

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**PI, SVPWM ZAMANLAYICI VE FARKLI LYAPUNOV ALGORİTMALARI
KULLANILARAK BATARYA ŞARJ SÜRELERİ VE KARARLILIKLARIN
KIYASLANMASI**

Doğukan ÖZTÜRK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OCAK 2023

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**PI, SVPWM ZAMANLAYICI VE FARKLI LYAPUNOV ALGORİTMALARI
KULLANILARAK BATARYA ŞARJ SÜRELERİ VE KARARLILIKLARIN
KIYASLANMASI**

Doğukan ÖZTÜRK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OCAK 2023

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PI, SVPWM ZAMANLAYICI VE FARKLI LYAPUNOV ALGORİTMALARI
KULLANILARAK BATARYA ŞARJ SÜRELERİ VE KARARLILIKLARIN
KIYASLANMASI**

Doğukan ÖZTÜRK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OCAK 2023

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PI, SVPWM ZAMANLAYICI ve FARKLI LYAPUNOV ALGORİTMALARI
KULLANILARAK BATARYA ŞARJ SÜRELERİ VE KARARLILIKLARIN
KIYASLANMASI**

Doğukan ÖZTÜRK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez / / 2023 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Dr.Öğr.Üyesi Yalçın ALBAYRAK

Doç.Dr. Övünç POLAT

Dr.Öğr. Üyesi Mehmet Erhan ŞAHİN

ÖZET

PI, SVPWM ZAMANLAYICI VE FARKLI LYAPUNOV ALGORİTMALARI KULLANILARAK BATARYA ŞARJ SÜRELERİ VE KARARLILIKLARIN KİYASLANMASI

Doğukan Öztürk

Yüksek Lisans Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Yalçın ALBAYRAK

OCAK 2023; 61 sayfa

Lityum iyon pillerinin kullanım alanı büyük bir hızla artmaktadır. Bunun yanı sıra gelişen teknoloji ile daha yüksek kapasitede, daha hızlı şarj sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Tarihsel süreç boyunca yeni gelişen sistemlere, daha önceden başka sistemler üzerinde başarılı kontrol yöntemleri uyarlanmıştır. Buradan yola çıkarak daha önce batarya şarj sistemlerinde zaten başarılı olan PI algoritmasına yeni bir zamanlayıcı eklendi. Bu zamanlayıcı, elektrikli motor sürücü devrelerinde oldukça popüler olan SVPWM tekniği yardımıyla bataryaya uyarlanmıştır. Lyapunov'un farklı kararlılık teorileriyle sistemin davranışları kıyaslanmıştır. Batarya yönetim sisteminin bir konusu ise bataryanın nasıl şarj edileceğidir. Eski şarj devreleri daha çok elektronik tabanlı olup daha az yazılıma sahiptir ancak günümüzde devre elemanları üzerindeki kayıpları azaltmak ve daha küçük şarj devreleri elde etmek amacıyla matematiksel kontrol algoritmaları kullanılarak daha sağlıklı bir hızlı şarj yöntemi isteği vardır. Bu çalışmada daha önceden şarj devreleri için kullanılmış çift yönlü dönüştürücü devresi ve PI algoritmasına ek olarak motor sürücü devreleri ile batarya şarj devrelerindeki benzerlikten yararlanarak SVPWM tekniği yüksek güç aktarımı için şarj devresinde kullanılmıştır. Ayrıca bu teknik, batarya doluma yaklaştıkça batarya üzerindeki zorlamaları optimize edebilmek için akımı zamanla azaltmaktadır. Daha sonra Lyapunov kararlılık algoritmaları sisteme eklenip kararlılık durumları birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bu kıyaslar zamana karşı akım, voltaj, SoC ve sıcaklık grafikleri ile ele alınmıştır. Kontrol algoritmalarının akım ve voltajdaki dalgalanmalarını azaltarak sistemi daha kararlı hale getirdiği simülasyon üzerinde gösterilmiştir. Şarj edilen bataryanın önerilen akım ve gerilim miktarına en erken sürede ulaşan, en az dalgalanmaya ve en az ısınmaya neden olan topoloji daha başarılı bir yöntem olacaktır. Pil parametreleri bilindiği zaman SoH hakkında yorum yapmak mümkündür. Yeni yöntemler eklendiğinde batarya iç direnci değişim hızı daha yavaş olmasıyla daha sağlıklıdır. Sağlık yorumu sadece Kalman filtresiyle değil, kontrol algoritmalarının önemli parametreleri kullanılarak da değerlendirilmiştir. Sistem kararlılığı; oturma süresi, aşma miktarı gibi temel ve önemli kontrol parametreleri kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmanın nasıl geliştirilebileceğine dair yorumlar yapılmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Gürbüz Lyapunov, Lityum İyon Pil, PI, SoC, SoH, SVPWM.

JÜRİ: Dr.Öğr.Üyesi Yalçın ALBAYRAK

Doç.Dr. Övünç POLAT

Dr.Öğr. Üyesi Mehmet Erhan ŞAHİN



ABSTRACT

COMPARISON OF BATTERY CHARGE TIMES AND STABILITIES USING PI, SVPWM TIMER AND DIFFERENT LYAPUNOV ALGORITHMS

Doğukan ÖZTÜRK

MSc Thesis in Department of Electric-Electronic Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr Yalcin ALBAYRAK

JANUARY 2023; 61 pages

The usage area of lithium-ion batteries is increasing rapidly. Additionally, with the developing technology, higher capacity, and faster charging systems have been needed. Control methods previously achieved on other systems have adapted to newly developed systems throughout the historical process. Based on this, a new timer has been added to the PI algorithm, which was already successful in the battery charging systems. This timer was implemented in the battery with the help of the SVPWM technique, which is extremely popular in electric motor drive circuits. The system's behaviour has been compared with different stability theories of Lyapunov. One issue with the battery management system is how to charge the battery. The old charging circuits are mostly electronic based and have less software, but today there is a demand for a healthier fast charging method using mathematical control algorithms to reduce the losses on the circuit elements and to obtain smaller charging circuits. In this study, in addition to the bidirectional converter circuit and PI algorithm previously used for the charging circuits, the SVPWM technique has been used in the charging circuit for high power transfer by taking advantage of the similarity between the motor driver circuits and the battery charging circuits. Additionally, this technique reduces the current over time to optimize the strains on the battery as the battery approaches full charge. Then, the Lyapunov stability algorithms have been added to the system, and the stability states were compared with each other. These comparisons were handled with graphs of current, voltage, SoC, and temperature against time. It has been shown in the simulation that the control algorithms make the system more stable by reducing the fluctuations in current and voltage. The topology that reaches the recommended current and voltage amount of the charged battery in the earliest time reaches the least amount of fluctuation and causes the least heating of the battery will be a more successful method. It is possible to comment on the SoH when the battery parameters are known. When new methods have added to the system, the battery's internal resistance change rate is slower and healthier. The health interpretation has been evaluated not only using the Kalman filter but also using the essential parameters of the control algorithms. The system stability was investigated using significant control parameters such as settling time and overshoot. Comments have been made on how this study could be improved.

KEYWORDS: Lithium-ion battery, PI, Robust Lyapunov, SoC, SoH, SVPWM.

COMMITTEE: Asst. Prof. Dr Yalcin ALBAYRAK
Asoc. Prof. Dr Övunc POLAT
Asst. Prof. Dr Mehmet Erhan ŞAHİN



ÖNSÖZ

Kendi tasarladığım bir ürünü kullanabilmenin vereceği haz beni mühendis olmaya ve insanlığa faydalı olabilme isteği ise bilimsel çalışmalara yöneltti. Tezin sonunda uzun uğraşlar sonrasında bir şeyleri başarmanın verdiği mutluluğunu yaşıyorum. Bu süreç kendimi daha da geliştirmem ve değişen dünyaya faydalı olabilmem için heyecanımı arttırdı. Problem tespit etme ve çözme yeteneklerimi geliştiren çok sayıda öğretmenler tanıdığım için kendimi şanslı hissediyorum.

Yüksek lisansın ilk yılında merhum Dr.Öğr.Üyesi Yavuz ÜSER ile birlikte elektrikli motorların sürücü devresi üzerinde çalışıyordum. Danışman hocamın önerisi ile İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol Mühendisliği Bölümü'nden özel öğrenci olarak yüksek lisans dersleri aldım ve kontrol alanında uzmanlaşmaya başladım. Dr.Öğr.Üyesi Yalçın ALBAYRAK'ın bana batarya sistemleri hakkında bilgi verdiği sırada elektrikli araçların sürücü devresi ile batarya şarj devresi arasındaki benzerlikler hakkında fikir sahibi olmaya başladım. Yavuz hocamızın vefatı sonrasında beni algoritma yöntemleriyle tanıştıran Dr.Öğr.Üyesi Yalçın ALBAYRAK ile bataryalar üzerinde çalışma kararı aldık. Bu süre zarfında Polonya'nın en iyi üniversitelerinden biri olan AGH Üniversitesi'nde eğitim almam için Dr.Öğr.Üyesi Yalçın ALBAYRAK tarafından teşvik edildim. 3 farklı Üniversite'den kontrol dersleri alarak bu tezi tamamlama fırsatı buldum.

Bu çalışmanın ilerleyen yıllarda daha az enerji tüketimi ve daha temiz çevre koşulları sağlayarak insanlığa faydalı olmasını ümit ediyorum. Yaşadığım tüm zorluklara karşı bana verdikleri tüm destekler için her iki danışman hocama ve daima yanımda olan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ.....	v
AKADEMİK BEYAN	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	13
3. MATERYAL VE METOT	16
3.1. Lityum İyon Pil	16
3.2. Yarım Köprü 2 Kademeli Çift Yönlü DC/DC Dönüştürücü.....	17
3.3. Sabit Gerilim Şarj Yöntemi.....	18
3.4. Sabit Akım Şarj Yöntemi	18
3.5. Değişen Akım ve Değişen Voltaj (Kombine) Şarj Yöntemi.....	19
3.6. Pasif Dengeleme.....	19
3.7. SoC Hesaplaması	21
3.8. PI Kontrol Algoritması.....	22
3.9. Batarya İçin Uyarlanmış Asenkron Motor SVPWM Zamanlayıcı	24
3.10. Lyapunov Bilinen Bazlı Model.....	25
3.11. Gürbüz (Robust) Denetim	28
3.12. Yüksek Frekans Lyapunov.....	28
3.13. Yüksek Kazançlı Lyapunov	29
3.14. Kokusuz Kalman Filtresi Kullanarak Direnç Değişimi ve SoH Tahmini.....	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	32
5. SONUÇLAR	52
6. KAYNAKLAR	54
7. EKLER.....	61
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “PI, SVPWM Zamanlayıcı ve Farklı Lyapunov Algoritmaları Kullanılarak Batarya Şarj Süreleri ve Kararlılıkların Kıyaslanması” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

/01/2023

Öğrencinin Adı Soyadı

İmzası

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Amper
V	: Volt
°C	: Celsius
Ω	: Ohm
m	: Mili
s	: Saniye
(.)	: Ondalık ayırıcı

Kısaltmalar

BMS	: Battery Management System
CAN	: Controller Area Network
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DSP	: Digital Signal Processor
DSVM	: Discrete Space Vector Modulation
FOC	: Field Oriented Control
I ² C	: Inter-Integrated Circuit
IPM	: Intelligent Power Module
JFET	: Junction Field Effect Transistor
Li-ion	: Lityum İyon
MOSFET	: Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
PMSM	: Permanent Magnet Synchronous Motor
PWM	: Pulse With Modulation
SoC	: State of Charge
SoH	: State of Health
SPI	: Serial Peripheral Interface

SPWM	: Sinus Pulse With Modulation
SVM	: Space Vector Modulation
SVPWM	: Space Vector Pulse With Modulation
THD	: Total Harmonic Distortion
UART	: Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
YSA	: Yapay Sinir Ağı



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Pasif dengeleme şeması	6
Şekil 1.2. Pasif dengeleme basitleştirilmiş devresi	7
Şekil 1.3. Dengeleme durumları karşılaştırılması	8
Şekil 3.2.1. Çift kademe şarj çıkışlı çift yönlü konverter	18
Şekil 3.6.1. Simulink basit dengeleme çizimi	20
Şekil 3.7.1. SoC blokları	22
Şekil 3.8.1. PI kontrol algoritması	23
Şekil 3.8.2. Şarj kontrol blokları	23
Şekil 3.8.3. Deşarj kontrol blokları	23
Şekil 3.9.1. SVPWM fonksiyonları	24
Şekil 3.9.2. Ta, Tb ve Tc fonksiyonları	25
Şekil 3.10.1. Simulink Lyapunov blokları	26
Şekil 3.10.2. x ve x_d fonksiyonlarının farkının alınması	27
Şekil 3.10.3. Tam bazlı bilinen Lyapunov şeması	28
Şekil 4.1. Şarj devresi ve batarya Simulink bağlantısı	32
Şekil 4.2. Herhangi bir kontrol tekniksiz şarj simülasyonu çıktısı; şarj durumu (a), batarya voltajı (b), batarya akımı (c) ve batarya sıcaklığı (d)	33
Şekil 4.3. Parametreleri optimize edilmemiş PI ile şarj simülasyon çıktısı; şarj durumu (a), batarya voltajı (b), batarya akımı (c) ve batarya sıcaklığı (d)	34
Şekil 4.4. PI algoritmasına ilave edilmiş batarya için uyarlanmış SVPWM zamanlayıcısı ile şarj simülasyonu; şarj durumu (a), batarya voltajı (b), batarya akımı (c) ve batarya sıcaklığı (d)	35
Şekil 4.5. PI, SVPWM ve tam bilinen model bazlı Lyapunov kararlılık yöntemi ile şarj simülasyonu; şarj durumu (a), batarya voltajı (b), batarya akımı (c) ve batarya sıcaklığı (d)	37
Şekil 4.6. Parametreleri optimize edilmiş PI ile şarj simülasyonu; şarj durumu (a), batarya voltajı (b), batarya akımı (c) ve batarya sıcaklığı (d)	38
Şekil 4.7. Optimize edilmiş PI, batarya için uyarlanmış SVPWM zamanlayıcısı ve Lyapunov kararsızlık ilkesi ile şarj simülasyonu; şarj durumu (a), batarya voltajı (b), batarya akımı (c) ve batarya sıcaklığı (d)	40

Şekil 4.8. Gürbüz (Robust) yüksek frekans Lyapunov ile şarj simülasyonu; şarj durumu (a), batarya voltajı (b), batarya akımı (c) ve batarya sıcaklığı (d).....	41
Şekil 4.9. Yüksek kazanç düşük epsilon ile simülasyon; şarj durumu (a), batarya voltajı (b), batarya akımı (c) ve batarya sıcaklığı (d)	43
Şekil 4.10. Yüksek kazanç yüksek epsilon ile simülasyon; şarj durumu (a), batarya voltajı (b), batarya akımı (c) ve batarya sıcaklığı (d).....	44
Şekil 4.11. Çoklu hücre PI kontrol akım çıkışı.....	46
Şekil 4.12. Çoklu hücre PI kontrol voltaj çıkışı.....	47
Şekil 4.13. Çoklu hücre PI, SVPWM ve Lyapunov ile kontrolünde akım çıkışı	47
Şekil 4.14. Çoklu hücre PI, SVPWM ve Lyapunov ile kontrolünde voltaj çıkışı	48
Şekil 4.15. Dengesiz pil gruplarının pasif dengeleme ile dengelenmesi; batarya 1 (a), batarya 2 (b) ve batarya 3 (c)	48
Şekil 4.16. Sadece PI kontrol algoritması uygulandığında Kalman tahmini	49
Şekil 4.17. Tüm yöntemler birlikte uygulandığında Kalman tahmini	49

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.1. Pil parametreleri.....	16
Çizelge 3.1.2. Şarj modları (Anonymous 3)	16
Çizelge 4.1. Yüksek kazanç değişimi	42
Çizelge 4.2. Yüksek kazanç düşük epsilon ile değişimi	44
Çizelge 4.3. Yüksek kazanç yüksek epsilon ile değişimi	46
Çizelge 4.4. Kontrol kararlılık parametreleri	46
Çizelge 5.1. Batarya için uygulanmış kontrol tekniklerin karşılaştırılması.....	53



1. GİRİŞ

Yüksek batarya maliyeti, bataryayı her an kullanabilme isteği, yedek batarya taşımak ve batarya bağlantılarını değiştirmenin zorluğu hızlı şarj sistemlerini hızlı bir ivme ile popüler haline getirmiştir. Birçok endüstriyel ve akademik alanda en hızlı, sağlıklı ve maliyetsiz yöntemler için arayışa çıkılmıştır. Gelişim sürecinin kronolojik yapısını bilmek gelecekte yapılacak olan araştırmalara ışık tutacaktır. Bu yöntemler fiziksel devreler ile birlikte olmakla birlikte çok sayıda matematiksel hesaplamaların programlandığı algoritmalarından da oluşabilir. Mikrodenetleyicilerin çalışma hızı, hata payları gibi birçok etkenler algoritmaların kullanımında problemlere yol açabilir. Bu sebeple eski yıllardaki araştırmaların çoğunluğu şarj için kullanılabilecek inverter, konverter, filtre devreleri üzerine yapılmıştır. Literatürde çok sayıda şarj devresi bulunmakla birlikte bu topolojileri geliştirmek hem ekonomik açıdan hem de mühendislik ve zaman açısından daha maliyetli bir hâle gelmiştir. Daha hızlı ve ekonomik şarj sistemlerine olan ihtiyaç, sensörlerden gelen verileri hesaplama fikrini doğurmuştur. Mühendislik alanında matematiğin uygulanabilirliğinin artmasıyla kontrol mühendisliği başka bir boyut kazanmıştır. Bu sistemler ilk önce bataryaları kontrol etmek için uygulanmamış olsa da aynı algoritmaları başka sistemlere uyarlamak mümkün olmuştur. Örnek vermek gerekirse, internet üzerinde arama araçlarında PID kontrol algoritmalarını arattığımız zaman genellikle ısı ve denge sistemleri uygulamaları ile karşılaşırız. Buradaki temel matematiksel işlemler yeni sistemlerin dinamiklerine göre yıllar içinde uyarlanmıştır ve halen çok sayıda sistem için yeni arayışlar devam etmektedir. Batarya şarj sistemleri için bakıldığında zaman, taşınabilir pilli istemler hızlıca artmakta ve daha büyük enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacı karşılayabilmek için pil boyutları büyütülmüş ve çoklu pil grupları halinde paketler geliştirilmiştir. Bu gelişimin en büyük dezavantajlarından bir tanesi süredir. Mobil telefonlar ve elektrikli araçlardan örnek verecek olursak, maksimum şarj kapasitesi artırıldı ancak şarj devreleri aynı oranda geliştirilemediği sürece şarj süreleri uzayacaktır ve kullanıcılar telefonları ya da arabalarını kullanmak istedikleri herhangi bir zamanda kullanamama durumlarıyla karşılaşacaktır. Bunun için olabildiğince daha hızlı ama aynı zamanda kullanılan elektrikli eşyalara zarar vermeyen daha gelişmiş bir şarj tekniği gerekmektedir. Şarj aletlerinin taşınabilirliği de oldukça önemlidir. Bu sebeple bu sorun sadece elektroniksel olarak çözülmesi pek mümkün değildir. Diğer büyük problem ise çoklu pil gruplarında dengeleme işlemidir. Aynı fabrikada üretilmiş pillerde dahi hata payı, pilinin kalan ömrü gibi etkilerden kaynaklanan farklar oluşur. Şarj sırasında bu farklar, tüm pillerin eşit potansiyelde şarj olmasını engeller. Farklı potansiyeller, fiziksel yollarla kendini hızlı bir şekilde eşitlemeye çalışır. Ancak bu durum yangın ve patlama gibi risklere yol açacaktır. Bu dengelemenin kontrollü bir şekilde yapılması gerekmektedir. Tam bu noktada batarya yönetim sistemleri (BMS) büyük önem kazanıyor.

Batarya yönetim sistemi, batarya sağlığını ve güvenliğini korumak amacıyla dolum ve boşaltım sürecini takip eden bir sistemdir. Bu yönetim ile riskler minimize edilir. Koşulları ideal değerlerde tutmayı hedefleyen elektronik bir yapıya sahiptir. Ayrıca arıza durumunu tespit etme görevi de vardır. BMS yüksek akım veya gerilim, kaçak akım gibi istenmeyen durumlarda direkt olarak müdahale edebilecek bir yapıda olmalıdır.

BMS'in görevlerini başlıca veri izleme, hesaplama, koruma ve optimizasyon olmak üzere dört temel grupta incelenebilir. Veri izlemede sensörlerden gelen bilgiler sayesinde akım, voltaj, sıcaklık, deşarj durumu gözlemlenir ve bu bilgilerden

yararlanarak SoC (State of Charge), SoH (State of Health) değerleri hesaplanır ve tahmin edilir. Tüm bu işlemlerin, ilerleyen zamanlarda daha doğru tahmin yapılabilmesi için kesinlikle raporlanması gerekmektedir. Bu durumda hesaplama ve veri izlemenin kesiştiği noktalar var diyebiliriz. Bataryanın toplam döngüsü ve çalışma süresinin hesaplanması bataryanın kalan ömrünü tahmin etmek için oldukça yaygın kullanılır. Koruma ise, olası ya da beklenmedik durumda istenilen değerlerin dışında akım, voltaj, sıcaklık, basınç gibi durumda bataryanın ve çevrenin güvenliğinden sorumludur. Tüm bu başlıkları ele aldıktan sonra maksimum verimlilikte ve güvenlikte sistemi çalıştırmak için optimizasyon yapılır. Gerekli durumda sistem kapatılır ya da pil belirli oranda boşaltılabilir ya da enerji başka bir hücreye aktarılabilir. Optimizasyon için şarj tekniklerinin önemi kadar dengeleme sistemleri de hayati rol oynamaktadır.

Dengeleme sistemlerini pasif, aktif, kayıpsız dengeleme ve redoks mekaniği olmak üzere dörde ayırabiliriz. Pasif dengeleme sistemleri uygulanabilirlik açısından oldukça kolaydır ancak enerji kaybı da bir o kadar fazladır. Pil potansiyelleri daima sensörler tarafından ölçülür. Yüksek potansiyele sahip pil ya da piller en düşük voltaja sahip olan pilin seviyesine ulaşınca kadar direnç sayesinde deşarj olurlar. Burada enerji güvenli bir şekilde ısı enerjisine dönüşür. Dönüşen bu enerjilerin kullanılamaması sebebiyle kayıplar oldukça fazladır. Buna karşılık olarak pasif dengeleme sistemleri maliyet açısından oldukça ekonomiktir. Düşük maliyetli ve az sayıda devre elemanları kullanılır. Tasarım kolaylığından kaynaklı mühendislik maliyeti de oldukça azdır. Mükemmel çalışan bir sistem yani hücreler arasında potansiyel fark olmayan bir paket enerjiyi israf etmez ve hücrelerin daima eşit SoC seviyesinde olduğu bilinir. Bu avantajlar yeni kontrol algoritmalarını test edilmek istendiğinde pasif dengeleme tercihinin ön plana çıkarır. Hızlı bir biçimde, güvenilirliği kanıtlanmış bir sisteme merak edilen algoritma uyarlanır. Bu hem endüstriyel hem de akademik açıdan oldukça önemlidir. Örneğin bu tezin amacı dengeleme sistemlerini kanıtlamak değildir. Şarj sistemleri için yeni olan kontrol algoritmalarının bu sistemlerle birlikte verimli ve güvenilir bir şekilde çalışıp çalışmadığını kontrol etmektir. Bu yüzden uygulanabilirliği en kolay olan pasif dengeleme sistemi seçilmiştir. Çünkü zayıf termal yönetim, tam kapasite şarj edememe gibi dezavantajlar denenecek olan algoritmaları engelleyecek bir durum değildir. Yine de enerjinin ısıya dönüştürülmesinin termal probleme yol açılabileceği göz ardı edilmemelidir.

Aktif dengeleme sistemleri pasif dengeleme sistemlerine nazaran daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Daha yüksek hücre voltajına ulaşan pil üzerindeki enerji konverterler yardımıyla ortak bir baraya aktarılır. Ortak baradaki bu enerji ters yönde çalışan konverterler yardımıyla düşük potansiyele sahip hücrelere aktarılır. Burada kayıplar olabildiğince düşüktür. Şarj sırasında ya da kullanım sırasında oluşan bir farkta enerjinin ısıya dönüştürülmesine ihtiyaç yoktur. Bu avantajlara karşılık devre daha maliyetlidir. Enerjiyi güvenli bir şekilde ve doğru oranda transfer etmek gereklidir. Hesaplamalar oldukça hassas bir şekilde yapılmalıdır. Deşarj işlemi olmadığı için şarj süresi de daha hızlıdır. Enerji korunumun sağlaması ve paket ömrünü uzatmayı amaçlamasıyla çok sayıda aktif dengeleme yöntemi mevcuttur.

Kayıpsız dengeleme minimum sayıda donanım elemanları ve mümkün olduğunca yazılım kontrolü kullanarak devre kayıplarını azaltmayı hedefleyen ve oldukça yeni bir tekniktir. Dengeleme devresini kurmak oldukça kolay hale gelir ve bu devre olabildiğine az yer kaplar. Özel matriks anahtarlama devresine sahiptir.

Redoks Mekaniği ile dengeleme kimya mühendislerinin çalışma alanı olup lityum iyon pillerinin kimyasal yapılarının dengelenmesi amaçlamaktadır. Elektrolitler üzerinde yapılan bu ölçümler ve çalışmalar bu tezin konusu değildir.

BMS sisteminin şarj optimizasyonu görevinde, yazılım ve haberleşme olmazsa olmaz bileşenlerdendir. Bir bataryanın şarj işleminin başlangıcından bitimine kadar olan süre boyunca aynı büyüklükteki akım ve gerilimle şarj edilmesi sağlıklı bir durum değildir. Batarya doluma yaklaştıkça, kimyasal ve elektriksel potansiyellerden kaynaklı pil üzerindeki basınç artar. Bu basınç ciddi tehlikelere yol açabilir ya da pil ömrünü azaltabilir. Bu sebep doğrultusunda bu çalışmada zamanla azalan akım yöntemi ile harcanan gücü ve batarya dolum potansiyelini dengeleyebilmek amacıyla zamanla artan voltaj kullanılmıştır. Bu değişim herhangi lineer matematiksel model ile birim zamanda birim değişim gibi oranla yapılamaz. Batarya verilerinin ölçülüp, belirli bir matematiksel model ile programlanıp, şarj devresindeki MOSFETler (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor) ile kontrolü amaçlanmıştır. Bu tezde batarya karakteristiğini daha iyi anlayıp daha doğru matematiksel kontrol yapabilmek amacıyla tüm gözlemler sırayla yapıldı. Bataryanın sabit voltaj altındaki karakteristiği, MOSFETlerin anahtarlanması, anahtarlamaların PI, PID algoritmalarıyla geliştirilmesi sıraya göre ilk önce hesaplanıp, simüle edilen sistemlerdir. Eğer eski sistemin nasıl ve doğru çalıştığını bilinmez ise yeni sistemin etkisini gözlemleyemeyiz. Literatür için yeni olmayan bu sistem gözlemlendikten sonra yapılan her bir değişikliğin hangi parametreden kaynaklandığını ve bu parametrenin ne yönde etki ettiğini raporlayabiliriz. Aynı şekilde yeni algoritmalar haricinde bu yöntemin dengeleme içinde kullanılması kolaylık sağlamaktadır. Çoklu pil guruplarını kontrol etmek, bir pili kontrol etmeye oranla oldukça zordur. Öncelikle tek bir pilin doğru ve istenilen şekilde şarj edildiği gözlemlendikten sonra diğer pil gurupları sisteme dahil etmek, olası bir hatanın hangi aşamadan kaynaklandığını tespit etmek için yardımcı olacaktır. Tam olarak burada bu çalışmanın ilerleyişi, BMS sistemlerinin tarihsel gelişimi ile benzerlik göstermektedir.

PID algoritmalarının uygulanabilirliği oldukça kolaydır ancak uygulanan sistem karmaşık bir yapı aldıkça, PID algoritmasının başarı oranı azalmaktadır. Bir pilin şarj karakteristiğinin doğrusal yapıda olmamasından kaynaklı doğrusal olmayan sistemlere uyarlanabilecek bir kontrol algoritması arayışı ile Lyapunov yöntemlerinin etkileri bu çalışmaya özgünlük katmıştır. Bu çalışmaya kolaylık ve bir özgünlük daha sağlayan çok önemli bir yöntem ise asenkron motorların sürücü devrelerinde SVPWM (Space Vector Pulse With Modulation) için uygulanan zamanlayıcın şarj algoritmasına uyarlanmasıdır. Lyapunov belirsizlik ilkesini uygulayabilmek için ihtiyaç duyulan fonksiyon bu zamanlayıcı ile sağlanmıştır. Ayrıca bu zamanlayıcı, sisteme Lyapunov eklenmediği durumlarda bile şarj parametrelerini iyileştirmektedir.

Birçok sistem için kullanılan PID algoritmasının ve farklı inverter topolojilerinin şarj devrelerinde de kullanılması mevcutta zaten var olan güvenilirliği kanıtlanmış ancak batarya sistemleri için yeni olan bir yöntem arayışı için yol gösterici olmuştur. Asenkron motor sürücü devresindeki anahtarlama mantığı ile şarj devrelerinin anahtarlanmasıdaki benzerlik, aslında her iki alanda da yapılabilecek ortak çalışmaları göstermektedir. Bir alanda daha gelişmiş olan bir yöntem diğer sisteme aktarılabilir.

Kontrol algoritmaları genellikle şimdiki ve geçmişteki bilgileri kullanarak gelecekteki durumu tahmin etmek için kullanılır. Herhangi bir sistemin ideal olduğu

değer ile mevcut durumun farkı o sistemin hatasıdır. Bu hata verimsizliklere, bakım maliyetlerine, güvenlik risklerine sebep olabilir. Örneğin odanın sıcaklığını sabitleme, kontrol ideolojisini ve etkisini anlamak için çok güzel bir uygulamadır. Bir oda sıcaklığı bir klima yardımıyla 25 °C derecede sabitlenmek istenilsin. Eğer oda sıcaklığı 25 °C'nin altına düşerse klima sıcak modda çalışacak, üzerinde bir sıcaklıkta olduğunda ise soğuk modda çalışacaktır. Eğer kontrol hesaplaması yapılmamışsa bu klima soğutma için tek sabit bir sıcaklık, ısıtma için yine tek sabit bir sıcaklık kullanacaktır. Bu durumda sistem hatasının 3 °C olduğunu varsayalım. Oda sıcaklığı 22 °C ile 28 °C arasında değişecektir. Bu kullanıcı için konforsuzluğa, odada özel sıcaklıkta saklanması istenilen ürünler için bozulma riskine sebep olmakla beraber, sürekli farklı mod için çalışıp duran motorlar da fazla enerji tüketecektir. Ancak iyi bir kontrol algoritması ile sıcaklık değerindeki kararsızlık 24.5 °C ile 25.5 °C arasında olacak şekilde iyileştirilirse daha başarılı bir sonuç elde edilmiş olunur. Bunu sağlamanın yöntemlerinden bir tanesi, oda sıcaklığı istenilen değerden uzakta iken hızlı bir şekilde, istenilen değere yaklaştığı zaman ise yavaşlayan bir şekilde ısıtma ya da soğutma yapılmasıdır. Bunun için kontrol algoritması sistem hatasını daima hesaplamalıdır.

Yukarıdaki örnek gibi herhangi bir kullanıcının gözlem yapmasının daha zor olduğu bu tezin konusuna dönülürse, batarya şarj edilirken akım ve voltajdaki kararsız yapı yani dalgalanmalar, batarya sağlığı için oldukça tehlikelidir. Bataryalar belirli bir süre ile belirli bir akım ve gerilim değerleri arasında çalışmaya izin verir. Optimal değerde çalışmak batarya sağlığını korumakla birlikte, sağlıklı durumların sebep olacağı riskleri de minimize eder. Hızlı şarj sistemlerini kararlı hale getirmek yavaş şarjlara oranla daha zordur. İlerleyen bölümlerde simülasyonlar ile sistemin istenilen şarj aralığı gelme süresi, eğer olursa aşma büyüklüğü ve dalgalanmalar ile sistemin kararlılığı değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın farklı ve zorlayıcı bölümü ise sabit akım ve voltaj ile çalışmama isteğidir. Akımdaki değişim hızının, şarj hızı ve batarya sıcaklığını nasıl etkilediği ve bu değişikliklere sebep olan parametreler incelenmiştir.

BMS sisteminde şarj prosedürü ile ilgilendiği gibi dengeleme sistemleri ile de ilgilenir. Tezin asıl konusu olan yeni şarj yöntemi incelendikten sonra, çoklu pil gruplarında dengesizlik olursa dengelemenin nasıl çalıştığı da gösterilmiştir. Uygulanabilirliğinin kolay olmasıyla çalışmayı hızlandırmak amaçlı diğer dengeleme yöntemlerine nazaran daha verimsiz olan pasif dengeleme yöntemi tercih edilmiştir. Dengeleme yöntemleri hakkında detaylı bilgi kaynak taraması kısmında verilmiştir. Bu teknikleri yazılım ağırlıklı kontrol etme isteği, şarj yöntemlerinin de yazım ağırlıklı olmasının fayda sağlayacağı konusuna ışık tutmaktadır.

Son olarak bu çalışmada sistemin çalışmasını ideale yaklaştıran gelişmiş dönüştürücüler, filtreler kullanılmaktan kaçınılmıştır. Bunun en büyük sebebi elektronik devreler ile yapılacak işi yazılım ve kontrol algoritmalarıyla yapma isteğidir. Elektronik ekipmanlar enerji tüketimi ile kayıplara sebep olurlar. Ayrıca boyut ve ekipmanlardan oluşan maliyeti artırırlar. Bu sebeple olabildiğince tüm olumsuzluklarla kontrol yöntemleriyle baş edilmeye çalışılmıştır. İstenilen sistem için en iyi yöntem seçildikten sonra eksiklikler daha sonra mevcut şarj devrelerinde kullanılmakta başarılı elektronik devreler ile geliştirilebilir. Bu tez ilerleyen yıllarda güç elektroniğinin gelişmiş tekniklerinden yararlanılarak geliştirilebilir.

Bu çalışmada kullanılan şarj teknikleri, BMS dengeleme sistemi, elektrikli

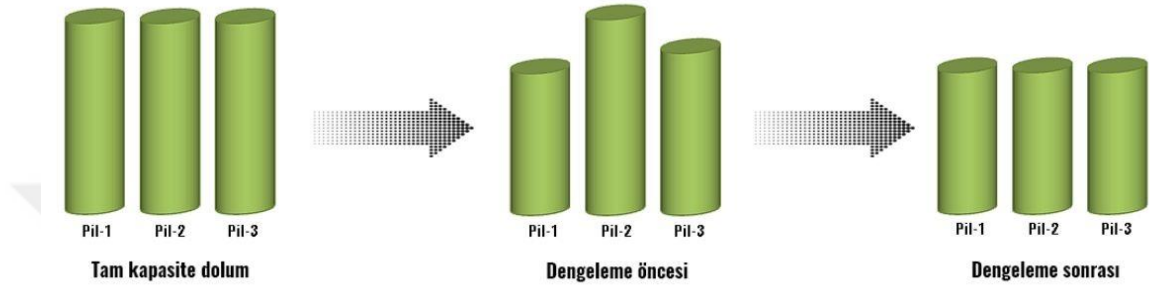
araçlardaki inverter yapısı ve sürüş tekniklerinden esinlenilmiştir. Diğer tekniklerin tarihsel gelişim yapısı, benzer özellikler taşıyan diğer tekniklerinde nasıl geliştirebileceğini göstermektedir. Günümüzde lityum iyon pillerinin kullanımın ve kapasitesinin hızlı bir şekilde artması kullanılan şarj tekniklerini geliştirme zorunluluğunu doğurmuştur. Diğer tekniklerin gelişiminden bahsetmeden önce şarj sistemlerinin mevcut problemlerini ve amaçlarını ele alalım.

Konforlu bir kullanım için hızlı şarj oldukça önemli olmasının yanı sıra hızın artmasıyla birlikte ısınma ve envanter kayıpları da artar. Ayrıca sağlıksız etkiler ortaya çıkabilir (Xie vd. 2020). Sıcaklık etkisi ve güvenlik araştırması kalp pilleri için tasarlanmış şarj sistemleri üzerinde dahi incelenmiştir (Xiao, Cheng ve Wei 2018). Daha az güvenlik sistemleri kullanarak kayıpları azaltmak için optimize çalışmaları yapılmıştır (Bendall ve Peterson 2002). Gerçek zamanlı kontrol sistemleri sadece akım, voltajı ve SoC değerlerini izlemek dışında sıcaklığa dayalı algoritmalar ile geliştirilmiştir (Kim vd. 2022). Aşırı akım ve voltajı engellemek sadece güvenliğini sağlamakla kalmayıp batarya ömrünü de uzatır (Yan vd. 2010). Batarya sağlığına aşırı yüklenme dışında çıkıştaki akım dalgalanmaları da oldukça zarar verir (Zhang vd. 2019). Kontrol mühendisliğinde bu dalgalanmalar ve belirli bir aralıkta çalışmama durumu kararsızlık olarak adlandırılır (Tangirala vd. 2001). Daha sağlam bir sistem için sistem girişindeki dalgalanmalardan bağımsız kararlı bir çıkış almak amacıyla yöntemler geliştirilmiştir (Huang vd. 2008).

Eğer bir batarya sisteminde birden fazla hücre kullanılıyorsa şarj ya da deşarj moduna bakılmaksızın daimî olarak sensörler yardımıyla hücreler arasında dengesizlik olup olmadığı kontrol edilmelidir. Eşit olmayan potansiyellerin oluşturduğu riskli durumdan etkilenmemek için yeni şarj yöntemini ilk önce tek bir hücreyi şarj edilerek simüle edildi. Ancak daha fazla hücre kullanımı durumunda önce güvenliğini sağlamak amacıyla, şarj ve kontrol tekniklerinden önce dengeleme sistemlerinden bahsetmek gerekir.

Elektrikli ve hibrit araç ihtiyaçlarının artması ile dengeli bir şekilde hızlı şarj sistemleri endüstride popüler hale gelmiştir (Baughman ve Ferdowsi 2008). Ayrıca kullanılacak olan pillerin uzun süre kullanılması gereklidir. Dengeleme sistemleri çok sayıda seri bağlanmış pil gruplarından oluşmuş hücrelerde kullanılır ve bu hücredeki pillerin kapasitesini ve ömrünü artırır. Lityum pilleri şarj ve deşarj sırasında ya da sonrasında yanlış kullanılması durumunda tehlikeli sonuçlarla karşılaşılabilir. Dengeleme yapılmamış pil gurupları minimum yasa ile en düşük kapasitedeki pil ile hücrenin kapasitesini, en düşük sağlık ile de hücrenin sağlığını sınırlar. Hücre sağlığı yanlış dengeleme sonucunda kötüye gidebilir. Hücre deşarj voltajının altına düşer ve halen de deşarj devam ederse pil ömrünü tamamlamış olur ve bir daha asla kullanılamaz (Anonymous 2). Başka bir deyişle Li-ion (lityum iyon) pillerin maksimum voltaj değerden daha fazla şarj edilme durumunda ya da minimum voltaj değerinden daha fazla deşarj edilme durumunda pil kullanılmaz hale gelir hatta yangın tehlikesi meydana gelir (Prinz vd. 2021). Pilin tamamının dolması durumunda da yüksek voltaj pilin ömrünün azalmasına sebep olmasına karşın bataryanın sağlık durumunu tahmin etmekte yardımcı olmaktadır (Ekici 2019).

Dengelenme olmayan sistemlerde ise sürekli artan potansiyel farktan kaynaklı ısınma meydana gelecektir (Cao vd. 2008). Pil şarj ve deşarj olarak iki ye ayrılırken, deşarj olayı da aktif ve pasif dengeleme olarak iki gruba ayrılır (Moore ve Schneider 2001). Aktif dengelemede enerjiyi korumak ve şarj süresini hızlandırmak amaçlı yüksek enerjili hücreden düşük enerjili hücreye enerji aktarımı olur. Kullanım sırasında oldukça avantajlı olmasına rağmen uygulanabilirlik açısından oldukça maliyetlidir. Dolayısıyla yeni bir yöntemi pasif dengeleme ile denemek oldukça mantıklıdır. Pasif dengeleme mantığı şekil 1.1' gibidir.



Şekil 1.1. Pasif dengeleme şeması

Pasif dengelenme sistemleri Şekil 1.1'deki gibi belirli bir voltaj değerinin üstünde eşitlenmelidir. Pasif dengelemede görüldüğü üzere yüksek voltaja sahip piller en düşük voltaj seviyesindeki pil seviyesine deşarj olmuştur. Bu sebeple enerji kaybının fazla olması pasif dengelemenin dezavantajı olmasına rağmen kolay uygulanabilir olması sebebiyle bilimsel çalışmalarda çok sık şekilde tercih edilmektedir. Çünkü simülasyonlar güvenilirlik açısından yeterli değildir. Pil hücrelerinin içerisindeki pasif devre elemanlarından kaynaklı teorik çalışmalar ile pratikteki çalışmalarda elde edilen sonuçların birbiri ile tamamen aynı olması zor bir ihtimaldir (Kiehne 2003).

Batarya hücreleri birden fazla kullanıldığı durumlarda seri ya da paralel olarak bağlanabilirler (Bergveld 2001). Paralel bağlı pil hücreleri şarj edilirken toplam akımı bulmak için her koldaki akımı toplanır (Jiang ve Dougal 2003). Bu hesaplamalar ışığında yeni bir çalışmada ilk olarak sadece seri bağlı pil paketini kullanmak yeterlidir. Pillerin seri bağlı olduğu koldaki toplam gerilimi bulmak için ise her pilin gerilimleri toplanmaz (Perişoară vd. 2018). Başka bir algoritma ile piller arasına herhangi bir devre elemanı yerleştirilirse o devre elemanının da gerilimi hesaba katılmalıdır. Yine de paralel bağlantı yapılmak istenilirse güvenlik riskleri sebebiyle altıdan daha fazla hücre paralel olarak bağlanması çok sık tercih edilen bir durum değildir (Anonim 1).

Ticari gereksinimleri karşılama zorunluluğu, tehlikeli bir durum oluşturmadan yüksek güçteki enerjiyi depo etme problemlerini doğuruyor. Lityum pillerin yapısında yüksek voltajlara dayanıklılığı arttırabilmek için $\text{LiMn}_{1.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_4$ ve kapasiteyi arttırabilmek için ise $\text{Li}_2\text{MnO}_3\text{--LiMO}_2$ kullanılır (Marom vd. 2011).

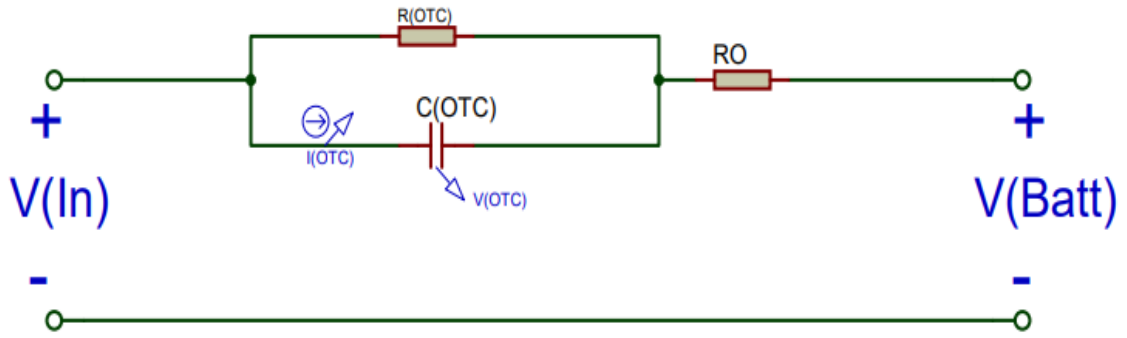
Piller deşarj sırasında silikon yüzeyde çatlaklıklar oluşturur (Green vd. 2003). Bu çatlaklıklar sebebiyle piller belli bir seviyenin altına boşalmış olursa o pil bir daha kullanılamaz.

İyon pillerin kafes kapasitesini arttırması ile lityum-iyon piller 2015 yılında uzun menzilli elektrikli araçlarda da ticari olarak piyasaya sürülmüştür (Zeng vd. 2019). Ancak bu durum kullanıcıların hızlı ve kolay şarj isteklerini de beraberinde getirmiştir.

Hızlı şarj için çok sayıda kontrol algoritmaları mevcut olmasına rağmen bu algoritmalarla birlikte voltaj dengeleme sistemlerini doğru kullanılamazsa potansiyel farktan kaynaklı piller üzerinde ısınma meydana gelir. Birçok pil ortam sıcaklığına uyum sağlayamama ve şarj sırasında ısınma gibi sorunlarla güvenlik tehlikesi doğurması sebebiyle ticari kullanımda tercih edilmemektedir (Abraham 1993).

Lityum-iyon pilleri kurşun asit pillere kıyasla daha verimli olmalarının yanı sıra daha kararsız bir yapıya sahiptirler. Kararsızlık sebebiyle enerji kaybını kontrol etmek ve güvenliği sağlamak kıyasla daha zordur. Batarya yönetim sistemleri (BMS) ile hem güvenlik çalışmaları hem de verimlilik için optimizasyon çalışmaları yapılması gerekir (Samaddar vd. 2020).

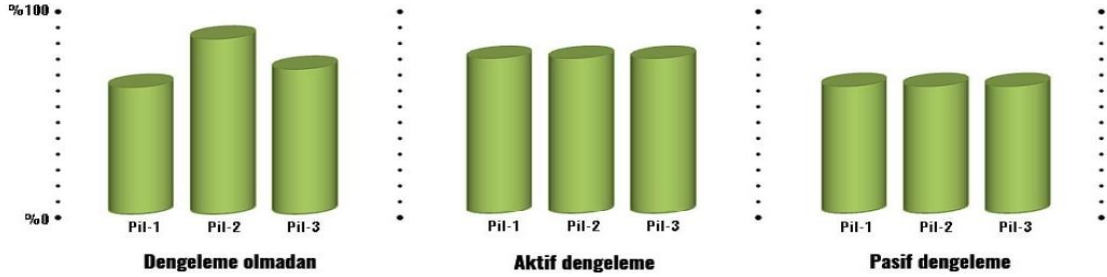
Pasif dengeleme genellikle bir şönt direnci üzerinden deşarj edilerek yapılabilir. Ancak bu durumda tüm hücreler üzerinden geçen akım deşarj edilmek istenmeyen düşük potansiyeldeki piller üzerinde de sürekli bir kayba sebep olacaktır. Diğer bir seçenek ise sızdırmaz röleler ile deşarj edilmek istenilen pil MOSFET'lerin anahtarlama ile MOSFETlerin iç dirençlerinden de faydalanarak boşaltılır (Kıvrak vd. 2020). Eşdeğer bir pasif dengeleme devresi şekil 1.2'deki gibidir.



Şekil 1.2. Pasif dengeleme basitleştirilmiş devresi

Pasif dengelemeler kolay tasarlanabilir olmasıyla birlikte uygun maliyetlidir ve güvenilirdir (Zhao vd. 2012). Ayrıca aktif dengeleme sistemlerindeki gibi yüksek gerilimi için izole devre elemanlarına ihtiyaç duyulmamaktadır (Aizpuru vd. 2016). Yüksek frekansta anahtarlama ihtiyacının olması, seçilecek olan mikroişlemcilerin anahtarlama yeteneği gibi kısıtlayıcı parametrelerdir (Kursun vd. 2003). Mikrodenetleyici maliyeti olarak da bu durumda pasif dengeleme daha avantajlıdır.

Pasif dengelemenin en büyük dezavantajı, aktif dengelemedeki gibi büyük potansiyele sahip pilden düşük potansiyeldeki pile enerji akışının olmamasıdır (Daowd vd. 2011).



Şekil 1.3. Dengeleme durumları karşılaştırılması

Şekil 1.3'te görüldüğü üzere pasif dengelemede aktif dengelemeye göre daha fazla güç enerji kaybı yaşanır (Anonymous 2).

PID doğrusal davranış sağlayan sistemlere kolay uygulanabilir olması ve yüksek performans ile düşük hata payı ile çalışmasıyla en yaygın kontrol sistemleri arasında yer almaktadır. Günümüzde bu popüler yöntemin %90'ı oranında türev kazancı sıfıra ayarlanıp PI kontrolü olarak kullanıldığı tahmin edilmektedir (Knospe 2006). Aşmanın genliğinin artması ve sistemin kontrolsüz şekilde tepki vermesi sebebiyle PID yerine PI doğrusal olmayan sistemlerde de kullanılmaktadır (Mudi ve Pal 1999). Lineer olmayan multi-input/multi-output (MIMO) sistemlerde PI geri beslemesinin kabul edilebilirliği kanıtlanmıştır (Desoer ve Lin 1985). İlk önce PI ile kapalı döngü yapıldıktan sonra lineer olmayan sistemler için Lyapunov gibi ek bir kontrol sistemi eklenmesi mümkündür. PI'ın yeterli olmadığı yerde gürbüzlük sağlayan algoritmalar da kullanılabilir (Kitiş ve Üser 2021). Akım gerilim tüketen kaynaklar için PI ve PID kontrolleri başarıyla uygulanmış olup kullanılacak olan sistemin izin vereceği aşma miktarına göre uygun olan algoritmanın seçilebileceği gözlemlenmiştir (Karimi-Ghartemani vd. 2009).

Bataryaların hızlı şarj olması için yüksek akım verilmesi gereklidir (Çolak ve Tuncay 2008). Ancak batarya doluluk oranı arttığında patlama riskine karşı zamanla azalan akım ile eş zamanlı artan voltaj uygulanmalıdır. Yani voltajın minimum olduğu değerlerde akım değerinin maksimuma ulaşması gerekir. Bu tezde ise akım ve gerilim talebinin batarya için optimizesi etmek için çalışma yapıldı.

Laplace domaininde çalışmak mühendislik alanında oldukça kolaylık sağlamış olup hesaplamaları daha hızlı ve basit hale getirmiştir (Johnson ve Moradi 2005). Dolayısıyla Laplace yöntemi kontrol yöntemlerinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir.

Bu Ayırık zamanlı sistemi, sürekli gibi ortamda çalışabilmek için yüksek frekansta salınım yapmaktadır. Kayan kipli kontrol sisteminde istenilen cevaba göre kökler yerleştirildikten sonra Lyapunov kontrolcüsü tasarlanmaktadır.

Daha önce batarya şarj inverterini kontrol etmek için SVPWM zamanlayıcısı, Lyapunov ve PID birlikte kullanılmamıştır. Bu yöntemlerin birlikte başarılı olduğu elektrikli motor sürücü devrelerinde kanıtlanmıştır. Bir motor üzerinde başarı ile çalışan bir yöntem başka motor türlerine de uyarlanmıştır ve halen bazı yöntemler uyarlanmaya devam etmektedir. Şarj kontrolü için bu yöntemleri uyarlayabilmek için elektrikli motorlar üzerindeki bu algoritmaların nasıl çalıştığını, güçlü yönlerini ve zayıf yönlerini bilmek gerekmektedir. Elektrik araçların ideal bir yolda sürüşünü tamamlaması neredeyse imkansızdır. Beklenmedik eğimler, farklı sürtünme kuvvetleri ve farklı tekerlerde farklı kuvvetler etki ettiğinde kontrol sisteminin hızlı, güvenilir ve aracı sarsıp konforu bozmayacak şekilde tepki vermesi gerekmektedir. Bu durumu bataryada şu şekilde düşünebiliriz. Elektrikli araç fazla güç talep ettiği zaman yüksek akım ve voltaj ile çalışmak isteyebilir. Batarya şarj edilirken, sağlıklı bir şekilde şebekeden istenmeyen şekilde akım ve voltaj talep ettiği zaman bu kontrol algoritmaları ile sorunun önüne geçmeye çalışılabilir. Öyle ise batarya şarj devresi üzerinde kullanacağımız kontrol algoritmalarının, özel tekniklerin ve devrelerin elektrikli motorlar üzerindeki gelişimini inceleyelim.

Endüstride çok fazla enerji ihtiyacı ekonomik motorları ön plana çıkarmıştır. Düşük maliyetli ve kolay bakıma sahip olması, başlangıçta yüksek akımlarda çalışabilmesi, asenkron motorları piyasadaki en yaygın motor haline getirdi (Vaclavek ve Blaha 2006). Sürücü ve motor çalışma koşullarında voltaj bozulmasını azaltmak için (Sahoo vd. 2011). Motora maksimum güç aktarımını sağlamak, arıza ve arızaları kolayca tespit edebilmek için inverter devrelerinde PWM (Pulse With Modulation) teknikleri uygulanmaktadır (Ataei vd. 2010). Geliştirilmiş matematiksel işleme kabiliyetine sahip mikrodenetleyiciler, daha yüksek anahtarlama frekanslarında çalışma imkânı sunmuştur (Preindl 2016). Gelişen teknoloji ile motor sürücüleri için yeni PWM teknikleri ve inverter topolojileri ortaya çıkmıştır. Bir sürücü üzerinde inverter devresinin anahtarlama ayarlanarak, DC (Direct Current) güç üzerinden farklı Darbeli Modülasyon (PWM) teknikleri ile motorun ihtiyaç duyduğu AC gerilim ve frekansı elde etmek mümkündür. Mikroişlemcilerin hızlanmasıyla birlikte SPWM ve SVPWM daha popüler hale geldi. SVPWM, daha düşük harmonik bozulmalarla %15'e kadar daha fazla verimliliğe sahip DC baralar üretir. Bu nedenle SPWM eski popüleritesini kaybetmiş ve günümüzde hemen hemen her uygulamada kontrol yöntemlerinden önce SVPWM tekniği kullanılmaktadır (Kabalan vd. 2017). Motor sürücülerinin yüksek tork ve hızda çalışması için PWM teknikleri tek başına yeterli değildir. Bunun için PWM tekniklerinden sonra kontrol yöntemleri kullanılır. Asenkron motorlar için en uygun maliyetli ve en kolay uygulanabilir uygulama V/f skaler yöntemidir. SPWM'nin programlanmasının SVPWM'ye göre daha kolay olması ve daha düşük bütçeli bir işlemci gerektirmesi nedeniyle, asenkron motor hız kontrol yöntemlerinden biri olan SPWM'nin avantajları, asenkron motor hızlarından biri olan iki PWM ile karşılaştırılmıştır. SVPWM tekniğinin SPWM'den daha kararlı sonuçlar vermesi ve daha yüksek torklara kadar yükselebilmesi ile daha başarılıdır. (Schoonhoven ve Uddin 2016). SWPWM, güç faktörünü 0,906'ya

yükselterek 1'e yaklaştırıyor. Ancak makalede, skaler yöntemi, V/f hız kontrolünü açık ve kolay bir şekilde göstermek için bir açık döngü kullanılıyor ancak geri besleme hattı ile daha kararlı sonuçlar elde edilebilir. Çıkıştaki voltaj THD (Total Harmonic Distortion) 56.51'dir ve mevcut THD %8.39'dur. Bu uygulamada daha yüksek hızlara çıkabilen V/f kontrol yönteminde motor sağlığı da daha uzun süre korunmaktadır. Değişken tork yüklerine sahip uygulamalar için geri besleme kullanılmadan bir öneri sunulmaktadır (Ouassaid vd. 2005). Ayrıca SVPWM tekniği düşük frekanslarda SPWM'den çok daha iyi sonuçlar vermektedir (Chang 2003). DSP (Digital Signal Processor) sistemlerinin geliştirilmesi, daha hızlı ve daha doğru kontrol yöntemlerinin geliştirilmesinin yanı sıra düşük güçte çalışma imkânı sağlamıştır. 3 fazlı sistemlerde vektör kontrol yöntemleri skaler yöntemlerin yerini almaya başlamıştır. Vektörel yöntemlerden biri olan FOC (Field Oriented Control) yüksek işlem kapasiteli silikon cihazlar ile programlanarak yüksek hızlı anahtarlama algoritmaları geliştirilerek güç dönüşümünde daha yüksek verim elde edilmiştir. SVM (Space Vector Modulation) ve FOC birleştirilerek daha yüksek verimlilik elde edildi (Venkatesh 2022). Vektörel kontrol yöntemleri FOC ile sınırlı değildir. DTC yöntemi de aynı amaca hizmet eden bir kontrol mekanizmasıdır. Elektrikli araçlarda performans ve verimliliğin yanı sıra güvenilirlik de çok önemli bir faktördür. Daha güvenli bir sürüş performansı için SVPWM tekniği ile çalıştırılan IPM (Intelligent Power Module) modülleri DTC kontrolüne tabi tutulmuş, düşük tork ve akı dalgalanmaları iyileştirilmiştir. Hataya oldukça toleranslı olan bu yöntemle çok dinamik bir performans elde etmek mümkündür (Zhang vd. 2009). Konvansiyonel bir DTC yapılırken, 6'sı sıfır olmayan, aralarında 60 derecelik açı farkı olan 8 uzay vektörü kullanılır, ancak voltaj kontrolü sırasında bu vektörlerin tamamına atıfta bulunmak mümkün değildir. Sadece biri tarafından kontrol edildiğinden tork ve stator akısında dalgalanmalar meydana gelir. Anahtarlama tablosu reddedilerek histeretik yöntemlerle verim artırılmıştır. SVM-DTC'nin uygulanmasının önemi gösterilmiştir (Xu ve Xue 2011). PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) matematiksel modeli kullanılarak hem DTC hem de FOC yöntemleri ayrı ayrı önerilmiştir. FOC yönteminde sensörlerden gelen matematiksel verilerle hız hesaplanırken, DTC yönteminde tork ve akı PMSM (Daimî Mıknatıslı Senkron Motor) gücüne bağlı olarak tahmin edilir. Sensörün yanlış ölçüm yapması durumunda DTC yöntemini kullanmak mümkündür. (Belkacem vd. 2012). PMSM için en yaygın vektör kontrol yöntemleri olan FOC ve DTC'nin karşılaştırılması sonucunda DTC daha yüksek performanslı tork yanıtı verirken, FOC yöntemi daha kararlı bir yanıt vermiştir. DTC yöntemini daha kararlı hale getirmenin önemi açıkça anlaşılmaktadır (Ammar vd. 2017). Asenkron motorlar için de DTC ve FOC tork kontrolü karşılaştırması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar PMSM için yapılan karşılaştırmaya benzerdir. DTC, yüksek performans, yani yüksek tork gerektiren uygulamalar için uygundur ancak akım ve tork dalgalanmalarına bakarak DTC'nin FOC yöntemine göre daha kararsız bir yapıya sahip olduğunu söyleyebiliriz. Bu kararsızlık DSVM (Discrete Space Vector Modulation) ile çok küçük bir düzeye kadar iyileştirilebilir (Dube ve Bayoumi 2020). Yüksek işlem hacmine sahip kontrollere geliştirilmesi ile vektörel yöntemlerin skaler yöntemlere göre daha iyi sonuçlar

verebileceği merak konusu olmuştur. Asenkron motorlar için V/f skaler hız kontrol yöntemi ile vektörel bir yöntem olan DTC karşılaştırılmış ve DTC'nin daha kararlı bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Bu kararlılık motor sağlığı daha fazla korur. Çünkü akım ve torktaki dalgalanmalar daha düşük seviyelerdedir. Yüksek tork çıkışı ile yüksek performanslı işlerde çalışmak mümkündür ve daha az enerji tüketimi ile maliyet düşecektir (Ahammad vd. 2013). Mevcut birçok kontrol yöntemi vardır, ancak doğrusal olmayan dinamik sistemlerin kontrolü doğrusal sistemlerden daha zordur. PID yöntemi yerine bulanık mantık (Fuzzy Logic) PID yönteminin kullanılması, kararsız yapının ihmal edilmesini kolaylaştırır (Carvajal vd. 2000). PID'nin sağladığı kararlılığın yetersiz olduğu durumlarda, minimum ve maksimum hata payını sınırlayan bir Lyapunov fonksiyonu eklenerek sistem daha kararlı hale getirilmiştir (Michel vd.1978). Lyapunov fonksiyonunun en büyük dezavantajı, hatanın çok sınırlı olması durumunda sistemde yüksek salınımların oluşmasıdır. Lyapunov Fonksiyonu, lineer olmayan kısmen kararlı bir sistemi daha kararlı hale getirmek için sistemin lineer fonksiyona benzetmesini gerçekleştiren bir fonksiyon olarak kullanılabilir (Bhat ve Bernstein 1999). Motor sürüşü sırasında doğrusal olmayan birçok dinamik faktörle karşılaşıldığından, elektrik motorlarında Lyapunov fonksiyonu uygulanmaya başlanmıştır. DC Motor uygulamasında sistem kararlılığı için Lyapunov fonksiyonu seçilmiş ve kararlılık sağlanmış ve fonksiyonun türevi alınmıştır. Kesirli mod yüzer kontrolör, hız hatasını PID'den daha başarılı bir şekilde sıfırlar. Bu çalışmanın en önemli özelliklerinden biri sistem modelinin çok iyi bilinmesine gerek olmamasıdır (Prior ve Krstic 2012). Benzer şekilde PMSM motorlarda sistemin kararlı tork kontrolü Lyapunov yöntemi ile simülasyonlar aracılığıyla sunulmuştur. Daha dinamik performansı etkilemek için geçici ve kararlı durumlara Lyapunov fonksiyonu eklenmesine rağmen, parametre belirsizlikleri ve bozuklukları tamamen ortadan kaldırılamamıştır (Ouassai vd. 2005). PMSM için Lyapunov yöntemi doğrusal olmayan fonksiyonlarda önem kazanmış ve FOC ile Lyapunov'un birleştirilmesiyle tork kontrolü sağlanmıştır. Bu çalışma sonucunda sistem daha kararlı bir yapıya sahip olmasına rağmen parametre değişimlerine duyarsız olduğu için tork değişimlerine hızlı tepki vermektedir (Prior ve Krstic 2012). Sürücünün kararlı yapısı, elektrik motorlarındaki yük, tork, hız değişimi veya besleme kaynağında üretilen gürültü gibi değişken ortamlarda bozulmaya karşı hassastır. Bu kararsızlığı gidermek için Unvertainty and Disturbance Estimator (UDE) ile kontrol yasası takip edilmiş ve şafttaki hata azaltılarak sistem daha kararlı hale getirilmiştir (Raj vd. 2015). Zamanla değişmeyen lineer sistem kontrolünde yüksek frekansların geri beslemesinde filtreleme açısından sorun teşkil etmektedir. Yüksek frekanslı çalışma aralığı filtrelerle engellendiğinde sağlam bir kontrol mekanizmasından uzaklaşılır. Yüksek frekans dinamiğinde modellenmeyen sistemler için sağlamlıkta kararlılık sağlanır (O'reilly 1986). a-b eksen dönüşümü için yapay sinir ağı invertör devresi üzerinde çalışmalar yapılmış ve simülasyonda YSA (Yapay Sinir Ağı) ağırlık fonksiyonları ile tork ve akı çıkışları için gözlemci elde edilmiştir. D eksen ile dönen senkron hız, yapay zekâ Lyapunov yöntemi ile kontrol edilir (Payam vd. 2011). Hız kontrolüne ek olarak, vektör kontrolü ile akı da kontrol edilir. Bazı uygulamalarda bu koşulların sensörler kullanılmadan algılanması

gerekir. Lyapunov gözlemcisi ile sensörsüz kontrol daha kararlı sonuç vermiştir. DTC ve PDSFC yöntemlerinin kullanılmasının mümkün olduğu söylene de bu yöntemlerle ilgili bir makale bulunmamaktadır (Vaclavek ve Blaha 2006). Lyapunov Kararlılık teorisinin nerede uygulanabileceğine dair kesin bir tanım yoktur. Çünkü Leibniz kuralı sonsuz terimler toplar. Bunun için özel bir alan üzerinde çalışmalar yapılabilir (Efe 2008).

İlk olarak 1859 yılında icat edilen ve ağırlık probleminin çok fazla önemli olmadığı yerlerde daha düşük maliyet için kurşun asit pilleri kullanılır. Taşınabilen alanlar için önce NiCd daha sonra daha yüksek enerji depolayabilen Ni-MH ve Li-ion piller geliştirildi (Hussein ve Batarseh 2011). Araçların yakıt maliyetini ve motor gücünü düşürebilmek için pil ağırlığı önemlidir. Bu sebeple elektrikli araçlar genel olarak Li-ion piller kullanılır (Moraga, Xamán, ve Araya 2016). Ayrıca Li-ion pillerin şarj verimliliği 80% ile 90% arasında olması da diğer pillere karşı ekonomik açıdan avantaj sağlamaktadır (Sun 2010). Ni-Mh pillerinin iki katı yoğunluğuna sahip bu piller, SoC durumlarını daha kolay tahmin etme, daha az ısı üretmesiyle soğutmada kolaylık ve yeniş bir sıcaklık yelpazesinde çalışma gibi güçlü yanları da vardır (Alam ve Gao 2006). Havacılık, otomotiv alanlarında diğer ve yeni modal pillerin kullanılacağı düşünülse de 2030 yılında daha büyük pil paketleri ile Li-ion pillerin daha çok kullanılacağı öngörülmektedir. (Arun vd. 2022). Li-ion pillerin çalışma alanı sadece burası ile sınırlı değildir. Vücuda yerleştirilen küçük boyuttaki biyomedikal elektronik aletlerinin taşınabilir ve şarj edilebilir olması gerekmektedir. Ayrıca basınç, sıcaklık gibi koşullara uyum sağlaması da bir o kadar önemlidir. Yaşam kalitesini artırabilmek için şarj verimliliği artırılmalı ve devre boyutu minimum boyuta indirilmelidir (Bhatia vd. 2010). Eskiden kullanılan direnç gibi devre elemanlarına duyulan ihtiyacı kaldırılarak daha kompakt bir cihaz elde etme çalışmaları yapılmıştır (Do Valle vd. 2010). Fiziksel olarak yer kaplayan elektronik bileşenlerin yaptığı görevi yazılımla yapmak daha küçük boyutlarda tamamlanmış bir devre sağladığı gibi devre üzerindeki kayıpları da azaltacaktır. Ancak tüm işi yazılımla yapmak her zaman mümkün değildir. Örneğin pasif dengeleme sırasında kullanılan ek direnç ihtiyacı kaldırmak için MOSFET'in kendi iç direnci ile dengeleme yapılmıştır (Amin vd. 2017). Aynı şekilde inverter devrelerine de baktığımız zaman, ilk devreler daha büyük ve daha az verimle çalışmaktadır. Zaman içerisinde yeni teknolojiler ile gelişim sağlamıştır. Örneğin izole edilmiş DC/DC konvertör ile yük direnci üzerinden ölçüm geri besleme fonksiyonu ile kararlılık artırılmıştır (Swingler ve Dunford 2002). Başka bir araştırma ise LCL rezonansı ile maksimum verimin elde edilmesi hedeflenmiştir (Wang vd. 2004). Bu çalışmada kullanılan çift yönlü konvertör ise 2010 yılında fotovoltaik üretim sistemleri için simülasyon ve bazı deneysel sonuçlar ile incelenmiştir (Choe vd. 2010).

2. KAYNAK TARAMASI

(Amanor-Boadu ve Elie 2020) Taguchi ortogonal dizilerini yardımıyla darbe şarj parametrelerini belirlenerek batarya şarj üzerindeki etkiler incelendi. Sabit akım ve sabit voltaj teknikleri ile kıyaslamalar ile bu darbelerin önemi bahsedildi. Oluşabilecek riskleri önlemek amacıyla, pil süresinin uzamasını göze alarak azalan akım uygulanması bu teze yol göstermiştir. Bu çalışmaların sonuçlarından faydalanarak yazılım ile bataryayı şarj etmek daha önce kullanılmamış azalan yöntem bu tezde kullanıldı. Darbeli şarj standart sabit akımda şarj ve sabit akımda voltaj tekniklerden daha hızlı ve verimli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Diğer önemli sonuçlardan bir tanesi ise sıcaklık parametresinin pil empedansına ciddi derecede etki etmesidir. Pil empedansınız değişmesi, bataryanın sağlığının kötüye gittiğini gösterir. Döngü ömründe de ciddi şekilde iyileştirme gözlemlenmiştir.

(Tian vd. 2022) Modele dayalı kontroller, kısıtlayıcı faktörlerden dolayı gerçek zamanda kontrol algoritması geliştirmeyi zorlaştırır. Bu durumun üstesinden gelebilmek için matematiksel fonksiyonlara dayalı parçalı afin yöntemi kullanılmıştır. Açık döngü sistemi kullanılarak sonuçlar elde edilmiş ve kapalı döngünün daha başarılı sonuç sunacağı tahmin edilmektedir. Bu çalışma, sistem bilgisine daha az ihtiyaç duyan kapalı döngü bir kontrol sisteminin yeni gelişimlere ışık tutabileceğini göstermektedir. Doğrusal olmayan çift kapasitörler üzerinde, programlama kolaylığı ile çok parçalı doğrusallaştırma ile şarj kontrol edilmiştir. Ayrıca sağlığa duyarlı şarj algoritması ile sistem yapısına değil, ihtiyacına göre kontrol algoritmalarının geliştirilmesinin mantığı gösterilmiştir.

(Nizam vd. 2022) Sıcaklığın pilin ömrüne verdiği zararı azaltarak daha uzun kullanım ömrüne sahip Lityum iyon pili elde etmek amacıyla bulanık kontrol yöntemi kullanılmıştır. Düşürücü ve yükseltici konvertörler ile farklı iki şarj modu elde edilmiş ve bu modlarda bulanık kontrol algoritması yardımıyla eskisine oranla sırasıyla %25 ve %12.5 şarj hızında artış elde edilmiştir. Düşürücü modda sıcaklık yarım derece daha düşük sonuç vermiştir. Bu da aynı devrede bulanık yöntem algoritması kullanıldığında daha hızlı ve sağlıklı bir şarjın olacağını göstermektedir. Sonuçlar kısmında yazmasa da yükseltici mod, şarj döngüsünü daha kısa sürede bitirmesine karşılık aynı ısınmaya sahip olması, bu modun batarya üzerindeki ısı değişim oranının yüksek olduğunu gösterir. Yüksek değişim oranları batarya açısından beklenmedik sonuçlara sebep olabilir. Bu denklemlerle bu tezdeki eksikliklerin bulanık yöntem harici başka algoritmalar ile iyileştirilmesi tercih edilmiştir.

(Liu vd. 2021) Batarya şarj süresin boyunca en önemli ve kritik parametrelerden bir tanesi ise SoC değeridir. Şarj durumunu doğru bilmek hem güvenlik açısından hem kontrol açısından oldukça önemlidir. Genişletilmiş kalman filtresi, PID algoritması ile harmanlanarak geri besleme hattına sahip kapalı bir sistem ile tahmindeki hata aralığını düşürmeyi başarmıştır. Bu yöntemler uygulanabilmesi için bataryaya ait direnç

bilgilerinin tanımlanması gerekmektedir. Bu tahmin ilerleyen zamanlarda bu dirençlerin kullanımıyla sağlık tahminin edilmesinde rol oynayacaktır. Bir bataryanın iç direncinin başlangıçtaki, mevcut var ömrünün sonuna geldiğindeki direnç değerleri bilinirse sağlık durumu hesaplanabilir. Bu değerler arasındaki tek değişken değer mevcut direnç değeridir. Kalman filtresi kontrol yöntemi yerine tahmin yöntemi olarak kullanılabilir.

(Xu vd. 2021) Pillerin sağlık durumundaki bir kıstas ise kimyasal durumdur. Elektromanyetik bir yapıda olan pilin yapısının bozulması şarj kapasitesini azaltacaktır. Topluluk türü Kalman algoritması uygulanarak burada %1.5 sınırlamasıyla hata payı elde edilmiştir.

(Zeng vd. 2019) Elektrikli araçlarda yüksek gürültü ve batarya içinde değişen iç direnç, SoC ve SoH ölçümünde hatalara sebep olacaktır. Bu hataları minimize edebilmek amacıyla bulanık kokusuz kalman filtresi uygulanmıştır. Bu yöntem istatistiksel verilere ihtiyaç duymaktadır. İkinci dereceden RC lityum iyon pil modeli denklem haline getirilmiştir. Daha sonra bataryanın omik iç direncinden faydalanarak bataryanın yeni kapasitesi tahmin edilir. Yeni maksimum kapasite batarya sağlığını gösterdiği gibi şarj durumu için de oldukça önemlidir. Farklı dolulukta SoC değerleri seçilerek SoC tahminleri yapılmıştır.

(Vazini vd. 2022) DC/DC dönüştürücü şarj devresi sırasıyla PI ve Lyapunov ile tasarlanmıştır. Lyapunov algoritmasının akım takibinin farkı olacağı belirtilmiştir. Farklı frekans aralığında akım takibi hızları gözlemlenmiştir. Bu çalışmada hangi algoritmanın daha sağlıklı olduğu hakkında yorum yapılmadığı gibi, PI ve Lyapunov birlikte kullanılmamıştır. Ayrıca farklı Lyapunov algoritmalarının burada denenmemiştir. Bu farklı yaklaşımlar ve PI ile kombinasyonu bu tez içerisinde kararlılık parametrelerine odaklı incelenmiştir.

(Sethia vd. 2020) Kapasite durumunu bilmeden bir bataryayı daha uzun süre kullanabilmek ve o bataryanın kapasitesini optimize etmek mümkün değildir. Bu sebeple kapasite tahmininin düşük hata ile yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada Lyapunov gözlemcisi kullanarak daha doğru tahminin yapılması hedeflenmiştir. PI tahmini ile karşılaştırıldıktan sonra önerilen yöntemin gürültü, yakınsama ve hesaplama zamanları açısından daha doğru sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Doğru ve hızlı gözlem yapabilmek istenilen değerde çıkış almak için oldukça önemlidir. Gözlemin bir sonraki aşaması olarak bu gözlem değerleri geri besleme yoluyla daha optimize bir sistem sunabilir.

(Thakre ve Matala 2020) Güç kaynaklarının gücü aktarması sırasında güç kalitesinin bozulmasını gözlemlemek amacıyla yük gerilimi üzerindeki THD değerleri ölçülmüştür. SVPWM, SPWM ile karşılaştırıldığında, aynı kalitede voltaj çıktısı ve THD için daha düşük voltaj girişine sahip olması yeterlidir. Bunu SVPWM tekniğinin daha fazla güç aktarabileceği şeklinde de söyleyebiliriz.

(Yu vd. 2012) Asenkron motorlarda SVPWM tekniğinin popüler olmasıyla birlikte bu çalışma bu çalışmada SVPWM tekniğinin DSP ile nasıl uygulanabileceği ve sonuçların nasıl olacağı gözlemlenmiştir. SVPWM uygulandıktan sonra, oldukça popüler olan standart SPWM ile kıyaslanmıştır. Motor tork ve akım çıktısında azalma ile daha kararlı bir sistem elde edilmiştir. Ayrıca daha verimli bir DC voltaj elde edildi. IGBTlerin belirli sürelerde ve belirli hızlarda anahtarlanması bu tezdeki batarya şarj devresindeki MOSFETlerin anahtarlanması ile benzerdir.

(Azizi ve Rajeai 2015) Hibrit araçlar fren yaptıklarında elektriksel yük depolarlar. Bu yükü depolayabilmek için motor jeneratör modunda iken çalışacak bir devreye ihtiyaç vardır. Bu çalışmada iki yönlü DC/DC dönüştürücü kullanılarak motor ve rejeneratif modları aynı anda simüle edilmiştir. Bu iki yönlü dönüştürücü Lityum iyon pili besler. Pilin şarj olabilmesi için tasarlanan sistemin iki yönlü çalışmamasına karşılık rejeneratif modda çalışmaya müsaade eden bir yapı kullanılmıştır. Test sonucunda hız izleme, parazitler ve doğruluk açısından iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmadan yola çıkarak şarj devresinin ve motor sürücülerinin benzer bir yapıya sahip olduğu söylenebilir ve bu düşünce bu tezde kullanılmıştır. Bataryanın şarj ve deşarj olmak üzere iki modunun olduğu söylenebilir. Kaba bir şekilde bir motorun ileri ve geri yönde çalıştığını bu duruma benzetebiliriz. Anahtarlama yönü değiştirildiğinde motorun yönü değişeceği gibi, bataryadaki akımın yönü de değişecektir. Bataryadaki bu değişen akım yönü şarj ya da deşarj modunu belirleyecektir. Elektrikli motorlarda kullanılan teknikler ile ve bu çift yönlü DC/DC dönüştürücü kullanılarak yeni batarya şarj yöntemlerini bu tezde kullanma fikrinin doğmasına, 2015 yılında yapılan bu çalışma yardımcı olmuştur.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Lityum İyon Pil

Her bataryanın karakteristiği farklı bir davranış göstermektedir. Lityum iyon pillerin şarj kapasitesi, verimliliği ve hafifliği sebebiyle kullanım alanı oldukça geniştir. Bu yaygın kullanım sebebiyle bu çalışma için lityum pil seçilmiştir.

Pil özellikleri Simulink batarya kütüphanesinin önerisi ve ANR26650m1-B model pil kılavuzu kullanılarak seçilmiştir. Hazır blok pil parametreleri çizelge 3.1.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1.1. Pil parametreleri

Maksimum Kapasite	2.3 Ah
Kesim Voltajı	2.475 V
Maksimum Şarj Voltajı	3.748 V
Nominal Voltajda Kapasite	2.3 V

ANR26650m1-B modeli pil için önerilen şarj verileri çizelge 3.1.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1.2. Şarj modları (Anonymous 3)

Önerilen Standart Şarj Yöntemi	2.5A / 3.6V CCCV, 60 dk
%80 SoC Değerine kadar Önerilen Hızlı Şarj Yöntemi	10A / 3.6V CC, 12 dk

Çizelge 3.1.2’de görülmek üzere %80 şarja kadar 12 dakika boyunca hızlı şarj modu mümkündür. Daha hızlı bir şarj için 10A değerini geçmeyecek şekilde %80 doluma kadar şarj simüle edilmiştir. Daha sonra maksimum 2.5A olacak şekilde normal modda şarj devam etmiştir. Sadece PI ile sabit akım ile, bu tezde önerilen yeni teknikler eklendiğinde ise zamanla azalan akım yöntemi ile şarj tamamlanmıştır.

Lityum İyon pilleri genellikle düşük enerji gerektiren durumlarda tek hücre, bir pilin yetersiz olduğu durumlarda ise çoklu hücreler şeklinde kullanılır. Boyut, ağırlık, talep edilen akım ve gerilim miktarları pil sayısını etkileyebilecek temel parametrelerin birkaçıdır. Şarj karakteristiğini yorumlamanın daha kolay olması için şarj yöntemleri tek bir hücre üzerinde denenmiş olup çoklu hücre kullanımında nasıl bir dengeleme yapılabileceğinden kısaca bahsedilmiştir.

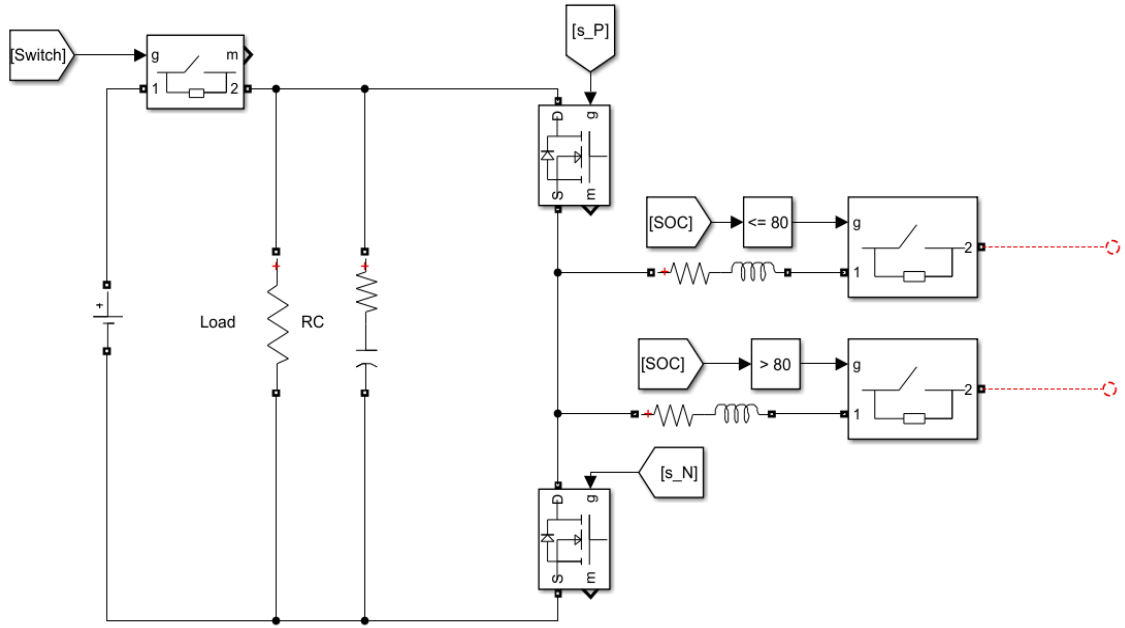
3.2. Yarım Köprü 2 Kademeli Çift Yönlü DC/DC Dönüştürücü

İzoleli ya da izolesiz olarak ikiye ayırabileceğim çift yönlü DC/DC dönüştürücüler diyotların anahtarlama elemanları ile yer değiştirilerek kontrol edilmesiyle elde edilir (Akkaya ve Özer 2021). Genellikle aynı besleme kaynağından farklı gerilimler ile çalışacak elektronik devreleri beslemek ve kontrol etmek için kullanılır (Dere vd. 2022). Ancak bu çalışmada tek bir pili farklı voltaj ve akım değerlerinde şarj edebilmek için kullanılmıştır. Bu dönüştürücüde anahtarlama elemanları olarak kullanılan MOSFETlerin anahtarlama süreleri bu tezde önerilen yöntemler ile değiştirilerek farklı şarj çıktıları elde edildi. Burada kısa devre riski sebebi ile MOSFETlerin aynı anda anahtarlanmaması gerekir. Gerçek uygulamalarda MOSFETlerin ve işlemcinin yapabileceği gecikme hesaba katılmalı, ölü bant denilen hata için tolerans payı verilmelidir. Aksi durumda anahtarlama elemanları zarar görebilir ve İngilizcesi dead-band olan bu terim bilinmediği sürece orunun nereden kaynaklandığı bulunamaz. Yeni nesil anahtarlayıcılar yüksek hızda açma ve kapama yapabilmekle, daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilmektedir. Her ne kadar kısa devre durumunda hemen bozulmasalar da bu süre çok uzun değildir. Ayrıca dayanabildikleri kısa devre süresinin de bir sıklığı vardır. Çok sık şekilde tolere edilebilen sürede kısa devre olsa bile bir süre sonra hasar görme olasılığı yüksektir.

Anahtarlama elemanlarını günümüz kontrol teknikleri için çok büyük önem taşımaktadır. İstenilen süre boyunca istenilen büyüklükte akım ve gerilim ayarlanarak istenilen çıkışa ulaşmayı kolaylaştırır. Örneğin SVPWM gibi uygulamalarda vektörel işlemler yapılarak bir elektrik motoru daha verimli şekilde döndürülebilir. Ya da beleme hattı olan bir kontrol algoritmasında sisteme aktarılan gücün miktarı değiştirilebilir.

Diyot yerine anahtarlama elemanları kullanılarak çift yönlü kontrol sağlayan bu dönüştürücü üzerine yüksek hız şarj modu ve standart şarj modu için iki farklı çıkış tasarlandı. Dolum oranı %80'nin altında olduğunda yüksek akım veren çıkış, %80 ve üzerinde olduğu durumlar için standart şarj modunu destekleyen daha düşük akım taşıyan direnç kullanıldı.

Simulink üzerinde çizilen yarım köprü iki kademeli çift yönlü DC/DC dönüştürücü şekil 3.2.1'de verilmiştir.



Şekil 3.2.1. Çift kademe şarj çıkışlı çift yönlü konverter

3.3. Sabit Gerilim Şarj Yöntemi

Voltaj sabit iken zamanla değişen akım uygulanır. Yüksek akım şarj hızını artırırken batarya sağlığını azaltacaktır. Bataryanın en az miktarda hasar görüp en yüksek hızda şarj edebilmek için zamanla azalan akım yöntemi kullanılır (Patnaik vd. 2019; Muqet vd. 2020).

Genellikle sabit akım yöntemi göre daha hızlıdır çünkü başlangıçta yüksek akım uygulamak mümkündür. Ancak yüksek akım sağlık ve ısınma açısından olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Ayrıca özel devreler olmadığı zaman bu çalışmada uygulanan kontrol yöntemleri ile çalışmayı desteklememektedir. Bu dezavantajların üstesinden gelebilmek için doğasında daha sağlıklı olan yöntemler kullanılmalı ya da geliştirilmelidir.

Teorik olarak çıkış geriliminin batarya gerilimine eşit olduğu sırada akımın sıfır olması düşünülerek geliştirilmiştir. Eğer bu yöntem kontrol teknikleri ile geliştirilmezse batarya daha yüksek gerilimde şarj olmayı desteklese dahi bu gerilimi uygulamak mümkün olmayacaktır.

3.4. Sabit Akım Şarj Yöntemi

Akım sabit voltaj değişkendir ancak akımın yüksek tutulması şarj hızını artırırken batarya sağlığını olumsuz etkileyecektir ve yangın riskine sebep olacaktır. Riskleri minimize etmek için düşük seviye akım kullanıldığında ise şarj süresi uzayacaktır.

Yüksek akımla şarjı sonlandırmak batarya sağlığı ve güvenliği sebepleri ile pek mümkün olmayacaktır. Sağlık ön planda olup daha düşük akım uygulandığında ise şarj

süresi uzayacaktır. Bu durum için iki adım kullanılarak şarj gerçekleştirilebilir. İlk adım yüksek şarj modunda bataryanın kabul ettiği yüksek akım, daha sonra standart mod ile daha düşük akım uygulanabilir. Örneğin bu çalışmada PI algoritması kullanıldığında akım sabit kalmış olup %80 doluma ulaştığında ise düşük akımla şarj olmuştur. Bu teknik yeni değildir ancak %0 ile %80 değerinde aynı akım ile şarj olması sağlık açısından dezavantajdır. Bataryadaki olumsuz kimyasal etkileri azaltmak ve elektronik elemanların sağlığını korumak için zamanla akımın düşürülmesi gerekmektedir.

3.5. Değişen Akım ve Değişen Voltaj (Kombine) Şarj Yöntemi

Sabit akım ve sabit gerilim yöntemlerinin avantajları alınarak ve dezavantajları bırakılarak elde edilen kombine yöntemdir. Yukarıdaki iki yöntemin birisinde zamanla gerilim değişirken diğerinde ise akım değişmektedir. İkisi aynı anda sağlanırsa yukarıdaki tekniklerde sayılan dezavantajların üstesinden gelinmiş olur.

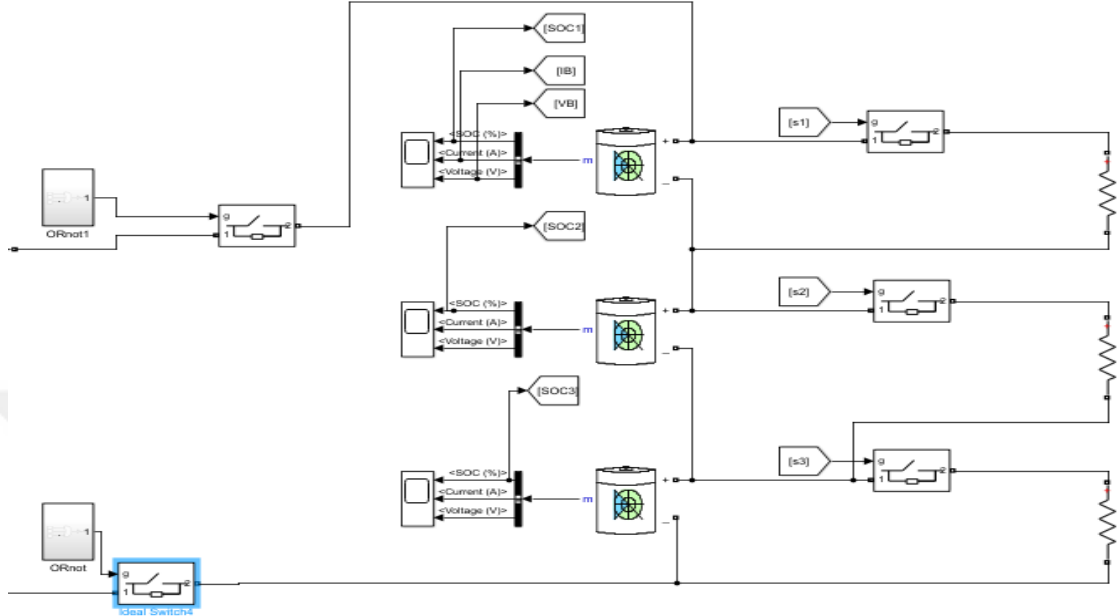
Şarj hızını ve pil sağlığını optimum seviye çekebilmek için zamanla hem akım hem de voltaj değiştirilir (Turhan 2011; Anonymous 1). Bu çalışmada bataryanın sağlığını yüksek tutabilmek için zamanla azalan akım ve potansiyeli dengeleyebilmek için ise zamanla artan voltaj tekniği elde edilmiştir. Bu kombinasyonu sağlayan tekniğin elektrikli motor sürücü devreleri için kullanılan SVPWM yönteminin batarya şarj sistemlerine uyarlanarak, bu çalışmanın özgün yöntemi olarak elde edilmiş olması ilerleyen bölümlerde detaylı şekilde bahsedilmiştir. Bu yeni yöntem eklendiğinde zamanla voltaj artarken, akım azalmaktadır.

Bu yeni yöntemle rağmen yine standart ve yüksek hızlı şarj modu olmak üzere iki türlü şarj modu kullanılmıştır. Çünkü şarj modu verilerini aldığımız pil paketi kılavuzunda tek mod ile, hangi akım büyüklüğünün hangi hızda hangi seviyeye düşürüleceğine dair bir bilgi yoktur. Örneğin 10A ile başlayan akımın zamanla 2.5A değerine tek mod ile düşürülmesi durumunda arada kalan 5A gibi değerler ile bataryanın hangi sürede çalışabildiği bilinmemektedir. İlerleyen zamanlarda bu mod ile tek bir modda şarjı tamamlayabilmek için yeni çalışmalar söz konusu olabilir. Bu çalışma ilk olacağı için gerekli güvenlik önlemleri alınmadan ve hesaplamalar yapılmadan kesinlikle deneme yapılmamalıdır.

3.6. Pasif Dengeleme

Risk yaratan aşırı gerilim bir direnç yardımıyla ısı enerjisine dönüştürülerek dışarı atılır. Daha basit ve ucuz olan bu yöntem dengeleme amacıyla kullanılan dirençleri sürekli olarak aktif ve pasif hale getirerek çalışır. Uygulanabilirliğinin kolay ve maliyetinin az olması sebebiyle pasif dengeleme üzerine çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Her birinde farklı faydalar ve metotlar kullanılmış olsa da ortak nokta, diğer hücrelerden yüksek olan enerjiyi dışarıya atarak hücreler arasındaki dengeyi sağlamaktır. Bu çalışmada boşaltma direnci kullanılmış olup anahtarlayıcının iç direnci de hesaba katılmıştır.

Batarya SoC durumu sürekli olarak sensörler ile ölçülür. Eşitliği bozan istenmeyen bir durum olduğunda, şekil 3.6.1’de görüldüğü gibi yüksek potansiyele sahip bataryaya ait boşaltma direnci anahtarlanır ve bataryalar dengelenir.



Şekil 3.6.1. Simulink basit dengeleme çizimi

İlk önce dengeleme sistemi için anahtarlama mantıksal kapılar ile tasarlanmıştır ancak daha sonra fiziksel alandan tasarruf edebilmek için tek bir anahtarlama ile yazılımsal olarak kontrol edilmiştir.

İlk önce her bir hücreden gelen SoC değerleri ondalık olarak bir değişken üzerine atandı. Daha sonra virgülden sonra iki hane ile çalışmak için hassasiyet ayarı yapıldı. Her bir hücre kendi arasında kıyaslandıktan sonra, dengesizlik varsa şarj modu durdurulur, yüksek potansiyele ait boşaltma direnci aktif edilir. Her üç hücre de birbirine iki hane hassasiyetle eşitlendikten sonra şarj modu tekrar aktif edilir. Bu prosedür tüm şarj işlemi boyunca devam eder. Algoritma pil sayısı arttığında tek tek kıyas yapmamak için, SoC değerleri büyükten küçüğe doğru sıralayarak kıyaslanabilir. Ondalık hane hassasiyeti belirlemek yerine yüzdesel tolerans tanımlanabilir.

$$R_b = \frac{V_{max}}{I_{dm}} \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1’de gösterilen I_{dm} maksimum deşarj akımı, V_{max} maksimum pil gerilimi ve R_b ise boşaltma direncidir (Amin vd. 2017).

Örneğin maksimum şarj voltajı 3.748V olan 50A boşaltma akımına sahip olan bir batarya için toplamda 74.96mΩ değerinde bir direnç gereklidir. Bu direnç değerinden kullanılan MOSFET’in iç direnci çıkartılabilir.

3.7. SoC Hesaplaması

Bir pilin doluluk oranını, kullanıcılar için önemli olmakla birlikte tasarımcıların şarj sürecini kontrol edebilmeleri için en önemli parametrelerden birisidir. Bu tezde de hızlı ya da yavaş şarj modu SoC bilgisine göre belirlenmektedir. Eğer şarj durumu %80 değerinden daha düşük ise hızlı şarj, aksi durumda daha yavaş şarj işlemi gerçekleştirilmiştir. Pil tam doluma ulaştığında ise şarjı sonlandırmak yerine uygulanan yeni metotların davranışını simülasyon üzerinde görmek tercih edilmiştir. Batarya tam dolunda iken akım sıfır düzeyine düşmemiştir ve voltaj artmaya devam etmiştir. Bu durum bataryada hızlı ısınmaya sebep olmuştur. Dolum tamamlandığında pil güvenliğini sağlayacak ek bir sistem kesinlikle gereklidir.

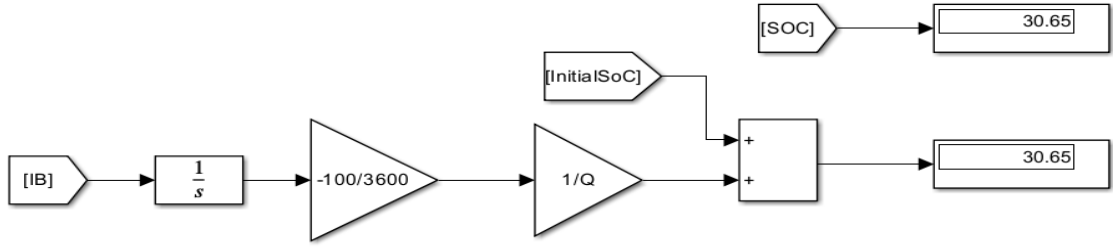
Birden fazla pil kullanımında her bir hücrenin doluluk oranı kesinlikle düzenli olarak ölçülmeli ve SoC değerleri arasında fark olursa bu durum BMS denge sistemine bildirilmeli, şarj işlemi varsa durdurulmalı ve hücreler dengelenmelidir. Dengelenme tamamlandıktan sonra tekrar şarja devam edilebilir. Bu bilgi BMS kartına UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter), I2C (Inter-Integrated Circuit), SPI (Serial Peripheral Interface) ve CAN (Controller Area Network) gibi farklı protokoller ile verilebilir.

Batarya doluluk oranını ölçen sensörler bulunmaktadır. Basit düzeyde bir pil ölçer devresinin nasıl yapıldığına dair uygulamalar oldukça yaygındır ancak bu çalışmadaki kontrol algoritmalarının dolum hızına nasıl etki edeceğini yorumlayabilmek için SoC değerini bir tasarımcı olarak tahmin etmemiz de gereklidir. Eşitlik 3.2’te de görüldüğü üzere dolumu etkileyen değişken akımdır. Bu da yeni yöntemlerin akıma etkisinin çok ciddi bir öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Kapasite genellikle Amper-saat cinsinden yüzdesel olarak enerjiyi gösterir ve doğrudan ölçüm, gerilim tabanlı ölçüm ve Coulomb sayma yöntemi ile ölçüm yöntemleri ile tespit edilebilir (Tezde ve Okumuş 2018).

$$SoC = SoC_{ilk} - \frac{\int Current_{in}}{Q \times 3600} \times 100dt \quad (3.2)$$

3600 sayısı bir saatteki saniye miktarı olup 100 sayısı ise yüzdelik hesap yapabilmek için kullanılan bir çarpandır. Q batarya kapasitesidir (Kim ve Kowal 2022). Formülden de anlaşılacağı üzere bataryanın ilk dolumuna, daha sonradan ilave edilen enerji eklenmektedir. Bu yeni eklenen enerji, akımın integralini alarak birim zamanda geçen yük miktarını sayarak hesaplanır. Bu hesaplama, şekil 3.7.1’de kendi bloklarımız ile Matlab Simulink içinde bulunan hazır batarya bloğunun SoC tahmini ile karşılaştırılmıştır ve aynı değer elde edilmiştir.



Şekil 3.7.1. SoC blokları

3.8. PI Kontrol Algoritması

PID uygulamalarının %90'ında türev kazancının kullanılmadığı tahmin edilmektedir (Knospe 2006). Bu çalışmada da ani tepki ile riskli davranışlardan uzak durmak amacıyla PI kontrol kullanılmıştır. Bu matematiksel algoritma ile sistemin şimdiki ve geçmişteki durumu kullanılarak ideal olan değere ulaşılmaya çalışılır. Mevcut durum ile ideal durum arasındaki fark hatanın miktarını belirler. Oransal sabit ile cevabın aşmasını kontrol ederken integral ile kalıcı hata durumu yani tolere edilebilir hata aralığı kontrol edilir (Hamamci 2008; Borase vd. 2021).

Matematiksel formüller aşağıdaki gibidir.

Sistem cevabı $u(t)$ olmak üzere,

$$u(t) = Kp \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right) \quad (3.3)$$

Mevcut hata bir önceki hata ile hesaplanır.

$$e_1(t) = e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.4)$$

Türevsel sabit bu çalışma için sıfır olarak alınır ve 3.4 yeniden düzenlenir. Elde edilen yeni cevap,

$$u(t) = Kp \left(e_1(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right) \quad (3.5)$$

Ki integral sabitidir.

$$Ki = \frac{Kp}{T_i} \quad (3.6)$$

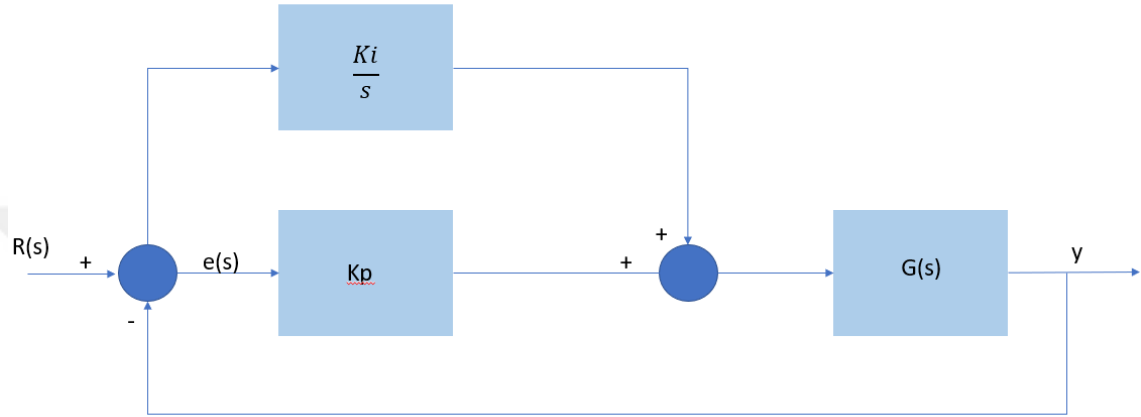
Transfer fonksiyonu 3.7 eşitliği ile elde edilir.

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = kp + \frac{k_i}{s\lambda} \quad (3.7)$$

$C(s)$ denetleyici cevabıdır ve $G(s)$ kontrol edilmek istenilen sistemin transfer fonksiyonudur.

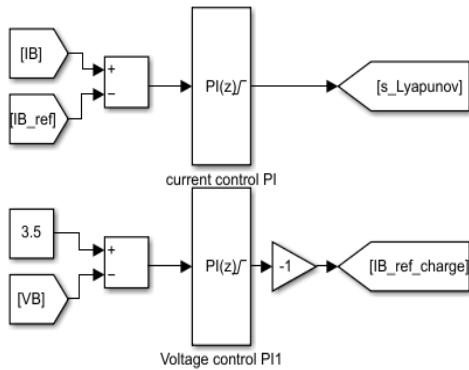
$$Y = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}R \quad (3.8)$$

Bir sistemin davranışı transfer fonksiyonu ile gözlemlenir. (Hamamci 2008; Borase vd. 2021). Transfer fonksiyonunu bilmek kontrol işlemlerini oldukça kolaylaştırır ve yazılımı çok hızlı bir şekilde matematiksel eşitlik olarak yazılabilir. Bu açıdan PI ve PID tekniklerinin uygulanması oldukça kolaydır. Yüksek oranda başarıya sahip olması ise kullanım yaygınlığını arttırmaktadır.

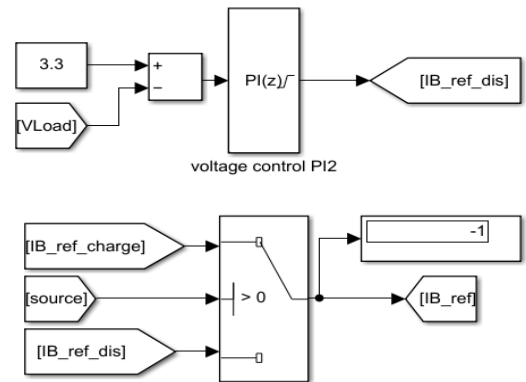


Şekil 3.8.1. PI kontrol algoritması

Oransal ve integral sabitlerini belirlemenin birkaç farklı yolu vardır. Bazı programlar da bazı parametrelere uyarak en iyi ayarlamayı yapmaya çalışmaktadır. Bazense bu durumun çok ciddi zaman alması ya da başka sebeplerle mümkün olmadığı sıralarda deneme yanılma yoluyla bu sabitler değiştirilerek kabul edilebilir cevaba göre seçilebilir. Ancak matematiksel olarak optimum değere bu yöntem ile ulaşmak zordur. Bu sebeple çalışmamızda diğer algoritmaların başarısını görebilmek amacıyla öncelikle iyi ayarlanamamış PI kullanılmıştır. Daha sonra PI optimize edildikten sonra akım, voltaj, SoC ve sıcaklık değişimleri tekrar incelenmiştir. Simulink şarj ve deşarj blokları şekil 3.8.2 ve 3.8.3'te gösterildiği gibidir.



Şekil 3.8.2. Şarj kontrol blokları



Şekil 3.8.3. Deşarj kontrol blokları

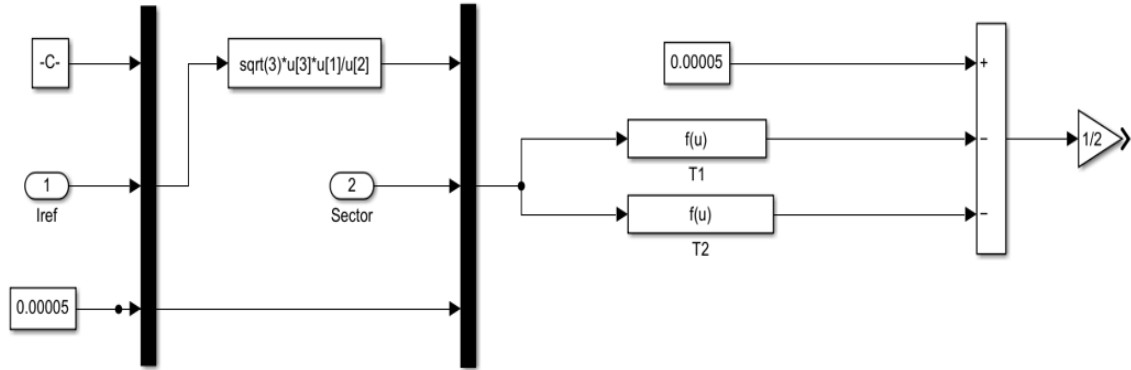
3.9. Batarya İçin Uyarlanmış Asenkron Motor SVPWM Zamanlayıcı

Sinüs PWM'e oranla daha başarılı sonuç veren SVPWM altıgen formunda vektörel bir dijital PWM yöntemidir (Çelik, Öksüztepe, ve Kürüm t.y.). Daha çok elektrikli motorların yüksek performansta çalışması için kullanıldığı görülür (Bal vd. 2007). Sinüs PWM gibi diğer popüler PWM yöntemlerine karşılık daha verimlidir ve THD değeri daha düşüktür. Yeni nesil işlemciler ile uyarlaması gün geçtikte daha kolay hale gelmektedir. Burada mantık vektörler ile altıgen oluşturarak bir elektrikli motorun dönmesini sağlar. MOSFET ya da JFET (Junction Field Effect Transistor) yardımı ile karşıya aktarılan güç değişiyor ise bu teknik uyarlandığında bataryanın kontrolü içinde kullanılabilir olduğu test edildi. 6 farklı MOSFET yerine 2 adet kullanılmıştır. İlerleyen çalışma konusu olarak 6 MOSFETli şarj modu denenebilir. Zamanlayıcılar matematiksel hesaplamalara dayalıdır. T1 ve T2 olmak üzere iki temel zamanlayıcı bulunmaktadır.

$$T1 = u[1](\sin(u[3].\pi/3)\cos(u[2])-\cos(u[3].\pi/3).\sin(u[2])) \quad (3.9)$$

$$T2 = u[1](\cos((u[3]-1)(\pi/3))\sin(u[2])-\sin((u[3]-1)(\pi/3))\cos(u[2])) \quad (3.10)$$

T1 ve T2 fonksiyonlarına ait bloklar şekil 3.9.1'de verilmiştir.



Şekil 3.9.1. SVPWM fonksiyonları

$u[1]$, $u[2]$ ve $u[3]$, T1 ve T2'yi hesaplamak için kullanılan temel bileşenler olmak üzere,

$$u[1] = \sqrt[2]{T_{örn}^3} \left(\frac{V_{ref}}{V_{DC}} \right). \quad (3.11)$$

$u[2]$ PI'den gelen anahtarlama bilgisi olarak kullanılmıştır. $u[3]$ örnekleme sinyali periyodudur.

$$u[1] = \frac{1}{2} (T_{örn} - T1 - T2) \quad (3.12)$$

$$u[2] = T2. \quad (3.13)$$

$$u[3] = T_3. \quad (3.14)$$

$u[4]$ sistemden gelen endüstri bilgisidir.

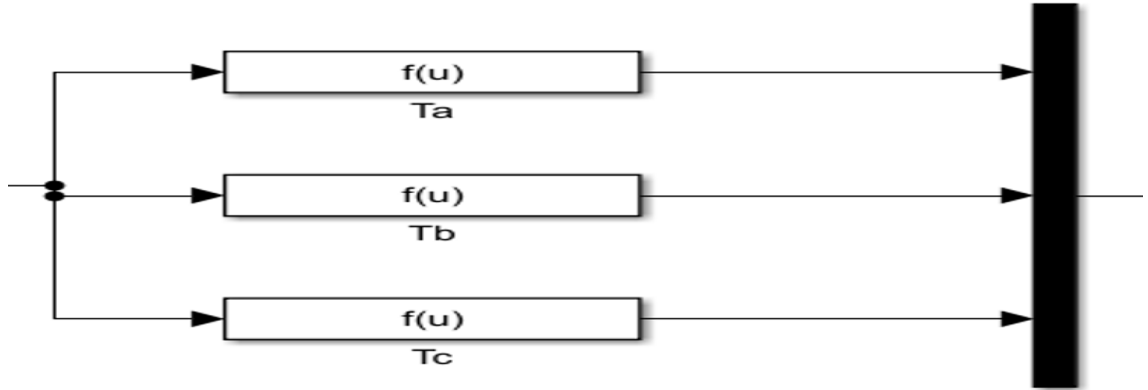
Normalde SVPWM altıgen yapıya sahip olduğu için birbirlerinin değilleri ile birlikte altı farklı durumu oluşturmak için T_a , T_b ve T_c olmak üzere 3 farklı durum hesaplanır. Ancak çalışmada 2 farklı durum yettiği için zamanlayıcılardan birisini seçmek yeterlidir.

$$T_a = (u[4]==1)(u[1]+u[2]+u[3]) + (u[4]==2)(u[1]+u[2]+u[3]) + (u[4]==3)(u[1]+u[3]) + (u[4]==4).(u[1]) + (u[4]==5)(u[1]) + (u[4]==6)(u[1]+u[2]). \quad (3.15)$$

$$T_b = (u[4]==1)(u[1]) + (u[4]==2)(u[1]+u[2]) + (u[4]==3)(u[1]+u[2]+u[3]) + (u[4]==4).(u[1]+u[2]+u[3]) + (u[4]==5)(u[1]+u[3]) + (u[4]==6)(u[1]) \quad (3.16)$$

$$T_c = (u[4]==1)(u[1]+u[3]) + (u[4]==2)(u[1]) + (u[4]==3)(u[1]) + (u[4]==4)(u[1]+u[2]) + (u[4]==5)(u[1]+u[2]+u[3]) + (u[4]==6)(u[1]+u[2]+u[3]) \quad (3.17)$$

T_a , T_b ve T_c fonksiyonları şekil 3.9.2’de verilmiştir.



Şekil 3.9.2. T_a , T_b ve T_c fonksiyonları

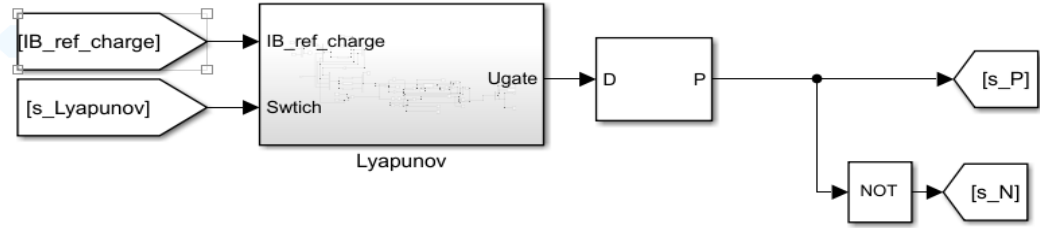
Daha sonra elde edilen sonuç 0.5 değeri ile çarpılır (Jung 2005).

Uyarlanmış SVPWM zamanla azalan akım sağlamıştır. Bataryaların talebine göre matematiksel formüller değiştirilerek akım ivmesi de değiştirilebilir. Böylece iki farklı moda sahip olmadan tek bir modla akım düzenli olarak azaltılabilir.

3.10. Lyapunov Bilinen Bazlı Model

Kararlılık ilkeleri doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlere aynı şekilde etki etmemektedir. Doğrusal sistemlerde çalışmanın basitliği sebebiyle doğrusal olmayan sistemleri, doğrusal sistemlere benzeterek çözmek kararlılık sağlamak için etkili bir yol olabilmektedir. Lyapunov ilkeleri bu yönüyle doğrusal olmayan sistemlerin birçoğuna kolayca uygulanabilmiş olmakla birlikte başarılı sonuçlar elde etmiştir (Tee vd. 2009; Wang vd. 2016). Batarya yapısı doğrusal bir yapıda çalışmaya müsaade etmediği için

çalışmada eski sistemin kararlılığını arttırmak için kullanılmıştır. Birden fazla Lyapunov yöntemi olduğu için, farklı yöntemler simüle edilmiş, şarj hızı, batarya ısınması, akım değişim hızı, sistem oturma zamanı gibi önemli sonuçlar karşılaştırılmıştır. Lyapunov'un bilinen bazı modeli kurulduktan sonra hata, geri ve ileri besleme fonksiyonlarını değiştirerek diğer modelleri test etmek oldukça kolaylaşmıştır. Şekil 3.10.1 ile şarj devresinin anahtarlama bilgisi elde edilmiştir.



Şekil 3.10.1. Simulink Lyapunov blokları

İkinci mertebeden konum, hız ve ivmeye sahip bir fonksiyon için başlangıç konumu sabit bir değer olan fonksiyon seçilir.

$$x(0) = c \quad (3.18)$$

3.18'de her iki tarafın türevi alındığında hız fonksiyonu elde edilir.

$$\dot{x} = f(x) \quad (3.19)$$

Daha sonra ivme kullanılarak 3.19 denkleminin türevi yardımıyla kontrol giriş sinyali $u(t)$ elde edilir.

$$\ddot{x} = -f(x, \dot{x}, \theta) - u(t) \quad (3.20)$$

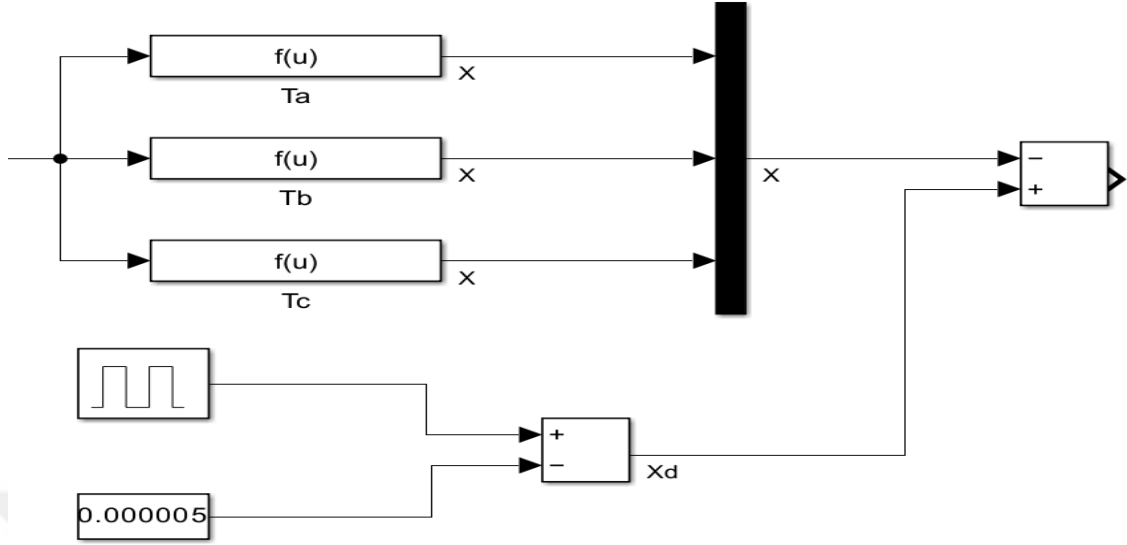
3.20 eşitliğinde $u(t)$ yalnız bırakılır.

$$u(t) = \ddot{x} + f(x, \dot{x}, \theta) \quad (3.21)$$

Hata fonksiyonu en az ikinci dereceden türevlenebilir sınırlı bir fonksiyon olmalıdır.

Önceden uyarlanmış olan SVPWMden gelen veri Lyapunov ile birleştirilir. Daha sonra hata tahmini yapılır. Bu tahmin Lyapunov yöntemlerinin ileri ve geri besleme fonksiyonları ile iyileştirilerek beklenen değerden çıkartılır. Beklenen değer olduğu fonksiyonlar değiştiğinde temel bazı Lyapunov yönteminden uzaklaşmaya başlayıp gürbüz Lyapunov yöntemleri elde edilir. Kesin olarak hangi yöntemin daha iyi olduğunu söylemek mümkün değildir çünkü her birinin kararlılık yöntemleri farklıdır. Ayrıca sistemin ihtiyaçları da farklılık gösterebilir ve geri besleme fonksiyonu eklenmemiş saf hata eşitsizliği 3.22 yazılır.

$$e = x_d - x \quad (3.22)$$



Şekil 3.10.2. x ve x_d fonksiyonlarının farkının alınması

Örnekleme periyodu şekil 3.10.2’de 0.000005 saniye olarak alınmıştır. Lyapunov kuralına göre örnekleme periyodunun referans sinyalinden büyük olmasını yasak olduğu durumlar denendiğinde ise sistemde istenilmeyen yanıtlar görülmüştür.

Laplace alanında s değerinin sıfıra yakınsadığı türevi negatif olan V skaleri kullanılarak ispat yapılabilir, filtrelenmiş hata sinyalleri elde edilebilir.

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (3.23)$$

α skaler kazanç kat sayısı bir reel sayı olarak seçilir. 3.23 denklemindeki hatayı denklem 3.21’deki sisteme taşıyabilmek için filtrelenmiş hata sinyali tanımlanır (Zergoğlu vd. 2013; Kitiş ve Üser 2021).

$$r = \dot{e} + \alpha e, \quad (3.24)$$

Hata ile filtrelenmiş hata arasındaki bağlantı,

$$e(s) = \frac{1}{s + \alpha} r(s) \quad (3.25)$$

Filtrelenmiş hata sinyalinin türevi alınır.

$$\dot{r} = (\ddot{x}_d - \ddot{x}) + \alpha \dot{e} \quad (3.26)$$

3.26 denkleminde yola çıkarak ileri ve geri besleme fonksiyonları elde edilir.

$$u_f = (\ddot{x}_d + \alpha \dot{e}) \quad (3.27)$$

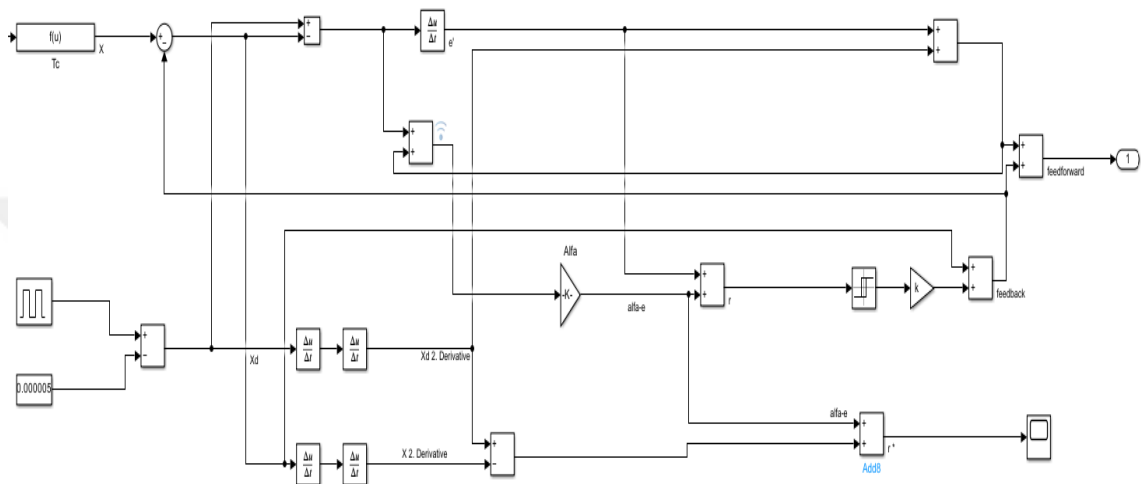
u_f ileri besleme fonksiyonudur.

$$u_o = f(x, \dot{x}, \theta) + kr \quad (3.28)$$

u_0 geri bildirim fonksiyonudur.

$$u = (\ddot{x}_d + \alpha \dot{e}) + f(x, \dot{x}, \theta) + kr \quad (3.29)$$

u hem ileri hem de geri besleme fonksiyonlarını içeren bir fonksiyondur.



Şekil 3.10.3. Tam bazlı bilinen Lyapunov şeması

Eğer şekil 3.10.3 eşitliğindeki ileri ve geri besleme fonksiyonları belirli bir kural ile değiştirilirse farklı Lyapunov algoritmaları elde edilebilir.

3.11. Gürbüz (Robust) Denetim

Gürbüz denetimde dışarıdan gelebilecek her türlü belirsizliği, sistem bilgisini de kullanarak tahmin ederek cevap olarak en doğru tepki vermeye çalışılır. $\tilde{f}(x, \dot{x}, \theta)$ tahmini değerini kullanarak, gerçek değer ile tahmin değer arasındaki farkı sınırlandırma yöntemine dayalıdır.

$\rho(x, \dot{x}, \theta)$ sınırlayıcı bir fonksiyonu olmak üzere,

$$|\tilde{f}(x, \dot{x}, \theta)| < \rho(x, \dot{x}, \theta) \quad (3.30)$$

3.30 eşitsizliği gürbüz olmanın koşuludur (Zergeroğlu vd. 2013).

Bu koşul yüksek frekans ve yüksek kazançlı denetimlerde kullanılmıştır.

3.12. Yüksek Frekans Lyapunov

Yüksek frekanslı denetleyicinin geri besleme bölümü 3.28’den biraz farklıdır.

$$u_o = kr + \hat{f}(x, \dot{x}, \hat{\theta}) + v_R \quad (3.31)$$

v_R değeri için en iyi fonksiyon kabul edilebilir hata payı ε ile 3.22 eşitliğindeki gibidir.

$$v_R = \frac{\rho^2 r}{|\rho||r| + \varepsilon} \quad (3.32)$$

Hata payı sıfırdan büyük çok küçük bir sayıdır.

Filtrelenmiş gürbüz hata fonksiyonu 3.33 eşitliğini takip eder (Zergeroğlu vd. 2013).

$$\dot{r} = -kr - \frac{\rho^2 r}{|\rho||r| + \varepsilon} + \tilde{f}(x, \dot{x}, \tilde{\theta}) \quad (3.33)$$

3.13. Yüksek Kazançlı Lyapunov

Yüksek frekans algoritması ile çok yakın çalışır ancak v_R fonksiyonu paydasında sadece hata payını barındırır. Bu sayede daha yüksek kazanç elde edilir.

$$v_R = \frac{r\rho^2}{\varepsilon} \quad (3.34)$$

3.14. Kokusuz Kalman Filtresi Kullanarak Direnç Değişimi ve SoH Tahmini

Kalman filtreleri ölçüm, tahmin ve düzeltme yapmak için kullanılan bir algoritmadır. Şarj döngüsü sırasında ölçülebilen değerlerden faydalanarak batarya direncinin değişimi gözlemlemek için bu algoritma kullanıldı. Batarya üzerindeki direnç değişimi bataryanın sağlığının kötüye gittiğini gösterir. Çalışma sırasında bir bataryaya ait tüm matematiksel denklemler olmadığı için, eldeki veriler ile farklı şarj yöntemlerinin sağlığa etkisi, direnç üzerindeki değişim hızının oranı ile karşılaştırıldı.

Kalman filtresi birçok elektronik alanda kullanılmakla birlikte batarya içinde popüler bir algoritmadır. Değişen batarya parametreleri ile daha iyi SoC tahmini için kullanılabilir (Cheng vd. 2014). 2009 yılında kapasiteyi ve iç direnci tahmin ederek SoH durumunun değerlendirilmesi için kokusuz kalman filtresi önerilmiştir (Zhang vd. 2009). Doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler için farklı kalman filtresi uygulamaları vardır. Kokusuz kalman filtresi birden fazla örnekleme ile doğrusal olmayan sistemlerin tahmininde kullanılması sebebiyle iç direncini tahmin etmek için uygundur.

Sağlık durumu eşitlik 3.35 ile gösterilen parametrelerle ifade edilebilir.

$$SOH = \frac{R_{EOL} - R}{R_{EOL} - R_{BOL}} * 100\% \quad (3.35)$$

R deney ile ölçülen iç direnç, R_{BOL} bataryanın yeni olduğu anki iç direnç ve R_{EOL} bataryanın ömrü tamamladığı anki iç dirençtir. Kalman filtresi ölçüm yapmadan, R'nin değerini tahmin etmekte oldukça başarılıdır. (Ren vd. 2021).

Eşitlik 3.35'ten de anlaşılacağı üzere batarya %100 sağlığa sahip iken R ile R_{BOL} eşittir. R değeri artmaya başladıkça batarya ömrü tükenir. Sağlık hakkında yorum yapabilmek için R parametresindeki tahmini değişimin hızını PI ve bu tezde kullanılan yeni algoritmalar eklenerek kıyaslandı. Bu tahmin belirli bir sıcaklık altındaki verilerin matematiksel modellenmesiyle yapılabilmektedir. Bu sebeple doğrudan R'yi tahmin edememek de hangi algoritmanın değişiminde daha az etkisi olduğunu söyleyebilmek mümkündür.

Direnç tahmini için eşitlikler yazılırsa,

$$R_k = R_{k-1} + r_{k-1} \quad (3.36)$$

Direncin durumu bir önceki direnç durumu değerlendirilerek hesaplanır.

$$U_k = u_{oc}(SoC) - U_{1,k} - U_{2,k} - i_k R_k - \omega_k, 1 \quad (3.37)$$

SoC doğrusal fonksiyonu ile U_{OC} açık devre gerilimidir.

RC devreleri arasındaki U_1 ve U_2 terminal gerilimleri,

$$U_1(k) = U_1 e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} + R_1 i_k (1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_1}}) \quad (3.38)$$

$$U_2(k) = U_2 e^{-\frac{t}{R_2 C_2}} + R_2 i_k (1 - e^{-\frac{t}{R_2 C_2}}) \quad (3.39)$$

İç direncin yeni değerini tahmin edebilmek için bazı gerçek parametrelere ihtiyaç vardır.

$$\tilde{R}_0 = E[R_0] \quad (3.40)$$

R_0 filtreleme başlangıç değeridir.

$$P_0 = E[(R_0 - \tilde{R}_0)(R_0 - \tilde{R}_0)^T] \quad (3.41)$$

R_0 bataryanın ilk iç direncidir.

İç direnç çok hızlı şekilde değişmektedir. Örneklemenin yeterli olduğu durumda bir önceki gerçek değeri yeni zamandaki tahminin güncellenmiş değeri olarak alınır. R_k durum değişkeni ve P_k hata kovaryansı denklemleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$R_k = \tilde{R}_k + K_k [U_k - U_{OC}(SoC) - U_{1,k} - U_{2,k} - i_k \tilde{R}_k] \quad (3.42)$$

$$P_k = (I - K_k C_k) \tilde{P}_k \quad (3.43)$$

$\tilde{R}_k$ ve $\tilde{P}_k$, R_k ve P_k 'nin güncel zaman değerleridir.

$$K_k = \tilde{P}_k(C_k)^T [C_k \tilde{P}_k(C_k)^T + P_r]^{-1} \quad (3.44)$$

Kalman kazancı çözümü iç direnci ve hata kovaryansını belirlemede kullanılır ve hatanın miktarı önemlidir.

Terminal gerilimi Kirchhoff gelirim yasası ile yazılır.

$$U_L = U_{OC} - I_L R_0 - I_L R_1 (1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_1}}) + I_L R_2 (1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_1}}) \quad (3.45)$$

Değişken sayısı τ_1 ve τ_2 ile azaltılır ve a,b,c değişkenleri kullanılır. Yeni değişkenler ile eşitlik 3.45 düzenlenir.

$$y = a - b(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) - c(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \quad (3.46)$$

$$a = U_{OC} - I_L R_0, \quad b = I_L R_1 \quad (3.47)$$

$$c = I_L R_2, \quad \tau_1 = R_1 C_1, \quad \tau_2 = R_2 C_2 \quad (3.48)$$

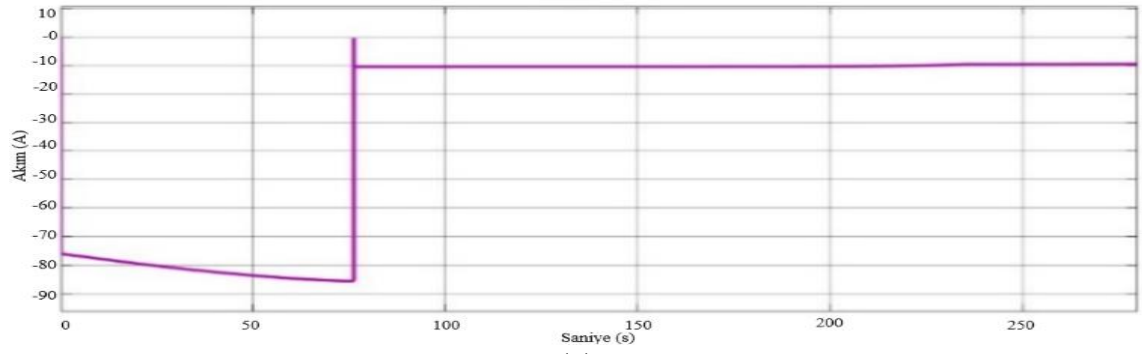
Ortalama R_0 iç direnci eşitliği,

$$R_0 = \frac{|U_1 - U_2| + |U_3 - U_4|}{2I_L}, \quad (3.49)$$

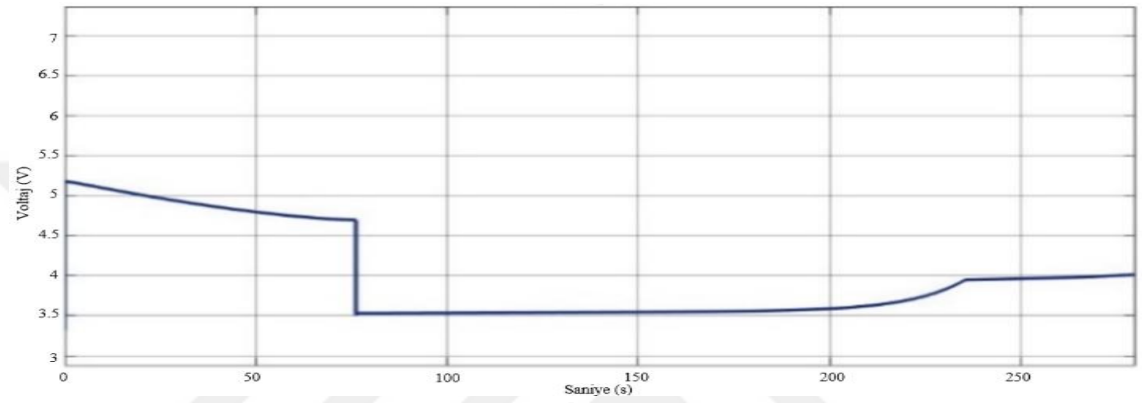
U_1 başlangıç anındaki gerilim, U_2 deşarj başlangıcında mutasyondan önceki gerilim, U_3 deşarjın sonundaki mutasyondan önceki, U_4 Deşarjın sonundaki mutasyon voltajı ve I_L boşaltma akımıdır.

$$R = at + b \quad (3.50)$$

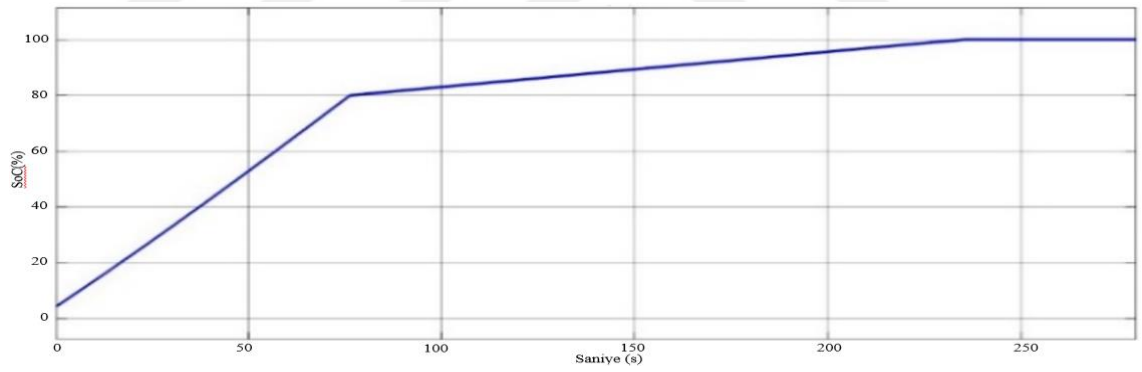
R tahmin yapılmak istenilen iç dirençtir.



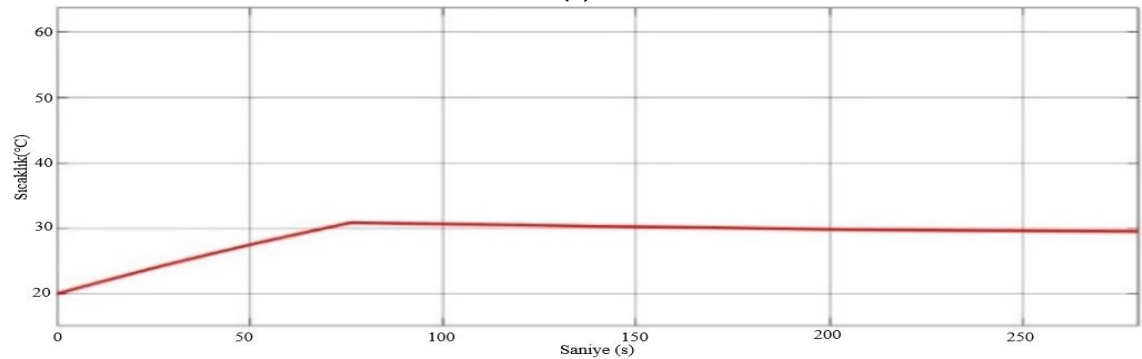
(a)



(b)



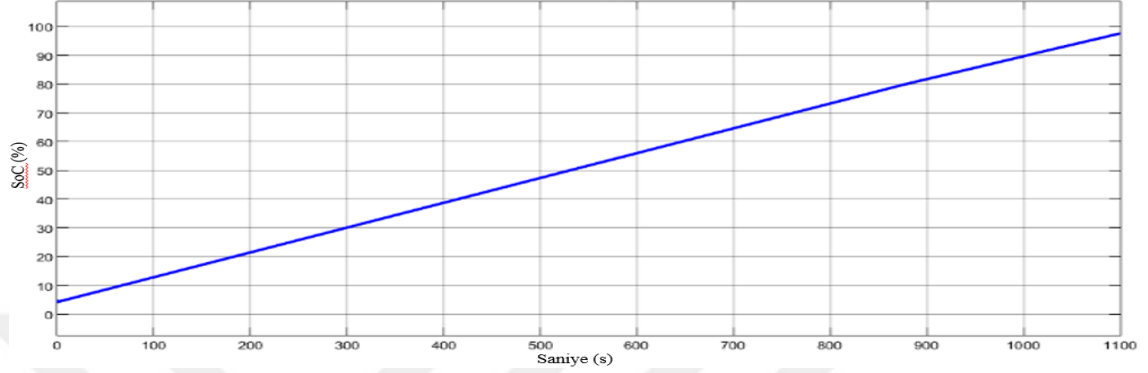
(c)



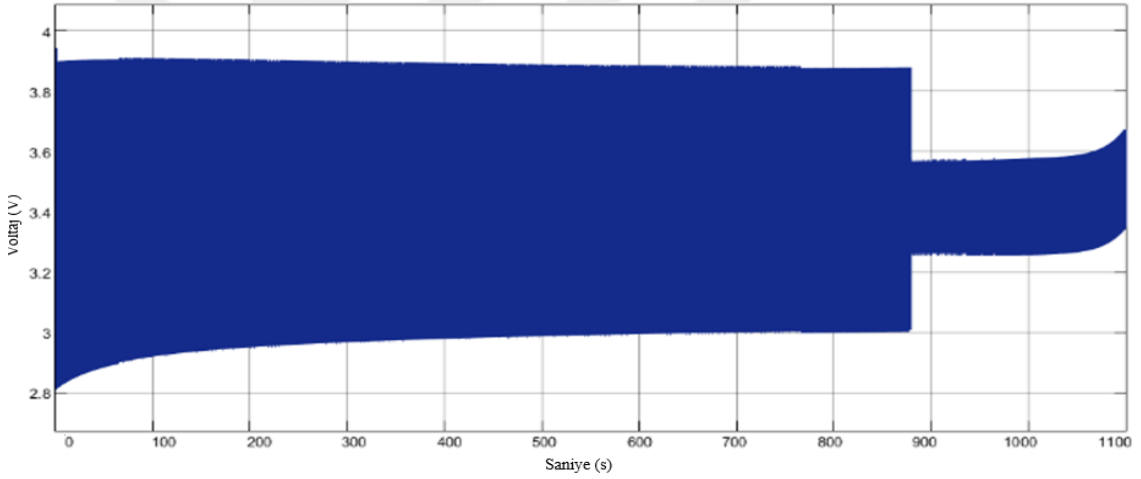
(d)

Şekil 4.2. Herhangi bir kontrol tekniksiz şarj simülasyonu çıktısı; şarj durumu (a), batarya voltajı (b), batarya akımı (c) ve batarya sıcaklığı (d)

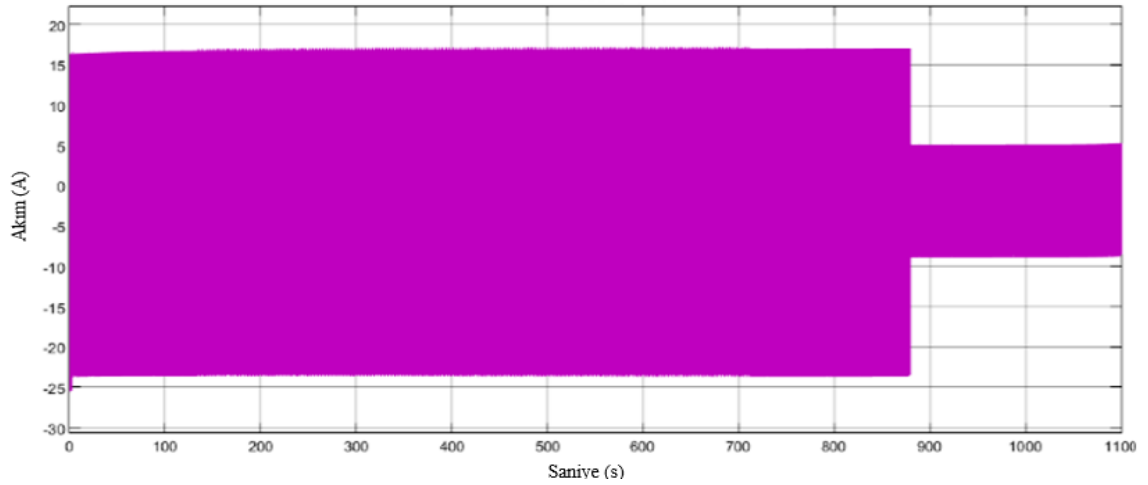
Ŗekil 4.2'deki Ŗarj eğrilerine baktığımızda SoC'un doğrusal bir Ŗekilde davranmaya çalıştığını gözlemleyebiliriz. Normal hızda Ŗarja yani %80 doygunluğa ulaşana kadar akımın zamanla arttığı, voltajın ise düştüğü oldukça açıktır. Isınmadaki değişim ise oldukça hızlıdır. Bir sonraki simülasyonlardaki amaç yeni bir devre kullanılmadan sadece yazılım ve kontrol algoritmalarıyla bu durumu mümkün olduğu kadar iyileştirmektir.



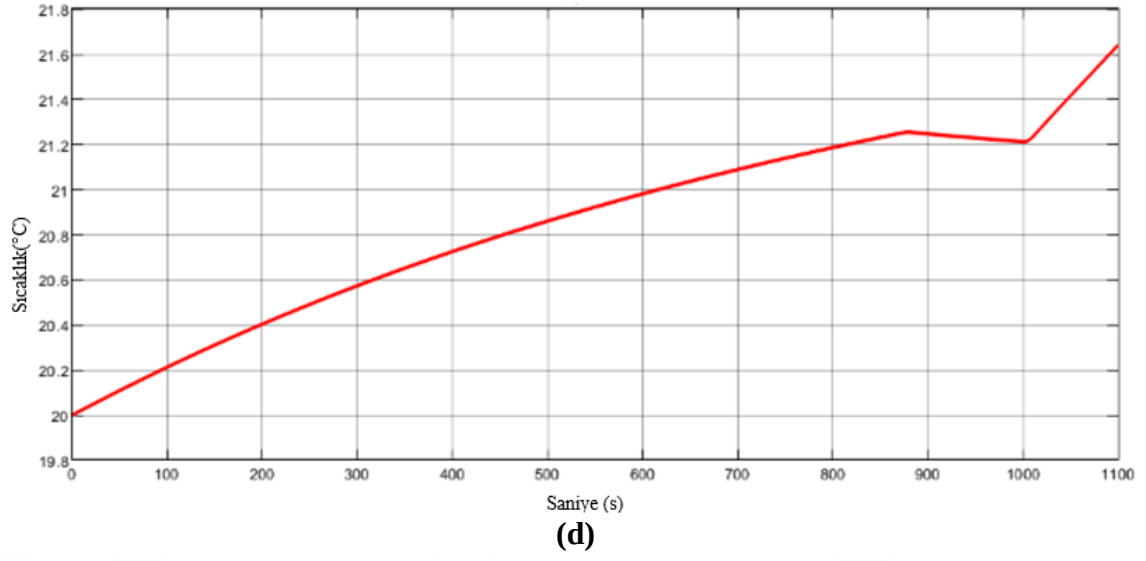
(a)



(b)

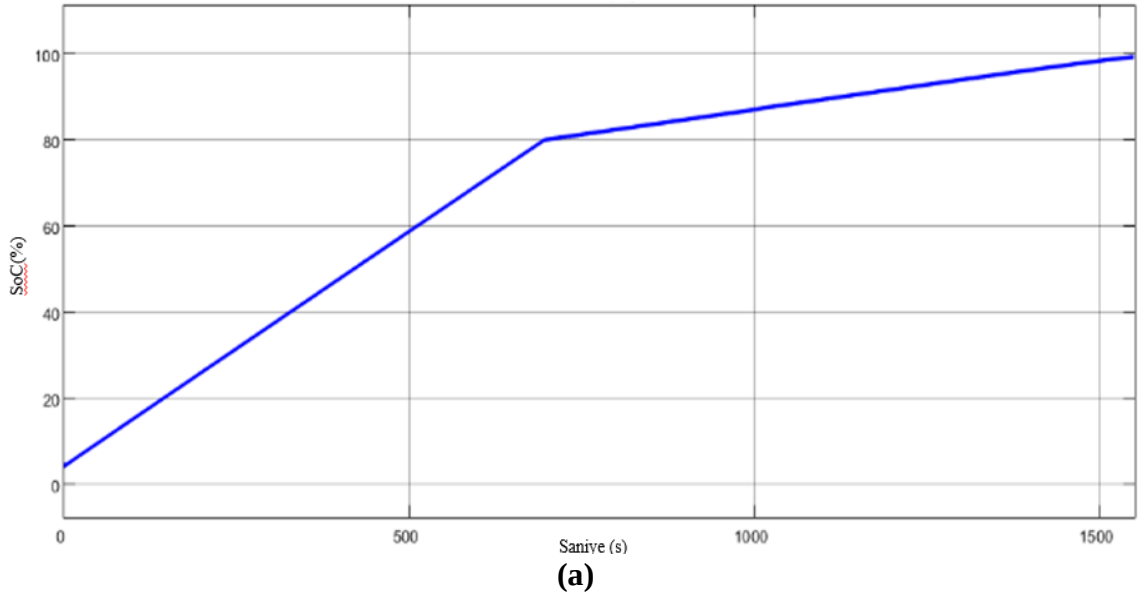


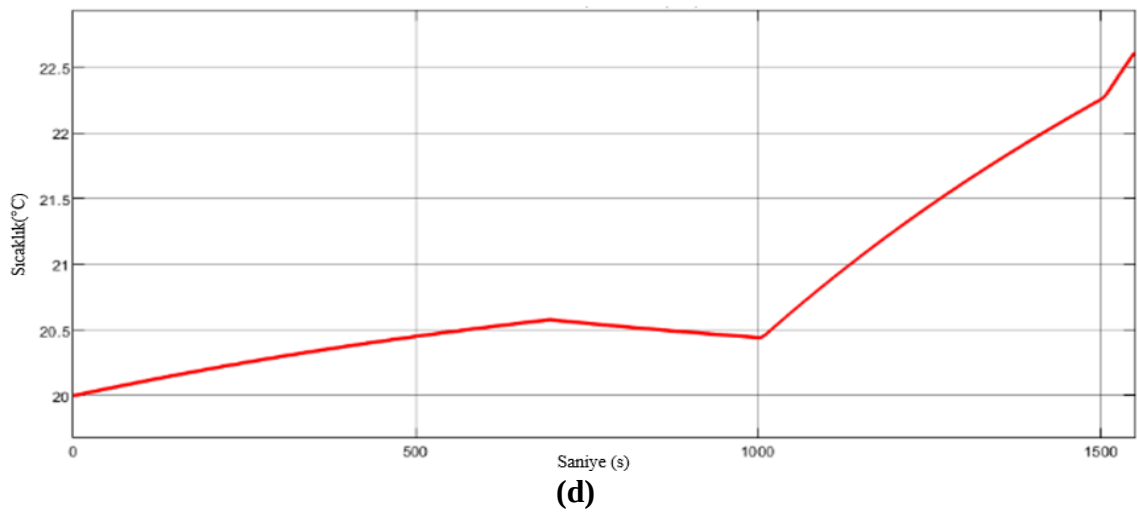
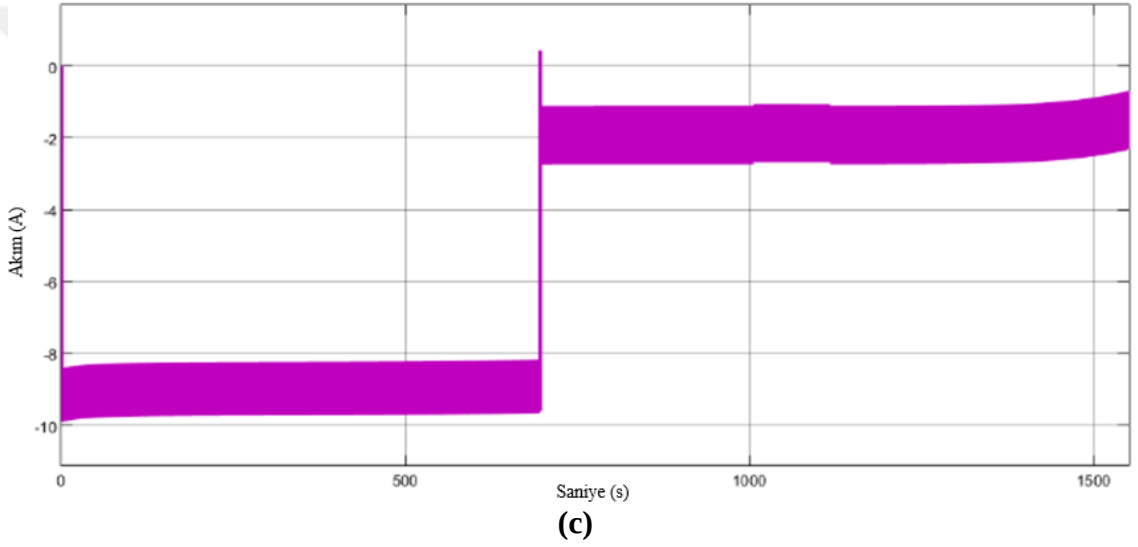
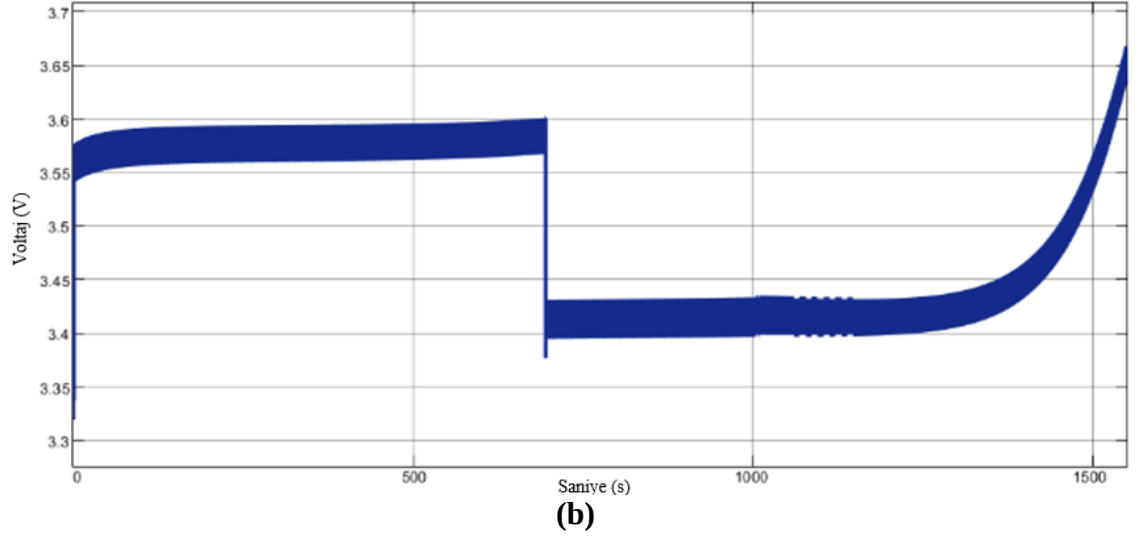
(c)



Şekil 4.3. Parametreleri optimize edilmemiş PI ile şarj simülasyon çıktısı; şarj durumu (a), batarya voltajı (b), batarya akımı (c) ve batarya sıcaklığı (d)

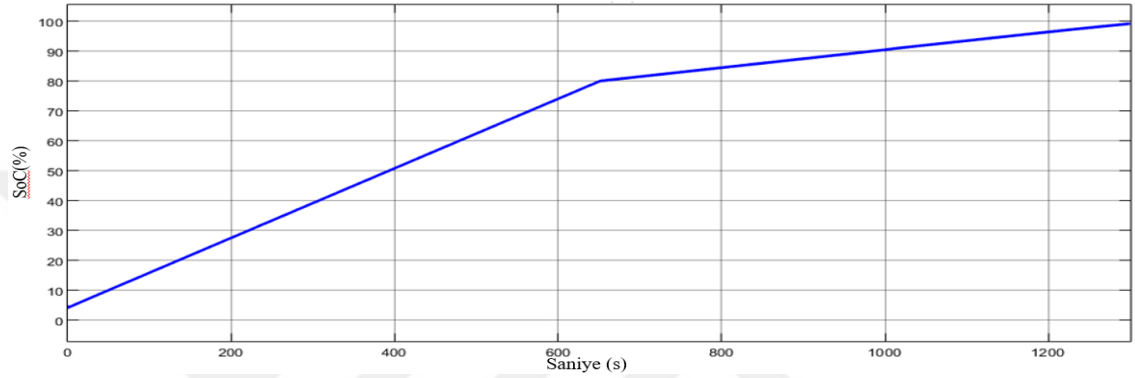
Şekil 4.3'teki akımdaki ve voltajdaki dalgalanmalar kabul edilebilir bir aralıkta değildir. Yaklaşık olarak -25A ile +15A arasındaki bu değişim şarj ve deşarj modu arasındaki değişim olarak yorumlanabilir. Ayrıca bu tezde istenilen akım değerleri, batarya hızlı şarj modunda -10A ve normal hızlı mod ile -2.5A'dır. Akım değerinin eksiye olması büyüklük değil yön belirtir. Şarj işlemi negatif yönlü dolun işlemi ise pozitif yönlü olarak gösterilir. Akımın artan ivmesini kırıp sabit davranış yapmak istediği söylenebilir ancak ilerleyen zamanlarda daha iyi ayarlanmış bir PI kontrolü grafiği incelenecektir.



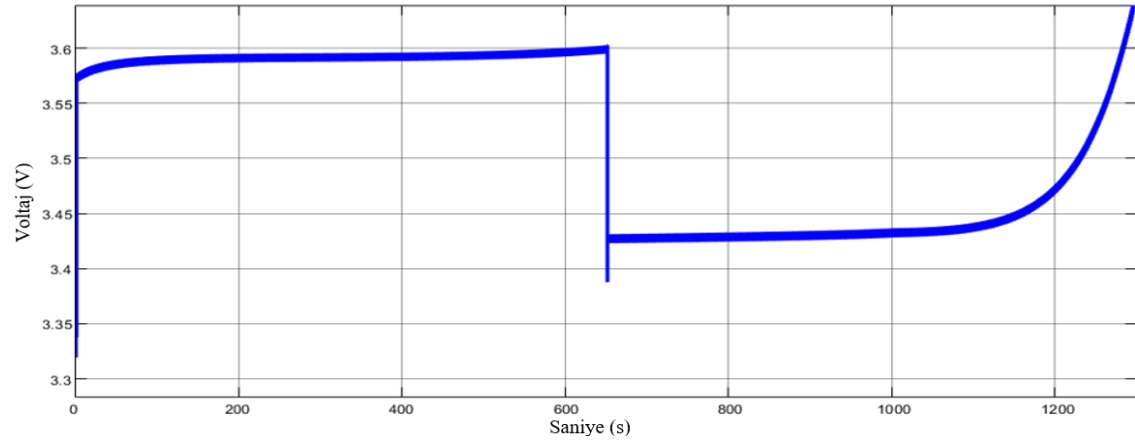


Şekil 4.4. PI algoritmasına ilave edilmiş batarya için uyarlanmış SVPWM zamanlayıcısı ile şarj simülasyonu; şarj durumu (a), batarya voltajı (b), batarya akımı (c) ve batarya sıcaklığı (d)

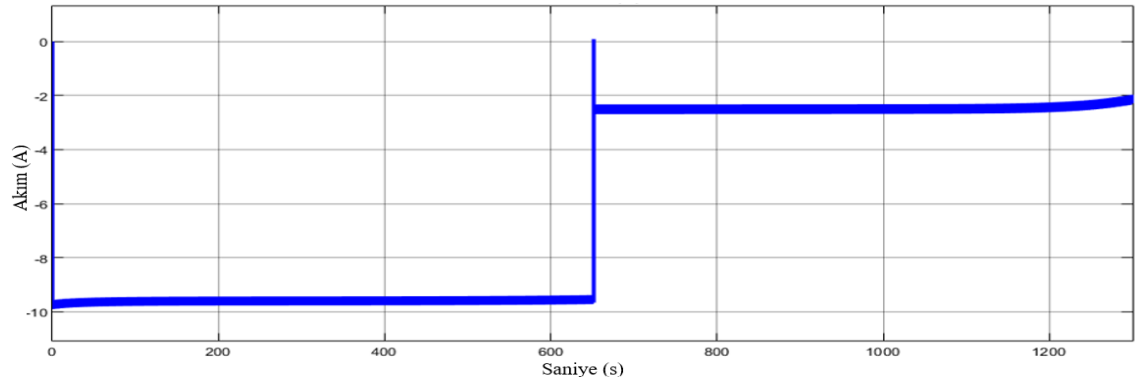
SVPWM elektrik motorlarını verimli bir şekilde döndürebilmek için MOSFET, IGBT gibi devre elemanlarının anahtarlama zamanını ayarlayan bir PWM tekniğidir. Bu çalışmada batarya invertör devresi ile motor sürücü invertör deresinin benzerliğinden yararlanarak bu zamanlayıcının bu çalışmadaki şarj devresi için yeterli olan kısmı ile simülasyon yapılmıştır. Bu zamanlayıcı kullanıldıktan sonra şekil 4.4'te görülmek üzere akım ve geriliminde aşırı dalgalanmaların azaldığı çok rahat bir şekilde gözlemleniyor. Ayrıca zamanla azalan akım ve artan voltaj bu çalışmada kullanılmak istenilen tekniktir. İstenilen akım ve gerilimdeki ivme başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Ancak şarj işlemi bittikten sonra voltajın ve ısınmanın artması istenilen durum değildir. %100 dolum sonrası şarj işleminin bir anahtarlayıcı ile sonlandırılması gerekmektedir.



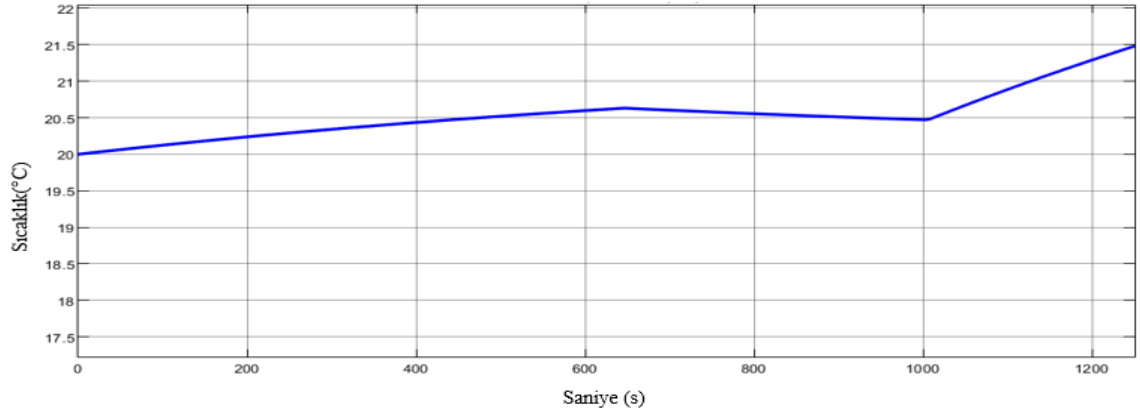
(a)



(b)



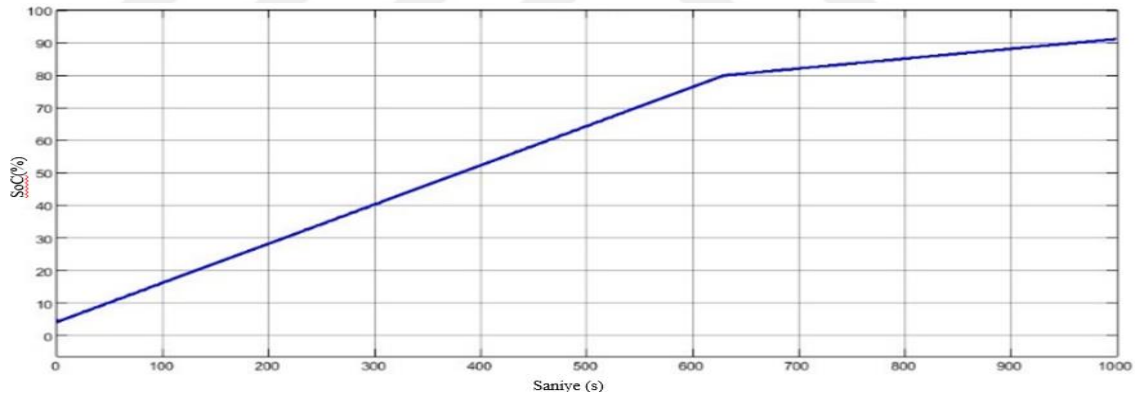
(c)



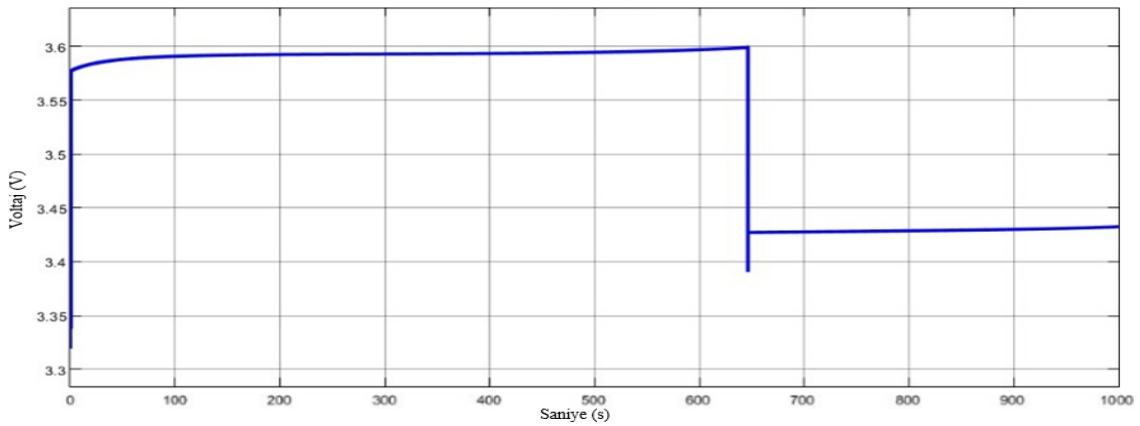
(d)

Şekil 4.5. PI, SVPWM ve tam bilinen model bazlı Lyapunov kararlılık yöntemi ile şarj simülasyonu; şarj durumu (a), batarya voltajı (b), batarya akımı (c) ve batarya sıcaklığı (d)

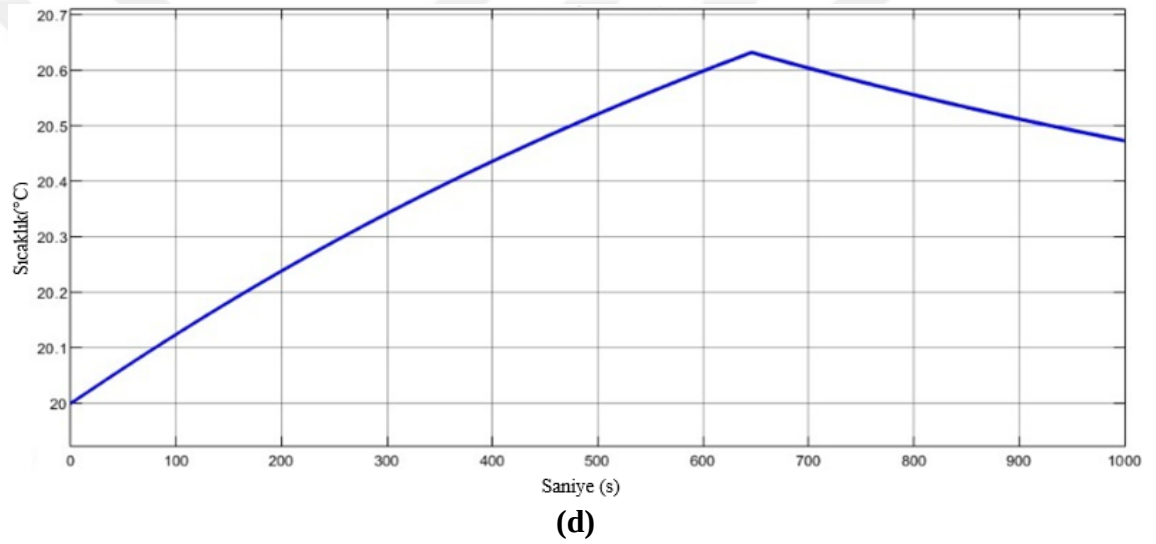
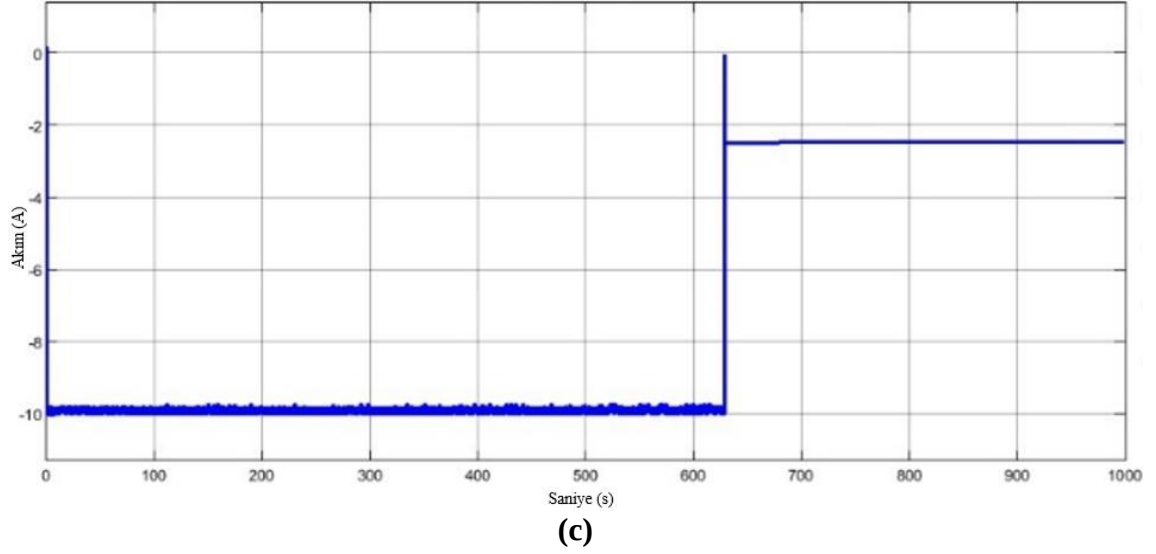
Şekil 4.5 ile SVPWM tekniği ve Lyapunov Kararlılık Teorisinin birlikte ne kadar güçlü çalıştığı simülasyon ile kanıtlanmıştır. Kötü bir şekilde ayarlanmış bir PI algoritmasına dahi ilave edildiklerinde sistemdeki kararsız yapıyı büyük bir oranda iyileştirmişlerdir. Şarj süresi boyunca sabit olan akım, doluma yaklaştıkça azalarak batarya üzerindeki zorlamayı azaltmıştır. Ayrıca PI algoritmasında olası hataları iyileştirebilmesi hem mühendislik açısından hem de zaman açısından katkı sağlayacaktır.



(a)

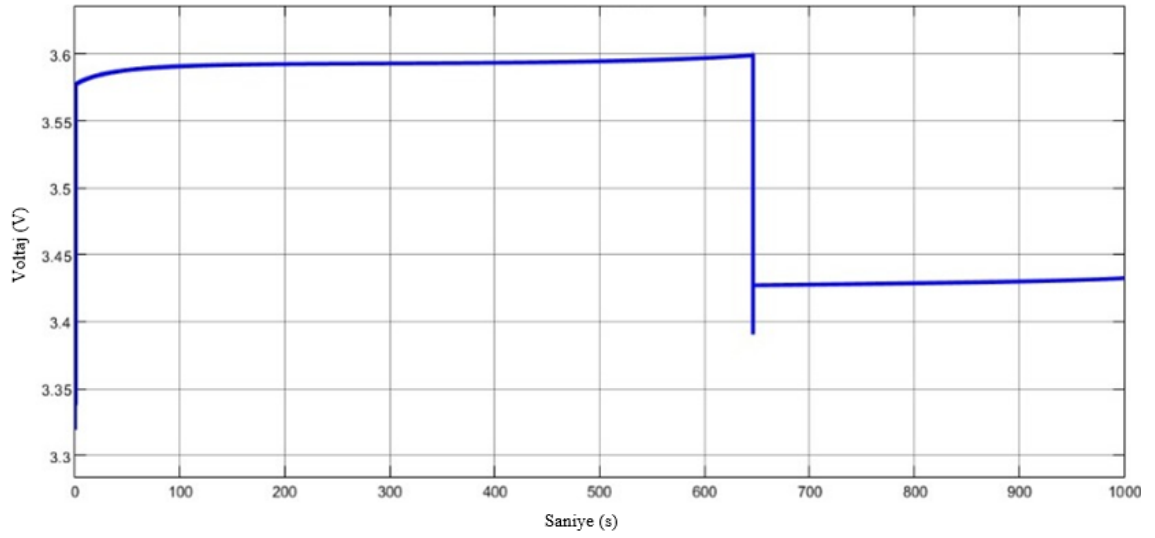


(b)

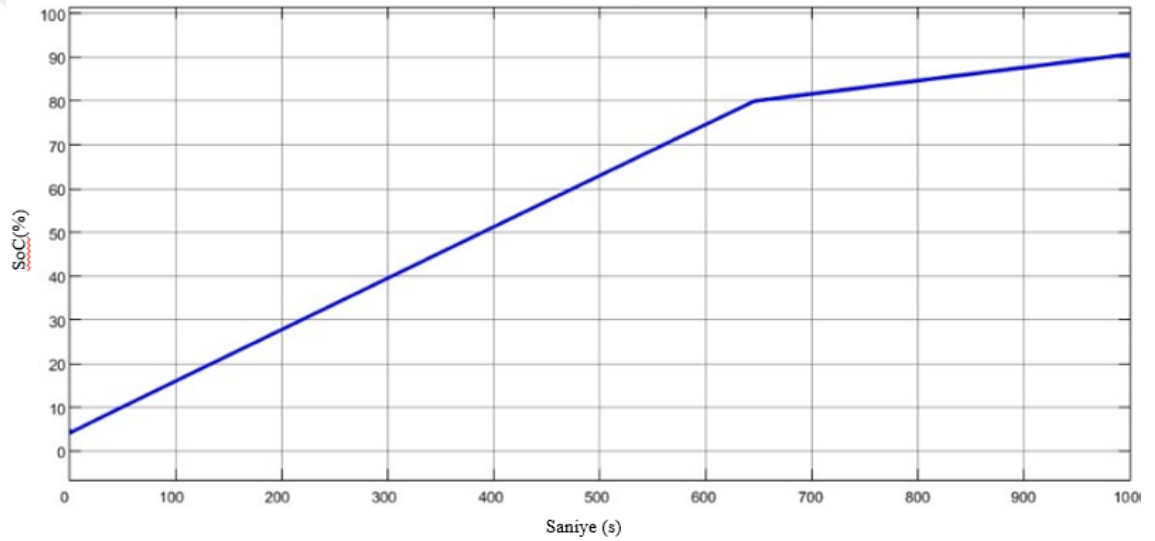


Şekil 4.6. Parametreleri optimize edilmiş PI ile şarj simülasyonu; şarj durumu (a), batarya voltajı (b), batarya akımı (c) ve batarya sıcaklığı (d)

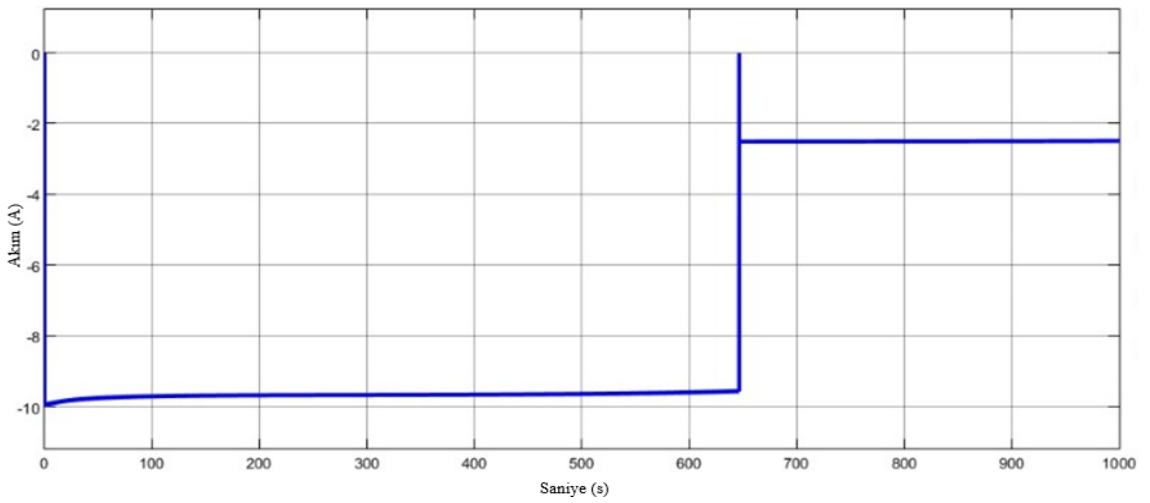
Bu kısımdan sonraki çalışmalar iyi optimize edilmiş PI üzerine ilave edilen teknik ve algoritmalarından oluşacaktır. Şekil 4.6’da sadece iyi optimize edilmiş bir PI çıktıları görülmektedir. Yeni yöntemin etkisini gözlemleyebilmek için ilk önce PI kontrolünde kasıtlı olarak eksiklikler yapılmıştır. Şimdi ise kısa devre testleri yardımıyla ve iyi ayarlanmış K_p ve K_i sabitleriyle kabul edilebilir aralıkta akım çıktısı elde edilmiştir. Şarj süresi boyunca sabit olan akımı değiştirmek için SVPWM ve Lyapunov teoremini tekrar uygulandı.



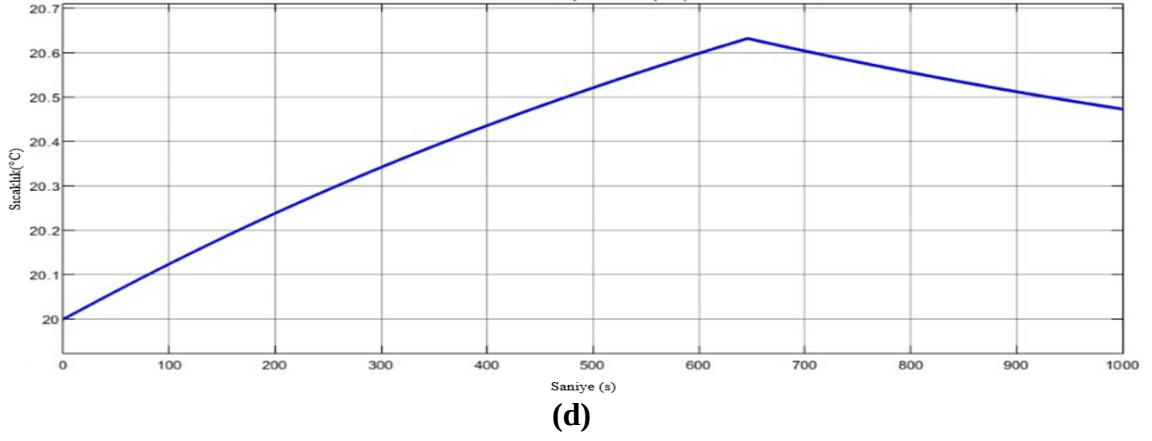
(a)



(b)

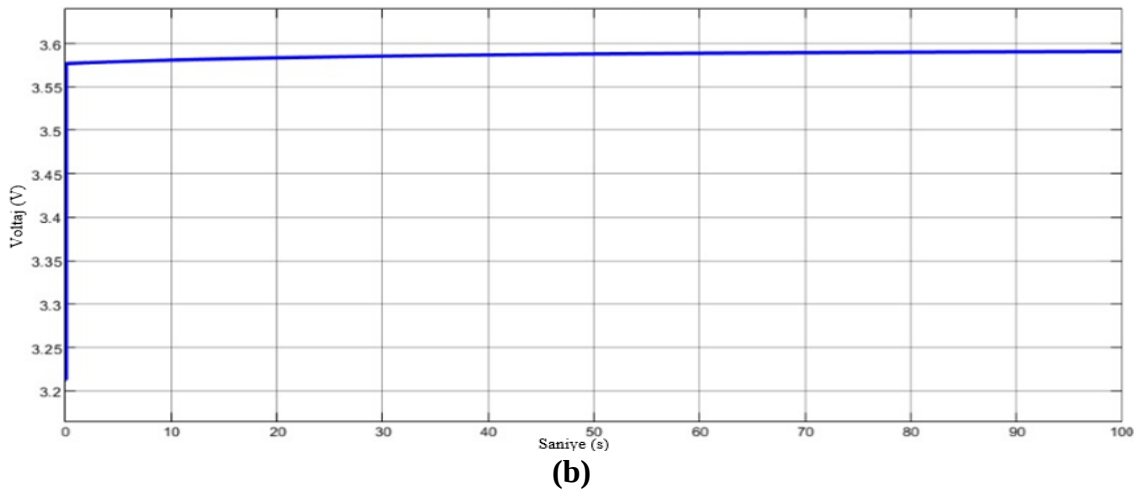
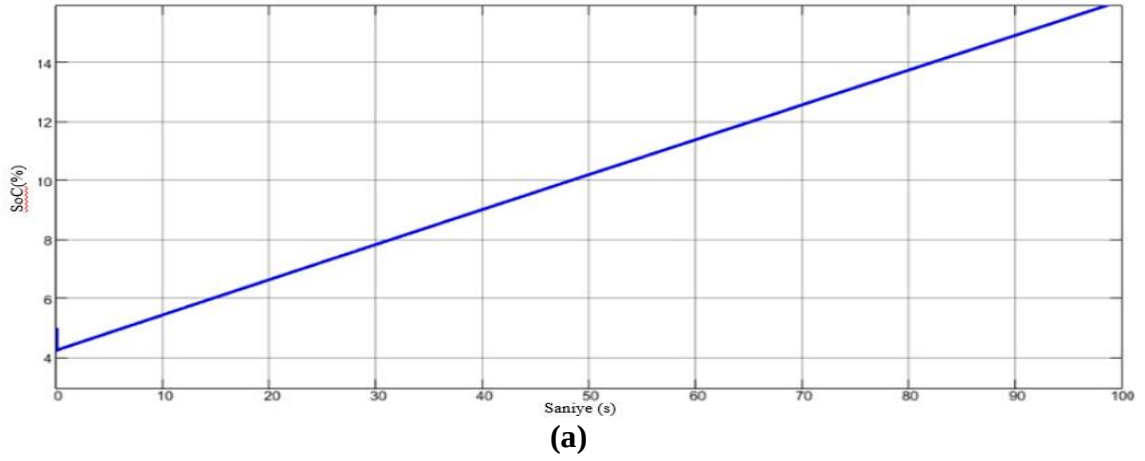


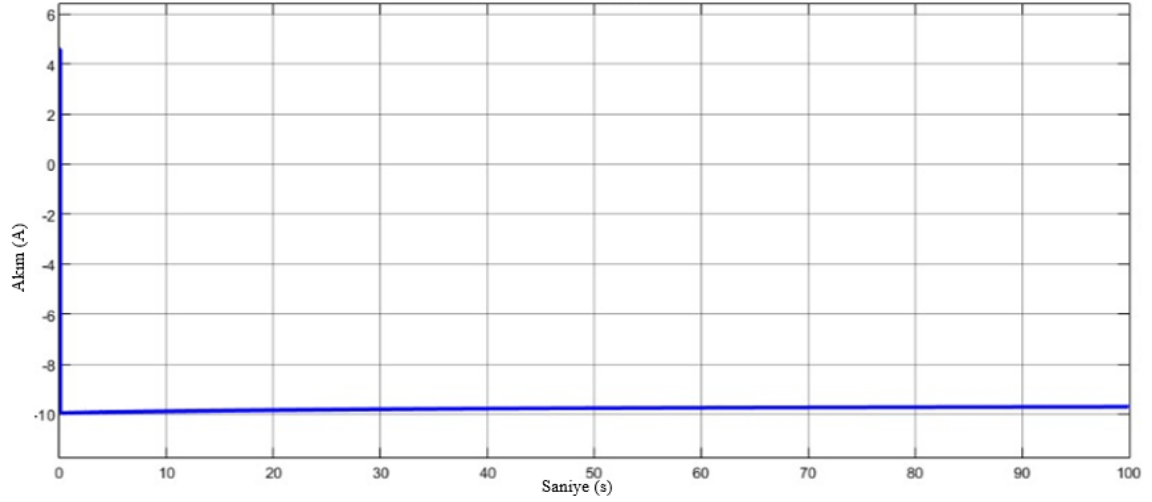
(c)



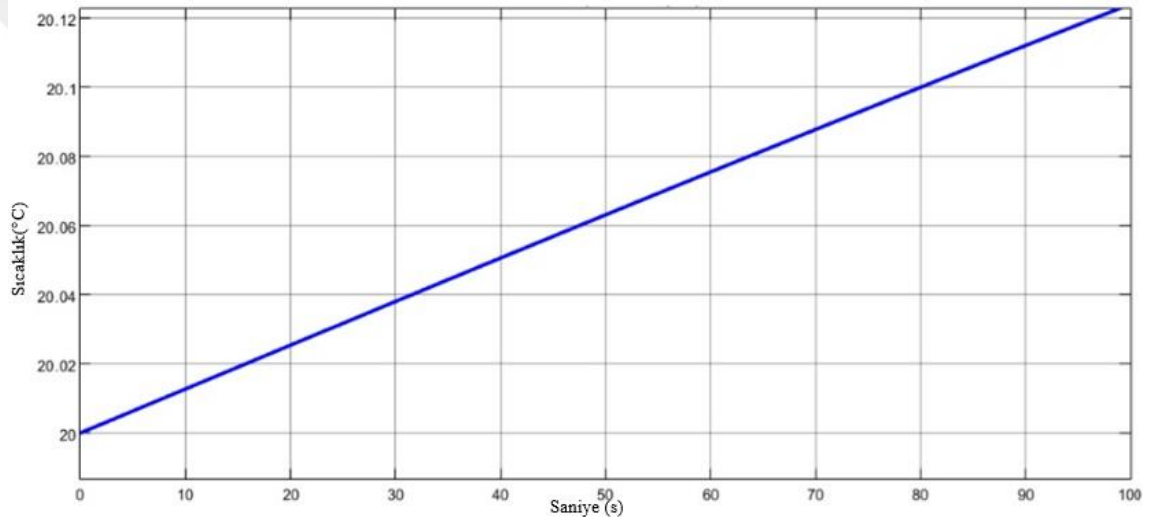
Şekil 4.7. Optimize edilmiş PI, batarya için uyarlanmış SVPWM zamanlayıcısı ve Lyapunov kararsızlık ilkesi ile şarj simülasyonu; şarj durumu (a), batarya voltajı (b), batarya akımı (c) ve batarya sıcaklığı (d)

Şekil 4.5 için yapılan yorumların aynısını şekil 4.7’de de yapabileceğimiz üzere akım -10 ve 2.5 Amper değerleri ile 3.6V değerini, yani pil üretici firmanın belirlemiş olduğu güvenli değerler, aşılmamıştır. Pil ömrü akım ve voltaj dalgalanmalarının minimize edilmesi batarya sağlığını olumsuz etkileyen faktörün azalmasıyla uzayacaktır.





(c)



(d)

Şekil 4.8. Gürbüz (Robust) yüksek frekans Lyapunov ile şarj simülasyonu; şarj durumu (a), batarya voltajı (b), batarya akımı (c) ve batarya sıcaklığı (d)

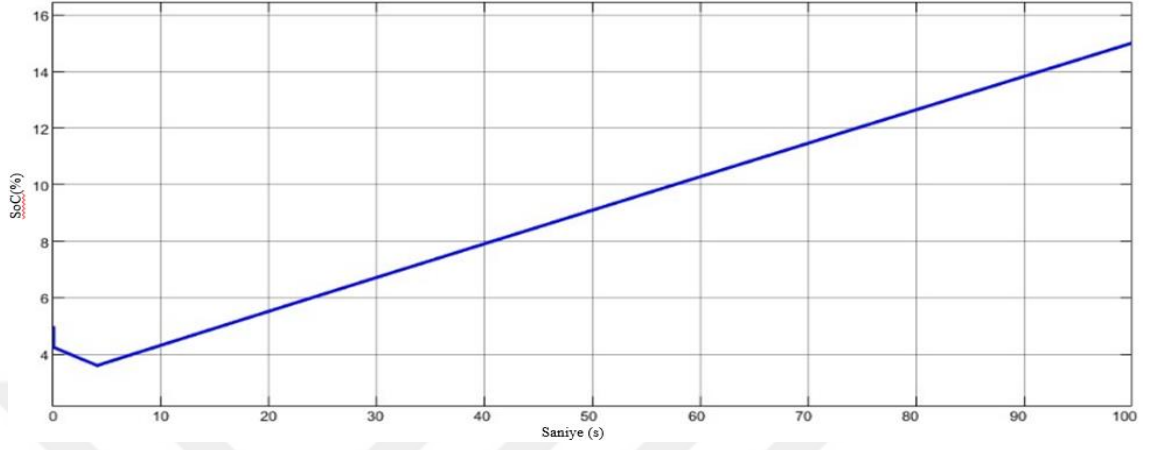
Tahmin edilen sistem belirsizliği ile gerçek değerin mutlak değerinden daha büyük olacak bir sınırlayıcı fonksiyon ρ geri besleme fonksiyonundaki v_R 'de yerine yazıldığında gürbüzlük şartı sağlanmış olur.

Çizelge 4.1. Yüksek kazanç değişimi

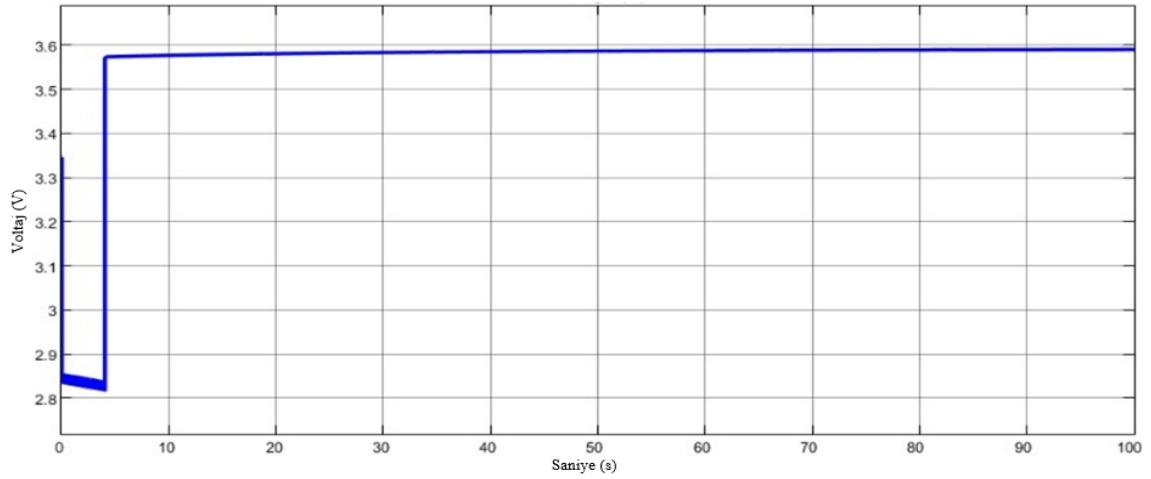
Zaman (Saniye)	Akım (A)	Voltaj (V)	SoC(%)	Sıcaklık(°C)
5	-9.917	3.579	4.838	20.001
25	-9.819	3.584	7.228	20.003
75	-9.726	3.590	13.15	20.009
95	-9.710	3.591	10.68	20.012

$$\frac{\Delta I}{75s-25s} = 1.859 \times 10^{-1} (/ks) \text{ ve } \frac{\Delta I}{95s-5s} = 2.704 \times 10^{-1} A (/ks) \quad (4.1)$$

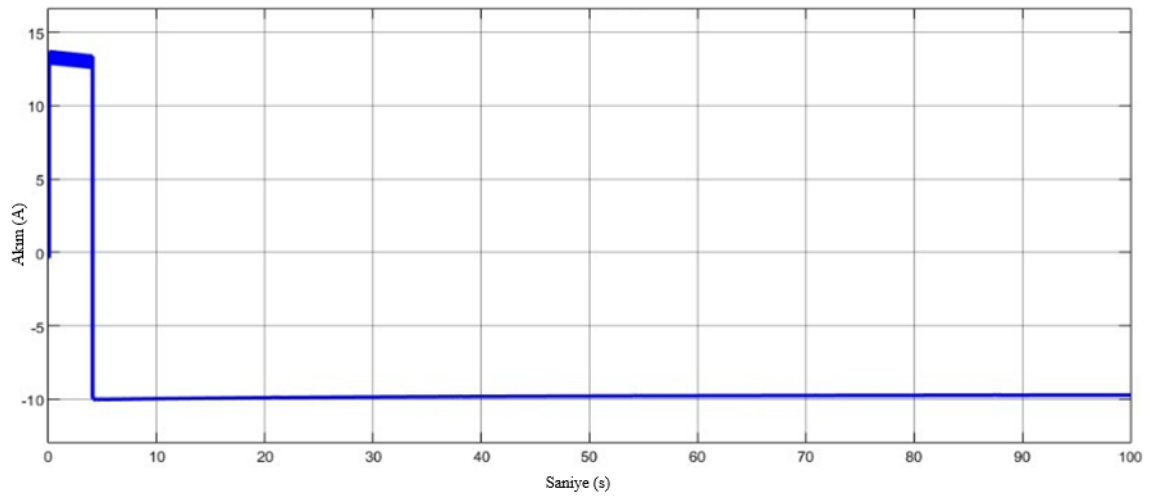
Olmak üzere sistemin oturması hızlıdır. Bu durum şekil 4.8 akım ve voltaj grafikleriyle, eşitlik 4.1 ile ve çizelge 4.1 ile kolayca gözlemlenebilir.



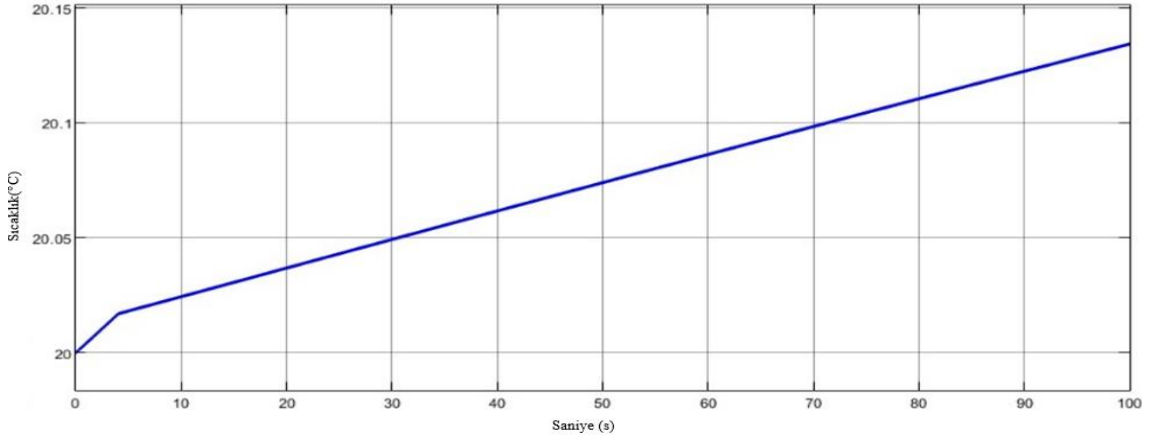
(a)



(b)



(c)



(d)

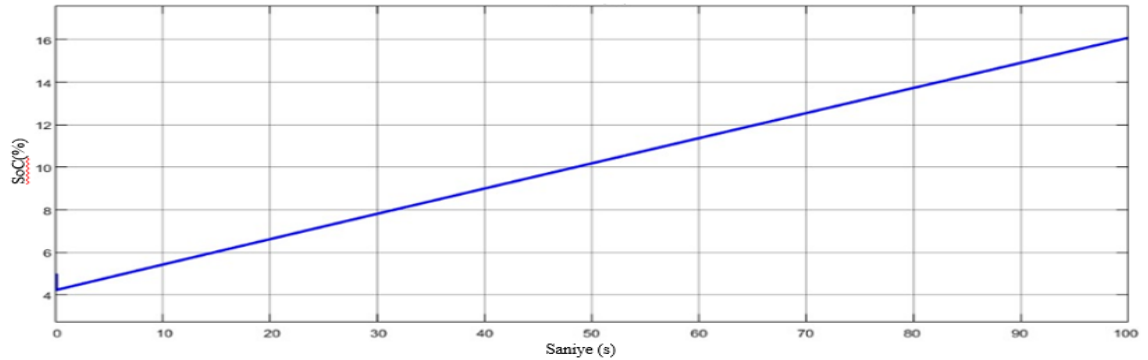
Şekil 4.9. Yüksek kazanç düşük epsilon ile simülasyon; şarj durumu (a), batarya voltajı (b), batarya akımı (c) ve batarya sıcaklığı (d)

Çizelge 4.2. Yüksek kazanç düşük epsilon ile değişimi

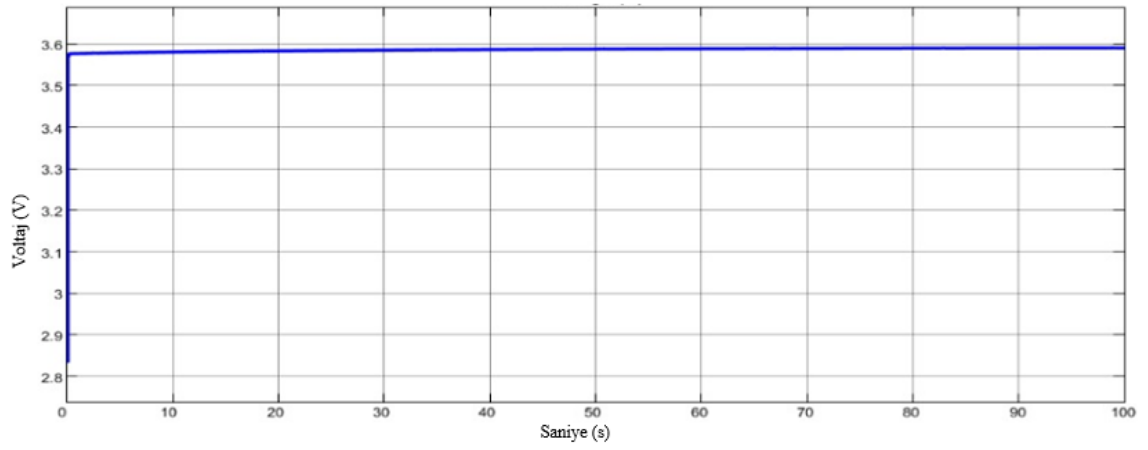
Zaman (Saniye)	Akım (A)	Voltaj (V)	SoC(%)	Sıcaklık(°C)
1	1.360	2.850	4.094	20.000
4	1.337	2.818	3.612	20.002
5	-10.001	3.574	3.709	20.002
25	-9.863	3.582	6.12	20.004
75	-9.743	3.589	12.06	20.010
95	-9.723	3.590	14.42	20.013

$$\frac{\Delta I}{75s-25s} = 1.202 \times 10^{-1} (/ks) \text{ ve } \frac{\Delta I}{95s-5s} = 2.842 \times 10^{-1} A (/ks) \quad (4.2)$$

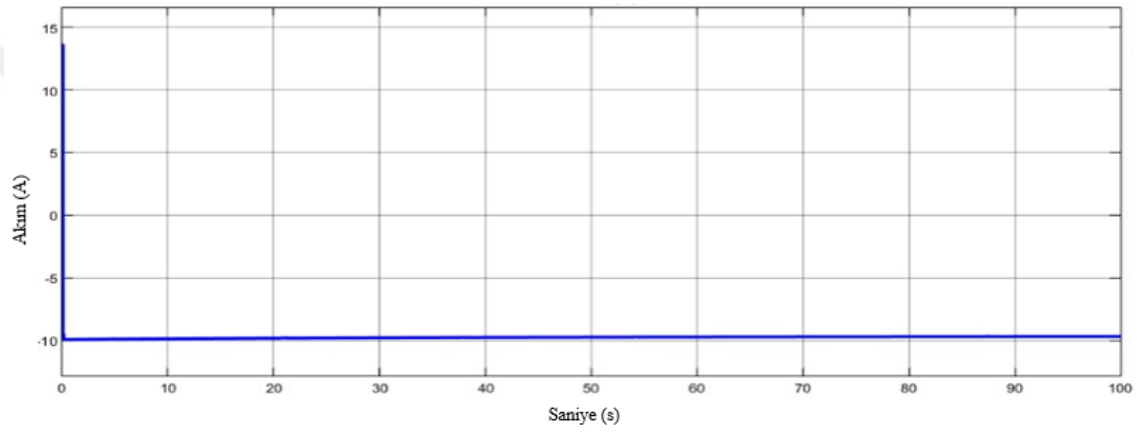
Epsilon değerinin aşırı büyük olması sisteme zarar verebilir. İlk başta sistem şarj etmeye başlayamıyor. Bir kısım deşarj işleminden sistem -10A'e yakın değer ile dolum yapabiliyor. Şekil 4.9 akım ve voltaj grafikleri, çizelge 4.2 ve eşitlik 4.2 sistem oturma hızının yavaş olduğunu göstermektedir.



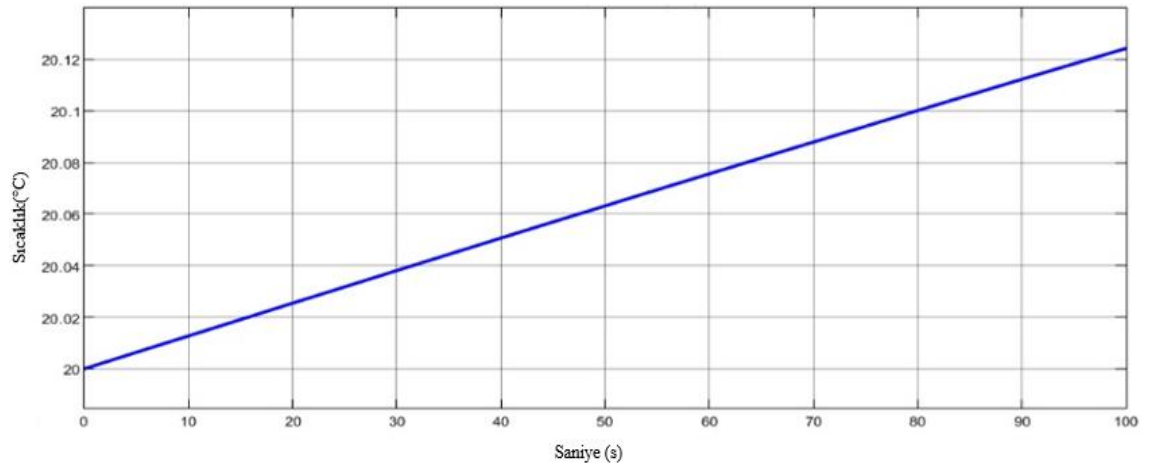
(a)



(b)



(c)



(d)

Ŗekil 4.10. Yüksek kazanç yüksek epsilon ile simölasyon; Ŗarj durumu (a), batarya voltajı (b), batarya akımı (c) ve batarya sıcaklığı (d)

Çizelge 4.3. Yüksek kazanç yüksek epsilon ile değişimi

Zaman (Saniye)	Akım (A)	Voltaj (V)	SoC(%)	SoC(%)
0	6.663×10^{-5}	3.319	5	20.000
0.1	-9.487	3.568	4.238	20.000
5	-9.918	3.579	4.827	20.003
25	-9.819	3.584	7.217	20.009
75	-9.726	3.590	13.14	20.010
95	-9.710	3.591	15.50	20.012

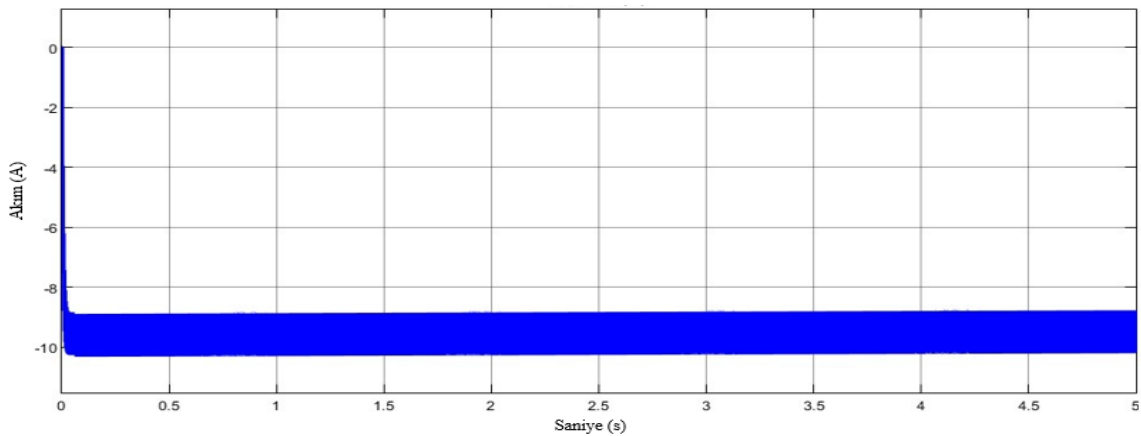
$$\frac{\Delta I}{75s-25s} = 9.317 \times 10^{-2} (/ks) \text{ ve } \frac{\Delta I}{95s-5s} = 2.080 \times 10^{-1} A (/ks) \quad (4.3)$$

Şekil 4.10 verileri, çizelge 4.3'e yazılmıştır. Epsilon değeri büyük iken sistem oturma zamanı küçüktür. Akım değişim hızı eşitlik 4.3'te görülmek üzere daha yavaştır. Akım yavaş yavaş azaldığı için şarj daha hızlı gerçekleşir. Simulink üzerinden sistem oturma zamanı 15.869 ms olarak ölçüldü ve farklı kontrol parametreleri çizelge 4.4 ile gösterilmiştir.

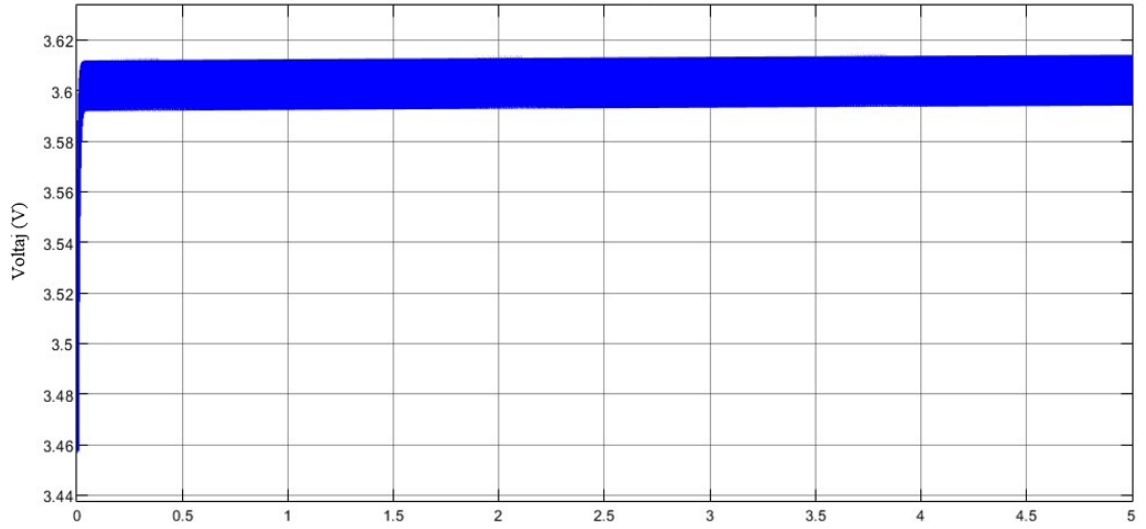
Çizelge 4.4. Kontrol kararlılık parametreleri

Oturma Zamanı (ms)	Aşma	Hedef Dışı Süresi	Ön atış	Yetişme Hızı (/s)	Düşme Süresi (ms)	Maksimum Akım(A)
15.869	3.097	5.079	98.98%	-296.192	13.176	9.707

Daha sonra şarj süresini gözlemlemek ve dengeleme yapabilmek için üçlü pil grubu simüle edildi. Akım ve voltaj çıktıları şekil 4.11 ve 4.12'de verilmiştir.

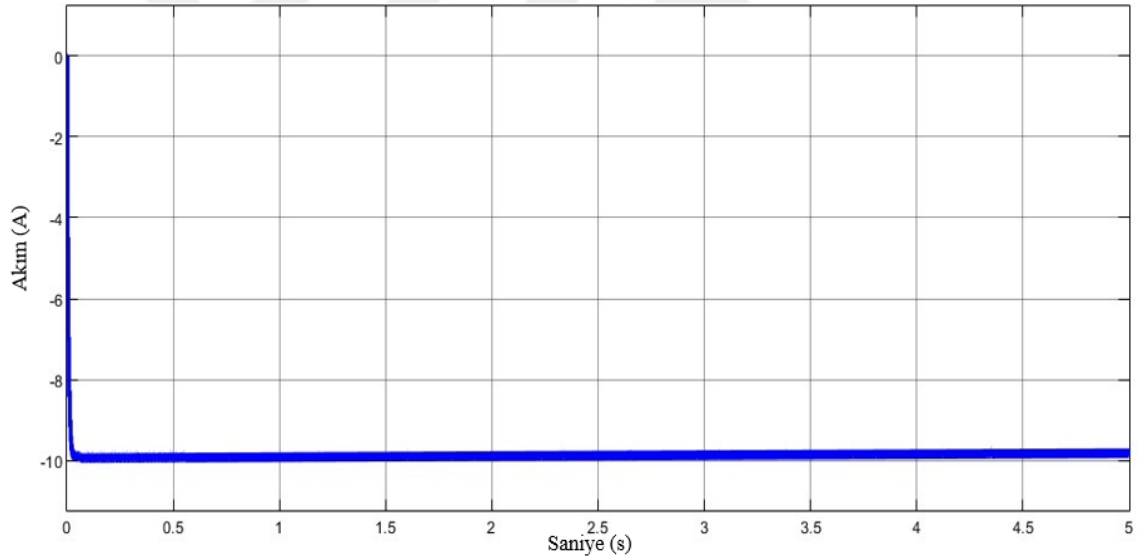
**Şekil 4.11.** Çoklu hücre PI kontrol akım çıktısı

Yalnızca PI kullanılan algoritmada pil sayısı arttığında şekil 4.11'deki akımı sağlayabilmek için besleme gerilimini 113.5V değerine ayarlanması gerekti. Büyüyen besleme gerilimi ile akım dalgalanmaları arttı. Ayrıca 113.5V besleme gerilimi oldukça büyük bir değerdir.



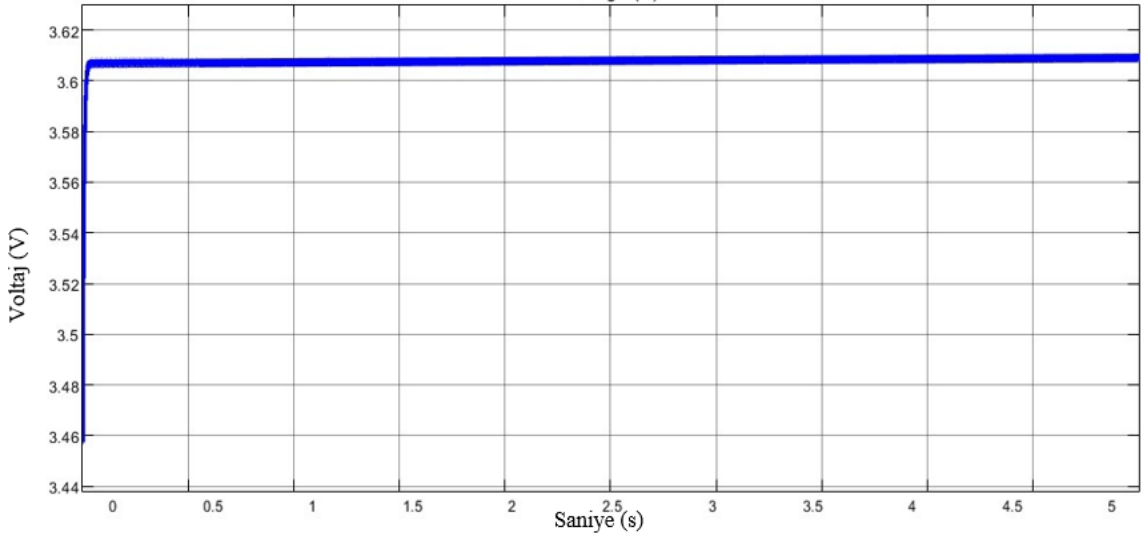
Şekil 4.12. Çoklu hücre PI kontrol voltaj çıktısı

Büyüyen giriş gerilimi aynı şekilde voltaj dalgalanmalarını da etkiledi. Bu sağlık açısından istenilmeyen bir durumdur. Potansiyel dengesizlik BMS çalışmaları için oldukça can sıkıcı bir hal alabilir.



Şekil 4.13. Çoklu hücre PI, SVPWM ve Lyapunov ile kontrolünde akım çıktısı

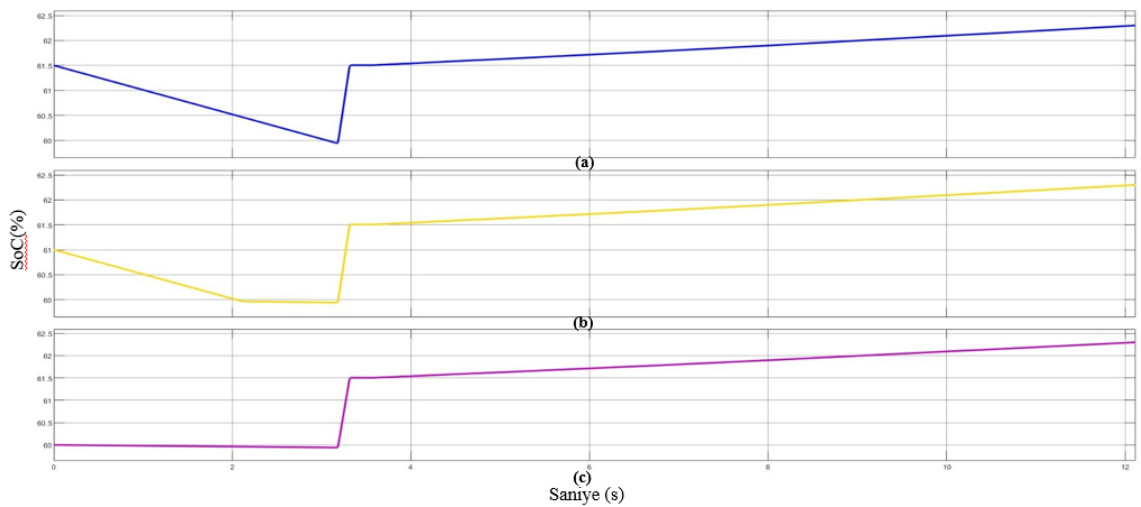
Bütün algoritmaları eklediğimizde giriş gerilimini 11.6 Volt yapmamız bu çıktı için yeterlidir. Düşük besleme voltajında büyük oranda verim elde edildiği gibi akım ve gerilim çıkışları da daha sağlıklı ve kararlı bir çıktıya sahip olmuştur. Büyüyen besleme gerilimi sağlamak daha maliyetli ve risklidir. Ayrıca şekil 4.13'te görüleceği gibi şarj akımının mutlak değeri 10A'e daima yakındır. Yalnızca PI algoritmasındaki gibi 8A değerine yaklaşan ve tekrar 10A'e dönen bir durum yoktur. Bu durum istenilen RMS ya da ortalama akım değerinde çalışmayı da kolaylaştıracaktır. Şekil 4.14 ile de voltaj karakteristiğinin daha kararlı olduğu gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Çoklu hücre PI, SVPWM ve Lyapunov ile kontrolünde voltaj çıktısı

Çoklu pil grupları denendiğinde Lyapunov ve SVPWM eklenmiş yöntem çok daha kararlı sonuç verdi. Ayrıca giriş gerilimi ciddi oranda değişti. 10A değerine yakın çıkış alabilmek için yalnızca PI algoritması olan devrenin besleme girişine 113.5 Volt uygulanırken, yeni yöntemimiz için 11.6V besleme girişi yeterli olmuştur. Bu da pil kapasitesi ya da sayısı arttığında verimliliğin ciddi şekilde değiştiğini kanıtlar niteliktedir. Ayrıca akım ve gerilim çıktıları karşılaştırıldığı zaman sadece PI kontrolüne sahip batarya daha kararlı bir şekilde şarj oluyor. Yalnızca PI yeni bir hücre eklendiğinde ek olarak uyarılma istersen SVPWM ve Lyapunov ekli sistem PI'daki bozulmaları dikkate almaksızın kararlı şekilde çalışabiliyor. Ayrıca besleme voltajı çok ufak miktarda değiştirildiğinde yüksek akımda çıkış verebiliyor.

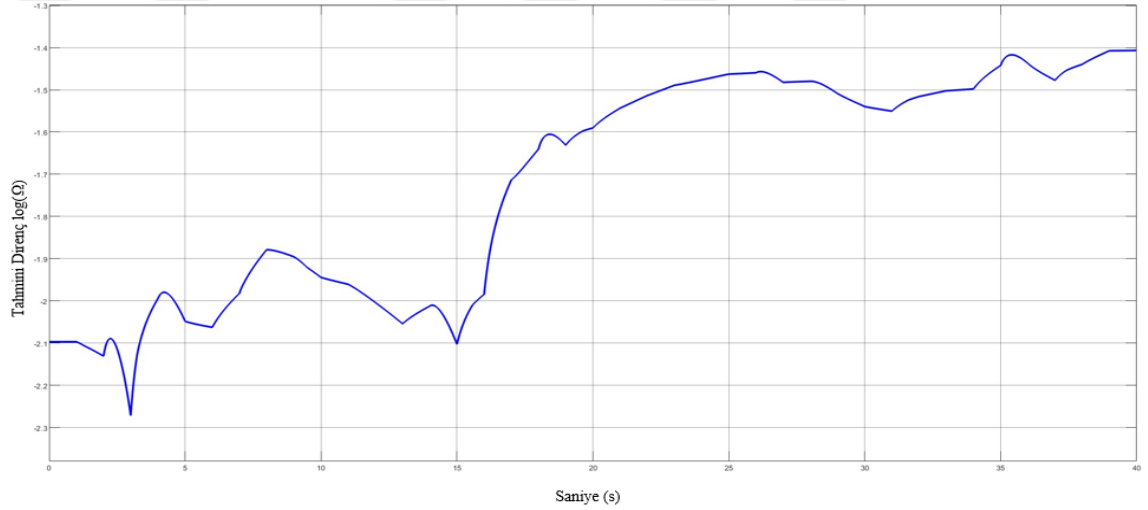
Simulink üzerindeki batarya blokları ideal oldukları için şarj süresi boyunca dengesizlik oluşmamıştır. Ancak kasıtlı olarak kendimiz dengesizlik oluşturarak dengeleme yönteminin çalışıp çalışmadığını Şekil 4.15'teki gibi test edebiliriz.



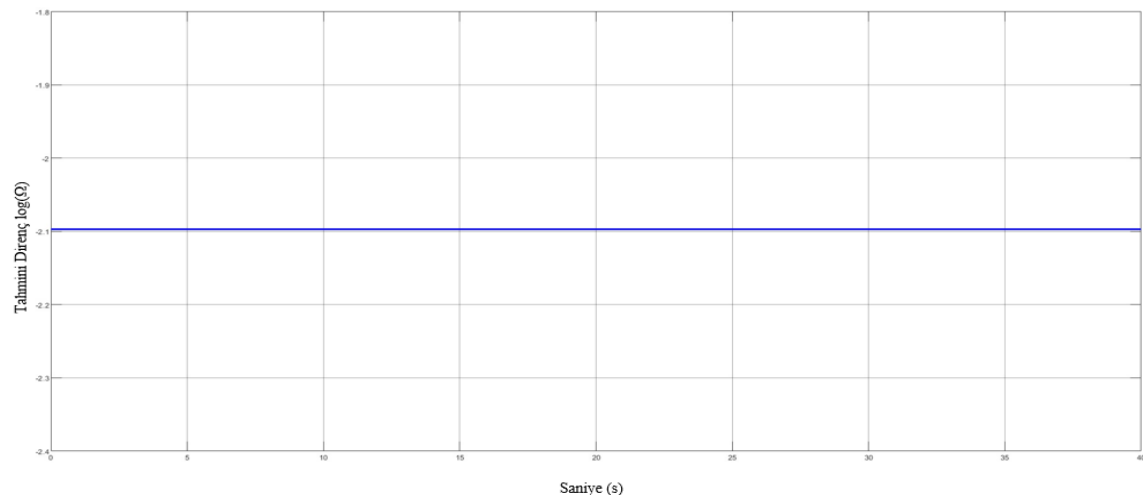
Şekil 4.15. Dengesiz pil gruplarının pasif dengeleme ile dengelenmesi; batarya 1 (a), batarya 2 (b) ve batarya 3 (c)

Yüksek potansiyele sahip pillerin boşaltma direnci aktif olarak enerjiyi dışarı atmıştır. En düşük potansiyeldeki pil diğer piller ile eşitleninceye kadar beklemiştir. Ancak bataryanın iç direnci sebebi ile bekleme sırasında ufak miktarda da olsa sızıntı akımıyla enerji kaybetmiştir. Hassasiyet iki hane olduğu için çok kısa sürelik de olsa besleme anahtarı açılıp kapanmaktadır. Bu kontrol açısından istenilen bir durum değildir. Uygun aralıkta tolerans ile çalışmak test edilebilir. Ancak pasif dengeleme ile ilgili çok sayıda araştırma mevcuttur. Tezin ana odak konusu şarj yöntemleri olduğu için dengeleme üzerinde fazla durulmamıştır.

Şekil 4.16 sadece PI kontrol algoritması uygulandığı andaki tahmini direnç değişimini göstermektedir. Gerçek bir pile ait tam bir matematiksel veriler olmadığı için değişim normalden daha hızlıdır. Şekil 4.17’de PI, SVPWM ve Lyapunov yöntemi uygulandığındaki tahmini direnç değişimini göstermektedir. Her iki çıktıda gerçek değişimden hızlı sonuç gösterse de şekil 4.16 ve şekil 4.17 kıyaslandığında şekil 4.17’nin daha yavaş direnç değişimi ile daha sağlıklı olduğu söylenebilir. Ayrıca şekil 4.17’deki değişim çok ama çok küçük olduğu için çıktı logaritmik ölçek ile gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Sadece PI kontrol algoritması uygulandığında Kalman tahmini



Şekil 4.17. Tüm yöntemler birlikte uygulandığında Kalman tahmini

Tüm yöntemler ile direnç değişimi daha az olmaktadır. Direncin daha yavaş değişmesi batarya ömrünün daha uzun olacağını gösterir. Direnç arttıkça batarya ömrü azalır.

Yeni nesil şarj yöntemleri daha küçük şarj devreleri ile daha hızlı, daha sağlıklı ve daha verimli şarj sistemini elde etmeyi amaçlamaktadır. Bu durumda yazılım çok önemli rol oynuyor. Devre elemanlarının gördüğü iş kod ile çözülürse hem kayıplar azaldığı için verim artar, hem boyut maliyetleri azalır. Sistem kararlılığını azaltmak ise batarya ömrünü uzatabilir, şarj süresini kısaltılabilir. Batarya şarj süresince kararlılık sadece şarj hızı değişimi ile gözlemlenemez. Beklenmedik bir durum sırasında akım, voltaj sıcaklık gibi hayati önem taşıyan parametreleri güvenli aralıkta tutmak, bu aralıkta sapma olursa bu değerleri bu aralığa tekrar olabildiğince hızlı sürede getirmek gereklidir.

Eksiklikler filtre devreleri ya da şarj için kanıtlanmış özel devreler ile iyileştirebilir. Hatta bu çalışmadaki algoritmalar farklı invertör ve konvektör devreleri ile daha verimli hale getirilebilir. Elektrikli araç sürücü devrelerinde uygulanan ama batarya şarj sistemleri için uygulanmayan teknikler yeni çalışma konuları için adaydır.

Bu çalışma şarj yönteminin pil üzerindeki etkisine odaklı bir çalışmadır. Şarj sırasında çoklu hücre gruplarında dengesizlik durumunda nasıl yöntemlerin kullanıldığından bahsedilse de burada asıl gözlemlenmek istenilen durum şarj hızı, akım ve voltaj kararlılığı, pil sıcaklığı ve bu etkenlerin pil sağlığına nasıl etki edeceğidir. Pil sağlığı yani SoH için kesin sonuç bulamamak ile çok sayıda tahmin yöntemi bulunmaktadır. Ancak pilin üretilişinden itibaren ideal yapıyı bozan sebeplerin ne olduğu ve ne oranda etki ettiğini tam olarak bilmeni imkânsız olması sebebiyle kesin olarak pil sağlığı hakkında yüzdesel yorum yapmak da çok zordur. Neyse ki kontrol yöntemlerinin sağladığı avantajlar ile daha başarılı bir sonuç elde edildiğini görmek mümkündür. Sistemin istenilen yanıtı hızlı gelmesi, pil sağlığına ciddi hasar veren akım ve gerilimdeki dalgalanmaların minimize edilmesi, pil sıcaklığının daha düşük seviyede olması batarya sağlığı koruyacaktır. Batarya sağlığının korunması pil ömrünü artırır, bakım maliyetini düşürür, genellikle termal kaçakları önler ve yangın gibi riskleri de minimize eder.

Pil sağlığı için kullanılan en önemli yöntemlerden bir tanesi ise azalan akım yöntemidir. Batarya doluma yaklaştıkça yüklerden kaynaklı bazı riskler bulunmaktadır. Bu sebeple hızlı şarj yöntemleri genellikle %80 dolum sonrasında kullanılmaz. Elektrikli araçların sürücü devresinde düşük harmonikler ile yüksek güç aktarımı için kullanılan SVPWM zamanlayıcısı, batarya ile sürücü devrelerindeki invertör devrelerinin anahtarlanarak kontrol edilme ortak özelliğinden faydalanılarak batarya şarj devresi için uygulandı. Sabit akım sağlayan PI, yeni zamanlayıcı ile azalan akım sağlamakla kalmamış, eğer PI yeteri kadar iyi optimize edilememiş olsa dahi sistem kararlılığını da büyük ölçüde arttırmıştır.

SVPWM kullanılarak elektrikli motorlarda çok sayıda çalışmanın olması, bu çalışma ile batarya için yeni uyarlanabilecek çalışmaların sayısının da bir o kadar çok olduğunu göstermektedir.

Daha sonra sistem kararlılığını arttırabilmek amacıyla farklı Lyapunov teknikleri uygulanmıştır. Lyapunov parametrelerini değiştikçe kararlılığın artıp azalabileceğini gözlemlendi. Her pilin yapısı ve müsaade ettiği akım, voltaj değeri ve süreleri farklı

olacağı için kesinlikle bir yöntemin en iyi şekilde çalıştığını söylemek bu çalışmalar sonucunda mümkün değildir ancak sistemdeki dalgalanma miktarını ve sistemin oturma zamanı başarı ile değiştirildi. Bu değişimler ısınmayı da etkiledi. Özellikle sistemin kararlılığı yeteri kadar iyi değilse, daha önceden kötü ayarlanmış bir kontrol algoritması varsa Lyapunov yönteminin dalgalanmaları ciddi ölçüde azalttığı gözlenmiştir.

Bu çalışmada yapılabilecek bir yöntem ise elektrikli motorlar için SVPWM, üç farklı ikili sıra ile anahtarlama görevi yapan devre elemanı ile gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada tek bir bacak ile iki farklı anahtarlama yapan MOSFET kullanılmıştır. Bu sebeple T_a , T_b ve T_c zamanlayıcılarından sadece bir tanesi kullanılmıştır. 3 farklı zamanlayıcı kullanılarak aktarılan güç ve harmonikler karşılaştırılabiliriz.



5. SONUÇLAR

Bataryanın doluma ulaşma isteğinin nasıl bir yapıda olduğunu gözlemlemek için hem farklı kontrol yöntemleri ile hem de hiçbir kontrol yöntemi olmadan batarya şarj edilmiştir. Tüm bu simülasyonlardaki ortak gözlem, bataryanın dolum süresini doğrusala yakın bir şekilde tamamlama eğilimidir. Herhangi bir kontrol algoritması kullanılmadığı zaman, akım ve gerilim değerleri kabul edilebilir güvenli aralığı fazlasıyla geçmiştir. Üstelik ilk %80'lik dilimde voltaj azalırken, akım artmaya devam etmiştir. Doğrusal şarj hızını koruyabilmek için akım ya da voltajdan birisinin arttığı sırada diğerinin azalması oldukça doğaldır. Ancak bu çalışmada güvenlik amacıyla batarya doluma yaklaştıkça zorlamaları azaltmak için akımın azaltılması, dolum ile besleme arasındaki potansiyel dengelemeyi sağlayabilmek için ise voltajın arttırılması hedeflenmiştir. Daha sonra PI kontrol algoritması eklenildiğinde akım belirli bir aralıkta sabit kalacak şekilde dolum sürecini tamamlamıştır. İyi ayarlanmış bir PI ile akımdaki dalgalanma yani kararsızlık oldukça düşüktür. İstenilen çalışma bölgesinde istenilen sürede şarj işlemini tamamlamak için yeterlidir. Ancak pil sağlığı için hedeflenmiş olan akım azaltma yöntemi uygulanamamıştır. Daha kötü ayarlanmış bir PID ise akım şarj bölgesinden deşarj bölgesine kadar geçebiliyor. Dalgalanmalar çok sağlıksız sonuçlar verebiliyor. Ancak SVPWM zamanlayıcısının burada kullanılması, invertör devresindeki anahtarlama zamanını değiştirerek akımdaki dalgalanmayı sınırlayarak kabul edilebilir tolerans ile optimizasyon sağlıyor. Ayrıca bu yöntemin uygulanması Lyapunov algoritmasını uygulamayı da kolaylaştırıyor. Daha sonra tam bazlı bilinen SVPWM zamanlayıcı yöntemini uyguladığımızda akımdaki dalgalanmalar oldukça azaldığı gibi, şarj süresi boyunca azalan bir akım da elde ediliyor. Pil sağlığını ve riskleri iyileştirirken buradaki dezavantajlardan bir tanesi akımın azalmasıyla şarj süresinin uzamasıdır. Buna rağmen şarj süresi istenilen aralıktadır. Farklı hızlı şarj teknikleri ile iyileştirmelerin yapılması mümkündür. Burada test edilen durum kombine edilmiş SVPWM ile Lyapunov yönteminin batarya sağlığı için etkisidir. Diğer dezavantaj ise işlemci yükünün artmasıdır. Ancak günümüz işlemcileri oldukça gelişmiş oldukları için bu durum kolayca çözülebilir. Sisteme Lyapunov eklendiğinde sistem çok daha kararlı bir yapıda çalışmaya devam ediyor. Lyapunov yönteminin lineer olmayan sistemler üzerindeki gücü burada da başarılı bir şekilde simülasyon üzerinde kanıtlanmıştır. Lyapunov yöntemi robust hale getirilebilir. Buradaki parametrelerin ihtiyaca göre ayarlanması gereklidir. Şarj hızı, sistem oturma zamanı gibi etkenler istenilmeyen sonuçlar doğurabilir. İyi ayarlandığında ise daha hızlı daha sağlıklı bir şarj mümkündür.

Elde edilen yararlardan bir tanesi ise SVPWM ve Lyapunov yöntemleri eklendiğinde çıkışa aynı voltajı aktarmak için daha düşük voltaj uygulanabilirliği. Örneğin 5.408V giriş voltajı ile başlanmış olan PI, diğer yöntemler eklendikten sonra 4.218V değerine kadar düşürüldü. Hızlı şarj çıkışı veren dirençler ise 0.53Ω 'dan 0.278Ω 'a düşürülmüştür. Giriş voltajının ve çıkış direncinin azalması harcanılan enerji miktarının daha az olacağını göstermektedir. Yöntemlerin kıyaslanması çizelge 5.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.1. Batarya için uygulanmış kontrol tekniklerin karşılaştırılması

Kontrol Tekniği Olmadan	Donanıma bağlı kalınır, yazılım ile güncelleme yapılmaz.
PI Kontrol Tekniği	Kesinlikle hassas ayar yapılması gereklidir. Sabit akımda şarj sağlar.
SVPWM Zamanlayıcısı	Şarj için PI devresi üzerine uyarlandığında daha kararlı bir sistem, daha düşük giril voltajı ile çalışabilme imkânı ve zamanla azalan akımla şarj sağlar.
Lyapunov Tekniği	Doğrusal olmayan sistemlerde başarılı olduğu için PI ve SVPWM üzerine eklendiği zaman sistemi daha kararlı hale getirir.
Gülbüz (Robust) Lyapunov	Geri besleme fonksiyonu değiştirildiğinde sistemin oturması ve akımdaki azalma ivmesi değiştirilebilir.
Yüksek Frekans Lyapunov	Hatanın belirli bir aralıkta kabul edildiği yöntemdir. Epsilon değeri ile değişim genellikle yüksek kazançtaki kadar hassas değildir.
Düşük Epsilon ile Yüksek Kazançlı Lyapunov	Oturma zamanını erkendir. Akım değişim hızını belli bir bölgede artırır.
Yüksek Epsilon ile Yüksek Kazançlı Lyapunov	Oturma zamanını geciktirir. Akım değişim hızını belli bir bölgede yavaşlatır.

Hangi Lyapunov yönteminin nerede ve ne zaman daha başarılı olacağı sistemin ihtiyaçlarına göre değişmektedir. Parametreler gereksinimler doğrultusunda değiştirilebilir. Çizelge 5.1'deki farklı kontrol yöntemleri farklı sistemlerde farklı başarılar gösterebilir.

6. KAYNAKLAR

- Abraham, K. M. 1993. Directions in Secondary Lithium Battery Research and Development. *Electrochimica Acta*, 38(9): 1233-1248.
- Ahammad, T., Beig, A. R., and Al-Hosani, K. 2013. Sliding mode based DTC of three-level inverter fed induction motor using switching vector table, pp. 1-6, 23-26 June, *9th Asian Control Conference*, İstanbul.
- Aizpuru, I., Iraola, U., Mari, J., and Goikoetxea, A. 2016. Comparative study and evaluation of passive balancing against single switch active balancing systems for energy storage systems, pp. 1-9, 10-12 May, *PCIM Europe 2016; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Nuremberg.
- Akkaya, R. ve Özer, O. 2021. İki yönlü izoleli iki köprü DC-DC dönüştürücünün tasarımı ve analizi, Yüksek lisans tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, 70 s.
- Alam, M.S. and Gao. D.W 2006. Conversion of a Golf Car into a Hybrid Fuel Cell Li-Ion Battery Vehicle and Validation of the Vehicle Model for the 2006 GEM EL Golfear Using PSAT, pp. 1224-1229, 15-17 December, *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, Mumbai.
- Amanor-Boadu, J. M., and Guiseppi-Elie, A. 2020. Improved performance of li-ion polymer batteries through improved pulse charging algorithm. *Applied Sciences*, 10(3): 895.
- Amin, Ismail, K., Nugroho, A., abd Kaleb, S. 2017. Passive balancing battery management system using MOSFET internal resistance as balancing resistor, pp. 151-155, 23-24 October, *International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)*, Jakarta.
- Ammar, A. Benakcha, A., and Bourek, A. 2017. Closed Loop Torque SVM-DTC Based on Robust Super Twisting Speed Controller for Induction Motor Drive with Efficiency Optimization. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(28): 17940-17952.
- Anonim 1: <https://www.elektrikport.com/makale-detay/aku-nedir-nasil-calisir--elektrikport-akademi/4230#ad-image-0> [Son erişim tarihi: 17.01.2023].
- Anonymous 1: <https://www.csb-battery.com.tw/upfiles/gen01477828297.pdf> [Son erişim tarihi: 17.01.2023].
- Anonymous 2: <https://www.ionenergy.co/resources/blogs/cell-balancing-battery-life> [Son erişim tarihi: 16.01.2023].
- Anonymous 3: <https://www.batteryspace.com/prod-specs/6610.pdf> [Son erişim tarihi: 17.01.2023].
- Arun, V., Kannan R, Ramesh, S., Vijayakumar, Raghavendran, P. S., Siva Ramkumar, M., Anbarasu, P., and Sundramurthy, V.P. 2022. Review on Li-Ion Battery vs Nickel Metal Hydride Battery in EV. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022.

- Ataei, M., Kiyoumars, A., and Ghorbani, B. 2010. Control of chaos in permanent magnet synchronous motor by using optimal Lyapunov exponents placement. *Physics Letters A*, 374(41): 4226-4230.
- Azizi, I., and Radjeai, H. 2015. A bidirectional DC-DC converter fed DC motor for electric vehicle application, pp. 1-5, 13-15 December, *4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Setif.
- Bal, G., Özgenel, M.C., ve Demirtaş, Ş. 2007 Vektör Denetimli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu İle Performans Analizi. *Politeknik Dergisi*, 10(1):7-13.
- Baughman, A.C., and Ferdowsi, M. 2008. Double-Tiered Switched-Capacitor Battery Charge Equalization Technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6): 2277-2285.
- Belkacem, S., Naceri, F., and Abdessemed, R. 2012. Reduction of torque ripple in DTC for induction motor using input-output feedback linearization. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 20(3): 273-85.
- Bendall, C. A., and Peterson, W.A. 2002. An EV On-Board Battery Charger. Annual IEEE Conference on Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 1, 26-31.
- Bhat, Sanjay P., and Bernstein, D.S. 1999. Lyapunov Analysis of Semistability, pp. 1608-1612, 02-04 June, *Proceedings of the American Control Conference*, San Diego
- Bhatia, Dinesh, Sweeti Bairagi, Sanat Goel, ve Manoj Jangra. 2010. Pacemakers charging using body energy. *Journal Of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 2(1): 51-54.
- Borase, R.P., Maghade, D.K., Sondkar, S.Y., and Pawar, S.N. 2021. A review of PID control, tuning methods and applications. *International Journal of Dynamics and Control*, 9(2): 818-827.
- Cao, J., Nigel S., and Emadi, A. 2008. Battery Balancing Methods: A Comprehensive Review, pp. 1-6, 03-05 September, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Harbin.
- Carvajal, J., Chen, G., and Ogmen, H. 2000. Fuzzy PID controller: design, performance evaluation, and stability analysis. *Information Sciences*, 123(3-4): 249-270.
- Chang, Jerome. 2003. The Lyapunov-based estimator of rotor resistance for an ac induction motor, pp. 536-540, 12-12 June, *International Conference on Control and Automation*, Montreal.
- Cheng, Z., Lv, J., Liu, Y., and Yan, Z. 2014. Estimation of state of charge for lithium-ion battery based on finite difference extended kalman filter. *Journal of Applied Mathematics*, 2014: 1-10.
- Choe, G.Y., Kim, J.S., Lee, B.K., Chung Yuen Won, ve Tea Won Lee. 2010. A bi-directional battery charger for electric vehicles using photovoltaic PCS systems, pp. 1-6, 1-3 September, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Lille.
- Çelik, H., Öksüztepe, E., ve Kürüm, H. PIC16F877 Mikrodenetleyicisi İle Uzay Vektör PWM İşaretlerinin Üretilmesi.

- Çolak, I., and Tuncay, N. 2008. High current, low voltage modular power converter for lead acid battery charging, pp. 1042-1046, 24-27 November, *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*, Singapur.
- Daowd, M., Omar, N., Van Den Bossche, P., and Van Mierlo, J. 2011. Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation, pp. 1-7, 6-9 September, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Chicago.
- Dere İ.E. ve Ertekin, D. 2022. Elektrikli araçlarda çift yönlü dc-dc dönüştürücü ile akü şarjı için bir kontrol mekanizması, 24-26 Kasım, *Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı*, Bursa.
- Desoer, C.A., and Lin, C.A. 1985. Tracking and disturbance rejection of MIMO nonlinear systems with PI controller. *IEEE Transactions on Automatic Control* 30(9): 861-867.
- Do Valle, B., Wentz, C. T., and Sarpeshkar, R. 2010. An ultra-compact and efficient Li-ion battery charger circuit for biomedical applications, pp. 1224-1227, 30 May- 02 June, *Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Paris.
- Dube, Ş. Lucky, and Bayoumi, E. 2020. Robust DTC against parameter variation for three phase induction motor drive systems, pp. 1-6, 12-13 June, *2nd International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE)*, Istanbul.
- Efe, M. Ö. 2008. Kesir Dereceli Kayan Kipli Denetim, ss. 622-627, 13-15 Kasım, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, İstanbul.
- Ekici, Y.E. 2019. Batarya Yönetim Sistemleri. Yüksek lisans tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya, 149 s.
- Green, M., Fielder, E., Scrosati, B., Wachtler, M., and Moreno, J. S. 2003. Structured silicon anodes for lithium battery applications. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 6(5): A75.
- Hamamci, S. E. 2008. Stabilization using fractional-order PI and PID controllers. *Nonlinear Dynamics*, 51: 329-343.
- Huang, C. C., Yen, S. F., and Wang, C. C. 2008. A li-ion battery charging design for biomedical implants, pp. 400-403, 30 November, *IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems*, Makao.
- Hussein, A.A.H and Batarseh, I. 2011. A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(3): 830-838.
- Jiang, Z., and Dougal, R. A. 2003. Design and testing of a fuel-cell powered battery charging station. *Journal of Power Sources* 115(2): 279-287.
- Johnson, M. A., and Moradi, M. H. 2005. *PID control*. London, UK: Springer-Verlag, London, 543 p.

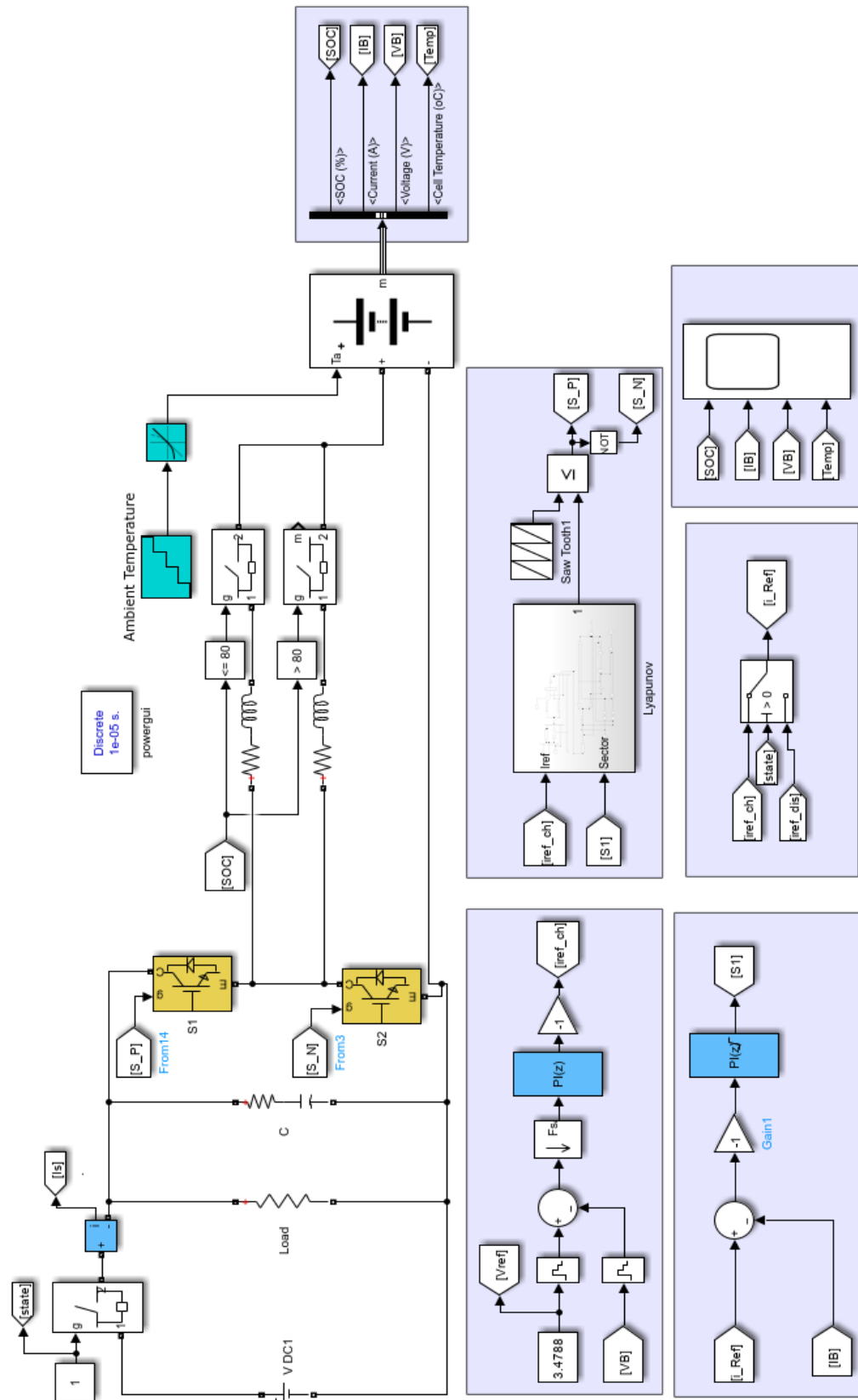
- Jung, Jin-Woo. 2005. Project #2 space vector PWM inverter, pp. 1-35, Mechatronic Systems Laboratory Department Of Electrical And Computer Engineering The Ohio State University, Ohio.
- Kabalan, M., Singh, P., and Niebur, D. 2017. Large Signal Lyapunov-Based Stability Studies in Microgrids: A Review. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(5): 2287-2295.
- Karimi-Ghartemani, M., Mabooodi, M., and Nikkhajoei, H. 2009. Optimal design of current and voltage controllers for a distributed energy resource, pp. 1675-1681, 03-05 November, *35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Porto.
- Kıvrak, S., Özer, T., Oğuz, Y., and Erken, E. B. 2020. Battery management system implementation with the passive control method using MOSFET as a load. *Measurement and Control*, 53(1-2): 205-213.
- Kiehne, H. A. 2003. Battery Technology Handbook, CRC Press: 118, Breckerfeld, 509 p.
- Kim, D. H., Kim, M. S., Prabakar, K., and Kim, H. J. 2022. Efficient management of fast charging systems based on a real-time monitoring system. *Electronics*, 11(4): 520.
- Kim, J., and Kowal, J. 2022. Development of a Matlab/Simulink model for monitoring cell state-of-health and state-of-charge via impedance of lithium-Ion battery cells. *Batteries*, 8(2): 8: 1-19.
- Kitiş, U., and Üser, Y. 2021. Determination and control of the instant moment need of electric vehicles in variable road conditions with a Lyapunov-based flux observer. *Electrica*, 21(3): 428-443.
- Knospe, C. 2006. PID control, *IEEE Control Systems Magazine*, 26(1): 30-31.
- Kursun, V., Narendra, S. G., De, V. K., and Friedman, E. G. 2003. Analysis of buck converters for on-chip integration with a dual supply voltage microprocessor. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 11(3): 514-522.
- Liu, Z., Qiu, Y., Yang, C., Ji, J., and Zhao, Z. 2021. A state of charge estimation method for lithium-ion battery using PID compensator-based adaptive extended Kalman filter. *Complexity*, 2021: 1-14.
- Marom, R., Amalraj, S. F., Leifer, N., Jacob, D., and Aurbach, D. 2011. A review of advanced and practical lithium battery materials. *Journal of Materials Chemistry*, 21(27): 9938-9954.
- Michel, A., Miller, R., and Tang, W. 1978. Lyapunov stability of interconnected systems: Decomposition into strongly connected subsystems. *IEEE Transactions on circuits and systems*, 25(9): 799-809.
- Moore, S. W., and Schneider, P. J. 2001. A review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems. *SAE Technical Paper*, 2001, 01-0959.
- Moraga, N. O., Xamán, J. P., and Araya, R. H. 2016. Cooling Li-ion batteries of racing solar car by using multiple phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 108: 1041-1054.

- Mudi, R. K., and Pal, N. R. 1999. A robust self-tuning scheme for PI-and PD-type fuzzy controllers. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 7(1): 2-16.
- Muqet, M.A., Sohail, M.A., and Khan, M.H. 2020. Implementation and Simulation of DC Battery Fast Charging Topologies. *Gedrag and Organisatie Review*, 33(02): 93-100.
- Nizam, M., Maghfiroh, H., Ubaidilah, A., Inayati, I., and Adriyanto, F. 2022. Constant current-fuzzy logic algorithm for lithium-ion battery charging. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 13(2): 926.
- O'REILLY, J. 1986. Robustness of linear feedback control systems to unmodelled high-frequency dynamics. *International Journal of Control*, 44(4): 1077-1088.
- Ouassaid, M., Cherkaoui, M., Nejmi, A., and Maaroufi, M. 2005. Nonlinear torque control for pmsm: A lyapunov technique approach. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 6, 2007: 118-121.
- Patnaik, L., Praneeth, A. V. J. S., and Williamson, S. S. 2018. A closed-loop constant-temperature constant-voltage charging technique to reduce charge time of lithium-ion batteries. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(2): 1059-1067.
- Payam, A. F., Hashemnia, M. N., and Fai, J. 2011 Robust DTC control of doubly-fed induction machines based on input-output feedback linearization using recurrent neural networks. *Journal of Power Electronics*, 11(5): 719-725.
- Perişoară, L.A., Guran, I. C., and Costache, D. C. 2018. A passive battery management system for fast balancing of four LiFePO₄ cells, pp.390-393, 25-28 Ekim, *IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Yaş.
- Preindl, M. 2016. Robust control invariant sets and Lyapunov-based MPC for IPM synchronous motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(6): 3925-3933.
- Prior, G., and Krstic, M. 2012. Quantized-input control Lyapunov approach for permanent magnet synchronous motor drives. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 21(5): 1784-1794.
- Raj, R. V., Poluru, V. S., and Chandar, T. S. 2015. Robust control of Electric motor drive based on UDE. *IFAC-PapersOnLine*, 48(30): 37-42.
- Ren, P., Wang, S., He, M., and Cao, W. 2021. Novel strategy based on improved Kalman filter algorithm for state of health evaluation of hybrid electric vehicles Li-ion batteries during short-and longer term operating conditions. *Journal of Power Electronics*, 21(8): 1190-1199.
- Sahoo, S. K., Dasgupta, S., Panda, S. K., and Xu, J. X. 2011. A Lyapunov function-based robust direct torque controller for a switched reluctance motor drive system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(2): 555-564.
- Samaddar, N., Kumar, N.S., and Jayapragash, R. 2020. Passive cell balancing of Li-ion batteries used for automotive applications, pp.1-9, 11-12 May, In *Journal of Physics: Conference Series, Chennai*.

- Schoonhoven, G., and Uddin, M. N. 2016. MTPA-and FW-based robust nonlinear speed control of IPMSM drive using Lyapunov stability criterion. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(5): 4365-4374.
- Sethia, G., Nayak, S. K., and Majhi, S. 2020. An approach to estimate lithium-ion battery state of charge based on adaptive Lyapunov super twisting observer. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 68(3): 1319-1329.
- Sun, J. 2010. Car Battery Efficiencies. <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/sun1> [Son erişim tarihi: 15.01.2023]
- Swingler, A. D., and Dunford, W. G. 2002. Development of a bi-directional DC/DC converter for inverter/charger applications with consideration paid to large signal operation and quasi-linear digital control, pp. 961-966, 23-27 June *IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No.02CH37289)*, Cairns.
- Tangirala, A. K., Li, D., Patwardhan, R. S., Shah, S. L., and Chen, T. 2001. Ripple-free conditions for lifted multirate control systems. *Automatica*, 37(10): 1637-1445.
- Tee, K. P., Ge, S. S., and Tay, E. H. 2009. Barrier Lyapunov Functions for the Control of Output-Constrained Nonlinear Systems. *Automatica*, 45(4): 918-927.
- Tezde, E. İ., ve OKUMUŞ, H. İ. 2018. Batarya modelleri ve şarj durumu (SoC) belirleme, *EMO Bilimsel Dergi*, 8(1): 21-25.
- Thakre, M. P., and Matala, N. P. 2020. Alleviation of voltage sag-swell by DVR based on SVPWM technique, pp. 1-6, 10-11 December, *International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)*, Chennai.
- Tian, N., Fang, H., and Wang, Y. 2022. Real-time optimal lithium-ion battery charging based on explicit model predictive control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(2): 1318-1330.
- Turhan M. 2011. Li-ion pil destekli yakıt pili güç sisteminin su üstü platforma uygulanması, Doktora tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 163 s.
- Vaclavek, P., and Blaha, P. 2006. Lyapunov-function-based flux and speed observer for AC induction motor sensorless control and parameters estimation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(1): 138-145.
- Vazini, H., Asadi, M., Karimadini, M., and Hajisadeghian, H. 2022. A fast charging of Li-ion battery based on Lyapunov function for electrical vehicle. *IET Power Electronics*, 15(1): 23-32.
- Venkatesh, A. 2022. An improved adaptive smo for speed estimation of sensorless Dsfoc induction motor drives and stability analysis using Lyapunov theorem at low frequencies. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, V8(09): 246-253.
- Wang, C. S., Covic, G. A., and Stielau, O. H. 2004. Investigating an LCL load resonant inverter for inductive power transfer applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(4): 995-1002.

- Wang, H., Ye, X., Tian, Y., Zheng, G., and Christov, N. 2016. Model-free-based terminal SMC of quadrotor attitude and position. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 52(5): 2519-28.
- Xiao, C., Cheng, D., and Wei, K. 2018. An LCC-C compensated wireless charging system for implantable cardiac pacemakers: Theory, experiment, and safety evaluation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(6): 4894-4905.
- Xie, W., Liu, X., He, R., Li, Y., Gao, X., Li, X., Peng, Z., Fren, S., Feng X., and Yang, S. 2020. Challenges and opportunities toward fast-charging of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 32: 101837.
- Xu, J., and Xue, Z. 2011. Speed sensorless DTC system simulation of induction motor based on full-order flux observer, pp. 208-211, 08-09 September, *IEEE Power Engineering and Automation Conference, Wuhan*.
- Xu, L., Deng, Z., and Hu, X. 2021. Battery Health Estimation Using Electrochemical Aging Model and Ensemble Kalman Filtering, pp. 1-6, 16-19 November *IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC)*, Taipei.
- Yan, J., Xu, G., Qian, H., and Xu, Y. 2010. Battery fast charging strategy based on model predictive control, pp. 1-8, 06-09, September, *IEEE Vehicular Technology Conference, Ottawa*.
- Yu, G. Q., Zhang, Y., and Li, Y. W. 2012. Research of DSP-based SVPWM vector control system of asynchronous motor. *International Conference on Computer Science and Electronics Engineering*, 1: 151-155.
- Zeng, M., Zhang, P., Yang, Y., Xie, C., and Shi, Y. 2019. SOC and SOH joint estimation of the power batteries based on fuzzy unscented Kalman filtering algorithm. *Energies*, 12(16): 3122.
- Zeng, X., Li, M., Abd El-Hady, D., Alshitari, W., Al-Bogami, A. S., Lu, J., and Amine, K. 2019. Commercialization of lithium battery technologies for electric vehicles. *Advanced Energy Materials* 9(27): 1900161.
- ZERGEROĞLU, E., KANDEMİR, İ., ŞEKER, M., and EROĞLU, E. 2013. kontrol sistemlerinde belirsizlikle baş etme yöntemleri: Lyapunov tarzı yaklaşımlar. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(3): 587-602.
- Zhang, F., Liu, G., and Fang, L. 2009. Battery state estimation using unscented kalman filter, pp. 1863-1868, 12-17 May, *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe*.
- Zhang, Z., Chen, L., and Le, J. Y. 2009. Lyapunov-based control for single-phase three-level NPC AC/DC voltage-source converters, pp. 1-4, 15-18 November, *International Conference on Electrical Machines and Systems, Tokyo*.
- Zhang, Z., Wu, Y. Q., Gu, D. J., and Chen, Q. 2017. Current ripple mechanism with quantization in digital LLC converters for battery charging applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(2): 1303-1312
- Zhao, C., Xie, X., and Liu, S. 2012. Multioutput LED drivers with precise passive current balancing. *IEEE Transactions on Power Electronics* 28(3): 1438-1448.

7. EKLER



Simulink genel görünümü

ÖZGEÇMİŞ

Doğukan ÖZTÜRK

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2020-2023	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2015-2020	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya
Erasmus+ 2022-2023	Akademia Górniczo-Hutnicza Electronic Engineering and Telecommunication, Krakow
Özel Öğrenci 2021-2022	İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol Mühendisliği Fakültesi, İstanbul

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Proje Sorumlusu 2016-2017	Akdeniz Üniversitesi Finder Elektronik, Antalya
Sözleşmeli Öğretim Görevlisi 2021-2022	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya