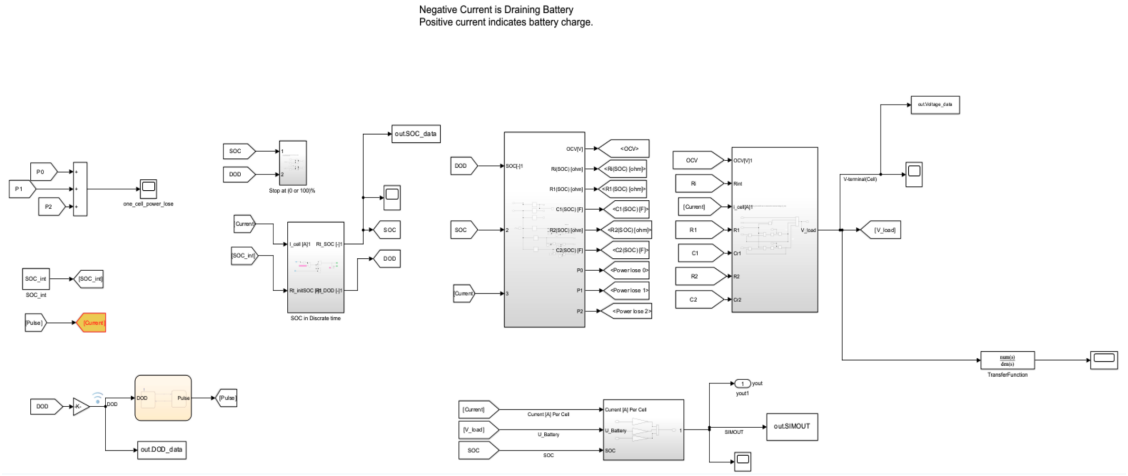
CHALMERS



Matlabbaserad batterisimulator för eldrivna fordon

En avancerad metodik för analys och observation av batteriers prestanda

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Elektroteknik

Natthawat Luangbanthao
Zaher Albaghajati

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2024
www.chalmers.se

Examensarbete 2024

Matlab baserad batterisimulator för eldrivna fordon

Avancerad teknologi för analys och observation av batteriers prestanda

Natthawat Luangbanthao
Zaher Albaghajati

CHALMERS

Institutionen för Elektroteknik
Chalmers Tekniska Högskola
Göteborg 2024

Matlab baserad batterisimulator för eldrivna fordon
Avancerad teknologi för analys och observation av batteriers prestanda
NATTHAWAT LUANGBANTHAO
ZAHER ALBAGHAJATI

© NATTHAWAT LUANGBANTHAO, ZAHER ALBAGHAJATI, 2024.

Handledare: Thorsten Hinrichs, Innomotics
Handledare: Thomas Hammarström, Elkraftteknik
Examinator: Thomas Hammarström, Elkraftteknik

Examensarbete 2024
Institutionen för Elektroteknik
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Simulink-modell för batterisimultorn.

Skriven i LaTeX
Göteborg 2024

Matlab baserad batterisimulator för eldrivna fordon
Avancerad teknologi för analys och observation av batteriers prestanda
NATTHAWAT LUANGBANTHAO
ZAHER ALBAGHAJATI
Institutionen för Elektroteknik
Chalmers Tekniska Högskola

Abstract

The need to address fuel consumption and exhaust gas pollution is steering the automotive industry towards electric vehicles, making battery innovation more crucial than ever. With the surging popularity of electric vehicles, there is an increased demand for solutions to sustain this increased energy demand. One of the solutions is making batteries more efficient. However, the traditional way of testing batteries faces a lot of challenges, which has led to an increased demand for digital solutions, one of the solutions being battery simulators. The usage of simulation would significantly reduce unnecessary costs. Therefore, many companies are moving on to test their batteries using a simulation tool before the actual construction.

This thesis focuses on the construction and design of a battery simulator. Specifically, primary objective of this project is to develop a program based on Matlab and Simulink that adapts input values to calculate and provide essential parameters for battery evaluation, simulating the battery at both the cell and pack levels. Consequently, the simulator aims to enhance battery testing efficiency, reduce costs, and improve the accuracy of battery performance predictions.

The validation part of the battery plays a crucial role in this project to achieve an accurate ideal battery replication. This will be accomplished by aquiring specific battery parameters coupled and utilizing Matlab coding for observation and analysis. Furthermore, this research will evaluate the influence of external cables connected to the battery, assessing their impact on overall performance and efficiency. By examining these factors, the project aims to provide a comprehensive understanding of battery behavior in real-world applications, ensuring the simulator's robustness and reliability.

Nyckelord: Battery simulator, Batteri typer, State och charge estimation, Colomb counting, OCV, Thevenin model, Li-ion batteri, Nickel-metal hydride.

Förord

Vi vill börja med att tacka vår handledare Thorsten Hinrichs och Stefan Nilsson som vägledde oss under kandidatarbetet samt visa tacksamhet för all hjälp som vi fick under möten vi haft med er. Vi vill även tacka Thomas Hammarström för all stöd samt vägledning vi erhållit av honom. Slutligen vill vi också tacka biblioteket och fackspråk för era tjänster och handledningar gällande rapportskrivande.

Zaher Albaghajati Natthawat Luangbanthao Göteborg, Maj 2024

Akronymer

Här nedan finns en lista på akronymer som används i rapporten. Akronymerna ordnas i alfabetisk ordning.

AC	Alternating Current
CCMs	Coulomb Counting Methods
DC	Direct Current
DoD	Depth of Discharge
ECM	Equivalent Circuit Model
EIS	Electrochemical Impedance Spectroscopy
EV	Electric Vehicle
HPPC	Hybrid Pulse Power Characterization
ISBMs	Impedance Spectroscopy Based Methods
KFMs	Kalman Filter Methods
Li-ion	Lithium ion
LiPo	Lithium Polymer
LTO	Lithium-Titanate
NCA	Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel Metal Hydride
NCO	Lithium Cobalt Oxide
OCV	Open Circuit Voltage
OCVMs	Open Circuit Voltage Methods
SLI	Starting, Lighting, Ignition
SOC	State Of Charge
SOH	State Of Health

Innehåll

Akronymer **ix**

Figurer **xiii**

1 Inledning **1**
1.1 Bakgrund . . . 1
1.2 Syfte . . . 1
1.3 Mål . . . 1
1.4 Avgränsningar . . . 2

2 Teknisk Bakgrund **3**
2.1 Batterityper . . . 3
2.1.1 Lithiumjonbatterier . . . 4
2.1.2 Bly-syra batterier . . . 5
2.1.3 Nickel-Cadmium . . . 7
2.1.4 Nickel-Metal Hydride . . . 8
2.2 Batteri Modellering . . . 10
2.2.1 Elektrokemisk Modell . . . 10
2.2.2 Ekvivalent Kretsmodell . . . 11
2.2.2.1 Rint Modell . . . 11
2.2.2.2 Thevenin Modell . . . 12
2.2.3 Data-Driven Model . . . 13
2.3 State of Charge . . . 14
2.3.1 Coulomb Counting Method . . . 14
2.3.2 Open Circuit Voltage . . . 14
2.3.3 Impedance Spectroscopy-Based Method . . . 15
2.3.4 Kalman Filter . . . 17
2.4 Terminologi och Definition . . . 18
2.5 Kablar och RLC-krets . . . 19

3 Metod **20**
3.1 Batterimodellering . . . 21
3.1.1 Selektion av modell och implementering av prefererade metoden . . . 21
3.2 Modellverifiering . . . 23
3.3 Parameter Estimering . . . 27
3.3.1 SOC estimering med Coulomb counting . . . 27

3.3.2 Förlustberäkning av effekt . . . 27
3.4 Kabelkonstruktion och design . . . 27

4 Systemkonstruktion **29**
4.1 Simulink . . . 29
4.2 Coulomb Counting Method SOC . . . 30
4.3 Lookuptable För Parametrarna Samt Effektförlust . . . 30
4.4 Beräkning Av Totala Effektförlust Cell-form . . . 31
4.5 Beräkning Av V-terminal . . . 32
4.6 Kabelkonstruktion . . . 33
4.7 Batteripacksmodell . . . 34
4.8 Hantering av laddningstillstånd . . . 34
4.9 Säkerhetsstoppmekanism . . . 35

5 Resultat och diskussion **37**
5.1 OCV och strömmen som funktion av tiden . . . 37
5.1.1 OCV vid urladdning som funktion av tiden . . . 38
5.2 SOC som funtion av tiden vid olika C-Rates . . . 39
5.3 Spänningen vid lasten som funktion av tiden . . . 40
5.4 Batteripack . . . 40
5.5 Skillnaderna mellan Li-ion-batterier och andra batterityper . . . 42
5.5.1 Livslängd . . . 42
5.5.2 Nominell spänning . . . 42
5.5.3 Energi densitet . . . 43
5.5.4 Kraft densitet . . . 43
5.5.5 Laddningseffektivitet . . . 43
5.5.6 Självurladdningshastighet . . . 43
5.5.7 Arbetstemperaturområde . . . 43
5.5.8 Massa för elfordon . . . 43
5.6 Kabelns inverkan på systemet . . . 44

6 Slutsats och förslag till fortsatt arbete **45**
6.1 Begränsningar . . . 46
6.2 Framtida arbete . . . 46
6.3 Slutsats . . . 46

Bibliography **I**

A Appendix **I**
A.1 Matlab-koden . . . I

Figurer

2.1 Energidensiteten hos olika typer av batterier, där vikt och storlek beaktas [14]. 5
2.2 Genomskärning av en bly-syrabatteri [17]. 6
2.3 Energikedja från ingångsaggregatet (inmatningsaggregat eller elnät) till lasten via ett batteri [19]. 8
2.4 En NiMH-battericell som visar den elektrokemiska reaktionen och elektronflödet [21]. 9
2.5 Metoder för batteri modellering. 10
2.6 Kretsschema av ett batteri med intern resistans [25]. 11
2.7 Thevenin model med 1RC koppling [27]. 12
2.8 Thevenin model med 2RC kopplingar [25]. 13
2.9 OCV-SOC förhållande för ett Li-ion batteri. 15
2.10 Nyquist-plot för EIS beräkningar av en cell vid 25 ∘ C med frekvens mellan 800 Hz och 19 mHz [32] 16
2.11 Batteri ECM [31]. 16

3.1 Upplägget för projektets genomförande. 21
3.2 Graf över 2RC Thevenin modell [36]. 22
3.3 Krets över 2RC Thevenin modell [37]. 23
3.4 Data för HPPC test. 24
3.5 Spänningen över en puls av HPPC test profil i urladdningsfas [39]. . . 25
3.6 Illustrerar sambandet mellan spänningen över en puls och formeln för vilostadiet [39]. 26

4.1 Simulink-kretschema. 29
4.2 Coulomb Counting Method Discrete Time. 30
4.3 Lookup Tables För Parametrarna Samt Effektförlust. 31
4.4 Effektförlust i cell-form. 32
4.5 KVL för att räkna utV-terminal (Vload). 32
4.6 Modell av kabel. 33
4.7 Batteripackmodell. 34
4.8 Hantering av laddningstillstånd med hjälp av "Chartblock. 35
4.9 Kopplingen för Säkerhetsstopp mekanismen. 35

5.1 OCV och strömmen som funktion av tiden. 38
5.2 OCV (discharge) som funktion av tiden. 38
5.3 SOC som funktion av tiden vid olika C-Rates. 39

5.4 Spänningen vid belastning från 10% till 90% och tillbaka till 10%. . . 40
5.5 Utmatningsparametrarna från batteripack. 41
5.6 Förstorad bild över strömmen från batteripack. 41
5.7 Den terminala spänningen från kabeln. 44
5.8 Kabelns inverkan på terminala spänningen vid början av tiden. 44

A.1 Inledande kod för att avläsa specifika data från Excel filen. I
A.2 Perioden mellan varje puls. II
A.3 Estimering av parametrarna. III
A.4 Omvänd data samt konfiguration för ett batteripaket. III
A.5 Kod för inmatning av värden för kabel specifikationer. IV

1
Inledning

1.1 Bakgrund

Den ökande medvetenheten om miljöfrågor över hela världen har resulterat i en ökad utveckling av andra energikällor än olja och kol för att producera energi, samt energi lagringssystem såsom batterier. Det finns olika typer av batterier som för närvarande används inom industrin, såsom litiumjon (Li-ion) batteri, nickel-metallhydrid (Ni-MH) batteri, nickel-kadmium (Ni-Cd) batteri och bly-syra batteri. Batterier har en fördel gentemot andra typer av energilagringsystem på grund av deras höga effektivitet, låga föroreningar, hög effekttäthet och hög arbetsspänning för celler [1]. Parametern för att försäkra en säker laddning och urladdning är laddningstillståndet (SOC).

Användning av avancerade mjukvaror såsom Matlab och Simulink erbjuder en rad fördelar inom området. Matlab och Simulink är välkända bland ingenjörer för sina kraftfulla verktyg för modellering av komplexa system [2]. Genom att utnyttja dessa programvaror är det möjligt att utveckla batterisimulator som inte bara ger ut noggranna värden, utan också lätt att använda och redigera för vidare utveckling. Med hjälp av dessa kan en mer djupgående forskning utföras av batteriteknikens potential och dess användning i olika områden.

1.2 Syfte

Syftet med det här projektet är att skapa en användarvänlig batterisimulator med hjälp av Matlab och Simulink, som enkelt kan anpassas för olika inmatningsvärden. Simulatorn kommer att kunna beräkna och visa viktiga parametrar, samt simulera batteriet på cell och packnivå.

1.3 Mål

Målet med det här projektet är att utveckla en batterisimulator med hjälp av Matlab och Simulink. Därtill är målet även att skapa en simulator som kan bland annat beräkna de viktiga parametrarna såsom SOC, effekt, spänningen osv, simulera parallell- och seriekopplingar av batterier samt olika kablar.

Utöver att utveckla själva simuleringsverktyget, kommer projektet även att involvera forskning över olika batterityper som finns tillgängliga på marknaden inom det specifika området. Detta inkluderar att undersöka vilka batterityper som är mest använda och deras egenskaper, vilket kommer att bidra till att skapa en mer realistisk batterisimulator.

Simulatorn kommer att göra det möjligt att analysera hur kablar och anslutningar kan påverka batteriets prestanda. Genom att inkludera denna funktionalitet ges kunden möjlighet att utforska olika kabelkonfigurationer och deras inverkan på batteriets effektivitet och stabilitet.

Genom att tillhandahålla en lättanvänd batterisimulator underlättar projektet för forskare, ingenjörer och utvecklare att utföra noggranna simuleringar och analyser för att optimera batteriets effektivitet. Möjligheten att snabbt testa olika scenarier och ta informerade beslut som i sin tur kommer att hjälpa kunden att förbättra prestanda och hållbarhet hos batteridrivna system.
Detta projekt representerar en viktig steg mot att utveckla och förstå batteriteknologi och dess tillämpningar inom olika områden av industrin.

1.4 Avgränsningar

I samband med projektets genomförande förekommer diverse avgränsningar som begränsat uppnåendet av målet. De huvudsakliga begränsande faktorerna inkluderar den begränsade tiden för att genomföra arbetet samt den ursprungliga begränsade kunskapen inom Matlab/Simulink. Den integrarbara mjukvarumiljön Matlab/Simulink är det optimala alternativet för att uppnå projektets syfte och tillämpas för numeriska beräkningar, modellering av dynamiska system samt simulering och analys.

Tidsåtgången för utförandet av projektet var bristande med tanke på den praktiska delens komplexitet och den begränsade tillgången till resurser inom Simulink. Eftersom vi inte hade tillgång till toolboxen innebar detta att vi endast fick använda de standardfunktionsblock som ingår i Simulink. Därför var tilläggsverktyg i Simulink inte ett alternativ på grund av de extra kostnaderna. Vilket i sin tur resulterar till en mer komplex konstruktion för batterisimulatorn. Man kan konstatera att tidsbristen och begränsad kunskap inom Matlab har varit beroende av varandra.

Sedan tillkommer därtill övriga avgränsningar. Olika batterityper på marknaden har studerats och projektet har sitt fokus på Li-ion batterier då det anses vara standardtypen i nuvarande fordonsektorn samt på grund av batteri typens höga effektivitet.

2

Teknisk Bakgrund

2.1 Batterityper

Genom åren har olika typer av batterier använts inom industriella områden, såsom tillverkning av EV. EV använder en rad olika batterityper vilka utvecklats över tid för att möjliggöra lagring och leverans av energi [3,4]. Dessa batterier varierar i sammansättning, prestanda och användningsområden, men de delar alla den gemensamma huvudfunktionen att använda kemiska reaktioner för att generera elektrisk ström . Den ström går sedan till en elmotorn som omvandlar den elektriska energin till en mekanisk energi [4,5].

Bland de mest använda batterityperna återfinns uppladdningsbara batterier, vilka utgör ryggraden i många elektriska fordon och portabla elektronikenheter. Deras förmåga att återställa sig till sitt ursprungliga tillstånd genom kemiska processer gör dem idealiska för upprepade laddningscykler, vilket i sin tur stödjer en långsiktig hållbarhet och ekonomi [6,7].

Det finns flera varianter av uppladdningsbara batterier, varav några inkluderar Li-ion-batterier, bly-syra-batterier, NiCd-batterier och NiMH-batterier. Dessa batterier skiljer sig åt i sina kemiska sammansättningar och egenskaper [8]. Mer detaljerad information om varje typ kommer att presenteras senare i rapporten för att ge en mer omfattande förståelse för deras användningsområden, fördelar och nackdelar.

Effektiviteten hos ett batteri är en avgörande faktor för att maximera dess användning. Ett högeffektivt batteri kan tillåta en djupare urladdning, vilket innebär att en större del av dess totala kapacitet kan utnyttjas innan det behöver laddas igen. Detta koncept, känt som DOD, är kritiskt för att förbättra både räckvidden och prestandan hos elektriska fordon och andra applikationer som är beroende av batteri lagringskapacitet [9].

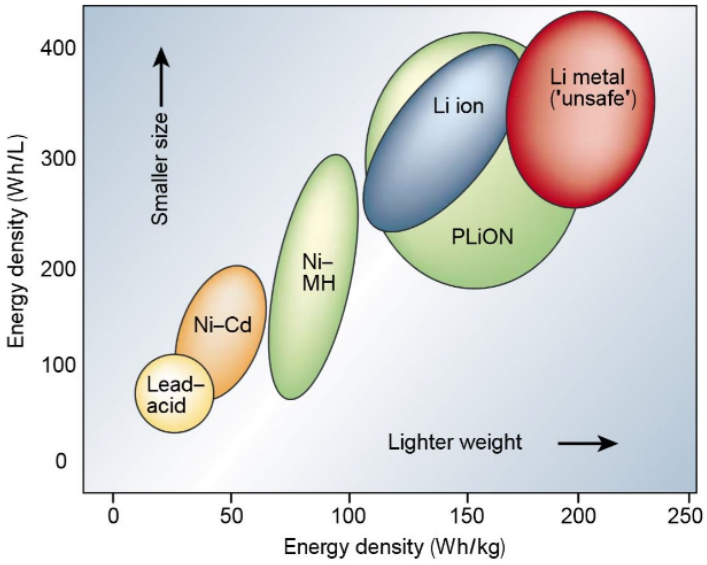
För att uppnå dessa mål krävs fortsatta innovationer och forskningsinsatser inom batteriteknik. Genom att utveckla nya material, förbättra design, optimering av laddningsalgoritmer, kylningssytem, batteriernas effektivitet och att hållbarheten ytterligare förbättras. Dessutom är det viktigt att integrera hållbara tillverkningsmetoder och återvinningsprocesser för att minimera miljöpåverkan och resursanvändning över hela batteriets livscykel [10].

2.1.1 Lithiumjonbatterier

Lithiumjonbatterikonceptet introducerades först år 1970 av den brittiske kemisten Stanley Whittingham. Det var dock inte förrän på 1990-talet, som dessa batterier började bli tillgängliga för allmänheten. På grund av klimatförändringar, satsar länder över hela världen på att öka användningen av förnybara energikällor och högeffektiva uppladdningsbara batterier som används i elbilar som siktar på att ersätta fossildrivna fordon. Syftet är att minska miljöpåverkan och ha en mer hållbar framtid för alla [11, 12]. Volvo Cars strävar mot en mer hållbar framtid och har som mål att övergå till en hel elbilsproduktion före år 2030. Denna åtgärd är en del av deras engagemang och motiv för att minska miljöpåverkan och främja en mer hållbar utveckling framöver [13].

Ett lithiumjonbatteri (LIB) består av en katod (till exempel LiCoO2 eller LiFePO4) och en anod (oftast grafit kol), samt organiskt lösningsmedelsbaserat flytande elektrolyt. Batteriets energitäthet beräknas som produkten av arbetspotentialen, vilket är skillnaden mellan anod- och katod potential, och den specifika kapaciteten. För att förbättra energitätheten bör antingen anodmaterialet fungera vid lägsta möjliga potentialer (0 V mot Li/Li+) och/eller katodmaterialet fungera vid högsta möjliga potentialer ($\leq$ 5V mot Li/Li+) [12].

Till skillnad från andra laddningsbara batterier som idag används i industrin, utmärker sig LIB när det gäller energitäthet. Figur 2.1 illustrerar en jämförelse mellan olika batterityper, där x-axeln representerar energitäthet i Wh/kg (Vikt på batteriet) och y-axeln i Wh/L(Volym på batteriet). Figuren visar att LIB har högre energitäthet per kilogram (Wh/kg) samt per volymenhet (Wh/L) än till exempel bly-syrabatterier eller nickel-kadmiumbatterier. Detta innebär att de kan lagra mer energi för samma vikt, vilket gör dem lättare och mer kompakta. Detta är väldigt viktigt för till exempel elbilar, där vikten och storleken på batteriet spelar en stor roll, eftersom en tyngre bil kräver mer energi för att röra sig [14].



Figur 2.1: Energidensiteten hos olika typer av batterier, där vikt och storlek beaktas [14].

Figur 2.1 illustrerar att Li-metall har bättre energitäthet än Li-ion-batterier, trots detta överväger nackdelarna med Li-metall dess fördelar. Li-metall har begränsad stabilitet, dålig ledningsförmåga och är känsligt för felanvändning, vilket i vissa fall kan leda till brand eller till och med explosioner. Dessa säkerhetsrisker gör att Li-ion batterier är mer användbara och pålitligare än Li-metall för de flesta tillämpningar.

Genom att justera elektrolyten kan man förändra egenskaperna hos ett Li-ion-batteri. Till exempel om man ersätter den traditionella flytande elektrolyten får man det som brukar benämnas som en litium-polymer (LiPo). Trots att denna typ av batteri är dyrare och har lägre effekt jämfört med Li-ion, har den fördelen av ökad tålighet samt mångsidighet och kan därför användas för olika ändamål [15]. De olika typerna av litiumbatterier, såsom Lithium Titanate (LTO), Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide (NCA), och Lithium Cobalt Oxide (LCO), uppstår beroende på det aktiva materialet i elektrolyten. Det är detta aktiva material som ger varje batterityp sina unika egenskaper och användningsområden. Några typer har lägre cykelliv, vilket innebär att de kan laddas och urladdas färre gånger innan de börjar förlora kapacitet, medan andra har högre energidensitet vilket innebär att de kan lagra mer energi per enhet vikt eller volym [16].

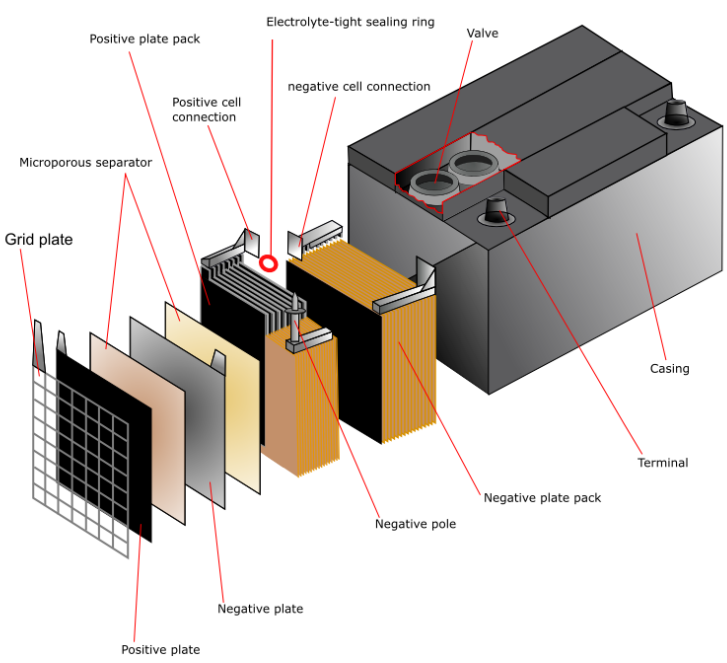
2.1.2 Bly-syra batterier

Sekundära batterier har sitt ursprung från år 1859 i samband med uppkomsten av bly-syra batterier vilka kom till användning för stationära energilagring redan vid början av 1900-talet. Produktionen av bly-syra batterier ökades enormt inom telekommunikation samt transportindustrin efter andra världskrigets slut och har expanderat för applicering inom fler användningsområden sedan dess. I dagsläget tillämpas den här batteritypen bland annat som stationära batterier, SLI (starting, lightning, ignition), batterier vid transport av privatpersoner samt inom industrin

[17]. Dessa batterier är vanligt förekommande i fordonsapplikationer för godstransport, och ett exempel på ett företag specialiserat på tillverkning av materialhanteringsutrustning och lagerlösningar är det tyska företaget Jungheinrich. Jungheinrich tillverkar olika typer av truckar som används för transport av gods, och deras fordon är ofta utrustade med bly-syra-batterier som drivkraft [18].

Det bör noteras att bly-syra-batterier inte enbart används inom materialhantering sektorn utan är också vanliga i andra fordonstyper såsom golfbilar och elscootrar. Dessa batterier har fördelen av att vara kostnadseffektiva och har länge varit en pålitlig energikälla för fordon inom olika tillämpningsområden.

Bly-syrabatteriets egenskaper utmärker sig väl gällande låg självurladdning, kostnadseffektivitet samt förmåga att hantera höga startströmmar. Däremot, i jämförelse med de andra sekundära batterierna konkurreras denna batterityp ut med hänsyn till specifikationerna. Låg energitäthet, regelbundet underhåll, begränsad livslängd och negativ miljöpåverkan, eftersom bly klassas som en tungmetall, är några av de nackdelar som kännetecknar bly-syrabatteriet.



Figur 2.2: Genomskärning av en bly-syrabatteri [17].

Från figuren ovan framgår det att ett bly-syrabatteriet består av positiva plattor av blydioxid och negativa plattor av bly, separatorer som förhindrar kortslutning men tillåter jonflöde. Plattorna stöds av nätplattor som ger elektrisk kontakt. De positiva och negativa plattorna är grupperade i plattpaket och förbundna med cellanslutningar. En elektrolyt-tätande ring (Electrolyte-tight sealing ring) förhindrar läckage, och en säkerhetsventil släpper ut överflödiga gaser för att förhindra skador [17].

2.1.3 Nickel-Cadmium

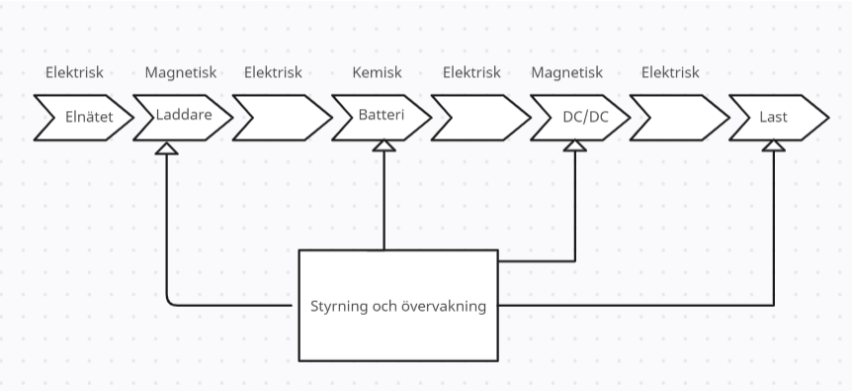
Nickel-cadmium eller NiCd är en typ av laddningsbara batterier. Tack vare sina elektriska egenskaper kunde det vara en dominerande typ av laddningsbara batterier för strömförsörjning av portabla elektriska enheter och stationära utrustningar som behöver laddas och urladdas regelbundet. NiCd har utmärkta egenskaper, den är prisvärd, tålig, har bra prestanda vid låga temperaturer och den kan driva en stor ström. Den utmärker sig genom sin förmåga att hålla en laddning över tid och att kunna laddas upp om och om igen [19].

Dock är det viktigt att notera att NiCd-batterier har vissa nackdelar. De innehåller kadmium, en tungmetall som är miljöfarlig och kan vara skadlig för människor om det hanteras felaktigt. På grund av detta har användningen av NiCd-batterier minskat över tid, och de har delvis ersatts av mer miljövänliga alternativ. Det är viktigt att överväga miljöaspekterna och att överväga alternativa batteri teknologier när det är möjligt för att minimera den negativa påverkan på miljön [20].

Hur en NiCd cell är uppbyggd beror på dess tillämpningar, men oavsett vilket användningsområde den har så har alla celler ett slutet system, där en ventil finns för att möjliggöra ventilation om det blir högt tryck inne i cellen. Tack vare denna ventil så är NiCd säkra att använda oavsett under vilket tryck de använde vid [19].

En laddningsbar NiCd batteri utgörs av tre grundläggande komponenterna: den positiva nickel-elektroden, den negativa kadmium-elektroden och en koncentrerad KOH-elektrolytlösning. För att undvika elektrisk kontakt mellan den positiva och negativa elektroden implementeras en viktig komponent - separatorn. Denna separator utgör ett tunt, poröst skikt av isolerande material och fungerar som en barriär för att säkerställa att de båda elektroderna förblir åtskilda. Isoleringen mellan den positiva och negativa elektroden i en battericell är avgörande för att förhindra oönskad elektrisk kontakt, vilket om den inträffar kan leda till en kortslutning, där elektronerna rör sig mellan de två polerna. Kortslutningen kan leda till överhettning, skador på batteriet och till och med explosion i vissa fall. Separatorn i en battericell tjänar därför som en viktig säkerhetskomponent för att förhindra oavsiktlig elektrisk kontakt och säkerställa en korrekt och kontrollerad laddnings- och urladdningsprocess, vilket i sin tur bidrar till en stabil och effektiv prestanda för batteriet [19].

Portabla elektriska enheter får sin ström från ett laddningsbart batteri, som laddas upp från elnätet. Omvandlingen av energi från elnätet till lasten kan beskrivas som en energikedja, vilken visas i figur 2.3. Energikedjan består av en laddare, ett batteri, en DC/DC-omvandlare och en last (en apparat).



Figur 2.3: Energikedja från ingångsaggregatet (inmatningsaggregat eller elnät) till lasten via ett batteri [19].

Batteriet får ström från elnätet genom en laddare under laddningen. Under laddningen används en elektromagnetisk komponent, vilket gör att den elektriska energin från elnätet omvandlas till magnetisk energi i laddaren och sedan tillbaka till elektrisk energi. Denna energi lagras sedan i batteriet i form av kemisk energi. När apparaten används utan elnät, det vill säga när batteriet urladdas, omvandlar det den kemiska energin till elektrisk energi.

DC/DC-omvandlaren som kommer efter batteriet används för att justera spänningen så att den passar bra med enheten, utan att enheten skadas av hög spänning. Den gör även batteriet mer effektivt. På samma sätt som i laddaren omvandlar DC/DC-omvandlaren elektrisk energi till magnetisk energi och sedan tillbaka till elektrisk energi. I lasten eller enheten omvandlas den elektriska energin från omvandlaren till exempelvis bild, ljud, mekanisk energi eller vad den bärbara apparaten utför.

2.1.4 Nickel-Metal Hydride

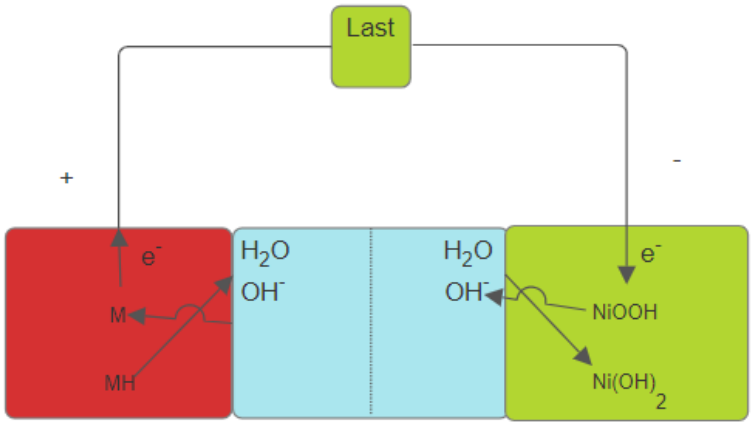
Nickel-metal hydride (NiMH) batterier är en typ av ackumulator vilket benämnes som uppladdningsbara batterier där de kemiska ämnena i batteriet möjliggör den här unika egenskapen, därtill är de vanligt förekommande i EV applikationer samt portabla elektriska enheter. De unika fördelarna hos NiMH som skiljer sig åt från de andra typer av batterierna är livscykeln, energitätheten samt den miljövänliga aspekten [21].

NiMH batterierna har förmågan att laddas upp flera hundratals gånger under deras begränsade livslängd. Därtill utmärkas de av deras relativt höga energitäthet vilket medför att de är kapabla till att lagra energi i en stor omfattning gentemot sin vikt och storlek. Den höga energitätheten är även fördelaktig när den används av en enhet i en längre tidsperiod utan avbrott innan batteriet behöver laddas om på nytt. I jämförelse med NiCd batterier så överträffar NiMH när det gäller faktorer såsom livslängd och energin densitet. Till skillnad från NiCd är NiMH fri från metaller som kan utgöra fara utifrån den ekologiska samt sociala dimensionerna, vilket medför att NiMH är ett betydligt mer miljövänligt alternativ [22].

Den relativt höga självurladdningen hos NiMH utgör en avgörande nackdel för den här typen av batteri vilket definieras som en kemisk reaktion vilken pågår inuti cellen även när batteriet inte används. Självurladdningen beror på diverse faktorer såsom de passiva materialen i konstruktionen samt batteriets kemiska struktur. Temperaturförändringar som batteriet utsätts för spelar roll likaså för självurladdningen. I det här fallet (NiMH) ökas självurladdningen vid höga temperaturer. Den höga självurladdningen kan däremot minskas med hjälp av nya kemiska tillsatser [23].

Inom elbilssektorn har användningen av nickelmetallhydridbatterier (NiMH) minskat avsevärt. Detta beror på att litiumjonbatterier (Li-ion) har blivit betraktade som ett överlägset alternativ för energilagring, tack vare deras högre energitäthet, lägre självurladdning och snabbare laddningskapacitet. Trots detta fortsätter vissa bilföretag, såsom Toyota, att tillverka bilar utrustade med NiMH-batterier, särskilt för hybridfordon (HEV). Detta beslut baseras ofta på ekonomiska överväganden då NiMH-batterier anses vara en mer kostnadseffektiv lösning. Dessutom har NiMH-batterier visat sig ha god tolerans och prestanda även vid låga temperaturer, vilket gör dem särskilt lämpliga för vissa klimatförhållanden [23].

Toyota uppger att de planerar att fortätta sin utveckling av NiMH inom en nära framtid. Samtidigt har de introducerat en ny variant av NiMH-batterier som kallas "bipolära nickel-metallhydridbatterier". Enligt företaget har en av deras modeller blivit det första fordonet i världen att använda dessa bipolära NiMH-batterier som en elektrisk drivkraft. Den här versionen framstår som lättare samt mindre storleksmässigt. Dessutom krävs det mindre geologiska material för konstruktionen av batteriet vilket leder till en lägre miljöpåverkan, därav medför en lägre kostnad [24].

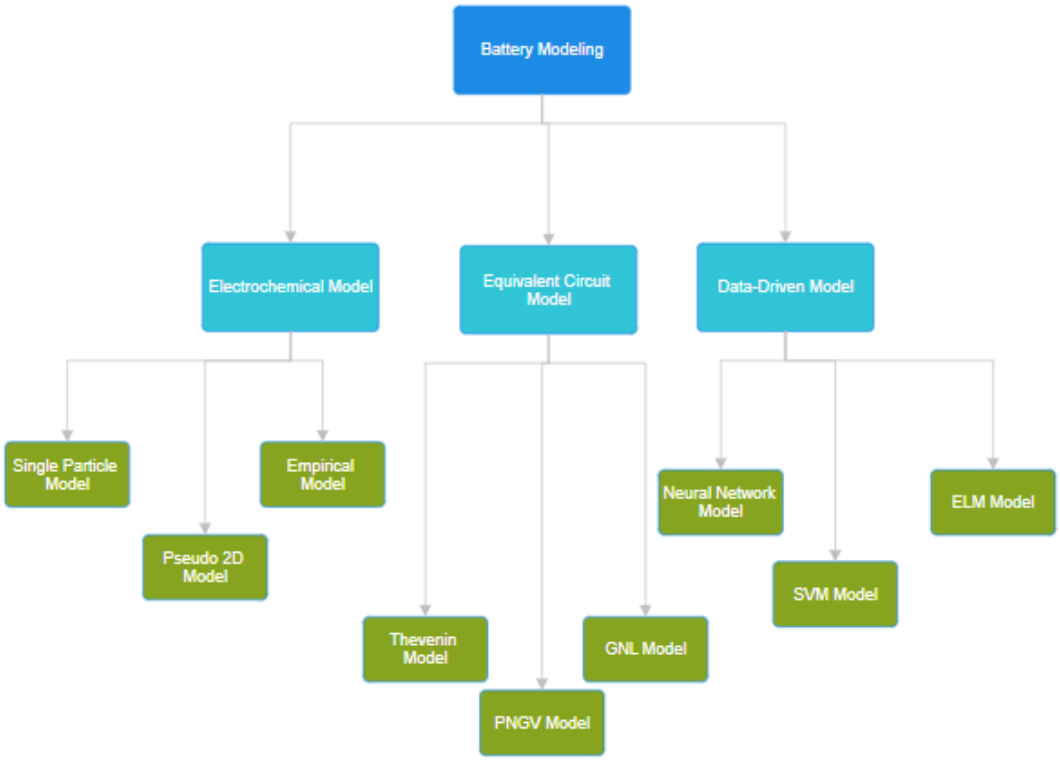


Figur 2.4: En NiMH-battericell som visar den elektrokemiska reaktionen och elektronflödet [21].

Figuren ovan illustrerar en redoxreaktion som äger rum i en NiMH-battericell. Vid katoden reduceras nickel(III) oxidhydroxid (NiOOH) till nickel(II) hydroxid (Ni(OH)2), medan metallhydrid (MH) oxideras till metall (M) och vatten (H2O) vid anoden. Denna reaktion producerar elektrisk energi.

2.2 Batteri Modellering

För att modellera en battericell används olika metoder beroende på syftet av modelleringen och den önskade noggrannheten och snabbheten. Genom att använda lämpliga modeller kan parametrarna såsom SOC, interna resistansen, spänningen, osv bli analyserade för att studera batteriets prestanda. Den här rapporten kommer att grunda sig på Equivalent Circuit Models (ECM) vilket illustrerar batteriet som en elektrisk krets bestående av spänningskällor, resistorer samt kondensatorer [25].



Figur 2.5: Metoder för batteri modellering.

2.2.1 Elektrokemisk Modell

En elektrokemisk modell för batterier är en avancerad metod som används för att förstå och studera batteriers beteende på en grundläggande nivå. Denna modell är avgörande för utvecklingen av nya batteriteknologier och möjliggör en optimering av befintliga batterier. En elektrokemisk modell bygger på de grundläggande principerna för elektrolys, där kemiska reaktioner omvandlar kemisk energi till elektrisk energi eller tvärtom. Modellen beskriver de elektrokemiska processerna som sker vid batteriets elektroder och i elektrolyten [26].

Vid varje elektrod sker reduktions- och oxidationsreaktioner (redox-reaktioner) som innebär överföring av elektroner och joner mellan elektroderna i elektrolyten. Elektrolyten spelar en central roll genom att möjliggöra jontransport mellan anoden och

katoden, vilket gör det möjligt för strömmen att gå igenom kretsen.
Elektrokemisk modellering involverar komplexa ekvationer som gör det möjligt att förstå batteriets funktion. En av de viktigaste funktionerna är Nernst-ekvationen, som beskriver förhållandet mellan cellpotentialen och koncentrationen av de reaktiva arterna vid elektroderna. Detta är fenomenalt för att förstå hur elektrokemiska celler laddas och urladdas [26]. Det finns andra viktiga ekvationer, men vi ska inte fördjupa oss i den elektrokemiska modellen i den här rapporten, eftersom arbetet syftar på att utveckla en batterisimulator och inte inriktar sig mot den teoretiska delen.

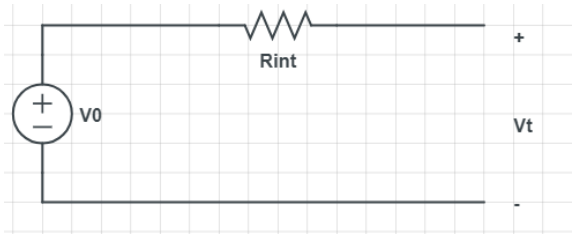
2.2.2 Ekvivalent Kretsmodell

Batteri modellering anses vara en fundamental moment inom batteri simulering för att undersöka batteriets beteende samt egenskaper. För att begripa batteriets interna beteende kan man tillämpa diverse metoder såsom matematiska modeller, ECM och elektrokemiska modeller. Syftet med modelleringen är att använda de matematiska sambanden mellan beståndsdelarna hos batteriet och deras SOC, interna resistans, spänning och strömmen [25]. .

2.2.2.1 Rint Modell

Figur 2.6 illustrerar krets konstruktionen av en enkel batterimodell som omfattas av en spänningskälla samt en intern resistans. Den interna resistorn är en fundamental komponent för analys av batteriprestanda, electrochemical impedance spectroscopy (EIS) anses vara den vanligaste metoden för undersökning av den interna resistansen [27]. Däremot finns det ytterligare metoder för mätning av den här resistansen såsom pulse charge/discharge metoden vilket kommer att tillämpas då den framstås vara en lämpligare metod i detta fall.

Genom att studera den interna resistansen går det att erhålla kunskaper kring batteriets state of charge, förutse komplikationer som kan uppstå och bromsa degraderingen av batteriet. Alltså beskriver resistansen begränsningarna hos batteriet samt de interna förlusterna som därav medför till spänningsfall i samband med belastningen [25,27].



Figur 2.6: Kretsschema av ett batteri med intern resistans [25].

Vt kan beräknas med hjälp av KVL (kontinuerlig tid) där OCV i ekvationen referar till Vo i figur 2.6:

$$Vt = OCV(t) - I_{bat} * Rint(t) \tag{2.1}$$

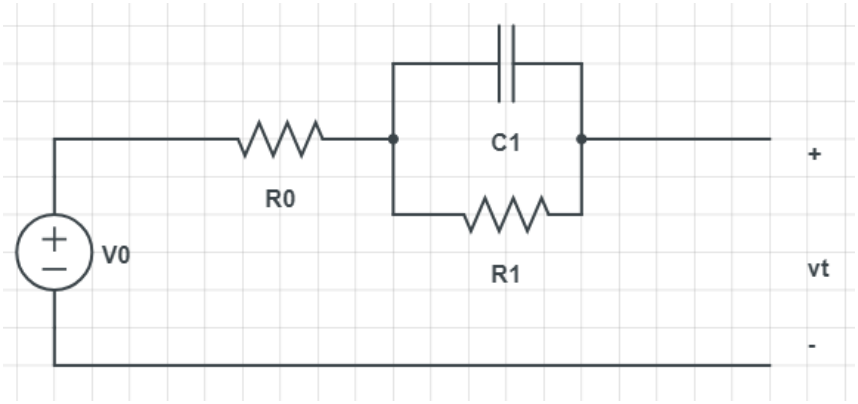
Differensekvationen (diskret tid) av (1) är:

$$Vt(k) = OCV(k) - I_{bat} * Rint(t) \tag{2.2}$$

Komplikationer för att avgöra batterietsstatus uppstår i samband med variationerna i prestandan vid förändring av driftförhållanden. Det kan vara allt från faktorer som ändring på temperatur, lasten, laddning eller urladdning.

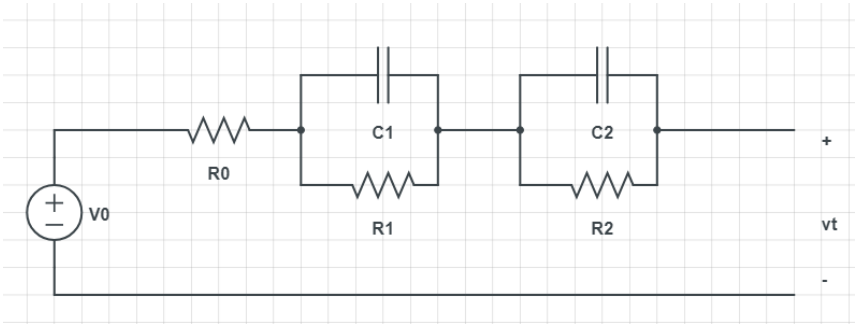
2.2.2.2 Thevenin Modell

Thevenin modellen omfattas av en spänningskälla som är kopplad till en intern resistor vilket i sin tur är seriekopplad till en parallellkopplad RC koppling bestående av en polarisationsmotstånd. Den här modellen är i princip densamma som den enkla batteri modellen som uppgetts innan. Däremot finns vissa faktorer som skiljer den här modellen från den tidigare med hänsyn till den noggrannhet av värden som kan uppnås och kan därför ge en mer detaljerad bild av batteriets beteende.



Figur 2.7: Thevenin model med 1RC koppling [27].

Rp uppges vara väsentlig för tolkning samt modellering av batteriets dynamiska beteenden under upp & urladdningslägen. Därtill representerar den här resistansen ett motstånd kopplat till polarisations effekten och återspeglar successiva spänningsförändringar i förhållande till strömvariationer. Definitionen av polarisation effekten i batteriet är alltså en stegvis förändring i spänningen vid växlandet av strömmen under upp & urladdningen. Det går att koppla till extra RC kopplingar i kretsen för en förbättrad anpassning prestanda när det gäller polarisations-effekten, däremot resulterar det till en större utmaning för bestämning av parametrarna ju mer RC kopplingar som ansluts [25,27].



Figur 2.8: Thevenin model med 2RC kopplingar [25].

I figur 2.8 omfattas kretsen av två RC kopplingar som har olika tidskonstanter

$$\tau = R * C \tag{2.3}$$

Med hjälp av Kirchoffs lag u_c och i_c kan bestämmas genom följande ekvation:

$$V_{bat}(t) = V_{OC}(t) - V_0(t) - V_1(t) - V_2(t) \tag{2.4}$$

$$V_0(t) = R_0 * I_{bat}(t) \tag{2.5}$$

$$V_1(t) = I_{bat} * R_1 * (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \tag{2.6}$$

$$V_2(t) = I_{bat} * R_2 * (1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \tag{2.7}$$

2.2.3 Data-Driven Model

Den här sorten av batteri model använder en typ av algoritm som tillämpas för att finna ett samband mellan indata och utdata utan att beskriva de grundläggande fysikaliska samt kemiska mekanismerna. Modellen fungerar genom att analysera stora mängder data för att identifiera mönster och relationer. Genom att använda den insamlade datan kan modellen förutsäga resultat eller förklara observationer. En datadriven modell kan liknas vid en svart låda,"vilket innebär att den inte behöver förstå hur processen fungerar internt.

Metodiken bakom den här modellen bygger på insamling av data från batteriet såsom ström, spänning och temperatur. Därefter tränas modellen genom att låta algortimen identifiera sambanden mellan indatan samt utdatan. När modellen tillägnat sig metodiken samt hittat samband för systemet, kan den användas för att förutsäga resultat. Resultaten används för att bland annat förbättra batteriets prestanda, livslängd och säkerhet genom att förutse kapacitetstapp och överhettning.

Diverse datadrivna modeller, som neurala nätverk, LSTM (Long-Short Term Memory), och ELM (Extreme Learning Machine), har använts för att studera batteriers

beteende och prestanda utan tidigare kunskaper om batteriets grundläggande konstruktion[28].

2.3 State of Charge

State of Charge definieras som en procentandel av den kvarvarande energin i ett batteri jämfört med dess fulla kapacitet. Det finns olika metoder för att estimera SOC i ett batteri. Några av dem metoderna som används idag för att estimera SOC [29,30] :

- Coulomb counting methods (CCMs)
- Open circuit voltage methods (OCVMs);
- Impedance spectroscopy-based methods (ISBMs);
- Kalman filter method

2.3.1 Coulomb Counting Method

I den metoden är SOC integrationen över strömmen, där SOC är definierat enligt följande ekvation [29,30]:

$$Z(t) = Z(0) - \int_0^t \frac{i(t) * \eta_i}{C_n}\, dt \tag{2.8}$$

Förenkla ekvation (2.8):

$$Z(t) = Z(0) - \frac{\eta_i}{C_n} \int_0^t i(t), dt \tag{2.9}$$

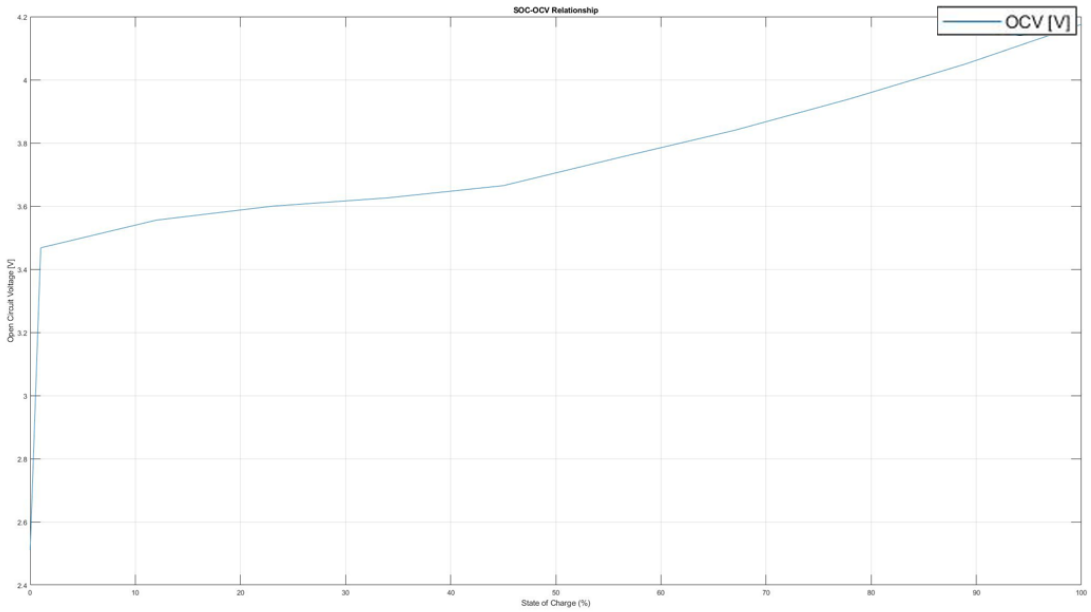
I ekvationen (2.9), Z(t) är SOC som vi undersöker vid tiden t, Z(0) är SOC vid starten t=0, Cn är den totala kapaciteten av batteriet, η_i är coulombisk verkningsgrad och i(t) är strömmen [29].Variabeln η_i kan estimeras genom att använda följande formel [30]:

$$\eta_i = \frac{Qut}{Q_{in}} * 100 \tag{2.10}$$

$$Z(t) = 100\% - DOD(t) \tag{2.11}$$

2.3.2 Open Circuit Voltage

Open circuit voltage (OCV) metoden tillämpas vid batteriets passiva tillstånd, alltså ska batteriet vara urkopplad från lasten i approximativt 10 timmar för att uppnå ett mer noggrannt resultat. OCV representerar spänningen vid batteri terminalerna när ingen ström flödar genom det. I samband med beräkningen av OCV skapas en OCV-SOC uppslagstabell för exakt uppskattning av SOC som indikerar batteriets återstående laddning i procent. Däremot orsakar faktorer såsom temperatur och batterietslivslängd komplikationer för uppskattningen då de har befunnits ha en avgörande inverkan på resultatet [29,30].



Figur 2.9: OCV-SOC förhållande för ett Li-ion batteri.

Figur 2.9 illustrerar hur OCV varierar i förhållande till SOC för ett batteri. OCV varierar mellan sitt lägsta värde på 2.4V vid 0% SOC till sitt högsta värde på 4.2V vid 100% SOC. Denna relation kan beskrivas i olika intervall för att tydliggöra hur spänningen förändras över laddningsnivåerna.

Vid 0% SOC, när batteriet är helt urladdat, är OCV på sitt lägsta värde, 2.4V. Detta indikerar att batteriet har minimal kvarvarande kapacitet och behöver laddas för att undvika djupurladdning vilket kan skada batteriet.

Från 20% till 80% SOC stiger OCV stadigt från 3.6V till cirka 3.8V. Detta är det mest linjära och stabila intervallet för OCV ökningen, och representerar den laddningszon där batteriet tar emot och lagrar energi mest effektivt. När batteriet närmar sig full laddning, från 80% till 100% SOC, stiger OCV snabbare igen, från 3.8V till sitt maximala värde på 4.2V. Denna sista del av laddningsprocessen kan ta längre tid eftersom batteriet blir mer motståndskraftigt mot ytterligare laddning och laddströmmen minskar för att förhindra en överladdning.

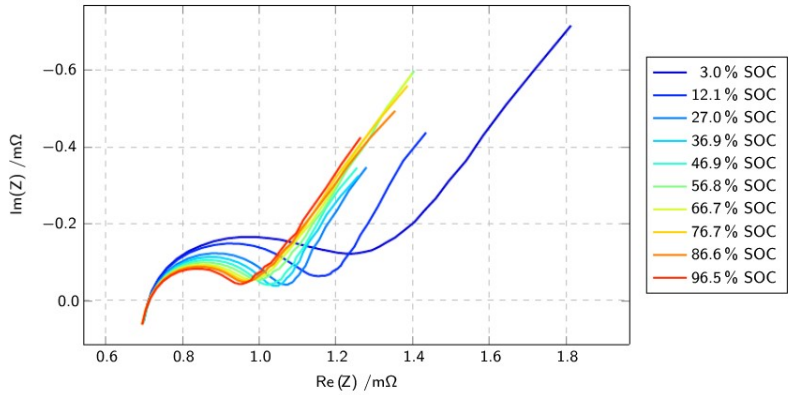
2.3.3 Impedance Spectroscopy-Based Method

Elektrokemisk impedansspektroskopi är baserad på att skicka AC spänningar på olika frekvenser till batteriet. Metoden är fördelaktig för att studera egenskaperna hos elektrokemiska system (Batteri) såsom temperaturen, SOC och så vidare. Med

hjälp av följande ekvation kan man bestämma impedansen vid olika frekvenser:

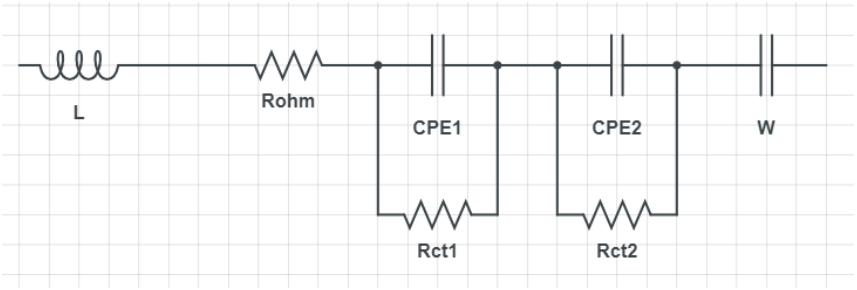
$$R_{EIS}(\omega) = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} * e^{j*\varphi} \tag{2.12}$$

$\hat{U}$ och $\hat{I}$ är det maximala värdet av spänningen respektive strömmen i en växelströmsvåg, medan φ är fasförskjutningen mellan strömmen och spänningen [29,31]. I figur 2.10 illustreras ett exempel på R_{EIS} hur det kan variera med olika frekvenser och SOC:



Figur 2.10: Nyquist-plot för EIS beräkningar av en cell vid 25 ∘ C med frekvens mellan 800 Hz och 19 mHz [32]

I figur 2.10 illustrerar en Nyquist-plot för R_{EIS} hos en Li-ion battericell. De två axlarna representerar R_{EIS} där Im(Z) är den imaginära delen hos R_{EIS}, och Re(Z) är den reala delen. Undersökningen inkluderade frekvensvariationer från 900 Hz ner till 19 mHz, och temperaturvariation 25 ∘ C. Tydligt framgår att Re(Z) är minst vid höga frekvenser, medan det är som högst vid låga frekvenser och SOC. Det visar tydligt att Z_{EIS} påverkas inte bara av temperaturen/frekvensen, utan den påverkas också av bland annat SOC.



Figur 2.11: Batteri ECM [31].

Två tidskonstanter används samtidigt (parallellt CPE==Rct) för att skilja anod- och katodprocessernas effekter åt [31].
Där summan av alla impedanser är:

$$Z_{CPE1//Rct1} = \frac{R_{ct1}}{1 + R_{ct1} * Z_{PE1}(jw)^{n_1}} \tag{2.13}$$

$$Z_{CPE2//Rct2} = \frac{R_{ct2}}{1 + R_{ct2} * Z_{PE2}(jw)^{n_2}} \tag{2.14}$$

$$Z_{CPE2//Rct2} = \frac{1}{CPEW(jw)^{n_w}} \tag{2.15}$$

$$Z_{TOT} = Z_L + Z_R + Z_{CPE1//Rct1} + Z_{CPE2//Rct2} + Z_{CPEW} \tag{2.16}$$

Z_L är den induktiva impedansen. Z_R är den resistiva impedansen. Parametern n betecknar en vinkel som roterar i det komplexa planet. Det är impedansen för det element som representerar en konstant fasvinkel i det komplexa planet.

2.3.4 Kalman Filter

Kalman-filtret är en algoritm som används för att uppskatta bland annat State of Charge (SOC) hos ett batteri och för att beräkna de inre tillstånden hos ett dynamiskt system. Det introducerades för första gången år 1960 av den ungerska matematikern R.E. Kalman [33]. En nackdel med denna metod är att den kräver en lämplig modell, beräkningskapacitet och korrekt initialisering. Till exempel fungerar första ordningens Thevenin-modell inte optimalt med Kalman-filtret eftersom den är ganska begränsad och dess parametrar är beroende av SOC, vilka dessutom varierar med SOC. En fördel med denna metod är dess goda förmåga att lösa tillståndsuppskattningsproblem i linjära system [33].

2.4 Terminologi och Definition

Kapacitet

Kapaciteten eller ampere-timmar (Ah) är en viktig mått på batteriets prestanda. Den representerar den totala mängden laddning som ett batteri kan leverera/hålla [34].

Charge Rate (C-Rate)

C-rate är indikator på hur fort ett batteri laddas eller urladda i relation till sin nominella kapacitet. Om ett batteri med kapacitet på 2000 mAh och den har en C-rate på 1C, betyder det att strömmen som används i batteriet skulle urladdas helt efter två timmar, dvs att batteriet urladdas med 1A i timmen eller 1C. Så C-rate är ett sätt att normalisera upp- och urladdningshastigheten för ett batteri i förhållande till sin kapacitet [34]

Open Circuit Voltage OCV

OCV i ett batteri är spänningen som mäts när ingen last är ansluten till batteriet. OCV ökar i förhållande till batteriets laddningstillstånd (SOC). För en Li-ion batteri varierar OCV vanligtvis mellan 3,4 V, vilket anses vara avstängningspänningen (0% SOC), och 4,2 V, vilket är den maximala spänningen vid 100 % SOC. OCV är ett viktigt mått på batteriets laddningstillstånd och används för att uppskatta hur mycket laddning som finns kvar i batteriet när den är i vila [34].

Terminal Voltage

Till skillnad från OCV är Terminal voltage den spänningen som mäts när en last är ansluten till batteriet. Den varierar också i förhållande till SOC [34].

Depth of Discharge (DOD)

DOD är en viktig parameter som beskriver hur mycket av batteriets totala kapacitet som har använts vid en given urladdning. Det är en procentandel som representerar hur mycket av batteriets maximala kapacitet som har använts under urladdningen[34].

Cut-Off Voltage

Är den minsta spänningen som ett batteri kan ha innan den ska behöva laddas upp igen för att undvika skador på batteriet. När batteriet når denna spänning betraktas det som urladdat dvs inte användbar tills man laddar upp det igen [34].

2.5 Kablar och RLC-krets

Kablar har en essentiell förmåga att leda elektrisk energi samt signaler mellan diverse komponenter i systemet. De kan förekomma i olika storlekar, vara tillverkade av varierande material och bestå av en eller flera ledare beroende på tillämpningsområde och avsikt. Dessutom isoleras ledaren av ett skyddande lager för att motverka kortslutning och garantera säkerhet.

Varje kabel kan ha varierande dimension samt elektriska egenskaper och kan beskrivas som en kombination av resistanser, kapacitanser och induktanser. Resistorn representerar de resistiva förlusterna i kabelns ledarmaterial som i sin tur leder till spänningsfall. Induktansen i kabeln orsakar fasförskjutningar, som påverkar strömflödet på grund av att kretsen avger och lagrar magnetisk energi. Kondensatorn påverkar strömflödet i kretsen på ett liknande sätt som induktansen, men istället avger och lagrar den elektrisk energi. Den representerar även den kapacitiva kopplingen mellan jord och ledarna, vilket leder till distorsion och orsakar förändringar i spänningsfördelningen.

Kablar kan modelleras på flera sätt, som serie- eller parallellkopplingar av impedanser. En vanligt förekommande kabelmodell som undersöks och modelleras är en RLC modell. Denna modell innehåller en resistor som ligger i serie med en induktor, i anslutning till en parallellkopplad kondensator [35]. Den matematiska representationen av den här modellen visas i ekvationerna (2.17 - 2.20).

$$Z(s) = R + sL + \frac{1}{Cs} \tag{2.17}$$

$$Vt(s) = \frac{\frac{1}{Cs}}{R + Ls + \frac{1}{Cs}} \tag{2.18}$$

$$T(s) = \frac{Vt(s)}{V_{OCV}} = \frac{1}{sC} * \frac{1}{R + Ls + \frac{1}{Cs}} \tag{2.19}$$

$$T(s) = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} \tag{2.20}$$

Överföringsfunktionerna som presenteras upplyser om den totala impedansen för kretsen.

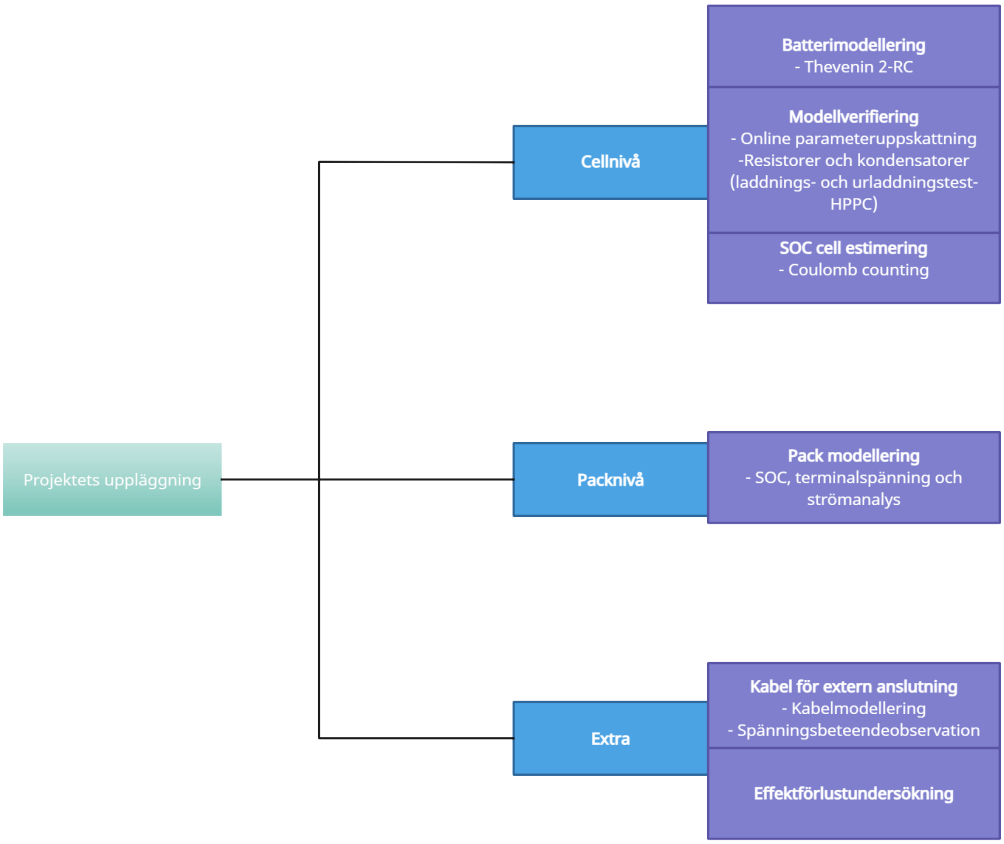
3

Metod

För utvecklingen av batterisimulatorn användes Matlab och Simulink. För att validera och testa simuleringens noggrannhet användes testdata som var tillgänglig online. Denna data möjliggjorde simulering av olika scenarier och tillstånd för att säkerställa att modellen fungerar korrekt under olika förhållanden. Genom att använda dessa testdata kunde simuleringen utvecklas och finjusteras utan behov av verkliga testförhållanden. Simuleringen med testdata från internet resulterade i tillräckligt noggranna resultat för att möjliggöra modellering och analys av batteridynamik. Matematiska ekvationer användes för att beräkna V-terminalen, SOC och effektförlusten, samt för att modellera hur kablarna påverkar spänningen.

Systemarkitekturen omfattar modellering, simulering och kontroll av batteriet. En icke-linjär batterimodell ska skapas för att kunna simulera systemet och erhålla precisa kontrollparametrar. Det här utfördes för att studera det komplexa sambandet mellan spänning, ström och SOC, vilket inte kan beskrivas med enkla linjära ekvationer.

En algoritm implementerades för att justera batteriets strömriktning och därigenom simulera både laddningen- och urladdningen av batteriet. I Figur 3.1 illustreras en sammanfattande översikt över projektets utförande:



Figur 3.1: Upplägget för projektets genomförande.

3.1 Batterimodellering

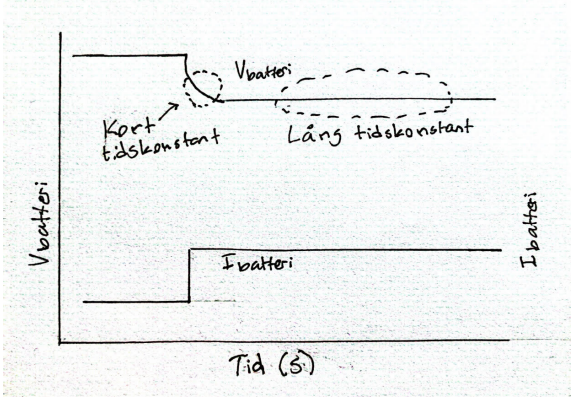
Huvudkonceptet i en batterisimulering är att inledningsvis modellera batteriet genom att använda någon av de modeller som för närvarande är tillgängliga, såsom den ekvivalenta kretsen som tillämpas i det här projektet. Generellt sett består den grundläggande representationen av en elektrisk krets av en spänningskälla V_{OC} och en intern resistans R_0 som illustrerar den enkla batterimodellen. Dessa elektriska komponenter är nyckel elementen för att analysera och bestämma batteri parametrar som eftersöks, samt för att förhindra batterier från överhettning och hastig degradering, genom ekvivalenta kretsmodeller, såsom spänningskälla och en intern resistans. Dessutom hjälper de till att förstå och analysera batteriets beteende under olika förhållanden.

3.1.1 Selektion av modell och implementering av prefererade metoden

Vid studier av batteriets respons under plötsliga belastningsförändringar kan man observera gradvisa spänningsförändringar. Vanligtvis illustrerar batteriets responskurva en kraftig nedgång i spänningsnivån samt spänningsvariationer beroende på belastningen och batteriets tillstånd. Denna nedgång beror på den

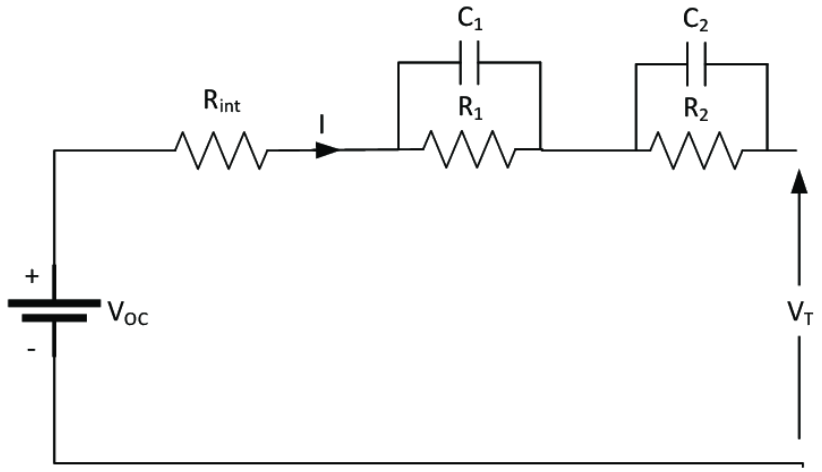
interna resistansen och batteriets elektrokemiska egenskaper, efter den förändringen sker ofta en anpassning av spänningen, ett exempel på detta kommer att visas i resultat. För att noggrant modellera den transienta responsen använder forskare generellt RC-kopplingar i detta sammanhang.

I en Thevenin-modell som består av två RC-nätverk, ansvarar de parallellkopplade resistorerna och kondensatorerna för de korta och långa tidskonstanterna i stegresponsen. R_1 och C_1 företräder som de snabba dynamiken inom batteriet och i motsats till representerar R_2 och C_2 de långsamma dynamiken. Modellen omfattas även av en seriekopplad intern resistor som ansvarar för det omedelbara spänningsfallet eller uppgången beroende på om batteriet laddas upp eller ur. Genom kontinuerlig forskning och experiment har man kunnat visa att batterimodeller med två RC-nätverk är mest fördelaktiga, eftersom de erbjuder en optimal balans mellan komplexitet och noggrannhet. Denna balans ger en representation av batteriets dynamisk utan att modellen blir för komplex, vilket underlättar praktisk användning och simulering [36].



Figur 3.2: Graf över 2RC Thevenin modell [36].

Till skillnad från modeller som använder endast en eller fler än två RC-tidskonstanter, ger appliceringen av två RC-länkar en bättre noggrannhet ner till under 1 mV. Denna felmarginal anses vara acceptabel i vår applikation eftersom systemet strävar efter en balans mellan snabbhet och noggrannhet. Beslutet att använda två RC-länkar istället för en eller fler är baserat på strävan att korrekt representera batteriets respons samtidigt som man bibehåller en enkel modell. Genom att hålla fast vid denna goda balans kan man fånga de grundläggande faktorerna i batteriets beteende utan att införa någon onödig komplexitet [36].



Figur 3.3: Krets över 2RC Thevenin modell [37].

Figur 3.3 ovan representerar en Thevenin model som användes i arbetet bestående av en spänningskälla samt en intern resistor i serie med två parallelkopplade polarisation RC kopplingar. Den här modellen används i systemet för observation av batteriets beteende och undersökning av viktiga parametrar.

3.2 Modellverifiering

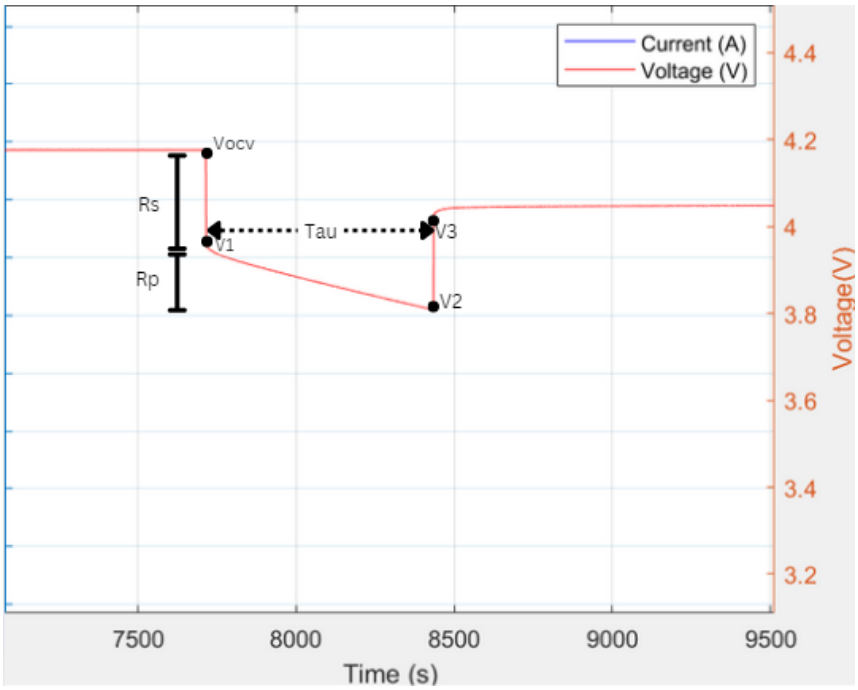
För att säkerställa att den utvecklade batterimodellen är tillförlitlig och fungerar korrekt genomförs modellverifiering med hjälp av Hybrid Pulse Power Characterization (HPPC). Denna verifieringsprocess är avgörande för att kunna använda batterimodellen i praktiska applikationer och säkerställa att den beter sig korrekt under verkliga förhållanden.

I förhållande till genomförandet av en fullständig batterimodell, bekräftas pålitligheten av funktionaliteten genom en HPPC (Hybrid pulse power characterization) för att erhålla offline parametrar. Inledningsvis användes CALCE batteri data (Incremental current OCV för 25 grader celsius) för att illustrera HPPC profilen med hjälp av Matlab kod [38].

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
									BP25C								
	Data_P...	Test_Ti...	Date_T...	Step_Ti...	Step_In...	Cycle_I...	CurrentA	Voltag...	Charge...	Discha...	Charge...	Discha...	dVdtVs	Interna...	Is_FC_D...	AC_Im...	ACI_Ph...
	Numb...	Numb...	Dateti...	Numb...	Numb...	Numb...	Numb...	Numb...	Numb...	Numb...	Numb...	Numb...	Numb...	Numb...	Numb...	Numb...	Numb...
1	Data_Point	Test_Time(s)	Date_Time	Step_Time(s)	Step_Index	Cycle_Index	Current(A)	Voltage(V)	Charge_Cap...	Discharge_...	Charge_Ene...	Discharge_E...	dV/dt(V/s)	Internal_Res...	Is_FC_Data	AC_Impeda...	ACI_Phase_...
2	1	10.0002	02-Dec-201...	10.0002	1	1	0	4.1662	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2	20.0157	02-Dec-201...	20.0157	1	1	0	4.1660	0	0	0	0	-3.2425e-05	0	0	0	0
4	3	30.0312	02-Dec-201...	30.0312	1	1	0	4.1660	0	0	0	0	-3.2425e-05	0	0	0	0
5	4	40.0468	02-Dec-201...	40.0468	1	1	0	4.1662	0	0	0	0	3.2425e-05	0	0	0	0
6	5	50.0623	02-Dec-201...	50.0623	1	1	0	4.1660	0	0	0	0	-3.2425e-05	0	0	0	0
7	6	60.0154	02-Dec-201...	60.0154	1	1	0	4.1660	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	7	60.0158	02-Dec-201...	4.6365e-06	2	1	0.9994	4.3758	1.2871e-09	0	5.6321e-09	0	0	0	0	0	0
9	8	70.0330	02-Dec-201...	10.0156	3	1	0.1664	4.2007	4.7150e-04	0	0.0020	0	3.2425e-05	0	0	0	0
10	9	80.0486	02-Dec-201...	20.0312	3	1	0.1623	4.2004	9.2783e-04	0	0.0039	0	-3.2324e-05	0	0	0	0
11	10	90.0641	02-Dec-201...	30.0467	3	1	0.1591	4.2007	0.0014	0	0.0058	0	3.2425e-05	0	0	0	0
12	11	100.0641	02-Dec-201...	40.0467	3	1	0.1564	4.2006	0.0018	0	0.0076	0	3.2425e-05	0	0	0	0
13	12	110.0796	02-Dec-201...	50.0622	3	1	0.1540	4.2006	0.0022	0	0.0094	0	0	0	0	0	0
14	13	120.0953	02-Dec-201...	60.0778	3	1	0.1519	4.2006	0.0027	0	0.0112	0	3.2425e-05	0	0	0	0
15	14	130.0953	02-Dec-201...	70.0779	3	1	0.1499	4.2006	0.0031	0	0.0130	0	0	0	0	0	0
16	15	140.1106	02-Dec-201...	80.0931	3	1	0.1479	4.2006	0.0035	0	0.0147	0	0	0	0	0	0
17	16	150.1106	02-Dec-201...	90.0932	3	1	0.1461	4.2006	0.0039	0	0.0164	0	-3.2425e-05	0	0	0	0
18	17	160.1107	02-Dec-201...	100.0933	3	1	0.1441	4.2006	0.0043	0	0.0181	0	-3.2425e-05	0	0	0	0
19	18	170.1261	02-Dec-201...	110.1086	3	1	0.1423	4.2006	0.0047	0	0.0198	0	3.2425e-05	0	0	0	0
20	19	180.1416	02-Dec-201...	120.1242	3	1	0.1409	4.2007	0.0051	0	0.0215	0	3.2425e-05	0	0	0	0
21	20	190.1573	02-Dec-201...	130.1399	3	1	0.1393	4.2006	0.0055	0	0.0231	0	0	0	0	0	0
22	21	200.1727	02-Dec-201...	140.1552	3	1	0.1378	4.2007	0.0059	0	0.0247	0	0	0	0	0	0
23	22	210.1883	02-Dec-201...	150.1709	3	1	0.1362	4.2006	0.0063	0	0.0263	0	3.2425e-05	0	0	0	0
24	23	220.2038	02-Dec-201...	160.1864	3	1	0.1348	4.2006	0.0066	0	0.0279	0	0	0	0	0	0
25	24	230.2193	02-Dec-201...	170.2018	3	1	0.1334	4.2006	0.0070	0	0.0295	0	3.2425e-05	0	0	0	0
26	25	240.2194	02-Dec-201...	180.2019	3	1	0.1317	4.2006	0.0074	0	0.0310	0	0	0	0	0	0
27	26	250.2349	02-Dec-201...	190.2175	3	1	0.1303	4.2006	0.0077	0	0.0325	0	3.2425e-05	0	0	0	0
28	27	260.2349	02-Dec-201...	200.2175	3	1	0.1292	4.2007	0.0081	0	0.0341	0	0	0	0	0	0
29	28	270.2504	02-Dec-201...	210.2330	3	1	0.1278	4.2007	0.0085	0	0.0356	0	3.2425e-05	0	0	0	0

Figur 3.4: Data för HPPC test.

Parametrar såsom 'Test time', 'Current' och 'Voltage' extraherades från Excel filen i figur 3.4 som innehöll samtliga data från batteitesten. Dessa parametrarna användes för att plotta urladdningsstadiet av batteriet. Den ursprungliga batterinivån håller sig på 100% och laddas ur 10% för varje tidsintervall på ca 792,0043 sekunder per puls tills batteriet är urladdat. Detta tidsintervall räknades ut med hjälp av en Matlab kod baserat på analys av batteriets urladdningskurva. Alla 10 SOC nivåer i intervallet mellan 100 % och 0 % observerades och analyserades för att bestämma R_0, R_1, R_2, C_1, C_2 samt O_{CV}. Koden utförde numeriska beräkningar och analyser, bestämning av urladdningstakt och kontroll av tidsstegens noggrannhet. Mer information om MATLAB-koden och de algoritmer som användes finns i kapitel 4.

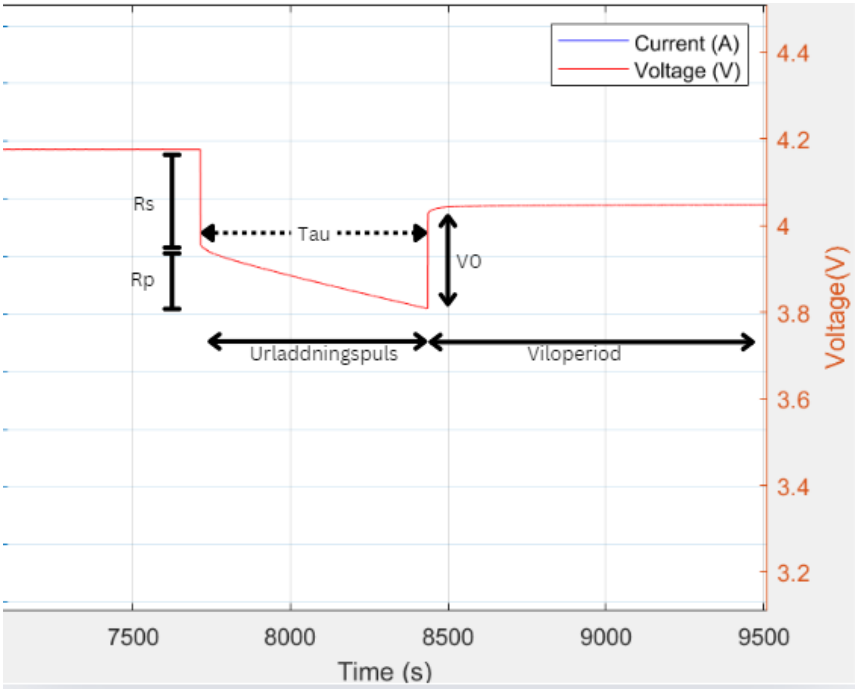


Figur 3.5: Spänningen över en puls av HPPC test profil i urladdningsfas [39].

Till en början undersöks OCV för alla 10 pulsar i HPPC test profilerna, dessa värden kan erhållas genom att observera spänningen vid slutet av viloperioden för varje puls i grafen. För varje punkt i viloperiodens slut extraheras motsvarande OCV-värde. Den andra parametern som studeras är den ohmska interna resistansen R_0 vilket kan beräknas med ekvationen i (3.1) genom att inspektera skillnaden mellan V_{OCV} till V_1 och V_3 till V_2 tillsammans med amplituden av strömmen för pulsen I_{bat}. Alltså studeras den plötsliga spänningsfallet dividerat med urladdningsströmmen för att uppskatta värdet av R_0 [39].

$$R_0 = \frac{V_{OCV} - V_1 + V_3 - V_2}{2 * I_{bat}} \tag{3.1}$$

För att sedan bestämma parametrarna för andra ordningens Thevenin modell, tillämpas ekvationen för vilo perioden i figur 3.6. Parametrarna erhålls genom matlab curve fitting funktion av den exponentiala funktionen i (3.3).



Figur 3.6: Illustrerar sambandet mellan spänningen över en puls och formeln för vilostadiet [39].

Formeln i (3.2) beskriver den terminala spänningen vid viloläget.

$$V_{bat} = V_{OCV} - R_0 * I_{bat} - R_1 * I_{bat} * exp(-t/R_1 * C_1) - R_2 * I_{bat} * exp(-t/R_2 * C_2) \quad (3.2)$$

Genom att utgå efter formeln i (3.2) anpassas en förenklad exponentiell ekvation som visas i (3.3) för inmatning i Matlab curve fitting funktionen för att bestämma de okända parametrarna k_1, k_2, a och b.

$$V_{bat} = k_0 - k_1 * exp(-a * t) - k_2 * exp(-b * t) \quad (3.3)$$

För att slutligen bestämma de resterande parametrarna R_1, R_2, C_1 och C_2 används samtliga parametrar från curve fitting tool tilsammans med ekvationerna (3.4 - 3.7).

$$R_1 = \frac{k_1}{I_{bat}} \quad (3.4)$$

$$R_2 = \frac{k_2}{I_{bat}} \quad (3.5)$$

$$C_1 = \frac{1}{a * R_1} \quad (3.6)$$

$$C_2 = \frac{1}{b * R_2} \quad (3.7)$$

Vidare till kan den terminala spänningen V_{bat} bestämmas med hjälp av KVL i kretsen genom att tillämpa ekvationen i (3.8) tillsammans med parametrarna som uppskattats tidigare [39].

$$V_{bat}(t) = V_{OC}(t) - V_0(t) - V_1(t) - V_2(t) \tag{3.8}$$

3.3 Parameter Estimering

I detta avsnitt redogörs metoder och diverse formler för uppskattning av olika parametrar som är väsentliga för att begripa och analysera batteriets beteende samt prestanda. Specifikt ligger fokuset på att beräkna SOC genom coulomb mätningsmetoden men även genom att studera effektförlusten i batteriet.

3.3.1 SOC estimering med Coulomb counting

För att estimera SOC eller enklare sagt laddningsstatusen hos batteriet tillämpades coulomb mätningsmetoden som mäter samtliga in och utströmmande elektriska laddningar över en viss tidsintervall. Konstruktionen för SOC estimering i Simulink hänivsade för ekvationen i (3.9) [29, 30].

$$Z(t) = Z(0) - \frac{\eta_i}{C_n} \int_0^t i(t), dt \tag{3.9}$$

Utifrån ekvationen framställs $Z(t)$ som den totala SOC som undersöks vid tiden t och $Z(0)$ är den initiala SOC nivån då t = 0. Därtill framkommer även Cn vilket kännetecknar den totala kapaciteten hos batteriet och $i(t)$ är strömmen. Parametern η_i är den coulombiska verkningsgraden och kan beräknas genom följande formel i (3.10) [30].

$$\eta_i = \frac{Qut}{Q_{in}} * 100 \tag{3.10}$$

3.3.2 Förlustberäkning av effekt

Effektförlusten i batteriet bestäms genom att introducera resistansvärdena från R_0, R_1 och R_2 i formeln (3.11) var för sig tillsammans med strömmen. För att sedan summera ihop alla effektvärden tillämpas (3.12) för att erhålla den totala effektförlusten som uppstår i batteriet.

$$P = R * I^2 \tag{3.11}$$

$$P_{tot} = P_0 + P_1 + P_2 \tag{3.12}$$

3.4 Kabelkonstruktion och design

Kabel modellen som användes i Simulink som extern anslutning till batteriet är en enkel RLC modell. Den här modellen valdes med syfte till att representera en verklig kabel och efterbilda de elektriska egenskaperna hos kablar som kombinerar de olika komponenterna i systemet. RLC modellen omfattas av tre huvudkomponenter: resistanser, induktanser och kapacitanser.

Implementationen i simulink för kabeln implementeras i ett transfer function block. Den här kretsen är konstruerad enligt (3.13).

$$T(s) = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} \tag{3.13}$$

Användaren av programmet har möjligheten att mata in värden för kabeln såsom kabelns längd, antal ledare, resistans, induktans, kapacitans värdet. Tillsammans med matematiska ekvationer kalkyleras resultatet och användaren kan erhålla data av spänningen vid kabelns terminaler.

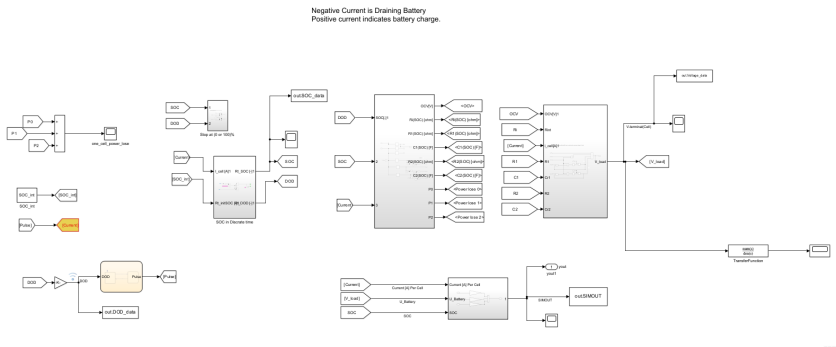
4

Systemkonstruktion

Detta kapitel behandlar konstruktion och implementering av en batterisimulator med hjälp av Simulink och MATLAB. Syftet är att visa hur olika komponenter i batteriet modelleras och simuleras för att analysera dess prestanda. Vi kommer att gå igenom systemarkitekturen och detaljerna i Simulink-modellen.

4.1 Simulink

I Simulink-modellen användes flera block såsom Math Operations och Lookup Tables för att beräkna viktiga parametrar för batterisystemet. Bland dessa parametrar finns State of Charge (SOC), som indikerar batteriets laddningsnivå och beräknas med Coulomb counting-metoden, samt effektförlust, vilket är ett mått på energi som går förlorad under drift och omvandlas till värme. En chart användes för att justera strömriktningen och möjliggöra både laddning och urladdning av batteriet, där negativ ström indikerar laddning medan positiv ström indikerar urladdning. Dessutom beräknades batteriets terminalspänning (V-terminal), vilket är avgörande för att studera och analysera batteriets prestanda. Kabelkonstruktionen är också viktig för att se hur kablarna påverkar batteriets prestanda. För att förhindra överladdning eller för djup urladdning användes ett block som stoppar simuleringen om batteriet når över 100% eller under 0% SOC.
Slutligen användes ett block för att simulera batteriet i pack-form, vilket visar ström, spänning och SOC. Detta block är justerbart för att möjliggöra simulering av olika antal parallella och seriekopplade battericeller mha MATLAB. Figur 4.1 illustrerar kretsdiagrammet som användes i detta arbete.

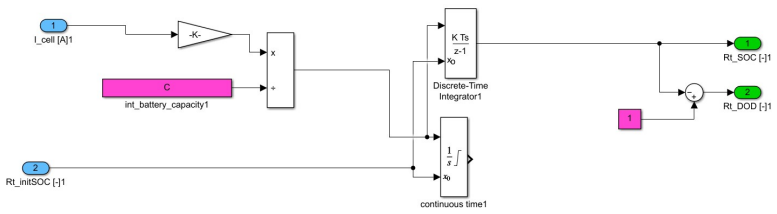


Figur 4.1: Simulink-kretschema.

Diagrammet visar hur de olika komponenterna i systemet är kopplade och interagerar med varandra. För att förenkla kretsens utformning och förbättra läsbarheten användes flera block och antal Goto-taggar (se exempel i figur 4.4 på sida 32). Dessa taggar gör det möjligt att skapa mer överskådliga och hanterbara modeller genom att minska antalet direkta kopplingar mellan blocken. Genom att använda Goto-taggar kan man enkelt följa signalflödet i modellen, vilket underlättar både felsökning och vidareutveckling av systemet.

4.2 Coulomb Counting Method SOC

Coulomb-räkningsmetoden, som illustreras i Figur 4.2, används för att uppskatta batteriets State of Charge (SOC). Denna metod fungerar genom att integrera strömmen som flödar in och ut ur batteriet över tid. Viktiga komponenter i detta block inkluderar strömmen genom battericellen (I-cell [A]), batterikapacitetens integrering (C), samt C-rate som är beskriver hur snabb ett batteri laddas eller laddas ur

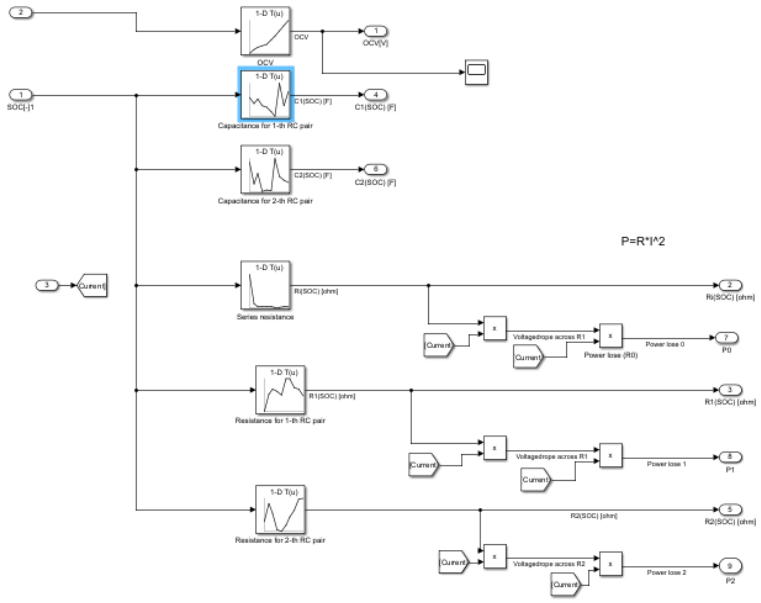


Figur 4.2: Coulomb Counting Method Discrete Time.

I Figur 4.2 användes bara en Diskret-Tids Integrator som integrerar strömmen över diskreta tidssteg, vilket ger ett uppdaterat SOC värde. Beroende på kundens behov finns även en Kontinuerlig-Tids Integrator i modellen.
Utgångarna från detta block, Rt_SOC och Rt_DOD, representerar realtidsvärden för SOC och Depth of Discharge (DOD). Genom att integrera strömmen över tid kan modellen exakt spåra batteriets laddningsstatus, vilket är viktigt för att optimera batteriets prestanda. SOC ger en indikation på hur mycket laddning som finns kvar i batteriet, medan DOD visar hur mycket av batterikapaciteten som har använts.

4.3 Lookuptable För Parametrarna Samt Effektförlust

Nedan i Figur 4.3 visar lookup-tabellerna som används för att fastställa olika batteriparametrar och beräkningar av effektförluster i systemet. Dessa tabeller tillhandahåller viktiga värden baserade på SOC och ström.



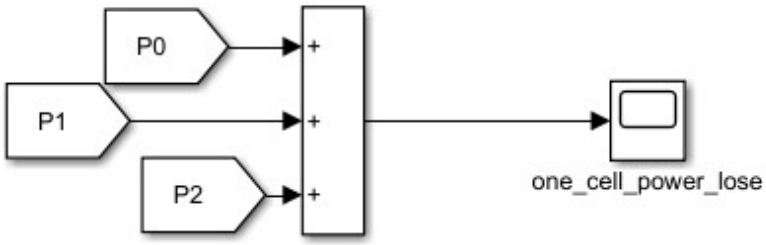
Figur 4.3: Lookup Tables För Parametrarna Samt Effektförlust.

Lookup-tabellerna innehåller parametrar såsom OCV, kapacitans värdena för RC-paren (C1(SOC) och C2(SOC)), och resistans värdena för serie(Ri(SOC))- och RC-paren (R1(SOC) och R2(SOC)). Effektförlusten beräknas med Joules lag $P = R * I^2$. Beräkningar utförs separat för olika resistans komponenter (R0, R1, R2), vilket beskriver deras respektive bidrag till den totala effektförlusten.

Genom att använda lookup-tabeller kan modellen dynamiskt anpassa sig till varierande förhållanden, vilket resulterar i en mer noggrann representation av batteriets beteende under olika SOC-nivåer och strömnivåer. Detta gör det möjligt att förutsäga och optimera batteriet under olika driftsförhållanden. Därmed blir lookup-tabellerna en viktig del av batterimodelleringen och bidrar till att säkerställa att systemet fungerar effektivt och hållbart över tid.

4.4 Beräkning Av Totala Effektförlust Cell-form

Figur 5 visar hur effektförlusterna P0, P1 och P2 summeras och visas i en scope". I detta block summeras de individuella effektförlusterna från varje resistiv komponent för att bestämma den totala effektförlusten.

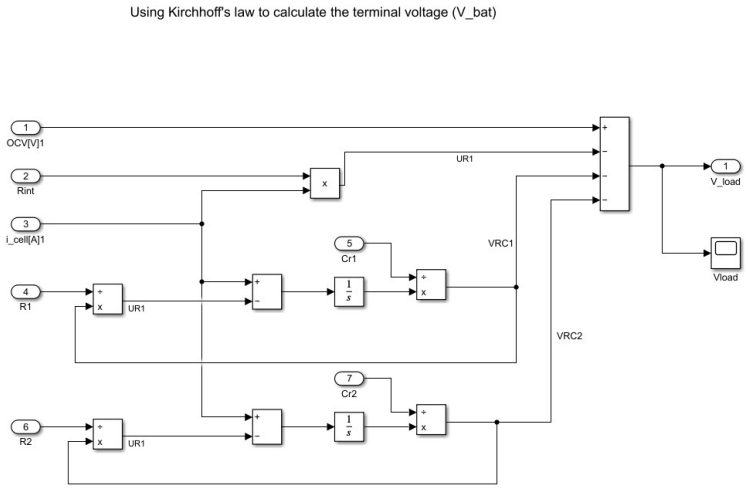


Figur 4.4: Effektförlust i cell-form.

Scopen ger en visuell representation av denna totala effektförlust över tid, vilket är viktigt för att analysera batteriets effektivitet och identifiera eventuella energiförluster.

4.5 Beräkning Av V-terminal

För att beräkna spänningsterminalen används Kirchhoffs spänningslag (KVL), vilket illustreras i Figur 4.5. KVL tillämpas för att se till att summan av alla spänningar i en sluten krets är noll, vilket är en grundläggande princip i elektriska kretsar.



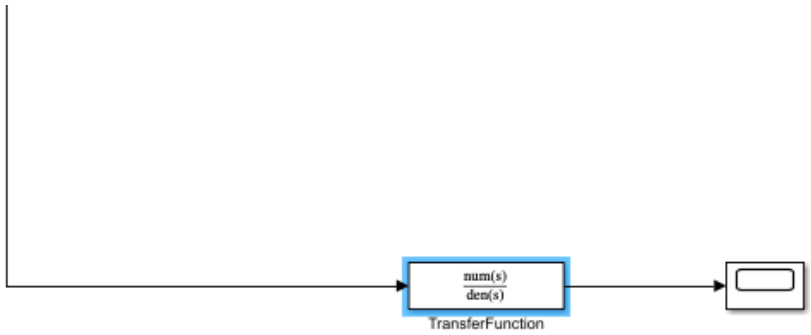
Figur 4.5: KVL för att räkna utV-terminal (Vload).

I denna figur summeras spänningen över de olika resistiva och kapacitiva elementen för att bestämma den totala spänningen vid batteriets terminal. Detta innefattar att ta hänsyn till både ohmisk resistans och de dynamiska spänningskomponenterna från RC-paren. Genom att tillämpa KVL kan modellen

exakt beräkna batteriets terminalspänning under olika driftsförhållanden, vilket är avgörande för att förstå batteriets prestanda och för att förutsäga dess beteende i olika scenarier.

4.6 Kabelkonstruktion

Figur 4.6 illustrerar en kretskonstruktion över en RCL-modell av en kabel. Den här modellen utgörs av en överföringsfunktion block som representerar den fullständiga kretsen för en kabel som inkluderar resistans, kapacitans, och indukstans. Denna modellering är viktig för att simulera och förstå hur kabelns elektriska egenskaper påverkar det totala systemets prestanda, särskilt när det gäller överföring av ström och spänning under olika belastningsförhållanden.



Figur 4.6: Modell av kabel.

Resistansen i en kabel representerar kabelns motstånd mot elektrisk ström och orsakar effektförluster i form av värme. Denna resistans omvandlar en del av den elektriska energin till värme enligt Joules lag, även om den kan vara mycket liten i högkvalitativa ledare. Hur mycket resistansen påverkar effektiviteten av strömöverföringen beror på storleken av kabelns ledare.

Kapacitansen i en kabel representerar dess förmåga att lagra elektrisk laddning. När en spänning appliceras över en kabel, kommer laddningar att ackumuleras kring ledarnas ytor, och denna ackumulering skapar ett elektriskt fält. Energin som lagras i detta elektriska fält kallas elektrisk energi. Kapacitans kan orsaka reaktiv effekt i växelströmskretsar, vilket kan påverka överföringseffektiviteten och signalintegriteten, särskilt vid höga frekvenser.

Induktansen representerar kabelns motstånd mot förändringar i ström, vilket orsakar inducerad elektromotorisk kraft (EMF) som motverkar strömförändringar och kan leda till fasfördröjningar i växelströmskretsar. När strömmen genom kabeln förändras, skapas ett magnetfält runt kabeln, och energin som lagras i detta magnetfält kallas magnetisk energi.

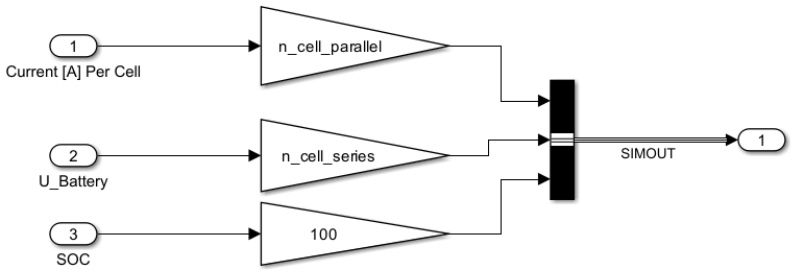
4.7 Batteripacksmodell

Figur 4.7 visar en förenklad modell av ett batteripackssystem. Denna modell integrerar centrala parametrar för batteripacket och tillhandahåller en lämplig utgångspunkt för vidare analys. Modellen har tre huvudingångar:

Ström som representerar strömmen genom varje cell, och den multipliceras med faktorn n_cell_parallel för att beräkna den totala strömmen genom batteripacket. När den parallellkopplas blir spänningen densamma över varje parallell gren medan strömmen delas mellan grenarna. Det vill säga om den totala strömmen är 10 och vi har 5 st grenar så delar de strömmen och vi får 10/5 =2A över varje gren. Men i arbetet, utförs det i motsatta vägen vi har strömmen för gren och den totala räknas ut genom att multiplicera med antal parallellkopplade celler.

U_Battery är den totala spänningen för battericellen, multiplicerad med antalet seriekopplade celler n_cell_series för att representera den totala spänningen som uppstår genom att lägga till spänningen över varje enskild cell i serien

SOC mräknat till procent genom att multiplicera det med faktorn 100.



Figur 4.7: Batteripackmodell.

Dessa signaler sammanförs och utgången sker via en bus benämnd SIMOUT. Syftet med modellen är att så exakt som möjligt återge batteripackets beteende genom att justera ström- och spänningsingångarna baserat på cellernas konfiguration i parallell respektive seriekoppling.

4.8 Hantering av laddningstillstånd

Figur 4.8 illustrerar ett tillståndsmaskin ”Chart” för hantering av strömriktning som i sin tur hanterar batteriet laddnings- och urladdningscykler baserat på dess DOD. Den har två tillstånd:

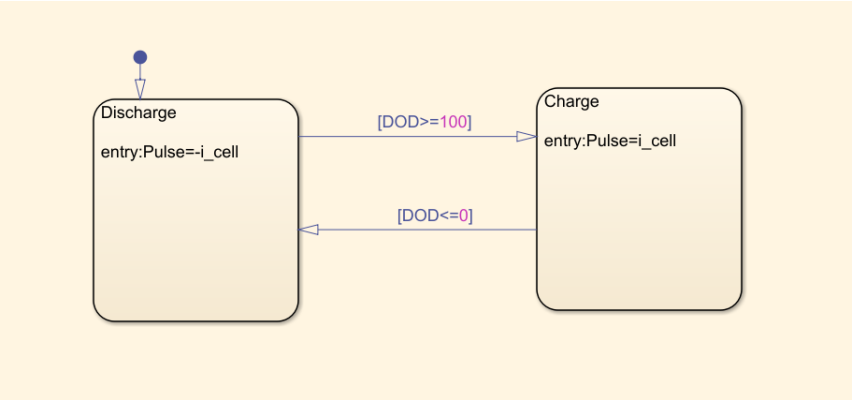
Laddningstillstånd: Här är ‘Pulse‘-signalen satt till ‘-1‘, vilket indikerar laddningsläge.

Urladdningstillstånd: Här är ‘Pulse‘-signalen satt till ‘1‘, vilket indikerar urladdningsläge.

Övergångar mellan dessa tillstånd sker baserat på DOD-värdet:

Om DOD > 100 övergår systemet från laddning till urladdning.

Om DOD < 0 övergår systemet från urladdning till laddning.

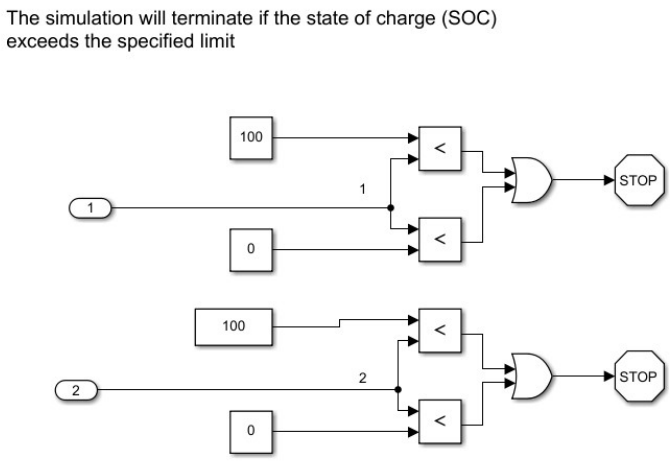


Figur 4.8: Hantering av laddningstillstånd med hjälp av "Chartblock.

Denna tillståndsmaskin garanterar att batteriet används inom säkra och optimala intervaller, och undviker överladdning eller för djup urladdning som kan påverka batteriets livslängd och prestanda negativt.

4.9 Säkerhetsstoppmekanism

Figur 4.9 visar en säkerhetsmekanism som avslutar simuleringen ifall SOC överstiger angivna gränser. Den består av 'Relational Operator' som kontrollerar om SOC är mindre än '100' eller större än '0' för cellen. Om något av dessa villkor inte uppfylls, utlöser en logisk OR-grind en 'STOP'-signal vilket avslutar simuleringen.



Figur 4.9: Kopplingen för Säkerhetsstopp mekanismen.

Syftet med denna säkerhetsmekanism är att förhindra battericellerna från att fungerar utanför sina säkra SOC-gränser. Om funktionen 'Hantering av laddningstillstånd' inte fungerar som det ska, stoppar mekanismen simuleringen,

vilket upprätthåller batteriets prestanda över tid genom att undvika överladdnings- och djupurladdningsscenarier.

5
Resultat och diskussion

Det här kapitlet kommer att presentera resultaten för de olika testerna som genomfördes i arbetet. Analysen av resultaten kommer att ske i följande ordning och varje del kommer att diskuteras i detalj.

Först kommer vi att undersöka **resultaten för OCV och strömmen som funktion av tiden**. Denna del är viktig eftersom den ger insikt i hur batteriet fungerar utan belastning samt utifrån resultatet kan man räkna ut SOC och de andra viktiga parametrarna.

Vidare kommer vi att presentera resultat vid **olika C-rate**, och analysen av detta kommer att visa hur batteriet presterar under olika belastningar och hur snabbt detta kan laddas eller urladdas.

Efter detta kommer vi att titta på **spänningen vid belastning som funktion av SOC**. Denna analys är viktig för att förstå hur batteriets spänning ändras med SOC under drift.

Vi kommer också att diskutera **batteripacksystemet**, där vi analyserar hur de enskilda battericellerna fungerar när de placeras i ett pack.

Därefter kommer vi att studera **skillnaderna mellan Li-ion-batterier och andra batterityper** för att få en bättre förståelse av varför just Li-ion är så eftertraktat på marknaden trots att det är en relativt dyr lösning jämfört med andra batterityper.

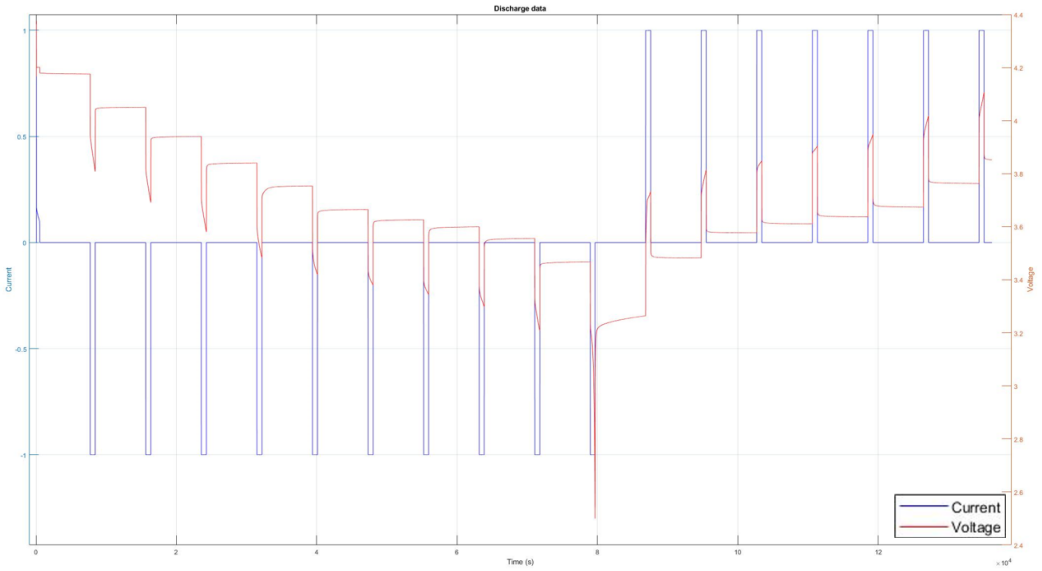
Slutligen kommer vi att undersöka hur närvaro av **kabel** påverkar batteriet. Kablarnas motstånd och kvalitet kan ha en betydande inverkan på systemets effektivitet och värmeutveckling. Vi kommer att analysera hur olika typer av kablar kan påverka batteriets funktion och övergripande prestanda.

Genom att gå igenom dessa olika aspekter i detalj kommer vi att kunna ge en omfattande bild av batterisystemets prestanda och identifiera potentiella områden för förbättringar.

5.1 OCV och strömmen som funktion av tiden

I figur 5.1 illustrerar datan för en "INR 18650-20RLi-ion cell vid 25 grader celsius, där både ström och spänning över tid under samma urladdnings- och

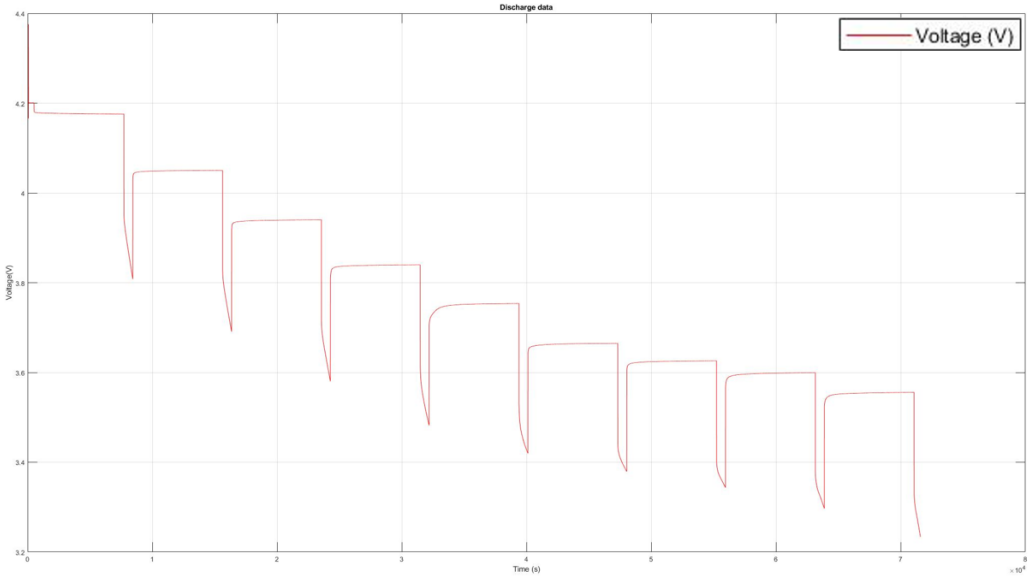
laddningscykel.



Figur 5.1: OCV och strömmen som funktion av tiden.

Den blå kurvan representerar strömmen, medan den röda kurvan visar spänningen. Här kan vi se hur strömnivåerna påverkar spänningen över tid, där varje strömpuls bidrar till dess variation. Beroende på strömmens polaritet dvs om den är negativ eller positiv, så minskar spänningen (batteriet laddas ur) eller ökar denna (batteriet laddar).

5.1.1 OCV vid urladdning som funktion av tiden

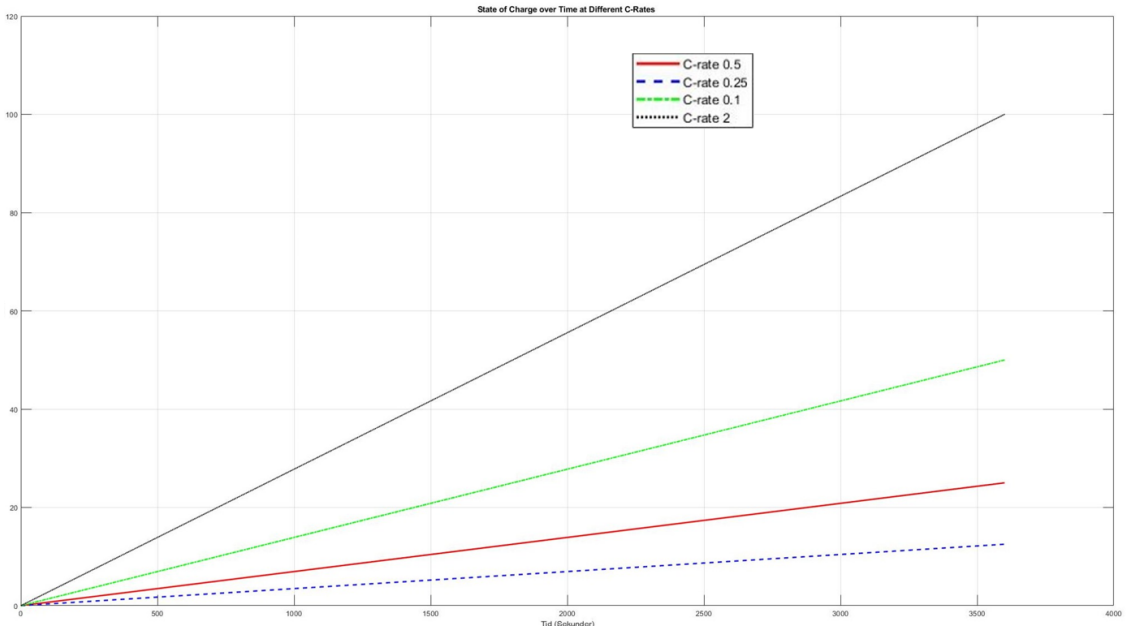


Figur 5.2: OCV (discharge) som funktion av tiden.

Figur 5.2 visar spänningen över tid under en urladdningscykel. Grafen illustrerar tydligt hur spänningen sjunker från 4,2 V till lägre nivåer. Genom cyklisk urladdning och återhämtning mellan 10% och 90% belastning kan vi observera batteriets urladdningsprofil. Grafen ger därför en visuell representation av hur spänningen förändras med tiden under olika laddningstillstånd (SOC), denna graf är väldigt viktigt för att estimera SOC, noggrannheten på batteriet samt parameter identifiering som representerades i Metod- Modellverifiering".

5.2 SOC som funtion av tiden vid olika C-Rates

Som vi nämnde innan i Terminologi och Definition"C-rate är ett mått på snabb ett batteri laddas. Figur 5.3 visar hur mycket batteriet med 2000Ah laddas med olika c-rate värde 0,25, 0,5, 1 och 2.

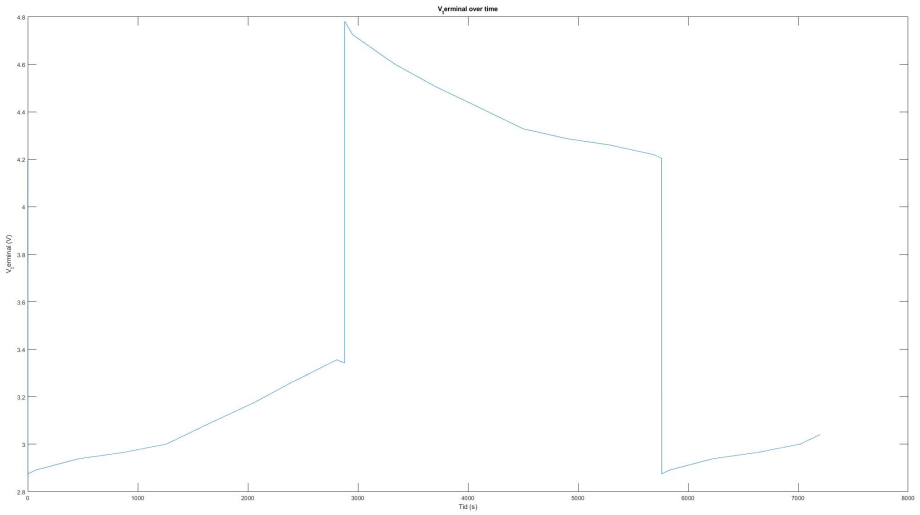


Figur 5.3: SOC som funktion av tiden vid olika C-Rates.

I figur 5.3 framgår det tydligt att olika laddningshastigheter, uttryckta som C-rate, har olika påverkan på batteriets laddningsnivå under en given tidsperiod. Den blå linjen representerar en C-rate på 0,25 och visar att batteriet endast laddas till cirka 12.5% under en timmes tid. Linjen för C-rate 0,5, markerad i rött, illustrerar att batteriet når en laddningsnivå på cirka 25%. Vidare visar den gröna linjen, med en C-rate på 1, att batteriet laddas upp till hälften av sin kapacitet, cirka 50%. Slutligen, den svarta linjen representerar en C-rate på 2 och visar att batteriet laddas till sin fulla kapacitet på en timme, vilket är förväntat för ett 2000mAh-batteri vid denna laddningshastighet.

5.3 Spänningen vid lasten som funktion av tiden

Figuren nedan visar förändringen av terminalspänningen V_terminal över tid under en cyklisk laddnings- och urladdningsprocess. Initialt börjar terminalspänningen vid ungefär 2.8 V vilket motsvarar 10% och stiger stadigt upp till ungefär 4.8 V som är 90% av batteriets kapacitet. Vid denna punkt sker en abrupt förändring, vilket indikerar slutet av laddningsfasen och början av urladdningsfasen.



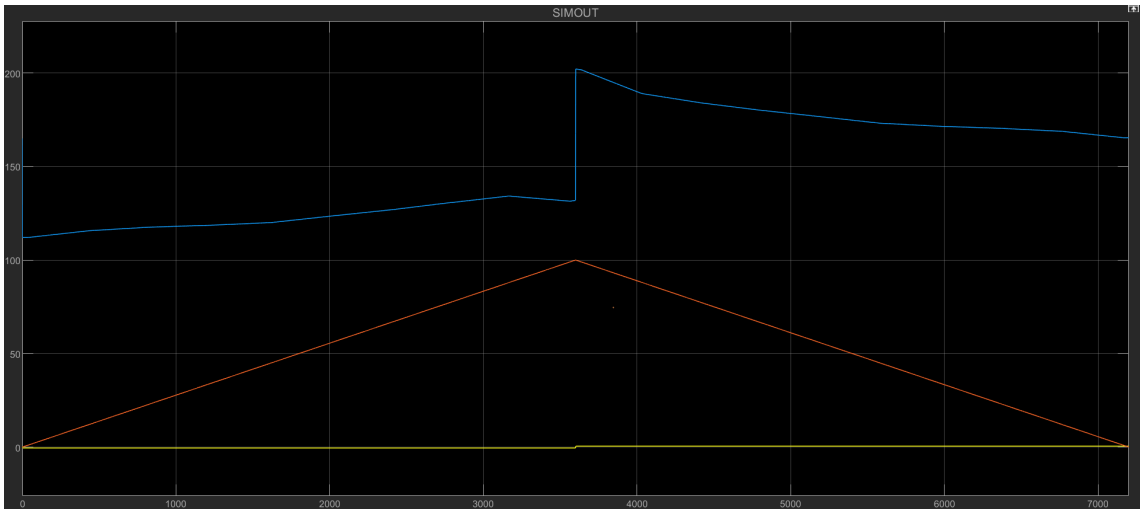
Figur 5.4: Spänningen vid belastning från 10% till 90% och tillbaka till 10%.

Under urladdningsfasen observeras en gradvis minskning av terminalspänningen, vilket är typiskt för batteriets urladdningskurva. Som visas i figuren ovan, börjar terminalspänningen vid ett högre värde 90% SOC och sjunker successivt tills den når sitt slutliga värde vilket är 10% SOC i detta exempel. Efter ca 6000 sekunder (1 timme och 40 min) sker en annan abrupt förändring, vilket kan indikera att en återladdning inträffar.

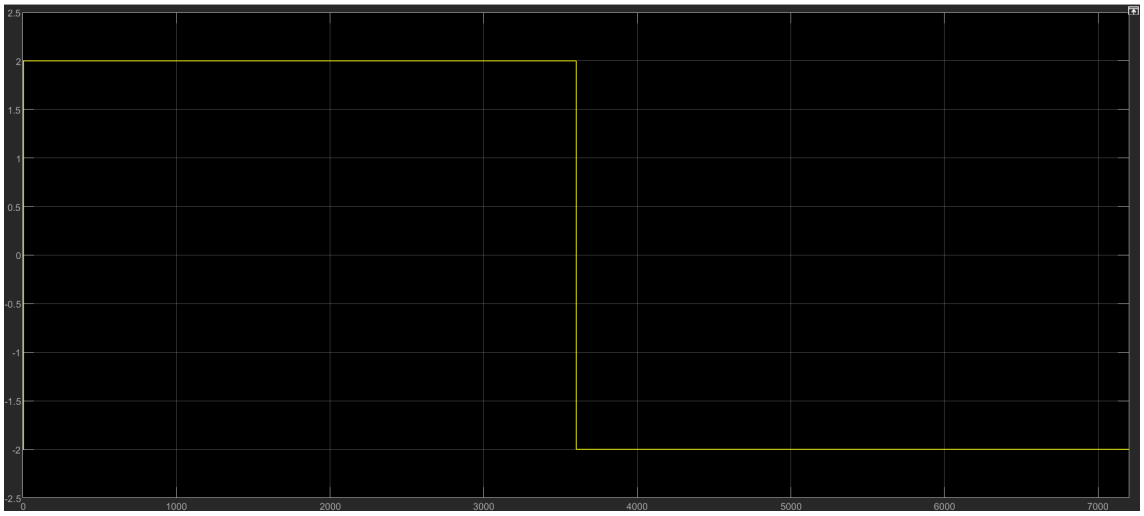
Denna cykliska förändring av V_terminal är typisk för uppladdningsbara batterier och återspeglar de elektrokemiska processerna som sker under laddning och urladdning. Denna data är viktig för att förstå batteriets prestanda under en cyklisk användning. De egenskaperna hos kurvan kan användas för att analysera och identifiera eventuella problem eller ineffektivitet i batterisystemet.

5.4 Batteripack

Figur 5.5 presenterar en omfattande översikt över parametrarna på paketnivå, inklusive spänning (återgiven av den blå kurvan), ström (illustrerad av den gula kurvan) och State of Charge (SOC, representerad av den röda kurvan).



Figur 5.5: Utmatningsparametrarna från batteripack.



Figur 5.6: Förstorad bild över strömmen från batteripack.

I denna undersökning användes data från Samsung/INR18650-20R-batterier, med specifikationer på 64.5/1000 m för höjd, 18.33/1000 m för tjocklek och 45/1000 m för bredd. Med en konfiguration av 40 seriekopplade battericeller och 2 parallellkopplingar uppmättes den samlade spänningen på paketnivå till cirka 200V. Detta står i tydlig kontrast till spänningen på cellnivå, som låg runt 5V vid full laddning.

Användningen av Samsung/INR18650-20R-batterier, tillsammans med den angivna konfigurationen, möjliggjorde en omfattande undersökning av paketnivåparametrar. Den tydliga skillnaden mellan spänningarna på cellnivå och paketnivå understryker vikten av att överväga den övergripande batteripaketkonfigurationen vid analys av systemprestanda och operationella egenskaper.

5.5 Skillnaderna mellan Li-ion-batterier och andra batterityper

Egenskaperna för olika batterityper som presenteras i Tabell 5.1 - 5.2 ger en omfattande jämförelse av deras prestanda och effektivitet. Genom att studera dessa tabeller kan vi dra slutsatsen att Li-ion-batterier, trots att de är dyrare, erbjuder överlägsna egenskaper som gör dem till den mest effektiva batteritypen på marknaden.

Tabell 5.1: Jämförelse av batterierna i laddningstillstånd samt temperaturförhållanden [40].

Batteri typer	Nominell spänning (V)	Energi densitet (Wh/kg)	Kraft densitet (W/kg)	Livslängd (cykel)	Laddnings effektivitet (%)	Självurladdningshastighet (%/månad)	Temperatur för urladdning (°C)	Temperatur för laddning (°C)
Lead acid	2.0	30-50	180	200-300	50-95	5	-20-50	-20-50
NiMH	1.2	60-120	250-1000	300-600	65	30	-20-65	0-45
NiCd	1.2	50-80	150	1000	70-90	20	-20-65	0-45
Li-ion	3.2-3.7	100-270	250-680	600-3000	80-90	3-10	-20-60	0-45

Tabell 5.2: Jämförelse av diverse egenskaper och kapacitet mellan batteri typerna [41].

Batteri typer	Märkkapacitet (Ah)	Märkkapacitet (kWh)	Sträcka som kan färdas på en laddning approximativt (km)	Batterivikt för elbil att köra 100 km med 20 kWh/100 km (kg)	Viktminskning jämfört med tidigare batteri (%)
Lead acid	215	1.29	35.4	500 - 600	0%
NiMH	77	26.4	120.7 - 241.4	300 - 400	36.36%
NiCd	64	17.83	193.1	200	42.86%
Li-ion	158	55	402.3	100 - 140	40%

5.5.1 Livslängd

Li-ion batterier har en betydligt längre livslängd, med 600–3000 cykler, jämfört med NiMH (300–600 cykler) och bly-syra batterier (200–300 cykler). Även om NiCd-batterier har en service life på cirka 1000 cykler, ligger Li-ion batterier ofta högre, vilket ger dem en fördel i applikationer som kräver lång hållbarhet.

5.5.2 Nominell spänning

Li-ion batterier har en högre nominell spänning på 3.2–3.7 V, jämfört med 2.0 V för bly-syra batterier och 1.2 V för både NiCd och NiMH. Denna högre spänning innebär att Li-ion batterier är mer effektiva när det gäller att leverera energi per cell.

5.5.3 Energi densitet

En av de mest framstående egenskaperna hos Li-ion batterier är deras höga energidensitet, som ligger mellan 100–270 Wh/kg. Detta är betydligt högre än bly-syra batterier (30–50 Wh/kg), NiCd (50–80 Wh/kg) och NiMH (60–120 Wh/kg). Den höga energidensiteten gör att Li-ion batterier kan lagra mer energi per viktenhet, vilket är avgörande för många moderna applikationer.

5.5.4 Kraft densitet

Li-ion batterier uppvisar också en hög kraftdensitet, från 250–680 W/kg. Detta överträffar bly-syra (180 W/kg), NiCd (150 W/kg) och ligger i det övre intervallet för NiMH (250–1000 W/kg). Den höga kraftdensiteten gör Li-ion batterierna lämpliga för applikationer som kräver snabb energitillförsel.

5.5.5 Laddningseffektivitet

Li-ion batterier har en laddningseffektivitet på 80–90%, vilket är högre än NiMH (65%) och konkurrerar med både NiCd (70–90%) och bly-syra-batterier (50–95%). Hög laddningseffektivitet innebär att en stor del av den insatta energin omvandlas till lagrad energi.

5.5.6 Självurladdningshastighet

Li-ion batterier har en låg självurladdningshastighet på 3–10% per månad, vilket är lägre än bly-syra (5%), NiCd (20%) och NiMH (30%). Detta innebär att Li-ion batterier behåller sin laddning längre när de inte används.

5.5.7 Arbetstemperaturområde

Li-ion batterier har ett brett temperaturområde för drift, från 0 till 45°C för laddning och -20 till 60°C för urladdning. Detta gör dem lämpliga för användning i olika miljöer och temperaturförhållanden, jämfört med de andra batterityperna som har liknande men något mindre flexibla temperaturintervall.

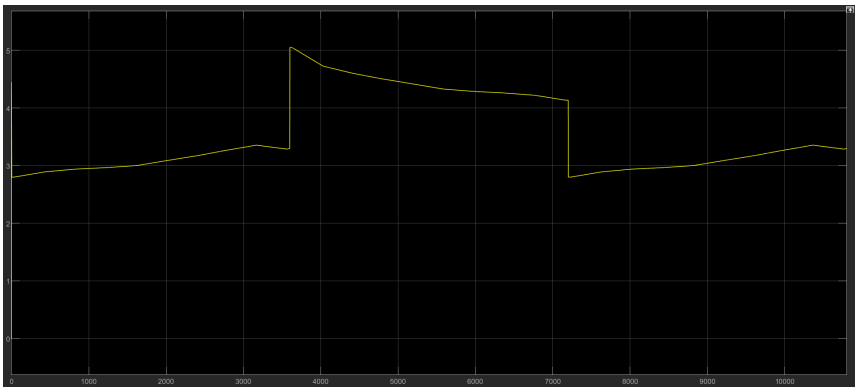
5.5.8 Massa för elfordon

För elfordon är Li-ion batterier betydligt lättare, med en vikt på 100–140 kg för att köra 100 km med 20 kWh, jämfört med bly-syra batterier (500–600 kg), NiMH (300–400 kg) och NiCd som väger 200 kg. Den lägre vikten är avgörande för att förbättra fordonens effektivitet och prestanda.

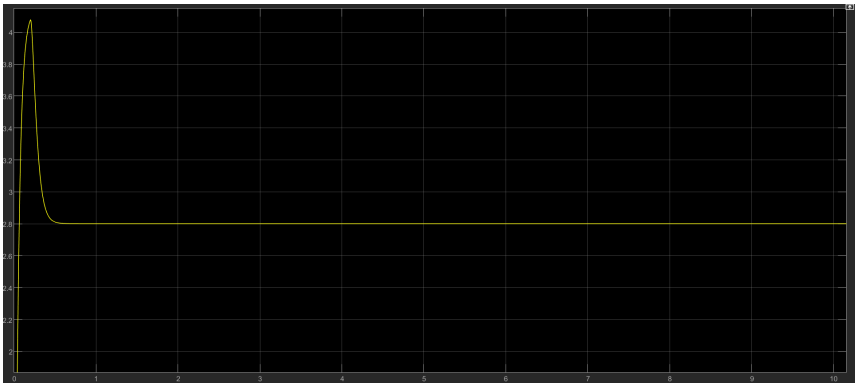
Sammanfattningsvis erbjuder Li-ion batterier överlägsen prestanda i flera avseenden såsom längre livslängd, högre nominell spänning, hög energidensitet, hög kraftdensitet, effektiv laddning, låg självurladdning och lägre vikt. Dessa egenskaper gör dem till det mest effektiva valet för många applikationer, inklusive elfordon, vilket motiverar deras högre kostnad. Li-ion-batteriernas överlägsna prestanda och flexibilitet gör dem till det föredragna valet trots deras högre pris.

5.6 Kabelns inverkan på systemet

I figur 5.7 presenteras den terminala spänningen från kablen över tid.



Figur 5.7: Den terminala spänningen från kabeln.



Figur 5.8: Kabelns inverkan på terminala spänningen vid början av tiden.

Det är observerbart att det uppstår en liten spänningsfall som stämmer överens med teorin. Genom att integrera kabelmodellen i vår simulering kan vi observera och analysera spänningsförluster över kabeln och eventuella transienter som uppstår vid belastningsförändringar.

Resistorn bidrar till att minska amplituden på spänningen genom att dissipera energi som värme. Induktorn motverkar snabba förändringar i strömmen, vilket resulterar i en mer gradvis förändring av spänningen. Kapacitansen lagrar och släpper ut energi långsamt, vilket också bidrar till att jämna ut spänningsvariationer.

RLC-kabeln fungerar som ett lågpassfilter på spänningen. Den dämpar högfrekventa komponenter och gör att snabba förändringar i spänningen blir mindre uttalade. Detta är varför spänningen från resultatet med kabeln visar mindre fluktuationer och mer gradvisa förändringar.

6

Slutsats och förslag till fortsatt arbete

Projektet har gjort betydande framsteg och uppfyllt de flesta av de ursprungliga förväntningarna. Det fokuserade på tre huvudmål: batterimodellering, parameteridentifiering och uppskattning av laddningstillstånd (SoC) . Lösningarna för dessa mål validerades mot uppmätta värden. Modelleringsmetoden började med att fokusera på en batteri-cell och gick därefter vidare till mer komplexa strukturer såsom ett batteri-pack. Batterimodellen använder den andra ordningens Thevenin-modell som implementerades i Simulink. Denna modell valdes på grund av sin goda balans mellan noggrannhet och snabbhet, som redan har beskrivits i rapporten.

Flera metoder för SOC uppskattning utforskades. Exempel på dessa är Coulomb-counting och OCV metoden. Coulomb-counting visade bättre noggrannhet, medan OCV metoden visade lägre noggrannhet eftersom att fler faktorer måste approximeras i den metoden. När det kommer till konstruktionen av kablar tillämpades RLC modellen för observation av kabelns inverkan på batteriet. Analys av kabelns inverkan visade att det uppstod spänningsfall för spänningen över batteriets terminaler vilket stämmer överens med teorin.

6.1 Begränsningar

Vi kunde inte genomföra experimentet av att ladda och urladda ett Li-ion batteri samt mäta datan själva i ett labb. Detta ledde till att vi blev tvungna att använda data uppmätta av andra och göra oss beroende av befintliga (online) data.

En annan begränsning i vårat arbete var att bortse från faktorer som cellbalansering och att ytterligare motstånd som kan påverka batterietsfunktion såsom Kontaktmotstånd, temperaturen osv. Dessa faktorer kan ha haft en inverkan på noggrannheten i vår uppskattning av batteriets SOC. Ignoreringen av dessa variabler kan därför ha introducerat fel och minskat tillförlitligheten i våra resultat

Den största utmaningen som vi stötte på under arbetet var parameteridentifiering. Vi behövde använda en funktion i MATLAB som heter 'Curve Fitting' för att sedan analysera relaxation och utifrån en matematisk ekvation kunna beräkna parametrarna R1, R2, C1 och C2. Problemet var att Curve Fitting inte fungerade som förväntat. Vi fick olika värden varje gång vi testade, och dessa värden var inte rimliga för att implementeras i en batterimodell. C1 och C2 var så små, nära noll, vilket inte är fysiskt möjligt vid konstruktion av ett batteri.

Som ett resultat av detta var vi tvungna att söka efter befintliga parametervärden online igen. Detta steg kan också ha lett till en minskad noggrannhet i testningen, eftersom de parametrar vi använde möjligtvis inte var helt representativa för vårt specifika batteri eller över de exakta förhållanden under vilka vi skulle ha genomfört våra experiment.

6.2 Framtida arbete

Då vi kunde göra betydande framsteg genom att använda befintliga data och modeller, finns det flera osäkerheter och potentiella felkällor som kan ha påverkat resultatens tillförlitlighet. För att förbättra detta arbete skulle det vara fördelaktigt att ha tillgång till färdiga data för att utgå ifrån eller ha tillgång till en labbmiljö där vi själva kan genomföra noggranna mätningar och kontrollera alla relevanta variabler för att förbättra precisionen i våra beräkningar och modeller. Inverkande faktorer såsom temperatur och state of health, alltså batteriets degradering över tid skulle möjligtvis kunna studeras vidare för framtida arbeten och införas i programmet. Därtill skulle även en bibliotek med diverse batterityper inom programmet kunna implementeras allt utifrån önskan och efterfrågan.

6.3 Slutsats

Batterier spelar en avgörande roll i övergången till hållbara energisystem genom att minska användningen av fossila bränslen och utsläpp, särskilt via elfordon. De bidrar till att reducera koldioxidutsläpp och möjliggör energilagring från förnybara källor, vilket är avgörande för ett hållbart samhälle. Det är dock viktigt att

adressera de negativa miljöaspekterna, såsom utvinning och hantering av batterier, för att uppnå en hållbar framtid.

En användarvänlig och integrerbar batteri simulator har utvecklats genom den interaktiva programmeringsplattformen Matlab tillsammans med Simulink. Genom att noggrant ta hänsyn till de fastställda avgränsningarna, såsom att enbart använda standardfunktionsblock inom Matlab och att endast modellera litiumjonbatterier, kan vi säkerställa en välfungerande batterisimulator som är anpassad efter användarens behov. Användaren har möjligheten till att mata in sina specifika parametervärden för att erhålla utdata från batteriet på både cell och pack nivå, samt att observera batteriets beteende och prestanda grafiskt under olika belastningsförhållanden, exempelvis vid en extern kabelanslutning.

Som helhet kan det konstateras att projektets syfte har uppnåtts och att den utvecklade batterisimulatorn erbjuder en kostnadseffektiv och noggrann metod för batteritester. Simulatormodellen bidrar dessutom till en ökad förståelse av batteriets beteende och kan underlätta beslutsfattandet i utvecklingen av framtida batterisystem. Projektet lägger därmed en god grund för vidare forskning och utveckling inom batterisimulering och energilagringsteknik.

Litteraturförteckning

[1] Z. Rao, S. Wang, och G. Zhang, “Simulation and experiment of thermal energy management with phase change material for ageing LiFePO4 power battery,“ Energy Conversion and Management, vol. 52, no. 12, pp. 3408–3414, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2011.07.009.

[2] V. Nehra, “Intelligent Systems and Applications,“ Int. J. Intell. Syst. Appl., vol. 5, pp. 1–24, 2014, doi: 10.5815/ijisa.2014.05.01.

[3] S. Muslimin, Z. Nawawi, B. Y. Suprapto, och T. Dewi, “Comparison of Batteries Used in Electrical Vehicles,“ in Proc. First T1 T2 Conf., 2022. [Online]. Tillgänglig: https://www.atlantis-press.com/proceedings/first-t1-t2-21/125970344.

[4] S. Manzetti och F. Mariasiu, “Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems,“ Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 51, no. 1, pp. 1004–1012, Nov. 2015, doi: doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.010.

[5] L. Stridh, “Så funkar en elmotor,“ IDC | Skaraborgs utvecklingsbolag för industrin, Dec. 03, 2021. [Online]. Available: https://idcab.se/nyheter/sa-funkar-en-elmotor/.

[6] I. Ukpanah, “Are Rechargeable Batteries Bad For The Environment? Trends And Facts,“ GreenMatch.co.uk, Apr. 16, 2024. [Online]. Available: https://www.greenmatch.co.uk/blog/rechargeable-batteries.

[7] D. Kamath, R. Arsenault, H. C. Kim, och A. Anctil, “Economic and Environmental Feasibility of Second-Life Lithium-Ion Batteries as Fast-Charging Energy Storage,“ Environmental Science & Technology, vol. 54, no. 11, pp. 6878–6887, Apr. 2020, doi: https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05883.

[8] G. P. Hammond och T. Hazeldine, “Indicative energy technology assessment of advanced rechargeable batteries,“ Applied Energy, vol. 138, pp. 559–571, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.10.037.

[9] G. Yüksek och A. Alkaya, “Effect of the Depth of Discharge and C-Rate on

Battery Degradation and Cycle Life,“ Nov. 2023, doi: doi.org/10.1109/eleco60389.2023.10415967 .

[10] J. Meng, H. Guo, C. Niu, L. Xu, Q. Li, and L. Mai, “Advances in Structure and Property Optimizations of Battery Electrode Materials,“ Joule, vol. 1, no. 3, pp. 522–547, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.joule.2017.08.001.

[11] S. A. Pervez, M. A. Cambaz, V. Thangadurai, and M. Fichtner, “Interface in Solid-State Lithium Battery: Challenges, Progress, and Outlook,“ ACS Applied Materials Interfaces, vol. 11, no. 25, pp. 22029–22050, May 2019, doi: 10.1021/acsami.9b02675.

[12] T. Kim, W. Song, D.-Y. Son, L. K. Ono, and Y. Qi, “Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies,“ Journal of Materials Chemistry A, vol. 7, no. 7, pp. 2942–2964, 2019, doi: 10.1039/c8ta10513h.

[13] “Volvo Cars to Be Fully Electric by 2030, “www.media.volvocars.com, Mar. 02, 2021. [Online]. Tillänglig: https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/277409/volvo-cars-to-be-fully-electric-by-2030.

[14] Y. Miao, P. Hynan, A. von Jouanne, and A. Yokochi, “Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements,“ Energies, vol. 12, no. 6, pp. 1074, Mar. 2019, doi: 10.3390/en12061074.

[15] S. Vashista, “Lithium-ion vs Lithium-Polymer Batteries,“ LinkedIn, [Online]. Available: https://www.linkedin.com/pulse/lithium-ion-vs-lithium-polymer-batteries-sumit-vashista/.

[16] E. Admin, “Types of Lithium-ion Batteries available in the market,“ Inverted Energy, Sep. 07, 2021. [Online]. Tillgänglig: https://inverted.in/blog/types-of-lithium-ion-batteries-available-in-the-market.

[17] “Lead/acid batteries,“ University of Cambridge .[Online]. Tillgänglig: https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/batteries/batteries_lead_acid.php.

[18] “Lead-acid batteries,“ Jungheinrich, [Online]. Tillgänglig: https://www.jungheinrich.co.nz/products/energy-and-drive-systems/batteries/lead-acid-batteries-1189334.

[19] H. J. Bergveld, W. S. Kruijt, och P. H. L. Notten, “Electronic-network modelling of rechargeable NiCd cells and its application to the design of battery management systems,“ Journal of Power Sources, vol. 77, no. 2, pp. 143–158, Feb. 1999, doi: 10.1016/s0378-7753(98)00188-8.

[20] “Uppdrag att utveckla myndighetssamverkan för Sveriges delar av en hållbar europeisk värdekedja för batterier,“ Regeringskansliet, Aug. 18, 2020. [Online].

Available: https://www.regeringen.se/regeringsuppdrag/2020/08/uppdrag-att-utveckla-myndighetssamverkan-for-sveriges-delar-av-en-hallbar-europeisk-vardekedja-for-batterier/.

[21] J. Tarabay och N. Karami, “Nickel Metal Hydride battery: Structure, chemical reaction, and circuit model,“ [Online], pp. 22-26, doi: 10.1109/TAEECE.2015.7113594.

[22] N. R. Babu, K. Chenchireddy, V. H. V. Reddy, D. Samhitha, P. Apparao, och C. P. Kalyan, “Case study on Ni-MH Battery,“ [Online]. pp. 1559-1564, doi: 10.1109/ICAAIC56838.2023.10140812.

[23] J. P. Aditya och M. Ferdowsi, “Comparison of NiMH and Li-ion batteries in automotive applications,“ 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, China, 2008, pp. 1-6, doi: 10.1109/VPPC.2008.4677500.

[24] “Toyota’s Batteries | Toyota Europe,“ Toyota EU. [Online]. Available: https://www.toyota-europe.com/electrification/batteries.

[25] R. R. Thakkar, Y. Srinivasa Rao, och R. R. Sawant, “Performance Analysis of Electrical Equivalent Circuit Models of Lithium-ion Battery,“ 2020 IEEE Pune Section International Conference (PuneCon), Dec. 2020, doi: 10.1109/PuneCon50868.2020.9362386.

[26] “Electrochemical Models,“ Monolithic Power Systems. [Online]. Tillgänglig: https://www.monolithicpower.com/en/battery-management-systems/battery-modeling/electrochemical-models.

[27] Y. Li, B. Zhang, M. Chen, D. Yang, and J. Liu, “Investigation of the internal resistance in LiFePO4 cells for battery energy storage system,“ 2014, doi: 10.1109/ICIEA.2014.6931423.

[28] M. Elmahallawy, T. Elfouly, A. Alouani, och A. M. Massoud, “A Comprehensive Review of Lithium-Ion Batteries Modeling, and State of Health and Remaining Useful Lifetime Prediction,“ IEEE Access, vol. 10, pp. 119040-119070, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3221137.

[29] J. Meng et al., “An Overview and Comparison of Online Implementable SOC Estimation Methods for Lithium-Ion Battery,“ IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 2, pp. 1583-1591, Mar. 2018, doi: 10.1109/TIA.2017.2775179.

[30] M. Murnane och A. Ghazel, “A Closer Look at State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) Estimation Techniques for Batteries,“ Accessed: May 31, 2024. [Online]. tillgänglig: https://www.pvpower.co.za/wp-content/uploads/2023/01/BMS-SoC-and-SoH-Estimation.pdf.

[31] M. Galeotti, L. Cinà, C. Giammanco, S. Cordiner, and A. Di Carlo, “Performance analysis and SOH (state of health) evaluation of lithium polymer batteries through electrochemical impedance spectroscopy,“ Energy, vol. 89, pp. 678-686, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.05.148.

[32] J. Schmalstieg, C. Rahe, M. Ecker och D. Uwe Sauer , ‘Full Cell Parameterization of a High-Power Lithium-Ion Battery for a Physico-Chemical Model: Part I. Physical and Electrochemical Parameters,“ Journal of The Electrochemical Society, vol. 165, pp. 3805, Dec. 2018, doi:10.1149/2.0321816jes

[33] R. Xu, “Degree project in Electric power engineering (TELPM) Second cycle 30 credits Lithium-ion battery modeling and SoC estimation,“ Available: https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1802829/FULLTEXT01.pdf.

[34] “A Guide to Understanding Battery Specifications,“ MIT Electric Vehicle Team, 2008. Tillgänglig: http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf.

[35] W. A. Thue, *Electrical Power Cable Engineering*. New York: Marcel Dekker, 2003.

[36] M. Chen and G. A. Rincon-Mora, “ Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance,“ [Online], vol. 21, no. 2, pp. 504-511, June 2006, doi: 10.1109/TEC.2006.874229.

[37] G. Saldaña, J. I. San Martín, I. Zamora, F. J. Asensio, and O. Oñederra, “Analysis of the Current Electric Battery Models for Electric Vehicle Simulation,“ *Energies*, vol. 12, no. 14, pp. 2750, Jan. 2019, doi: 10.3390/en12142750.

[38] “Battery Data | Center for Advanced Life Cycle Engineering,“ *calce.umd.edu*. [Online]. Available: https://calce.umd.edu/battery-data.

[39] R. O. Nemes, S. Maria Ciornei, M. Ruba, and C. Martis, “Parameters identification using experimental measurements for equivalent circuit Lithium-Ion cell models, “ [Online]. 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ATEE.2019.8724878.

[40] K. Liu, K. Li, Q. Peng, and C. Zhang, “A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles,“ *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 47-64, Apr. 2018, doi: 10.1007/s11465-018-0516-8.

[41] T. Chian et al., “A Review on Recent Progress of Batteries for Electric Vehicles,” *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 14, pp. 4441–4461, 2019. Tillgänglig: https://www.ripublication.com/ijaer19/ijaerv14n24_07.pdf.

A

Appendix

A.1 Matlab-koden

Read ata From Excel

```
clc;
clear;
close all;
% Read data from the first sheet 25 degrees "Discharge"
Data_Sheet1 = readtable('B_P_25C.xlsx', 'Sheet', 1);

% Read data from the second sheet "Charge"
Data_Sheet2 = readtable('B_P_25C.xlsx', 'Sheet', 2);

Data_Sheet1_0 = readtable('B_P_0C.xlsx', 'Sheet', 2);

% Extract relevant variables from the first sheet
Test_Time_Sheet1 =Data_Sheet1{:, 2};
Current1_Sheet1 = Data_Sheet1{:, 7};
Voltage1_Sheet1 = Data_Sheet1{:, 8};

% Extract relevant variables from the second sheet
Test_Time_Sheet2 = Data_Sheet2{:, 2};
Current1_Sheet2 = Data_Sheet2{:, 7};
Voltage1_Sheet2 = Data_Sheet2{:, 8};

% Combine data from both sheets
Test_Time_Combined = [Test_Time_Sheet1; Test_Time_Sheet2];
Current1_Combined = [Current1_Sheet1; Current1_Sheet2];
Voltage1_Combined = [Voltage1_Sheet1; Voltage1_Sheet2];
```

Figur A.1: Inledande kod för att avläsa specifika data från Excel filen.

```
current_threshold = 0.5;
Current1_discharge=Current1_Combined(1:76000);
% Initialize variables
pulse_times = [];
previous_above_threshold = false;
for i = 1:length(Current1_discharge)
  current_value = -Current1_Combined(i);

  % Check for rising edge (transition from below to above threshold)
  if (~previous_above_threshold && current_value > current_threshold)
    pulse_times = [pulse_times; Test_Time_Combined(i)];
    previous_above_threshold = true;
  end

  % Update previous state
  previous_above_threshold = current_value > current_threshold;
end

  % Calculate time difference between pulses
  time_differences = diff(pulse_times) /10;

  disp('Number of pulses detected:')
  disp(length(pulse_times))
  disp('Average pulse interval (seconds):')
  disp(mean(time_differences))
  disp('Standard deviation of pulse interval (seconds):')
  disp(std(time_differences))

mean_time_differences=  mean(time_differences).* (ones(size(pulse_times)))
```

Figur A.2: Perioden mellan varje puls.

```
SOC_int = 1;                %SoC initial value (0-1)
i_cell = 1;                 % Cell current (A)
C = 2 *3600;                % Capacity (mAh)
sim_time = 3600;            % Simulation time (s)
C_rate= i_cell / (C / 3600);
SOC=1;
DC =  ones(size(mean_time_differences));   % Discharge current
SOC_change_per_pulse = (DC .*mean_time_differences) ./ (C);
SOC_Value=zeros(1,length(SOC_change_per_pulse)+1)
SOC_Value(1)=SOC;
% Iterate and update SOC
for i = 1:length(SOC_change_per_pulse)

  disp(['SOC after pulse ', num2str(i), ': ', num2str(SOC)])
    SOC = SOC - SOC_change_per_pulse(i);
     % Enforce SOC to be 0 at the end of discharge
  SOC = max(0, SOC);  % This clips any negative SOC values to 0
  SOC_Value(i+1) = SOC;
end
SOC_25C=SOC_Value(1:length(SOC_change_per_pulse))';
length(SOC_Value)
%SOC_OCV from the graph  (Plot combined data in the other file "ploting")
OCVV_25C_Value=[4.17577,4.05034,3.93997,3.83998,3.7536,3.66479,3.62606,3.59965,3.55557,3
%stroing data from 100% down to 10%we dont want our batttery to completely discharging t
OCVV_25C=OCVV_25C_Value(1:length(SOC_change_per_pulse))';
% from 100% down to 10%
R0_25C=[0.222345,0.221535,0.220160,0.220320,0.221290,0.221455,0.221860,0.222180,0.228185
R1_25C=[0.03232,0.03885,0.04033,0.04895,0.04838,0.03299,0.03659,0.03849,0.03365,0.01703]
C1_25C=([3.7377,2.0592,4.7868,.80619,1.3616,1.9088,2.0958,2.8585,2.3363,3.0847].*10^3)';
R2_25C=[0.4363,0.4284,0.3066,0.2361,0.1514,0.08976,0.1077,0.2770,0.3775,0.1898]';
C2 25C=([2.9957,3.5357,4.1820,7.8421,1.3638,1.4661,1.2275,4.7533,2.7850,7.0510].*10^3)';
```

Figur A.3: Estimering av parametrarna.

Reversed

```
reversed_R0_25C = flip(R0_25C);
reversed_R1_25C = flip(R1_25C);
reversed_R2_25C = flip(R2_25C);
reversed_C1_25C = flip(C1_25C);
reversed_C2_25C = flip(C2_25C);
reversed_SOC_25C = flip(SOC_25C);
reversed_OCVV_25C = flip(OCVV_25C);
```

Pack

```
%Data belowe form  a datasheet. Battery name:(Samsung/INR18650-20R)
Battery_cell_H = 64.85/1000;   % Battery cell height [m]
Battery_cell_T = 18.33/1000; % Battery cell thickness [m]
Battery_cell_W = 45/1000;  % Battery cell width [m]

n_cell_series = 40; %  Number of cell connected in series
n_cell_parallel = 2; %  Number of cell connected in parallel
```

Figur A.4: Omvänd data samt konfiguration för ett batteripaket.

Cable

```
Cable_length=input('Enter cable length:');
cond=input('Enter number of conductors:');
R_cable=input('Enter resistance value:');
L_cable=input('Enter inductance value:');
C_cable=input('Enter capacitance value:');
R_total=(1*(R_cable*Cable_length)/cond);
L_total=(L_cable*Cable_length)/cond;
C_total=C_cable*Cable_length*cond;
```

Figur A.5: Kod för inmatning av värden för kabel specifikationer.

INSTITUTIONEN FÖR något ämne
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige
www.chalmers.se

CHALMERS