

UNIVERSITETET I BERGEN



Geofysisk institutt

Masteroppgåve i energi, studieretning Energiteknologi

Avansert styringssystem for optimalisering av energilagring i distribusjonsnett

*Advanced Control System for Optimization of Energy
Storage in the Distribution Grid*

Vanessa Cristal Salvador Eide

16. Januar 2019

Samandrag

I distribusjonsnettet har det lenge blitt opererert med tradisjonell nettutbygging for handtering av kapasitetsproblem eller spenningsproblem. Med stor vekst i tal el-bilar, meir energikrevjande apparat, samt befolkningsvekst vil påverke kraftsystemet på ulike måtar. Dersom ein auke i energibruk i tillegg kjem på ei tid med eksisterande lasttoppar på kalde vinterdagar, vil det kunne påverke effektsikkerheita. Behovet for energilagring er sett som ein nøkkelkomponent i Smart Grid og spelar allereie ein viktig rolle i energisystemet. I dette studie er litium-ion batteri valt som energilagringstype og omhandlar optimalisering av batterisystemdesign ved hjelp av dynamisk modellering og avansert batteristyringsystem. Denne typen styring av energilagring i distribusjonsnett vil kunne bidra til reduksjon av lasttoppar, sikre drift og auke stabiliteten i distribusjonsnettet.

Som teoriverktøy er det brukt reguleringsteknikkprinsipp og batterimodellar som matematiske- og elektriske ekvivalente kretsmodellar. Det er i studien valgt Thevenin-modell grunna best dynamisk yting og låg feilrate på mindre enn 1%. Det er i Matlab Simulink® utarbeidd simuleringsmodellar for å visualisere korleis batteriprossane blir dynamisk modellerte.

Det er gjennom AMS måling ved SFE sin live demolab i Hyen henta forbruksdata med timeoppløysing og er nytta som lastprofil for regulering av batterisystemet.

Ut frå berekningar og dynamisk modellering med pulstestutladingsmetode er karakteristikkar studert og den raskaste responstida på 31 sekund (ved 3τ) funne for optimalt utladningsnivå mellom 85 og 40% for Litium-ion battericelle.

Det er med oppskalert batteripakke og avansert batteristyringsystem modellert topplastreduksjon, også kalla Peak Shaving. Simuleringa viser at bidraget frå batteriet reduserer topplast gjennom transformator og dermed aukar stabiliteten til distribusjonsnettet.

Føreord

Denne masteroppgåva representera slutten på masterstudie i energi, studieretning Energiteknologi. Studiet utført ved Geofysisk institutt ved Universitetet i Bergen.

Oppgåva omhandlar korleis optimalisering av ny energilagringsteknologi kan bidra til auka fleksibilitet og stabilitet i kraftsystemet.

Først of fremst vil eg gjerne gje uttrykk for takknemligheit til mine dyktige veileiarar, prof.Emil Cimpan ved HVL og Sven Arild Kjerpeset hjå SFE. Dykkar gode innspel og kommentarar gjorde mitt arbeid mogleg.

Eg vil og rette ein takk til alle mine kollegar og alle dei menneska eg møtte under mitt studieprogram som gjorde dei to siste åra minneverdige.

Framfor alt, vil eg takke foreldra mine og familie i Peru og Norge for deira ubøyeleg støtte under mitt arbeid.

Definisjonar

Effektsikkerhet	Kraftsystemet si evne til å dekke momentan belastning
Energieffektivisering	Nøkkelkomponent i Smart Grid og spelar ein viktig rolle i energisystemet.
Dynamisk modell	Ei forenkla framstilling av den verkeleg verda i form av likningar.
Det smarte nettet	Overvåker tilstand og elektrisitetsflyt og kan styre seg sjølv ut frå endringar som oppstår.
Energilagring	Nøkkelspelar til Smart Grid
Forsyningssikkerheit	Omfattar energisikkerheit, effektsikkerheit og leveringskvalitet.
Peak Shaving	Topplastreduksjon
Smart Grid	Framtida sitt kraftsystem. Fusjon mellom internett og kraftnettet
Smart Nett	Ei nemning på framtidens kraftnett og den tilhøyrande teknologien.
SFE Smart Valley	Live demo lab og emne for tidleg implementering av testing av AMS målarar
Steady State	Responstid som eksistere i lang tid som følgjer av eit inngangssignal
Transient state	Respons som forvinn med tida
Ytingsmetode	Det er eit effektiv kompromisset og justering av spesifikasjonane

Forkortingar

AMS	Avanserte måle- og styringssystem
ASoC	Absolutt ladningstilstand
DoD	Utladningsdybde (deep of discharge)
DSO	Distribusjonssystem operatører
DST	Dynamic Stress Test Cycling
ISO/ RTO	Uavhengige systemoperatører/regionale overføringsorganisasjoner
RSoC	Den relative ladningstilstanden
SoC-nivå	Ladningstilstand
OCV	Open kretsspennig

Symbolliste

C	Rate
C_{cell}	Cellekapasitet
E_{mf}	Elektromotorisk kraft
ECM	Elektriske kretsmodellar
i^*	Filtret batteristraum
k_r	Polariserings-motstandkoeffisient (Ω)
k_v	Polariserings-spenningkoeffisient (V)
Q	Kapasitet
OCV	Open kretsspenning
η	Coulomb koeffisient

Figurliste

Figur 1 Smart Grid- Frå tradisjonelt og framtidig smarte distribusjonsnett [4].....	2
Figur 2 Viser dei tretten ulike tenestene der batterienergilagring kan bli nytta [9, s. 6, fig. ES2].....	5
Figur 3 Illustrasjon av Peak Shaving [8, s. 13]	8
Figur 4 Lastprofil for kunde Nr 15	12
Figur 5 Prinsippskisse for Peak Shaving modellering [15, s. 51, fig 1.23]	13
Figur 6 Blokkskjema med multivariablar for ein batteriprosess [17, Kap. 3].....	14
Figur 7 Flytskjema for eit dynamisk system med tilbakekoplingskontroll [15, s. 25, fig 1.3] ..	15
Figur 8 Første ordens system (a) og plotting av ein pol (b) [17, s. 157, figure 4.4]	15
Figur 9 Første ordens system [17, s. 158, fig 4.5]	16
Figur 10 Ytingsmetode $P1$ og $P2$ mot parameter $Pmin$ [15, s. 327, fig 5.1]	17
Figur 11 Utladingsprosess [20]	21
Figur 12 Ladingprosess [20]	21
Figur 13 Kapasitet ved testsyklus av Litium- ion batteri under ulike opp- og utladingssekvensar ved 20 romtemperatur. [15, s. 1137, fig. 5a]	26
Figur 14 Elektrisk ekvivalent krets for lading -og utladingsdynamikk med R0- modell [25, s. 0289, fig 3].....	29
Figur 15 Utladingskurve består av tre seksjonar: (1) det eksponentielle området, (2) det nominelle området og det operasjonsområdet (3) [25, s. 0290, fig 1].....	31
Figur 16 Ladingkurve med det nominelle området og det eksponentielle området [25].....	32
Figur 17 Skjematisk framstilling av første ordens batterimodel- Thevenin modell [23, s. 7, fig 3].....	35
Figur 18 Pulsutladingstest metode med battericelle på ein 3.7 V og 2.4 Ah [31, Fig. 5.3].....	37
Figur 19 Tilsvarande Thevenin kretsmodell av litium- ion batteri 31, Kap. 2]	39
Figur 20 representerer ein pulsutlading med dei dynamiske karakteristikkane til batteriet [31, Fig. 2.5].....	39
Figur 21 Eksempel på pulsutladingstest med dynamiske karakteristikkar til batteriet. [31, Fig. 2.5].....	40
Figur 22 Peak Shaving modellering med transformatorblokk, batteripakke og kundeblokk ..	41

Figur 23 Resultat av DoD-nivå test ved å bruke ytingsmetode.....	45
Figur 24 Nominell utladingskurve for eit Litium- ion batteri ned 3.7 V og 2.4 Ah.....	46
Figur 25 Batteridynamikk for 85-40% SoC optimal nivå.	49
Figur 26 Pulsutladingsmetode viser eit første ordens system ved 85-40 % <i>SoCoptimal</i> - nivå	50
Figur 27 Kvar modul består av 5 batteri i seriekopling	53
Figur 28 Simulering for 1 modul med 5 batteri i seriekopling	54
Figur 29 Første ordens system med 5 batteri	55
Figur 30 Resultat for Peak Shaving modellering	58
Figur 31 Skjematisk representasjon av <i>R0</i> modellen	63
Figur 32 Skjematisk representasjon av RC- modellen.....	63
Figur 33 eit lineært dynamisk system med inngang $x(t)$ og utgang $y(t)$	67
Figur 34 Skisse av ein fasor som dreier seg om orige med vinkelhastigheitt ω	68
Figur 35 Eksempel på multivariablar	69
Figur 36 Klassisifering av ulike litium-ion batteri	73
Figur 37 Utladingskurve for litium-ion batteri Matlab Simulink®	74

Tabelliste

Tabell 1 Kort beskriving av tretten tenester der batterilagring kan bli nytta	6
Tabell 2 Tider for ulike C-rate [18, s. 152]	22
Tabell 3 Parameter for dimensjonering av batteripakke	33
Tabell 4: Avleste verdier for DoD-nivå test	44
Tabell 5 Resultat for 45 % DoD ved å bruke pulsutladingstest metode	48
Tabell 6 Resultat for 25% DoD ved å bruke pulsutladingstest metode	48
Tabell 7 Resultat for 55% DoD ved å bruke pulsutladingstest metode	48
Tabell 8 Viser elektriske komponentar som kondensatorer og motstander [17, s. 48]	64
Tabell 9 Den statistiske analyselisten over absoluttverdiene for terminalspenningsfeil [29, s. 592].....	65
Tabell 10 Dei mest brukt Laplacetransform teorema i funksjon av $f(t)$	71
Tabell 11 Batteri spesifikasjonar	74

INNHALDSLISTE

SAMANDRAG	II
FØREORD	III
DEFINISJONAR.....	IV
FORKORTINGAR	V
SYMBOLLISTE	VI
FIGURLISTE.....	VII
TABELLISTE.....	IX
1 INNLEIING	1
1.1 BAKGRUNN.....	1
1.2 FØREMÅL OG PROBLEMSTILLING	9
1.3 AVGRENSING	9
1.4 OPPGÅVESTRUKTUR	10
2 METODE.....	11
2.1 SMART VALLEY - FORBRUKSDATA.....	11
2.2 REGULERINGSTEKNIKK.....	13
2.3 LITIUM-ION BATTERI.....	18
2.3.1 <i>Battericelle eigenskapar</i>	18
2.4 BATTERI KRETSMODELLAR.....	28
2.4.1 <i>Elektrisk modell</i>	28
2.4.2 <i>Elektrisk Ekvivalent kretsmodell</i>	34
2.5 BATTERICELLE TESTMODELL.....	36
2.6 PEAK SHAVING MODELL	41
3 RESULTAT.....	44
3.1 DOD TEST	44
3.2 BATTERICELLE TEST.....	46
3.3 PEAK SHAVING MODELL.....	57
4 DRØFTING	58
5 KONKLUSJON	62
6 VEDLEGG	63
6.1 EVALUERING AV BATTERIMODELLAR.....	63

6.2	REGULERINGSTEKNIKK.....	66
6.3	KLASSIFISERING AV ULIKE LITIUM-ION BATTERI MODELLAR	73
6.4	BATTERIBLOKKEN	74
6.5	UTLADINGSKURVE FOR DEI ULIKE TESTANE	75
6.6	BATTERIPAKKE DYNAMIKKEN (5 BATTERI I 1 MODUL)	78
6.7	BATTERIPAKKE I SERIE-KOPLING	79
6.8	DATABASE PEAK SHAVING	80
	REFERANSAR	81

1 INNLEIING

1.1 Bakgrunn

Behov for eit smartare distribusjonsnett

Dagens distribusjonsnett er for svakt til å møte utfordringar i framtida. Behovet for eit sterkare distribusjonsnett er no breitt forankra. I desember 2015 la departementet fram stortingsmeldinga om endring i , energilova¹. [1]

Den stiller krav om eit selskapsmessig og funksjonelt skilje mellom nettvirksomheit og annan virksomheit frå 2021. Skiljet mellom nett- og produksjons-/omsetningsvirksomheit er også eit vesentleg element i EU sin tredje energimarknadspakke. Dette er viktig for å betre virkemåten til den indre marknaden for energi, auka oppmerksomheit rundt teknologiutvikling, smarte nett og handtering av meir uregulerbar kraft i systemet.

Som følge av EU sin tredje energimarknadspakke, vil distribusjonssystemoperatørar (DSO) etter kvart få eit auka ansvar for drift og utvikling innan sitt område. DSO skal insentivere til å ta i bruk lokal fleksibilitet og ny teknologi, samt eigarskap og handtering av forbruksdata. Det er også peika på behov for tettare samarbeid mellom transmissjonssystemoperatørar (TSO) og DSO om planlegging og drift av kraftsystemet [2]

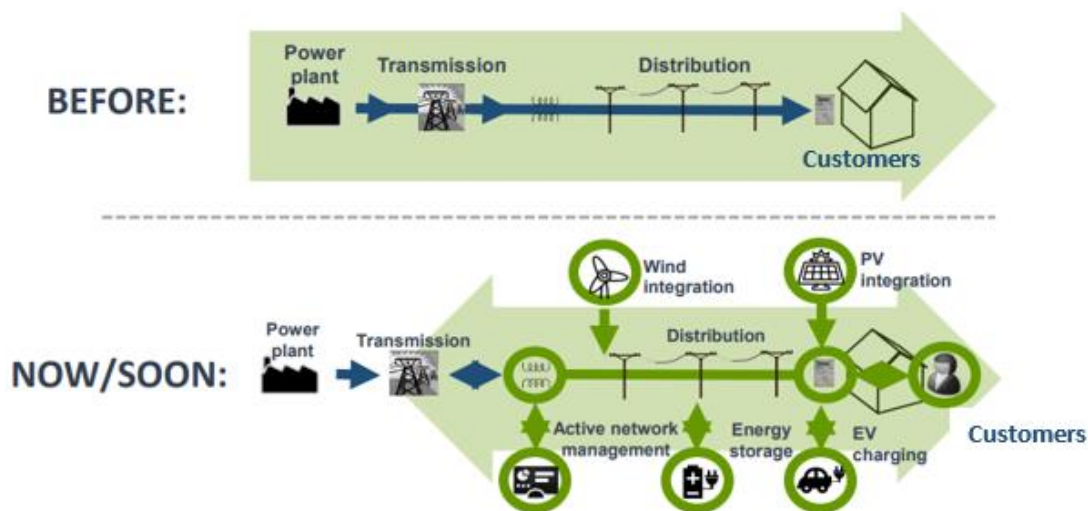
Norske distribusjons- og regionalnettselskap vil kunne møte auka omstillingskrav og nye forventningar til kva nettet skal levere i åra framover. Selskapa er pålagt ressurskrevjande oppgåver knytt til implementering av avanserte målarar. Desse systema legg til rette for teknologiutvikling og meir avansert styring av dei lokale kraftsystema med moglegheit for betre regulering av lokale spennings- og effektutfordringar. Det er også eit betydeleg behov for nettinvesteringar i perioden, drive fram av mellom anna tekniske levealder til nettet, demografisk utvikling, klima- og fornybarmål, auka sårbarheit for straumbrot, samt auke i effektuttak.[1, s. 11]

¹ Meld. St. 25 (2015- 2016) Kraft til endring- energipolitikken mot 2030 og i proposisjon 35L(2015-2016)

Smart Grid

Dagens kraftnett blei bygd for mellom 80 og 120 år sidan, og er laga for flyt av straum frå store kraftstasjonar til kunden [3]. Tradisjonelt har distribusjonsnettoperert med einvegs effektflyt med store produksjonseiningar lokalisert langt unna sluttkunden i grisgrendte strøk.

Nye måtar å lage og bruke straum på gjer at nettet har behov for oppgradering og innfasing av ny teknologi.



Figur 1 Smart Grid- Frå tradisjonelt og framtidig smarte distribusjonsnett [4]

Smart Grid er framtida sitt kraftsystem. Det blir beskrevet som ein fusjon mellom internett og kraftnettet [5]. Smart Grid gir mogelegheit for smartare styring av nettet, og kan i mykje større grad ein før inkludere sluttkunden. Ei smart styring gir nettselskapa betre kontroll når alle ønskjer å bruke elektrisitet samtidig. Problemet er å levere nok effekt til alle som treng det. Gjennom døgnet gir dette seg spesielt utslag i morgontimane og om ettermiddagen. Gjennom året er det vintermånadane som er mest problematiske. Ein auke ved stort tal el-bilar, induksjonstoppar og nye elektroniske hjelpemiddel blir lagt på toppen av dette. Samtidig blir det bygd ut mykje ny vind- og vasskraft i Norge som følgje av el-sertifikatmarknaden. Dette er uregulert kraft, då mengda som blir produsert avheng av vindstyrke og vassføring. Meir uregulert kraft inn på nettet medfører at nettselskapa treng

betre styring for å utnytte kapasiteten optimalt, og med betre informasjon om forbruksmønster vil ein kunne redusere mengde kraft ein treng stille til disposisjon.

Smart Grid kan også betre forsyningsikkerheita ved at alle komponentane i kraftnettet kan bli overvaka, noko som er svært nyttig ved til dømes bortfall av kraftleidningar, nettstasjonar eller transformatorstasjonar.

Ved å bruke terminologien Smart Grid, ser ein på heile kraftsystemet under eitt: Frå produksjon og distribusjon til forbruk hos sluttkunden. Det kan vere nyttig å sjå på Smart Grid gjennom to ulike perspektiv:

- Frå eit kundeperspektiv vil fokuset vere kva for val ein sjølv kan gjere gjennom den nye teknologien. Det kan vere å gå aktivt inn og redusere eller legge om sitt eige forbruk, eller ta i bruk nye tenester som gir auka energieffektivisering. Mange vil nok ønskje å sjå på kva for mogelegheit dette gjev dei som plusskundar.
- Frå eit kraftsystemperspektiv vil det vere forsyningsikkerheit. Mogelegheit til å handtere ny kraftproduksjon med betre overvaking og styring av kritiske komponentar i systemet er viktigast. Eit anna viktig moment er dei mogelegheitane dette kan gje gjennom å bidra til reduksjon av flaskehalsar og at ein unngår nyinvesteringar i nettet.

For begge perspektiva ovanfor vil kostnadsreduksjonar vere ein viktig drivar.

Innføring av smarte målarar, eller avanserte måle- og styringssystem AMS, er ein viktig del av Smart Grid, og er første skritt for å oppnå det smarte nettet. AMS er ein type straummålar som blir installert i alle hushaldar i Norge innan 1. januar 2019 [6]. Den største forandringa for straumkundane er at måleravlesinga vil skje automatisk. Måleravlesinga blir rapportert inn kvar time, og gir dermed nettselskapa ein mykje meir detaljert oversikt enn kva dei har hatt tidlegare. AMS-målaren vil også kunne gi mogelegheit til å vise momentanforbruket slik at kunden sjølv kan følgje med på eige forbruk.

Forbruket av straum aukar og samfunnet blir stadig meir avhengig av sikker straumforsyning. Det blir forventa at spenningskvaliteten er god og at det ikkje oppstår brot.

Smart Grid vil spare nettselskapa for mykje arbeid med vedlikehald og manuell overvaking av utstyr. Til no har ein måtte sende folk ut for å gjere mange av dei operasjonane som Smart

Grid og AMS no kan automatisere, til dømes spenningsmåling, feilsøking, fråkopling av kunde osv.

Energilagring

I kraftnettet må det vere balanse mellom forbruk og produksjon. Energilagring er ein nøkkelkomponent i Smart Grid og spelar allereie ein viktig rolle i energisystemet [7, s. 25].

Energilagring handlar om å lagre overskotskraft når produksjonen er større enn forbruket. Når forbruket til kundane aukar, kan den lagra overskotskrafta forsyne kundane.

Energilagring kan sjåast på som ei tidsforskyving av levert energi. Krafta blir produsert, lagra og så forbrukt på eit seinare tidspunkt.

EU sin ambisiøse klima- og energipolitikk, samt globale klimaavtalar, vil drastisk auke behovet for effektiv energilagringsteknologi. Energilagringsteknologiar omfattar generelt pumpe hydro, trykkluft energilagring, ulike typar batteri, svinghjul, elektrokjemiske kondensatorar osv. Kvar teknologi opererer med svært ulik storleik, eigenskapar, lagringstid og kostnader. Denne studien har fokus på elektrokjemiske batteri, spesielt Lithium-Ion [7, s. 37].

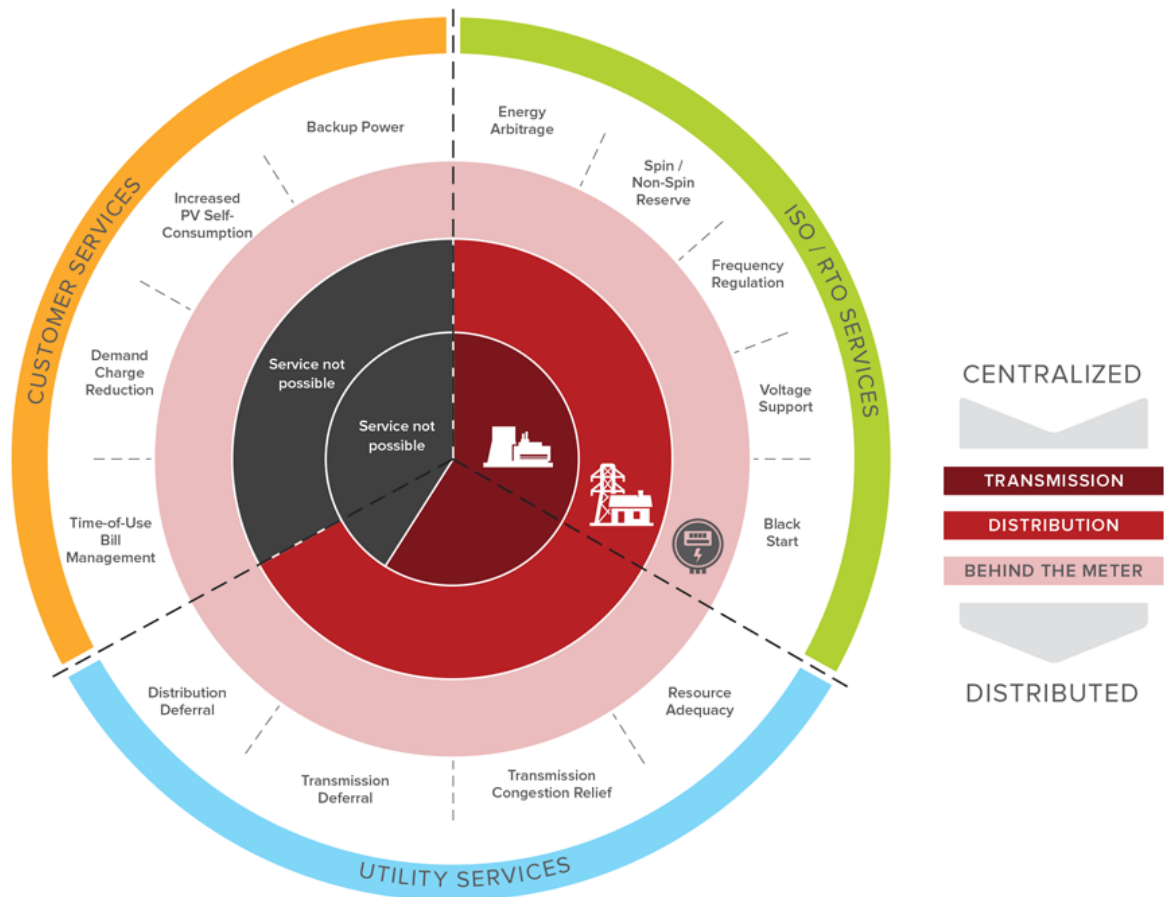
Bruksområde for batteri

Teknologi- og prisutvikling på elektrokjemiske batteri og moderne kommunikasjons- og styringsteknologi har gjort batteriløysingar til eit reelt alternativ til tradisjonelle nettinvesteringar [8, s. 2]. For bruk i distribusjonsnettet er det rimeleg å legge til grunn at ein typisk installasjon eventuelt vil vere batteri med kapasitet på eit fåtal kW og kWh, i nokre tilfelle kanskje opp i MW og MWh.

Batteri i distribusjonsnettet representerer ein allsidig form for energilagring ved at dei kan opptre som generatorar, som ein integrert del av nettet og som last med høg fleksibilitet. Ein av fordelane som batteri har i forhold til andre energiteknologiar, er hastigheit og kvaliteten på tenesta dei leverer, samt at dei er meir fleksible når det gjeld plassering.

I 2015 blei det utført ein meta-studie av eksisterande estimat av nett og kundeverdier der resultatet viste at batteri-energilagring er i stand til å tilby ein serie med tretten generelle

tenester på tre ulike nivå [9]: kundetenester (customer services), nett-tenester (utility services) og produksjons- og innmatingstenester (uavhengige systemoperatører/regionale overføringsorganisasjoner, ISO/ RTO) [9, s. 6] som vist i Figur 2.



Figur 2 Viser dei trettten ulike tenestene der batterienergilagring kan bli nytta [9, s. 6, fig. ES2]

Tabell 1 Kort beskriving av tretten tenester der batterilagring kan bli nytta

ISO/RTO tenester	
Spining reserves	Energikapasitet i kraftnettet som kan nyttast momentant. Typisk under kortvarige lasttoppar eller ved uventa straumbrot som t.d. utfall av produksjonseiningar.
Non spining reserves	Energikapasitet i kraftnettet som ikkje kan nyttast momentant, men typisk innan 10 minutt for å kompensere for uventa hendingar.
Voltage support	Spenningsregulering sikrar påliteleg og samanhengande elektrisk flyt i kraftnettet. Reguleringa inneber å halde nettspenning innanfor akseptable verdiar og tilpasse aktiv/reaktiv effekt etter behovet.
Black start	Øystart av produksjonseining ved bortfall av nettspenning. I større produksjonseiningar er det krav til tilleggsutstyr som gir tilstrekkeleg energi til produksjonsstart mot kraftnett utan nettspenning.
Frequency regulation	Øyeblikkeleg og automatisk effektrespons til endring av lokal systemfrekvens. Kontinuerleg regulering sikrar perfekt balanse mellom frekvens og last som gir systemstabilitet utan frekvenspiggjar og dippar.
Energy Arbitrage	Kjøp av kraft ved låg pris i kraftmarknaden og tilbakesal når prisen er høgast.
Utility Services	
Resource Adequacy	Redusere behovet for større produksjonseiningar ved å ta i bruk energilagring for å dekke toppplaster og dermed minimere overinvestering i kraftnettet.
Transmission/ Distribusjon deferral	Redusere, utsette eller unngå behov for nettförsterkning i delar av kraftnettet, knytt til forventa lastauke.
Congestion relief	Nytte smarte regulerbare energilagringssystem i svake nett for å handtere periodiske toppplaster og dermed unngå komponentoverbelastning. Også kalla Peak Shaving.

Customer Services

Increases PV Self consumption	Kraftproduksjon med solcellepanel i kombinasjon med energilagring vil gi auka lokal økonomisk nytteverdi i område som ligg ugunstig til for vidare distribusjon.
Time-of-Use Bill Management	Ved flytande kWt pris kan forbrukaren endre forbruksmønster ved å flytte noko forbruk til ei tid på døgnet der prisen er lågare.
Demand charge reduction	I tilfelle med effektregulert tarriff vil det for forbrukaren vere økonomisk gunstig å nytte lokalt energilagringssystem som bidrar til reduksjon av effekttoppar. Dette er omtala som topplastreduksjon eller peak shaving.
Backup power	Ved straumbrot i kraftnettet kan eit energilagringssystem, evt. i lag med lokal generator, nyttast til lokal beredskapsforsyning hjå forbrukar.

Denne studien har fokus på tenester innanfor *Distribusjon deferral* og *Congestion relief* med batteri som topplastreduksjonstiltak i distribusjonsnett der det er forventta lasteauke eller som allereie er overbelasta.

"Balansering av det lokale nettet og utnytting av batteri for å redusere investeringsbehovet i lokale nett, er teknologiske framsteg ein kan ha nytte av," seier Erik Dugstad, DNV GL [10]

Topplastreduksjon - Peak Shaving

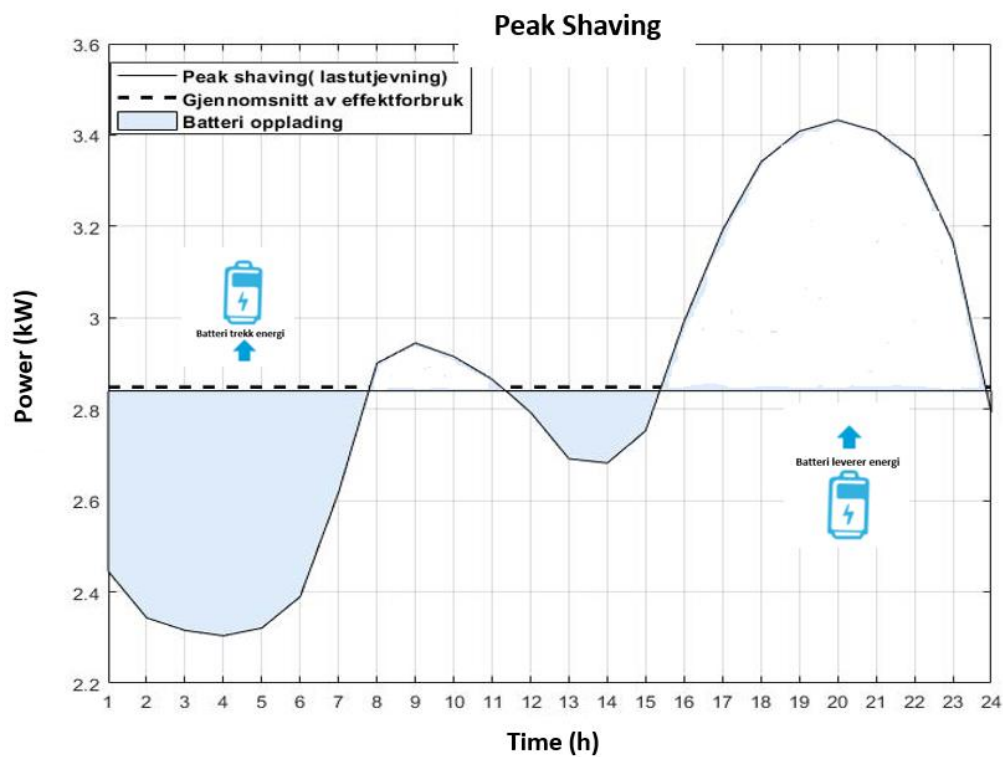
Elektrisitetsforbruket i Norge er sesongavhengig, og dei høgaste forbrukstoppene er på vinterstid. I tillegg er nye forbrukstypar med stor lastvariasjon, som ladestasjonar for ferjer, ofte aktuelle på stadar der nettet er svakt i forhold til den nye etterspørselen [11].

Batteriløysingar kan imøtekome behovet ved å lagre energi i periodar med låg last og avgi energi i periodar med høg last. På denne måten jamnar ein ut effektflyten i nettet over tid

Topplastreduksjon kan med dette redusere, eller i beste fall fjerne flaskehalsar i nettet, ved å unngå termisk overlast på kraftlinjer og andre tekniske komponentar i situasjonar med høg last i nettet. Flaskehalshandtering i distribusjonsnettet vil typisk vere aktuelt i morgontimane på vinterdagar når alle førebur seg for dagen, på ettermiddagen når folk kjem heim frå jobb

eller ved større lokalt varierende laster. For at batteri skal være eit alternativ til tradisjonelle nettinvesteringar, bør flaskehalsen vere avgrensa både i tid og storleik.

Topplastreduksjon betyr også betre utnytting av eksisterande kapasitet og jamnare belastning på komponentane. Dette vil tilseie lenger levetid og gjere det mogleg å redusere eller utsetje tradisjonelle nettinvesteringar. Topplastreduksjon er også kalla Peak Shaving og er illustrert i Figur 3 [8, s. 13]



Figur 3 Illustrasjon av Peak Shaving [8, s. 13]

1.2 Føremål og problemstilling

Denne studien tek sikte på å optimalisere eit batterisystemdesign ved hjelp av å modellere dynamisk og styre eit batteristyringssystem. Føremålet med undersøkinga er å sjå om ei slik optimalisering, ut frå dagens føresetnader, vil bidra til ei sikrere drift og auka stabilitet i distribusjonsnettet.

Dei spesifikke måla er som følgjer:

- Matematisk beskriving av dei ulike batteriprossessane, opp-/ utlading. Dette for å visualisere korleis batteriprossessane blir dynamiske modellerte.
- Designe og implementere batteristyringssystem (BSS). Ved bruk av historiske forbruksdata og målingar utført i Smart Valley blir ulike designsscenario implementert i BSS- modellering.
- Test og simulering. Dei dynamiske batteriprossessane og modelleringane blir brukt i datasimuleringar for å implementere, samt teste det avanserte batteristyringssystemet.

1.3 Avgrensing

Denne studien tek ikkje omsyn til den dynamiske oppførselen til distribusjonsnettet og faktiske parameter for transformator. Det er heller ikkje fokus på krav til spenningskvalitet for systemet, men heller overordna optimalisering av regulert effektbalanse mellom nytta komponentar.

1.4 Oppgåvestruktur

Kapittel	Innhald
1	Innleiing Introduksjon i energilagring
2	Metodar Data-samansetting blir presentert og optimaliseringsmodellar testa. Beskriving av batteriprosessar og reguleringsprinsipp med hovudvekt på optimal dimensjonering.
3	Resultat Implementeringsmodellar og simuleringar blir analysert for den optimale batteristyringssystem-modellen.
4	Drøfting Basert på resultatata blir optimaliseringsmetoden drøfta.
5	Konklusjon Seksjon der dei viktigaste konklusjonane med omsyn til metodar og resultat blir vist. og vidare arbeid Basert på avgrensingar og konklusjon blir det presentert anbefalingar for framtidig arbeid.

2 METODE

2.1 Smart Valley - Forbruksdata

I 2015 etablerte SFE prosjektet «Smart Valley» i Hyen, Sogn og Fjordane. Føremålet er å utvikle «smarte» løysingar for elektrisitetsbruk ved hjelp av «BigData» og moderne teknologi som skal redusere investeringsbehovet i kraftnettet, forbetre elektrisitetsbrukaren si oppleving og gi meir presise data frå produksjonsanlegg.

SFE Smart Valley er ein live demo lab og emne for tidleg implementering av testing av AMS målarar. Desse målarane blir utbreidd nasjonalt innan slutten av 2018 og kan levere live-data både for kunde og SFE. I tillegg samarbeider SFE og eSmart System om Connected Grid programvare, som dannar eit grafisk grensesnitt for datavisualisering av denne type data².

Verdiar frå Smart Valley gir verdifull innsikt i energiforbruket i bygda Hyen, er utgangspunkt for data nytta denne studien. Det er inkludert 45 kundar som har ulike time-, døgn- og vekebelastningar. Desse belastningane blir bestemt av storleik på huset, sesongvariasjon, oppvarming av vatn, belysning og bruk av elektrisk utstyr, noko som typisk er høgare om dagen enn om natta. Her er variasjon i utetemperatur ein viktig faktor [12, s. 20]. I tillegg er topplastene til dei fleste kundane høgast i vintermånadane og på sitt lågaste i sommarmånadane.

Standard for validering, estimering og endring

God kvalitet på måleverdiar er ei forutsetning for ein velfungerande marknad og AMS representerer ei mogelegheit for å få eit vesentleg løft i kvaliteten på måleverdiar. Derfor er det viktig å legge opp til reglar og rutinar som sikrar best muleg kvalitet så raskt som muleg.

Statnett, i samarbeid med Elhub-prosjektet, har definert eit sett med marknadsprosessar og meldingsformat, samt ein Validering, Estimering og Editering (VEE) guide som skal støtte DSO i si daglege innsamling og kontroll av måleverdiar før innsending til Elhub [13] .

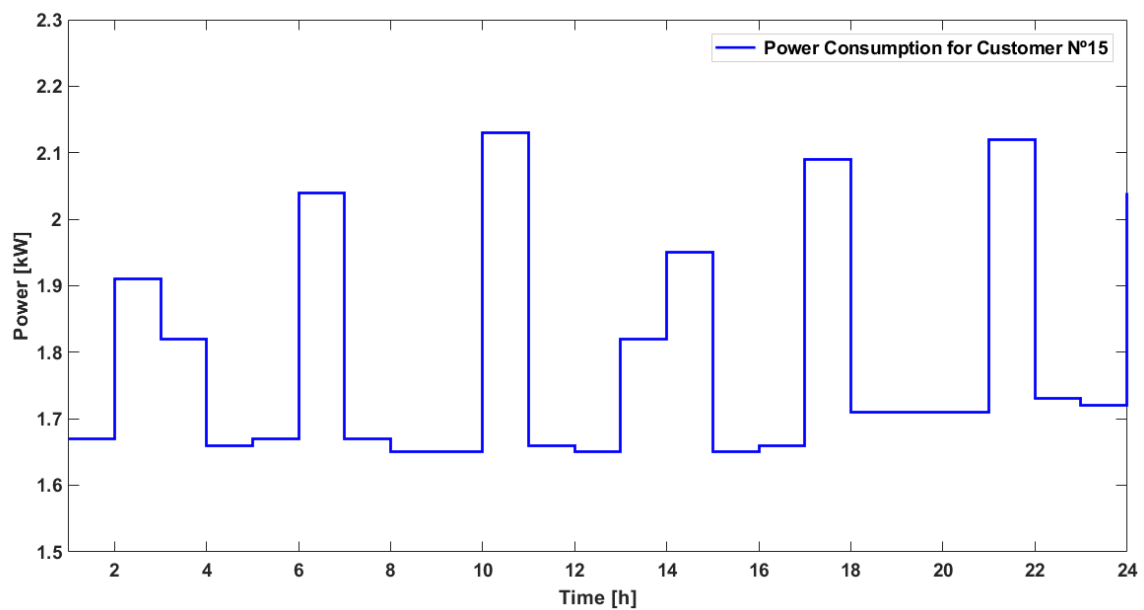
² Microsoft azure blir også brukt som ei skyteneste og for databehandling.

VEE-prosessen fastslår at AMS- data skal samlast ein gong kvar dag og skal innhalde forbrukt energi ved kvart målepunkt. Kontrollrutinar blir gjort til einkvar tid slik at utbetningsbehov i den automatiske validering og editering av måleverdiar blir avdekka [14].

Datagrunnlag

AMS- datasett innheld målingar frå 45 kundar i fire årstider, frå hausten 2015 til slutten på hausten 2016, med timeoppløysing. Datasett er målingar av forbrukt energi (kWh) ved kvart målepunkt. Av desse målingane er det i denne studien nytta lastprofil for ein kunde gjennom eit døgn i ein vintermånad, der lasta er relativt høg og med tydeleg variasjon.

Figur 4 viser lastprofil for kunde nr 15 gjennom eit døgn den 11. desember 2015.



Figur 4 Lastprofil for kunde Nr 15

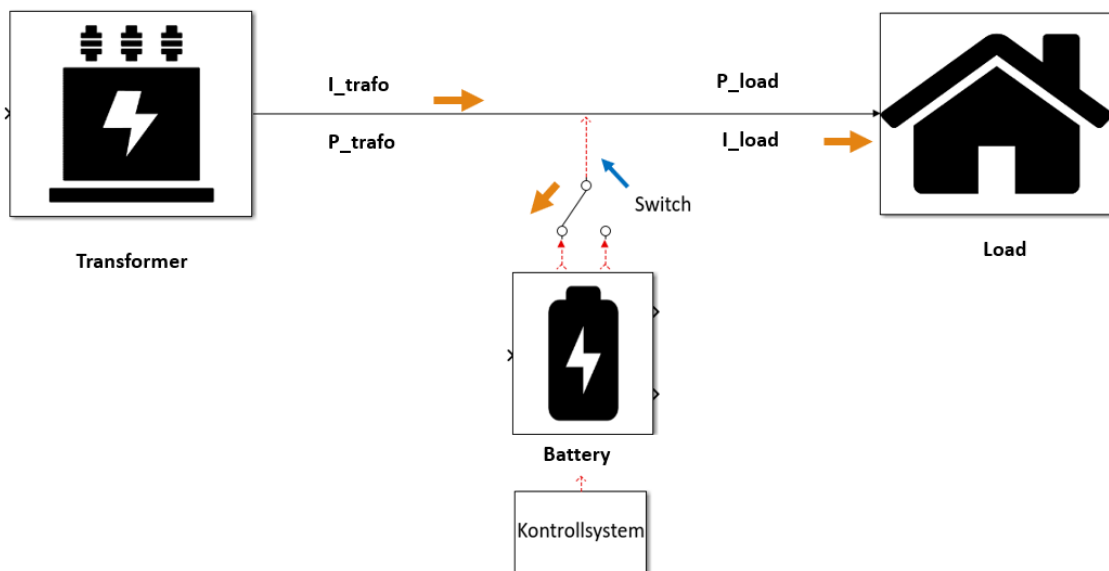
2.2 Reguleringssteknikk

Eit Smart Nett er like mykje eit konsept som det er eit fysisk system. I prinsippet er konseptet å levere kraft meir påliteleg og effektiv samtidig som det forblir miljømessig, venleg, økonomisk og trygt [15, s. 59].

Smart Nett omfattar eit breitt og rikt undersøkingsområde der kontrollsystem spelar ein nøkkelrolle på alle nivå. To sentrale teknologiar fell under den generelle kategorien styringssystem, nemleg måling og avanserte kontrollmetodar. Difor blir reguleringssteknikk innført sidan eit dynamisk system treng å bli regulert eller styrt for å få det stabilt.

Som teoriverktøy blir det brukt 1. ordens system, multivariable, blokkdiagram og tilbakekopling til kontrollsystem. Sjå vedlegg 6.2

Tema ovanfor vil vere grunnlaget for implementere Peak Shaving modellering. Figur 5 viser prinsippsskisse for Peak Shaving modellering.



Figur 5 Prinsippsskisse for Peak Shaving modellering [15, s. 51, fig 1.23]

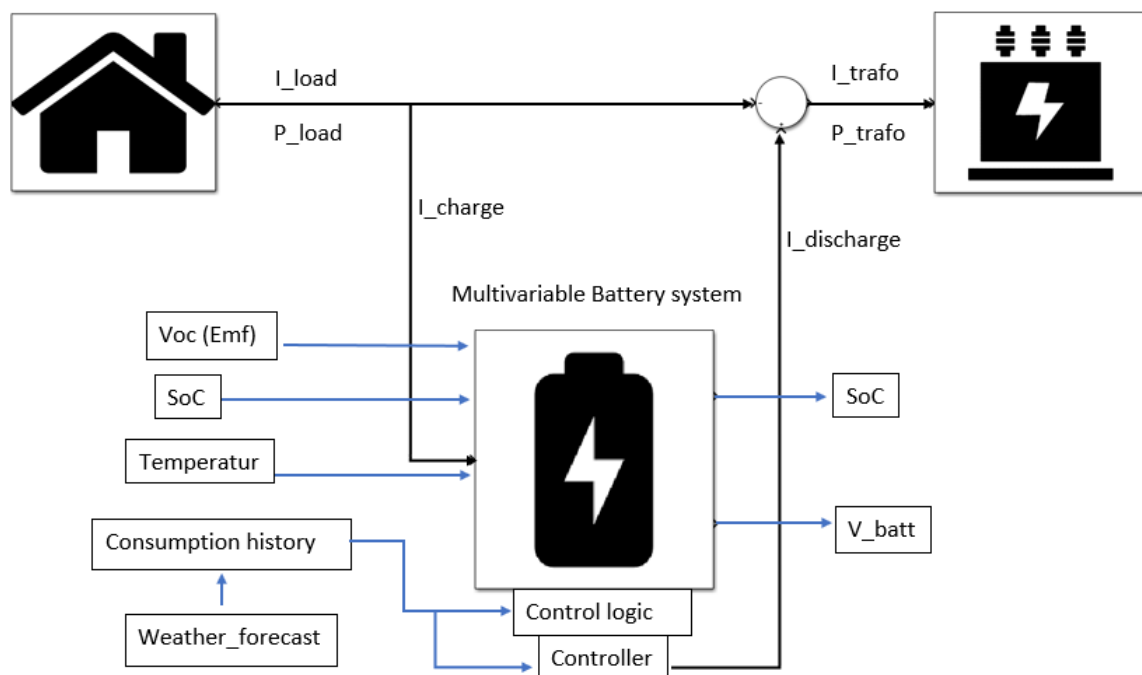
Dynamisk modell

Ein dynamisk modell er ei forenkla framstilling av den verkeleg verda i form av likningar.

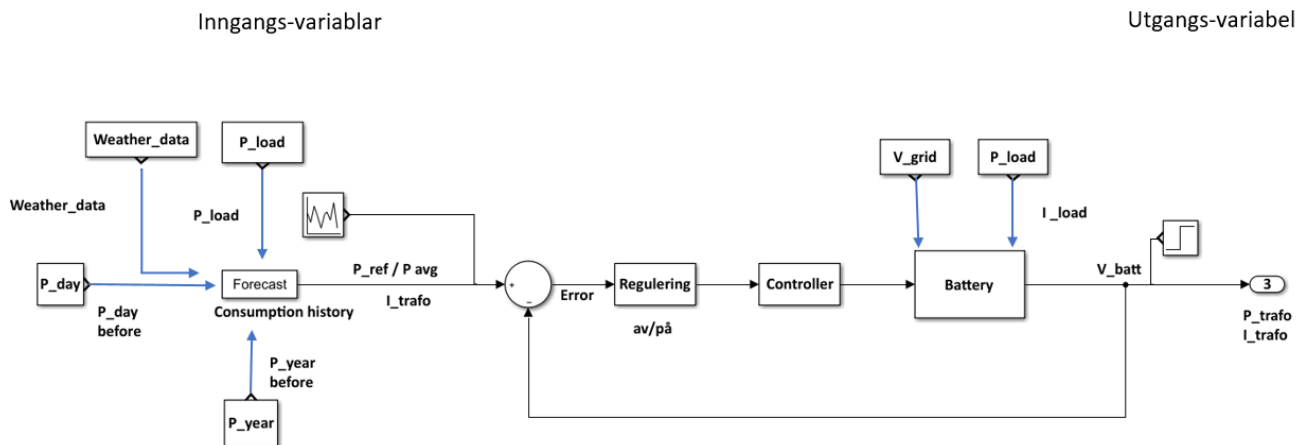
Dynamiske likningar viser korleis tilstandsvariabel endrar seg over tid, mellom anna differensiallikningar, transferfunksjonar og tilstandsrom. Tilstandsrom modellar er nyttige spesielt ved dynamisk beskriving av multivariable system. I eit multivariabel system er det innført ein transfermatrise for å karakterisere tilbakekoplingane [16, s. 17].

Eit dynamisk system er multivariabelt når det blir utsett for fleire uavhengige påverknadar (u) og/eller observert gjennom fleire målingar (y). Kor mange tilstandsvariablar som finst, er ikkje avgjerande for om systemet er monovariabelt eller multivariabelt.

Med blokkskjema og flytskjema vist i Figur 6 og Figur 7, er det framstilt multivariabelt dynamisk system implementert i Peak Shaving modell. Dette er eit godt hjelpemiddel for tankemåte og systemforståing når ein vel å bruke eit avansert styringssystem.



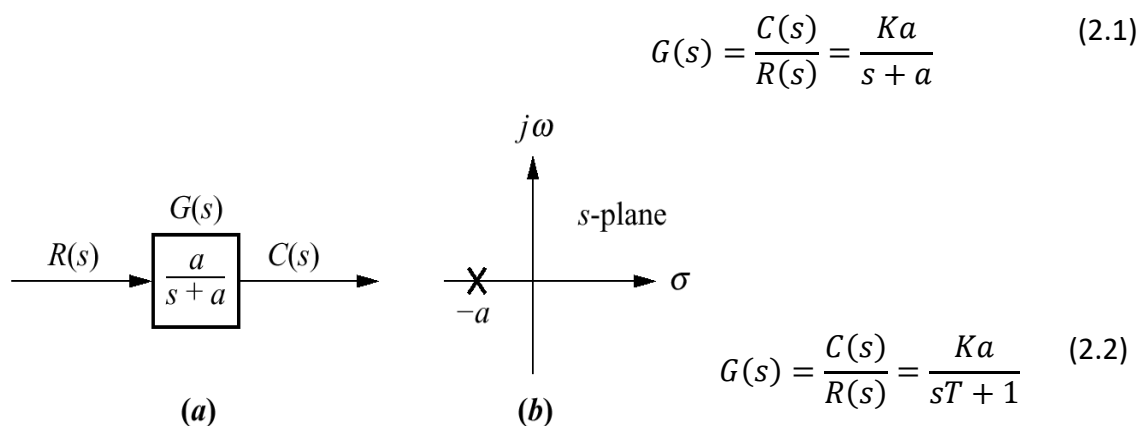
Figur 6 Blokkskjema med multivariablar for ein batteriprosess [17, Kap. 3]



Figur 7 Flytskjema for eit dynamisk system med tilbakekoplingskontroll [15, s. 25, fig 1.3]

Første ordens system

Første ordens system inneheld grunnleggande eigenskapar som transferfunksjon og tidskonstant. Transferfunksjon til ein prosess inneheld forsterking k . Denne forsterkinga representerer steady-state forholdet mellom den resulterande endringa av utgangen og endringa ved inngangen [17, Kap. 4].

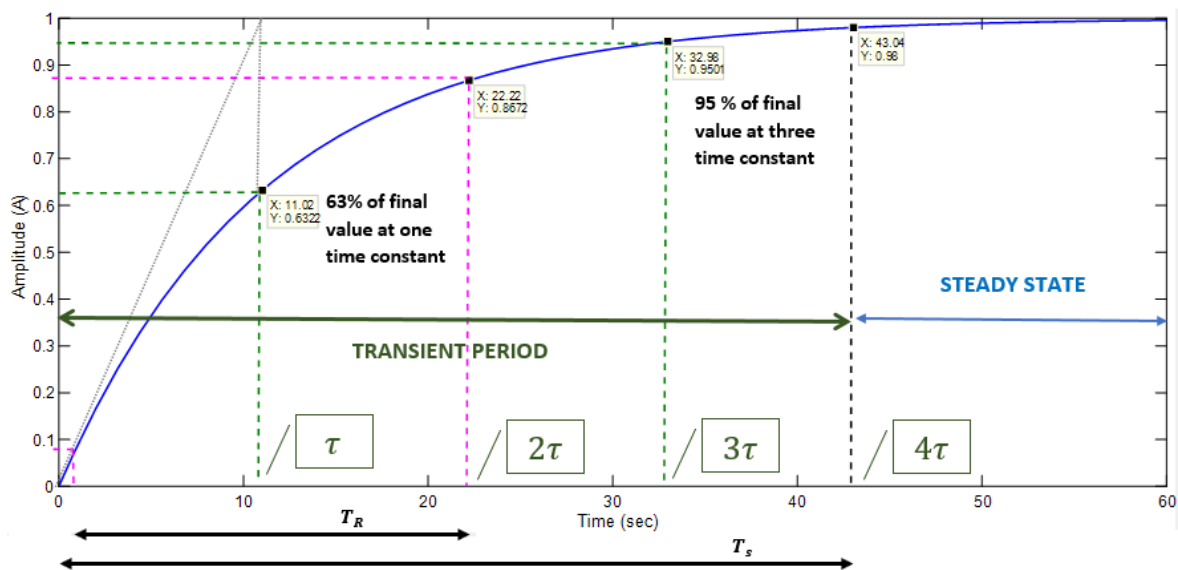


Figur 8 Første ordens system (a) og plotting av ein pol (b) [17, s. 157, figure 4.4]

Ved å velge ein $k=1$ i formel (2.1), får ein det som er kalla normalisert transferfunksjon. Dette vil gi transferfunksjonen frå Figur 8 (a). Så når ein delar på a heile brøkdeler, får ein den andre grunnleggande eigenskapen, nemleg tidskonstant T (τ), vist i formel (2.2). I Figur 8 (b) ein pol i $-a$ som genererer ein respons e^{-at} .

Figur 9 viser følgande karakteristikkar for eit første ordens system med verdiane som er brukt i denne studien.

- Tidskonstant: 3τ representerer tidsperioden der sprangresponsen når 95 % av steady-state.
- Stigningstid eller responstid (T_r) er tida der spranget aukar frå 10% til 90% av steady state.
- Innstillingstid (T_s) for 5% når tidslengde for den transiente perioden er $3T$.

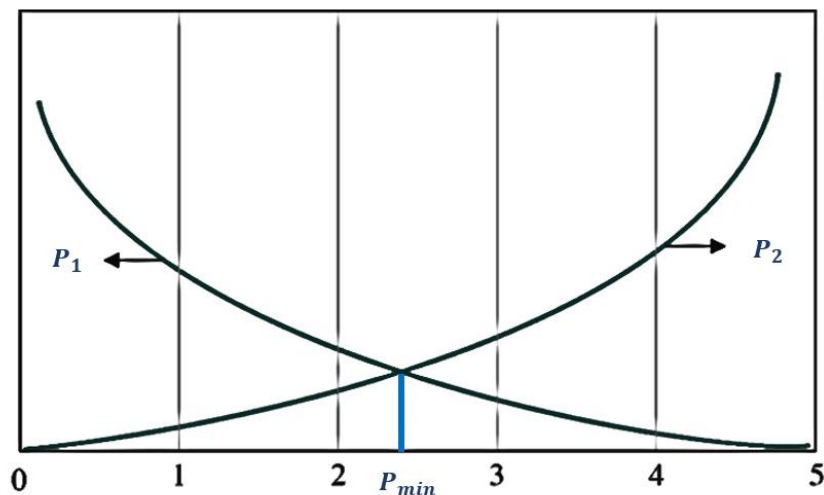


Figur 9 Første ordens system [17, s. 158, fig 4.5]

Ytingsmetode

Mogleheita til å justere forbigåande (transient) og steady- state respons er ein klar fordel ved eit tilbakekopla kontrollsystem. For å analysere og designe eit kontrollsystem må yting bli definert og målt [15, s. 5].

Basert på ønska yting av kontrollsystem, kan systemparameter blir justert for å gi ønska respons, sjå Figur 10. Fordi kontrollsystem er innbydane dynamiske, er deira ytingar vanlegvis spesifisert i form av transient og steady- state respons. I designfasen blir spesifikasjonane ofte revidert for å få eit kompromiss. Difor er spesifikasjonane sjelden eit stivt sett med krav, men heller eit forsøk på å kvantifisere ønska yting. [15, s. 327, fig 5.1]



Figur 10 Ytingsmetode P_1 og P_2 mot parameter P_{min} [15, s. 327, fig 5.1]

I Figur 10 viser skjæringspunktet mellom parameter P_1 og P_2 gir P_{min} . Denne type justeringa oppstår normalt i kontrollsystem design [15, Kap. 5]. Spesifikasjonane som er oppgitt i forhold til ytingsmåling, angir kvaliteten på systemet til designer. Med andre ord bidreg ytingsmålingane til å svare på spørsmålet om kor godt systemet utfører oppgåva det blei designa for.

2.3 Litium-ion batteri

Litium-ion batteri består hovedsakleg av to elektrodar, elektrolyttar og porøse partisjonar. Det aktive materialet litium-ion er levert av litium metalloksid som positiv elektrode. Innebygd arbeidsmateriale for litium-ionar er i hovudsak koks, grafitt og amorft karbon i negativ elektrode [18, s. 3–4].

Elektrolytt blir oppløyst i litiumsalt av organiske løysingsmiddel. Litiumsalta er LiPF_6 , LiAsF_6 , LiClO_4 osv. Organiske løysingmiddel er hovudsakleg etylenkarbonat, propylenkarbonat, dimetylkarbonat og klorkarbonat³. Membranen er porøs, elektrisk isolert og har fysiske barrierar mellom polane som tillèt ionar å passere gjennom.

Separatormaterialet som blir brukt i Litium-ion batteri er polyetylen eller polypropylen. Litium batteri oppfyller prinsippet «gyngestol» i lade- og utladingsprosessen. Ved lading forlet Li^+ det positive laget av den lagdelte strukturen. Under påverknad av ekstern spenning gjennom elektrolytten og porøs separator, vil den migrere til den underliggende negative strukturen. Elektrodane strøymar frå det positive til det negative gjennom ein ekstern leiing [18, s. 3–4].

På tidspunkt for utladinga forlet Li^+ det negative laget av lamellarstrukturen gjennom den porøse separatoren og migrerer til den positive strukturen av den lagdelte strukturen slik at elektronar strøymar. Der vil ein oppnå kjemisk energikonvertering.

2.3.1 Battericelle eigenskapar

Dei to viktige eigenskapane til eit batteri er elektromotorisk kraft (E_{mf}) og indre motstand (r_{intern}). Desse to eigenskapene er konstante. I eit batteri vil separasjon av ladingar gi opphav til E_{mf} ved kjemiske reaksjonar i elektrodane og elektrolytten inne i batteriet sine celler. Dette skjer ved at positive og negative ladingar blir adskilt, kalla ladingseparasjon. Dermed oppstår eit elektrisk felt som fører til ein elektrisk potensialforskjell per unit lading. Eininga for denne mengda energi per lading er *Joul /Coulomb eller Volt*.

³ C₃H₄O₃, C₄H₆O₃, C₃H₆O₃

E_{mf} er ei spenning som gir batteriet ein polaritet. Spenninga til batteriet sin E_{mf} går frå sin negative terminal til sin positive terminal. For å gi ei forklaring på opphavet til elektromotorisk kraft E_{mf} , er det vanleg å betrakte den som ei ideell spenning til batterikjelder.

Eit ideelt batteri

Eit batteri lagrar straum. Spørsmål om eit ideelt batteri kan virke trivielt, men er det er ikkje. Eit ideelt batteri vil levere straum ved ei spenning som er avhengig av ladingstilstanden (SoC). Ekte batteri gjer det ikkje. Ekte batteri ser spenningsfallet under belastning, og plutselig stig det medan dei blir lada. Årsaka til dette fenomenet er at dei har ein indre motstand. Til høgare straumen er, til lågare spenning går tapt for denne indre motstanden. [19]

For å representere variasjon i spenning forårsaka av endringar i straum og forstå oppførselen til batteriet, vil ein legge ein intern motstand mot eit ideelt batteri. I er definert som den straumen som går gjennom kretsen ved lading slik

$$I = \frac{q}{t} = \frac{d_q = \text{Coulombs}}{d_t \text{ seconds}} = \text{Ampere [A]}$$

Dersom det er ingen straum som går gjennom, har den indre motstanden ingen effekt på utgangsspenninga. Derfor er det viktig å måle cellespenninga i kvile, om målet er å skaffe seg ein ide om ladingstilstanden (SoC). Elles påverkar effekten av elektrisk motstanden spenninga i forhold til straumen, dvs $\Delta V = Ir_{intern}$

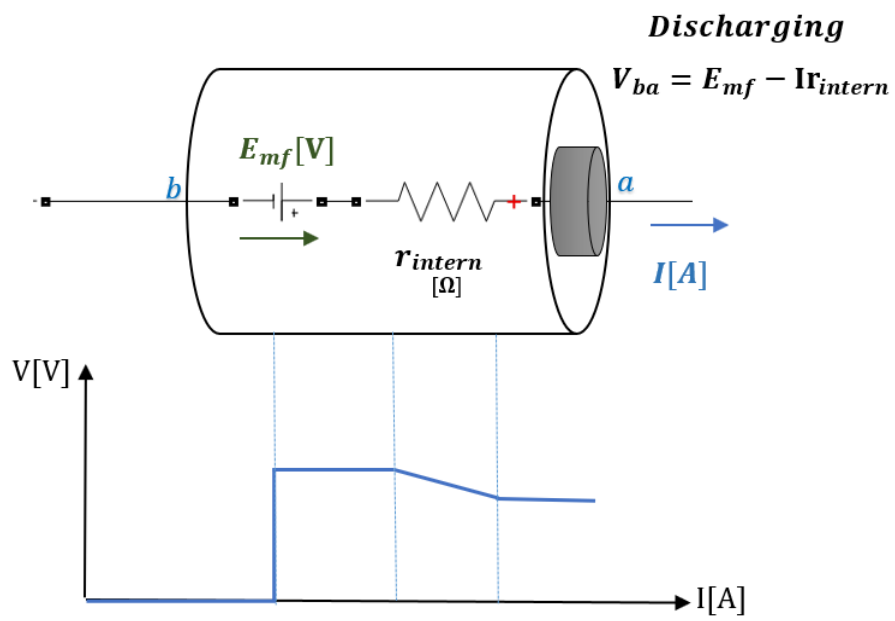
Figurane under viser ein skjematisk framstilling av dei to eigenskapane til batteriet, der E_{mf} og intern motstand r_{intern} er i serie. Jo mindre den indre motstanden er for ein gitt E_{mf} , desto meir straum og jo meir effekt kan batterikjelda levere [20]

Dersom retninga til straumen i eit batteri er den same som E_{mf} , er batteriet utlada. Dersom retninga til straumen er mot E_{mf} , blir batteriet lada.

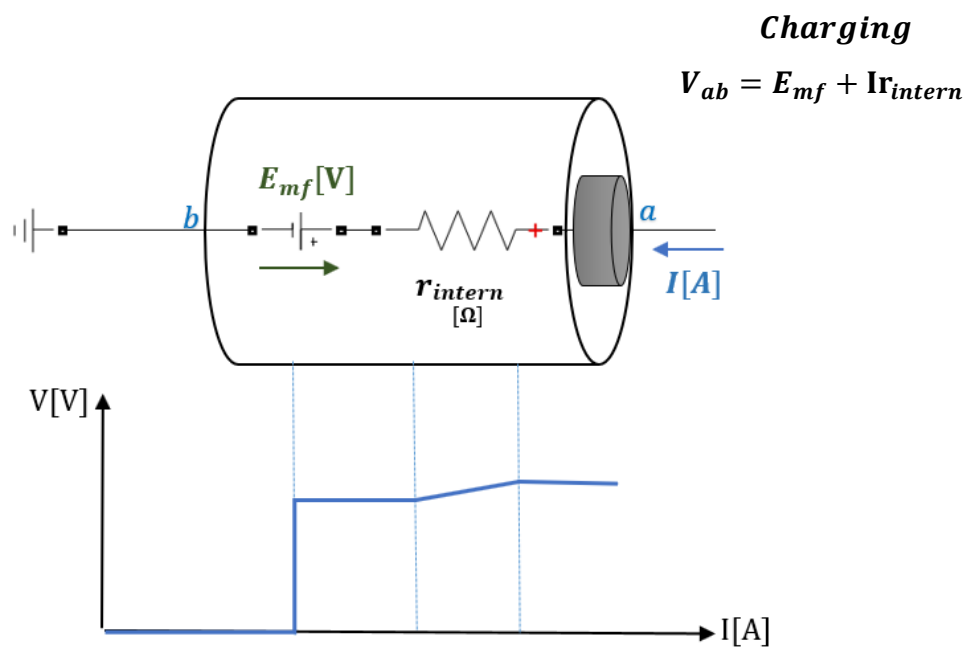
For utlading $V_{ba} = E_{mf} - Ir_{intern}$

For lading $V_{ab} = E_{mf} + Ir_{intern}$

Som følge av dette reflekterer ikke den målte spenninga på batterietsterminal ladingstilstanden lenger. Dette er grunnen til at ladingstilstanden for batteri berre kan bli fastsett av ei stabilisert spenningsmåling i kvilemodus. Den blir kalla stabilisert open spenningskrets (OCV).



Figur 11 Utladingsprosess [20]



Figur 12 Ladingsprosess [20]

Straumrate

Straumrate er eit relativ mål for cellestraum og er den konstante straumladinga og utladingsraten som cella kan oppretthalde i ein time, kalla C-rate. C- rate er uttrykket for lading-/ utladingsstraum som er normalisert med batterikapasitet. Til dømes, når ein tømmer med 1C, blir batteriet fulllada på 1 time ideelt [21, Kap. 2] . Tilgjengeleg kapasitet blir endra per ulike C- rater. Eigentleg jo større C- rate er, jo mindre kapasitet er tilgjengeleg .

Ein C-rate på 1C er også kjent som ein time-utladning; 0.5C eller C/2 er ein to-timers utlading og 0.2 eller C/5 er ein 5-timers utlading. Tabell under illustrerer tider ved ulik C- hastigheit [18, Kap. 4].

Tabell 2 Tider for ulike C-rate [18, s. 152]

C-rate	Tid
5C	12 minutt
2C	30 minutt
1C	1 time
0.5C eller C/2	2 timar

Årsaka til C-rate definisjonen er å kunne samanlikne ulike batteri. Når dei ulike batteria blir samanlikna, er det viktig at det blir gjort under like forhold, t.d. temperatur, utladingsrate og at batteria har nådd same alder.

Kapasitet

Kapasiteten kan bli målt ved å lade ut eit fulllada batteri gjennom ein last med konstant straumrate.

Kapasiteten er utrekna ved å integrere straum i tid :

$$Q = \int_{V_{min}}^{V_{max}} I(t) dt \text{ når } I > 0 \text{ ved utladning.}$$

Grunna den kjemiske reaksjonen i battericeller, er kapasiteten til eit batteri vanlegvis avhengig av utladingstilstandar som utladingsstraumrate, temperatur og andre faktorar. Til dømes, dersom batteriet er utlada ved ein relativ høg straumrate, vil kapasiteten vere lågare enn forventa.

C- raten gir ein relasjon mellom utladningsstraumen I og cellekapasiteten C_{cell} i Ah ved

$$I_{tal\ c} = tal * \frac{C_{cell}}{1h}$$

Ladingstilstand

Ladingstilstand (SoC) er ein måte å kvantifisere kapasiteten. Denne er ein prosentandel av batteriet sitt noverande nivå i forhold til batteriet sin fulle kapasitet. SoC er komplementær til utladningsdybde (DoD):

$$SoC_{MIN} = 100 \% - DoD \quad (2.3)$$

SoC kan bli definert som RSoC (Relative State og Charge) og ASoC (Absolute State og Charge). RSoC er typisk frå 0% - 100%. Eit fulllada batteri sin RSoC er alltid 100% og eit heilt utlada batteri har 0% RSoC. ASoC har evne til å ta den angitte ladinga når batteriet er nytt. Det vil seie at ASoC er ein referense utrekna av designkapasitet som er ein fast kapasitet når batteriet er produsert. Eit fulllada nytt batteri vil ha 100% ASoC, men eit fullada aldringsbatteri kan vere mindre enn 100% på grunn av ulike ladnings-/ utladningsforhold. Det er viktig å halde ladingstilstanden innan bestemte grenser for å sikre levetid til batteriet og for å kunne optimaliserere bruken av tilgjengeleg energi i batteri.

SoC- nivået på batteriet er bestemt ved å bruke formel (2.4) der strømmen blir integrert over tid og Q_{max} . Battericeller er vanligvis estimert ved bruk av Coulomb- Counting- metoden.

Denne metoden kan bli formulert til :

$$\begin{aligned} SoC &= 100 \left(1 - \frac{1}{Q_{max}} \int_0^t \eta I_{batteri}(t) dt \right), \\ SoC' &= \eta \frac{I_{batteri}}{Q_{max}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Q_{max} (Ah) er den maksimale lading som kan bli lagret i batteriet, coulomb koeffisient η er en konstant verdi som definerer lading og utladningsprosess og $I(t)$ er strømmen som har passert gjennom batteriet siden tid $t=0$, starter ved 100% SoC. Ladingstilstand kan generelt bli bestemt ved måling av den åpne kretsen sin spenning brukt videre i studien.

Ladningscyklus

Refererer seg til en batteriprosess der batteri blir utladet, ladd og deretter utladet igjen. En ladningscyklus trenger ikke å være fullstendig for å bli betraktet som en syklus. Batteri er vanligvis vurdert for en rekke sykluser med en spesifikk utladningsdybde (DoD) og en bestemt utladningsrate. Forventet levetid for et batteri er bestemt av forventet antall ladningscykluser.

Utladningsdybde

Utladningsdybde (DoD) er en måte å kvantifisere kapasiteten som er utladet fra et batteri. Den kan bli definert som brukstid, amper-timer (Ah) eller i prosent (%). Utladningsdybde er komplementær til ladingstilstand (SoC) formel (2.3), og DoD er i følge formel (2.5)

$$SoC_{MIN} + DOD = 100 [\%] \quad (2.5)$$

Energilagring er en sakte prosess som etter hvert raskt må frigjøre energi på etterspurnad. Den fulle energien som er lagret i batteriet, kan ikke bli tømt helt uten å forårsake alvorlig og ofte uopprettelig skade på batteriet. Jo mindre utladning (låg DoD), desto lengre varer batteriet. Litium-ion batteriet har ikke noen minner og trenger ikke periodisk full utladningscyklus for å forlenge levetida [18, Kap. 5].

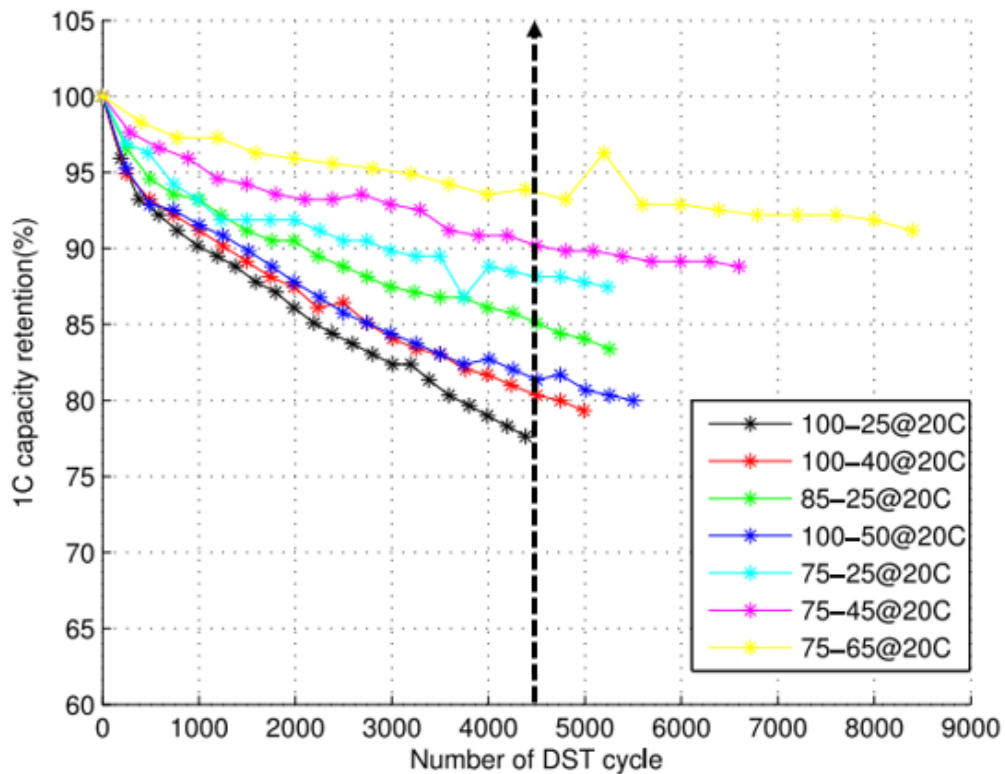
Levetid

Levetida til Litium- ion batteri er avhengig av mange faktorar. Desse faktorane er DoD som er ein funksjon av sykluslivet, lading/utladingsrate, temperatur, yting (målt i kapasitet) og val av materialar i batterikonstruksjon. Batteriet si levetid er ofte spesifisert av produsenten som syklusliv, som er tal lading/utladingscyklusar batteriet kan oppleve før ei viss ytingsgrense er nådd.

Elektrokjemiske reaksjonar i batteriet er temperaturavhengige, og høg driftstemperatur reduserer sykluslevetida. Lågare driftstemperatur kan auke sykluslevetida, men dette reduserer batteriet si yting. Litium-ion batteri har eit driftsområde for lading mellom 0°C til 45°C (32°F til 113°F) og for utlading mellom -20°C til 60°C (-4°F til 140°F) [18, Kap. 4]

Ved hjelp av Litium- ion batteri nedbrytingsmodell (DST) blir battericelle levetid vurdert frå driftsprofil [22]. For kvar test startar cella først ved eit sett SoC- nivå og DST- profil. Testen er brukt gjentatte gongar til det angitte stoppnivået er nådd. Cellene blir deretter lada tilbake til startnivået ved ein 1C-rate for å fullføre ein testsyklus.

Denne studien tek utgangspunkt i [22, s. 1137, fig. 5a] registrert syklusverdi på 4500 ved 100-25 % SoC ved 20°C romtemperatur. Det blir lese av samanlikningsverdiar for ulike DoD i forhold til kapasitet ved 1C og tal syklusar. For å finne DoD_{min} er det nødvendig å bruke Figur 10 og avlesinga frå Figur 13 for å få ein kompromissverdi. Desse verdiane blir brukte i ytingsmetode vist i Figur 10 for å få finne DoD_{min} .



Figur 13 Kapasitet ved testsyklus av Litium- ion batteri under ulike opp- og utladingssekvensar ved 20 romtemperatur. [15, s. 1137, fig. 5a]

Effektivitet

Ein annan viktig parameter er effektiviteten. Under ladinga blir noko av energien uungåeleg tapt i den kjemiske konverteringsprosessen, vanlegvis som varme. På same måte på retur, av same grunnar, er noko av tilgjengeleg lading gått tapt og berre ein del av den lagra ladinga er tilgjengeleg for arbeid. Effektiviteteten er forholdet mellom utladingsenergi og ladingsenergi. Effektiviteteten til batteriet og kapasitet vil endre seg avhengig av lading og utladingsparametrar.

Maksimal spenning og straum

Maksimal spenning ved lading er bestemt av kjemi-komponenten og er karakteristisk for batteriet. Den kan vere litt lågare dersom anoden/katodematerialet endrar seg. Maksimal straum som batteriet kan levere er direkte avhengig av batteriet sin indre ekvivalent serie motstand r_{intern} [21, Kap. 2]. Straumen som strøymar ut av batteriet må passere gjennom E_{mf} og r_{intern} , noko som vil redusere batteriet si terminal spenning $V_{terminal}$ eller V_{ab} .

For å forstå denne dette konseptet, blir det brukt både Kirchoffs spenningslov og Ohms lov.

For utlading:

$$\begin{aligned} (+V_{terminal}) + (-V_{E_{mf}}) + (-V_{lost}) &= 0 \\ (+V_{terminal}) + (-V_{E_{mf}}) - (I_{Discharging} * r_{intern}) &= 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

For lading:

$$\begin{aligned} (-V_{terminal}) + (+V_{E_{mf}}) + (+V_{lost}) &= 0 \\ (-V_{terminal}) + (+V_{E_{mf}}) + (I_{Charging} * r_{intern}) &= 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

Merk at r_{intern} og $V_{E_{mf}}$ kopl i serie er ein modell for litium- ion batteri. Dette er ein forenkla modell og tek ikkje omsyn til sjølvutlading og temperaturvariasjonar i den indre motstanden, samt ikkje sett i samanheng med ekstern motstand kopl i serie med r_{intern} .

2.4 Batteri kretsmodellar

Forbettringsnøyaktigheit av lade- og utladingsmodellen til batteri, spesielt lithium batteri, er eit betydeleg mål i denne studien.

Når ein modellerer oppførselen til eit fysisk system, er det mogleg å identifisere tre generelle modellkategoriar, vist i Figur 36. Avhengig av metoden, korleis inngangane er relatert til utgangane til modellen, kan dei bli kategoriserte i empiriske, fysiske og semi-empiriske modellar [23, s. 2].

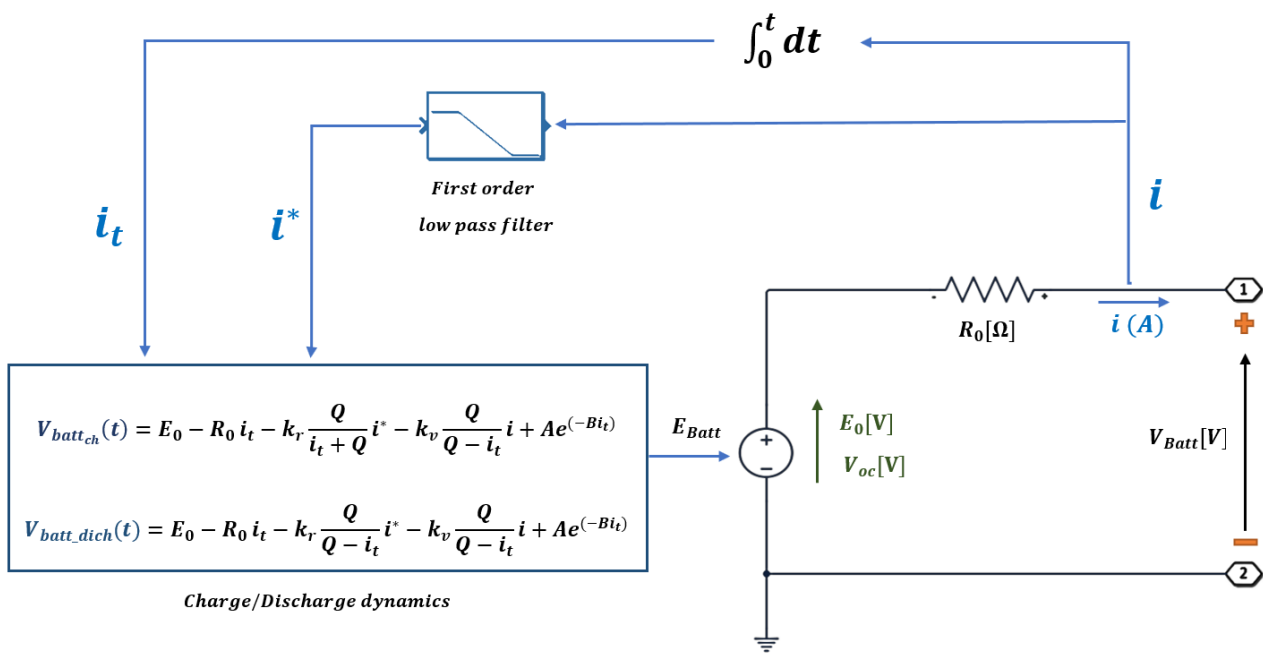
Ein effektiv batterimodell er uunnverleg når det gjeld å designe energilagring i distribusjonsnett. Element i batterimodellen inkludert i denne studien, er batteriladings-/ utladingsegenskapar og ladningstilstand (SoC).

Her blir det brukt elektriske modellar mellom anna Thevenin som ein semi-empirisk modell.

2.4.1 Elektrisk modell

Ein detaljert matematisk batterimodell inkluderer normal fleire under modellar. Den mest kjende undermodellen for elektrisk systemstudie er spenning- straum modellen for konstant utladingsstraum. Denne modellen, som er også kjent som Shepherd- modellen, beskriv korleis terminalspenninga på eit batteri blir endra med straumen [24]. Shepherd- modellen har utvikla formlar for å beskrive den elektrokjemiske oppførselen til eit batteri direkte i form av terminalspenning, open kretsspenning, indre motstand, utladingsstraum og SoC [25]. Modellen blir brukt for utlading såvel som for lading, vist i formlar (2.8) og (2.9) basert på Shepherd- modellen og SimPowerSystems- batterimodell.

Litium- ion batterimodellen [25], vist i Figur 14 viser korleis ein ekvivalent krets er modellert for lading -og utladingsdynamikken. Variasjon av OCV frå referanse konstant spenning E_0 er relatert til SoC-endingar ved å inkludere ein polarisasjonskonstant k .



Figur 14 Elektrisk ekvivalent krets for lading -og utladingsdynamikk med R0- modell [25, s. 0289, fig 3]

Ved lading er utgangsspenninga :

$$V_{batt_ch}(t) = E_0 - R_0 i - \underbrace{k_r \frac{Q}{i_t + Q} i^* - k_v \frac{Q}{Q - i_t} i}_{\text{Polarisation resistance}} + Ae^{(-Bi_t)} \quad (2.8)$$

Polarisation voltage

Og for utlading blir:

$$V_{batt_dich}(t) = E_0 - R_0 i - k_r \frac{Q}{Q - i_t} i^* - k_v \frac{Q}{Q - i_t} i + Ae^{(-Bi_t)} \quad (2.9)$$

Kor E_0 representerer den konstante batterispenninga (V), Q er maksimal batterikapasitet (Ah), $V_{batt}(t)$ er terminal batterispenning (V) ved tid, i er batteristraumen (A), $i_t = \int i dt$ (Ah) er den dynamiske straum (A) ved tid, R_0 er den indre motstanden som har ulike verdiar for lading og utlading. A representerer amplitude i eksponential sone i (V), B er omvendt tidskonstant i eksponential kapasitet sone (Ah^{-1}), og i^* representerer straum filtrert gjennom polarisasjonsmotstand (A).

k er polarisasjonskonstant (V/Ah) der k_r er polariserings-motstandkoeffisient (Ω) og k_v er polariserings-spenningkoeffisient.

Polarisasjonsmotstanden er ulik for lading og utlading. Denne blir modifisert ved å bruke ein filtrert batteristraum i^* . OCV varierer ikkje-lineært med SoC, og dette fenomenet er modellert med polariseringspenninga [25].

$k \frac{Q}{Q-i_t} i$ representerer ei ikkje-lineær spenning som blir endra med straum-amplitude og det lada batteriet. Når batteriet er nesten heilt utlada og det ikkje går straum ($i_t = 0$), aukar batterispenninga nesten til E_0 . Så snart ein straum sirkulerer igjen, fell spenninga brått. Denne oppførselen er representativ for eit ekte batteri, og den matematiske modellen gjer det mogleg å representere dette fenomenet med ei algebraisk sløyfe for simulering av ustabilitetet [26].

Utladingskurve

Parameter knytt til Ekvivalent krets kan modifiserast for å representere ein bestemt batteritype, basert på sine utladingsegenskapar. Ein typisk utladingskurve for eit Litium-ion batteri er delt i tre seksjonar[25].

Det eksponentielle området (1) representerer batteriet si spenningsoverskriding over nominell verdi. Operasjonspunktet til batteriet i dette området er i ein periode med på å opprette ein stasjonær verdi av utladingsstraum.

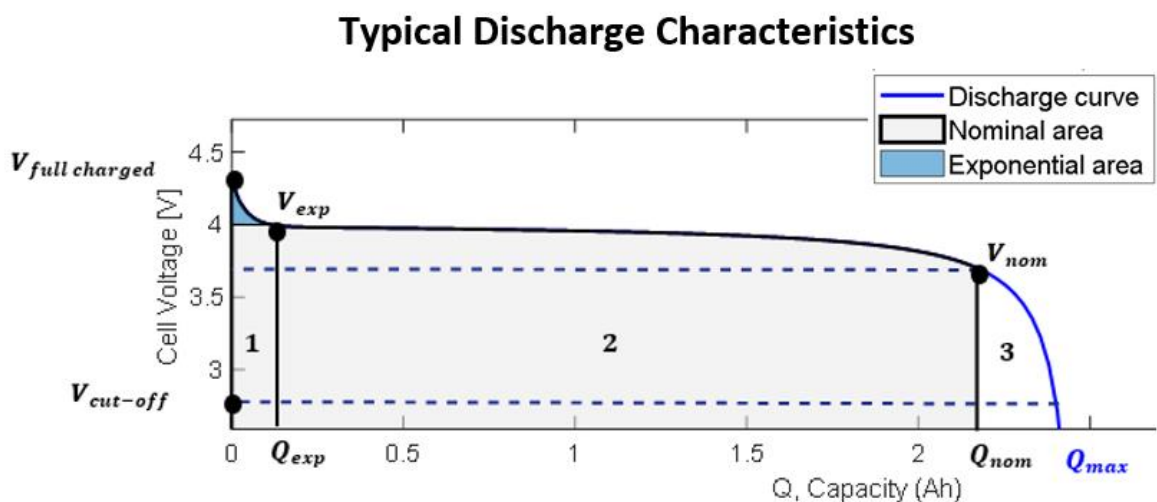
I det *nominelle området* for batteridrift (2) under utladningsmodus, blir spenninga endra. Utlading av nominell kapasitet for batteristraum blir etterfølgt av *det tredje operasjonsområdet(3)*, som representerer den totale utlading når spenninga i batteriet minkar raskt.

Batteriutladingskurve, vist som ei blå linje i Figur 15, har ikkje ein ikkje-lineær karakteristikk og er beskrevet av formel (2.9). Batterispenninga strekkjer seg mellom øvre fullada spenning V_{full} og ei lågare spenningsgrense $V_{cut-off}$.

$V_{cut-off}$ representerer den tomme tilstanden til batteriet der den minste tillatte spenninga er nådd. Denne avgrensinga er meint å beskytte batteriet mot djup reduksjon.

Seksjonen mellom V_{full} , $V_{exponential}$ (V_{exp}) med følgjande kapasitetsrater (C-rate) Q_0 , og Q_{exp} , er identifisert som eksponential region av utladningskarakteristisk kurve. Der blir den utladda spenninga endra eksponentielt med omsyn til batterikapasitet.

Spenninga har ein omtrentleg stabil verdi for C- rater utover Q_{exp} til den nominelle Q_{nom} , til den nominelle V_{nom} spenninga er nådd. Det er ikkje berre batterispenninga som blir påverka av utladingsraten, men også batterikapasiteten blir redusert ved høg utladingsrate. Dette skjer som eit skarpt spenningsfall på slutten av utladingsprosessen. Denne utladingsraten avsluttar ved $V_{cut-off}$ [27].

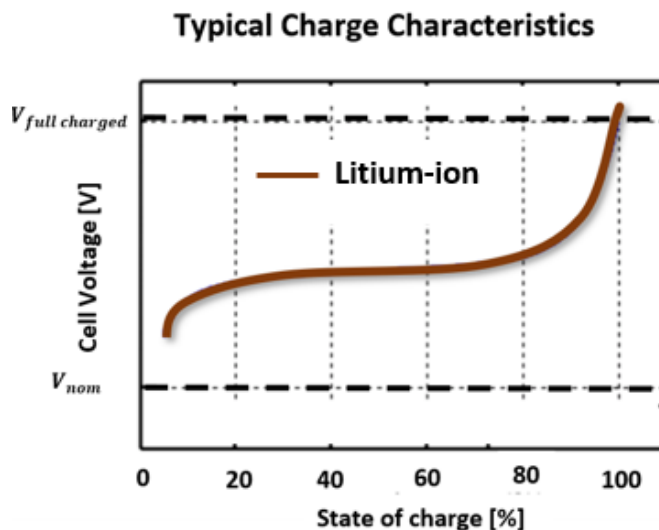


Figur 15 Utladingskurve består av tre seksjonar: (1) det eksponentielle området, (2) det nominelle området og det operasjonsområdet (3) [25, s. 0290, fig 1]

Ladingskurve

Det nominelle området for ladingskurve er den omvendte formen for utladingskurva, i utgangspunktet frå den tomme batteritilstanden, gjennom ein periode med rask etablering av nominell spenning. Den er etterfølgt av ein ladingsperiode ved nominell spenning, og til slutt for det eksponentielle området når ikkje noko spenning blir gjenoppretta [25].

Sidan ladestraum har motsett teikn ($i^* < 0$), endrar polarisasjonsmotstanden seg. Derfor blir funksjonen til ladespenninga litt ulik. Verknaden av temperatur er ikkje teke i betraktning.



Figur 16 Ladingskurve med det nominelle området og det eksponentielle området [25].

Celleparameter

Sidan batterimodellen er ein dynamisk modell som simulerer oppførselen til oppladbare batteri av ulike teknologiar under ulike ladings- og utladingsforhold, blir følgjande kriterie vurdert [25]:

- At den interne motstanden til batteriet er konstant under lading -og utladingsyklus og at den ikkje vil variere med straumamplitude.

- At den effektive kapasiteten til batteriet vil vere den same sjølv om straumamplitude endrar seg.
- At temperaturen har ingen effekt på modellens oppførsel.

Parameter til modellen blir utleia av utladningsegenskapane og er det same for lading.

Følgjande formlar blir brukt for å utleie parameter for ei celle.

$$\begin{aligned}
 A &= V_{full} - V_{exp} \\
 B &= \frac{3}{Q_{exp}} \\
 K &= \frac{((V_{full} - V_{nom}) + A(e^{-B \cdot Q_{nom}} - 1)) * (Q_{max} - Q_{nom})}{Q_{nom}} \\
 E_0 &= V_{full} + K + R_0 i_{tal_C-rate} - A
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Ei battericelle blir utvida til å modellere ein batteripakke ved å skalere mengde. For å modellere ein serie og/ eller parallellkombinasjon av celler basert på parametrane til ei enkeltcelle, kan følgjande parameter bli brukt. Nr_{ser} - variabelen svarer til tal celler i serie og Nr_{par} svarer til tal celler i parallell [28].

Tabell 3 Parameter for dimensjonering av batteripakke

Parameter		Verdiar
Nominal Voltage	V_{nom} [V]	$V_{nom} * Nr_{ser}$
Rated capacity	Q_{rated} [Ah]	$Q_{rated} * Nr_{par}$
Maksimal kapasitet	Q_{max} [Ah]	$Q_{max} * Nr_{par}$
Fully charged voltage	V_{full} [V]	$V_{full} * Nr_{ser}$
Nominal Discharge Current	Q_{dich_nom} [A]	$Q_{dich_nom} * Nr_{par}$
Internal resistance	R_0 [Ω]	$R_0 \frac{Nr_{ser}}{Nr_{par}}$
Capacity at nominal voltage	Q_{nom} [Ah]	$Q_{nom} * Nr_{par}$
Exponential zone Voltage	V_{exp} [V]	$V_{exp} * Nr_{ser}$
Exponential zone Current	Q_{exp} [Ah]	$Q_{exp} * Nr_{par}$

2.4.2 Elektrisk Ekvivalent kretsmodell

Elektriske Ekvivalente kretsmodellar (ECM) som brukar kombinasjonar av kondensatorar, motstandar, spennings- og straumskjelder, har vist seg å vere ein påliteleg måte å modellere spenning- og straumeigenskapar til Litium-ion batteri [29].

Dei fleste ECM-modellane er semi-empiriske modellar der prosessen for utrekna utgang er basert på å kjenneteikne opprinnelege tilstandar og verdiar (t.d energi, kapasitet, spenningsrespons osv) til eit utrekna system, etterfølgd av parameter til modellen.

Design på ECM- modellar kan variere sterkt avhengig av utgang og nøyaktigheit som det blir forventa å oppnå. Utgangane til eit batteri ECM- modell samanliknar dei viktigaste batterikarakteristikkane og informasjon (til dømes spennings, indre motstand, SoC-OCV relasjonar, temperatur osv).

Dei vanlege aspekta ved alle EMC litium-ion batterimodellar kan bli oppsummert i følgjande punkt:

- Bruk av elektriske komponentar for å representere elektriske/kjemiske oppførsel til batteri.
- Bruk av karakteriseringsmetodar for å identifisere (innledande) verdiar og tilstandar i batteri.
- Den opne kretsspenninga (OCV) og batterispenninga er hovudverdiane som blir brukt til å simulere ladestatus (SoC).

Formålet til denne kretsmodellen er å forutsjå batteriets yting ved SoC- estimering for batterisystem, samt nytte ekvivalentkretsen av ei celle som ein komponent i modellering av komplett batteripakke.

Det finst fem hovudelektriske ECM- modellar som [29, s. 584–586] enkel modell- R_0 modell, RC- modell, Thevenin modell, Dobbelt polarisering modell (DP), PNGV modell. Sjå vedlegg 6.1

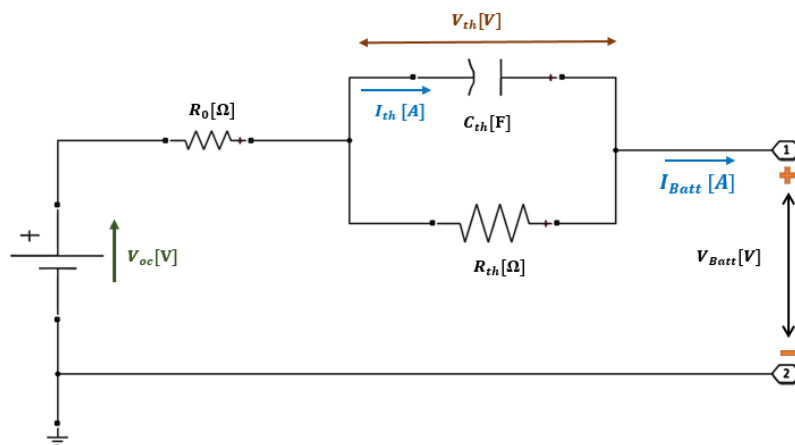
Ved å analysere og samanlikne desse modellane basert på [29, s. 592, table 6], kjem Thevenin modell ut med å ha best dynamisk yting og den lågaste feil-raten, mindre enn 1 %. Både DP- modellen og PNGV modellen er meir relatert for batteritest Hybrid & Plugg-in- elektriske bilar. Sjå Tabell 9 [29, s. 592, table 6]

Første ordens modell

Figur 17 består den hovudsakleg av tre delar: den indre motstanden R_o , ein RC- krets representert ved C_{th} og R_{th} og ein spenningskjelde V_{oc} som tilsvarar open kretsspenning OCV når den ikkje er belasta.

Dei indre motstandane inkluderer den ohmske motstanden R_o (som gir det øyeblikkelege spenningsfallet- øyeblikkeleg systemrespons) og polarisasjonsresistansen R_{th} . Tilsvarande ekvivalent kapasitans C_{th} blir brukt til å skape den dynamiske oppførselen og forbigåande respons under lading og utlading. RC- kretsen i modellen har ei spenning V_{th} og I_{th} ein straum I_{th} i forbindelse med C_{th} . Dei beskriv effekten av dei kjemiske rekasjonane i elektrodeoverflata og ionmasse-overføringa [23].

Den elektriske oppførselen av modellen er beskrive formel (2.11) [23, s. 7, fig 3]



Figur 17 Skjematisk framstilling av første ordens batterimodel- Thevenin modell [23, s. 7, fig 3]

$$\left\{ \begin{array}{l} V'_{th} = -\frac{V_{th}}{R_{th}C_{th}} + \frac{i_{Batt}}{C_{th}} \\ V_{Batt} = V_{oc} - V_{th} - i_{Batt}R_o \end{array} \right. \quad (2.11)$$

Kor: R_o - Den indre motstanden [Ω]
 R_{th} - Polarisasjonsmotstanden [Ω]

C_{th}	- Polarisasjonskondensatoren [F]
I_{th}	- Kapasitansstrom C_{th} [A]
I_{Batt}	- Batteristrom [A]
V_{th}	- Spenning over kondensatoren C_{th} [V]
V_{Batt}	- Spenning over klemmer til batteriet [V]

Temperatur, strøamplitude og strøamform blir ikkje teke omsyn til i denne modellen.

Parasitiske tap (sjølvutlading) kan vere representert med kondensator til jord, men dette blir ignorert sidan tapet Li-ion batteriet er svært lite. Det er mogleg å legge til flerie RC- element for å auke modellenes nøyaktigheit. Simuleringstid er eit hovudelement i Thevenin-modellen.

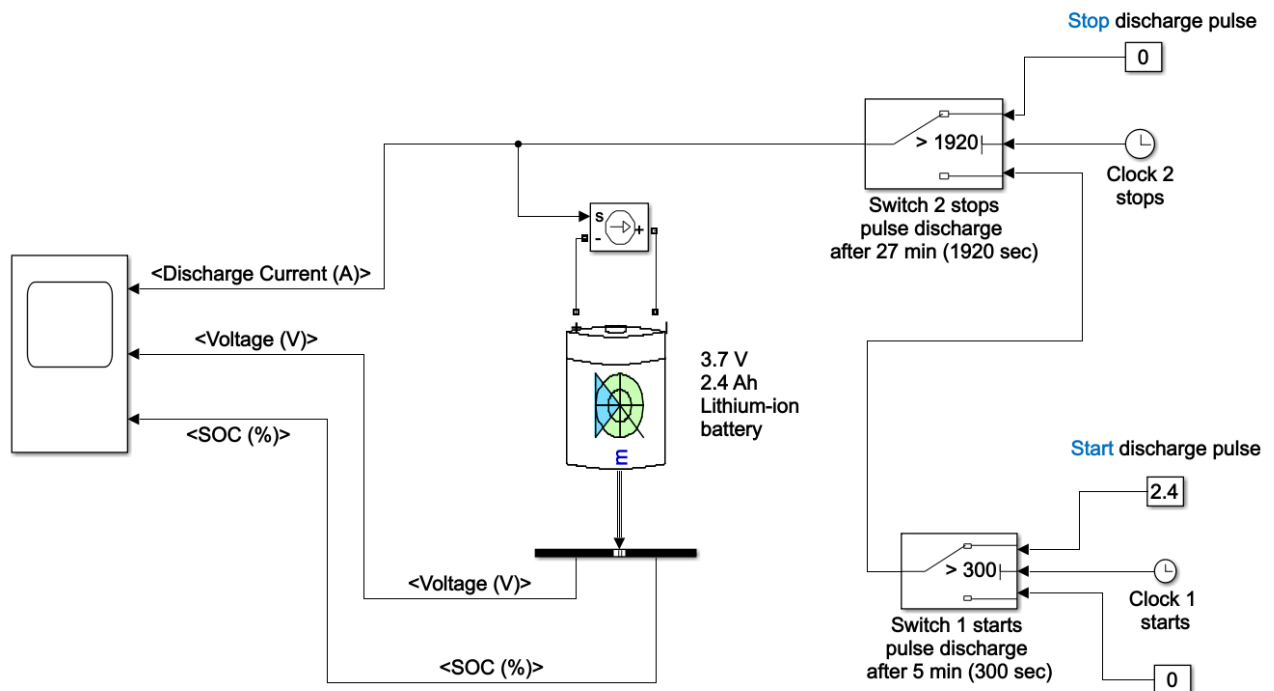
2.5 Battericelle testmodell

For å implementere batteriblokka i modellen, blir det utført tre forsøkestestar med ulike SoC-nivå for pulsutladingstest.

Først blir den dynamiske responsen testa med Figur 18, der ein nyttar seg av Thevenin ekvivalent kretsmodell. Det er av interesse å sjå korleis den dynamiske responsen varierer ved hjelp av ein pulsutladingstest, i første omgang for ei battericelle. Deretter blir det modellert ein heil batteripakke ved å kombinere modular i ulike kombinasjonar av serie og/eller parallelle. Her er henta batterispesifikasjonar frå LG Chem datablad [30] for ei battericelle der den maksimale kapasiteten Q_{max} er 2.4 Ah og nominell batterispenning V_{nom} er 3.7 V. Deretter blir det nytta første ordens system grafen slik at ein kan plote og deretter utrekna dei dynamiske karakteristikkar til batteri, samt tidskonstant. Til slutt blir resultatet samanlikna med verdiane som er presentert av batteriblokka frå Matlab- Simscape.

Pulsutladingstest metode

Ved å utføre ein pulsutladingstest, er det mogleg å trekke ut dei dynamiske karakteristikane til ei gitt battericelle. For å gjennomføre denne pulsutladingstesten, blir det testa ei enkel litium- ion battericelle som batteriblokk henta frå Simscape Library i Matlab.



Figur 18 Pulsutladingstest metode med battericelle på ein 3.7 V og 2.4 Ah [31, Fig. 5.3]

Figur 18 viser ein. Batteriblokka er kopla til ei kontrollert straumkjelde som er tilkopla batteriterminal slik at det blir danna ein utladningsstrøm. Deretter er denne straumskjelda kopla til to switcher som viser i sekundarskalaen når pulsutladninga startar og sluttar. Tida er eit viktig parameter i denne testen då den bestemmer når pulsen startar utlading etter ein rest-prosess, samt ladetida til steady state respons, sjå Figur 21 . Denne testen finn den raskaste tidsresponsen for dei ulike SoC- nivåa. Sjølv om det er funne eit $SoC_{optimal}$ - nivå i forhold til levetida og DoD, samt effektivitet, er det ønskeleg å undersøke om det fins raskare tidsrespons når ein gjer forsøk med ein låg DoD på 25 % og ein større DoD på 55%.

Dynamisk karakteristikkar

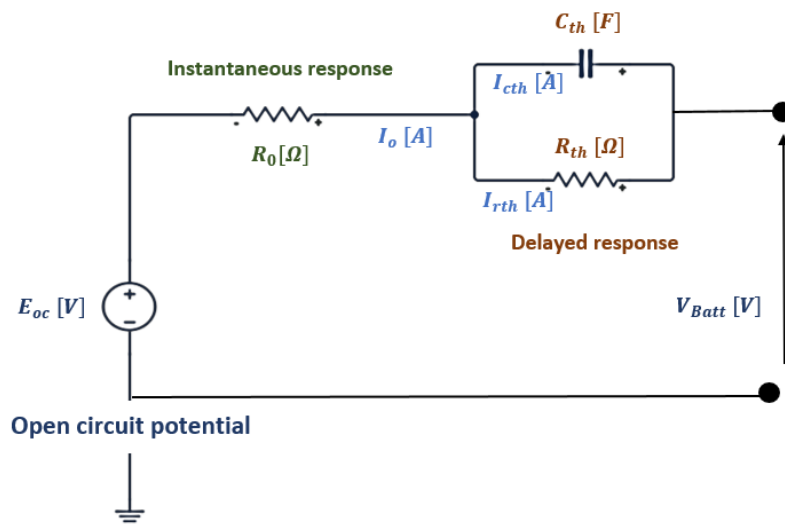
Den elektriske modellen simulerer batteriet sin respons ved hjelp av ein elektrisk ekvivalent krets. E_{oc} er den opne kretsspenninga eller batterispenninga når ingenting er kopla til. R_0 er den indre motstanden og parallell $R_{th}C_{th}$ tilsvarar tidskonstanten τ , sjå figur Figur 19.

Ved å evaluere spenningsresponsen er det mogleg å bestemme [32, Kap. 2]

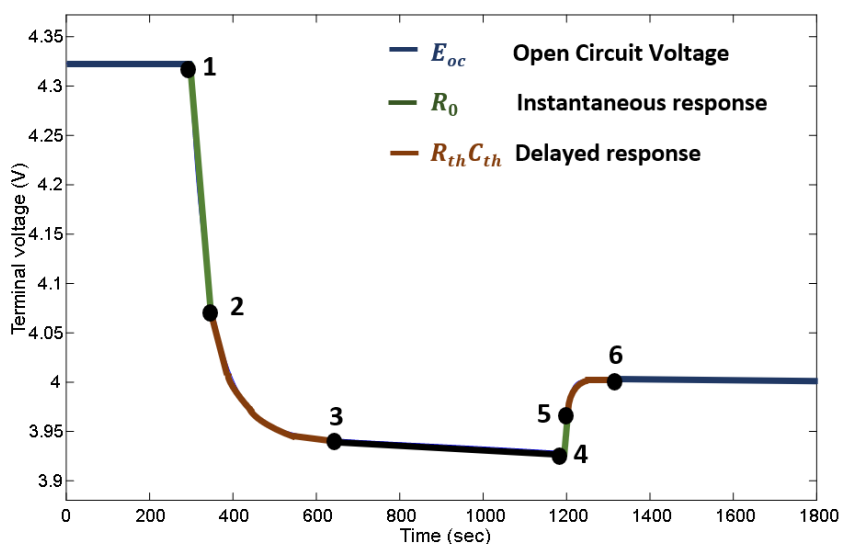
- R_0 , som gir den augeblikkelege spenningsresponsen. R_0 gjenspeglar ein umiddelbar nedgang eller auke i batterispenninga. Dette skuldast tilkopling og fråkopling av lasten.
- $R_{th}C_{th}$, forseinka respons for batteriet, gir den dynamiske spenningsresponsen. Desse elementa vil gi ei jamn tilnærming til spenningsverdien i steady- state.

Merk at den parasitiske greina som inneheld Z_p og E_p ⁴ ofte blir utelaten i modellering av litiumceller på grunn av den høge coulumb effekten og låg sjøvutladning under typisk driftsforhold [33].

⁴ Z_p står for impedans av parasitisk del [Ω] og E_p for elektromotorisk kraft av parasitisk del.



Figur 19 Tilsvarende Thevenin kretsmodell av litium- ion batteri [31, Kap. 2]

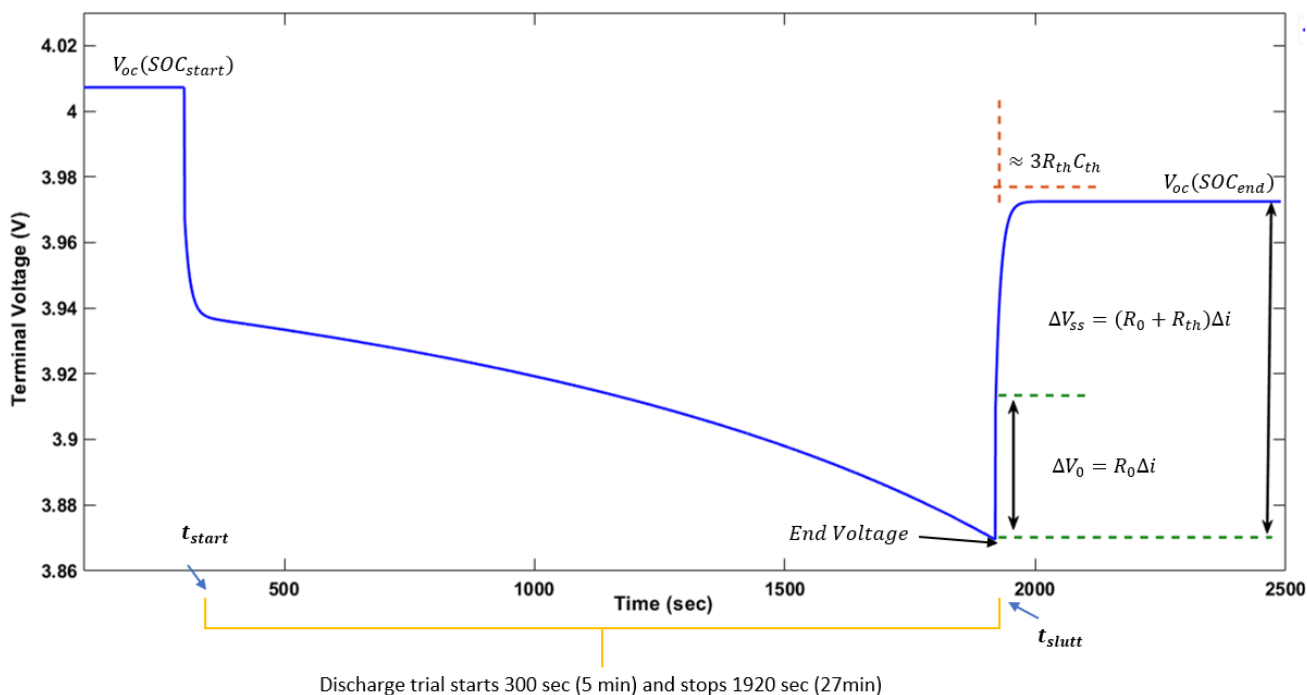


Figur 20 representerer ein pulsutlading med dei dynamiske karakteristikkane til batteriet [31, Fig. 2.5]

Først produserer den interne elektriske motstanden i batteriet ein øyeblikkeleg respons (segment $\overline{12}$) som vist i figuren over. Den kjemiske reaksjonen begynner etter kort tid og endrar batteriet sin interne elektriske motstand (segment $\overline{23}$). Etter ei stund når reaksjonshastigheita ein konstant verdi, og motstandsendringsforholdet er stabilisert (segment $\overline{34}$). På slutten av utladingspulsen blir den interne motstanden redusert (segment

45), og den kjemiske reaksjonen stoppar gradvis. Til slutt når batteriet ein steady state tilstand, og reaksjonen stoppar heilt opp (segment 56).

Eksempel på pulsutlading Figur 21 representerer batterireaksjon på ein pulsutladingsstrøm med sine parametrar. Pulsen treng tid før den startar å lade seg ut. Deretter blir det vist ein spenningsvariasjon som blir avslutta ved første responstid, 1 tau (vist med grønne stripla linjer). Formelen for dette tidspunktet startar med $\Delta V_0 = R_0 \Delta I$, der ein kan rekne ut den indre mostanden. Deretter er det av interesse å finne når systemet har nådd ei responstid ved 3τ . Dette gir ei responstid innanfor 95 %, der stasjonær- avviksintervallet blir $\pm 5\%$. Det blir også nytta formel for variasjon av sluttverdien i steady- state $\Delta V_{ss} = (R_0 + R_{th}) \Delta i$ for å finne R_{th} . Ved å bruke tidskonstant formel $\Delta T_{R_{3\tau}} = 3R_{th}C_{th}$ blir det funne C_{th} og til slutt blir det rekna ut tidskonstant ved 1τ .

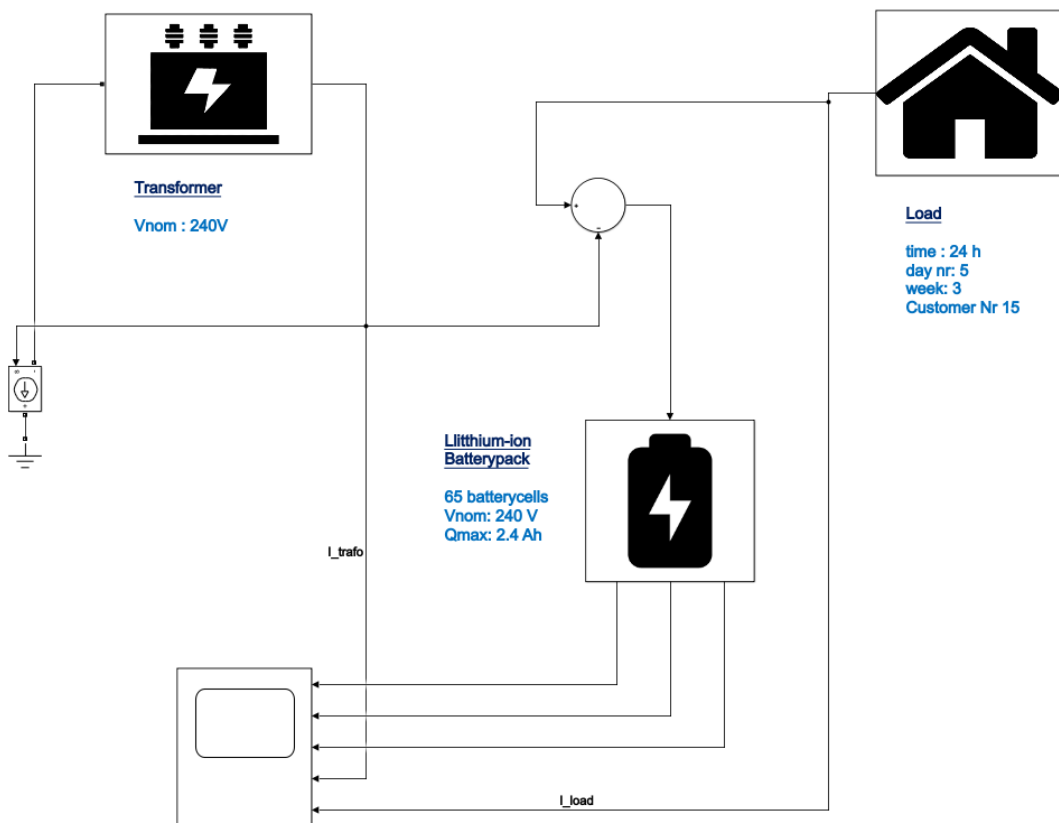


Figur 21 Eksempel på pulsutladingstest med dynamiske karakteristikkar til batteriet. [31, Fig. 2.5].

2.6 Peak Shaving modell

For å designe ein Peak Shaving modell, blir det nytta Matlab, Simulink og Simscape slik at historiske data for den valgte kunden blir simulert i lag med trafo og batteripakke.

Modellen under simulerer batteripakken, transformatoren og lastprofil for kunde N°15, der førmålet med batteripakken er å kompensere for variasjonar i lasten slik at belastninga sett frå transformatoren blir konstant. Batteripakken vil derfor gi støtte når lasta er høg (Peak Shaving), og trekkjer ladestraum frå transformatoren på tidspunkt med låg belastning.



Figur 22 Peak Shaving modellering med transformatorblokk, batteripakke og kundebløkk

Kundeblakk

Forbruksdata blir importert i modellen og består av energiforbruket med timeoppløysning for kunde N°15 i Smart Valley. Energiforbrukskurven ved lasta E_{load} i kWh blir konvertert til ein forbrukskurve P_{load} i kW. Vidare blir effektforbruket konvertert til straum ved bruk av nominell batterispenning V_{batt} som referanseverdi. Den nominelle batterispenning V_{batt} er då fast og fører til at I_{load} varierer proporsjonalt med P_{load} .

<i>Load Power</i>	$E = Pt \rightarrow P = \frac{E \text{ (kWh)}}{t \text{ (h)}} = \text{(kW)} \quad (2.12)$
-------------------	---

	$P_{load} _{t=1h} = \frac{E \text{ (kWh)}}{1h} = \text{(kW)} \quad (2.13)$
--	--

	$P_{load} _{t=1h} \propto E \text{ (kWh)} \quad (2.14)$
--	---

<i>Load Current</i>	$I_{load} = \frac{P_{load}}{V_{batt}} \quad (2.15)$
---------------------	---

	$I _{V_{batt}=V_{nom}} \propto P_{load} \quad (2.16)$
--	---

Transformatorblokk

Transformatorblokka består av ei DC- spenning i serie med motstand. Straumen gjennom transformator I_{trafo} er summen av laststraum I_{load} og batteriladings- og utladingsstraum I_{batt} . Batteristraumen reduserer og aukar belastningsstraumen slik at I_{trafo} blir konstant.

I transformatorblokka er det bygd ein logikk som kontrollerer amplituden og retning til batteristraum, I_{avg} . Det er ønskjeleg å ha ein modell som tilpassar seg variasjonen i lastprofil over eit døgn, og derfor blir I_{avg} brukt for ein 24 timars periode i simulering som ei optimal løysing. I_{avg} er som ei grense for når batteriet ladar eller ladar ut. Når I_{load} er over I_{avg} , vil batteriet levere straum og fungere som ein støttespelar til transformatoren. Når I_{load} er under I_{avg} , vil batteriet lade. I tillegg til I_{avg} , er også SoC-nivå grenser teke i betraktning i batteriblokka.

<i>Transformer current</i>	$I_{trafo} = I_{load} + I_{batt}$	(2.17)
----------------------------	-----------------------------------	--------

<i>Battery current discharge ($I_{load} > I_{avg}$)</i>	$I_{trafo} = I_{load} + (-I_{batt})$	(2.18)
---	--------------------------------------	--------

<i>Battery current charge ($I_{load} < I_{avg}$)</i>	$I_{trafo} = I_{load} + I_{batt}$	(2.19)
--	-----------------------------------	--------

Batteriblokk

Batterietstraumen I_{batt} består av I_{charge} og ein $I_{discharge}$. I_{charge} er ladestraum som trekkjer straumen til transformator, medan $I_{discharge}$ avlastar.

I_{charge} og $I_{discharge}$ kan ikkje førekome samtidig. Straumretninga bestemmer enten lading eller utladingsstraum i perioden den er aktiv.

<i>Battery current</i>	$I_{batt} = I_{charge} + I_{discharge}$	(2.20)
------------------------	---	--------

<i>Battery current discharge ($I_{load} > I_{avg}$)</i>	$I_{discharge} = I_{load} - I_{avg}$	(2.21)
---	--------------------------------------	--------

<i>Battery current charge ($I_{load} < I_{avg}$)</i>	$I_{charge} = I_{avg} - I_{load}$	(2.22)
--	-----------------------------------	--------

3 RESULTAT

3.1 DoD test

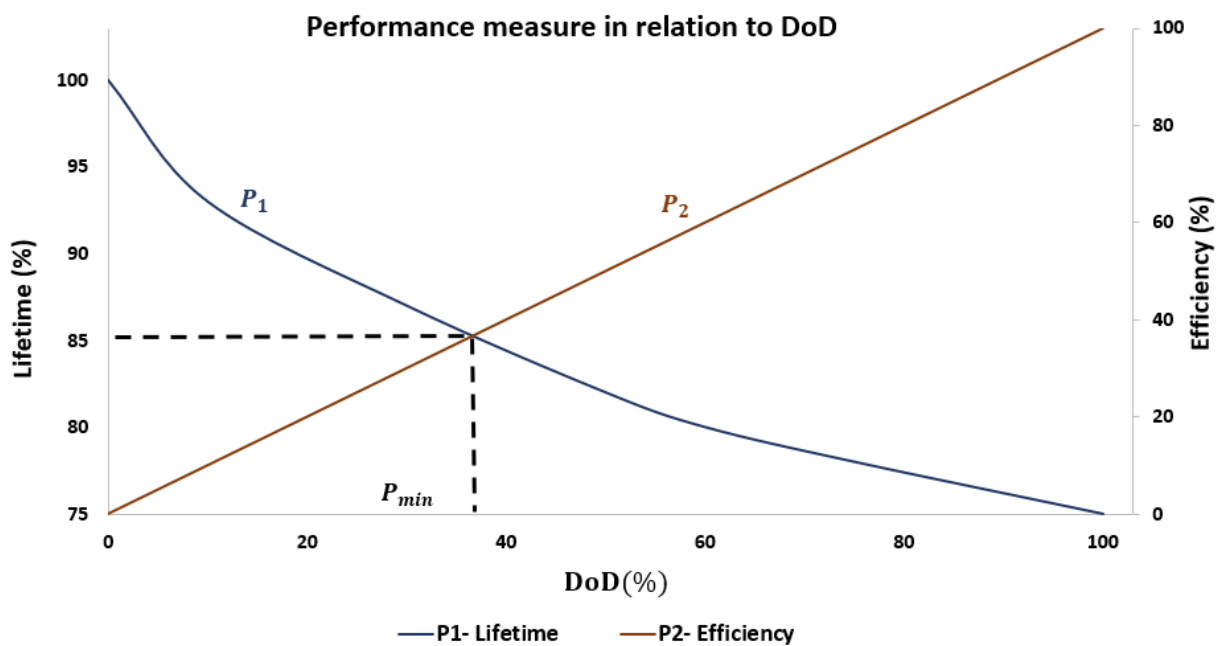
For å minimere kostnadane som involverer energilagring, er det viktig å optimalisere batterikapasiteten. I virkeligheita kan ein behalde størst mogleg energikapasitet ved å redusere DoD i kvar syklus og dermed auke levetida til batteriet. Ved å bruke ytingsmetoden med Figur 13 , er det med følgjande forutsetningar funne DoD_{min} .

- Ved å ta utgangspunkt i Figur 13 og i registrert syklusverdi på 4500 ved SoC 100-25@20 °C, blir det lese av samanlikningsverdiar for ulike DoD i forhold til redusert kapasitet ved 1C og tal syklusar.
- Den reduserte kapasiteten ved 1C blir rekna i høve til levetid. Dette innfører $P_{1_{avlest}}$ lifetime (%).
- Tar utgangspunkt i ideelt batteri og ser bort frå termiske tap. Effektivitet blir då lineær tilnærming til DoD, der P_2 efficiency i % blir innført.

Tabell 4: Avleste verdiar for DoD-nivå test

<i>SoC</i> (%)	<i>DoD</i> (%)	<i>P_{1_{avlest}}</i> lifetime (%)	<i>P₂ Efficiency</i> (%)
100-100	0	100	0
75-65	10	93	10
75-45	30	87	30
100-50	50	82	50
85-25	60	80	60
100-25	75	78	75
100-0	100	75	100

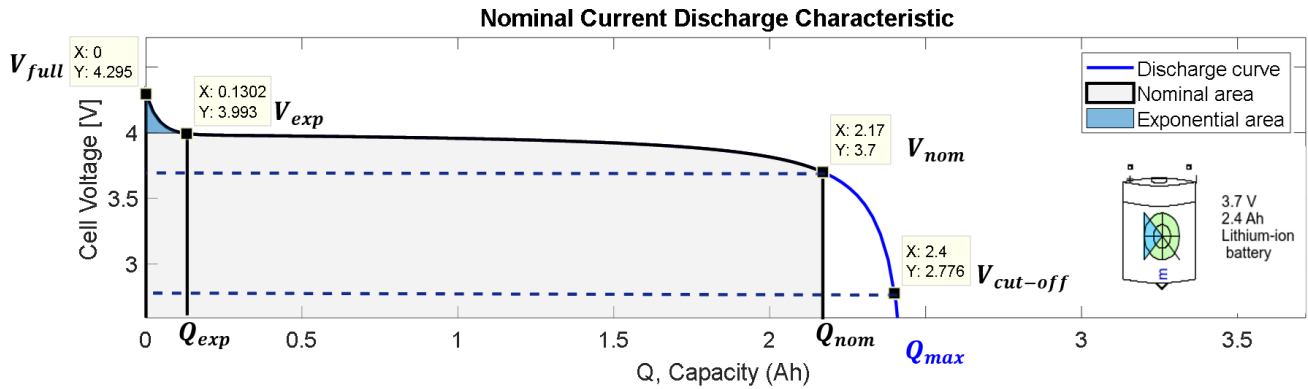
Resultatet Figur 23 viser DoD_{min} ved skjæringspunktet på litt under 40%. Dette fortel at Litium- ion batteriet har ei akseptabel levetid i forhold til DoD_{min} . For vidare testing er sett ein DoD på 45%, sidan det i DoD-nivå test er nytta tilnærma verdier utan tapsfaktor. I tillegg støttar tidlegare forskning, der også kostnadsnivået er inkludert, at optimal DoD vil ligge mellom 40 og 50% [34, s. 5.4]



Figur 23 Resultat av DoD-nivå test ved å bruke ytingsmetode

3.2 Battericelle test

Resultat for ei battericelle med følgjande parametarar vist i Figur 24



Figur 24 Nominell utladingskurve for eit Litium- ion batteri ned 3.7 V og 2.4 Ah

Når det gjeld i_{1rate} med ein 43 % nominal utladingsstrøm på 1.043 [A] for resultatet under ved å bruke formel (2.10)

$$A = V_{full} - V_{exp} = 4.295 - 3.993 = 0.302 \text{ [V]}$$

$$B = \frac{3}{Q_{exp}} = \frac{3}{0.1302 * 1h} = 23.041 \text{ [Ah}^{-1}\text{]}$$

$$K = \frac{((V_{full} - V_{nom}) + A(e^{-B*Q_{nom}} - 1)) * (Q_{max} - Q_{nom})}{Q_{nom}}$$

$$K = \frac{(4.295 - 3.7) + 0.302(e^{-23.041*2.17} - 1)) * (2.4 - 2.17)}{2.17} = 0.031$$

$$R_0 = \frac{V_{nom}}{Q_{max}} = \frac{3.7}{2.4} = 0.015416 \text{ [\Omega]}$$

$$E_0 = V_{full} + K + R_0 i_{1C-rate} - A$$

$$E_0 = 4.295 + 0.031 + 0.015 * 1.043 - 0.302 = 4.039 \text{ [V]}$$

Pulsutladingstest

Basert på pulsutladingstesten til ei Litium- ion battericelle med $Q_{max} = 2.4$ Ah og $V_{nom} = 3.7$ ved 1C- utladningsstrom 2.4 A, blir verdiane i Tabell 5, Tabell 6, Tabell 7 undersøkte med omsyn til DoD og tid i sekund. Batteriet treng tid før det begynner å lade seg ut og så lade, så ein tek utgangspunkt i tidsstart (t_{start}) etter 5 minutt (300 sek). For å finne ut når det ladar seg ut t_{slutt} , blir det teke omsyn til det bestemte DoD. Testane er gjort for ein minimum og maksimum DoD %, dvs 25 % og 55 %, samt for DoD på 45% . Dette for å sjå korleis responstida varierer i forhold til dei ulike DoD %.

For Tabell 7, ved 28 minutt startar batteriet å lade seg ut i intervallet mellom $t_{start} = 5$ minutt (300 sek) og ved $t_{slutt} = 33$ minutt (2280 sek) viser ein DoD på 55 %. For Tabell 5 ved 22 minutt, i intervallet mellom $t_{start} = 5$ minutt (300 sek) og $t_{slutt} = 27$ minutt (1920 sek), viser ein DoD på 45 % . For Tabell 6 ved 10 minutt, i intervallet mellom $t_{start} = 5$ minutt (300 sek) og $t_{slutt} = 15$ minutt (1200 sek), viser ein DoD på 25 % .

Deretter blir dei første tre kolonnene frå Tabell 5, Tabell 6 og Tabell 7 gjennomført slik at ein finn kva for DoD som vil gi det raskaste systemet ved 95% responstid, dvs, med ± 5 % stasjonært avvik ved 3 tidskonstantar.

Etterpå blir det observert at Tabell 5 med 45% DoD gir den raskaste responstida i forhold til dei andre to DoD testane. Grunna dette resultatet blir det sett bort frå å rekne ut batteriparametrane for Tabell 6 og Tabell 7 . Vidare er det utrekna batteriparameter for det systemet som gir oss den beste og raskaste responstida ved 3τ .

Følgjande resultat, vist i Tabell 5, viser korleis modellparameter oppfører seg i praksis. Observasjonar viser ein V_{oc} som varierer svært lite, og den indre motstanden R_0 blir konstant. Men parametrane som identifiserer polarisasjonsegenskapane R_{th} og C_{th} er heilt ulike på grunn av ulikt SoC- nivå. Thevenin parameter, parallelle $R_{th}C_{th}$ i kretsen i serie med R_0 , viser dei dynamiske karakteristikkane til batteriet. $R_{th}C_{th}$ er avhengig av ein tidskonstant ved 1τ for ei responstid på 10.32 sek , og ved 3τ får 31 sek for DoD 45%. Dette gjev eit raskare system og SoC 85-40% blir rekna som $SoC_{optimal}$ -nivå. Resultat for test er presantert i tabell under. Sjå vedlegg 6.5 for meir detaljerte simuleringar for alle testane. Vidare blir det utleia korleis batteridynamikken for $SoC_{optimal}$ -nivå er utarbeidd.

Tabell 5 Resultat for 45 % DoD ved å bruke pulsutladingstest metode

<i>Time</i> [sec] (5 min-27 min)	<i>SoC</i> [%]	<i>DoD</i> [%]	$V_{3\tau_{th}}$ [V]	$\Delta T_{R_{3\tau_{th}}}$ [sec]	V_{oc} [V]	R_0 [Ω]	R_{th} [mΩ]	C_{th} [kF]	$1\tau_{th}$ [sec]
300-1920	100-55	45	3.988	33	4.323	0.037	10	1.100	11.00
300-1920	95-50	45	3.983	33	4.025	0.037	14	0.780	10.92
300-1920	90-45	45	3.977	33	4.010	0.037	20	0.550	11.00
300-1920	85-40	45	3.969	31	4.007	0.037	26	0.397	10.32
300-1920	80-35	45	3.960	34	4.005	0.037	34	0.330	11.22
300-1920	75-30	45	3.948	33	4.003	0.037	45	0.240	10.80

Tabell 6 Resultat for 25% DoD ved å bruke pulsutladingstest metode

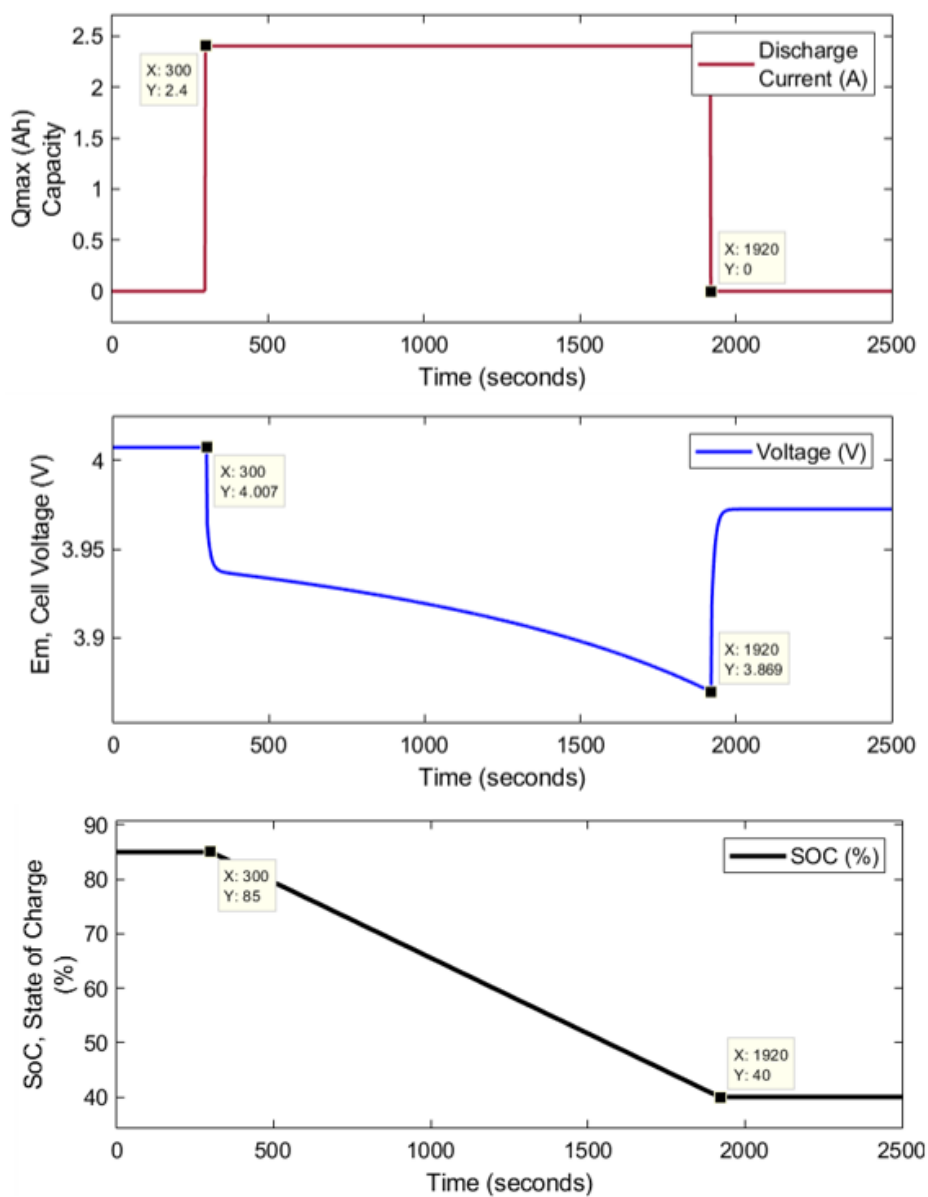
<i>Time</i> [sec] (5 min- 15 min)	<i>SoC</i> [%]	<i>DoD</i> [%]	$V_{3\tau_{th}}$ [V]	$\Delta T_{R_{3\tau_{th}}}$ [sec]
300-1200	100-75	25	4.002	35
300-1200	95-70	25	3.998	33
300-1200	90-65	25	3.995	33
300-1200	85-60	25	3.992	32
300-1200	80-55	25	3.988	32

Tabell 7 Resultat for 55% DoD ved å bruke pulsutladingstest metode

<i>Time</i> [sec] (5min- 33 min)	<i>SoC</i> [%]	<i>DoD</i> [%]	$V_{3\tau_{th}}$ [V]	$\Delta T_{R_{3\tau_{th}}}$ [sec]
300-2280	100-45	55	3.977	33
300-2280	95-40	55	3.969	33
300-2280	90-35	55	3.960	33
300-2280	85-30	55	3.948	32
300-2280	80-25	55	3.931	32

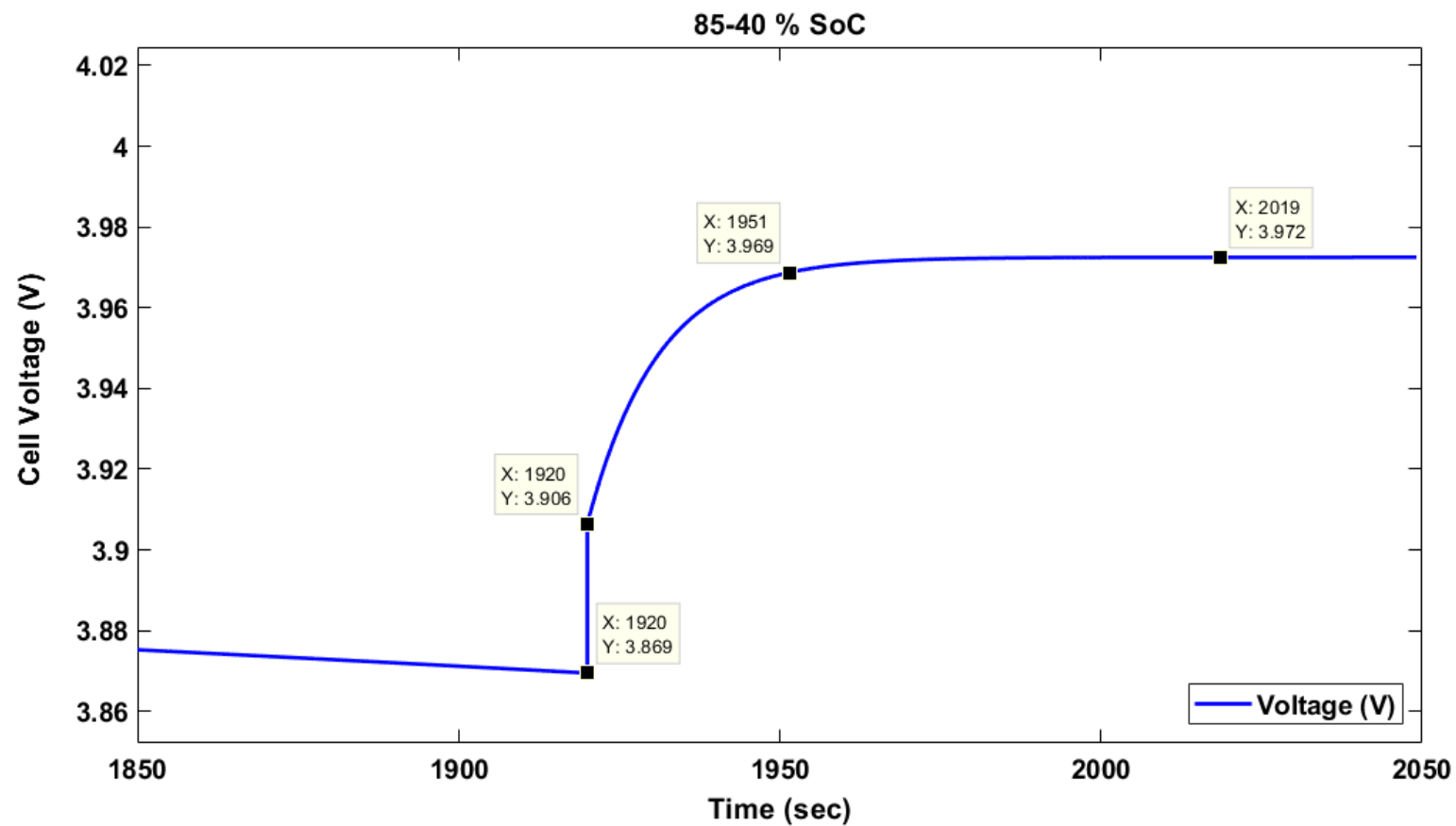
Batteridynamikk for 85-40 % $SoC_{optimal}$ -nivå

Etter pulsutladingstest viser Figur 25 batterietsdynamikk for 85 -40% $SoC_{optimal}$ - nivå med 45 % DoD. Responstid for heile testperioden er egentleg 3600 sek, men for ei meir tydeleg visualisering blir oppløsninga sett til 2500 sek. Ved $t_{start} = 300$ sek (5 minutt) blir utladingsstrøm på 2.4 Ah aktivert, varer i 22 minutter og så sluttar ved $t_{slutt} = 1920$ sek (27 min). Etter endt tid oppstår steady state. Figur 25 Batteridynamikk for 85-40%Figur 25 viser dynamikken av 85- 40 % SoC ved å bruke pulsutladingstest metode.



Figur 25 Batteridynamikk for 85-40% SoC optimal nivå.

Figur 26 viser eit første ordens system med ein spenningsrespons frå $t_{slutt} = 1920$ sek (27 min). For å rekne ut batteriparametrane, er det gjort følgjande utrekningar ved hjelp av formelar frå Figur 21.



Figur 26 Pulsutladingsmetode viser eit første ordens system ved 85-40 % $SoC_{optimal}$ - nivå

Utrekninga viser følgjande batteriparameter til ei celle:

Den indre motstanden R_0 er

$$R_0 = \frac{\Delta V_0}{\Delta I_{Discharge}} = \frac{3.906 - 3.869}{1 - 0} = 0.037 \Omega \text{ så polarisasjonsmotstanden } R_{th} \text{ blir}$$

$$\Delta V_{ss} = (R_0 + R_{th})\Delta I$$

$$\frac{\Delta V_{ss}}{\Delta I} = (R_0 + R_{th}) \Rightarrow R_{th} = \frac{\Delta V_{\infty}}{\Delta I} - R_0$$

$$R_{th} = \frac{3.969 - 3.906}{1 - 0} - 0.037 = 26 \text{ m}\Omega$$

Ved 95 % responstid blir stasjonært avvik intervall $\pm 5\%$ får

$3.906 + 0.95 * (3.972 - 3.906) \approx 3.969$ og ved tidskonstant 3τ

$$\Delta T_{R_{3\tau}} = 1951 - 1920 = 31 \text{ sek}$$

Deretter blir polarisasjonskondensatoren C_{th} utrekna

$$\Delta T_{R_{3\tau}} = 3R_{th}C_{th} \Rightarrow C_{th} = \frac{\Delta T_{R_{3\tau}}}{3R_{th}}$$

$$C_{th} = \frac{1951 - 1920}{3 * 26 * 10^{-3}} = 0.397 \text{ kF} \text{ Til slutt blir tidskonstanten funne ved } 1\tau :$$

$$\tau = R_{th}C_{th} \Rightarrow \tau = 26 * 10^{-3} * 0.397 * 10^3 = 10.322 \text{ sek}$$

På same måte er det mogleg å rekne ut batteriparameter for dei to andre SoC- testane. Sjå vedlegg 6.5 for kvar SoC- nivå testar for Tabell 5, Tabell 6 og Tabell 7.

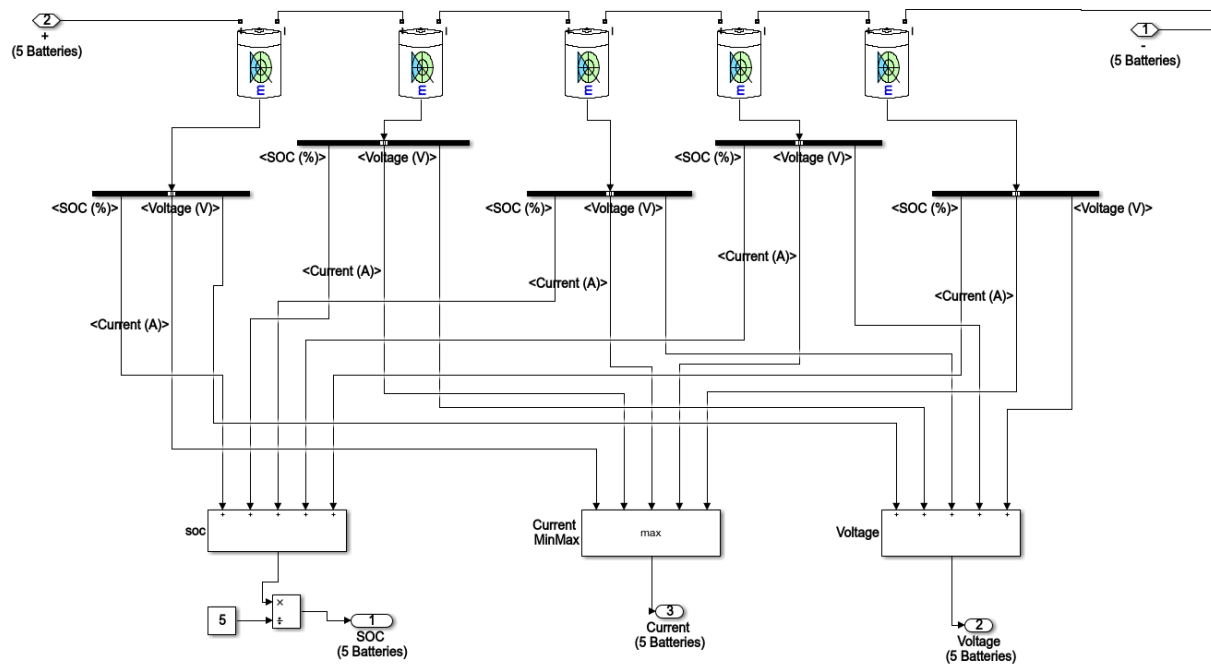
Oppbygging av batteripakke

Følgjande utrekningar er utført for å danne eit bilde av ein fysisk batteripakke, slik matlab batteriblokk er bygd opp. Trafoen leverer 240 V og ei battericelle gir ei nominell spenning på 3.7 V

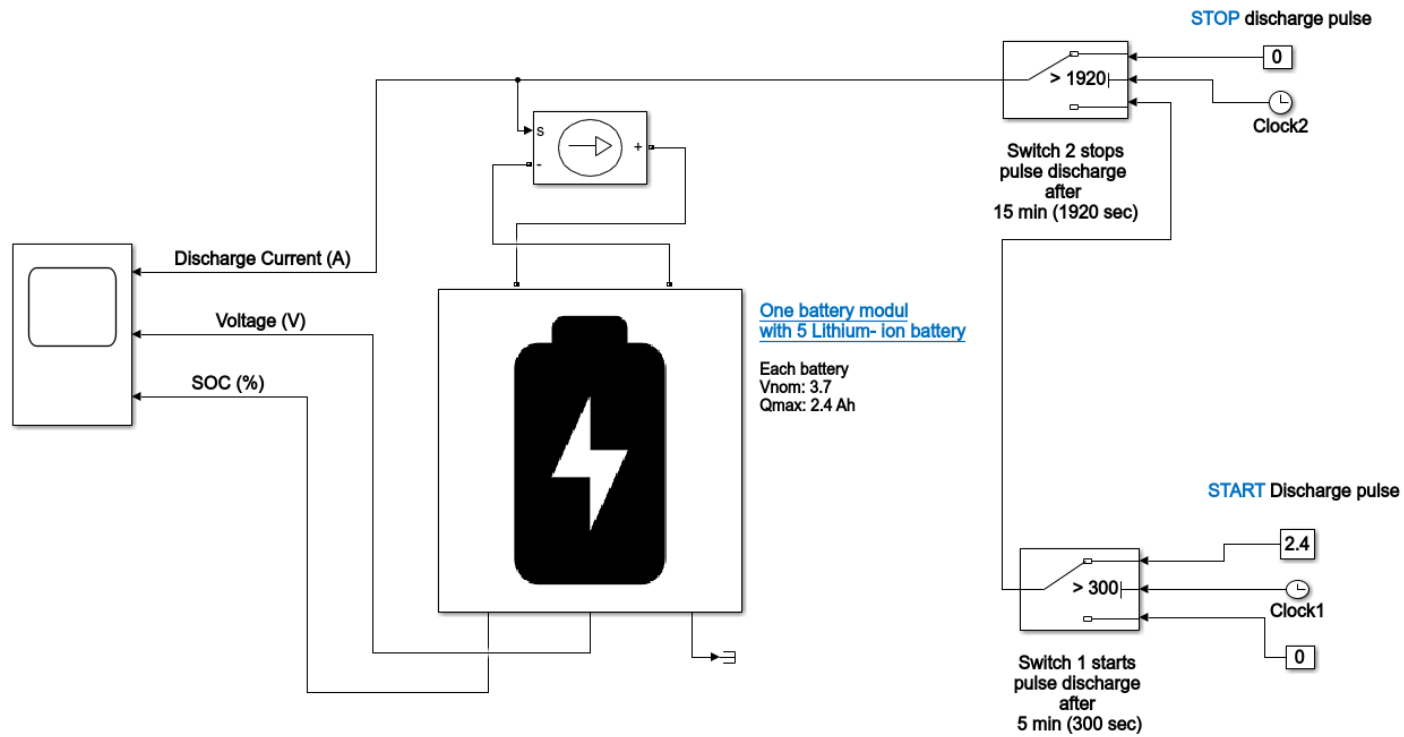
$$\text{Tal batteri i seriekopling} = \frac{V_{trafo}}{V_{nom}} = \frac{240}{3.7} = 65$$

Dette resultatet fortel oss at det er behov for 65 batteri i seriekopling for å tilfredstille Peak Shaving modellering. Batteriet vil oppnå ei ønska driftsspenning ved å kople 65 batteri i serie. Ein vil legge til grunn 13 modular, og kvar modul blir koplta i cellekombinasjonar av 5 batteri, vist i Figur 27.

Ved bruk av batteriblokk verdier i Tabell 11, blir det utført utladingstest for ein cellekombinasjon med 5 seriekoplta batteri for kvar modul. Det vil gi ei nominell batterispenning V_{nom} på 18.5 V og ein nominell kapasitet på Q_{max} på 2.4 Ah per modul. Med denne testen blir det undersøkt korleis batteriparametrane oppfører seg i forhold til $SoC_{optimal}$ -nivå og tidsrespons. For gjennomføring av pulsutladingstesten metode, 85-40% $SoC_{optimal}$ -nivå, er det nytta Figur 29 og formlar frå Figur 21.

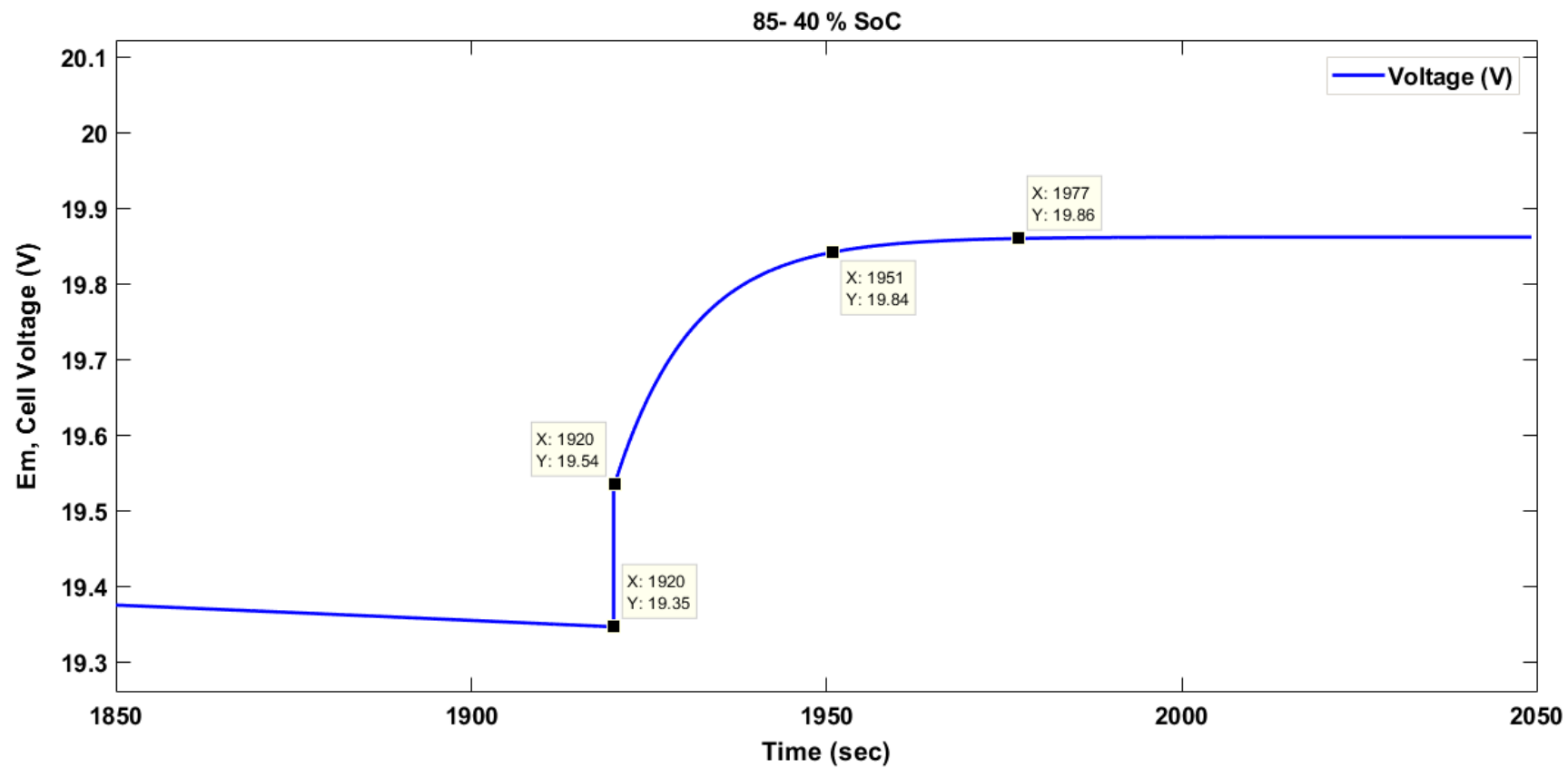


Figur 27 Kvar modul består av 5 batteri i seriekopling



Figur 28 Simulering for 1 modul med 5 batteri i seriekopling

Figur 29 viser eit første ordens system med ein spenningsrespons frå $t_{slutt} = 1920$ sek (27 min). For å rekne ut batteriparameter, er det gjort følgjande utrekningar ved hjelp av formelar frå Figur 21.



Figur 29 Første ordens system med 5 batteri

Utrekninga viser følgjande resultat for parameter til 5 batteri.

Den indre motstanden R_0 er

$$R_0 = \frac{\Delta V_0}{\Delta I_{Discharge}} = \frac{19.54 - 19.35}{1 - 0} = 0.19 \Omega$$

så polarisasjonsmotstanden R_{th} blir

$$\Delta V_{SS} = (R_0 + R_{th})\Delta I$$

$$\frac{\Delta V_{SS}}{\Delta I} = (R_0 + R_{th}) \Rightarrow R_{th} = \frac{\Delta V_{SS}}{\Delta I} - R_0$$

$$R_{th} = \frac{19.84 - 19.54}{1 - 0} - 0.19 = 114 \text{ m}\Omega$$

Ved 95 % responstid blir stasjonær avvik intervall $\pm 5 \%$

$19.54 + 0.95 * (19.86 - 19.54) \approx 19.84$, og ved tidskonstant 3τ

$$\Delta T_{R_{3\tau}} = 1951 - 1920 = 31 \text{ sek}$$

Deretter blir polarisasjonskondensatoren C_{th} utrekna

$$\Delta T_{R_{3\tau}} 3R_{th} C_{th} \Rightarrow C_{th} = \frac{\Delta T_{R_{3\tau}}}{3R_{th}}$$

$$C_{th} = \frac{1951 - 1920}{3 * 114 * 10^{-3}} = 0,0906 \text{ kF}$$

Til slutt blir tidskonstanten funnen ved 1τ :

$$\tau = R_{th} C_{th} \Rightarrow \tau = 114 * 10^{-3} * 0,0906 * 10^3 = 10.328 \text{ sek}$$

Resultatet viser lengre responstid ved τ for 5 battericelle i serie enn ved 1 celle, 10.328 sek mot 10.322 sek.

3.3 Peak shaving modell

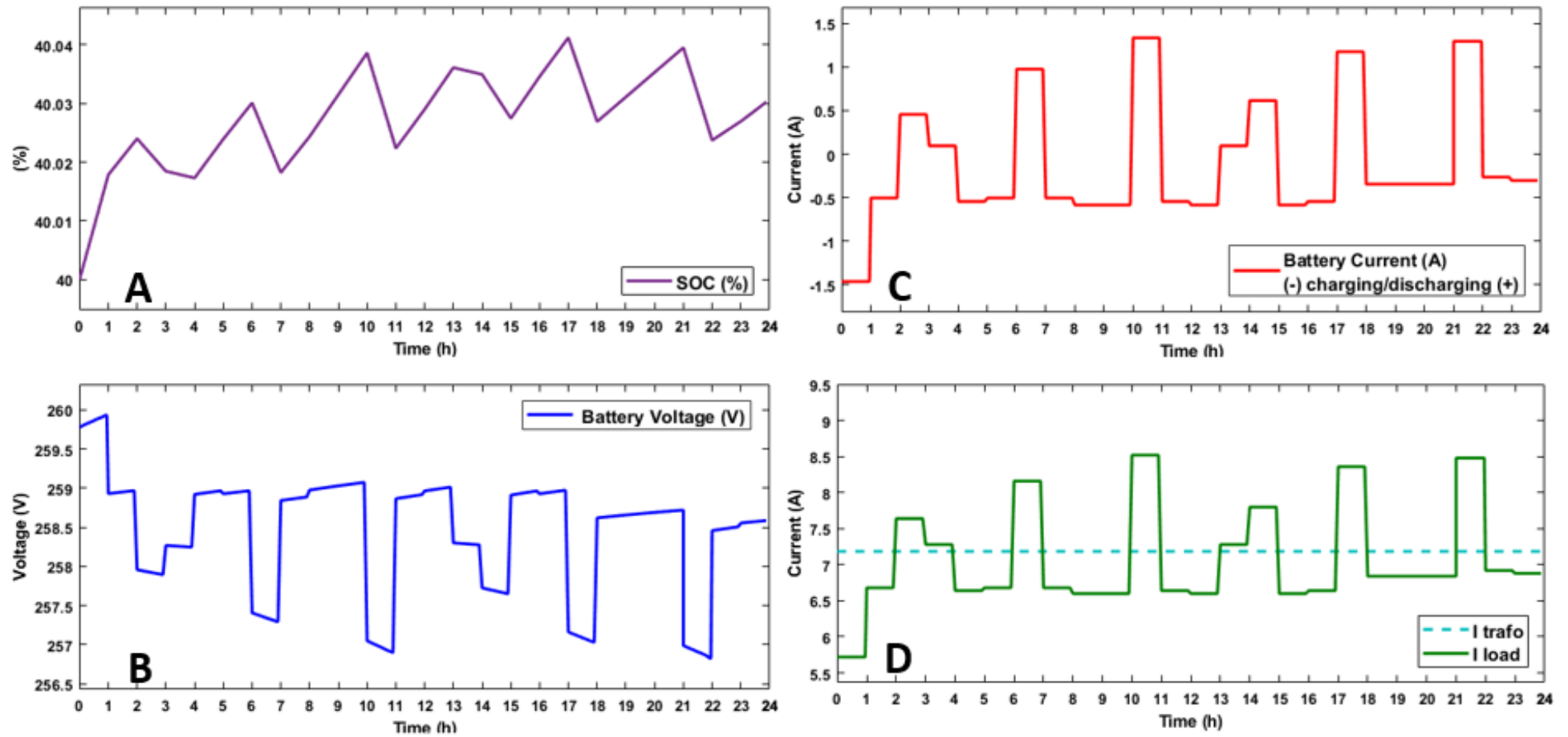
Ved ein batteripakke på 65 batteri i serie vil det bli ei nominell spenning på 240 V totalt. Når batteriet er fullada, er spenninga $4.3 \text{ V} * 65 \approx 280 \text{ V}$ ved 2.4 Ah. Når ein legg til grunn transformator spenning på 240 V, så bør det vere plass for spenningsvariasjon. Teoretisk sett er utgangspunktet i denne studien at spenningsvariasjonar svingar innom øvre spenningsgrense på 250 V.

Følgjande kriterier er teke med for å oppnå Peak Shaving modellering:

- For å dimensjonere batteristørrelse tek ein utgangspunkt Figur 4
Batteriet bør dekke $E_{\max_batt} = (2.13 - 1.795) * 1000 = 335 \text{ Wh}$
- Batteristørrelse vil vere $240 \text{ V} * 2.4 \text{ Ah} = 577.2 \text{ Wh}$ og for ein maksimal lading- og utladingseffekt på 0.60 kW.
- For å dimensjonere I_{\max_batt} tar ein utgangspunkt verdiar frå Figur 4. Det maksimale straumforbruket til kunde er 8.52 A og til trafo er 7.18 A. Dette vil gi $I_{\max_batt} = 1.34 \text{ A}$.

Figur 30 viser fire plot for ladningstilstand SoC (A), batterispenning (B), batteristraum når det ladar og ladar seg ut (C) og når I_{trafo} avgrensar ein auka laststraum I_{load} (D). Med utgangspunkt i det største forbruket, dvs på 8,52 A mellom kl 10- 11 på føremiddag, er det tydeleg at batteriet klarer å levere den straumen som trafo ikkje klarer. Ein ser og på dynamikken mellom SoC, spenning- og straum til batteri. I (A) varierer batterispenninga innafor utrekna verdi ovanfor. I (B) viser dynamikken mellom opplading og utlading av batteriet.

Dette gir eit bilde på korleis ein ser for seg funksjonaliteten til Peak Shaving i verkeligheita, samt korleis dynamikken til batteriet kan støtte transformator ved varierende lastsituasjonar i løpet av eit døgn. Peak Shaving modellering får ei responstid på 31 sek ved 3τ .



Figur 30 Resultat for Peak Shaving modellering

4 DRØFTING

Batteri kretsmodellar

Basert på analyse og samanlikning av dei tradisjonelle Litium- ion batteri, ekvivalente kretsmodellar som R_0 , RC, Thevenin , DP og PNGV- modellane [29, s. 592, table 6], blir både Thevenin- modellen og DP- modellen med maksimal feilrate mindre enn 1% samanlikna med dei andre modellane. I følgje den statistiske analyselista over absoluttverdiane i tabell for terminalspenningsserror, kan ein sjå at det ikkje er så stor forskjell i nøyaktigheit mellom DP- og Thevenin modellen. Sjølv om DP- modellen er den mest nøyaktige av desse to, blir Thevenin-modellen valt fordi den er enklare og nesten like nøyaktig. Thevenin- modellen blir sett på som eit tilstrekkeleg kompromiss mellom kompleksitet og nøyaktigheit.

Ein må og innsjå at kretsparameter i modellen ikkje er meint å beskrive konstruksjonen av cella, men heller kretsen si beskriving av oppførselen til cella der ulike analoge kretsparameter påverkar nokre av dei interne prosessane. Då det er mykje kunnskap om korleis kretsparametrar oppfører seg, blir denne nyttig for å gi ein betre "følelse" på korleis celler reagerer på ulike scenario.

Battericelle test

Ei open kretsspenning (OCV) til batteriet er ein viktig parameter for å etablere ein matematisk modell. Etter lading eller utlading, er terminalspenninga til batteri svært nær eksponential endring, figur [25, s. 0290, figure 1] For auka forståing av korleis batteriblokk modell i SimPowerSymsten Matlab Simulink®[25] er nytta, brukar ein den matematiske kretsmodellen frå kapittel 0, samt formlar (2.10) som er utvikla frå Shepherd- modellen. Dette for å kontrollere automatisk utrekna verdjar i batteriblokk modell. Spesifikasjonar for Litium- ion batteri [30] der V_{nom} er 3.7 V og Q_{max} er 2.4 h ved 1C med følgande parameter:

Parameter for a nominal current discharge characteristic at $Q_{dich_nom} = 1.0435 A$				
$E_0 =$	$R_0 =$	$K =$	$A =$	$B =$
4.039 [V]	0.015 [Ω]	0.031 [Ω or $\frac{V}{Ah}$]	0.302 [V]	23.041 [Ah^{-1}]

Ved å samanlikne desse verdiane med Tabell 11 viser det seg at verdiane er tilnærma lik som verdiane Matlab Simulink® oppgir for Litium- ion batteri.

Utladingstest modell

Ved å bruke pulsutladingstest metode forsøker ein tre utladingstestar: 25, 45 og 55 % DoD, som er vist i Tabell 5, Tabell 6 og Tabell 7. Desse baserer seg på [31, s. 72, figure 5.13], [28] samt formlar frå Figur 21 [32, Par. 2.4]. Før gjennomføring av utrekna dynamiske batteriparametrarar R_0 , R_{th} og C_{th} , har ein undersøkt kva for DoD som gir det raskaste systemet ved 3 tidskonstantar (ved $\pm 5\%$ stasjonært avvik intervall)

Resultatet viser at Tabell 5 med 85- 40% SoC- nivå gir den raskaste responstida systemet kan få, med 31 sekund. Dette resultatet gir referansebetingelsen for design av batteripakke , samt at denne tida vil tilfredstille Peak Shaving modellering.

Ved å køyre simulering for pulsutladingsmetode Figur 18, oppfører simuleringa seg som eit første ordens system for å komme til steady state. Dette systemet med sine dynamiske karakteristikkar til batteriet er rekna ut i Tabell 5. R_0 , R_{th} og C_{th} , og viser korleis battericella oppfører seg. Resultatet stemmer overeins med tidlegare forskning som viser at jo større SoC- nivå, desto større blir C_{th} - verdi, ein får auka responstid, R_0 vil vere tilnærma konstant og V_{oc} varierer svært lite [29, s. 590, table 3].

SoC- nivå

Tal ladings- og utladings- syklusar og alder på batteriet er ein viktig parameter til batteriet. Det finst fleire metodar for å estimere DoD og SoC- nivået. Denne studien vel å nytte time-domain ytingsmetoden frå underkapittel 0. Dette fordi ein tek utgangspunkt i dei viktigaste parametrane til batteriet. Sjølvutlading av batteriet blir ikkje vurdert, og ein legg til grunn at modellen har ingen minneeffekt. Grunnen til at desse kriteriane ikkje blir vurderte, er at dei kan auke modell-kompleksiteten som resultater i langsomme simuleringshastigheiter. Om det hadde vore nytta program som handterer mengdedata, ville ein kunne framskaffe eit meir nøyaktig resultat. Men denne studien har, likevel ved å undersøke den vitenskapeleg litteraturen, evaluere batteriparameterane og ved hjelp av dynamisk yting klart å kome fram til eit godt resultat for vidare implementering.

Batteripakke

I denne studien har ein valgt berre to Litium- ion batterspesifikasjonar frå LG Chem [30], dvs, V_{nom} og Q_{max} . Dette fordi målet er å dimensjonere batteri med omsyn til ei rett skalering av batteri per modul. Basert på datablad sine tabellutrekningar, V_{nom} på 3.7 V og trafo sin spenning sett til 240 V, er det kome fram til 65 batteri i seriekopling totalt. Dette resultatet samsvarer med ein batteristorleik tilnærma lik trafospenning. Derfor er det anbefalt 13 seriemodular med 5 batteri i seriekopling for kvar modul i batteripakken. Ved å simulere ein modul med 5 batteri i seriekopling med pulsutladningsmetoden Figur 18, får ein ei responstid ved τ som er noko lenger enn for ei battericelle. Målt responstid innafor 95 %, med stasjonær- avviksintervall på $\pm 5\%$ er 10.328 sek for 1 celle mot 10.322 sek for 5 celler. Dette er ein relativt liten auke, men kan bli betydeleg med tanke på dimensjonering av større batteripakkar.

Peak Shaving modellering

Peak Shaving modellering viser dynamikk mellom varierende lastvariasjon for kunde N°15 og transformator. Transformator si spenning er sett som teoretisk grunnlag slik at ein kan simulere dette scenarioet. I praksis er maksimal tillatt spenningsvariasjon ved kunde lovpålagt $\pm 10\%$ av nominell spenning, i følge forskrifta om leveringskvalitet i kraftsystemet § 3-3 [35, Kap. 3]. Størrelsen på batteriet er dimensjonert slik at det dekker behovet til transformator når det finst spenningsutfordringar. Det er naturlegvis batteristorleiken som har betydning i distribusjonsnettet. Til større variasjoner, til større er sannsynet for at det er snakk om eit stort batteri. [8, s. 11]. Dette samsvarer med funn i denne studien når det gjeld batteristorleik. Ved optimalt 85-40 % SoC- nivå må batteriet vere relativt stort for å bidra til reguleringa.

Når det gjeld SoC variasjon i simuleringar, viser den ein liten variasjon som kanskje er påverka av feil skaleringar i følge straum. Det er mogleg at det er i simulink gitt *mA* istadenfor *Ampere*. Uavhengig av dette viser simuleringar korleis Peak Shaving kan vere funksjonelt i under slike scenario typar.

Kunde N°15 er brukt som case- studie for forståing om kor mykje desse variasjonane kan påverka framtidig Smart Nett og kva moglege batteristørrelsar som er aktuelle. Generelt blir batteristørrelse dimensjonert for alle kundar på same trafokrets.

Multivariablar som er nemnt i underkapittel 0, er i avgrensa grad brukt i simuleringa sidan det er valgt å implementere Peak Shaving modellering som eit raskt og forenkla system.

Når det gjeld spenningskjelde til transformatorblokka er det valt DC- spenning for å tilpasse simuleringa. Ved ein fullskala dynamisk modelering må ein nytte like –og vekselrettar og tilpasse dynamisk eigenskapar for transformator. Men ein kan likevel ut frå modelleringsløyising som er valt i dette studie undersøke dynamiske karakteristikkar og batteriblokk i modellering kan bli erstatta med Thevenin- model.

5 KONKLUSJON

Studiet omhandlar optimalisering av batterisystemdesign ved hjelp av dynamisk modellering og avansert batteristyringssystem for energilagring i distibusjonsnett. Forbruksdata henta gjennom AMS måling frå SFE sin live demolab i Hyen er nytta som data for berekning av nødvendig energilagringsskapasitet og val av reguleringsystem.

Ved å studere batterieigenskapar og reguleringsteknikk for styresystem, er det i Matlab Simulink® utarbeid modellar for detaljert analyse. Modellering og analyse av dynamiske batteriprosessar er brukt i datasimuleringane for å implementere og teste det avanserte batteristyringssystemet.

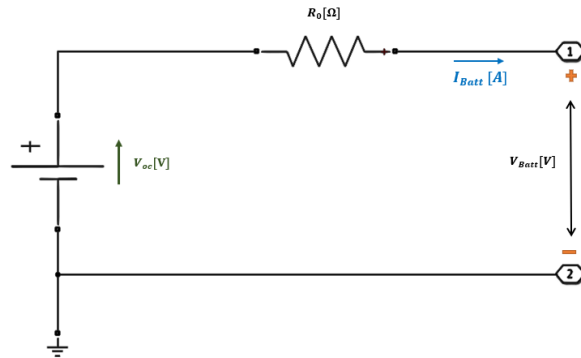
Resultatet av berekningar og dynamisk modellering syner optimalt utladningsnivå mellom 85 og 40% for Litium-ion battericelle. Ved oppskalering med auke i tal battericeller for nødvendig kapasitet, er det ilag med avansert batteristyringssystem modellert topplastreduksjon. Bidraget frå batteriet reduserte topplast over transformator og sikra auka stabilitet i distibusjonsnettet.

I eit vidare arbeid, med utgangspunkt i denne studien, kan det vere aktuelt å bruke komplekse modellar for handtering av større datamengder for auka nøyaktigheit, samt å belyse temperatur påverknad for ekvivalente kretsparametrar. I tillegg er det mogeleg å fysisk impementere modellar frå denne studien til laboratoriemodel for test av simulering i praksis.

6 VEDLEGG

6.1 Evaluering av batterimodellar

R_0 modell

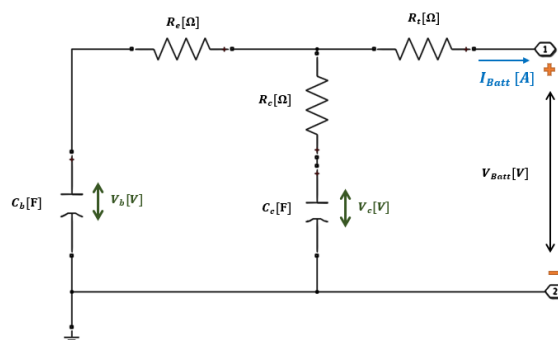


Figur 31 Skjematisk representasjon av R_0 modellen

$$V_{Batt} = V_{oc} - I_{Batt} R_0$$

- Kor:
- V_{Batt} - Terminalspenning til batteri [V]
 - V_{oc} - Ideell spenningskilde [V]
 - I_{Batt} - Laststrøm eller batteristram [A]
 - R_0 - Den indre motstanden [Ω]

RC -modell



Figur 32 Skjematisk representasjon av RC- modellen

$$\begin{bmatrix} V'_b \\ V'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ \frac{1}{C_b(R_e + R_c)} & \frac{1}{C_b(R_e + R_c)} \\ 1 & -1 \\ \frac{1}{C_c(R_e + R_c)} & \frac{1}{C_c(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_b \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R_c \\ \frac{-R_c}{C_b(R_e + R_c)} \\ -R_e \\ \frac{-R_e}{C_c(R_e + R_c)} \end{bmatrix} [I_{Batt}]$$

$$[V_{Batt}] = \begin{bmatrix} R_c & R_e \\ (R_e + R_c) & (R_e + R_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_b \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R_t & -\frac{R_e R_c}{(R_e + R_c)} \end{bmatrix} [I_{Batt}]$$

- Kor:
- R_e - Motstanden i serie med kondensatoren C_b [Ω]
 - R_c - Motstanden i serie med kondensatoren C_c [Ω]
 - R_t - Motstanden mellom dei to RC- kretsane [Ω]
 - C_b - Massekondensatoren [F]
 - C_c - Overflatekondensatoren [F]
 - I_{Batt} - Terminalstraum til batteri [A]
 - V_b - Spenning over kondensatoren C_b [V]
 - V_c - Spenning over kondensatoren C_c [V]
 - V_{Batt} - Spenning over klemmer til batteriet [V]

Tabell 8 Viser elektriske komponentar som kondensatorer og motstander [17, s. 48]

Komponent	Spenning- Straum (VC)	Straum-Spenning (CV)	Spenning- oppladning	Impedansen ⁵
Capacitor	$v(t) = \frac{1}{C} \int_0^1 i(t) dt$	$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$	$v(t) = \frac{1}{C} q(t)$	$\frac{1}{Cs}$
Resistor	$v(t) = Ri(t)$	$i(t) = \frac{1}{R} v(t)$	$v(t) = R \frac{dq(t)}{dt}$	R

⁵ $Z(s) = \frac{V(s)}{I(s)}$, formelen definerer transferfunksjon.

Tabell 9 Den statistiske analyselisten over absoluttverdiene for terminalspenningsfeil [29, s. 592]

Model	Maximun (V)	Mean (V)	Variance (V²)	Max. Error Rate (%)
Rint model	1.6229	0.3945	0.0762	2.8176
RC model	1.0785	0.2336	0.0463	2.0337
Thevenin model	0.2967	0.0455	0.0220	0.5151
PNGV model	0.5772	0.0875	0.0243	1.0020
DP model	0.2183	0.0429	0.0021	0.3790

6.2 Reguleringssteknikk

Integral

$$\int_0^t e^{-\sigma t} \sin \omega t dt$$

Integrasjonsteknikken, delvis integrasjon, tek utgangspunkt i den deriverte av produktet mellom to deriverte funksjonar u og v . Den deriverte funksjon er gitt ved: (Mathema-Steffen Log 2. utgåve)

$$\frac{d}{dt} [u(t) \cdot v(t)] = u'(t) \cdot v(t) + u(t) \cdot v'(t)$$

Antiderivasjon på begge sider gir:

$$u(t) \cdot v(t) = \int u'(t) \cdot v(t) dt + \int u(t) \cdot v'(t) dt$$

Dersom u og v har kontinuerleg deriverte, gjeld:

$$\int u(t) \cdot v'(t) dt = u(t) \cdot v(t) - \int u'(t) \cdot v(t) dt \quad (6.1)$$

Eller på ein enkel måte:

$$\int u dv = uv - \int v du \quad (6.2)$$

Ved å erstatte denne likninga, får denne mellomrekninga som følger

$u = e^{-\sigma t}$	$du = -\sigma e^{-\sigma t} dt$
$dv = \sin(\omega t) dt$	$v = -\frac{1}{\omega} \cos(\omega t) dt$

Ved å erstatte mellomrekninga i (6.1) får:

$$\int_0^t e^{-\sigma t} \sin(\omega t) dt = -\frac{1}{\omega} e^{-\sigma t} \cos(\omega t) \Big|_0^t - \frac{\sigma}{\omega} \int_0^t e^{-\sigma t} \cos(\omega t) dt \quad (6.3)$$

Det ser ut at ein ikkje har oppnådd noko anna enn å erstatte $\sin(\omega t)$ med $\frac{1}{\omega} \cos(\omega t)$ og $e^{-\sigma t}$ med $-\sigma e^{-\sigma t}$. Ved å gjennomføre ein delvis integrasjon til å konvertere $\cos(\omega t)$ til $\sin(\omega t)$, blir mellomrekninga slik:

$u = e^{-\sigma t}$	$du = -\sigma e^{-\sigma t} dt$
$dv = \cos(\omega t) dt$	$v = \frac{1}{\omega} \sin(\omega t)$

Utrekninga ved å erstatte mellomrekninga i (6.3) blir:

$$\begin{aligned}
 \int_0^t e^{-\sigma t} \sin(\omega t) dt &= -\left[\frac{1}{\omega} e^{-\sigma t} \cos(\omega t) - \frac{1}{\omega}\right] - \frac{\sigma}{\omega} \left[\frac{1}{\omega} e^{-\sigma t} \sin(\omega t)\right]_0^t - \int_0^t \frac{\sigma}{\omega} e^{-\sigma t} \sin(\omega t) dt \\
 \int_0^t e^{-\sigma t} \sin(\omega t) dt &= \frac{1}{\omega} - \frac{1}{\omega} e^{-\sigma t} \cos(\omega t) - \frac{\sigma}{\omega^2} e^{-\sigma t} \sin(\omega t) - \frac{\sigma^2}{\omega^2} \int_0^t e^{-\sigma t} \sin(\omega t) dt \\
 \left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2}\right) \int_0^t e^{-\sigma t} \sin(\omega t) dt &= \frac{1}{\omega} - \frac{1}{\omega} e^{-\sigma t} \cos(\omega t) - \frac{\sigma}{\omega^2} e^{-\sigma t} \sin(\omega t) \\
 (\omega^2 + \sigma^2) \int_0^t e^{-\sigma t} \sin(\omega t) dt &= \omega^2 \left(\frac{1}{\omega} - \frac{1}{\omega} e^{-\sigma t} \cos(\omega t) - \frac{\sigma}{\omega^2} e^{-\sigma t} \sin(\omega t)\right) \\
 (\omega^2 + \sigma^2) \int_0^t e^{-\sigma t} \sin(\omega t) dt &= \omega - \omega e^{-\sigma t} \cos(\omega t) - \sigma e^{-\sigma t} \sin(\omega t) \\
 \int_0^t e^{-\sigma t} \sin(\omega t) dt &= \frac{\omega}{(\omega^2 + \sigma^2)} - \frac{\omega}{(\omega^2 + \sigma^2)} e^{-\sigma t} \cos(\omega t) - \frac{\sigma}{(\omega^2 + \sigma^2)} e^{-\sigma t} \sin(\omega t) \\
 \int_0^t e^{-\sigma t} \sin(\omega t) dt &= \frac{\omega}{(\omega^2 + \sigma^2)} - \frac{e^{-\sigma t}}{\sqrt{(\sigma^2 + \omega^2)}} \left(\frac{\omega}{\sqrt{(\sigma^2 + \omega^2)}} \cos(\omega t) + \frac{\sigma}{\sqrt{(\sigma^2 + \omega^2)}} \sin(\omega t)\right) \\
 \int_0^t e^{-\sigma t} \sin(\omega t) dt &= \frac{\omega}{(\omega^2 + \sigma^2)} - \frac{e^{-\sigma t}}{\sqrt{(\sigma^2 + \omega^2)}} \left(\frac{\sigma}{\sqrt{(\sigma^2 + \omega^2)}} \sin(\omega t) + \frac{\omega}{\sqrt{(\sigma^2 + \omega^2)}} \cos(\omega t)\right) \quad (6.4)
 \end{aligned}$$

Det andre leddet, som ligg i parentes, kan forenklast ved hjelp av sinusoidal signal. I dette tilfellet blir det brukt $\sin(\omega t + \varphi)$. For å sjå korleis dette fungerer, bør ein vurderer eit lineært dynamisk system med inngang $x(t)$ og utgang $y(t)$:



Figur 33 eit lineært dynamisk system med inngang $x(t)$ og utgang $y(t)$

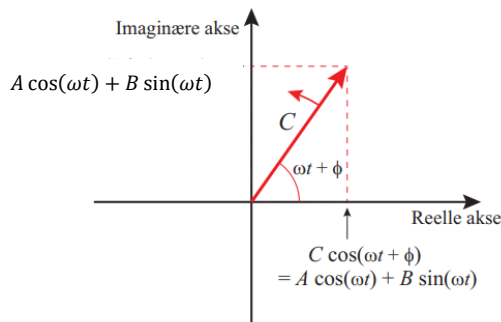
For sinusforma inngangssignal er $x(t) = \sin(\omega t)$ og utgangssignalet blir :

$$\begin{aligned}
 y(t) &= C \sin(\omega t + \varphi) = C\{\sin(\omega t) \cos(\varphi) + \cos(\omega t) \sin(\varphi)\} \\
 &= C \cos(\varphi) \sin(\omega t) + C \sin(\varphi) \cos(\omega t) \\
 &= A \sin(\omega t) + B \cos(\omega t)
 \end{aligned}
 \tag{6.5}$$

Dersom :

$$A = C \cos(\varphi) \text{ og } B = C \sin(\varphi) \tag{6.6}$$

Det kan vere nyttig å ha ein visuell skisse å forhalde seg til, og då er fasorer svært godt eigna. Ein fasor er ein vektor som roterer etter som tida går i eit komplekst plan med ein reell x -akse og ein imaginær y -akse, sjå Figur 34. Vektoren roterer med vinkelhastighet lik ω . Komponenten av denne vektoren langs den reelle aksene representerer den fysiske verdien ein er interessert i.



Figur 34 Skisse av ein fasor som dreier seg om orige med vinkelhastigheitt ω

Ein kan gå motsatt veg ved å utnytte detaljane sist i likning (6.6) :

$$\begin{aligned}
 A^2 + B^2 &= (C \cos \varphi)^2 + (C \sin \varphi)^2 = C^2(\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) = C^2 \\
 C &= \pm \sqrt{A^2 + B^2}
 \end{aligned}$$

Og vidare får ein ved å setje dei to uttrykka sist i likninga (6.6) opp i ein brøk:

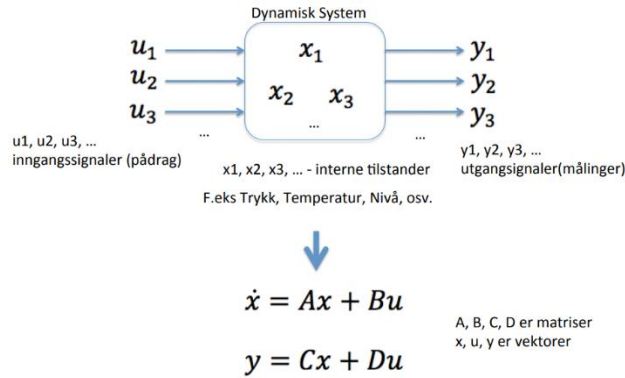
$$\frac{B}{A} = \frac{C \sin \varphi}{C \cos \varphi} = \tan \varphi.$$

Ved å erstatte desse konstantane med koeffisientane

$$\begin{aligned}
 \int_0^t e^{-\sigma t} \sin(\omega t) dt &= \frac{\omega}{(\omega^2 + \sigma^2)} - \frac{e^{-\sigma t}}{\sqrt{(\sigma^2 + \omega^2)}} \left(\frac{\sigma}{\sqrt{(\sigma^2 + \omega^2)}} \sin(\omega t) + \frac{\omega}{\sqrt{(\sigma^2 + \omega^2)}} \cos(\omega t) \right) \\
 &= \frac{\omega}{(\omega^2 + \sigma^2)} - \frac{e^{-\sigma t}}{\sqrt{(\sigma^2 + \omega^2)}} \sin(\omega t + \varphi); \text{ kor } \tan \varphi = \frac{\omega}{\sigma}
 \end{aligned}
 \tag{6.7}$$

Tilstandsrommodellar

Anta følgjande differensiallikningar [17, s. 255]:



Figur 35 Eksempel på multivariablar

Figur 35 Kan bli skrive i matriseform slik:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}'_1 \\ \dot{x}'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

x' A x B u

Ved å ta laplacetransformen av begge sider av tilstandslikningan (6.8) gir:

$$sX(s) - x(0) = AX(s) + BU(s)$$

$$sX(s) - AX(s) = x(0) + BU(s)$$

For å skilje X (s), erstattar ein sX (s) med sIX (s) Kor I er ein nxn identitetsmatrise, og n er orden til systemet. Ved å kombinere alle X (s) vilkåra, får ein

$$X(s)(SI - A) = x(0) + BU(s)$$

Ved å ta vekk x(0) gir:

$$X(s) = (SI - A)^{-1}BU(s) \quad (6.9)$$

Ved å innsetje likninga (6.8) i utgangslikningar gir :

$$Y(s) = CX(s) + DU(s)$$

$$Y(s) = C(SI - A)^{-1}BU(s) + DU(s)$$

Så den skalerte transferfunksjonen $G(s)$ er:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = C(SI - A)^{-1}B + D$$

$$\equiv C \frac{\text{adj}(sI - A)}{\det(sI - A)}B + D \quad (6.10)$$

Laplacestransform

Laplacestransformasjon gjer det mogleg å løyse ein lineær høgare ordens differensiallikning eller eit sett av lineære differensiallikningar på ein enkel måte. Ved å Laplacestransformere differensiallikninga (-ane), blir problemet omgjort til ein eller eit sett av algebraiske likningar. Desse blir løyst med omsyn på variablane ein er interessert i, og ein kan inverstransformere uttrykka for å finne tidsforløpet til dei same variablane [36, s. 99].

$$F(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (6.11)$$

Dette kan også bli skriva som:

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s) \text{ eller } f(t) \xleftrightarrow{\mathcal{L}} F(s) \quad (6.12)$$

$f(\cdot)$ og $F(\cdot)$ er kalla Laplacestransformasjons-par. Den siste formuleringa indikerer også at det finst ein invers Laplacestransformasjon.

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}\{F(s)\} \quad (6.13)$$

Alle tidsforløpa som blir betrakta i denne studien, vil ha $f(t) = 0$ for $t < 0$. Dermed vil ein alltid ha:

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (6.14)$$

Ein kompleks variabel av formel $\sigma + j\omega$ kor $j = \sqrt{-1}$.

For å finne laplacestransferfunksjon av ein tidsfunksjon, f.eks. $f(t) = Ae^{-at}u(t)$:

$$\begin{aligned}
 F(s) &= \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt = \int_0^{\infty} A e^{-at} e^{-st} dt = A \int_0^{\infty} e^{-(s+a)t} dt \\
 &= -\frac{A}{s+a} e^{-(s+a)t} \Big|_{t=0}^{\infty} = \frac{A}{s+a}
 \end{aligned}
 \tag{6.15}$$

A er berre ein konstant variabel i denne transformasjonen.

Tabell 10 Dei mest brukt Laplacetransform teorema i funksjon av $f(t)$

Teorem	Namn
$\mathcal{L}\left[\frac{df}{dt}\right] = sF(s) - \lim_{t \rightarrow 0} f(t)$ $= sF(s) - f(0^-)$	1.ordens derivasjon
$\mathcal{L}\left[\int_{0^-}^t f(\tau) d\tau\right] = \frac{1}{s}F(s) - f(0)$	Integrasjon
$\mathcal{L}[A] = \frac{A}{s}$	Konstant (sprang)
$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s)$	Sluttverditeoremet
$\lim_{t \rightarrow 0^+} f(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} sF(s)$	Startverditeoremet
$F_1(s)F_2(s) = \mathcal{L}[f_1(t) \otimes f_2(t)] = \mathcal{L}\left[\int_0^t f_1(\tau) f_2(t-\tau) d\tau\right]$ $= \mathcal{L}\left[\int_0^t f_2(\tau) f_1(t-\tau) d\tau\right]$	Real konvolutsjon ⁶

⁶ La $F_1(s)$ og $F_2(s)$ bli Laplacetransformasjonane av funksjonane $f_1(t)$ og $f_2(t)$, og $f_1(t) = 0$ og $f_2(t) = 0$, for $t < 0$.

Første ordens system

Transferfunksjonen til eit første ordens system kan bli skrive på to måtar:

$$G(S) = \frac{K}{\tau s + 1} \text{ eller } G(S) = \frac{K}{s + a} \quad (6.16)$$

Der K er forsterkning og τ er tidskonstant.

Sprangsresponsen for eit 1.ordens system er:

(6.17)

Då får:

$$y(s) = G(s)u(s) \quad (6.18)$$

Kor:

$$U(s) = \frac{A}{s} \quad (6.19)$$

Dvs.:

$$y(s) = \frac{K}{\tau s + 1} * \frac{A}{s} \quad (6.20)$$

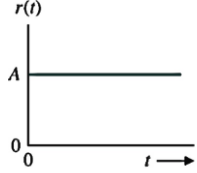
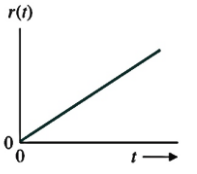
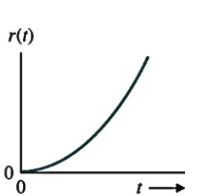
Dette følgjer Laplace- transformasjonspar:

$$\frac{K}{(\tau s + 1)} \leftrightarrow K \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (6.21)$$

Til slutt får :

$$y(t) = KA \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (6.22)$$

Test signal-inngang

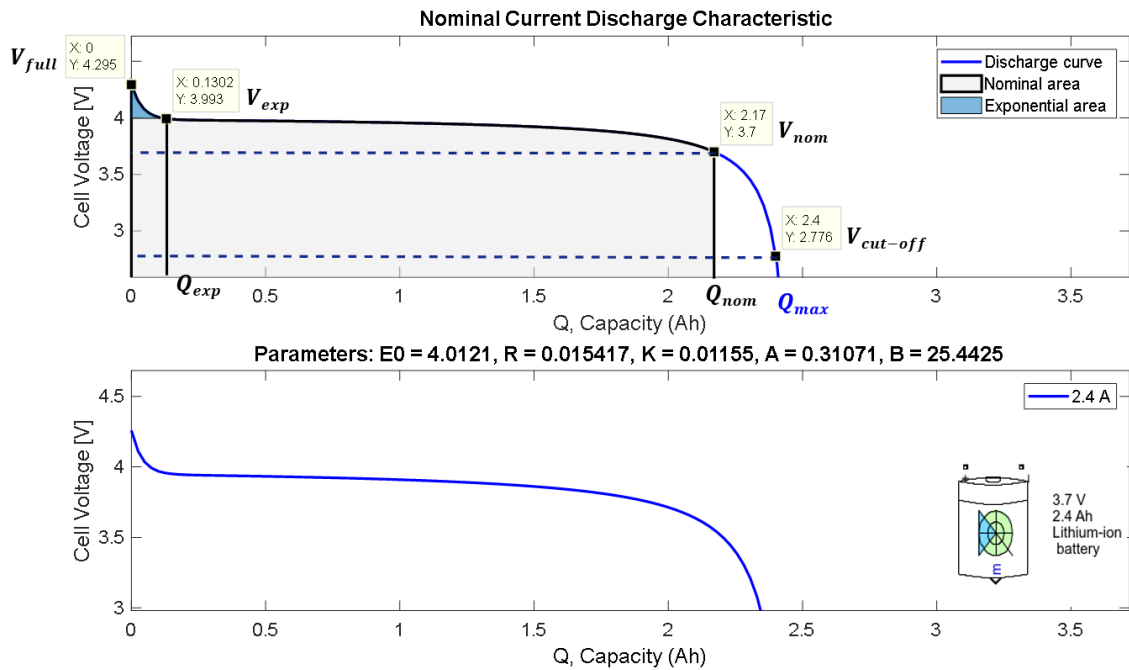
Test Signal	$r(t)$	$R(s)$	Test signal-inngang
Trinn (Step)	$r(t) = A, t > 0$ $= 0, t < 0$	$R(s) = A/s$	
Rampen (ramp)	$r(t) = At, t > 0$ $= 0, t < 0$	$R(s) = A/s^2$	
Parabol (parabolic)	$r(t) = \frac{At^2}{2}, t > 0$ $= 0, t < 0$	$R(s) = A/s^3$	

6.3 Klassifisering av ulike litium-ion batteri modeller

<i>Model Type</i>	<i>Model</i>	<i>Empirical</i>	<i>Semi-Empirical</i>	<i>Physical</i>	
Electro - Chemical	Pure Electro-Chemical			✓	
	ECM Electro-Chemical		✓		
Electrical	Analytical	Peukert's model	✓		
		Rakhmatov and Vrudhula		✓	
		Sheperd other iterations		✓	
		State-Space	✓		
	ECM	Simple Rint	✓		
		Enhance Rint		✓	
		RC		✓	
		PNGV / FreedomCAR		✓	
		1 st order (Thevenin Model)		✓	
		Dual Polarization (2 nd order)		✓	
		Enhance PNGV (2 nd order)		✓	
		Noshin Model		✓	
	Neural Nets	✓			
Freq.	Frequency domain	✓	✓		
Thermal	Analytical Thermal			✓	
	ECM Thermal		✓		
Mechanical/ Fatigue	Fatigue/Mechanical		✓	✓	
Combined Models	Electro-Thermal		✓		
	Thermo-electrochemical		✓	✓	
	Thermo-Mechanical		✓	✓	

Figur 36 Klassifisering av ulike litium-ion batteri

6.4 Batteriblokker



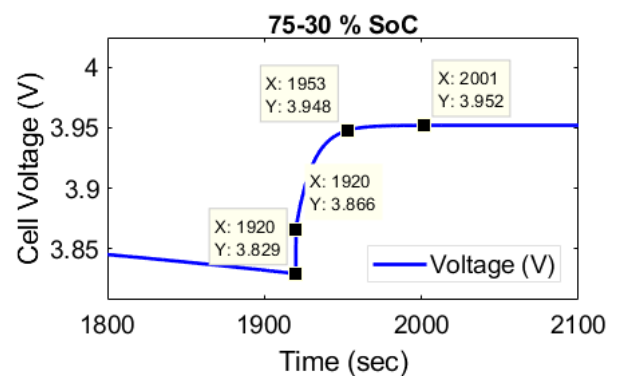
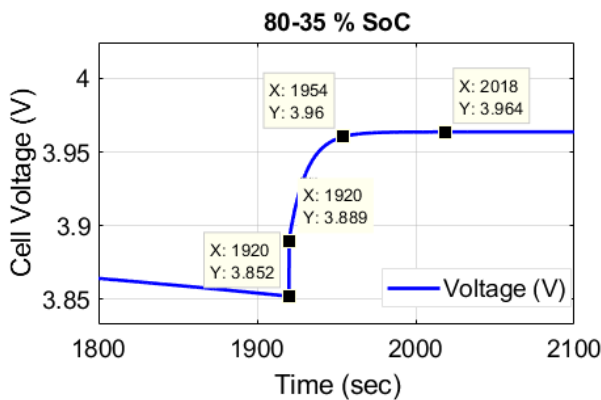
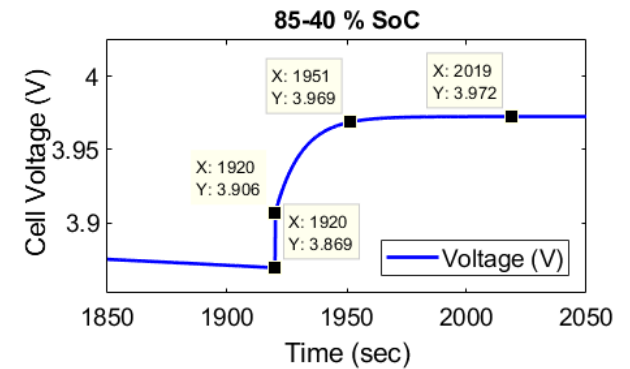
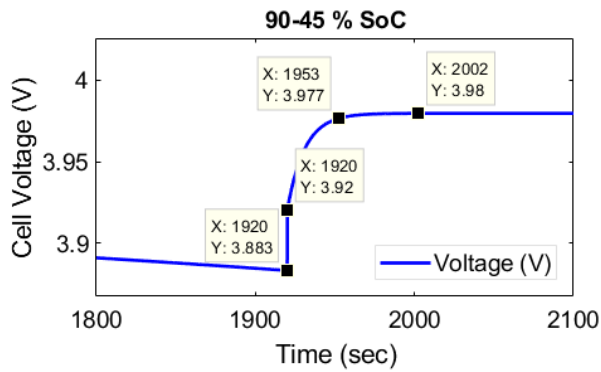
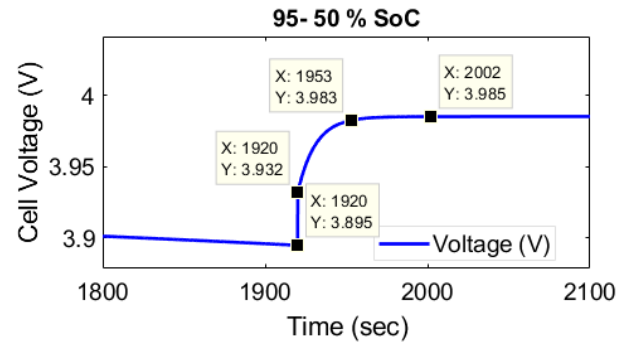
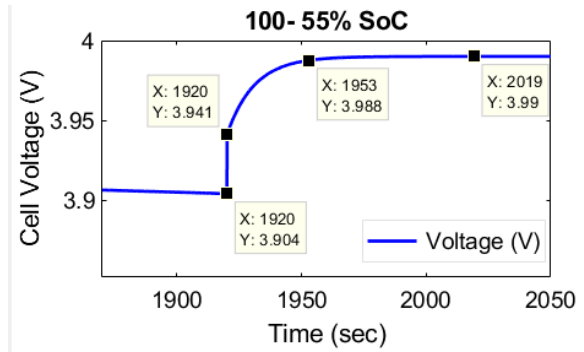
Figur 37 Utladingskurve for litium-ion batteri Matlab Simulink®

Tabell 11 Batteri spesifikasjoner

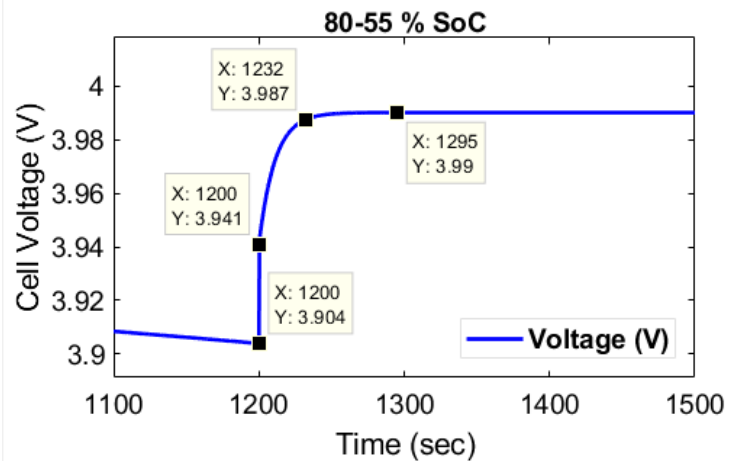
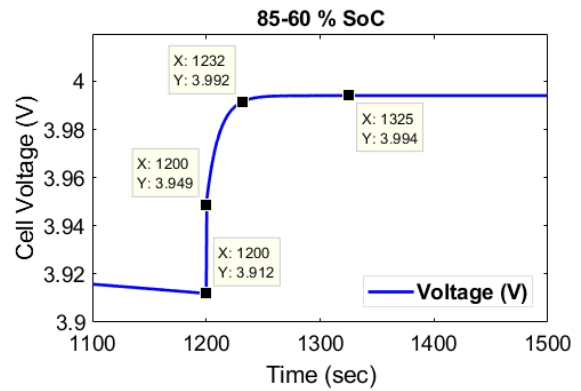
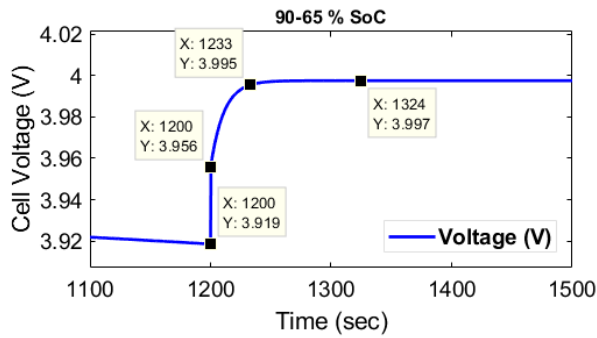
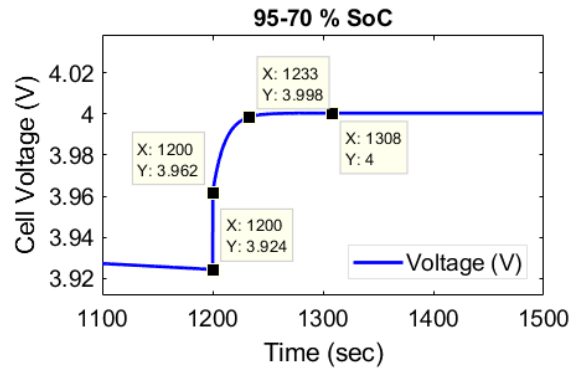
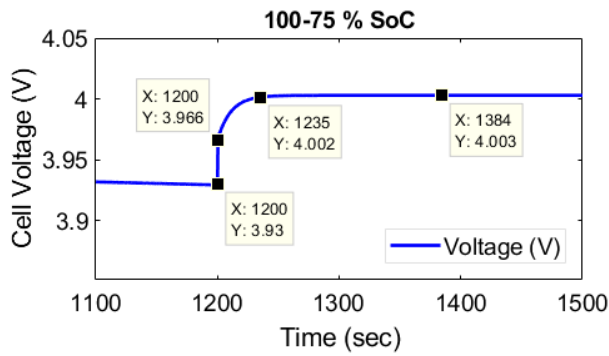
Parameter		1 battericell
Nominal Voltage	V_{nom} [V]	3.700
Rated capacity	Q_{rated} [Ah]	2.400
Maximum capacity	Q_{max} [Ah]	2.400
Fully charged voltage	V_{full} [V]	4.307
Nominal Discharge Current	$Q_{dich\ nom}$ [A]	1.043
Internal resistance	R_0 [Ω]	0.015
Capacity at nominal voltage	Q_{nom} [Ah]	2.170
Exponential zone Voltage	V_{exp} [V]	3.997
Exponential zone Current	Q_{exp} [Ah]	0.118

6.5 Utladingskurve for dei ulike testane

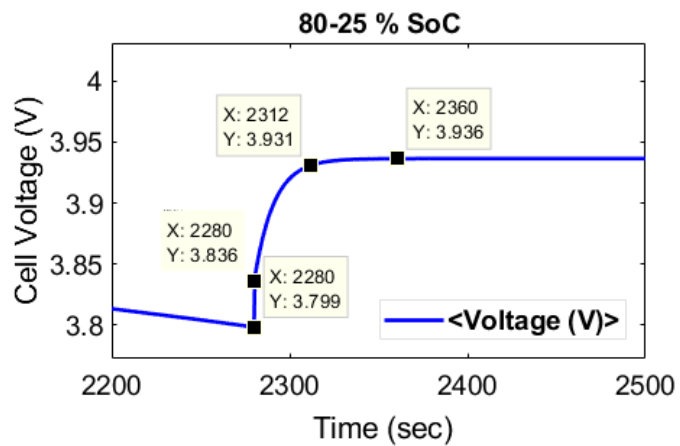
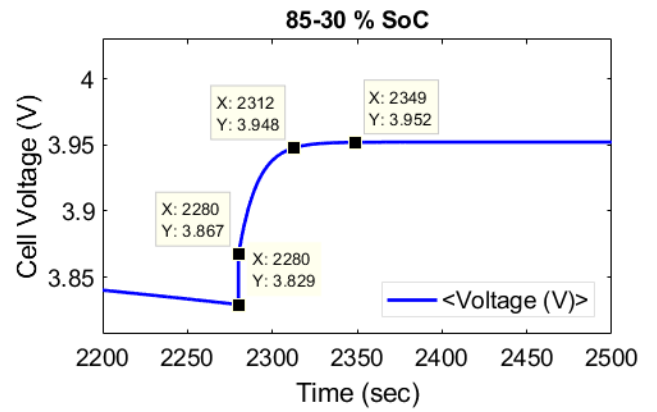
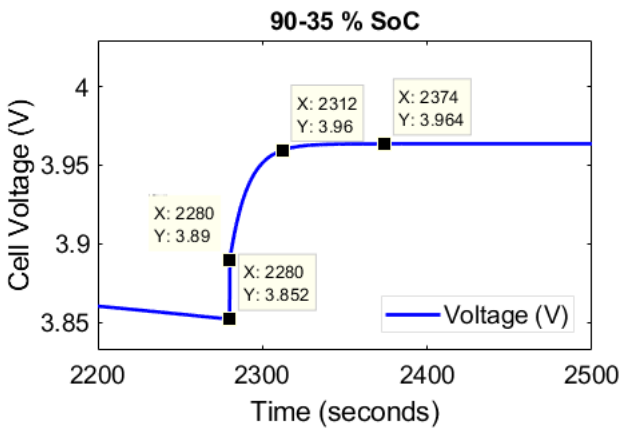
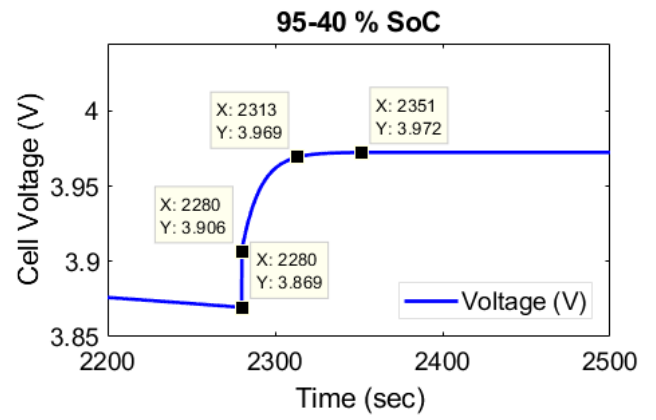
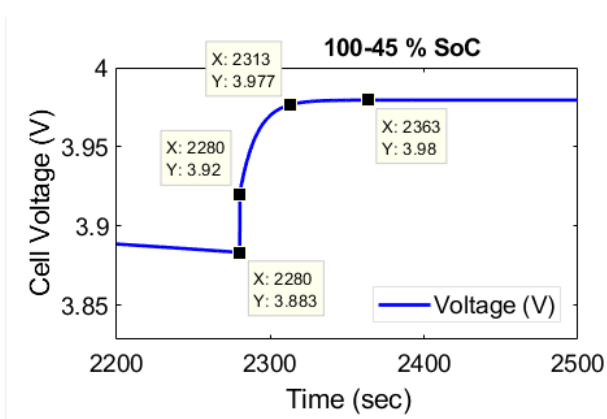
Ved 45 % $SoC_{Discharge}$



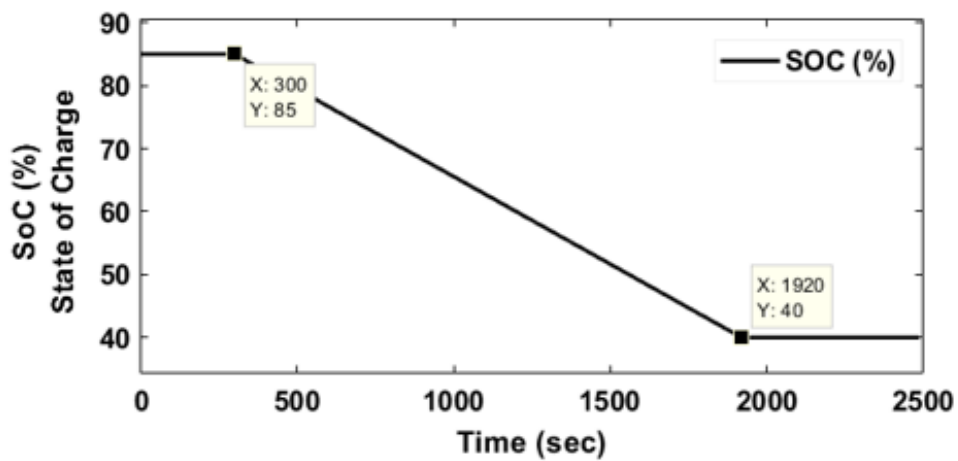
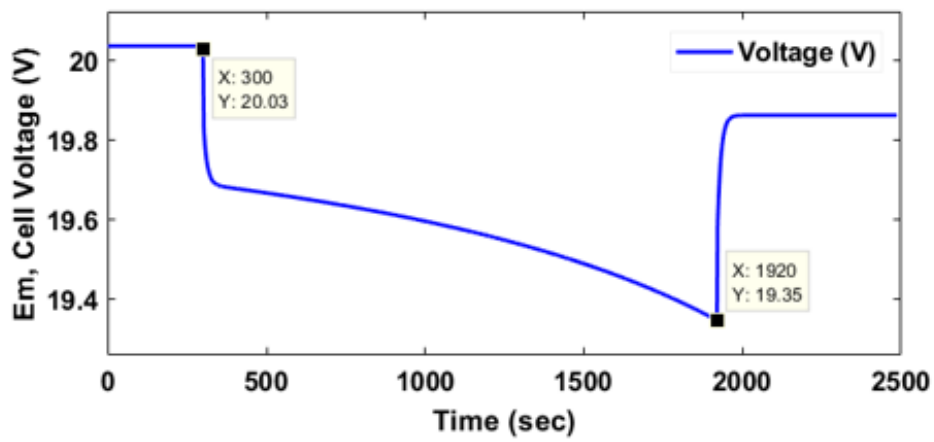
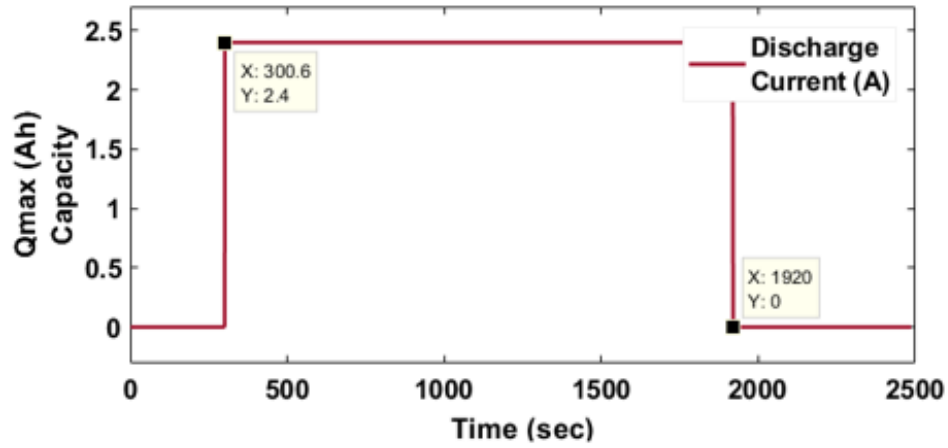
Ved 25 % $SoC_{Discharge}$



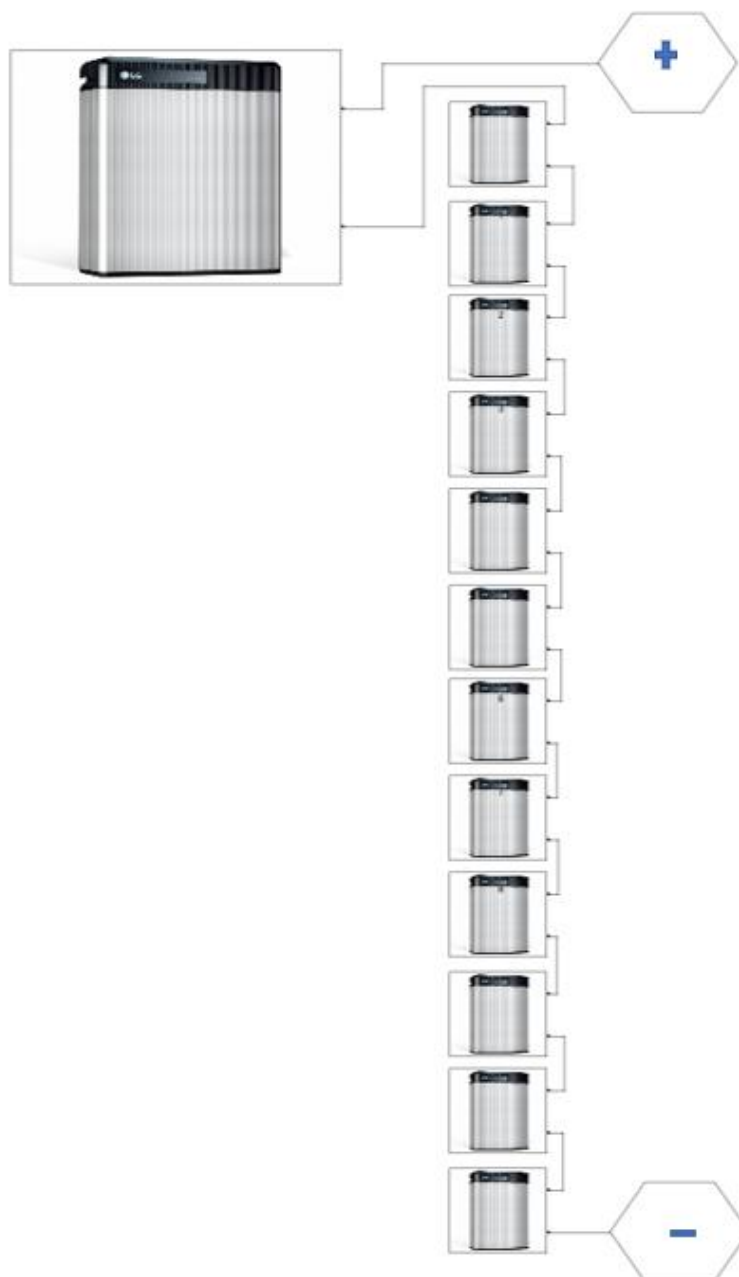
Ved 55 % $SoC_{Discharge}$



6.6 Batteripakke dynamikken (5 batteri i 1 modul)



6.7 Batteripakke i serie-kopling



6.8 Database Peak Shaving

```
% Database_load.m
% Database_Peak_Shaving
% Lagrar lasteffekt(time,dag,uke,kunde)vektoren som representerer alle
% målingene fra 45 kunder i løpet av et år (52 uker) 2015-2016
% Merk at 11. desember 2015. data er henta ifrå kunde 14
% Første kolone representerer Timer.

AlleKunderOneYear=importdata('Husstander_45.xlsx'); % A =
importdata(filename) loads data into array A.
[lin,col]= size(AlleKunderOneYear.data);
alledager=364;
alleuker=alledager/7; %% uker 52
tid=linspace(1,24,24)';
StartDate=23112015;
for kunde=1:col; %% col 1 er egentleg time
    for uke= 1:alleuker; %% 1:52
        for dag=1:7;
            for time=1:24;

lasteffekt(time,dag,uke,kunde)=AlleKunderOneYear.data(time+24*(dag-
1)+24*7*(uke-1),kunde);
                end
            end
        end
    end

plot(tid,lasteffekt(:,5,3,15));%% 11. desember 2015
for uke= 1:alleuker; %% 1:52
    for dag=1:7;
        dato(dag,uke)=AlleKunderOneYear.textdata(1+24*(dag)+24*7*(uke-
1),1);
    end
end
%%
stairs(tid,lasteffekt(:,5,3,15),'-b')
xticks([0:1:24])
ylim([1.5 2.5])
PavgDag5=sum(lasteffekt(:,5,3,15))/24;
PavgDag5=PavgDag5*ones(size(tid));
hold on;
plot(tid,PavgDag5,'--m')
legend({'Effektforbruk for kunde nr 15','Gjennomsnittforbruk for
mandag'},'Location','northwest')
title('Effektforbruk for 11. Desember 2015')
xlabel('Tid [h]')
ylabel('Lasteffekt [kW]')
grid on; box on; hold on;
```

REFERANSAR

- [1] Energi- og Miljøkomiteen, «Innstilling til Stortinget fra energi- og miljøkomiteen Prop. 35 L (2015–2016)», Stortinget, Oslo, Prop. 35 L (2015–2016), nov. 2016.
- [2] THEMA Consulting/EPOS Consulting, «Behovet for koordinering mellom regional- og distribusjonsnett», Konsulentrapport 30, 2017.
- [3] The Norwegian Smartgrid Centre, «Om Smartgrid». [Online]. Tilgjengeleg på: <http://smartgrids.no/senteret/about-smartgrid/>. [Vitja: 12-apr-2018].
- [4] EDSO, «EDSO for smart grids», *Why smart grids?* [Online]. Tilgjengeleg på: <https://www.edsoforsmartgrids.eu/home/why-smart-grids/>. [Vitja: 15-jan-2019].
- [5] ZERO, «Smart strøm – neste skritt for de smarte, grønne forbrukerne», s. 13.
- [6] Norges vassdrags-og energidirektorat, «AMS», nov-2017. [Online]. Tilgjengeleg på: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten-for-energi-rme-marked-og-monopol/sluttbrukermarkedet/ams/>. [Vitja: 12-apr-2018].
- [7] EASE – European Association for Storage of Energy, «European energy storage technology development roadmap», Brussels, 128.
- [8] DNV GL, «Batterier i distribusjonsnettet», Oslo, Konsulentrapport 2, jan. 2018.
- [9] G. Fitzgerald, J. Mandel, J. Morris, og H. Touati, «The economics of battery energy storage», *Rocky Mt. Inst.*, s. 41.
- [10] DNV GL, «Elektrifisering av transport, batterier og fleksibilitet for strømmettet», *DNV GL*, 15-nov-2016. [Online]. Tilgjengeleg på: <https://www.dnvgl.no/news/elektrifisering-av-transport-batterier-og-fleksibilitet-for-stromnettet-80303>. [Vitja: 15-jan-2019].
- [11] G. Karmiris og T. Tengnér, «Peak Shaving control method for energy storage», *Sandia*, s. 6.
- [12] Optimeering AS, «Beregning av nasjonal justert innmatingsprofil», Norges vassdrags-og energidirektorat, Oslo, Konsulentrapport 82.
- [13] Statnett, «Om Elhub», *Elhub*. [Online]. Tilgjengeleg på: <http://elhub.no/nb/om-elhub>. [Vitja: 17-apr-2018].
- [14] Elhub, «Standard for Validering, Estimering og Endring (VEE)». Stanett, 13-jan-2017.
- [15] R. C. Dorf og R. H. Bishop, *Modern Control Systems, Global Edition*, 13 th. USA: Pearson Education, 2016.
- [16] F. Haugen, *Reguleringsteknikk*, 2.utg. Skien: Fagbokforlaget, 2014.
- [17] N. S. Nise, *Control Systems Engineering*, 6th Edition Binder Ready Version edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2010.
- [18] I. Buchmann, *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers, Fourth Edition*. Cadex Electronics Inc., 2017.
- [19] «DC circuits». [Online]. Tilgjengeleg på: http://scientificsentence.net/Equations/Electrostatics/index.php?key=yes&Integer=dc_circuits. [Vitja: 26-des-2018].

- [20] E. Bretscher, «Marine lithium batteries in operation | Nordkyn Design», *Nordkyn Design - Marine Design & Engineering*, 03-okt-2015. [Online]. Tilgjengeleg på: <http://nordkyndesign.com/practical-characteristics-of-lithium-iron-phosphate-battery-cells/>. [Vitja: 16-jan-2019].
- [21] I. Joerg, *Physically based Impedance Modelling of Lithium-Ion Cells*. KIT Scientific Publishing, 2014.
- [22] B. Xu, A. Oudalov, A. Ulbig, G. Andersson, og D. S. Kirschen, «Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment», *IEEE Trans. Smart Grid*, bd. 9, nr. 2, s. 1131–1140, mar. 2018.
- [23] A. Nikolian *mfl.*, «Classification of Electric modelling and Characterization methods of Lithium-ion Batteries for Vehicle Applications», presentert på European Electric Vehicle Congress Brussels, Belgium, 2014, s. 16.
- [24] S. Li og B. Ke, «Study of battery modeling using mathematical and circuit oriented approaches», i *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011, s. 1–8.
- [25] O. Tremblay og L. Dessaint, «Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications», *EVS24*, s. 10, mai 2009.
- [26] O. Tremblay, L. Dessaint, og A. Dekkiche, «A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles», i *2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007, s. 284–289.
- [27] M. Alhanouti, M. Gießler, T. Blank, og F. Gauterin, «New Electro-Thermal Battery Pack Model of an Electric Vehicle», *Energies*, bd. 9, nr. 7, s. 563, jul. 2016.
- [28] Matlab R2018a, «Implement generic battery model - Simulink - MathWorks Nordic», <https://se.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>, 2018. [Online]. Tilgjengeleg på: <https://se.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>. [Vitja: 12-jan-2019].
- [29] H. He, R. Xiong, og J. Fan, «Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach», *Energies*, bd. 4, nr. 4, s. 582–598, mar. 2011.
- [30] Energy Solutions Company, «Product | ESS Battery | LG Chem», aug-2017. [Online]. Tilgjengeleg på: <http://www.lgchem.com/global/ess/ess/product-detail-PDEC0001>. [Vitja: 07-jun-2018].
- [31] S. A. Kjerpeset, «Energy Storage in the Distribution Grid», University of Bergen, Bergen, 2017.
- [32] G. L. Plett, *Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling*. Artech House, 2015.
- [33] R. Jackey, M. Saginaw, P. Sanghvi, og J. Gazzarri, «Battery Model Parameter Estimation Using a Layered Technique: An Example Using a Lithium Iron Phosphate Cell», *The MathWorks*, s. 14, 2013.
- [34] M. C. Kintner-Meyer *mfl.*, «Energy Storage for Power Systems Applications: A Regional Assessment for the Northwest Power Pool (NWPP)», PNNL-19300, 991590, apr. 2010.

- [35] Lovdata, «Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet - Lovdata», 30-nov-2004. [Online]. Tilgjengeleg på: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-11-30-1557>. [Vitja: 14-jan-2019].
- [36] J. G. Balchen, B. A. Foss, og T. Andresen, *Reguleringsteknikk*, 2. utg. Trondheim: Institutt for teknisk kybernetikk, NTNU, 2000.