



**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN AKTİF BATARYA DENGELEME
SİSTEMİ TASARIMI**

Elif KILINÇ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2022

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.

Elif KILINÇ

28/12/2022

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN AKTİF BATARYA DENGELEME SİSTEMİ TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Elif KILINÇ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

pAralık 2022

ÖZET

Günümüzde elektrikli araç teknolojisi önemli bir yere sahiptir. Elektrikli araçların temel hareket enerjisini bataryalar oluşturmaktadır. Bataryaların şarj ve deşarj döngülerinde uygun çalışma aralığında kalabilmesi için bir batarya yönetim sistemi gerekmektedir. Batarya yönetim sistemleri batarya paketinde bulunan hücrelerin kontrolünü sağlamakla birlikte bataryaların özdeş seviyede şarj ve deşarj olmasını düzenlemektedir. Bataryaların eşit bir şekilde şarj ve deşarj olabilmesi için batarya dengeleme sistemleri kullanılmaktadır. Pasif ve aktif dengeleme olmak üzere iki çeşit dengeleme sistemi vardır. Çalışmada elektrikli araçlar için genişletilmeye uygun prototip bir batarya yönetim sistemi tasarımı yapılmıştır. Geliştirilen batarya yönetim sisteminde dönüştürücü esaslı aktif dengeleme sistemlerinin bir çeşidi olan çift yönlü flyback dönüştürücü tasarımı yapılmıştır. Geliştirilen sistemde 6 tane 18650 lityum iyon 2200 mAh kapasiteli hücreler kullanılmıştır. Her batarya hücresi bir hücre kartına sahiptir. Hücre kartı bataryanın gerilim, akım, SOC ve dengeleme değerlerini CAN haberleşme üzerinden ana kontrol kartına göndermektedir. Ana kontrol kartı bu bilgiler ile hücrelerin nominal çalışma aralığında olmasını ve dengeleme sisteminin kontrolünü sağlamaktadır. Batarya dengeleme sisteminin kontrolünde bulanık mantık denetleyici kullanılmıştır. Geliştirilen sistemde 6 hücreden oluşan batarya paketine dengeleme devresi olmadan ve dengeleme devresi kullanılarak farklı akım değerlerinde şarj ve deşarj testleri yapılmıştır. Dengeleme sistemi olmadan yapılan test sonucunda bataryaların kapasitesinin tam kullanılamadığı ve bununda toplam paket kapasitesini olumsuz etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. Dengeleme sistemi ile yapılan testler sonucunda hücreler dengeye ulaşmış, paket şarj süresi kısaldığı ve deşarj kullanım süresinin arttığı görülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda batarya yönetim sistemlerinin önemli olduğu görülmüştür. Tasarlanan çift yönlü flyback dönüştürücünün batarya dengeleme sistemlerinde kullanıma uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bilim Kodu : 93001
Anahtar Kelimeler : Batarya yönetim sistemi, aktif dengeleme, flyback dönüştürücü
Sayfa Adedi : 83
Danışman : Doç. Dr. Fatih ŞAHİN

DESIGN OF ACTIVE BATTERY BALANCE SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLES

(M. Sc. Thesis)

Elif KILINÇ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2022

ABSTRACT

Today, electric vehicle technology has an important place. Batteries constitute the main energy of movement of electric vehicles. A battery management system is required in order to keep the batteries in the proper operating range during charge and discharge cycles. Battery management systems control the cells in the battery pack and regulate the charging and discharging of the batteries at the same level. Battery balancing systems are used so that the batteries can be charged and discharged evenly. There are two types of balancing systems, passive and active balancing. In the study, a prototype battery management system suitable for extension for electric vehicles has been designed. In the developed battery management system, a bidirectional flyback converter, which is a type of converter-based active balancing systems, was designed. In the developed system, 6 18650 lithium ion cells with a capacity of 2200 mAh were used. Each battery cell has a cell board. The cell card sends the voltage, current, SOC and balancing values of the battery to the main control card via CAN communication. With this information, the main control card ensures that the cells are within the nominal operating range and that the balancing system is controlled. Fuzzy logic controller is used to control the battery balancing system. In the developed system, charge and discharge tests at different current values were carried out on the battery pack consisting of 6 cells, without balancing circuit and using the balancing circuit. As a result of the test performed without the balancing system, it was concluded that the capacity of the batteries could not be used fully and this negatively affected the total package capacity. As a result of the tests made with the balancing system, the cells have reached equilibrium, it has been observed that the charging time of the pack is shortened and the discharge usage time is increased. As a result of the study, it has been seen that battery management systems are important. It has been concluded that the designed bidirectional flyback converter is suitable for use in battery balancing systems.

Science Code : 93001

Key Words : Battery management system, active balance, flyback converter

Page Number : 83

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Fatih ŞAHİN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının her aşamasında engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, her zaman ve her konuda desteğini aldığım çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Fatih ŞAHİN'e, başta Prof. Dr. Serdar YÜCESU olmak üzere, her konuda fikir alışverişi yaptığım Dr. Öğr. Üyesi Meral ÖZARSLAN YATAK ve Arş. Gör. Çağdaş HİSAR hocalarıma, tüm Gazi Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyeleri ve personeline, ayrıca şu an görev yapmakta bulunduğum Kocaeli Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümündeki değerli hocalarıma, çalışma arkadaşlarıma ve hayatımın her aşamasında olduğu gibi bu tez sürecinde de her zaman yanımda olan ve beni sabırla destekleyen değerli anneme, babama, kardeşlerime ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. BATARYALAR VE BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ.....	9
2.1. Batarya Dengeleme Sistemleri.....	12
2.1.1. Pasif dengeleme.....	14
2.1.2. Aktif dengeleme.....	16
2.2. Şarj Durumu (State Of Charge. SOC) Tahmin Hesabı Yöntemleri.....	27
2.2.1. Batarya modeli ile SOC hesabı.....	27
2.2.2. Algoritmalar ile SOC tahmini.....	30
3. GELİŞTİRİLEN AKTİF BATARYA DENGELEME SİSTEMİ.....	33
3.1. Çift Yönlü Flyback Tasarımı.....	35
3.2. Hücre Kart Tasarımı.....	46
3.3. Ana Kontrol Kart Tasarımı.....	52
3.4. Geliştirilen Algoritma.....	56
3.5. Kullanılan Bataryanın Parametre Hesabı.....	61
4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....	67

Sayfa

4.1. Dengeleme Sistemi Olmadan Batarya Hücrelerinin Davranış Analizi.....	67
4.2. Dengeleme Sistemi ile Batarya Hücrelerinin Davranış Analizi.....	69
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	83

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Şarj edilebilir bataryaların özellikleri	10
Çizelge 2.2. Türkiye’de 2013’ten 2022 mayıs ayına kadar olan elektrikli araç satış..... adedi ve toplam satış sayıları	11
Çizelge 2.2. (devam)Türkiye’de 2013’ten 2022 mayıs ayına kadar olan elektrikli..... araç satış adedi ve toplam satış sayıları	12
Çizelge 2.3. Batarya dengeleme topolojilerinin karşılaştırılması.....	26
Çizelge 3.1. Çift yönlü flyback dönüştürücü tasarım parametreleri.....	40
Çizelge 3.2. Hücre deşarj yönü test sonuçları.....	43
Çizelge 3.3. Hücre şarj yönü test sonuçları.....	44
Çizelge 3.4. 18650 2200 mAh Lityum iyon pil özellikleri.....	49
Çizelge 3.5. STM32F103C8 genel özellikleri.....	50
Çizelge 3.6. Bulanık mantık kural tablosu.....	60

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Şarj edilemeyen ve şarj edilebilen bataryalar.....	9
Şekil 2.2. 2010 .2021 yılları arası dünyada ki elektrikli araç sayısı	11
Şekil 2.3. Dengeleme yapılmamış hücrelerin şarj vedeşarj durumu.....	13
Şekil 2.4. Batarya dengeleme sistemleri.....	13
Şekil 2.5. Pasif dengeleme yapmış hücreler.....	14
Şekil 2.6. Sabit direnç yöntemi.....	15
Şekil 2.7. Anahtarlamaalı direnç yöntemi.....	15
Şekil 2.8. Pasif ve aktif dengeleme yapmış hücreler.....	16
Şekil 2.9. Aktif dengeleme sistemleri.....	17
Şekil 2.10. Anahtarlamaalı kondansatör yöntemi.....	18
Şekil 2.11. Çift katmanlı anahtarlamaalı kondansatör yöntemi.....	19
Şekil 2.12. Hücreden hücreye tek endüktans yöntemi ile dengeleme.....	20
Şekil 2.13. Batarya paketinden hücreye tek endüktans yöntemi ile dengeleme.....	20
Şekil 2.14. Çok katmanlı endüktans yöntemi.....	21
Şekil 2.15. Zincir yapılı endüktans yöntemi.....	22
Şekil 2.16. Cuk dönüştürücü yöntemi.....	23
Şekil 2.17. Buck-boost dönüştürücü yöntemi.....	23
Şekil 2.18. Tam köprü dönüştürücü yöntemi.....	24
Şekil 2.19. Yarı rezonans yöntemi.....	25
Şekil 2.20. Flyback dönüştürücü.....	26
Şekil 2.21. Rint batarya modeli.....	28
Şekil 2.22. Thevenin batarya modeli	28
Şekil 2.23. PNGV batarya modeli.....	29
Şekil 2.24. Çok sıralı batarya modeli.....	29

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Aktif batarya dengeleme sistemi blok diyagramı.....	34
Şekil 3.2.Temel flyback dönüştürücü devresi.....	36
Şekil 3.3. PWM sinyali.....	36
Şekil 3.4. Primer ve sekonder gerilim ve akım grafikleri.....	37
Şekil 3.5. Sürekli akım (CCM) modu.....	38
Şekil 3.6. Süreksiz akım (DCM) modu.....	38
Şekil 3.7. Çift yönlü flyback dönüştürücü devresi.....	39
Şekil 3.8. Simülasyon devresi.....	42
Şekil 3.9. Simülasyon akım grafikleri.....	42
Şekil 3.10.Hücre deşarj yönü verim grafiği.....	44
Şekil 3.11. Hücre şarj yönü verim grafiği.....	45
Şekil 3.12. Hücre kartı devre çizimi.....	47
Şekil 3.13. Kullanılan DC-DC dönüştürücü devre şeması.....	51
Şekil 3.14. Ana kontrol kartı devre çizimi.....	53
Şekil 3.15. ACS712 akım sensörü devre şeması	55
Şekil 3.16. Ana kontrol kartı ve hücre kartı algoritma yapısı.....	57
Şekil 3.17. Bulanık mantık kontrol yapısının blok diyagramı	58
Şekil 3.18. Hata üyelik fonksiyonu.....	59
Şekil 3.19. Hatanın değişim üyelik fonksiyonu.....	59
Şekil 3.20. Çıkış üyelik fonksiyonu.....	59
Şekil 3.21. Ana kontrol kartı CAN mesaj yapısı.....	61
Şekil 3.22. Hücre kartı CAN mesaj yapısı.....	61
Şekil 3.23. Kullanılan batarya modeli.....	61
Şekil 3.24. Darbeli deşarj deneyi algoritması.....	62

Şekil	Sayfa
Şekil 3.25. Darbeli deşarj deneyi bir döngü.....	63
Şekil 3.26. Elektronik yük devresi.....	64
Şekil 3.27. Darbeli deşarj deney düzeneği.....	64
Şekil 3.28. Darbeli deşarj deneyi batarya gerilimi.....	65
Şekil 3.29. Voc değerinin kullanılan kapasitesine bağlı değişimi.....	65
Şekil 4.1. 1 A akım ile dengeleme devresi olmadan şarj-deşarj döngüsü.....	68
Şekil 4.2. 1,75 A akım ile dengeleme devresi olmadan şarj.deşarj döngüsü.....	68
Şekil 4.3. 0,20A referans akım değeri ile şarj durumunda aktif dengeleme.....	70
Şekil 4.4. 0,35A referans akım değeri ile şarj durumunda aktif dengeleme.....	70
Şekil 4.5. 0,50A referans akım değeri ile şarj durumunda aktif dengeleme.....	71
Şekil 4.6. 0,20A referans akım değeri ile deşarj durumunda aktif dengeleme.....	72
Şekil 4.7. 0,35A referans akım değeri ile deşarj durumunda aktif dengeleme.....	73
Şekil 4.8. 0,50A referans akım değeri ile deşarj durumunda aktif dengeleme.....	73

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Aktif batarya dengeleme sistemi.....	35
Resim 3.2. Tasarlanan çift yönlü flyback devresi test düzeneği.....	43
Resim 3.3. Hücre deşarj yönü 0,582 doluluk oranı osiloskop ekran görüntüsü.....	45
Resim 3.4. Hücre şarj yönü 0,535 doluluk oranı osiloskop ekran görüntüsü.....	46
Resim 3.5. Hücre kartı baskı devresi.....	47
Resim 3.6. Hücre kartı devre montajı.....	48
Resim 3.7. 18650 2200 mAh lityum iyon batarya hücresi.....	48
Resim 3.8. STM32F103C8 mikro denetleyici kartı.....	49
Resim 3.9. Ana kontrol kartı baskı devresi.....	53
Resim 3.10. Ana kontrol kartı ve hücre kartları.....	54
Resim 3.11. 12V çift kanal röle.....	55
Resim 3.12. LCD TFT ekran.....	56

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Amper
A_{core}	Nüve kesit alanı
Ah	Amper saat
A_L	Endüktans faktörü
B	Akı yoğunluğu
C	Kapasite
D	Doluluk oranı
f	Frekans
H	Henry
hz	Hertz
I_{in}	Giriş akımı
I_{out}	Çıkış akımı
I_{p(peak)}	Primer tepe akımı
Kbyte	Kilo byte
kV	Kilo volt
L_p	Primer Endüktans
m²	Metrekare
mAh	Mili amper saat
Mhz	Mega hertz
mV	Mili volt
n	Sarım oranı
N_p	Primer sargı sarım oranı
N_s	Sekonder sargı sarım oranı
P_{in}	Giriş gücü
P_{out}	Çıkış gücü
T	Periyot

Simgeler**Açıklamalar**

T	Tesla
t_{off}	Yalıtım süresi
t_{on}	İletim süresi
V	Volt
V_{in}	Giriş gerilimi
V_{out}	Çıkış gerilimi
V_{OC}	Açık devre gerilimi
W	Watt

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AC	Alternatif akım
ADC	Analogtan dijital dönüşürücü
BYS	Batarya yönetim sistemi
CAN	Denetleyici alan ağı
CC	Coulomb sayma
CCM	Sürekli akım modu
DC	Doğru akım
DCM	Sürekli akım modu
DMA	Doğrudan bellek erişimi
EKF	Genişletilmiş kalman filtre
KF	Kalman filtre
MOSFET	Metal oksit yarıiletken alan etkili transistör
NN	Sinir ağı
OCV	Açık devre gerilimi
PNGV	Yeni nesil araçlar için ortaklık
PWM	Darbe genişlik modülasyonu
SOC	Şarj durumu

1. GİRİŞ

Artan nüfusa bağlı olarak ulaşım sistemlerine duyulan ihtiyacın gün geçtikçe artması, fosil yakıtların tükenmesi, sera gazı artışları, petrol fiyatlarının elektrik fiyatına göre yüksek olması nedeniyle hibrit ve tam elektrikli araçlara talep artmaktadır. Hibrit ve elektrikli araç sayılarının artması enerji kaynağı olarak bataryalara olan ihtiyacı da artırmaktadır. Elektrik motorunun tahrik edilebilmesi için gerekli enerji batarya paketinden sağlanır. Batarya paketi, batarya hücrelerinin seri ve paralel bağlanması ile oluşmaktadır. Elektrikli araçlarda bataryalar aracın temel enerjisini sağlaması ve yüksek maliyetlere sahip olmasından dolayı araçtaki önemli parçalardan biridir. Bu nedenle bataryaların kontrollü bir şekilde çalışması gerekmektedir. Şarj ve deşarj döngüsü yapan bataryalar bir batarya yönetim sistemi tarafından kontrol edilmektedir. Batarya paketini oluşturan hücreler eşit kapasiteli ve aynı kimyasal yapıda olmasına karşın üretim toleransları ve hücre iç direnç değerlerinden kaynaklanan yapısal farklılıklar söz konusudur. Buna ek olarak hücrelerin şarj ve deşarj döngüleri esnasında da çalışma farklılıkları söz konusudur. Oluşan bu farklılıklardan dolayı bataryalar eşit seviyede şarj ve deşarj olamaz. Bu durum bataryanın tam kapasite kullanılmasını engellemektedir. Eşit seviyede şarj ve deşarj olamayan batarya hücrelerinden şarj edilirken bazı hücreler maksimum şarj seviyesine, deşarj edilirken bazı hücreler minimum deşarj seviyesine daha erken ulaşmaktadır. Bataryaların dengeli bir şekilde kullanılması, ömürlerini, performanslarını, verimlerini ve güvenliklerini etkilediği için batarya yönetim sistemlerine (Battery Management Systems - BMS) ihtiyaç vardır.

Batarya yönetim sistemleri (BYS), batarya paketinin şarj, deşarj döngülerinde paket içerisindeki hücrelerin eşit miktarda kullanılmasını sağlamakta, akım, gerilim, sıcaklık değerlerini kontrol ederek bu değerleri normal çalışma aralığında tutmaktadır. Batarya yönetim sistemi batarya paketindeki hücrelerin şarj ve deşarj esnasında şarj seviyelerinin eşit tutulmasını dengeleme sistemleri ile sağlamaktadır. Dengeleme sistemleri pasif ve aktif olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Pasif dengeleme sabit direnç ve anahtarlamalı direnç olarak iki gruba ayrılmaktadır. Pasif dengelemenin temel çalışma prensibi, batarya paketi içerisindeki yüksek şarj seviyesine sahip olan hücrenin düşük şarj seviyesine sahip olan hücrenin seviyesine gelineye kadar deşarj edilmesidir. Pasif dengeleme sistemleri ucuz ve basit olmasına rağmen düşük enerji verimliliği ve dengeleme süresinin uzun olmasından dolayı cazip değildir. Aktif dengeleme sistemleri kondansatör, endüktans (transformatör) ve dönüştürücü esaslı olarak üç gruba ayrılmaktadır. Aktif

dengelemenin temel çalışma prensibi ise batarya paketi içerisindeki yüksek şarj seviyesine sahip hücreden düşük şarj seviyesine sahip hücreye enerji aktarımı esasına dayanmaktadır.

Bu tez kapsamında elektrikli araçlar için genişletilmeye uygun prototip bir batarya yönetim sistemi tasarımı yapılmıştır. Geliştirilen batarya yönetim sisteminde dönüştürücü esaslı aktif batarya dengeleme sistemleri kullanılmıştır. Sistem donanım ve yazılım bileşenlerinden oluşmaktadır. Çalışmada 6 tane EEMB marka LIR18650 model 2200 mAh kapasiteli lityum iyon hücre kullanılmıştır, bununla birlikte yapılan sistem farklı batarya türleri için de uygulanabilir yapıdadır. Tasarlanan sistem bir ana kontrol kartı ve hücre kartlarından oluşmaktadır. Ana kontrol kartı ve hücre kartları arasındaki veri alışverişi CAN haberleşme sistemi ile sağlanmaktadır. Hücre kartları üzerinde aktif dengelemenin bir çeşidi olan çift yönlü flyback dönüştürücü yer almaktadır. Hücreler üzerinde bulunan hücre kartları enerjisini kendi batarya hücresinden almaktadır. Her hücrenin gerilim, akım, SOC bilgileri CAN haberleşme ile ana kontrol kartına gönderilmektedir. Ana kontrol kartı gelen bilgiyi değerlendirerek her hücre için ayrı ayrı şarj ve deşarj kontrolü yapmaktadır. Hücrelerin dengeleme sistem kontrolünde bulanık mantık yöntemi kullanılmaktadır. Hücrelerin SOC değeri eş değer devre modeli kullanılarak, coulomb sayma yöntemi ile belirlenmiştir.

BYS bataryaların kontrollü bir şekilde şarj ve deşarj döngülerinde kullanılabilmesi için tasarlanan donanım ve yazılım bütünüdür. Bataryaların gerilim, akım, sıcaklık ve SOC bilgilerinin nominal çalışma değerleri arasında kullanılmalarını sağlayan sistemdir. Şarj ve deşarj döngülerini kontrol ederek aşırı şarj ve deşarjdan korur. Batarya paketindeki hücreler arasında oluşan kapasite farklılıklarını gidermek için dengeleme işlemi yapar. Günümüzde elektrikli araçlar için BYS üzerine birçok çalışma yapılmaktadır.

Çoruh ve arkadaşları tarafından flyback dönüştürücü tasarımı yapılmıştır. Geliştirilen flyback dönüştürücünün benzetimi yapılarak sistemin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada flyback dönüştürücünün tasarımı için gerekli matematiksel hesaplar verilmiştir. Flyback dönüştürücünün sürekli ve süreksiz akım modlarının hangisinde çalışacağını transformatörün mıknatıslanma endüktansı ve yük akımı belirler. Çalışma sonucunda tasarlanan dönüştürücü ile simülasyon sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğunu göstermişlerdir [1].

Daowd ve arkadaşları batarya hücreleri için dengeleme sisteminin öneminden bahsetmişlerdir. Dengeleme topolojilerinin MATLAB Simulink'te benzetimini yaparak dengeleme topolojilerinin hızı, kontrol karmaşıklığı, maliyeti, boyutu ve verimliliği açısından değerlendirmişlerdir. Dengeleme topolojilerinden pasif dengeleme sistemlerinde enerjinin boşa kullanıldığı ve bu nedenle aktif dengeleme sistemlerine göre verimsiz olduğunu belirtmişlerdir. Simülasyonu yapılan topolojilerin maliyet, boyut ve kontrol yapılarına göre birbirlerinden farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir, Çalışmada ele alınan topolojilerin avantajları ve dezavantajları ortaya konulmuştur [2].

Karadeniz ve arkadaşları tarafından aktif dengeleme sistemlerinden hareketli kondansatör yönteminin MATLAB Simulink'te benzetimini yapmışlardır. Farklı SOC değerine sahip 4 hücre için dengeleme sistemini başlatmışlardır. İlk başta en yüksek hücre ile en düşük hücre arasında %6 fark olan SOC değeri dengeleme sonunda %0,65 SOC değerine düşmüştür. Sonuçlara göre aktif dengelemenin pasif dengelemeye göre daha verimli bir sistem olduğunu açıklamışlardır [3].

Nafiz ve arkadaşları tarafından şarj dengeleme sistemleri için çift yönlü bir flyback dönüştürücü devresi yapılmıştır. Çalışmada geliştirilen flyback dönüştürücünün verimi %75,07 olarak kaydedilmiştir. Bu çalışmada bataryalar için dengeleme sistemlerinin önemi vurgulanmış, flyback topolojisinin uygulanabilirliği deneysel sonuçlarla gösterilmiştir [4].

Lin ve arkadaşları tarafından seri bağlı dört lityum demir fosfat hücre için modüler sisteme sahip çift yönlü flyback dönüştürücü ile aktif dengeleme çalışması gerçekleştirilmiştir. 4 hücre birbirine seri bağlanarak, her hücreye bir flyback dönüştürücü kullanılmış ve bu devrenin çıkış ucu birbirine paralel bağlanarak bir kondansatör eklenmiştir. Hücreler dengelemeye başladığında hücreler arası enerji transferi kondansatör üzerinden sağlanmıştır. Dengeleme sisteminde bataryaların ortalama gerilimi hesaplanmış ve hücreler bu değere gelinceye kadar dengeleme devam ettirilmiştir. Çalışmanın sonuçlarında maksimum hücre ile minimum hücre arasında 501 mV'luk bir fark varken dengeleme yapılarak bu fark 22 mV seviyesine indirilmiştir. Sonuçlara göre dengeleme başarılı bir şekilde yapılmıştır [5].

Saleh ve arkadaşları tarafından aktif dengeleme sistemlerinden çift yönlü flyback dönüştürücü devresi ve kontrol yönteminin benzetimi yapılmıştır. Çalışma MATLAB

Simulink'te gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre hem şarj hem de deşarj döngüsünde etkili bir dengeleme olduğunu grafiklerle sunmuşlardır [6].

Santos ve arkadaşları tarafından lityum iyon hücrelerin batarya parametrelerini elde ederek SOC'nin hesabı yapılmıştır. Darbeli deşarj deneyi ile batarya parametrelerinin nasıl elde edildiğini açıklayarak simülasyon sonuçlarını sunmuşlardır. Elde edilen sonuçları SOC hesabında kullanmışlardır [7].

Baccouche ve arkadaşları coulomb sayma algoritmasına dayalı açık devre gerilimi yöntemi (OCV) ile lityum iyon hücrelerin SOC tahmin doğruluğunu artırmak için bir çalışma sunmuşlardır. Deneysel çalışmaları ile teorik çalışmalarının uyumlu olduğunu ve bunlar arasındaki farkın %2'e yakın bir değer olduğunu belirtmişlerdir [8].

Yaren ve arkadaşları tarafından flyback dönüştürücü devrenin STM32F4 mikro denetleyici geliştirme kartı ile kontrolü yapılmıştır. Flyback dönüştürücü kontrolünde primer taraf algılama tekniğini kullanmışlardır. Flyback dönüştürücü tasarım ve analizi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ile sistemin uygulanabilirliğini ve STM32F4 kitinin güç elektroniği alanında da kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır [9].

Haizhou tarafından lityum iyon pilin elektrokimyasal modelini birinci ve ikinci dereceden RC devresi ile analizi yapılmıştır. Hücrenin gerilim, akım, sıcaklık, SOC şarj ve deşarj karakteristiklerini sunmuştur. Elektrokimyasal model sonuçları doğrultusunda bir lityum iyon hücrenin SOC hesabının yapılabileceğini göstermiştir [10].

Narayanaswamy ve arkadaşları tarafından flyback dönüştürücü tabanlı bir aktif dengeleme sistemi yapılmıştır. Önerilen flyback dönüştürücü her bir batarya hücresi için bir modül olacak şekilde tasarlanmıştır. Aktif dengeleme için gerekli yüksek frekans devredeki MOSFET'ler aracılığı ile her hücreye ayrı olarak sağlanmış ve dengeleme verimli bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın diğer benzer çalışmalara göre donanımında, kontrol karmaşıklığında ve veriminde iyileşmeler sağlanmıştır. Dönüştürücünün bireysel dengeleme döngüsünde %14,5, sistem veriminde %12,3 verim sağlanmıştır [11].

Sarı Kurt ve Balıkcı tarafından elektrikli araçlarda kullanılmak üzere enerji yönetimi için bir çift yönlü DC-DC dönüştürücü devresi tasarlanmıştır. Tasarladıkları bu enerji yönetim

sistemini LTO ve NMC hücreler kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Önerdikleri sistem bataryalar için aktif dengeleme yapmaktadır. Yaptıkları çalışma sonucunda sistemin bataryalarının çalışma süresinin iki kat artırdığını belirtmişlerdir [12].

Tian ve arkadaşları tarafından optimize edilmiş flyback dönüştürücü devre tasarımı yapılmıştır. Dönüştürücü temelli aktif dengeleme yönteminin pilleri daha hızlı ve daha az enerji kaybıyla dengelediğini açıklamışlardır. Yaptıkları dengeleme devresine ait analiz sonuçlarında devrenin doğrultucu devresini optimize ederek sistem verimini artırmışlardır. 6 lityum iyon pil kullanılarak yapılan deneyde sistemin uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir [13].

Karabeyoğlu ve arkadaşları tarafından lityum iyon hücreler için artıran azaltan dönüştürücü tabanlı bir aktif dengeleme sistemi ve dengeleme işlemini kontrol eden bir algoritma yapılmıştır. Aktif dengeleme sistemi için hücrelerin eş değer devre analizi yapılmıştır. Önerilen sistem iki lityum iyon hücre için farklı çalışma durumlarında benzetimi yapılmış ve MATLAB Simülink sonuçları verilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda iki hücre düşük yükte 147 saniyede, yüksek yükte 127 saniyede dengeye ulaşmıştır [14]

Banarjee ve arkadaşları tarafından çok sargılı flyback dönüştürücü topolojisi kullanarak lityum iyon hücrelerin şarj dengelemesi için aktif dengeleme devresi yapılmıştır. Önerilen dengeleme devresinde seri bağlı n hücre için $n+1$ tane aktif dengeleme devresi kullanılmıştır. Çalışma farklı SOC değerindeki 4 hücre için benzetimi yapılarak doğrulanmıştır. Benzetim sonuçları test sonuçları ile uyumludur [15].

Dange ve arkadaşları tarafından yönetim sistemi (BYS) tasarlanmıştır. Tasarlanan BYS ile hücre gerilim, akım, sıcaklık kontrolü, aktif dengeleme, termal yönetim ve bataryaların güvenli çalışması için bir algoritma geliştirmişlerdir. Batarya paketinin kontrolü için gerekli SOC hesabını coulomb sayma yöntemini kullanarak bir eş değer devre modeli üzerinden yapmışlardır. Hücre dengeleme sistemi için endüktans esaslı dengeleme sistemini kullanmışlardır [16].

Omariba ve arkadaşları birçok batarya dengeleme sistemlerini gözden geçirmişlerdir. Batarya hücrelerinin aynı fiziksel boyut ve kimya yapısına sahip olmasına karşın üretim

farklılıkları, farklı iç direnç değerleri ile hücreler aynı kapasiteye sahip olamaz. Bu farklılıklardan dolayı hücrelerin şarj ve deşarj döngüsünde şarj seviyeleri eşit olmadığından hücrenin kullanım kapasitesinde ve kullanım ömründe azalmalara sebep olur. Batarya paketinin performansı hücrelerin kapasitesini ve kullanım ömrünü artırmak ile bağlantılıdır. Bu nedenle batarya paketlerinde BYS'nin ve dengeleme sistemlerinin zorunlu olduğunu vurgulamışlardır [17].

Kurpiel ve arkadaşları 8 seri bağlı 10 Ah lityum demir fosfat hücrelerden oluşan bir batarya paketi için pasif ve aktif dengelemeye ilişkin araştırma ve test yapmışlardır. Aktif dengeleme için birçok metot olup bunlardan en avantajlı olanın paketten hücreye olan yöntem olduğu ile ilgili bir test ve simülasyon çalışması yapmışlardır. Yaptıkları bu yöntem ile aktif dengeleme sonucunda bataryaların deşarjda kullanım süresini ve ömrünün arttığını açıklamışlardır [18].

Conway tarafından 16 seri 2 paralel koldan oluşan 20 Ah lityum demir fosfat hücreler ile bir flyback aktif dengeleme yapılmıştır. Yapılan çalışmada her hücreye bir flyback devresi bağlanmıştır. Dengeleme sistemi en yüksek SOC değerine sahip hücre ile en düşük SOC değerine sahip hücre arasındaki farka göre çalışmaktadır. Dengeleme süresince sürekli hücrelerin gerilim ölçümü yapılmıştır. Çalışma sonucunda tam izolasyon sağlanarak hücrelerin gerilim izlemesi ve aktif dengelemesi yapılmıştır [19].

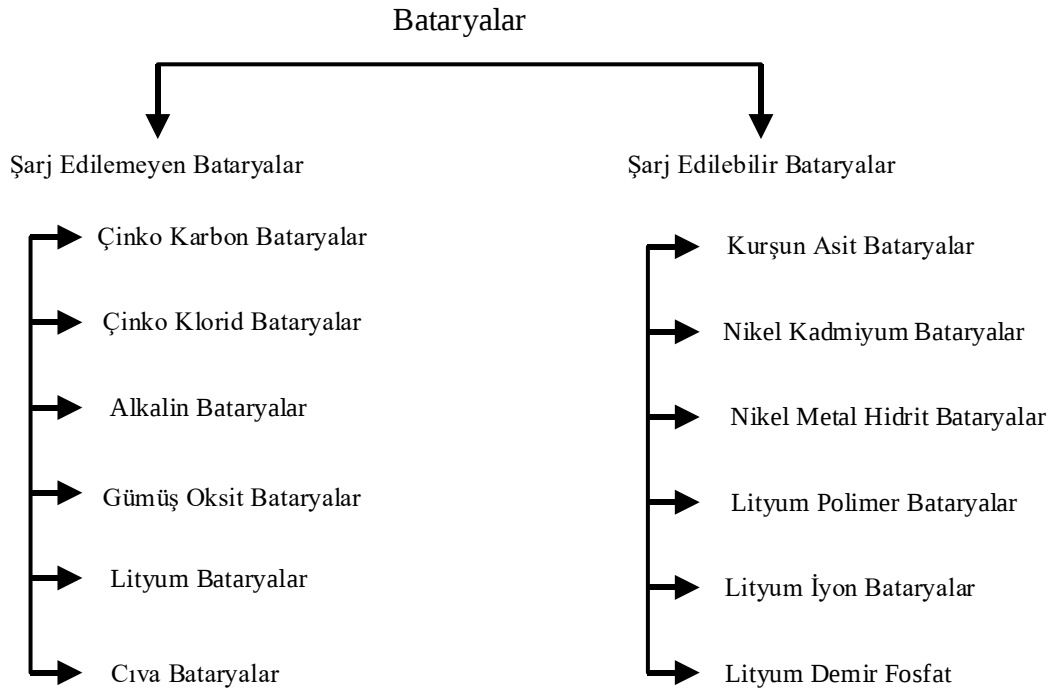
Ziegler ve arkadaşları tarafından hücreler üzerinde pasif ve aktif dengelemenin arasındaki kapasite ve kullanım ömrü olarak değerlendirme yapmışlardır. Yaptıkları çalışmaya göre aktif dengeleme pasif dengelemeye göre kapasite kullanımının %3,1, kullanım ömrünün %7,7 oranında daha fazla olduğunu test etmişlerdir. Çalışma sonucunda aktif dengelemenin batarya hücrelerinin yaşlanma oranını azaltabildiği ve daha iyi kullanım sağlayabildiğini açıklamışlardır [20].

Şahin ve Kılınç tarafından batarya aktif dengeleme sisteminde kullanılması için çift yönlü flyback dönüştürücü devre tasarımı yapılmıştır. Çalışmada batarya hücreleri hem şarj hem de deşarj yönünde kullanılmaktadır. Yapılan flyback dönüştürücünün verimi test sonuçlarına göre hücre şarj yönünde %67,84, hücre deşarj yönünde %66,02 olarak kaydedilmiştir. Yapılan simülasyon ve test sonuçlarına göre sistemin uygulanabilir olduğu görülmüştür [21].

Literatürde de görüldüğü üzere flyback dengeleme sistemi BYS çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu çalışmada çift yönlü flyback dönüştürücü dengeleme sisteminin yanında kontrol yöntemi olarak bulanık mantık kullanılmıştır. Bu çalışmada elektrikli araçlar için prototip, CAN haberleşme ile veri alışverişi sağlayan, bulanık mantık kontrollü bir BYS tasarlanmıştır. Tasarlanan batarya yönetim sisteminde dönüştürücü esaslı aktif batarya dengeleme sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen dengeleme sistemi bulanık mantık ile kontrolü sağlanmıştır. Batarya hücrelerinin SOC hesabı ile batarya kapasitesi belirlenmiştir. Batarya hücrelerinin gerilim, akım ve SOC değerleri anlık olarak takip edilmiştir. Batarya hücre bilgileri CAN haberleşme ile ana kontrol kartına iletilmiştir.

2. BATARYALAR VE BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ

Günümüzde teknolojinin ilerlemesi, konfor seviyesinin artması ve mobilitenin kolaylaşması gibi sebeplerden dolayı taşınabilir enerji depolama sistemlerine olan ihtiyaç artmaktadır. Bu enerji depolama ihtiyacını karşılayabilmek için batarya sistemleri geliştirilmektedir. Bataryalar elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolamaktadır. Bataryanın bu enerjiyi depolayabilmesi içindeki elektrolit ve elektrot sayısı ile doğru orantılıdır ve bu bataryanın kapasitesini oluşturmaktadır. Batarya kapasitesi C , bataryanın nominal gerilimde sağlayabileceği elektrik yüküdür. Bataryanın kapasitesi amper saat (Ah) veya mili amper saat (mAh) olarak ifade edilir. Bataryalar şarj edilebilme ve şarj edilememe durumuna göre ikiye ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Şarj edilemeyen ve şarj edilebilen bataryalar

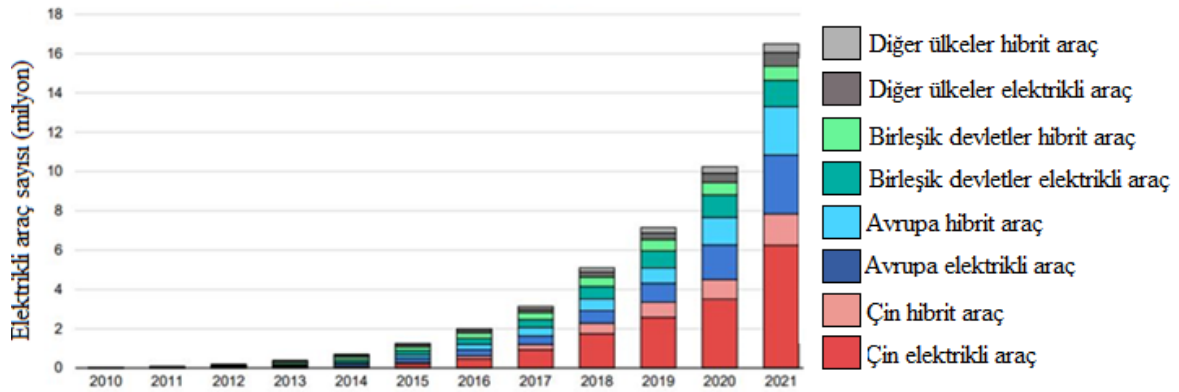
Şarj edilemeyen bataryalar kullandıktan sonra işlevlerini yitirirler. Enerji yoğunlukları düşüktür ancak uzun bekleme ömürleri olduğu için kullanım alanları geniştir. Şarj edilebilen bataryalar ise kullanıldıktan sonra tekrar tekrar şarj edilerek kullanılmaya devam edilebilen bataryalardır [22].

Kurşun asit bataryalar, en eski ve en çok bilinen şarj edilebilir bataryalardır. Uzun süre kullanılabilmesi, güvenli, maliyetinin az olması, kendi kendine deşarj oranının düşük, geniş bir çalışma sıcaklığı olması bu bataryaların yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır [23]. Bu bataryaların nominal gerilimleri ve enerji yoğunlukları düşük, şarj süreleri uzundur. Nikel kadmiyum bataryalar, kurşun asit bataryalara göre daha fazla enerji yoğunluğuna sahiptir. Kendi kendine deşarj oranlarının yüksek olması, hafıza etkilerinin olması, düşük sıcaklıklarda çalışma verimlerinin az olması bu bataryaların başlıca dezavantajlarıdır [24]. Nikel metal hidrit bataryalar, nikel kadmiyum bataryalarla nominal gerilim değerleri eşittir ancak nikel kadmiyum bataryalara göre daha yüksek enerji yoğunlukları vardır [25]. Lityum iyon bataryalar, kullanım alanları oldukça yaygındır. Nikel tabanlı bataryalara göre daha yüksek nominal gerilime, enerji ve güç yoğunluğuna sahiptirler [4- 5]. Hafıza etkileri yoktur, kendi kendine deşarj oranları düşüktür. Dizüstü bilgisayarlar ve cep telefonları gibi birçok taşınabilir elektronik cihazda kullanılmaktadırlar. Lityum iyon polimer bataryalar, lityum iyon bataryaların temel özelliklerini taşırlar. Lityum iyon bataryalardan farkı, lityum iyon polimer bataryalarda polimer elektrolit bulunur. Polimer elektrolit malzemenin elektrik iletkenliği yüksektir. Elektrik iletkenliği yüksek olmasına rağmen lityum iyon bataryalara göre daha az enerji yoğunluğuna sahiptirler. Lityum demir fosfat bataryalar, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek çevrim ömrüne sahiptirler ancak lityum iyon bataryalara göre enerji yoğunlukları düşüktür. Şarj edilebilir bataryalara ait nominal gerilim, enerji yoğunlukları, çevrim ömrü, kendi kendine deşarj oranı, hafıza etkisi ve çalışma sıcaklık aralıklarına ait bilgiler Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Şarj edilebilir bataryaların özellikleri [25]

	Nominal voltaj (V)	Enerji yoğunlukları (Wh/kg)	Çevrim ömrü	Kendi kendine deşarjı (% her ay)	Hafıza etkisi	Çalışma sıcaklığı (°C)
Kurşun asit	2	35	1000	<5	Yok	60
Nikel kadmiyum	1,2	50.80	2000	10	Var	250-300
Nikel metal hidrit	1,2	70.95	<3000	20	Az	200-250
Lityum polimer	3,7	130.225	>1200	<5	Yok	150
Lityum iyon	3,6	118.250	2000	<5	Yok	150
Lityum demir fosfat	3,2	120	>2000	<5	Yok	350

Günlük hayatımızda bataryaların kullanım alanları oldukça yaygındır. Bataryaların kullanım alanlarından biri de elektrikli araçlardır. Elektrikli araçlarda gerekli tahrik kuvveti batarya paketinden sağlanmaktadır. Elektrikli araçlar hakkında menzile, şarj süresi, pil ömrü, şarj altyapısı, enerji maliyeti fiyatları ve güvenilirlik gibi nedenlerden dolayı bir ön yargı söz konusu olsa da dünyada elektrikli araç üretim ve satışlarında bir artış görülmektedir. Elektrikli araç satışları 2021’de bir önceki yıla göre ikiye katlanarak yaklaşık 6,6 milyonluk bir değere ulaştı [26]. 2021’de dünyada otomobil satışlarının yaklaşık %10’unu elektrikli araçlar oluşturdu ve 2022’de bu sayılar önemli bir şekilde yükselmektedir [26]. Şekil 2.2’de 2010 yılından 2021 yılına kadar dünyadaki elektrikli araç sayısı gösterilmiştir.



Şekil 2.2. 2010-2021 yılları arası dünyadaki elektrikli araç sayısı [27]

Türkiye’de elektrikli araç satış sayısı 2013 yılına kadar 184 seviyesinde iken 2022 mayıs ayında bu sayı 6333 adete ulaşmıştır [27]. 2013’ten Mayıs 2022 yılına kadar ülkemizde elektrikli araç satış ve toplam satış sayıları Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Türkiye’de 2013’ten 2022 mayıs ayına kadar olan elektrikli araç satış adedi ve toplam satış sayıları [27]

YIL	SATIŞ ADEDİ	TOPLAM SATIŞ
2013’e kadar	184	184
2013	31	215
2014	47	262
2015	120	382
2016	44	426
2017	76	502

Çizelge 2.2. (devam) Türkiye’de 2013’ten 2022 mayıs ayına kadar olan elektrikli araç satış adedi ve toplam satış sayıları [27]

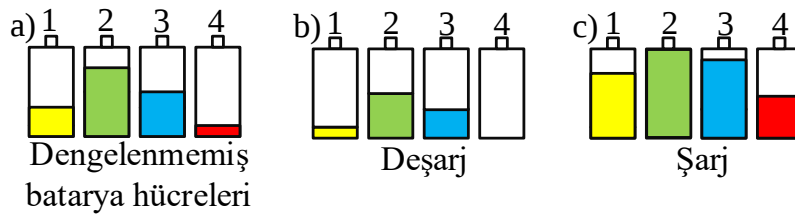
YIL	SATIŞ ADEDİ	TOPLAM SATIŞ
2018	155	657
2019	222	879
2020	844	1.723
2021	2.846	4.569
2022 Mayıs	1.764	6.333

2.1.Batarya Dengeleme Sistemleri

Aynı kimyasal yapı, boyut ve özdeş kapasiteli bataryaların bir araya gelmesi ile batarya paketi oluşmaktadır. Bataryalar, paketin kapasitesini artırmak için paralel, gerilimini artırmak için seri bağlanmaktadır. Batarya paketinin şarj ve deşarj döngülerinde sağlıklı ve güvenilir bir şekilde çalışması için batarya yönetim sistemleri kullanılmaktadır. Batarya yönetim sistemlerinin görevi, batarya paketinde bulunan hücrelerin nominal çalışma aralığında kalmasını sağlamak, bataryaların anlık şarj ve deşarj seviyelerini takip etmek, batarya hücrelerinin aşırı şarj ve aşırı deşarj olmasını engellemek, hücrelerin pasif veya aktif olarak dengelenmesini sağlamak, hücrelerin birbirleriyle ve diğer sistemlerle haberleşmesini sağlamak, batarya paketini çalışma sıcaklığını kontrol etmek, batarya paketinin ve hücrelerin kapasitesini tahmin etmek, çalışma aralığında olmayan durumlar için güvenlik sistemini devreye almak ve uyarı mesajları göndermek olarak sıralanabilir [28- 29].

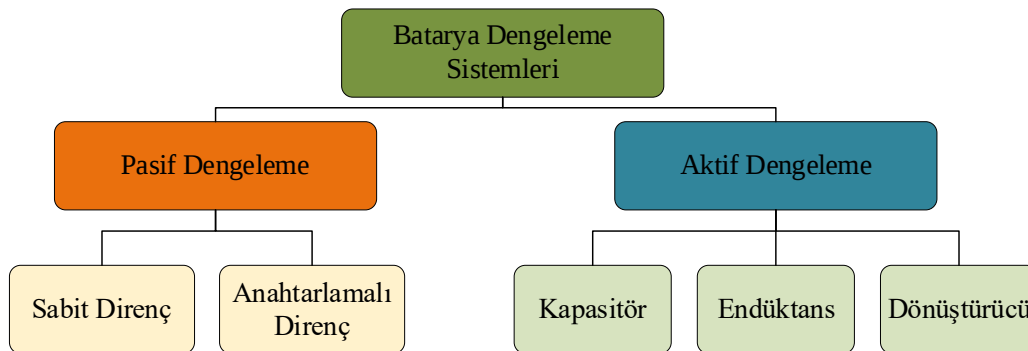
Batarya paketi özdeş pillerden oluşsa da bu pillerin üretim toleransları ve çalışma koşullarından kaynaklanan farklılıklar söz konusudur [9–12]. Bu farklılıklar hücrenin şarj ve deşarjda kullanımını etkilemektedir. Şarj durumunda bazı hücrelerin maksimum şarj seviyesine daha erken ulaştığı ve deşarj durumunda bazı hücrelerin minimum deşarj seviyesine daha erken ulaştığı görülmektedir [21]. Şekil 2.3.a’da dengeleme yapılmamış hücreler gösterilmiştir. Bu hücreler deşarja devam ederse 4 numaralı hücre Şekil 2.3.b’de gösterildiği gibi minimum deşarj seviyesine ulaşır. Deşarj işlemi devam ederse 4 numaralı hücre zarar görür. Dengelenmemiş batarya hücreleri şarja devam ederse 2 numaralı hücre Şekil 2.3.c’de gösterildiği gibi maksimum şarj seviyesine ulaşır. Şarj devam ederse 2 numaralı hücre zarar görür. Batarya paketinde şarj sonlandırma işlemi maksimum şarj

seviyesine ulaşan hücreye göre, deşarj sonlandırma işlemi minimum deşarj seviyesine ulaşan hücreye göre yapılır [4]. Bu durumda dengelenmemiş batarya hücrelerinin şarj işleminde 2 numaralı hücre maksimum şarj seviyesine ulaştığından dolayı şarj işlemi sonlanır. 1,3 ve 4 numaralı hücreler tam şarj olamaz. Dengelenmemiş batarya hücreleri deşarj işleminde 4 numaralı hücre minimum deşarj seviyesine ulaştığından dolayı deşarj işlemi sonlanır. 1,2 ve 3 numaralı hücreler deşarj işleminde tam olarak kullanılamaz. Hücrelerin bu durumda olması batarya paketinin toplam kapasitesinin tamamıyla kullanılamamasına yol açar [32].



Şekil 2.3. Dengeleme yapılmamış hücrelerin şarj ve deşarj durumu

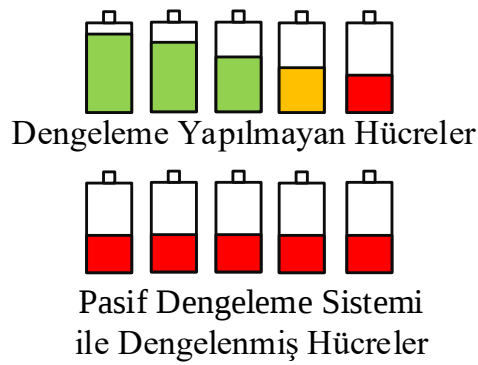
Bu sorunun çözümü için batarya dengeleme sistemlerine ihtiyaç vardır. Batarya dengeleme sistemlerinin pasif dengeleme ve aktif dengeleme olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır [33]. Pasif dengeleme kendi içinde sabit ve anahtarlama direnç olarak iki gruba ayrılırken, aktif dengeleme kondansatör, endüktans (transformatör) ve dönüştürücü esaslı olarak üç gruba ve bunlarda kendi içlerinde farklı gruplara ayrılmaktadır. Batarya dengeleme sistemleri dengeleme sistemlerinin türleri Şekil 2.4'te batarya gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Batarya dengeleme sistemleri

2.1.1. Pasif dengeleme

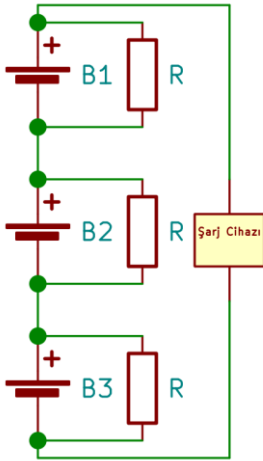
Pasif dengelemede şarj seviyesi yüksek olan hücrelerdeki fazla enerji bir direnç yardımıyla ısıya dönüştürülmektedir [16–19]. Pasif dengeleme sadece şarj işleminde kullanılmaktadır. Basit yapıda olması, ucuz olması ve kontrolünün kolay olması avantajları arasında sıralanabilir bununla birlikte dengeleme sırasında enerjiyi boşa harcaması verimin düşmesine ve şarj süresini uzamasına neden olmaktadır [2], [36]. Şekil 2.5’ de pasif dengeleme yapmış hücreler gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Pasif dengeleme yapmış hücreler

Sabit direnç yöntemi

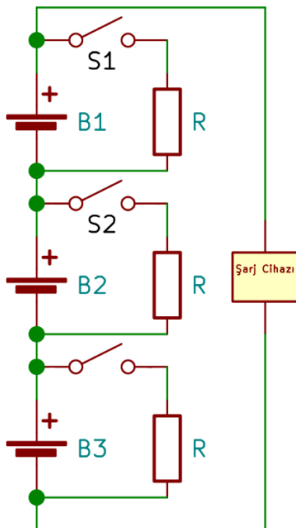
Sabit direnç ile dengeleme yöntemi kullanılan en basit dengeleme yöntemidir. Her hücreye paralel bağlı dirençler üzerinden geçen sürekli bir akım vardır. Bu akım hücrelerin terminal gerilimleriyle orantılı olduğu için herhangi bir kontrol sistemi olmadan dengeleme yapılır. Uygulaması çok kolay ve çok ucuzdur ancak dengeleme hızı düşüktür. Şekil 2.6’da devre yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Sabit direnç yöntemi

Anahtarlama direnç yöntemi

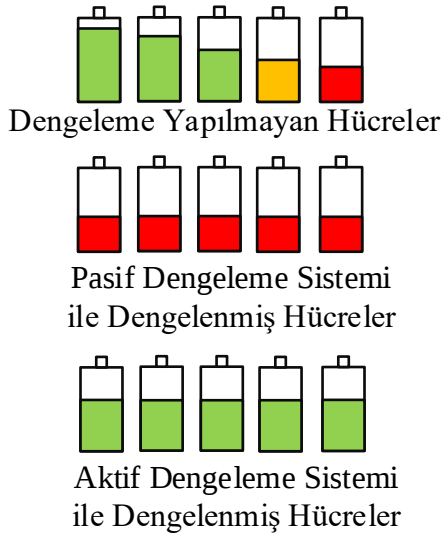
Anahtarlama direnç ile dengeleme yönteminde her hücreye bağlı dirençlere ek olarak birer anahtar bulunur. Şarj işlemi başladığında şarj olan hücreye bağlı anahtar açılacak ve direnç üzerinden bir dengeleme akımı geçmeye başlayacaktır [34]. Bu hücre aşırı şarja karşı korunmuş olur. Kullanılan en yaygın yöntemdir. Şekil 2.7’de devre yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Anahtarlama direnç yöntemi

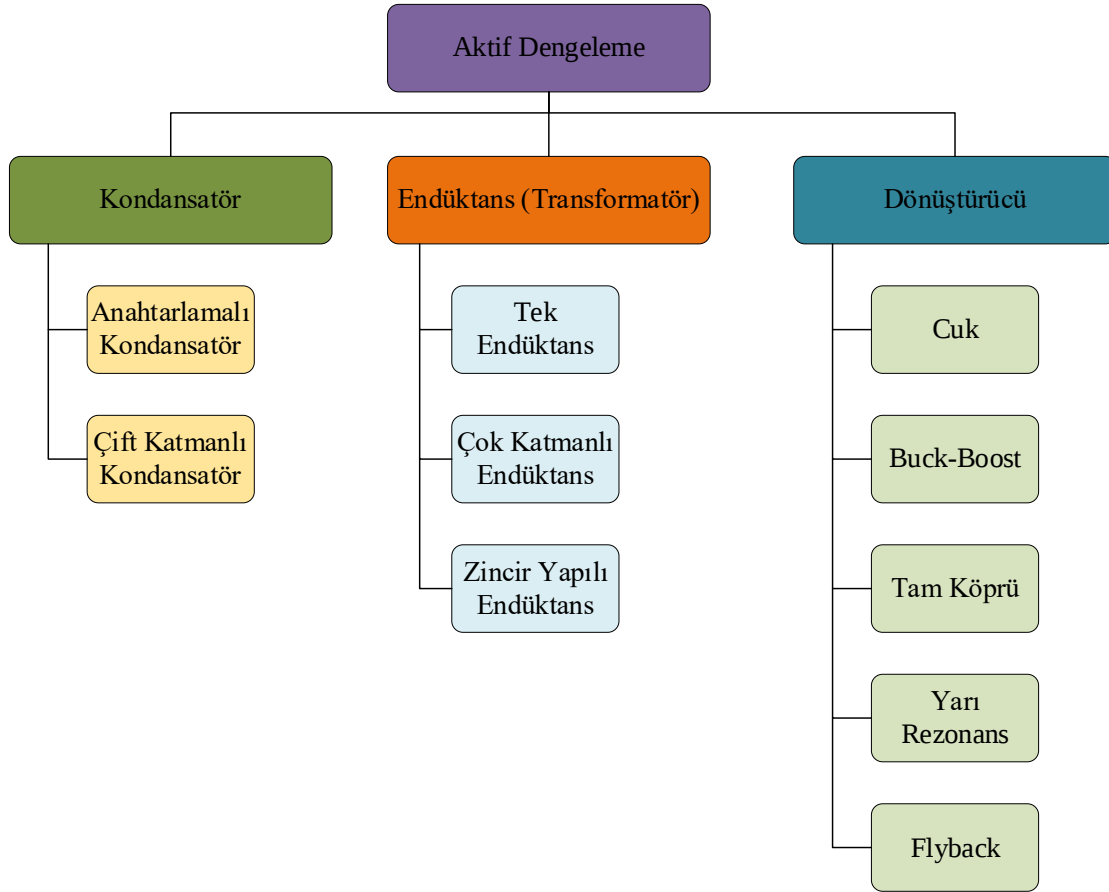
2.1.2. Aktif dengeleme

Aktif dengeleme batarya hücreleri için en iyi dengeleme yöntemidir. Aktif dengeleme şarj seviyesi yüksek olan hücrelerden şarj seviyesi düşük olan hücelere enerji aktarımı ile yapılmaktadır [18,20]. Bu yöntem ile batarya hücresinin kapasite kullanımı, şarj ve sağlık durumu yükseltilmektedir. Aynı zamanda şarj süresini kısaltılmaktadır [38]. Bu sistem hem şarj hem de deşarj evresinde kullanılmaktadır. Pasif dengeleme sistemine göre daha verimli, kontrol edilebilir olduğu için daha güvenli, dengeleme süresi daha kısadır. Şekil 2.8’de pasif ve aktif dengeleme yapan hücreler arasındaki farklılık gösterilmiştir. Burada dengeleme yapılmayan hücreler pasif dengeleme sistemleri kullanıldığında hücreler şarj seviyesi en düşük hücrenin seviyesine gelinceye kadar deşarj edilerek dengeye getirilmektedir. Dengeleme yapılmayan hücreler aktif dengeleme sistemleri kullanıldığında yüksek şarj seviyesine sahip hücresinden diğer hücelere bir enerji aktarımı yapılarak dengeleme işlemi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.8. Pasif ve aktif dengeleme yapmış hücreler

Aktif dengeleme sistemleri kondansatör, endüktans (transformatör) ve dönüştürücü esaslı yöntemler kullanılarak üç şekilde yapılmaktadır. Bu yöntemlerde kendi içlerinde gruplara ayrılmaktadır. Şekil 2.9’da aktif dengeleme sistemleri gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Aktif dengeleme sistemleri

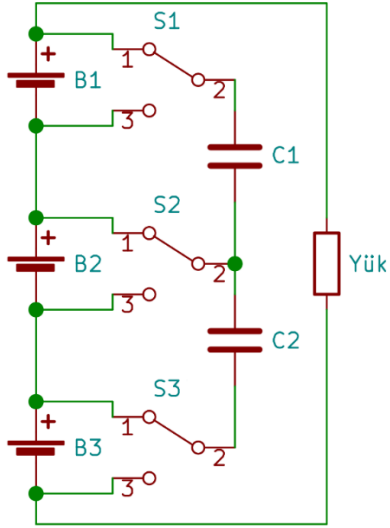
Kondansatör Esaslı Aktif Dengeleme

Kondansatör esaslı aktif dengelemede enerji transferi için hücrelere paralel bağlı kondansatörler bulunmaktadır. Kondansatör esaslı aktif dengelemenin kullanımı, kurulumu, kontrolü diğer aktif dengeleme yöntemlerine göre basittir ancak çoklu seri bağlı hücrelerde uzun devre yapısı olur ve bu nedenle dengeleme hızları düşer [39].

Anahtarlamaalı Kondansatör Yöntemi

Anahtarlamaalı kondansatör dengeleme yönteminin devre yapısı Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Bu yöntemde n hücre için $n-1$ tane kondansatör kullanılmaktadır [31]. Dengeleme işlemi etkinleştirildiğinde, tüm anahtarlara aynı PWM sinyalleri verilir ve tüm anahtarlar aynı frekansta açılır ve kapanır [39]. Her kondansatör yanındaki hücrelere bağlanmaktadır. Bu durum yüksek şarj seviyeli hücreden düşük şarj seviyeli hücreye aktarılan enerjiyi sağlamaktadır. Anahtarlamaalı kondansatör dengeleme yöntemi,

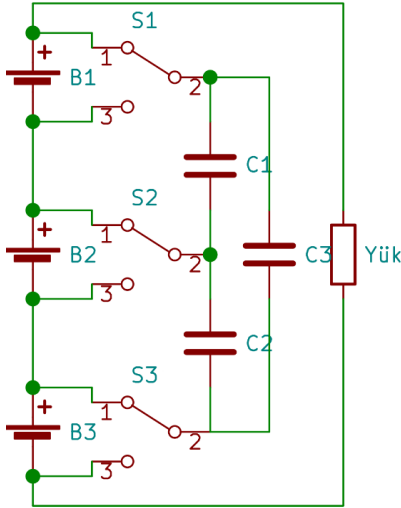
hücrelerin SOC bilgisine ihtiyaç duymayan çok kolay bir kontrol yöntemine sahiptir. Diğer aktif dengeleme sistemlerine göre dengeleme süresi oldukça uzundur. Maliyeti pasif dengelemeye göre yüksektir.



Şekil 2.10. Anahtarlama kondansatör yöntemi

Çift Katmanlı Anahtarlama Kondansatör Yöntemi

Çift katmanlı anahtarlama kondansatör dengeleme yöntemi iki kondansatör katmanına sahiptir [40]. Şekil 2.11’de devre yapısında görüldüğü gibi C_1 ve C_2 birinci kondansatör katmanını, C_3 ikinci kondansatör katmanıdır. Çift katman olmasının avantajı B_1 ve B_3 batarya hücreleri direkt olarak C_3 ile enerji aktarımı yapabilmektedir. Bu durum dengeleme hızını artırır, daha az enerji dönüşümü olur ancak daha fazla kondansatör kullanıldığı için devre boyutunu ve maliyetini artırır [41].



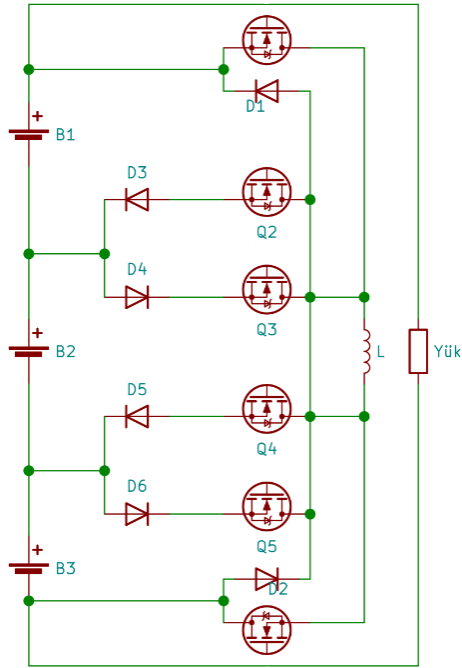
Şekil 2.11. Çift katmanlı anahtarlama kondansatör yöntemi

Endüktans (Transformatör) Esaslı Aktif Dengeleme

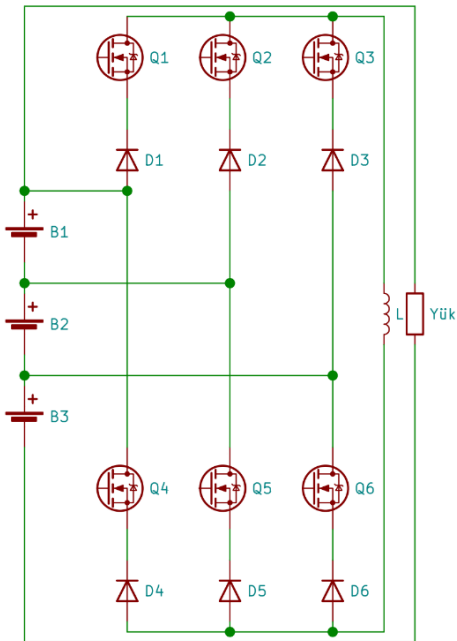
Endüktans (Transformatör) esaslı aktif dengelemede akım transformatörden geçen enerji burada depolanır ve depolanan enerjinin hücreler arası transferi ile dengeleme yapılır.

Tek Endüktans Yöntemi

Tek endüktans dengeleme yönteminde MOSFET'ler kontrol edilerek hücredeki fazla enerji endüktans ile aktırılmaktadır. Enerjinin aktarım yönüne göre hücreden hücreye ve batarya paketinden hücreye olmak üzere iki farklı yöntem ile dengeleme yapılmaktadır. Şekil 2.12'de hücreden hücreye tek endüktans yöntemi ile dengeleme devre yapısı gösterilmiştir. Şekil 2.13'te batarya paketinden hücreye tek endüktans yöntemi ile dengeleme devre yapısı gösterilmiştir. Bu dengeleme yönteminde sadece bir veya iki hücre dengelenebildiği için dengeleme hızı orta düzeydedir [42].



Şekil 2.12. Hücreden hücreye tek endüktans yöntemi ile dengeleme

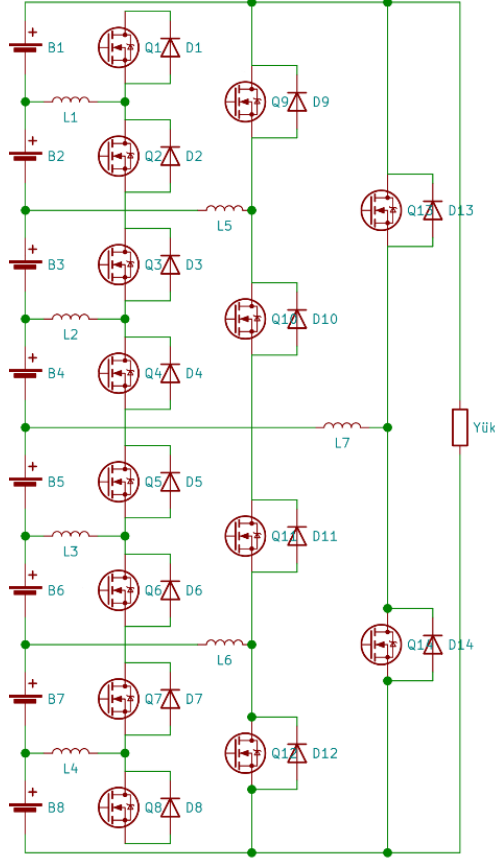


Şekil 2.13. Batarya paketinden hücreye tek endüktans yöntemi ile dengeleme

Çok Katmanlı Endüktans Yöntemi

Çok katmanlı endüktans dengeleme yöntemi hücreler arası enerji aktarımı için daha fazla yol sağlayarak dengeleme hızı artırılmaktadır. Seri olarak daha fazla hücre bağlanıldığında

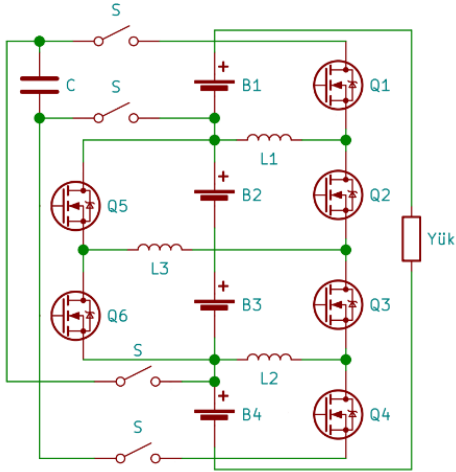
eleman sayısı fazladır [43]. Bu durum karmaşıklığı ve maliyeti artırmaktadır. Şekil 2.14'te devre yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Çok katmanlı endüktans yöntemi

Zincir Yapılı Endüktans Yöntemi

Zincir yapılı endüktans dengeleme yöntemi Şekil 2.15'de gösterilmiştir. Dengeleme hızını artırmak için ek bir kondansatör kullanılmaktadır [44]. MOSFET'ler kontrol edilerek endüktans aracılığı ile enerji aktarımı sağlanmaktadır. Devrenin iç uzunluk yapısı çok katmanlı endüktans yöntemine göre daha kısadır.



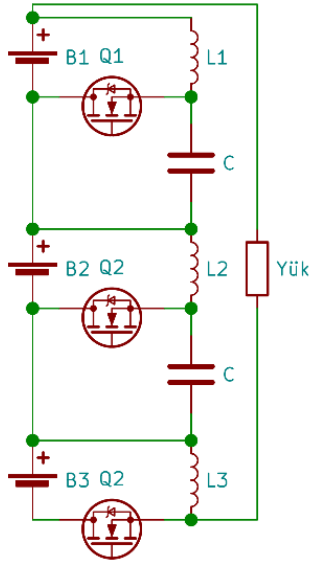
Şekil 2.15. Zincir yapılı endüktans yöntemi

Dönüştürücü Esaslı Aktif Dengeleme

Dönüştürücü esaslı aktif dengeleme sistemleri dengeleme süresini kontrol etmede yüksek esnekliğe sahiptir ancak karmaşık ve pahalı sistemlerdir [45].

Cuk Dönüştürücü Yöntemi

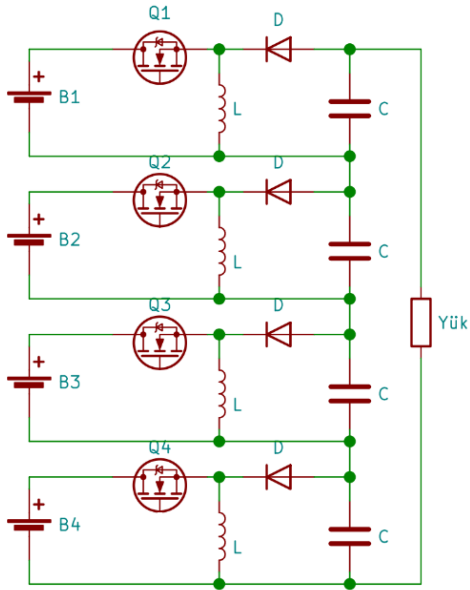
Cuk dönüştürücü dengeleme yönteminde MOSFET kayıpları ve verim çok katmanlı endüktansa göre iyileştirilmiştir [34]. Cuk dönüştürücü, komşu hücre çiftleri arasında dengeleme hızı yüksek, komşu olmayan hücrelerde dengeleme hızı yavaştır [41]. Şekil 2.16’da devre yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Cuk dönüştürücü yöntemi

Buck-Boost Dönüştürücü Yöntemi

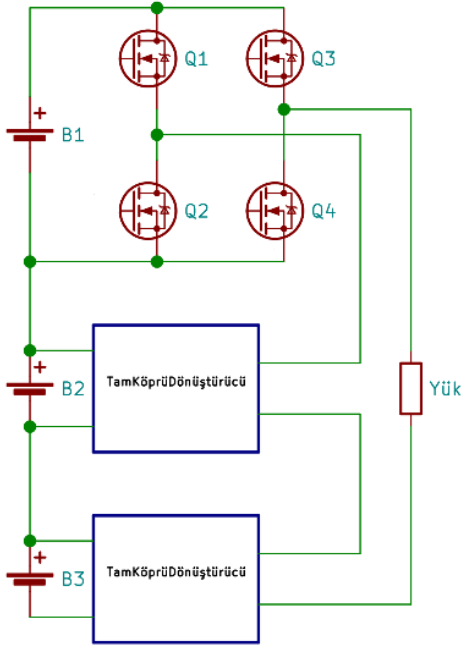
Buck-boost dönüştürücü dengeleme yönteminde her hücreye ait bir dönüştürücü bloğu vardır. Buck-boost dönüştürücü MOSFET PWM sinyallerinin doluluk oranları ile kontrol edilmektedir [34]. Pahalı fakat modüler bir tasarımdır. Literatürde yaygın olarak kullanılır. Şekil 2.17’de devre yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Buck-boost dönüştürücü yöntemi

Tam Köprü Dönüştürücü Yöntemi

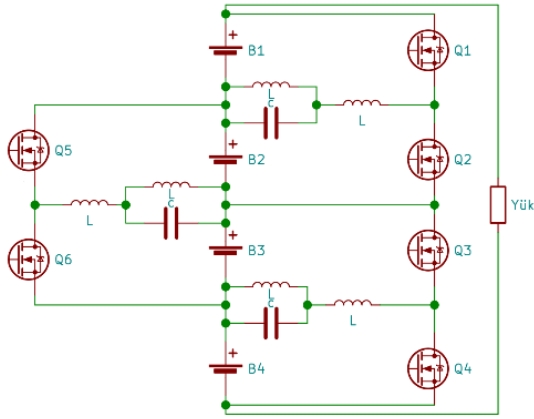
Tam köprü dönüştürücü çift yönlü bir enerji aktarımı sağlamaktadır [37]. Aktarabileceği güç değerleri yüksektir. Modüler sistemler için uygundur. Karmaşık ve maliyetli bir yapıda olmasına rağmen dengeleme hızları yüksektir. Şekil 2.18’de devre yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Tam köprü dönüştürücü yöntemi

Yarı Rezonans Dönüştürücü Yöntemi

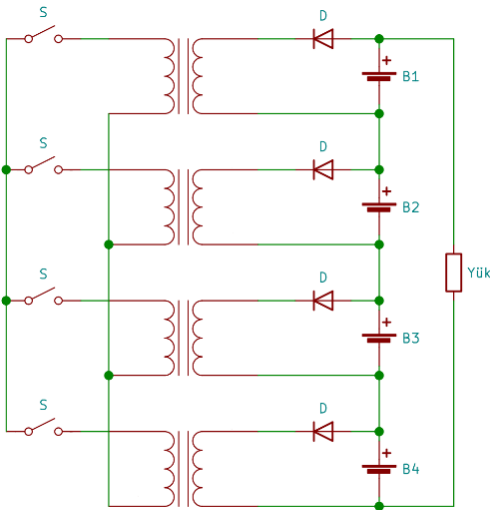
Yarı rezonans dönüştürücü dengeleme sisteminde Şekil 2.19’da gösterildiği gibi bitişik her iki hücre arasına yarı rezonans dönüştürücü bağlanmaktadır. MOSFET ile kontrol edilmektedir. Yarı rezonans dönüştürücü ile anahtarlama kayıplarını azaltarak dengeleme veriminin artırılması sağlanmaktadır. Sadece bitişik hücrelerde dengeleme hızı yüksektir [46]. Kompleks ve maliyetli bir yapıya sahiptir.



Şekil 2.19. Yarı rezonans yöntemi

Flyback Dönüştürücü Yöntemi

Flyback dönüştürücüler izoleli yapıdadır. Şekil 2.20’de gösterildiği gibi her hücreye bağlı bir flyback dönüştürücü vardır. Dönüştürücünün hücre tarafı seri, diğer uçları paralel bağlanmaktadır. Modüler bir yapıya sahiptir. İzoleli yapıda olmasından dolayı kullanımı yaygındır.



Şekil 2.20. Flyback dönüştürücü

Batarya yönetim sistemlerinin en önemli parametresi dengeleme sistemleridir. Burada açıklanan her topolojinin kendine özgü avantaj ve dezavantajları olduğu görülmüştür. BYS tasarlanırken sistemin dengeleme hızı, verim, kontrol zorluğu, sistem boyutu, maliyet gibi önemli parametreleri göz önünde bulundurulmalıdır. Bu parametreler göz önünde

bulundurularak batarya dengeleme topolojilerinin Çizelge 2.3'te karşılaştırılması gösterilmiştir (1 en düşük, 4 en yüksek değeri göstermektedir).

Çizelge 2.3. Batarya dengeleme topolojilerinin karşılaştırılması

Batarya Dengeleme Topolojileri	Dengeleme Hızı	Kontrol Zorluğu	Boyut	Maliyet	Verim
Sabit Direnç	1	1	1	1	1
Anahtarlamalı Direnç	1	2	1	1	2
Anahtarlamalı Kondansatör	2	3	2	2	2
Çift Katmanlı Anahtarlamalı Kondansatör	3	3	2	2	2
Tek Sarımlı Endüktans	3	4	3	3	3
Çok Sarımlı Endüktans	3	4	4	4	3
Zincir Yapılı Endüktans	3	4	4	4	3
Cuk Dönüştürücü	2	4	3	3	3
Buck-Boost Yükseltici	3	4	3	3	3
Tam Köprü	4	4	4	4	4
Yarı Rezonans	2	3	3	3	3
Flyback	3	3	3	3	3

2.2. Şarj Durumu (State of Charge. SOC) Belirleme Yöntemleri

BYS birçok sensör, kontrolör ve sinyal hattından oluşur. BYS'nin temel görevi bataryaların şarj durumlarının önemli bir göstergesi olan SOC bilgisini sağlamaktır [47]. SOC bataryada mevcut kullanılabilir enerjiyi tanımlamak için kullanılır ve genellikle yüzde cinsinden ifade edilen bir terimdir [48]. SOC bir bataryanın kalan kapasitesini doğru bir şekilde belirlenmesi bataryanın aşırı şarj ve deşarjını önleyerek batarya ömrünün uzatılmasını sağlar [49]. SOC batarya tam şarj olmuş iken %100 ve batarya tam deşarj olmuşken %0 kabul edilmektedir. Teknik olarak SOC; çalışan bir bataryanın kullanılabilir kapasitesinin, bataryanın nominal kapasitesine oranı olarak hesaplanmaktadır [28-29]. SOC değerini hesaplamak için Eş. 2.1 kullanılmaktadır [50].

$$SOC = \frac{C_{kullanilabilir kapasite}}{C_{nominal kapasite}} \cdot 100 (\%) \quad (2.1)$$

Bataryanın SOC değerinin belirlenmesi BYS için önemlidir. Batarya şarj durumunun (SOC), belirlenmesi modeller ve algoritmalar olarak iki yolla yapılmaktadır.

2.2.1. Batarya modeli ile SOC hesabı

Batarya kimyasal reaksiyonu doğrusal olmayan karmaşık bir süreçtir. Batarya şarj veya deşarj olduğunda polarizasyonu, terminal gerilimi, iç direnci doğrusal olmayan bir şekilde sürekli değişmektedir. Bataryanın her kullanımında bu değişiklikler devam edeceği için bataryanın kapasitesinde, şarj ve deşarj seviyelerinde azalmalar meydana gelmektedir. Bu durumları en doğru şekilde analiz edebilmek için bataryanın modelini oluşturmak gerekir. Günümüzde en yaygın olarak elektrokimyasal, eşdeğer devre ve veriye dayalı modeller kullanılmaktadır [51].

Elektrokimyasal batarya modeli

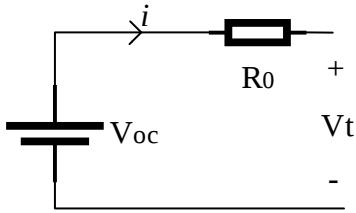
Elektrokimyasal batarya modeli, bataryanın iç mekanizmasına göre elektrokimyasal güç ve iletim denklemlerini oluşturur. Bu model bataryanın fiziksel ve kimyasal özelliklerini, iç difüzyon sürecini ve elektrokimyasal reaksiyon sürecini dikkate almaktadır [51].

Eşdeğer devre batarya modelleri

Eşdeğer devre modeli bataryanın dinamik modelini dirençler ve kondansatörler ile bir devre ağı kurarak analizini yapar. Eşdeğer devre modelleri, Rint, thevenin, PNGV ve çok sıralı model olarak sıralanabilir.

Rint Modeli

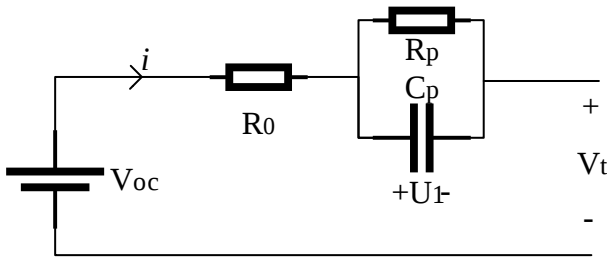
Rint modelinde bir açık devre gerilimi V_{OC} , batarya ve bataryanın dinamik özelliğini tanımlamak için seri R_0 direnci kullanılmaktadır. Şekil 2.21’de devre yapısı gösterilmiştir. Rint modeli basit ve uygulamasının kolay olmasının yanında doğruluğu düşük bir modeldir.



Şekil 2.21. Rint batarya modeli

Thevenin Modeli

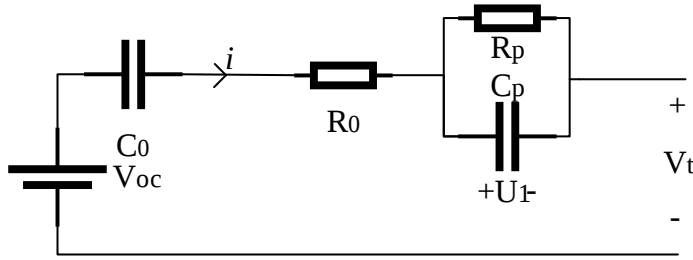
Rint modeline paralel bir RC devresi eklenerek oluşturulan yapıdır. Şekil 2.22’de devre yapısı gösterilmiştir. Bu model Rint modeline göre daha yüksek doğruluğa sahiptir. R_0 ani direnç özelliğini, R_p , C_p kapasiteyi belirtir.



Şekil 2.22. Thevenin batarya modeli

PNGV Modeli (Partnership for a New Generation of Vehicles – Yeni Nesil Araçlar İçin Ortaklık)

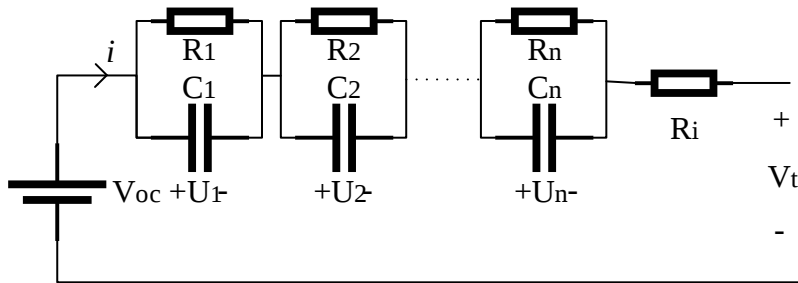
Thevenin modeline seri bir kondansatör bağlanması ile oluşturulmaktadır. Şekil 2.23'te devre yapısı gösterilmiştir. Bu kondansatör açık devre gerilimi V_O de ki değişikliği tanımlamak içindir. PNGV modeli geçici yanıt sürecini belirlemede çok iyidir ancak bataryanın polarizasyonunu ayrıntılı algılayamaz. PNGV modelinin doğruluğu düşük ve hesaplama yöntemi karmaşıktır.



Şekil 2.23. PNGV batarya modeli

Çok Sıralı Model

Thevenin modeline bir veya daha fazla paralel RC kolu eklenerek oluşturulmaktadır. Devre yapısı Şekil 2.24'te gösterilmiştir. Bataryanın elektrokimyasal polarizasyonu dikkate alındığında, ikinci bir RC kolu eşdeğer devrenin dinamik modelini geliştirir ve bataryanın model doğruluğunu artırmaktadır. RC paralel kollar arttıkça modelin doğruluğu da artmaktadır [51].



Şekil 2.24. Çok sıralı batarya modeli

Veriye dayalı batarya modelleri

Veriye dayalı batarya modeli sinir ağı modelini içerir, eşdeğer devre batarya modeli gibi bir devre yapısı bulunmadığından veri modelinde bataryanın iç yapısını benzetim yapan test veri örnekleri kullanılır. Eğer veri örneği az ise model doğruluğu da düşüktür. Çeşitli batarya tiplerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.2.2. Algoritmalar ile SOC hesabı

Literatürde SOC tahmini ile ilgili birçok yöntem bulunmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanlar açık devre gerilim yöntemi, coulomb sayma, kalman filtre, genişletilmiş kalman filtre, H_∞ filtre ve sinir ağı yöntemleridir.

Açık devre gerilim (OCV) yöntemi

SOC ve OCV arasındaki ilişki her bataryada aynı değildir. Kurşun asit bataryalarda SOC ve OCV arasında doğrusal bir ilişki varken lityum iyon bataryalarda SOC ve OCV arasında doğrusal bir ilişki bulunmamaktadır. OCV basit ve uygulaması kolay bir yöntemdir [52].

Coulomb sayma yöntemi (CC)

Coulomb sayma yöntemi, batarya SOC değerini tahmin etmenin en kolay yoludur. Bu yöntem, düşük güç hesaplaması ile uygulanması basittir. Batarya şarj ve deşarj olurken batarya akımının zamana göre integralinin alınmasına dayanmaktadır [53]. Gürültü, sıcaklık, akım, vb. gibi değişkenler hesaplamada hatalara yol açabilir [53]. Coulomb sayma yöntemi batarya durum tahmininde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kalman filtresi (KF) yöntemi

KF yöntemi batarya durumunu lineer bir durum uzay denkleminde dönüştürerek hesaplamaktadır [54]. KF en önemli avantajı, ölçüm verilerinde gürültü olmasında durumunda dahi doğru bir şekilde tahmin yapabilmesidir. Ancak oldukça karmaşık matematiksel hesaplamaları bulunmaktadır.

Genişletilmiş kalman filtresi (EKF) yöntemi

KF bataryanın doğrusal olmayan özelliklerinde yeterli olmadığı için genişletilmiş kalman filtresi (EKF) kullanılmıştır. EKF batarya modelini doğrusal hale getirmek için oluşturulan denklemin ilk türevleri ve taylor serisi kullanılmaktadır [55]. Model her defasında SOC tahmin parametrelerini düzeltmek için öngörülen değeri bataryanın terminal voltajı ile karşılaştırarak doğrusallaştırma yöntemi sunmaktadır.

H_∞ filtresi yöntemi

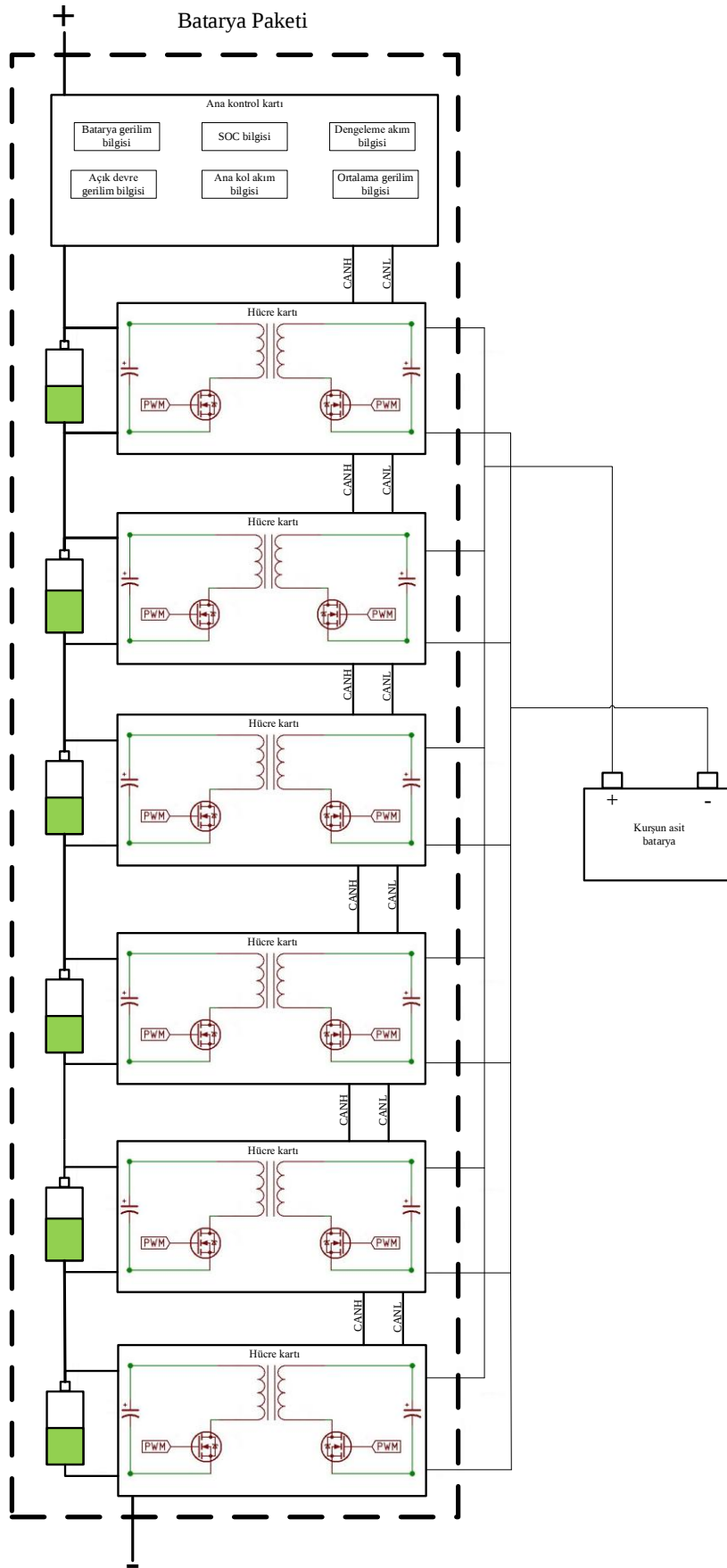
H_∞ filtresi zamana göre değişen batarya parametrelerini dikkate almaktadır [52]. Belirli koşullar altında gerçekleştirilebilecek güçlü sağlamlığa sahip basit bir tasarımı vardır. Doğruluk, hesaplama maliyeti ve zaman verimliliği açısından diğer yöntemlerden daha iyi performans göstermektedir.

Sinir ağı (NN) yöntemi

Sinir ağı kendi kendine öğrenme becerisine sahip akıllı bir matematiksel araçtır. Sinir ağı modeli bataryanın iç yapısı ve başlangıçtaki SOC değerini bilmeden eğitilmiş verileri kullanarak SOC tahmini yapmaktadır [56]. Sinir ağı modeli için şarj veya deşarj akımı, terminal gerilimi ve sıcaklık bilgileri girilerek SOC tahmini yapılmaktadır. Bu model bataryanın doğrusal olmayan durumlarında da çalışabilmektedir.

3. GELİŞTİRİLEN AKTİF BATARYA DENGELEME SİSTEMİ

Bu çalışmada elektrikli araçlar için genişletilmeye uygun prototip bir aktif batarya dengeleme sistem tasarımı yapılmıştır. Geliştirilen aktif batarya dengeleme sisteminde dönüştürücü esaslı çift yönlü flyback dengeleme sistemi kullanılmıştır. Tasarlanan sistem donanım ve yazılım bileşenlerinden oluşmaktadır. Çalışmada 6 tane EEMB marka LIR18650 model 2200 mAh kapasiteli lityum iyon hücre kullanılmıştır. BYS, bir ana kontrol kartı ve hücre kartlarından oluşmaktadır. Ana kontrol kartı ve hücre kartları arasındaki haberleşme CAN sistemi ile sağlanmaktadır. Hücre kartları enerjisini kendi batarya hücresinden almaktadır. Hücre kartlarının üzerinde dönüştürücü esaslı aktif dengeleme sisteminin bir çeşidi olan çift yönlü flyback dönüştürücü devresi yer almaktadır. Çift yönlü flyback devresinin giriş uçları birbirine seri bağlı olup batarya hücresi bulunmaktadır. Çift yönlü flyback devresinin çıkış uçları birbirine paralele bağlı olup 12V kurşun asit batarya bulunmaktadır. Her hücrenin gerilim, akım, SOC bilgileri CAN haberleşme ile ana kontrol kartına gönderilmektedir. Ana kontrol kartı gelen bilgiyi değerlendirerek her hücre için ayrı ayrı şarj ve deşarj kontrolü yapmaktadır. Hücrelerin SOC değeri eş değer devre modeli kullanılarak, coulomb sayma yöntemi ile belirlenmiştir. Şekil 3.1’de geliştirilen aktif batarya dengeleme sisteminin blok diyagramı, Resim 3.1’de geliştirilen aktif batarya dengeleme sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Aktif batarya dengeleme sistemi blok diyagramı

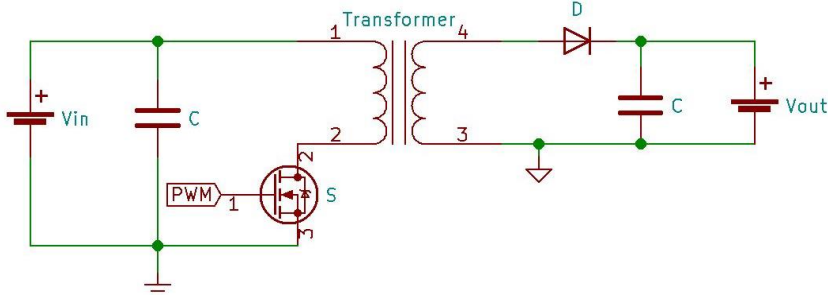


Resim 3.1. Aktif batarya dengeleme sistemi

3.1. Çift Yönlü Flyback Dönüştürücü Tasarımı

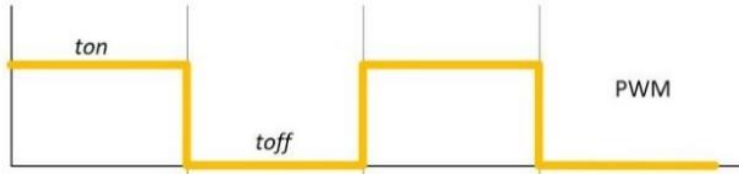
Flyback dönüştürücüler tasarım kolaylığı, devredeki eleman sayısının azlığı, düşük maliyeti, üzerinde bulunan transformatör ile çıkış geriliminin ayarlanabilmesi, giriş (primer) ve çıkışın (sekonder) yalıtımlı olmasından dolayı düşük ve orta güç uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır [53-54,57]. Flyback dönüştürücülerin başlıca özellikleri, primer ve sekonder uçlarının izoleli yapıya sahip olması, eleman sayılarının az olması, geniş giriş gerilim aralığına sahip olması, çıkış geriliminin ayarlanabilir olması, tekli veya çoklu çıkış olması, çıkış geriliminin girişten düşük veya yüksek değerde olması, çıkış geriliminin pozitif veya negatif değerde olmasıdır [58]. Flyback dönüştürücüler adaptörlerde, şarj cihazlarında, yazıcılarda, güç kaynaklarında, yalıtımlı sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [1], [58] .

Flyback dönüştürücü devrelerde yalıtım transformatör ile sağlanmaktadır. Buradaki transformatör birbirine ters polariteli sargılardan oluşmaktadır [59]. Şekil 3.2’de temel bir flyback dönüştürücü devresi görülmektedir. Devrede MOSFET ilettime geçtiğinde giriş gerilimi primer sargılara uygulanır ve sekonder sargılar primer sargılara göre ters polaritede olduğu için akım geçirmez, diyot ters kutuplanır ve primer akımı artar. MOSFET yalıtıma geçtiğinde transformatördeki manyetik akı azalır, diyot ilettime geçer, primer sargılar üzerinde depolanan enerji sekonder sargılar ve diyot üzerinden çıkışa iletilmektedir [58], [60].



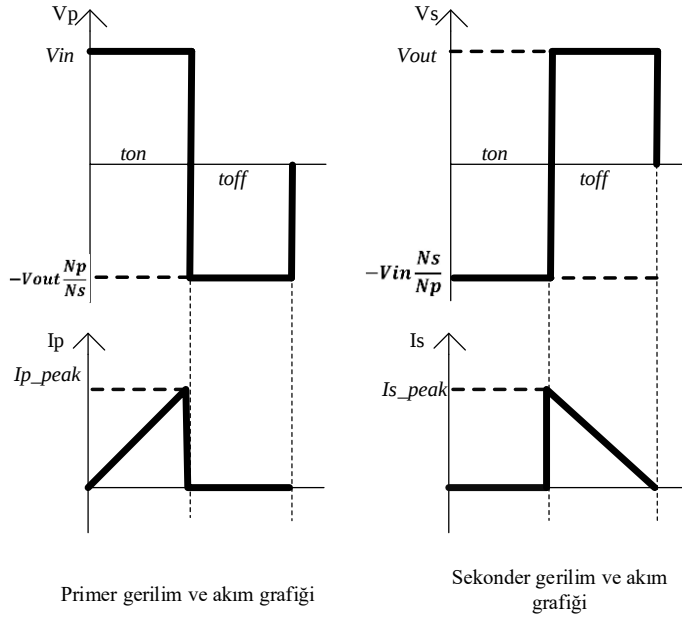
Şekil 3.2. Temel flyback dönüştürücü devresi

Flyback dönüştürücü devresinde bulunan MOSFET PWM sinyalinin (Şekil 3.3) *ton* süresinde iletimde, *toff* süresinde ise yalıttımdadır [9], [21].



Şekil 3.3. PWM sinyali

MOSFET'in iletim ve yalıtım safhalarında devrede iki ayrı durum görülmektedir. MOSFET iletimde iken giriş gerilimi primer sargısına uygulanır ve sabit bir gerilim olduğundan dolayı primer endüktansı üzerinde akım artmaya başlamaktadır [61]. Bu esnada sekonder sargılarından akım geçmez. MOSFET yalıttıma geçtiğinde ise primer sargılarda depolanan enerji sekonder sargılara iletilir ve sekonder sargılarında oluşan akım azalarak sıfıra düşer. Şekil 3.4'te *ton* ve *toff* sürelerinde primer ve sekonder sargılarının gerilim ve akım grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Primer ve sekonder gerilim ve akım grafikleri

Şekil 3.4'te yer alan grafiklerden flyback dönüştürücünün giriş ve çıkış bağıntısı Eş. 3.1'deki gibi elde edilmektedir.

$$V_{in} \cdot t_{on} = V_{out} \frac{N_p}{N_s} \cdot t_{off}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_s}{N_p} \cdot \frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{N_s}{N_p} \cdot \frac{D \cdot T}{T - D \cdot T} \quad (3.1)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_s}{N_p} \cdot \frac{D}{1 - D}$$

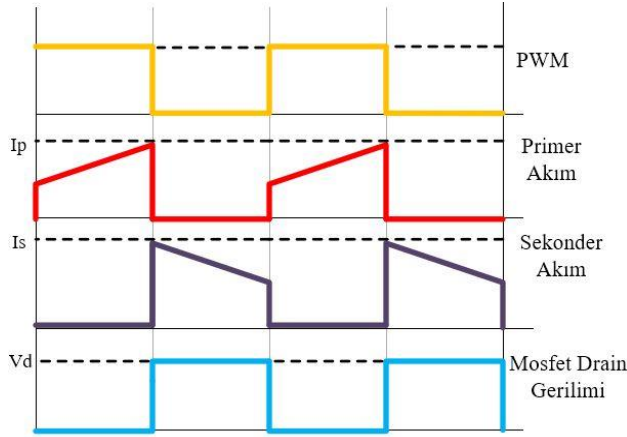
Benzer şekilde dönüştürücü hesaplamalarında kayıplar ihmal edildiğinde giriş gücü ile çıkış gücü eşit kabul edilebileceğinden giriş çıkış akımları arasındaki bağıntı da Eş. 3.2'deki gibi elde edilmektedir.

$$P_{out} = P_{in}$$

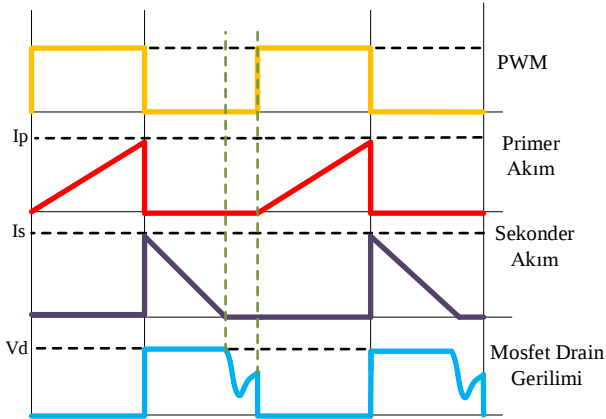
$$V_{out} \cdot I_{out} = V_{in} \cdot I_{in} \quad (3.2)$$

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{N_p}{N_s} \cdot \frac{1 - D}{D}$$

Flyback dönüştürücülerde de diğer dönüştürücülerde olduğu gibi sürekli akım (Şekil 3.5) (Continuous Current Mode-CCM) ve süreksiz akım (Şekil 3.6) (Discontinuous Current Mode-DCM) çalışma modları vardır [62]. Sekonder akım *toff* süresi bitmeden sıfıra düşerse süreksiz akım (DCM), *toff* süresi bittiğinde akım sıfırdan büyükse sürekli akım (CCM) modu olarak tanımlanmaktadır [58].



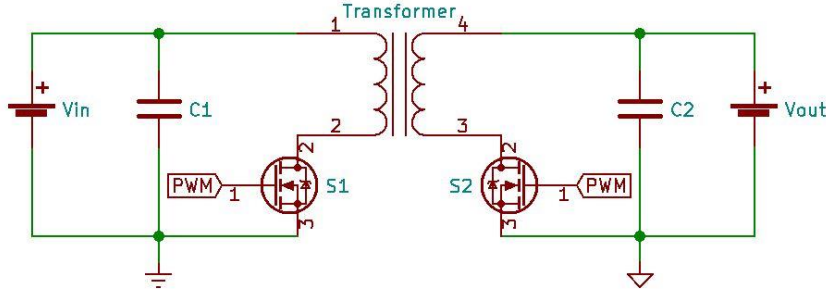
Şekil 3.5. Sürekli akım (CCM) modu



Şekil 3.6. Süreksiz akım (DCM) modu

Sürekli akım çalışma modunda MOSFET iletim kayıplarının ve çekirdek kayıplarının az olması, tepe akım değerlerinin düşük olması, akım dalgalanmalarının az olması, anahtarlama frekansının değerinin sabit olması avantajları olsa da düşük verim ve yüksek voltaj stresi de dezavantajlarıdır. Süreksiz akım çalışma modunda düşük endüktans değerine sahip olması, transformator boyutlarının küçük olması ve verimlerinin yüksek

olması avantajları olsa da MOSFET iletim kayıplarının ve çekirdek kayıplarının fazla olması dezavantajlarıdır [14, 63- 64].



Şekil 3.7. Çift yönlü flyback dönüştürücü devresi

Çift yönlü flyback dönüştürücü devresinde Şekil 3.7’de gösterildiği gibi temel flyback devresinde bulunan diyotun görevini S2 MOSFET’in içerisinde yer alan gövde diyotu yapmaktadır. Bu dönüştürücü türünde kullanılan transformatörün en temel özelliği primer ve sekonder sargılarının aynı anda çalışmamasıdır [65]. Çift yönlü flyback dönüştürücüde primer taraftan sekonder tarafa dönüştürme işlemi sırasında S2 MOSFET yalıtımda tutularak S1 MOSFET’ine PWM kontrolü yapılmakta, sekonder taraftan primer tarafa dönüştürme sırasında ise S1 MOSFET yalıtımda tutularak S2 MOSFET’ine PWM kontrolü yapılmaktadır [66].

Flyback dönüştürücü transformatörünün tasarımında ilk olarak nüve tipi ve boyutu seçilmektedir. Nüve boyutu, sarım sayısı ve çıkış gücüne bağlıdır. Küçük boyutlu bir nüve ısı radyasyonu, kayıplar ve parazitlik kapasitans açısından avantaj sağlamaktadır [9]. Nüve tipi ve boyutunun belirlenmesinden sonra sarım oranı Eş.3.3’teki gibi hesaplanmaktadır.

$$n = \frac{B \cdot A_{core}}{A_L \cdot I_{p(peak)}} \quad (3.3)$$

Burada, n , sarım oranı, B , akı yoğunluğu (T), A_{core} , nüve kesit alanı (m^2), A_L , endüktans faktörü (H), $I_{p(peak)}$, primer tepe akımıdır (A). Çıkış gücü Eş. 3.4 yardımıyla belirlenmektedir.

$$P_{out} = 0,5 \cdot L_p \cdot I_{p(peak)}^2 \cdot f \quad (3.4)$$

Burada, P_{out} , çıkış gücü (W), L_p , primer endüktansı (H), f , frekanstır (Hz). Eşitlik 3.4'ten primer tepe akım değeri Eş. 3.5'te ki gibi elde edilmektedir.

$$I_{p(peak)} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{out}}{L_p \cdot f}} \quad (3.5)$$

Primer endüktans değeri için Eş. 3.6 yardımıyla belirlenmektedir.

$$L_p \leq \frac{V_{in} \cdot D \cdot T}{I_{p(peak)}} \quad (3.6)$$

Burada, V_{in} , giriş gerilimi (V), D , doluluk oranı, T , periyottur (s). Sarım oranı aynı zamanda primer endüktansı ile bağlantılıdır. Bunun için Eş. 3.7 kullanılmaktadır.

$$L_p = n^2 \cdot A_L \quad (3.7)$$

Tasarım parametrelerinin belirlenmesi

Çift yönlü flyback dönüştürücünün tasarım parametreleri yukarıda verilen formüller doğrultusunda batarya aktif dengeleme sistemi hücre şarj durumu için (12V giriş 4,2V çıkış) Çizelge 3.1'de görüldüğü gibi belirlenmiştir.

Çizelge 3.1. Çift yönlü flyback dönüştürücü tasarım parametreleri

Giriş gerilimi (V_{in})	$12,5 \pm 0,5V$
Çıkış gerilimi (V_o)	4,2V
Tam yük akımı (I_{FL})	5A
Anahtarlama frekansı (f)	20 kHz
İstenen doluluk oranı (D)	0,5
Maksimum akım dalgalanması (ΔI_{pp})	2A
Kısa devre tepe akımı (I_{scp})	8A
Sekonder sargı endüktansı (L_s)	21μH
Transformatör hava aralığı	0,1mm
Nüve	ETD29

Transformatörün sarım oranının formülü Eş. 3.8’de verilmiştir.

$$n = \frac{V_{in}}{V_o'} \cdot \frac{D}{1-D} \quad (3.8)$$

Burada, V_o' çıkış gerilimi ve sekonder tarafındaki MOSFET gövde diyotu iletim gerilimlerinin toplamıdır. Çizelge 3.2’de verilen tasarım parametrelerine göre sarım oranı 2,5 olarak belirlenmiştir.

Nüve maksimum akı yoğunluğu salınımının belirlenmesi

Akı yoğunluğu, bir transformatörün enerji iletim kapasitesini belirler. Yüksek akı yoğunluğu, transformatörün iletebileceği gücün artmasını sağlar ancak çok yüksek akı yoğunluğu güç kayıplarının önemli oranda artmasına yol açar. Maksimum akı yoğunluğunun 300 mT olarak seçilmesi genel bir yaklaşımdır [64], [67]

$$\Delta B_{\max} = B_{\max} \cdot \frac{\Delta I_p}{I_{SCpk}} \quad (3.9)$$

Maksimum akı yoğunluğu salınımı Eş. 3.9’de ki denkleme göre 75 mT olarak belirlenmiştir.

Sekonder ve primer sarım sayısının belirlenmesi

$$N = \frac{L \cdot \Delta I_{pp}}{\Delta B_{\max} \cdot A_e} \cdot 10^{-2} \quad (3.10)$$

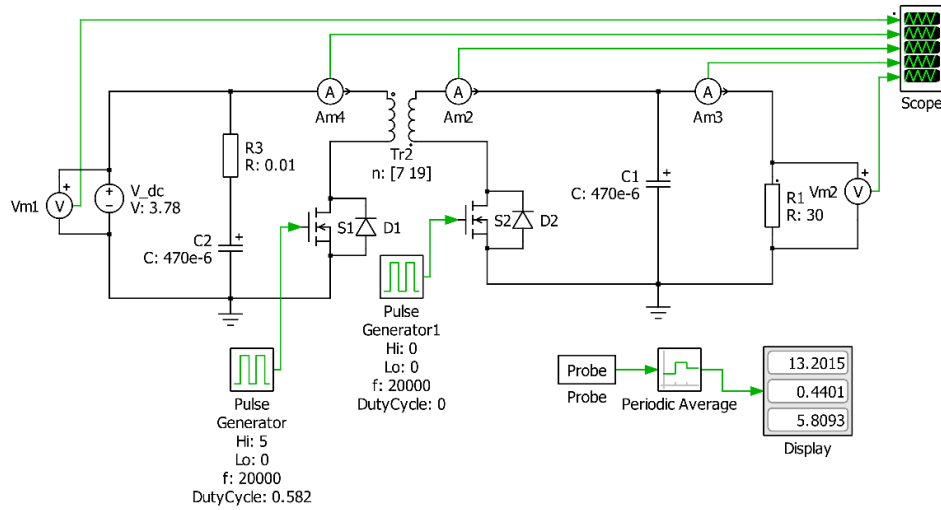
Burada, A_e , flyback transformatörü nüve kesit alanıdır. Sekonder sarım sayısı Eş. 3.10’da ki denkleme göre 7,37 olarak hesaplanmış ve 7 olarak belirlenmiştir.

$$N_p = n \cdot N_s \quad (3.11)$$

Primer sarım sayısı Eş. 3.11 yardımıyla 19,16 olarak hesaplanmış ve 19 olarak belirlenmiştir. Hücre şarj durumu için flyback transformörü hesaplamaları yapıldıktan sonra deşarj durumuna göre hesaplamalar yapılarak transformörün uygunluğu belirlenmiştir. Transformör 1 mm çapında emaye kaplı bakır tel ile sarılmış, primer ve sekonder sargı endüktansları sırasıyla 21 μH ve 114 μH olarak ölçülmüştür.

Simülasyon ve Test Sonuçları

Çift yönlü flyback dönüştürücü devresinin simülasyonu PLECS güç elektroniği simülasyon yazılımında yapılmıştır. Şekil 3.8’de dönüştürücünün hücre deşarj yönünde simülasyon devresi, Şekil 3.9’de ise akım grafikleri görülmektedir.



Şekil 3.8. Simülasyon devresi



Şekil 3.9. Simülasyon akım grafikleri

Geliştirilen çift yönlü flyback dönüştürücünün her iki yönde (hücre şarj ve deşarj yönünde) testleri farklı doluluk oranları için yapılmıştır. Resim 3.2’de test düzeneği görülmektedir.

MOSFET gate sürücüleri için gerekli PWM sinyalleri bir sinyal jeneratöründen sağlanmaktadır. Dönüştürücünün her iki yönde testi sırasında çıkış akımının sabit tutulabilmesi amacıyla bir elektronik yük devresi kullanılmıştır. Testler sırasında osiloskop yardımıyla PWM sinyali, MOSFET drain gerilim sinyali, primer ve sekonder akımları ölçülerek kaydedilmiştir.



Resim 3.2. Tasarlanan çift yönlü flyback devresi test düzeneği

Dönüştürücünün hücre deşarj yönünde testleri sırasında elde edilen sonuçlar Çizelge 3.2’de, hücre şarj yönünde testleri sırasında elde edilen sonuçlar ise Çizelge 3.3’te verilmiştir.

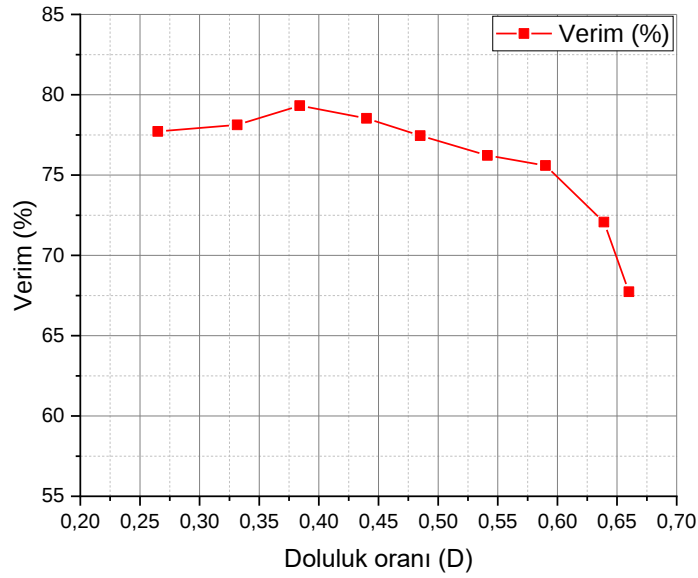
Çizelge 3.2. Hücre deşarj yönü test sonuçları

Doluluk oranı (D)	Primer Gerilimi (V)	Primer Akımı (I)	Sekonder Gerilimi (V)	Sekonder Akımı (I)	Verim (%)
0,265	3,86	0,4	12	0,1	77,72
0,3315	3,84	0,6	12	0,15	78,125
0,384	3,83	0,79	12	0,2	79,32
0,44	3,82	1	12	0,25	78,534
0,485	3,81	1,22	12	0,3	77,45
0,5413	3,8	1,45	12	0,35	76,225
0,59	3,78	1,68	12	0,4	75,59
0,639	3,75	2,22	12	0,5	72,07
0,66	3,73	2,85	12	0,6	67,73

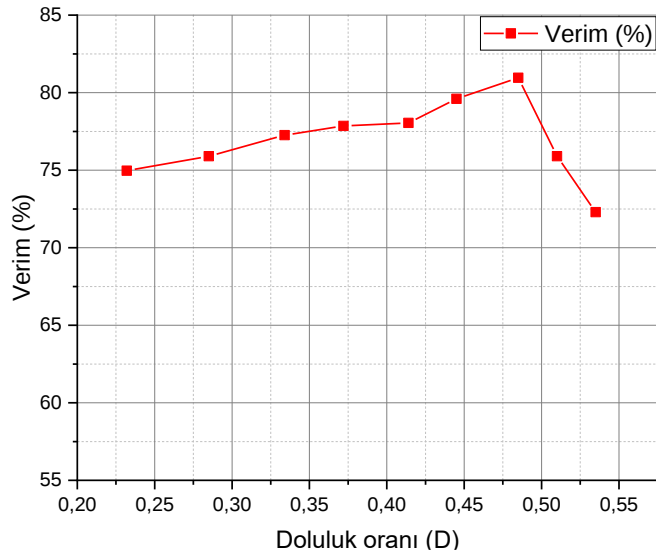
Çizelge 3.3. Hücre şarj yönü test sonuçları

Doluluk oranı (D)	Primer Gerilimi (V)	Primer Akımı (I)	Sekonder Gerilimi (V)	Sekonder Akımı (I)	Verim (%)
0,232	4,2	0,3	12,45	0,135	74,966
0,285	4,2	0,45	12,45	0,2	75,903
0,334	4,2	0,6	12,45	0,262	77,255
0,372	4,2	0,75	12,45	0,325	77,849
0,414	4,2	0,9	12,45	0,389	78,049
0,445	4,2	1,05	12,45	0,445	79,599
0,485	4,2	1,2	12,45	0,5	80,963
0,51	4,2	1,35	12,45	0,6	75,903
0,535	4,2	1,5	12,45	0,7	72,289

Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de her iki yön için doluluk oranına bağlı elde edilen verim grafikleri gösterilmiştir.

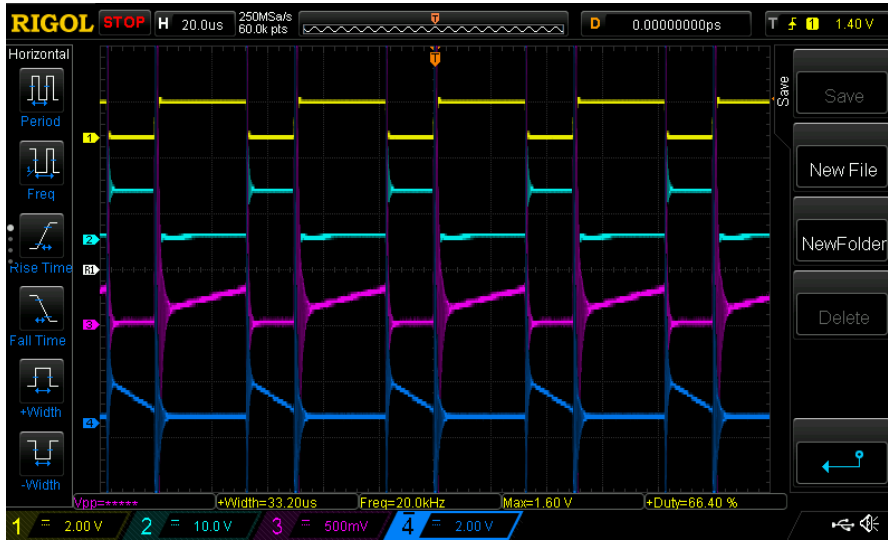


Şekil 3.10. Hücre deşarj yönü verim grafiği

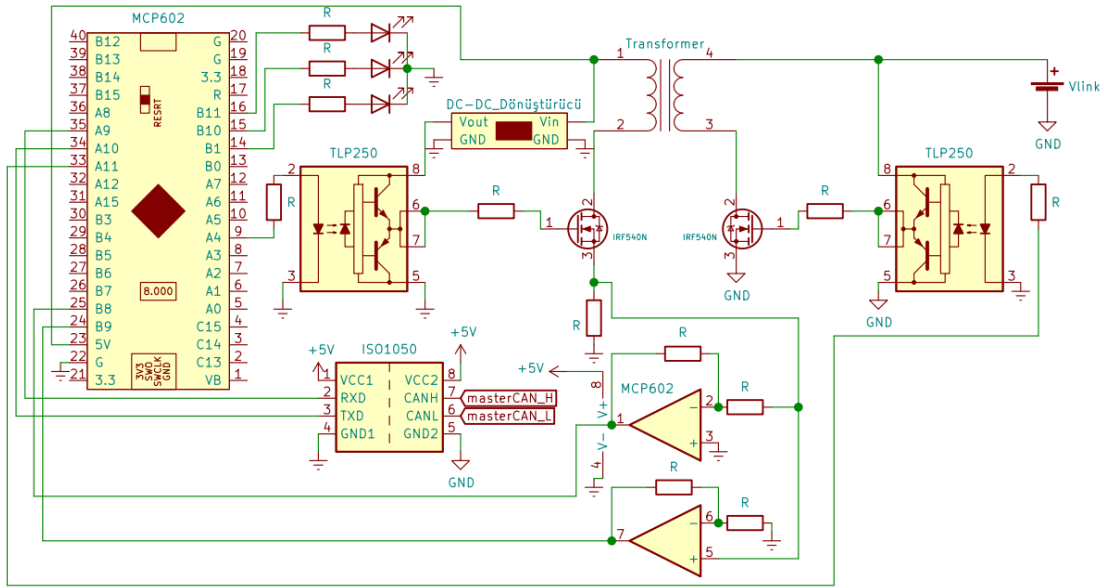


Şekil 3.11. Hücre şarj yönü verim grafiği

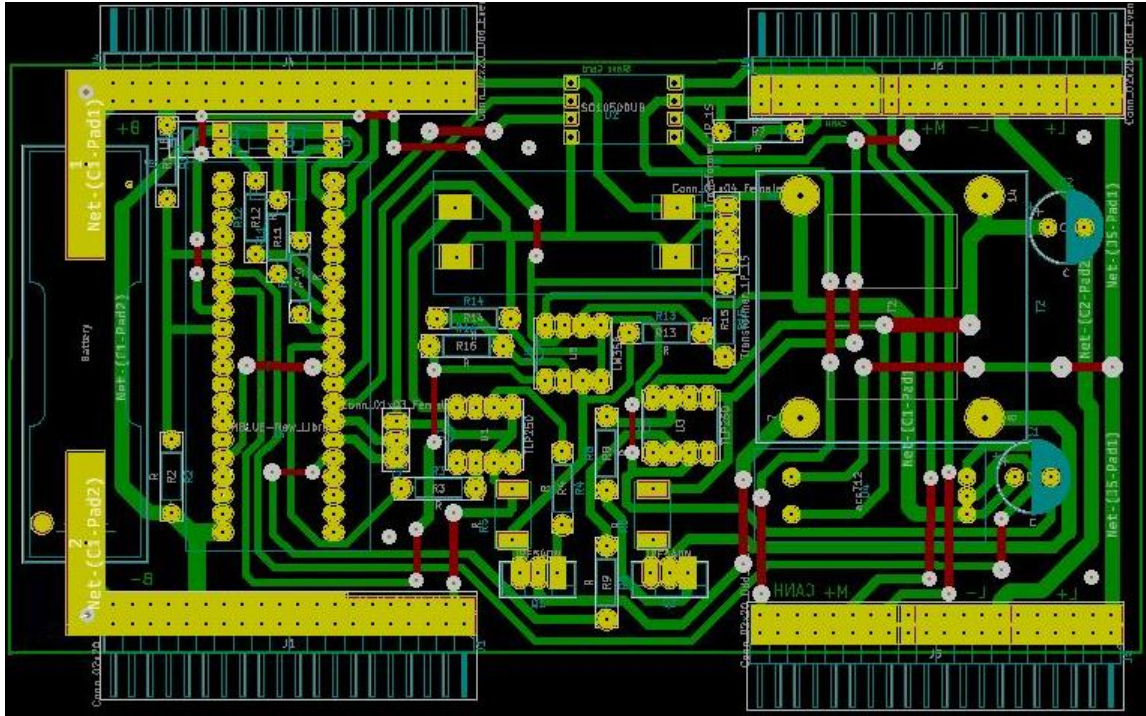
Resim 3.3 hücre deşarj yönü 0,582 doluluk oranı testi osiloskop ekran görüntüsü, Resim 3.4'te ise hücre şarj yönü 0,535 doluluk oranı testi osiloskop ekran görüntüsü verilmiştir. Osiloskop görüntülerinde sarı sinyal PWM, turkuaz sinyal MOSFET drain gerilimi, pembe sinyal primer akımı ve mavi sinyal sekonder akımıdır. Primer ve sekonder akım grafiklerinden dönüştürücünün sürekli akım modunda çalıştığı görülmektedir.



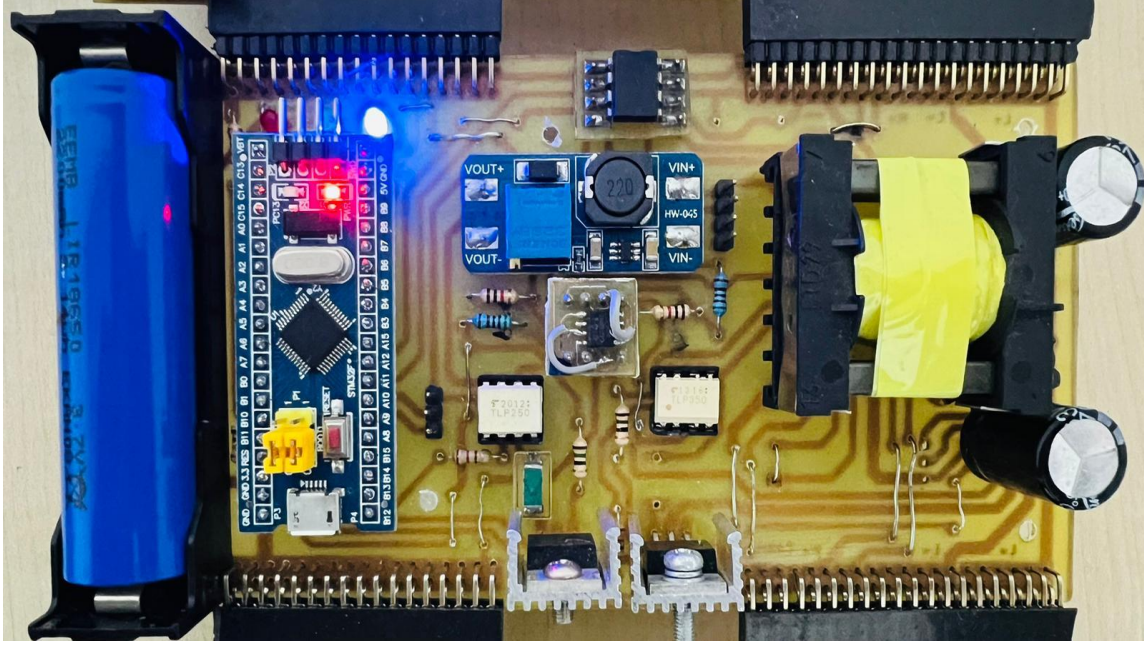
Resim 3.3. Hücre deşarj yönü 0,582 doluluk oranı osiloskop ekran görüntüsü



Şekil 3.12. Hücre kartı devre çizimi



Resim 3.5. Hücre kartı baskı devresi



Resim 3.6. Hücre kartı devre montajı

LIR18650 2200 mAh lityum iyon batarya h creti

Bu  alışmada Resim 3.7’de gösterilen lityum iyon tabanlı LIR18650 model silindirik yapılı 2200 mAh kapasiteli piller kullanılmıştır.



Resim 3.7. 18650 2200 mAh lityum iyon batarya h creti

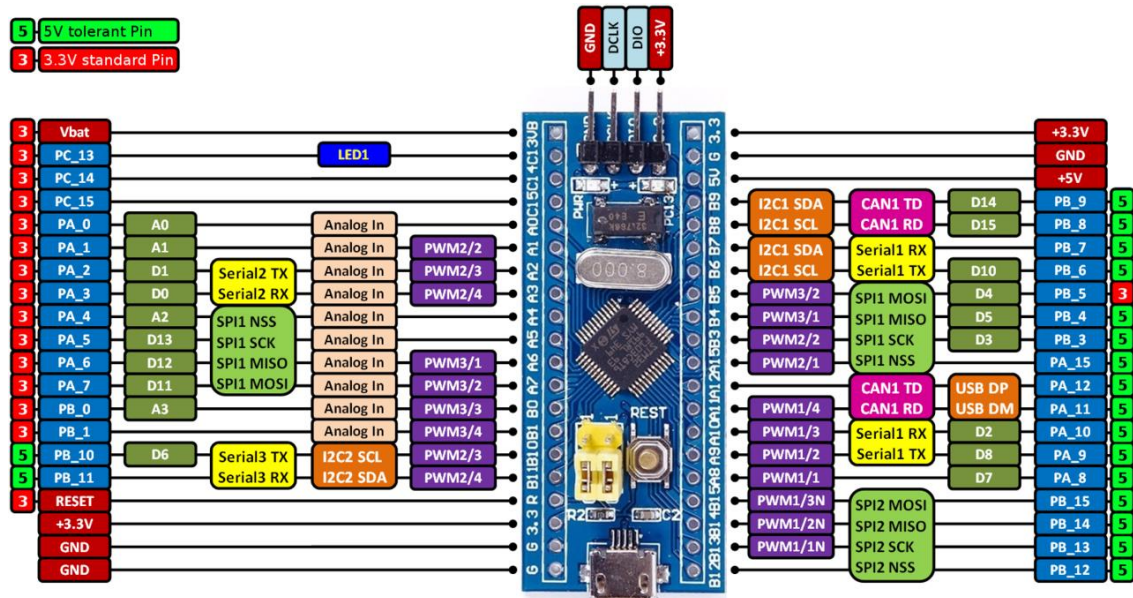
Kullanılan hücre 3,7V nominal gerilime, 2200 mAh kapasiteye sahiptir. Maksimum şarj gerilimi 4,20V, deşarj kesme gerilimi 2,75V’tur. Batarya h cretinin özellikleri  izelge 3.4’te verilmiştir [68].

Çizelge 3.4. 18650 2200 mAh Lityum iyon pil özellikleri

Nominal Gerilim	3,7 V
Nominal Kapasite	2200 mAh (0,2 C deşarj)
Minimum Kapasite	2150 mAh (0,2 C deşarj)
Şarj Gerilimi	4,20 ±0,05 V
Standart Şarj Akımı	1100 mAh
Maksimum Şarj Akımı	1760 mAh
Maksimum Deşarj Akımı	2C
Deşarj Kesme Gerilimi	2,75 V
Çevrim Ömrü	>300 çevrim

STM32F103C8 mikro denetleyici geliştirme kartı

Yapılan çalışmada ARM Cortex 32 bit çekirdekli 72 MHz frekansında çalışan 12 bit ADC kanalına sahip STM32F103C8 mikro denetleyici geliştirme kartı kullanılmıştır. Yüksek frekansa sahip olması, 2 farklı ADC kanalı olması, yüksek bellek kapasitesine sahip olması ve kolay ulaşılabilir model olması ile bu mikro denetleyici olduğu için tercih edilmiştir. Resim 3.8’de kullanılan geliştirme kartının pin haritası gösterilmiştir.



Resim 3.8. STM32F103C8 mikro denetleyici kartı

STM32F103C8 mikro denetleyici kartı orta yoğunluklu gömülü sistem, motor sürücü, GPS platformları, alarm sistemleri ve otomotiv elektroniğinde tercih edilmektedir. Karta ait genel özellikler Çizelge 3.5.’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. STM32F103C8 genel özellikleri

Çekirdek ARM 32 bit Cortex M3
Maksimum Frekans 72 MHz
Flash Bellek 64 – 128 Kbyte
20 Kbyte SRAM
Kristal Osilatör 16 MHz
ADC 2 Kanal 12 bit
7 Kanallı DMA
Çift örnekleme ve tutma özelliği
CAN arayüzü
Serip port haberleşme
Hata ayıklama modu

TLP250 MOSFET sürücü

TLP250 push pull MOSFET çıkışına sahip optokulör kategorisinde bir MOSFET sürücü entegresidir. Toplamda 1 kanala sahiptir ve 2.5 kV'a kadar çıkan gerilimlere karşı izolasyona sahiptir. Besleme gerilimi 10.35V arasındır. Tasarlanan çift yönlü flyback devresinin primer ve sekonder sargıları izolasyonlu olduğu için MOSFET sürücü entegresi optokuplör yapısına sahip bir entegre tercih edilmiştir.

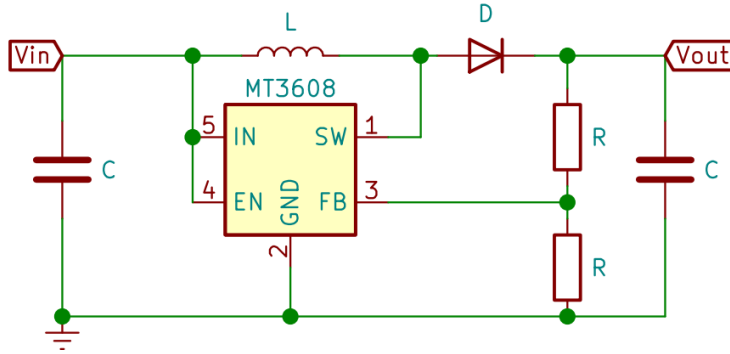
IRF540N N kanal

Çift yönlü flyback dönüştürücü tasarımında 100V Gate.Soruce gerilimine, 33A sürekli çıkış akımına, 110A Drain akımına sahip IRF540N N kanal güç MOSFET'i kullanılmıştır. MOSFET hızlı tepki süresi, sistemin anlık yüksek akım çalışma değerlerini sağladığı ve kolay ulaşılabilir olduğu için tercih edilmiştir.

DC-DC dönüştürücü

Kullanılan TLP250 MOSFET sürücü besleme gerilimi 10V -35V arasındır. Çift yönlü flyback devresinin primer tarafı besleme gerilimi batarya hücresinden sağlanmaktadır. Batarya gerilim değeri maksimum 4.2V olduğu için TLP250 MOSFET sürücü için yeterli gerilim değeri sağlanamaz. Aynı zamanda kullanılan MOSFET'in iletme geçmesi içinde

batarya gerilimi yeterli değildir. Bu nedenle hücre kartı üzerinde primer tarafa ait MOSFET sürücü beslemesi için bir DC-DC dönüştürücü kullanılmıştır. Kullanılan DC-DC dönüştürücü batarya gerilim değerini 12V'a yükseltir. Bu şekilde TLP250 MOSFET sürücü besleme gerilim aralığı sağlanmış olup MOSFET iletime geçirilir. Kullanılan DC-DC dönüştürücünün devre şeması Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Kullanılan DC-DC dönüştürücü devre şeması

Şönt

Hücre kartı üzerinde primer ve sekonder akım değerlerini ölçebilmek için ISABELLENHUTTE marka 33 mΩ değerli şönt kullanılmıştır. Dönüştürücünün primer akım değeri hücrenin deşarj akım değerini, sekonder akım değeri hücrenin şarj akım değerini vermektedir. Dönüştürücünün akım grafikleri sabit olmadığı için akım ölçümünde akım grafiğinin orta noktasından ölçüm değeri alınmıştır. Akım grafiğinin orta noktası MOSFET PWM sinyalinin orta noktası ile aynıdır. PWM sinyalinin orta noktasına geldiğinde yazılımsal olarak burada bir tetikleme sinyali oluşturulmuştur Tetikleme sinyali geldiğinde direnç ucundan opamp ile yükseltilecek değeri okunarak akım ölçümü gerçekleştirilmiştir.

MCP6021 opamp

Dönüştürücünün primer ve sekonder akım değerlerini ölçebilmek için kullanılan şönt gerilimi çok düşük olduğundan MCP6021 opamp entegresi kullanılarak eviren ve evirmeyen yükselteç devreleri ile bu değeri yükseltilmiştir. Eviren ve evirmeyen yükselteç devrelerinin çıkışları STM32F103C8 mikro denetleyici geliştirme kartı ile okunarak gerilim bilgisi alınmıştır. Okunan gerilim bilgisi şönt değerine bölünerek akım hesabı

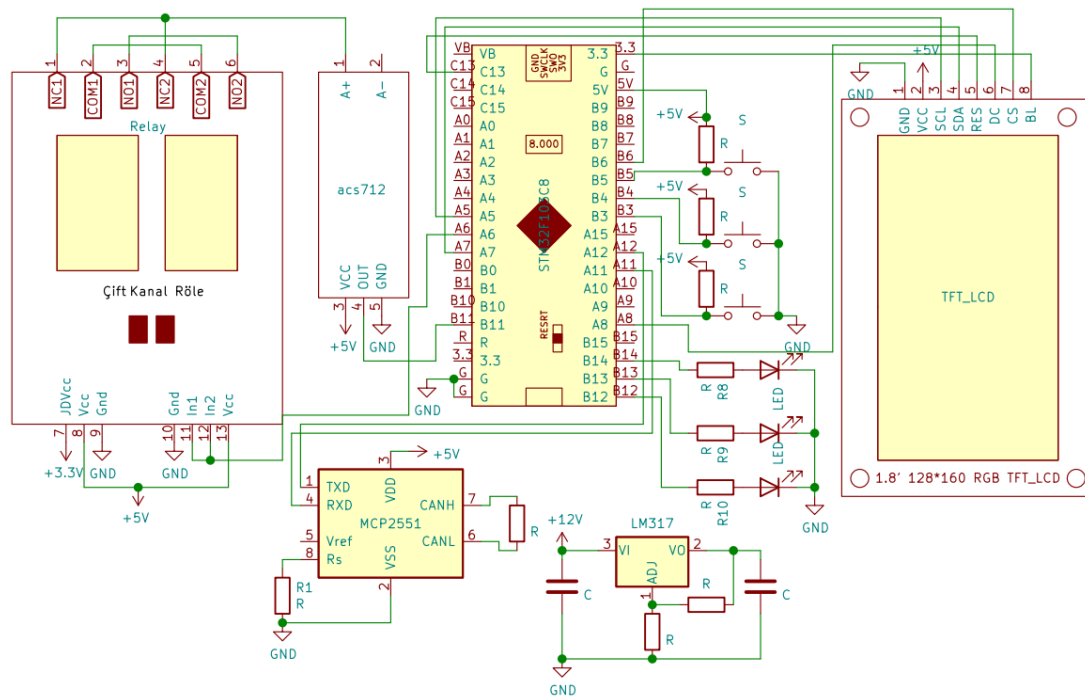
yapılmıştır. Böylelikle primer ve sekonder akım ölçümleri elde edilmiştir. MCP6021 2.5V-5.5V besleme gerilim değeri aralığındadır. 10 Mhz bant genişliğine sahiptir. MCP6021 düşük besleme gerilim aralığı yüksek bant genişliği ve rail to rail özelliğine sahip olduğu için tercih edilmiştir. Rail to rail, opampın besleme gerilim değerine yakın çıkış gerilimi üretebilme özelliğidir.

ISO1050 izolasyonlu CAN entegresi

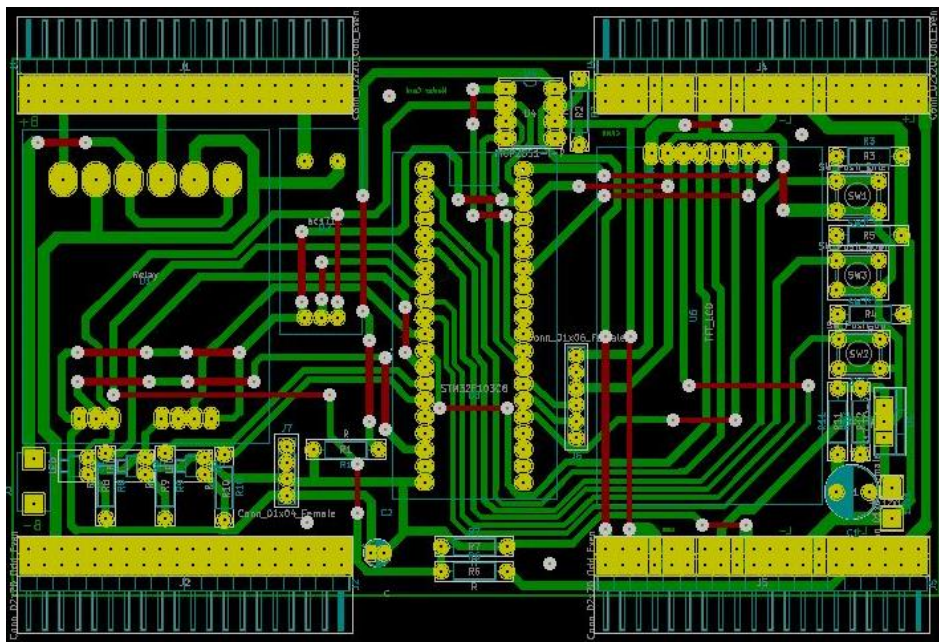
CAN haberleşme, Bosh firması tarafından otomotivde kablo yoğunluğunu azaltmak için geliştirilmiş mesaj tabanlı bir veri iletişimidir. CAN haberleşmede gönderilen veya okunan her mesajın bir adresi vardır. CAN haberleşmede en fazla 8 byte veri aktarımı olur. Sinyal iletim sistemlerinde, sinyalin frekansına ve yolun uzunluğuna bağlı olarak sinyalde yansımalar meydana gelir. Bu yansımaları en aza indirmek için iletim sisteminin empedansına uygun direnç bağlanarak iletim sistemi sonlandırılır. CAN haberleşme sistemlerinde de sonlandırma direnç değeri 120Ω 'dur. CANH ve CANL arasına 120Ω değerinde direnç bağlanmıştır. Yapılan sistemde hücre kartları ve ana kontrol kart arasındaki haberleşme ISO1050 izolasyonlu CAN entegresi ile yapılmıştır. Ana kontrol kartı ve hücre kartları arasında izolasyon olduğu için ISO1050 CAN entegresi tercih edilmiştir.

3.3. Ana Kontrol Kartı Tasarımı

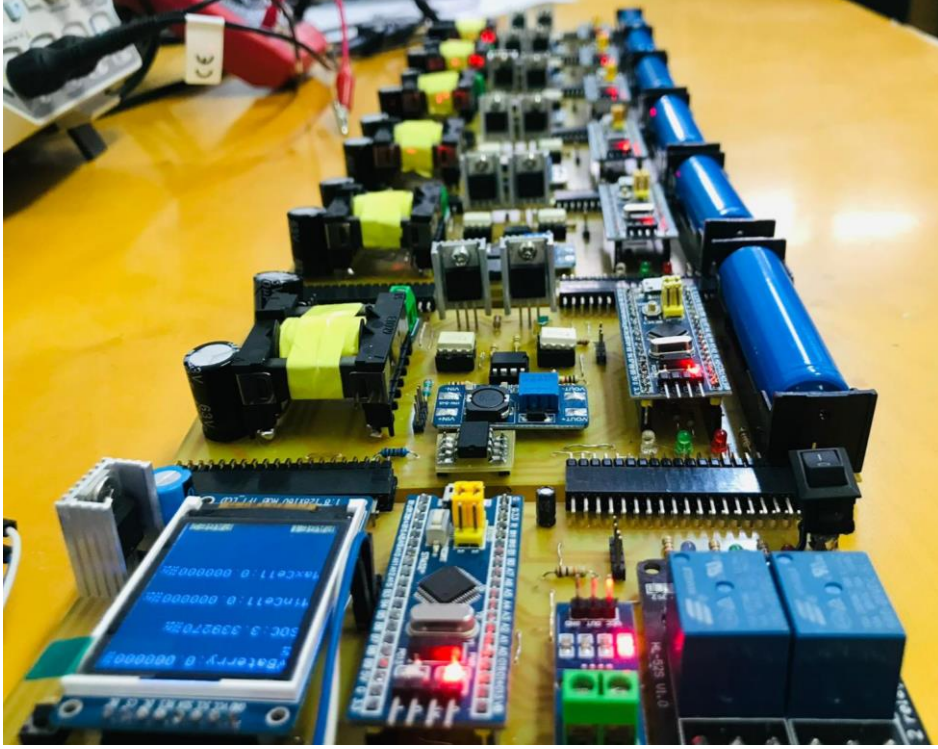
Ana kontrol kartı 6 tane hücre kartın kontrolünü sağlamaktadır. Ana kontrol kartı enerjisini çift yönlü flyback dönüştürücünün sekonder uçlarında bulunan 12V'luk kurşun asit bataryadan almaktadır. Üzerindeki elemanların besleme gerilimleri LM317 ile 5V gerilime dönüştürülerek sağlanmıştır. Hücre kartları ile haberleşmeyi CAN haberleşme üzerinden yapmaktadır. Hücrelere ait gerilim, SOC ve toplam akım ve gerilim değerleri bir LCD ekran üzerinden gösterilir. Batarya paketine verilen paket şarj ve deşarj akımları ana kontrol kartı üzerindeki güvenlik kontrol rölesinden geçerek pakete iletilmektedir. Burada ana kol akımı, akım sensörü ile ölçülür. Ana kontrol kartı üzerinde de hücre kartlarında kullanılan STM32F103C8 mikro denetleyici geliştirme kartı kullanılmıştır. Ana kontrol kartı devre tasarımı KiCad çizim programında yapılmıştır. Şekil 3.14'te ana kontrol kartı devrenin çizimi, Resim 3.9'da ana kontrol kartının baskı devresi ve Resim 3.10'da ana kontrol kartı ile hücre kartlarına ait bir görsel gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Ana kontrol kartı devre çizimi



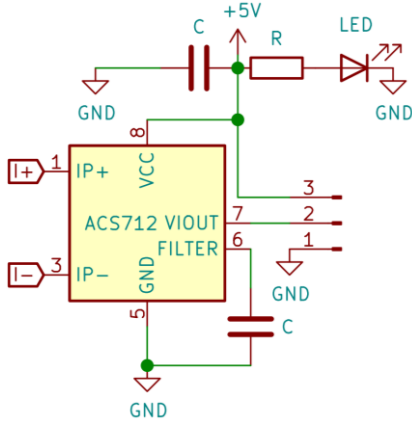
Resim 3.9. Ana kontrol kartı baskı devresi



Resim 3.10. Ana kontrol kartı ve hücre kartları

ACS712 $\pm 5A$ akım sensörü

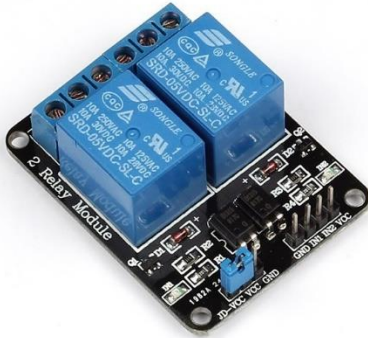
ACS712 hall etkisine dayanan AC ve DC akım ölçümü yapabilen sensördür. ACS712 akım sensörü üzerindeki hall efekt sensöründe oluşan manyetik alanla orantılı çıkış gerilimi üretir. Şekil 3.15'te devre şeması gösterilmiştir. Batarya paketine giden şarj ve deşarj akım ölçümü için ana kontrol kartı üzerinde bulunan ACS712 akım sensörü kullanılmıştır. ACS712 akım sensöründen yazılım kart ucuna gelen analog bilgi dijital bilgiye dönüştürülerek, sensörün referans gerilim değerinden bu dijital değer çıkarılır ve hassasiyet katsayısına bölünür. Akım değeri elde edilerek hücrelere ve ekrana iletilir. Sensör üzerinde 5V besleme gerilimi, çıkış ucu ve GND bulunur. Çıkış ucundaki gerilim değeri sensörün hassasiyet katsayısına göre akım değeri karşılığı bulunur. ACS712 $\pm 30A$, $\pm 20A$ ve $\pm 5A$ gibi farklı akım değerlerinde ölçüm alabilir. Bizim sistemimizde $\pm 5A$ olan ACS712 akım sensörü kullanılmıştır. Bu sensörün akım ölçüm aralığı daha az olduğu ve sistemimizde yüksek akımlar olmadığı için tercih edilmiştir.



Şekil 3.15. ACS712 akım sensörü devre şeması

12V Çift Kanal Röle

Ana kontrol kartı üzerinde bulunan, sistemi yüksek şarj ve deşarj akımlarına karşı korumak için güvenlik olarak çift kanal 12V röle kullanılmıştır. Bu röle ile ana kontrol kartı algoritmasında belirtilen akım, gerilim aralığı dışında ki durumlarda röle devreye alınmış ve sistem üzerinden akım geçişi engellenmiştir. Kullanılan 12V çift kanal röle Resim 3.11’de gösterilmiştir.



Resim 3.11. 12V çift kanal röle

MCP2551

Ana kontrol kartı üzerinde CAN modülü olarak MCP2551 entegresi kullanılmıştır. 2.7V-5.5V besleme gerilim aralığına sahiptir. Ana kontrol kartı üzerinde izoleli yapı olmadığı için MCP2551 entegresi tercih edilmiştir.

LCD Ekran

Ana kontrol kartı hücre gerilim, akım, SOC, aktif dengeleme referans akım değeri gibi bilgileri biz kullanıcılara LCD ekran üzerinden iletir. Bu çalışmada LCD ekran olarak 1.8 inç ölçülere sahip, 128*160 çözünürlükte LCD TFT ekran kullanılmıştır. Kullanılan ekran Resim 3.12’de gösterilmiştir.

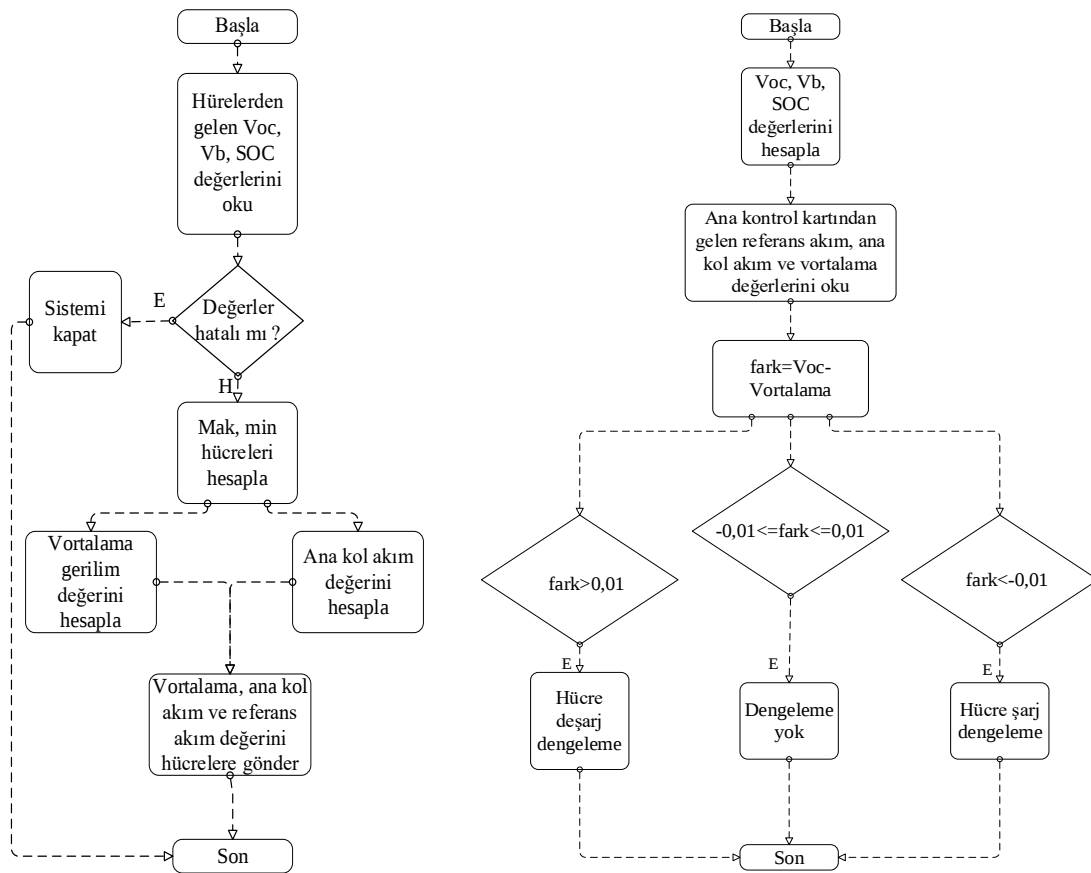


Resim 3.12. LCD TFT ekran

3.4. Geliştirilen Algoritma

Hücre kartları ve ana kontrol kartı algoritmasında STM32F103C8 kodlu ARM Cortex M3 mimarisine sahip mikro denetleyici geliştirme kartı kullanılmıştır. Geliştirilen algoritma ile hücre kartlarında bulunan çift yönlü flyback dönüştürücülerinin anahtarlama PWM sinyal kontrolü bulanık mantık ile sağlanmıştır. Hücre kartları ve ana kontrol kartı arasındaki iletişim için CAN haberleşme yapısı oluşturulmuştur. Hücre kartında hücrelerin açık devre gerilim değeri V_{OC} , batarya gerilim değeri V_B , SOC değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler ana kontrol kartına gönderilmiştir. Ana kontrol kartı algoritmasında hücrelerden gelen açık devre gerilim değeri V_{OC} , batarya gerilim değeri V_B ve SOC değerleri okunmuştur. Gelen değerler ana kontrol kartında sınırları belirlenen hücre değerlerinden farklı ise sistemin çalışması durdurulmuştur. Ana kontrol kartına gelen değerler ile hücrelerin ortalama gerilimi ana kontrol kartında hesaplanmıştır. Ana kontrol kartı üzerinde bulunan ACS712 akım sensörü ile batarya paketinin akım bilgisi okunmuştur. Ana kontrol kartından hücre kartlarına dengeleme akımının referans değeri, ana kol akım değeri ve ortalama gerilim değerleri gönderilmiştir. Hücre kartlarında, ana kontrol kartından gelen ortalama gerilim değeri ile hücre kartında hesaplanan açık devre gerilim

değeri V_{OC} arasındaki fark hesaplanmıştır. Hesaplanan fark değeri ($V_{OC}-V_{ortalama}$) $-0,01V$ ve $0,01V$ değerlerine eşit veya arasında ise hücrede dengeleme yapılmamıştır. Hesaplanan fark değeri $-0,01V$ değerinden küçükse yani batarya paketinin ortalama gerilim değeri hücrenin V_{OC} değerinden daha büyükse hücre gelen referans akım değeri ile dengeleme şarjına başlamıştır. Hesaplanan fark değeri $0,01V$ değerinden büyükse yani batarya paketinin ortalama gerilim değeri hücrenin V_{OC} değerinden küçükse hücre gelen referans akım değeri ile dengeleme deşarjına başlamıştır. Ana kontrol kartı ve hücre kartı algoritması Şekil 3.16’da gösterilmiştir.

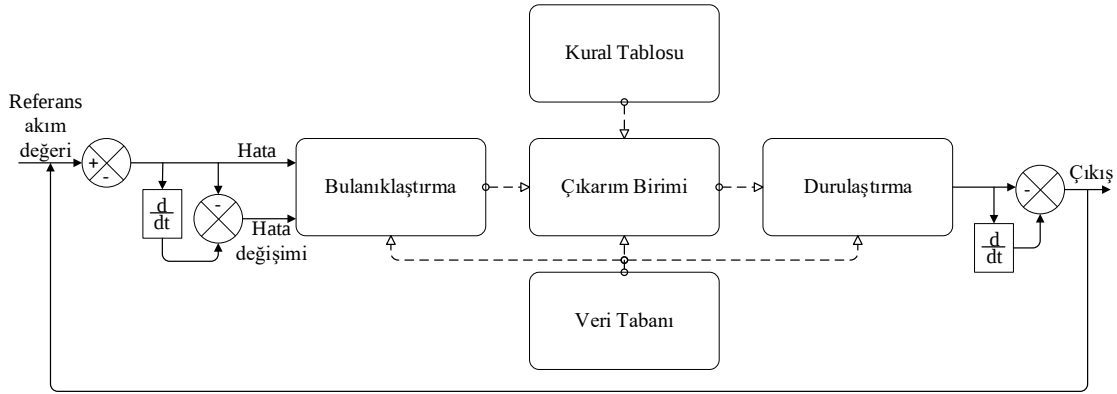


Şekil 3.16. Ana kontrol kartı ve hücre kartı algoritma yapısı

Bulanık Mantık Denetleyici

Batarya hücrelerinin dengeleme sistemi için kullanılan çift yönlü flyback devresinin PWM sinyalinin doluluk oranının kontrolünde bulanık mantık denetleyici kullanılmıştır. Bulanık mantık (fuzzy logic) 1965 yılında Lütü Zadeh tarafından geliştirilmiştir. Bulanık mantık insan beyninin karar verme yapısını modelleyerek kural tabanlı sonuç çıkarımına dayalı bir

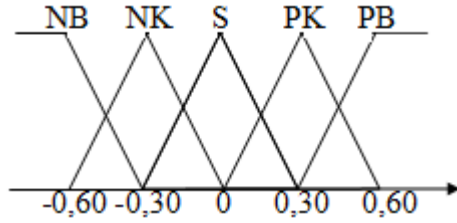
sistemdir [69]. Klasik mantıkta kümeler 0 ve 1'den oluşmaktadır. Klasik kümelerde eleman kümeye tamamen aittir veya kesinlikle ait değildir. Bulanık kümeler 0-1 aralığındaki üyelik derecelerinden (μ) oluşmaktadır. Bulanık kümeler bir elemanın kümeye ne kadar ait olduğuyula ilgilenir. Bulanık kümeler her bir elemanın üyelik derecesini gösteren üyelik fonksiyonları ile temsil edilmektedir. Üyelik fonksiyon çeşitleri üçgen, yamuk, gaussian, çan ve sinüzoidal şeklindedir [70]. Üçgen üyelik fonksiyonu hesaplama kolaylığından dolayı diğerlerinden daha çok tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında da üçgen üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Bulanık mantıkta çeşitli kontrol yöntemleri bulunmaktadır. Mamdani ve Sugeno en çok kullanılan kontrol yöntemlerindendir. Mamdani ve Sugeno kontrol yöntemleri arasındaki temel fark, Mamdani çıktıları üyelik fonksiyonuna sahiptir, Sugeno çıktıları üyelik fonksiyonu içermez [70-71]. Bu çalışmada Mamdani kontrol yöntemi kullanılmıştır. Bulanık mantık kontrolü bulanıklaştırma, çıkarım birimi, kural tablosu ve durulaştırma olmak üzere dört bileşenden oluşmaktadır [72]. Bulanıklaştırma, girişleri üyelik fonksiyonları ile bulanık değerlere dönüştürmektedir. Kural tabanında denetim amaçlarına uygun denetim kuralları bulunmaktadır. Bulanık mantık ile tasarlanan sistemin çalışma mekanizmasını kural kümesi belirlemektedir. Çıkarım birimi, oluşan bulanık değerlerden ve kural tablosundan sonuç çıkarır. Durulaştırma, bulanık sonuçları kesin değerlere dönüştürmektedir [73]. Şekil 3.17'de bulanık mantık kontrol yapısının blok diyagramı gösterilmiştir.



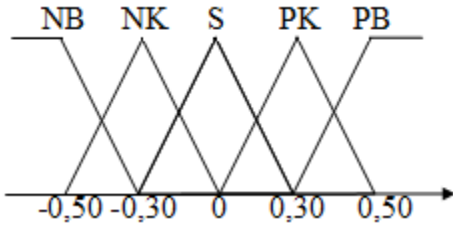
Şekil 3.17. Bulanık mantık kontrol yapısının blok diyagramı

Hücre kartları tarafından gerçekleştirilen hücre dengelemesinde bulanık mantık kontrolü kullanılmıştır. Ana kontrol kartından hücre kartlarına gönderilen dengeleme akım değeri referans olarak alınmıştır. Bu referans akım değerinden hücrenin primer veya sekonder akım değerinin farkı alınarak hata değişkeni elde edilmiştir. Hata değişkeninden bir önceki

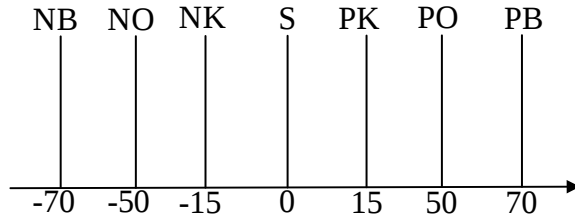
hata değeri çıkarılarak hata değışimi elde edilmiştir. Bu iki değışken bulanık mantık kontrolünün girişlerini oluşturmaktadır. Şekil 3.18’de hata, Şekil 3.19’da hata değışimi ve Şekil 3.20’de çıkış üyelik fonksiyonları verilmiştir.



Şekil 3.18. Hata üyelik fonksiyonu



Şekil 3.19. Hata değışim üyelik fonksiyonu



Şekil 3.20. Çıkış üyelik fonksiyonu

Hata ve hatanın değışimi hesaplandıktan sonra üyelik fonksiyonu ve üyelik derecesi hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler 2x2'lik bir matris olarak kaydedilmiştir. Matrisin birinci sütununda üyelik fonksiyonu, ikinci sütununda üyelik derecesi bulunmaktadır. Hata ve hatanın değışim değerlerinin çarpımlarından bulanık çıkarım değerleri elde edilmektedir. Hata ve hatanın değışim değerleri ile oluşturulan kural tablosundan çıkış üyelik fonksiyonları elde edilmiştir [74]. Üyelik fonksiyonlarındaki etiketler; NB: Negatif Büyük, NO: Negatif Orta, NK: Negatif Küçük, S: Sıfır, PK: Pozitif Küçük, PO: Pozitif Büyük, PB: Pozitif Büyük olarak isimlendirilmiştir. Çizelge 3.6'da oluşturulan kural tablosu gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Bulanık mantık kural tablosu

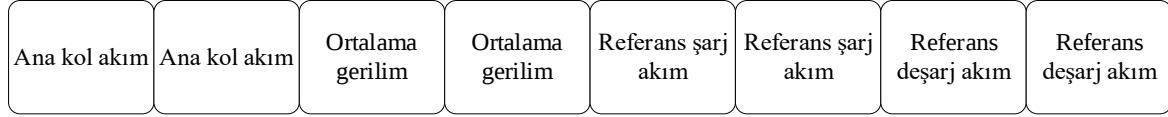
de \ e	NB	NK	S	PK	PB
NB	NB	NO	NK	NK	S
NK	NO	NK	NK	S	PK
S	NK	NK	S	PK	PK
PK	NK	S	PK	PK	PO
PB	S	PK	PK	PO	PB

Elde edilen üyelik fonksiyonlarının üyelik dereceleri hesaplanır. Hesaplanan üyelik dereceleri toplanır. Elde edilen üyelik dereceleri toplam üyelik derecelerine bölünerek PWM sinyalinin doluluk oranının değişimi elde edilmiştir.

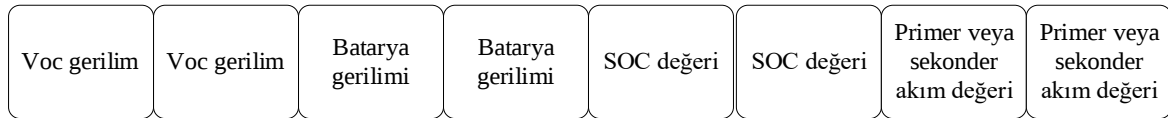
CAN Haberleşme

Hücre kartları bataryanın gerilim değerini, çift yönlü flyback devresinin primer ve sekonder akım değerini ve bataryanın SOC değerini kendi algoritması ile hesaplamıştır. Hesapladığı bu değerleri CAN haberleşme ile ana kontrol kartına göndermiştir. Her batarya hücresinin kendine ait bir hücre kartı ve algoritması olduğu için her hücre kartına CAN haberleşme için bir mesaj numarası tanımlanmıştır. Bu farklı mesaj numaraları sayesinde ana kontrol kartına gönderilen veya ana kontrol kartından gelen mesajların hangi hücrenin bilgisi olduğu anlaşılmaktadır. Hücre kartlarından ana kontrol kartına, bataryanın anlık gerilimi, açık devre gerilimi, SOC, primer ve sekonder akım değerleri gönderilmiştir. Ana kontrol kartından da hücre kartlarına dengeleme için gerekli olan referans akım değeri, batarya paketinin ortalama gerilim değeri, ana kol akım değeri gönderilmiştir. CAN haberleşmede en fazla 8 byte veri aktarımı olmaktadır. Hücre kartlarından ve ana kontrol kartından gönderilen ve alınan değerler 8 byte değerinden fazladır. Bu nedenle tek bir mesaj kanalından gönderilemez ve tek bir mesaj kanalından okunamaz. Gönderilen veya okunan mesajlar 2 mesaj kanalına ayrılarak gönderildi ve 2 mesaj kanalından

toplanarak tek mesaj olarak okunmuştur. Şekil 3.21’de ana kontrol kartı CAN mesaj yapısı, Şekil 3.22’de hücre kartı CAN mesaj yapısı gösterilmiştir.



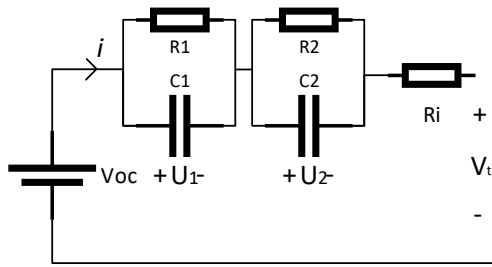
Şekil 3.21. Ana kontrol kartı CAN mesaj yapısı



Şekil 3.22. Hücre kartı CAN mesaj yapısı

3.5. Kullanılan Bataryanın Parametre Hesabı

Bataryanın modelini oluşturmak için çok sıralı yöntem kullanılarak coulomb sayma metodu ile hücrenin SOC hesabı yapılmıştır. Şekil 3.23’te kullanılan batarya modeli verilmiştir.

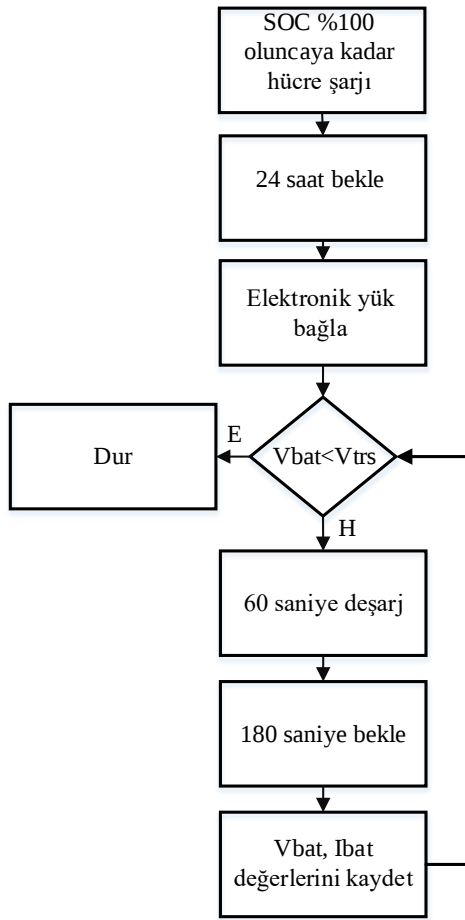


Şekil 3.23. Kullanılan batarya modeli

Kullanılan batarya modeline göre batarya gerilim hesabı Eş. 3.12’de verilmiştir. Denklemden bulunan u_1 ve u_2 sırasıyla R_1C_1 ve R_2C_2 kolları üzerindeki gerilim değerlerini ifade etmektedir. i devreden geçen ana kol akımını göstermektedir.

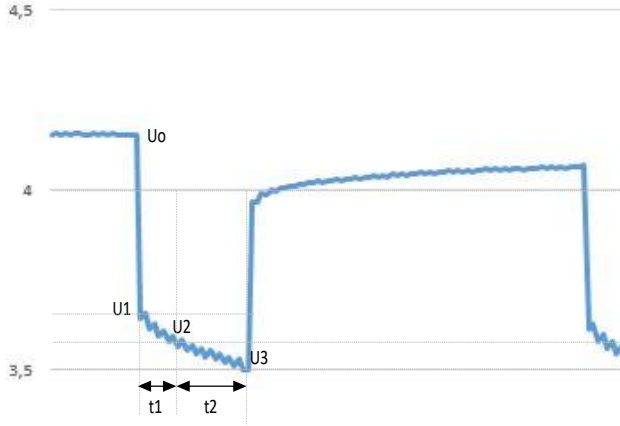
$$V_{bat} = V_{OC} - u_1 - u_2 - R_S \cdot I \quad (3.12)$$

SOC tahmin hesabını yapmak için batarya maksimum gerilim değerine kadar DC güç kaynağı kullanılarak 1.1A akım ile şarj edilmiştir. Batarya şarj edildikten sonra SOC %100 kabul edilir ve hücre 24 saat bekleme bırakılmıştır. 24 saat sonunda hücre elektronik yük devresine bağlanarak hücre 3V yani %0 SOC değerine gelinceye kadar 60 saniye sabit akım deşarjı uygulanmış, 180 saniye bekleme alınarak deney tamamlanmıştır. Şekil 3.24'te deney algoritma şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Darbeli deşarj deneyi algoritması

Şekil 3.25'te bir döngü darbeleri deşarj deneyine ait batarya gerilimi gösterilmiştir. Batarya darbeleri deşarj deneyine başlamadan önce gerilimi u_0 , deneye başladıktan hemen sonra gerilim değeri u_1 , t_1 süre sonunda gerilim değeri u_2 ve t_2 süre sonunda ki gerilim değeri u_3 'tür.



Şekil 3.25. Darbeli deşarj deneyi bir döngü

Batarya modeli üzerinde bulunan R_S , R_1 , R_2 direnç değerlerinin hesabı darbeleri deşarj deneyinde elde edilen grafikte belirtilen u_0 , u_1 , u_2 , u_3 noktaları ile Eş. 3.13'te verilen denklemler ile hesaplanmıştır.

$$R_S = \frac{u_0 - u_1}{I}$$

$$R_1 = \frac{u_1 - u_2}{I}$$

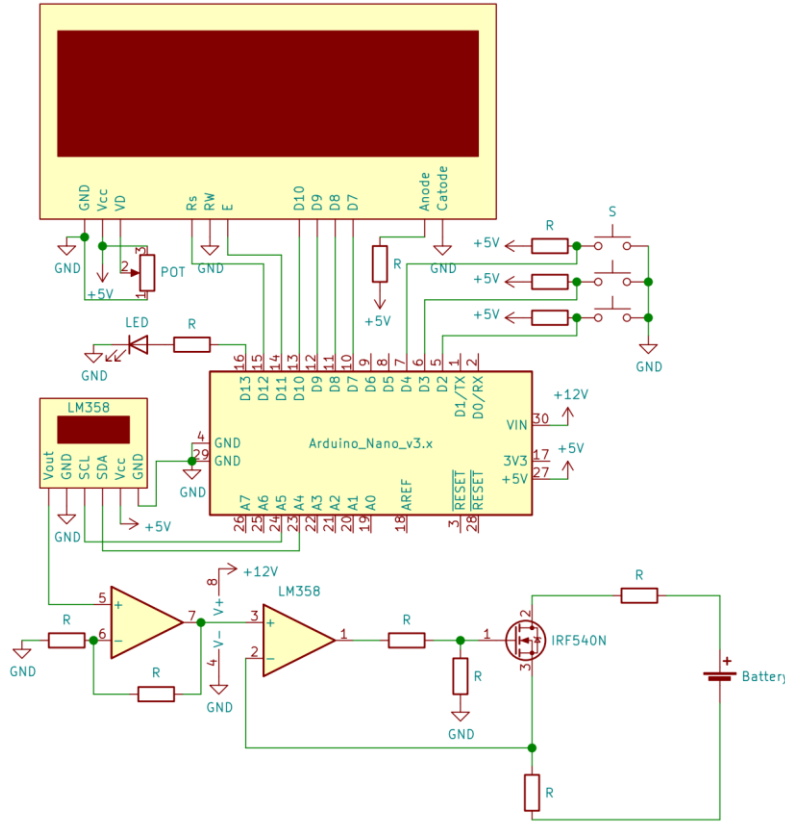
$$R_2 = \frac{u_2 - u_3}{I}$$
(3.13)

Darbeleri deşarj döngüsünde t_1 ve t_2 ile batarya modeli üzerinde bulunan C_1 ve C_2 kondansatör değerleri hesaplanmıştır. Eş. 3.14'te bu denklem verilmiştir.

$$\tau_1 = R_1 \cdot C_1$$

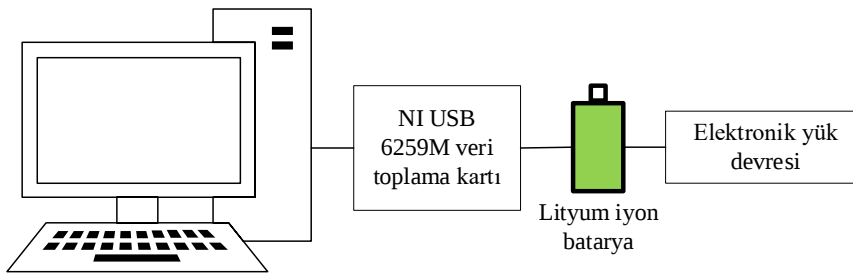
$$\tau_2 = R_2 \cdot C_2$$
(3.14)

Bataryaya darbeleri deşarj deneyi uygulanarak bataryanın açık devre gerilimi ölçülmüştür. Darbeleri deşarj deneyinin amacı bataryanın kısa süreli deşarj darbelerine karşı gerilimin ve SOC değerinin nasıl tepki verdiğini gözlemlemektir. Şekil 3.26'da deney düzeneğinde kullanılan elektronik yük devre şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.26. Elektronik yük devresi

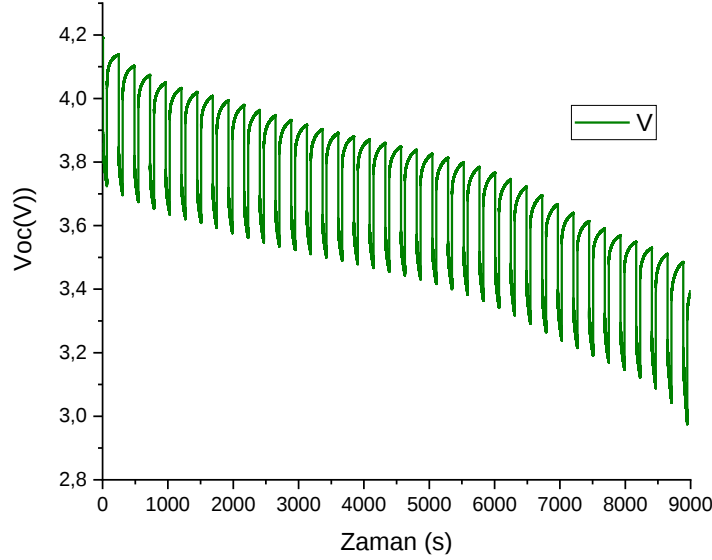
Darbeli deşarj deneyinde kullanılan batarya hücresine bağlı national instruments veri toplama cihazı ile anlık gerilim ölçüm kaydı yapılmıştır. Şekil 3.27’de darbeli deşarj deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Darbeli deşarj deney düzeneği

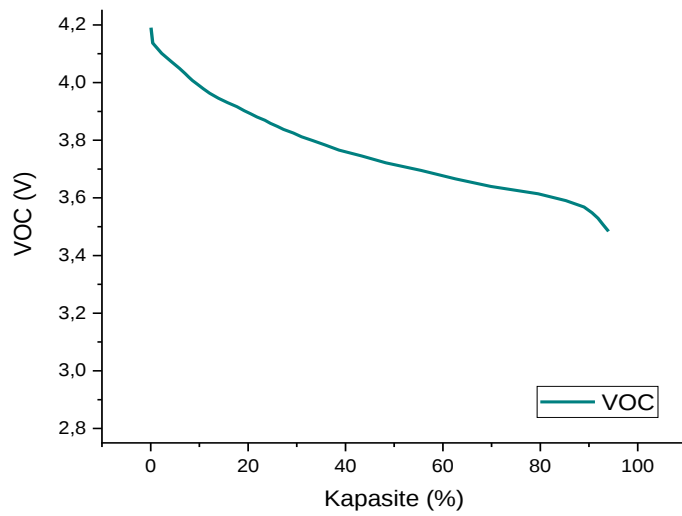
Darbeli deşarj deneyinde batarya hücresine 3A akım uygulanarak 60 saniye deşarj işlemi, 180 saniye batarya bekleme işlemi yapılmıştır. Deşarj işlemine başlanıldığında batarya 4.19 V değerindedir ve deney sonunda 3,00V değerine kadar düştüğü gözlemlenmiştir.

Darbeli ve sürekli olarak akım çekildiği için batarya gerilimi her deney sonunda azalmıştır. Şekil 3.28’de deney sonucuna ait batarya Voc grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.28 Darbeli deşarj deneyi batarya Voc gerilimi

Şekil 3.29’da yapılan test sonucunda elde edilen bataryanın açık devre geriliminin bataryanın kullanılan kapasitesine bağlı değişimi verilmiştir. Kullanılan kapasite ifadesi SOC ifadesinin tam tersini göstermektedir. Kullanılan kapasitenin %100 değeri bataryanın tamamının kullanılmış olduğunu belirtmektedir. Bu durum %0 SOC değerine eşittir.



Şekil 3.29. Voc değerinin kullanılan kapasitesine bağlı değişimi

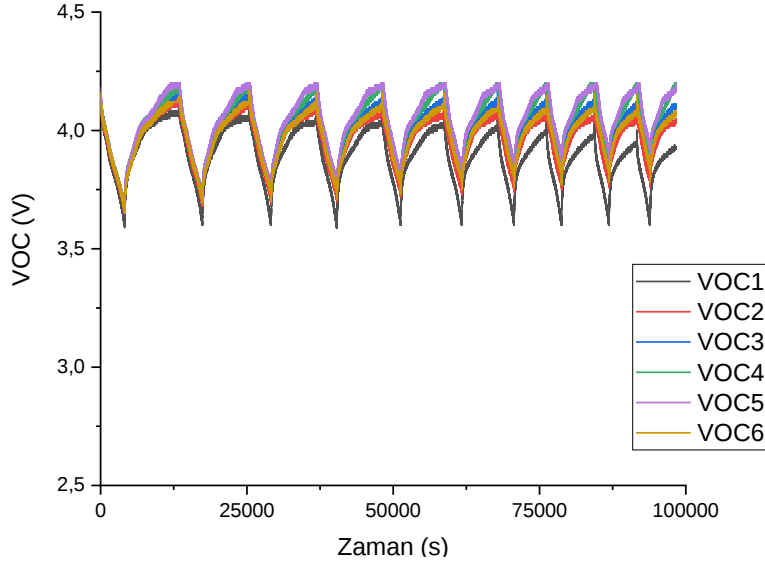
Algoritmada SOC değer tahmini tablo yöntemi (Look Up Table -LUT) ile yapılmıştır. Elde edilen Voc değeri maksimum 4,20V ve minimum 3,00V olarak bir dizi haline getirilmiştir. Her Voc değerine karşılık gelen kapasite değeri hesaplanmıştır. Hesaplana kapasite değeri 100'den çıkarılarak SOC değeri hesaplanmıştır. Hesaplanan SOC değeri ve o anda devrenin ana kol akım değeri formülde (Bkz. Eř.3.12) yerine yazılarak bataryanın anlık Voc değeri hesaplanmıştır.

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde, çalışmada kullanılan batarya hücreleri için iki farklı deney düzeneği sunulmuştur. Birinci deney düzeneğinde batarya hücrelerinde dengeleme sistemi olmadan sürekli şarj ve deşarj deneyleri yapılmıştır. İkinci deney düzeneğinde ise batarya hücrelerinde dengeleme sistemi kullanılarak şarj ve deşarj deneyleri yapılmıştır. Deneylerde deşarj işlemi için elektronik yük devresi, şarj işlemi için DC güç kaynağı kullanılmıştır.

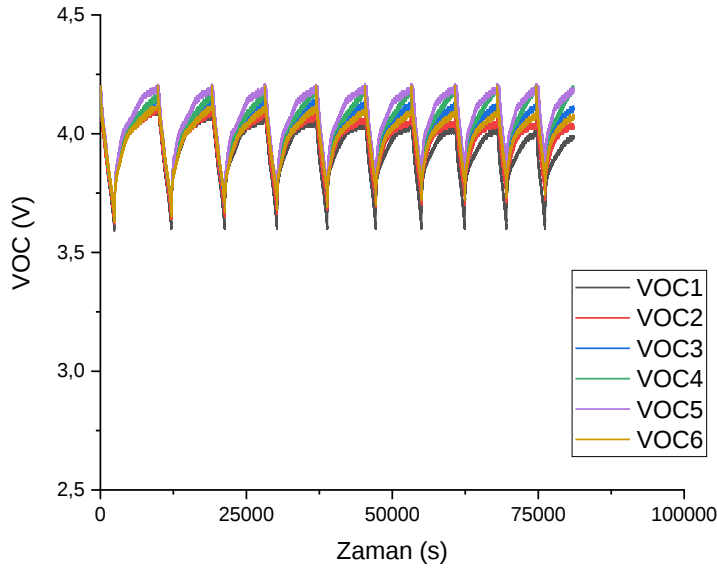
4.1. Dengeleme Sistemi Olmadan Batarya Hücrelerinin Davranış Analizi

Bir batarya paketinin şarj işleminin sonlandırılması maksimum şarj seviyesine ulaşan batarya hücresine göre, deşarj işleminin sonlandırılması minimum deşarj seviyesine ulaşan batarya hücresine göre yapılmaktadır. Deneyde 6 adet LIR18650 model 2200 mAh kapasiteli lityum iyon batarya hücresi seri bağlanarak bir batarya paketi oluşturulmuştur. Oluşturulan batarya paketinin maksimum şarj seviyesi 4,20V (%100 SOC), minimum deşarj seviyesi 3,60V (%20 SOC) değerindedir. Deneyde batarya hücreleri aynı SOC seviyesine getirilmiştir ve batarya paketine önce elektronik yük devresi bağlanarak sabit 1A ile deşarj edilmiştir. İlk hangi hücre minimum deşarj seviyesi 3,60V (%20 SOC) değerine ulaşırsa deşarj işlemi durdurulmuştur. Paket DC güç kaynağı kullanılarak 1A akım ile şarja başlamıştır. İlk hangi hücre maksimum şarj seviyesi 4,20V (%100 SOC) değerine ulaşırsa şarj işlemi durdurulmuştur. Tüm batarya hücrelerinin açık devre gerilimi V_{OC} değerleri seri port ile kaydedilmiştir. Şekil 4.1’de deney sonucunun grafiği gösterilmiştir. Deney sonucu grafikte görüldüğü üzere ilk durumda aynı seviyede olan hücrelerde zamanla aralarında farklılıklar oluşmuştur. 1A akım ile yapılan deney sonucunda 1.batarya hücresinin daha önce minimum deşarj seviyesine ulaştığı, 5.batarya hücresinin daha önce maksimum şarj seviyesine ulaştığı görülmüştür.



Şekil 4.1. 1 A akım ile dengeleme devresi olmadan şarj-deşarj döngüsü

Aynı test 1,75A akım değeri ile de yapılmıştır. Şekil 4.2’de 1,75 A akım ile yapılan deney sonucu gösterilmiştir. 1A akım deneyine göre daha fazla akım çekildiği için deney süresinin daha kısa olduğu görülmüştür.



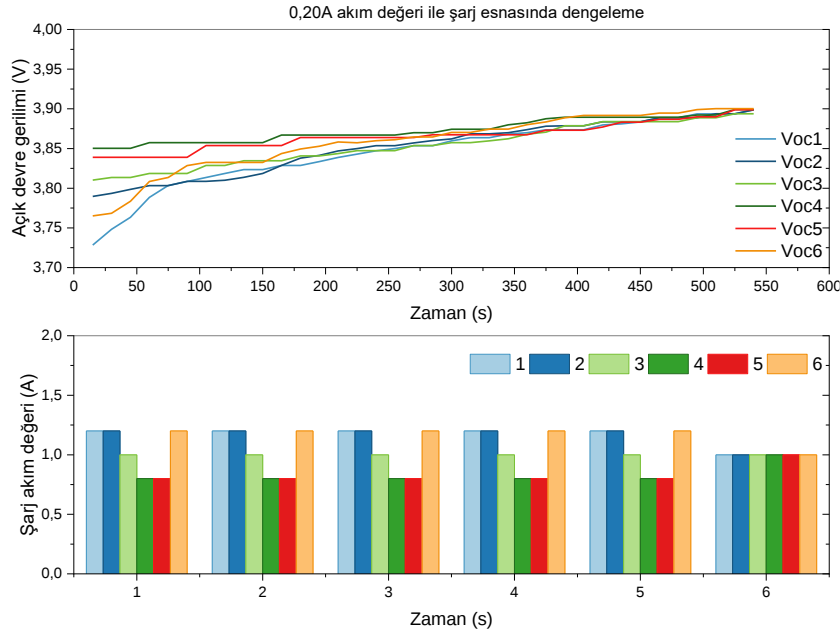
Şekil 4.2. 1,75 A akım ile dengeleme devresi olmadan şarj vedeşarj döngüsü

Yapılan bu deney sonuçlarına göre dengeleme sisteminin olmaması ile hücrelerin eşit seviyelerde şarj vedeşarj edilemediği gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre oluşturulan batarya paketinde 1.batarya hücresinin daha önce minimumdeşarj seviyesine ulaştığı,

5.batarya hücresinin daha önce maksimum şarj seviyesine ulaştığı görülmüştür ve bu durum batarya paketinin kullanılabilir kapasitesini azaltmaktadır.

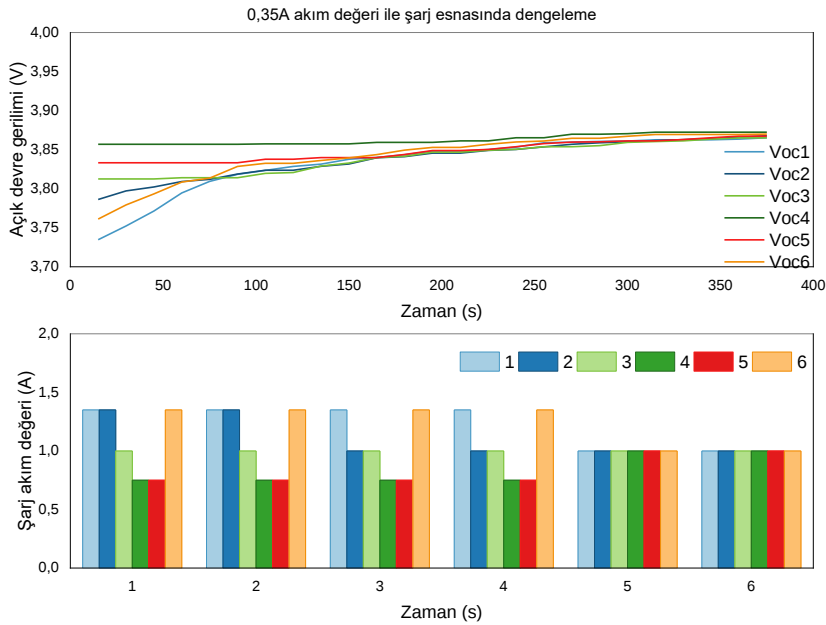
4.2. Dengeleme Sistemi ile Batarya Hücrelerinin Davranış Analizi

Deneyde 6 tane LIR18650 model 2200 mAh kapasiteli lityum iyon batarya hücresi seri bağlanarak bir batarya paketi oluşturulmuştur. Deşarj için elektronik yük devresi, şarj için DC güç kaynağı kullanılmıştır. Deneyde 6 batarya hücresi farklı SOC seviyesine getirilmiştir. Batarya paketine DC güç kaynağı bağlanarak sabit 1A akım ile şarja başlanılmıştır. Referans dengeleme akım değeri 0,20A olarak belirlenmiştir. Batarya paketinin ortalama gerilim değerinin 0,01V altında kalan hücre veya hücreler dengeleme sistemi ile şarj edilerek hücrenin toplam şarj akımı artırılmıştır. Hücrenin şarj akım değeri 1A, dengeleme akım değeri 0,20A ve toplam şarj akım değeri 1,20A olur. Hücrenin şarj akım değeri yükseldiği için şarj seviyesi düşük olan hücrenin dengeye gelene kadar şarjı hızlandırılmış olur. Batarya paketinin ortalama gerilim değerinin 0,01V üstünde olan hücre veya hücreler dengeleme devresi ile deşarj edilerek hücrenin toplam şarj akımı azaltılmıştır. Hücrenin şarj akım değeri 1A, dengeleme akım değeri 0,20A ve toplam şarj akım değeri 0,80A olur. Hücrenin şarj akım değeri azaldığı için şarj seviyesi yüksek olan hücrenin dengeye gelene kadar şarjı yavaşlatılmış olur. Hücreler farklı SOC değerlerine getirilerek paket şarj akım değeri 1A ve referans akım değeri 0,20A olarak test gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3'te teste ait hücrelerin zamana bağlı açık devre gerilimi ve şarj akım değerleri gösterilmiştir.



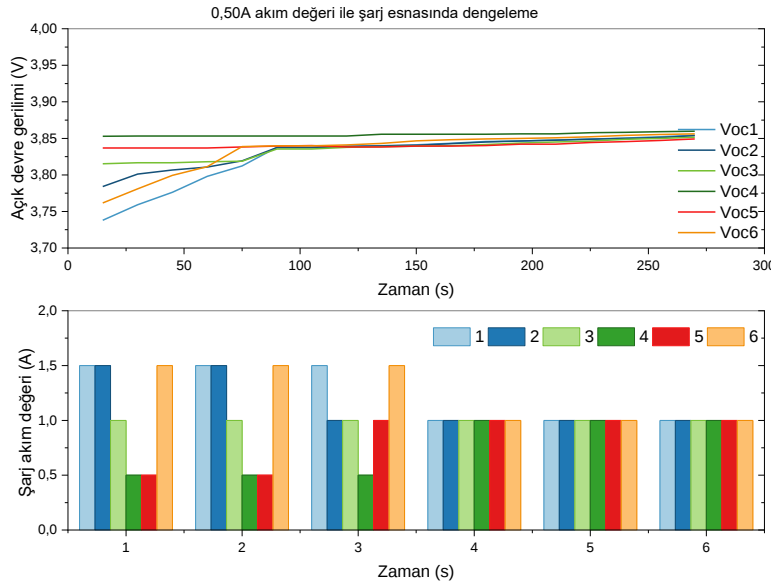
Şekil 4.3. 0,20A referans akım değeri ile şarj durumunda aktif dengeleme

Test referans akım değeri 0,35A değerine ayarlanarak yapılmıştır. 0,35A akım değeri için ortalama gerilim değerinin altında kalan hücreler için toplam şarj akımı 1,35A olurken, ortalama gerilim değerinin üstünde olan hücreler için toplam şarj akımı 0,65A'dır. Şekil 4.4'te teste ait hücrelerin zamana bağlı açık devre gerilimi ve şarj akım değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.4. 0,35A referans akım değeri ile şarj durumunda aktif dengeleme

Test referans akım değeri 0,50A değerine ayarlanarak yapılmıştır. 0,50A akım değeri için ortalama gerilim değerinin altında kalan hücreler için toplam şarj akımı 1,50A olurken, ortalama gerilim değerinin üstünde olan hücreler için toplam şarj akımı 0,50A'dır. Şekil 4.5'te teste ait hücrelerin zamana bağlı açık devre gerilimi ve şarj akım değerleri gösterilmiştir.

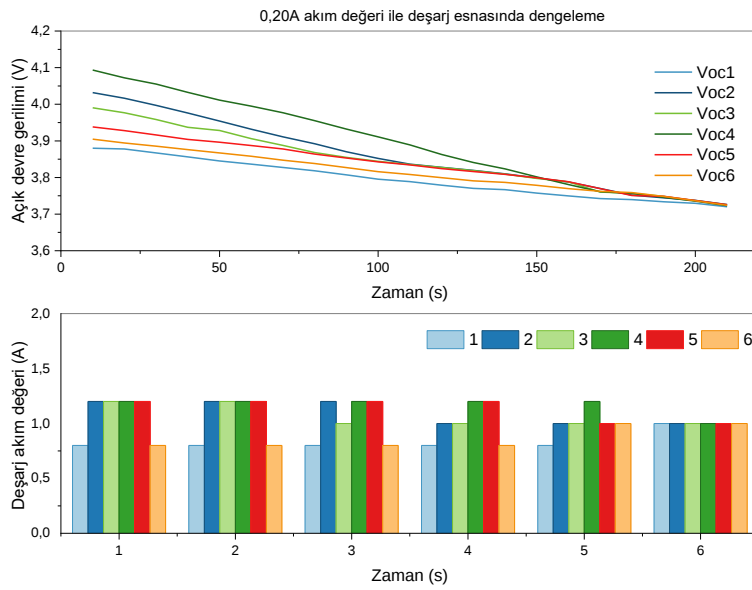


Şekil 4.5. 0,50A referans akım değeri ile şarj durumunda aktif dengeleme

Şarj durumunda farklı aktif dengeleme akım değerleri ile yapılan test sonuçlarına göre, şarj seviyesi düşük olan hücrelerin şarjı hızlandırılmış, şarj seviyesi yüksek olan hücrelerin şarjı yavaşlatılmıştır. Dengeye ulaşıncaya kadar testler devam etmiştir. Test sonuçlarında 0,20A referans akım değerinde hücrelerin 0,35A ve 0,50A referans akımlar için daha uzun bir şarj süresi olmuştur. Dengeleme akım değeri arttıkça dengeleme süresinin kısaldığı, daha hızlı dengeye ulaştığı gözlemlenmiştir.

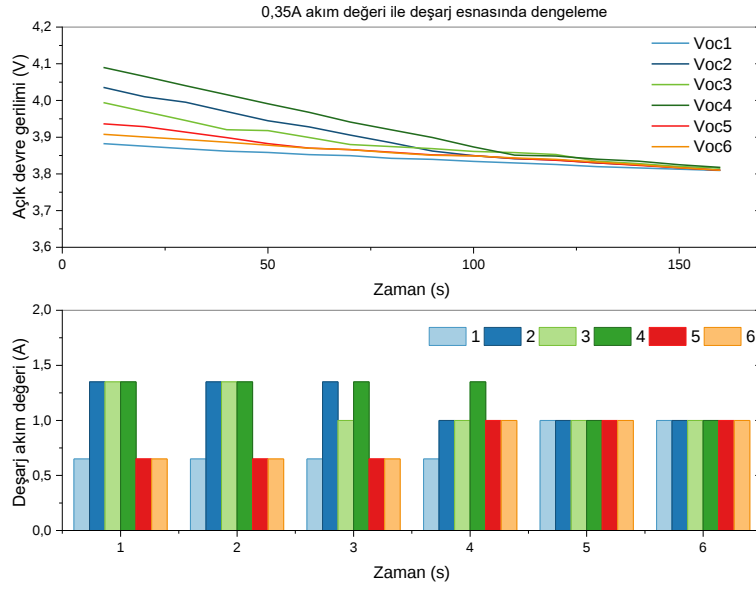
Yapılan sistem deşarj durumda ki hücreler içinde uygulanmıştır. Deşarj için elektronik yük devresi kullanılmıştır. Deney de 6 batarya hücresi farklı SOC seviyesine getirilmiştir. Batarya paketine elektronik yük devresi bağlanarak sabit 1 A akım ile deşarja başlanılmıştır. Dengeleme devresinin referans dengeleme akım değeri 0,20A olarak belirlenmiştir. Batarya paketinin ortalama gerilim değerinin 0,01V altında kalan hücre veya hücreler dengeleme sistemi ile şarj edilerek hücrenin deşarjı yavaşlatılmıştır. Hücrenin deşarj akım değeri 1A, dengeleme şarj akım değeri 0,20A ve toplam akım değeri

0,80A olur. Hücrenin deşarj akımı değeri azaldığı için deşarj seviyesi düşük olan hücrenin dengeye gelene kadar deşarjı yavaşlatılmış olur. Batarya paketinin ortalama gerilim değerinin 0,01V üstünde olan hücre veya hücreler dengeleme sistemi ile deşarj edilerek hücrenin deşarjı hızlandırılmıştır. Hücrenin deşarj akım değeri 1A, dengeleme akım değeri 0,20A ve toplam akım değeri 1,20A olur. Hücrenin deşarj akımı değeri artırıldığı için deşarj seviyesi yüksek olan hücrenin dengeye gelene kadar deşarjı hızlandırılmıştır. Şekil 4.6'da teste ait hücrelerin zamana bağlı açık devre gerilimi ve şarj akım değerleri gösterilmiştir.



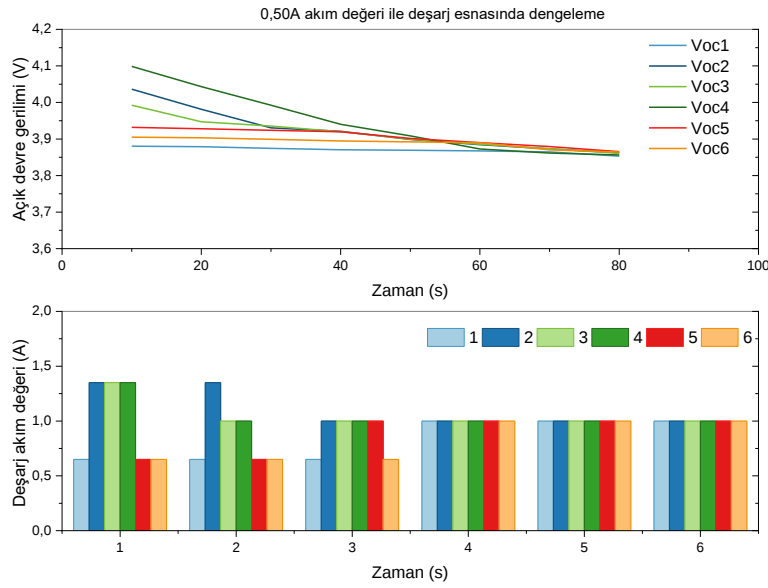
Şekil 4.6. 0,20A referans akım değeri ile deşarj durumunda aktif dengeleme

Test referans akım değeri 0,35A değerine ayarlanarak yapılmıştır. 0,35A akım değeri için ortalama gerilim değerinin üstünde kalan hücreler için toplam deşarj akımı 1,35A olurken, ortalama gerilim değerinin altında olan hücreler için toplam deşarj akımı 0,65A'dır. Şekil 4.7'de teste ait hücrelerin zamana bağlı açık devre gerilimi ve şarj akım değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.7. 0,35A referans akım değeri ile deşarj durumunda aktif dengeleme

Test referans akım değeri 0,50A değerine ayarlanarak yapılmıştır. 0,50A akım değeri için ortalama gerilim değerinin üstünde kalan hücreler için toplam deşarj akımı 1,50A olurken, ortalama gerilim değerinin altında olan hücreler için toplam deşarj akımı 0,50A'dır. Şekil 4.8'de teste ait hücrelerin zamana bağlı açık devre gerilimi ve şarj akım değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.8. 0,50A referans akım değeri ile deşarj durumunda aktif dengeleme

Deşarj durumunda farklı aktif dengeleme akım değeri ile yapılan test sonuçlarına göre, deşarj seviyesi düşük olan hücrelerin deşarjı yavaşlatılmış, deşarj seviyesi yüksek olan hücrelerin deşarjı hızlandırılmıştır. Dengeye ulaşıncaya kadar testler devam etmiştir. Test sonuçlarında 0,20A referans akım değeri hücrelerin 0,35A ve 0,50A referans akımlar için daha uzun bir deşarj dengeleme süresi olmuştur. Dengeleme akım değeri arttıkça dengeleme süresinin kısaldığı, hücrelerin daha hızlı dengeye geldikleri gözlemlenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada elektrikli araçlar için aktif batarya dengeleme sistemi tasarlanmıştır. Yapılan tasarım hücrelerin şarj ve deşarj döngülerinde dengeli bir şekilde ilerlemesini sağlar. Çalışma hem donanımsal hem de yazılımsal bir yapıdan oluşmaktadır. Çalışmada 6 tane LIR18650 model 2200 mAh kapasiteli lityum iyon hücre kullanılmıştır. Her batarya hücresine bir hücre kartı bağlanarak hücrenin gerilim, akım, SOC değerleri sürekli ölçülmekte ve hücre dengeleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Ölçülen bilgiler CAN haberleşme ile ana kontrol kartına gönderilmektedir. Ana kontrol kartından da hücre kartına dengeleme akım değerleri gönderilmektedir. Gelen dengeleme akım değerlerine göre hücre kartlarında bulunan dengeleme sistemleri bulanık mantık kontrolü ile aktif olmaktadır.

Dengeleme sistemi olmadan yapılan testlerde, aynı seviyelerdeki batarya hücrelerinin şarj ve deşarj döngüleri ile aralarında oluşan gerilim farklılığı gösterilmiştir. Testler sonucunda 1.hücrenin minimum deşarj seviyesine diğer hücrelerden önce ulaştığı görülmüştür. 5.hücrenin maksimum şarj seviyesine diğer hücrelerden önce ulaştığı görülmüştür. Hücreler arası oluşan bu farklılıktan dolayı batarya hücreleri tam şarj ve deşarj olamamıştır. Tam şarj ve deşarj döngülerini tamamlayamayan hücrelerden dolayı batarya paket kapasitesi tam olarak kullanılamadığı görülmüştür.

Dengeleme sistemi ile yapılan şarj ve deşarj testlerinde farklı seviyelerdeki batarya hücrelerinin maksimum 0,01V'luk farkla dengeye geldiği görülmüştür. Batarya paketi 1A ile şarj olurken dengeleme akım değeri 0,20A akımdır. Başlangıçta maksimum hücre 3,8502V gerilim değerinde, minimum hücre 3,7283V gerilim değerindedir. Test sonunda maksimum hücre 3,8894V gerilim değerinde iken minimum hücre 3,8796V gerilim değerine ulaşarak dengeye gelmiştir. Batarya paketi 1A ile şarj olurken dengeleme akım değeri 0,35A akımdır. Başlangıçta maksimum hücre 3,8569V gerilim değerinde, minimum hücre 3,7347V gerilim değerindedir. Test sonunda maksimum hücre 3,8704V gerilim değerinde iken minimum hücre 3,8611V gerilim değerine ulaşarak dengeye gelmiştir. Batarya paketi 1A ile şarj olurken dengeleme akım değeri 0,50A akımdır. Başlangıçta maksimum hücre 3,8529V gerilim değerinde, minimum hücre 3,738V gerilim değerindedir. Test sonunda maksimum hücre 3,8578V gerilim değerinde iken minimum hücre 3,8491V gerilim değerine ulaşarak dengeye gelmiştir.

Batarya paketi 1A ile deşarj olurken dengeleme akım değeri 0,20A akımdır. Başlangıçta maksimum hücre 4,0933V gerilim değeri, minimum hücre 3,88V gerilim değeri. Test sonunda maksimum hücre 3,7354V gerilim değeri iken minimum hücre 3,7257V gerilim değeri ulaşarak dengeye gelmiştir. Batarya paketi 1A ile deşarj olurken dengeleme akım değeri 0,35A akımdır. Başlangıçta maksimum hücre 4,0357V gerilim değeri, minimum hücre 3,8825V gerilim değeri. Test sonunda maksimum hücre 3,8175V gerilim değeri iken minimum hücre 3,8093V gerilim değeri ulaşarak dengeye gelmiştir. Batarya paketi 1A ile deşarj olurken dengeleme akım değeri 0,50A akımdır. Başlangıçta maksimum hücre 4,0985V gerilim değeri, minimum hücre 3,8802V gerilim değeri. Test sonunda maksimum hücre 3,8728V gerilim değeri iken minimum hücre 3,8675V gerilim değeri ulaşarak dengeye gelmiştir.

Farklı gerilim seviyelerdeki batarya hücrelerinin 0,20A, 0,35A ve 0,50A dengeleme akım değerlerinde yapılan şarj ve deşarj testlerinde maksimum 0,01V'luk farkla dengeye geldiği görülmüştür. 0,20A dengeleme akımında hücrelerin dengeleme süresi 0,35A ve 0,50A dengeleme akım değerlerine göre daha uzun sürmüştür. Dengeleme akımının fazla olması dengeleme süresini kısaltmıştır. Yapılan testler sonucunda bataryalar için BYS'nin gerekli olduğu görülmüştür. Tasarlanan BYS ile batarya hücreleri aşırı şarj ve deşarj akım değerlerinden korunması sağlanmıştır. BYS'de bulunan dengeleme sistemi ile batarya paketlerindeki hücrelerin dengeli bir şekilde kullanılabilmesi sağlanmıştır. Böylece bataryanın kullanılabilir kapasitesinin ve ömrünün artırılması sağlanmıştır.

Gelecek çalışmalarda yapay zeka teknikleri kullanılarak batarya kapasitesi, ömrü ve güvenliği konusunda optimizasyonlar yapılabilir. Batarya paketinin anlık çalışma koşullarına göre paketin tam kapasite kullanım süresi hakkında tahminler yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Ürgün S., Coruh N., Erfidan T. ve Öztürk S. (2009). FlyBack Dönüştürücü Tasarımı ve Analizi. *EMO Yayınları*, 297.
2. Daowd M., Omar N., Bossche P. and Mierlo J., (2011, September). *Passive and Active Battery Balancing Comparison Based on MATLAB Simulation*. 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 1-7.
3. Karadeniz M., Sezenoğlu C., Balıkçı A. (2012). Elektrikli Araç Batarya Sistemleri İçin Aktif Hücre Dengeleme Sistemi. *Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, Türkiye*, 450–54.
4. Nafiz S. and Alıcı M. ve Yıldız M.N. (2013) Şarj Dengeleme Sistemleri İçin Çift Yönlü Flyback Devresi Tasarımı. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, 472-476.
5. Lin Y.F., Yao-Ching H.,Huang J.C. and Kuan C. (2016, October). *Modular Battery Balancing Circuit Based on Bidirectional Flyback Converter*. In 2016 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT) 1-4 IEEE.
6. Saleh, M., Masoum, M. A., Meek, L., and Abshar, M. (2016, July). *Control algorithm for bidirectional fly-back active cell balancer with interleaved transformer connections*. In 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM) IEEE 1-5.
7. Santos, R. M., Alves, C. L. D. S., Macedo, E. C., Villanueva, J. M., & Hartmann, L. V. (2017, August). *Estimation of lithium-ion battery model parameters using experimental data*. In 2017 2nd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT) 1-6 IEEE.
8. Baccouche, I., Jemmali, S., Mlayah, A., Manai, B., and Amara, N. E. B. (2018). Implementation of an improved Coulomb-counting algorithm based on a piecewise SOC-OCV relationship for SOC estimation of li-IonBattery. *arXiv preprint arXiv:1803.10654*.
9. Yaren T., Süel V. Fırat F. (2017). Gerçek Zamanlı Flyback Dönüştürücü Tasarımı Ve Kontrolü Real Time Flyback Converter Design And Control. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*.
10. Haizhou, Z. (2017). Modeling of Lithium-ion Battery for Charging/Discharging Characteristics Based on Circuit Model. *International Journal of Online Engineering*, 13(6).
11. Narayanaswamy, S., Kauer, M., Steinhorst, S., Lukasiewicz, M., and Chakraborty, S. (2016). Modular active charge balancing for scalable battery packs. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 25(3), 974-987.
12. Sarıkurt, T., Balıkçı, A. (2017). Tam Elektrikli Araçlar İçin Özgün Bir Enerji Yönetim Sistemi Uygulaması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(2).

13. Tian, L., Hong, M., He, Z., and Gao, M. (2018, August). *Active Battery Balancing Circuit Based on Optimized Flyback Convertor for Large Lithium-ion Battery Packs*. In 2018 IEEE 4th International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE) 212-216.
14. Karabeyoğlu, E. D., Güzel, E., Kılıç, H., Sarioğlu, B., Gökdel, Y. D., ve Serincan, M. F. (2019). Investigation and Design of an Active Cell Balancing System for Li-İon Batteries. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(4), 869-877.
15. Banerjee, D., Giri, A., and Saha, S. S. (2019, November). *Active Cell Balancing of Li-Ion Batteries for Electric Vehicles*. In 2nd International Conference on Non-Conventional Energy: Nanotechnology & Nanomaterials for Energy & Environment (ICNNEE).
16. Dange, D., Ballal, R., Murali, M., Sonawane, D. N., and Prakash, A. K. (2019). Design and Development of Automotive Battery Management System. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, 2(2019-28-2498), 1116-1127.
17. Omariba, Z. B., Zhang, L., and Sun, D. (2019). Review of battery cell balancing methodologies for optimizing battery pack performance in electric vehicles. *IEEE Access*, 7, 129335-129352.
18. Kurpiel, W., Deja, P., Polnik, B., Skóra, M., Miedziński, B., Habrych, M., Falkowski-Gilski, P. (2021). Performance of Passive and Active Balancing Systems of Lithium Batteries in Onerous Mine Environment. *Energies*, 14(22), 7624.
19. Conway, T. (2020). An isolated active balancing and monitoring system for lithium ion battery stacks utilizing a single transformer per cell. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(4), 3727-3734.
20. Ziegler, A., Oeser, D., Hein, T., Montesinos-Miracle, D., & Ackva, A. (2021). Reducing cell to cell variation of lithium-ion battery packs during operation. *IEEE access*, 9, 24994-25001.
21. Şahin, F., Kılınç, E. (2022). Elektrikli Araç Batarya Aktif Dengeleme Sistemleri için Çift Yönlü Flyback Dönüştürücü Tasarımı. *Politeknik Dergisi* , 1-1
22. Muratoğlu, Y. ve Alkaya, A. (2016). Elektrikli Araç Teknolojisi ve Pil Yönetim Sistemi-İnceleme. *Elektrik Mühendisliği*, 458, 10-14.
23. Efe, Ş., Güngör, Z. A. (2021). Geçmişten Günümüze Batarya Teknolojisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* , (32), 947-955
24. Yong ,J. Y., , Ramachandaramurthy ,V. K., Tan, K. M., and Mithulananthan, N., (2015) A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, (49), 365–385.

25. Akgündoğdu A., Tiriyaki H., Karadeniz O., Erdoğan G., Şahin U., Yılmaz M., İn S. ve Kocaarslan İ. (2017). Elektrikli Araçlar İçin Batarya Paketi ve Batarya Yönetim Sisteminin Gerçeklenmesi. *World Electro Mobility Conference*.
26. IEA, Global EV Outlook 2022.
27. Enerji Atlas, Enerji Atlas 2022.
28. Chiasson, J., Vairamohan, B. (2003, June). *Estimating the state of charge of a battery*. In Proceedings of the 2003 American Control Conference, 4 (2863-2868)
29. Plett, G. L. (2004). Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 3. State and parameter estimation. *Journal of Power sources*, 134(2), 277-292.
30. Wang, Y., Wei, X., Fang, Q. and Zheng, B. (2018). Bi-Directional Equalization System for Li-Ion Battery Pack Based on Fly-back Transformer. *SAE Technical Paper*.
31. Cao, J., Schofield, N., and Emadi, A. (2008, September). *Battery balancing methods: A comprehensive review*. In 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 1-6.
32. Klrn, W., (2018) Development of Battery Management System for Hybrid Electric Two Wheeler *SAE Mobilus*.
33. Lin, Y. F., Hsieh, Y. C., Wang, J. M., Lin, J. Y., Chiu, H. J., and Lin, K. C. (2016, October). *Modular battery balancing circuit based on bidirectional flyback converter*. In 2016 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT), 1-4.
34. Bowen J. (2020). *Active Cell Balancing Algorithms in Lithium-Ion Battery*. Yüksek Lisans Tezi Chalmers University Of Technology
35. Duraisamy, T., & Kaliyaperumal, D. (2020). Active cell balancing for electric vehicle battery management system. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 11(2), 571.
36. Thiruvonasundari, D., and Deepa, K. (2021). Optimized passive cell balancing for fast charging in electric vehicle. *IETE Journal of Research*, 1-9.
37. Hançar, Y., and Kaymaz, H., (2021) Elektrikli araç batarya yönetim sistemleri için hücre eşitleme yöntemleri *DergiPark*, . 59–73.
38. Scott, K., and Nork, S., (2019) Active Battery Cell Balancing *Analog. Devices*.

39. 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 (2), 848-854.
40. Takeda, Y., and Koizumi, H. (2017, October). *Modularized double-tiered switched capacitor voltage equalizer*. In IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2782-2787
41. Gallardo-Lozano, J., Romero-Cadaval, E., Milanes-Montero, M. I., and Guerrero-Martinez, M. A. (2014). Battery equalization active methods. *Journal of Power Sources*, 246, 934-949.
42. Liu, H., and Xia, C. (2013, August). *An efficient battery balancing scheme in electric vehicle*. In 2013 International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment (2), 541-544
43. Moghaddam, A. F., Van Den Bossche, A. (2018, July). *An active cell equalization technique for lithium ion batteries based on inductor balancing*. In 2018 9th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE) 274-278.
44. Hua, C. C., Fang, Y. H., and Huang, J. F. (2015, October). *Inductor based equalizer with a chain structure of switched capacitor to improve balancing speed*. In 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) 2151-2154.
45. Qi, J., and Lu, D. D. C. (2014, September). *Review of battery cell balancing techniques*. In 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC) 1-6.
46. 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.
47. Xiong, R., Cao, J., Yu, Q., He, H., and Sun, F. (2017). Critical Review on the battery state of charge estimation methods for electric vehicles. *IEEE Access*, 6, 1832-1843.
48. Tezde, E. İ., ve Okumuş, H. İ. (2018). Batarya modelleri ve şarj durumu (SoC) belirleme. *EMO Bilimsel Dergi*, 8(1), 21-25.
49. He, H., Xiong, R., and Guo, H. (2012). Online estimation of model parameters and state-of-charge of LiFePO₄ batteries in electric vehicles. *Applied Energy*, 89(1), 413-420.
50. Shrivastava, P., Soon, T. K., Idris, M. Y. I. B., & 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.

51. Zhou, W., Zheng, Y., Pan, Z., and Lu, Q. (2021). Review on the battery model and SOC estimation method. *Processes*, 9(9), 1685.
52. Hannan, M. A., Lipu, M. H., Hussain, A., and Mohamed, A. (2017). A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 834-854.
53. Danko, M., Adamec, J., Taraba, M., and Drgona, P. (2019). Overview of batteries State of Charge estimation methods. *Transportation Research Procedia*, 40, 186-192.
54. Li, W., Yang, Y., Wang, D., and Yin, S. (2020). The multi-innovation extended Kalman filter algorithm for battery SOC estimation. *Ionics*, 26(12), 6145-6156.
55. He, H., Xiong, R., Zhang, X., Sun, F., and Fan, J. (2011). State-of-charge estimation of the lithium-ion battery using an adaptive extended Kalman filter based on an improved Thevenin model. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(4), 1461-1469.
56. Charkhgard, M., and Farrokhi, M. (2010). State-of-charge estimation for lithium-ion batteries using neural networks and EKF. *IEEE transactions on industrial electronics*, 57(12), 4178-4187.
57. Martin M., Ghazel A. (2017). A Closer Look at State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) Estimation Techniques for Batteries. *Analog Devices*.
58. Algül S. (2008). *Yüksek Güçlü Flyback Dönüştürücü*. Yüksek Lisans Tezi Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
59. Taneri, M. C., Genc, N., and Mamizadeh, A. (2019, September). *Analyzing and comparing of variable and constant switching frequency flyback DC-DC Converter*. In 2019 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA) 1-5.
60. Picard,J.,(2010) Under the hood of flyback SMPS design *Texas Instruments Power Supply Des. Semin*.
61. Ho, T. Y., Chen, M. S., Lin, C. H. and Chang, C. W. (2011, September). *The design of a flyback converter based on simulation*. In 2011 international conference on electronics, communications and control (ICECC) 3996-3999.
62. Mohammed A., Nafie S.M. (2015). Flyback Converter Design for Low Power Application. 2015 *International Conference on Computing, Control, Networking, Electronics and Embedded Systems Engineering (ICCNEEE)* 447–450.
63. Howimanporn, S., and Bunlaksananusorn, C. (2003, November). *Performance comparison of continuous conduction mode (CCM) and discontinuous conduction mode (DCM) flyback converters*. In The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, (2),1434-1438.

64. Picard,J.,(2010),Under the Hood of Flyback SMPS *Designs Texas Instruments Incorporated.*
65. Köseni, H., Yıldız, A. B. (2019). Geri dönüşlü DC-DC dönüştürücünün genelleştirilmiş düğüm denklemleri ile analizi. *Politeknik Dergisi*, 22(1), 179-184.
66. Saranya, P. S., and Chandran, L. R. (2015, April). *Analysis of bidirectional flyback converter*. In 2015 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC) 425-429.
67. Van der Werk, B., Koolman, G., and Gerrits, T. (2017). Design of a Bi-directional Flyback DC/DC converter: For a stand-alone solar-powered eBike charging station.
68. İnternet EEMB Marka LIR18650 2200 mAh Batarya özellikleri (2022)
Web:https://cdn.ozdisan.com/ETicaret_Dosya/353384_7637345.PDF. Erişim Tarihi: 01.12.2022
69. Nguyen, A. T., Taniguchi, T., Eciolaza, L., Campos, V., Palhares, R., and Sugeno, M. (2019). Fuzzy control systems: Past, present and future. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 14(1), 56-68.
70. Hamam, A., & Georganas, N. D. (2008, October). *A comparison of Mamdani and Sugeno fuzzy inference systems for evaluating the quality of experience of Hapto-Audio-Visual applications*. In 2008 IEEE International Workshop on Haptic Audio visual Environments and Games. 87-92.
71. Shleeg, A. A., and Ellabib, I. M. (2013). Comparison of mamdani and sugeno fuzzy interference systems for the breast cancer risk. *International Journal of Computer and Information Engineering*, 7(10), 1343-1347.
72. Vinogradov, A., Terentev, A., Kochetkov, M., & Petrov, V. (2019, January). *Model of fuzzy regulator of mobile robot motion control system*. In 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. (EIConRus) 2109-2112 .
73. Zhang, H., Liu, D. (2006). Fuzzy modeling and fuzzy control. *Springer Science & Business Media.*
74. Liang, H., Zou, J., Zuo, K., Khan, M. J. (2020). An improved genetic algorithm optimization fuzzy controller applied to the wellhead back pressure control system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 142, 106708.



Gazili olmak ayrıcalıktır