

Dimensjonering av batteri for reduksjon av effekttopper i banestrømforsyningen

Armeen Ali & Stian Larsen Varlid

Bachelor i Elkraft
Innlevert: Mai 2019
Hovedveileder: Trond Leiv Toftevaag

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elektroniske systemer

Oppgavens tittel:	Dato: 20.05.19
-------------------	----------------

Dimensjonering av batteri for reduksjon av effektopper i banestrømforsyningen	Antall sider: [72]		
	Masteroppgave:	Bacheloroppgave	X
Navn: Armeen Ali og Stian Larsen Varlid			
Veileder: Trond Leiv Toftevaag			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/ veiledere: Øyvind Gebhardt			

Sammendrag:

Formålet med denne oppgaven er å utføre analyse av målinger, modellere, simuleringer med tilhørende analyse på banestrømforsyningen for å redusere effektopper. Dette blir kalt for peak shaving. Det skal undersøkes om et batterianlegg kan ta seg av de høye kortvarige effektoppene som oppstår, spesielt i situasjoner hvor flere tog akselerere samtidig.. Bane NOR sto for strømmålinger fra Leivoll omformerstasjon på Sørlandsbanen.

For å undersøke hvordan et batterianlegg vil kunne bidra, ble det brukt flere metoder. Effektbehovet ble først kartlagt gjennom en matematisk modell ved hjelp av Microsoft Excel til å finne en fornuftig dimensjonering av batteri kapasitet. Det var Bane NOR selv som ønsket en slik modell, som også kan bli brukt som mal til flere målinger senere.

På bakgrunn av dimensjonert batterikapasitet, ble det satt opp en simuleringsmodell i programmet DlgSILENT Power factory. Ved hjelp av simuleringsmodellen, ble det konstruert ulike caser. Case 1, med konstante laster. Case 2, laster i tidsserie fra målingene på Leivoll. Case 3, testing av batterier med forskjellige ladeeffekter. Case 4, uten overliggende nett på en av omformerstasjonene. Gjennom de ulike casene ble simuleringsmodellen kjørt med og uten batteri, slik at bidraget fra batterianlegget kom frem.

Ut ifra excel og simulerings resultater, kan det vises at et batterianlegg kan være en god løsning til å redusere effektopper med tilstrekkelig batterikapasitet og riktige batteri parametere som er tilpasset til driftssituasjoner.

Stikkord:

Batterianlegg
Banestrømforsyning
Redusering av effektopper
Dimensjonering

Abstract

The purpose of this dissertation is to analyze the given measured current values in a convertor station to dimensionalize battery capacity. Battery dimensionalizing will take into consideration, the frequent occurring power peak in the convertor station and how a battery installation would contribute in reduction of the power peaks, this phenomenon is also known as peak shaving.

The first method that is used in this dissertation is to examine and analyze the load over the convertor station in Excel. As Excel was the recommended method for this thesis, several mathematical functions, graphical illustration and formulas in excel were utilized to obtain a satisfactory value for battery capacity.

Furthermore, a simulation program Power factory is used to simulate a model of train network line, convertor stations and battery. The purpose of this simulation is an attempt to utilize the battery capacity that was obtained from the excel analysen in a simulation to observe a realistic picture of battery influence in a train network.

After obtaining results of the simulations from several case scenarios, it became evident that a battery installation would be a wise decision for peak shaving in a convertor station to achieve desired power offloading. However, it is primitive to consider an adequate size for battery capacity and other important battery parameters like discharging power, in order to achieve desired results based on different scenarios. Such battery installation would compensate for power peak occurrence and also maintain current and voltage value in the network within desired limits.

Forord

Denne rapporten er skrevet som en del av den avsluttende hovedoppgaven på bachelorstudiet elektro med fordypning i elkraft ved NTNU i Gjøvik våren 2019. Medlemmene i gruppen er Armeen Ali og Stian Larsen Varlid. Arbeidet med denne hovedoppgaven ble påbegynt 12.januar 2018 og levert 20.mai 2018, og er utført for og i samarbeid med Bane Nor.

Gruppen har gjennom samarbeid med Bane Nor fått god hjelp og veiledning til å utføre denne oppgaven. Grappa har fått god hjelp av dette og besvarelser og tilbakemeldinger fra veileder har også hjulpet mye med god forståelse av det teoretiske.


Vi vil benytte anledningen til å takke vår oppdragsgiver Øyvind Gebhardt og vår veileder Trond Leiv Toftewaag ved NTNU i Trondheim, for deres bidrag og hjelp som gjorde det mulig for grappa å skrive en relevant og aktuell bacheloroppgave.

Gjøvik, 20.05.19

Sted, Dato



Ali Armeen



Stian Larsen Varlid

Innholdsfortegnelse

1	Innledning	1
1.1	Bakgrunn.....	2
1.2	Mål.....	2
1.3	Avgrensninger	3
1.4	Rapportens struktur	3
2	Systembeskrivelse	4
2.1	Omformerstasjon.....	4
2.1.1	Omformerstasjon med roterende omformer	5
2.1.2	Omformerstasjon med statisk omformer.....	5
2.2	Transformatorstasjon.....	6
2.3	Effektflyt i linje.....	6
2.3.1	Spendingenes fasevinkler.....	6
3	Dimensjonering av batteri	7
3.1	Excel data analyse I.....	7
3.2	Excel data analyse II.....	8
3.3	Resultater Excel data analyse enfase	9
3.4	Resultater Excel data analyse trefase.....	9
4	Grunnleggende om batteriteknologi	10
4.1.1	Batterikapasitet.....	10
4.1.2	State of charge (SOC) og C-rate.....	11
4.1.3	Batteri degradering og effekt.....	11
4.1.4	Litium-ion batteri	13
4.1.5	Flytbatteri	14
4.1.6	Blybatteri.....	15
5	Simuleringsmodell	17
5.1	Beskrivelse av simuleringsmodell.....	17
5.2	Batteri modellering.....	18
5.2.1	Batterimodell	18
5.2.2	Kontrollsystem.....	19
5.2.3	Last modellering.....	23
5.3	Modell avgrensninger	24
6	Resultater	25
6.1	Case 1: Med konstant last.....	25
6.1.1	Med lav konstant last	25

6.1.2	Med høy konstant last.....	27
6.2	<i>Case 2: Simulering med last i tidsserie</i>	<i>30</i>
6.2.1	Uten batteri.....	31
6.2.2	Med batteri	34
6.3	<i>Case 3 - Batteri med ulike ladeeffekter.....</i>	<i>39</i>
6.3.1	6 MW ladeeffekt.....	39
6.3.2	8 MW ladeeffekt.....	41
6.4	<i>Case 4 - Overliggende nett faller ut.....</i>	<i>43</i>
6.4.1	Uten batteri.....	43
6.4.2	Med batteri	46
7	Diskusjon og anbefalinger	49
8	Konklusjon	51
9	Videre arbeid.....	53
	Vedlegg.....	59

Figurliste

Figur	Figurtekst	Side
1	Roterende omformer	4
2	Statisk omformer	5
3	Utklipp av fra Excel data analyse II. Grå: Effekt ut av Leivoll omformerstasjon, Blå: lade-effekten til batteriet, Rød: Energi lagret i batteriet.	9
4	DOD og batteri syklus.	12
5	Batteri container	13
6	Prinsipiell operasjon av et flytbatteri	14
7	Batteri peak shaving	16
8	Skisse av simuleringsmodell fra Dlgilent Power factory	18
9	Enkel modell av batteri kontrollsystem.	19
10	Variabler og parametere i kontrollsystemet	20
11	Ønsket respons av kontrollsystemet	21
12	Case 6.1.1, Aktiv effekt i batteri og state of charge med lav konstant last	26
13	Case 6.1.1, Aktiv effekt gjennom linje seks med lav konstant last	26
14	Case 6.1.1, Spenningen og strømmen gjennom linje seks	27
15	Case 6.1.2, aktiv effekt i batteriet og state of charge med høy konstant last	28

16	Case 6.1.2, aktiv effekt i linje seks med høy konstant last. Ved punkt 47:58 er batteriet utladet, og effekten i linjen stiger betraktelig.	29
17	Case 6.1.2: Spenning og strøm gjennom linje seks med høy konstant last	30
18	Case 6.2.1, last i tidsserie i 1 time	31
19	Case 6.2.1, aktiv effekt i linje seks over en time. Uten batteri	32
20	Case 6.2.1, Spenning og strøm gjennom linje seks. Uten batteri	33
21	Case 6.2.1, spenning over Tog 2 uten batteri	34
22	Case 6.2.2, Aktiv effekt gjennom linje seks, med batteri.	35
23	Case 6.2.2, aktiv effekt i batteri og state of charge i prosent. Negativ aktiv effekt i batteriet indikerer at batteriet lader.	36
24	Case 6.2.2, spenning og strøm gjennom linje seks med tidsserie last	37
25	Case 6.2.2, P_Mesured med Pstartfeed (batteriet leverer) og Pstartstore (batteriet lader), Aktiv effekt i batteri og state of charge.	38
26	Case 6.3.1, spenning og strøm gjennom linje seks med 6 MW ladeeffekt.	39
27	Case 6.3.1, aktiv effekt i batteriet og state of charge	40
28	Case 6.3.1, aktiv effekt gjennom linje seks med 6 MW ladeeffekt.	41
29	Case 6.3.2, strøm og spenning gjennom linje seks. 8 MW ladeeffekt.	42
30	Case 6.3.2, aktiv effekt i batteri og state of charge. 8 MW ladeeffekt.	42
31	Case 6.4.1, aktiv effekt levert av trafoene (omformere). Uten batteri	46
32	Case 6.4.1, aktiv effekt gjennom linje seks. Uten batteri	44
33	Case 6.4.1, Spenning og strøm gjennom linje seks. Uten batteri	45

34	Case 6.4.2, Aktiv effekt gjennom line seks. Med batteri	46
35	Case 6.4.2, Spenning og strøm gjennom linje seks. Med batteri	47
36	Case 6.4.2, Batteriets state of charge I prosent	48

Tabelliste

Tabell	Tabelltekst	Side
1	Effekt operatører som blir brukt til koding av kontrollsystem	21
2	Energioperatører som blir brukt til koding av kontrollsystemet	22
3	Konstant strøm, konstant effekt og konstant impedans koeffisienter	24

1 Innledning

Som eier av den norske jernbaneinfrastrukturen, har Bane NOR ansvaret for at denne holdes vedlike, driftes og bygges ut etter behov [5]. Med økende trafikk på jernbanen skaper dette problemer med å levere nok effekt ut til togene og spesielt når flere tog akselererer samtidig. Det forekommer at omformerstasjoner som forklart videre i kapittel 2, leverer energi ut på jernbanenettet blir så overbelastet at vernet som beskytter de slår ut. Dette er ikke optimalt for verken passasjerer eller Bane NOR når tidsskjemaet og punktligheten for togene skal holdes.

På bakgrunn av dette ønsker Bane NOR å undersøke om et batterianlegg i omformerstasjonene kan være en løsning på problemet. Denne oppgaven vil derfor se nærmere på om et slikt batterianlegg kan ta seg av de høye effekttopper og reduserer disse effekttopene (peak shaving) når omformerstasjonene ikke klarer å levere mer energi. I tillegg ønsker Bane NOR en kartlegging av batteriets størrelse og hvilke forbedringer det kan ha på det eksisterende anlegget under forskjellige driftssituasjoner.

1.1 Bakgrunn

Bane NOR har gjort strømmålinger på Leivoll omformerstasjon på Sørlandsbanen for å kartlegge forbruket. Det er disse målingene som har blitt brukt som et utgangspunkt i denne rapporten for å kunne dimensjonere et batterianlegg. Bane NOR er interessert i å finne ut hvilken innvirkning et batterianlegg kan ha på omformerstasjonen. Periodene hvor den høye etterspørselen av energi kreves er varierende, og vanskelig å forutse. Men å oppgradere eller bygge nye omformerstasjoner er kostbart, og tanken er at batterianlegget skal ta seg av de korte periodene med høy etterspørsel. [2]

Bane NOR har følgende overordnede krav om energiforsyning og banestrømforsyning: “Energiforsyningen skal utvikles i tråd med utbygging og utvikling av infrastrukturen og kapasiteten man ønsker å oppnå i denne. Banestrømforsyningen skal være robust og skal ikke være begrensende for togframføring” [1]. Dette er også grunnen til at de ønsker å se nærmere på et batterianlegg.

Oppgaven vil omfatte analyse av målinger mottatt fra Bane NOR gjennom Excel, modellering og simuleringer med tilhørende analyse. Det vil i hovedsak bli sett på systemet med og uten batteri slik at man ser hvilke innvirkninger batterianlegget har. Det vil også bli gjort en vurdering om tiltaket ved å sette inn et batterianlegg er hensiktsmessig basert på verdiene som kommer frem etter analysene.

1.2 Mål

Overordnet mål for oppgaven er å dimensjonere et batterianlegg i en omformerstasjon på jernbanen, for å ta seg av effektoppene som oppstår i perioder med høy togtrafikk.

Delmål:

- Analysere strømmålinger fått av Bane Nor til å finne en tilstrekkelig batterikapasitet.
- Bruke dimensjonert batterikapasitet for simulering i en realistisk modell.
- Teste simuleringsmodellen i ulike driftssituasjoner (case).
- Sammenligne resultater med og uten batterianlegg.

1.3 Avgrensninger

I denne oppgave, ble det lagt stor vekt på stasjonær analyse som videre ble brukt til dynamiske analyser i simuleringen. Disse analysene var nødvendige å foreta for å oppnå målet til oppgaven. I analysene, er det noen faktorer som ikke ble tatt med i oppgave som kunne vært aktuelle. En stor del av oppgaven dreier seg om batteri dynamikken, da er det viktig å få med termiske forhold i et batteri og påvirkninger som disse forholdene medfører. Oppgaven omfatter ikke termiske forhold i batteri og nettet i modellen vist i fig 8. Ettersom oppgaven omfatter et realistisk problem, er ikke linjene og komponenter i nettet ideelle og vil dermed føre til tap. Disse tapene påvirker verdier på faktorer som spenning, og effekt i modellen. Oppgaven tar ikke med seg disse tapene i betraktning. Et annet viktig element som ikke tas hensyn til i denne oppgaven er den økonomiske vurderingen. Prisen på batterianlegget og ladning fra overliggende nett faktorer som bør tas i betraktning. En økonomisk vurdering sammen med taps analyse ville gitt et bedre bilde på om det er økonomisk gunstig å installere et batteri i banestrømforsyningen, eller om det bare kan dras ekstra effekt fra overliggende nett for å kompensere for effekttopper.

1.4 Rapportens struktur

Denne rapporten begynner med innledning, mål og teori for å gi en god oversikt til leseren om det rapporten omfatter. Det gis nødvendige informasjon som trengs for en god forståelse av rapportens innhold. Deretter er det beskrivelse av systemet og modellen som brukes til å utføre oppgaven og få resultater. Disse resultatene diskuteres, og oppgaven avsluttes med en konklusjon.

- Kapittel 1: Innledning, bakgrunn og mål
- Kapittel 2: Systembeskrivelse
- Kapittel 3: Dimensjonering av batteri
- Kapittel 4: Grunnleggende om batteriteknologi
- Kapittel 5: Resultater fra excel analyse og simuleringer.
- Kapittel 6: Diskusjon av resultater
- Kapittel 7: Konklusjon
- Kapittel 8: Videre arbeid
- Vedlegg

2 Systembeskrivelse

2.1 Omformerstasjon

Omformerstasjoner har som oppgave å levere effekt inn til høyspenningsnettet på jernbanen, der hvor togene drives av elektrisitet. Omformerstasjonene er plassert langs jernbanen ved jevne mellomrom, for å gi en stabil tilførsel til togene. Avstanden mellom hver omformerstasjon vil variere fra i forhold til hvilken strekning man er på, men vanligvis ca 2-8 mil.

Ut ifra nettselskapet sitt overliggende kraftnett blir det hentet ut høyspenning på 11-132 KV [3,18], avhengig av hva som ligger tilgjengelig i nærheten. Spenningen fra det overliggende kraftnettet kommer inn til en transformator på omformerstasjonen med tre faser, før det blir transformert ned til 2,5 kilovolt ved statisk omformer og 6,3 kilovolt for roterende omformer. Etter at spenningen har blitt transformert ned til en lavere spenning, går det videre til en trefasemotor på 50 Hz. [3]

På omformerstasjoner hvor det benyttes roterende omformere er denne trefasemotoren mekanisk montert sammen med en generator. På denne måten er det elektriske anlegget til jernbanen og det overliggende nettet adskilt fra hverandre. Det er her frekvensen omgjøres til $16 \frac{2}{3}$ Hz, som er standard frekvensen for den norske jernbanen. Dette blir forklart under avsnittet med roterende omformere. [3]



Figur 1: Roterende omformer [4]

2.1.1 Omformerstasjon med roterende omformer

Det er en roterende omformer på omformerstasjon Leivoll, som blir analysert i oppgaven. En omformerstasjon med roterende omformere, består av en motor og en generator. Det er 3-fase motor med 12 poler med innspenning på 6,3 kV. Til akslingen av motoren, er det koblet en-fase 4 polet generator. Det gjør pol-forholdet til 3:1 og fører til en frekvensomforming fra 50 Hz til $16\frac{2}{3}$ Hz, dette gjøres for å få vinkelforskjell i en-fasenettet dersom 3-fasenett ikke samkjøres. Spenningen transformeres opp til systemspenning på 16-16,5 kV, før den går ut til kontaktledningsnett. Det finnes flere typer og størrelser av roterende omformere, på Leivoll som blir brukt i denne rapporten er det to stk ASEA 5,8 MVA. [3,14]

2.1.2 Omformerstasjon med statisk omformer

Det finnes to type statiske omformere, direkteomformer og mellomledd omformer. I Norge, blir det kun brukt mellomledd omformere. Forskjellen mellom disse omformerne ligger i måten de nedtrapper og omformer frekvensen og spenningen. Direkteomformer gjør 3-fase 50 Hz til en-fase $16\frac{2}{3}$ Hz ved hjelp av tyristorer i kretsen. I Mellomledd omformer, likerettes det 3-fase likespenning igjen til vekselspenning med frekvensen på $16\frac{2}{3}$ Hz. [4]

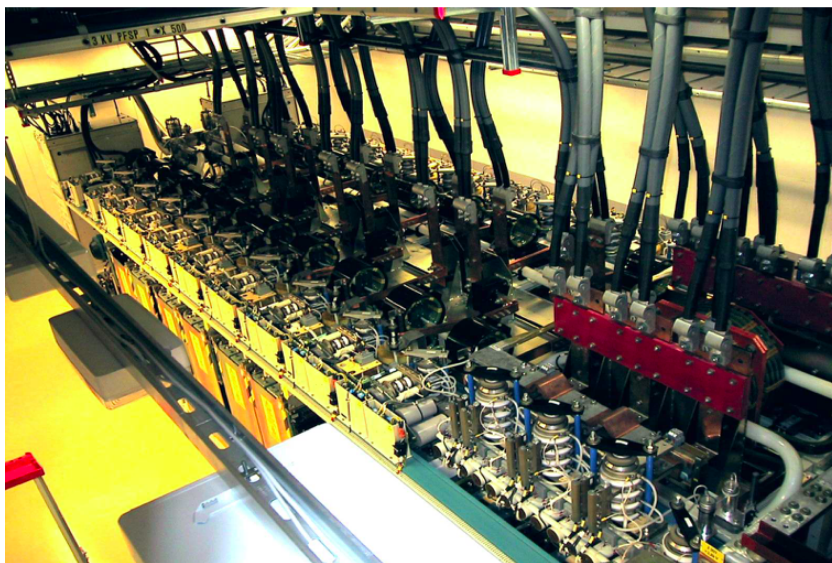


Fig 2: Statisk omformer [4]

2.2 Transformatorstasjon

Transformatorstasjon blir brukt til å transformere spenningen til over 15 kV som mater kontaktledninger. Stasjonen gjør at man kan leverer store effekter over lange strekninger med minst mulig tap. Transformatorstasjonene står på 16 2/3 Hz frekvens og spenning på rundt 16,5 kV normalt. [3]

2.3 Effektflyt i linje

Effektflyt i en samleskinne er avhengig av spenningsforskjeller, fasevinkler. Som vist i likning 1, er effektflyten også avhengig av resistans og reaktans. En omformerstasjon med liten last eller om den går i tomgang, vil omformerstasjonen med lav spenning motta aktiv og reaktiv effekt av andre omformerstasjonen. Omformerstasjonen med høyest spenning vil derfor levere effekt. [6]

2.3.1 Spenningenes fasevinkler

Dersom spenningene over omformerstasjonene er like, er det fasevinkler som årsakes effektflyten. Omformerstasjon med høyre fasevinkelen og ligger derfor foran andre omformerstasjonen [6], skal levere aktiv effekt til andre omformerstasjonen og motta reaktiv effekt. Forskjellen i spenningenes fasevinkler mellom omformerstasjoner skyldes blant annet av polhjulsinkelen.

$$P_A = \frac{R(U_A^2 - U_A \cdot U_B \cdot \cos(\delta_A - \delta_B)) + X \cdot U_A \cdot U_B \cdot \sin(\delta_A - \delta_B)}{R^2 + X^2} \quad (1)$$

$$Q_A = \frac{X(U_A^2 - U_A \cdot U_B \cdot \cos(\delta_A - \delta_B)) - R \cdot U_A \cdot U_B \cdot \sin(\delta_A - \delta_B)}{R^2 + X^2} \quad (2)$$

3 Dimensjonering av batteri

3.1 Excel data analyse I

Excel analyse I er et regneark basert på strømmålinger levert av Bane NOR. Målingene kommer fra Leivoll omformerstasjon, hvor et instrument har loggført strømforbruket ut fra omformerstasjonen over en periode. Strømmålingene er registrert med et mellomrom på tre sekunder. Datasettet med målinger som ble brukt under analyse I er på 5003 målinger, slik at dette tilsvarer ca. 4 timer med målinger.

Regnearket ble satt opp som vist i vedlegg A.1, hvor strømmålingen fra Leivoll og spenningen på 16,5 kilovolt er kjente. Det er laget et eget oppsett for variablene; maks ladeeffekt, maks batterikapasitet og energi i batteriet ved start grense for ladning. Slik at om det endres på de parameterne, endrer det seg over alt i Excel arket ved hjelp av formler. I og med at strømmålingene varierer fra hver måling, regner Excel ut energi som er lagret i batteriet ved hver linje i arket. Ved å lage en graf med parametere effekt ut, lade-effekt og energi i batteriet, kan det fås en grafisk oversikt over batteriets status under hele perioden. På denne måten kan det varieres på ladestrømmen, batteriets størrelse og grense for ladning får å se at hvilke verdier som gjør at batteri energi ikke går i null.

$$\text{Effekt ut } P = V \cdot I \quad (3)$$

Effekt ut ble regnet som vist i formel (3). Spenningen er satt til 16,5 kilovolt, mens strømmen er hentet fra målingene gjort på Leivoll omformerstasjon.

$$\text{Effekt ut i 3 sek} = P \cdot \frac{3}{3600} \quad (4)$$

Effekt ut ble beregnet ved hjelp av formel (4). Effekten ut avhenger av tid (MWh), grunnen til dette er fordi strømdata ble gitt i et intervall på 3 sek, effekt verdiene må også da tilsvare det intervallet.

$$\text{Lade-energi} = \text{lade-effekt} \cdot \frac{3}{3600} \quad (5)$$

Lade-energi er regnet ut ifra formen (10). Lade-effekt er en variabel i eget oppsett, slik at denne settes manuelt. Det er multiplisert med tre, og dividert på 3600 slik at verdien kommer ut i MWh.

$$\text{Energi i batteriet} = \text{energi i batteri fra forrige intervallet} + \text{lade-energi} - \text{energi ut} \quad (6)$$

Energien i batteriet ble beregnet ved hjelp av formel (6). Energien i batteriet avhenger av verdien fra linjen over i Excel arket, minus energien ut. Lade-energien vil også adderes dersom effekten ut er større enn variabel grense for ladning. Denne er lagt inn for at batteriet ikke skal lade dersom forbruket fra togene er for høyt.

3.1.1 Excel data analyse II

Excel data analyse II ble laget som en utvidelse av versjon I, slik at oppsettet er helt likt. Strømmålingen som ble benyttet i Analyse nummer II kommer også fra Leivoll omformerstasjon, men målingene består av 604 800 strømverdier. Dette tilsvarer en periode på 3 uker.

$$\text{Lade-effekt: } ((\text{Maks batterikapasitet} - \text{Energi i batteri}) / (\text{Maks Batterikapasitet} - \text{ladeknekkpunkt})) * \text{Maks lade-effekt} \quad (7)$$

I tillegg til at antall målinger ble utvidet, ble det også lagt inn en funksjon “ladeknekkpunkt”, vist i formel (7). Funksjonen ble laget for å unngå hurtige inn og utkobling av ladning på batteriet. Ved å variere på variabelen ladeknekkpunkt, kan man endre på når batteriet skal lade med mindre energi. Dette gir en jevnere ladning når batteriet nærmer seg fulladet, samtidig som kurvene blir mer oversiktlig.

3.2 Resultater Excel data analyse enfase

Analysen utført i Excel blir en ren matematisk modell, slik at dette vil kun gi en indikering på hvilken størrelse et batteri må ha. Analysen viser at et batteri på 2,5 MWh med 2,5 MW ladeeffekt er nok til at batteriet ikke går tomt. Grense for ladning er da satt til 3 MW, ladeknekkpunkt 2 MW og energi i batteriet ved start 1,25 MWh.

Denne analysen gir et godt bilde av situasjonen, i fig 3, vises det at når effekt ut fra omformerstasjonen økes drastisk som representeres av de grå effekttoppene, fører det til forminskning av energi i batteriet, dette også viser at likningen 5 som ble brukt i Excel arket, gir meningsfylt resultat og illustrerer at batteri oppførselen virker som ønsket. Det vises også at under måling 436153, går den røde kurven nesten på null som representerer at batteriet er tom for energi selv om tilsvarende effekttoppen ikke er på det høyeste. Det forårsaker flere effekttopper i det intervallet som oppstår dermed får ikke batteriet muligheten til å oppladdes. Batterikapasiteten som ble beregnet på 2,5 MWh med ladeeffekt på 2,5 MW, kan være et fornuftig valg fordi det kan sees at batterienergi synker aldri under null for alle målinger i hele intervallet og vil derfor kunne bidra til reduksjon av effekttopper. Excel datatabell som ble brukt til å få kurvene i fig 3 er vist i vedlegg A.2. Disse resultatene brukes videre i kapittel 6 til å simulere en modell som er beskrevet i kapittel 5.1.

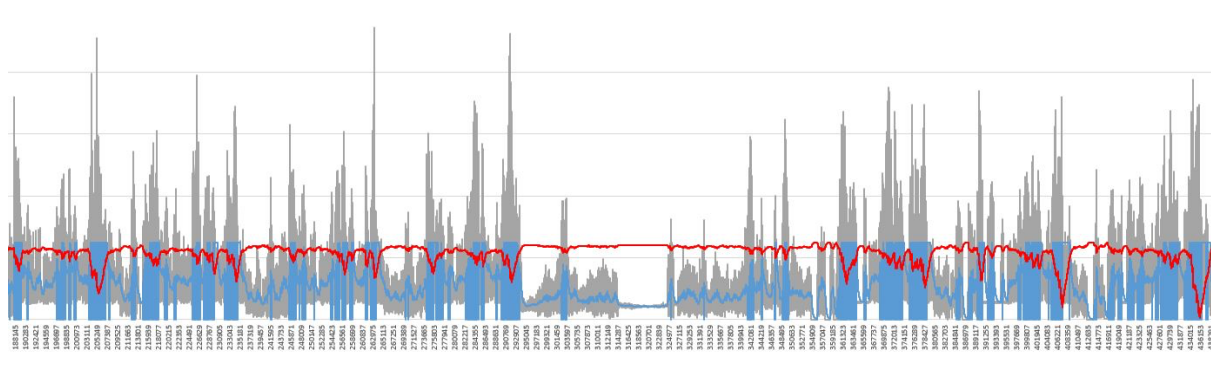


Fig 3. Utklipp av fra Excel data analyse II. Grå: Effekt ut av Leivoll omformerstasjon, Blå: lade-effekten til batteriet, Rød: Energi lagret i batteriet.

3.2.1 Resultater Excel data analyse trefase

Simuleringsmodellen som beskrevet i kapittel 5, ble laget i trefase og årsaken til det forklares i detalj under modell avgrensninger i 5.3. Modellen blir laget ut ifra effekt belastningen som vist i fig 3. Det tas verdier for effekt ut på en time ut ifra verdiene vist i fig 3. Disse effekt

verdiene brukes også senere som tog last i tidsserie i kapittel 6.2. På grunn av trefase modelleringen, måtte last verdiene i tidsserien ganges med en faktor på roten av 3. Det trengs dermed en ny dimensjonering for batterikapasitet som kompensasjon for denne økningen. Som vedlegg A.7 viser, dersom det settes batterikapasiteten på 4 MWh med ladeeffekt på 4 MW, går ikke energi i batteriet under null, derfor kan denne dimensjoneringen være fornuftig. Denne verdien for batterikapasitet skal bli videre brukt til simuleringen av modellen i kapittel 6. Det kan bemerkes at resultat i trefase data analyse er større enn resultater som ble fått i enfase analysen med faktor på cirka roten av 3 som en ville tro, på grunn av overgangen fra enfase til trefase.

4 Grunnleggende om batteriteknologi

Det er ulike teknologier som har evnen til å lagre energi, men i denne oppgaven skal det kun fokuseres på elektrokjemisk lagring i batterier. Elektrokjemiske batterier kan fordeles i to kategorier, primære og sekundære batterier. Primære batterier er ikke ladbare og kan kun brukes en gang, på andre siden, kan sekundære batterier lades opp når de går tom ved hjelp av en ekstern strømkilde som kobles til battericeller. Det skal kun diskuteres sekundære batterier i rapporten.

Hovedfunksjonen til sekundære batterier er å konvertere kjemisk energi til elektrisk energi. Det finnes ulike type batterier, i oppgaven, har hovedfokus vært på oppladbare batterier. Oppladbare batterier består av to ulike metaller i begge endene. Disse endene kalles for elektroder. Positive ioner overføres fra positive elektroden til negative elektroden. Det dannes potensial differanse mellom elektrodene som gjør at ioner går fra høyere potensial til lavere ved hjelp av kjemisk reaksjon som kalles for Redoksreaksjon. Det brukes også en kjemisk væske i batterier som brukes som et medium for disse reaksjonene. Det brukes en ledende metallkabel som kobler mellom endene som fullfører kretsen. [10]

4.1.1 Batterikapasitet

Batterikapasitet er en parameter når det gjelder batterier. Batterikapasitet blir målt i ampere-timer (Ah). Kapasiteten viser strømmer som et batteri kan levere når det lades ut over en

tidsperiode på nominell spenning. Det betyr at kapasitet ladningen som blir målt over et tidsintervall som illustrert i formel 8. Q er kapasiteten under utladningen, I er strømmen som leverer over en tidsperiode fra t_1 til t_2 . [34]

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I dt \quad (8).$$

4.1.2 State of charge (SOC) og C-rate

SOC er mål på energien som er tilgjengelig og forteller om kapasiteten i batteriet [9]. SOC måles i prosent (%) som vist i formel (9).

$$SOC = \left(1 - \frac{Q}{Q_{rated}}\right) \cdot 100\% \quad (9)$$

Q står for batterikapasitet og Q_{rated} er nominell batterikapasitet. 100% SOC betyr fullt ladet batteriet og SOC er på 0% når batteriet er tomt. [11]

C-rated i et batteri kan defineres som hastighet eller rate batteriet lader seg opp eller lader seg ut på, relativt i maksimal kapasitet. Likningen (10) viser uttrykket for C-rate hvor I står for strømmen og Q_{rated} er merkekapasiteten.

$$C = I / Q_{rated} \quad (10)$$

Batterikapasitet har en verdi på 1C til vanlig, det betyr at et fullt ladet batteri kan levere 1A i en time. På samme måte, dersom samme batteri utlades på 0.5C, skal det levere 500mA i 2 timer. Paukert's effekt som vist i likning (11) er også et viktig fenomen som forklarer at oppladning og utladning på et C-rate på høye strømmen, resulterer i lavere kapasitet i battericelle i forhold til samme batteri celle som blir utladet med lavere strøm. I likning (11), er k paukerts eksponent. På grunn av denne sammenhengen, er det viktig å definere denne relasjonen når det gjelder C-rate.

$$Q = (Q_{rated} \cdot I_{rated} / I)^{k-1} \quad (11)$$

4.1.3 Batteri degradering og effekt

Batteri degradering kan deles opp i to deler, kalender aldring og aldrings-syklus. Kalender aldring tilsvarer proporsjon av kapasiteten som går tapt under lagringsprosessen i batteriet. Aldringen-syklus er degraderingen som skjer på grunn av oppladning og utladning av

batteriet, faktorer som temperatur betingelser og strøm solidifisering minsker batteriyttelse gradvis. Degraderingen i elektrokjemiske stoffer i batteriet viderefører til minsket effektivitet. Alle disse faktorene resulterer i temperaturøkning i batteriet, mindre lagringskapasitet, høy indre motstand, lav spenning og selvutladning. Selvutladning er et fenomen som skjer når et batteri er inaktivt, altså en åpen-krets tilfelle. Dette fører til sakte utladning som også kalles for selvutladning. Selvutladning oppførselen av batteriet er ulik i forskjellige batterityper. [12]

Batteri livssyklus er antall ganger batteriet blir brukt i løpet av sin levetid før batteriets merkekapasitet blir under 80% av den opprinnelige. Det mange faktorer som spiller en rolle i levetiden til batterier, faktorer som høy C-rate minsker levetiden. Degradering blir også påvirket av DOD (depth of discharge). DOD indikerer kapasitet som har blitt utladet ut av det hele. En høy DOD kan føre til økt degradering og lavere livssyklus i batteriet [13]. Det er derfor anbefalt å operere batterier i forhold til SOC grenser, SOC_{MAX} og SOC_{MIN} Et litium-ion-batteri opereres normalt i 80% DOD, mellom 10% og 90% SOC. Fig 4, viser forholdet mellom DOD og batteriets sykluser.

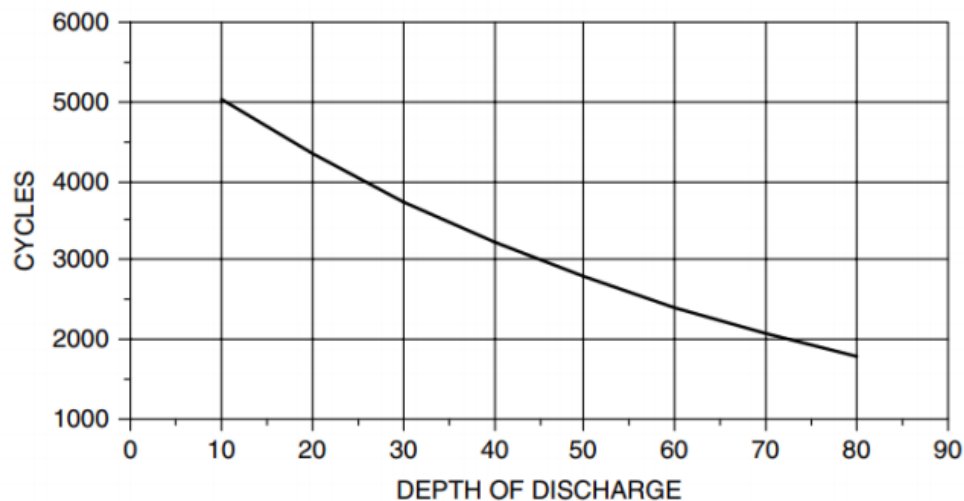


Fig 4. DOD og batteri syklus. [13]

Batterieffekt kan beregnes som produkt av strøm og spenning som vist i likning (3). Effekten i et batteri er avhengig av C-rate og spenning. Batterier som blir brukt i elbiler, blir ofte spesifisert med spesifikk-effekt i effekt per kilogram. I Batteriene i større anlegg, er spesifikk-effekt ikke relevant. [15]

Et batteri leverer DC strøm og det kreves derfor en konverter i batterianlegget for å kunne levere AC effekt. Konverter har som hovedoppgave å likerette og invertere strømmen som blir levert. Dette skal ikke fokuseres på i denne rapporten.

4.1.4 Litium-ion batteri

Litium-ion batterier kommer i ulike pakninger og størrelser, men oppbyggingen er lik i alle. Batteriet består av en positiv elektrode, negativ elektrode og et skille [33]. Det brukes en organisk løsning som elektrolytt. En elektrolytt er en løsning med frie bevegelige ioner og derfor elektriske ledende. Elektrolytter når løst i vann, danner positive og negative ioner som besørger elektrisitetens transporten [12]. Det blir også brukt et tynt skille lag som separerer positive og negative elektrodene og tillater ioner til å passere. Et eksempel på elektrodetype er litium koboltoksid som positive elektrodene og karbon som negative elektrodene. Når batteriet lades opp, beveger litium ioner gjennom elektrolytten til karbonelektroden. Under utladningen, beveger litium tilbake til litium koboltoksid elektrodene. [30,15]

Det er flere fordeler ved bruk av litium-ion batteri som lav selvutladning og lavt vedlikehold. De fleste batteri variantene med høy batterikapasitet er litium-ion batteriet, dette gjør dem til å være et fornuftig valg i jernbanenettet. [20,32]

Fig 5 viser en batteri container som kunne vært et eksempel på hvordan et litium-ion batteri på et effektstøtteanlegg ser ut som.



Fig 5. Batteri container. [16]

4.1.5 Flytbatteri

Et flytbatteri er ny batteriteknologi, det brukes elektrolytt som består av forskjellige elektroaktive stoffer som befinner seg i battericellene. Disse stoffene flyter fritt i battericellene og konverterer kjemisk energi om til elektrisk energi. Batteriet har to store eksterne tanker fylt med elektrolytt. Ved hjelp av to pumper, sirkulerer elektro-kjemiske stoffer rundt i battericellene. Den kjemiske reaksjonen som oppstår i battericellene er reversibel, noe som tillater oppladning og utladning i batteriet. Ved oppladning fører den elektriske kilden til en redusert reaksjon i den ene elektrolytten, og oksidert reaksjon i den andre [34]. Det finnes en membran i cellen som hindrer blanding av elektrolyttene men tillater noen valgte ioner til å passere gjennom for å fullføre redoksreaksjonen. Ved utladningen, skjer det revers reaksjonen og energien leveres fra elektrodene. Flytbatteri skiller seg ut fra andre konvensjonelle batterier ved teknologien som gjør det uavhengig av lagringskapasitet i elektrolytten og merkeeffekt av battericeller. Energi i et flytbatteri er avhengig av tankkapasitet og aktivt området der reaksjonen oppstår, denne egenskapen gjør dette til et godt valg til å bli brukt i et stasjonært elektrisk nett med god tilgjengelighet av areal.

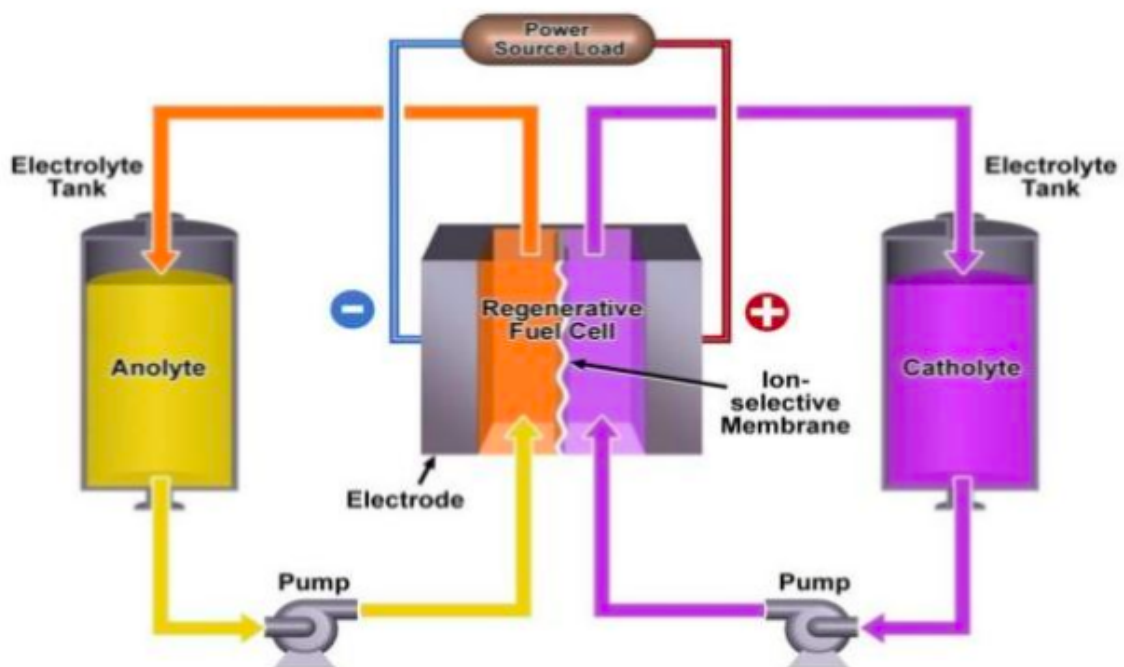


Fig 6. Prinsipiell operasjon av et flytbatteri [8]

Denne batteriteknologier er ny, men den får popularitet i elkraft sammenheng. Problemet ved bruk av andre batteriteknologier i elektriske nett er batteriet kapasitet og merke effekt. Ved flytbatteri blir det lenger ikke et problem siden batterikapasiteten som tidligere nevnt er avhengig av tankkapasitet og aktivt areal i cellene som kan lettere økes i et elektrisk nett. Det tillater dermed dimensjonering av flytbatteriets størrelse, respektivt. Ved peak shaving som et eksempel, kan det lett dimensjoneres riktig merke effekt og tank størrelse som tilpasser ønsket kapasitet. [18,19]

Batteri degradering som ble nevnt i delkapittel 4.1.3 er en faktor som spiller en stor rolle i batteriets livsløp. Ved bruk av flytbatteri, kan det reduseres på en stor grad og dermed økes levetiden i batteriet. Det brukes ikke solide elektroder i et flytbatteri som unngår degraderingen. Batteriet kan bli brukt på fullt DOD og kapasitet uten at de reduseres, ved økning i utladning, reduseres ikke levetiden og derfor kan et flytbatteri ha et livsløp med 20 år mer enn andre batteriteknologier. En annen fordel med et flytbatteri er funksjonen av pumpe som styres manuelt. Ved temperaturøkning og andre feil som skulle oppstå, kan pumpene stoppes og dermed redusere farlige og kostbare skader. [21]

4.1.6 Blybatteri

Blybatteri ble oppfunnet i 1859 og har blitt mest i mange hundre år til ulike oppgaver. I oppbyggingen, består et blybatteri av en blyoksid katode, et metall blyoksid anode og en svovelsyre løsning som elektrolytt. Disse komponenter gjør kjemisk energi til elektrisk energi. Reaksjoner i et blybatteri er reversible som også gjør at batteriet kan lades opp og utlades. ved utladningen, reageres elektrodene med elektrolytten som danner blyulfat, vann og energi. ved oppladningen, reverseres prosessen ved hjelp av en ekstern strømkilde. [7]

Etter ulike applikasjoner av blybatteri i disse 150 årene etter oppfinnelsen, er ikke blybatteri den beste kandidaten til å bruke i kraftnett. Blybatterier har lave livsløp og blir typisk brukt i under 50% DOD og tilbyr kun 1000 sykluser [20]. Blybatteri kapasitet er avhengig av temperatur og batterikapasiteten minskes drastiske i lave temperaturer under 0 grader. Land med kaldt klima som det er i Norge, finnes det andre batteriteknologier som blir mer aktuelle

enn blybatterier. Kostbarheten er en av største grunnene til at blybatterier blir prioritert over alle andre ettersom de er billigere og har lavere operative kostnader. [22]

4.2 Peak Shaving

Peak shaving innebærer at høyt effektforbruk som fører til effekttopper, kan klippes eller kompenseres ved hjelp av et batteri. Når det oppstår effekttopper i en omformerstasjon som Leivoll, etter en viss grense av effektforbruk, dersom effektbehovet fremdeles økes, begynner batteriet å lade ut og levere effekt slik at det jernbanenettet ikke blir overbelastet. Denne teknikken brukes av fabrikker og industrier med høyt effektbruk som en metode for å synke økonomiske kostnader [17]. Under en situasjon med effekttopper, kreves det ekstra effekt som går utover grensen til industrier for effektforbruk. [26]

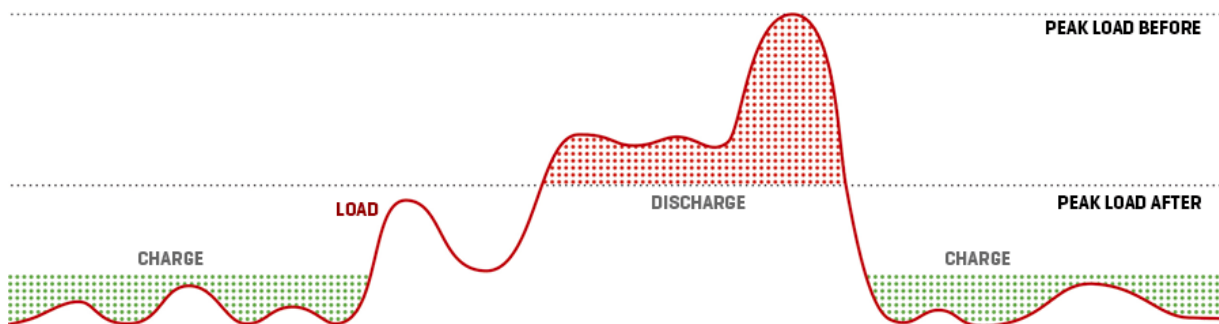


Fig 7. Batteries peak shaving [27]

Fig 7 illustrerer hovedprinsippet peak shaving fungerer på. Som vist, lader batteriet seg opp når belastningen ikke er for stor eller over grensen. Batteriet begynner å lade seg ut når belastningen øker drastisk som vist i det røde skraverte området i figuren. Etter peak shaving prosessen, synkes belastningen og batteriet begynner å lade seg opp igjen. Det er dette fenomenet som i utgangspunktet ble tatt som en mulig løsning til å redusere belastningen på jernbanenettet.

5 Simuleringsmodell

Til å simulere en modell til å illustrere peak shaving, ble det brukt DIgSILENT Power Factory [30]. Ved å sette opp ulike driftssituasjoner (case) ble det utført simuleringer for å teste påvirkning av et batterianlegg i jernbanenettet. Programvaren er var svært avansert, og krevde dermed lang tid til å forstå ulike funksjoner og simulatorer i programmet. For å kunne ha en realistisk modell, ble det brukt realistiske verdier målt vist i fig 3 over omformerne som ble satt inn som tog belastning i en tidsserie. Denne programvaren var et aktuelt valg for en slik simulering på grunn av simulerings muligheter som tillater fleksibilitet i innsetting av batteri parametere som for eksempel aktiveringsgrenser, ladeeffekt og energikapasitet.

5.1 Beskrivelse av simuleringsmodell

Fig 8 viser kretsen som har blitt simulert gjennom DIgSILENT Power factory. Skissen skal forestille en jernbanestrekning med tre omformerstasjoner etter hverandre, hvor omformerstasjon 2 (i midten) er utstyrt med et batteri for peak shaving. Omformerstasjonene er uthevet med rød stiplede firkanter, og har hvert sitt overliggende nett. Ut ifra omformerstasjonene går linje 5, 6 og 7 tilkoblet terminal 1,2 og 3. Terminalene skal illustrere skille mellom der tilførselskablene går over i kontaktledningen på jernbanen. Linje 1, 2, 3 og 4 er selve kontaktledningen som er i kontakt med pantografen på toget. Selve togene er simulert som last med navn "Tog 1" og "Tog 2".

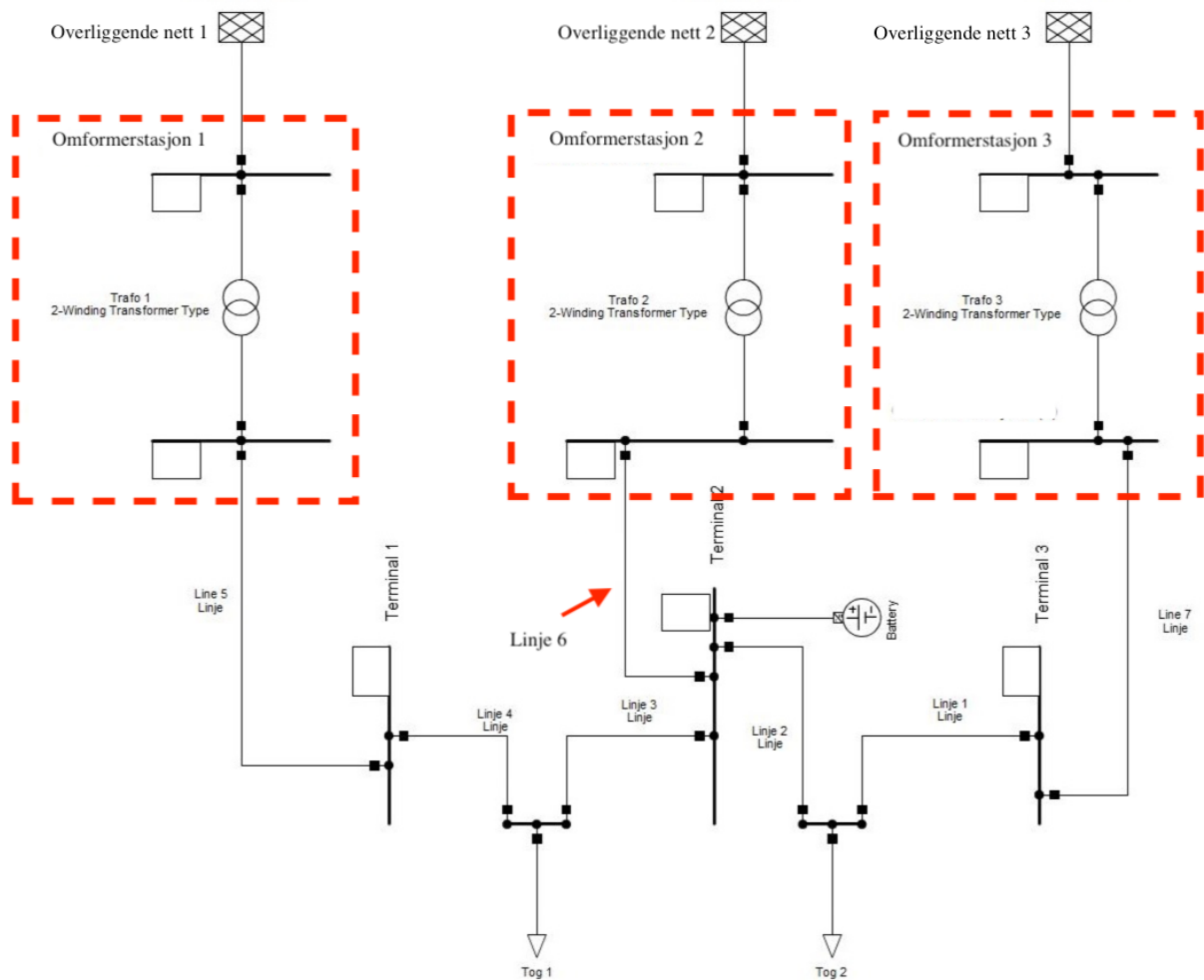


Fig 8. Skisse av simuleringsmodell fra DIgSILENT Power factory

5.2 Batteri modellering

5.2.1 Batterimodell

Etter Excel data analyser og dimensjonering av batteriet, ble det laget en simuleringsmodell som en metode for å teste påvirkning av et installert batteri på en omformerstasjon. Det ble brukt Power Factory simuleringsprogram til å modellere batteriet mellom to omformerstasjoner som vist i fig 8.

I modellen, skal batteriet installeres mellom to omformerstasjoner som mater to tog. I tillegg, skal det brukes kontroll systemer fra Power Factory som tillater batteriets funksjon på en realistisk måte. I kontrollsystemet skal dataene lagres og modellen skal programmeres slik at batteriet utlades når effekten som trekkes av omformerne når en viss grense, innsettingen av grensene forklares senere i kapittelet.

5.2.2 Kontrollsystem

Modellen for kontrollsystemet ble brukt som beskrevet i Powerfactory manualen. På grunn av ingen forkunnskaper om programmet og begrensninger av tid, ble det ikke lagd eget kontrollsystem. Batteri kontrollsystemet består i utgangspunktet av PV system, belastning og en tilkobling til nett-kilden [25]. Batteriet kontrollsystemet skal bli kontrollert av testingen til simuleringen når modellen skal bli kjørt med og uten batteri i kapittelet med diskusjon av resultater og ulike tilfeller.

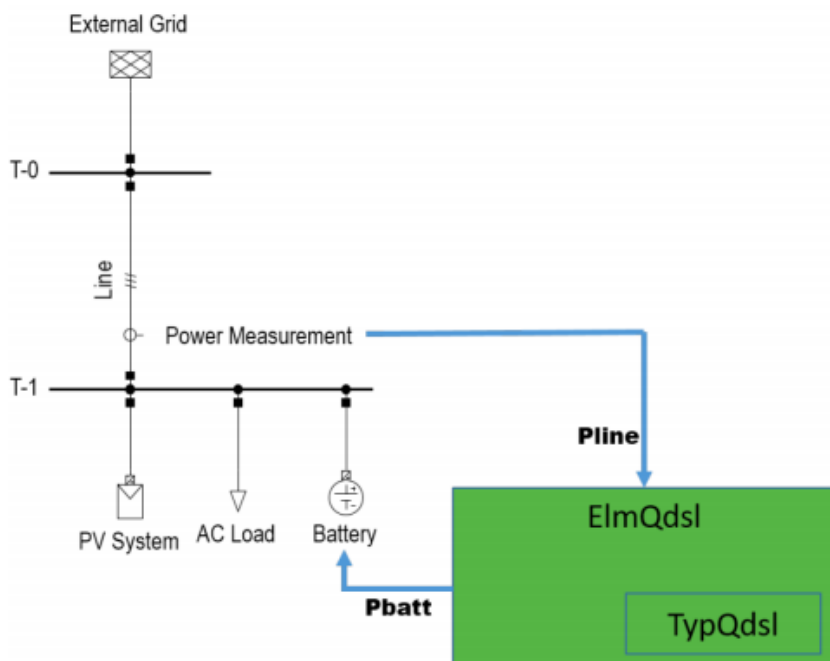


Fig 9. Enkel modell av batteri kontrollsystem. [25]

Name	Unit	Description
SOC	%	State of charge
Eini	MWh	Storage Energy Size
SOCini	%	Initial state of charge
SOCmin	%	Minimal state of charge
SOCmax	%	Maximal state of charge
Pstore	MW	Nominal storing active power
Qstore	Mvar	Nominal storing reactive power
PFullStore	MW	Power to store at full power
PStartStore	MW	Power to start storing
Pfeed	MW	Nominal feeding active power
Qfeed	Mvar	Nominal feeding reactive power
PStartFeed	MW	Power to start feeding
PFullFeed	MW	Power to feed at full power
orientation		1=terminal j i closest, otherwise -1

Fig 10. Variabler og parametere i kontrollsystemet.

Som vist i tabellen i fig 10, er det parametere brukt til peak shaving batteri simuleringen. Kontrollsystemet er avhengig av effektmålinger over omformerne, $P_{Measured}$ og effekt over PV systemet. $P_{Measured}$ er positiv dersom effekten som PV genererer er større enn det som belastningen forbruker og derfor opplades batteriet. På samme måten, blir $P_{Measured}$ negativ hvis PV leverer mindre effekt enn det som forbrukes av belastningen og det fører til at batteriet lades ut. Dette reduserer effekten som trekkes av overliggende nettet og omformerne som resulterer i minsket $P_{batteri}$ og P_{line} som vist i formelen (12). [25]

$$P_{PV} + P_{load} = P_{line} - P_{battery} = P_{Measured} \quad (12)$$

Det blir brukt to grense parametere for å unngå hurtige oscillasjoner mellom oppladning og utladning. $P_{Measured}$ må derfor nå en spesifikk verdi $P_{startfeed}$ for å kunne utlade og den må nå en spesifikk grense verdi $P_{startstore}$ for å kunne lade seg opp. Batteriet vil holde seg inaktivt for $P_{Measured}$ verdier mellom $P_{startfeed}$ og $P_{startstore}$.

$$- P_{StartFeed} \leq P_{Measured} \leq P_{startStore}$$

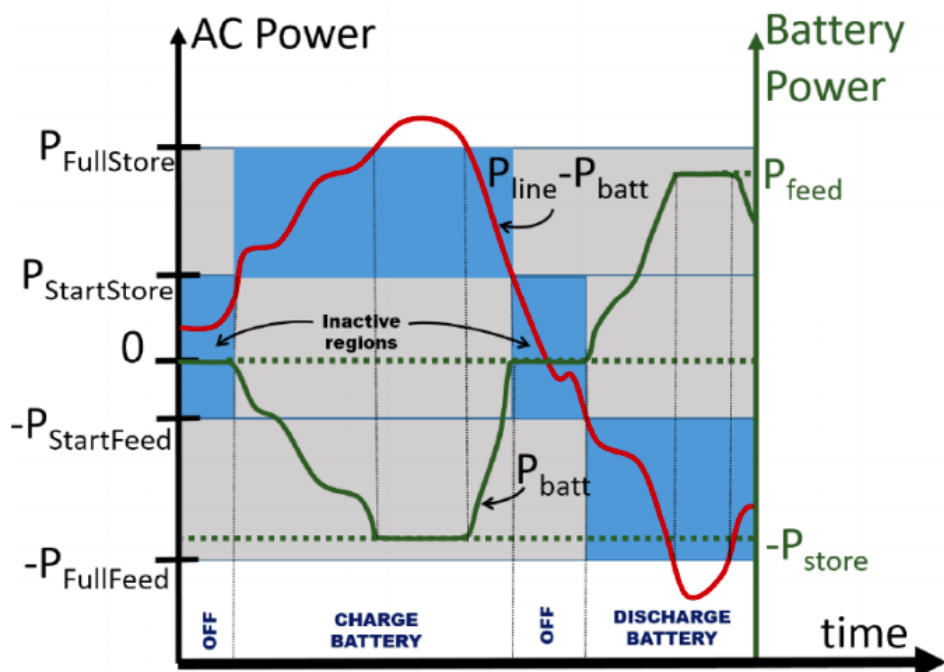


Fig 11. Ønsket respons av kontrollsystemet [25]

Det ble brukt effekt operatører brukt i koden skrevet i vedlegg C.1 som avgjør aktiviteten av batteriet som vist i tabell 1.

Statement	Battery operation mode
chargeP = 1	Charging
chargeP = 2	Inactive
chargeP = 3	Discharging

Tabell 1: Effekt operatører som blir brukt til koding av kontrollsystem

SOC (state of charge) er også en viktig parameter i modellen og indikerer ladning og energi tilstand i batteriet. Uttrykket (13) for SOC viser at SOC er tidsavhengig der C står for total kapasitet i batteriet. SOC blir brukt i kodeskrift nevnt i vedlegg C.3.

$$\frac{d}{dtSOC} = -P_{battery} \cdot \frac{100}{C} \cdot 3600 \quad (13)$$

Hovedfunksjonen av SOC er å indikere tilgjengelighet av energi i batteri og som beskrevet i delkapittel 4.1.2, har et batteri et maksimum og minimum SOC grense [31]. Definerte variable *chargeE* sørger for at batteriet ikke lades ut under minimum SOC grense (SOC_{MIN}) og at den ikke lader seg opp over maksimum SOC grense (SOC_{MAX}) [25]. Kodeskriften i vedlegg C.1 viser hvordan disse parameterne brukes som vist i tabell 2.

Statement	Operation mode
chargeE = 1	$SOC \leq SOC_{MIN}$
chargeE = 2	$SOC_{MIN} \leq SOC \leq SOC_{MAX}$
chargeE = 3	$SOC \geq SOC_{MAX}$

Tabell 2: Energioperatører som blir brukt til koding av kontrollsystemet

Kodeskrift i vedlegg i C.2 fungerer med kombinasjonen av energioperatører og effekt. Dersom $P_Measured$ over omformerne indikerer at batteriet burde utlades ($chargeP = 1$) og at det er energi tilgjengelig i batteriet ($chargeE = 2,3$), lades batteriet seg ut. Dette skjer dersom SOC ikke er minimum. På samme måten, hvis $P_Measured$ over omformerne indikerer at batteriet burde lades opp og at SOC ikke er på maksimum, lader batteriet seg opp. Kodeskriften også bestemmer effekt som batteriet skal levere og motta, $P_Measured$ vil være høyere enn $P_{fullstore}$ for at batteriet skal lade seg opp til merkeeffekten. [25]

Quasi-dynamic simuleringens algoritme i vedlegg C består av tids avhengige variabler og endringer i SOC. Koden for Quasi-dynamic simulering i C.4 er samme som for de i lastflyt kontrollsystem, men uten effekt operatører. Årsaken til det er tids uavhengighet av effekt operatører, ulikt som de i energioperatører. [23]

5.2.3 Last modellering

Last kan i hovedsak modelleres på 3 ulike måter, konstant effekt, konstant strøm og konstant impedans. Konstant effekt karakteristikk modelleres for spennings uavhengige laster. Det kan for eksempel være kraftelektroniske komponenter med svitsj som regulerer spenning til et konstant nivå. Vannvarmere også bruker konstant effekt modelleringen ettersom effekt skal være konstant uansett spenningen. Modeller med konstant strøm fører til lineær last endring i forhold til spenning. Komponenter som bruker induksjonsmotorer som for eksempel kjøleskap og fryserer i hushold bruker denne karakteristikken. Konstant impedans brukes i elektriske varmere uten termostat, i denne karakteristikken, endres lasteffekt med kvadratet av spenningsendring. [29]

I et kraftnett, er det mange ulike variasjon av utstyr som brukes. Det fører til et behov for en polynomial modell i likning 14. Likning kombinerer alle last modeller. [29]

$$P = P_0 \left(a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + a_3 \right) \quad (14)$$

I uttrykket (14), a_1 , a_2 og a_3 representerer konstant impedans, konstant strøm og konstant effekt. a_1 representerer sitt bidrag av konstant impedans, a_2 representerer konstant strøm og a_3 representerer sitt bidrag av konstant effekt. Ved bruk av denne modellen, også kalt for ZIP modell, kan ekvivalent last vises mer nøyaktig.

$$a_1 + a_2 + a_3 = 1 \quad (15)$$

Denne oppgaven er modellert til å være konstant last effekt uansett dersom lasten er konstant eller varierende i tidsserie som det brukes under casene i kapittel 6. Simuleringen i denne oppgaven vil vise at økning i strøm vil føre til forminskning i linjespenning og spenningen over bussen. Tog vil alltid forsøke å holde konstant effekt og det ønskes at spenningen ikke synker langt under 16,5 KV samt drastiske økninger i strømmen er ikke ønskelige. Dermed passer denne karakteristikken godt for valg av konstant last effekt i modelleringen på grunn av omvendt proporsjonaliteten mellom strøm og spenning forhold. koeffisienter for polynomial modellen blir:

a_1	0
a_2	0
a_3	1

Tabell 3: Konstant strøm, konstant effekt og konstant impedanse koeffisienter

5.3 Modell avgrensninger

Det brukes ulike spesielle programvarer av jernbanen til å simulere slike modeller. Gruppen valgte et simuleringsprogram som lar seg simulere modellen for denne rapporten med minst mulige tilpasninger av faktorer. Allikevel måtte det gjøres en del forenklinger i oppgaven på grunn av lite kunnskap om programmet og begrenset tid.

I overliggende nett, er et trefasesystem som leverer effekt på 50 Hz til omformerstasjonen. Som nevnt i kapittel 2,1, nedtrappes frekvensen fra 50 Hz til $16 \frac{2}{3}$ Hz og spenningen forminskes til 16,5 KV enfase. I modellen på fig 8, er det 16,5 KV i alle kontaktledningene under omformerstasjonene med frekvens $16 \frac{2}{3}$ Hz. I programmet, ble det vanskelig å gjøre om trefasesystem til enfasesystem på grunn av mangel av nødvendige komponenter og lite kunnskap om programmet. Det ble nødt til å gjøres forenklinger som å konstruere hele modellen i trefase istedenfor enfase. Dette fører til avgrensninger i resultater som at det flyter større effekter i system på grunn av trefase og dermed høyere strømmer, men fremdeles blir hensikten med rapporten oppfylt og konseptet blir fremvist.

Det ble gjort noen tiltak for å kunne kompensere for noen forenklinger. Målte Effekt last verdier som brukes i tidsserie i kapittel 5 ble ganget med en faktor på (roten av 3), dette medfører økt effekt i linjene, men dette gjør at strømverdier forblir det samme som de hadde vært i et enfase nett. Uansett hvis effekten i modellen blir høyere, vil batteri påvirkningen i modellen kunne klare å fremvise peak shaving fenomenet som denne rapporten setter stort fokus på. Fordelen ved uendret strømverdier er at det illustrerer dersom strømtopper passerer topp-grensen og risikerer oppvarmingen i ledninger eller at det kan løse ut vernet.

6 Resultater

I dette kapittelet vil det gjennom fire forskjellige caser bli presentert simuleringer, analyseringer og resultater. Case 1 vil det bli sett nærmere på kretsen som blir brukt under alle simuleringene er bygget opp. Denne casen vil være en indikasjon på hvordan systemet fungerer under normalsituasjon, og hvordan batteriet vil kunne bidra. I Case 2, er det satt inn tog last i tidsserie med faktiske effekt målinger levert av Bane Nor. Her gjøres målingene med og uten batteri, slik at det kan sammenlignes resultatene med og uten batteri. I Case 3, blir det sett på ulike ladeeffekter på batteri, og hvilken innvirkning dette har i forhold til de høye toppene og strøm verdier som oppstår. Case 3 tar for seg situasjonen hvor en av omformerstasjonene faller ut.

6.1 Case 1: Med konstant last

I denne casen vil det bli sett på hva lasten til togene gjør med systemet under en normalsituasjon. Hovedfokus vil bli strømmen, effekten og spenningen rundt linje 6. Det vil også bli sett på hvilken funksjon batteriet har i forhold til lasten. Selv om en fast last ikke er reell med tanke på at et tog sitt forbruk, siden det vil variere i forhold til variabler som for eksempel akselerasjon, antall tog og jernbanens stigning. Casen vil teste batteri innvirkning i simuleringmodellen i noen enkle scenarioer som gjør rede for god grundig forståelse av batteri funksjonaliteten i casene senere i dette kapittelet.

6.1.1 Med lav konstant last

I forsøket med lav last, ble det satt inn last på 3 MW på begge togene. I denne sammenhengen vil dette være en relativt liten last. Figur 12 viser også at forbruket ikke er nok til at batteriet skal tilføre noe effekt til systemet, slik at batteriet SOC er på 90% under hele simuleringen. Med en konstant last gjør også at spenningen på 16,47 Kilovolt og strømmen 0,127 kA ampere som vist i figur 14, også holdes konstant under hele perioden. Strømmen på 0,127 kA ampere er langt unna 0,35 kA, som er grenseverdien for hva omformerstasjonen klarer å holde under kontinuerlig drift. Spenningen på 16,47 Kilovolt er godt innenfor med hensyn på et av hovedmålene i jernbanenett å kunne holde spenning mellom en grense fra 11,5 kV til 16 kV. Hensikten med valg av 3 MW som togets last var det at total belastning fra tog 1 og tog 2

forblir under effektgrense for å kunne aktivere batteriet. I case 4.1.2, vil det gjort endringer i lasten i togene som stiger over grensen for effekt verdien og dermed aktiverer batteriet.

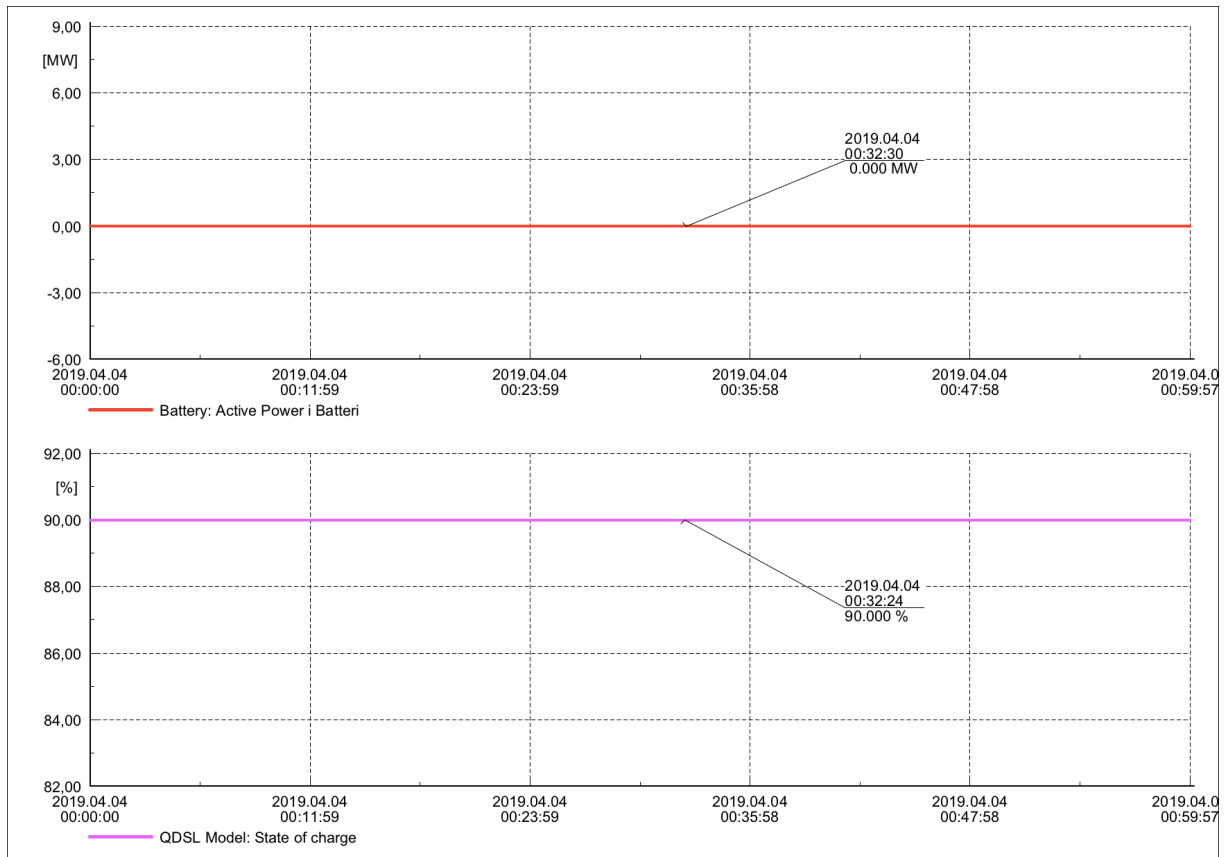
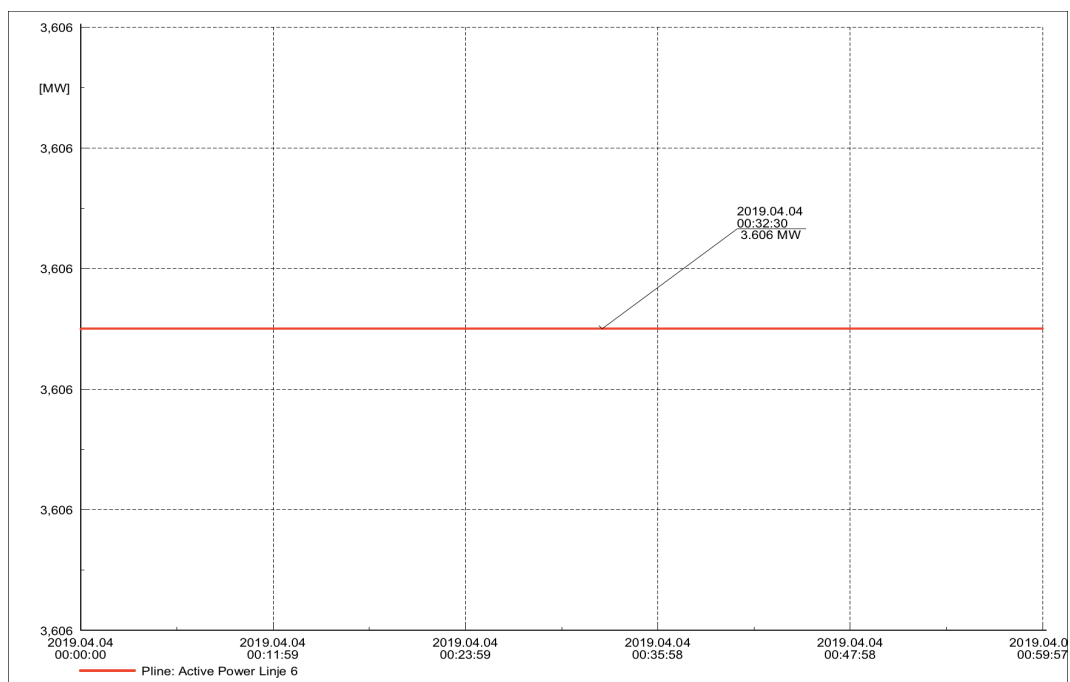
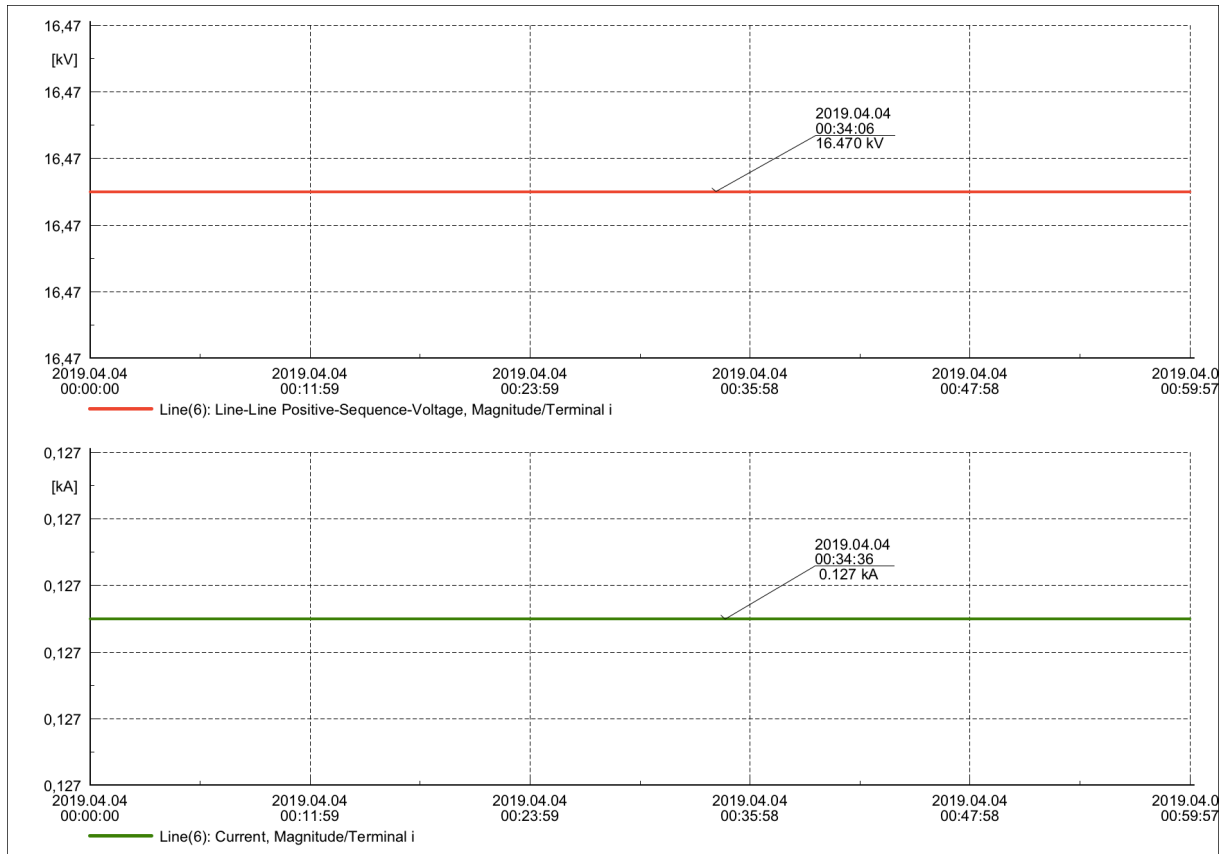


Fig 12. Case 6.1.1: Aktiv effekt i batteri og state of charge med lav kontant last



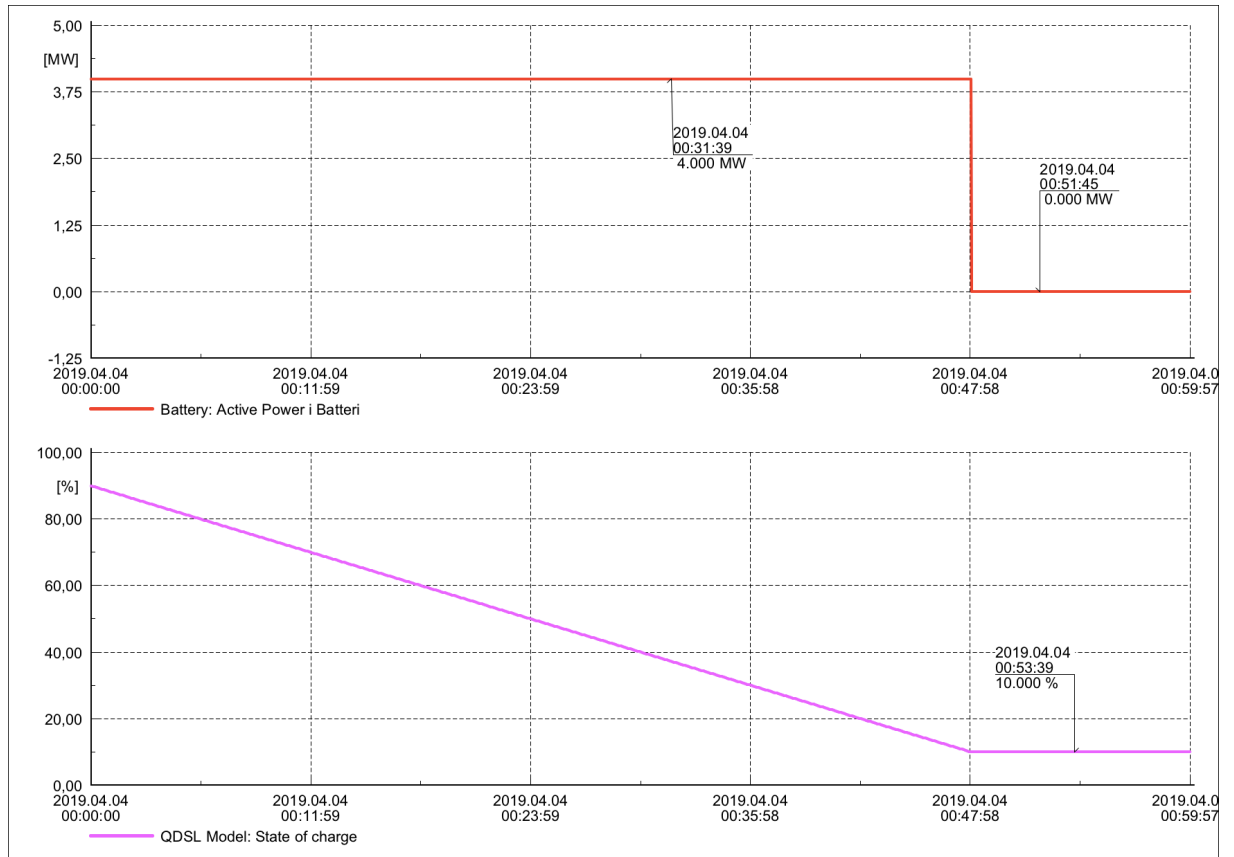
Figur 13. Case 6.1.1: Aktiv effekt gjennom linje seks med lav konstant last



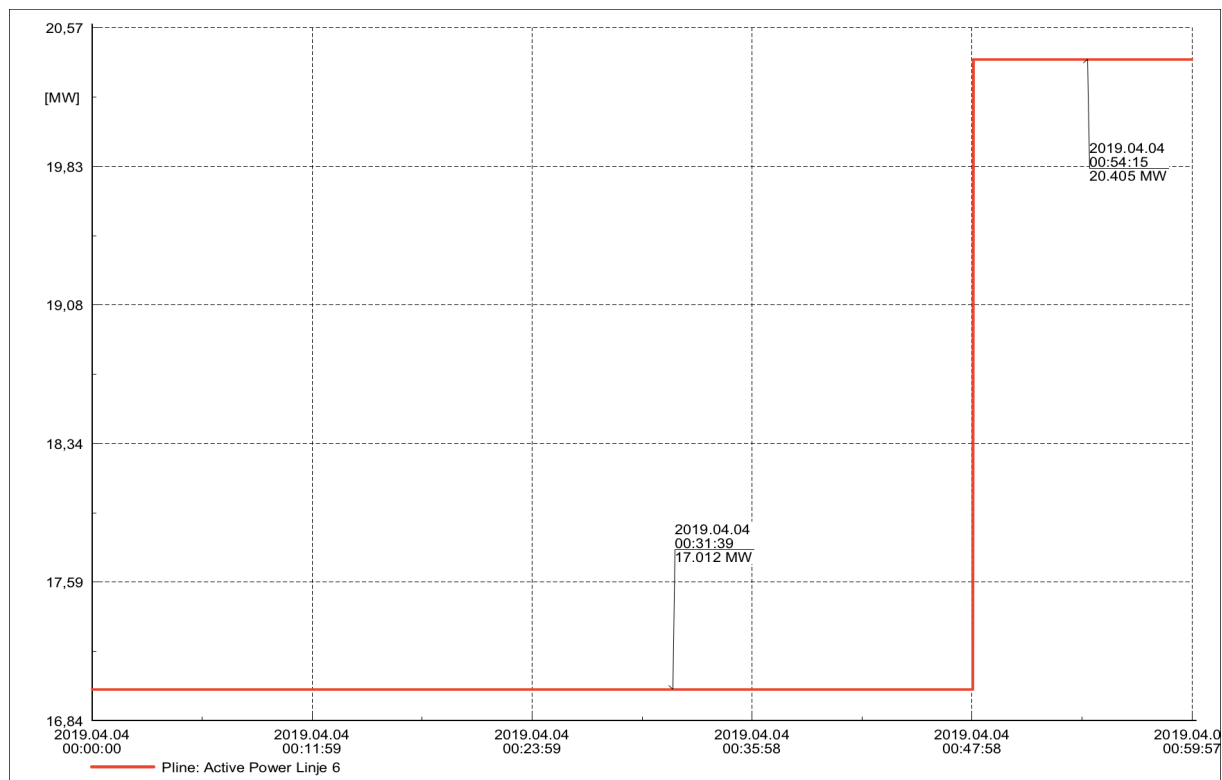
Figur 14. Case 6.1.1: Spenningen og strømmen gjennom linje 6 med lav konstant last

6.1.2 Med høy konstant last

I forsøket med høy last ble det satt inn en last på 15 MW på begge togene. Dette skal illustrere en togstrekning hvor man kjører flere tog, og/eller tyngre tog som trekker mer effekt. Det høye forbruket fra togene gjør at batteriet aktiveres, da har P_{Measured} verdi nådd grenseverdien $P_{\text{startfeed}}$ som nevnt i 3.3.1, og bidrar med effekt. Men siden lasten er konstant vil ikke batteriet ha mulighet til å lade seg opp og forblir tom for resten av intervallet. Som vist i fig 15, leverer batteriet ut 4 MW konstant frem til tidspunkt 00:47:58, før det går ned til SOC 10% og slutter å levere. Spesifiseringer for SOC grenser og batteri effektgrense verdier i simulatoren er vist i vedlegg B.2.



Figur 15. Case 6.1.2: Aktiv effekt i batteriet og state of charge med høy konstant last



Figur 16. Case 6.1.2: Aktiv effekt i linje seks med høy konstant last.

Det kan observeres i fig 16 hvor aktive effekt som leveres ligger på 4 MW konstant frem til 00:47:58 og går tom i resten av intervallet. Tilsvarende, som en konsekvens som fig 16 viser, kan det sees hvordan den aktive effekten stiger i linje 6 med 4 MW opp til tidspunktet da batteriet slutter å tilføre effekt. Ved batteri tilførsel, går det 17 MW gjennom linjen 6, mens etter at batteriet går tomt øker effekten til 20,4 MW. Dette tilfredsstiller hensikten med denne casen hvor effekten over linja 6 ble redusert (peak shaving) med 16,6%.

Batteriet hjelper også til med å redusere strømmen i linje 6, som vist i fig 17. Her kan det også sees hvordan spenningen økes fra 16,0 Kilovolt til 16,189 når batteriet bidrar. Enda viktigere er hvordan batteriet bidrar til å redusere strømmen i linje 6. Når batteriet leverer, er strømmen i linje 6 på 0,62 kA sammenlignet med 0,75 kA når batteriet er tom for energi. Reduksjon i strømmen er en direkte konsekvens av likning 3, batteri bidrag til strøm forminskning er et viktig resultat fordi strømmen økes med nesten samme prosentandel som effekt og dermed kan effekttopper føre til høye strømmer gjennom linjer som ikke er ønskelig. Det finnes også andre måter i jernbanenett som regulerer strøm og spennings verdier som tilbakemating, men

de skal ikke fordypes i denne rapporten. Batteri og strøm relasjon skal fordypes videre i case 3.

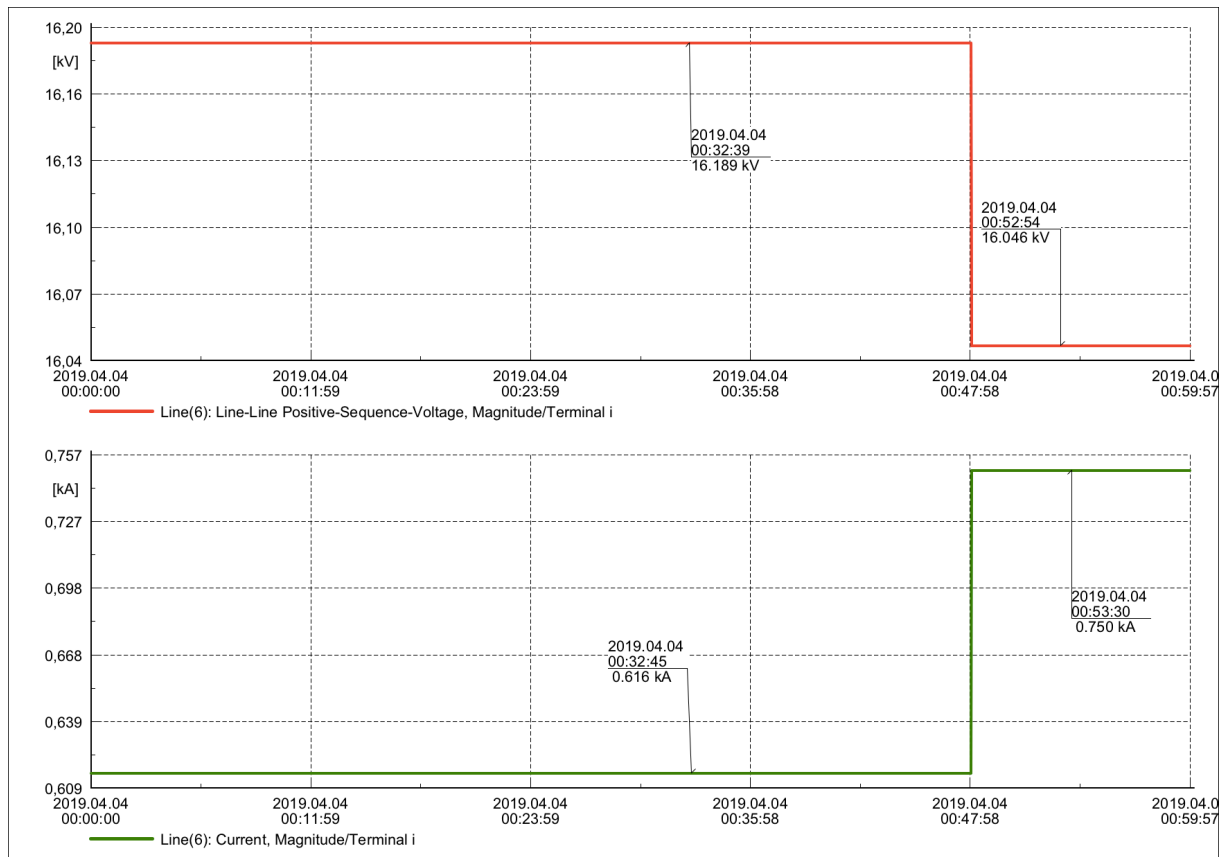


Fig 17. 6.1.2: Spenning og strøm gjennom linje seks med høy konstant last

6.2 Case 2: Simulering med last i tidsserie

I dette delkapittelet, skal det presenteres en case der det brukes faktiske målte verdier over omformere av Bane NOR. Disse verdiene forteller om effekten togene trekker og dermed kan brukes som last på togene. Målte data var på et intervall på cirka 14 dager, i simuleringmodellen, brukes det kun verdier i et intervall på 1 time. I den perioden, oppstår det fleste effekttopper og derfor var det aktuelt å se på det intervallet. I rapporten, har det blitt gjort en forenkling, altså begge tog trekker like mye effekt, det måtte gjøres for å unngå komplikasjoner i simuleringmodellen som feil i last konvergens. Fig 18, viser last tidsserien over begge tog. I delkapitlene til case 4.4.2, skal det fokuseres på påvirkningen av peak shaving og dermed skal det presenteres tilfeller uten batteri og med batteri.

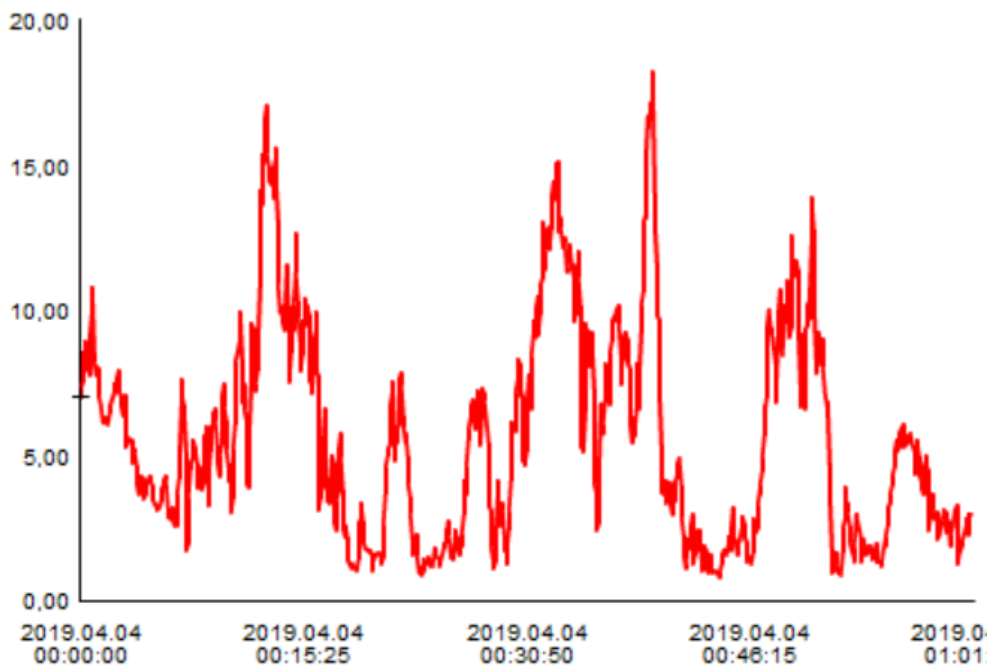
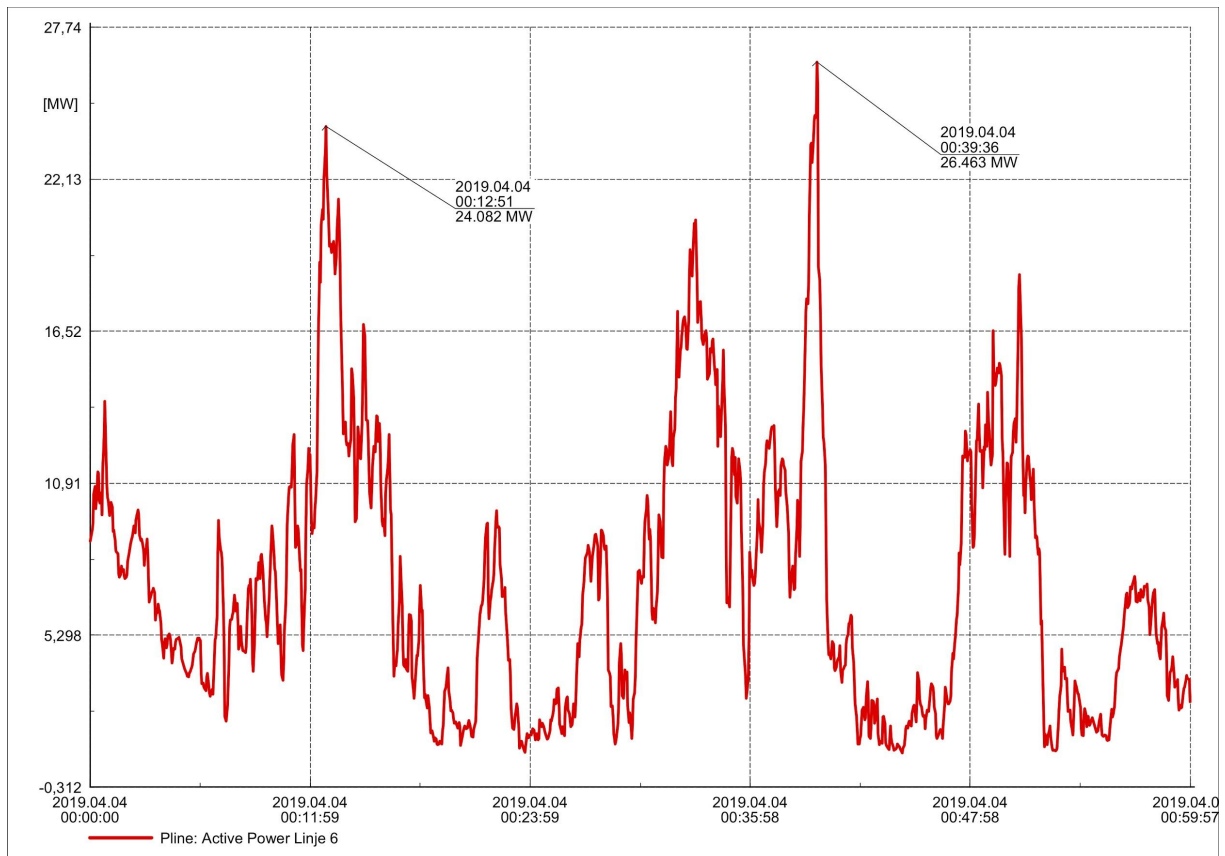


Fig 18. Case 2, last i tidsserie i 1 time.

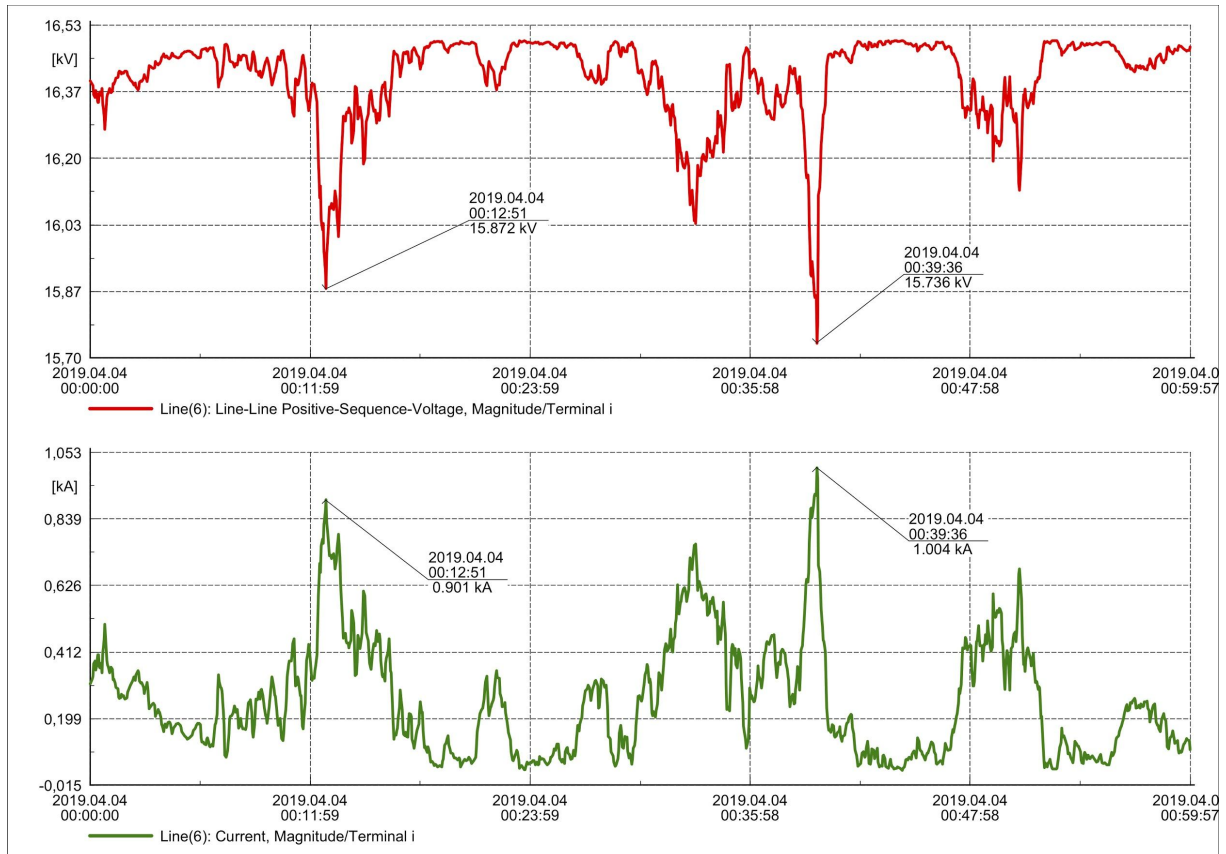
6.2.1 Uten batteri

Dette delkapittelet er en god illustrasjon av hensikten bak denne rapporten når det først blir sett på tilfellet uten batteriet. Fig 18 viser hvordan en hektisk dag med høyt effektforbruk kan se ut som.



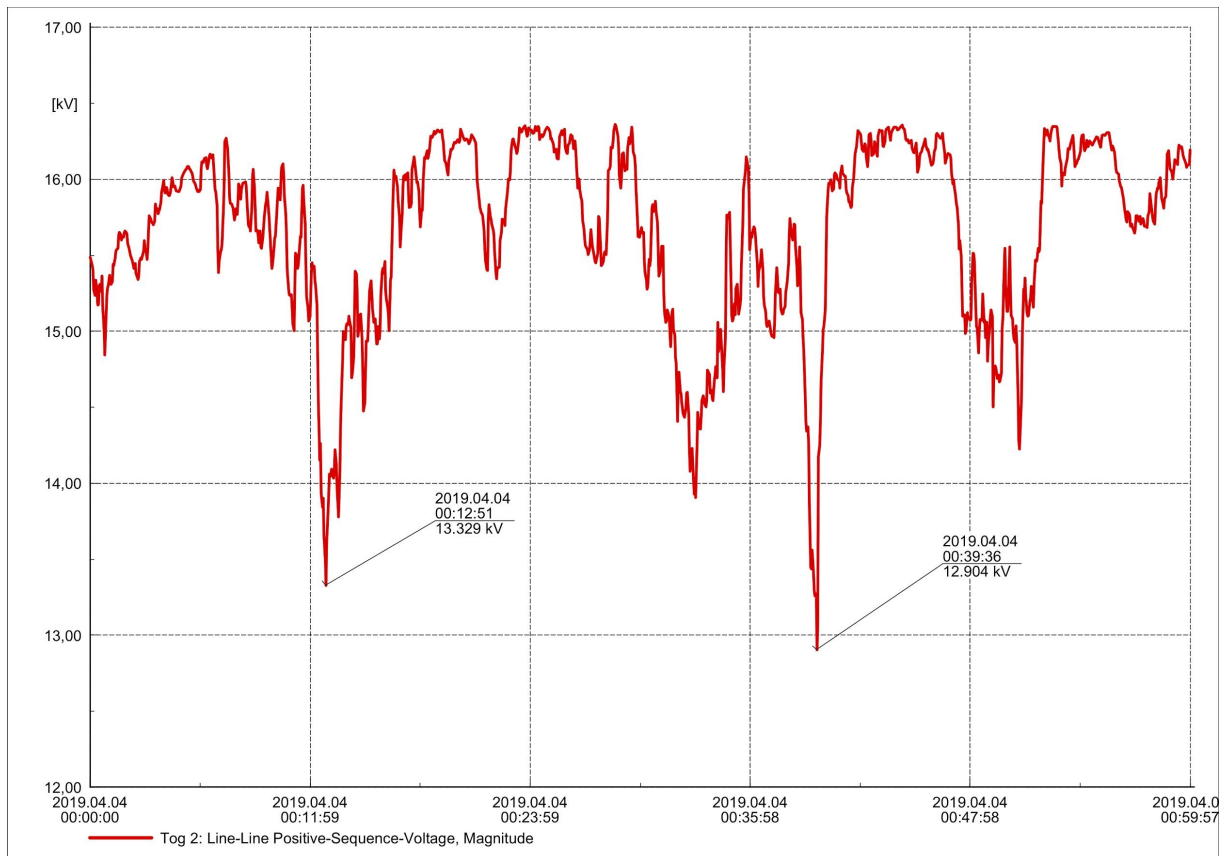
Figur 19. Case 6.2.1: aktiv effekt i linje seks over en time. Uten batteri

Linja 6 ligger under transformator 2 som også representerer omformerstasjon 2 som vist i fig 18. Årsaken til at det velges linje 6 er fordi den illustreres effekttopp reduksjon i omformer 2 siden linja er modellert til å ikke ha noe impedans. Som det vises i fig 19, oppstår det 2 effekttopper i 12:51 og 39:36 respektivt. Høyeste effekt verdien som den omformerstasjonen leverer ligger på 26,46 MW. Dette fører til høy belastning over omformereren som gjør at den ikke kan levere en effektverdi som høy som nevnt på en lang periode.



Figur 20: Case 6.2.1, Spenning og strøm gjennom linje seks. Uten batteri

Som tidligere forklart, kan inverse forholdet mellom strøm og spenning også illustreres ved hjelp av fig 20. Strømmen økes opp til cirka 1kA og 0,9 kA i tiden 39:36 og 12:51 respektivt. I tillegg, synker spenning ned drastisk i perioden når effekttopper oppstår. Slike belastnings topper også fører til lavere spenning over togene på tilsvarende tidspunkter som også vist i fig 21.



Figur 21: Case 6.2.1, spenning over Tog 2 uten batteri

6.2.2 Med batteri

Det blir observert simuleringmodellen med batteriet og last i tidsserie. Batteriet ble installert i terminal 7 som vist i fig 8. Det var viktig å sørge for at batterieffekten bidrar til omformerstasjonen 2 og at mye av effekt flyter til linje 3 og 4 for å kunne observere batteri bidraget til peak shaving algoritmen. For eksempel batteriet først ble installert samleskinnen 2 (SS2), det viste seg at linje 3 og linje 4 ble mest benyttet av effekt levert av batteriet.

Et av hovedmålene ved batteribruk var å kunne minske effekttopper som tidligere nevnt i case 4.2.1 og vist i fig 16. Det skal forsøkes å levere 4MW av batteriet som bidra til å redusere effekt belastningen med 4 MW. Som det er illustrert i fig 22 har effekttopp i 00:39:16 og 00:12:51 er redusert til 20,65 MW og 22,98 MW respektivt, toppene er redusert til cirka 13% over hele intervallet på 59 minutter. Batteriets ladeeffekt ble satt til 4 MW og batterikapasitet på 4 MWh som det ble beregnet i Excel-analyse resultat i delkapittel 3.4. ladeeffekt ble satt til 4 MW siden det var den ønskede verdien effekten skulle nedtrappes til. SOC minimum ble

satt til 10% og SOC maksimum ble satt til 90%. Spesifiseringer av verdier batteriet ligger i vedlegg B.3.

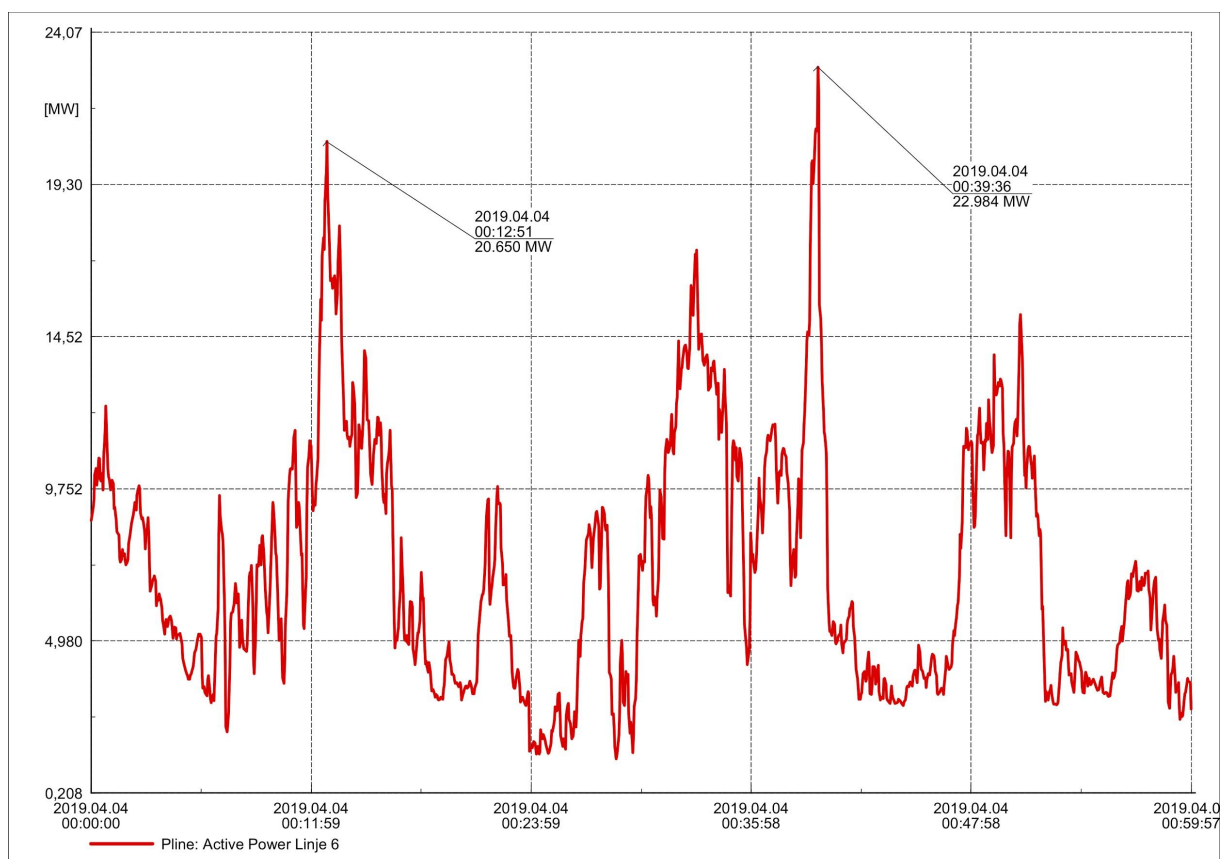


Fig 22. Case 6.2.2: Aktiv effekt gjennom linje seks, med batteri.

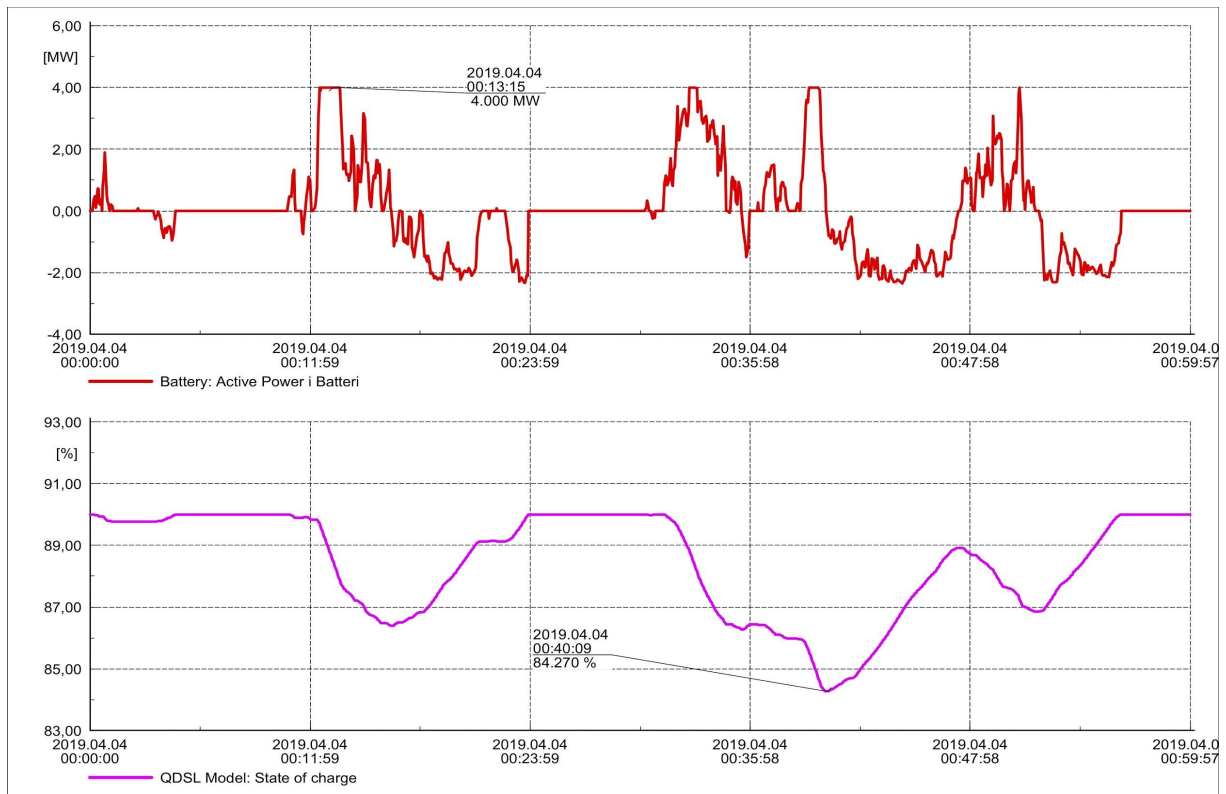


Fig 23. Case 6.2.2: aktiv effekt i batteri og state of charge i prosent.

I fig 23, er aktiv effekt i batteriet positiv når det batteriet utlades. Det blir også representert i SOC modellen i fig 23. SOC synker ned fra SOC maksimum som er definert på 90%. Dette illustreres at batteriet leverer effekt og spesielt i tidspunktet der det oppstår høyeste effekttopp på 00:39:36, da leverer batteriet på fulle ladeeffekt på 4 MW. Tilsvarende, er SOC% er minst på det tidspunktet på 84, 27%. Det viser at batteriets funksjon i simuleringsmodellen fungerer bra som ønsket. Batteriet leverer fullt når det skjer effekttopper og som vist i fig 23, oppfylles det ønskede peak shaving nivå også. SOC_{MIN} nås aldri fordi batterikapasitet er på 4 MWh som ble beregnet til å være tilstrekkelig som forklart i delkapittel 3.4. Dersom batterikapasitet ikke var tilstrekkelig, ville det ført til lavere SOC når batteriet leverer i tidspunkter når effekttopper opplevs.

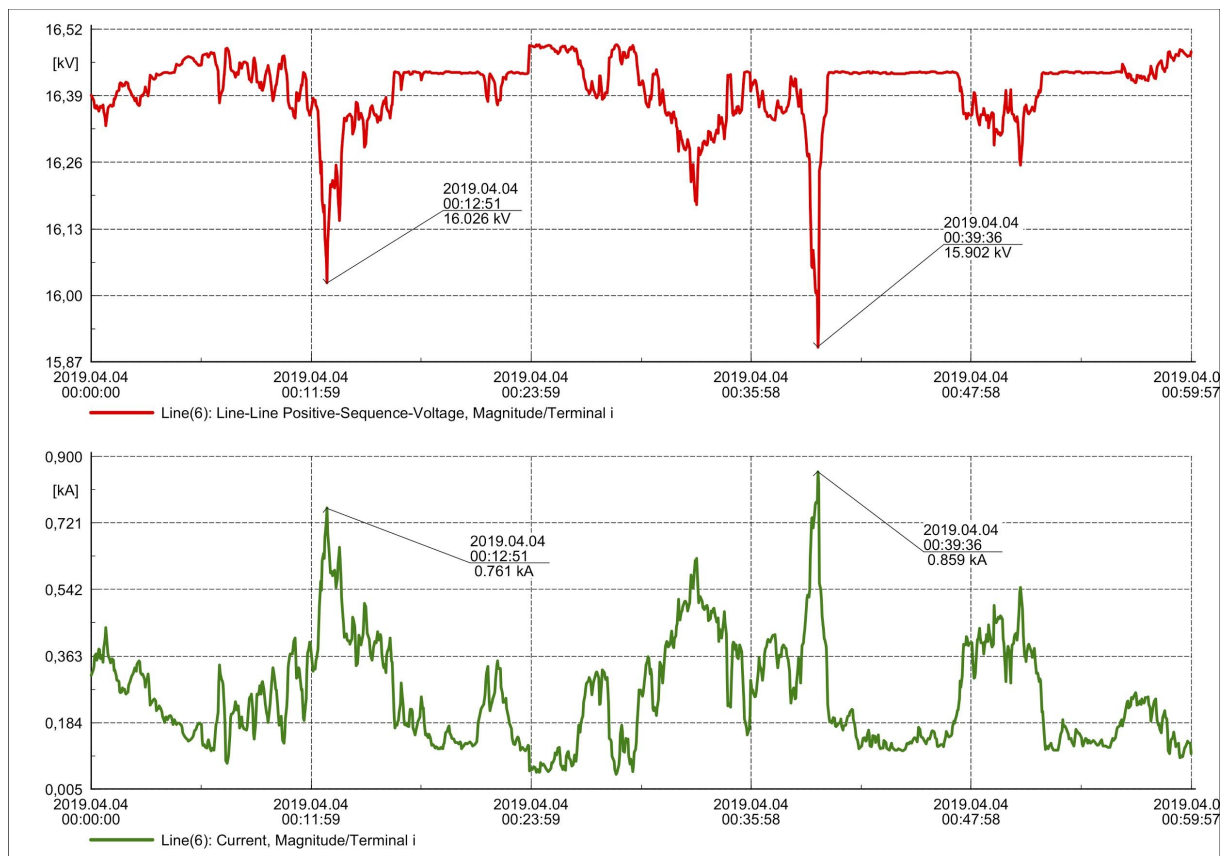
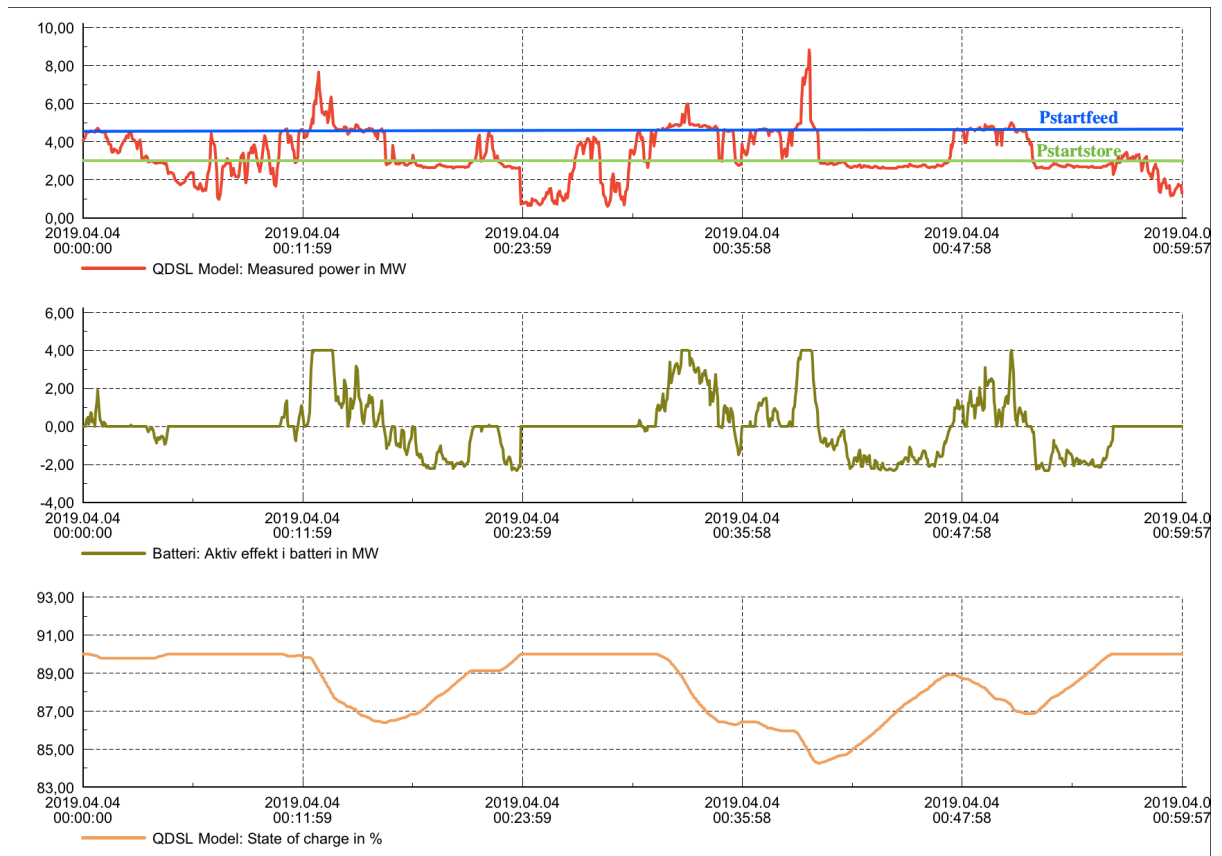


Fig 24. Case 6.2.2: Spenning og strøm gjennom linje seks med tidsserie last

I forhold til verdiene fra case 6.2.1 fig 20, kan det observeres linje 6 og endringer i strøm og spennings verdier som vist i fig 24. Strømtopper i 00:12:51 og 00:39:36 er redusert ned til 0,78 kA og 0,86 kA, det tilsvarer nedtrappingen på ca. 15 %. På grunn av direkte proporsjonalitets forhold mellom effekt og strøm, vil peak shaving på linja 6 også føre til forminskning i strømmen som går gjennom linja med cirka samme prosentandel. Spenning derimot vil øke som en konsekvens av peak shaving, og det skyldes omvendt proporsjonalitets forhold mellom spenning og effekt med lasten modellert til å være konstant effekt last. Batteriet bidrar til forminskning av effektbelastning, men strømmen når høye verdier som 0,76 kA og 0,85 kA som ikke er ønskelig i jernbanenettet. Case 6.2 viser derfor tilfredsstillende resultater for peak shaving, men høye strømverdier skal reguleres i case 6.4 ved hjelp av ulike batteri ladeeffekter.



Figur 25. Case 6.2.2: Aktiv effekt i batteri og state of charge.

Batteri grenser for oppladning og utladning ble satt ved hjelp av to parametere i simuleringen, nemlig $P_{startfeed}$ og $P_{startstore}$. Det måtte først settes en referanselinje i modellen som varsler om overbelastning, linje 3 ble valgt som referanse linje ettersom den ligger over tog 1 som vist i fig 8. $P_{Measured}$ varsler batteriet om når det skal oppladdes og utlades; $P_{Measured}$ må passere over en viss verdi $P_{startfeed}$ for å kunne levere effekt og $P_{Measured}$ må være under en spesifikk verdi $P_{startstore}$ for å kunne lade seg opp. Batteriet vil være inaktivt mellom disse to grensene.

I denne casen, ble $P_{startstore}$ satt på 4,5 MW og $P_{startfeed}$ på 3 MW. Det kan observeres i fig 25, at når $P_{Measured}$ (measured power) overstiger $P_{startfeed}$ i 00:14:00, begynner batterier å levere, dermed skjer det økning i aktiv effekt i batteriet og minskning i SOC i tilsvarende tidspunktet. På samme måte, kan det sees at $P_{Measured}$ understiger $P_{startstore}$ i periode fra 00:39:00 og 00:45:00, i tilsvarende perioden går aktiv effekt i batteriet under null og SOC stiger, som indikerer oppladningen.

6.3 Case 3 - Batteri med ulike ladeeffekter

Som det ble analysert i case 4.2.2. Selv om case 2 viste lovende resultater for peak shaving, var det fremdeles høye strømverdier som 0,76 kA og 0,85 kA. Denne casen vil derfor fokusere på å forminske strømverdier ved å øke batteri ladeeffekten. Det skal brukes ladeeffekter på 6 MW og 8 MW.

6.3.1 6 MW ladeeffekt

I dette delkapitlet, skal det observeres og analyseres modellens oppførsel med 6 MW ladeeffekt fra batteri med hensyn på endringer i strømverdier, spenningen og peak shaving. Spesifiseringer av andre innsatte parametere i batteri simulatoren er vedlagt i B.4.

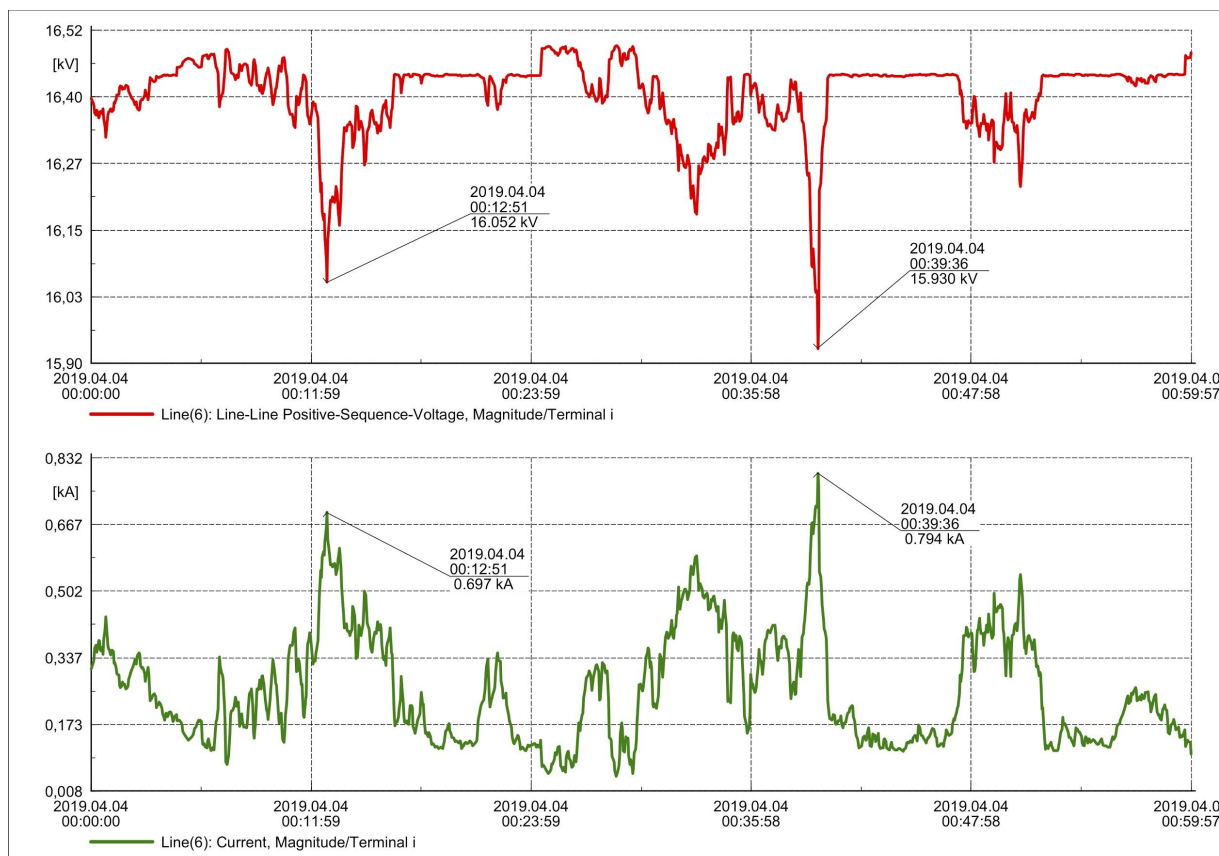


Fig 26. Case 6.3.1: spenning og strøm gjennom linje seks med 6 MW ladeeffekt.

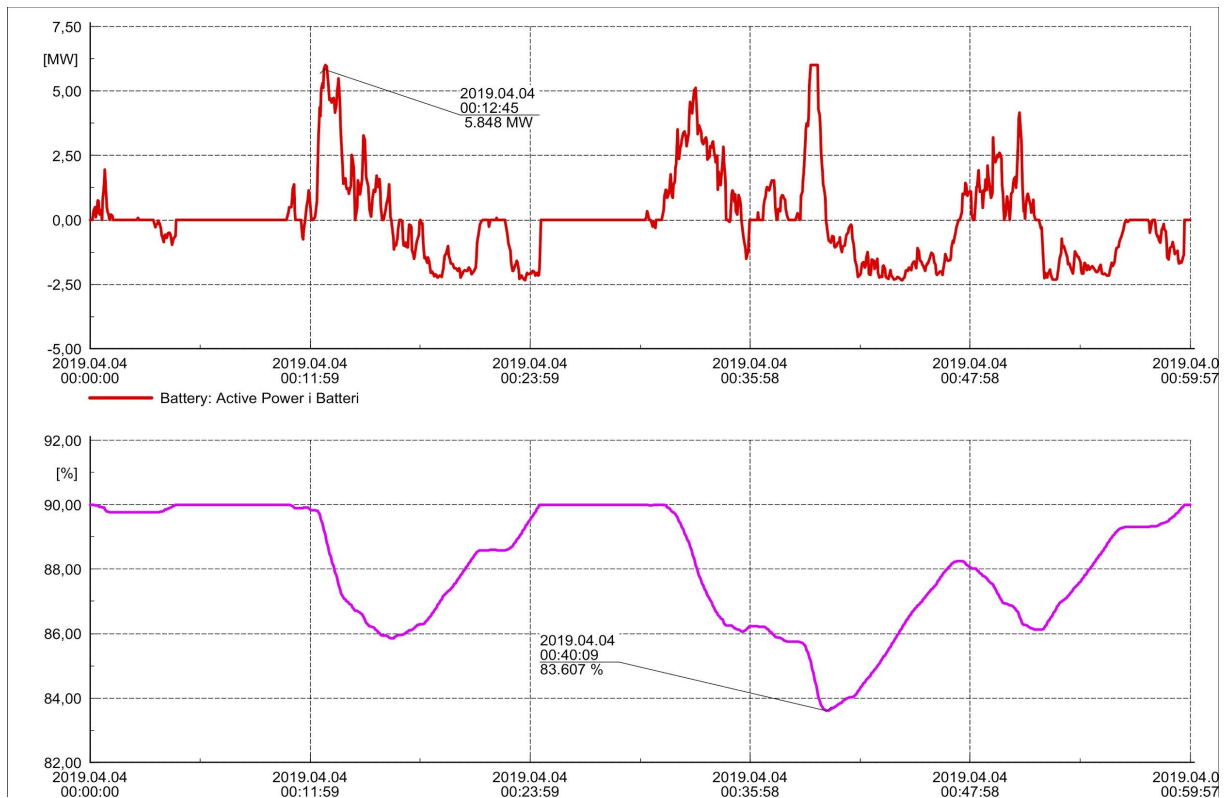


Fig 27. Case 6.3.1: aktiv effekt i batteriet og state of charge

Som vist i fig 26, har strømtopper redusert med cirka 20 % i forhold til case 6.2.2 med batteri ladeeffekt på 4 MW. Høyeste toppen er minsket fint fra 0,85 kA til 0,79 kA. Det er et signifikant resultat i denne casen fordi i det tidspunktet, opplevs det høyest effekttopp og dermed høy strøm i linjen. Det vises også i fig 27 at batteriet nå leverer 6 MW under tidspunkter med høye belastninger og effektbehov. SOC synker minst til 83,6%. Det er ikke betydelig forskjell fra case 6.2.2 med batteri ladeeffekt på 4 MW, årsaken til det at det brukes samme batteri kapasitet på 4 MWh som er tilstrekkelig stor at det ikke fører til særlige endringer i SOC. Spenning økes ikke noe særlig med nye batteri parametere, fra 15,9 KV til 15,93 KV. Det er ønskelig at spenningen ikke endres drastisk ved endringer i batteri parametere fordi målet er å holde spenningen nærmest 16,5 KV.

Formen av batteri aktiv effekt kurven i fig 27 endres ikke fra den i case 6.2.2, det forårsakes last naturen. Ettersom det ble ikke gjort noen endringer på lasten i tidsserien, leverte batteriet effekt i samme tidspunkter som i case 6.2.2, men med ulik ladeeffekt. Endringen i ladeeffekt vil derfor ikke endre på formen til figuren for aktiv effekt i batteriet, men kun på skaleringen av effekt verdier som leveres.

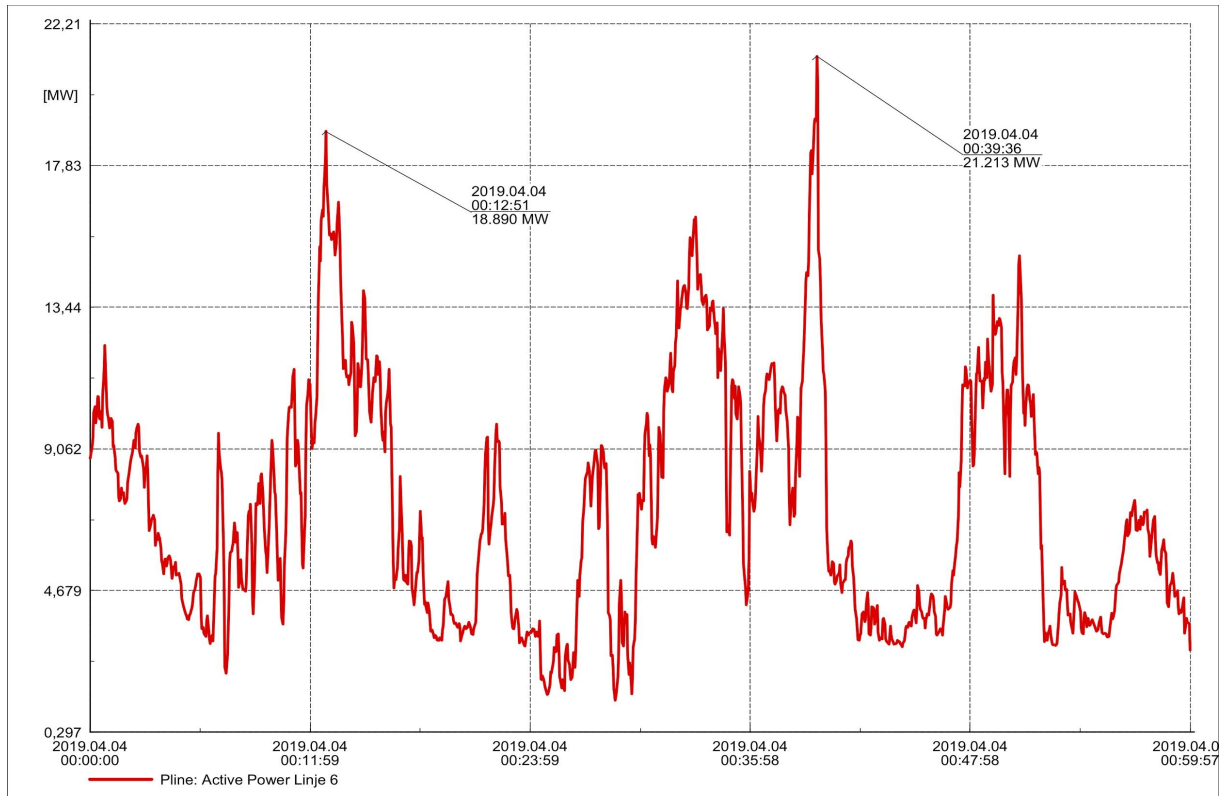


Fig 28. Case 6.3.1: Aktiv effekt gjennom linje seks med 6 MW ladeeffekt.

I fig 28, endres effekttopp i tidspunktet 00:39:36 fra 26.4 MW til 21.1 MW sammenlignet med case 6.2.1, uten batteri. Denne forskjellen tilsvarer simuleringen uten batteri og nedtrappingen av effekt med et større batteri. Peak shaving ser ut som til å fungere tilfredsstillende og effekten i linja over hele intervallet synkes med 20% i forhold til 13% i case 4.2.2 med batteri som leverte mindre ladeeffekt på 4 MW.

6.3.2 8 MW ladeeffekt

I dette delkapittelet, skal det analyseres modellens respons med 8 MW ladeeffekt fra batteri i forhold til endringer i strømverdier, spenningen og peak shaving. Spesifiseringer av parametere i batteri simulatoren er vist i vedlegg B.5.

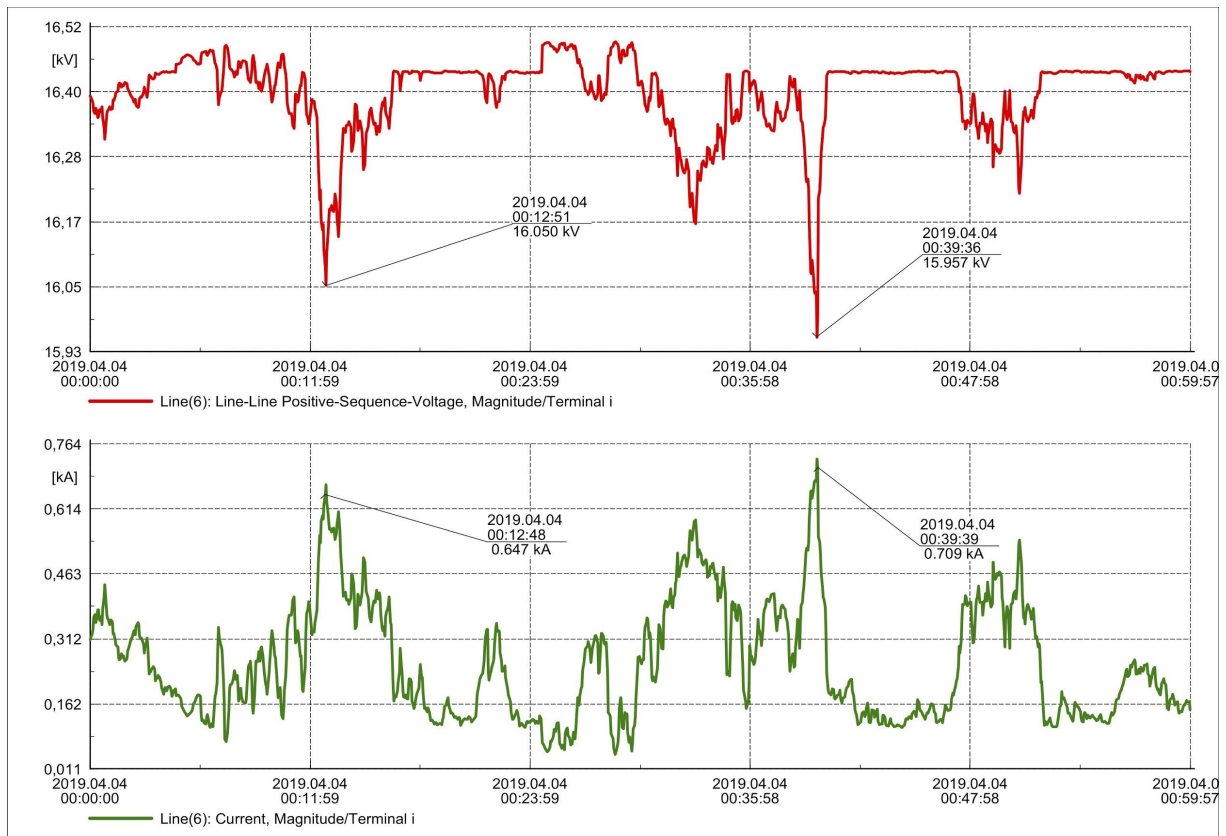


Fig 29. Case 6.3.2: strøm og spenning gjennom linje seks. 8 MW ladeeffekt.

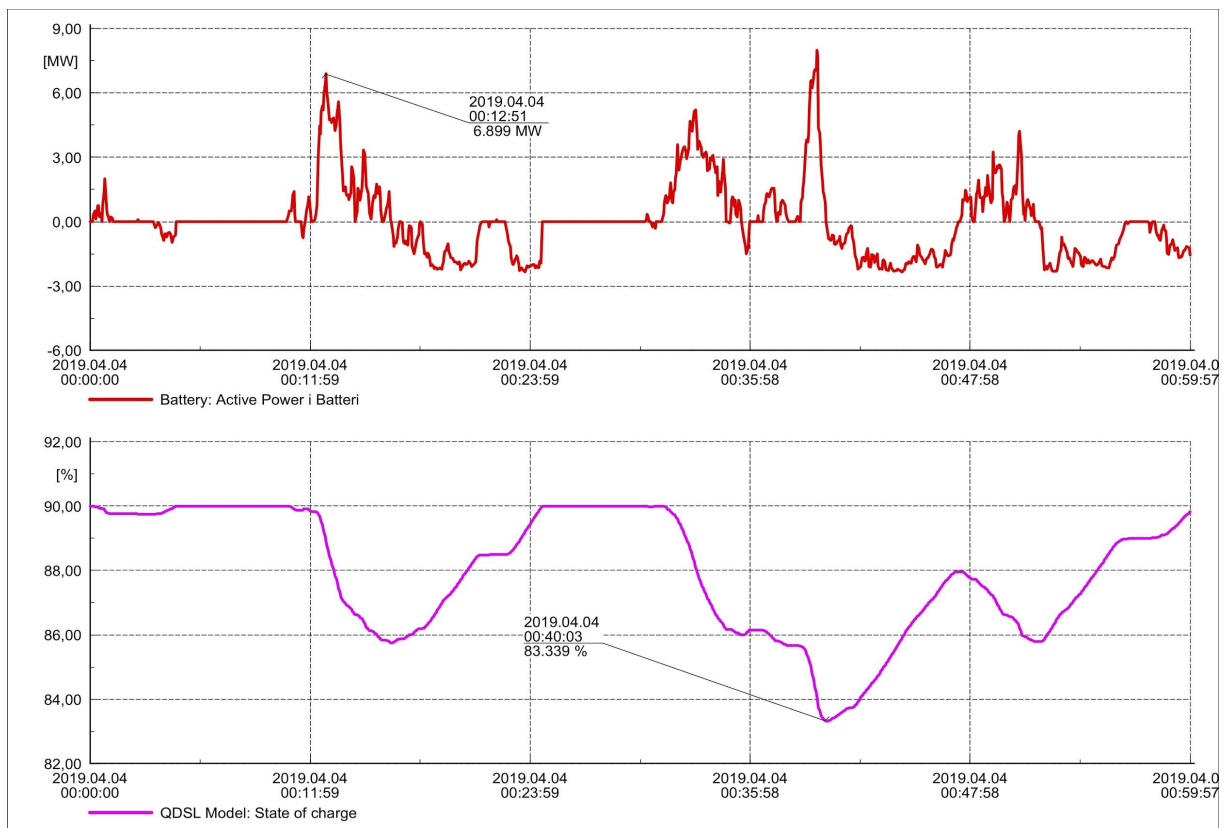


Fig 30. Case 6.3.2: aktiv effekt i batteri og state of charge. 8 MW ladeeffekt.

Fig 30 er en god demonstrasjon av effekt oppførselen i modellen. Som det ble illustrert tidligere i case 4.2.2 og 4.3.1, måtte batteri levere fullt under høyeste effekt belastninger i 00:12:51 og 00:39:36, det viste at effektbehovet er ikke helt oppfylt for å kunne takle effekttopper og det var mer som batteriet kunne bidra i de to tidspunktene. I denne casen med 8 MW som ladeeffekt, kan det sees at effekttopp i tidspunkt 00:12:51 mates kun med 6,9 MW og det viser derfor grensen for batteriet til å levere til den belastningen. Belastningen i tidspunkt 00:39:36 drar fremdeles full effekt fra batteriet. I intervallet mellom 00:24:00 og 00:29:00, er belastningsgrense ikke nådd høy nok for batteri til å levere og dermed leveres det ikke noe effekt. Det kan også observeres at i det intervallet forblir SOC til SOC maksimum på 90%.

Strømtopper er redusert fint med 30% over hele intervallet. I tidspunktet 00:39:36, er strømverdien på 0,7 kA. Fordobling i ladeeffekten i batteriet fører til to ganger så mindre reduksjon i strøm prosentandel. ladeeffekt på 4 MW forminsket strømtopper med cirka 15 %. Det kan derfor vises at blant andre metoder å regulere strømtopper på, er batteri bidrag også en effektiv måte å redusere strømtopper.

6.4 Case 4 - Overliggende nett faller ut

I denne casen, skal det bli sett på et tilfelle som kan oppstå i jernbanen og fører til store forstyrrelser og problemer. Dersom en av omformerne faller ut, omformer 3 i dette tilfellet. Hvordan ville batteriet hatt bidratt i en slik situasjon? I realiteten, henger det flere omformerstasjoner ved siden av hverandre, men i denne oppgaven legges det fokus på kun tre som i modellen i fig 8 og omformerstasjoner ved omformer 1 og 3 sees bort i fra for enkelhets skyld. Det skal bli sett på 2 ulike tilfeller, med og uten batteri. Det skal sammenlignes ulike parametere og forskjellen skal analyseres.

6.4.1 Uten batteri

Fig 31 viser aktiv effekt i transformator (omformer) 1, 2 og 3. Omformer 3 ble lagt ned i simuleringen og det flyter derfor ikke noe effekt gjennom den. Under høye belastningen i 00:39:36, er aktiv effekt i omformer 1 på cirka 12,8 MW og effekt i omformer 2 er på ca 37,8

MW. Effekt som en omformer leverer er avhengig av avstand mellom omformer og tog. Dersom et tog er nærmest ene omformer, vil den motta mer effekt av den enn de andre omformerne. Dette fenomenet forårsaker forskjellen i aktiv effekt verdier i begge omformerne i fig 31. På grunn av symmetriske avstander som illustrert i modellen på fig 8 mellom tog og alle omformerne, vil omformer 2 levere mer enn omformer 1 og 3. Omformer 2 leverer 33,8% mer effekt enn omformer 1, som konsekvens av dette, ble det kompliserte å simulere en modell dersom omformer 2 hadde falt ut i steden for omformer 3. Dette medførte last konvergens feil i programmet, altså noen parametere i simuleringen oversteg grenseverdier.

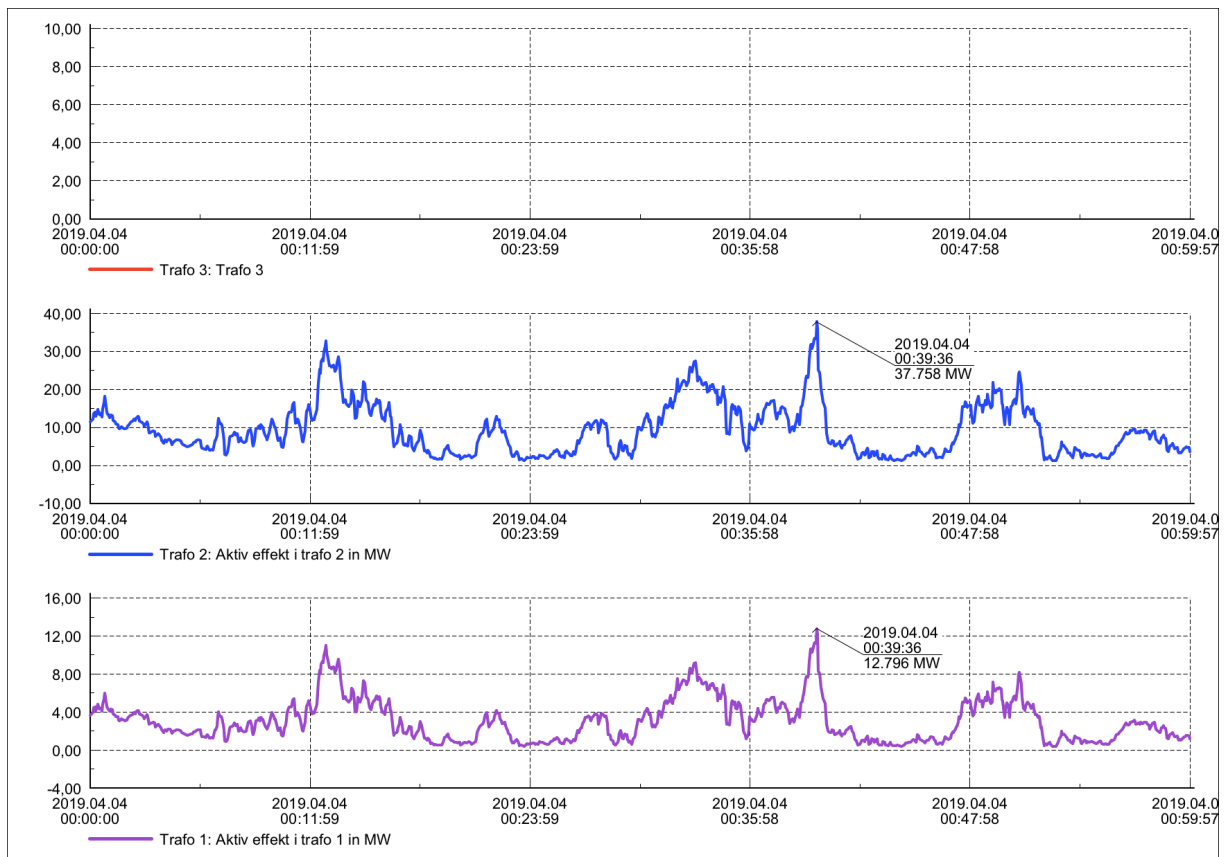


Fig 31. Case 6.4.1: aktiv effekt levert av transformatorene (omformere). Uten batteri

Det flyter 39% mer effekt i linje 6 under denne situasjon enn det i normaldrift av simuleringen med 3 omformere, det vises i fig 31 at effekttopp i tidspunkt 00:39:36 økte fra 24,6 MW fra case 6.2.2 til 37,75 MW. En slik situasjon har større behov for ekstern effekt kilde som batteri ettersom en slik økning fører til drastiske stigninger i strømverdier som vist i fig 33.

Strømmen toppen i tilsvarende tidspunktet har økt fra 0,85 kA til 1,5 kA.

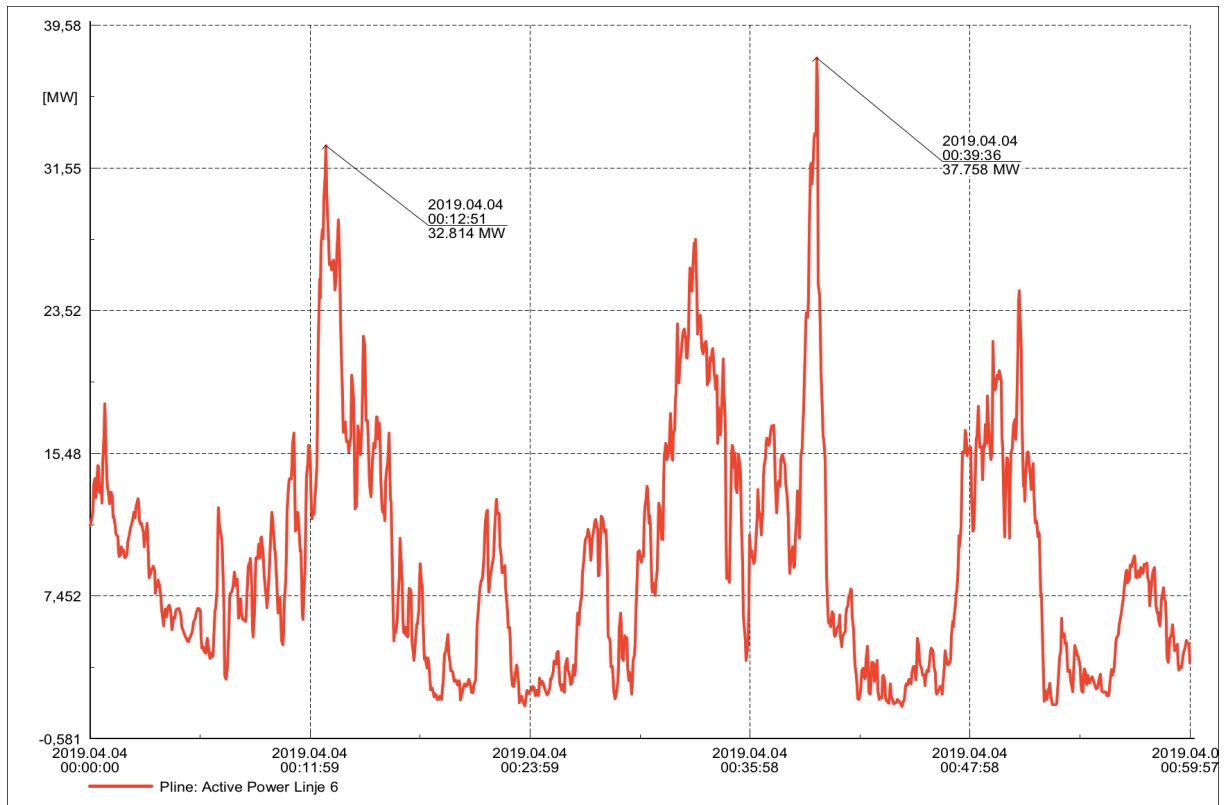


Fig 32: Case 6.4.1: Aktiv effekt gjennom linje seks. Uten batteri

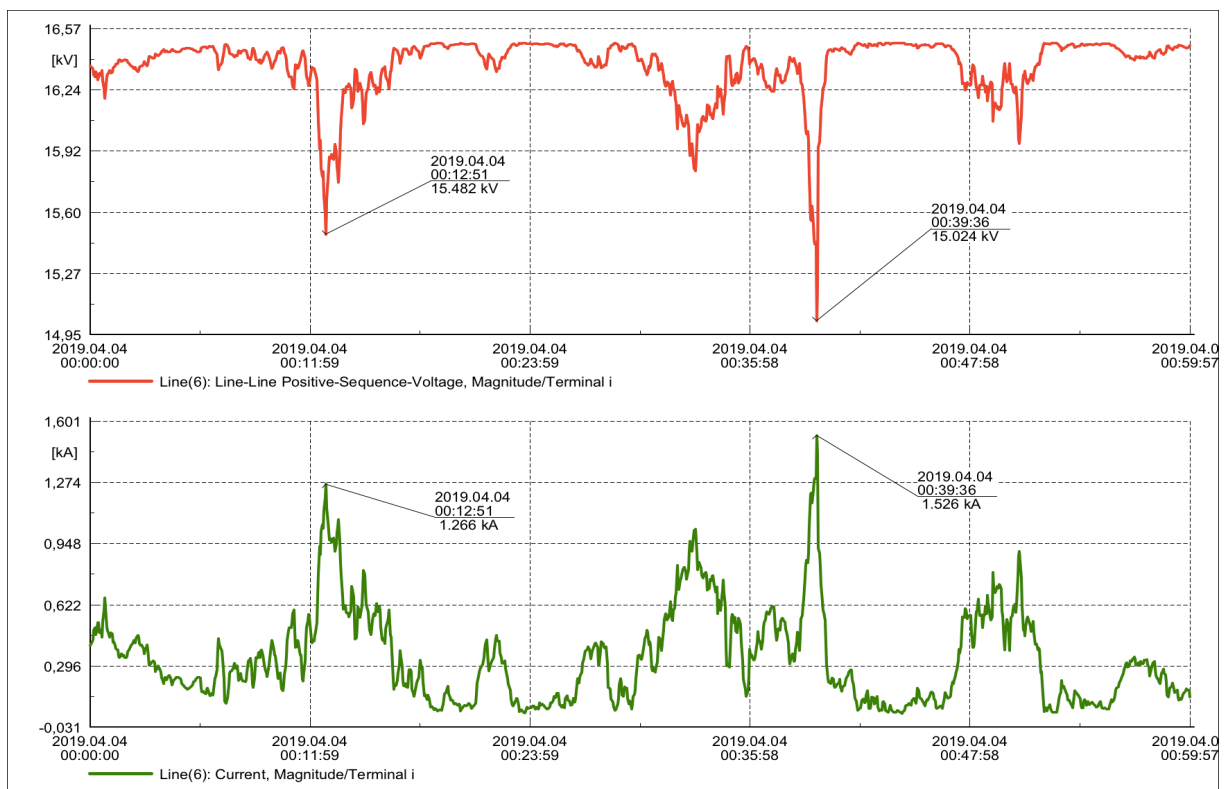


Fig 33: Case 6.4.1: spenning og strøm gjennom linje seks. Uten batteri

6.4.2 Med batteri

I fig 34, reduseres effekttopper fint ned til 28,8 MW og 30,014 MW i begge toppene. Dette tilsvarer en reduksjon på 21%. Denne forminskningen er betydelig, men i et tilfelle dersom en omformer faller ut, økes belastningen over omformer 1 og omformer 2 drastisk. Selv om i et realistisk jernbanenett, ville det vært andre omformere i kjede med disse i modellen som hadde bidratt å synke ned belastningen over omformer 1 og omformer 2. Det ble også gjort noen endringer i batteri parametere for å kunne få batteriet til å levere på lave belastninger. Pstartfeed ble satt ned fra 4,5 MW til 1 MW, denne endringen medfører at batteriet leverer ut når belastningen passerer 1 MW. I tillegg, ble batteriets ladeeffekt satt på 8 MW fordi i en case som denne, ble det nødt til å bruke høy ladeeffekt for å kunne observere betydelige forskjeller.

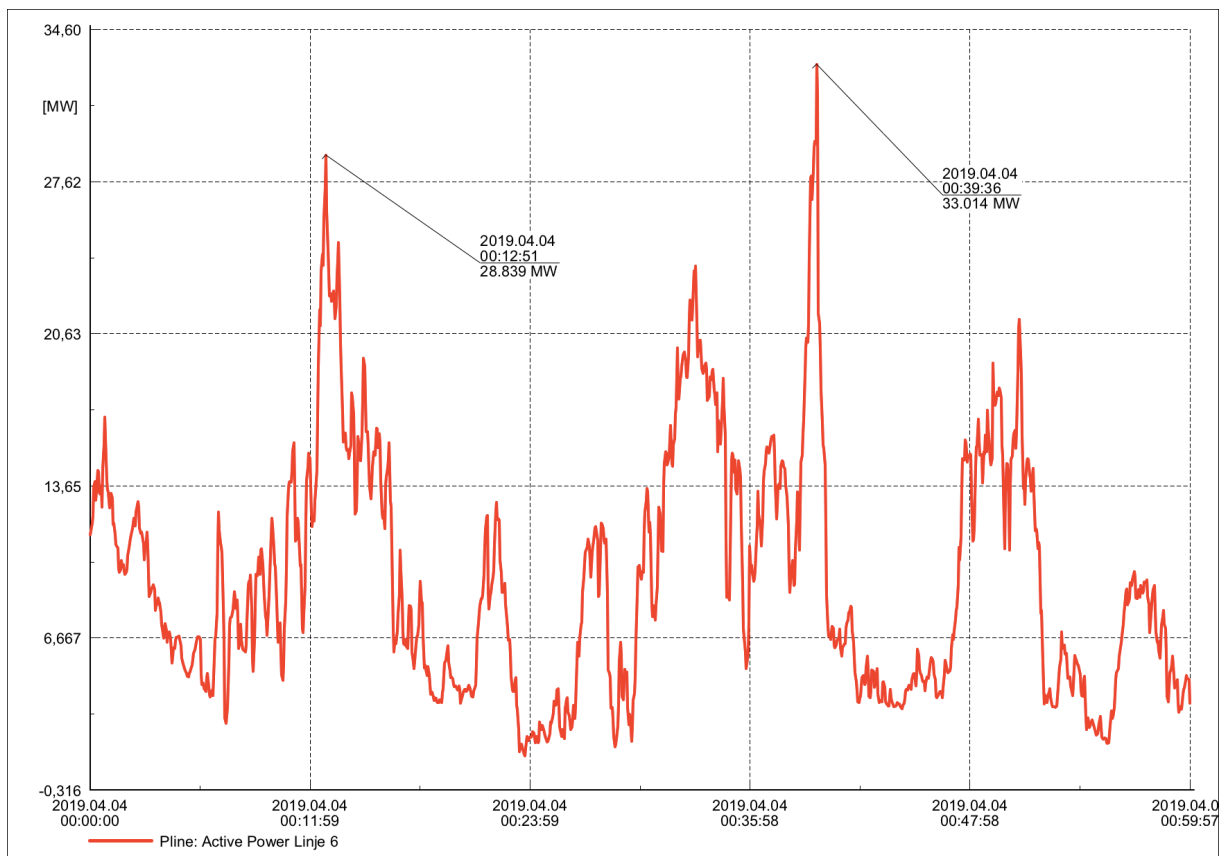


Fig 34: Case 6.4.2: Aktiv effekt gjennom linje seks. Med batteri

Strøm gjennom linja forminskes fra 1,52 kA til 1,19 kA som vist i fig 35. Dette er en reduksjon på 21,6% og selv om batteriets bidrag er betydelig, er strømverdien fremdeles ganske høy. Denne strømmen i realiteten ville vært mindre dersom andre omformere som

henger i nettet men ikke inkludert i modellen, ville bidratt. Spenningen ligger på en verdi som ikke er langt unna 16,5 KV og dermed ikke skaper store problemer i nettet i denne casen.

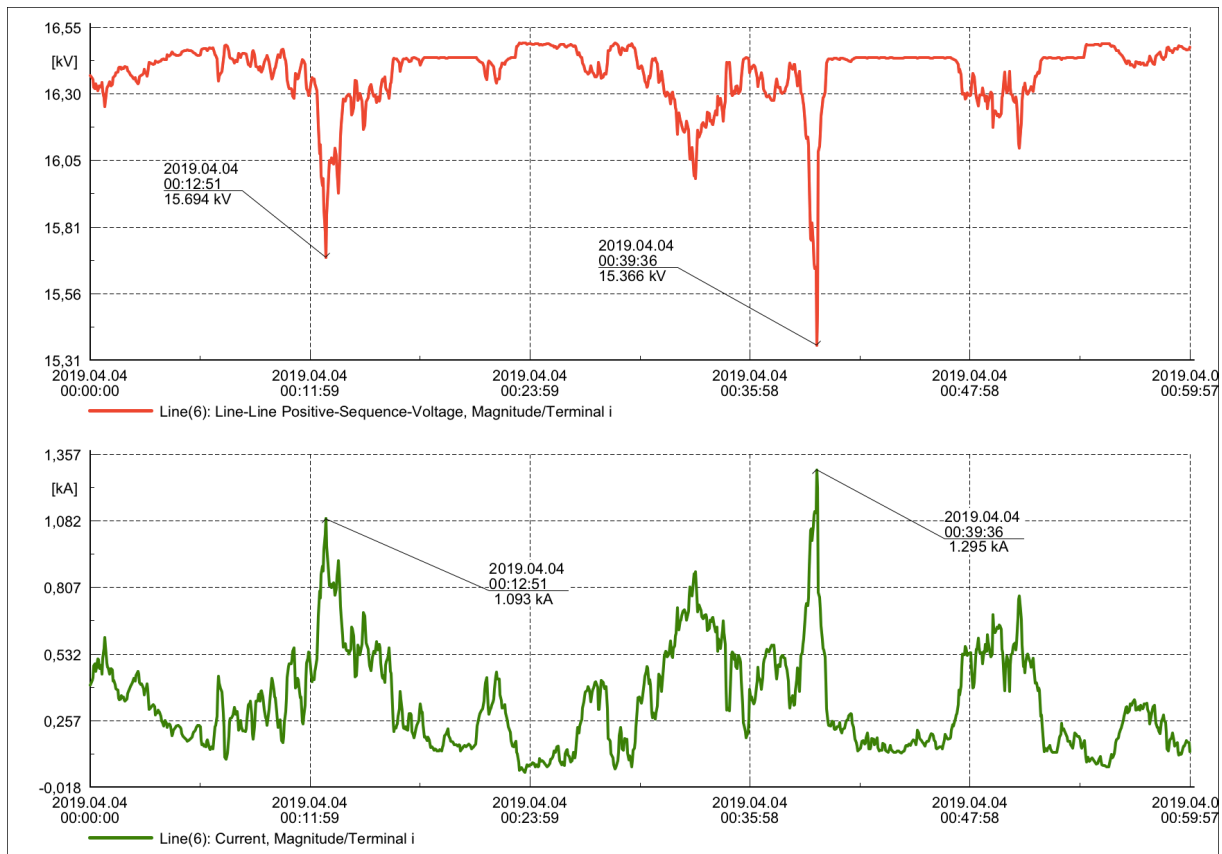


Fig 35: Case 6.4.2: Spenning og strøm gjennom linje seks. Med batteri

Batteri kapasitet var endret på 4 MWh, men i denne casen kan det observeres ut ifra fig 36 at SOC synker i hele intervallet på 1 en time. Dersom intervallet hadde vært lengre, hadde SOC nådd SOC_{MIN} på 10% og batteriet ville gått tom for energi. Siden belastning ble for stor, vil ikke batteriet kunne lade seg opp igjen og dermed dra effekt fra overliggende nettet. Under dette spesifikke intervallet på en time, var batteriet nyttig og gjorde den ønskelige oppgaven av å redusere effekttopper og strømtopper, men i lengre intervaller, ville ikke batteriet kunne levere og dermed ville det være viktig å se på bidrag fra andre omformerne i kjeden som avlastet disse to omformerne i oppgave som videre fører til mindre effektbelastning på batteriet. Da ville batteriet kunne lade seg opp igjen til SOC_{MAX} og levere i lengre intervaller.

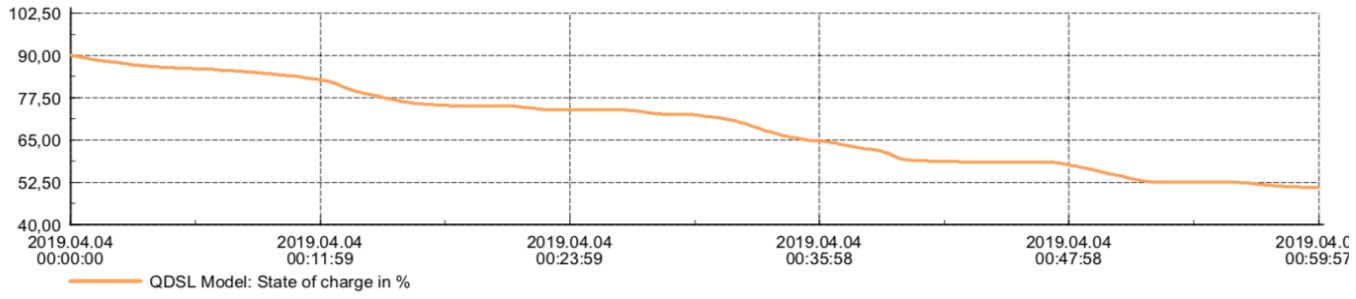


Fig 36: Case 6.4.2: Batteries state of charge i present

7 Diskusjon og anbefalinger

Som det ble sett i simuleringer i casene i kapittel 6, et batterianlegg bidrar til reduksjon av effekttopper i linjene i en banestrømforsyning som vist i casene under kapittel. Effekt og batterikapasitet er en viktig faktor å dimensjonere når det gjelder fornuftig bruk av installasjonen. Batteri parametere som $P_{startfeed}$ og $P_{startstore}$ som nevnt i kapitlet ovenfor, må settes slik at batteriet har en ønsket virkning. Peak shaving og dimensjonering av batteri henger derfor sammen og er i stor grad avhengig av hverandre. Som i case 6.3, er ulike batteristørrelser direkte proporsjonale med reduksjon av effekttopper (peak shaving) i linjen. Batterikapasitet er en annen viktig faktor som trenger å være stor nok for at batteriet ikke går tomt for energi etter å redusere en effekttopp. Ut ifra Excel analysen, ble det beregnet batterikapasitet på 4 MWh. Denne batteri størrelsen ble beregnet i henhold til strømdata på en periode over en måned, da ble viktig å dimensjonere størrelsen slik at batterienergi ikke går under null som forklart i excel analyse resultat i delkapittel 3.3. Det kan tas et tilfelle i case 6.2.2, når batterikapasitet er satt på 4 MWh, klarer batteriet å levere effekt og reduserer begge effekttopper fint, SOC synker lavest til 84,2 %. Det viser at batteriet fremdeles kunne redusere flere effekttopper i det intervallet dersom det skulle oppstå noen til batteriet når SOC_{MIN} . Hvis batterikapasitet ble satt på en lavere verdi for eksempel 0,5 MWh, ville batteriet gå tomt etter å levere effekt til første effekttopp og med kombinasjon av en lav oppladnings effekt og lav batterikapasitet, hadde ikke batteriet klart å lade seg opp igjen til å redusere andre effekttoppen.

En slik batteri installasjon må nødvendigvis ikke være operativ i situasjon med kun overbelastet linjer. Det kan også være ønskelig at batteriet leverer og reduserer effekttopper daglig uten at det er særlig behov. Dette bør likevel ikke påvirke batteriets evne til å redusere effekttopper under overbelastning. Som tidligere sett i 6.3 og 6.4, trenges det å endre på batteri parametere avhengig av situasjoner. For et slikt forbruk, er det nødt til å regulere batterikapasitet, oppladning og utladning parametere manuelt i forhold til behov.

Resultater fra datasett gitt av Bane Nor som ble brukt i Excel analyse i delkapittel 3.4, foreslår å bruke batterikapasitet på 4 MWh og ladeeffekt på 4 MW som også ble brukt i mange simulerings tilfeller. Siden det ble gjort en forenkling og modellen ble simulert i trefase istedenfor enfase, var det høye effekt som flyter i linjene, dette medfører at batteri parametere ble satt med hensyn på trefasenett. Det kompliserer valg av oppladning, utladnings parametere samt batteri kapasitet tilpasset til enfase system. Dersom denne forenklingen blir sett bort i fra, blir ladeeffekt på 4 MW et godt valg med tanke på at det

reduuerte effekttopper betydelig ned og forminsket strømverdier fint under linje-str mgrenser også som vist i case 6.2.2 i fig 24. Det kan også brukes ladeeffekt på 6 MW og 8 MW dersom noen av innkommende linjene i en av omformerne opplever høye strømtopper.

Aktiv effekt i batteriet og linje 6 er høye i simuleringen med en faktor på roten av 3. Det skyldes økningen i belastninger i tidsserien med roten av 3 på grunn av simulering i trefase verden, som det også ble nevnt tidligere i delkapittel 5.3. Dermed må disse effekt verdiene divideres med roten av 3 for å kunne få tilsvarende verdier i enfase verden. Samtidig er det viktig å nevne at strøm verdiene som ble fått i simuleringene tilsvareer verdier i enfase system på grunn av økning i lasten med roten av 3. Tilsvarende batterikapasitet i enfase blir derfor 2,31 MWh med ladeeffekt på 2,31 MW. Med sikkerhetsmarginer, kan en batterikapasitet på 2,5 MWh med ladeeffekt på 2,5 MWh være et fornuftig valg for bruk i enfase verden. Ladeeffekter som ble brukt i case 6.3.1 og 6.3.2, ville også tilsvart 3,5 MW og 4,6 MW respektivt i realiteten.

8 Konklusjon

I rapporten, ble det funnet at batterilagring applikasjon er en nyttig ressurs i en banestrømforsyning. En batteri installasjon kan være en løsning til flere problemer i et kraft fordelingsystem. Et batteri kan bidra til å regulere strøm og spenning, som et effektlagringsanlegg dersom det behøves og ikke minst relevant og signifikant for reduksjon av effekttopper (peak shaving) i perioder med overbelastninger, noe denne oppgaven omfatter. Under drift, vil batteriet lade seg opp dersom effekt etterspørsel er lav og utlades når det oppstår effekttopper.

Ut ifra resultater fra simuleringer i kapittel 6 og dimensjonert batterikapasitet i kapittel 5, vises det at det at batteriets evne til å levere energi kan redusere effekten som overliggende nett leverer. Med riktige batteri parametere, kan det også unngås overbelastninger over linjen som representerer omformer 2 som vist i kapittel og det slippes og dra ekstra effekt fra overliggende nett. Det trenger derimot riktig dimensjonering av batterikapasitet for å kunne oppfylle det som jernbanenettet har behov for til ulike last etterspørsler i ulike tidspunkter.

Ulike batterier kan være aktuelle for utførelsen av effekttopp reduksjon. Som det ble tidligere introdusert i oppgaven, kan litium-ion batteri, blybatteri og flytbatteri kan være gode kandidater til peak shaving applikasjon. Det kreves økonomiske vurderinger om hvilken av de teknologiene som blir mest aktuelle. Siden denne oppgaven ikke analyserer økonomiske grunnlag for valg av batteriteknologi, ble det derfor vanskelig å anbefale en.

Fra tidligere resultater i kapittel 6, en god dimensjonering av batteri i en banestrømforsyning kan være en batterikapasitet på 2,5 MWh med ladeeffekt som blir avhengig av last situasjon. I simuleringer resultater, ble det sett at et batteri med kapasitet på 4 MWh og ladeeffekt på 2 MW (trefase) kan redusere effekttopper med 13% i forhold til situasjon uten batteri. Denne reduksjonen økes ved økningen i ladeeffekten. Det kan observeres i en case hvor det tas en situasjon med at en omformer faller ut, med batterikapasitet fremdeles på 4 MWh (trefase) og økt ladeeffekt på 8 MW (trefase) i dette tilfellet, reduseres effekttopper med 21%. Ved fordobling i ladeeffekt med lik kapasitet på 4 MWh med 3 omformere som i utgangspunktet, reduseres effekttopper med 20% sammenlignet med tilfellet uten batteri.

Etter analysen av resultater, kan det vises at med riktig dimensjonert batterikapasitet og tilpasset oppladnings og utladnings batteri parametere, kan effekttopper reduseres uansett hvordan behovet blir og hvor ofte effekttopper oppstår. Batterikapasitet, ladeeffekt og aktiv

effekt i linje 6 må divideres på roten av 3 på grunn av forenklingen som foretas i simuleringen for å kunne få tilsvarende verdier for enfase system. Strømmen vil være det samme i enfase system som den ville vært i trefase verden.

9 Videre arbeid

I oppgaven, ble det gjort mange forenklinger som førte til avgrensninger. Det kan gjøres mange forbedringer for å unngå forenklinger som ikke gir ønskede resultater. I dette kapitlet, skal det foreslås noen videre arbeid som kan føre til forbedringer i rapporten:

- Det kan brukes bedre og moderne måleutstyr som kan gi mer nøyaktige og realistiske last verdier.
- Det kan foretas en økonomisk vurdering av omformerstasjonen med batteri installasjon og hvis det dras effekt fra overliggende nett til å redusere effekttopper.
- Det kan gjøres en grundig tap analyse av system med og uten batteri installasjon for å gi en bedre økonomisk vurdering.
- Det kan brukes en bedre simulering programvare som er mer rettet mot modellering av jernbane nettverket.
- Et forbedret batterikontrollsystem som tillater oppladning av batteri ved lavt effektbehov.
- Det kan gjøres en analyse på effekt kvaliteten som batteriet leverer.

Referanse

- [1] Kraftsystemutredning. Bane NOR [Internett]: banenor.no [30.06.17;19.05.19].
Tilgjengelig fra: <https://www.banenor.no/elkraft/energi/kraftsystemutredning.pdf>
- [2] Vi skaper fremtidens jernbane. Bane NOR [Internett]: banenor.no [05.2017;19.05.19].
Tilgjengelig fra:
<https://www.banenor.no/contentassets/4d2f2788335a43d0b2571f0248c6c656/brosjyre-bane-nor---vi-skaper-fremtidens-jernbane.pdf>
- [3] Generell beskrivelse av banestrømforsyning [Internett]: jernbanekompetanse.no [08.12.2016;19.05.19]. Tilgjengelig fra:
https://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Generell_beskrivelse_av_banestrømforsyning
- [4] Jernbaneverket [Internett]: jernbaneskole.no [20.02.19]. Tilgjengelig fra:
<https://jernbaneskolen.no/neted/services/file/?hash=3835df3c6fe3e134aa6b7477a5615001>
- [5] Slik fungerer jernbanen. Bane NOR [Internett]: banenor.no [10.02.19] Tilgjengelig fra: <https://www.banenor.no/contentassets/b9ade1303f42474eabf16099c7dd2182/slik-fungerer-jernbanen-versjon-191213.pdf>
- [6] Effektflyt [Internett]: jernbanekompetanse.no [28.01.2015;19.05.19]
Tilgjengelig fra: <https://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Effektflyt>
- [7] How does the lead acid battery work? [Internett]: Batteryuniversity.com [29.08.18;19.05.19] Tilgjengelig fra:
https://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries
- [8] Lombardo T. Massive 800 MegaWatt-hour battery to be deployed in China [Internett]: Engineering.com [05.06.16;19.05.19] Tilgjengelig fra:
<https://www.engineering.com/DesignerEdge/DesignerEdgeArticles/ArticleID/12312/Massive-800-MegaWatt-hour-Battery-to-Be-Deployed-in-China.aspx>

- [9] Murnane M, Ghazel A. A closer look at state of charge (SOC) and state of health (SOH) estimation techniques for batteries [Internett] analog.com [19.05.19]
Tilgjengelig fra : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/A-Closer-Look-at-State-Of-Charge-and-State-Health-Estimation-Techniques-....pdf>
- [10] How a battery works [Internett]:[science.org.au](http://www.science.org.au) [25.02.2016;19.05.19]. Tilgjengelig fra: <https://www.science.org.au/curious/technology-future/batteries>
- [11] Pang Shou. Battery state-of-charge estimation: Proceedings of the 2001 American Control Conference (Cat.No.01CH37148) [Internett] IEEE Xplore [07.08.02:19.05.19]
Tilgjengelig fra: <https://ieeexplore.ieee.org/document/945964>
- [12] Foiadelli,Federica.Analysis of ageing effect on li-polymer batteries[Internett].ncbi.nlm.nih.gov[18.04.19]Tilgjengelig fra: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4506813/#B18>
- [13] Masters,M,Gilbert.Renewable and efficient electric power systems [avhandling].a-ghadimi.com[05.04.19] Tilgjengelig fra: http://www.a-ghadimi.com/files/Courses/Renewable%20Energy/REN_Book.pdf
- [14] Oppgraderte omformer. Bane NOR [Internett]. banenor.no[21.05.15:10.04.19]
Tilgjengelig fra: <https://www.banenor.no/Nyheter/Nyhetsarkiv/2015/Oppgraderte-omformere/>
- [15] Grolleau,Sebastien.Delaille,Arnaud.Gualous, Hamid.Predicting lithium-ion battery degradation for efficient design and management [Internett]:researchgate.com[17.11.13:19.05.19] .Tilgjengelig fra:

https://www.researchgate.net/publication/325293217_Predicting_lithium-ion_battery_degradation_for_efficient_design_and_management

[16] Intensium Max, the megawatt energy storage system [Internett]. Saft batteries. [05.05.19] Tilgjengelig fra: <https://www.saftbatteries.com/products-solutions/products/intensium%C2%AE-max-megawatt-energy-storage-system>

[17] Asea Brown Broveri. Peak shaving [Internett]: abb.com [19.05.19]. Tilgjengelig fra: <https://new.abb.com/distributed-energy-microgrids/applications/energy-storage-applications/peak-shaving>

[18] Omformerstasjoner. Bane NOR [Internett]: banenor.no. [10.02.19] Tilgjengelig fra: <https://www.banenor.no/elkraft/omf/index.html>

[19] Electropedia. Battery and Energy Technologies [Internett]: mpoweruk.com [19.05.19]. Tilgjengelig fra: <https://www.mpoweruk.com/flow.htm>

[20] Marshall B. How lithium-ion batteries work [Internett]: howstuffworks.com [14.11.2006; 19.05.19] Tilgjengelig fra: <https://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/lithium-ion-battery.htm>

[21] Service, F, Robert.. New generation of “flow batteries” could eventually sustain a grid powered by the sun and wind [Internett]: sciencemag.org [31.10.18; 19.05.19]. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencemag.org/news/2018/10/new-generation-flow-batteries-could-eventually-sustain-grid-powered-sun-and-wind>

[22] Electropedia. Battery and Energy Technologies [Internett]: mpoweruk.com [19.05.19]. Tilgjengelig fra: <https://www.mpoweruk.com/leadacid.htm>

- [23] Can you provide a quasi-dynamic simulation case with QDSL battery model integrated? [Internett]. DlgSILENT Power Factory [01.04.19] Tilgjengelig fra:
<https://www.digsilent.de/en/faq-reader-powerfactory/can-you-provide-a-quasi-dynamic-simulation-case-with-qdsl-battery-model-integrated/searchfaq/QDSL.html>
- [24] PV education.org.Characteristics of lead acid batteries[Internett]. pveducation.org [20.03.19] Tilgjengelig fra:
<https://www.pveducation.org/pvcdrom/lead-acid-batteries/characteristics-of-lead-acid-batteries>
- [25] DlgSILENT PowerFactory version 2019 user manual. Online edition. DlgSILENT GmbH, Germany December 2018.
- [26] Chen H, Ngoc T, Yang W, Tan C, Li Y, Ding Y. Progress in electrical storage system: a critical review [Internett] Elsevier [10.03.09:19.05.19] Tilgjengelig fra:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100200710800381X>
- [27] Battery-storage-peak-shaving-graph[Internett]. EvoEnergy [19.05.19] Tilgjengelig fra:
<https://www.evoenergy.co.uk/technology/solar-battery-storage/battery-storage-peak-shaving-graph/>
- [28] Jernbaneverket.Banestrømforsyning[Internett]:trv.jbv.no[13.04.03:19.05.19]. Tilgjengelig fra:
<https://trv.jbv.no/PDF/Banestromforsyning/546/Vedlegg/T4605a101.pdf>
- [29] Tellez,Perez,Adriel.Modelling aggregate loads in power systems [avhandling].diva-portal.org[25.04.19]Tilgjengelig fra:
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1085518/FULLTEXT01.pdf>
- [30] Dlgsilent .Power factory applications [Internett]:dlgsilent [19.05.19] .Tilgjengelig fra:
<https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html>

[31] State of charge (SOC) determination [Internett]. Electropaedia [05.04.19] Tilgjengelig fra: <https://www.mpoweruk.com/soc.htm>

[32] Is lithium-ion the ideal battery? [Internett]. Batteryuniversity.com [20.10.10:05.04.19] Tilgjengelig fra: https://batteryuniversity.com/learn/archive/is_lithium_ion_the_ideal_battery

[33] Understanding lithium-ion [Internett]. Batteryuniversity.com [15.10.10:05.04.19] Tilgjengelig fra: https://batteryuniversity.com/learn/archive/understanding_lithium_ion

[34] Yano K, Hayashi S, Kumamoto T, Shibata T, Yamanishi K, Fujikawa K. Development and demonstration of redox flow battery system [Internett]: SEI [04.2017;19.05.19] Tilgjengelig fra: <https://global-sei.com/technology/tr/bn84/pdf/84-04.pdf>

Vedlegg

Vedlegg A

A.1 Excel regneark en-fase

	A	B	C	D	E	F	G
1	Tid sekund	Strøm ut A (3sekunder):	Effekt ut MW	Energi ut MWh	Lade-effekt MW	Lade-energi MWh	Energi i batteri MWh
2	0						1,25
3	3	145,6	2,40	0,00200	2,50	0,00208	1,25
4	6	130,2	2,15	0,00179	2,50	0,00208	1,25
5	9	118,3	1,95	0,00163	2,50	0,00208	1,25
6	12	118,2	1,95	0,00163	2,50	0,00208	1,25
7	15	119,6	1,97	0,00164	2,50	0,00208	1,25
8	18	122,1	2,01	0,00168	2,50	0,00208	1,25
9	21	124,7	2,06	0,00172	2,50	0,00208	1,25
10	24	125,3	2,07	0,00172	2,50	0,00208	1,25
11	27	130,1	2,15	0,00179	2,50	0,00208	1,25
12	30	134,4	2,22	0,00185	2,50	0,00208	1,25
13	33	139,8	2,31	0,00192	2,50	0,00208	1,25
14	36	140,0	2,31	0,00193	2,50	0,00208	1,25
15	39	142,2	2,35	0,00196	2,50	0,00208	1,25
16	42	137,2	2,26	0,00189	2,50	0,00208	1,25
17	45	113,8	1,88	0,00157	2,50	0,00208	1,25
18	48	112,1	1,85	0,00154	2,50	0,00208	1,26
19	51	131,9	2,18	0,00181	2,50	0,00208	1,26
20	54	138,2	2,28	0,00190	2,50	0,00208	1,26
21	57	125,6	2,07	0,00173	2,50	0,00208	1,26
22	60	116,5	1,92	0,00160	2,50	0,00208	1,26
23	63	114,8	1,89	0,00158	2,50	0,00208	1,26
24	66	101,8	1,68	0,00140	2,50	0,00208	1,26
25	69	94,6	1,56	0,00130	2,50	0,00208	1,26
26	72	93,9	1,55	0,00129	2,50	0,00208	1,26
27	75	95,7	1,58	0,00132	2,50	0,00208	1,26
28	78	100,9	1,67	0,00139	2,50	0,00208	1,26
29	81	104,4	1,72	0,00144	2,50	0,00208	1,26
30	84	70,1	1,16	0,00096	2,50	0,00208	1,26
31	87	64,9	1,07	0,00089	2,50	0,00208	1,26
32	90	64,7	1,07	0,00089	2,50	0,00208	1,26
33	93	67,5	1,11	0,00093	2,50	0,00208	1,27
34	96	67,0	1,11	0,00092	2,50	0,00208	1,27
35	99	59,0	0,97	0,00081	2,50	0,00208	1,27

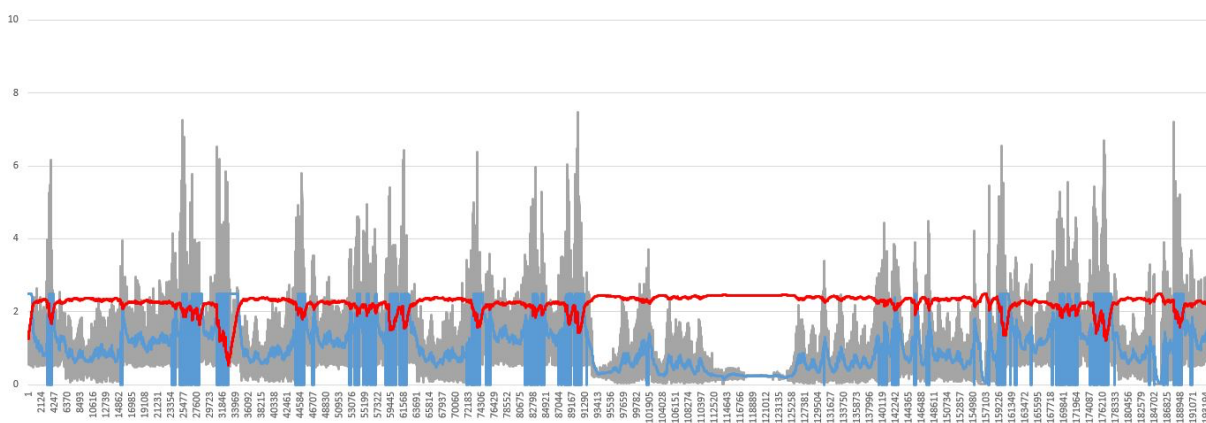
A.2 Excel regneark en-fase

	A	B	C	D	E	F	G
1	Tid sekund	Strøm ut A (3sekunder):	Effekt ut MW	Energi ut MWh	Lade-effekt MW	Lade-energi MWh	Energi i batteri MWh
2	0						1,25
3	3	39,89	0,66	0,00055	2,50	0,00208	1,25
4	6	38,29	0,63	0,00053	2,50	0,00208	1,25
5	9	35,67	0,59	0,00049	2,50	0,00208	1,25
6	12	36,93	0,61	0,00051	2,50	0,00208	1,26
7	15	41,44	0,68	0,00057	2,50	0,00208	1,26
8	18	40,24	0,66	0,00055	2,50	0,00208	1,26
9	21	37,33	0,62	0,00051	2,50	0,00208	1,26
10	24	37,11	0,61	0,00051	2,50	0,00208	1,26
11	27	38,95	0,64	0,00054	2,50	0,00208	1,26
12	30	41,40	0,68	0,00057	2,50	0,00208	1,27
13	33	39,64	0,65	0,00055	2,50	0,00208	1,27
14	36	36,88	0,61	0,00051	2,50	0,00208	1,27
15	39	34,96	0,58	0,00048	2,50	0,00208	1,27
16	42	35,61	0,59	0,00049	2,50	0,00208	1,27
17	45	35,30	0,58	0,00049	2,50	0,00208	1,27
18	48	37,49	0,62	0,00052	2,50	0,00208	1,27
19	51	39,38	0,65	0,00054	2,50	0,00208	1,28
20	54	40,83	0,67	0,00056	2,50	0,00208	1,28
21	57	40,82	0,67	0,00056	2,50	0,00208	1,28
22	60	38,93	0,64	0,00054	2,50	0,00208	1,28
23	63	35,95	0,59	0,00049	2,50	0,00208	1,28
24	66	36,25	0,60	0,00050	2,50	0,00208	1,28
25	69	39,42	0,65	0,00054	2,50	0,00208	1,29
26	72	40,27	0,66	0,00055	2,50	0,00208	1,29

A.3 Parameter beskrivelse Excel regneark (enfase)

Beskrivelse	Verdi	Benevnelse
Maks ladeeffekt	2,50	MW
Ladeknekkpunkt	2,00	MW
Maks batterikapasitet	2,50	MWh
Energi i batteriet ved start:	1,25	MWh
Grense for ladning:	3	MW

A.4 Diagram basert på Excel regneark (enfase)



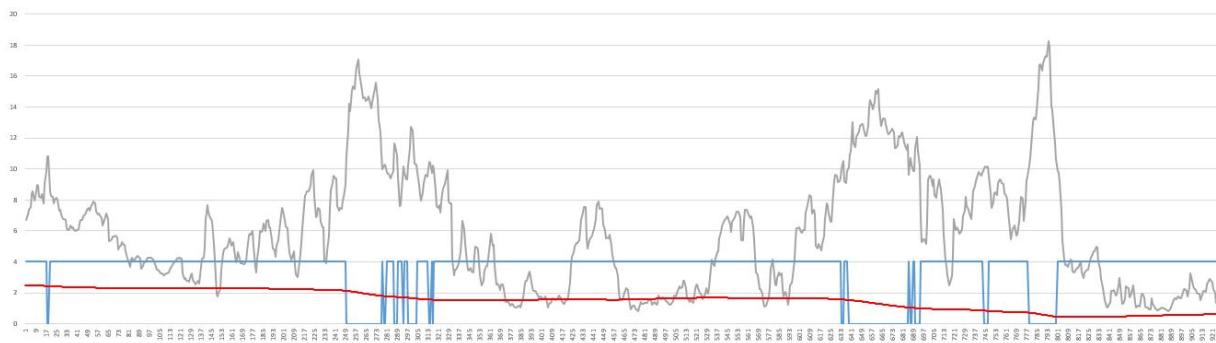
A.5 Diagram basert på Excel regneark (trefase)

	A	C	D	E	F	G
1	Tid sekund	Effekt ut MW	Energi ut MWh	Lade-effekt MW	Lade-energi MWh	Energi i batteri MWh
2	0					2,50
3	3	6,70303663	0,00559	4,00	0,00333	2,50
4	6	7,04944679	0,00587	4,00	0,00333	2,50
5	9	7,36121593	0,00613	4,00	0,00333	2,49
6	12	7,55174152	0,00629	4,00	0,00333	2,49
7	15	8,34848489	0,00696	4,00	0,00333	2,49
8	18	8,55633099	0,00713	4,00	0,00333	2,48
9	21	7,95011321	0,00663	4,00	0,00333	2,48
10	24	8,19260032	0,00683	4,00	0,00333	2,48
11	27	8,95470268	0,00746	4,00	0,00333	2,47
12	30	8,92006166	0,00743	4,00	0,00333	2,47
13	33	8,17527981	0,00681	4,00	0,00333	2,46
14	36	8,10599778	0,00675	4,00	0,00333	2,46
15	39	8,40044642	0,00700	4,00	0,00333	2,46
16	42	7,77690813	0,00648	4,00	0,00333	2,45
17	45	9,0066642	0,00751	4,00	0,00333	2,45
18	48	9,8726896	0,00823	4,00	0,00333	2,44
19	51	10,807997	0,00901	0,00	0,00000	2,44
20	54	10,807997	0,00901	0,00	0,00000	2,43
21	57	8,5736515	0,00714	4,00	0,00333	2,42
22	60	8,26188235	0,00688	4,00	0,00333	2,42
23	63	8,17527981	0,00681	4,00	0,00333	2,42
24	66	7,75958762	0,00647	4,00	0,00333	2,41
25	69	8,00207473	0,00667	4,00	0,00333	2,41
26	72	8,12331829	0,00677	4,00	0,00333	2,41

A.6 Diagram basert på Excel regneark (trefase)

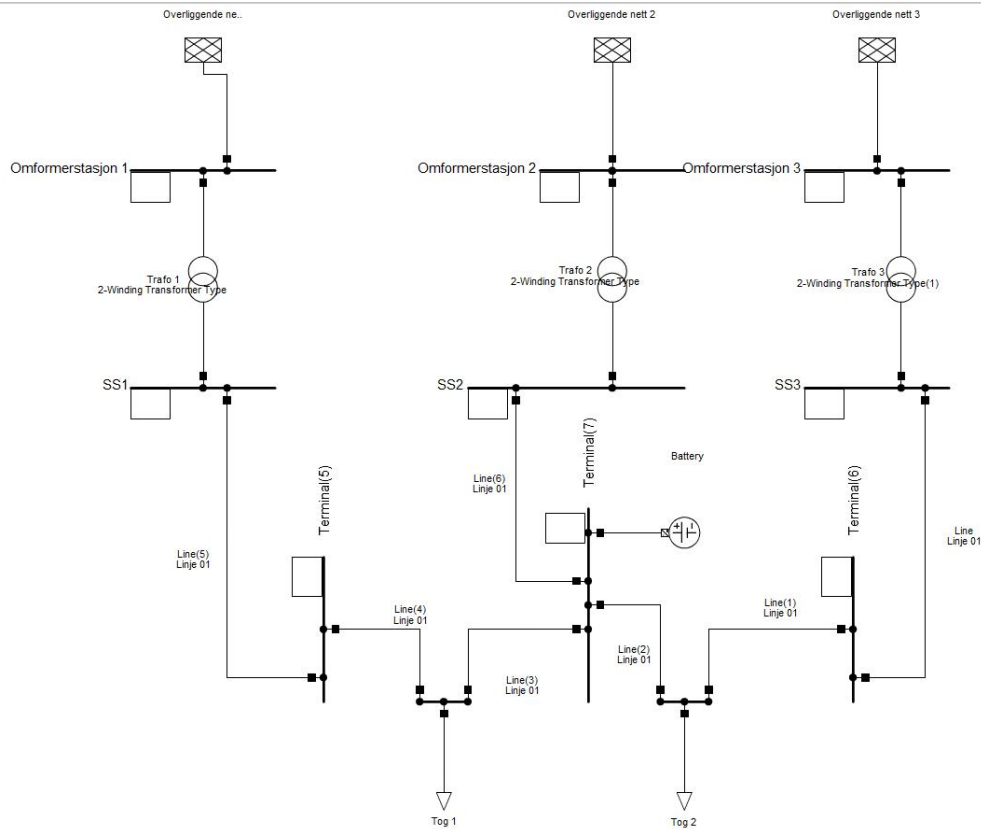
Beskrivelse	Verdi	Benevnelse
Maks ladeeffekt	4,00 MW	
Ladeknekkpunkt	3,75 MW	
Maks batterikapasitet	4,00 MWh	
Energi i batteriet ved start:	2,5 MWh	
Grense for ladning:	10 MW	

A.7 Diagram basert på Excel regneark (trefase)



Vedlegg B

B.1 Enlinjeskjema av modellen som brukes i Power Factory



B.2 Case 6.1.2 Quasi simulering batteri parametere

Batteri parametere	Verdier
Eini Storage energy (MWh)	4
SOCini initial state of charge (%)	90
SOC_{MIN} Minimum state of charge (%)	10
SOC_{MAX} Maximal state of charge (%)	90
Pstore Nominal storing active power (MW)	4
PFullStore Power to store at full power (MW)	2
Pstartstore Power to start storing (MW)	3
Pfeed Nominal feeding active power (MW)	4

Pstartfeed Power to start feeding (MW)	1,5
PFullFeed Power to feed at full power (MW)	5

B.3 Case 6.2.2 Quasi simulering batteri parametere

Batteri parametere	Verdier
Eini Storage energy (MWh)	4
SOCini initial state of charge (%)	90
SOC_{MIN} Minimum state of charge (%)	10
SOC_{MAX} Maximal state of charge (%)	90
Pstore Nominal storing active power (MW)	4
PFullStore Power to store at full power (MW)	2
Pstartstore Power to start storing (MW)	4,5
Pfeed Nominal feeding active power (MW)	4
Pstartfeed Power to start feeding (MW)	3
PFullFeed Power to feed at full power (MW)	5

B.4 Case 6.3.1 Quasi simulering batteri parametere

Batteri parametere	Verdier
Eini Storage energy (MWh)	4
SOCini initial state of charge (%)	90
SOC_{MIN} Minimum state of charge (%)	10
SOC_{MAX} Maximal state of charge (%)	90
Pstore Nominal storing active power (MW)	4
PFullStore Power to store at full power (MW)	2
Pstartstore Power to start storing (MW)	3
Pfeed Nominal feeding active power (MW)	6

Pstartfeed Power to start feeding (MW)	1,5
PFullFeed Power to feed at full power (MW)	5

B.5 Case 6.3.2 Quasi simulering batteri parametere

Batteri parametere	Verdier
Eini Storage energy (MWh)	4
SOCini initial state of charge (%)	90
SOC_{MIN} Minimum state of charge (%)	10
SOC_{MAX} Maximal state of charge (%)	90
Pstore Nominal storing active power (MW)	4
PFullStore Power to store at full power (MW)	2
Pstartstore Power to start storing (MW)	3
Pfeed Nominal feeding active power (MW)	8
Pstartfeed Power to start feeding (MW)	1,5
PFullFeed Power to feed at full power (MW)	5

B.6 Case 6.4.2 Quasi simulering batteri parametere

Batteri parametere	Verdier
Eini Storage energy (MWh)	4
SOCini initial state of charge (%)	90
SOC_{MIN} Minimum state of charge (%)	10
SOC_{MAX} Maximal state of charge (%)	90
Pstore Nominal storing active power (MW)	4
PFullStore Power to store at full power (MW)	2
Pstartstore Power to start storing (MW)	3

Pfeed Nominal feeding active power (MW)	8
Pstartfeed Power to start feeding (MW)	1,5
PFullFeed Power to feed at full power (MW)	6

Vedlegg C

C.1 Initialisering

```
double pmeas;

SOC = SOCini;
pmeas = 0.;

! measured power operation area
chargeP = 0.;
if ({PFullStore >= PStartStore}.or.{PStartFeed >= PFullFeed}) {
    chargeP = 0; ! Error
    Warn('PFullStore must be < than PStartStore and PFullFeed > than PStartFeed');
}
else if (pmeas > PStartFeed) {
    chargeP = 3;
}
else if (pmeas < PStartStore) {
    chargeP = 1;
}
else {
    chargeP = 2;
}

! energy operation area
iniSOCoob = 0; ! Inside bounds
if (SOCmin >= SOCmax) {
    chargeE = 0; ! Error
    Warn('SOCmin must be < than SOCmax.');
```

```

else if (SOC > SOCmax) {
    chargeE = 3;
    iniSOCcoob = 1;
}
else if (SOC = SOCmax) {
    chargeE = 3;
}
else if (SOC = SOCmin) {
    chargeE = 1;
}
else if (SOC < SOCmin) {
    chargeE = 1;
    iniSOCcoob = 1;
}
else {
    chargeE = 2;
}

```

C.2 Lastflyt uttrykk

```

double Pgen,
       Qgen,
       redFac;

Pmeas = Pline*orientation - Pset; ! negative=load

redFac = 1.0;
if ({chargeP = 3}.and.{chargeE >= 2}.and.{chargeE > 0}) {
    if (Pmeas < PFullFeed) {
        redFac = 1 - ((PFullFeed - Pmeas)/(PFullFeed - PStartFeed));
    }
    Pgen = Pfeed * redFac; ! discharge = GEN, feeding
    Qgen = Qfeed * redFac; ! discharge = GEN, feeding
}
else if ({chargeP = 1}.and.{chargeE <= 2}.and.{chargeE > 0}) {
    if (Pmeas > PFullStore) {
        redFac = 1 - ((PFullStore - Pmeas)/(PFullStore - PStartStore));
    }
    Pgen = -Pstore * redFac; ! charge = LOAD, storing
    Qgen = -Qstore * redFac; ! charge = LOAD, storing
}

else {
    Pgen = 0.;
    Qgen = 0.;
}

SetEquation(0, Pset - Pgen);
SetEquation(1, Qset - Qgen);

```

C.3 Lastflyt kontroll

```
Pmeas = Pline*orientation - Pset; ! negative=load
! measured power operation area
if (chargeP > 0) { ! Not initial error
  if (Pmeas > PstartFeed) {
    chargeP = 3;
  }
  else if (Pmeas < PstartStore) {
    chargeP = 1;
  }
  else {
    chargeP = 2;
  }
}
! energy operation area
if (chargeE > 0) { ! Not initial error
  if (SOC >= SOCmax) {
    chargeE = 3;
    if ({iniSOCoob = 0}.and.{SOC > SOCmax}) {
      SOC = SOCmax;
    }
  }
  else if (SOC <= SOCmin) {
    chargeE = 1;
    if ({iniSOCoob = 0}.and.{SOC < SOCmin}) {
      SOC = SOCmin;
    }
  }
  else {
    chargeE = 2;
    iniSOCoob = 0; ! Inside limits now
  }
}
```

C.4 Quasi-dynamics simuleringis kontroll

```
! energy operation area
if (chargeE > 0) { ! Not initial error
  if (SOC >= SOCmax) {
    chargeE = 3;
    if ({iniSOCcob = 0}.and.{SOC > SOCmax}) {
      SOC = SOCmax;
    }
  }
  else if (SOC <= SOCmin) {
    chargeE = 1;
    if ({iniSOCcob = 0}.and.{SOC < SOCmin}) {
      SOC = SOCmin;
    }
  }
  else {
    chargeE = 2;
    iniSOCcob = 0; ! Inside limits now
  }
}
```