

Simulering av olika laddningsmetoder för ett litiumjonbatteri



Alaa Ahmed

Division of Industrial Electrical Engineering and Automation
Faculty of Engineering, Lund University

© Copyright Alaa Ahmed

LTH Ingenjörshögskolan
Lunds Universitet
Box 882
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering
Lund University
Box 882
SE-251 08 Helsingborg
Sweden

Printed in Sweden
E-husets tryckeri
Lund 2021

Sammanfattning

Detta examensarbete handlar om hur den vanliga laddningsmetoden CC-CV laddar litiumjonbatterier och undersöker hur den kan förbättras så att den ger snabbare laddning med samma totala temperaturstegring. För detta jämfördes två laddningsmetoder, CC-CV och CT-CV. Jämförelsen utgick från olika parametrar såsom spänning, ström och temperatur.

Simulering för laddningsmetoderna genomfördes i Simscape Simulink-program. Modelleringen genomfördes för själva batteriet med både första ordningens elektriska modell och andra ordningens termiska modell för CC-CV och CT-CV laddningsmetoderna. Dessutom användes en batteriladdningsmodell och PID-regulator som var kopplad till en temperatursensor.

Utgångspunkten var att startvärdet för CT-CV laddningström är $2C$, medan startvärdet för CC-CV är $1C$. Detta gör att strömmen går snabbare i CT-CV laddningsmetoden och därmed blir laddningstiden mindre. Temperaturen mättes så att den inte överskred den maximala temperaturen och har samma totala temperaturstegring som CC-CV. Resultatet stämmer bra överens med referensens resultat. Slutsatsen som dras av studien är att CT-CV reglermetoden är bättre att använda jämfört med CC-CV eftersom CT-CV ger 20% snabbare laddning vid övervakande av litiumjonbatteriets ytemperatur.

Nyckelord

Laddningsmetod, CC-CV, CT-CV, litiumjonbatteri, elektrisk model, termisk model

Abstract

This thesis is about how the standard charging method CC-CV charges lithium-ion batteries, and it examines how the method can be improved so that it provides faster charging with the same total temperature rise. For this, two loading methods were compared, CC-CV and CT-CV.

The comparison was based on various parameters such as voltage, current and temperature.

Simulation of the charging methods was performed in Simscape Simulink software. The modeling was performed for the battery itself with a first-order electrical model and a second-order thermal model for the CC-CV and CT-CV charging methods. In addition, a battery charging model and PID controller connected to a temperature sensor were used.

The starting point was that the initial value for CT-CV charging current is 2C, while the initial value for CC-CV is 1C. This makes the current go faster in the CT-CV charging method, thus reducing the charging time. The temperature is measured so that it does not exceed the maximum temperature and has the same total temperature rise of CC-CV. The result agrees well with the result of the reference. The conclusion drawn from the work is that the CT-CV control method is better to use compared to CC-CV because CT-CV provides 20% faster charging when monitoring the surface temperature of the lithium-ion battery.

Keywords

Charging method, CC-CV, CT-CV, lithium-ion battery, electrical model, thermal model

Innehållsförteckning

Sammanfattning	1
Abstract	2
Förord	5
1. Inledning	7
1.1 Bakgrund	7
1.2 Syfte	7
1.3 Problemformulering	8
1.4 Målformulering	8
1.5 Avgränsningar	8
1.6 Motivering av examensarbetet	8
2. Teknisk bakgrund	9
2.1 Simuleringsmiljöer	9
2.1.1 SPICE	9
2.1.2 Matlab/Simulink	9
2.2 Litiumjonbatterier	10
2.2.1 Specifikationer	10
2.3 Modellering	11
2.3.1 Elektriska modeller	12
2.3.1.1 Första och andra ordningens modell	12
2.3.2 Termiska modeller	13
2.3.2.1 Termisk modell av första ordningen	13
2.3.2.2 Termisk modell av andra ordningen	15
2.4 Reglering	15
2.4.1 PID-reglering	15
2.4.1.1 Framkoppling	16
2.4.1.2 PID-reglering och framkoppling	16
3. Metod	20
3.1 Litteratursökning	20
3.2 Tillvägagångssätt	20
3.3 Simulering	21
3.4 Källkritik	21
4. Utförande	23
4.1 Första ordningens elektriska modell för både CC-CV och CT-CV	23
4.2 Andra ordningens termiska modell för både CT-CV och CC-CV	26
4.3 Elektro-termisk modell	26
4.4 Batteriladdningens kretsmodell	27

4.5 PID-regulator och framkopplingsterm	29
4.5.1 CT-CV	29
4.5.2 CC-CV	30
5. Analys och resultat	31
5.1 Referensens CT-CV och CC-CV simuleringsresultat	31
5.2 Simuleringsresultat	33
5.2.1 Framkoppling	37
6. Slutsats	39
6.1 Reflektion över etiska aspekter	39
6.2 Framtida utvecklingsmöjligheter	40
7. Källförteckning	41

Förord

Detta examensarbete utgör mitt avslutande moment på utbildningen högskoleingenjör inriktning elektroteknik med automationsteknik i Lunds universitet, Campus Helsingborg. Arbetet omfattar 22,5 högskolepoäng och utfördes i samarbete med handledaren.

Tack till min handledare, Morten Hemmingsson, på LTH som var till stor hjälp under arbetets gång och även i vår diskussioner. Tack till min examinator, Mats Lilja, på campus helsingborg som också var med i vår diskussioner.

Stort tack till Ulla Urde, på Campus Helsingborg som ägnat tid till att hjälpa mig med arbetet. Jag vill även tacka min familj som har uppmuntrat mig och stöttat mig under hela arbetets gång.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

För litiumjonbatterier finns det både laddningsmetoder som utnyttjar återkoppling och sådana som bara använder öppen styrning utan återkoppling, där laddningsprofilen är beräknad baserat på parametrar, t.ex. resistanser, i den använda modellen för en litiumjoncell. Det finns ett stort intresse för laddningstekniker med återkoppling [1].

Examensarbetet har undersökt två reglermetoder, nämligen konstant temperatur-konstant spänning (CT-CV) och konstant ström- konstant spänning (CC-CV) applicerad på en modell av ett litiumjonbatteri. Modellen består av en första ordningens elektrisk modell och en andra ordningens termisk modell, där återkoppling sker från en temperaturgivare monterad på batteriet. Återkoppling förekommer både i naturliga och konstruerade system. Reglersystem med återkoppling används i många olika tillämpningar, t.ex. bilar, konsumentelektronik, tillverkningsprocesser samt transport och kommunikationssystem. Återkoppling används dels för att stabilisera eller snabba upp system och dels för att minska känsligheten för störningar [2].

Konstant temperatur- konstant spänningsladdningsmetoden utnyttjar reglering av celltemperaturen. Denna metod implementeras genom att börja ladda batteriet med ett högt värde av ström (t.ex. 2C, C som i 2C-rate är den ström som en cell behöver för att laddas på en halv timme). Sedan minskas den så småningom tills den når 1C, C som i 1C-rate är den ström som en cell behöver för att laddas på en timme. Efteråt skiftas laddaren från CT-läge till CV-läge. Temperaturen regleras under hela laddningsförloppet. Detta bidrar till att laddningen sker med kortare laddningstid samtidigt som att temperaturen övervakas [1].

1.2 Syfte

Huvudsyftet med detta examensarbete var att testa och undersöka två olika reglerstrategier som tar hänsyn till en modell av temperaturreglering för en litiumjoncell. Undersökningen har utförts genom simulering. Det är av stor vikt att reglera temperaturen för att undvika överhettning och för höga strömmar.

1.3 Problemformulering

I examensarbetet ska metoder för temperaturreglerad laddning undersökas genom simulering med utnyttjande av en befintlig modell av ett litiumjonbatteri.

Följande frågor ska besvaras i examensarbetet:

- 1- Vilken modell ska användas för att utvärdera reglermetoderna?
- 2- Vilka två reglermetoder ska testas?
- 3- Vilka kriterier ska användas för att avgöra vilken reglermetod som är bäst?
- 4- Hur ska parametrarna ställas in i reglermetoderna?

1.4 Målformulering

Det övergripande målet med arbetet är att undersöka och analysera en modell av litiumjonbatteri för att åstadkomma en snabbare laddning utan att överskrida kritiska temperaturgränser. Detta görs genom simulering av temperatur, ström och spänning.

1.5 Avgränsningar

-Examensarbetet behandlar endast två olika reglermetoder applicerade på en modell.

-Laddningen utförs enbart för en batterityp, vilken är ett litiumjonbatteri.

1.6 Motivering av examensarbetet

Det här förslaget valdes för att batteriladdning spelar en viktig roll i många tillämpningar och kravet på att hålla batteriet laddat så fullt som möjligt med hänsyn taget till den optimala batterilivslängden har så stor betydelse idag. Området batteriladdning har också varit ett intressant ämne att studera. Ytterligare en motivering är att kunskap från många av kurserna i utbildningen har kommit till nytta, inte minst kursen i styr- och reglerteknik.

2 Teknisk bakgrund

Detta kapitel beskriver den simuleringsmjukvara som utnyttjats i examensarbetet samt de olika batterimodeller och regulatorer som använts vid simuleringarna.

2.1 Simuleringsmiljöer

Simuleringarna kan utvecklas i olika simuleringsmiljöer som t.ex. Matlab/Simulink. I sådana simuleringsmiljöer finns det möjlighet att bygga och testa verkliga system, innan de testas i verkligheten. I detta examensarbete jämförs två simuleringsmiljöer: Matlab/Simulink och SPICE.

2.1.1 SPICE

SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) är en analog simulator som används för att verifiera kretsens utformning och förutsäga dess beteende. Detta är särskilt viktigt för integrerade kretsar. Det faktum att det är viktigt för just denna typ av kretsar är anledningen till att SPICE från början utvecklades på Elektronikforskningslaboratorium vid University of California, Berkeley [8].

2.1.2 Matlab/Simulink

Matlab är ett program som började utvecklas i slutet på 70-talet av Cleve Moler vid University of New Mexico. Sedan dess har det utvidgats betydligt och från 1984 är det Mathworks som är ansvariga för utvecklingen. Matlab är ett programmeringsspråk där man lätt kan utföra matematiska beräkningar. I början var Matlab begränsat till enbart matrisberäkningar, men med tiden har den utvecklats med avancerade tillämpningar. Själva programmet är utrustat för att användaren ska slippa gå igenom tekniska detaljer. Det kan till exempel handla om kompilering och minneshantering. Därför kan Matlab vara ett lättanvänt program [4].

Simulink är en mjukvara som är integrerad med Matlab och även utvecklad av MathWorks. Syftet med Simulink är att systemen simuleras genom att modellen byggs upp med olika block som till sist beskrivs det med ett signalbaserat grafiskt användargränssnitt. Simulink och Matlab används inom reglerteknik och industrin [3]. Eftersom arbetet kommer att simulera en modell som utnyttjar återkoppling och det inte ska vara byggt med integrerade kretsar så väljs Matlab/Simulink som simuleringsmiljö för att den är betydligt snabbare än SPICE [10].

2.2 Litiumjonbatterier

Litiumjonbatterier är lättare än andra typer av uppladdningsbara batterier av liknande storlek. De brukar användas i bärbar elektronik. Dessa batterier finns därför vanligtvis i surfplattor, mobiltelefoner och bärbara datorer [5].

Den här typen av batterier har många fördelar och därför har den blivit så populär. Den är lättare, laddas snabbare och håller längre. Dessutom kan den lagra en stor mängd energi. Det finns ett stort behov av dem och detta beror på batteriernas långa livslängd. Litiumjonbatterier har ingen minneseffekt. De kan alltså laddas och urladdas utan att påverka kapaciteten [5] [12].

2.2.1 Specifikationer

Batteriet är försett med olika specifikationer. I tabellen nedan redovisas specifikationen för Samsung INR 18650-25R cylindrical cell som skall användas under simulering. Simuleringens utgångspunkt är data för detta batteri. Det handlar alltså inte om egna experiment. I figur 1 visas kretsmodellen med de olika parametrarna som tabellen anges värden för.

Tabell.1 Specifikationen för Samsung INR 18650-25R cylindrical cell [1]

TABLE I
BATTERY SPECIFICATIONS

Parameter	Value
Model	Samsung INR18650-25R
Format	Cylindrical cell
Chemical System	LiNiCoAlO ₂ (NCA)
Nominal Voltage	3.6 V
Nominal Capacity	2,300 mAh
Charging Condition	CC-CV: @1C (2.3 A), 4.2 V max, 0.1C (0.23 A) cut-off
Discharging Condition	CC @1C (2.3 A), 2.8 V cut-off
Nominal R_0	70 m Ω
Nominal R_1	10 m Ω
Approx. weight	44 g

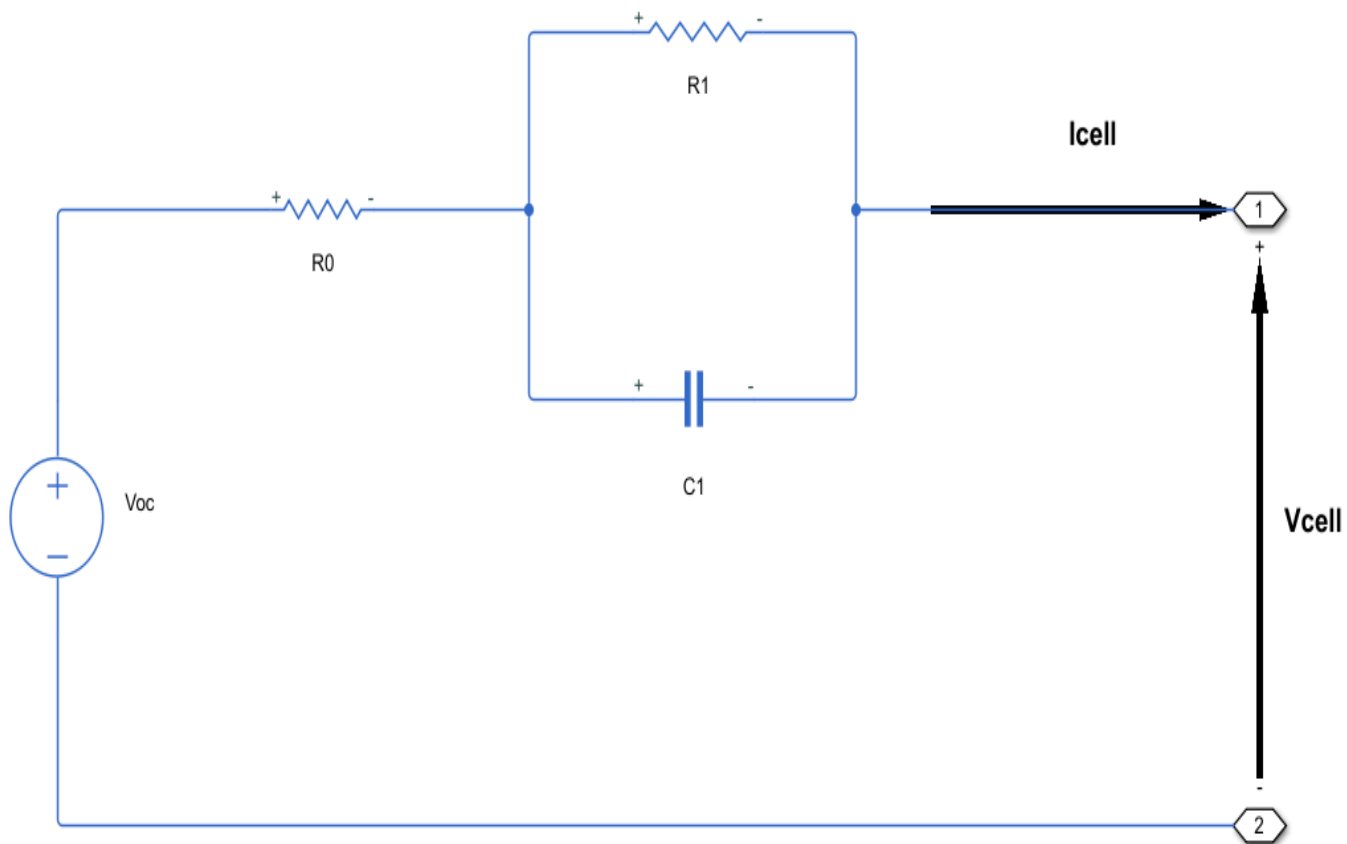


Fig. 1 Den ekvivalenta kretsmodellen för första ordningen.

2.3 Modellering

Det finns två delmodeller för en litiumjoncell: en elektrisk och en termisk. I den elektriska modellen är den uppmätta laddningsströmmen integrerad för att få tillståndet för laddning under amperetimmar. I den termiska modellen används en andra ordningens modell för att beskriva uppvärmning inom de inre elektroderna samt batteriets yteryta.

2.3.1 Elektriska modeller

2.3.1.1 Första och andra ordningens modell

Kretsmodellen för första ordningen består av ett RC-nätverk. Parametrarna framgår av Fig. 1 som är en koppling med öppen kretsspänning, inre resistans ($R_0 + R_1$) och en kondensator.

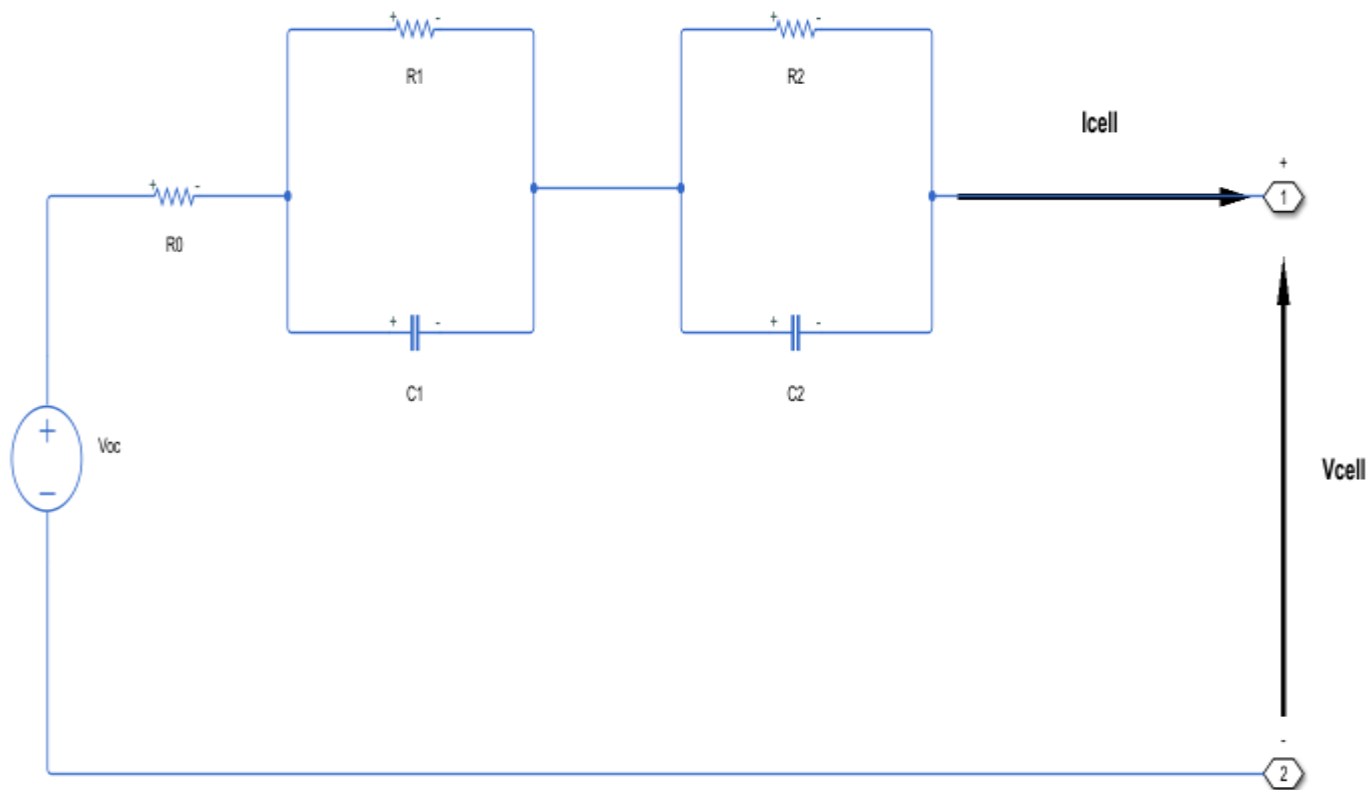


Fig. 2 Den ekvivalenta kretsmodellen av andra ordningen.

I Fig. 1 och Fig. 2 ses hur kretsarna är kopplade. De består av den öppna kretsspänningen V_{oc} och en intern resistans R_0 som är seriekopplade med ett antal RC-nätverk av första ordningen. Varje RC-nätverk består av en resistans och en kondensator, vilka är parallellkopplade med varandra. Första ordningens modell har ett RC-nätverk medan andra ordningens modell har två RC-nätverk. Alla dessa parametrar är funktioner beroende på laddningstillstånd (SOC) och temperatur. Modellens noggrannhet beror på antalet RC-nätverk. Ökning av ordningen hos modellerna medför ökad noggrannhet men samtidigt ökar komplexiteten [9].

Parametrarna förklaras och definieras nedan.

(SOC): SOC är laddningstillstånd som definieras som förhållandet mellan den nuvarande laddningen i cellen (C) med cellens nominella laddning (C_Q). SOC_o är batteriets initiala laddningstillstånd och I_{cell} är cellens ström [9].

$$SOC = \frac{C}{C_Q} = SOC_o - \frac{1}{C_Q} \int I_{cell} dt \quad (1)$$

(V_{oc}): definieras som öppen kretsspänning (se Fig. 1 och Fig. 2).

(R_0): är den interna resistansen som seriekopplas till de RC-parallellkopplade nätverken (se Fig. 1 och Fig. 2).

(RC-nätverk): Modellerna innehåller ett eller två nätverk beroende på modellens ordning. Varje nätverk har två komponenter parallellkopplade till varandra. Den första ordningens modellen består av två komponenter, vilka är R_1 och C_1 . Den andra ordningens modellen har fyra komponenter, vilka är R_1 , C_1 i det ena nätverket och R_2 , C_2 i det andra nätverket [9].

2.3.2 Termiska modeller

2.3.2.1 Termisk modell av första ordningen

Den föreslagna elektriska modellen har förbättrats med den enkla termiska modellen som visas nedan i figur 3.

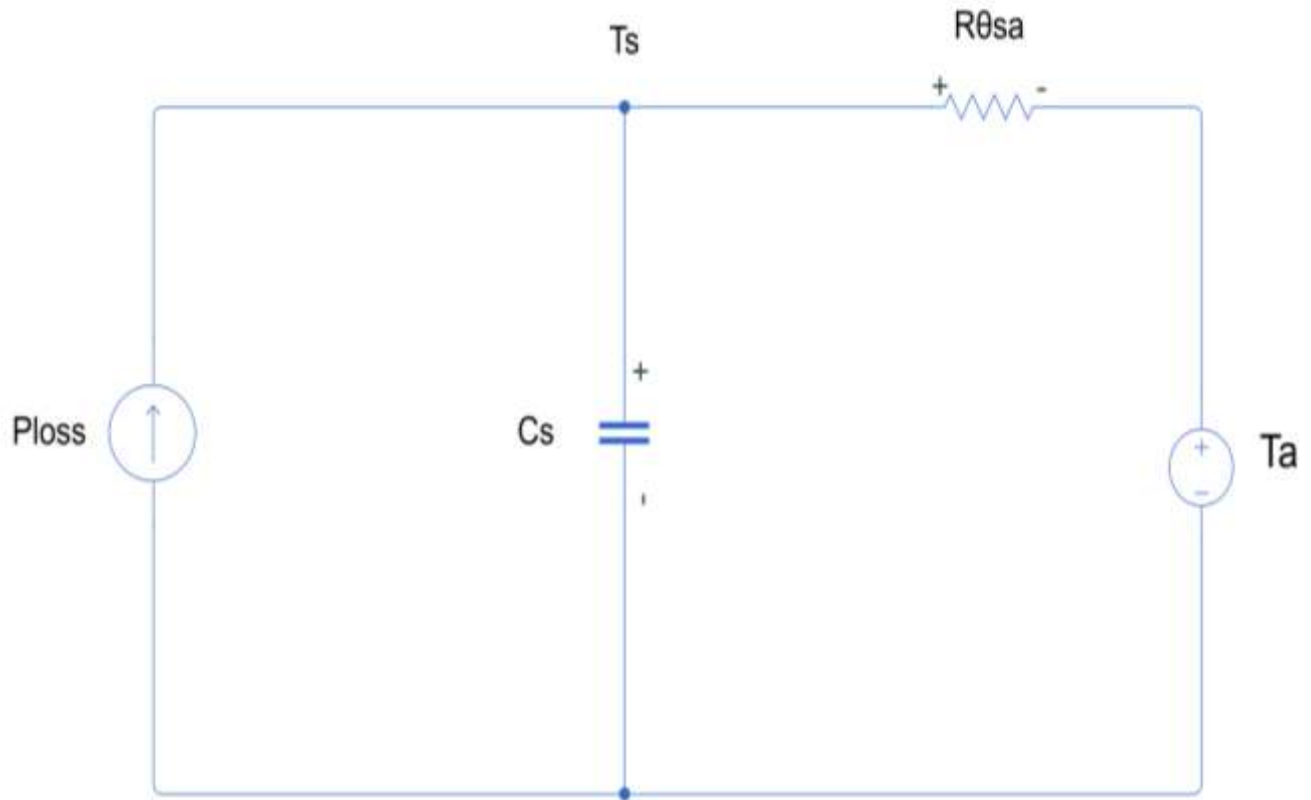


Fig. 3 Den första föreslagna termiska modellen för cellen

På detta sätt kan den förbättrade modellen förutsäga beteendet hos celltemperaturen, vilket är värdefull data vid utformningen av batteripaketets och batteriets kylsystem. Den termiska modellen består av ett RC-nätverk, som tar hänsyn till cellens termiska transient. Det valdes att endast anta en tidskonstant för att inte öka komplexiteten i systemet. Den simulerade celltemperaturen kan uttryckas som [6]:

$$T_s = T_a + \frac{1}{C_s} \int \left(P_{loss} - \frac{T_s - T_a}{R_{\theta_{sa}}} \right) dt \quad (2)$$

där T_a är omgivningstemperatur, C_s är värmekapacitet och $R_{\theta_{sa}}$ är värmemotstånd. När det gäller Q , har den modellerats med en strömgenerator, vars värde är de elektriska förlusterna i batteriet:

$$P_{loss} = |V_{oc} - V_{cell}| I_{cell} \quad (3)$$

där V_{oc} är den öppna kretsspänningen, V_{cell} är cellens spänning och I_{cell} är cellens ström.

2.3.2.2 Termisk modell av andra ordningen

I figur 4 nedan visas den andra ordningens termiska modellen. T_i är cellens interna temperatur, T_s är cellens yttemperatur och T_a är omgivningstemperatur.

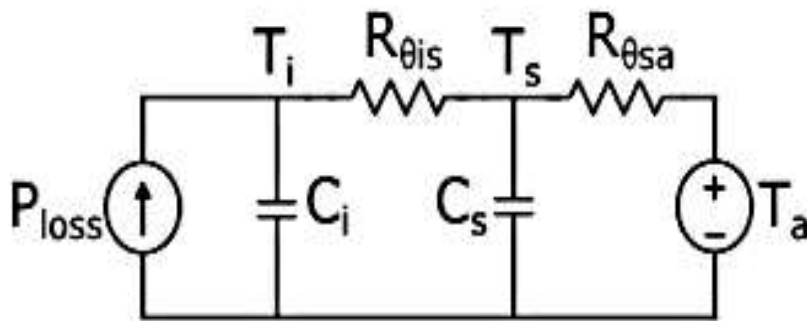


Fig. 4 Den andra föreslagna andra ordningens termiska modellen för cellen [1]

2.4 Reglering

Celltemperaturen kan regleras genom att utnyttja konstant temperatur-konstant spänningsladdningsmetoden (CT-CV). I detta examensarbete kommer denna regelmetod för laddning redovisas eftersom den kommer testas och regleras i Simulink.

2.4.1 PID-reglering

Det krävs att integralverkan kombineras med derivataverkan för att åstadkomma ett tillräckligt snabbt system som effektivt kan kompensera för stegstörningar. Eftersom styrsignaldelarna P, I och D adderas, kan formuleringen av PID-regulatorn betraktas som en parallellkoppling. Då derivatadelen dessutom låpassfiltreras erhålls följande PID-regulator [7].

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t') dt' + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4)$$

där $u(t)$ är regulatorns utsignal, K_p är proportional förstärkningen, $e(t)$ är reglerfelet, T_i är integrationstid och T_d är deriveringstid.

2.4.1.1 Framkoppling

Framkoppling används i de situationer då störningar är mätbara. För att eliminera dessa störningar är det bästa valet att kombinera återkoppling med framkoppling. Innan störningens inverkan upptäcks i processens utsignal, kan styrsignalen kompensera för uppmätta störningar. Därför kommer PID-regulatorn att kompletteras med en framkoppling i detta examensarbete [7].

2.4.1.2 PID-Reglering och Framkoppling

Figur 5 nedan visar ett blockschema för styrslingan för det föreslagna CT-CV-laddningsschemat. Den regulator som används är en standard PID-regulator kompletterad med framkoppling.

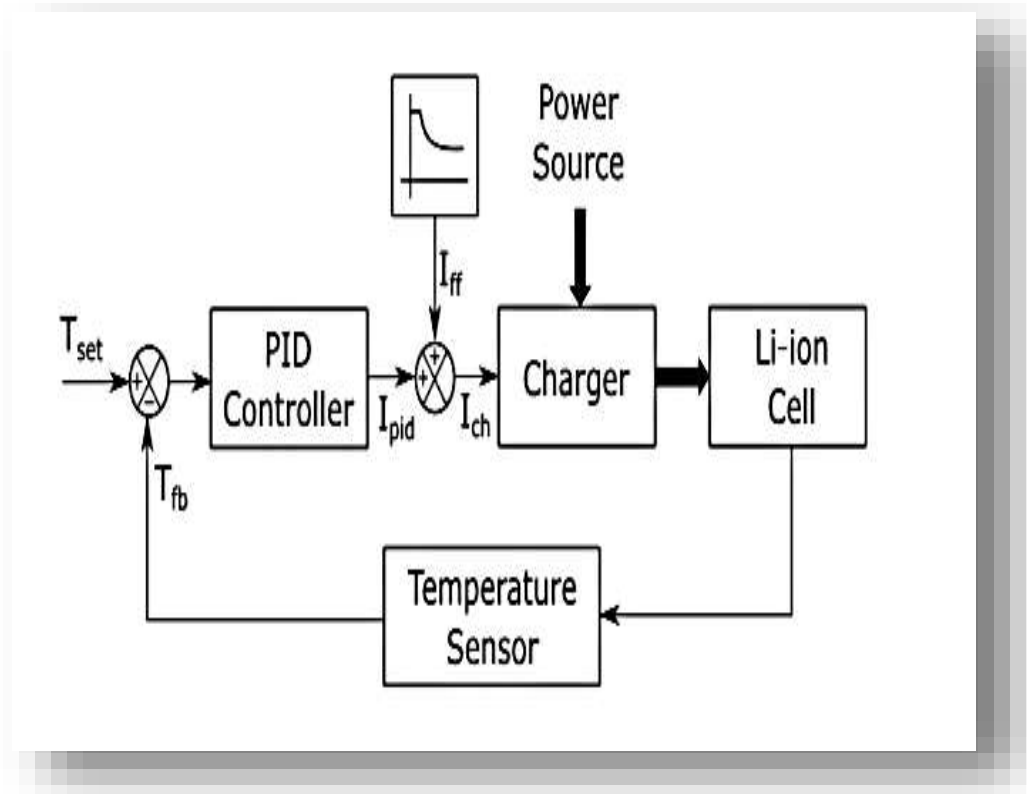


Fig. 5 Blockschema för CT-CV laddning [1]

I konstant temperatur-konstant spänningladdningsmetoden initieras strömmen med ett högt värde (t.ex. 2C) och därefter går den ner till ett slutligt värde på 1C under CT-läge. Kurvan visar tre olika steg för framkopplingsström under laddning. Det första steget hamnar mellan noll och peaktid (t_{pk}) och då motsvarar framkopplingsström 2C. Det andra steget hamnar mellan peaktid (t_{pk}) och konstantspänningstid (t_{cv}) och då beräknas framkopplingstermen med hjälp av följande formel:

$$C \left(1 + e^{-(t-t_{pk})/\tau} \right) \quad : \quad t_{pk} \leq t < t_{cv} \quad (5)$$

där C representerar C -rate av batteriet, t_{pk} är tiden som den initiala laddningsströmmen hålls vid sitt toppvärde ($2C$), t är tidskonstanten och t_{cv} är den tid då CV-läget uppnås.

Under de två ovan beskrivna stegen övervakar den föreslagna laddningstekniken celltemperaturen och reducerar laddningsströmmen för att begränsa temperaturökningen. CV-steget är det tredje och sista steget. Vid det steget har spänningsgränsen uppnåtts, och då skiftar laddaren från CT-läge till CV-läge, och de beräknade värdena från PID-regulatorn och framkopplingstermen är då inkonsekventa (\times) [1].

De tre ovan beskrivna stegen framgår av figur 6.

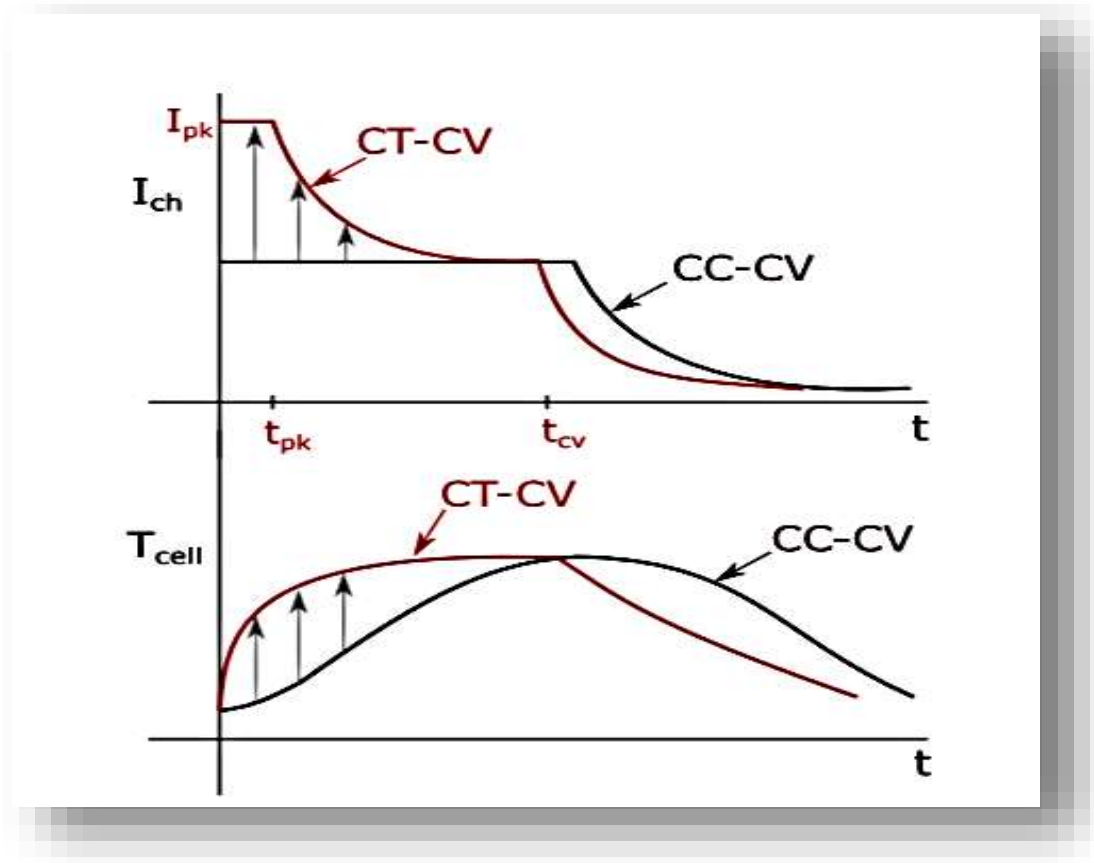


Fig. 6 Ström och temperatur för laddningsförloppet för de båda metoderna (CC-CV resp. CT-CV) [1]

Framkopplingstermen beräknas vid varje steg enligt figur 7.

$$I_{ff} = \begin{cases} 2C & : & 0 \leq t < t_{pk} \\ C(1 + e^{-(t-t_{pk})/\tau}) & : & t_{pk} \leq t < t_{cv} \\ \times & : & t > t_{cv} \end{cases}$$

Fig. 7 Framkopplingsström [1]

där C representerar C-rate av batteriet, t_{pk} är tiden som den initiala laddningsströmmen hålls vid sitt toppvärde ($2C$), t_{cv} är den tid då CV-läget uppnås och tau är tidskonstanten för det exponentiella avtagandet [1].

PID-återkopplingen kompletteras med framkoppling för att bibehålla celltemperaturen vid det inställda värdet. I avsaknad av framkopplingsterm, skulle PID-regulatorn behöva ha höga förstärkningar K_p , K_i och K_d för att styrenheten snabbt ska konvergera till lösningen. Dock kanske höga K_p , K_i , K_d inte är önskvärda, särskilt om det kommer in brus i signalen från temperatursensorn. Framkopplingstermen hjälper till att minska inverkan av detta problem [1].

Det är dock möjligt att förbättra prestandan för laddningstekniken genom att beräkna en framkopplingsterm baserat på den detaljerade elektriska och termiska modelleringen av Litiumjoncellen [1].

Flödesschemat över den kompletta algoritmen finns nedan för implementering av det föreslagna CT-CV laddningsprotokollet

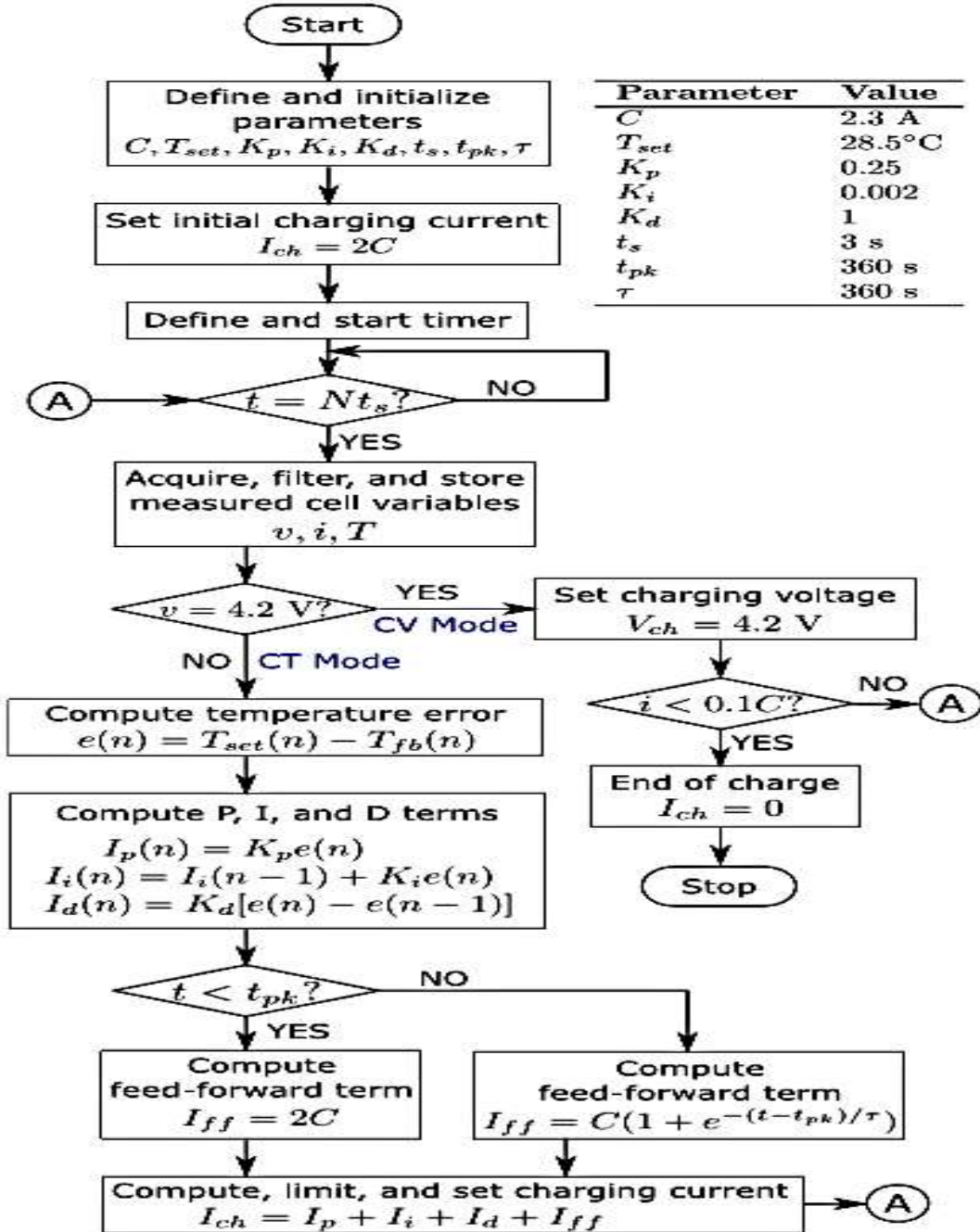


Fig. 8 Ett flödesschema för laddningsalgoritmen [1]

3 Metod

Arbetet delades in i tre olika faser: litteratursökning, tillvägagångssätt och simulering. Inledningsvis gjordes dock en beskrivning av examensarbetet med hjälp av ett gantt-schema. Ett Gantt-schema är en typ av schema som används för att visa hur arbetet fortskrider.

3.1 Litteratursökning

För att komma åt tidigare forskning inom det valda området och för att nå syftet med examensarbetet genomfördes en litteraturstudie. Källor söktes främst i flera databaser från exempelvis IEEE och ScienceDirect. För att hitta de mest relevanta artiklarna snabbt och för att begränsa sökresultatet valdes sökord såsom modellering, reglering, laddning och litiumjonbatteri. Andra källor valdes också med noggrannhet från officiella webbsidor såsom MathWorks eftersom de hämtades från databaser som räknas som pålitliga.

3.2 Tillvägagångssätt

Arbetet påbörjades genom att genomföra informationssökning för att hämta in allmän information om litiumjonbatterier, olika modeller av dem och olika laddningsmetoder. Fakta hämtades från trovärdiga källor (se 3.1). Dessutom bestämdes tillsammans med handledaren vilka källor som var bäst lämpade. Därför ansågs källorna både lämpliga och trovärdiga. För att uppnå examensarbetets syfte, krävdes ett simuleringsprogram som laddades ned i egen laptop och som också var möjligt att köras på Campus Helsingborg vid behov. Eftersom arbetet diskuterades regelbundet varje vecka så utfördes delar av arbetet på Campus Helsingborg.

Av nedanstående (figur 9) framgår vilka aktiviteter som skedde i arbetets olika faser. Den tiden för arbetet räknades till ungefär sexton veckor. Förstudier och förberedelse krävde fem heltidsveckor. Rapporten uppdaterades dagligen. Den mesta tiden spenderades på simulering. Den tog ungefär nio veckor att bli färdig med. Testning gjordes i varje steg av simuleringen utfördes för att se om resultaten och värdena blev rimliga. Den resterande tiden gick åt till projektanalys, granskning av annans rapport och förberedelse av presentationen.

#	Aktivitet	Beroende	Vecka																
			35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	
A1	Förstudier																		
A2	Förberedelse	A1																	
A3	Rapportskrivning 1	A2																	
A4	Simulering																		
M1	Test																		
A5	Projektsanalys och Rapportskrivning 2																		
A6	Granskning av rapport																		
A7	Förberedelse av presentation																		
M2	Redovisning																		

Fig. 9 Tidsplanering via gantt-schema

3.3 Simulering

Simulering var en viktig del av examensarbetet eftersom det var den enda del som användes för att studera resultatet. Det var alltså inte tänkt att utföra experiment. Modellerna och metoderna undersöktes och utvärderades istället genom simulering. Simuleringsmiljön som användes var Matlab/Simulink.

3.4 Källkritik

Källa [1] kan anses vara trovärdig för att den är skriven av tre personer vilka är en professor, en doktorand och en framtida doktorand. Källan är tagen från IEEE vilken har vetenskapligt granskade källor.

Källa [2] är en E-bok, skriven av Richard M. Murray som är forskare. Dessutom är den skriven av Karl Johan Åström, professor i reglerteknik och en av världens främsta reglertekniker, som har skrivit flera böcker inom området. Därför kan denna källa anses vara tillförlitlig.

Källa [3] och Källa [10] kan anses vara trovärdiga eftersom information är tagen från MathWorks. Det är de som egentligen utvecklar och säljer programvaran MATLAB och Simulink.

Källa [4] är en E-bok, skriven av Katarina Blom som jobbar som doktorand i matematik och som sedan många år arbetar som lektor på Chalmers tekniska högskola där hon undervisar i framförallt matematik, programmering och numerisk analys. Källan kan anses vara trovärdig.

Källa [5] kan anses vara trovärdig eftersom information är tagen från en amerikansk webbplats som heter HowStuffWorks. Webbplatsen är grundad av professor och författare Marshall Brain. Webbplatsen använder olika medier för att förklara komplexa begrepp, komplex terminologi och komplexa mekanismer, till exempel fotografier, diagram, videor, animationer och artiklar.

Källa [6] är tagen från IEEE. Källan är skriven av flera professorer som jobbar på institutionen för informationsteknik: Elektronik, datavetenskap och telekommunikation i University of Pisa i Italien. En av dem heter Federico Baronti. Han fick priset för bästa papper från IEEE Industrial Electronics Magazine 2013. Därför kan denna källa anses vara tillförlitlig källa.

Källa [7] kan anses vara trovärdig eftersom information är tagen från ett läromedel som heter *Reglerteknikens grunder*, skriven av professor Bengt Lennartson.

Källa [8] är en artikel som är skriven av tre doktorander som jobbar i University of Strasbourg i Frankrike. Därför kan denna källa anses vara tillförlitlig källa.

Källa [9] är tagen från IEEE. Källan är skriven av flera professorer. Källan är tagen från IEEE vilken har vetenskapligt granskade källor. Därför kan denna källa anses vara tillförlitlig.

Källa [11] kan anses vara trovärdig eftersom den är en artikel som är skriven av fyra professorer som jobbar på institutionen för informationsteknik i University of Science and Technology i Kina.

Källa [12] kan ses vara trovärdig eftersom den är skriven av flera professorer och doktorander som deras forskningar ligger inom batteriområdet.

4 Utförande

I detta avsnitt förklaras i detalj vad som utförts under examensarbetet och vilka signaler och parametrar som valdes i själva Simulink/Simscape för de båda reglermetoderna.

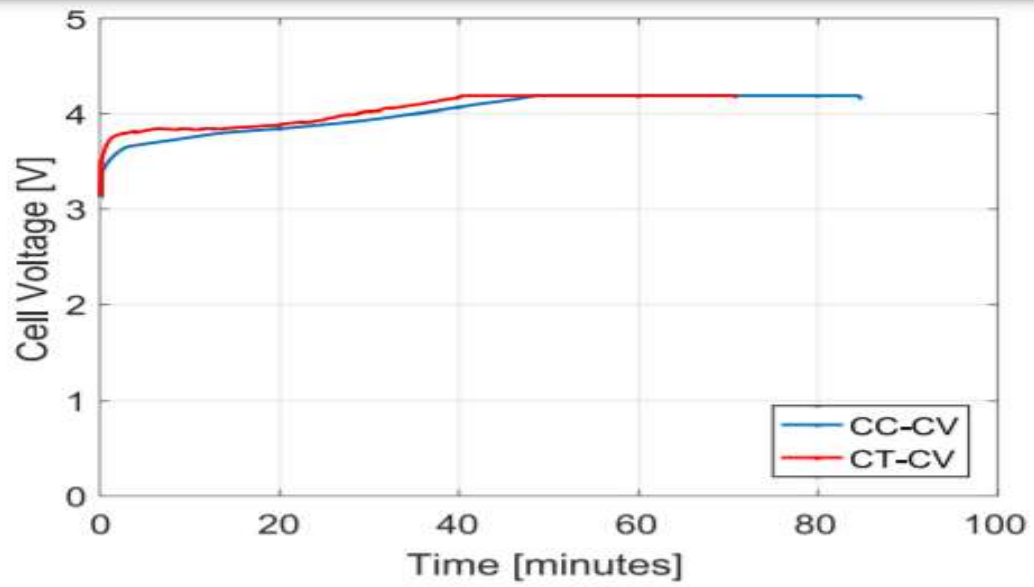
4.1 Första ordningens elektriska modell för både CC-CV och CT-CV

I det här avsnittet presenteras den första ordningens modellen utifrån hur den kopplades med hjälp av formler och figurer.

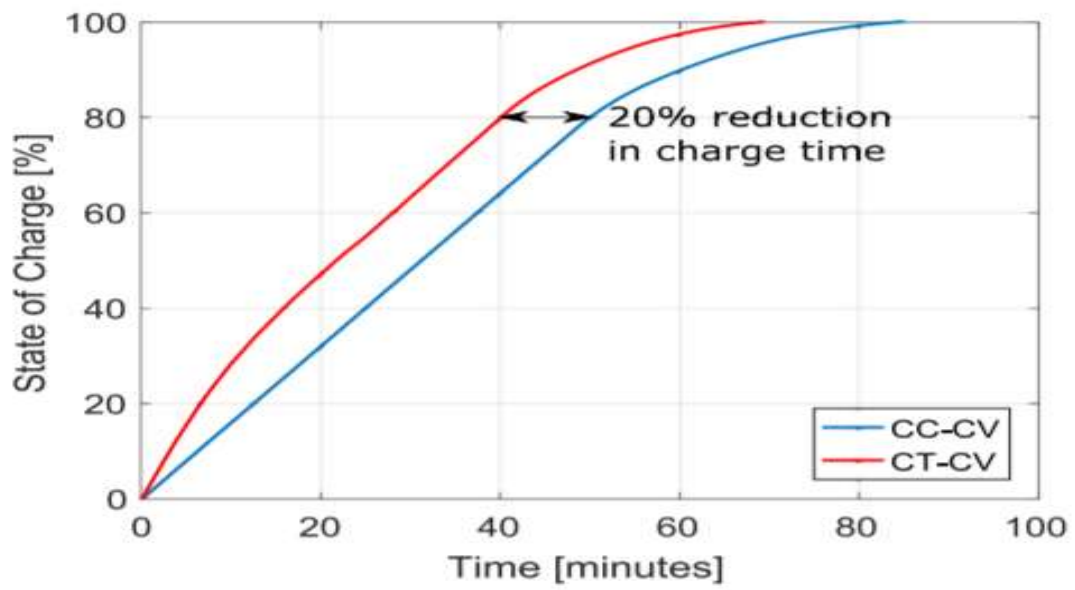
Den elektriska modellen var bestämd utifrån att kretsen var konstruerad för laddning, vilket betyder att laddningsströmmen var negativ (se Fig. 1). För att laddningsströmmen senare i figuren ska visas i positiv riktning måste den multipliceras med -1.

Fig. 1 visar den elektriska modellen av första ordningen. Den första resistansen var given och hade värdet 0.07 ohm medan den andra resistansen som var kopplad till kondensatorn hade värdet 0.01 ohm, se Tabell.1. Kondensatorn hade värdet 50000 F, värdet av kondensatorn hämtades från avsnittet 3.1 ur källan [11]. Laddningstillståndet beräknades med Coulombberäkningsmetoden som utförs genom att integrera laddningsströmmen. Efter att laddningstillståndet erhöles i amperetimmar beräknades det olinjära förhållandet mellan laddningstillstånd och öppen kretsspänning. Denna relation användes för att beräkna den öppna kretsspänningen från det uppmätta laddningstillståndet.

Värdena för både öppen kretsspänning och laddningstillstånd valdes att skrivas i en tabell i Simulink. Värdena som anges nedan erhöles genom att för varje tidpunkt i delgraferna (c) och (b) i Fig. 10 avläsa laddningstillstånd och spänning.



(b)



(c)

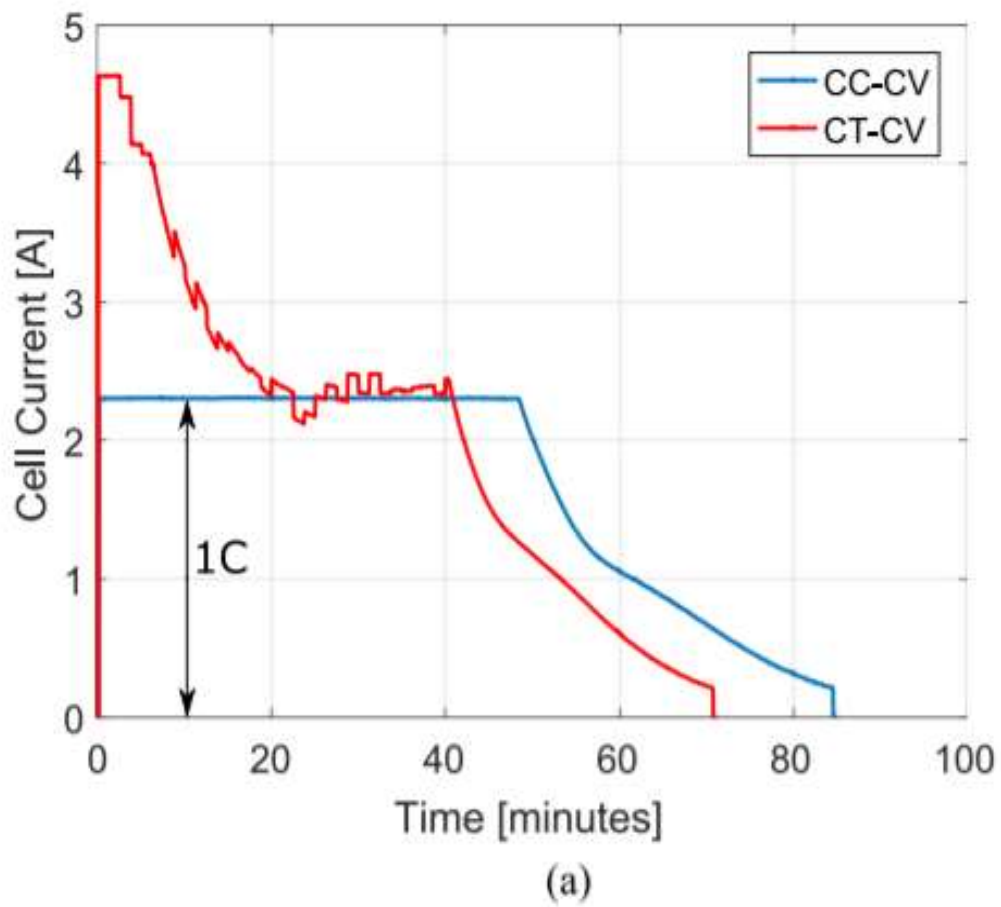


Fig. 10 Öppen kretsspänning, laddningstillstånd och cellens ström [1]

Tabell.2 Förhållandet mellan laddningstillstånd och öppen kretsspänning (se Fig. 10).

Laddningstillståndsinmatning	Öppen kretsspänningsinmatning
0	2.85
0.1000	3.0
0.2000	3.1500
0.3000	3.2813
0.4000	3.4125
0.5000	3.5438
0.6000	3.6750
0.7000	3.8063
0.8000	3.9375
0.9000	4.0687
1	4.2000

4.2 Andra ordningens termisk modell för både CT-CV och CC-CV

Den termiska modellen kopplades enligt Fig. 2. Här förklaras mer ingående hur den byggdes upp i Simulink och vilka värden som matades in.

Kopplingen bestod av två termiska RC- nätverk. I Simulink valdes den första resistansen till 10 K/W medan den andra valdes till 18 K/W. Dessutom, i enlighet med Fig. 2, kopplades de två kondensatorer upp men i själva simuleringen i Simulink hittades ingen termisk kondensator, och då användes istället termisk massa med specifik värme för 30 J/kg/K (se Fig. 13) för den ena och 55 J/kg/K (se Fig. 13) för den andra med startvärdet för temperaturen satt till omgivningens temperatur 21°C [1].

I simulering av den termiska modellen användes två termiska sensorer för mätning av cellens interna temperatur och yttemperatur. Yttemperaturen är viktig att mäta och regleras med PID-regulatorn för att den inte ska överskrida 28.5°C (se Fig. 13).

4.3 Elektro-termisk modell

Kopplingen mellan termiska och elektriska modeller gjordes i Simulink genom att använda generiska matematiska ekvationer och implementera dem genom användning av matematikblock eftersom alla ekvationer var ganska enkla i det här fallet.

På grund av att laddningströmmen gick genom seriemotstånden R_0 och R_1 , resulterade det i effektförlust. Effektförlusten gjorde att temperaturen höjdes och påverkade den interna batteritemperaturen. Sedan spreds värmen till batteriets yttre delar och höjde temperaturen där.

I Simulink implementerades effektförlusten enligt nedanstående formel:

$$P_{loss} = I_{ch}^2 (R_0 + R_1) \quad (6)$$

Effektförlusten beräknades genom att multiplicera den uppmätta laddningsströmmen i kvadrat med summan av resistorerna, vilka var 0.08 ohm (se Tabell.1) . Detta leder till en överskattning av förlusterna. Vidare kopplades denna till den termiska kopplingen.

4.4 batteriladdningens kretsmodell

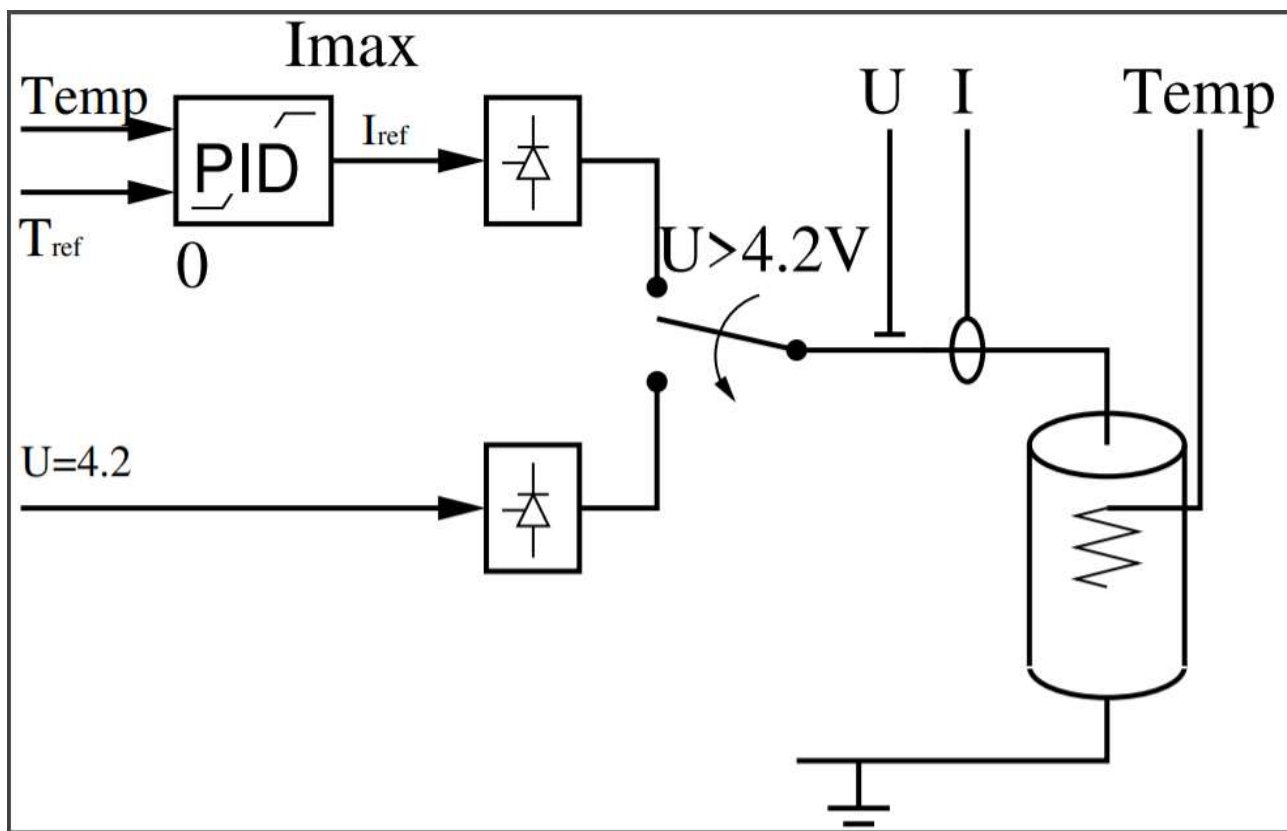


Fig. 11 CT-CV batteriladdningens kretsmodell

Batteriladdningskretsen kopplas med hjälp av algoritmen i Fig. 8. Utgångspunkten är att i CT-läge kommer tillförseln från en strömkälla medan i CV-läge kommer tillförseln från DC-spänningskällan. Laddaren är avsedd för 4.2V till full-laddning och övervakar batterispänningen under laddning. Under laddningen jämförs hela tiden batterispänning och värdet 4.2V som representerar full-laddning. Om spänningen fortfarande är under 4.2V är den i CT-läge men om laddningen når 4.2, då är den i CV-läge. I CV-läge blir temperaturen inte hög och det beror på att strömmen minskar efterhand som spänningen ökar och därmed blir temperaturen så småningom låg eftersom batteriet blir full-laddat. Spänningen i DC-spänningskällan valjs till 4.201V.

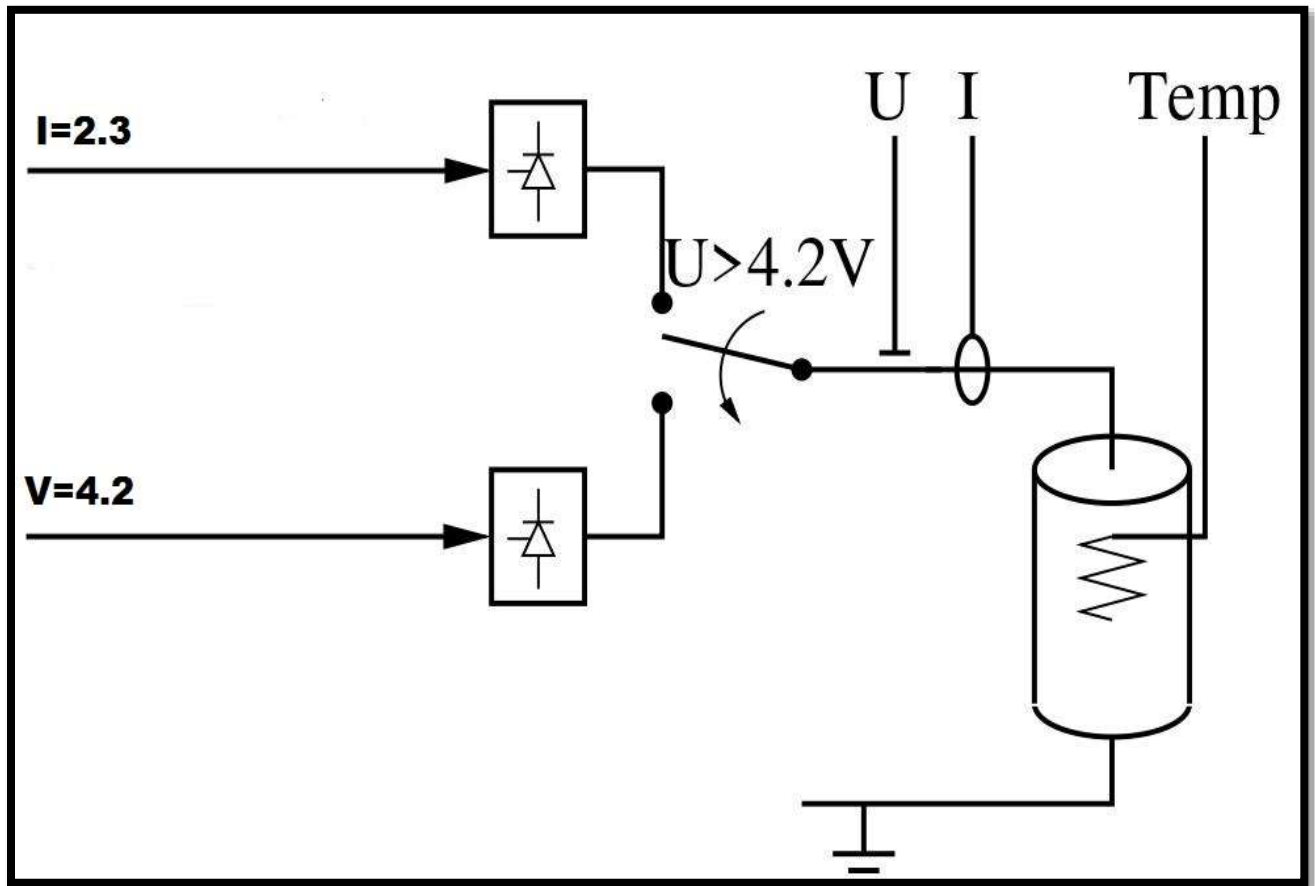


Fig. 12 CC-CV batteriladdningens kretsmodell

Utgångspunkten var att i CC-CV laddningsmetoden kommer tillförseln från en strömkälla. Strömkällan ger konstant ström som gör att spänningen höjs. Därmed höjs också temperature tills den når den maximala temperaturen. Spänningen som erhålls fastställs vid den maximala temperaturen. I CV-läget kommer tillförseln från den spänningkällan. Så länge spänningen blir konstant, minskar strömmen tills den ger ett full-laddat batteri.

4.5 PID- regulator och framkopplingsterm

4.5.1 CT-CV

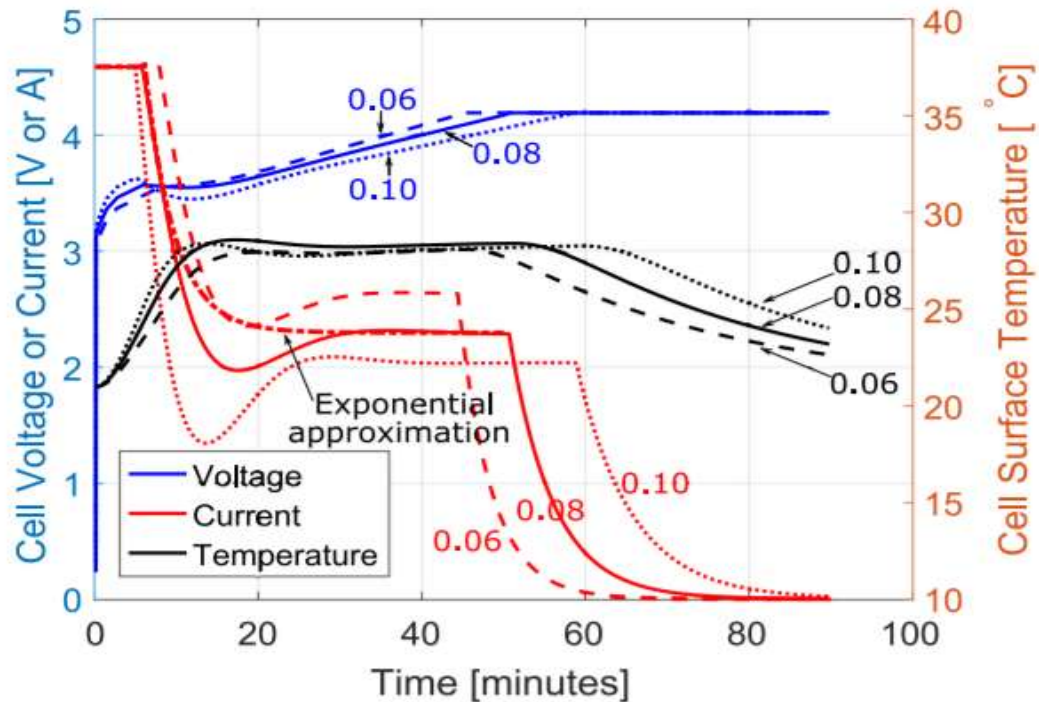


Fig. 4. Li-ion charge profiles obtained by numerical simulation using PLECS software for different values of $R_{int} = R_0 + R_1$, in ohms. Parameters: $K_p = 0.9$, $K_i = 0.0005$, $K_d = 0.05$, $I_{ff} = 0$, $T_{set} = 28.5$ °C, $C_i = 30$ J/K, $C_s = 55$ J/K, $R_{\theta is} = 10$ K/W, and $R_{\theta sa} = 18$ K/W.

Fig. 13 En samling ([1]) av olika figurer och inmatningsvärdena för olika $R_{int} = 0.06\Omega$, 0.08Ω och 0.10Ω .

I själva simuleringen i CT-CV reglermetod användes PID-regulatorn. PID-parametrarna som ställdes in i simulering var:

$K_p = 0.9$, $K_i = 0.0005$, $K_d = 0.05$ (se Fig. 13).

Det var möjligt att göra så att CT-CV laddning fungerade utan framkopplingsström, dvs $I_{ff} = 0$. Själva simuleringen liknar simuleringen i den ursprungliga källan [1], vilken också gjordes utan framkopplingsström.

Om framkopplingsström utnyttjades, skulle den endast hjälpa regulatorn att ta kortare tid att nå ett lämpligt värde på laddningsströmmen, och den skulle endast behöva ha ett litet värde på styrsignalen från själva PID-regulatorn.

4.5.2 CC-CV

I CC-CV simulering användes varken PID-regulator eller framkopplingsterm. Konstantströmmen ställdes in till 2.3A.

5 Analys och resultat

I detta avsnitt redovisas och analyseras själva resultatet av simuleringen för de två olika reglermetoderna och de jämförs med resultatet av referenssimuleringen. Det resultat som är kopplade till gjorda simuleringar kallas hädanefter simuleringsresultat, och de resultat som kopplas till den referensen det jämförs med kallas referensens resultat. Resultatet visar hur spänningen, strömmen, cellens ytemperatur och laddningstillståndet varierar vid flera tidpunkter.

5.1 Referensens CT-CV och CC-CV simuleringsresultat

I Fig. 13 avläses att i CT-läge är cellspänningen något mindre än 4.2V medan laddarens spänning hålls på 4.2V. Det lilla spänningsfallet över seriemotstånden skapar en liten laddningsström som minskar ner till en lägre nivå när cellspänningen närmar sig 4.2V. I CT-läge är startström vid 2C-rate, där C är 2.3A, vilket betyder att 2C har värdet 4.6A i början av laddningen. Laddningsströmmen börjar sen gå ner mot noll så fort cellspänningen nått 4.2 V (full-laddad cell).

Vid implementering av CC-CV och CT-CV märks att CT-CV startar med högre ström jämfört med CC-CV. Strömmen för CT-CV minskar via återkopplingen. Det märks också att CT-CV har 20% snabbare laddning. Detta syns tydligt speciellt när laddningstillståndet avläses mellan 70 och 80%. Då ses minskningen i laddningstiden vilken är cirka 20% (se Fig. 10).

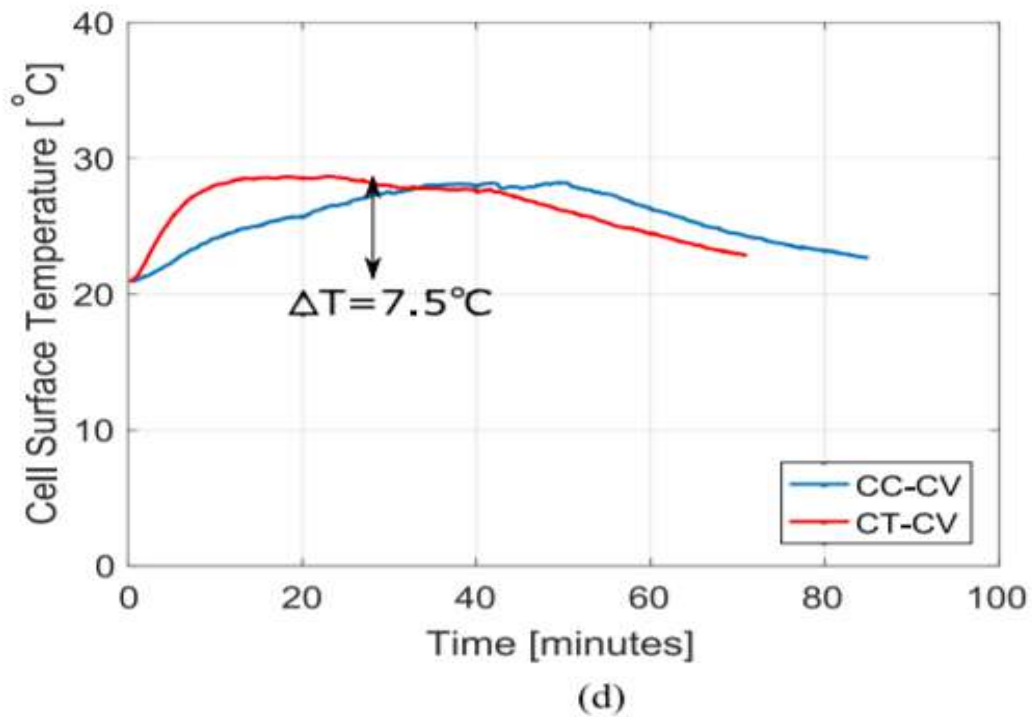


Fig. 14 Batteriets ytemperatur för de två olika metoderna [1]

Den blåa kurvan motsvarar CC-CV metoden. Figuren visar att temperaturen långsamt stiger till ett maximivärde som nås i slutet av CC-fasen av laddningen, så denna temperaturstegring är vanligtvis 2-8 grader beroende på typ av litiumjonceller. I CT-CV läge stiger temperaturen dock snabbt på grund av en högre startström för att sedan bli konstant i slutet av CT-fasen.

5.2 Simuleringsresultat

Simuleringsresultatet som jämför de två laddningsmetoderna illustreras med hjälp av fyra figurer, Fig. 15, 16, 17 och 18. Genomgående presenteras resultat kopplade till CT-CV med röd färg och CC-CV med blå färg. För det första handlar det om batteritemperatur:

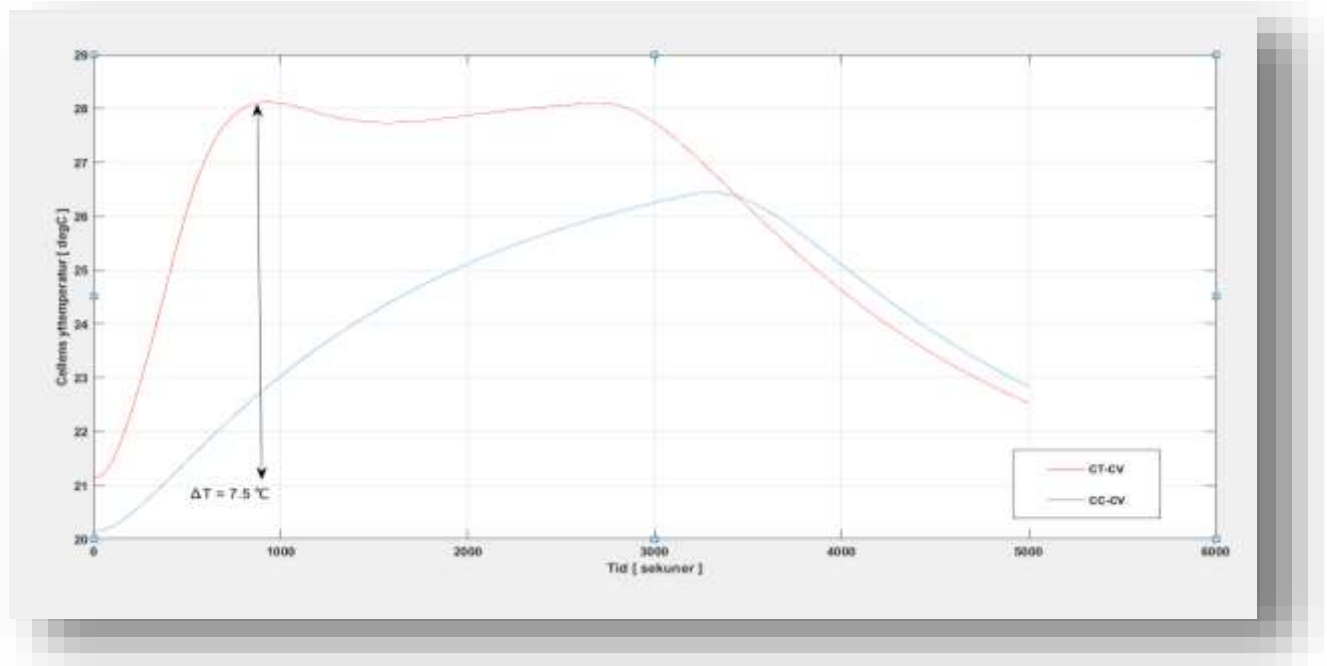


Fig. 15 Batteritemperatur för de två olika metoderna, jämför Fig. 13 och Fig. 14.

Fig. 15 visar att resultaten liknar referensens resultat i enlighet med Fig. 13 och Fig. 14. Skillnaderna består i den tid det tar att nå maximal yttemperatur. Det handlar alltså om att skillnaderna visar sig vid varje tidpunkt, i detta fall vid maximal yttemperatur. I CT-CV läge ses att för att uppnå den högsta temperaturen (28.5 °C), tog det ungefär 800 sekunder. För CC-CV nås den högsta temperaturen vid ungefär 3400 sekunder vid avläsning av Fig. 15.

Batteriets maximala yttemperatur för CT-CV inträffar 600 sekunder efter start, medan för CC-CV inträffar det 3000 sekunder efter start, vid avläsning av Fig. 14. Sammanfattningsvis gäller att maximala yttemperaturen uppnås snabbare i CT-CV. Detta stämmer bra överens med resultatet i Fig. 13 och Fig. 14.

För det andra handlar det om laddningstillståndet.

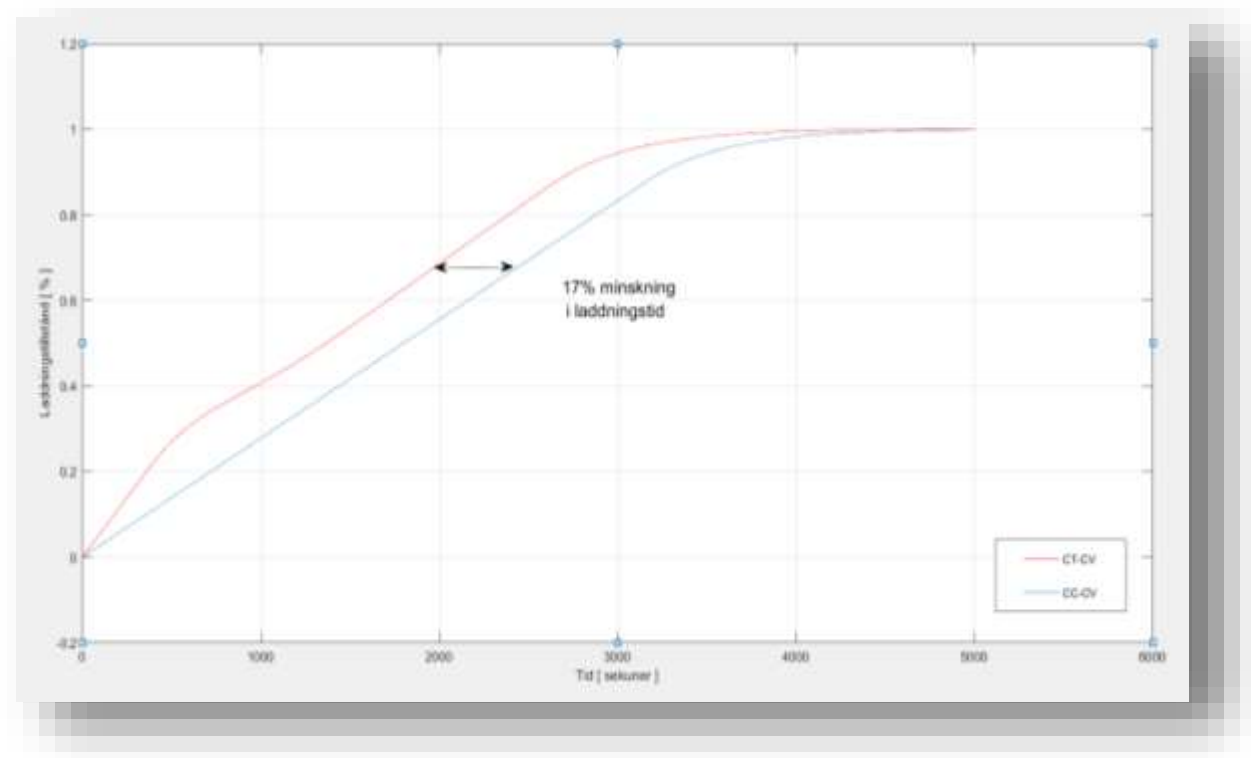


Fig. 16 Laddningstillstånd för de två olika metoderna, jämför Fig. 10.

Figuren visar att laddningstillståndets intervall går mellan 0 och 1 vilket motsvarar 0%, som representerar ingen laddning respektive 100% för full-laddning. Vid jämförelse mellan CT-CV och CC-CV märks att vid 2000 sekunder ligger CT-CV laddningstillståndet på 70%, medan denna nivå uppnås först vid 2400 sekunder för CC-CV. Detta betyder att laddningstiden för CT-CV jämfört med CC-CV minskats med $100\% \cdot (2400 - 2000) / 2400 = 100\% \cdot 400 / 2400 = 100 / 6\%$ dvs ungefär 17%.

Av fig. 14 framgår att resultaten liknar referensens resultat (se Fig. 10 c). Om dess resultat avläses vid 40 minuter (2400 sekunder) ses att batteriet laddas till 80% i CT-CV. För CC-CV är batteriet laddat till 80% först vid 48 minuter. Detta ger en reduktion av laddningstiden med $100\% \cdot (48 - 40) / 48 = 100 / 6\%$ vilket är ungefär 17%. Resultaten stämmer alltså väl överens numeriskt, även om referensen avrundat uppåt till 20%.

För det tredje handlar det om cellens spänning.

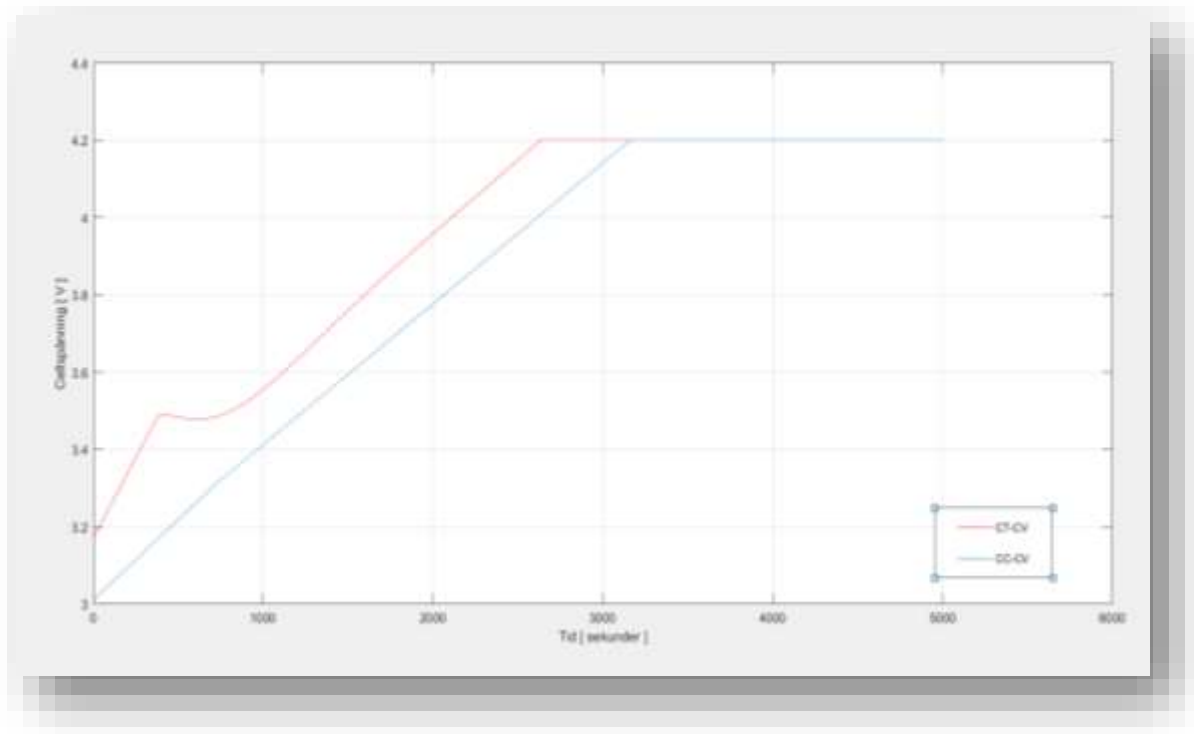


Fig. 17 Cellens spänning för de två metoderna, jämför Fig. 13.

Vid jämförelse med cellens spänning i Fig. 13 framgår att i CT-CV metoden blir batteriet full-laddat (4.2 V) vid 50 minuter (3000 sekunder) i referensen, medan i föreliggande undersökning tar det ungefär 2600 sekunder för batteriet att bli full-laddat. Sammantaget visar detta att batteriet laddas snabbare i CT-CV. Detta överensstämmer alltså väl med resultatet i Fig. 13.

För det fjärde handlar den om cellens ström.

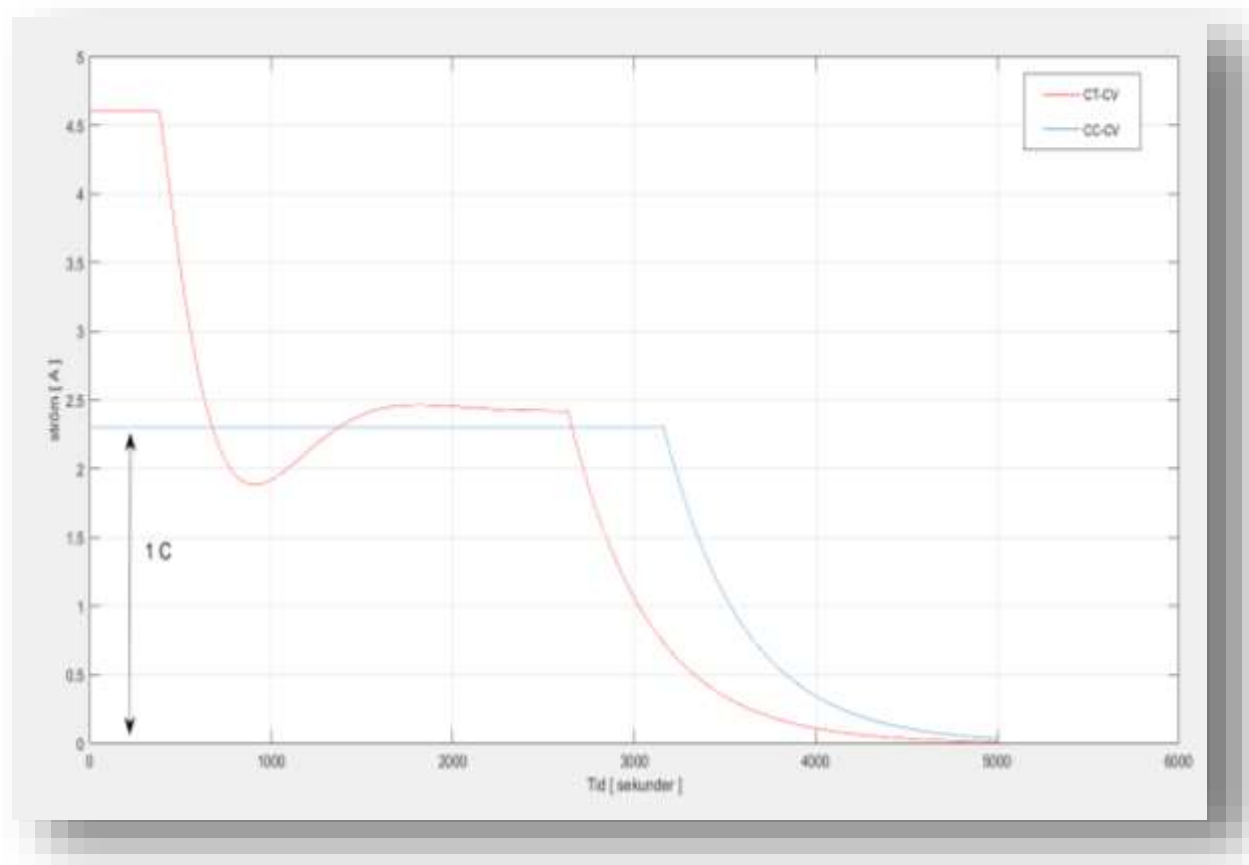


Fig. 18 Cellens ström för de två olika metoderna, jämför Fig. 13.

Det framgår att resultatet liknar referensens CT-CV resultat (Fig. 10). De ger samma form. Startvärdena för de två metoderna är dock olika. Startvärdet från denna simulering för CT-CV är 4.6A. Sedan går strömmen ner till 2.45A och slutvärdet är drygt 2.4A. För CC-CV börjar strömmen vid 2.3A. I fig. 13 ses att det tar drygt 50 minuter (3200 sekunder) att nå tidpunkten för byte till CV-läge vilket är vid 1C-rate(2.3A). Simuleringsresultatet når 1C-rate vid byte till CV-läge vid ungefär 2600 sekunder. Den enda skillnaden är tiden. Sammantaget visar resultatet alltså att strömmen når ett visst läge snabbare jämfört med Fig. 13 för CT-CV.

Simuleringsresultatet liknar referensens resultat för de olika parametrarna angående ström, spänning och ytemperatur. Det enda som skiljer sig åt är laddningstid. Skillnaden i tid kan bero på att under simuleringen användes termisk massa istället för termisk kondensator på grund av att det i Simscape inte finns någon termisk kondensator. Dessutom kan förhållandet mellan öppen kretsspänning och laddningstillstånd som lagts in i tabellen vara en anledning till denna skillnad. Värdena kan inte heller avläsas med tillräcklig noggrannhet i Fig. 10. Dessa anledningar gör att cellens parametrar ändras och detta påverkar även batteriets specifikationer som leder till ändring av laddningstid.

5.2.1 Framkoppling

Framkopplingsström används varken i detta resultat eller i Fig. 13. Vid simuleringen märks varför referensen inte använder framkoppling; Den ger mycket hög yttemperatur vilken skadar batteriet. Figurerna nedan illustrerar problemet.

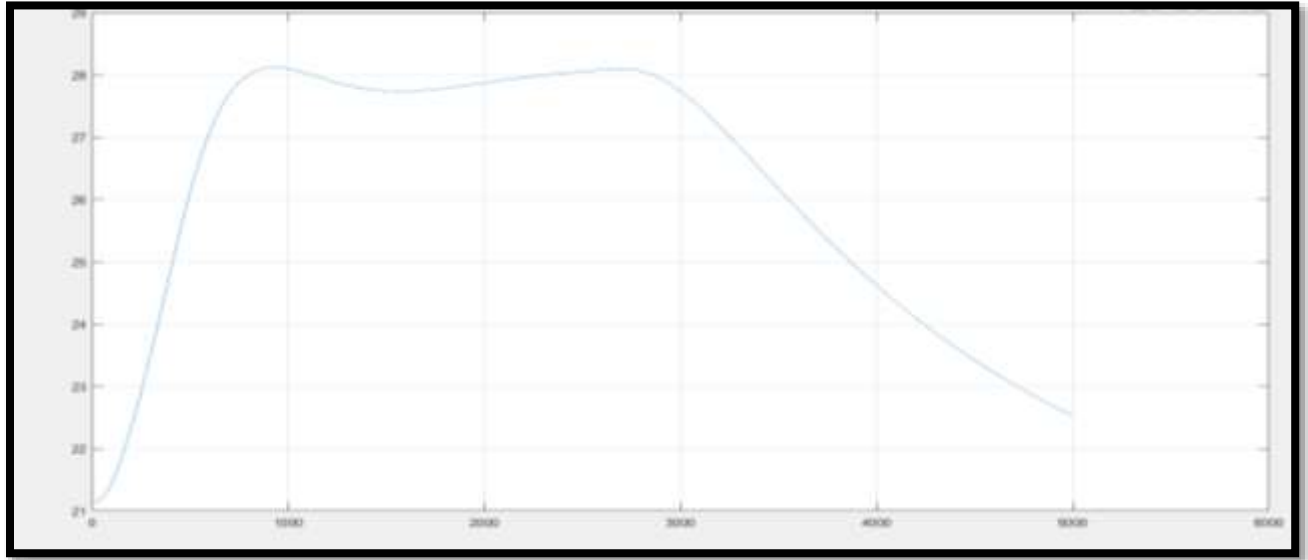


Fig. 19 Cellens temperatur utan framkoppling

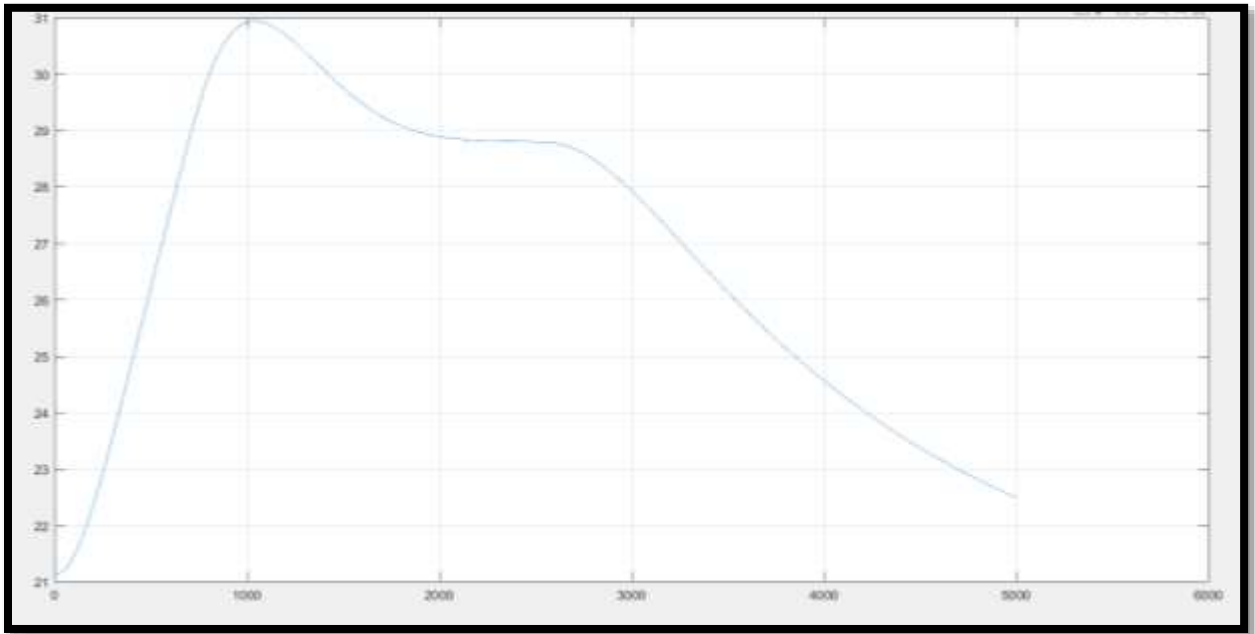


Fig. 20 Cellens temperatur med framkoppling

6 Slutsats

Detta examensarbete har simulerat två olika reglerstrategier för den valda modellen för en litiumjoncell, vilket implementerades i Matlab/Simulink och särskilt med Simscape och dess bibliotek. Simulering ger en helhetsbild av vilken reglermetod som är bäst utifrån olika kriterier. I detta kapitel kommer slutsatser att dras genom att gå igenom resultatet i jämförelse med arbetetmål och problemformuleringar.

1- Vilken modell ska användas för att utvärdera reglermetoderna?

Den som användes var en batterimodell som består av en första ordningens elektrisk modell och en andra ordningens termisk modell för både CT-CV och CC-CV.

2- Vilka två reglermetoder ska testas?

Testet genomfördes med CT-CV och CC-CV reglermetoderna i ett litiumjonbatteri.

3- Vilka kriterier ska användas för att avgöra vilken reglermetod som är bäst?

Kriterierna som användes var genom att se vilken reglermetod ger snabbare laddning samtidigt som temperaturen inte överskred den maximala temperaturen. Detta uppnåddes genom att använda PID-reglering baserat på återkoppling från celltemperaturen. Laddningstiden är mindre med CT-CV vilket betyder att laddningen blir snabbare.

4- Hur ska parametrarna ställas in i reglermetoderna?

Parametrarna ställdes in med hjälp av Fig. 13 och Tabell.1 och PID-regulatorn ställdes in med de PID-förstärkningar som erhöles ur Fig. 13.

6.1 Reflektion över etiska aspekter

Denna laddningsmetod kommer att påverka miljön på ett positivt sätt, genom att ge lång livslängd på litiumjonbatterier. Den är dessutom tidsbesparande för användaren eftersom laddningen går snabbare än den vanligen använda laddningsmetoden CC-CV. Genom att övervaka temperaturen och minska den så att inte överskrider den maximala temperaturen blir litiumjonbatterier inte skadade eller börjar brinna och orsaka skador på människor och miljö.

6.2 Framtida utvecklingsmöjligheter

- En mer avancerad batterimodell som bättre kan förutsäga intern temperatur, yttemperatur och batterispänning för laddning och urladdning skulle kunna utvecklas.
- CT-CV-laddningsmetoden kan undersökas ifall batteriet kan laddas väldigt snabbt genom att ha den initiala strömmen i CT-fasen större än den använda i examensarbetet. I examensarbetet användes 2C, medan undersökningen kan tänkas ske för 3C eller 4C. Detta kan inte utföras utan att använda bättre kylmekanismer inuti cellen. Dessutom kan denna utvecklingsmöjlighet inte utföras med enbart elektroingenjörer utan det krävs samarbete med experter inom elektrokemi och termiska system.

7 Källförteckning

- [1] L. Patnaik, A. V. J. S. Praneeth and S. S. Williamson, "A Closed-Loop Constant-Temperature Constant-Voltage Charging Technique to Reduce Charge Time of Lithium-Ion Batteries," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 2, pp. 1059-1067, Feb. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2833038.
- [2] Karl J. Åström "Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Internet: http://www.cds.caltech.edu/~murray/books/AM05/pdf/am08-complete_22Feb09.pdf, 2009 [Januari 22, 2021].
- [3] J. Little; C. Moler. "Simulink". Internet: <https://se.mathworks.com/help/simulink/index.html>, 2019 [Februari 15, 2021].
- [4] K. Blom. [On-line] "Programmering med Matlab". Available: <https://www.bokus.com/bok/9789147127399/programmering-med-matlab/>, 2019 [Februari, 12, 2021].
- [5] B. Marshall. "How Lithium-ion Batteries Work". Internet: <https://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/lithium-ion-battery.html>, 2006 [Maj 18, 2021].
- [6] F. Baronti, G. Fantechi, E. Leonardi, R. Roncella and R. Saletti, "Effective modeling of temperature effects on lithium polymer cells," 2010 17th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2010, pp. 990-993, doi: 10.1109/ICECS.2010.5724680
- [7] B. Lennartson. 2002. "Reglerteknikens grunder". 4. Uppl. ISBN 9789144024165. Sweden: Chalmers Tekniska Högskola.
- [8] Madec M, Lallement C, Haiech J (2017) Modeling and simulation of biological systems using SPICE language. PLoS ONE 12(8): e0182385. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182385>
- [9] L. Gurjer, P. Chaudhary and H. K. Verma, "Detailed Modelling Procedure for Lithium-ion Battery Using Thevenin Equivalent," 2019 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECCT.2019.8869224.

[10] M. Woodward; T. Reeves. . ” Accelerating SERDES Simulation”.

Internet: <https://se.mathworks.com/company/newsletters/articles/accelerating-serdes-simulation.html/>, 2012

[Augusti 29, 2021].

[11] X.Xin, S. Li Wang, C.Mei Yu, J.Cong and J. Coffie-Ken, "A Novel State of Charge Estimation Method for Ternary Lithium Batteries Based on System Function and Extended Kalman Filter," 2020 10th Int. J. Electrochem. Sci., 15 (2020), pp. 2226 – 2242, doi: 10.20964/2020.03.47

[12] SASAKI, T, UKYO, Y, NOVÁK, P, " Memory effect in a lithium-ion battery," 2013 14th Nature Materials, 2013, pp. 569 – 575, doi: 10.1038/nmat3623