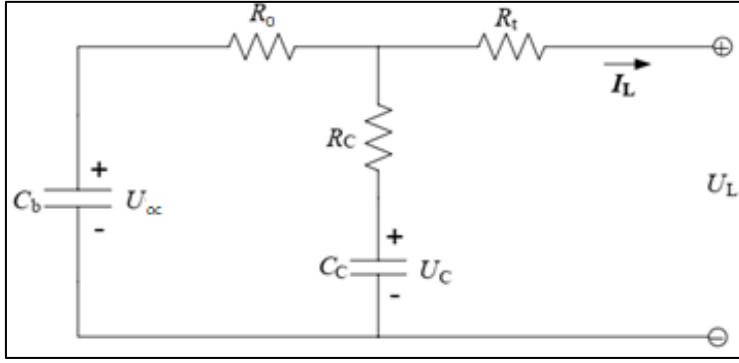
Şekil 2.2. İç direnç modelinin elektriksel devresi

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

2.2.2. RC modeli

RC model batarya şirketi SAFT tarafından tasarlandı. Şekil 2.3’de görüldüğü gibi iki kapasitör ile üç direnç içermektedir. C_c kapasitörünün değeri çok düşük olup bataryanın yüzey etkileri için seçilmiştir ve yüzey kapasitörü olarak adlandırılır. C_b kapasitörünün değeri çok büyük olup bir bataryanın kimyasal olarak elektrik enerjisini depolamak için kullanılan kapasiteyi temsil etmektedir. SoC değeri bu kapasitör üzerinden hesaplanmaktadır. R_t , R_0 ve R_c değerleri sırası ile terminal direnci, iç direnci ve kapasitör direnci olarak adlandırılmaktadır. U_{oc} ve U_c değerleri ise kapasitörler üzerine düşen gerilimi ifade eder ve Eş. 2.2’deki gibi hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{oc} \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_b(R_0+R_c)} & \frac{1}{C_b(R_0+R_c)} \\ \frac{1}{C_c(R_0+R_c)} & \frac{-1}{C_c(R_0+R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{oc} \\ U_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_c}{C_b(R_0+R_c)} \\ \frac{-R_e}{C_c(R_0+R_c)} \end{bmatrix} [I_L] \quad (2.2)$$



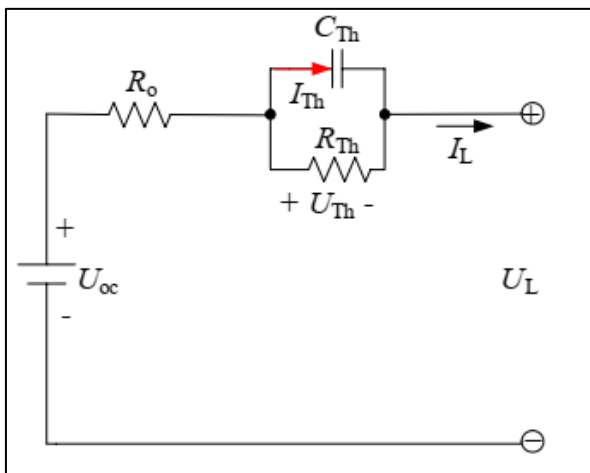
Şekil 2.3. RC modelinin elektriksel devresi

U_L değeri ise bataryanın terminal gerilimidir ve Eş. 2.3'deki gibi hesaplanabilir (He, 2011).

$$[U_L] = \left[\frac{R_c}{(R_o + R_c)} \quad \frac{R_e}{(R_o + R_c)} \right] \begin{bmatrix} U_{oc} \\ U_c \end{bmatrix} + \left[-R_t - \frac{R_o R_c}{(R_o + R_c)} \right] [I_L] \quad (2.3)$$

2.2.3. Thevenin modeli

Thevenin modeli, Rint modeline seri ve birbirine paralel bir direnç kapasitör ikilisinin eklenmesiyle elde edilir. Bu ekleme işlemi bataryanın dinamik özellikleri içindir (He, 2011). Şekil 2.4'deki gibi U_{oc} bataryanın açık devre gerilim değeri, R_o bataryanın iç direnci, R_{Th} polarizasyon direnci, C_{Th} şarj-deşarj sırasındaki geçici tepkiyi ve U_L ise batarya terminal gerilimini ifade eder. Eş. 2.4'de Thevenin modelinin matematiksel denklemleri verilmiştir

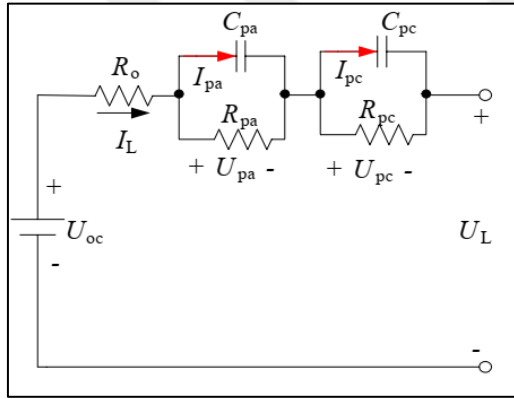


Şekil 2.4. Thevenin modelinin elektriksel devresi

$$\begin{cases} \dot{U}_{Th} = -\frac{U_{Th}}{R_{Th}C_{Th}} + \frac{I_L}{C_{Th}} \\ U_L = U_{oc} - U_{Th} - I_L R_0 \end{cases} \quad (2.4)$$

2.2.4. Çift polarizasyon (DP) modeli

Lityum-ion bataryaların test sonuçlarına dayanarak bataryalarda polarizasyon etkileri olduğu söylenebilir. Bu polarizasyon etkisi Thevenin modeli ile giderilebilir fakat şarj veya deşarj durumlarının sonunda elektrokimyasal polarizasyon ve konsantrasyon polarizasyon arasındaki farkı veremez (He, 2011). Şekil 2.5’de polarizasyon karakteristiklerinin tanımlanabilmesi için tasarlanan ikili polarizasyon modeli verilmiştir.



Şekil 2.5. DP modelinin elektriksel devresi

DP modelde bataryanın açık devre gerilimin temsil eden U_{oc} ve bataryanın iç direncini temsil eden R_0 değeridir. Elektrokimyasal polarizasyon karakteristiğinin direnci R_{pa} ve bataryanın anlık güç durumunun tepkisi ise C_{pa} ile gösterilir. Polarizasyon konsantrasyonu karakteristiğinin direnci R_{pc} ve bataryanın anlık güç durumunun tepkisi ise C_{pc} ile gösterilir. Eş. 2.5’te DP modelin matematiksel denklemleri verilmiştir.

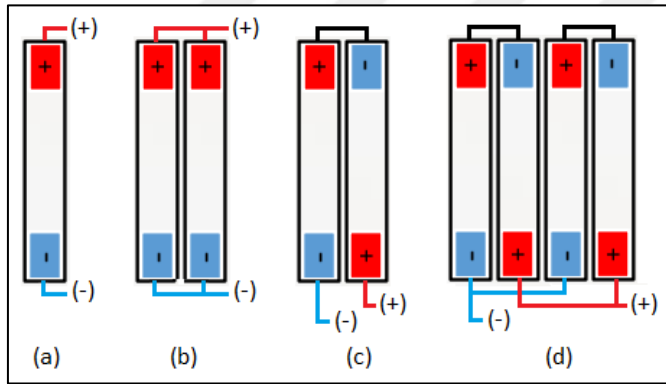
$$\begin{cases} \dot{U}_{pa} = -\frac{U_{pa}}{R_{pa}C_{pa}} + \frac{I_L}{C_{pa}} \\ \dot{U}_{pc} = -\frac{U_{pc}}{R_{pc}C_{pc}} + \frac{I_L}{C_{pc}} \\ U_L = U_{oc} - U_{pa} - U_{pc} - I_L R_0 \end{cases} \quad (2.5)$$



3. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ

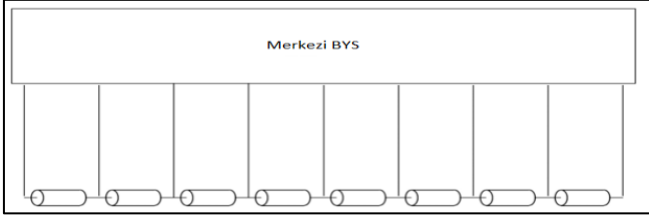
Batarya yönetim sistemleri (BYS'ler) oldukça geniş bir anlamda kullanılmaktadır ve yapısında ne olması gerektiği kesin olarak tanımlanmamıştır. Bataryaları koruyan, durumlarını kestiren, gerilimlerini ölçen, performanslarını maksimum seviyede tutmaya çalışan ve bu durumları kullanıcıya veya herhangi bir başka devreye aktaran sistemlerin tümü BYS olarak isimlendirilebilir.

BYS'lerde, bataryaların seri ve paralel bağlanması durumuna veya yalnızca tek bir batarya hücresine göre uygulanacak işlem değişmektedir. Bu sebeple batarya gruplarından söz edilirken anlam karmaşasını önlemek için bazı tanımlamalar yapılır. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi bataryanın en basit elemanına hücre adı verilir. Hücrelerin paralel bağlanması sonucu elde edilen batarya grupları blok olarak isimlendirilirken, seri bağlanmış hücrelere veya bloklara modül adı verilir. Sistemde bulunan birbirine seri ya da paralel bağlanmış modüllere ise batarya paketi denir (Andrea, 2010).



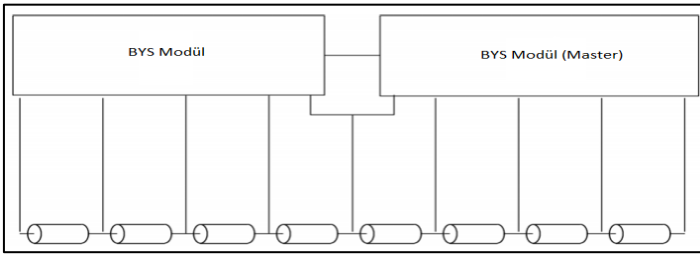
Şekil 3.1. (a) Hücre, (b) Blok, (c) Modül, (d) Batarya paketi

BYS, tasarım şekillerine göre merkezi, master-slave, modüler ve dağıtılmış olarak sınıflandırılabilirler. Şekil 3.2'de merkezi BYS devresinin blok diyagramı görülmektedir. Sistem her bir hücrenin direkt olarak ana bir devre üzerine bağlanmasıyla oluşturulur. Merkezi BYS olarak tasarlanan sistemde herhangi başka bir kart olmamasıyla kompakt yapısı, maliyetinin düşük olması ve herhangi bir sorun oluştuğunda çözümünün kolay bulunması avantajlarıdır (Andrea, 2010).



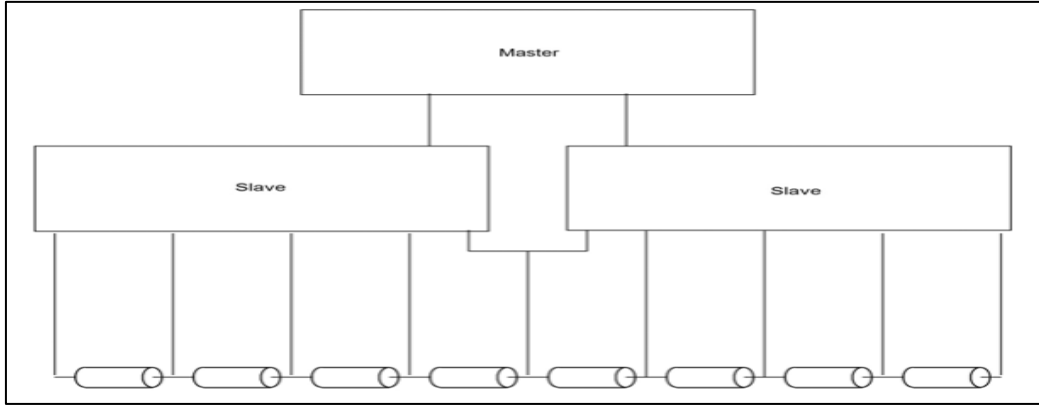
Şekil 3.2. Merkezi YYS blok diyagramı

Modüler bir batarya yönetim sistemi blok diyagramı Şekil 3.3’de görülmektedir. Modüler tasarım, merkezi tasarıma çok benzemekle beraber batarya paketi özdeş modüllere bölünür. Her modül için bir kart atanır ve bu kartlardan birine master görevi verilir. Tüm paketi yöneten ve diğer kartlarla iletişimi kuran master karttır. Diğer kartlar basit bir ölçüm cihazı olarak işlev görür. Modüler sistemdeki her kart master kart görevini üstlenmeye hazır olarak üretilir. Modüler sistem, merkezi sistemin avantajlarının çoğuna sahiptir. Ek olarak merkezi sisteme göre kartlar okuma yaptığı batarya modülüne daha yakın konumlandırılarak kablo demetlerinin yönetimi daha basit hale getirilebilir. Sistemdeki modül sayısı arttırıldığında kartı tekrar tasarlamak yerine sisteme kart ekleyerek sistemin genişlemesi kolayca sağlanabilir. Fakat maliyeti merkezi sisteme göre daha yüksektir. Çünkü batarya modüllerini idare eden kartların kullanılmayan özellikleri bulunur. Aynı zamanda kart geçişlerindeki hücreden, her iki karta ekstra kablo gitmesi gerekliliği ve kartların birbiri ile haberleşmesi için kullanılan kablolar ekstra maliyet getirmektedir (Andrea, 2010).



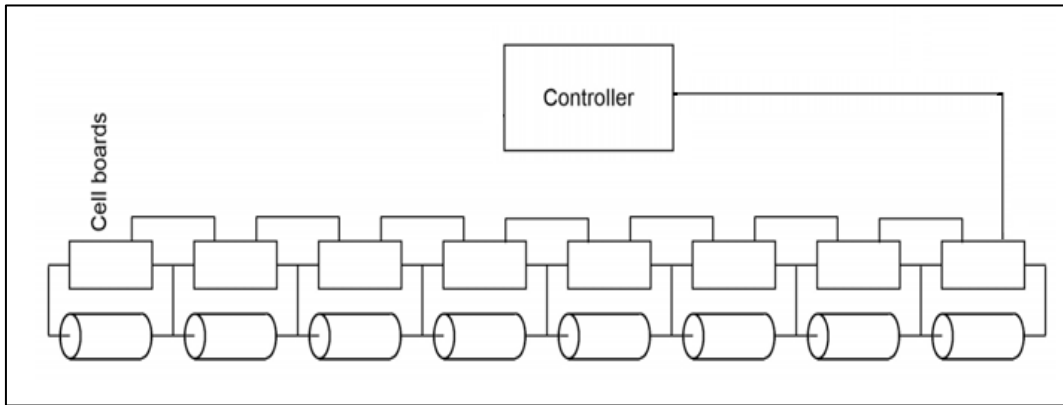
Şekil 3.3. Modüler YYS blok diyagramı

Şekil 3.4’de Master-Slave bir sistemin blok diyagramı görülmektedir. Master-Slave sistem, modüler sisteme çok benzemektedir. Her biri birkaç hücre gerilimini ölçen birden çok özdeş slave kart kullanılır. Ancak master kart modüler sisteme göre farklıdır. Master kart sadece hesaplamalar ve kartlar arasındaki iletişimi sağlar.



Şekil 3.4. Master-Slave BUS blok diyagramı

Modüler sistemden farklı olarak master karta herhangi bir ölçüm yaptırılmaz. Bu sebeple master kart ayrı slave kartlar ayrı tasarlanıp üretilir. Master-Slave sistem, modüler sistem ile aynı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Master-Slave sistem, modüler sisteme alternatif olarak tasarlanmış bir sistemdir. Modüler sistemden tek artısı slave ve master kartlar birbirinin yerine kullanılmadığı için gereksiz olan ekipmanlar ortadan kaldırılarak maliyet azaltılmıştır (Andrea,2010). Şekil 3.5'te de görüldüğü gibi dağıtılmış bir batarya yönetim sistemi diğer sistemlerden çok farklı bir şekilde tasarlanmaktadır.



Şekil 3.5. Dağıtılmış BUS blok diyagramı

Her hücrenin ölçümlerini, hesaplamalarını yapan kendine ait bir kartı bulunmaktadır. Bu kartlar birbiri ile haberleşerek sistemin devamlılığını sağlamaktadırlar. Büyük ölçekli sistemler bir kontrolcüye ihtiyaç duyar. Fakat genel olarak herhangi bir kontrolcü kullanmadan da sistem tasarımı yapılabilir. Dağıtılmış bir sistemin diğer sistemlere göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Dağıtılmış sistemde her hücre için ayrı kart eklenmesi diğer sistemlere göre daha karmaşık bir yapıya sahip olması ve bileşen sayısının

daha fazla olmasından dolayı maliyeti diğer sistemlerden yüksektir. Dağıtılmış sistemlerde ölçüm yapan kart hücreye çok yakın olduğundan hatta bazı durumlarda kartları direk olarak hücreye lehmlenebilir pozisyonda olması yapılan ölçümün güvenilirliğini arttırmaktadır. Fakat kartlar arasındaki her bağlantı birer potansiyel arıza noktası olduğundan arıza tespitinin zor yapılması dezavantajdır. Dağıtılmış sistemlerde hücreler ile kartların birbirine çok yakın olması bir avantaj iken bazen dezavantaja dönüşebilir. Bu durum elektrik sistemi ile haberleşme sistemini birbirine çok yakın tutacağından sistemdeki gürültü miktarı artacaktır. Her hücre için ayrı bir tasarım yapılmaması kartların hepsinin birebir aynı olması ve hücre kadar kart kullanılması avantajlarıdır. Diğer sistemlerde tasarlanan kart hücre miktarından az ya da çok olabilir bu da sistemde kullanılmayan girişlerin bulunmasına sebep olur. Çizelge 3.1’de BYs’ler, tasarım şekilleri dikkate alınarak bazı parametrelere göre karşılaştırılmıştır (Andrea; 2010).

Çizelge 3.1. BYs’lerin karşılaştırılması

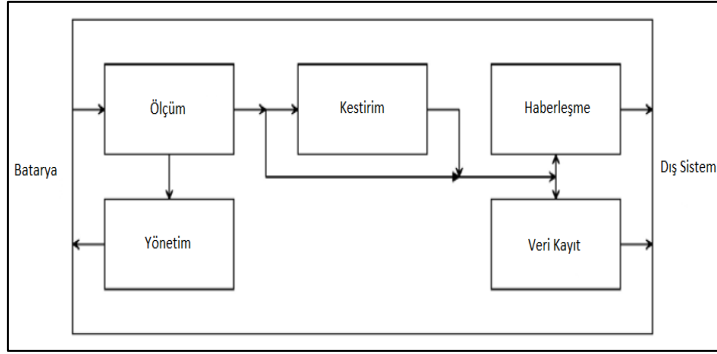
	Merkezi	Modüler	Master-Slave	Dağıtılmış
Ölçüm kalitesi	++	++	++	+++
Gürültü bağımsızlığı	+++	+++	+++	++
Çok yönlü kullanım	+	++	++	+++
Güvenlik	+	+	+	+++
Kart maliyeti	+	+++	+++	+++
Kurulum maliyeti	++	++	++	+
Bakım maliyeti	+	+	+	++

+++ = Çok iyi; ++ = İyi; + = Kötü

3.1. Batarya Yönetim Sisteminin Görevleri

Batarya yönetim sistemlerinin iyi bir şekilde işleyebilmesi için bazı işlevleri yerine getirmesi gerekmektedir. Şekil 3.6’da bu gereklilikler blok şema olarak verilmiştir. Bir BYs’nin en temel görevleri ise şu şekilde sıralanabilir;

- Batarya hücrelerini ve modülleri korumak.
- Bataryanın uygun gerilim ve sıcaklık aralığında çalıştırılmasını sağlamak.
- Bataryanın ömrünü uzatmak ve verimini arttırmak.
- Batarya hücreleri için yapılan kestirimleri dış sisteme aktarmak.



Şekil 3.6. BYS'nin görev blok şeması

3.1.1. Ölçüm

Batarya yönetim sistemi bataryaların verimli ve güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için bazı verilere ihtiyaç duyar. Bunlar hücre gerilimleri, hücre sıcaklıkları ve hücre akımları olarak sıralanabilir.

Hücre gerilimi

Bir BYS'de her hücrenin geriliminin ayrı ayrı ölçülmesi gerekir. Bu durumda ölçüm sıklığının ne kadar olması gerektiği belirlenmesi gereken bir parametredir. Bu parametre BYS'nin nerede kullanılacağına göre değişir. Yedek besleme sistemlerinde kullanılacak bir BYS'de dakikada bir veya 10 saniyede bir ölçülecek gerilim değeri yeterlidir. Elektrikli araçlar gibi akım değerinin aniden değişebileceği uygulamalarda ise bu sıklık saniyede bir olarak belirlenebilir. Bilimsel araştırma uygulamalarında ise bu sıklık daha da artırılarak saniyede 10 ile 100 arasında bir değer belirlenmektedir. Unutulmamalıdır ki ölçüm değerinin sık alınması işlemciyi zorlayacaktır. Bu yüzden uygulama amacına göre ölçüm sıklığı seçilmelidir.

Ölçüm sıklığı kadar önemli olan bir diğer konu ise ölçüm doğruluğudur Doğruluk değeri analog-dijital dönüştürücünün (ADC) kaç bit olduğuna göre değişir. Çizelge 3.2'de analog-dijital dönüştürücülerin 5V'daki doğruluk değeri ile çözünürlük ve tolerans değerleri verilmiştir.

Bir bataryanın şarj veya deşarj durumda olduğunu anlamak için 100mV yeterlidir. Lityum tabanlı pillerde açık devre gerilimi, batarya şarjda iken yaklaşık olarak 200mV yükselir iken

deşarj durumunda ise 500mV düşer. Fakat bu değer dengeleme yapabilmek için yeterli değildir. Dengeleme yapabilmek için gerekli olan hassasiyet ise 50mV kadardır. Bu durumda okumadaki en büyük hata payı hücrelerin iç direncinden kaynaklanacaktır.

Bir hücrenin SoC değerinin yaklaşık olarak tahmin edilebilmesi için hücrenin açık devre gerilimi ve SoC eğrisinin uç değerlerindeki değişim 10mV kadardır. Bu durumda SoC değeri tahmini %10 seviyelerinde hatalı olacaktır. SoC değeri %20 ile %80 arasında ve önceki durumu hakkında bilgiye sahip olunmayan bir hücre için ise doğruluk değeri 1mV seviyelerinde olmalıdır. Birçok BYS’de doğruluk değeri 10mV ile 30mV arası seçilir.

Çizelge 3.2. AD dönüştürücü için doğruluk, çözünürlük ve tolerans değerleri

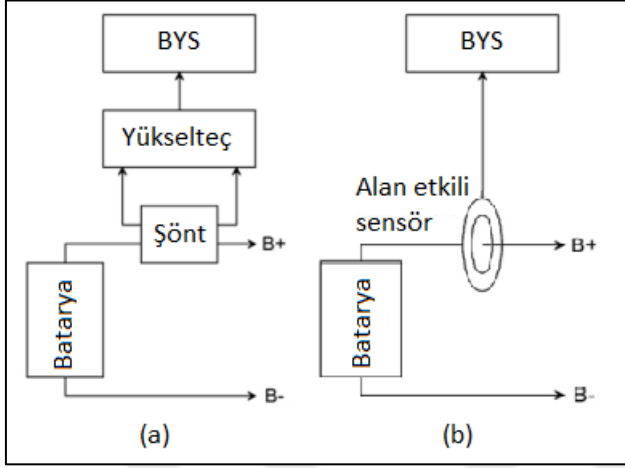
Doğruluk (mV)	Çözünürlük (bit)	Tolerans (%)
100	6	1
30	8	0.25
10	9	0.1
1	10	0.01

Hücre akımı

Hücre akımı ise her BYS için gerekli olmasa da bataryanın SoC ve SoH değerlerinin tahmininde kullanılmaktadır. Bataryadan geçecek akımın ölçülmesi için iki yöntem vardır. Bunlardan birinci şönt direnç yöntemidir. Şönt direnç yönteminde küçük değerli seçilecek bir direncin üzerinden akım geçmesi sonucunda direnç üzerine düşecek gerilimin bir yükselteç yardımı ile yükselti olarak ölçülmesidir. Diğer yöntem ise alan etkili sensör yöntemidir. Batarya akımını taşıyan iletkenin ürettiği manyetik alanın içine bir alan etkili sensör yerleştirilir. Bu sensör akım ile doğru orantılı olacak şekilde bir gerilim üretir ve bu gerilim direkt olarak ölçülebilir. Bu yöntem maliyetten dolayı pek tercih edilmez.

Şönt direnç yöntemi ucuz olmasının yanında ısınan direncin değerinin değişmesinden dolayı doğruluktan sapacaktır. Alan etkili sensör yönteminin doğruluğu daha iyi olmasına rağmen uygulaması pahalı bir yöntemdir. Hassasiyetin önemli olduğu uygulamalarda alan etkili sensör yöntemi kullanılırken ölçüm hassasiyetinde esnek olan uygulamalarda ise şönt direnç yöntemi kullanılır.

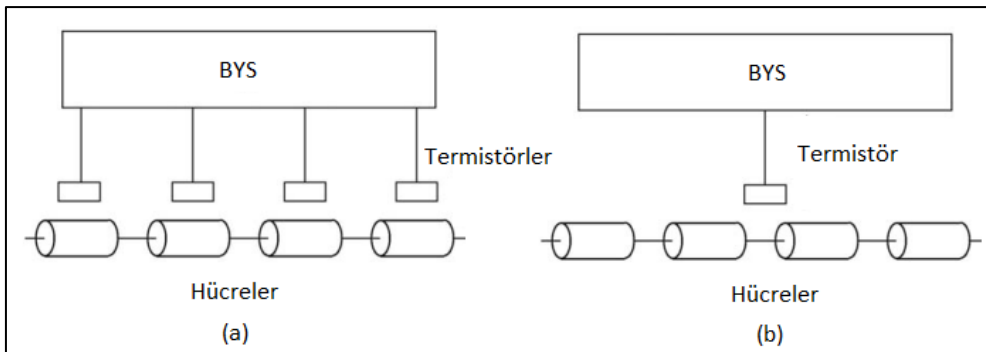
Gerilim ölçümünde olduğu gibi ölçüm sıklığı ve doğruluğu akım ölçümünde de önemlidir. Şekil 3.7’de batarya akımının ölçülmesinde kullanılan teknik görülmektedir.



Şekil 3.7. (a) Şönt direnç, (b) Alan etkili sensör

Hücre sıcaklığı

Sıcaklık ise gerekli olan bir değer veridir. Lityum tabanlı piller belirli bir sıcaklık değerinin dışında ise deşarj edilmemelidir. Olası problemler sebebiyle bir hücrede oluşan sıcaklık değişimi daha büyük problemler oluşmadan sistemi uarmak için en iyi seçenektir. Şekil 3.8’de görüldüğü gibi sıcaklık ölçümü her hücre için ayrı ayrı yapılacağı gibi tüm batarya paketi içinde yapılabilir.



Şekil 3.8. Sıcaklık ölçümü (a) Her hücre için, (b) Tüm batarya paketi için

Her hücre için ayrı ayrı yapılan ölçüm hücrelerin SoH değerlerinin hesaplanması için daha verimli olsa da dağıtılmış yöntem dışındaki diğer yöntemler için ayrı kablolama

maliyeti gerektirmektedir. Tüm ölçüm değerlerinde olduğu gibi ölçüm sıklığının ve doğruluğunun belirlenmesi sıcaklık ölçümü içinde gereklidir.

3.1.2. Yönetim

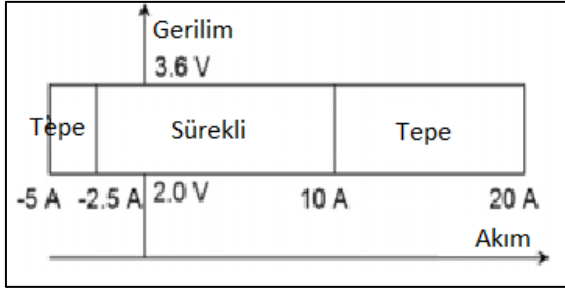
Ölçüm basamağı sonrası alınan verilerin incelenmesi ve algoritmalara girdi olarak sunulan görev bölümüdür. Bu bölümde alınan verinin ilk önce güvenli aralıkta olup olmadığı değerlendirilir. Eğer ölçülen değerler güvenli değil ise koruma basamağı aktif olur. Güvenli aralıkta olan veriler sıcaklık yönetimi ve dengeleme algoritmalarına aktarılır.

Koruma

Batarya yönetim sisteminin en önemli görevlerinden biri de korumadır. İyi bir batarya yönetim sistemi hücrelerin uygun çalışma şartları dışındaki durumlarda sistemin çalışmasını önleyerek batarya paketlerini korur. Bazı sistemler akımı keserek bazı sistemler ise çekilen akımı sınırlayarak bunu gerçekleştirir.

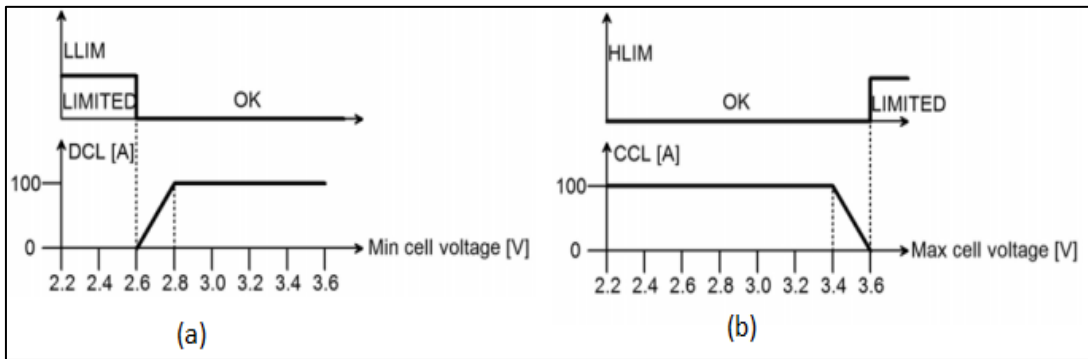
Bataryaların şarj için farklı deşarj için farklı akım limitleri vardır. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi lityum tabanlı bir pilin sürekli olarak şarj olabileceği maksimum akım 10A olarak belirtilirken kısa süreliğine maksimum 20A ile şarj olabilmektedir. Deşarj durumda ise sürekli maksimum deşarj akımı 2.5A olarak belirlenirken kısa süreliğine belirlenen maksimum deşarj akımı ise 5A'dir. Belirlenen bu değerler dışında bataryanın çalıştırılması batarya ömrüne büyük zarar verebileceği gibi güvenli bölge sınırını da geçilmiş olacaktır.

Belirlenen tepe değerleri motor gibi ilk kalkınma anında yüksek akım çeken alıcılar için esnetilmiştir. İyi tasarlanmış bir batarya yönetim sisteminde bu dört akım değeri için ayrı ayrı değerler ayarlanabilir. Ek olarak bir algoritma yardımı ile akım değerlerinin sürekli bölgede veya tepe değerinde çalıştığı tespit edilebilir. Bu algoritma aşırı akım durumlarına anında tepki vererek batarya paketi akımını azaltmanın hatta kesmenin zamanının geldiğini belirleyebilir.



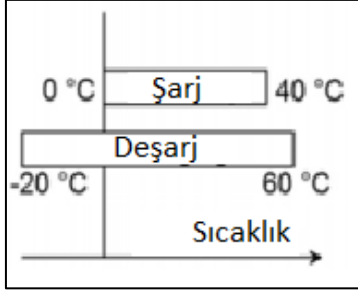
Şekil 3.9. Lityum tabanlı bir pilin akım sınır değerleri

Bir diğer koruma durumu ise hücre gerilimlerinin aşırı artması veya düşmesidir. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi batarya deşarj durumunda iken hücre gerilimlerinin minimum düşme seviyesi belirtilmiştir. Eğer hücre veya batarya paketi belirlenen bu değerin altına düştüğünde deşarj akımı kademeli olarak azaltılır veya direkt olarak kesilir. BYS elektrikli araçlar gibi deşarj akımının birden kesilmesinin sakıncalı olduğu uygulamalarda kademeli olarak azaltılarak sürücülerin panik yaşamadan yavaşça durmaları sağlanmalıdır. Aynı yöntem ile maksimum hücre gerilim değeri belirtilmiştir. Batarya şarj durumunda iken hücre geriliminin maksimum seviyeye çıkması durumunda şarj akımı kesilir. Bu durum batarya paketinin daha uzun sürelerde kullanılması için gerekli bir işlemdir.



Şekil 3.10. (a) Minimum gerilim değeri, (b) Maksimum gerilim değeri

Koruma işlevini aktif edecek bir diğer durum ise sıcaklık durumudur. Lityum tabanlı bataryalarda, batarya kullanım süresini en çok etkileyen durum sıcaklıktır. Şekil 3.11'de görüldüğü gibi lityum tabanlı bataryalarda şarj durumu 0 °C ile 40 °C arasında yapılmalıdır. Deşarj durumu ise daha geniş aralığı sahiptir. -20 °C ile 60 °C arasında deşarj işlemi yapılabilir. Hücre sıcaklığı belirtilen bu sıcaklıklara ulaşmadan belirlenen eşik değerleri ile sıcaklık yönetimi algoritması aktif hale getirilmelidir.



Şekil 3.11. Bataryaların çalışma sıcaklık değerleri

Sıcaklık yönetimi

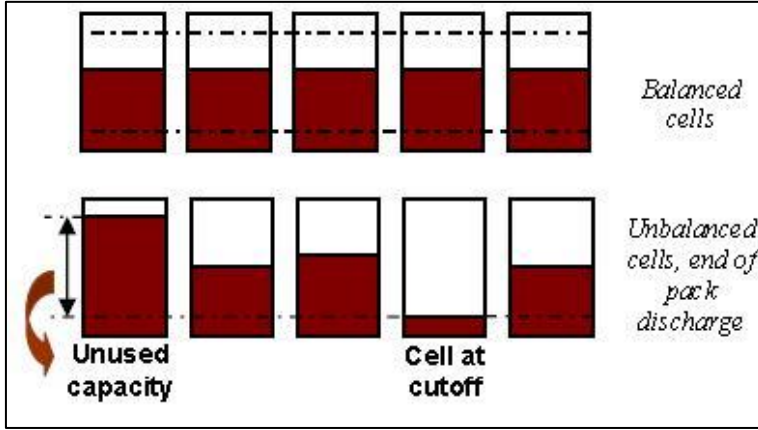
Lityum tabanlı bataryaların çalışma sıcaklık aralığı belirtilmiştir. Batarya belirtilen sıcaklık aralığında tutulmadığı takdirde kullanım ömründe büyük kayıplar yaşanabilir. Örneğin deşarj durumunda -20 °C ile 60 °C arasındadır. Fakat otomotiv ve askeri standartlar gibi bazı uygulama alanları -40 °C ile 85 °C gibi daha geniş bir çalışma aralığı istemektedir. Bu uygulama alanlarında batarya paketlerinin sıcaklık yönetimine ihtiyaçları vardır.

Minimum çalışma sıcaklığının altında olan bir batarya paketi için bir ısı kaynağına ihtiyaç vardır. Pasif dengeleme yapan sistemlerde dengeleme dirençleri şarj devresi üzerinden aktif edilerek batarya paketi ısıtılmaya çalışılır. Aktif dengeleme yapan sistemlerde ise ayrı bir ısıtıcı kullanılabilir. Maksimum çalışma sıcaklığının üstünde olan bir batarya paketi için ise bir fan yardımı bile batarya paketi üzerindeki sıcaklık ortama yayılabilir. Bu durumda fan devir hızı sabit olacağı gibi sıcaklık durumuna göre kademeli olarak da tasarlanabilir (Andre, 2010).

Dengeleme

Batarya yönetim sistemlerinin en önemli görevlerinden biri de hücreleri dengelemektir. Dengeleme kısaca hücrelerin şarj durumlarını eşitlemek olarak tanımlanabilir. Şekil 3.12’de bir batarya paketinde dengelenmiş ve dengelenmemiş hücrelerin kapasiteleri gösterilmiştir.

Bataryanın boş noktasını belirleyen etmen enerjisi en zayıf hücredir. En düşük enerjili hücre, en düşük gerilime sahip olacak ve deşarj koşullarının sona ermesine sebep olacaktır. Bu nedenle, yetersiz şarjlı bir seri hücre, tüm paketin daha az kullanılmasına neden olacaktır.



Şekil 3.12. Dengelenmiş ve dengelenmemiş hücreler

Şarj sırasında ise en yüksek enerjili hücre, en yüksek gerilime sahip olacak ve bataryaların dolu bilgisini tüm hücreler şarj olmadan verecektir. Batarya paketinin şarj işlemi duracak ve düşük enerjili hücreler tamamen şarj olamayacaktır. Bu sebeple bataryaları daha verimli kullanabilmek için hücre dengeleme devrelerine ihtiyaç duyulur. Hücre dengesizliği, hücreler aynı miktarda yükü taşımadığında ortaya çıkar.

Hücre dengesizliğine sebep olan bir diğer etmen ise her hücrenin iç dirençlerinin farklı olmasıdır. Üretim sürecinde hücre dengesini sağlamak için hücrelerin kapasitesini eşleştirmek önemlidir (DeIRossi, 2002).

Lityum tabanlı bir batarya grubunda dengeleme akımı yaklaşık 100mA olarak seçilirse yeterli olacaktır. Aynı zamanda hücreleri dengeleme işlemi bir SoC algoritması üzerinden yapılır ise 2 ile 5 kat arası daha verimli bir dengeleme yetkinliği sağlanabilir (Andrea, 2010). Dengeleme yöntemleri sonraki bölümlerde ayrı bir başlık altında incelenmiştir.

3.1.3. Kestirim

BYS'ler için kestirim sistemin bulunması gerekli olan bir özellik değildir. Yapılan kestirimler, sistemin korunması için değil daha ziyade kullanıcının sistemi rahat kullanabilmesi içindir. Örneğin SoC bataryanın ne kadar şarjı kaldığını ve sistemin ne zaman şarj edilmesi gerektiği hakkında kullanıcıyı bilgilendirir. SoH ise bataryanın ne kadar ömrü kaldığını ve kullanıcının bataryaları ne zaman değiştirmesi gerektiği hakkında bilgi vermektedir. Bu parametreler olmadan sistem düzgün çalışabilir fakat kullanıcının aklındaki soru işaretlerini gidermek için faydalıdır. Çoğu BYS sadece SoC değeri verirken daha

gelişmiş BYS'ler SoH değerini de verir. Özellikle lityum tabanlı bataryalarda SoC değerini doğrudan ölçmenin herhangi bir yolu yoktur. Bu yüzden bazı parametre değerlerine göre bu değerler kestirilir. Bu yüzden yapılan kestirimler gerçek değerleri vermemektedir.

Kestirimler ile gerçek değerler arasında büyük farkların oluşması kullanıcıya maddi zarar verecektir. Örneğin SoH değerinde yapılan yanlış kestirim kullanıcının batarya ömrü bitmeden değişim yapmasına sebep olacaktır. BYS'nin ana işlevini yerine getirdiği durumlarda da kestirimler hatalı olabilir. Kestirimler, uygulanan algoritmalar ile gerçek duruma en yakın değerleri tahmin etmeyi amaçlar. Bataryalarda SoC ve SoH değerleri kestirilir (Andrea, 2010). Kestirim yöntemleri sonraki bölümlerde ayrı bir başlık altında incelenmiştir.

SoC (State of Charge)

SoC bataryanın şarj durumu anlamına gelir. Bir arabanın deposunda ne kadar yakıt kaldığını bilen bir sürücü aracının bu yakıt ile ne kadar gideceğini tahmin eder. Gitmek istediği yere yakıtı yetiyor ise huzurlu bir yolculuk yapar. Bataryalarda ise bu değer SoC değeridir. Fakat arabalarda bulunan yakıt sıvı seviye ölçümü ile doğrudan yapılabilir iken özellikle yeni nesil lityum tabanlı bataryalarda SoC değerini doğrudan ölçmek olanaksızdır. Bu sebeple SoC değeri başka parametrelerin yardımıyla sadece kestirilebilir.

SoC değerini kestirmenin dolaylı yolları vardır. En sık kullanılan yöntemler gerilim çevirisi ve akım entegrasyonudur. Her iki teknikte faydalıdır fakat kendi başlarına SoC değerini güvenilir bir şekilde kestiremez. Bu teknikler bazı algoritmalar ile birleştirilerek daha makul bir SoC değeri kestirimi yapmak mümkündür.

SoH (State of Health)

SoH değeri bataryanın sağlık durumu anlamına gelir. Şarj ve deşarj sayıları bataryaların kullanım ömürleri ile ilgili bize bilgi verirler. Lityum tabanlı bataryalarda SoC durumunda olduğu gibi SoH değerini de doğrudan ölçmek imkansızdır. Temel iki parametre ile SoH değeri kestirilmeye çalışılır. Bunlar bataryanın iç direnci ile kapasite değerleridir. Bataryanın iç direnci kendi başına bir anlam ifade etmez fakat hücre akımı ve terminal gerilimi yardımı ile bataryanın açık devre geriliminin kestirilmesi için gereklidir. Açık devre gerilimi

bataryanın SoC ve SoH değerlerinin kestirilmesi için kullanılan bir parametredir. Bataryaların şarj ve deşarj döngüleri esnasında iç dirençlerinde bir artma meydana gelir. Bu değer bataryanın kullanım koşulları ve termal konforu ile de değişkendir. Kapasite kabaca bir bataryanın nominal gerilim değerinde sağlayabileceği elektrik yükü miktarıdır. Örneğin 500mAh bir bataryanın nominal gerilim değerinde bir saat boyunca 500mA verebileceği anlamına gelir. Sisteme bağlı bir bataryanın her defasında bu deneyi yaparak kapasite değerinin ölçülmesi çok zordur. Bu sebeple hücre akımı, hücre gerilimi ve sıcaklık gibi parametrelerdeki değişime göre kestirim yapılmaya çalışılır.

SoH değerinin SoC değerine göre kestirimi daha zordur değişen çevre şartlarına ve kullanım durumuna göre parametreler kestirime dahil edilse bile her bataryanın kimyasal yapısına göre vereceği tepki farklı olacağından yapılan kestirim gerçek değerden çok farklı olabilir (Andrea, 2010).

3.1.4. Haberleşme

Bir batarya yönetim sisteminde bataryanın durumunu, yapılan kestirimleri, sistemde karşılaşılan uyarı ve hata durumlarının başka bir sisteme ya da kullanıcıya aktarılması için gerekli olan yapıdır. Dış sistem ile kurulacak bağlantılar kablolar yardımı ile yapılabildiği gibi kablosuz sistemler ile de yapılabilir. Maliyetin az olması için genellikle kendini kanıtlamış haberleşme protokolleri kullanılır. BYS'lerde kullanılan bazı haberleşme protokolü çeşitleri şunlardır.

RS232

RS232 haberleşme standardı noktadan noktaya iletişimde önemli bir yere sahiptir. Bilgisayarlarda bulunan bu port sayesinde kolay haberleşme sağlamaktadır. Günümüzde dizüstü bilgisayarlarda artık bu port olmamasına rağmen bir dönüştürücü ile hala kullanılabilir. Gürültü hassasiyeti ve düşük hızı yüzünden endüstriyel araçlarda kalıcı olarak kullanılması uygun görülmemektedir. Fakat BYS'lerde arıza bildirimleri ve bir bilgisayar yardımı ile görülebilen hata bildirimleri için kullanılabilir. Büyük paketlerde meydana gelebilecek gürültünün haberleşme hattına yansımaması için bir izolatör ile aktarım sağlanmalıdır.

USB

USB'lerin artık tüm bilgisayarlarda bulunması sebebiyle BYS'lerde haberleşme standardı olarak kullanımı RS232 standardına göre daha yaygındır. Fakat USB standardının da RS232 standardı gibi BYS'lerde kalıcı olarak kullanılması uygun görülmemektedir. Sadece kısa süreli hata bildirimlerinde ve anlık veri akışının bilgisayara aktarılması gereken yerlerde kullanılabilir.

Ethernet

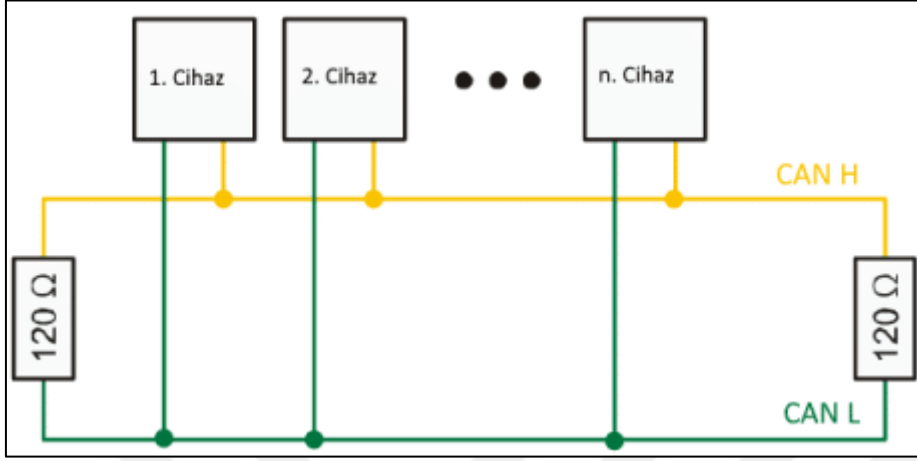
Ethernet bağlantısı karada olan çok büyük batarya yönetim sistemleri için kullanılabilir. Sistemin çok büyük olması veya birden fazla olması ile birlikte bir kontrol noktasından tüm batarya yönetim sistemlerini yerel bir ağ bağlantısı ile birbirine bağlayıp bilgisayardaki bir uygulama yardımı anlık izlenebilirliğin sağlandığı ve hata raporlarını kaydeden bir sistem tasarlandığında etkin olarak kullanılabilir (Andrea, 2010).

CAN Bus

1980'lerin ortasında Robert Bosch tarafından otomotiv endüstrisi için geliştirilmiştir. Gerçek zamanlı uygulamalarda sistem elemanları arasında yüksek kapasiteli veri alışverişini sağlamak amacıyla iki kablo üzerinden seri haberleşme metodu ile çalışır. CAN haberleşme protokolü dünya genelinde standartlarla belirlenmiştir. Otomotiv endüstrisinde kullanılması, hatasız bir haberleşme sağlaması, maliyetinin düşük olması ve uygulanabilirliğinin yüksek olması gibi avantajları sayesinde BYS'lerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

CAN Bus haberleşme protokolü iki kablo arasındaki potansiyel farka bakarak veriler hakkında karar verir. Veri yolu üzerinde baskın ve çekinik olmak üzere iki seviye vardır. Veriyi gönderen veri yolu seviyelerini değiştirerek alıcıya mesaj gönderir. Veri yoluna bağlı tüm cihazlar veri yoluna mesaj gönderebilir. Bir master-slave anlayışı yoktur. Aynı anda iki cihazdan da veri yoluna mesaj gönderdiğinde mesaj önceliği olan cihaz ilk mesajı gönderir. Şekil 3.13'de genel bir CAN bağlantısı görülmektedir. Fiziksel ara yüzde baskın seviye için CAN-H hattı yüksek seviyede tutulurken CAN-L hattı düşük seviyede olacak şekilde bir sinyal uygulanır. Bu durumda iki hat arasında bir potansiyel fark oluşur. Çekinik seviye ise CAN-H ve CAN-L hatları yüksek empedans durumundadır. Bu durum veri yolunda veri

olmadığı her durumda görülür. Çekinik durumu elde etmek için ise veri yolunun her iki tarafı da 120 ohm direnç ile sonlandırılır (Kara, 2009).



Şekil 3.13. CAN Bus bağlantısı

3.1.5. Veri kayıt

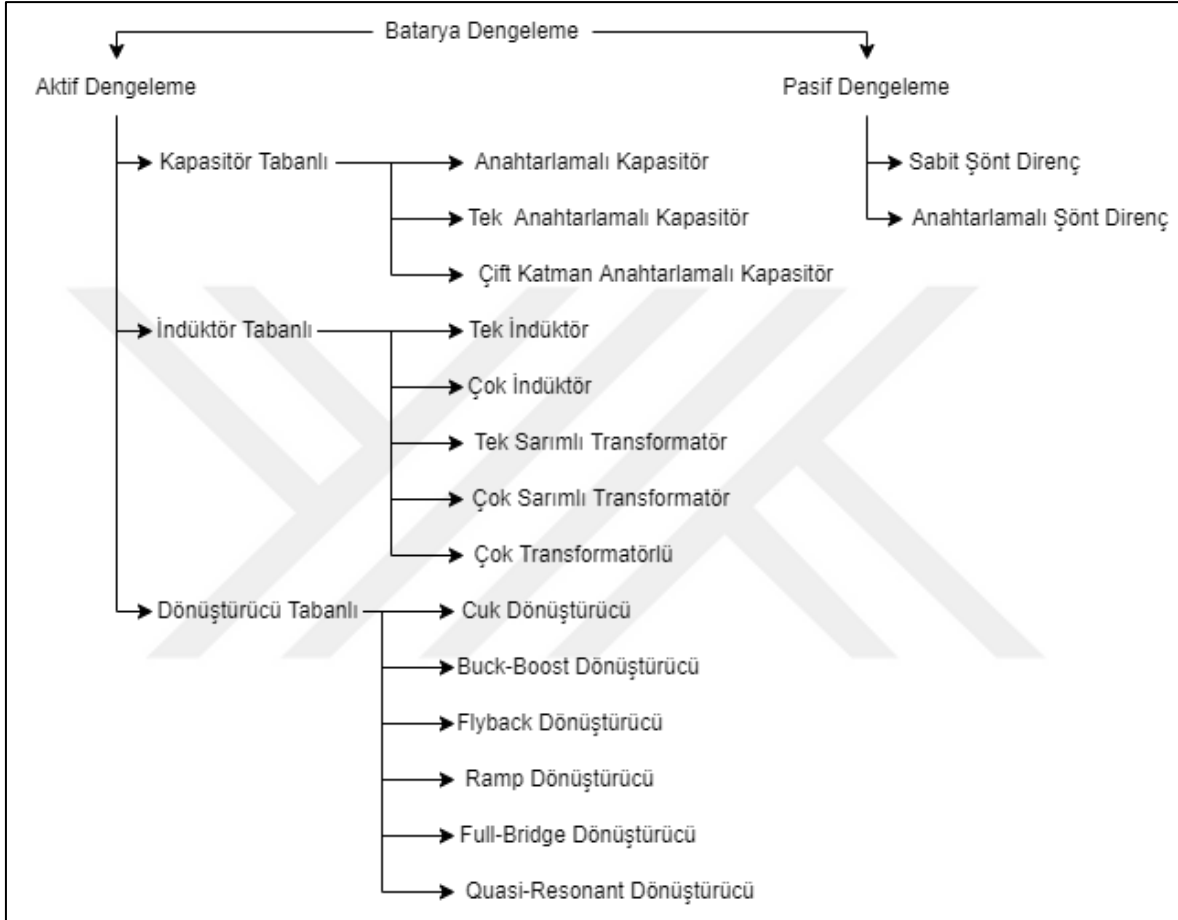
Birçok BYS’de veri kayıt görevi bulunmamaktadır. Bunun sebebi haberleşme ile dış sisteme aktarılan verilerin burada kaydedildiği düşüncesidir. Fakat bu durum gerçekleşmeyebilir. Araç endüstrisinde bu kayıt işlemi anlık olarak yapılmaktadır. Fakat farklı alanda kullanılacak bir BYS’nin kendi veri kayıt sistemi olmalıdır.

Veri kayıtlarının içeriğinde paket gerilimi, paket akımı, paket SoC ve SoH değerleri, paket direnci, minimum ve maksimum hücre gerilimleri, minimum ve maksimum hücre sıcaklıkları, şarj akımı limiti, deşarj akımı limiti, uyarılar ve hatalar olmalıdır. Bu verilen daha sonra kullanıcının başka veriler ile karşılaştırarak sistemin daha verimli hale gelmesine veya olası kötü durumları engellemesine yardımcı olabilir (Andrea, 2010).



4. BATARYA DENGELEME YÖNTEMLERİ

Bu bölümde bataryaların dengeli bir enerjiye sahip olabilmesi için uygulanan yöntemler ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Şekil 4.1’de batarya dengeleme yöntemleri listelenmiştir.



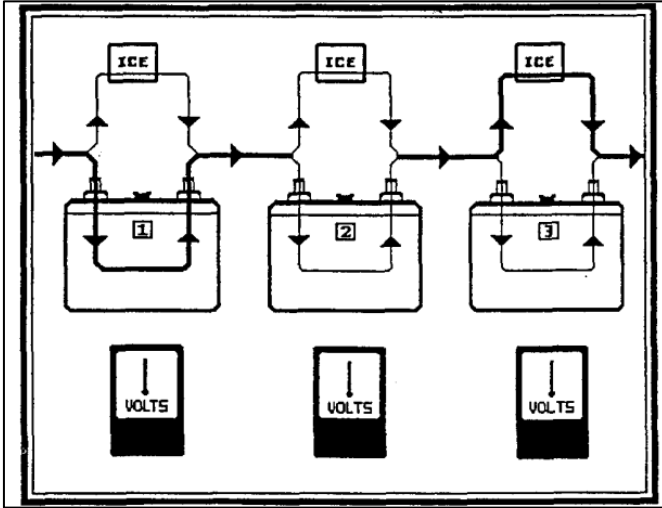
Şekil 4.1. Batarya dengeleme yöntemleri

4.1. Pasif Dengeleme Yöntemleri

Pasif dengeleme yöntemlerinin prensibi hücrelere paralel bağlı direnç üzerinde fazla enerjinin harcanmasına dayanır. Her hücreye paralel bağlı bir direnç bulunur fazla enerji bu direnç üzerinde harcanır ve hücre enerjisi diğer hücrelerin enerjisine eşitlenir. Böylelikle aşırı enerji sürekli olarak ortadan kaldırılır. Düşük maliyetli ve basit bir topoloji olması sebebiyle en çok kullanılan dengeleme yöntemidir. Dezavantajları ise dengesiz ısı dağılımı, enerji kaybı ve uzun dengeleme süresi olarak belirtilebilir (Ahmad, 2019).

4.1.1. Sabit şönt direnç

SoC değeri daha düşük olan hücre diğer hücrelerden daha fazla akım çekmek isteyecektir. Fakat hücreler seri bağlı olduğundan dolayı bu akım tüm hücrelerden geçerek diğer hücrelerin aşırı şarj olmasına sebep olacaktır. Bu sorunu engellemek için Şekil 4.2’de görüldüğü gibi her hücreye paralel sabit bir direnç bağlanır. Hücre daha az akıma ihtiyaç duyduğunda bağlı olan şönt direnç üzerindeki akım artarken hücreden geçen akım azalır. Böylelikle aşırı şarj engellenir. Tam tersi durumda hücre daha fazla akıma ihtiyaç duyduğuna bağlı olan şönt direnç üzerindeki akım azalırken hücreden geçen akım artacaktır. Bu durumda ise yetersiz şarj önlenecektir. Sonuç olarak tüm hücreler belirlenen değerdeki gerilim eşliğinin ne altında ne de üstünde olacaktır (Lindemark, 1991).



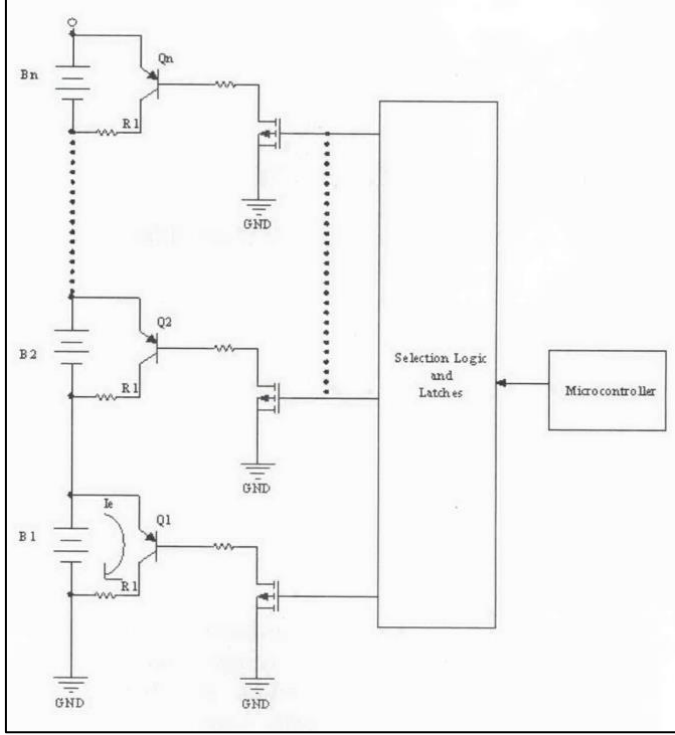
Şekil 4.2. Sabit şönt direnç blok şeması

Hücre başına bir direnç kullanılması sebebiyle uygulanması çok basit ve çok ucuz olması tercih nedenleri arasında gösterilebilir. Şönt direnç değeri belirlenirken hücrelerin eşdeğer olduğu varsayılır. Aynı zamanda hücrelerin zamanla yaşlanması göz ardı edilir. Dengeleme belirlenen bir değerde yapılır ve yüksek enerji kayıpları dezavantajları olarak sayılabilir. Lityum tabanlı bataryalar için uygun değildir (Daowd, 2011).

4.1.2. Anahtarlamalı şönt direnç

Anahtarlamalı şönt direnç yöntemi Şekil 4.3’ de görüldüğü gibi her hücre için bir direnç ve anahtarlama elemanı gerektirir. Bu yöntemde her hücrenin gerilimi ölçülür ve en düşük

hücre gerilimi bir kontrolcü tarafından tespit edilir. Hücrelerin tümü en düşük enerji seviyesine sahip hücreye eşitleninceye kadar anahtarlamaları aktif edilir ve akım şönt direnç üzerinden geçirilir. Böylelikle en düşük enerjiye sahip hücre şarj olurken diğerleri şarj olmayacaktır (Stuart, 2009).



Şekil 4.3. Anahtarlamalı şönt direnç blok şeması

Bu yöntem sabit şönt direnç yöntemine göre daha verimli ve daha güvenilirdir. Lityum tabanlı bataryalarda kullanılabilir. Ucuz olması, uygulanmasının basit olması ve hızlı dengeleme oranına sahip olması avantajları iken yüksek güçlü dirençlerin büyük enerji kayıplarına sebep olması veriminin düşük olmasına sebep olurken aynı zamanda termal yönetime ihtiyaç duyması da dezavantajlarıdır (Daowd, 2011).

4.2. Aktif Dengeleme Yöntemleri

Aktif dengeleme yöntemleri, pasif dengelemenin en önemli sorunu olan verim problemi çözmek için tasarlanmışlardır. Pasif dengeleme anında fazla enerji ısı enerjisine dönüştürülüp harcanmaktadır. Aktif dengeleme yöntemlerinde ise bu enerji kondansatörler, bobinler, transformatörler ve dönüştürücüler yardımı ile taşınmaktadır. Enerji hücreden hücreye (cell to cell), hücreden pakete (cell to pack) veya paketten hücreye (pack to cell)

olacak şekilde batarya içerisinde taşınır. Böylelikle enerji ısı olarak harcanmak yerine diğer hücreleri şarj etmekte kullanılır. Aktif dengeleme kapasitör tabanlı, indüktör tabanlı ve dönüştürücü tabanlı olmak üzere üç başlık altında incelenebilir (Ahmad, 2019).

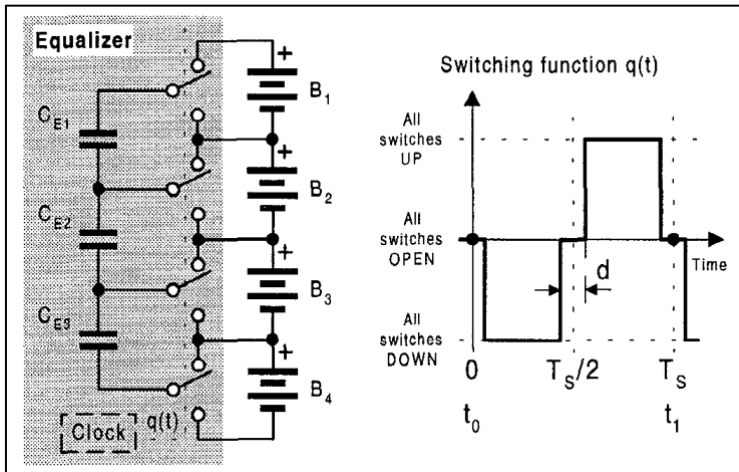
4.2.1. Kapasitör tabanlı

Bu yöntemde enerjinin taşınması için kapasitörler kullanılır. Yaklaşık 100mA dengeleme akımı önerilir. En büyük dezavantajı ise kapasitörlerin şarjı ve deşarjı sırasında oluşan enerji kaybı ve yüksek dengeleme süresidir (Ahmad, 2019).

Anahtarlamalı kapasitör

Anahtarlamalı kapasitör yönteminde hücre gerilimlerini ölçmeye gerek duyulmaz. Hücrede bulunan fazla enerji bitişiginde bulunan hücreye kaydırma şeklinde çalışır. Anahtarların yön değişimi ise bir clock sinyali ile sağlanır. Olası olumsuz durumları engellemek için clock sinyaline bir miktar ölü zaman bırakılır (Pascual, 1997).

Şekil 4.4'de anahtarlamalı kapasitör yönteminin blok şeması gösterilmiştir. B_1 hücresi yüksek enerjiye B_3 hücresi ise düşük enerjiye sahip olsun. İlk durumda B_1 hücresinin gerilim değeri C_{E1} kapasitörüne aktarılır ikinci durumda ise C_{E1} kapasitörünün değeri B_2 hücresine aktarılır. Hücreden hücreye taşınan enerji (cell to cell) düşük enerjili olan B_3 hücresine gidinceye kadar bitişik hücrelerin arasında dolaşır.

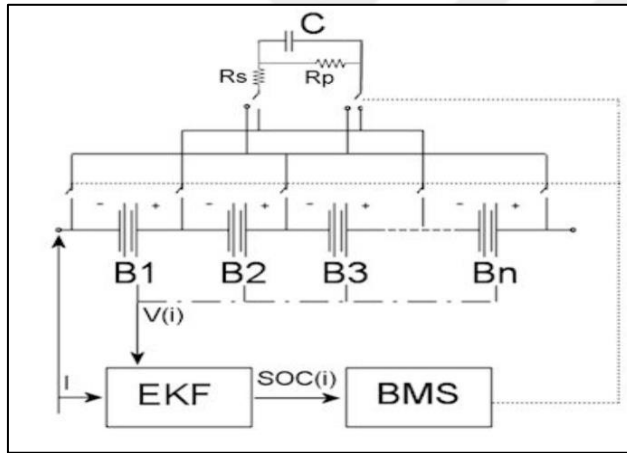


Şekil 4.4. Anahtarlamalı kapasitör yöntemi blok şeması

Bu yöntemin kapalı döngü bir kontrole ihtiyaç duymaması sebebiyle kontrolü kolay olması, şarj ve deşarj durumlarının ikisinde de çalışması avantajları arasında yer alır. Dengeleme süresinin yüksek olması ve anahtar sayısının çok olması ise dezavantajları arasındadır (Daowd, 2011).

Anahtarlama tek kapasitör

Şekil 4.5’de tek katmanlı anahtarlama kapasitör blok şeması gösterilmiştir. Anahtarlama kapasitör yönteminden farklı olarak anahtarlar bir kontrolcü tarafından kontrol edilir. Enerjisi yüksek olan hücre bir algoritma tarafından belirlenir ve belirli anahtarlar konum değiştirilerek enerji kapasitöre aktarılır. Enerjisi düşük olan hücre yine algoritma tarafından tespit edilir. Kontrolcü tarafından belirli anahtarlar konum değiştirilerek kapasitörde olan enerji düşük enerjili hücreye aktarılır. Enerji hücreden hücreye aktarılır (Speltino, 2010).



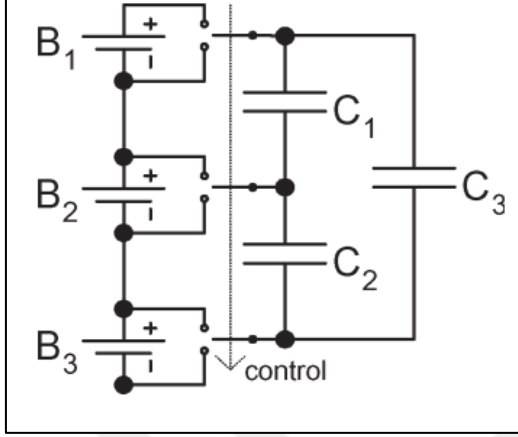
Şekil 4.5. Tek anahtarlama kapasitör blok şeması

Bu yöntemde anahtarlama kapasitör yönteminde kullanılan kapasitörlerin ve anahtarların sayısı azaltılmıştır. Kontrolünün basit olması ve hem şarj hem de deşarj esnasında kullanılması avantajlarıdır. Dezavantajları ise dengeleme için bir algoritmaya ihtiyaç duyması ve dengeleme hızının ortalama seviyede olmasıdır (Daowd, 2011).

Çift katmanlı anahtarlama kapasitör

Şekil 4.6’da çift katmanlı anahtarlama kapasitör blok şeması görülmektedir. Hücelere paralel bağlanmış kapasitörlere paralel bir kapasitör daha bağlanarak ikinci katman

oluşturulur. Bu katman clock sinyalinde bırakılan ölü zamanda kapasitörler arası dengeyi sağlayarak dengeleme hızını arttırmak için yapılmıştır. (Baughman, 2008)



Şekil 4.6. Çift katmanlı anahtarlama kapasitör blok şeması

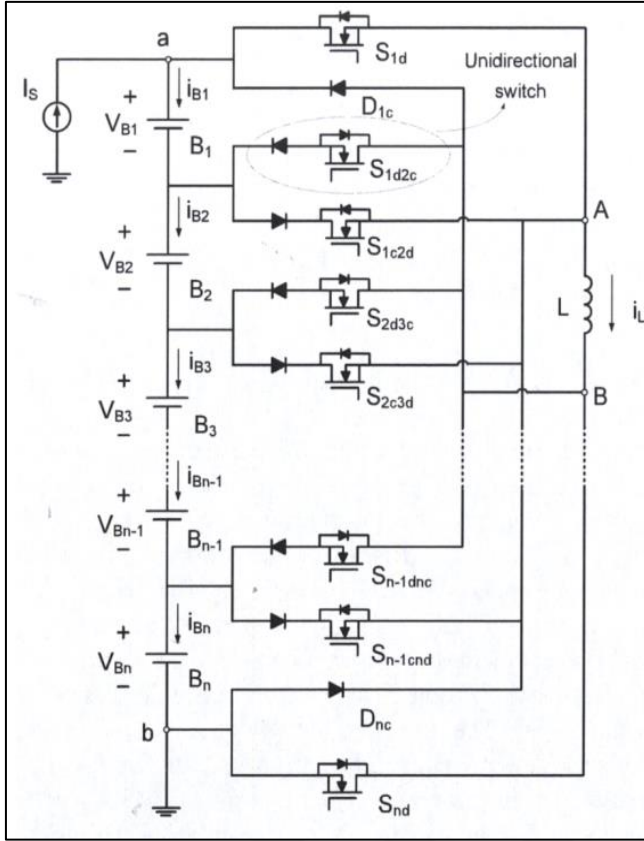
Anahtarlama kapasitör yönteminde olduğu gibi basit bir kontrol sinyali ile anahtarlar kontrol edilir. Eklenen ikinci katman kapasitör ile dengeleme süresi %25 oranında azaltılır. Yine de dengeleme süresi ortalama seviyededir. Şarj ve deşarj esnasında kullanılması avantaj iken yüksek anahtar sayısı ise dezavantajdır (Daowd, 2011).

4.2.2. İndüktör tabanlı

Bu yaklaşım da enerjinin taşınması için indüktörler veya transformatörler kullanılır. Paketten alınan enerjiyi hücreler arasında (pack to cell) veya hücreden hücreye (cell to cell) enerji aktarımı yaparak dengeyi çok iyi ve hızlı bir şekilde sağlayabilir. Ancak anahtarlama frekansının yüksek olması sebebiyle filtre kondansatörüne ihtiyaç duyması ve transformatör maliyetlerinin yüksek olması bu yöntemin dezavantajlarıdır (Ahmad, 2009).

Tek indüktör

Şekil 4.7’de tek indüktör ile dengeleme yönteminin blok şeması görülmektedir. Pil terminalinden iki adet tek yönlü çıkış vardır. Bunlardan biri indüktörün bir ucuna diğeri ise diğeri ucuna bağlanır. İlk ve son geçişler maliyeti azaltmak için anahtarlar yerine diyotlar ile yapılabilir.



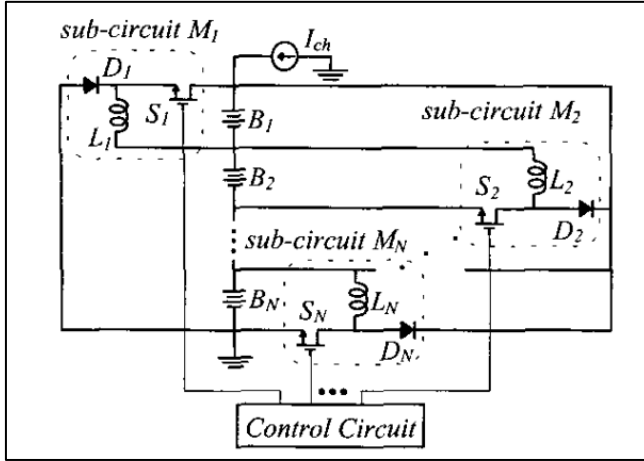
Şekil 4.7. Tek indüktör blok şeması

Örneğin B_1 bataryası aşırı enerjili B_2 bataryası ise zayıf enerjili olsun. Anahtar S_{1d} ve S_{1d2c} aktif edilir. Bu durumda B_1 bataryasının üzerinde bulunan enerji anahtarlar üzerinden L indüktörünü şarj eder. S_{1d} anahtarı pasif hale getirilerek S_{2c3d} anahtarı aktif edilir. L indüktöründeki enerji B_2 bataryasına taşınmış olur (Park, 2007).

Bu yöntemde dengeleme süresi hızlı olsa da anahtarlama frekansının yüksek olması yüzünden filtre kapasitörüne ihtiyaç duyması, anahtarlar üzerinde akım stresi oluşturması ve karmaşık kontrolü eksik yönleridir (Daowd, 2011).

Çok indüktör

Çok indüktörlü dengeleme yönteminin temel mantığı her batarya için bir buck-boost dönüştürücü tasarlamaktır. Şekil 4.8'de çok indüktör blok şeması görülmektedir. B_1 bataryasında bulunan fazla enerji S_1 anahtarı üzerinden L_1 indüktörünü şarj eder. S_1 Anahtarı pasif yapıldığında ise D_1 diyotu üzerinden diğer hücrelerin tümüne enerji dağıtılır (Hesieh, 2002).

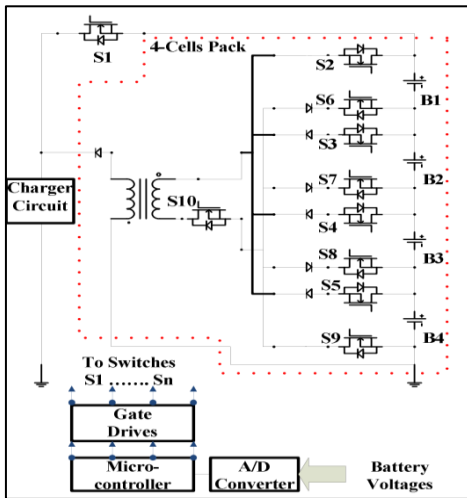


Şekil 4.8. Çok indüktör blok şeması

Tek indüktörlü tasarıma göre verimi daha iyi olması ve kontrolünün daha basit olmasına rağmen en büyük dezavantajı ise sadece şarj esnasında kullanılabilmesidir (Daowd, 2011).

Tek sarımlı transformatör

Tek sarımlı transformatör ile dengeleme yöntemi flyback dönüştürücü mantığı ile çalışır. Batarya gerilimleri bir analog dijital dönüştürücü tarafından mikroişlemciye iletilir. Belirli algoritmalar ile en düşük enerjili ve en düşük enerjili hücreler tespit edilir. Anahtarlar mikroşlemciden alınan sinyal ile aktif hale getirilerek dengeleme işlemi yapılır. Bu yöntemde paketten hücreye (pack to cell) ve hücreden pakete (cell to pack) olmak üzere iki ayrı şekilde tasarlanabilir. Şekil 4.9’da hücreden pakete olacak şekilde tasarım yapılmıştır.



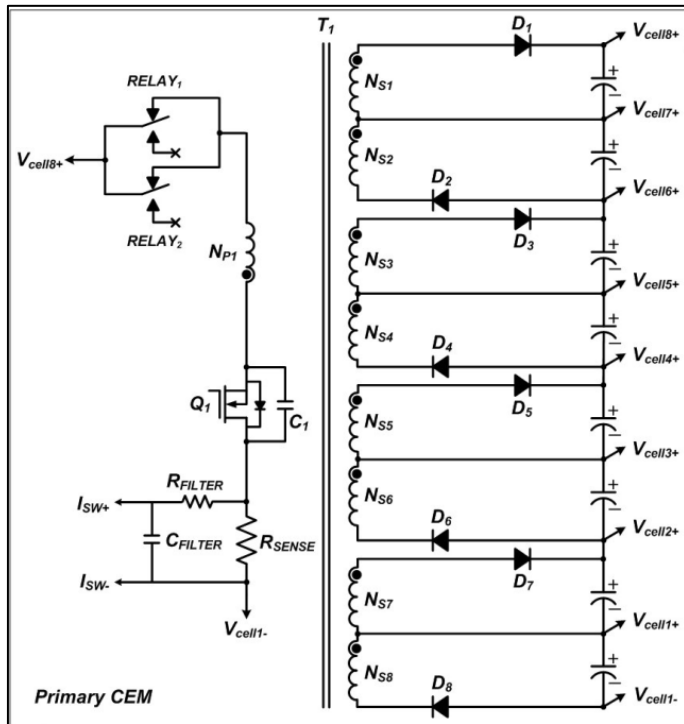
Şekil 4.9. Tek sarımlı transformatör blok şeması

Bir örnek olarak en düşük enerjili hücre B2 hücresi olsun en yüksek enerjili hücre ise B3 olsun İlk aşamada S10 anahtarı ile S4 ve S8 anahtarı da aktif edilerek şarj akımının B1 hücresini şarj etmeden geçmesi sağlanır. Daha sonra S4 ve S8 anahtarı pasif hale getirilir ve transformatör üzerindeki enerji pakete aktarılır. Bu tekrar B2 hücresinin enerjisi ile B3 hücresinin enerjileri dengeleninceye kadar devam eder (İmtiaz, 2011).

Dengeleme süresinin hızlı olması ve tek bir nüve olmasından dolayı düşük manyetik kayıpları olması avantajları arasında iken kontrolün çok karmaşık olması, uygulamanın pahalı olması ve sadece şarj durumunda kullanılabilmesi dezavantajlarıdır (Daowd, 2011).

Çok sarımlı transformatör

Çok sarımlı transformatör ile dengeleme yöntemi iki farklı topolojide ele alınır. Şekil 4.10'da flyback topoloji ile tasarlanmış bir devre görülmektedir. Primer sargıda bulunan Q_1 anahtarlama elemanı aktif duruma getirildiğinde transformatörün primer sargısında bir enerji oluşur. Anahtar pasif edildiğinde ise bu enerji sekonder sargılara aktarılır. Hücrelere bağlı olan sekonder tarafında gerilim dengesizliğinden dolayı bir empedans farkı olacaktır. Sekonder sargılardan çekilen akım ise buna göre değişkenlik gösterecektir (Park, 2010).



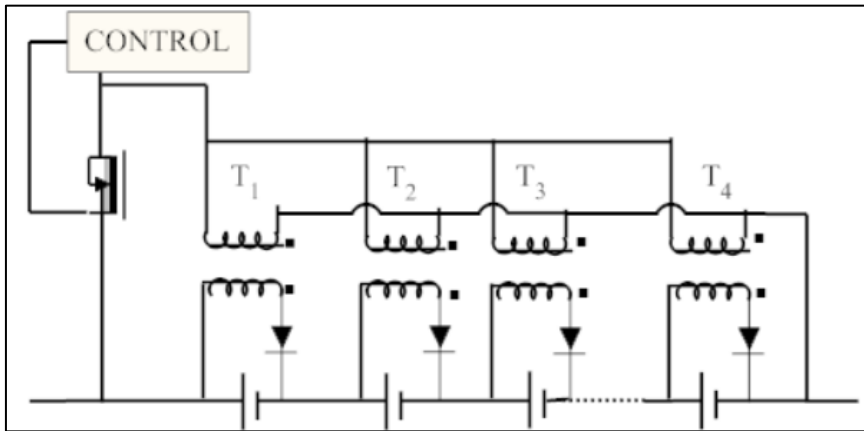
Şekil 4.10. Çok sarımlı transformatör blok şeması

Primer sargıdaki anahtarlama elemanı yerine diyot, sekonder taraftaki diyotlar yerine anahtarlama elemanları kullanılırsa devre forward topoloji olarak adlandırılır. Sekonder taraftaki fazla enerjiye sahip hücreye bağlı olan anahtarlama elemanı aktif edildiğinde fazla enerji hücreye bağlı olan sekonder sargıda depo edilir. Anahtarlama elemanı pasif duruma getirildiğinde ise primer tarafa aktarılır ve fazla enerji tüm paketi şarj etmek için kullanılır.

Flyback topoloji sadece şarj durumunda kullanılırken forward ise sadece deşarj durumunda kullanılabilir. Yöntemin en büyük dezavantajı bu olmakla beraber sisteme bir hücre eklenmek veya çıkarılmak istendiğinde tüm transformatör değişmesi gerekmektedir. Bu da yüksek maliyete sebep olmaktadır. Hızlı dengeleme yapması ve kapalı döngü bir kontrol sistemine ihtiyaç duymaması ise avantajlarıdır (Daowd, 2011).

Çok transformatör

Çok sarımlı transformatörün dezavantajlarından biri olan hücre ekleme veya çıkarmada yaşanan zorlukların üstesinden gelmek için her hücre için ayrı bir transformatör kullanma fikri ile ortaya çıkmıştır. Şekil 4.11’de görüldüğü gibi her hücre için ayrı ayrı kullanılan transformatörlerin primer sargıları paralel bağlanır. Kontrolcüden gelen sinyal ile anahtarlama elemanı aktif olur ve primer sargılarda enerji oluşur. Anahtarlama elemanı pasif olduğunda ise tüm transformatörlerin primer sargılarında bulunan enerji sekonder sargılara aktarılır. Enerji dengesizliğinden dolayı oluşacak endüktans farkından dolayı sekonder sargılardan çekilen akım farklılık gösterir.



Şekil 4.11. Çok transformatör blok şeması

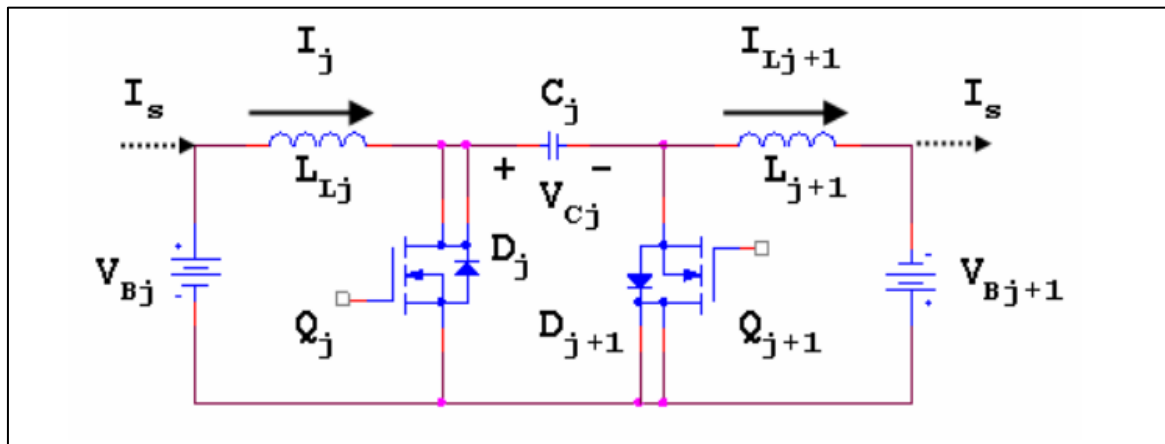
Dengeleme süresinin hızlı olması, hücre eklemenin ve çıkarmanın kolay olması avantajları iken Transformatörlerin ayrı ayrı olmasından kaynaklanan manyetik kayıplardan dolayı verimi diğerlerinden az olması ve maliyetinin yüksek olması ise dezavantajlarıdır (Daowd, 2011).

4.2.3. Dönüştürücü tabanlı

Dönüştürücü tabanlı dengeleme yöntemleri standart dönüştürücülerden türetilerek elde edilmiş yöntemlerdir. Bu yöntemlerin dengeleme sürecinin tamamen kontrol edilebilmesinin çekiciliği ile son yıllarda batarya dengelemedeki oranları artmıştır. Fakat süreç kontrolünün getirdiği karmaşıklığın yanında yüksek maliyetleri de göz önünde bulundurulmalıdır (Ahmad, 2009).

Cuk dönüştürücü

Cuk dönüştürücü ile dengeleme yöntemi Şekil 4.12’de gösterilmiştir. İlk durumda $V_{B_j} > V_{B_{j+1}}$ olduğunu düşündüğümüzde Q_j anahtarlama elemanı aktif olur ve C_j kapasitörü B_j hücresi üzerinden şarj olur Q_j anahtarı kesime gittiğinde ise şarj olan C_j kapasitörü B_{j+1} hücresini şarj eder. İkinci durum $V_{B_{j+1}} > V_{B_j}$ göz önüne alınırsa Q_{j+1} anahtarlama elemanı aktif olur ve C_j kapasitörü B_{j+1} hücresi üzerinden şarj olur Q_{j+1} anahtarı kesime gittiğinde ise şarj olan C_j kapasitörü B_j hücresini şarj eder. Böylelikle hücreden hücreye dengeleme yapılmış olur (Lee,2005).



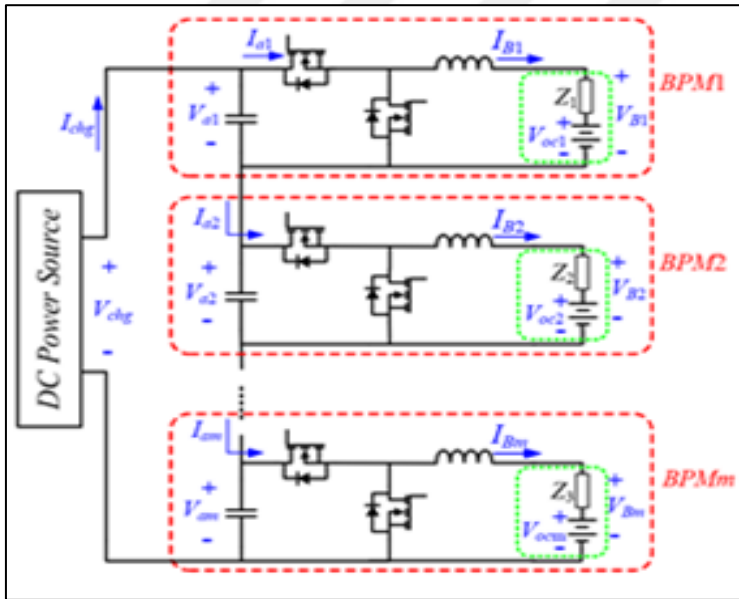
Şekil 4.12. Cuk dönüştürücü blok şeması

Bu yöntem yan yana hücreleri dengeleyebildiği için uzun batarya paketlerinde dengeleme süresinin uzun olması ve kontrolünün karmaşık olması aynı zamanda gerilim ölçümüne ihtiyaç duyması dezavantajları olarak değerlendirilir. Hücreden hücreye direk aktarma yapıldığından ise verimi yüksektir (Daowd, 2011).

Buck-Boost dönüştürücü

Buck -Boost dönüştürücü ile dengeleme yöntemi Şekil 4.13' de de görüldüğü gibi standart bir buck-boost dönüştürücü değildir. Bu topolojide dönüştürücü ya buck (düşürücü) mod olarak ya da boost (yükseltici) mod olarak çalıştırılır.

Yöntem iki aşamada dengeleme yapar ilk önce sabit akım yöntemi (CC) ile en düşük hücreleri en yüksek hücreye yaklaştırmaya çalışır. Tüm hücreler aynı akım ile şarj veya deşarj olmaya başladığında sabit gerilim yöntemi (CV) uygulanır böylelikle şarj durumu dengeleninceye kadar sistem çalışmaya devam eder (Hong, 2010).

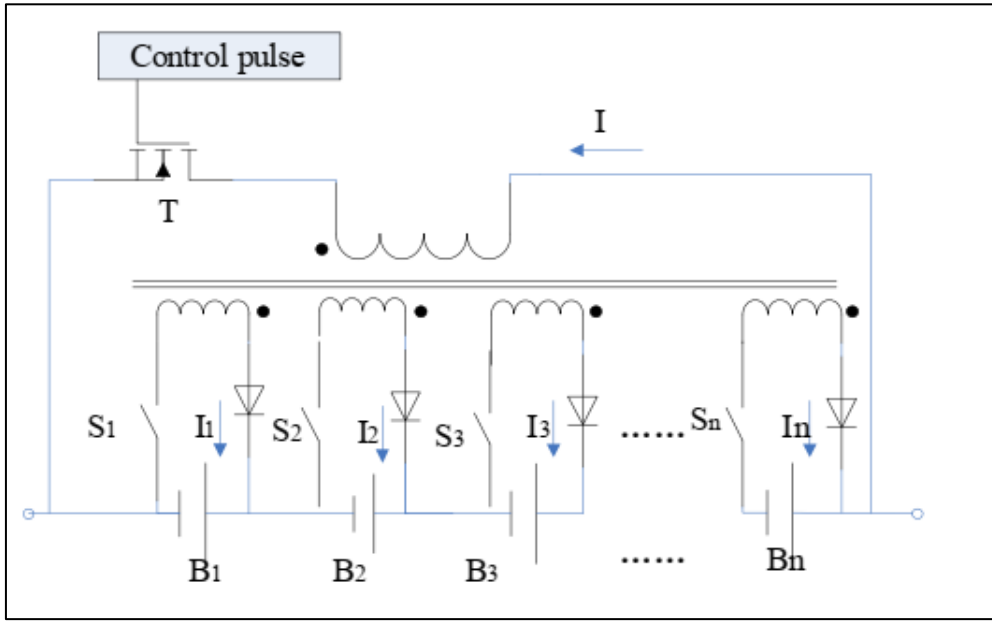


Şekil 4.13. Buck-Boost dönüştürücü blok şeması

Bu yöntemin dengeleme hızı iyi olması ve modüler tasarımlara uygun olması avantajları iken maliyetinin yüksek olması ve yöntemin çalışabilmesi için çok iyi ölçüm yapılmasının yanında zeki bir algoritma tasarımına da ihtiyaç duyması sebebiyle kontrolünün karmaşık olması ise dezavantajlarıdır (Daowd, 2011).

Flyback dönüştürücü

Flyback dönüştürücü yöntemi ile dengeleme yöntemi tek yönlü (unidirectional) ve çift yönlü (bidirectional) olarak tasarlanabilir. Tek yönlü tasarım paketten hücreye (pack to cell) veya hücreden pakete (cell to pack) şeklinde tasarlanabilirken çift yönlü tasarım ise her iki yönde de çalışabilmektedir. Şekil 4.14’de çift yönlü bir tasarım görülmektedir.



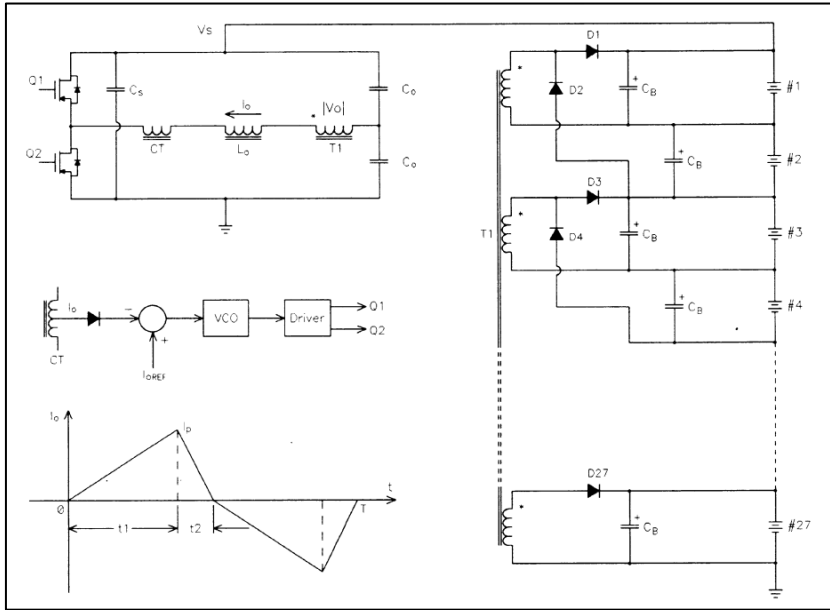
Şekil 4.14. Flyback dönüştürücü blok şeması

B2 hücresinin en düşük enerjiye sahip hücre olduğunu var sayalım. T anahtarı kapatıldığında transformatörün primer tarafı enerji depolayacaktır. T anahtarı kapatılıp S2 anahtarı açıldığında ise transformatörün sekonder tarafına aktarılan enerji B2 hücresini şarj edecektir. Böylelikle paketten hücreye olacak şekilde B2 hücresi diğer hücrelerden daha fazla şarj akımı çekerek enerjisini yükseltecektir (Wei, 2009). Diğer bir bakış açısı ile B2 hücresinin en enerjili hücre olduğunu var sayalım. S2 anahtarı kapatılarak B2 hücresindeki enerji transformatörün sekonder sargılarına aktarılır. S2 anahtarı kapatılıp T anahtarı açıldığında transformatörün sekonder sargısında bulunan enerji primer tarafa aktarılır. Böylelikle enerji akışı hücreden pakete olacak şekilde B2 hücresinin fazla enerjisi paketin şarjında kullanılır.

Büyük sayıda hücresi bulunan sistemlerde uygulanmasının kolay olması ve modüler tasarımlara uygun olması avantajları iken gerilim ölçümüne ihtiyaç duyması ve nispeten daha düşük dengeleme süresi ise dezavantajları arasında sayılabilir (Daowd, 2011).

Ramp dönüştürücü

Ramp dönüştürücü ile batarya dengeleme yöntemi Şekil 4.15’de gösterilmiştir. Yumuşak anahtarlama yaparak I_o akımının rampa şeklinde artmasından adını alır. Q1 veya Q2 anahtarlarının aktif edilmesiyle trafonun primer tarafında enerji depo edilir anahtarlar pasif duruma getirildiğinde ise transformatörün sekonder tarafına aktarılan enerji hangi anahtarın aktif edildiğine göre tek veya çift sayılı hücrelerin en düşük enerjili olanına enerji aktarılır.



Şekil 4.15. Ramp dönüştürücü blok şeması

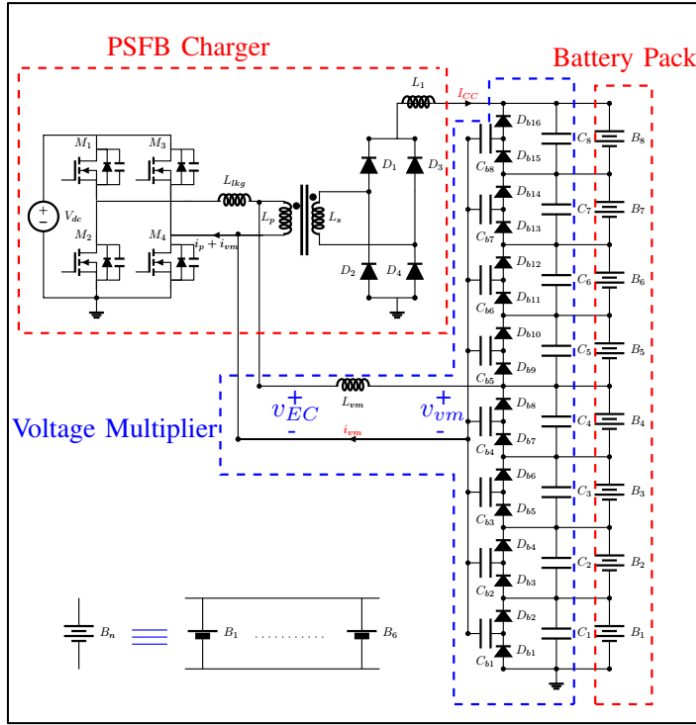
Yumuşak anahtarlama sayesinde anahtarlama kayıpları en aza indirilmiş ve soğutucu boyutlarında küçültmeye gidilmiştir (Gottwald, 1997).

Nispeten basit bir transformatör ile birlikte yumuşak anahtarlama yapılabilmesi en büyük avantajı iken karmaşık kontrol yapısı ile ve tek sayılı hücreleri kendi aralarında, çift sayılı hücreleri kendi arasında dengelemesinden kaynaklanan eşitleme süresinin uzun olması ise dezavantajlarıdır (Daowd, 2011).

Full-Bridge dönüştürücü

Full-bridge dönüştürücü ile batarya dengeleme yöntemi Şekil 4.16’da gösterilmiştir. B1 hücresinin enerjisi en düşük B4 hücresinin ise en yüksek olduğunu varsayalım. İlk durumda

M1 ve M4 anahtarları aktif olacak aynı zamanda D1 ve D4 diyotları üzerinden tüm paket şarj olmaya başlayacaktır. D_{b1} diyotu aktif olacak dolayısıyla dengeleme akımı B1 hücreni şarj edecektir. Daha sonra D_{b3} diyotu aktif olacak ve B2 hücresi şarj olmaya başlayacaktır. Bu durum sırayla diğer hücrelerin en yüksek enerjili hücrenin seviyesine ulaşınca kadar devam eder (Maharjan, 2009).



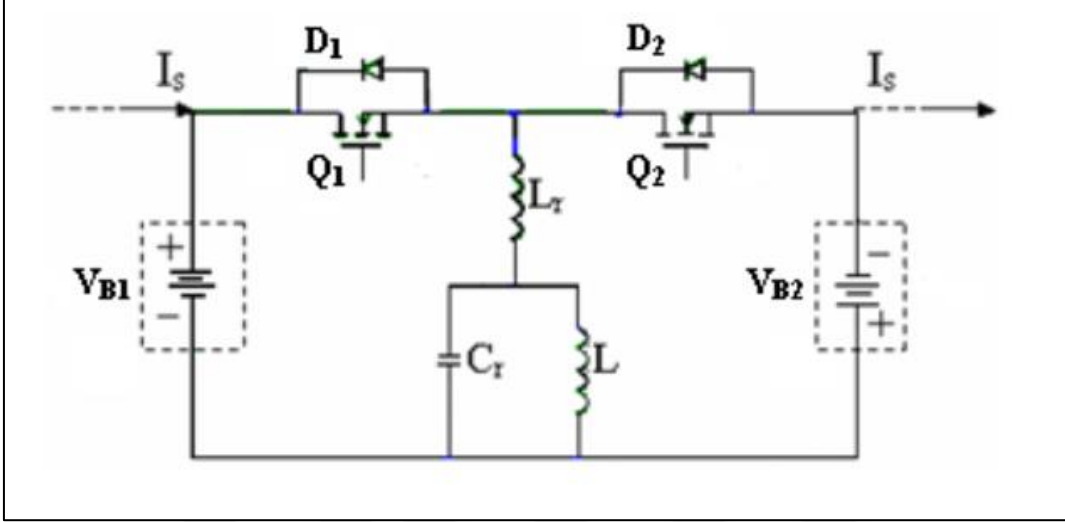
Şekil 4.16. Full-bridge dönüştürücü blok şeması

Full-bridge dönüştürücü tam kontrollü bir enerji dönüştürücü olarak düşünülebilir. Yüksek güçlü uygulamalar için tasarlanmıştır. Hibrit araçlarda duruma göre AC-DC dönüştürücü veya DC-DC dönüştürücü olarak kullanılabilirler. Her iki durumda da dengelemeye ihtiyaç duyan bir batarya grubu için zeki bir kontrole ihtiyaç duyarlar. Maliyetinin yüksek olması ise en büyük dezavantajıdır (Daowd, 2011).

Quasi-resonant dönüştürücü

Quasi-resonant dönüştürücü ile batarya dengeleme yöntemi Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Bu yöntemde hücreden hücreye enerji transferi sağlanır. Örneğin $V_{B1} > V_{B2}$ durumunda Q_1 anahtarı aktif duruma geçer. L_r ve C_r rezonans tankı şarj olurken L bobinini de şarj eder. Q_1 anahtarı

pasif duruma getirildiğinde D_2 diyotu üzerinden L bobini deşarj olur ve B_2 hücresi şarj olur böylelikle hücreden hücreye enerji transferi gerçekleştirilmiş olur (Lee, 2010).



Şekil 4.17. Quasi-resonant dönüştürücü blok şeması

Quasi-resonant dönüştürücünün ana avantajı anahtarlama kayıplarını azaltmasıdır. Böylelikle dengeleme verimini artırır. Ne yazık ki çok karmaşık bir kontrol yapısının olması ve yüksek maliyetleri olması sebebiyle tercih edilmemektedir (Daowd, 2011).

Bu bölümde ele alınan dengeleme yöntemlerinin bazı parametrelere göre Çizelge 4.1'de kıyaslanmıştır. Pasif dengeleme yöntemleri hem ucuz hem de uygulaması kolay olmasından dolayı daha çok tercih edilen yöntemler olmasına rağmen orta ve yüksek güçlü uygulamalarda tercih edilmez. Aktif dengeleme yöntemlerinde ise transformatörlü dengeleme yöntemleri sadece şarj durumunda dengeleme yaptığı için dengeleme yöntemleri arasında pek tercih edilmemektedir.

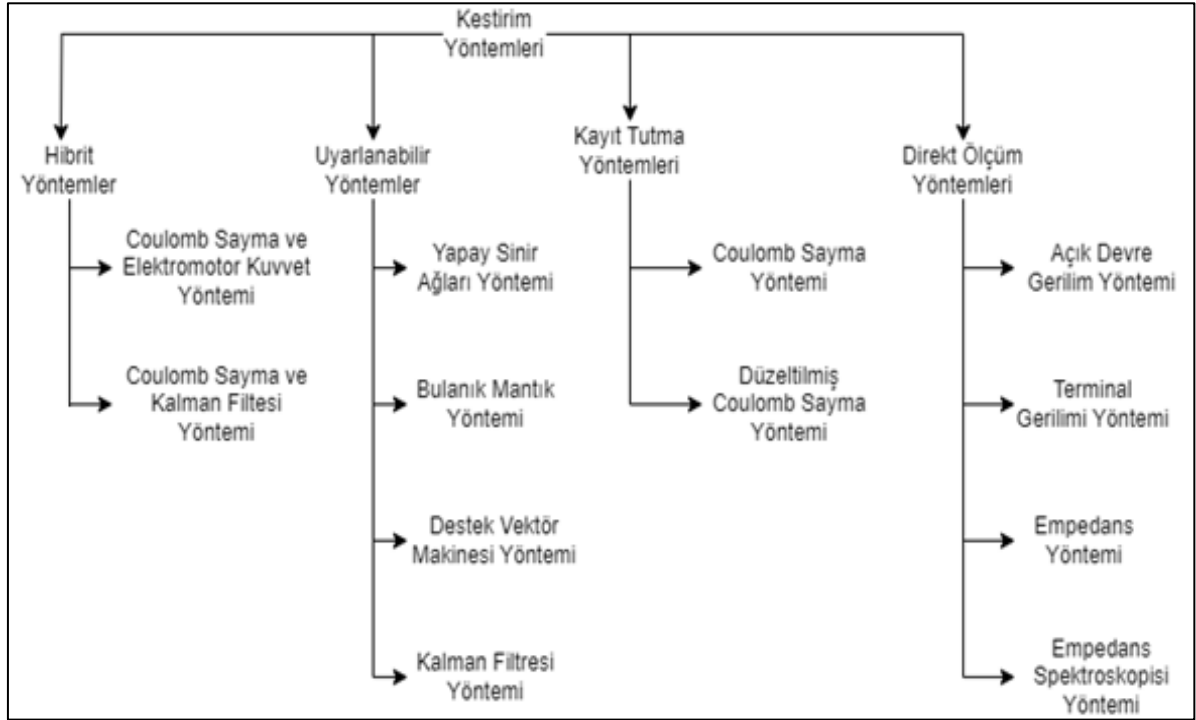
Çizelge 4.1. Dengeleme yöntemlerinin karşılaştırılması

Dengeleme Yöntemi	Dengeleme Hızı	Kontrol Karmaşıklığı	Uygulama Kolaylığı	Maliyet	Şarj/ Deşarj Durumu	Uygulama Gücü	Verim
Sabit şönt direnç	Düşük	Çok basit	Çok basit	Çok ucuz	Sabit değer	Düşük	Çok düşük
Anahtarlamalı şönt direnç	Orta	Basit	Orta	Çok ucuz	Şarj	Düşük	Düşük
Anahtarlamalı kapasitör	Düşük	Orta	Zor	Orta	Çift yönlü	Orta/Yüksek	Orta
Tek anahtarlamalı kapasitör	Düşük	Karmaşık	Zor	Ucuz	Çift yönlü	Orta/Yüksek	Yüksek
Çift katman anahtarlamalı kapasitör	Orta	Orta	Zor	Orta	Çift yönlü	Orta/Yüksek	Orta
Tek indüktör	Yüksek	Karmaşık	Çok zor	Orta	Çift yönlü	Orta/Yüksek	Orta
Çok indüktör	Yüksek	Karmaşık	Çok zor	Orta	Çift yönlü	Orta/Yüksek	Orta
Tek sarımlı transformatör	Orta	Karmaşık	Orta	Pahalı	Şarj	Orta/Yüksek	Düşük
Çok sarımlı transformatör	Orta	Orta	Orta	Pahalı	Şarj	Orta/Yüksek	Düşük
Çok transformatörlü	Orta	Karmaşık	Zor	Pahalı	Şarj	Orta/Yüksek	Düşük
Cuk dönüştürücü	Düşük	Karmaşık	Çok zor	Orta	Çift yönlü	Orta/Yüksek	Orta
Buck-boost dönüştürücü	Orta	Karmaşık	Orta	Orta	Çift yönlü	Orta/Yüksek	Orta
Flyback dönüştürücü	Orta	Karmaşık	Orta	Pahalı	Çift yönlü	Orta/Yüksek	Düşük
Ramp dönüştürücü	Düşük	Karmaşık	Basit	Pahalı	Çift yönlü	Orta/Yüksek	Düşük
Full-bridge dönüştürücü	Yüksek	Karmaşık	Zor	Pahalı	Çift yönlü	Yüksek	Yüksek
Quasi-resonant dönüştürücü	Düşük	Orta	Basit	Pahalı	Çift yönlü	Orta/Yüksek	Orta



5. KESTİRİM YÖNTEMLERİ

Bu bölümde bataryaların SoC ve SoH değerlerini kestirebilmek için kullanılan yöntemler ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Şekil 5.1'de en çok kullanılan kestirim yöntemleri listelenmiştir.



Şekil 5.1. Kestirim yöntemleri

5.1. Direkt Ölçüm Yöntemleri

Direkt ölçüm yöntemleri terminal gerilimi ve batarya empedansı gibi bataryanın fiziksel özelliklerine bağlı kestirim yöntemidir (Chang, 2013). Bu yöntemlerin uygulaması kolay olması sebebiyle tercih edilebilir fakat kestirim doğruluğu diğer yöntemlere göre daha düşüktür. Lityum tabanlı bataryalarda bu yöntemlerin kullanılması tavsiye edilmez.

Lityum tabanlı pillerde SoC durumu pil sıcaklığı, stokta bekleme süresi, öz boşalım, kapasite kaybı, deşarj verimliliği gibi çevresel faktörlerden etkilenmektedir. Direkt ölçüm yöntemlerinde bu faktörlerin kestirime dahil edilmesi mümkün değildir.

5.1.1. Açık devre gerilim yöntemi

Açık devre gerilimi (OCV), bataryayı şarj cihazından ve yükten ayırarak belli bir süre bekledikten sonra ölçülen gerilimdir. Kurşun-asit bataryalarda SoC ile OCV arasında doğrusal bir ilişki olduğu belirlenmiştir. $V_{oc(t)}$ bataryanın t anındaki boştaki gerilimi, $SoC(t)$ bataryanın t anındaki SoC durumu, a_0 SoC=%0 olduğundan batarya terminallerinden ölçülen gerilim değeridir. SoC=%100 olduğu durumda $V_{oc(t)}$ batarya terminallerinden ölçülerek Eş. 5.1’de yerine yazıldığında, a_1 katsayısı bulunur.

$$V_{oc(t)} = a_1 \cdot SoC(t) + a_0 \quad (5.1)$$

Fakat OCV ile SoC tahmini yapılabilmesi için bataryaların yaklaşık iki saat şarj-deşarj edilmeden beklemesi gerekir. Aktif çalışan bir sistemde bataryaları uzun bir süre şarjdan veyadeşarjdan ayırmak pek mümkün değildir. Bu yüzden sadece basit uygulamalarda kullanılabilir (Ng Kong-Soon, 2008).

SoC ile OCV arasındaki ilişki kurşun asit bataryalarda doğrusal olsa da lityum tabanlı bataryalarda yapısı gereği bu ilişki doğrusal değildir. Kurşun asit bataryada iki defa alınan örnekleme sayısı lityum tabanlı bataryalarda daha fazla artırılarak bir eğri elde edilir ve bu eğriden bir eşitlik kurulur. Fakat her batarya için bu eşitlik farklılık gösterir. Çünkü lityum tabanlı bataryaların şarj vedeşarj durumunda verdiği tepkiler değişkendir. (Chang, 2013).

5.1.2. Terminal gerilimi yöntemi

Terminal gerilimi yöntemi, bataryadeşarj durumunda iken iç empedanstan dolayı terminal gerilimdeki değişim ölçülmesiyle elde edilen yöntemdir. Bataryanın elektromotor kuvveti (EMF) ile terminal gerilimi doğru orantılıdır. EMF ile SoC birbiriyle doğru orantılı olduğundan, SoC ile terminal gerilimi arasında bir orantıdan bahsedilebilir.

Bu orantı yapılan testler sonrasında Eş. 5.2’de görüldüğü gibi verilmiştir. Bu eşitlikte α , β , γ , δ ve $Const$ sabit değerlerdir ve batarya üzerinde yapılan deneylerle elde edilmişlerdir. SoC bataryanın şarj durumunu, V_T batarya terminal gerilimini, R_0 ise batarya iç direncidir (Sato, 2002).

$$SoC = \alpha.V_T + \beta.R_0 + \gamma\sqrt{V_T} + \delta\sqrt{R_0} + Const \quad (5.2)$$

Terminal gerilimi yöntemi farklı şarj akımlarında ve sıcaklıklarda çalışabilmektedir. Fakat SoC çok düşükken bu yöntemin kestirim hatası çok büyüktür. Çünkü batarya şarj durumu düştükçe terminal uçlarındaki gerilim çok ani olarak düşecektir (Chang, 2013). Bu sebeple basit uygulamalarda tercih sebebi olabilir fakat karmaşık sistemlerde güvenilir değildir.

5.1.3. Empedans yöntemi

Elektrokimyasal empedans, gerilim ve akım arasındaki transfer fonksiyonu olarak tanımlanır. Belirli bir sürede batarya gerilimindeki değişim ile batarya akımının değişiminin birbirine oranı ile batarya empedansının elde edilmesiyle SoC kestirimi yapılan yöntemdir.

$$\frac{\Delta V}{\Delta I} = a.(SoC)^2 + b.(SoC) + c \quad (5.3)$$

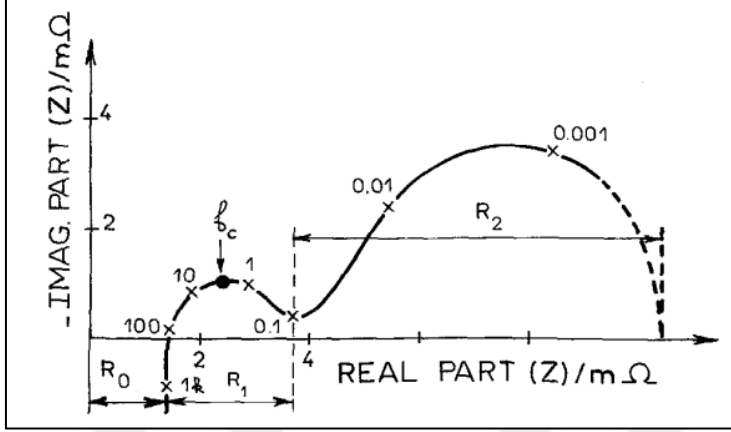
Eş. 5.3'de a , b ve c değerleri bataryaların elektriksel karakteristiğinin bir yansıması olan sabitlerdir. Bu sabitleri SoC değeri %0 iken ve %100 iken yapılan ölçümler ile elde edilmektedir (Hung, 2014).

Bataryanın SoC değeri birçok parametreden etkilenebilir. Empedans parametresi ve varyasyonları SoC değeri için tüm bataryalarda eşit değildir. Bir bataryanın SoC değerini kestirebilmek için kullanılan empedans parametreleri elde edebilmek için çeşitli empedans testleri yapılması gerekir (Chang, 2013). Bir bataryanın SoC değerini kestirmek için bataryayı defalarca test etmek ve her batarya değişiminde bu testleri tekrar etmek dinamik ve karmaşık sistemler için pek olası değildir. Bu sebeple SoC kestirimde empedans yönteminin kullanılması çok yaygın değildir.

5.1.4. Empedans spektroskopisi yöntemi

Empedans spektroskopisi yöntemi batarya empedansının üzerine farkı şarj vedeşarj akımlarında geniş bir aralıkta alternatif akım bindirilerek yapılan ölçüm yöntemidir. Karmaşık düzlemde gösterilen empedans genellikle frekans tepki analizörü kullanılarak ölçülür. Şekil 5.2'de bir bataryanın karmaşık düzlemde empedansı verilmiştir. 100 Hz' den

daha büyük frekanslarda empedansın gerçekte kısmı R_0 değerini, 0.1 Hz ile 100 Hz aralığında R_1 değerini, 0.1 Hz' den küçük değerlerde ise R_2 değerini verir.



Şekil 5.2. Batarya empedansının Nyquist diyagramı (Hz)

Eş. 5.4'de bataryanın DP eşdeğer devre modeli kullanılarak elde edilen eşitlik verilmiştir. Eşitlikte frekans tepki analizörü ile yapılan ölçüm $Z(f)$, Batarya iç direnci R_0 , f ölçülen frekans, R_1 ve C_1 değeri ilk döngü değerlerini, R_2 ve C_2 değeri ikinci döngü değerleridir. (Huet, 1998).

$$Z(f) = R_0 + \frac{R_1}{1+2\pi f C_1 R_1} + \frac{R_2}{1+2\pi f C_2 R_2} \quad (5.4)$$

Ölçülen empedans değerleri en yakın model empedans değerlerine yuvarlanır. Empedans ile SoC değerleri arasında daha önce bir ilişkilendirme yapılmıştır. Ölçülen empedans değeri ile dolaylı yoldan SoC değeri kestirilmiş olur (Chang, 2013).

5.2. Kayıt tutma yöntemleri

Kayıt tutma yöntemleri; şarj ve deşarj alımlarını bir girdi olarak kullanarak bataryanın SoC kestirimin yapan yöntemlerdir. Bu yöntemler öz boşalım, kapasite kaybı, deşarj verimliliği gibi bazı dahili batarya değişkenlerinin SoC kestirimi yaparken kullanılmasına olanak sağlar (Chang, 2013). Kayıt tutma yönteminde bazı çevresel etmenleri kestirme dahil etse de kendi başına kullanıldığında SoC durumunu en çok etkileyen sıcaklık etkisini kestirime dahil edemez. Bu sebeple diğer yöntemlerle birleştirilerek kullanımı daha yaygındır.

5.2.1. Coulomb sayma yöntemi

Coulomb sayma yöntemi, başlangıçtaki çalışma koşullarına göre bir bataryanın SoC değerine çalışma süresi boyunca şarj ve deşarj akımlarının entegre edilmesiyle SoC kestirim yapan yöntemdir.

Eş. 5.5’de $SoC(t)$ kestirilen SoC değeri, $SoC(t-1)$ önceki SoC değeri, $I(t)$ şarj veya deşarj akımı Q_n batarya üreticisinin verdiği batarya kapasitesi, Δt ise çalışma süresidir.

$$SoC_{(t)} = SoC_{(t-1)} + \frac{I(t)}{Q_n} \Delta t \quad (5.5)$$

Bu yöntemin doğru sonuç verebilmesi akımın doğru ölçülmesine ve ilk SoC değerinin doğru kestirilmesi gereklidir. Akımın doğru ölçülmesi için şönt direnç yöntemi ya da alan etkili sensörler kullanılarak ölçüm hatasını en az seviyede olması sağlanır. SoC değeri ilk değeri kestirilirken bataryanın uzun süre dinlendirildiği varsayılarak OCV-SoC ilişkisinden yararlanılabilir (Ng Kong-Soon, 2009).

Dahili sıcaklık, batarya geçmişi, çevrim ömrü, raf süresi bu yöntemin doğruluğunu etkileyen faktörlerdir. Coulomb sayma yöntemi kendi başına olmasa da diğer yöntemlerle birlikte kullanılarak SoC kestirimde en çok tercih edilen yöntemlerdendir.

5.2.2. Düzeltilmiş Coulomb sayma yöntemi

Bataryadan geçen akım bilgisi ve bataryanın ilk anındaki SoC değerini bilmek kararlı sistemlerde SoC kestirimi için yeterlidir. Ancak kararlı olmayan yüklerde frekans değişimi hızlıdır ve pilin elektrokimyasal tepkisinden dolayı SoC kestiriminde büyük hatalara sebep olur. SoC kestirimi doğru olabilmesi için birçok faktör varken akımın doğru ölçülmesi temel faktörlerden biridir.

Düzeltilmiş Coulomb sayma yöntemi, geleneksel Coulomb sayma yöntemine göre batarya akımının tahmin kesinliğini arttırmak için Eş. 5.6’da gösterildiği gibi batarya akımı ile kestirilen akım arasında ikinci dereceden bir ilişki kurar. Böylelikle ölçülen akım gerçek akıma daha yakın olması beklenir.

$$I_{c(t)} = \alpha_2 I_{c(t)}^2 + \alpha_1 I_{c(t)} + \alpha_0 \quad (5.6)$$

Daha sonra bu akım kullanılarak Eş. 5.7 kullanılarak SoC kestirimi yapılır (Sindhuja, 2015).

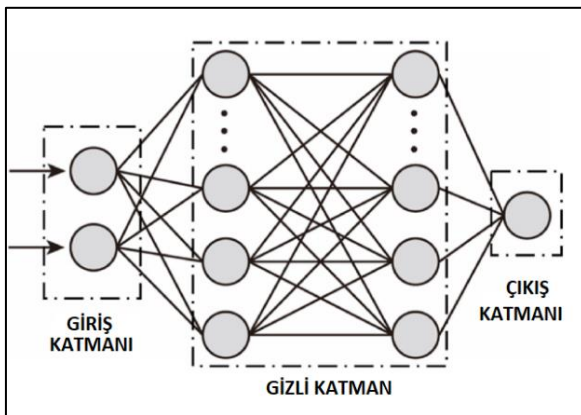
$$SoC_{(t)} = SoC_{(t-1)} + \frac{I_{c(t)}}{Q_n} \Delta t \quad (5.7)$$

5.3. Uyarlanabilir Yöntemler

Son zamanlarda yapay zekânın gelişmesiyle SoC kestirimi için uyarlanabilir yöntemler tasarlanmıştır. Uyarlanabilir yöntemler, değişen sistemlere göre otomatik olarak ayarlanabilen ve değişen koşullara göre kendi kendini tekrar tasarlayabilen sistemlerdir. Bataryaların SoC kestirimi birçok faktörden etkilendiği için bu faktörlerdeki değişimlere göre kendini tekrar güncelleyen sistemler olduğundan uyarlanabilir yöntemler diğer yöntemlere göre SoC kestirimi daha doğruya yakındır (Chang, 2013). Uyarlanabilir sistemlerin en büyük dezavantajı önemli sayıda referans bilgisine ihtiyaç duyar. Bu referans bilgilerin elde edilebilmesi için çok sayıda deney yapılması gerekir (Sindhuja, 2015).

5.3.1 Yapay sinir ağları yöntemi

Yapay sinir ağları yöntemi doğrusal olmayan haritalama, kendi kendini organize etme ve kendi kendine öğrenme gibi iyi yetenekleri sebebiyle SoC kestirimde tercih edilen bir yöntemdir (Gou, 2009). Şekil 5.3'de yapay sinir ağları yönteminin SoC kestirimi için gerekli olan yapısı gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Yapay sinir ağları ile SoC kestiriminin yapısı

Yapının ilk katmanı olan giriş katmanı sinyal kaynağı düğümlerinden oluşur. SoC kestirimi için bu kaynaklar terminal gerilimi, batarya akımıdır. İstenildiği takdirde giriş katmanına sıcaklıkta eklenebilir. İkinci katmanda giriş ile çıkış arasındaki haritalama bilgisine sahip nöronlar bulunur. Bu nöronların ilişkisi ise Eş. 5.8 ile bulunabilir.

$$\begin{cases} o_j = \sigma(\sum_{i=1}^n (w_{i,j}x_i + b_{i,j})) \\ \sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \end{cases} \quad (5.8)$$

Burada o_j çıkış katmanındaki nöron sayısını, x_i giriş katmanındaki nöron sayısını, $w_{i,j}$ giriş çıkış arasındaki ağırlığı, $b_{i,j}$ ise ağırlık esnekliğini arttıran sabittir. $\sigma(x)$ ise haritalama ilişkisinin doğrusal olmayacağını gösteren fonksiyondur (Gou, 2023).

Son katman ise çıkış katmanıdır. Bu katman farklı girdilere uygun yanıt verebilen bir katmandır. SoC çıkış katmanında bulunur

5.3.2. Bulanık mantık yöntemi

Bulanık mantık yöntemi doğrusal olmayan sistemlerin tanımlanmasında en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Bulanık mantık yöntemi öğrenme mekanizmasının optimize edilmiş katsayılarını kullanarak etkili bir şekilde SoC kestiriminde bulunabilir. Fakat bulanık mantık kurallarını oluşturabilmek için bir dizi deney yapılması gerekir. Batarya deşarj edilirken alınan birçok örnek noktası ile batarya şarj edilirken alınan örneklemeler ile kıyaslanır. Yapılan bu testler ile SoC ilişkisi ile bir bulanık mantık modeli oluşturulur. Batarya terminallerinden ölçülen gerilim alınan örneklemelerin çift sayılara denk gelenleri ile modelin uyarlanmasını sağlarken tek sayılara denk gelenleri ile SoC kestirimi yapar (Singh, 2006). Bu yöntem ihtiyaç duyduğu ön işleme sebebiyle SoC kestirimde çok tercih edilen yöntemlerden değildir.

5.3.3. Destek vektör makinesi yöntemi

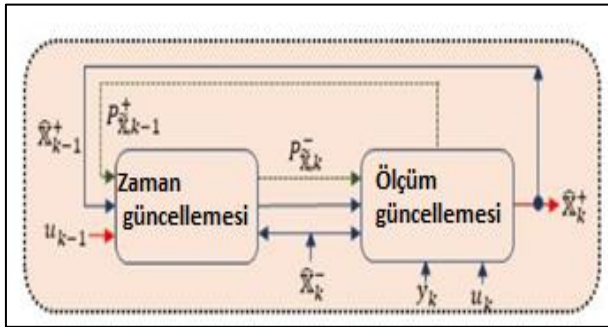
SoC kestirimi için bir destek vektör makinesinin eğitilmesi gerekir. Bunun için batarya birkaç deneyden geçilir. İlk adım eğitim seçmektir. SoC kestirimi için seçilen eğitimler SoC ile akım ilişkisi ve SoC ile gerilim ilişkisidir. Bu adımda dikkat edilmesi gereken durum test

esnasında kullanılacak değerler ile eğitim sırasındaki değerlerin aynı olmamasıdır. Eğer değerler aynı seçilirse gerçek kullanım esnasında kestirimin doğruluğu riskli olacaktır. İkinci aşama test verilerinin sınırlarını belirlemektir. Bu sınırlar bir bataryanın normal çalışma şartları göz önünde bulundurularak seçilmesi kestirimin doğruluğu açısından önemlidir. Üçüncü adım ise test verilerine göre optimal destek vektör makinesini oluşturmaktır.

Destek vektör makinesinin uygulanması için bataryaya birçok deney yapılması gerekir. Akım ve gerilim dışında girdi parametresi arttıkça deney sayısı artacaktır. Aynı zamanda kestirim hatası %5 ile %16 arasındadır (Hansen, 2005). Uygulaması kolay olmasına rağmen ön deneyler ve kestirim hatasından dolayı tercih edilen bir yöntem değildir.

5.3.4. Kalman filtresi yöntemi

Kalman filtresi, SoC gibi doğrudan ölçülmesi mümkün olmayan sistemlerin matematiksel modellerinden elde edilen giriş durum denklemlerini ve çıkış durum denklemlerini kullanarak kestirim yapan sistemlerdir. Şekil 5.4'de Kalman filtresi kestirim yaklaşımı gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Kalman filtre kestirim yaklaşımı

Kalman filtresi tahmin ve güncelleme olacak şekilde iki aşamadan oluşur. Tahmin aşamasında belirlenen çıktılar, hatanın ortak değişim miktarı ve hata kovaryansı hesaplanır. Güncelleme aşamasında ise bir ölçülen değerler ile hesaplanan değerler arasındaki farka göre kestirimi sürekli optimize eden kalman kazancı denilen kat sayısının güncellemesidir. Bu katsayıya göre hata kovaryansı ve çıktılar tekrar güncellenir (Shrivastava ,2019).

Kalman filtresinin iki temel denklemi Eş. 5.9'da verilmiştir.

$$\begin{cases} x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1} \\ y_k = Cx_k + Du_k + v_k \end{cases} \quad (5.9)$$

Denklemlerde x_k durum değerini, x_{k-1} bir önceki durum değerini, u_k tetikleme sinyalini, w_{k-1} ise işlem gürültüsünü temsil eder. Ölçülebilen fakat doğruluğundan şüphe duyulan değer y_k ile gösterilirken v_k değeri ise ölçüm gürültüsüdür. Genellikle gürültü değerleri çok küçük alınır ya da ihmal edilir. Kalman filtresi aşağıdaki adımları takip eder.

Önceki durum tahmini:

$$x_k^- = Ax_{k-1}^- + Bu_k \quad (5.10)$$

Hata kovaryansının tahmini:

$$P_k^- = AP_{k-1}^- + A^T + Q \quad (5.11)$$

Kalman kazancının hesaplanması:

$$K_k = P_k^- C^T (CP_k^- C^T + R)^{-1} \quad (5.12)$$

Ölçülen değer ile kestirimin güncellenmesi:

$$x_k = x_k^- + K_k(y_k - Cx_k^- - Du_k) \quad (5.13)$$

Hata kovaryansının güncellenmesi:

$$P_k = (I - K_k C) P_k^- \quad (5.14)$$

Denklemlerdeki Q ve R gürültü değerlerini temsil etmektedir (Çayiroğlu, 2012).

Bu yöntem kendi başına kullanımı pek mümkün değildir genellikle Coulomb sayma yöntemi ile beraber kullanılır.

5.4. Hibrit Yöntemler

Hibrit yöntemler iki yöntemin en avantajlı taraflarını kullanarak daha evrensel bir doğru sonuç elde etmeyi amaçlar. Kestirim yöntemleri ayrı ayrı kullanıldığında bazı sınırları bulunur. Hibrit yöntemler bu sınırlardan kaçarak mevcut kestirimi en üst seviyeye taşımayı amaçlar. Literatüre bakıldığında hibrit yöntemlerin tek kullanılan yöntemlere göre daha başarılı olduğu görülmüştür (Chang, 2013).

5.4.1. Coulomb sayma ve elektromotor kuvvet yöntemi

Coulomb sayma yöntemi ile denge durumundaki batarya terminallerinden ölçülen gerilim değerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuş hibrit yöntemdir. Bu yöntem için batarya üzerinde önceden bir deney yapılmadığı için gerçek zamanlı sistemlerde kullanımı uygundur.

Bataryaların SoC durumunun sıcaklıkla değiştiği bilinmektedir. Coulomb sayma yöntemi SoC kestirimi yaparken bu değişimi göz ardı etmektedir. Terminal gerilimi yöntemi ise batarya şarj veya deşarj olurken değerinin değişmesinden dolayı hata payı yüksektir. Bu iki dezavantajı ortadan kaldırmak için batarya şarj veya deşarj olurken Coulomb sayma yöntemi kullanılırken batarya denge durumunda ise terminal gerilimi yöntemi kullanılarak hem denge durumundaki çevresel şartlardan dolayı oluşan değişimlere hem de batarya akımı ile oluşan değişimlere tepki vererek doğruya en yakın kestirimin yapılması amaçlanmıştır (Pop, 2009).

5.4.2. Coulomb sayma ve Kalman filtresi yöntemi

Coulomb sayma yöntemi ve Kalman filtre yönteminin birleştirilerek elde edilmiş hibrit bir yöntemdir. Coulomb sayma yöntemindeki akım okuma hatalarını, okunan akımların toplanmasından elde edilen hataları ve örnekleme anında oluşan hataları en az seviyede tutmak için Kalman filtresinden yararlanılmıştır (Fahmy, 2023).

Kalman filtresi için herhangi bir bataryanın matematiksel eşitliği seçilmelidir. Bu projede DP modeli kullanılmıştır. Eş. 2.5 kullanılarak Eş. 5.15 oluşturulmuştur.

$$V_b = V_{oc}(SoC(t)) + I_b(t)R_0 + U_1(t) + U_2(t) \quad (5.15)$$

Eş. 5.15'te $V_{oc}(SoC(t))$ değeri SoC değerinin bir fonksiyonu olup Eş. 5.16'de verilmiştir.

$$V_{oc}(SoC(t)) = b_7 SoC^7 + b_6 SoC^6 + \dots + b_0 \quad (5.16)$$

Coulomb sayma yönteminde SoC değeri, Eş. 5.5 kullanılarak aşağıdaki formül türetilmiştir.

$$SoC_{(t+1)} = SoC_{(t)} - \frac{\Delta t}{Q} \eta I_b(t) \quad (5.17)$$

Eş. 5.17'de Q değeri Ah cinsinden yazılması gerekmektedir. $U_1(t)$ ve $U_2(t)$ değerleri ise Eş. 5.18'de verilmiştir.

$$\begin{cases} U_{1,(t+1)} = U_1(t) e^{-\frac{\Delta T}{R_1 C_1}} + R_1 (1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_1 C_1}}) I_b(t) \\ U_{2,(t+1)} = U_2(t) e^{-\frac{\Delta T}{R_2 C_2}} + R_2 (1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_2 C_2}}) I_b(t) \end{cases} \quad (5.18)$$

Elde edilen formüller Eş. 5.19'da yerlerine yerleştirilir.

$$\begin{bmatrix} SoC_{(t+1)} \\ U_{1,(t+1)} \\ U_{2,(t+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta T}{R_1 C_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta T}{R_2 C_2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SoC_{(t)} \\ U_{1,(t)} \\ U_{2,(t)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\Delta T}{Q} \eta \\ R_1 (1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_1 C_1}}) \\ R_2 (1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_2 C_2}}) \end{bmatrix} I_b(t) \quad (5.19)$$

Kalman filtresi için kullanılan katsayılar Eş. 5.19'dan elde edilir.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta T}{R_1 C_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta T}{R_2 C_2}} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta T}{Q} \eta \\ R_1 (1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_1 C_1}}) \\ R_2 (1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_2 C_2}}) \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} V_{oc} \\ SoC \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}^T, D = [-R_0] \quad (5.20)$$

Kalman filtresine uygulanan değerler sürekli olarak güncellenerek oluşan hataları minimize eder. Bu çalışmada Coulomb sayma ve Kalman filtresi yöntemi tercih edilmiştir.



6. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

Batarya yönetim sistemi tasarlanırken iki aşamalı olarak uygulanmıştır. İlk aşamada batarya durum bilgileri SoC ve SoH değerlerinin kestirimi için bir simülasyon hazırlanmıştır. İkinci aşamada ise elektronik bir devre tasarlanmıştır.

6.1. Simülasyon Tasarımı

Simülasyon tasarımı için MATLAB Simulink programı kullanılmıştır. Eş. 5.19'da verilen formül ile SoC kestirimi yapılmıştır. SoC kestirimi için gerekli olan bataryanın açık devre gerilim değeri Eş. 5.16'da verilmiştir. Bu denklemde bulunan katsayılar ise polinom regresyon analizi ile elde edilerek Çizelge 6.1'te verilmiştir.

Çizelge 6.1. VoC eşitliği polinom katsayı değerleri

Katsayı	Değeri
b7	63.4921
b6	-231.969
b5	346.393
b4	-270.6861
b3	118.0540
b2	-28.7618
b1	3.9317
b0	3.03

SoH kestirimi için ayrı bir Kalman filtresi daha tasarlanmıştır. SoH kestirimi için formüller tekrar düzenlenmiştir. Eş. 5.15'ten Eş. 6.1 elde edilmiştir.

$$V_b - V_{oc}(SoC(t)) = I_b(t)R_0 + U_1(t) + U_2(t) \quad (6.1)$$

SoH kestirimi için genellikle bataryanın iç direncini temsil eden R_0 kestirimi kullanılır. Batarya kullanıldıkça iç direnci aratacağı yeni bir bataryadan daha yüksek olacaktır. R_0 için durum denklemleri tekrar düzenlenir ve Eş. 6.2 elde edilir.

$$\begin{bmatrix} R_{0,(t+1)} \\ U_{1,(t+1)} \\ U_{2,(t+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta T}{R_1 C_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta T}{R_2 C_2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{0,(t)} \\ U_{1,(t)} \\ U_{2,(t)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ R_1(1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_1 C_1}}) \\ R_2(1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_2 C_2}}) \end{bmatrix} I_b(t) \quad (6.2)$$

Çıkış denklemi ise Eş. 6.3 olacak şekilde düzenlenir.

$$V_b - V_{oc}(SoC(t)) = \begin{bmatrix} I_b(t) \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} R_0(t) \\ U_{1,(t)} \\ U_{2,(t)} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Eş. 6.2 ve Eş. 6.3'den elde edilen formüllerden Kalman filtresi için ihtiyaç olan matrisler Eş. 6.4'te verilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta T}{R_1 C_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta T}{R_2 C_2}} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ R_1 \left(1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_1 C_1}}\right) \\ R_2 \left(1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_2 C_2}}\right) \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} I_b(t) \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}^T, D = 0 \quad (6.4)$$

Kestirilen R_0 değerinden SoH kestirimi yapmak için kurulan ilişki Eş. 6.5'te verilmiştir

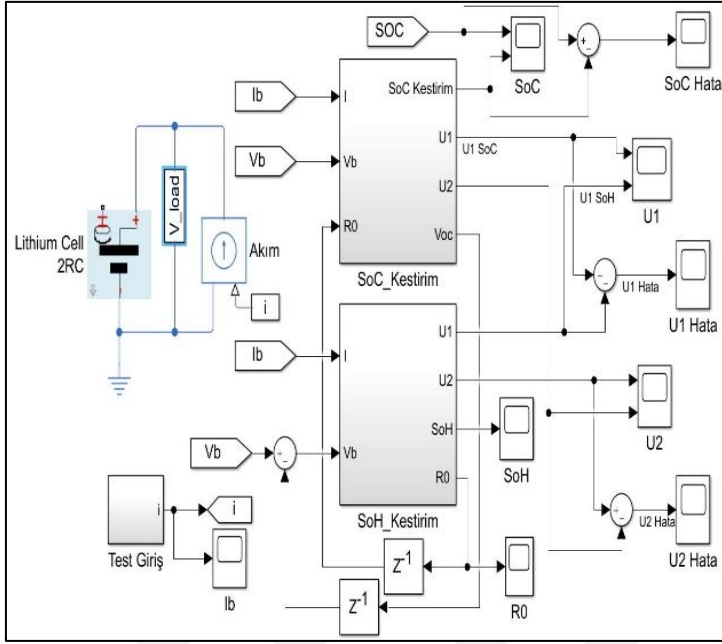
$$SoH = \frac{R_{EOL} - R_{now}}{R_{EOL} - R_{new}} \times 100 \quad (6.5)$$

Formülde kullanılan R_{now} bataryanın anlık kestirilen iç direncini temsil eder. R_{new} ise yeni bir bataryanın iç direncini temsil eder. R_{EOL} ise bataryanın ömrünün sonuna geldiğindeki iç direncini temsil etmektedir. R_{new} üretici tarafından bildirilen ve bilinen bir değerdir. R_{EOL} ise bataryalar üzerinde yapılan deneylerle tespit edilmiş ve Eş.6.6 elde edilmiştir (Wang, 2023).

$$R_{EOL} = 1,6 \times R_{new} \quad (6.6)$$

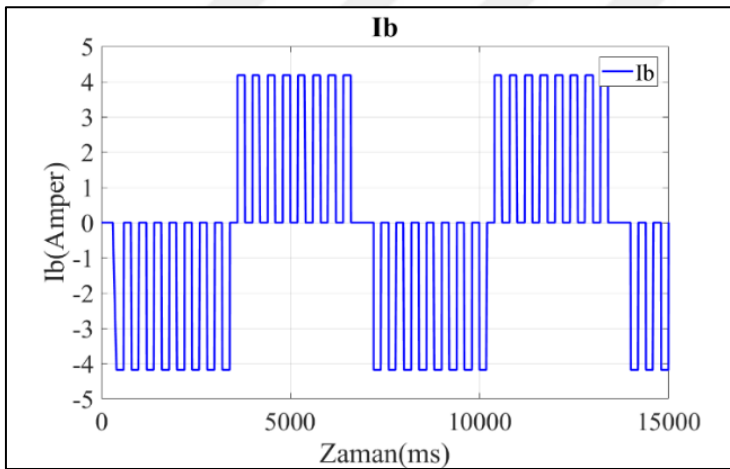
Kalman filtresi için seçilen DP matematiksel modeli için gerekli olan R_1 , R_2 , C_1 ve C_2 değerleri MATLAB programında modellenmiş olan "Lithium Cell 2RC" modelinin 20°C'deki değerleri olan $R_1=0.03$, $R_2=0.0061$, $C_1=5088$ ve $C_2=3876$ kullanılmıştır.

SoH kestiriminde kullanılan R_0 değeri aynı zamanda SoC kestiriminde kullanılan Kalman filtrenin girdisi olarak verilmiştir. Sürekli optimize olan R_0 değeri ile SoC kestiriminin daha doğruya yakın olması amaçlanmıştır.



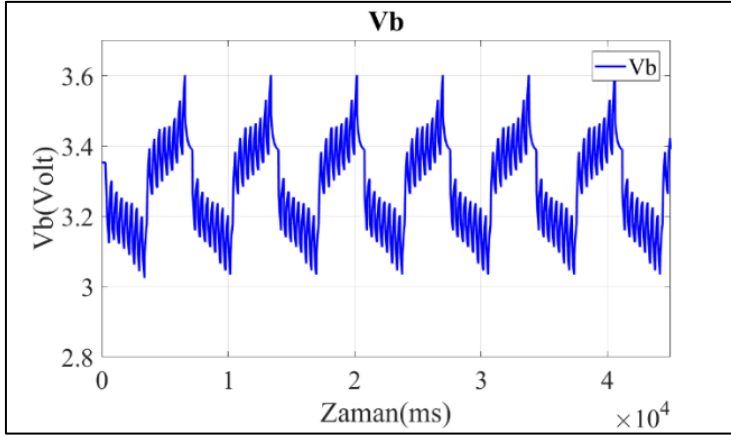
Şekil 6.1. MATLAB Simulink modeli

Şekil 6.1’de tasarlanan algoritmanın MATLAB Simulink modeli verilmiştir.



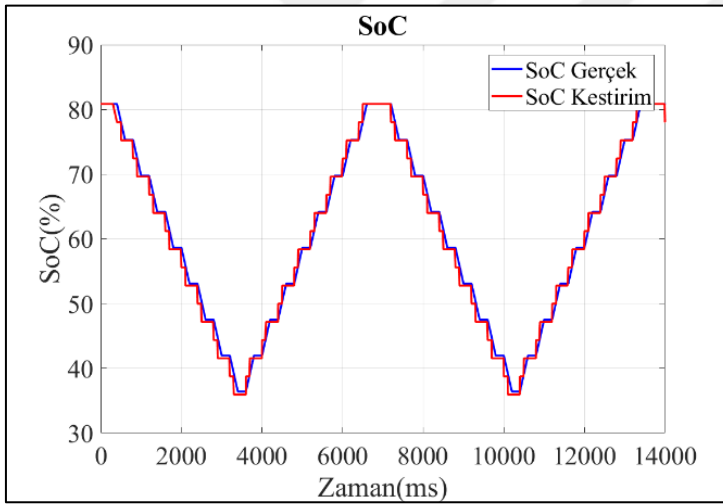
Şekil 6.2. Bataryaya uygulanan akım

Başlangıç SoC değeri %80 olarak tanımlanan bir bataryaya periyodik halde uygulanan akım Şekil 6.2’de verilmiştir.



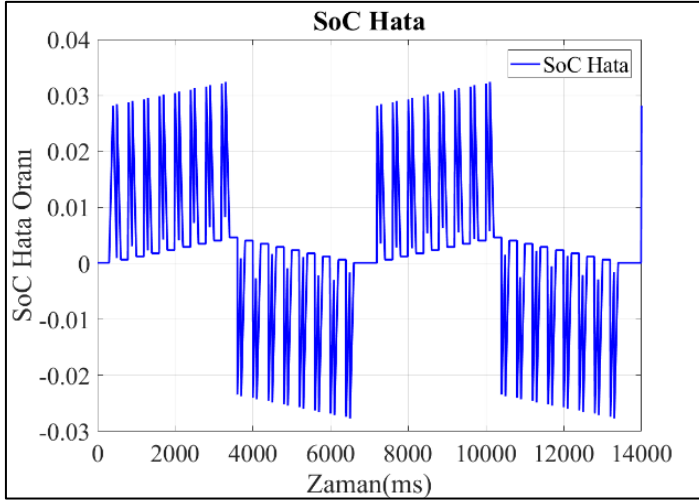
Şekil 6.3. Batarya terminal gerilimi

Şekil 6.3'te I_b akımı uygulanan bataryanın terminallerinden ölçülen V_b gerilimi verilmiştir. Algoritmanın çalışabilmesi için tüm girdiler hazır olduktan sonra simülasyon çalıştırılır.



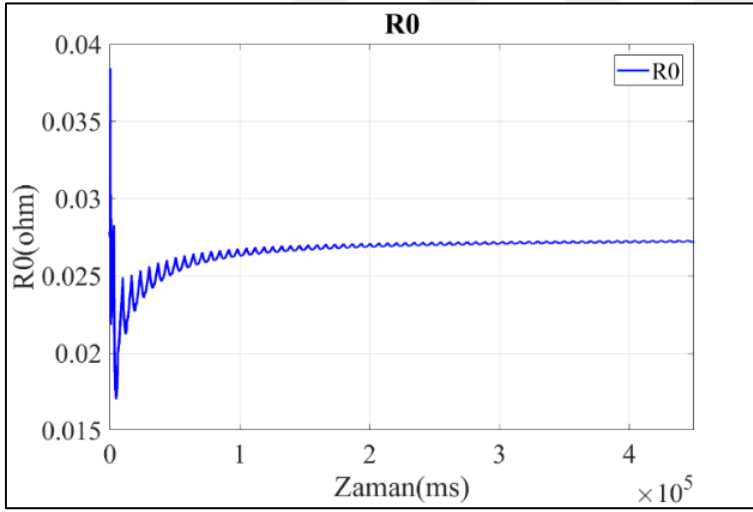
Şekil 6.4. SoC değerleri

İlk kalman filtresinin çıktıları olan SoC , U_1 ve U_2 değerleri elde edilir. Şekil 6.4'de MATLAB programında modellenmiş olan bataryanın SoC değeri gerçek değer olarak kabul edilmiştir. Kalman filtresinin sonucu elde edilen SoC değeri ise kestirilen değer olarak belirtilmiştir.



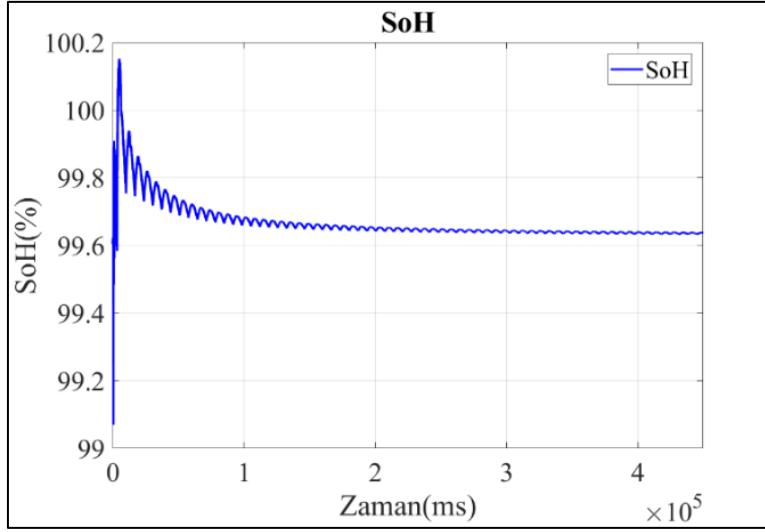
Şekil 6.5. SoC hata oranı

Şekil 6.5'te iki değer arasındaki sapma verilmiştir. Sapmanın maksimum değeri ± 0.03 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.6. Kestirilen R_0 değeri

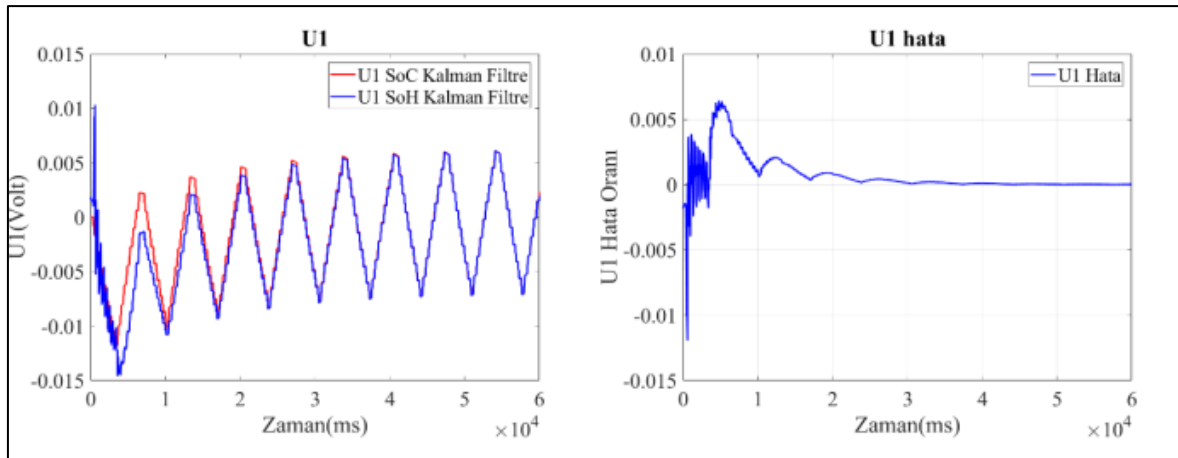
SoH kestirimi için olan ikinci Kalman filtresi devreye alınır. R_0 , U_1 ve U_2 ikinci kalman filtresinin çıktılarıdır. Şekil 6.6'da kestirilen R_0 değeri görülmektedir. Bu değer Eş. 5.20'de verilen R_0 değerini sürekli güncellemektedir.



Şekil 6.7. Kestirilen SoH değeri

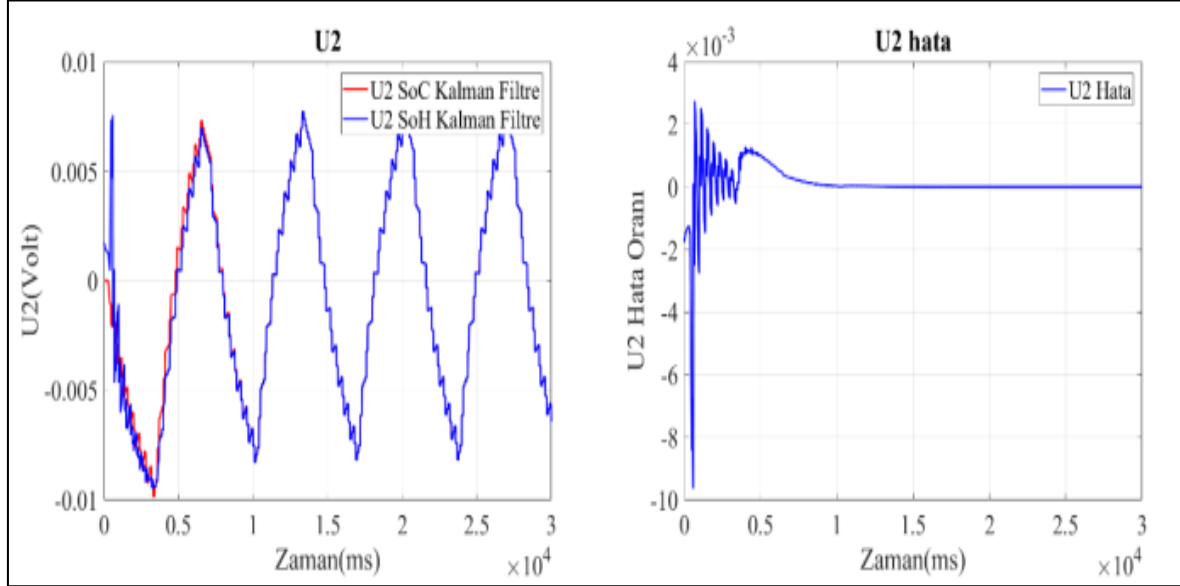
Şekil 6.7’de Eş. 6.5 ve Eş. 6.6’dan yararlanılarak dolaylı olarak kestirilen SoH değeri gösterilmektedir. SoH kestirimi için üretici tarafından verilen batarya iç direnci 0.02Ω alınmıştır. SoH kestirimi dolaylı olarak yapıldığından doğruluğunun kıyaslanabileceği herhangi bir veri yoktur. Ancak varsayım olarak yaklaşılabilir.

Her iki Kalman filtresinin ortak çıkışları olan U_1 ve U_2 değerleri birbiriyle kıyaslanır ve zamanla eşitlendiği görülür. MATLAB simulink batarya modelinde verilen SoC değeri ile kestirilen SoC değeri arasındaki hata oranı ± 0.03 iken SoC ile SoH Kalman filtrelerinin çıktılarının ikisi zamanla eşitlendiği görüldüğünden dolayı SoH kestiriminin de gerçek ile kestirilen arasındaki hata oranının ± 0.03 olması beklenmektedir (Sevim, 2023).



Şekil 6.8. U1 gerilimleri ve hata oranı

Şekil 6.8’de her iki filtreden elde edilen U_1 gerilimleri ve birbiriyle kıyaslanması sonucu elde edilen hata oranı verilmiştir.

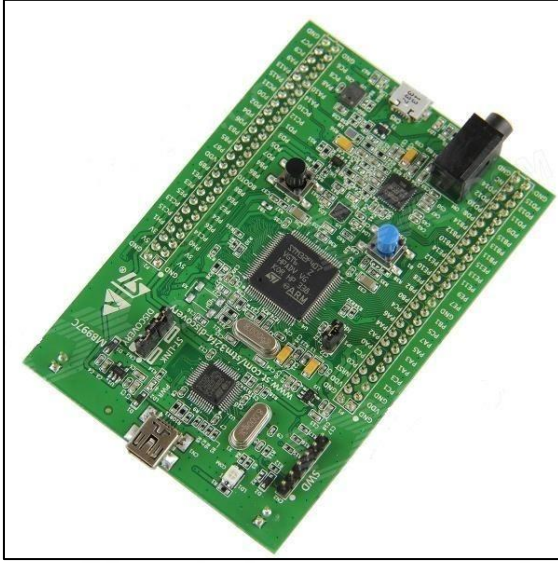


Şekil 6.9. U_2 gerilimleri ve hata oranı

Şekil 6.9’de her iki filtreden elde edilen U_2 gerilimleri ve birbiriyle kıyaslanması sonucu elde edilen hata oranı verilmiştir. Kalman kazançlarının zamanla oturması sonucunda her iki değerinde sıfırda eşitlendiği görülmektedir. SoC ve SoH değerine etki eden sıcaklık, depolama koşulları, çevrim süresi gibi parametreler bu algoritmada ihmal edilmiştir. Daha doğruya yakın değer için algoritmaya bu değerlerde eklenebilir.

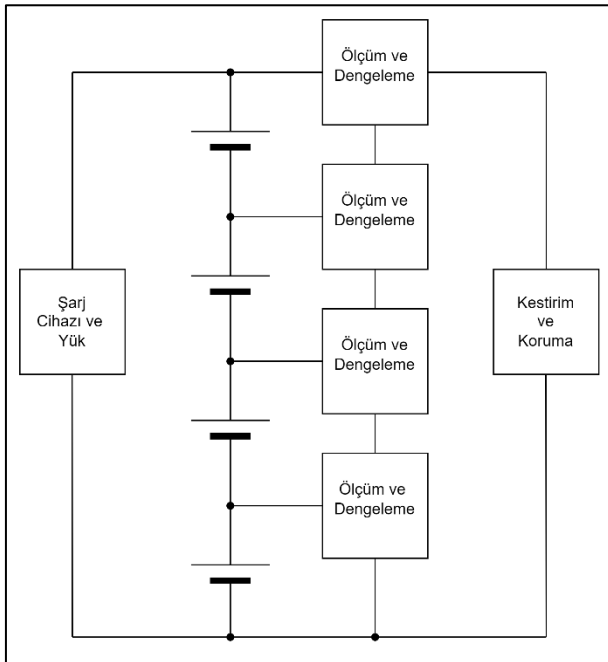
6.2. Elektronik Devre Tasarımı

4 hücreli bir batarya grubu için bir elektronik devre tasarlanmıştır. Elektronik devre tasarımı kontrolcü olarak STM32F407G-DISC1 Discovery geliştirme kartı kullanılmıştır. Şekil 6.10’da kontrolcünün resmi verilmiştir.



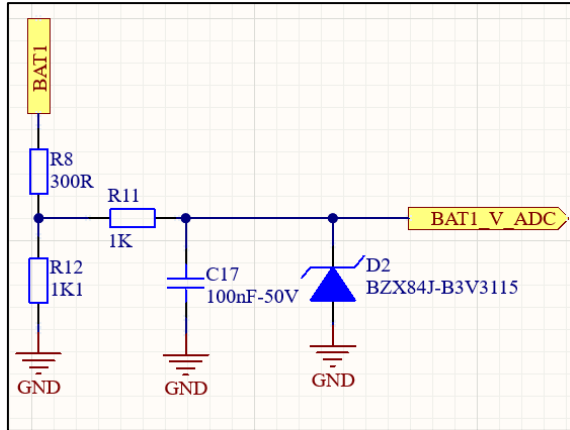
Şekil 6.10. STM32F407G-DISC1 geliştirme kartı

Kontrolcü hücrelerin gerilim ve akım ölçümlerini, dengeleme işlemi için anahtarlama sinyallerinin oluşturulmasını, diğer çevre birimleri ile haberleşme görevini, koruma eşiklerinin takibini ve kestirim için gerekli algoritmanın koşturulması görevlerini üstlenmektedir. Şekil 6.11’de tasarlanan devrenin blok şeması verilmiştir. Her bir hücre için ayrı ayrı ölçüm ve dengeleme devresi tasarlanmıştır. Daha sonra bu devrelerden alınan veriler kontrolcüye iletilmiş kestirim ve koruma adımları ise bu kısımda yapılmıştır.



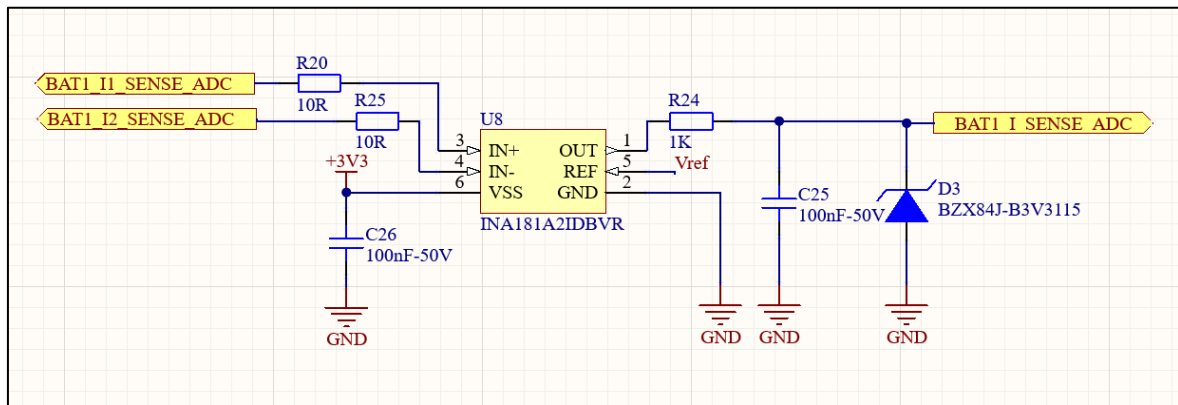
Şekil 6.11. Elektronik devrenin blok diyagramı

Şekil 6.12’de tek bir hücre için gerilim ölçümü devre şeması verilmiştir. Seri bağlı bulunan dört hücrenin kendi gerilimlerini hesaplayabilmek için kendinden bir önce gelen hücrenin gerilim değeri ölçüm değerinden çıkartılmıştır. Böylelikle her hücrenin kendi gerilimi elde edilmiş olur. Ölçüm doğruluğu için alçak geçiren filtre eklenmiştir. Olası yüksek gerilim girdileri için ise kontrolcüyü korumak için bir zener diyot eklenmiştir.



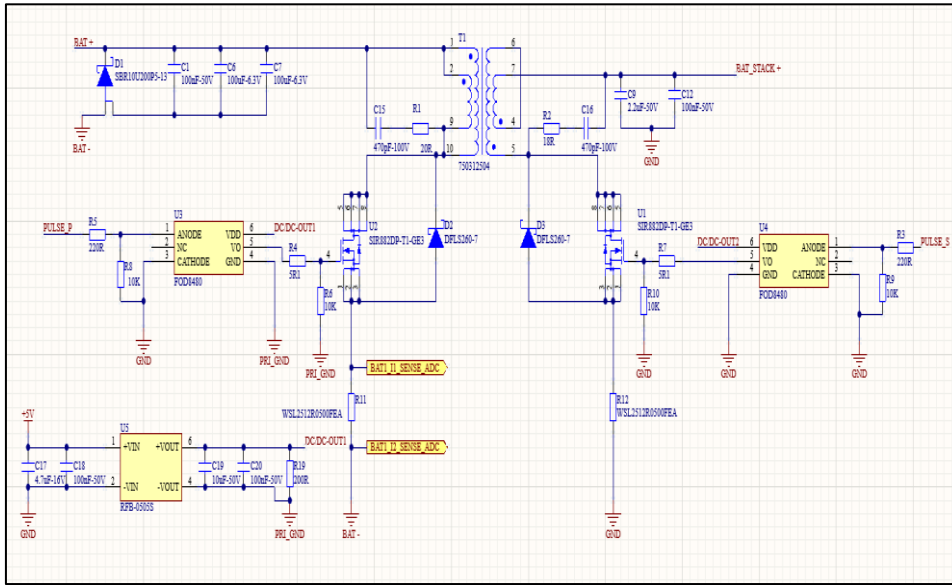
Şekil 6.12. Gerilim ölçüm devresi

Şekil 6.13’de tek hücre için akım okuma devresi verilmiştir. Şönt direnç üzerinden geçen akım iki yönlü akım okuyabilen INA181A2IDBVR ile okunmuş ve okunan değer entegre yardımı ile 20 kat büyütülmüştür. Vref değeri ise TLV431 entegresi ile 1,24V olarak belirlenmiştir. Eğer hücre üzerinden akım geçmiyor ise analog değer 1,24V, eğer batarya deşarj oluyor ise bu değer üstünde bir değer, şarj oluyor ise altında bir değere almaktadır. Böylelikle yapılan akım ölçümü ile bataryanın şarj ya da deşarj modunda çalıştığı bilinmektedir. Tüm hücreler için bu okuma devresi eklenmiştir.



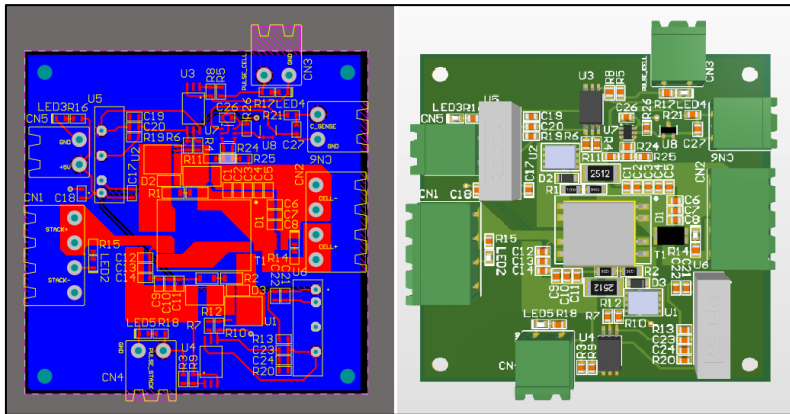
Şekil 6.13. Akım ölçüm devresi

Şekil 6.14’te dengeleme devresi verilmiştir. Hücrelerin ters bağlanmasına karşı D1 diyotu ile önlem alınmıştır. Flyback dönüştürücü iki taraflı olarak kullanılmıştır. Böylelikle hücreden pakete (cell to pack) veya paketten hücreye (pack to cell) enerji akışı sağlanmıştır. Hücre tarafındaki U1 mosfetinin Vgs gerilimini oluşturabilmek için her hücre için ortak bir yapı kurularak DC-DC izoleli dönüştürücü kullanılmıştır. Hücrenin hangi aralıkta olduğuna bakılmaksızın bu yapı ile mosfetin anahtarlama gerilimi oluşturulmuştur.



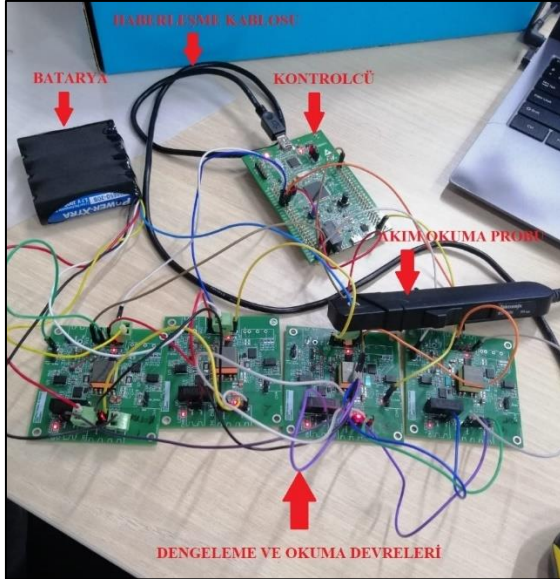
Şekil 6.14. Dengeleme devresi

Altium Design PCB çizim programı kullanılarak tasarlanan devrelerin görselleri Şekil 6.15’de verilmiştir. Bu devre her hücre için ayrı ayrı kullanılmıştır. Hücre sayısı artırılmak istendiğinde kolay bir şekilde eklenmesi amaçlanmıştır.



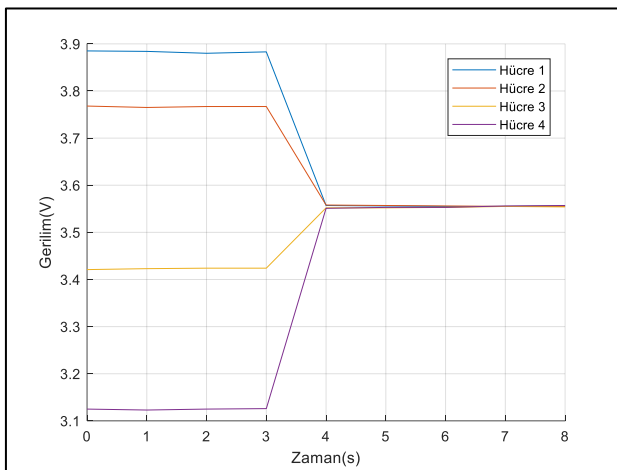
Şekil 6.15. Tasarlanan devrenin görselleri

Şekil 6.16’te hazırlanan projenin devre görseli verilmiştir. 4 hücreli bataryanın gerilimleri ölçüldükten sonra ortalaması alınmış ve bir dengeleme gerilimi bulunmuştur. Gerilim değeri bu değerden fazla olan hücreler için deşarj sinyalleri, az olan hücreler için şarj sinyalleri aktif edilmiştir.



Şekil 6.16. Uygulama devre şeması

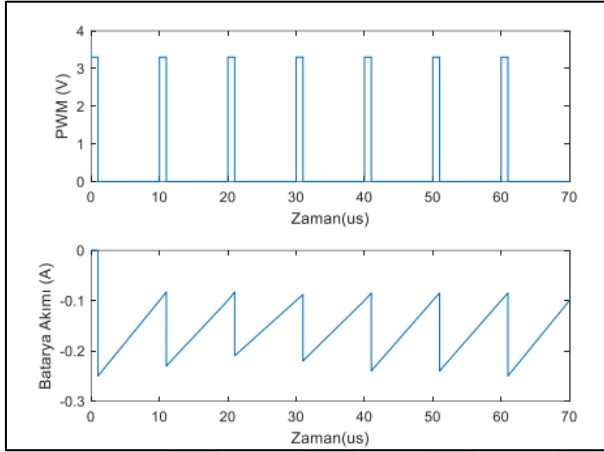
Dengeleme öncesi hücre gerilim değerleri ile dengeleme başladıktan sonra elde edilen gerilim değerleri Şekil 6.17’de gösterilmiştir.



Şekil 6.17. Hücre gerilimleri

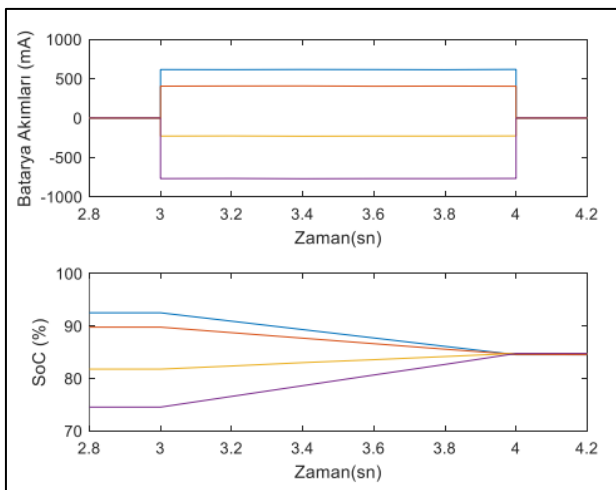
Dengeleme işlemi sırasında 100 KHz bir tetikleme sinyali kontrolcü tarafından sağlanmıştır. PWM doluluk oranı ise bataryanın ihtiyacına göre belirlenmiştir. Şekil 6.18’de kontrolcünden

çıkan bir PWM sinyali ile ilgili bataryanın akımı verilmiştir. Algoritmaya göre şarj olan pilin akımı eksi olarak gösterilmiştir. PWM doluluk oranı yükseldikçe akım değeri de yükselmektedir. Dengeleme akımının maksimum sınırı 3A olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.18. Tetikleme sinyali ve batarya akımı

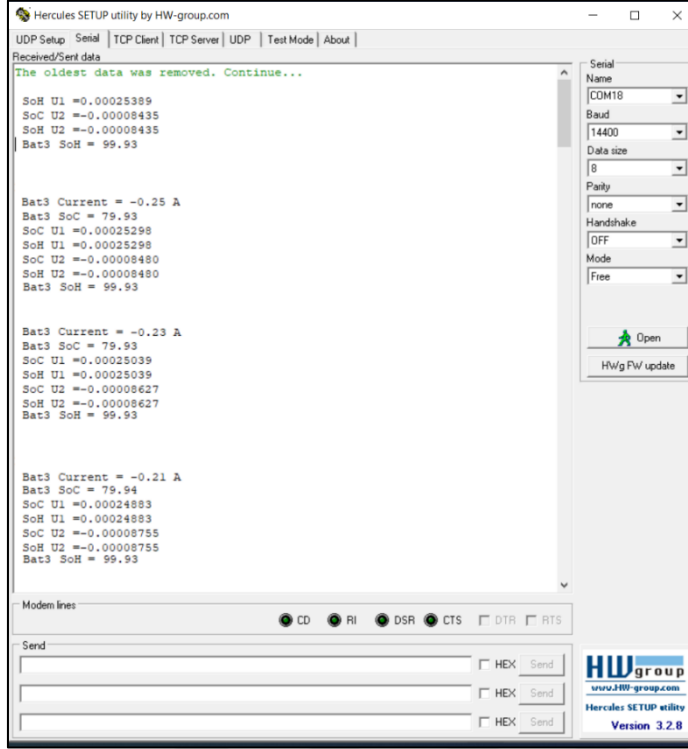
Haberleşme sırasında 10us süre çok sık olacağından ve kontrolcü performansında düşüş yaşanmaması için USB haberleşmesi 200ms aralıklarla yapılmıştır. SoC ve SoH grafikleri haberleşme üzerinden alınan verilerden yararlanılarak çizdirilmiştir. Şekil 6.209'da şarj olan bataryaların SoC değerlerinin arttığı, deşarj olan bataryaların ise SoC değerlerinin azaldığı görülmektedir. Denge değerinde ise SoC değerinin eşitlendiği görülmektedir.



Şekil 6.19. Batarya akımları ve SoC değerleri

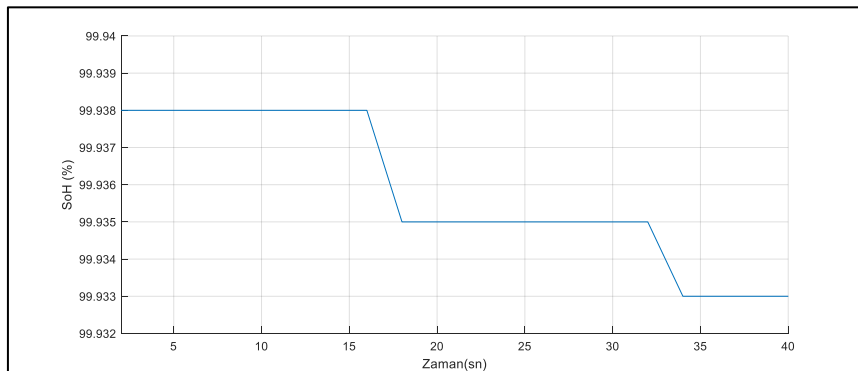
Şekil 6.20'de kontrolcünün üzerinde bulunan USB haberleşme kanalı ile verilerin Hercules programının görüntüsü verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi her iki kalman filtresinin

sonuçları olan U_1 ve U_2 değerleri eşitlenmiştir. Dolaylı olarak SoH değerinin de aynı hata oranında olduğu varsayımı yapılabilir.



Şekil 6.20. USB ara yüz görüntüsü

Şekil 6.21'da sistem çıktılarından biri olan SoH değeri görülmektedir. SoH değeri için kestirim esnasında kalman kazancı oturması için süre verilmiş veri daha sonra işlenmeye başlanmıştır.



Şekil 6.21. SoH değeri



7. SONUÇ

Bu projede ilk aşama olan simülasyon için bataryaların SoC ve SoH değerlerinin kestiriminde en yaygın yöntem olan Kalman filtresi kullanılmıştır. Kalman filtresi için gerekli olan durum denklemlerini oluşturabilmek için bataryanın elektriksel modellerinden DP modeli seçilmiştir. SoC ve SoH değişiminde en önemli faktörlerden biri olan sıcaklık değeri 20°C olarak sabit alınmıştır. SoH değerini belirlemede etkili olan depolama süresi, depolama sıcaklığı, şarj-deşarj sıklığı gibi değerler ihmal edilmiştir. Bu değerlerde algoritmaya eklenerek gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilir. MATLAB programında modellenmiş bir bataryanın SoC değeri gerçek değeri olduğu varsayılmıştır. Algoritma oluşturulurken iki adet kalman filtresi oluşturulmuş ve birinin girdisi diğerinin çıktısı olacak şekilde tasarın yapılmıştır. Böylelikle kalman kazançlarının daha çabuk oturması amaçlanmıştır. Oluşturulan algoritmanın sonuçları bu değer ile karşılaştırılmış ve hata değeri maksimum ± 0.03 olarak görülmüştür. Elde edilen iki filtre sonuçlarından U_1 ve U_2 değerleri birbiri ile kıyaslanmış ve bir süre sonra iki değer de aynı olduğu gözlemlenmiştir. Dolaylı olarak SoH kestiriminin gerçek değerinden maksimum hata değerinin ± 0.03 olduğu çıkarımı yapılmıştır. Bu çalışma SoC ve SoH değerleri batarya üzerinde deneyler yapmadan, ölçüm için süre kaybı yaşamadan ve şarj cihazı veya yük devreden ayrılmadan küçük bir hata payı ile kestirilmiştir.

Simülasyon sonuçlarından elde edilen yaklaşımlar ile elektronik devre tasarlanmıştır. Elektronik devre tasarımında kontrolcü olarak STM32F407G-DISC1 Discovery geliştirme kartı kullanılmıştır. Kontrolcü seçilirken analog okumalardan kaynaklanan hatanın en aza indirgenmesi için çözünürlük oranı 12 bit olmasına dikkat edilmiştir. Dengeleme işlemi için aktif dengeleme yöntemlerinden flyback dönüştürücü seçilmiştir. Dengeleme işleminin her hücre için ayrı ayrı yapılması dengeleme süresinin daha kısa olmasını sağlamıştır. Bataryaların düşük gerilim eşiği 2,6V, yüksek gerilim eşiği 3,6V, aşırı akım eşiği 3A seçilmiştir. Eşik değerlerin belirlenmesinde, kullanılan batarya değerleri referans alınmıştır. Belirlenen eşik değerleri aşması durumunda batarya koruması gerçekleştirilmiştir ve USB çıkışı ile elde edilen veriler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Elektronik devreden elde edilen sonuçlar ile simülasyon sonuçlarının uyduğu gözlemlenmiştir.

Bu alışmadan “Lityum bataryalarda şarj durumu (SoC) ve sağlık durumu (SoH) kestirimi” adında bir makale yayınlanmıştır.



KAYNAKLAR

- Sevim, G. ve Altın, N. (2023). Lityum bataryalarda şarj durumu (SoC) ve sağlık durumu (SoH) kestirimi. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 5(1), 33-51.
- Wang, N., Xia, X. and Zeng, X. (2023). State of charge and state of health estimation strategies for lithium-ion batteries. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 18, 443-448.
- Fahmy, H. M., Swief, R. A., Hasanien, H. M., Alharbi, M., Maldonado, J. L. and Jurado, F. (2023). Hybrid State of Charge Estimation of Lithium-Ion Battery Using the Coulomb Counting Method and an Adaptive Unscented Kalman Filter. *Energies*, 16(14), 5558.
- Pop, V., Bergveld, H. J., Notten, P. H. L., het Veld, J. O. and Regtien, P. P. (2009). Accuracy analysis of the State-of-Charge and remaining run-time determination for lithium-ion batteries. *Measurement*, 42(8), 1131-1138.
- Shrivastava, P., Soon, T. K., Idris, M. Y. I. B. and Mekhilef, S. (2019). Overview of model-based online state-of-charge estimation using Kalman filter family for lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109233.
- Çayıroğlu İ., Kalman filtresi ve programlama, *Fen ve Teknoloji Bilgi Paylaşımı*, 1 (2012).
- Hansen, T. and Wang, C. J. (2005). Support vector based battery state of charge estimator. *Journal of Power Sources*, 141(2), 351-358.
- Guo, S. and Ma, L. (2023). A comparative study of different deep learning algorithms for lithium-ion batteries on state-of-charge estimation. *Energy*, 263, 125872.
- Singh, P., Vinjamuri, R., Wang, X. and Reisner, D. (2006). Design and implementation of a fuzzy logic-based state-of-charge meter for Li-ion batteries used in portable defibrillators. *Journal of Power Sources*, 162(2), 829-836.
- Guo, H., Jiang, J. and Wang, Z. (2009, May). Estimating the state of charge for Ni-MH battery in HEV by RBF neural network. In *2009 International workshop on intelligent systems and applications*, 1-4.
- Sindhuja, S. and Vasanth, K. (2015, December). Modified coulomb counting method of SOC estimation for uninterruptible power supply system's battery management system. In *2015 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, 197-203.
- Ng, K. S., Moo, C. S., Chen, Y. P. and Hsieh, Y. C. (2009). Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. *Applied Energy*, 86(9), 1506-1511.
- Hung, M. H., Lin, C. H., Lee, L. C. and Wang, C. M. (2014). State-of-charge and state-of-health estimation for lithium-ion batteries based on dynamic impedance technique. *Journal of Power Sources*, 268, 861-873.

- Huet, F. (1998). A review of impedance measurements for determination of the state-of-charge or state-of-health of secondary batteries. *Journal of Power Sources*, 70(1), 59-69.
- Sato, S. and Kawamura, A. (2002, April). A new estimation method of state of charge using terminal voltage and internal resistance for lead acid battery. In *Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka 2002 (Cat. No. 02TH8579)*, Vol. 2, 565-570.
- Ng, K. S., Moo, C. S., Chen, Y. P. and Hsieh, Y. C. (2008, December). State-of-charge estimation for lead-acid batteries based on dynamic open-circuit voltage. In *2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference*, 972-976.
- Gao, X. Z., Hou, Z. X., Guo, Z. and Chen, X. Q. (2015). Reviews of methods to extract and store energy for solar-powered aircraft. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 96-108.
- Akgundogdu, A., Karadeniz, O., Şahin, U., İn, S., Tiryaki, H., Erdoğan, G. ve Kocaarslan, İ. (2017). Elektrikli araçlar için batarya paketi ve batarya yönetim sisteminin gerçekleştirilmesi. In *World electro mobility conference. Retrieved September* (Vol. 25, p. 2020).
- Polat, B. D. ve Keleş, Ö. (2012). Lityum iyon pil teknolojisi. *Metalurji Dergisi*, 162, 42-48.
- Tezde, E. İ. ve Okumuş, H. İ. (2018). Batarya Modelleri ve Şarj Durumu (SoC) Belirleme. *EMO Bilimsel Dergi*, 8(1), 21-25.
- He, H., Xiong, R. and Fan, J. (2011). Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. *Energies*, 4(4), 582-598.
- Jafari, Hasan, and Mohammad Reza Rahimpour. "Pb Acid Batteries." *Rechargeable Batteries: History, Progress, and Applications* (2020): 17-39.
- Özcan, Ö. F., Karadağ, T., Altuğ, M. ve Özgüven, Ö. (2021). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 8(2), 276-298.
- Madani, S. S., Schaltz, E. and Knudsen Kær, S. (2019). An electrical equivalent circuit model of a lithium titanate oxide battery. *Batteries*, 5(1), 31.
- Andrea, D. (2010). *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*. Artech house.
- DelRossi, R. (2002). Cell balancing design guidelines. *Technology*, 1-4
- Kara, İ. (2009). CAN haberleşme protokolünün incelenmesi ve bir sıcaklık kontrol sistemine uygulanması.

- Ahmad, A. B., Ooi, C. A., Ishak, D. and Teh, J. (2019). Cell balancing topologies in battery energy storage systems: A review. In *10th International Conference on Robotics, Vision, Signal Processing and Power Applications*, 159-165. Springer, Singapore.
- Daowd, M., Omar, N., Van Den Bossche, P. and Van Mierlo, J. (2011, September). Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation. In *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1-7.
- Lindemark, B. (1991, November). Individual cell voltage equalizers (ICE) for reliable battery performance. In *[Proceedings] Thirteenth International Telecommunications Energy Conference-INTELEC 91*, 196-201.
- Stuart, T. A. and Zhu, W. (2009). Fast equalization for large lithium ion batteries. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 24(7), 27-31.
- Ahmad, A. B., Ooi, C. A., Ishak, D. and Teh, J. (2019). Cell balancing topologies in battery energy storage systems: A review. In *10th International Conference on Robotics, Vision, Signal Processing and Power Applications*, 159-165. Springer, Singapore.
- Pascual, C. and Krein, P. T. (1997, February). Switched capacitor system for automatic series battery equalization. In *Proceedings of APEC 97-Applied Power Electronics Conference*, Vol. 2, 848-854.
- Speltino, C., Stefanopoulou, A. and Fiengo, G. (2010, June). Cell equalization in battery stacks through state of charge estimation polling. In *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, 5050-5055.
- Baughman, A. C. and Ferdowsi, M. (2008). Double-tiered switched-capacitor battery charge equalization technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6), 2277-2285.
- Park, S. H., Kim, T. S., Park, J. S., Moon, G. W. and Yoon, M. J. (2007, October). A new battery equalizer based on buck-boost topology. In *2007 7th International Conference on Power Electronics*, 962-965.
- Hsieh, Y. C., Moo, C. S., Tsai, I. S. and Cheng, J. C. (2002, December). Dynamic charge equalization for series-connected batteries. In *2002 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT'02*, Vol. 1, 444-449.
- Imtiaz, A. M., Khan, F. H. and Kamath, H. (2011, March). A low-cost time shared cell balancing technique for future lithium-ion battery storage system featuring regenerative energy distribution. In *2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 792-799. IEEE.
- Park, K. H., Kim, C. H., Cho, H. K. and Seo, J. K. (2010). Design considerations of a lithium ion battery management system (BMS) for the STSAT-3 satellite. *Journal of Power Electronics*, 10(2), 210-217.

- Lee, Y. S., Duh, C. Y., Chen, G. T. and Yang, S. C. (2005, June). Battery equalization using bi-directional Cuk converter in DCVM operation. In *2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference*, 765-771.
- Hong, W., Ng, K. S., Hu, J. H. and Moo, C. S. (2010, June). Charge equalization of battery power modules in series. In *The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA-*, 1568-1572.
- Wei, X., Zhao, X. and Dai, H. (2009, September). The application of flyback DC/DC converter in Li-ion batteries active balancing. In *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1654-1656.
- Gottwald, T., Ye, Z. and Stuart, T. (1997). Equalization of EV and HEV batteries with a ramp converter. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 33(1), 307-312.
- Maharjan, L., Inoue, S., Akagi, H. and Asakura, J. (2009). State-of-charge (SOC)-balancing control of a battery energy storage system based on a cascade PWM converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(6), 1628-1636.
- Lee, Y. S., Tsai, C. E., Ko, Y. P. and 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-*, 2722-2728.
- Chang, W. Y. (2013). The state of charge estimating methods for battery: A review. *International Scholarly Research Notices*, 2013.
- Habib, A. A. and Hasan, M. K. (2023). Lithium-ion battery state-of-charge balancing circuit using single resonant converter for electric vehicle applications. *Journal of Energy Storage*, 61, 106727.
- Lee, Y. L., Lin, C. H., Farooqui, S. A., Liu, H. D. and Ahmad, J. (2023). Validation of a balancing model based on master-slave battery management system architecture. *Electric Power Systems Research*, 214, 108835.



Gazili olmak ayrıcalıktır