



Forsuaret

Bacheloroppgave

OPG3301

Predefinert informasjon

Startdato:	26-11-2021 09:00	Termin:	2021 HØST
Sluttdato:	10-12-2021 20:00	Vurderingsform:	Norsk 6-trinns skala (A-F)
Eksamensform:	Oppgave		
Flowkode:	1627 OPG3301 1 O 2021 HØST		
Intern sensor:	Terje Fykse		

Deltaker

Naun:	Kristoffer Haukås
Kandidatnr.:	
FHS-id:	khaukas@mil.no, krishaukas@mil.no

Gruppe

Gruppenavn:	BMS
Gruppenummer:	9
Andre medlemmer i gruppen:	Herman Dammerud Karstensen



Sjøkrigsskolen

Bacheloroppgave

Battery Management System for Litium-Ion Batterier

Batteriutvikling via simulering i MATLAB

av

Herman D. Karstensen & Kristoffer Haukås

Levert som en del av kravet til graden:

BACHELOR I MILITÆRE STUDIER MED FORDYPNING I LEDELSE -
MARINEINGENIØR VÅPENSYSTEMER, ELEKTRONIKK OG DATA

Innlevert: Desember 2021

Godkjent for offentlig publisering

Publiseringsavtale

En avtale om elektronisk publisering av bachelor/prosjektoppgave

Kadettene har opphavsrett til oppgaven, inkludert rettighetene til å publisere den.

Alle oppgaver som oppfyller kravene til publisering vil bli registrert og publisert i Bibsys Brage når kadetten(ene) har godkjent publisering.

Oppgaver som er graderte eller begrenset av en inngått avtale vil ikke bli publisert.

Vi gir herved Sjøkrigsskolen rett til å gjøre denne oppgaven tilgjengelig elektronisk, gratis og uten kostnader	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nei
Finnes det en avtale om forsinket eller kun intern publisering? (Utfyllende opplysninger må fylles ut)	<input type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Nei
Hvis ja: kan oppgaven publiseres elektronisk når embargoperioden utløper?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nei

Plagiaterklæring

Vi erklærer herved at oppgaven er mitt eget arbeid og med bruk av riktig kildehenvisning.

Vi har ikke nyttet annen hjelp enn det som er beskrevet i oppgaven.

Vi er klar over at brudd på dette vil føre til avvisning av oppgaven.

Dato: 10.12.2021

Herman D. Karstensen
Kadett navn

Herman Karstensen

Kristoffer Haukås
Kadett navn

KHaukås

Forord

Denne oppgaven er skrevet av Herman Dammerud Karstensen og Kristoffer Haukås i perioden oktober 2021 til desember 2021. Oppgaven er skrevet som en del av Bachelor i Militære studier med fordypning i ledelse – Marineingeniør våpensystemer, elektronikk og data ved Forsvaret Høgskole, Sjøkrigsskolen.

Oppgaven tar for seg vårt arbeid med utvikling av et Battery Management System som evner å simulere opp- og utlading av Litium-Ion batterier i MATLAB. Et overordnet mål med oppgaven er å kunne tilegne seg økt forståelse for utfordringene ved bruk av Litium-Ion batterier og å kunne bidra til økt kunnskap innenfor temaet. Leseren av denne oppgaven antas å ha generell kunnskap innenfor elektronikk og programmering.

Vi ønsker å rette en stor takk til forskerne Tareq Abou-Qassem og Halvard Olav Rusås ved Forsvarets Forskningsinstitutt for tips til oppgave og god faglig veiledning underveis. I tillegg ønsker vi å takke førsteamanuensis Alexander Sauter for god veiledning med oppgaveformulering og struktur. Uten deres bidrag ville ikke oppgaven vært den samme.

Bergen, Sjøkrigsskolen, 10.12.2021



Herman D. Karstensen



Kristoffer Haukås

Sammendrag

Litium-Ion batterier har de siste årene blitt den fortrukne spenningskilden til bruk i bærbare elektriske enheter. Batteritypen har god energitetthet per volum og vekt, noe som gjør den ideell til bruk i elektriske enheter der størrelse og vekt er en begrensende faktor. Ulempen med denne type batterier er at det krever høy grad av kontroll og styring for å kunne operere sikkert. Løsningen på dette er å implementere et Battery Management System som evner å overvåke, kontrollere og optimalisere batteriet. Denne oppgaven har **utviklet et system for opp- og utlading av Litium-Ion batterier**. Av sikkerhets- og utviklingshensyn er oppgaven utviklet gjennom simulering i MATLAB.

Opgavens mål ble delt i flere delmål. Først skulle det utvikles en modell for en Li-Ion celle. Videre skulle det utformes en simulert elektrisk krets som realistisk evner å simulere opp- og utlading av et batteri bestående av seks Litium-Ion celler. Til slutt skulle det designes en aktiv- og passiv balanseringsmetode som evner å utjevne cellenes ladetilstand i løpet av oppladingen av batteriet.

Det ble demonstrert at det utviklede systemet klarer å utføre opp- og utlading av seks Litium-Ion battericeller i serie. I tillegg er det utviklet tre forskjellige balanseringsmetoder, hvor to av disse evner å balansere batteriene i løpet av oppladingen av batteriet. Det drøftes om hvor vidt systemet fungerer i henhold til kravene i oppgaven, og om systemet er utviklet og fungerer på en realistisk måte.

Konklusjonen er at systemet evner å utføre kravene som er satt i problemstillingen. Til tross for dette, er ikke systemet klart for videre testing på fysiske komponenter. For å kunne gå videre med dette må det simulerte systemet benytte parametere fra virkelige komponenter, som må tas inn allerede under designfasen. Dette vil gi en mer realistisk simulering, som er nødvendig for å kunne teste systemet med fysiske komponenter og battericeller.

Innholdsfortegnelse

Publiseringsavtale	ii
Forord	iii
Sammendrag.....	iv
Innholdsfortegnelse.....	v
Figurer	vii
Tabeller	ix
Forkortelser	x
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	2
1.3 Avgrensinger	3
1.4 Struktur	3
2 Teori.....	4
2.1 Terminologi innenfor batteriteknologi	4
2.2 BMS – Battery Management System	6
2.2.1 Constant Current-Constant Voltage opplading	7
2.2.2 Balansering	8
2.3 Modellering av Li-Ion batterier	11
2.3.1 Sikkerhet.....	13
2.4 Simulering i MATLAB	14
2.4.1 Simulink og Simscape	14
2.4.2 Utvikling av BMS i MATLAB.....	15
3 Metode	17
4 Utvikling av systemet	18
4.1 Battericellene	19
4.1.1 Celle og datablad	20
4.1.2 Sensorer	20
4.2 Balansering	21
4.2.1 Passiv balansering	21
4.2.2 Aktiv balansering.....	22
4.3 Temperaturoverføring.....	24
4.4 Kontroll- og overvåking	25
4.4.1 Balanserings Logikk.....	25

4.4.2	Multiple Windings Tranformer Logikk	27
4.4.3	Overvåking.....	28
4.4.4	Simuleringskontroller	29
4.5	Opp- og utlading	30
4.5.1	CCCV-lader	31
4.5.2	Utlading ved konstant negativ strøm	31
5	Resultater.....	32
5.1	Opp- og utlading av batteri	32
5.1.1	Test 1 - Opplading	32
5.1.2	Test 2 – Utlading.....	33
5.1.3	Test 3 – Oppnå 100% State of Charge.....	35
5.2	Balansering	37
5.2.1	Passiv balansering	37
5.2.2	Aktiv Balansering	42
6	Drøfting.....	46
6.1	Batteri.....	46
6.2	Krets.....	48
6.3	Simulering	49
6.4	Balansering	50
6.5	Systemet i den virkelige verden.....	51
7	Avslutning.....	53
7.1	Anbefaling for videre arbeid.....	54
	Referanseliste.....	55
	Vedlegg	58
	Vedlegg 1: Dokumentasjon for SANYO UR18650W	58
	Vedlegg 2: Kode for startparametere	59
	Vedlegg 3: Kode for plotting av resultater.....	62

Figurer

<i>Figur 2.1: CCCV oppladingsgraf (Andrea, 2010, s. 36)</i>	7
<i>Figur 2.2: Batteri som blir ubalansert over tid. (Andrea, 2010, s. 25)</i>	8
<i>Figur 2.3: Kapasitetsøkning ved balansering (Andrea, 2010, s. 27)</i>	9
<i>Figur 2.4: Metoder for aktiv balansering (Daowd, Omar, Van Den Bossche, & Van Mierlo, 2011)</i>	10
<i>Figur 2.5 Modellskisse av Switched Capacitor Equalizer (Moral, et al., 2019)</i>	10
<i>Figur 2.6: Multi Windings Transformer (Daowd, Omar, Van Den Bossche, & Van Mierlo, 2011)</i>	11
<i>Figur 2.7: En enkel RC-krets med to motstander og en kondensator. (Andrea, 2010, s. 11)</i>	11
<i>Figur 2.8: Spenningsfallet i den simulerte battericellen og komponentenes påvirkning på spenningsgrafen. (Ahmed, et al., 2015)</i>	12
<i>Figur 2.9: De tre faser for utviklingen av en BMS. Fra simulering til implementering av det fysiske produktet (The MathWorks, Inc, 2018)</i>	16
<i>Figur 4.1: Systemet i sin helhet</i>	18
<i>Figur 4.2: Batteri med seks celler i serie</i>	18
<i>Figur 4.3: Undersystemet til battericelle</i>	19
<i>Figur 4.4: Utklipp av databladet til SANYO UR18650W</i>	20
<i>Figur 4.5: Undersystemet til batterisensorene</i>	21
<i>Figur 4.6: Undersystemet til den passive balanseringen</i>	21
<i>Figur 4.7: Oversikt over Switch Capacitor Equalization i Simulink</i>	22
<i>Figur 4.8: Bryterens åpen/lukke-periode. Blå graf er oddetallsbrytere og gul graf er partallsbrytere</i>	22
<i>Figur 4.9: Multiple Windings Tranformer</i>	23
<i>Figur 4.10: System for temperaturoverføring</i>	24
<i>Figur 4.11: Undersystemet til omgivelsene</i>	24
<i>Figur 4.12: Systemet for kontroll og overvåking</i>	25
<i>Figur 4.13: Kontrollblokk for passiv balansering</i>	25
<i>Figur 4.14: Koden i kontrollblokken</i>	26
<i>Figur 4.15: Kontrollblokk for MWT</i>	27
<i>Figur 4.16: Koden til MWT logikken</i>	27
<i>Figur 4.17: Eksempel på hvordan parameterne overvåkes</i>	28
<i>Figur 4.18: Eksempel på grafisk overvåking</i>	29
<i>Figur 4.19: Undersystemet til simuleringskontroller</i>	29
<i>Figur 4.20: Kode for simuleringskontroller</i>	30
<i>Figur 4.21: Opplading og utladning ved den tidsinnstilte bryteren</i>	30
<i>Figur 4.22: Undersystemet til CCCV-lader</i>	31
<i>Figur 5.1: CCCV-opplading ved 0 °C. Til venstre: Strøm (oransje) og spenning(svart). Til høyre: Temperatur</i>	32
<i>Figur 5.2: CCCV-opplading ved 20 °C. Graf 3 til venstre og graf 4 til høyre</i>	33
<i>Figur 5.3: CCCV-opplading ved 40 °C. Graf 5 til venstre og graf 6 til høyre</i>	33

<i>Figur 5.4: CC-utlading med 0,5C</i>	34
<i>Figur 5.5: CC-utlading med 1C</i>	34
<i>Figur 5.6: CC-utlading med 2C</i>	34
<i>Figur 5.7: SOC-nivåene til battericellene med $V_{top} = 4.2V$</i>	35
<i>Figur 5.8: SOC-nivåene til battericellene med $V_{top} = 4.19V$</i>	36
<i>Figur 5.9: SOC-nivåene til battericellene med $V_{top} = 4.1895V$</i>	36
<i>Figur 5.10: Sammenligning av oppladingstid og temperatur under passiv balansering (Test 1)</i>	38
<i>Figur 5.11: Maksimal SOC differanse etter passiv balansering (Test 1)</i>	39
<i>Figur 5.12: Sammenligning av passiv balansering med forskjellige parametere (Test 1)</i>	39
<i>Figur 5.13: Oppladingstid og temperatur under passiv balansering (Test 2)</i>	40
<i>Figur 5.14: SOC differanse passiv balansering (Test 2)</i>	41
<i>Figur 5.15: Sammenligning av passiv balansering med forskjellig strømmengde og balanseringsmotstand (Test 2)</i>	42
<i>Figur 5.16: SOC-nivå til battericellen etter CCCV-opplading og SC-balansering. Kapacitans = 550F og motstand = 10 ohm</i>	43
<i>Figur 5.17: SOC-nivå til battericellen etter CCCV-opplading og SC-balansering. Kapacitans = 550F og motstand = 0.001 ohm</i>	43
<i>Figur 5.18: SOC-nivå til battericellen etter CCCV-opplading og SC-balansering. Kapacitans = 2265.3F og motstand = 15 ohm</i>	44

Tabeller

<i>Tabell 2.1: Sammenligning av SOC og DOD (Andrea, 2010, s. 19).....</i>	<i>5</i>
<i>Tabell 2.2: SOA til Li-Ion celler (Andrea, 2010, s. 6)</i>	<i>13</i>
<i>Tabell 5.1: Startparametere for balanseringstester</i>	<i>37</i>
<i>Tabell 5.2: Testresultater passiv balansering (Test 1)</i>	<i>38</i>
<i>Tabell 5.3: Skalerte testresultater og summen av disse (Test 1)</i>	<i>39</i>
<i>Tabell 5.4: Testresultater passiv balansering (Test 2)</i>	<i>40</i>
<i>Tabell 5.5: Skalerte testresultater for passiv balansering (Test 2).....</i>	<i>41</i>
<i>Tabell 5.6: Testresultater Multiple Windings Transformer (Test 1)</i>	<i>45</i>
<i>Tabell 5.7: Testresultater Multi Windings Transformer (Test 2)</i>	<i>45</i>

Forkortelser

BMS	Battery Management System
CC	Constant Current
CV	Constant Voltage
CCCV	Constant Current, Constant Voltage
COP26	UN Climate Change Conference 2021
DOD	Depth of Discharge
Li-Ion	Lithium-Ion
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
MWT	Multiple Windings Transformer
RC	Resistor Capacitor
SC	Switched Capacitor
SOA	Safe Operating Area
SOC	State of Charge

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

«Den menneskeskapte klima- og naturkrise er vår tids største utfordring.» (Arbeiderpartiet & Senterpartiet, 2021, s. 28) Slik starter kapitlet som omtaler den nye regjeringens klimapolitikk. Klima og miljø er et av de mest dagsaktuelle temaene i nyhetsbilde. En løsning på «vår tids største utfordring» vil kreve en innsats fra alle sektorer, inkludert den militære sektoren.

“Windier, wetter and wilder weather matters for everything our armed forces do. So this will impact our exercises, our capabilities and we are integrating this into our military planning and our capability development. So climate change matters for NATO because it matters for our security, and NATO is now addressing these challenges.” (Stoltenberg, 2021)

På grunn av klimautfordringer har det moderne samfunnet blitt mer avhengig av elektrisk energi. En utfordring med elektrisk energi er at det er utfordrende å lagre, og derfor har utvikling av alternative lagringsmetoder vært i søkelyset lenge. En løsning på problemet har vært oppfinnelsen av batteriet. I et batteri omdannes den elektriske energien til kjemisk energi. Dette gjør at energi kan lagres over tid. Under utlading vil den kjemiske energien bli omgjort til elektrisk strøm med en spesifikk spenning. (Kiehne, 2003, s. 1)

«Forsvaret kan spare både liv, penger og miljø ved å bruke batterier smartere» (Forseth, 2019, s. 22) Videre legger sjefsforsker Sissel Forseth ved Forsvarets Forskningsinstitutt fram tips til flere prosjekter som kan gjennomføres for å bedre Forsvarets klimaavtrykk, samt å gi operative fordeler. Et av disse prosjektene er å hybridisere marinen ved hjelp av Li-Ion batterier og diesel aggregat. Dette vil bidra til å redusere drivstofforbruk og samtidig føre til en positiv operativ effekt. Et eksempel på dette er at fartøyene vil ha muligheten til å seile med lavere signatur og dermed blir vanskeligere å oppdage. (Forseth, 2019)

Litium-Ion batterier har de siste årene blitt den fortrukne spenningskilden til bruk i bærbare elektriske enheter. Mye av grunnen til dette er batteriets energitetthet per volum og vekt. Det vil si at Li-Ion batteriene har stor kapasitet i forhold til størrelse, sammenlignet med andre oppladbare batterier. Den høye energitettheten skyldes at Li-Ion celler opererer på en høyere spenning (ca. 4V) enn andre batterikjemier. Dette bidrar til at denne batteritypen stadig får nye bruksområder, blant annet til bruk i elbiler og i

større framkomstmidler (Materials Science and Engineering Program & Texas Materials Institute, University of Texas, 2017)

En utfordring med Li-Ion batteriet er at batteritypen ikke kan opereres utenfor batteriets grenseverdier. Handlinger som strider imot batteriprodusentens anbefalinger for utnyttelse av batteriet, kan medføre skade på batterisystemet og/eller personell. Dette fører til et behov for en effektiv kontroll og styring av batteriet gjennom et Battery Management System (BMS). (Languang, Xuebing, Jianqiu, Jianfeng, & Minggao, 2013) BMS er et system som overvåker og beskytter celler i et batteri. I tillegg kan den sørge for maksimal batterikapasitet ved å balansere battericellenes ladetilstand. (Andrea, 2011) En BMS kan ha flere ulike funksjoner og egenskaper ut ifra batteritype og batteriets virkemåte i et større system. Generelt er hovedfunksjonene til en BMS:

- Å overvåke batteriet
- Estimere batteriets ladetilstand
- Estimere batteriets prestasjon
- Beskytte og rapportere til brukeren/operatøren.

(Andrea, 2010, s. 16)

Risiko knyttet til håndtering av Li-Ion batterier gjør at utvikling av nye batterisystemer kan være risikabelt. Derfor kan simulering av nye konsepter ved hjelp av dataprogrammer være en trygg metode for utviklingsprosessen. MATLAB er et simuleringsverktøy som muliggjør simulering av batterisystemer.

1.2 Problemstilling

Sett i lys av et økende fokus på klimavennlige energikilder og en større satsning på batteriteknologi, ønsker denne oppgaven å bidra til økt kompetanse innenfor BMS. Gjennom design og utvikling av BMS i MATLAB søker oppgaven å belyse utfordringer og kompleksiteten ved opplading av Li-Ion batterier.

Helt konkret vil denne oppgaven **utvikle et system for opp- og utlading av Li-Ion batterier**. Denne problemstillingen vil bli redegjort og drøftet ut ifra tre krav til systemet:

1. Finne/utvikle en modell for en Li-Ion celle.
2. Utforme en simulert elektrisk krets som realistisk kan simulere opp- og utlading av et batteri bestående av seks celler.
3. Designe både en aktiv- og passiv balanseringsmetode som evner å utjevne cellenes ladetilstand i løpet av oppladingen av batteriet.

1.3 Avgrensinger

Design av BMS kan i mange tilfeller være krevende, da det er mange faktorer som må vurderes i en utviklingsprosess. Oppgaven vil ikke ta for seg ulike metoder for beregning av ladetilstand. Den vil heller ikke behandle implementering av fysiske komponenter og hardware utvikling. Fokuset ligger på konseptutvikling og simulering. I tillegg er tid en ytre faktor som påvirker handlingsrommet. I utgangspunktet krever det mye tid og kompetanse å designe en modell som er god nok for hardware implementering. Tidsbegrensing og kompetanse innenfor fagfeltet begrenser ambisjonsnivået til oppgaven. Dette resulterer i at fokuset vil være på design av en BMS i simuleringsverden med MATLAB som verktøy. Dette åpner muligheten for videreutvikling av prosjektet for fremtidige oppgaver.

1.4 Struktur

Opgaven starter med å ta for seg relevant teori for å gi en overordnet forståelse av fagfeltet. Teorien vil gi et godt innblikk innenfor temaene batteriteknologi, BMS som et helhetlig system, samt presentere ulike balanseringsmetoder for Li-Ion battericeller. I tillegg vil teorikapitlet gi en forklaring på modellering av Li-Ion batterier og simuleringsverktøyet MATLAB. Metoden vil ta for seg årsaken til at simulering benyttes som metodisk verktøy. Deretter vil BMS-modellen bli presentert, både som helhet og gjennom en grundig beskrivelse av hvert delement.

Resultatene vil legge fram tester av battericellen, opp- og utlading og balansering. Drøftingen vil diskutere resultatene og sette disse opp mot de tre kravene satt i problemstillingen. I tillegg vil dette kapitlet prøve å gi et svar på om BMS-modellen utviklet i oppgaven er realistisk. Avslutningen vil ta for seg en kort oppsummering av oppgaven og forslag til videre arbeid innenfor temaet.

2 Teori

Dette kapitlet vil innledningsvis presentere aktuell terminologi innenfor batteriteknologi. Deretter vil det bli gjennomgått teori som omhandler BMS, modellering av Li-Ion batterier og til slutt en kort introduksjon til MATLAB og Simulink.

2.1 Terminologi innenfor batteriteknologi

Celler

En celle er den minste elektrokjemiske enheten. En celle benytter kjemi for å levere elektrisk strøm med en spesifikk spenning. (Plett, 2021)

Batterier

Batterier og batteripakker består av grupper med celler. Disse kan være koblet sammen i serie, parallell eller en kombinasjon av begge. (Plett, 2021)

C-rate

C-rate er et relativt mål for den elektriske strømmen i et batteri. C-raten er definert som den konstante strøm oppladingen/utladingen en celle kan opprettholde i en time. F.eks.: En celle med kapasitet på 20 000 mAh vil kunne levere 20 A i en time. Det vil si at cellens 1C er på 20 A. (Plett, 2021)

State of Charge (SOC)

State of Charge beskriver hvor mange prosent av batteriets ladning som er tilgjengelig på et gitt tidspunkt. Når batteriet er fullt oppladet vil SOC være på 100% og tilsvarende på 0% når det er fullstendig utladet. (Andrea, 2010, s. 18)

Depth of Discharge (DOD) og kapasitet

Depth of Discharge til et batteri beskriver mengde ladning som er fjernet fra battericellen under utlading, målt i amperetimer (Ah). Batteriets kapasitet og DOD er identisk når batteriet er fullstendig utladet. (Andrea, 2010, s. 19)

Tabell 2.1: Sammenligning av SOC og DOD (Andrea, 2010, s. 19)

	SOC	DOD
Units	%	Ah
Reference	Two points: empty and full	Only one point: full
Full Reference	100%	0 Ah
Empty Reference	0%	Not applicable
Rate of Change	Not applicable	Proportional to battery current
Past Empty	Won't go below 0%	Continues increasing

Safe Operating Area (SOA)

Safe Operating Area sier noe om hvilke begrensninger en battericelle har innenfor strøm, temperatur og spenning. Grensene varierer ut ifra hvilken type kjemi batteriet har. Det er derfor viktig å sette seg inn i databladet til batteriet, som leveres fra produsenten. Om grensene overskrides kan dette skade eller ødelegge batteriet, samt øke risikoen for sikkerhetsfeil i cellene. (Andrea, 2010, s. 6)

Constant Voltage (CV)

Constant Voltage er et prinsipp for opplading av et batteri der en lader tilfører konstant spenning til batteriet. Strømmen gjennom batteriet varierer under oppladingsprosessen. CV er en tidkrevende oppladingsprosess der inngangsspenning er lik batteriets maksimale spenningsnivå. En rask temperaturøkning og høy startstrøm er baksider ved denne metoden. (Arabsalmanabadi, Tashakor, Javadi, & Al-Haddad, 2018)

Constant Current (CC)

Constant Current er et prinsipp for opplading av batterier der batteriet blir tilført konstant strøm, og der spenningen varierer. Denne metoden er raskere enn CV-opplading, som resulterer i kortere ladetid for batteriet. En utfordring med CC-opplading er å nå 100% SOC uten å overlade batteriet. Overlading av Li-Ion batteriet kan medføre skade på batteri og systemet. (Arabsalmanabadi, Tashakor, Javadi, & Al-Haddad, 2018)

MOSFET

MOSFET eller Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor er en elektrisk komponent som i denne oppgaven vil benyttes som en bryter. Komponenten består av tre porter. To av disse er en inn- og en utgang som kobles sammen med kretsen. Den siste inngangen er laget for å motta en referansespenning. Når referansespenningen blir høyere

enn komponentens interne terskelspenning vil kretsen sluttet og strømmen går gjennom komponenten. Når referansespenningen blir lavere enn terskelspenningen vil kretsen brytes og strømmen slutter å gå gjennom komponenten. (Teja, 2021)

2.2 BMS – Battery Management System

Hovedoppgaven til en BMS er å beskytte batteriet og sikre at ingen battericeller blir operert utenfor SOA. Sekundæroppgaven er å maksimere batteriets kapasitet gjennom balansering av cellens SOC. En BMS kan ha flere ulike funksjoner ut ifra behovet til batterisystemet. Overordnet kan en si at en BMS skal kunne overvåke og rapportere tilstanden til batteriet, kontrollere SOC-nivå og balansere battericellene ved opplading av batteriet. I tillegg kan en BMS ha temperaturovervåking og andre kontrollfunksjoner i den hensikt å beskytte battericellene. (Andrea, 2011)

I praksis kan en av oppgavene til en BMS være å hindre at spenningen i en battericelle overstiger sin maksimale grense ved å stoppe opplading. En annen oppgave kan være å overvåke temperatur og sørge for nedkjøling dersom temperaturen i cellene når et hasardiøst nivå. Når det kommer til valg av funksjonalitet i BMS vil dette være et økonomisk spørsmål. Større batterier i komplekse systemer stiller strengere krav til overvåking og regulering enn et lite batteri til et enkelt system. (Plett, 2021)

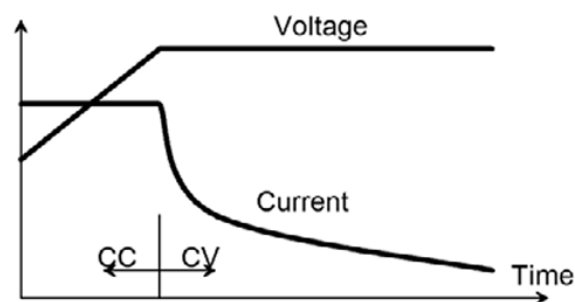
Når det er snakke om BMS finnes det i hovedsak to kategorier, egnedesignet BMS og hylleware BMS. (Andrea, 2010, ss. 16-17) Egnedesignet BMS gir brukeren større kontroll over batterisystemet ved at brukeren selv kan bestemme funksjoner og egenskaper til BMS'en. Hylleware BMS binner brukeren opp til det kommersielle designet og BMS-produsentens valgte funksjoner. Hylleware BMS er imidlertid brukervennlig, billig og kan raskt implementeres i et batterisystem. (Andrea, 2010, s. 18) Valg av type BMS er systemavhengig og opp til den enkelte produsent eller bruker å vurdere. Design av BMS er krevende og det er mange avgjørelser som må vurderes i en utviklingsprosess. Davide Andrea skriver om egnedesignet BMS:

«Please consider carefully the pros and cons of designing you BMS before embar on such project, lest you should end up saying - wish I had known how complex this was going to be before I started!» (Andrea, 2010, s. 18)

2.2.1 Constant Current-Constant Voltage opplading

Opplading av batteri er et viktig tema innenfor design av BMS. Oppladingsmetoden som benyttes vil ha et utslag på ladetid, samt påvirke temperaturen til den enkelte cellen. I utgangspunktet er det to prinsipper for opplading, CC- og CV-opplading.

CCCV er en hybrid oppladingsmetode som benytter prinsippene for både CV- og CC-opplading. Denne metoden er ofte benyttet i opplading av Li-Ion batterier. (Andrea, 2010, s. 35) Prosessen foregår over to steg der batteriet i første tilstand tilføres konstant strøm (CC). Dette medfører en økende spenning i batteripakken. Når spenningen i pakken nærmer seg maksimalt tillatt spenningsnivå for batteriet, vil oppladingen gå inn i neste tilstand. Denne tilstanden er opplading med konstant spenning (CV). Energikilden vil holde konstant spenning og batteripakkens strøm vil avta eksponentielt over tid. Tilstanden med oppladning gjennom konstant spenning vil vedvare til batteripakken er fulladet. (Andrea, 2010, ss. 35-36)

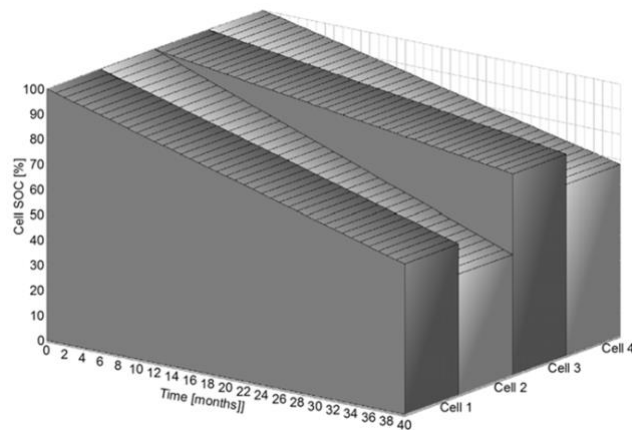


Figur 2.1: CCCV oppladingsgraf (Andrea, 2010, s. 36)

Figur 2.1 viser grafisk hvordan spenningen og strømmen oppfører seg over tid. Ved maksimal oppnådd spenning vil CCCV-kilden gå fra en konstant strøm til å redusere strømtilførselen, samt lade batteriet med konstant spenning. En fordel med denne hybride oppladingsprosessen er at en CCCV-lader hindrer overlading av batteriet. Dette reduserer sjansen for skade på battericeller og virker positivt på levetiden til det oppladbare batteriet. (Arabsalmanabadi, Tashakor, Javadi, & Al-Haddad, 2018, s. 5733)

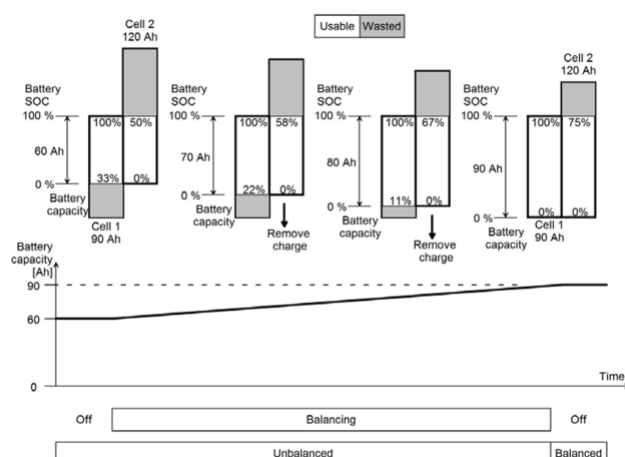
2.2.2 Balansering

I et batteri kan det over tid oppstå forskjeller i SOC mellom cellene. Dette betyr at cellene har forskjellig spenning til tross for lik opp- og utladning. Når disse forskjellene oppstår sier en at batteriet er ubalansert. Bakgrunnen for denne ubalansen skyldes både interne og eksterne faktorer. De interne faktorene skyldes som oftest små produksjonsvarianser mellom cellene. Dette fører til en forskjell i ladningstetthet, ulik intern impedans og forskjellige utladningsrater. De eksterne faktorene kan være ujevn utladning av cellene eller temperaturforskjeller internt i batteriet. (Daowd, Omar, Van Den Bossche, & Van Mierlo, 2011)



Figur 2.2: Batteri som blir ubalansert over tid. (Andrea, 2010, s. 25)

Figur 2.2 viser et eksempel på hvordan et batteri bestående av fire celler blir ubalansert over tid. Under opplading av batterier er oppladingen begrenset til den cellen som først blir fullt oppladet. Under utlading er batteriets evne til å levere ladning begrenset til cellen som først blir fullstendig utladet. I Figur 2.2 kan en se at celle 3 vil bli først oppladet og dermed stanse opplading av batteriet. Dette fører til at celle 1, 2 og 4 ikke blir fullstendig oppladet og får dårligere kapasitet. Samme prinsippet vil gjelde for utlading. Under utlading blir celle 2 først utladet, men celle 1, 3 og 4 er fortsatt ikke utladet. Et ubalansert batteri vil dermed ha dårligere kapasitet enn et batteri hvor alle cellene har samme SOC. Ved å balansere cellene vil batteriet få kapasiteten tilsvarende cellen med lavest SOC. Figur 2.3 gir et godt bilde på hvordan kapasiteten i batteriet øker etter en vellykket balansering.



Figur 2.3: Kapasitetsøkning ved balansering (Andrea, 2010, s. 27)

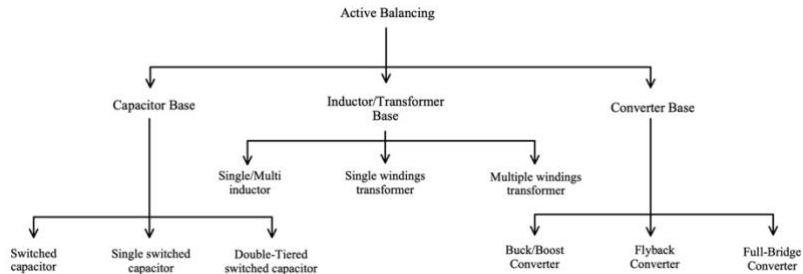
2.2.2.1 Passiv balansering

Passiv balansering av et batteri går ut på å fjerne energi fra den cellen fra den celle med høyest SOC. Dette gjennomføres ved å sende strøm gjennom en passiv motstand. Når dette gjøres, vil deler av energien bli omgjort til varme. Balanseringen vil pågå fram til cellen har samme spenning som den minst oppladde cellen. Den mest normale metoden for passiv balansering forgår ved å benytte et styringssystem som oppdager spenningsforskjeller i batteriet. Styringssystemet vil lukke en bryter til den passive motstanden slik at battericellen tappes for energi. Når cellen oppnår samme spenning som resten av batteriet vil bryteren åpne og oppladningen vil fortsette. (Daowd, Omar, Van Den Bossche, & Van Mierlo, 2011)

2.2.2.2 Aktiv balansering

Aktiv balansering går ut på å overføre energi mellom celler. Det finnes fire forskjellige metoder for aktiv balansering av batterier. Første metoden går ut på å overføre energien fra den mest oppladde cellen til de nærliggende battericellene. Den andre metoden går ut på å overføre energien fra den høyest oppladde cellen til hele batteriet. Dette er den enkleste og mest effektive metoden. Den tredje metoden går ut på å overføre energi fra hele batteriet og sende det til den minst oppladde cellen. Denne metoden er mest effektiv om en benytter en lader med en utgang koblet til hver celle. Den fjerde og siste metoden går ut på å overføre energi fra enten en celle til hele batteriet eller å overføre energi fra batteriet til en celle, alt etter hva som er behovet. (Andrea, 2010, s. 83)

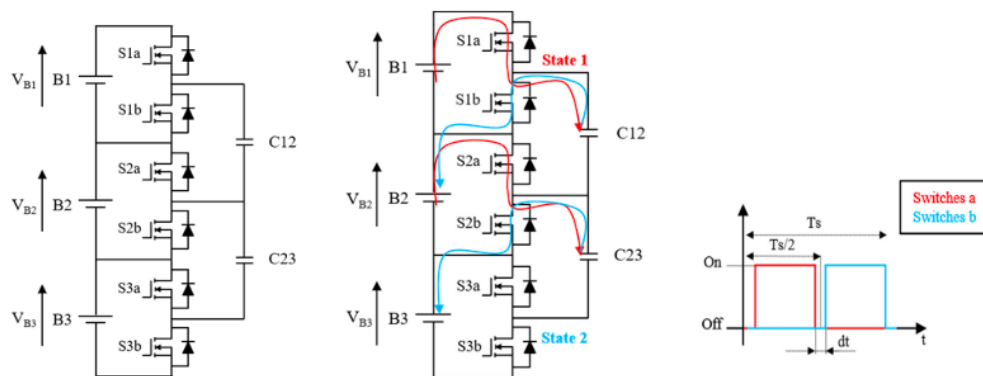
Figur 2.4 viser en oversikt over ulike aktive balanseringstyper. Oppgaven vil ikke ta for seg samtlige balanseringsmodeller, men noen av variantene vil bli presentert. Bildet illustrerer at det finnes mange forskjellige måter å balansere battericellene i et batteri.



Figur 2.4: Metoder for aktiv balansering (Daowd, Omar, Van Den Bossche, & Van Mierlo, 2011)

Switched Capacitor Equalizer

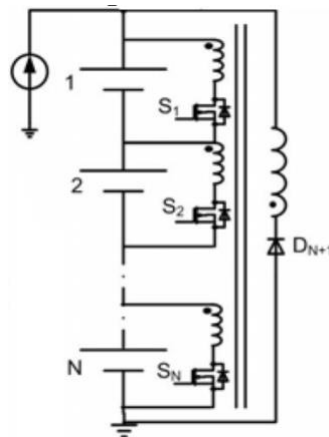
En av metodene for aktiv balansering er Switched Capacitor Equalizer. Dette er en metode til celle balanseringsmetode, som balanserer N celler ved hjelp av $N-1$ kondensatorer og $2 \cdot N$ brytere. Bryterne opereres ut ifra et fast mønster der partalls- og oddetallsbrytere lukkes og åpnes motsatt av hverandre. Bryterne vil være lukket omtrent 45% av den totale perioden, se figur 2.5. På denne måten vil hver kondensator først være tilkoblet en celle i parallell, og i resten av perioden være tilkoblet nabocellen. Dette medfører at overskuddsenergi blir overført fra den cellen med høyest spenning til den cellen med lavest spenning. Fordelene med SC-balansering er at den ikke krever logiskstyring. Balanseringsmetoden har kun behov for riktige komponenter, satt sammen i en elektrisk krets. SC-balansering fungerer også effektivt både for opplading og utlading av Li-Ion batterier. En ulempe med metoden er at energioverføring er mest effektiv mellom naboceller, som fører til at energien må gå gjennom mange celler. Dette gjør at SC-balansering kan være tidkrevende. (Moral, et al., 2019, s. 2)



Figur 2.5 Modellskisse av Switched Capacitor Equalizer (Moral, et al., 2019)

Multiple Windings Transformer

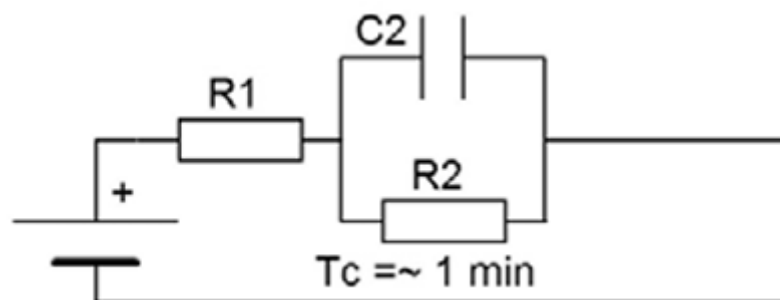
En annen metode for aktiv balansering er Multiple Windings Transformer med forward structure. Denne strukturen overfører energi fra cellen med høyest spenning og fordeler denne energien på alle cellene i batteriet. Metoden går ut på at MOSFET'en til den cellen med høyest spenning lukkes slik at balanseringskretsen kobles inn. Dette gjør at det sendes energi inn i transformatoren som overføres til resten av batteriet ved hjelp av den magnetiske strømmen som settes opp av spolene. (Gerislioglu, Ozturk, Sanli, & Gunlu, 2014)



Figur 2.6: Multi Windings Transformer (Daowd, Omar, Van Den Bossche, & Van Mierlo, 2011)

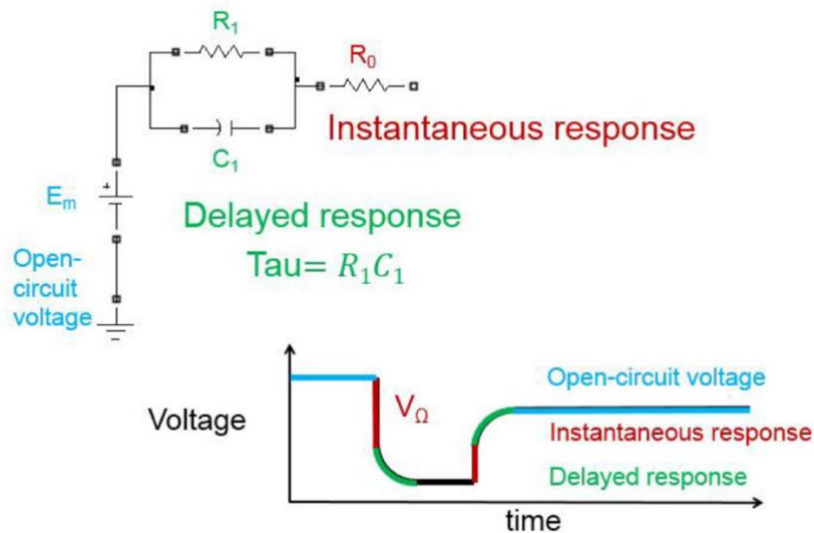
2.3 Modellering av Li-Ion batterier

For å kunne modulere og simulere oppførselen til et Li-Ion batteri benyttes det elektriske kretser. En slik framstilling av et batteri blir omtalt som den elektriske ekvivalente modellen (Andrea, 2010, s. 10) Ved hjelp av kjente elektriske komponenter er det mulig å simulere oppførselen til et fysisk batteri. Den elektriske ekvivalente modellen tar utgangspunkt i RC-kretser, der en enkelt krets utgjør en celle i et reelt batteri.



Figur 2.7: En enkel RC-krets med to motstander og en kondensator. (Andrea, 2010, s. 11)

Den totale motstanden i kretsen er essensiell for den ekvivalente elektriske modellen. Denne motstanden er dynamisk og endrer seg ut ifra faktorer som SOC, temperatur, strøm og operatørens bruk av batteriet. Motstanden blir i modellen fordelt på to komponenter R_1 og R_2 . Når det trekkes strøm fra kretsen, vil det oppstå et spenningsfall som tilsvarer batteriets utladningsrespons ved belastning. En kondensator er satt i parallell med R_2 i den hensikt å skape en spontan endring, som synker eksponentielt i perioden batteriet blir belastet. (Andrea, 2010, s. 12) Når lasten blir koblet fra batteriet og utladning stanses, vil spenningen øke og stabilisere seg rundt en konstant verdi. Spenningen vil ikke nå samme verdi som før utladningen. Det vil imidlertid oppstå en differanse mellom spenning før belastning og spenning etter belastning. Denne differansen kan betegnes delta U , og beskriver arbeidet batteriet har utført i perioden batteriet blir utladet.



Figur 2.8: Spenningsfallet i den simulerte battericellen og komponentenes påvirkning på spenningsgrafene. (Ahmed, et al., 2015)

Figur 2.8 viser spenningen i en battericelle ved første belastning av batteriet. Differansen i spenning før og etter spenningsfallet gir et estimat på hvor mye energi batteriet har brukt under utladning. Etter gjentatt belastning vil kapasiteten reduseres, spenningen vil nærme seg nullverdi og batteriet vil ha behov for opplading. Responsen beskrevet over er den ønskelige oppførselen til en battericelle, og viser hvorfor RC-kretser er en god modell for simulering av en battericelle. (Ahmed, et al., 2015)

2.3.1 Sikkerhet

En av de avgjørende grunnene for at det benyttes modellering av Li-Ion batterier er sikkerhet. Sikkerhet er viktig ved bruk av enhver type energikilde, inkludert batterier. Sammenlignet med andre typer energikilder er batterier en av de eneste kildene som oppbevarer oksidasjonsmiddelet (anoden) og drivstoffet (katoden) i samme lukkede miljø. Andre eksempler er rakettdrivstoff og høyeksplosiver. Hvis disse reagerer kjemisk med hverandre vil den kjemiske energien bli konvertert til varme og gass. Når denne prosessen først har startet vil den ikke stoppe før batteriet er tomt for energi. Derfor er det et ekstra fokus på sikkerhet ved bruk av batterier. Sikkerheten må adresseres på alle nivåer, fra celler, streng, pakke og til slutt på applikasjonsnivå. En feil på et nivå kan føre til mer alvorlige feil på et høyere nivå. (Doughty & Roth, 2012)

Li-Ion celler har liten toleranse for å operere utenfor safe operating area (SOA). Konsekvensene er som regel at livslengden til batteriet blir redusert eller at battericellen blir skadet eller ødelagt. Under visse omstendigheter kan konsekvensene være ekstremt farlige. Fysisk skade og/eller overoppheting, overspenning, overstrøm eller ekstern varme kan føre til at batteriene begynner å brenne eller i verstefall eksploderer. (Andrea, 2010, s. 5)

Tabell 2.2: SOA til Li-Ion celler (Andrea, 2010, s. 6)

HENDELSE	KONSEKVENNS
OVERLADING (SPENNING)	Cellen blir raskt ødelagt og mulighet for å begynne å brenne
OVER UTLADNING (SPENNING)	Cellen blir ødelagt
LADET/UTLADET TEMPERATUROMRÅDET	UTENFOR Redusering av cellens levetid
OVERSKRIDE SIKKER CELLETEMPERATUR	Kan forkomme hurtig overoppheting, som igjen kan føre til at cellen begynner å brenne eller eksploderer
LADET/UTLADET MED FOR HØY STRØM	Redusering av celles levetid
OPERERT MED HØY PULSSTRØM I MER EN NOEN SEKUNDER	Cellen kan bli skadet

10. Oktober 2019 ble det rapportert om brann i batterirom om bord på MF «Ytterøyningen», en bilferje i Kvinnherad kommune. Dagen etter oppstod en eksplosjon i batterirommet. (Vest brann- og redningsregion, 2021) Det tok tre dager å få kontroll over situasjonen. Fergen var fullelektrisk og om bord var det 352 lithiumbatterier, samt to elektriske motorer. (Josdal, 2019, s. 6) Evalueringsrapporten utarbeidet etter hendelsen konkluderte med at oppvarming av batteri i lukket rom utgjorde stor fare for eksplosjon. (Josdal, 2019, s. 13) Dette er et tydelig eksempel på hvorfor sikkerhet rundt batteribruk er helt avgjørende.

2.4 Simulering i MATLAB

«MATLAB® is a programming platform designed specifically for engineers and scientists to analyze and design systems and products that transform our world» (MathWorks, 2021) Sitatet er MathWork, Inc sin egen beskrivelse av dataprogrammet, og er hentet fra deres nettside. MATLAB er et programmeringsverktøy som gir anledning til å analysere data, utvikle algoritmer, samt utvikle modeller og applikasjoner. Programmet er utbredt blant ingeniører og forskere globalt. Dette åpner mulighet for god brukerstøtte gjennom MATLAB sin etablerte nettside og diskusjonsforum. (MathWorks, 2021) I prosessen med å lære seg et nytt program og programmeringsspråk er dette svært fordelaktig.

2.4.1 Simulink og Simscape

Simulink er delprogrammet i MATLAB som gjør det mulig å simulere et konsept og modellere et system før en fysisk overgang til hardware. Dette er en fordel i en utviklingsfase av batterisystemer. I denne oppgaven blir Simscape Electrical benyttet. Dette er en verktøykasse i Simulink som gir tilgang til elektriske komponenter og muliggjøre design av elektriske kretser.

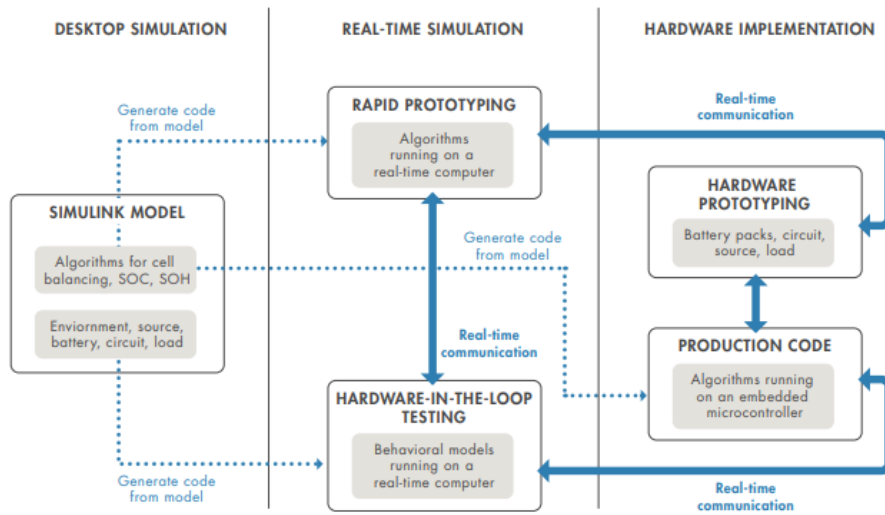
Simulink og Simscape er grafisk program som bygger på fysiske komponenter. Simscape Electrical inneholder elektriske komponenter brukeren av programmet kan plassere ut i et programmeringsvindu for å designe elektriske kretser. Programmet kan simulere og gi tilbakemelding ved feilkoding. I tillegg gir Simulink brukeren muligheten til å lage egendefinerte funksjoner. I denne oppgaven vil både elektriske komponenter og egendefinerte funksjonsblokker bli benyttet.

2.4.2 Utvikling av BMS i MATLAB

MathWorks, Inc har utviklet en modell som beskriver prosessen med BMS-utvikling i MATLAB. Denne modellen består av tre faser: Skrivebordsimulering, sanntidssimulering og hardware implementering. (The MathWorks, Inc, 2018) Den første fasen innebærer å produsere et konsept for BMS og benytte simuleringstøytø i MATLAB til å skape en arena for utvikling av dette konseptet. Skrivebordsimulering gir mulighet til å teste funksjonaliteten til BMS-designet. Gjennom visualisering og simulering kan batteriets opplading- og utladingsrespons, balanseringsalgoritmer og kontrollfunksjoner til BMS'en analyseres og kontrolleres. Nye ideer og sammensatte kretser kan utforskes uten å produsere det fysiske produktet. (The MathWorks, Inc, 2018)

Den andre fasen tar steget videre fra simulering av BMS-modellen i et dataprogram til testing av BMS på forenklede fysiske systemer. Sanntidssimulering handler om å benytte mikrokontrollere og reel data fra sensorer og fysiske komponenter i en analyse av modellen. Software-kode og parametere benyttet i den simulerte BMS'en kan bli kontrollert og forbedret ytterligere ved å se på modellens respons på fysisk data. (The MathWorks, Inc, 2018)

Hardware implementering er den siste fasen for utviklingen av BMS. De to tidligere fasene har til hensikt å korrigere feil og mangler i modellen. Etter å ha gjennomført skrivebordsimulering og sanntidssimulering er BMS'en klar for produksjon og kan installeres i integrerte systemer. (The MathWorks, Inc, 2018)



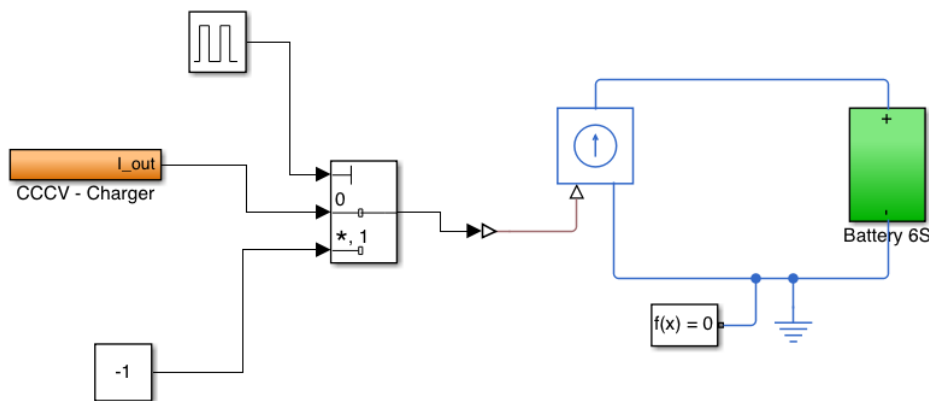
Figur 2.9: De tre faser for utviklingen av en BMS. Fra simulering til implementering av det fysiske produktet (The MathWorks, Inc, 2018)

3 Metode

Denne oppgaven ønsker å utvikle og designe en BMS-modell der battericeller, system for opp- og utlading av battericeller og balanseringsalgoritmer inkluderes. For å svare på problemstillingen vil MATLAB bli benyttet som simuleringsverktøy. Metoden i oppgaven følger første fase av MathWorks, Inc sin modell for utvikling av BMS (kap.2.4.2). Testingen av systemet vil bli delt inn to kategorier: kontinuerlig testing og systematisk testing. De kontinuerlige testene vil forgå underveis i utviklingsfasen og vil ikke bli beskrevet i oppgaven. Disse testene gir en direkte tilbakemelding på om systemet fungerer slik det skal. Dette er avgjørende for å kunne definere parametere og komponenter riktig. Når systemet er ferdig utviklet, vil det bli gjennomført systematisk testing av alle deelementene i systemet. Henholdsvis battericeller, opp- og utlading og aktiv og passiv balansering. Det er resultatene fra de systematiske testene som vil danne grunnlaget for drøftingen i oppgaven.

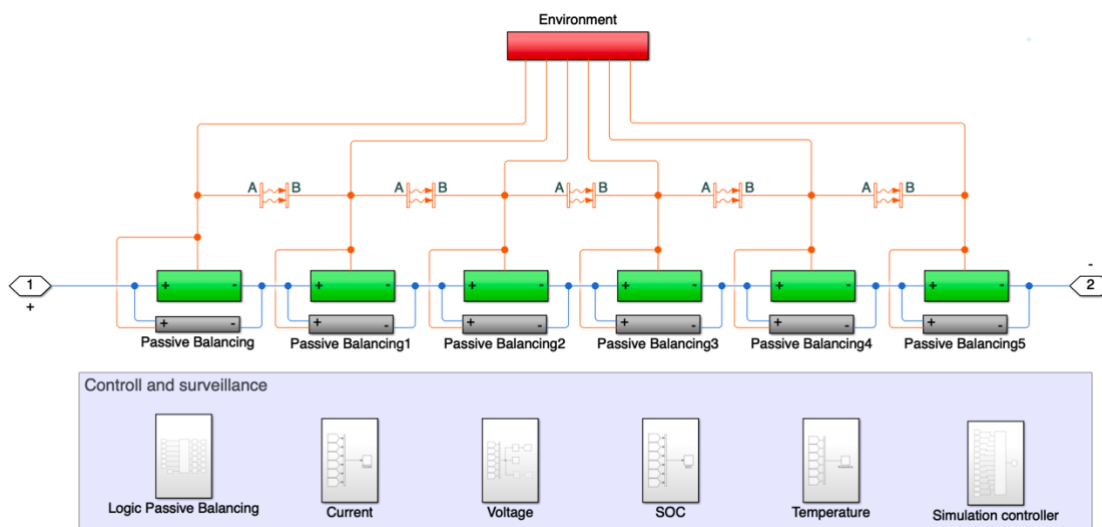
4 Utvikling av systemet

Dette kapitlet vil gå gjennom systemet som er designet for å oppfylle kravene satt i problemstillingen. Til å begynne med vil oppgaven ta for seg systemet i sin helhet. Deretter vil alle delsystemene i batteriet og opp- og utladningsstrukturen forklares i detalj.



Figur 4.1: Systemet i sin helhet

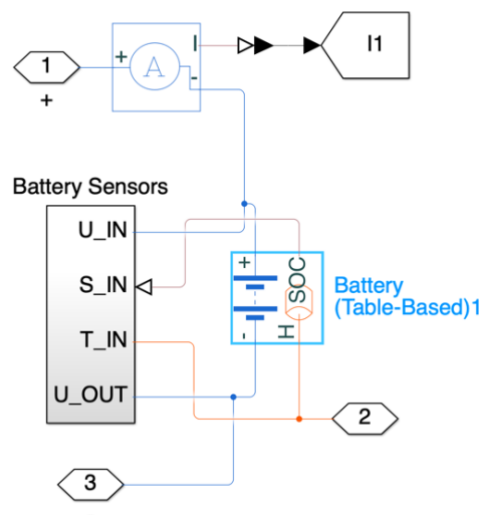
Figur 4.1 viser den overordnede kretsen. Kretsen er delt inn i flere forskjellige undersystemer. Dette blir gjort for å gjøre kretsen enklere å forstå, samt mer oversiktlig å jobbe med. Helt overordnet består kretsen av en strømkilde som kontrolleres av et opp- og utladningssystem, i tillegg til et batteri som består av seks battericeller med tilhørende BMS.



Figur 4.2: Batteri med seks celler i serie

Figur 4.2 viser undersystemet til batteriet i kretsen. Batteriet består i hovedsak av fire forskjellige systemer. Første systemet er de seks battericellene koblet i serie, disse kan ses som grønne blokker. Under hver battericelle kan en se grå blokker. Disse blokkene inneholder kretsen for den passive balanseringen. I tillegg til den passive balanseringen er det designet to forskjellige metoder for aktiv balansering. Disse er ikke representert i Figur 4.2, men vil bli framstilt og gjennomgått senere i dette kapitlet, på lik linje med den passive balanseringen. Videre kan en i rødt se systemet som simulerer varmeutveksling mellom de forskjellige balanseringsblokkene, cellene og omgivelsene rundt cellene. Til slutt kan en se de seks blokkene nederst på figuren. Disse blokkene driver kontroll og overvåking av battericellene.

4.1 Battericellene



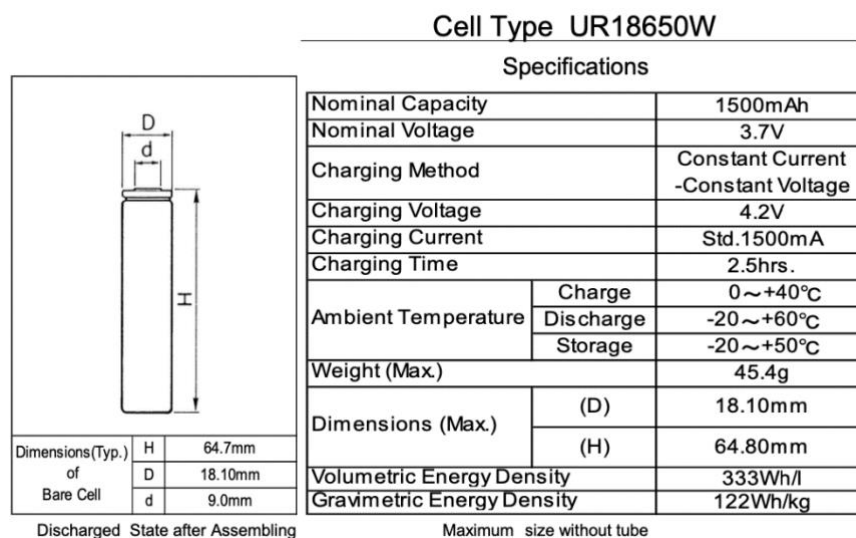
Figur 4.3: Undersystemet til battericelle

I figur 4.3 kan en se undersystemet til en av battericellene. Hoveddelen av undersystemet er selve battericellen som kan ses i blått. Denne blokken etterligner et virkelig batteri ved å benytte en rekke parametere som baseres på tester av det virkelige batteriet. Denne oppgaven har ikke tatt for seg testing av virkelige battericeller. Av den grunn er det benyttet en ferdig laget battericelle av typen SANYO UR18650W. Parameterne til cellen er hentet fra et prosjekt på MathWorks sin hjemmeside utviklet av Javier Gazzarri. (Gazzarri, 2021) I tillegg til å simulere battericellens opp- og utladingskurver leverer

blokken også informasjon om cellens temperatur og SOC. Disse verdiene benyttes både i systemet for temperatursimulering og i kontroll og overvåkingssystemet.

4.1.1 Celle og datablad

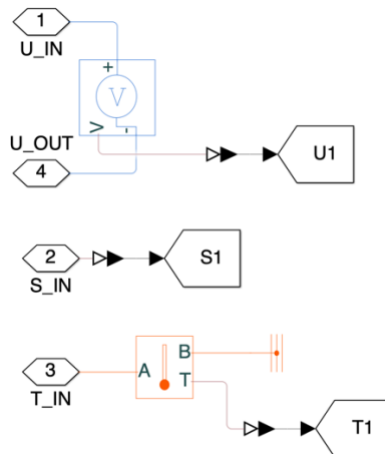
Batteriet som benyttes denne oppgaven består av battericeller av typen SANYO UR18650W. Cellen er av dimensjon 64.77 x 18.10mm, har en maksspenning på 4.2V og en nominell kapasitet på 1500mAh. Ved opplading er øvre temperaturgrense per celle 40 grader Celsius. Temperaturer som overstiger dette, kan medføre skade på battericellen. (Sanyo Electric by Panasonic, 2021) I figur 4.4 presenteres den mest grunnleggende informasjonen om celletypen som benyttes i oppgaven. Alle systemer i oppgaven er spesielt tilpasset akkurat denne typen batteri. Celles fullstendige datablad er lagt ved som vedlegg 1.



Figur 4.4: Utklipp av databladet til SANYO UR18650W

4.1.2 Sensorer

I undersystemet til battericellen er det inkludert en rekke sensorer, som måler og videreformidler informasjonen til kontroll og overvåkingssystemet til batteriet. Det er totalt tre sensorer i hver celle. Disse måler strøm, spenning og temperatur, i tillegg sendes informasjonen om cellens SOC til kontrollsystemet. Øverst på figur 4.3 kan en se strømsensoren. Resten av sensorene ligger i blokken på venstre side av figur 4.3. Innholdet i denne blokken er en spenningssensor og en temperatursensor, som vist i figur 4.5. I tillegg inneholder blokken utgangsvariabelen til SOC som hentes fra batteriblokken.

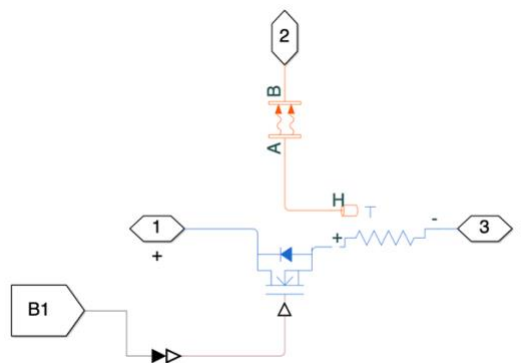


Figur 4.5: Undersystemet til batterisensorene

4.2 Balansering

Denne delen av oppgaven vil ta for seg de ulike balanseringsmetodene som har blitt utviklet. Som nevnt tidligere viser figur 4.2 kun metoden for passiv balansering, men denne delen vil også presenter de to metodene utviklet for aktiv balansering.

4.2.1 Passiv balansering



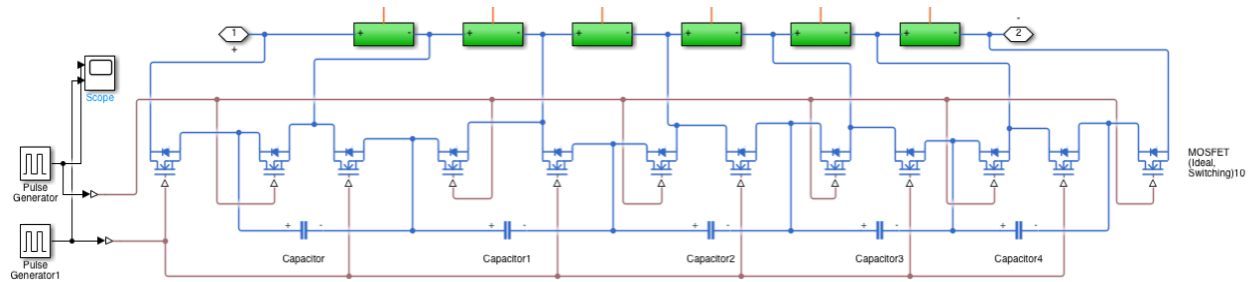
Figur 4.6: Undersystemet til den passive balanseringen

Figur 4.6 viser undersystemet til de grå balanseringsblokkene som er plassert under battericellene i figur 4.2. Kretsen til den passive balanseringen består kun av to komponenter, en MOSFET og en motstand. Kretsen kontrolleres av en logikk som vil forklares senere under delsystemet for kontroll og overvåking. Når kontrollsystemet mener at battericellen må balanseres vil MOSFET'en lukkes på samme måte som en bryter, noe som gjør at det sendes strøm gjennom motstanden. Balanseringsmotstanden vil transformere en del av overskuddsenergien fra den høyest oppladede cellen til varme.

Kretsen vil være sluttet helt til kontrollsystemet mener at cellen er balansert, noe som gjør at motstanden kobles ut og battericellen fortsetter normal opplading. Varmen fra motstanden blir overført til resten av systemet.

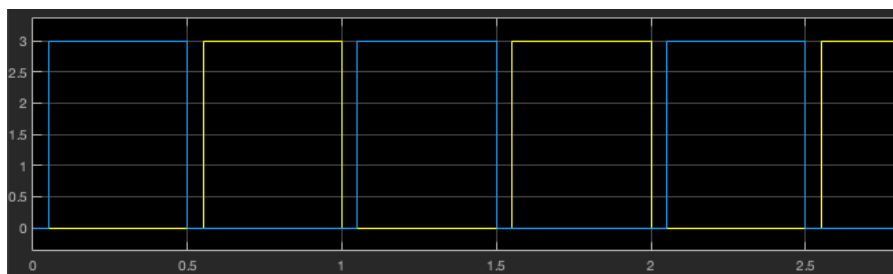
4.2.2 Aktiv balansering

4.2.2.1 Switch Capacitor Equalization



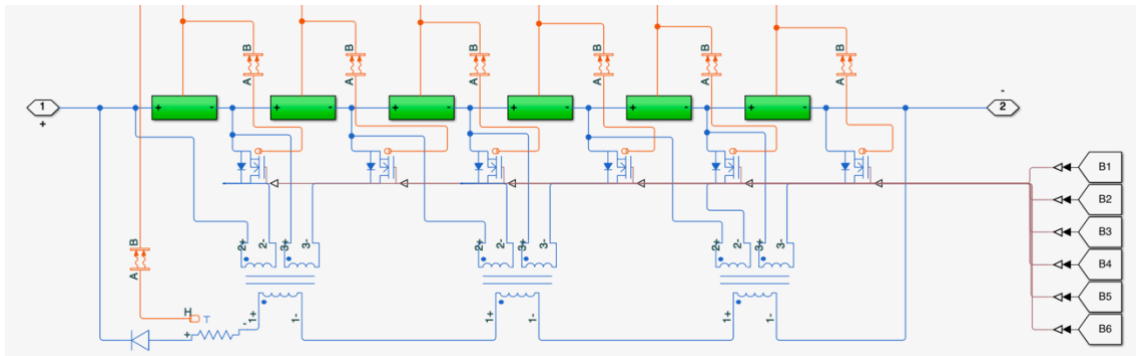
Figur 4.7: Oversikt over Switch Capacitor Equalization i Simulink

Den ene aktive balanseringslogikken baserer seg på konseptet Switch Capacitor Equalization (teori, kap 2). SC-balansering sier at for N celler skal det være $N-1$ kondensatorer og $2*N$ brytere. Figur 4.7 viser kretsen bestående av seks celler, fem kondensatorer og tolv brytere. Mellom hver celle er det koblet til en MOSFET-bryter, som igjen er koblet til kondensatorene. SC-balansering fungerer slik at MOSFET-bryterne styres av to pulsgeneratorer, som åpner og lukker annenhver MOSFET om gangen. Oddetallsbryteren kontrolleres av første puls og partallsbryterne styres av andre puls, slik som sett på figur 4.8. Denne logikken gjør at cellene balanseres over tid ved at kondensatorene lader opp de battericellene med minst spenningsnivå.



Figur 4.8: Bryterens åpen/lukke-periode. Blå graf er oddetallsbrytere og gul graf er partallsbrytere

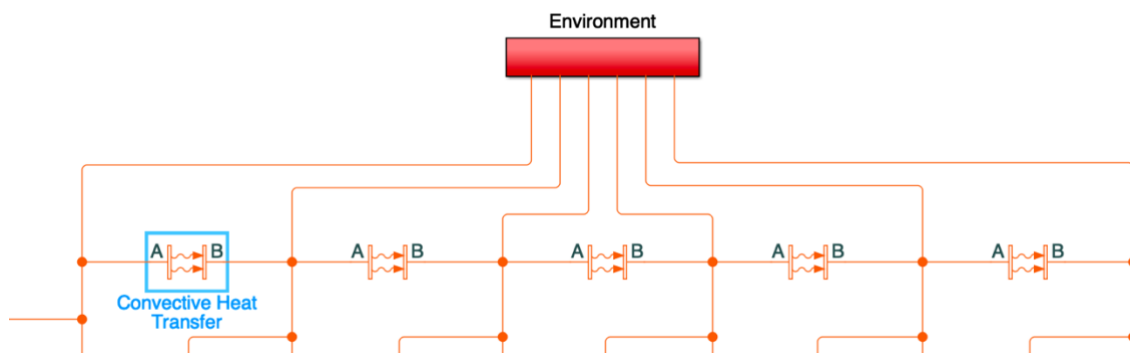
4.2.2.2 Multiple Windings Transformer



Figur 4.9: Multiple Windings Tranformer

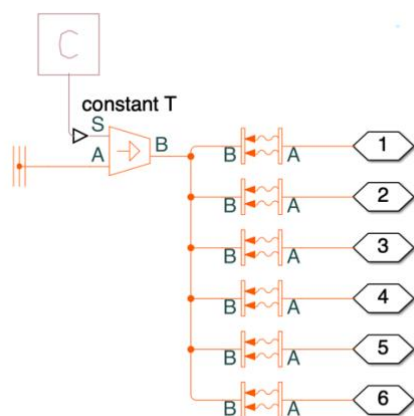
Figur 4.9 viser systemet for den aktive balanseringsmetoden Multiple Windings Transformer (MWT). Denne varianten av balanseringsmetoden kalles «forward structure». Bakgrunnen for dette, er at kretsen tar energi fra den høyeste oppladede cellen og sender det til resten av batteriet. Kretsen styres av en kontroll-logikk som vil forklares nærmere under avsnittet om kontroll og overvåking. Når logikken gir beskjed om at en celle skal balanseres vil MOSFET'en lukkes, slik at spolen kobles til batteriet. Strømmen som går gjennom spolen, gjør at det induseres strøm over i kretsen som kan ses nederst på figur 4.9. Denne strømmen går tilbake til alle battericellene. For å forhindre at det ikke går for mye strøm gjennom spolen under balanseringen, er det lagt inn en økt motstand i MOSFET'ene. Denne motstanden er definert i koden for startparametere (vedlegg 2). På grunn av den interne motstanden i MOSFET'ene er de koblet til systemet for temperaturoverføring. Inspirasjonen til kretsen ble hentet fra en konferanseprotokoll, levert av Universitetet Turgut Uzal, som ble presentert på 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation i 2014. (Gerislioglu, Ozturk, Sanli, & Gunlu, 2014)

4.3 Temperaturoverføring



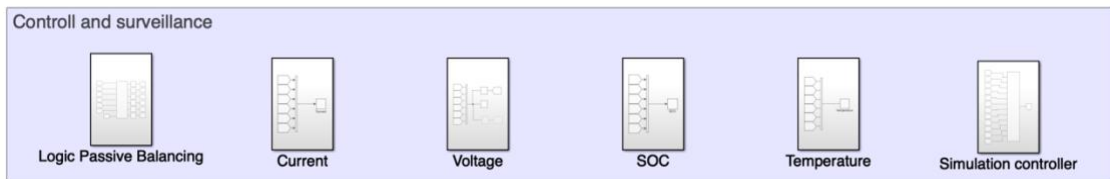
Figur 4.10: System for temperaturoverføring

Figur 4.10 viser det overordnede systemet for temperaturoverføring i kretsen. Systemet er inspirert av kretsen laget av Javier Gazzarri, samme krets som ble benyttet til å bestemme batteriparameterne. (Gazzarri, 2021) Systemet henter temperaturverdier fra alle battericellene og motstandene i balanseringsblokkene. Verdiene sendes til de konvektive varmeoverføringsblokkene. Disse benytter cellenes overflateareal og en varmeoverførings koeffisient til å beregne hvor mye varmen fra en celle påvirker en annen celle. Samtidig blir cellene også påvirket av omgivelsene rundt. Omgivelsene benytter varmeoverføringsblokker på samme måte som mellom battericellene. Forskjellen er at her vil battericellene bli kjølt ned av lufttemperaturen til omgivelsene slik som figur 4.11 viser. I denne oppgaven er lufttemperaturen satt til 23°C, men denne verdien kan enkel endres gjennom koden som definerer startparameterne til systemet. (Vedlegg 2)



Figur 4.11: Undersystemet til omgivelsene

4.4 Kontroll- og overvåking



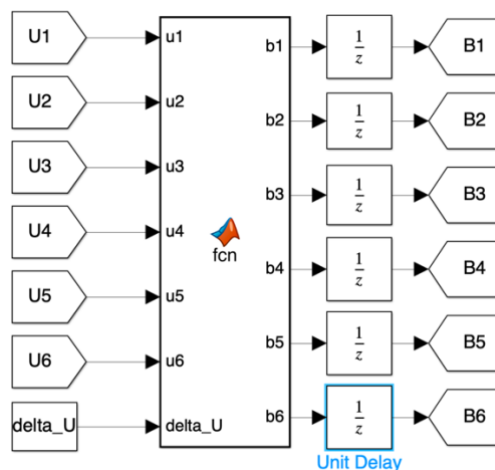
Figur 4.12: Systemet for kontroll og overvåking

Systemet for kontroll og overvåking består av seks forskjellige blokker. Første blokken er balanseringslogikken til systemet. De fire midterste utformer grafer av informasjonen fra kretsen. Siste blokken kontrollerer simuleringen av kretsen.

4.4.1 Balanserings Logikk

Ut ifra hvilken balanseringsform systemet kjører, finnes det ulike balanserings logikk. Det finnes en logikk både for passiv balansering og den aktive balanseringsmetoden Multiple Windings Transformer (MWT). Den siste aktive balanseringsmetoden, Switched Capacitor Equalizer (SC) krever ingen logikk og vil derfor ikke nevnes i dette delkapittelet.

4.4.1.1 Passiv Balansering Logikk



Figur 4.13: Kontrollblokk for passiv balansering

```

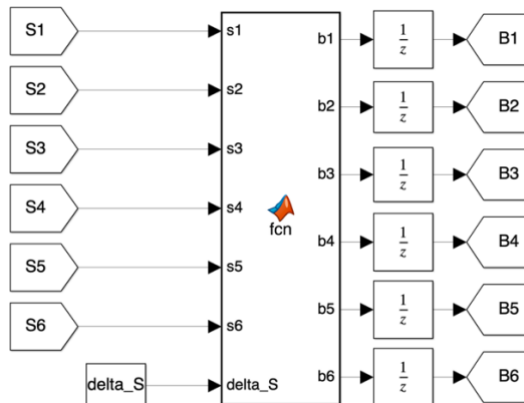
1 function [b1, b2, b3, b4, b5, b6] = fcn(u1, u2, u3, u4, u5, u6, delta_U)
2
3
4 B = zeros(1,6);
5 U = [u1, u2, u3, u4, u5, u6];
6 min_U = min(U);
7
8 %All Cells Continously
9 for i = 1:6
10     if max(U) < 4.17
11         B(i) = (U(i) - min_U)*1/delta_U;
12     end
13 end
14
15 b1 = B(1);
16 b2 = B(2);
17 b3 = B(3);
18 b4 = B(4);
19 b5 = B(5);
20 b6 = B(6);

```

Figur 4.14: Koden i kontrollblokken

Figur 4.13 viser undersystemet til blokken for passiv balansering logikk. Undersystemet fungerer ved at blokken mottar spenningsverdiene fra alle battericellene. I tillegg mottar den inputverdien til den tillatte spenningsforskjellen, kalt delta_U, som defineres i koden for startparametere (vedlegg 2). Inne i MATLAB funksjonsblokken utføres koden vist i figur 4.14. Koden starter med å lage en vektor B for de seks utgangsverdiene som sendes til MOSFET'en i blokken for passiv balansering. Deretter legges alle inngangsverdiene for spenning inn i en vektor U. Denne vektoren benyttes for å finne maksimum- og minimumsspenningen i batteriet. Videre benyttes en for-løkke til å gjennomføre balanseringskoden for samtlige celler i batteriet. If-setning kontrollerer at balanseringen kun kan kjøres dersom batteriet lades med konstant strøm. Inne i if-setningen blir utgangsverdien satt lik differansen mellom spenningen i cellen og cellen med lavest spenning. Deretter blir denne spenningen skalert ved hjelp av delta_U. Hvis utgangsverdien B er større en terskelspenningen til MOSFET'en vil balanseringsprosessen starte. Terskelspenningen finnes under navnet Vth i koden for startparametere. (Vedlegg 2). Til slutt skrives B-vektoren over til de seks utgangsverdiene. Når disse sendes ut av MATLAB funksjonsblokken blir det lagt på en liten forsinkelse slik at simuleringen går jevnere. Forsinkelsen gjøres i blokkene med navn «unit delay» vist i figur 4.13.

4.4.2 Multiple Windings Transformer Logikk



Figur 4.15: Kontrollblokk for MWT

```
1 function [b1, b2, b3, b4, b5, b6] = fcn(s1, s2, s3, s4, s5, s6, delta_S)
2
3
4 B = zeros(1,6);
5 S = [s1,s2,s3,s4,s5,s6];
6
7 [max_S, i] = max(S);
8 min_S = min(S);
9
10
11 if((max_S-min_S) > delta_S)
12     B(i) = 2;
13 end
14
15
16 b1 = B(1);
17 b2 = B(2);
18 b3 = B(3);
19 b4 = B(4);
20 b5 = B(5);
21 b6 = B(6);
```

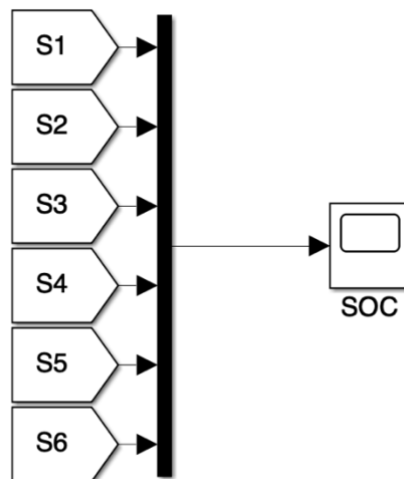
Figur 4.16: Koden til MWT logikken

Kontrollkoden for MWT minner veldig om den passive logikken. Overordnet gjør de veldig mye likt, men det er noen fundamentale forskjeller. Den største forskjellen er at den MWT logikken benytter SOC-verdier istedenfor spenningsverdier. Dette kan ses i figur 4.15, ved at inngangsvariablene er byttet til S-verdier. Grunnen til dette er at balanseringsprosedyren skaper store spenningsvingninger når spolen kobles inn og ut. Av den grunn benyttes de mer stabile SOC-verdiene istedenfor. Den andre store forskjellen mellom metodene er at den aktive balanseringen kun balanserer en celle om gangen. Grunnen til dette er at balanseringsmetoden kun er designet for at én celle skal overføre energi til resten av batteriet. I praksis blir dette gjennomført ved at koden finner indeksen til cellen med høyest SOC verdi, sett i linje syv i figur 4.16. Deretter blir differansen mellom høyeste og laveste SOC-verdi sammenlignet med den ønskede delta_S (definert i vedlegg 2). Hvis differansen er for stor vil koden benytte indeksen til

å sette B-verdien til den høyeste oppladete cellen lik to. Grunnen til at den settes lik to er kun fordi dette er en vilkårlig spenning som er høyere enn terskelspenningen til MOSFET'en.

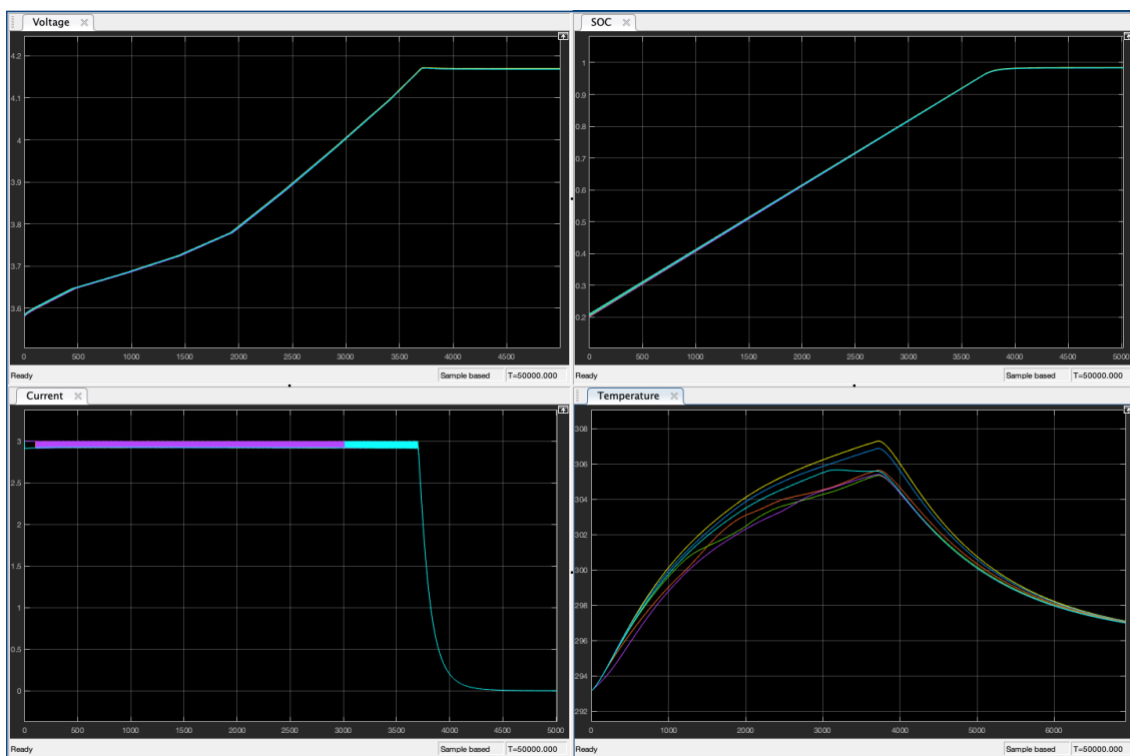
4.4.3 Overvåking

De fire blokkene i midten av figur 4.12 har, som tidligere nevnt, oppgave å overvåke og plote grafer for strøm, spenning, temperatur og SOC i de seks cellene. Disse parameterne er viktige å overvåke slik at en ser at systemet fungerer slik det skal. Figur 4.17 viser et eksempel på hvordan overvåkingen av SOC fungerer. Prosessen for de andre parameterne fungerer på samme måte.



Figur 4.17: Eksempel på hvordan parameterne overvåkes

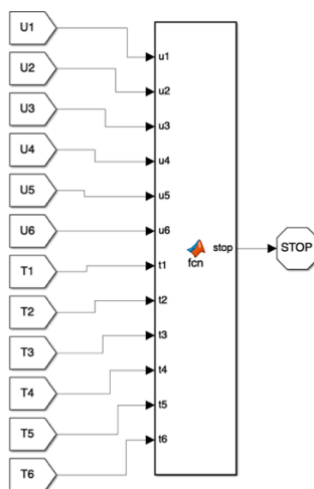
Figur 4.18 viser et eksempel på hvordan den grafiske overvåkingen fungerer under simulering. Under simuleringen av dette eksempelet begynner alle cellene med forskjellig SOC, noe som fører til at balanseringsprosedyren slår inn. Nede i høyre hjørne kan en se temperaturen i cellene. Alle cellene har forskjellig temperatur under oppladingen. De varmeste cellene er de som startet med høyest SOC og derfor må balanseres mest. Nede i venstre hjørne kan en se strømmen som går gjennom cellene. Her kan en se den karakteristiske grafen til CCCV-laderen. De to øverste rutene viser spenning (venstre) og SOC (høyre). Ut ifra grafene kan en se at oppladingen tar omtrent 3700 sekunder å lade opp batteriet. Grafene som vises i figur 4.18 fungerer kun som arbeidsgrafer. I resultatdelen vil det bli benyttet grafer som er bedre tilpasset parameterne en ønsker å overvåke. Disse grafene lages ved hjelp av koden i vedlegg 3.



Figur 4.18: Eksempel på grafisk overvåking

4.4.4 Simuleringskontroller

Simuleringskontrolleren har i oppgave å passe på at cellenes SOA ikke brytes. Kontrolleren mottar alle spenningene og temperaturen fra de seks cellene. Om noen av disse verdiene går utenfor cellens SOA vil simuleringen stanses. Figur 4.19 viser designet til kontrolleren. Det benyttes en MATLAB funksjonsblokk til å kontrollere verdiene til cellene.



Figur 4.19: Undersystemet til simuleringskontroller

Figur 4.20 viser koden til simuleringskontrolleren. Koden begynner med å plassere alle inngangsverdiene i to vektorer, en til spenning og en til temperatur. Deretter finnes maks- og minimumsverdiene til begge vektorene. Avslutningsvis sammenlignes disse verdiene med cellenes SOA-verdier for spenning og temperatur. Disse verdiene finnes i databladet til battericellen (Vedlegg 1). Hvis noen av verdiene er utenfor SOA vil simuleringen stanses.

```
function stop = fcn(u1, u2, u3, u4, u5, u6, t1, t2, t3, t4, t5, t6)

%Sort input parameters in vectors
U = [u1, u2, u3, u4, u5, u6];
T = [t1, t2, t3, t4, t5, t6];

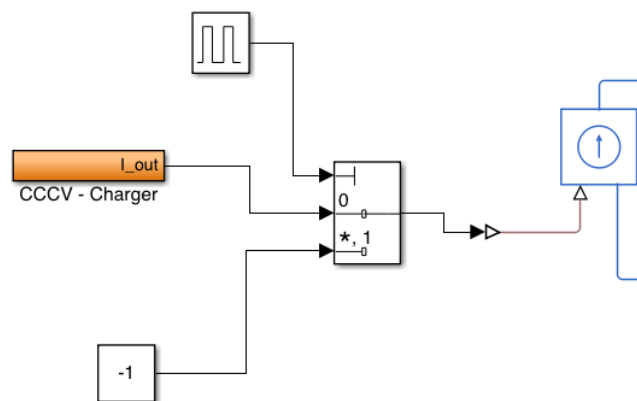
%Find max and min values
max_U = max(U);
min_U = min(U);
max_T = max(T);
min_T = min(T);

%Check if values are inside the cell SOA
if ((max_U >= 4.2) || (min_U <= 2.5) || (max_T >= 313.15) || (min_T <= 273.15))
    stop = 1;
else
    stop = 0;
end
```

Figur 4.20: Kode for simuleringskontroller

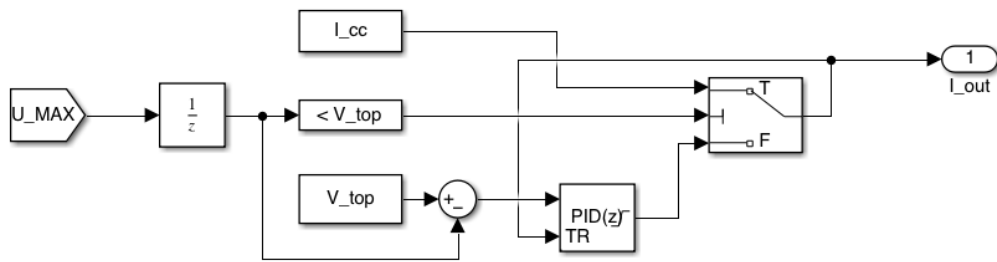
4.5 Opp- og utlading

I denne modellen forgår opp- og utlading av batteriet i to separate prosesser. Opplading skjer ved at CCCV-laderen kobles til batterikretsen. Utlading gjøres ved at batteriene blir tilført en konstant negativ strøm. Bryteren bestemmer når batteriene skal lades opp og lades ut. Dette er bestemt ved en pulsgenerator-blokk, som kan endres ut ifra hva den ønskelige tiden for opplading og utlading skal være.



Figur 4.21: Opplading og utlading ved den tidsinnstilte bryteren

4.5.1 CCCV-lader



Figur 4.22: Undersystemet til CCCV-lader

CCCV-laderen er konstruert som vist i figur 4.22. Designet av laderen er hentet fra kretsen laget av Javier Gazzarri. (Gazzarri, 2021) En bryter veksler mellom to tilstander, CC og CV. I_{cc} er variabelen som definerer mengden strøm tilført systemet. Denne variabelen kan variere ut ifra ønsket oppladingshastighet. Jo høyere strøm, jo raskere opplading. Den andre tilstanden er en mer kompleks krets som består av inngangsverdien U_{MAX} , sammenlikningsblokk, summasjonsblokk og en PID-regulator. U_{MAX} er den høyeste målte spenningen blant samtlige battericeller. Denne verdien blir sammenliknet med battericellens høyeste teoretiske spenningsnivå V_{top} . Når U_{MAX} er mindre enn V_{top} skal laderen tilføre konstant strøm til batteriet. I det øyeblikket en av cellene når maksimalverdien for den teoretiske spenningen vil bryteren endre tilstand. Strømmen vil bli trukket fra V_{top} og PID-regulatoren vil sørge for at strømmen eksponentiell reduseres, og konvergerer mot null.

4.5.2 Utlading ved konstant negativ strøm

Utlading av battericellene må gjøres gjennom CC-metoden. Dette er et sikkerhetstiltak produsenten av battericellen har satt som krav. (Sanyo Electric by Panasonic, 2021) Simuleringen tar for seg CC-utlading ved å koble batterikretsen til en konstant-blokk med negativ verdi (se figur 4.21).

5 Resultater

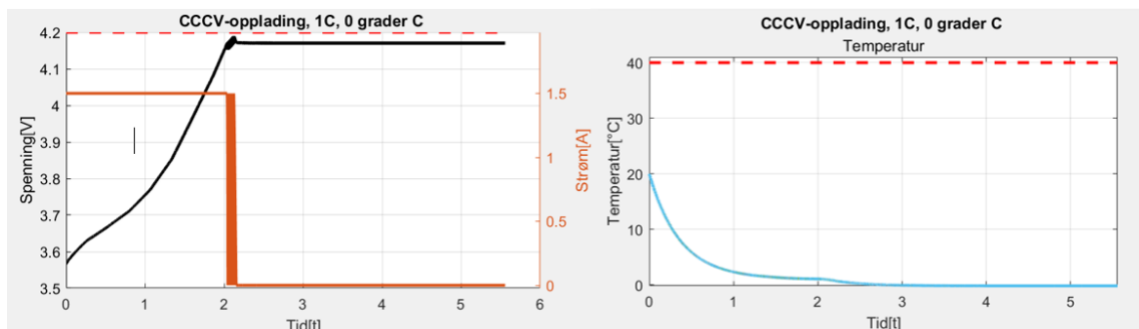
Dette kapittelet tar for seg resultatene fra de systematiske testene gjennomført i oppgaven. Testene er av opp- og utlading av battericellen og balanseringsalgoritmene som er utviklet i oppgaven.

5.1 Opp- og utlading av batteri

Det er gjennomført tre tester for opp- og utlading. To av testene baserer seg på opp- og utladningskarakteristikkene gitt i databladet (se vedlegg 1). Den siste testen undersøker ulike parameterverdier for å kunne nå maksimal batterikapitet etter opplading. Resultatene sammenlignes opp mot databladet til SANYO UR18650W.

5.1.1 Test 1 - Opplading

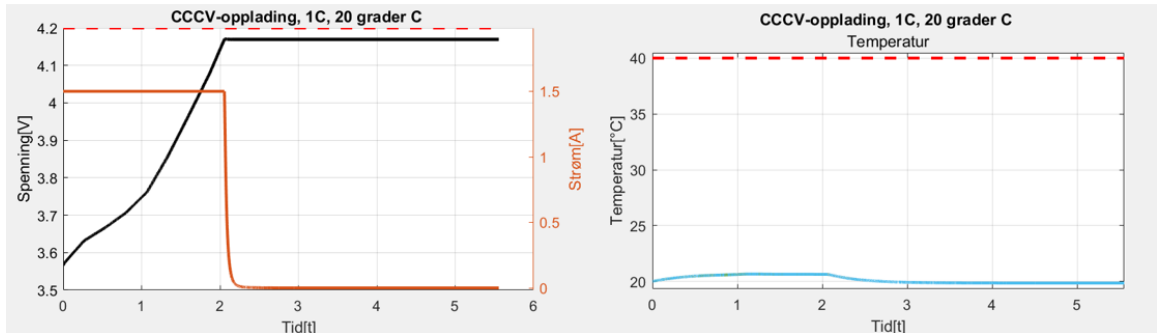
Test 1 tar for seg opplading med CCCV-lader. Formålet med testen er å lage en graf som er nær identisk den teoretiske CCCV- oppladingsgrafen i kap.2 (Figur 2.1). I denne testen lades batteriet opp med 1C, og simuleringen gjennomføres tre ganger. Temperatur på omgivelsene endres for hver gjennomføring, henholdsvis fra 0, 20 og 40 °C.



Figur 5.1: CCCV-opplading ved 0 °C. Til venstre: Strøm (oransje) og spenning(svart). Til høyre: Temperatur.

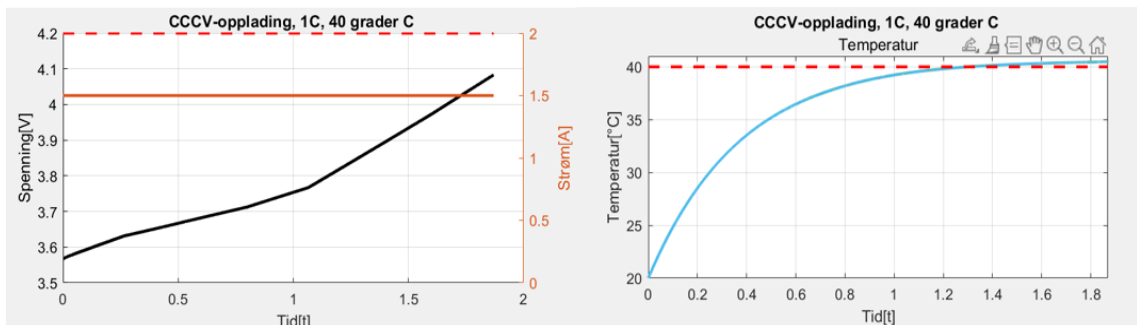
Graf 1 viser spenningsnivå (oransje) og strømnivå (svart) under CCCV-oppladning. Alle battericellene har 100% SOC fra start, dette medfører at cellene opererer som én enhet under testingen. Under første simulering kan en observere at kurvene til strøm og spenning har en karakteristikk som likner på den teoretiske figur 2.1 (se teori 2.3.1). Det er imidlertid noen avvik fra den teoretiske oppførselen til CCCV-oppladingen. Etter to timer opplading med konstant strøm veksler den simulerte laderen mellom 1.5A og 0A. Dette kan sees som en tykk oransje strek i figur 5.1. Til slutt stabiliserer grafen seg på 0

A. Spenningen krysser ikke 4.2V. En ideell CCCV-lader skal sørge for en negativ eksponentiell kurve på strømkurven i det tidspunktet batteriet når maksverdi på spenningen. Dette forekommer ikke under denne testen.



Figur 5.2: CCCV-opplading ved 20 °C. Graf 3 til venstre og graf 4 til høyre.

Graf 3 viser spenningsnivå og strømnivå under CCCV-oppladning ved 20 °C. Dette resultatet har en identisk respons som den teoretiske CCCV-oppladningen (figur 2.1). Graf 4 viser at temperaturen holder seg innenfor akseptabelt nivå.

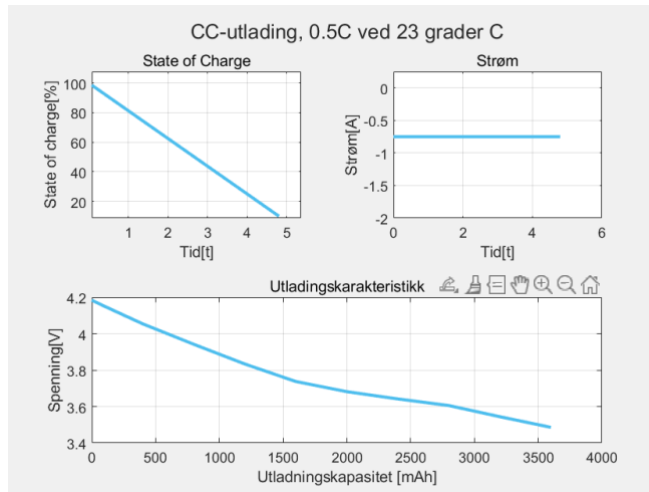


Figur 5.3: CCCV-opplading ved 40 °C. Graf 5 til venstre og graf 6 til høyre.

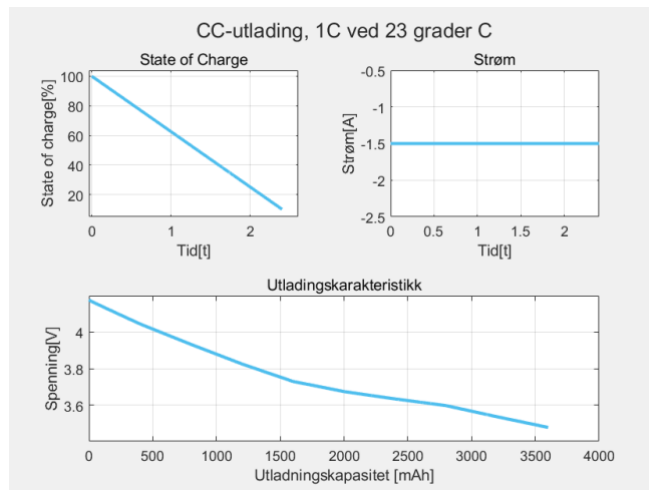
Siste forsøk gir et mindre ønskelig resultat. Simuleringen stopper før CCCV-laderen veksler mellom konstant strøm og konstant spenning. Dette skyldes den høye temperaturen til battericellene. Graf 6 viser at temperaturen til battericellene overstiger 40 °C, noe som er utenfor battericellens SOA.

5.1.2 Test 2 – Utlading

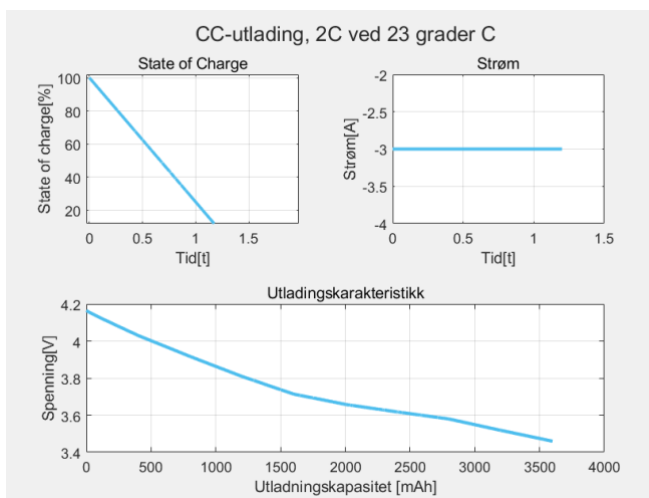
Test 2 tar for seg utlading med konstant strøm ved romtemperatur. Her vil C-rate variere, og fokuset vil ligge på utlading med 0.5, 1 og 2C. Målsetningen til testen er å sammenligne utladningskarakteristikken til battericellene i testen med det i databladet.



Figur 5.4: CC-utlading med 0,5C.



Figur 5.5: CC-utlading med 1C



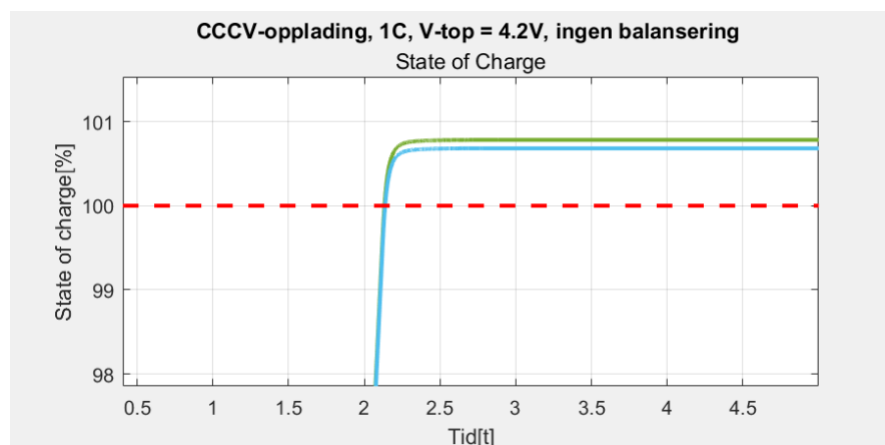
Figur 5.6: CC-utlading med 2C

Figur 5.4, 5.5 og 5.6 viser at utlading med høyere C-rate gir raskere utlading. Ved utlading av batteriet med 0.5C vil battericellen nå bunnivå etter 4,8 timer. Utlading med 1C resulterer i at batteriet blir utladet etter 2,4 timer. Til slutt kan en se at utlading med 2C gjør at batteriet når minimumsnivå etter 1,2 timer. I tillegg er det interessant å se at utladningskarakteristikken til de tre forsøkene ikke endrer seg, selv om C-raten endres mellom de tre forsøkene.

5.1.3 Test 3 – Oppnå 100% State of Charge

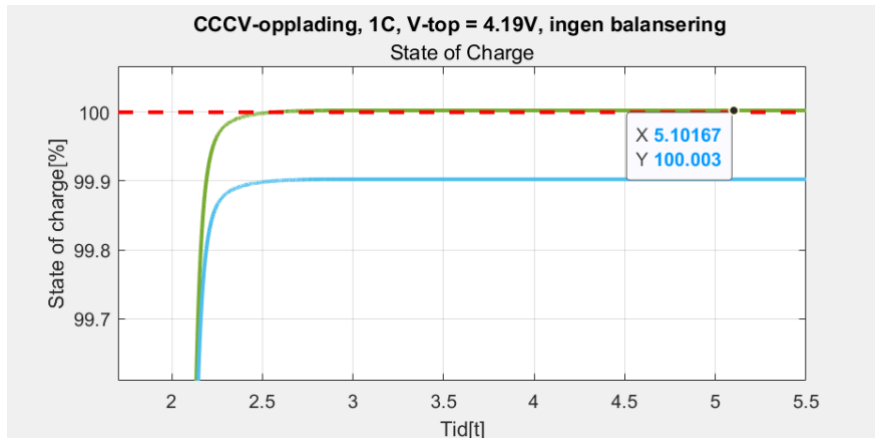
Test 1 belyser en problematikk rettet mot battericellene evne til å nå 100% SOC. Test 3 vil ta for seg testing av variabelen V_top (kapittel 4.5.1), for å kunne optimalisere CCCV-laderen. Målet med testene er å finne den verdien for V_top som gir et SOC-nivå nærmest mulig 100%. Variabelen V_top vil i første simulering bli satt til 4.2V, i andre simulering bli satt til 4.19 V og i siste simulering bli satt til 4.1895V.

Oppladingen gjøres uten balansering og CCCV-laderen leverer en konstant strøm på 1C. Den ene battericellen har en differanse på 0.1% SOC fra de resterende fem celler. Grunnen til dette er at CCCV-laderen må ha minimum to verdier å sammenlikne. På den måten klarer laderen å finne en maksverdi (V_top) mellom disse to verdiene, og vet dermed når den skal stoppe opplading med konstant strøm. Dersom SOC-nivåene i cellene er helt like vil laderen ha problemer med å regne ut en maksverdi, som resulterer i at simuleringen stanses.



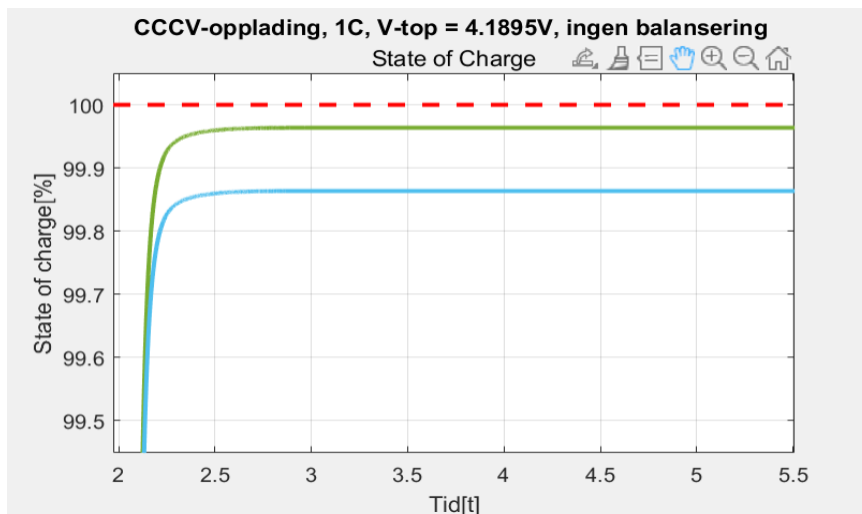
Figur 5.7: SOC-nivåene til battericellene med V_top = 4.2V

Første simulering, se figur 5.7, viser at 4.2V er en for høy verdi for variabelen V_top. Med denne verdien vil samtlige battericeller få en SOC-verdi over 100%. Dette medfører overlading.



Figur 5.8: SOC-nivåene til battericellene med $V_{top} = 4.19V$

Andre simulering, som figur 5.8 viser, gir en opplading som nesten resulterer i nøyaktig 100% SOC. Battericellen med høyest SOC-nivå krysser 100%-linjen og ender opp med en batteritilstand på 100.003%. Dette er over maksimumsgrensen for battericellenes SOC-nivå og resulterer i overlading.



Figur 5.9: SOC-nivåene til battericellene med $V_{top} = 4.1895V$

Siste simulering er gjennomført med en marginal endring fra den forrige simuleringen. Dette forsøket gir et resultat på 99.9% for den cellen med høyest SOC-nivå. Ingen av battericellene blir overladet. V_{top} lik 4.1895V er en verdi som gir full opplading av battericellene, uten å forårsake overlading. Denne verdien benyttes derfor som V_{top} i resten av simuleringene.

5.2 Balansering

Testingen av balanseringsmetodene gjennomføres forskjellig ut ifra hvilken metode som brukes. Felles for alle er at battericellene benytter SOC verdiene som er vist i tabell 5.1. I tillegg vil det gjennomføres tester med forskjellig strømmengde under opplading, henholdsvis 0.25, 0.5, 1 og 2C.

Tabell 5.1: Startparametere for balanseringstester

SOC Celle 1 [%]	21
SOC Celle 2 [%]	20,9
SOC Celle 3 [%]	20,2
SOC Celle 4 [%]	20,4
SOC Celle 5 [%]	20
SOC Celle 6 [%]	20,7
Lufttemperatur [°C]	23

Testene vil i hovedsak sette søkelys på tre forskjellige faktorer. Disse er oppladingstid, maksimal temperatur under opplading og maksimal differanse i SOC mellom cellene når batteriet er fulladet. Oppladingstiden vil i utgangspunktet være proporsjonal med strømmengden det lades med. Valg av balanseringsmetode vil påvirke ladetiden, da selve balanseringen bruker noe energi. Mengden energi som blir brukt til balansering varierer fra metode til metode. Maksimal temperatur under opplading vil gi et innblikk på hvor sikker oppladingen er. Hvis det er høye temperaturer under oppladingen, vil metoden generelt være lite egnet. Avslutningsvis vil maksimal differanse i SOC si noe om hvor godt balanseringsmetoden fungerer.

5.2.1 Passiv balansering

Testene av den passive balanseringen gjennomføres med en ΔU lik 0.0001. Dette vil si at balanseringen starter om differansen mellom en vilkårlig celle og cellen med minst spenning er større enn 0.0001 Volt.

5.2.1.1 Test 1

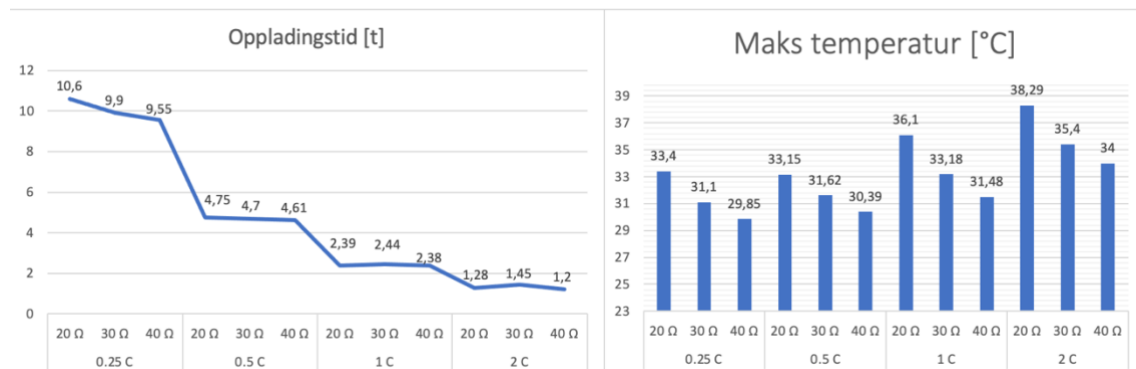
Første testen av passiv balansering gjennomføres med balanseringsmotstander på 10, 20, 30 og 40 Ohm.

Tabell 5.2: Testresultater passiv balansering (Test 1)

	0.25 C				0.5 C			
	10 Ω	20 Ω	30 Ω	40 Ω	10 Ω	20 Ω	30 Ω	40 Ω
Oppladingstid [t]	NA	10,6	9,9	9,55	NA	4,75	4,7	4,61
Maks temperatur [°C]	40	33,4	31,1	29,85	40	33,15	31,62	30,4
SOC Differanse [%]	NA	0,115	0,08	0,061	NA	0,12	0,033	0,04

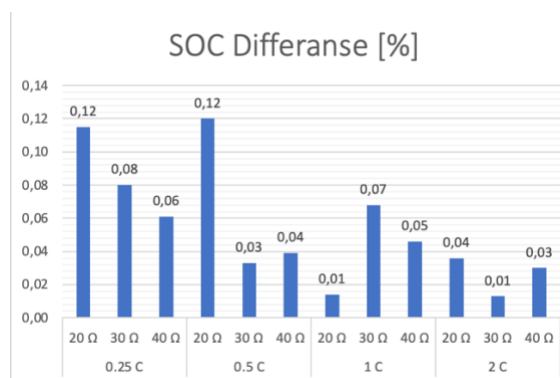
	1 C				2 C			
	10 Ω	20 Ω	30 Ω	40 Ω	10 Ω	20 Ω	30 Ω	40 Ω
Oppladingstid [t]	NA	2,39	2,44	2,38	NA	1,28	1,45	1,2
Maks temperatur [°C]	40	36,1	33,18	31,48	40	38,29	35,4	34
SOC Differanse [%]	NA	0,014	0,068	0,046	NA	0,036	0,013	0,03

Tabell 5.2 viser resultatene etter første test. Feltene merket i rødt indikerer at simuleringen ble avbrutt på grunn av at celledemperaturen gikk utenfor cellenes SOA. Resultatene på disse testene er derfor ikke relevante for sammenligning.



Figur 5.10: Sammenligning av oppladingstid og temperatur under passiv balansering (Test 1)

Figur 5.10 viser en sammenligning av oppladingstid og temperatur under passiv balansering av cellene. Oppladingstiden blir proporsjonalt mindre ut ifra strømmengden batteriet lades med. I tillegg kan en se at oppladingen går raskere og temperaturen blir lavere jo større balanseringsmotstand som benyttes. Temperaturforskjellene er relativt liten når strømmengden er på 0.25C og 0.5C, til tross for at strømmengden doubles. Når strømmengden er høyere enn 0.5C øker temperaturene. Dette kan skyldes at battericellen blir eksponentielt varmere jo høyere strømmengden blir.



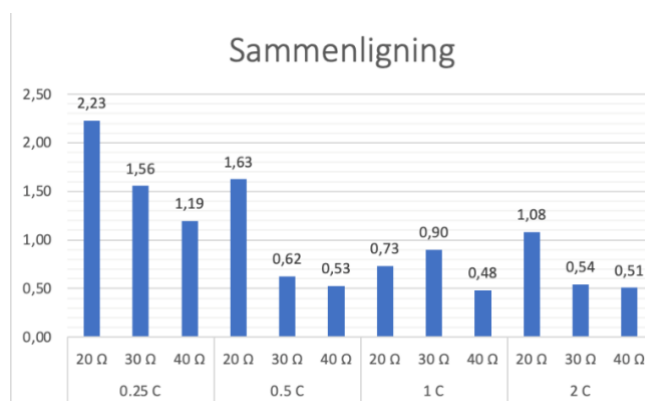
Figur 5.11: Maksimal SOC differanse etter passiv balansering (Test 1)

Figur 5.11 viser SOC differansen etter den passive balanseringen. En kan se at alle resultatene er betydelig lavere enn startdifferansen på 1% SOC. Det betyr at alle testene gjennomfører balansering av batteriene. En kan også se at balanseringen blir bedre når både motstanden og strømmengden går opp.

Tabell 5.3: Skalerte testresultater og summen av disse (Test 1)

	0,25 C			0,5 C			1 C			2 C		
	20 Ω	30 Ω	40 Ω	20 Ω	30 Ω	40 Ω	20 Ω	30 Ω	40 Ω	20 Ω	30 Ω	40 Ω
Oppladingstid [t]	0,64	0,56	0,53	0,02	0,01	0,00	-0,24	-0,23	-0,24	-0,35	-0,34	-0,36
Maks temperatur [°C]	0,03	-0,24	-0,39	0,00	-0,18	-0,33	0,35	0,00	-0,20	0,61	0,27	0,10
SOC Differanse [%]	0,56	0,24	0,06	0,61	-0,20	-0,15	-0,38	0,13	-0,08	-0,17	-0,39	-0,23
Sum + 1	2,23	1,56	1,19	1,63	0,62	0,53	0,73	0,90	0,48	1,08	0,54	0,51

Tabell 5.3 viser verdiene til alle resultatene etter at disse har blitt skalert ved hjelp av gjennomsnittsnormalisering. Ved å skalere verdiene vil alle verdiene vektet likt i en sammenligning. Dette gjør det mulig å summere de tre resultatene fra hver test. Når alle faktorene er summert sammen er det mulig å se hvilken kombinasjon av strømmengde og balanseringsmotstand som totalt sett gir best resultat. For å kunne lage et diagram som ikke inneholder negative verdier, er alle summene addert med én.



Figur 5.12: Sammenligning av passiv balansering med forskjellige parametere (Test 1)

Figur 5.12 sammenligner de forskjellige resultatene når alle parameterne er likt vektet. En kan se at det jevnt over er gjennomføringene med den største balanseringsmotstanden på 40 Ohm som presterer best. Bakgrunnen for dette er, som kan ses på figur 5.10, at både oppladingshastigheten og temperaturen går ned når motstanden økes. I tillegg viser figur 5.11 at også SOC differansen i mange tilfeller blir mindre ved høyere balanseringsmotstand. Av hensyn til resultatene fra denne testen, er det interessant å utføre flere tester med passiv balansering der det benyttes høyere balanseringsmotstand.

5.2.1.2 Test 2

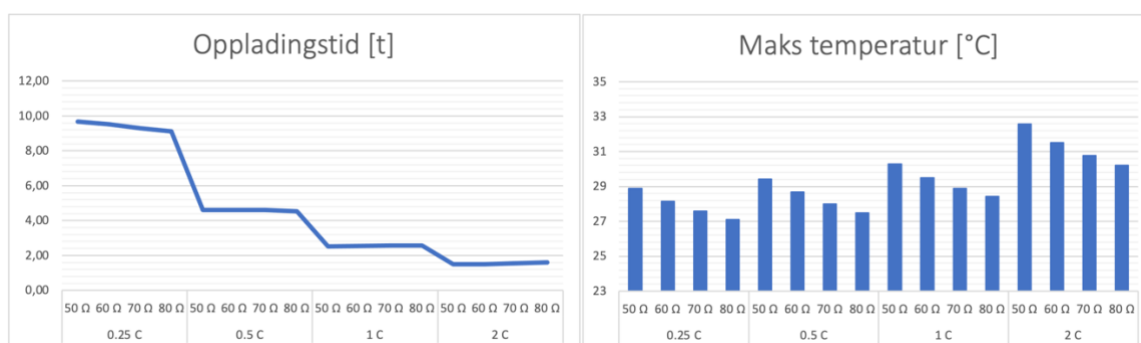
Den andre testen av passiv balansering, vil etter erfaring fra test 1 benytte større balanseringsmotstander. Motstandene som benyttes i testen er på 50, 60, 70 og 80 Ohm.

Tabell 5.4: Testresultater passiv balansering (Test 2)

	0.25 C				0.5 C			
	50 Ω	60 Ω	70 Ω	80 Ω	50 Ω	60 Ω	70 Ω	80 Ω
Oppladingstid [t]	9,68	9,52	9,29	9,12	4,62	4,6	4,61	4,52
Maks temperatur [°C]	28,89	28,14	27,58	27,11	29,43	28,67	28	27,48
SOC Differanse [%]	0,0501	0,0419	0,0086	0,026	0,0504	0,0135	0,031	0,0075

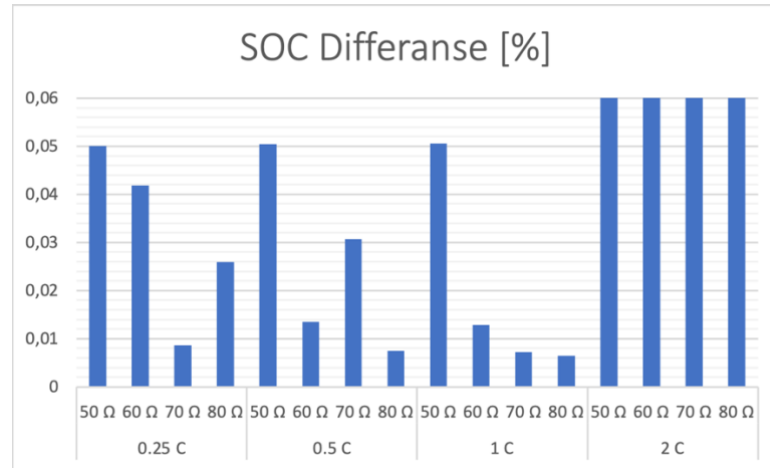
	1 C				2 C			
	50 Ω	60 Ω	70 Ω	80 Ω	50 Ω	60 Ω	70 Ω	80 Ω
Oppladingstid [t]	2,52	2,54	2,57	2,57	1,5	1,5	1,55	1,6
Maks temperatur [°C]	30,3	29,5	28,89	28,42	32,58	31,52	30,78	30,2
SOC Differanse [%]	0,0506	0,0129	0,0072	0,0064	0,145	0,2364	0,3043	0,3638

Tabell 5.4 viser testresultatene fra den andre testen med passiv balansering. Overordnet kan en se at balanseringen stort sett fungerer bedre enn i test 1, unntaket er når det lades med 2C. Bakgrunnen for dette er rett og slett at det ikke blir trukket nok strøm gjennom balanseringsmotstanden til at cellene rekker å bli balansert innenfor den korte oppladingstiden.



Figur 5.13: Oppladingstid og temperatur under passiv balansering (Test 2)

I figur 5.13 kan en se samme tendens som ble gjort i test 1. Både oppladingstiden og maksimal temperatur går ned når balanseringsmotstanden øker. Generelt er temperaturene relativt lave. Ingen av gjennomføringene viser fare for overoppheting.



Figur 5.14: SOC differanse passiv balansering (Test 2)

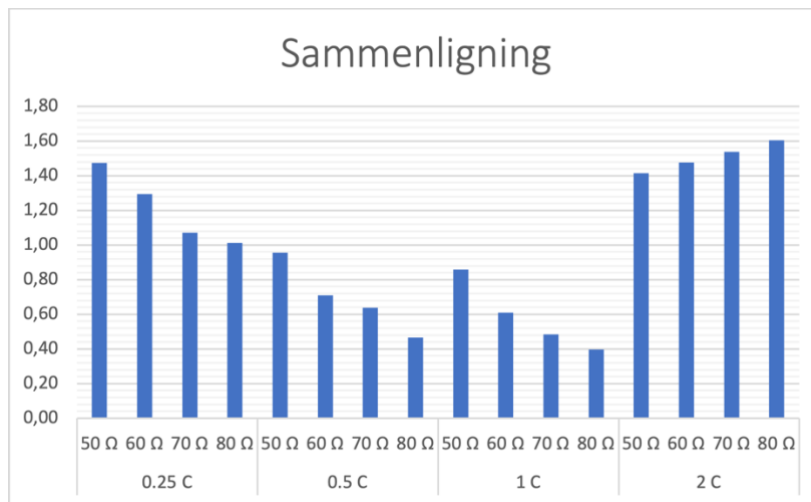
Figur 5.14 viser en sammenligning av SOC differansen til de forskjellige parameterne. Testene som benytter seg av strømmengden på 2C er såpass dårlige at det ikke er verdt å tilpasse diagrammet til disse verdiene. Snittdifferansen på de fire testene med 2C er på 0.26 %. Det vil si at cellene rett og slett ikke har rukket å bli balansert i løpet av oppladingen. Alle de andre testene viser utrolig gode resultater. De beste gjennomføringene endte opp med en SOC-differanse på under 0.01 %, noe som er svært nøyaktig.

Tabell 5.5: Skalerte testresultater for passiv balansering (Test 2)

	0.25 C				0.5 C			
	50 Ω	60 Ω	70 Ω	80 Ω	50 Ω	60 Ω	70 Ω	80 Ω
Oppladingstid [t]	0,63	0,61	0,58	0,56	0,01	0,01	0,01	0,00
Maks temperatur [°C]	-0,06	-0,20	-0,30	-0,39	0,04	-0,10	-0,22	-0,32
SOC Differanse [%]	-0,10	-0,12	-0,21	-0,16	-0,10	-0,20	-0,15	-0,22
Sum + 1	1,47	1,29	1,07	1,01	0,96	0,71	0,64	0,47
	1 C				2 C			
	50 Ω	60 Ω	70 Ω	80 Ω	50 Ω	60 Ω	70 Ω	80 Ω
Oppladingstid [t]	-0,24	-0,24	-0,24	-0,24	-0,37	-0,37	-0,36	-0,36
Maks temperatur [°C]	0,20	0,05	-0,06	-0,15	0,61	0,42	0,29	0,18
SOC Differanse [%]	-0,10	-0,20	-0,22	-0,22	0,17	0,42	0,61	0,78
Sum + 1	0,86	0,61	0,48	0,40	1,41	1,48	1,54	1,60

Tabell 5.5 viser de skalerte resultatene fra andre test av passiv balansering. Skaleringen er blitt utført på samme måte som i første test. Det er verdt å nevne at de skalerte resultatene i de to testene ikke er sammenlignbare. Bakgrunnen for dette er at verdiene er

skalert ved hjelp av gjennomsnitt fra egen testgruppe. De skalerte resultatene kan derfor kun tolkes innad i egen testgruppe.



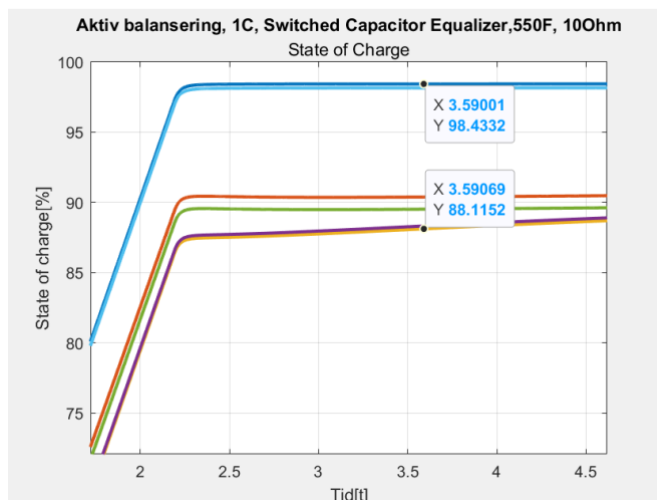
Figur 5.15: Sammenligning av passiv balansering med forskjellig strømmengde og balanseringsmotstand (Test 2)

Figur 5.15 viser en sammenligning av resultatene fra den andre testen av passiv balansering. Som tidligere har oppladingstid, maks temperatur og SOC differanse blitt vektlagt likt ved hjelp av de skalerte resultatene. En kan tydelig se en tendens som tilsier at balanseringen fungerer bedre jo høyere balanseringsmotstanden og strømmengden er. Dette gjelder dog kun fram til balanseringen ikke rekker å fullføre balanseringen før oppladingen er ferdig, slik som skjer under opplading med 2C.

5.2.2 Aktiv Balansering

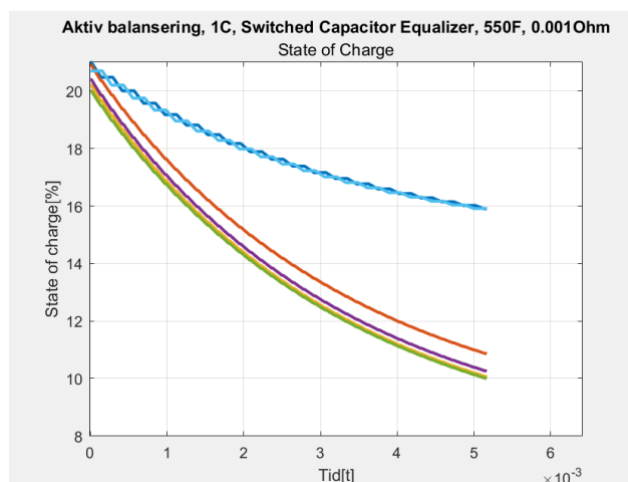
5.2.2.1 Switch Capacitor Equalization

Switch Capacitor Equalization (SC-balansering) krever ingen logisk styring annet enn to ulike faser på partall- og oddetalsbrytere. Et resultat av dette er at det krever nøye testing og utregning av verdiene til komponentene i kretsen. SC-balansering blir testet i tre forsøk, der battericellene blir ladet opp med lik C-rate. SOC-nivået til battericellene ved start av testene er lik startparameterne i tabell 5.1. Verdiene til kondensatoren og motstanden i MOSFET-bryterne endres under de tre forsøkene. Formålet med denne testen er å undersøke hvilke verdier for kondensatoren og MOSFET-bryterne som gir en vellykket balansering av battericellene.



Figur 5.16: SOC-nivå til battericellen etter CCCV-opplading og SC-balansering. Kapasitans = 550F og motstand = 10 ohm.

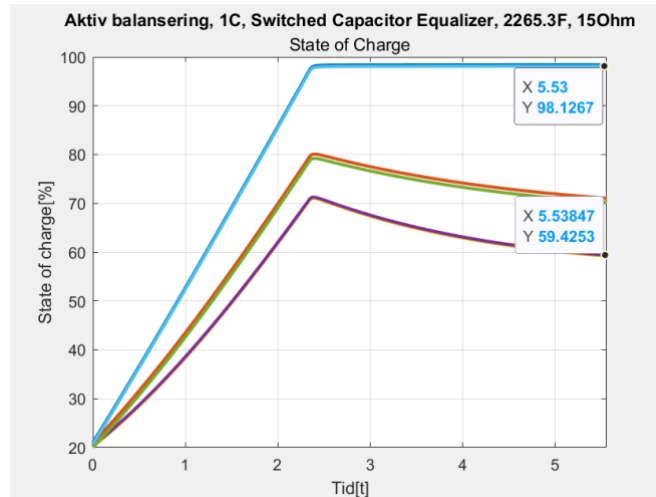
Forsøk 1 er gjennomført med 1C opplading, 550F kapasitans på kondensatoren og 10 Ohm motstand på bryterne. Figur 5.16 viser SOC-nivået til battericellene under oppladning. Før oppladningen var differansen mellom høyest og lavest battericelle på 0.3%, men etter testen viser figur 5.16 at differansen er 10.0%. Forskjellene i SOC-nivå mellom battericellene har økt. I dette tilfellet er verdiene til kondensatorene og bryterne feil.



Figur 5.17: SOC-nivå til battericellen etter CCCV-opplading og SC-balansering. Kapasitans = 550F og motstand = 0.001 ohm.

I andre forsøk er motstanden til bryterne endret. Motstanden er satt til en betydelig mindre verdi på 0.001 ohm. Verdien til kondensatoren er den samme. I dette forsøket

blir battericellen utladet i det CCCV-laderen blir koblet til. Figur 5.17 viser at battericellene blir ladet ut istedenfor å bli ladet opp. Dette er ikke et ønskelig resultat for balanseringsmetoden.



**Figur 5.18: SOC-nivå til battericellen etter CCCV-opplading og SC-balansering.
Kapasitans = 2265.3F og motstand = 15 ohm.**

I det siste forsøket blir verdien til kondensatoren satt til 2265.3 F. Figur 5.18 viser resultatet fra denne simuleringen. Verdien til kondensatoren er ikke tilfeldig. Kapasitans lik 2265.3F gir kondensatoren mulighet til å romme lik mengde energi som battericellene. Formelen $W=0.5 \cdot C \cdot U^2$, blir benyttet for å regne ut kapasitansen til kondensatoren. (Wikipedia, u.d.) W er arbeidet til battericellen målt i Joule, C er kapasitans målt i Farad og U er maks spenning i batteriet målt i Volt. Differansen i cellenes SOC-nivå har økt betydelig mellom starten og slutten av simuleringen, og differansen ender på 38.7%. Resultatet fra simuleringen viser at konfigurasjonene og verdiene på komponentene ikke gir tilfredsstillende balansering av cellene.

5.2.2.2 Multiple Windings Transformer

Under testingen av Multiple Windings Transformer balanseringen er det benyttet en delta SOC på 0,001 og en intern motstand i MOSFET'ene på 0.5 Ohm. Disse verdiene finnes i koden for startparameterne (Vedlegg 2). Testene utføres med samme strømmengder som i passiv balansering, henholdsvis 0.25, 0.5, 1 og 2 C.

Tabell 5.6: Testresultater Multiple Windings Transformer (Test 1)

	0,25C	0,5C	1C	2C
Oppladingstid [t]	9,91	5,57	3,32	2,5
Maks temperatur [°C]	26,75	26,76	26,83	27,15
SOC Differanse [%]	0,0748	0,0739	0,072	0,0782

Tabell 5.6 viser resultatene fra første test av MWT balansering. Resultatene for maksimal temperatur og SOC differanse er nærmest identiske på de fire gjennomføringene. Den lave temperaturen stemmer godt med teorien bak aktiv balansering (kap.2.2.2.2). Energien som benyttes under balanseringen overføres til resten av batteriet, slik at energien ikke transformeres til varme. Sett i lys av den lave temperaturen og SOC differansen under balanseringen, er det interessant å gjennomføre et forsøk der strømmengden økes.

Tabell 5.7: Testresultater Multi Windings Transformer (Test 2)

	3C	4C	5C	6C
Oppladingstid [t]	1,41	1,17	1,06	NA
Maks temperatur [°C]	29,1	32,62	36,32	40
SOC Differanse [%]	0,0644	0,0605	0,0567	NA

Tabell 5.7 viser resultatene fra andre test av MWT balansering. Resultatene viser at balanseringen fungerer bra selv om strømmengden øker. Naturlig nok, blir temperaturen til slutt så høy at simuleringen stanses. Bakgrunnen for dette kan være batteriets interne motstand, og trenger nødvendigvis ikke å ha noe med balanseringen å gjøre.

6 Drøfting

I dette kapittelet vil den simulerte elektriske kretsen og resultatene fra det tidligere kapittelet bli drøftet opp mot kraven satt i oppgaven. Oppgaven vil i tillegg gjøre en vurdering på hvorvidt BMS-modellen er realistisk. Kravene gitt i oppgaven er som tidligere nevnt:

1. Finne/utvikle en modell for en Li-Ion celle.
2. Utforme en simulert elektrisk krets som realistisk kan simulere opp- og utladning av et batteri bestående av seks celler.
3. Designe både en aktiv og passiv balanseringsmetode som evner å utjevne cellenes SOC i løpet av oppladingen av batteriet.

6.1 Batteri

Det første kravet til oppgaven er å finne eller utvikle en modell for en Li-Ion battericelle. Batteriet benyttet i denne oppgaven er en SANYO UR18650W battericelle. Valget faller på denne battericellen, med tilhørende datablad, av den grunn at battericellen var ferdigdesignet i MATLAB. I løpet av utviklingsprosessen av BMS-modellen viser det seg at å designe en realistisk battericelle i MATLAB er mer komplisert enn først antatt. Årsaken til dette er at en battericelle i MATLAB krever parametere som etterlikner reelle verdier fra tester på en ekte battericelle. (Wang, 2019) Oppgaven har til hensikt å designe en BMS ved hjelp av skrivebord-simulering, noe som fører til at anskaffelser av fysiske battericeller ikke er nødvendig. For å kunne jobbe med BMS-modellen er det essensielt å ha en battericelle som responderer realistisk på simuleringstester. Dette, i tillegg til manglende kompetanse innfor testing av fysiske battericeller, gjør at valget faller på battericellen SANYO UR18650W.

Resultatene fra opp- og utladningstestene muliggjør en sammenlikning av den MATLAB-modellerte battericellen og den fysiske SANYO UR18650W battericellen. Det er interessant å vurdere hvor lik respons den simulerte- og den fysiske battericellen har. Ved å studere figur 5.2 kan en se at grafen har lik form og verdier som «charge characteristics»-grafene i databladet (se vedlegg 1). Dette er et godt tegn. 1C oppladning i 20 °C lufttemperatur gir likt resultat både simulert og fysisk. Dette tyder på at det simulerte batteriet fungerer slik det skal. Battericellenes temperatur er også en faktor som blir vurdert. Under testing av CCCV-oppladning ved 40 °C i lufttemperatur, kan en se i

figur 5.3 at cellenes temperatur går over battericellens SOA. Dette resulterer i at simuleringen stanser. En slik respons er i henhold til batteriets datablad, da øvre temperaturgrense er på 40 °C. Simulering av opp- og utlading gir resultater som bygger oppunder argumentasjonen for at battericellen er modellert riktig i henhold til databladet. På den andre siden viser resultater fra tester gjort av utladningskarakteristikk at det modellerte batteriet ikke responderte slik det er tiltenkt. Databladet viser til utladningskarakteristikker ved utlading gjort med tre forskjellige C-rater (se vedlegg 1). Utladningskarakteristikk-grafen i figur 5.4, 5.5 og 5.6 samsvarer ikke med grafen gitt i databladet. Den simulerte utladingen stopper når battericellen når 3.48 V, der databladet viser at battericellen skulle klare å nå 2.5V før batteriet blir helt utladet. Grafens utseende er heller ikke lik. Databladet viser en rask endring etter at spenningsnivået har passert ca. 3.5 V. Derimot viser figur 5.4, 5.5 og 5.6 at utladingen har en tilnærmet jevn negativ kurve som går fra 4.2V til 3.48V. Databladet viser også at samtlige utladingstester gjort med forskjellig C-rate gir ulike kurver, der den simulerte testen i MATLAB gir likt resultat for hver av de tre forsøkene. I tillegg er utladingskapasiteten forskjellig. Databladet viser utladingskapasitet mellom 1.4 og 1.6 Ah og den simulerte testen viser en utladingskapasitet på 3.6 Ah.

Disse ulikhetene i utlading kan skyldes at det modellerte batteriet ikke har evne til å lades helt ut i forhold til den fysiske battericellen. Databladet viser at spenningsnivået til SANYO UR18650W battericellen er utladet når spenningsnivået er 2.5V. Simuleringen stopper når en av den modellerte battericellen når omtrent 3.4V (se figur 5.4). Dette medfører at grafene fra de simulerte testene ikke viser kurven for utladingen mellom 3.4V og 2.5V. Dette kan ha utslag på utladningskarakteristikk-kurven. Dersom dette ikke er tilfellet kan ulike utladningskarakteristikk fortelle at den simulerte- og den fysiske battericellen ikke samsvarer.

6.2 Krets

For å tilfredsstillere krav nummer to, som sier «Utforme en simulert elektrisk krets som realistisk kan simulere opp- og utlading av et batteri bestående av seks celler», er design av en CCCV-lader essensielt for måloppnåelse. Tester gjort av opplading viser at den MATLAB-modellerte CCCV-laderen fungerer slik den skal. Figur 5.2 viser en identisk oppladingsrespons for de simulerte battericellene sammenliknet med den teoretisk CCCV-oppladingen. Dersom en vurderer spenning-/strømgrafene i figur 5.2 med grafene i figur 5.1 og 5.3 vil en se at 20 °C lufttemperatur er den ideelle temperaturen for opplading av den simulerte battericellen. Dette skyldes at spenning-/strømgrafene i figur 5.2 er den grafen blant de tre forsøkene som best etterlikner den teoretiske CCCV-oppladingen.

Gjennom test 3 av opplading (se kapittel 5.1.3) ble den optimale verdien for V_{top} funnet. Testing av ulike verdier resulterer i at 4.1895V er den verdien som gir høyest SOC-nivå uten å overlade battericellene. I denne modellen vil 99.9% SOC blir ansett som presist nok, og flere desimaler vil ikke være nødvendig.

Et kriterier for at CCCV-laderne skal fungere slik den skal, er at laderen mottar verdien for høyeste spenning til battericellene. Med andre ord er laderen avhengig av tilbakemelding fra batteriet. Dette krever styring og dataprosessering. Den modellerte CCCV-laderen i denne oppgaven må derfor være tilkoblet en BMS. Dersom laderen hadde vært et fysisk produkt ville den ikke kunnet bli bruk alene og måtte ha vært tiltenkt batterier med styringssystemer.

For å kunne vurdere tester av opp- og utlading mot et virkelig miljø er en avhengig av å utvikle en form for temperaturoverføring mellom de forskjellige cellene, balanseringskretsene og luften rundt systemet. Resultatene fra temperatursystemet er benyttet under all testing i oppgaven. Systemet evner å gi et estimert bilde på hvordan oppvarmingen av systemet kunne reagert under opp- og utladingen av batteriet. Nøyaktigheten til systemet er derimot noe mer usikkert. Grunnen til dette er at blokkene som styrer temperaturoverføring er avhengig av komponentenes overflateareal og varmeoverføringskoeffisient. For å få nøyaktige tilnærminger av dette må det benyttes ekte komponenter i systemet. Dette er ikke tilfellet i denne oppgaven.

Kontrollsystemet i modellen skal stanse opplading og utlading utenfor battericellens SOA. Dette fungerer for simuleringer gjort under tester i denne oppgaven. Designet for

dette kontrollsystemet har kun tatt høyde for skrivebordsimulering. Systemet stanser simuleringen dersom temperaturen eller spenning kommer utenfor grensene satt i programmet. Dette kan en se i testen av CCCV-opplading ved 40 °C (kapittel 5.1.1). Simuleringen stanser etter omtrent 1.5 time fordi temperaturene til cellene overstiger 40 °C.

Kontrollsystemet vil imidlertid ikke fungere i den fysiske verden med reelle komponenter. Systemet stanser kun simuleringen, uten å endre opp- eller utlading. For at kontrollsystemet skal kunne operere i et fysisk batterisystem må designet av kontrollsystemet endres. Kontrollsystemet må til enhver tid kunne lese av verdier fra batteriet og ha evnen til å stanse opp- og utlading om det kreves. På denne måten vil batteriet holde seg innenfor battericellens SOA.

6.3 Simulering

Krav nummer to nevner at det skal utformes en «...**simulert** elektrisk krets...». Simulering skaper en trygg plattform for testing og feiling. Konsept for batterikretser og balanseringsalgoritmer kan utforskes og kontrollers før utviklingsprosessen går over til å implementere konseptet på fysiske deler og batterier. (The MathWorks, Inc, 2018) Fra et sikkerhetsmessig ståsted er testing av batterier ved hjelp av simulering i et dataprogram en trygg metode. Denne oppgaven har som mål å øke kompetanse i fagfeltet, og med lite forkunnskaper er det avgjørende å starte på et grunnleggende nivå. Skrivebordsimulering i MATLAB gir en plattform for testing av BMS og batterimodeller uten sannsynligheten for å påføre skade på systemet og/eller personell.

I en utviklingsfase er simuleringsverktøyer og liknende teknologi et hjelpemiddel som gjør en i stand til å produsere robuste design mer effektivt. Samtidig vil simulering redusere system og teknisk risiko. (Blanchard & Fabrycky, 2011, s. 136) I tillegg gir simulering mulighet til å teste og utforske påvirkningen av eventuelle utvidelser av modellen, uten fysisk å produsere disse endringene. (Blanchard & Fabrycky, 2011, s. 175) Analyse av batterier ved hjelp av fysiske prototyper kan både være tidkrevende og dyrt. Derfor vil simulering kunne redusere testing av hardware-komponenter. Dette er et aspekt ved simulering denne oppgaven drar nytte av, med tanke på at det ikke bygges en BMS med hardware komponenter.

6.4 Balansering

Balanseringen i denne oppgaven er designet i henhold til kravene i problemstillingen. Det er designet tre typer balansering, en passiv og to aktive. Som resultatene viser, evnet den passive og den ene aktive metoden å gjennomføre balansering i løpet av oppladingstiden. Fellesnevneren for disse to er at begge benytter en logisk styring for å gjennomføre balanseringen. En fordel med dette er at en selv kan kontrollere hva som skjer i kretsen. Det gir en mulighet til å teste mindre deler av balanseringen under utviklingsfasen. Alternativet til logisk styring er, som er benyttet i Switch Capacitor Equalization, styring ved hjelp av elektriske pulser. Fordelen med dette er at det ikke er behov for å utvikle en logisk styring, altså et ledd mindre å feilsøke når noe ikke fungerer. Ulempen med denne typen styring er at parameterne i de elektriske komponentene får større betydning. Dette kommer tydelig fram fra testene gjort av SC balansering i kap.5.2.2.1, der endringer i parameterne fører til tre vidt forskjellige resultater. Det å velge riktige parametere er utfordrende. Det krever en stor innsikt i fagfeltet og en god forståelse av balanseringsmetodens virkemåte for å gjøre dette.

Den passive balanseringen er lite kompleks, dette gjør den relativt enkel å utvikle. Kretsen består kun av to komponenter og krever kun en enkel logisk styring. Det er likevel en utfordring å implementere balanseringen sammen med resten av kretsen. Spesielt når utvikling av den passive balanseringen skjer parallelt med systemutviklingen. Den kontinuerlige testingen er derfor viktig for å få en passiv balansering til å fungere slik den skal. Resultatene på de systematiske testene viser at den passive balanseringen er veldig avhengig av hvilken balanseringsmotstand og strømmengde som benyttes. Når disse to parameterne er tilpasset hverandre, vil balanseringen fungere svært nøyaktig. Om de ikke tilpasses, vil battericellene risikere å bli overopphetet. En mulig feilkilde i resultatene er at noen parametere er satt til en fastverdi. Disse parameterne er for eksempel den indremotstanden til MOSFET'ene og ΔU . Spesielt ΔU kan ha mye å si for resultatene til balanseringen. En høyere ΔU kan gjøre balanseringen mindre nøyaktig, men det vil samtidig føre til at balanseringen benytter mindre energi. En lavere ΔU vil gjøre balanseringen mer nøyaktig, men energiforbruket vil gå opp. Et høyere energiforbruk vil føre til at temperaturen under balanseringen øker og sannsynligheten for overoppheting blir større.

Utvikling av aktiv balansering er svært krevende. Det finnes en rekke forskjellige metoder, hvor de fleste benytter forskjellige prinsipper og logikker. Fellesnevneren for

metodene er at de ofte er kompliserte, enten teknisk eller logisk. Det er i tillegg en utfordring at det er vanskelig å finne referanser som beskriver både kretsen og logikken til den aktive balanseringen i detalj. Resultatene fra de systematiske testene av den aktive balanseringen gjenspeiler dette. Switch Capacitor Equalization evner ikke å balansere battericellene, selv etter gjentatte tester med forskjellige parametere. Multiple Windings Transformer evner, etter mye kontinuerlig testing underveis, å balansere battericellene raskt og kontrollert. Under den systematiske testingen av MWT blir det, på samme måte som under den passive balanseringen, benyttet faste parametere i MOSFET'ene og delta_S. Forskjellen sammenlignet med den passive balanseringen er at en lavere delta_S fører til at balanseringen aldri blir ferdig. Grunnen til dette er at logikken ikke er hurtig nok til å kunne gjøre veldig små endringer.

Resultatene fra balanseringstestene viser at systemet evner å gjennomføre både aktiv og passiv balansering innenfor oppladningstiden. Fordelene med passiv balansering er at den er relativt enkel og har mulighet til å balansere svært nøyaktig om det benyttes en balanseringsmotstand som er tilpasset strømmen det lades med. Ulempen er at metoden fører til tap av energi og at feil balanseringsmotstand kan føre til overoppheting av batteriet. Fordelene med aktiv balansering er at den overfører energien fra den høyeste oppladede cellen til resten av batteriet, slik at det blir minst mulig energitap. Den tåler opplading med høy strøm og kan benytte den samme parameterkonfigurasjonen til flere forskjellige strømmengder. I tillegg skjer balanseringen i løpet av svært kort tid og kan gjennomføres både under opp- og utlading. Ulempen med denne type balansering er kompleksiteten, og at den benytter SOC verdier til balansering. SOC er en verdi som i seg selv er vanskelig å beregne nøyaktig. Denne usikkerheten vil derfor forplante seg til den aktive balanseringen.

6.5 Systemet i den virkelige verden

Det andre kravet til oppgaven er: «Utforme en simulert elektrisk krets som **realistisk** kan simulere opp- og utladning av et batteri bestående av seks celler». Denne delen av drøftingen vil diskutere om resultatene fra den systematiske testingen av systemet er realistisk.

Systemet som er utformet i oppgaven er svært avhengig av parameterne i de forskjellige komponentene for å kunne fungere best mulig. Mange av disse parameterne er bestemt fortløpende i utviklingsprosessen. Enten er de bestemt etter kontinuerlig testing eller så benytter de standardverdiene som leveres i MATLAB. Dette skaper en usikkerhet rundt resultatenes validitet. Ved å designe systemet med informasjon fra ekte komponenter blir resultatene mer realistiske. Da kan parameterne hentes direkte fra databladet til komponentene. I tillegg kan det gi informasjon om størrelse og pris på systemet. Om komponentene er for dyre vil de muligens ikke kunne benyttes i et balanseringssystem. En fordel med å bruke mer «vilkårlige» parametere er at det kan gjøre systemet mer fleksibelt og robust. I tillegg gjør det at en kan utvikle systemet raskere, enn om en må slå opp alle parametere i datablad.

En annen utfordring med resultatene, er at alle testene er gjort i en perfekt verden. Blant annet benytter den passive balanseringen en logikk som har en følsomhet på 0.0001 V. Når systemet fungerer i en simulert verden, fungerer dette fint. I den virkelige verden kan det være at spenningsmåleren har en feilmargin på 0.001 V. Da ville ikke logikken lengre fungert slik den er designet. Utfordringer som dette, viser noe av usikkerheten med å benytte simulering som metode. Simulering gjør det mulig å utvikle et system raskt og sikkert. Systemet kan testes hurtig med flere forskjellige parametere, uten at det er behov for å bytte komponenter underveis. I tillegg er det enkelt å analysere og sammenligne resultater. Ulempen med simulering er at det er vanskelig å si hvor realistiske resultatene er. En lite realistisk simulering kan fort føre til en dyr implementering av virkelige komponenter. I tillegg er simulering en tidkrevende prosess som ikke nødvendigvis gir gode resultater. Det kan i noen tilfeller være like effektivt å designe systemer med virkelige komponenter fra start. (McHaney, 1991, s. 7)

7 Avslutning

Denne oppgaven redegjør for utvikling av BMS gjennom modellering og simulering i MATLAB. Problemstilling er å utvikle et system for opp- og utlading av Li-Ion batterier. Modellen for en Li-Ion battericelle er implementert i en simulert elektrisk krets, i tillegg er det utviklet algoritmer for passiv samt aktiv balansering. Den simulerte kretsen tar høyde for påvirkning fra temperaturen til omgivelsene og har mulighet for overvåking ved hjelp av sensorer i kretsen. Kretsen kan styre mellom opp- og utlading av battericellene. To av de tre balanseringsalgoritmene presentert i oppgaven fungerer på en god måte, og leverer resultater innenfor battericellens SOA. Oppgaven konkluderer derfor med at systemet oppfyller alle kravene.

Avslutningsvis er det interessant å vurdere om oppgaven som helhet er god nok til å fortsette utviklingsprosessen i henhold til MathWorks, Inc tre faser for utvikling av BMS. I utgangspunktet er ikke modellen klar for å ta steget videre til sanntidssimulering. Årsaken til dette er at komponentene, benyttet i modellen, ikke er vurdert opp mot faktisk fysiske komponenter. Motstandene, bryterne, kondensatorene og transformatorene er alle standardkomponenter i MATLAB, og vil derfor oppføre seg etter de forhåndsprogrammerte verdiene. Dersom målsetningen er å avslutte BMS-utviklingen med hardware implementering vil det være viktig å modulere de fysiske komponentene i MATLAB. Dette er for å kunne få en så god plattform for testing som mulig. Det neste steget vil derfor være å bestemme seg for hvilke hyllevare komponenter BMS-en skal bestå av, og designe disse spesifikke komponentene.

Balanseringsalgoritmene er basert på teoretiske modeller, som gir troverdighet inn i en utviklingsprosess. Både testene for passiv balansering og testene av Multiple Windings Transformer balansering viser en nøyaktighet og presisjon, som kan gi gode resultater i en sanntidssimulering. Det som argumentere for at balanseringsalgoritmene er klare for sanntidssimulering er at ingen av testene gjort med MWT balansering eller den passive balanseringen har ført til temperaturøkning utenfor battericellenes SOA. Simuleringen viser at det ikke er risiko for overlading av battericeller og hasardiøse temperaturer i kretsen. Disse funnene argumenterer for at sikkerheten er ivaretatt, og at det vil være mulig å teste algoritmene i en sanntidssimulering.

«Samfunnet må igjennom et grønt skifte, det må skje en overgang til produkter og tjenester som gir betydelig mindre negative konsekvenser for klima og miljø enn i dag». (Regjeringen, 2021) Sitatet er hentet fra regjeringen sin egen nettsiden og sier noe om det politiske synspunktet på klima og miljø. Behovet for miljøvennlige energikilder og et større tilbud av energilagringmetoder er stort. Sjøforsvaret kan ta del i det grønne skiftet gjennom, blant annet, å hybridisere marinefartøyer, som kan redusere drivstofforbruk og samtidig gi en positiv operativ effekt. Gjennom simulering av en BMS-modell bidrar oppgaven til å øke kunnskap innenfor BMS og setter søkelys på viktigheten av sikker håndtering av Li-Ion batterier. Denne typen kunnskap og teknologi vil være viktig for utnyttelse av Li-Ion batterier i nye applikasjoner. Dette er et lite, men viktig bidrag til fagfeltet som kan være en del av løsningen på «...vår tids største utfordring». (Arbeiderpartiet & Senterpartiet, 2021)

7.1 Anbefaling for videre arbeid

Denne oppgaven har gjennom utviklingen av en BMS-modell i MATLAB hatt et mål om å øke kompetansen innenfor BMS. Ved å videreutvikle denne modellen vil en tilegne seg kunnskap om batteriteknologi, et nytt fagfelt som fortsatt er under utvikling og kan bidra til det grønne skiftet.

Oppgaven har flere muligheter for videre arbeid. En mulighet er å utvide batterisystemet. Et forslag kan være å utvide batteristrukturen med seks batteripakker i serie (kalt en streng). For å gjøre dette må det utvikles metoder for å balansere de seks batteripakkene. Deretter kan batterisystemet videreutvikles til totalt seks parallellkoblede strenger, og utføre balansering mellom strengene med hensyn på strengens SOC-verdi.

Et annet forslag til videreutvikling er å fullføre sanntidssimulering og hardware implementering i henhold til MathWorks, Inc tre faser for utvikling av BMS. Målsetningen kan være å produsere en fysisk BMS basert på modellen og balanseringsalgoritmene gitt i oppgaven. Et siste forslag til videre arbeid er å implementere den simulerte BMS-en i et større system. En ide til et prosjekt, er design av elektriske kjøretøy i MATLAB med batteristyring og overvåking gjennom en BMS. Det er mange muligheter for utvikling av batterisystemer og BMS i MATLAB, og det er bare fantasien som setter grenser.

Referanseliste

- Ahmed, R., Gazzarri, J., Onori, S., Habibi, S., Jackey, R., Rzemien, K., . . . LeSage, J. (2015, Juli). Model-Based Parameter Identification of Healthy and Aged Li-ion Batteries for Electric Vehicle Applications. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, ss. 233-247.
- Andrea, D. (2010). *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*. Norwood: Artech House.
- Andrea, D. (2011, Oktober 25). *Battery Management Systems*. Hentet fra Li-Ion BMS: http://liionbms.com/php/about_bms.php
- Arabsalmanabadi, B., Tashakor, N., Javadi, A., & Al-Haddad, K. (2018). Charging Techniques in Lithium-Ion Battery Charger: Review and New Solutions. *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (ss. 5731-5738). Washington DC: IEEE.
- Arbeiderpartiet, & Senterpartiet. (2021). *Hurdalsplattformen*. Hurdal: Regjeringen.
- Banks, J. (1998). *Handbook of Simulation*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J. (2011). *Systems Engineering And Analysis*. Prentice Hall: Pearson.
- Daowd, M., Omar, N., Van Den Bossche, P., & Van Mierlo, J. (2011). Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation. *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, (ss. 1-7). doi: 10.1109/VPPC.2011.6043010.
- Doughty, D., & Roth, E. P. (2012). A General Discussion of Li Ion Battery Safety. *The Electrochemical Society Interface*(Volume 21, Number 2), ss. 37-44.
- Forseth, S. (2019). *Viten*. Kjeller, Norge: Forsvarets Forskningsinstitutt.
- Gazzarri, J. (2021, November 19). *Battery Modeling*. Hentet fra MathWorks: https://se.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/36019-battery-modeling?s_eid=PSM_15028
- Gerislioglu, B., Ozturk, F., Sanli, A. E., & Gunlu, G. (2014). The multi-winding forward structure battery balancing . *2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)* (ss. 1-4). doi:

-
- 10.1109/ICECCO.2014.6997573: Electrical & Electronic Department, Turgut Ozal University .
- Josdal, A. (2019). *Evalueringsrapport - Brann i MF "Ytterøyningen" 10.10.2019*. Bergen: Kvinnherad brann og redning.
- Kiehne, H. A. (2003). *Battery Technology Handbook*. Breckerfeld, Germany: Expert Verlag.
- Languang, L., Xuebing, H., Jianqiu, L., Jianfeng, H., & Minggao, O. (2013, Mars 15). A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*(226), ss. 272-288.
- Materials Science and Engineering Program & Texas Materials Institute, University of Texas. (2017, Mars 10). An Outlook on Lithium Ion Battery Technology. *ACS Central Science*, ss. 1063-1069.
- MathWorks. (2021, November 18). *What is MATLAB?* Hentet fra MathWorks: <https://se.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>
- McHaney, R. (1991). *Computer Simulation, A Practical Perspective*. San Diego: Academic Press, Inc.
- Moral, C. G., Laborda, D. F., Alonso, L. S., Guerrero, J. M., Fernandez, D., Rivas, C., & Reigosa, D. D. (2019). Battery internal resistance estimation using a battery balancing system based on switched capacitors. *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (ss. 2516-2522). Baltimore: University of Oviedo. Dept. of Elect. Computer & System Engineering.
- Plett, G. (2021, September 22). *Introduction to battery management systems*. Hentet fra Coursea: <https://www.coursera.org/learn/battery-management-systems>
- Regjeringen. (2021). *Regjeringen.no*. Hentet fra Det grønne skiftet: <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/innsiktsartikler-klima-miljo/det-gronne-skiftet/id2879075/>
- Sanyo Electric by Panasonic. (2021, November 19). *Sanyo W 18650 Battery, 1500mAh, 20A, 3.7V, Grade A Lithium-ion (UR18650W)*. Hentet fra Voltaplex: <https://voltaplex.com/sanyo-w-18650-battery-ur18650w>

Stoltenberg, J. (2021, November 2). *NATO Secretary General attends United Nations “COP26” Climate Change Conference*. Hentet fra North Atlantic Treaty

Organization:

https://www.nato.int/cps/en/natohq/news_188258.htm?selectedLocale=en

Teja, R. (2021, November 22). *MOSFET as a Switch*. Hentet fra Electronics Hub:

<https://www.electronicshub.org/mosfet-as-a-switch/>

The MathWorks, Inc. (2018). *WHITE PAPER: Developing Battery Management*

Systems with Simulink and Model-Based Design. Hentet fra Mathworks.com:

<https://se.mathworks.com/campaigns/offers/battery-management-systems-white-paper.html>

Vest brann- og redningsregion. (2021, November 23). *Evalueringsrapporten etter*

ferjebrannen i Kvinnherad er klar. Hentet fra Vest brann- og redningsregion:

<https://vestbrannregion.no/evalueringsrapporten-etter-ferjebrannen-i-kvinnherad-er-klar/>

Wang, C. (2019). *Modeling and Simulating Battery Performance for Design*

Optimization. Hentet fra mathworks.com:

https://se.mathworks.com/company/newsletters/articles/modeling-and-simulating-battery-performance-for-design-optimization.html?fbclid=IwAR1D76_QbUizfQeOduQd9Y1UKoC-oLKscX5D6nA6H0iabHBp-tyHx5Ky4-Q

Wikipedia. (u.d.). *Capacitor*. Hentet fra wikipedia.org:

https://en.wikipedia.org/wiki/Capacitor#Further_reading

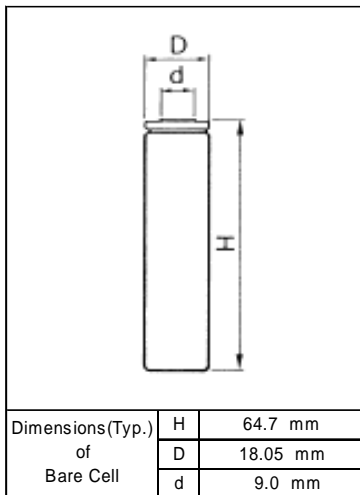
Vedlegg

Vedlegg 1: Dokumentasjon for SANYO UR18650W



May. 2007

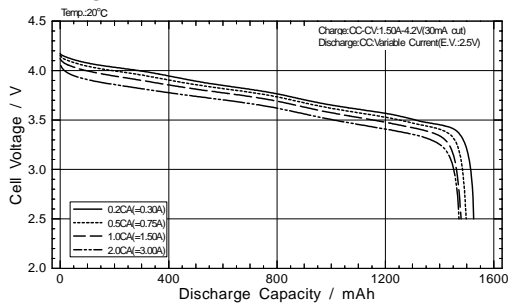
Cell Type UR18650W Specifications



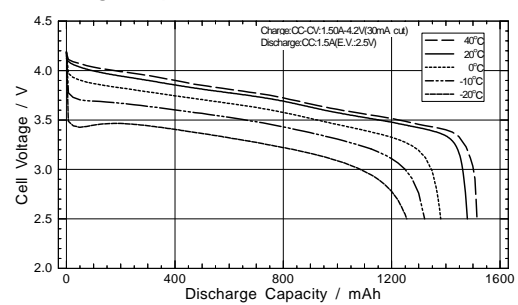
Nominal Capacity		Min.1500mAh
Nominal Voltage		3.7V
Charging Method		Constant Current -Constant Voltage
Charging Voltage		4.2V
Charging Current		Std. 1500mA
Charging Time		2.5hrs.
Ambient Temperature	Charge	0 ~ +40°C
	Discharge	-20 ~ +60°C
	Storage	-20 ~ +50°C
Weight (Max.)		44.3g
Dimensions (Max.)	(D)	18.10mm
	(H)	64.80mm
Volumetric Energy Density		332Wh/l
Gravimetric Energy Density		125Wh/kg

Typical Characteristics

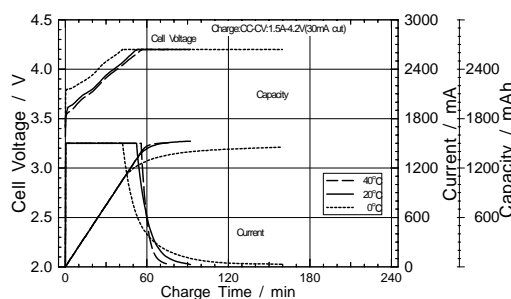
Discharge rate characteristics



Discharge temperature characteristics



Charge characteristics



Referanse: (Sanyo Electric by Panasonic, 2021)

Vedlegg 2: Kode for startparametere

```
%% MATLAB Source Code. (Gazzarri, 2021)
% Copyright 2012 The MathWorks, Inc.

numCells = 6;
% load('Kokam_LUT_3RC')%
results.T5C = load('batteryParameterEstimation_results_3RC_5degC.mat');
results.T20C = load('batteryParameterEstimation_results_3RC_20degC.mat');
results.T40C = load('batteryParameterEstimation_results_3RC_40degC.mat');
SOC_LUT = results.T5C.SOC_LUT;

%% Thermal Properties
% Cell dimensions and sizes
cell_thickness = 0.018; %m
cell_width = 0.018; %m
cell_height = 0.0650; %m

% Cell surface area
cell_area = 2 * (...
    cell_thickness * cell_width +...
    cell_thickness * cell_height +...
    cell_width * cell_height); %m^2

% Cell volume
cell_volume = cell_thickness * cell_width * cell_height; %m^3
%%
for idx = 1:numCells
%% Lookup Table Breakpoints

Battery(idx).SOC_LUT = SOC_LUT;
Battery(idx).Temperature_LUT = [5 20 40] + 273.15;

%% Em Branch Properties (OCV, Capacity)

% Battery capacity
Battery(idx).Capacity_LUT = [ 4 4 4]; % Ampere*hours

%% Em Branch Properties (OCV, Capacity)

% Em open-circuit voltage vs SOC rows and T columns
Battery(idx).Em_LUT = [ results.T5C.Em ...
    results.T20C.Em ...
    results.T40C.Em]; % Volts

%% Terminal Resistance Properties

% R0 resistance vs SOC rows and T columns
Battery(idx).R0_LUT = [ results.T5C.R0 ...
    results.T20C.R0 ...
    results.T40C.R0]; % Ohms

%% RC Branch 1 Properties

% R1 Resistance vs SOC rows and T columns
Battery(idx).R1_LUT = [ results.T5C.R1 ...
    results.T20C.R1 ...
    results.T40C.R1]; % Ohms
```

```

% R2 Resistance vs SOC rows and T columns
Battery(idx).R2_LUT = [ results.T5C.R2 ...
                      results.T20C.R2 ...
                      results.T40C.R2]; %Ohms

% R3 Resistance vs SOC rows and T columns
Battery(idx).R3_LUT = [ results.T5C.R3 ...
                      results.T20C.R3 ...
                      results.T40C.R3]; %Ohms

% C1 Capacitance vs SOC rows and T columns
Battery(idx).t1_LUT = [ results.T5C.tau1 ...
                      results.T20C.tau1 ...
                      results.T40C.tau1]; %Farads

% C2 Capacitance vs SOC rows and T columns
Battery(idx).t2_LUT = [ results.T5C.tau2 ...
                      results.T20C.tau2 ...
                      results.T40C.tau2]; %Farads

% C3 Capacitance vs SOC rows and T columns
Battery(idx).t3_LUT = [ results.T5C.tau3 ...
                      results.T20C.tau3 ...
                      results.T40C.tau3]; %Farads

%%
% Cell mass
Battery(idx).cell_mass = 0.05; %kg

% Volumetric heat capacity
% assumes uniform heat capacity throughout the cell
% ref: J. Electrochemical Society 158 (8) A955-A969 (2011) pA962
Battery(idx).cell_rho_Cp = 2.04E6; %J/m3/K

% Specific Heat
Battery(idx).cell_Cp_heat = Battery(idx).cell_rho_Cp * cell_volume / Battery(idx).cell_mass; %J/kg/K
%% Initial Conditions
% Charge deficit
Battery(idx).Qe_init = 15.6845; %Ampere*hours

% Ambient Temperature
Battery(idx).T_init = 20 + 273.15; %K

end
%Cell dimentions
diameter = 25.96/1000; %meter
length = 65.15/1000; %meter
cell_area = 3.14 * diameter * (diameter/2 + length);

%% Changeable parameters

%Thermal constants
h_conv = 5; %Cell to cell
env_temp = 23; %Environment temperature in celcius

% Initial charge deficit
Battery(1).SOC0 = 0.21;
Battery(2).SOC0 = 0.209;
Battery(3).SOC0 = 0.202;

```

Battery(4).SOC0 = 0.204;
Battery(5).SOC0 = 0.20;
Battery(6).SOC0 = 0.207;

%Passive Balancing

R_Bleed = 40; %Bleed resistance
delta_U = 0.0001; %Passive Balancing threshold
Vth = 1; %Threshold Voltage MOSFET

%CCCV

C = 2; %C-rate for charging
V_top = 4.1895; %Top voltage for CCCV switch
I_cc = C * 1.5; %Actual charging current

%Active Balancing

delta_S = 0.001; %Active Balancing threshold for SOC
R_MOSFET = 0.5; %The internal resistance of the MOSFET's

Vedlegg 3: Kode for plotting av resultater

```
%% Export plot
%Tittel = "Passiv " + C + "C " + R_Bleed + "Ohm";
Tittel = "Aktiv_MWT";
%Tittel = "Aktiv_SCE";
```

```
max_T = 40;
max_U = 4.2;
X = out.ScopeData_V.time./3600;
```

```
%% Voltage Plot
figure(1)
plot(X, out.ScopeData_V.signals.values)
hold on
plot([0 X(end)],[max_U max_U],"r--")
```

```
title(Tittel)
subtitle ("Spenning")
xlabel("Tid[t]")
ylabel("Spenning[V]")
grid on
```

```
%% SOC Plot
figure(2)
plot(X, out.ScopeData_SOC.signals.values*100)
```

```
title(Tittel)
subtitle ("State of Charge")
xlabel("Tid[t]")
xlim([(X(end)-2) (X(end)-1)])
ylabel("State of charge[%]")
grid on
```

```
%% Current plot
figure(3)
plot(X, out.ScopeData_C.signals.values)
hold on
%plot([0 X(end)],[I_cc I_cc],"r", LineWidth=2)
```

```
title(Tittel)
subtitle ("Strøm")
```

```
xlabel("Tid[t]")
xlim([0 X(end)])
ylabel("Current[A]")
grid on
```

```
%% Temperature Plot
figure(4)
plot(X, out.ScopeData_T.signals.values-273.15)
hold on
plot([0 X(end)],[max_T max_T],"r--")
```

```
title(Tittel)
subtitle ("Temperatur")
xlabel("Tid[t]")
xlim([0 X(end)])
```

```

ylabel("Temperatur[°C]")
ylim([20 41])
grid on

%% Save to file
mkdir("../Plots/" + Tittel)

savefig(figure(1), "../Plots/" + Tittel + "/Voltage.fig")
savefig(figure(2), "../Plots/" + Tittel + "/SOC.fig")
savefig(figure(3), "../Plots/" + Tittel + "/Current.fig")
savefig(figure(4), "../Plots/" + Tittel + "/Temperature.fig")

```

Plotting av CC-Utladning:

```

Tittel = "CC-utlading, " + C + "C " + "ved " + env_temp + " grader C";
max_T = 40;
max_U = 4.2;
X = out.ScopeData_V.time./3600;

```

% Top plot

```
t = tiledlayout('flow');
```

%SOC

```

nexttile
plot(X, out.ScopeData_SOC.signals.values*100, 'LineWidth', 2.0)
hold on
subtitle ("State of Charge")
xlabel("Tid[t]")
xlim([(X(end)-2) (X(end)-1)])
ylabel("State of charge[%]")
grid on

```

%Strøm

```

nexttile
plot(X, out.ScopeData_C.signals.values, 'LineWidth', 2.0)
hold on
subtitle ("Strøm")
xlabel("Tid[t]")
ylabel("Strøm[A]")
grid on

```

% Bottom plot

% Spenning over kapasitet

```

nexttile([1 2])
X = out.ScopeData_V.time./3600;
plot(X*I_cc*1000, out.ScopeData_V.signals.values, 'LineWidth', 2.0)
hold on
subtitle ("Utladingskarakteristikk")
xlabel("Utladningskapasitet [mAh]")
ylabel("Spenning[V]")
grid on

```

```

title(t, "CC-utlading, " + C + "C " + "ved " + env_temp + " grader C")
mkdir("../Plots/" + Tittel)
savefig(figure(1), "../Plots/" + Tittel + "/Resultat.fig")

```