

Sander Watland Nordvik
Emilie Sophie Getz
Øystein Myklegard Kristiansen

Energilagring i samspill med vannkraftverk til frekvensregulering

Bacheloroppgave i ingeniørfag, elektro
Veileder: Ian Norheim
Mai 2024

Sander Watland Nordvik
Emilie Sophie Getz
Øystein Myklegard Kristiansen

Energilagring i samspill med vannkraftverk til frekvensregulering

Bacheloroppgave i ingeniørfag, elektro
Veileder: Ian Norheim
Mai 2024

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk
Institutt for elektrisk energi



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

Når en økt mengde fornybare energikilder, som sol og vind, leverer effekt inn på kraftnettet, er det økt fare for større frekvensavvik. Dette kommer av at energikildene ikke har noe treghetsmoment, som reduserer raten for frekvensendring. For å minimere frekvensavvikene må frekvensreserver regulere effekten ut på kraftnettet, avhengig av målt frekvens. Med flere fornybare energikilder uten treghetsmoment, har systemansvarlige i Norden satt større krav til kraftverkene som skal levere effekt til frekvensreservene. De nye kravene inkluderer prekvalifisering av nye kraftverk som vil levere til primærreservemarkedet fra og med 2024, med en overgang innen 2028 for reserver som allerede leverer tjenesten. De nye kravene gjør at elvekraftverk med kaplanturbin ikke kommer til å oppfylle kravene for stabilitet og rask leveranse av effekt. Dette vil føre til tapte inntekter for kraftselskapene.

For å kvalifisere kraftverkene til reservetjenesten er en løsning å bruke et energilagringssystem i samspill med kraftverket. Her vil energilagringseenheten (batteri eller superkondensator) kunne levere effekten ut på kraftnettet nesten umiddelbart ved et frekvensavvik. I tillegg vil dette redusere slitasje på kraftverket.

Det har blitt undersøkt hvilke typer energilagringseenheter som kan egne seg best til formålet frekvensregulering. Ulike batterityper og superkondensatorer ble undersøkt. Energilagringseenheten må være egnet til rask opp- og utladning, holde på en stor nok mengde energi, holde kostnadene nede og samtidig være sikker og ha liten miljøpåvirkning. Hovedfunnene i oppgaven er at superkondensatorer, spesielt typen elektrokjemisk dobbeltlagskondensator, egner seg godt for frekvensregulering i samspill med kraftverk. Dette er grunnet enhetens høye sykluslevetid, brede temperaturområde for drift og evne til å levere høy effekt over korte perioder. Elektrokjemisk dobbeltlagskondensatorer har i tillegg ikke nevneverdig lavere spesifikk energi enn andre superkondensatorer. For å vite nøyaktig hva som er mest kostnadseffektivt må nødvendig kapasitet for effekt og energi bestemmes individuelt for kraftverket. Litium-ion-batterityper kan vurderes dersom en systemanalyse viser at bruk av Litium-ion-batterier gjøres mer kostnadseffektivt, dersom systemet trenger mer spesifikk energi. Elektrokjemisk dobbeltlagskondensator har en overlegen teknisk profil, er sikrere enn batterier og benytter ikke sjeldne materialer.

Abstract

With an increasing number of renewable energy sources, like solar and wind power, frequency deviations occurs more frequently as these power sources lack inertia. System operators in the Nordic countries have imposed stricter requirements on power plants providing or planning on providing power to frequency containment reserves (FCR). To minimize frequency deviations, frequency reserves must regulate the power output to the electricity grid based on the measured frequency. These new requirements include the prequalification of new power plants for the primary reserve market starting in 2024, with a transition period until 2028 for reserves already providing the service. The new requirements mean that run of the river hydro power plants with Kaplan turbines will not meet the required standards for stability and performance, resulting in lost revenue for power companies.

To qualify these power plants for FCR services, one solution is to use an energy storage system in conjunction with the power plant. In the event of a frequency deviation, the energy storage unit (battery or supercapacitor) can deliver power to the grid almost immediately. Additionally, this will reduce wear and tear on the hydro power turbine.

The thesis investigated which types of energy storage units are best suited for frequency regulation purposes. Various types of batteries and supercapacitors were examined. The energy storage unit must be capable of rapid charge and discharge, maintain a sufficient amount of energy, be cost-effective, and at the same time be safe and have minimal environmental impact. The main findings of the study indicate that supercapacitors, specifically electrochemical double-layer capacitors, are well-suited for frequency regulation in conjunction with hydro power plants. This is due to their high cycle life, wide operating temperature range, and ability to deliver high power in short periods. Furthermore, electrochemical double-layer capacitors do not have a significantly lower specific energy compared to other supercapacitor types. To determine the most cost-effective solution, the necessary capacity for power and energy must be determined individually for each power plant. Lithium-ion batteries can be considered if a system analysis shows that their use is more cost-effective, especially if the system requires more specific energy. Electrochemical double-layer capacitors, however, have a superior technical profile, are safer than batteries, and do not use rare materials.

Forord

Denne bacheloroppgaven er en del av det 3-årige bachelorstudiet i ingeniørfaget elektro med studieretning elkraft og bærekraftig energi ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU).

Oppgaven ble tildelt oss av Hafslund Eco Vannkraft og vi vil gjerne takke dem for å ha gitt oss en så interessant oppgave. Vi har lært mye om leveringskvalitet, reservemarkedet, oppbygning av kraftverk og energilagring. Vi vil takke alle ansatte som har svart på spørsmål, hjulpet oss og gitt oss omvisning hos Hafslund Eco Vannkraft på Lillehammer og Hunderfossen Kraftverk. Vi vil spesielt takke vår kontaktperson hos Hafslund Eco Vannkraft, Magne Lorentzen Kolstad. Vi fikk også god hjelp av Vidar Nylund som svarte godt på spørsmålene vi hadde.

Vi vil også takke alle som har hjulpet oss gjennom bacheloroppgaven og studiet i løpet av de tre årene vi har studert på NTNU i Gjøvik. En spesiell takk til vår veileder Ian Norheim, som har gitt oss god faglig veiledning gjennom arbeidet med denne bacheloroppgaven.

Vi gleder oss til å fortsette vår faglige utvikling i arbeidslivet og på videre studier og takker for oss.

Sander W. Nordvik

Emilie Getz

Øystein M. Kristiansen

Sander Watland Nordvik

Emilie Sophie Getz

Øystein Myklegard Kristiansen

Gjøvik, 21. mai 2024

Innhold

Sammendrag	iii
Abstract	iv
Forord	v
Innhold	vi
Figurer	ix
Tabeller	xi
Akronymer	xii
Ordliste	xiv
1 Innledning	1
1.1 Problemstilling og Mål	2
1.2 Avgrensninger	2
1.3 Oppbygning av oppgaven	2
2 Leveringskvalitet og frekvensreserver	4
2.1 Leveringskvalitet i kraftsystemet	4
2.1.1 Frekvensstabilitet og roterende masse	4
2.1.2 Årsak til nye krav for FCR-markedet	5
2.2 Oversikt over frekvensreserver	6
2.2.1 Raske frekvensreserver - FFR	7
2.2.2 Primærreserver - FCR	7
2.2.3 Sekundærreserver - aFRR	8
2.2.4 Tertiærreserver - mFRR	9
2.3 Kraftmarkedet og reservemarkedene	9
2.3.1 Kriterier for deltakelse i FCR-markedene	9
2.3.2 Prosedyre for prekvalifisering	10
2.3.3 D-2 og D-1-marked - Inntekt fra FCR-markedet for aktører	11
3 Oppbygning av hybridkraftverk	13
3.1 Oppbygning av vannkraftverk	13
3.1.1 Kaplan turbinen	13
3.1.2 Generator	15
3.2 Problemet med trege vannkraftverk	15
3.3 Oppbygning av energilagringssystem	16
3.3.1 Styling av energilagringssystemet	16
3.3.2 Omformere	20
3.3.3 Filter	22

3.3.4	Transformator	22
3.3.5	Kjøling	23
3.4	Fordeler med energilagringssystem	24
3.4.1	Reduksjon av slitasje	24
3.4.2	Høyere sammenlagt FCR-kapasitet	26
4	Energilagringssystemer	27
4.1	Batteri	28
4.1.1	Virkemåte	28
4.1.2	Klassifisering av batteri	28
4.1.3	Litium-ion batteri	28
4.1.4	Nikkel-kadmium-batteri	29
4.1.5	Nikkel-metall-hydrid-batteri	29
4.2	Superkondensator	29
4.2.1	Virkemåte	30
4.2.2	Klassifisering av superkondensator	31
4.2.3	Elektrokjemisk dobbeltlagskondensator	32
4.2.4	Pseudokondensator	33
4.2.5	Hybrid-kondensator	33
5	Kriterier for valg av energilagringssystemer	35
5.1	Tekniske spesifikasjoner	35
5.1.1	Energi og effekt	35
5.1.2	Opp- og utladningskarakteristikk	37
5.1.3	Effektivitet	39
5.1.4	Levetid og sykluslevetid	40
5.1.5	Temperatur	41
5.2	Kostnad	42
5.2.1	Faktorer som påvirker systemkostnaden	43
5.3	Miljø og sikkerhet	43
6	Metode for sammenligning av energilagringssystemer	44
6.1	Vektlegging	44
6.1.1	Teknisk analyse	44
6.1.2	Kostnadsanalyse	44
6.1.3	Miljø- og sikkerhetsaspekter	45
6.2	Utførelse av analyse	45
6.2.1	Uegnede energilagringssystemer	45
6.2.2	Aktuelle energilagringssystemer	45
6.2.3	Sammenligning av energilagringssystemer	46
6.3	Begrensninger	47
7	Analyse	48
7.1	Sammenligning av batteri	48
7.1.1	Li-ion-batteri	49
7.1.2	Ventilert nikkel-kadmium	51
7.1.3	Forseglet nikkel-kadmium	51
7.1.4	Nikkel-metall-hydrid	52

7.2	Sammenligning av superkondensator	52
7.2.1	Skeleton - SCA3200	53
7.2.2	Skeleton - SCX5000	54
7.2.3	Nes/Maxwell - BCAP3400	54
7.2.4	Skeleton - Aktivert karbon	54
7.2.5	JSR Micro - LIK Ultimo	54
7.2.6	Skeleton - Superbatteri	55
7.3	Sammenligning av de utvalgte energilagringseenhetene	56
7.3.1	Teknisk sammenligning	56
7.3.2	Kostnad	60
7.3.3	Miljø og sikkerhet	62
7.3.4	Sikkerhetsrisiko	64
7.3.5	Brannfare	65
8	Diskusjon	67
8.1	Hvilke tekniske kriterier er viktigst for frekvensregulering?	67
8.2	Sammenligning av energilagringseenheter	68
8.2.1	Begrensninger ved noen energilagringseenheter	68
8.2.2	Anbefalte energilagringseenheter for frekvensregulering	68
8.3	Usikkerhet og mangel på data	69
8.4	Hybridkraftverk og implementering av fornybar energi	70
9	Konklusjon	71
	Bibliografi	72
A	Forskjeller mellom elektrolyttypen	79
B	Elektrodetyper for superkondensatorer	80
C	Sammenligning av batteri	81
D	Karakteristikk for utvalgte superkondensatorer	83
E	Karakteristikk for superkondensatorer	84
F	Spesifikasjoner for ulike Li-ion celletyper	85
G	Ladeegenskaper for sekundærbatterier	86

Figurer

2.1	Illustrasjon av tiltenkt situasjon ved et stort frekvensavvik, med aktiveringstid og relativ effektrespons for de ulike reservene. Illustrert av Statnett [9].	6
2.2	Aktivert effekt i stasjonær tilstand som en funksjon av frekvens, droppprofil av FCR-N (blå), FCR-D (grønn) og begge kombinert (rød). Illustrert av ENTSO-E [11].	8
2.3	Hvordan markedslikevekten blir satt. Illustrert av Statnett [2].	9
2.4	D-2- og D-1-markedet. Illustrert av Statnett [17].	11
3.1	Oppbygning av en kaplanturbin med synkrongenerator. Hentet fra Wikimedia [21].	14
3.2	Hvordan kraftverket reagerer på en synkende og økende frekvensendring. Illustrasjon hentet fra ENTSO-E [11].	15
3.3	Koblingsskjema for en metode å strukturere et energilagringssystem. Hentet fra Gallardo-Lozano <i>et al.</i> [24].	16
3.4	Tilgjengelig SoC-område ved en ubalansert batteripakke (a) og en balansert batteripakke (b). Illustrasjon hentet fra Gao [26].	17
3.5	Passiv- og aktiv balansering av kondensator. Illustrasjon hentet fra Beard <i>et al.</i> [29].	19
3.6	Koblingsskjema for en DC/DC omformer. Illustrasjon hentet fra Gallardo-Lozano <i>et al.</i> [24].	20
3.7	Spenning mot SoC for en konvensjonell kondensator (oransje) og et Li-ion-batteri (blå). Illustrasjon hentet fra Berrueta <i>et al.</i> [30].	20
3.8	Koblingsskjema for en vekselretter / likeretter. Illustrasjon hentet fra Gallardo-Lozano <i>et al.</i> [24].	21
3.9	Forholdet mellom størrelsen og frekvensen på harmoniske strømmer ved fundamental- og svitsjefrekvens. Illustrasjon hentet fra Kim [34].	22
3.10	Levert effekt ved simulering av kraftverk uten og med ELS. Illustrasjon hentet fra Hellborg [40].	25
4.1	Forskjellige energilagringsteknologier til forskjellig bruk. Hentet fra Bank <i>et al.</i> [43].	27
4.2	Blokkdiagram for ulike undergrupper av SK-er [46], [48], [51].	31
4.3	Hvordan Li-ion-batteri, LIK, EDLK og Skeletons superbatteri er oppbygd [46], [57].	32

4.4	Oppbygning av EDLK-er. Illustrasjon hentet fra Burke [56].	33
4.5	Oppladning og utladning for EDLK og HK. Hentet fra Burke [56].	34
5.1	Ulike utladningskurver for batteri. Hentet fra Beard <i>et al.</i> [29].	37
5.2	Kapasitansreduksjon og motstandsøkning av SK ved sykling av ulike spenninger. Publisert av Skeleton [63].	41
5.3	Påvirkning av temperatur på batteri. Hentet fra Beard <i>et al.</i> [29].	41
5.4	Påvirkning av temperatur på SK-er. Publisert av Skeleton [63].	42
7.1	Selvutladning av Li-ion (NMC) ved forskjellige temperaturer og SoC. Graf hentet fra Beard <i>et al.</i> [29].	50
7.2	Ragone-plot av ulike elektriske energilagringssystemer. Hentet fra Arumugam <i>et al.</i> [69].	52
7.3	Fra venstre: SCA3200, SCX5000 og superbatteriet produsert av Skeleton. Hentet fra Skeleton [75].	53
7.4	LIK Ultimo produsert av JSR Micro. Hentet fra JSR Mikro [73].	54
7.5	Ragone-diagram for SK-er. Fra venstre: SK, kurvet grafen EDLK, superbatteri og Li-ion batterier. Hentet fra Skeleton [76].	55
7.6	Sammenligning av ladnings- og utladningsoppførsel for en ideell EDLK og et batteri. Graf hentet fra Beguin og Frackowiak [46].	57
7.7	Økningen i cellespenningen illustreres med et voltammogram. Figur 1: Elektrodemåling, EDLK. Figur 2: Elektrodemåling, HK-type. Graf hentet fra Beguin og Frackowiak [46].	58
7.8	Effekten av utladningsdybde på sykluslevetid til sekundærbatterisystemer. Graf hentet fra Beard <i>et al.</i> [29].	59
7.9	Sammenligning av kostnad for ulike Li-ion-batterityper og blysyre-batteri. Illustrasjon hentet fra Bank [43].	61

Tabeller

2.1	Aktivering av reguleringsobjekt som leverer FCR i stasjonær tilstand [11].	7
3.1	Bevegelser og distanser for lede- og løpehjulsskovler med og uten ELS [40].	25
4.1	Katode- og anodematerial brukt i ulike Li-ion-batterier [43].	29
4.2	Elektrode og elektrolytt brukt i SK-er.	31
7.1	Sammenligning av batteritypene [29].	49
7.2	Utvalgte superkondensatorer.	53
7.3	Sammenligning av EDLK og batteri hentet fra Beard <i>et al.</i> [46].	56
7.4	Sammenligninger spesifikk energi- og effekt mellom ulike batterier og superkondensatorer [29].	57
7.5	Effektivitet for batteri (fra vedlegg G).	58
7.6	Effektivitet og selvutladning for superkondensatorer [46].	59
7.7	Sammenligning av kostnader i USD for ulike typer ELS av Dhegani-Sanji <i>et al.</i> [42].	60
7.8	Sammenligning av kostnad for ulike batterityper.	61
7.9	Pris for elektrode og elektrolytt brukt i superkondensatorer.	62
7.10	Sammenligning av kostnader for et Li-ion-batteri og SK av Beard <i>et al.</i> (s 983) [29].	63
A.1	Forskjeller mellom ulike elektrolyttyper. Hentet fra Beguin og Frackowiak [46].	79
B.1	Elektrodetyper for SK-er hentet fra Beguin og Frackowiak [46].	80
C.1	Sammenligning av sekundærbatterier hentet fra Beard <i>et al.</i> [29].	82
D.1	Tekniske egenskaper for utvalgte superkondensatorer hentet fra Beard <i>et al.</i> [29].	83
E.1	Egenskaper ved elektrokjemiske kondensatorer fra en rekke produsenter hentet fra Beard <i>et al.</i> [72].	84
F.1	Generell karakteristikk for noen li-ion-celler [29].	85
G.1	Ladeegenskaper for sekundærbatterier [29].	86

Akronymer

AC Alternating Current / Vekselstrøm. 20

ACN Acetonitril. 65

aFRR automatic Frequency Restoration Reserves / Sekundærreserver. 8

BHK Batteritype-hybrid-kondensator. 34

DC Direct Current / Likestrøm. 20

EAM Energy Activation Market. 7

EDLK Elektrokjemisk dobbeltlagskondensator. 32

ELE Energilagringseenhet. 27

ELS Energilagringssystem. 13

ENTSO-E European Network of Transmission System Operators for Electricity. 9

ESM Ekvivalent seriemotstand. 39

FCR Frequency Containment Reserves / Primærreserver. 7

FFR Fast Frequency Reserves / Raske frekvensreserver. 7

HK Hybrid-kondensator. 33

IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor. 21

LCO Litiumkoboltoksid. 29

LFP Litiumjernfosfat. 29

Li-ion Litium-ion. 28

LIK Litiumion-kondensator. 34

LMO Litiummanganoksyd. 29

LTO Litiumtitanat. 29

mFRR manual Frequency Restoration Reserve / Tertiærreserver. 9

MMC Modular Multilevel Converter. 23

NCA Litiumnikkelkobolt Aluminiumoksid. 29

Ni-Cd Nikkel-kadmium. 29

Ni-MH Nikkel-metallhydrid. 29

NMC Litiumnikkelmangan koboltoksid. 29

PWM Pulse-Width Modulation / Pulsbreddemodulasjon. 18

SK Superkondensator. 30

SoC State-of-charge. 17

SoH State-of-health. 17

TSO Transmission System Operator / Systemansvarlig. 6

VSC Voltage source converter. 21

Ordliste

balanseansvarlig Markedsaktør som er finansielt ansvarlig for sin egen/og eller en annen aktørs ubalanse. 10

diskontere Å regne hva en verdi i fra tidligere tidspunkt eller i framtiden, vil være på et annet tidspunkt. 43

elektrisk gjennomslag En strøm som kommer fra en spenning som bryter gjennom et isolerende materiale. 24

elspotmarkedet Marked hvor elektrisk kraft kjøpes og selges. 11

energy cell Batteritype som er laget for høy energitetthet. 50

frekvensavvik Refererer til en endring i frekvensen som avviker fra nominell verdi. 4

førsteharmonisk Grunnfrekvensen på et signal. I det nordiske kraftnettet tilsvarer dette 50 Hz. 21

hybridkraftverk Et hybridkraftverk er et konvensjonelt kraftverk som opererer sammen med et energilagringssystem. 19

ion Atom med elektrisk ladning, altså et atom med et ulikt antall protoner og elektroner. 28

ledeskovle Dreibare skovler som kontrollerer mengden vannstrøm til turbinen. 13

løpehjulsskovle Dreibare propellblad på turbinen. Som omformer energien fra vannet om til roterende energi i turbinen. 13

oksidasjon reaksjon hvor et atom mister én eller flere elektroner. 28

organiske løsemiddel Organiske løsemidler er karbonholdige kjemiske forbindelser som kan brukes til å løse opp andre kjemiske forbindelser. 29

overlading Energi føres inn i en celle selv etter det er fullt oppladet (>100 % SoC).. 17

power cell Batteritype som er laget for høy effekttetthet. 50

redoksreaksjon En kjemisk reaksjon der et stoff blir redusert og et annet blir oksidert. 30

reduksjon reaksjon hvor et atom absorberer én eller flere elektroner. 28

reguleringsobjekt En effektkilde eller last hvor objektet kan regulere mengden effekt som produseres eller forbrukes, til bruk for frekvensregulering. 7

thermal runaway *thermal runaway* (termisk rusing) er en tilstand hvor et batteri vil overopphetes og ødelegges fra en kjemisk reaksjon som skaper varme, hvor raten til reaksjonen øker med temperaturen. Temperaturen øker dermed ukontrollerbart. 37

voltammogram Voltammogram viser strøm som en funksjon av påført potensial (spenning).
58

Kapittel 1

Innledning

Denne oppgaven fokuserer på hvordan en energilagringssenheter kan integreres med et vannkraftverk for å bidra til frekvensregulering i kraftnettet. Frekvensen på kraftnettet viser om det er balanse mellom produksjon og forbruk av effekt. Ved en ubalanse vil frekvensen endres og tiltak for å stoppe og reversere avviket må igangsettes. Dette gjøres ved å få effekt levert via frekvensreserver. Frekvensreservene er delt inn i flere marked hvor kraftprodusenter kan selge kraft til bruk for å regulere mengden effekt som blir levert ut på kraftnettet.

Vannkraftverk utgjør en betydelig del av energiproduksjonen i Norge og spiller en viktig rolle i å opprettholde kraftbalansen ved å bidra med treghetsmoment, som bremser endring i frekvens. Mengden treghetsmoment i det nordiske nettet synker grunnet integrering av nye fornybare energikilder som sol og vind, som leverer effekten ut på nettet uten treghetsmoment. Dette skaper en økt mengde frekvensavvik med en ubalanse i effekten. På grunn av dette er det blitt innført nye krav for leveranse av effekt på primærreservemarkedet, det mest kritiske og brukte markedet for å holde frekvensen stabil. Alle kraftverk som vil levere som primærreserve må nå prekvalifiseres for å kunne levere primærreservetjenester. Kraftselskap vil miste betydelig inntekt hvis de ikke klarer å kvalifisere deres kraftverk som allerede leverer primærreservetjenester før 2028.

De nye kravene er strenge på ytelse og stabilitet og et elvekraftverk med kaplanturbin vil trolig ikke klare å prekvalifiseres i henhold til de nye kravene, hvis både vannkraftverkets stabilitet og hurtighet for leveranse skal opprettholdes. Kraftverkene med kaplanturbin vil altså være for trege til å oppfylle de raske frekvensresponsene. Hafslund Eco Vannkraft ser på muligheten for å løse dette problemet ved å integrere en energilagringssenheter sammen med et elvekraftverk, og har planer om å implementere et system med superkondensator i samspill med elvekraftverket på Harpefossen kraftverk. Energilagringssenheterene kan levere effekt raskere enn turbinen, og med det kan de operere sammen med kraftverket slik at det til sammen kan kvalifiseres og brukes som primærreserve.

Det er noen fåtall kraftverk som har installert et energilagringssystem sammen med et kraftverk i Europa og per dags dato er dette ikke gjort i Norge. På grunn av at dette ser Hafslund Eco Vannkraft på hvordan dette kan gjøres med deres elvekraftverk og mer spesifikt hvilken type energilagringssenheter som kan egne seg best til dette formålet.

1.1 Problemstilling og Mål

Hvilke batteri- eller superkondensatortyper egner seg best med hensyn til tekniske krav, kostnadseffektivitet, sikkerhet og miljøpåvirkning når det brukes til frekvensregulering i samspill med vannkraftverk i kraftnettet?

Opgaven tar sikte på å utforske potensialet for å integrere et energilagringssystem sammen med et vannkraftverk til å bidra med optimalisert frekvensregulering i kraftnettet, for å kunne møte de nye kravene til prekvalifisering av primærreserver i Norden. Hvordan et slikt system fungerer og tilhørende komponenter skal gås igjennom, og fordeler og ulemper ved systemet drøftes. Videre i oppgaven skal tekniske aspekter av forskjellige type batteri og superkondensatorer evalueres, med mål om å først og fremst identifisere de beste tekniske løsningene og deretter gjennomføre en lettere kostnad- miljø og sikkerhetsmessig evaluering.

Målene i oppgaven er definert som følger:

- Forstå hvordan frekvensreserver i nettet fungerer og hva som må til for å kunne prekvalifisere et vannkraftverk for å levere reserver til primærreservemarkedet i Norden
- Forstå samspillet mellom et elvekraftverk og kraftsystemet
- Forstå hvordan energilagringssystem fungerer på systemnivå
- Forstå hvordan energilagringssystem fungerer i samspill med et elvekraftverk
- Finne den mest egnede energilagringseenheten i samspill med et elvekraftverk med formål om å delta i frekvensregulering

1.2 Avgrensninger

Opgaven vil ikke omhandle andre typer energilagringseenheter enn superkondensatorer og batteri. Dette ble gjort grunnet utrykk av ønske fra oppdragsgiver og for å begrense mengden informasjon.

1.3 Oppbygning av oppgaven

Her følger en kort forklaring av innholdet i hvert kapittel. Oppgaven er ment å leses kronologisk. Noen tabeller og figurer som henvises til hyppig er lagt til som vedlegg for å forbedre flyten av teksten.

Kap. 2 Leveringskvalitet og frekvensreserver

I kapitlet står det om hvordan leveringskvaliteten forringes ved innføring av mer fornybare energikilder som sol og vind. Videre står det om hvordan reservemarkedet forhindrer frekvensavvik. Til slutt følger en gjennomgang av de nye kravene til primærreserver.

Kap. 3 Oppbygning av hybridkraftverk

Dette kapitlet gir en overordnet forklaring på hvordan et vannkraftverk med kaplanturbin og synkrongenerator fungerer på systemnivå. Videre står det om hva som gjør at disse ikke

kan prekvalifiseres uten hjelp fra et energilagringssystem. Til slutt gjennomgås oppbygningen av et energilagringssystem og fordelene med å anskaffe dette.

Kap. 4 Energilagringssystemer

Kapittelet gir en gjennomgang av oppbygning, virkemåte og klassifisering av ulike typer batteri og superkondensatorer. Forskjeller ved disse gjennomgås.

Kap. 5 Kriterier for valg av energilagringssystemer

Kapittelet gir en gjennomgang av terminologi for tekniske kriterier som er viktige for analysing av forskjellige energilagringssystemer. Dette inkluderer energi og effekt, opp- og utladningskarakteristikk, effektivitet, levetid og sykluslevetid og temperatur. I tillegg skal teori for kostnad- sikkerhet og miljøanalyse gjennomgås.

Kap. 6 Metode for sammenligning av energilagringssystemer

Dette kapittelet beskriver metoden for sammenligning av energilagringssystemer, inkludert vektlegging av teknisk analyse, kostnadsanalyse og miljø- og sikkerhetsaspekter. Det omhandler også utførelsen av analysen og begrensninger.

Kap. 7 Analyse

Analysen sammenligner forskjellige batterier og superkondensatorer basert på tekniske spesifikasjoner, kostnader og miljø- og sikkerhetsaspekter.

Kap. 8 Diskusjon

Her diskuteres hvilke tekniske egenskaper som er viktige for frekvensregulering og et forslag for egnede energilagringssystemer basert på analysen. I tillegg diskuteres hva oppgaven kan bidra til i et bredere perspektiv.

Kap. 9 Konklusjon

Hovedfunn og svar på problemstillingen presenteres i konklusjonen.

Kapittel 2

Leveringskvalitet og frekvensreserver

2.1 Leveringskvalitet i kraftsystemet

For at kraftnettet skal fungere må det være stabilt og ha god leveringskvalitet på spenningen som leveres inn på kraftnettet. Spenningskvalitet handler om å opprettholde nettspenningen innenfor fastsatte grenser måles på tre forskjellige måter: Kvaliteten av spenningens effektivverdi, spenningens kurveform og spenningens frekvens. Dårlig spenningskvalitet kan føre til at det blir redusert overføringskapasitet, økt tap, redusert levetid på komponenter i kraftsystemet og funksjonsfeil eller skader på tilknyttet utstyr. Spenningens effektivverdi og spenningens kurveform er ofte bestemt av lokale forhold, mens spenningsfrekvensen er den samme på hele kraftnettet. Arbeidet for å holde frekvensen stabil omhandler altså hele nettet [1].

Frekvensen er et mål på hvor god balansen er i kraftnettet. Med likevekt av produksjon og forbruk vil frekvensen holdes stabil på 50 Hz. Ved mer forbruk enn produksjon går frekvensen ned og ved mer produksjon enn forbruk går frekvensen opp [2]. Avvik i frekvens kan forårsake økt belastning på generatorer, feil hastighet på motorer og feil tid på elektriske klokker [1]. Med en stor endring i frekvens kan generatorer i nettet også slå seg av. Når generatorene faller av nettet vil produsert effekt i nettet falle og skape et større avvik i effekt og da skape et enda større frekvensavvik som kan føre en dominoeffekt hvor flere generatorer slår seg av og til slutt føre til kollaps av hele kraftnettet. For å unngå frekvensavvik er det derfor satt opp frekvensreserver som kan endre effekten ut på kraftnettet for å holde frekvensen stabil og da holde nettet i balanse [2].

2.1.1 Frekvensstabilitet og roterende masse

Frekvensregulering opprettholder kraftbalanse ved å justere produksjon og forbruk. Denne balansen styres av Newtons andre lov for rotasjon og forholdet mellom effekt og samlingen av dreiemoment i kraftsystemet. Newtons andre lov for rotasjon uttrykker den resulterende kraften som virker på et legeme, som er lik endringen i dreiemomentet til legemet over tid:

$$\tau = I \frac{d\omega}{dt} \quad (2.1)$$

Her er τ det totale dreiemomentet som virker på legemet, I er treghetsmomentet, og $\frac{d\omega}{dt}$ er endringen i vinkelfrekvensen ω over tid. Dreiemomentet τ kan deles inn i produksjons- og forbrukskomponenter:

$$\tau = \tau_{\text{produksjon}} - \tau_{\text{forbruk}} \quad (2.2)$$

Effekt produsert av konstant dreiemoment τ ved vinkelfrekvensen ω kan uttrykkes ved:

$$P = \tau \omega \quad (2.3)$$

Frekvensreguleringen, hvor vinkelfrekvensen er lik $\omega = 2\pi f_e$, kan dermed uttrykkes ved hjelp av 2.1, 2.2 og 2.3:

$$\frac{P_{\text{produksjon}}}{\omega} - \frac{P_{\text{forbruk}}}{\omega} = I \frac{d\omega}{dt} \quad (2.4)$$

Ligning 2.4 uttrykker hvordan et system reagerer på ubalanser mellom produksjon og forbruk, og hvor raskt frekvensendringer oppstår gitt systemets treghet. Vinkelhastigheten ω til rotoren vil øke når P_{forbruk} går ned. Ved at det er ikke en last som kan bruke opp energien som blir omgjort fra vannfallet, vil overskuddsenergien absorberes som kinetisk energi i akselen. Og når P_{forbruk} øker eller $P_{\text{produksjon}}$ minsker vil den lagrede kinetiske energien i akselen blir omgjort til elektrisk energi i generatoren og vinkelhastigheten ω til rotoren minske [3].

Hvor stor frekvensendring som skjer ved en forstyrrelse eller lastendring i systemet, er basert på hvor stort treghetsmoment I som er tilkoblet nettet. Treghetsmomentet er basert på bidraget fra all den roterende massen fra kraftverkene i nettet. Det er i hovedsak vannkraftverkene i Norge som bidrar med treghetsmoment. Utifra ligning 2.4 kan det sees at dersom det eksisterer mer roterende masse i et kraftsystem som da skaper et større treghetsmomentet I , vil endringen av frekvensen $\frac{d\omega}{dt}$ være langsommere. Dermed blir det vanskeligere å endre på frekvensen i systemet. Dette er et ønsket tilfelle ift. at frekvensen ikke vil falle like fort og det kan gjøres tiltak mot frekvensendringen før det er for sent [4].

2.1.2 Årsak til nye krav for FCR-markedet

I Norge består synkrongeneratorene av ca 88 % av normalårsproduksjonen av kraft [5]. Synkrongeneratorene består av tung og tregt roterende masse, bestående av turbin, aksel og rotor. Rotasjonen av synkrongeneratorene, slik navnet henter, synkronisert med kraftsystemets frekvens. Summen av treghetsmomentet til synkrongeneratorene i kraftnettet motvirker de elektromagnetiske kreftene som påtrykkes av nettet med endringer i effekt [4]. Dette er grunnen til at frekvensen i nettet blir værende stabil rundt 50 Hz.

Fornybare energikilder som sol og vind er tilkoblet nettet med en vekselretter (DC/AC), som ikke vil gi noe roterende masse inn i nettet, i motsetning til vannkraftverkene. I perioder med økt produksjon fra sol og vind, er det mindre treghetsmoment i nettet. Energien fra vekselrettere minsker derfor stabiliteten i nettet ettersom flere frekvensavvik kan forekomme. Med mindre roterende masse vil en endring i effekt på nettet føre til at frekvensen varierer kraftig som vist ved ligning 2.4. Dersom mengden roterende masse kommer under 155 GWs, klarer ikke det nordiske systemet å håndtere det største dimensjonerende utfallet og systemansvarlig vil iverksette tiltak [1].

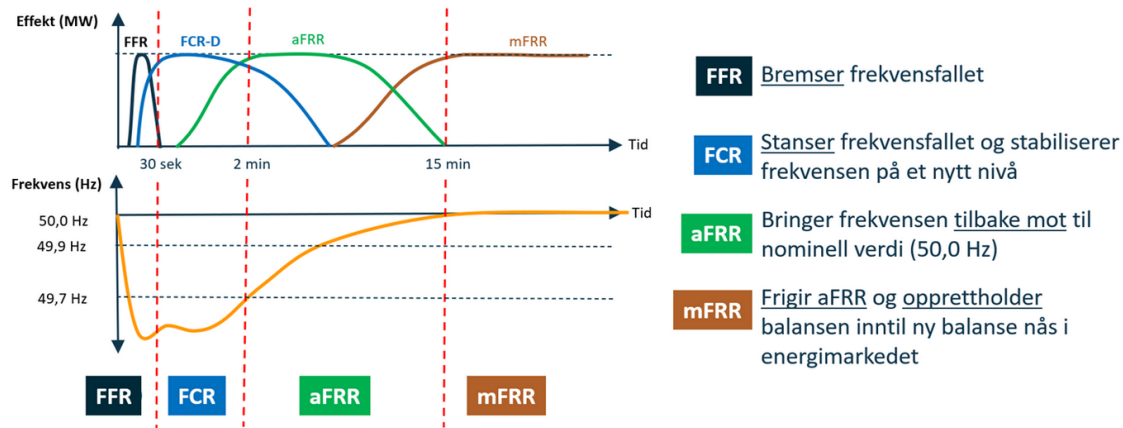
Økt mengde fornybare energikilder uten treghetsmoment er en av grunnene til hvorfor de nye kravene til prekvalifisering til FCR-markedet har kommet [6]. Kort gjennomgang av de nye kravene vises i kap. 2.3.1.

2.2 Oversikt over frekvensreserver

Elektrisk energi må genereres og brukes ved samme tidspunkt. Som skrevet i kap. 2.1.1 vil frekvensen synke ved større forbruk og ved større produksjon vil frekvensen øke. For å holde nettfrekvensen konstant lik 50 Hz må det med en synkende frekvens leveres mer effekt til nettet eller forbrukes mindre. Videre må det leveres mindre eller forbrukes mer ved en økende frekvens. Dette kan være vanskelig i praksis ettersom man ikke vet hvor mye energi som kommer til å forbrukes til enhver tid. Løsningen på dette er å bruke effektreserver som kan øke eller minske effekten på nettet i det en endring av effektbalansen skjer. Dette vil da bremse endringen av frekvensen.

I forskrift om systemansvaret i kraftsystemet (fos) § 9 står det at "[TSO (Statnett)] skal til enhver tid disponere tilstrekkelige effektreserver" [7]. Formålet er å opprettholde balansen mellom produksjon og forbruk og dermed leveringskvaliteten i kraftnettet og en rasjonell utnyttelse av kraftressursene [8]. Dette er beskrevet nærmere i 2.1. Hovedsakelig er effektreservene basert på markedsdeltakelse for aktørene, men ved behov for kritiske, geografisk betingede eller tidsbegrensede tilfeller, stiller systemansvarlig også krav til aktører gjennom systemkritiske vedtak [1].

Det er forskjellige frekvensbaserte aktiveringsområder for enhver type reserve avhengig behov for hurtighet på respons. En illustrasjon over aktivering og deaktivering av reserver for et tenkt forløp etter et større frekvensavvik er vist i figur 2.1.



Figur 2.1: Illustrasjon av tiltenkt situasjon ved et stort frekvensavvik, med aktiveringstid og relativ effektrespons for de ulike reservene. Illustrert av Statnett [9].

Det er ulike krav for å delta i de forskjellige markedene etter automatikk, respons og varighet. Reservemarkedene deles inn i to: kapasitetsmarkeder og aktiveringsmarkeder. I kapasitetsmarkedene får leverandørene betalt for å stille en viss kapasitet tilgjengelig hvis det forekommer

et frekvensavvik. I aktiveringsmarkedene aktiveres reservene etter bestilling fra TSO (Statnett) i driftstimen. Alle reservemarkedene tilhører kapasitetsmarkedet mens en del av mFRR kalt mFRR *Energy Activation Market* (EAM) er et aktiveringsmarked [2]. Reservemarkedene aktiveres i forskjellige driftssituasjoner. I normal drift, når frekvensen varierer innenfor det normalbåndet (49,9 - 50,1 Hz), aktiveres reservene fra kapasitetsmarkedene FCR-N, aFRR og mFRR. Ved betydelig ubalanse, som ved feil eller linjeutfall, aktiveres reservekapasitetene FFR, FCR-D, aFRR og mFRR [2]. Dette kapitlet gir en oversikt over de fire reservetypene, deres hovedfunksjoner, og hvordan de bidrar til å stabilisere frekvensen i kraftnettet.

2.2.1 Raske frekvensreserver - FFR

Raske frekvensreserver (FFR) ble introdusert i det nordiske reservemarkedet i 2020 [1] og formålet er forhindre store frekvensdipp etter større forstyrrelser ved uforventede feil i kraftsystemet. Som vist i figur 2.1 bidrar FFR før FCR opererer for fullt. Behovet for denne tjenesten bestemmes i samarbeid med de nordiske TSO-ene og baserer seg på den forventede mengden roterende masse i systemet [1]. Behovet er dermed samsvarende med lav last og produksjon og type kraftverk som forsyner kraft til nettet. Dette er forklart mer utdypende i 2.1.1. Denne reserven aktiveres ved ulike aktiveringsfrekvenser mellom 49,7 og 49,5 avhengig av responsbehov. Denne reserven aktiveres dermed sjelden som følge av lite frekvensområde for aktivering [10].

2.2.2 Primærreserver - FCR

Primærreservenes (FCR) hovedoppgave er å stanse frekvensendringen og stabilisere denne på et nytt nivå (se figur 2.1). Primærreservene deles inn i to undergrupper: Normaldriftsreserver (FCR-N) og driftsforstyrrelsesreserver (FCR-D).

Mengden effekt som skal leveres som FCR er basert på hvor stor frekvensendringen er. Som vist i figur 2.2, vil responsen økes negativt proporsjonalt med endringen av frekvensen. Grensen for hvor stor effekt som endres proporsjonalt med frekvensen, blir satt av kraftselskapet på hvert reguleringsobjekt i budsettingen i FCR. Dette gjøres ved å sette maks levert FCR-effekt og verdien kan bli satt forskjellig hver driftstime [11]. FCR-N er et symmetrisk produkt, mens FCR-D har differensierte priser avhengig av retning "Opp" og "Ned" [1]. Frekvensområdet som aktiverer hvilket produkt vises i tabell 2.1.

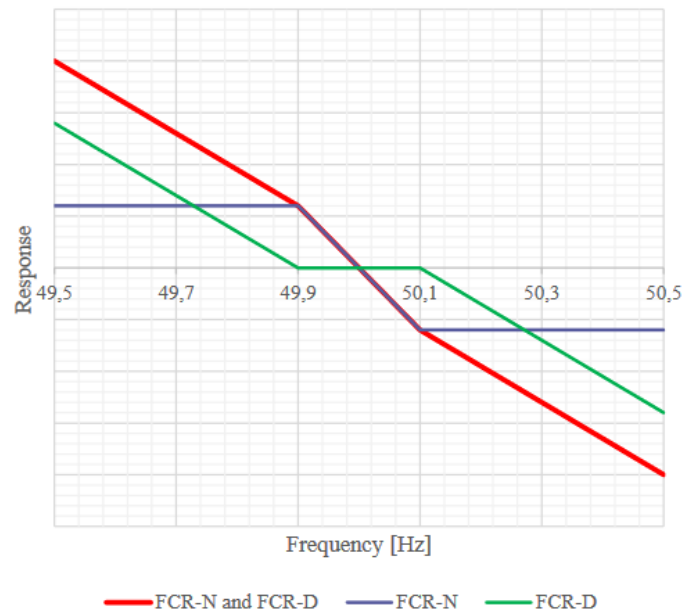
Tabell 2.1: Aktivering av reguleringsobjekt som leverer FCR i stasjonær tilstand [11].

Produkt	100 % negativ aktivering*	0 % aktivering	100 % positiv aktivering †
FCR-D Opp	N/A	$f \geq 49,9$ Hz	$f \leq 49,5$ Hz
FCR-N	$f \geq 50,1$ Hz	$f = 50$ Hz	$f \leq 49,9$ Hz
FCR-D Ned	$f \geq 50,5$ Hz	$f \leq 50,1$ Hz	N/A

* Reduksjon av kraftproduksjon

† Økt kraftproduksjon

Nye krav for deltakelse i FCR-markedet trådte i kraft i 2024 med en overgangsperiode til 2028. De nye kravene beskrives i kap. 2.3.1.



Figur 2.2: Aktivert effekt i stasjonær tilstand som en funksjon av frekvens, dropprofil av FCR-N (blå), FCR-D (grønn) og begge kombinert (rød). Illustrert av ENTSO-E [11].

Normaldriftsreserver - FCR-N er alltid aktivert ved normal drift og virker i frekvensområdet $50 \pm 0,1$ Hz. Frekvensen varierer med lasten og produksjonen i kraftnettet og vil dermed ikke være stabil på 50 Hz. Reguleringsobjektene deltar i FCR-N-markedet vil da trenge å regulere effekten ut på nettet kontinuerlig [12]. FCR er konstant aktiv og etterspørselen er stadig høy, derfor blir dette kontinuerlig kjøpt av TSO [2].

Driftsforstyrrelsesreserver - FCR-D aktiveres når frekvensnivået kommer over eller under normalt driftsnivå på $50 \pm 0,1$ Hz, altså etter en større forstyrrelse. Dermed tar FCR-D over når frekvensen overgår driftsnivået som FCR-N opererer innenfor [12]. Kjøp av FCR-D vurderes årlig basert på mengden roterende masse som forventes i kraftnettet [2]. FCR-D deles inn i to grupper, FCR-D "Opp" og FCR-D "Ned":

- FCR-D Opp: Aktiveres lineært når frekvensen er mellom 49,90 og 49,50 Hz [12]
- FCR-D Ned: Aktiveres lineært når frekvensen er mellom 50,10 og 50,50 Hz [12]

2.2.3 Sekundærreserver - aFRR

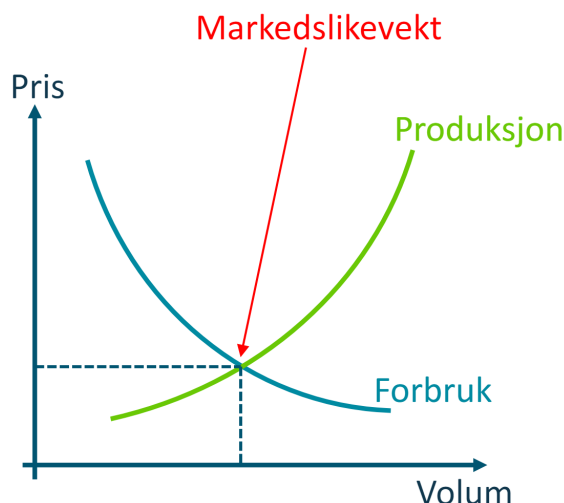
Sekundærreservene (aFRR) aktiveres innen 5 minutter og skal hente frekvensen inn igjen mot 50 Hz. Reserven skal gradvis frigi FCR etter en forstyrrelse slik som vist i figur 2.1. aFRR aktiveres ved større feil hvor mye effekt må leveres og er en reserve som må være tilgjengelig. Den aktiveres derimot sjeldent og kraftprodusenter blir derfor godt kompensert for å disponere aFRR [13].

2.2.4 Tertiærreserver - mFRR

Tertiærreservene (mFRR) frigir aFRR og leverer effekt inntil en stabil balanse nås i kraftmarkedet, som vist i figur 2.1. mFRR aktiveres manuelt i henhold til signal fra TSO på under 15 minutter og skal kunne levere i minst 1 time. mFRR brukes også til å håndtere regionale flaskehalsener i et marked kalt mFRR EAM [14]. mFRR EAM er et aktiveringsmarked hvor tjenestene aktiveres med signal fra Statnett for å justere forbruk eller produksjon opp eller ned istedenfor aktivering med kun frekvens som grunnlag [2].

2.3 Kraftmarkedet og reservemarkedene

Kraftproduksjon og leveranse fra utenlandskabler bestemmes utifra markedsliekevten, utifra hvor produksjonskurven krysser forbrukskurven. Dette er prisen som kraftselskapene ønsker å få betalt sammenlignet med prisen forbrukerne er villige til å betale. Dette er hva som setter spotprisen og visualiseres i figur 2.3, [2].



Figur 2.3: Hvordan markedsliekevten blir satt. Illustrert av Statnett [2].

Det momentane forbruket og produksjonen varierer derimot mot det som ble satt i spotmarkedet, som fører til forventede endringer i frekvensen. Tiltak mot frekvensendringer skjer gjennom reservemarked. Det håndteres av TSO (Statnett) som kjøper et gitt antall frekvensreserver i de ulike reservemarkedene. I reservemarkedet vil reguleringsobjektene som har fått tilslag på bud få betalt på å levere effekt i forhold til nettfrekvensen [2].

2.3.1 Kriterier for deltakelse i FCR-markedene

Reguleringsobjekt som vil delta i FCR-markedet må ifølge ENTSO-E [11] kunne garantere at de 1) har tilstrekkelig statisk og dynamisk ytelse og 2) ikke destabiliserer kraftsystemet. Hva dette innebærer spesifiseres i detalj i "Norsk støttedokument for FCR kravene" [12] og "Technical Requirements for Frequency Containment Reserve Provision in the Nordic Synchronous Area" [11].

Prekvalifisering til FCR-markedene

For å kunne bedre holde frekvensen stabil selv med mindre treghetsmoment på nettet er det som nevnt i kap. 2.1.2 blitt introdusert nye krav for FCR. De nye kravene krever at aktørene som ønsker å delta i FCR-markedet må prekvalifisere deres reguleringsobjekter. Dette innføres for å forsikre at alle reguleringsobjektene som deltar i FCR-markedet ikke skaper forstyrrelser [15].

Disse kravene trådte i kraft i Norge 1. januar 2024 [16]. Nye reguleringsobjekter må kvalifisere seg for å kunne oppfylle kravene i dokumentet ”*Technical Requirements for Frequency Reserve Provision in the Nordic Synchronous Area*”. For eksisterende reguleringsobjekter som tilbyr FCR er det satt en overgangsperiode til 2028. Disse reguleringsobjektene må fortsette å følge kravene i ”*Nasjonal veileder for funksjonskrav i kraftsystemet*” frem til de kan prekvalifiseres i henhold til de nye kravene. Aktørene må selv dekke kostnadene for kvalifisering og er i tillegg balanseansvarlig for reguleringsobjektet [17].

Nye krav

Det er to hovedkrav for FCR som er nevneverdige: Et stabilitets- og ytelseskrav. Kravenes hensikt er å forsikre at alle kraftverk som leverer FCR faktisk hjelper til med å hindre frekvensendringen og ikke skaper større problemer i kraftnettet.

En av hovedgrunnene til innføringen av de nye kravene er for å sørge for at et reguleringsobjekt ikke skaper ustabilitet i kraftnettet. For at nettet skal kunne holdes stabilt selv om det kun var reguleringsobjekter på nettet, så må alle reguleringsobjekter som leverer effekt til FCR-markedet kunne holde nettet stabilt uansett hva slags type kraftverk det er [11].

Formålet med ytelseskravet er å kunne dempe mindre frekvensvariasjoner i nettet. På nettet vil frekvensen ha en tendens til å svinge med en periodetid på 40-90 sekunder. For å unngå mekanisk belastning og frekvensavvik er det bestemt at reguleringsobjektene må kunne klare å dempe frekvenser som har syklus på ca. 70 sekunder eller lengre [12].

Det er et krav som gjelder kun for FCR-D. Det innebærer at reguleringsobjektet må innen 7,5 sekunder være i stand til å levere en bestemt andel energi og effekt ift. frekvensendringen. Grunnen til dette er for å kunne stoppe frekvensavviket så fort som mulig [11]. Kravene er som følger:

$$|\Delta P_{7.5s}| \geq 0.86 \cdot |\Delta P_{ss,theoretical}| \quad (2.5)$$

$$|E_{7.5s}| \geq 3.2s \cdot |\Delta P_{ss,theoretical}| \quad (2.6)$$

Hvor $\Delta P_{7.5s}$ er aktivert effekt etter 7,5 sekunder, $\Delta P_{ss,theoretical}$ er reguleringsobjektets stasjonære kapasitet og $E_{7.5s}$ er aktivert energimengde etter 7,5 sekunder.

2.3.2 Prosedyre for prekvalifisering

For å finne hvor mye energi og effekt som et reguleringsobjekt må kunne levere må følgende gjennomgås [15]:

- Egenskapene for turbineene/vannveiene i reguleringsobjektet må identifiseres.
- Styringsfilosofien for reguleringsobjektet må velges og beskrives.

- Tester for krav til FCR som beskrevet i ”Test Program for Prequalification of FCR in the Nordic Synchronous Area” [18] må simuleres, og så må kraftverket testes og resultatene må kjøres gjennom et ”FCP-IT tool” som leveres av TSO-en.

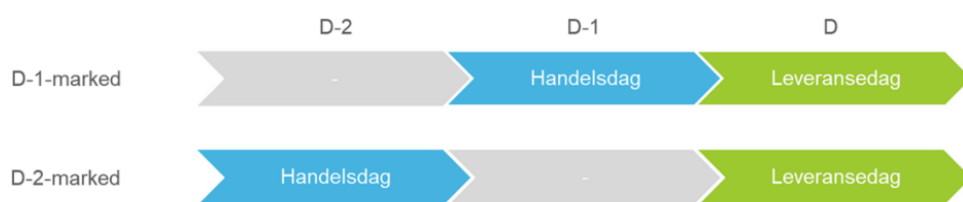
Gitt at reguleringsobjektet består kravene med resultatet fra ”FCP-IT tool” kan det begynne å levere effekt til FCR-markedet. Hvis reguleringsobjektet derimot ikke klarer et av kravene, kan reguleringsobjektet minske maks teoretisk utlevert FCR-effekt med en reduksjonsfaktor til det består alle kravene. Reguleringsobjektet kan da levere effekt til FCR-markedet, men med den reduserte makseffekten [11].

Reguleringsobjektet må vurderes på nytt selv om det er prekvalifisert: 1) ”Etter minimum hvert 5. år fra datoen for prekvalifisering”, eller 2) ”Hvis utstyr relatert til FCR-aktivering er fjernet, lagt til, modifisert eller på annen måte endret” [17]. Statnett har også rett til å kreve en ny kvalifisering av reguleringsobjekt tidligere enn etter 5 år, men det må gis varsel om dette minimum 6 måneder før ny vurdering” [17].

2.3.3 D-2 og D-1-marked - Inntekt fra FCR-markedet for aktører

Energihandelen styres gjennom elspotmarkedet, administrert av aksjeselskapet Nord Pool, hvor elektrisk energi kjøpes og selges mellom europeiske kraftselskaper. Deltakende aktører tilhører de nordiske, baltiske, britiske, tyske, polske, nederlandske, belgiske og østerrikske markedene [19]. Klarering av energihandelen er ofte ferdig dagen før, men endringer kan skje timer før driftstimen. Men det vil alltid skapes ubalanse i produksjon og forbruk i driftstimen, og når det ikke er likevekt av produsert og levert effekt vil det bli bruk for effekten i reserve-markedene [2].

FCR-markedet, som omfatter produktene FCR-N, FCR-D Opp og FCR-D Ned, består av to delmarkeder, D-2 og D-1, hvor aktørene selv velger hvilket de ønsker å delta i. D-2-markedet opererer før elspotmarkedet for driftsdøgn to dager fram i tid, mens D-1-markedet opererer etter elspotmarkedet dagen før for å dekke resterende behov etter energihandelen, inkludert utvekslingsønsker fra andre TSO-er [16], [17]. En illustrasjon av markedet vises i figur 2.4.



Figur 2.4: D-2- og D-1-markedet. Illustrert av Statnett [17].

Budgivning og akseptering av bud

Innsending av bud åpner D-2 midnatt to dager før driftstimen og D-1 åpner midnatt en dag før driftstimen. Informasjon og regler for budgivning for D-1- og D-2-markedet er åpen informasjon og finnes i dokumentet ”Vilkår - tilbud, aksept, aktivering, rapportering og avregning i marked for FCR til Statnett” [17].

Statnett aksepterer bud hovedsakelig basert på tilbudsprisen. Alle tilbud i samme reserve-marked som aksepteres vil få samme pris per MW etter den høyeste aksepterte budprisen (marginalprisen). Det kan være at tilbud under marginalprisen ikke blir akseptert; det er for å sikre at innkjøpskostnaden av FCR-kapasiteten er det totalt laveste det kan være. Dette skyldes at et bud med mye effekt kan bli billigere enn to mindre bud fordi den samlede prisen for de to mindre budene blir høyere enn for det ene store.

Dersom det forekommer endringer i det lokale nettforholdet eller reservebehovet etter klareringen av D-1-markedet, kan Statnett anskaffe kontrakter for FCR-kapasitet for priser høyere enn marginalprisen [17].

Kapittel 3

Oppbygning av hybridkraftverk

Et hybridkraftverk er et kraftverk som er tilkoblet og styres sammen med et energilagringssystem (ELS). Effekten leveres dermed både fra turbinen og energilagringssystemet (ELE). Sammen defineres de som ett reguleringsobjekt som kan levere effekt til reservekraftmarkedet.

3.1 Oppbygning av vannkraftverk

For å kunne levere elektrisk effekt på nettet vil et vannkraftverk omforme den potensielle energien fra et vannfall om til elektriske effekt. Den potensielle energien til et vannfall er gitt ved formel 3.1:

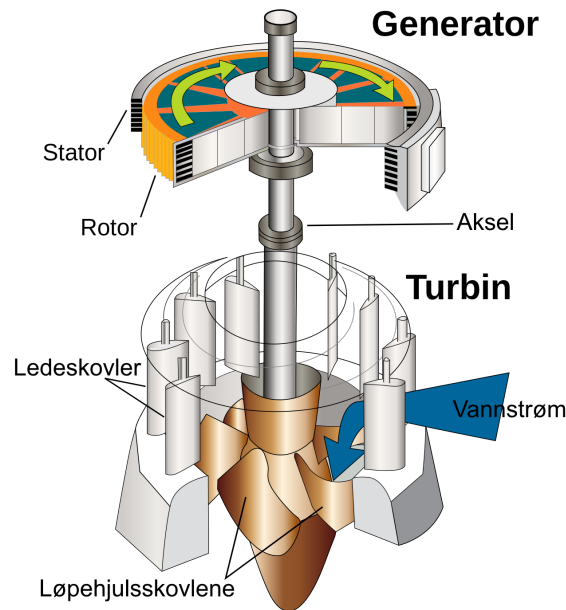
$$P = n_a \rho g Q H_e \quad (3.1)$$

hvor P er vannfallets effekt [W], n_a er virkningsgraden til anlegget, ρ er densiteten til vannet [kg/m^3], g er tyngdens akselerasjon [m/s^2], Q er mengden vann per sekund [m^3/s] og H_e er høyden mellom overvanns- og undervannspeilet [m] [20]. For å kunne omforme den potensielle energien må det brukes en turbin og en generator. Turbinen vil først omforme den potensielle energien til vannet om til roterende kinetisk energi, så omformer generatoren den kinetiske energi om til elektrisk energi som kan leveres inn på nettet. I denne oppgaven fokuseres det på et vannkraftverk (elvekraftverk) som benytter en kaplanturbin sammen med en synkrongenerator. Dette er den typen vannkraftverk som kan trenge et ELS for å kunne prekvalifisere seg iht. de nye kravene.

3.1.1 Kaplanturbinen

Både kaplanturbin og francisturbin er en type fullturbin. Diameteren på løpehjulet til en kaplanturbin er derimot mindre og omløpshastigheten er mer en dobbelt så stor som for en francisturbin. Kaplanturbiner benyttes ved lave fallhøyder og trenger derfor store vannmengder for å generere effekt [20].

For å regulere en kaplanturbin reguleres to forskjellige typer sett med skovler: Ledeapparatet og løpehjulsskovlene som vises i figur 3.1. Ledeapparatet er sammensatt av flere ledeskovler som brukes til å regulere vannmengden, som så regulerer effekten ut. Den regulerer ved å vri alle ledeskovlene slik at arealet mellom dem øker eller minsker. Dette vil kontrollere hvor mye



Figur 3.1: Oppbygning av en kaplanturbin med synkrongenerator. Hentet fra Wikimedia [21].

volum med vann kan strømme mellom skovlene og føres til løpehjulet. Kaplanturbinens løpehjul er konstruert med flere dreibare propellblad kalt løpehjulsskovler som kan rotere rundt sin egen akse. Løpehjulsskovlene er hva som omgjør den potensielle energien i vannet om til kinetisk energi i løpehjulet. Ved å kontrollere vinkelen på løpehjulsskovlene vil kaplanturbinen kunne reguleres til forskjellige arbeidsområder og fortsatt beholde en høy virkningsgrad [20].

Slitasje på turbin

Turbinene som skal bidra med å levere effekt til FCR skal som skrevet i kap. 2.2.2 skal øke eller minske produksjonen basert på frekvensen. For å bestemme hvor mye effekt som kraftverket produserer reguleres ledes- og løpehjulsskovlene. Med at frekvensen aldri holder seg perfekt på 50Hz vil lede- og løpehjulsskovlene alltid være i bevegelse for å regulere effekten som trengs for å levere FCR. Ved alle de små reguleringene vil ledeskovlene og løpehjulsskovlene bevege seg litt for å endre effekten for å stå imot frekvensendringen. Mengden slitasje er avhengig av hvor mye og hvor mange ganger skovlene må bevege på seg. Med andre ord fører mer overdreven regulering til slitasje av skovlene. For at slitasje av utstyr i kraftverket ikke skal skape en feil må kraftverket vedlikeholdes. Når turbinen skal vedlikeholdes må den stoppes og kraftselskapet mister derfor inntekt for tiden produksjonen er nede. Hvis utstyr må erstattes kan det bli kostbart. Hvis småregulering av turbinen kan hindres ved implementering av et ELS kan minimering av slitasje føre til mindre vedlikehold og produksjonsstopp og minske behovet for innkjøp av nytt utstyr [15], [22].

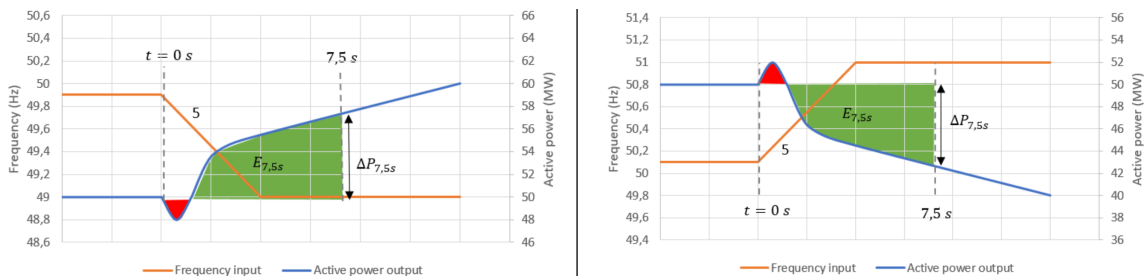
3.1.2 Generator

Generatorene som brukes mest på nettet i Norge er synkronmaskiner i vannkraftverk. Generatorer skal overføre kinetisk energi fra turbinens aksel til elektrisk energi ut på kraftnettet. Synkronmaskinen roterer stabilt sammen med frekvensen på nettet. Den er satt sammen av to hoveddeler: rotor og stator. Rotoren er fysisk festet sammen med akselen og roterer sammen med turbinen mens statoren er stasjonær.

Synkronmaskinen virker med at det påsettes en DC-strøm på viklingene i rotoren, som da produserer et magnetisk felt. Generatorens aksel roterer ved hjelp av dreiemomentet fra vannstrømmingen inn på turbinen og vil da også rotere magnetfeltene. Faradays lov sier at ved en endring i magnetfeltet rundt en sløyfe induseres en elektrisk spenning i sløyfen. Magnetfeltene fra rotoren beveger seg da i rundt til viklingene i stator og det roterende magnetfeltet vil da indukere spenninger i sløyfene i stator. Sløyfene er koblet sammen med lederne på kraftnettet koblet 120° fra hverandre slik at det genereres en trefase spenning ut av generatoren [3].

3.2 Problemet med trege vannkraftverk

Ved en aktivering av FCR ved en negativ frekvensendring vil ledeapparatet i kraftverket åpnes hurtig. Som nevnt i kap. 3.1.1 vil det bli et større areal for vannet å renne mellom ledeskivene på. På grunn av tregheten i endringen av vannstrømmen tar det tid for vannet å akselerere for å opprettholde samme trykk over turbinen. Dette vil føre til at trykket over turbinen vil synke når ledeskivene vrir seg [23]. På grunn av dette vil en aktivering av FCR forårsake at reguleringsobjektet gir ut mindre effekt enn det den leverte før aktiveringen. Vannet må akselerere helt til det når punktet hvor turbinen leverer ønsket FCR-effekt.



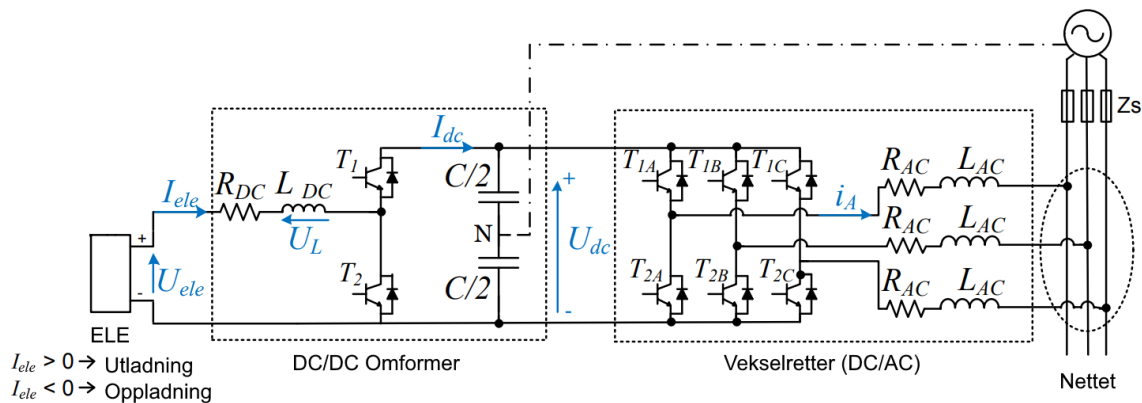
Figur 3.2: Hvordan kraftverket reagerer på en synkende og økende frekvensendring. Illustrasjon hentet fra ENTSO-E [11].

Figur 3.2 viser hvordan turbinen reagerer på en negativ og positiv frekvensendring og hvordan utgående effekt ser ut. Merk at effekten går motsatt retning som ønsket ved start på responsen på grunn av trykkforskjellen som oppstår. Som nevnt i kap. 2.3.1 er det krav om å kunne gi nok effekt og energi på 7,5 sekunder for å være innenfor kravet til FCR-D. På grunn av treghetmomentet i vannet vil ikke kraftverkene klare kravet til en så rask respons. Kraftverket vil heller ikke bestå kravene for ytelse og stabilitet. Responsens hastighet er sentral for å redusere faseforskyvning. FCR-N har dermed responskrav i frekvensplanet. Et tregt kraftverk kan klare kravene for stabilitet hvis regulatoren gir lav forsterkning, men da vil ikke kraftverket klare å nå ytelseskravet [15].

3.3 Oppbygning av energilagringssystem

Hovedproblemet med nåværende reguleringsobjekter som leverer FCR slik som elvekraftverk med kaplanturbin, er at de ikke klarer å bestå de nye kravene for respons og stabilitet (se kap. 3.2). For å kunne kvalifisere kraftverkene til FCR-markedet er det derfor tenkt å implementere et energilagringssystem (ELS) sammen med kraftverkets generator. Et ELS består av energilagringenheter (ELE) og omformere som gjør om likespenningen i ELE-ene til vekselspanning, optimaliserer driften og hindrer skader på ELE-ene.

Energien som skal leveres og lagres fordeles til ELE-ene og dette er en essensiell del av ELS-et. Hoveddelen av oppgaven er valg av optimal type ELE. Dette skal gjennomgås nærmere i kap. 7. Dette kapitlet gir en oversikt over styringssystemet og omformere som ELS-et trenger.



Figur 3.3: Kablingsskjema for en metode å strukturere et energilagringssystem. Hentet fra Gallardo-Lozano *et al.* [24].

ELS-er består som oftest av tre deler, som vises i figur 3.3: ELE-er, en bidireksjonal likestrømsomformer (DC/DC), og en bidireksjonal vekselretter (DC/AC) som også kan fungere som en likeretter (AC/DC). I tillegg består systemet av filter, transformator og sikkerhetsutstyr slik at ELS-et kan fungere optimalt. ELS-et vil som oftest være levert i en eller flere containere. Her er ELE-ene, omformere og alt tilleggsutstyr er satt sammen, slik at det enkelt kan installeres med moduler ved kraftverket uten å kreve for store inngrep på et allerede eksisterende kraftverk [15].

3.3.1 Styring av energilagringssystemet

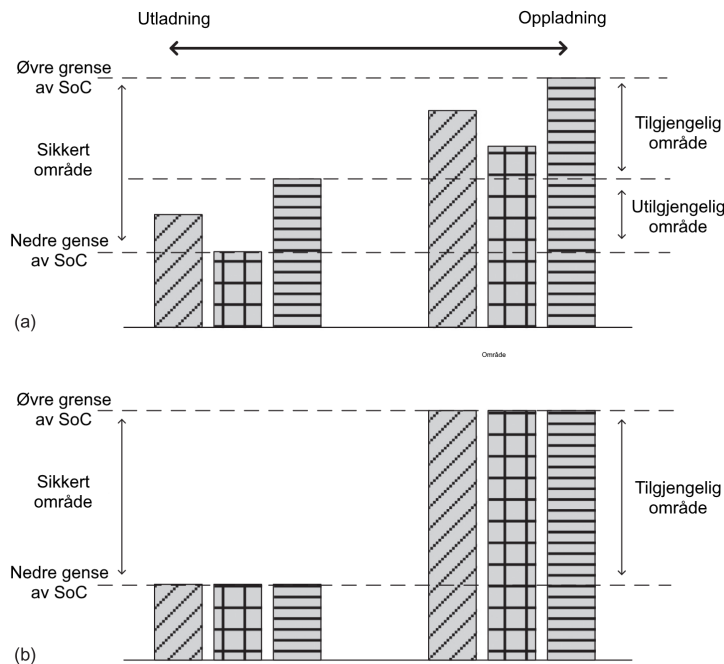
Ettersom ELE-enes cellespenning er lav, må flere ELE-er kobles i serie for å nå en gitt systemspenning som kan benyttes i et ELS [25]. Men både superkondensatorer (SK) og batterier har problemer med å balansere lagret energi og spenning. For at ELE-ene skal kunne brukes med riktig funksjon må de styres, av enten et batteri- eller kondensatorstyringssystem. ELE-styringssystemet må ha mulighet til å være koblet mellom hver celle i serien av batteri eller kondensatorer for å kunne overvåke temperatur, spenning og strøm til cellene. Ingen av cellene kan påsettes en spenning høyere enn maks driftspenning da de kan bli skadet. Cellene må

beskyttes slik at de ikke opplever en temperatur som fører til brann eller eksplosjon. *State-of-charge* (SoC) må beregnes utifra cellespenningen for å kunne vite hvor mye energi som er lagret og for å forhindre overlading. *State-of-health* (SoH) må beregnes utifra spenningen og strømmen fra ELE-ene for å få informasjon om hvorvidt de bør byttes ut [26], [27], [28].

I tillegg til systemet som overvåker og regulerer ELE-ene trenger ELS-et en regulator. ELS-ens regulator jobber sammen med turbinregulatoren og styrer hvor mye effekt som ELS-et skal levere istedenfor turbinen. Dette gjøres for å optimalisere samhandlingen mellom turbin og ELS [15].

Batteristyringssystem

For å kunne beskytte, øke levetiden og opprettholde god stabilitet i batteriene må det brukes et batteristyringssystem. Batteristyringssystemet må bruke den utregnete verdien av om SoC, slik at batteriet holdes innenfor 0 til 100% SoC (se kap. 5.1.2 for forklaring på SoC). Batteristyringssystemet må kunne begrense strømmen slik at den ikke blir for høy, da det vil senke levetiden og kan føre til feil på batteriet. Overoppheting av batteri kan føre til brann og eksplosjon. Temperaturovervåkning er derfor viktig for å være sikker på at batteriene opererer under stabile forhold. Batteristyringssystemet må kommunisere med DC/DC-konverteren for å forsyne riktig strøm og spenning inn til batteriene. Den må i tillegg kommunisere med regulatoren til ELS-et for å gi informasjon om SoC og SoH [26].



Figur 3.4: Tilgjengelig SoC-område ved en ubalansert batteripakke (a) og en balansert batteripakke (b). Illustrasjon hentet fra Gao [26].

Selv om cellene produseres av samme produsent med samme material og spesifikasjoner er det små forskjeller i mengden energi som kan holdes på av alle bateriene. Når batteriene da er

koblet i serie kan det skape en ubalanse i mengden energi i hver celle, og det er derfor behov for cellebalansering. Figur 3.4 viser det tilgjengelige området til batterier som er koblet i serie, når batteripakken er i balanse eller ubalanse. Når det er ubalanse i SoC mellom batteriene, bestemmes tilgjengeligheten og kapasiteten til batteripakken av når det mest ladete batteriet er ladet opp til den høyeste energimengden cellene tåler, og når det minst ladete batteriet er utladet til den laveste energimengden cellene tåler. Hvis batteripakken er balansert blir alle cellene ladet fra den høyeste energimengden cellene tåler til den laveste energimengden cellene tåler. Dette skaper den største kapasiteten batteripakken kan ha. Det er to hovedmetoder for balansering av batteripakke: passiv- og aktiv cellebalansering [26].

Passiv cellebalansering benytter motstander koblet parallellt sammen med batteriene for å fjerne energi fra batterier som lades opp høyere enn de andre batteriene i pakken som skaper ubalanse. Batteristyringssystemet måler enkeltvis batterienes SoC. Styringen foregår slik at det mest ladede batteriet lades ut ved å kobles sammen med motstanden i parallell. Ved oppladning er det ladestrømmen til batteripakken som blir sendt rundt til den parallelle motstanden til det batteriet. Ved utladning går strømmen ut av batteriet til den parallelle motstanden til det batteriet. Balanseringen fortsetter det til det nest mest oppladede batteriet helt til alle battericellene er balansert med samme SoC. Passiv cellebalansering er ikke veldig effektiv ettersom balanseringen gjør at restenergien går til varme i motstandene [26].

Aktiv cellebalansering fungerer slik at energien i cellene ledes til batteriet med minst SoC. Batteristyringssystemet måler spenningen til alle batteriene for å finne den som er minst ladet opp. Den kobles da opp sammen med en transformator som er koblet sammen med ladespenningen. Transformatoren er styrt av et PWM-signal fra batteristyringssystemet, slik at det minst ladede batteriet lades raskere enn resten av batteriene. Batteristyringssystemet fortsetter å lade opp de minst ladede batteriene hurtigere helt til alle batteriene er balanserte [26].

Kondensatorstyringssystem

Alle kondensatorer har ulik kapasitans, motstand og lekkstrøm på grunn av forskjeller skapt under produksjon. På grunn av dette kan det skapes spenningsforskjeller mellom de forskjellige kondensatorene som er koblet i serie. Dette kan skape et problem hvis en av kondensatorene får en spenning som er over den maksimale driftsspenningen. Hvis dette skjer kan det føre til flere skader som elektrolyttnedbrytning, gassgenerering, redusert levetid og øking av motstanden i kondensatoren som skaper mer tap. For å hindre spenningsubalanse må det brukes et kondensatorstyringssystem [27], [28].

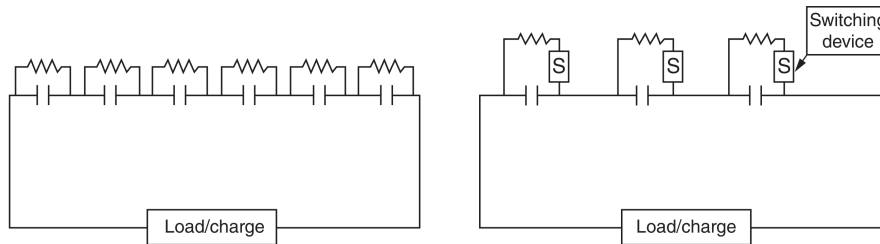
Det er to hovedgrunner til spenningsubalansen skjer med kondensatorer koblet i serie. En av grunnene til ubalansen er forskjeller mellom kapasitans. Hvis det eksempelvis er to kondensatorer i serie vil den kondensatoren med mindre kapasitans ha en høyere spenning enn den med større kapasitans. Dette vises med ligning 3.2. Hvis det ikke settes inn en form for balansesystem, vil enten en av kondensatorene kunne bli skadet eller så må høyeste forsyningsspenning bli satt ned [27].

$$V_{cap1} = V_{supply} \cdot \frac{C_{cap1}}{C_{cap1} + C_{cap2}} \quad (3.2)$$

Den andre hovedgrunnen til ubalanse er mengden lekkstrøm som forsynes av kondensatorene. En kondensator med mer lekkstrøm enn andre kondensatorer som er koblet sammen i serie vil

minske i spenning og vil øke spenningen på de andre kondensatorene i serien. Dette kommer fra forskjellen i motstanden i dielektrikumet i hver kondensator, som kan modelleres som en motstand i parallell med kondensatoren [27].

På samme måte som batteristyringssystemet kan kondensatorstyringssystemet holde balanse i kondensatorene ved to hovedmetoder: passiv og aktiv balansering.



Figur 3.5: Passiv- og aktiv balansering av kondensator. Illustrasjon hentet fra Beard *et al.* [29].

Passiv balansering gjøres ved å sette inn en lik motstand i parallell med hver kondensator i serien, som kan bli sett til venstre i figur 3.5. Dette vil gjøre at den totale motstandsverdien i parallellkoblingen får lik motstandsverdi som alle parallellkoblingene i serie. Lekkstrømmen i hver kondensator blir dermed være lik slik at spenningsvariasjonen mellom hver kondensator minsker. Passiv balansering er ugunstig for systemer hvor kondensatoren ofte skal lades opp og ned slik som ELS-et som skal benyttes i hybridkraftverket [27], [28].

I likhet med passiv balansering er motstander i parallell med hver kondensator i serien ved aktiv balansering. Motstandene vil derimot være koblet i serie med en bryter hver, som vises til høyre i figur 3.5. Kondensatorsstyringssystemet måler spenningen over hver kondensator. Når spenningen på en kondensator når en satt spenning, vil bryteren i parallell med kondensatoren slå inn. Ladestrømmen vil dermed gå igjennom motstanden og kondensatoren lader seg da ut for å skape en balanse mellom de andre kondensatorene i serien. Aktiv balansering trekker mindre effekt enn passiv balansering og gir systemet derfor mindre tap [28].

Hybridkraftverkets regulator

Hvor mye effekt som skal leveres ut av systemet vil bli bestemt av hvor mye effekt som skal leveres av FCR fra reguleringsobjektet. Hvor mye av den effekten som skal leveres av ELS-et kontra turbinen må bestemmes av regulatoren. Regulatoren må vite SoC i ELE-ene og kunne regulere turbinens pådrag i forhold til effekt som skal leveres og SoC. ELE-enes SoC kan ikke overgå det som er definert som maksimum og minimum slik at det kan skade ELE-ene og eventuelt skape brann- og eksplosjonsfare. Når ELE-enes SoC er for lav gis det et signal inn til turbinens ledeapparat slik at den kan øke effekttilførsel og FCR fortsatt kan leveres selv om ELE-ene er utladet [15]. En algoritme på hvor ofte ledeapparatet til turbinen skal endre pådrag må finnes med mål om å minske slitasje på ledeapparatet og løpehjulet, og for å forlenge levetiden og holde ELE-ene i et sikkert arbeidsområde [22].

Det er to hovedmåter å styre et hybridkraftverk på: en ny regulator som styrer turbin, generator og ELS. Eller en egen regulator som styrer ELS-et som kommuniserer med den allerede installerte regulatoren som regulerer turbin og generator [15]. Dette er en variabel som blir

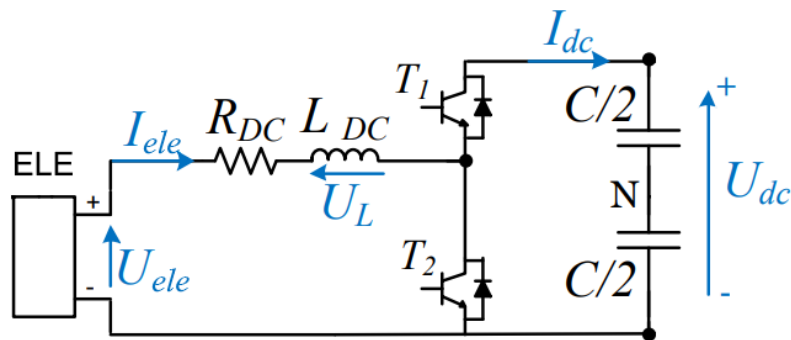
sett bort ifra i oppgaven, ettersom dette er en kostnad som vil variere mye fra kraftverk til kraftverk.

3.3.2 Omformere

Alle ELE-er som brukes i et ELS lagrer deres elektriske energi i likespenning og likestrøm (DC). Derfor må energien omformes fra likespenning til vekselstrøm (AC) før det leveres ut på kraftnettet.

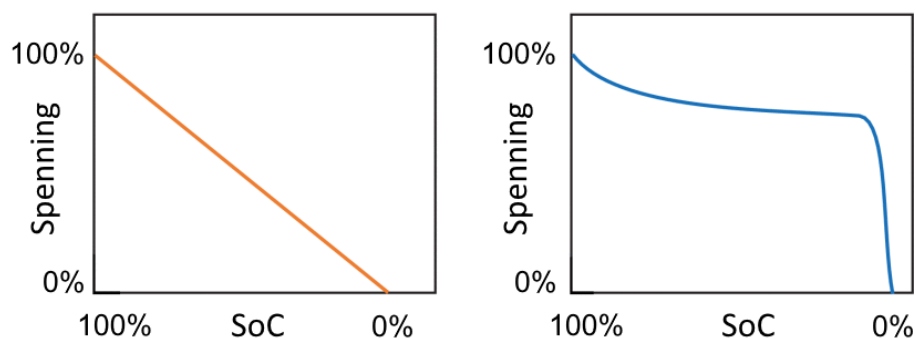
Likestrømsomformer (DC/DC)

En DC/DC Omformer, omformer en likespenning fra en høyere til lavere eller fra en lavere til høyere likespenning.



Figur 3.6: Koblingsskjema for en DC/DC omformer. Illustrasjon hentet fra Gallardo-Lozano *et al.* [24].

Figur 3.6 viser en bidireksjonal DC/DC omformer som kan brukes i et ELS. DC/DC-omformeren må være bidireksjonal slik at effekten kan gå i begge retninger både fra og til ELE-ene. Slik kan systemet lade opp og ut ELE-ene [25].



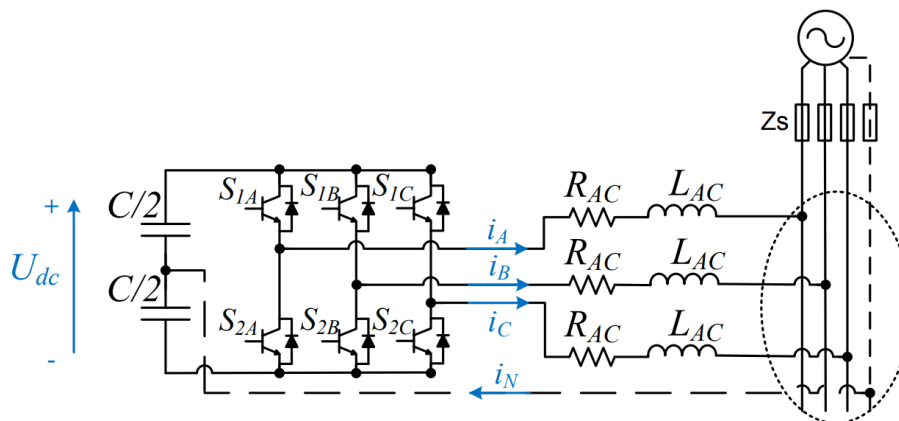
Figur 3.7: Spenning mot SoC for en konvensjonell kondensator (oransje) og et Li-ion-batteri (blå). Illustrasjon hentet fra Berrueta *et al.* [30].

Figur 3.7 viser en generisk kurve over kondensator og litium-ion batteri sin spenning mot

SoC. Den viser hvor mye spenning som ELE-en har ved forskjellige mengder energi lagret i ELE-en. Fordi spenningen vil forandres ved endringer i SoC så må vekselretteren ha et stort arbeidsområde. Ved bruk av en VSC DC/AC-vekselretter må det være en DC/DC-omformer for å kunne klare å bruke i ELE-enes kapasitet. Det brukes en DC/DC-omformer fra ELE-ene til DC/AC-vekselretteren. Dette gjøres for å kunne gi en bestemt spenning inn til vekselretteren og kunne enklere følge spenningen til ELE-ene i forhold til deres SoC [31]. Ved å ha en DC/DC-omformer vil det også kunne være færre celler i serie ved at DC/DC-omformeren øker spenningen til ønsket nivå inn til vekselretteren. Dette kan også øke levetiden til batterier som benyttes i ELS-et [25].

Vekselretter / Likeretter (AC/DC)

Alle ELE-ene som gjennomgår i kapittel 7 lagrer elektrisk energi som en likespenning. Kraftnettet som hybridkraftverket er tilkoblet operer med en vekselspenning. For å få likespenningen til vekselspenning må det brukes en DC/AC-vekselretter. Vekselrettere som benyttes med et hybridkraftverk må kunne levere effekt i begge retninger for å kunne lade opp og ut ELE-ene. Den fungerer dermed som en likeretter når effekten mates inn fra AC- til DC-siden.



Figur 3.8: Koblingsskjema for en vekselretter / likeretter. Illustrasjon hentet fra Gallardo-Lozano *et al.* [24].

Det er forskjellige topologier av vekselrettere. Den mest vanlige og enkleste topologien av vekselrettere vises i figur 3.8 som er en *voltage source converter* (VSC). Den benytter seks transistorer av typen *insulated-gate bipolar transistor* (IGBT). IGBT-ene blir kontrollert av et PWM-signal per fase, hvor IGBT-ene deler opp likespenningen i firkant-pulser med førsteharmonisk spenning med frekvens 50 Hz. Ved å bruke et filter gis det ut en sinusformet trefase spenning med 50 Hz i frekvens [25].

For en VSC vekselretter vil AC-spenningen på utgangen av vekselretteren alltid være mindre enn DC-spenningen. I motsatt retning vil DC-spenningen alltid være større enn AC-spenningen. Den opererer altså som en *step-down*-omformer i retning DC til AC og som en *step-up*-omformer i retning AC til DC [32]. Ved bruk av en VSC vekselretter må det brukes en likestrømsomformer. Det finnes flere typer vekselrettere som ikke trenger en DC/DC-omformer, slik som en

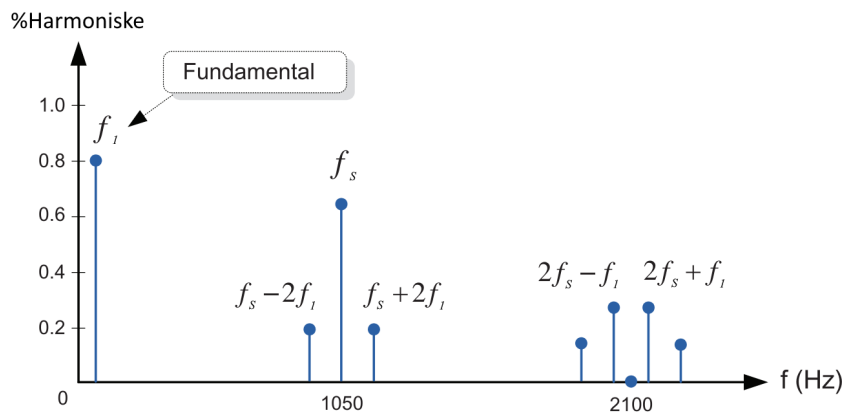
”Z-kilde-konverter”. ”Z-kilde-konverteren” kan gi glattere sinuskurve med mindre harmoniske strømmer. Ulempen er at den trenger et mer komplekst kontrollsystem [25].

3.3.3 Filter

Vekselretteren vil produsere harmoniske strømmer. Kurven som kommer ut av vekselretteren er ikke rent sinusformet og består derimot av mange firkantpulser med forskjellige intervaller. Ved å forsyne firkantpulserne rett inn på nettet vil det produseres store strømmer i vekselretteren og føre til skader på omformerer. I tillegg produseres det harmoniske strømmer på nettet som kan ødelegge innkoblet utstyr. Derfor å det benyttes et lavpassfilter sammen med vekselretteren slik at de høye harmoniske spenningene ikke mates ut på kraftnettet.

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (3.3)$$

De harmoniske strømmene er avhengige av svitsjefrekvensen som vist i ligning 3.3. Hvor m_f er frekvensmodulasjonsforholdet, f_s er svitsjefrekvensen og f_1 er førsteharmoniske som her følger nettet på 50Hz. Med høyere svitsjefrekvens vil frekvensmodulasjonsforholdet og da frekvensen til de harmoniske strømmene øke [33].



Figur 3.9: Forholdet mellom størrelsen og frekvensen på harmoniske strømmer ved fundamental- og svitsjefrekvens. Illustrasjon hentet fra Kim [34].

Figur 3.9 viser et eksempel med verdiene $f_1 = 50$ Hz og $f_s = 1050$ Hz. Her vises det at de harmoniske strømmene på utgangen av vekselretteren holder seg for det meste over svitsjefrekvensen. Ettersom frekvensen til de harmoniske strømmene er store vil det da være enklere å filtrere dem ut med ett lavpassfilter. Det negative med høye svitsjefrekvenser er at svitsjetapet i IGBT-ene og diodene i vekselretteren vil øke. For å bestemme svitsjefrekvensen må derfor svitsjetapet fra utvagt IGBT og diode vurderes opp mot kostnaden til filteret [33].

3.3.4 Transformator

ELS-et kan brukes både med og uten transformator. Det er fordeler og ulemper ved begge løsningene. Hovedsaken er den høye spenningen som ELS-et skal kobles til. ELS-et kan kobles til

generatorspenningen på kraftverket [25] hvor spenningen er rundt 11 - 35kV [35], men hvis vekselretteren skal kobles direkte på nettet uten en transformator må den og likestrømsomformerer være designet for å tåle den høye spenningen [25].

Med transformator

Ved at transformatoren kan øke lave spenninger til spenningen levert av generatoren, trenger ikke vekselretteren å være laget for høye spenninger. Når omformerne kun trenger å omforme lave spenninger, kan de gjøres billigere. Det negative ved å ha en transformator i systemet er at den må kjøpes, installeres og vedlikeholdes som gir ekstra kostnader. På grunn av den lave spenningen som kommer fra vekselretteren, vil det mates en høy strøm inn i transformatoren og dette minsker systemets effektivitet. En fordel er at det lages et galvanisk skille mellom omformerene og kraftnettet. Det kan beskytte omformere mot for høye strømmen og spenninger ved en feil. En transformator kan da også være til nytte for et ELS som allerede kan gi ut høy nok spenning ut av vekselretteren [25].

Uten transformator

Uten en transformator må omformerne kunne tåle den store spenningen som er på nettet eller generatorspenningen den skal kobles til. Den vanlige VSC vekselretteren tåler ikke spenningen som ELS-et skal kobles til. Dersom ELS-et skal fungere uten en transformator må det brukes andre typer vekselrettere. De må være laget for å tåle de høye spenningene, men de krever flere halvledere og er derfor dyrere. Man kan bruke en VSC vekselretter koblet inn rett på nettet, men for å tåle den spenningen trengs flere transistorer koblet i serie, hvor det vanligvis ville vært én. Det kan også brukes helt andre typer vekselrettere. Typen *Modular Multilevel Converter* (MMC) bruker to transistorer for hver celle og vil da kunne trenge opptil 432 transistorer og samme antall dioder på vekselretteren og vil dermed kreve et mer komplisert styringssystem. Selv om MMC-typen er effektiv og gir små harmoniske strømmen, slik at den ikke trenger like mye filtrering som VSC-typen så vil kostnaden til et system med MMC antageligvis være stor. Kontrollsystemet og den fysiske vekselretteren som må jobbe sammen med en MMC-vekselretteren vil være mer komplisert enn ved de andre alternativene. Dersom prisen på de nye typene av vekselrettere synker i fremtiden kan dette være en løsning [25].

3.3.5 Kjøling

Et ELS kan være et usikkert system. Flere deler har faremomenter som en må være forberedt på ved installasjon og bruk av et ELS. ELE-ene lagrer mye energi og er laget av materialer som kan være brennbare eller eksplosive og en feil kan føre til at energien forårsaker brann eller eksplodere [36], [37]. I tillegg overfører transformatorer en stor mengde energi og er som oftest nedkjølt av en brennbar olje [38]. Komponentene i ELS-et må også ha tilstrekkelig kjøling og brannsikringsutstyr må være tilgjengelig.

Det er to hovedkomponenter som har større fare for brann enn andre: ELE-ene og transformator. Brannfaren til ELE-ene er en essensiell risiko som må tas hensyn til. Dette beskrives nærmere i kap. 7.3.5.

Brannfare fra transformatorer

Transformatorer kan ta fyr og i verst tilfelle eksplodere hvis ikke sikkerhetshensyn tas i betraktning. Dersom transformatoren overfører mer effekt enn dens nominelle effekt, kan den bli så varm at isolasjonen rundt viklingene smelter og det skapes en kortslutning. Videre kan kortslutningen varme kjernen og viklingene og skape en potensielt brannfarlig situasjon [38].

Transformatoroljens aldringshastighet øker med økt temperatur. Ved aldring blir oljen til syrer, vann og slam. Dersom oljen har dårlig kvalitet grunnet aldring og ikke blitt byttet ut, vil det være fare for at viklingene og kjernen ikke blir tilstrekkelig nedkjølt. Det kan da skapes en brennbar gass fra oljen i transformatoren da oljen begynner å koke. Gassen kan skape elektronbruer og forårsake elektrisk gjennomslag. Transformatoren har flere sikkerhetsmekanismer som skal forhindre en eventuell eksplosjon eller kortslutning, som ved bruk av gassdetektorrelé (Buchholz relé) og trykkventiler. Det er likevel en risiko for at olje kan lekke ut av transformatoren. Oljen er brannfarlig og vil gi store skader dersom den tar fyr [38].

Kjølingssystem

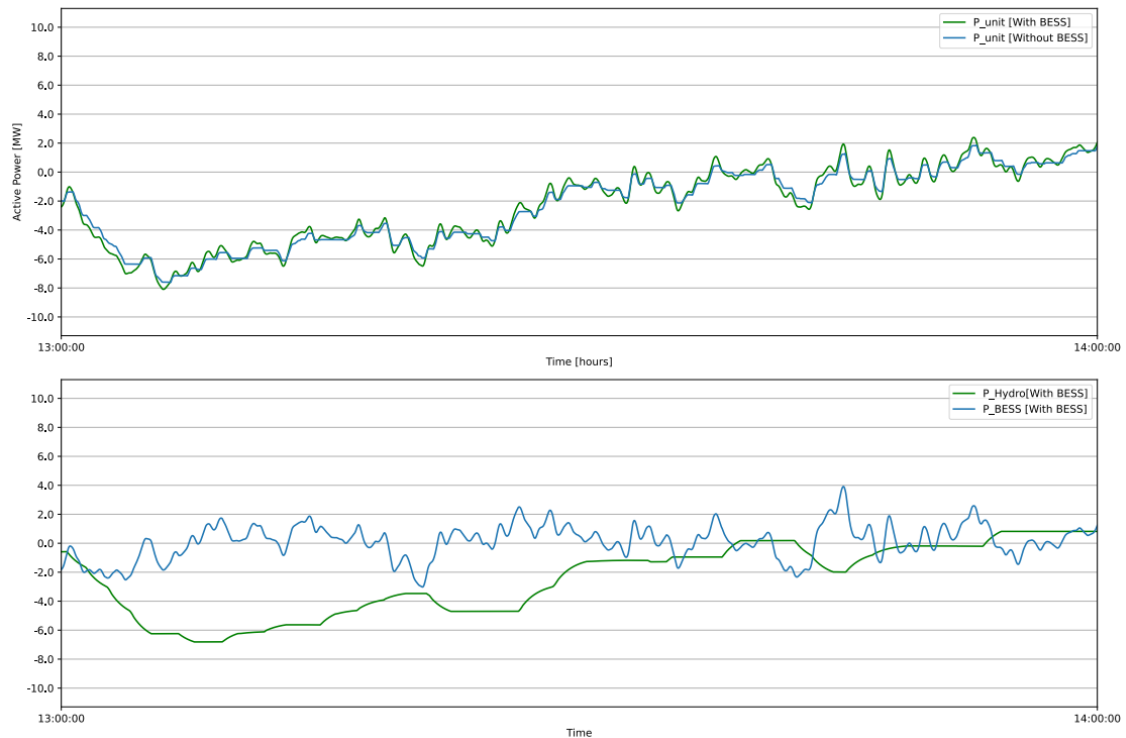
På grunn av fare for brann og eksplosjoner må det være et system for kjøling av ELS-et. At varmen må fjernes vekk fra komponentene skylder ikke kun fare for brann. Kjølesystemet må blant annet forlenge levetiden til omformere og ELE-ene (se kap. 5.1.5). For å forsikre at ingen av omformerne blir skadet og at ELE-ene ikke blir for varme og brann utløses, må det installeres et kjølesystem slik at temperaturen i ELS-et kan holdes lavt og stabilt. Både batterier og SK-er trenger kjøling for å øke levetiden og sikre god ytelse under drift. Dette skal diskuteres nærmere i kap. 5.1.5. Omformerne kan bli skadet av de høye temperaturene som skapes av kobbertap og svitsjetapene fra halvlederne hvis varmen ikke blir ført bort fra omformerne [39].

3.4 Fordeler med energilagringssystem

Selv om det trengs et ELS for å kunne kvalifisere et elvekraftverk med kaplanturbin for å levere FCR, er det også andre fordeler ved å bruke et ELS sammen med et vannkraftverk.

3.4.1 Reduksjon av slitasje

Som beskrevet i kap. 3.1.1 er det gunstig å redusere hvor mye ledeapparatet og løpehjulsskovlene beveger seg. Ved å integrere et ELS med vannkraftverket vil ELE-ene kunne brukes til å levere eller lagre energi for å motstå frekvensendringene i kraftnettet. Med andre ord er det kun effekten fra ELE-ene som leverer FCR. Dermed trenger ikke ledeapparatet og løpehjulsskovlene til turbinen å reagere og kunne fortsette å levere samme effekt som den leverte før frekvensendringen.



Figur 3.10: Levert effekt ved simulering av kraftverk uten og med ELS. Illustrasjon hentet fra Hellborg [40].

Figur 3.10 viser en simulering utført av Hellborg [40] av et kraftverk med og uten ELS. Simuleringen ble gjort med basis i frekvensdata fra august 2018. I figuren vises hvor mye effekt som ble levert av et reguleringsobjekt både uten (øverst) og med (nederst) et ELS. Simuleringen i figuren viser at pådraget fra turbinen ikke endres like ofte med et ELS som den gjøres uten et ELS.

Tabell 3.1: Bevegelser og distanser for lede- og løpehjulsskovler med og uten ELS [40].

Parameter	Uten ELS	Med ELS
Ledeskovle distanse	5 595%	957%
Løpehjulsskovle distanse	5 501%	956%
Ledeskovle bevegelser	84 567	5 411
Løpehjulsskovle bevegelser	75 982	5 321

Tabell 3.1 viser tallene fra simuleringen utført av Hellborg [40]. Her vises hvor mye ledeskovlene og løpehjulsskovlene beveger seg, samt den totale distansen for alle bevegelsene. 100% distanse oppnås når skovlene beveger seg fra helt åpen til helt lukket posisjon. Antall bevegelser med ELS på ledeskovlene er 15 ganger mindre og på løpehjulsskovlene 14 ganger mindre enn uten ELS. Videre er distansen på ledeskovlene og løpehjulsskovlene 5 ganger mindre når

kraftverket samspiller med et ELS. Med dette vil installasjon av et ELS redusere eventuelle kostnader påført av slitasje på vannkraftverket.

3.4.2 Høyere sammenlagt FCR-kapasitet

Et hybridkraftverk vil kunne levere høyere FCR-effekt enn ELS og kraftverk hver for seg. Anlegget tilhørende Hafslund Eco Vannkraft på Harpefossen er et kraftverk med kapasitet på 50 MW. Det er antatt at det vil kunne trenge et ELS med levert effekt på 630 kW og en kapasitet på 200 kWh fra et ELS for å levere en FCR-N-effekt fra reguleringsobjektet til sammen på 2,5 MW [15].

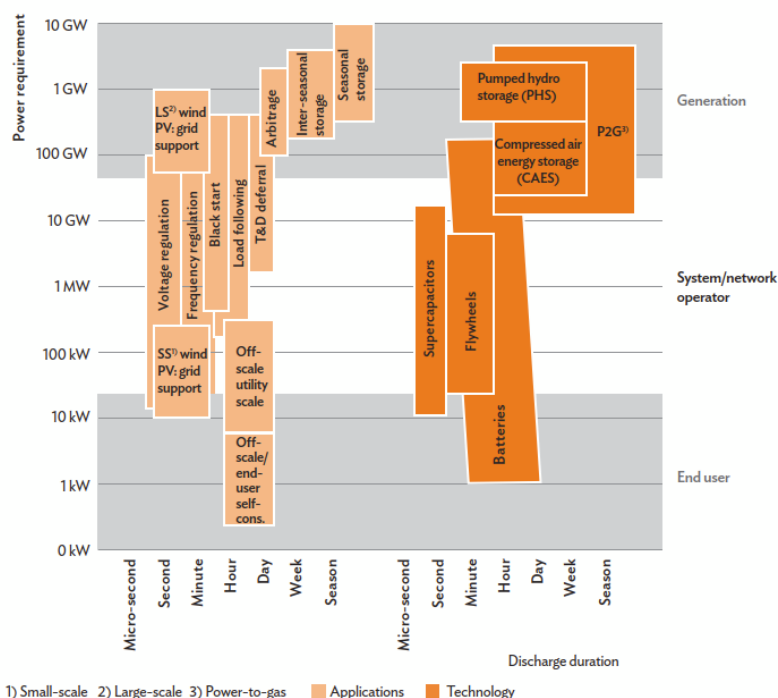
Et ELS alene vil kunne være klar til å reagere på en negativ frekvensendring og starte å levere effekt, men etter en stor varierende frekvensendring kan ELS-et gå tom for energi. ELS-et vil ikke da klare å benyttes før en positiv frekvensendring inntreffer slik at ELE-en kan lades opp igjen. Dette er en stor fordel med hybridkraftverket. ELS-et trenger ikke å være dimensjonert for å levere all FCR-effekten alene. I hybridkraftverket kan ELS-et reagere raskt ved et frekvensavvik og dersom det blir helt opp- eller utladet kan vannkraftverket øke eller minske produksjonen ved å regulere turbinen. ELE-ene kan dermed alltid være innenfor et funksjonelt område og klar til bruk uansett størrelsen på frekvensendringen som forekommer i kraftnettet [15].

Kapittel 4

Energilagringssystemer

En energilagringssystem (ELE) er et objekt som kan lagre energi og levere energien ut slik at den kan brukes. ELE-ene kan lagre energien på forskjellige måter som mekanisk, termisk, elektrisk, kjemisk og elektrokjemisk:

- Mekanisk ELE: Svinghjul, trykkluft [41]
- Termisk ELE: Varmtvannsakkumulator [41]
- Elektrisk ELE: Kondensator, superkondensator (SK) [42]
- Kjemisk ELE: Hydrogenlagring med brenselcelle [42]
- Elektrokjemisk ELE: Batteri [42]



Figur 4.1: Forskjellige energilagringsteknologier til forskjellig bruk. Hentet fra Bank *et al.* [43].

I figur 4.1 vises ulike ELE-er klassifisert etter hvor lenge de skal lades ut og størrelsen på effekten som kan leveres. ELE-er har med andre ord forskjellig grader av egnethet i henhold til bruksområde. I figur 4.1 vises det at noen batterier, SK-er og svinghjul er relevante alternativer innenfor et spektrum på sekunder til minutter og 50 kW til 50 GW (innenfor omfang av systemregulerende tjenester (*system/network operator*) for frekvensregulering (*frequency regulation*)).

SK-er og batterier er de eneste typene ELE-er som dekkes i denne oppgaven.

4.1 Batteri

I dette kapittelet gjennomgås virkemåten til batterier, klassifisering av type batterier, og oppbygning av noen relevante batterier.

4.1.1 Virkemåte

Batteriets grunnleggende virkemåte baserer seg på at kjemisk potensiell energi omdannes til elektrisk energi gjennom en kjemisk reaksjon. Batteriet består av to elektroder med motsatt ladning, som skaper spenningsforskjellen i batteriet. Elektrolytten, som er et medium i batteriet, fungerer som en transportør av ioner mellom disse elektrodene.

Et batteri genererer elektrisk strøm gjennom en serie av kjemiske reaksjoner. Disse reaksjonene involverer frigjøring av elektroner gjennom oksidasjon ved anoden, og en reduksjon ved katoden. Elektronene flytter seg gjennom en ekstern krets fra anoden til katoden, mens ionene beveger seg gjennom elektrolytten inne i batteriet for å opprettholde nøytralitet. En elektrodeseparator som leder ioner, ofte en syntetisk membran, er plassert mellom anoden og katoden for å hindre direkte elektronflyt og forhindre kortslutning. Etter en viss tid vil ionene diffundere gjennom denne separatoren, og batteriet vil utlades selv om det ikke er i bruk, altså det som kalles selvutladning. Ettersom reaksjonsmaterialene gradvis forbrukes, reduseres batteriets kapasitet inntil det til slutt må lades eller byttes ut [44], [45].

4.1.2 Klassifisering av batteri

Batterier klassifiseres i hovedsak enten som primær- eller sekundærbatterier. Primærbatterier kan ikke lades opp slik at de må byttes etter de er utladet, mens sekundærbatterier kan lades både opp og ned [29]. Sekundærbatterier er derfor fokuset i denne oppgaven, ettersom ELS-et ikke klarer å støtte frekvensreguleringen uten å lades opp.

4.1.3 Litium-ion batteri

Litiumion-batterier (Li-ion-batteri) tilhører gruppen sekundærbatterier. De bruker litiumforbindelser som elektrodematerialer i både anoden og katoden. I batteriets opp- og utladnings-syklus flytter litiumioner seg mellom disse elektrodene. Li-ion-batterier har blitt referert til som "gyngestol-batterier" fordi litium-ionene "gynger" fram og tilbake mellom de positive og negative elektrodene når cellen lades og utlades [29].

Ulike typer Li-ion-batteri

De vanligste katodematerialene som brukes i Li-ion-batteri inkluderer litiumjernfosfat ($LiFePO_4$ eller LFP), litiummanganoksid ($LiMn_2O_4$ eller LMO), litiumkoboltoksid ($LiCoO_2$ eller LCO) og litiumnikkeltmangankoboltoksid ($Li(NiCoMn)O_2$ eller NMC). LTO står for $Li_{4/3}Ti_{5/3}O_4$ [29].

Tabell 4.1: Katode- og anodematerial brukt i ulike Li-ion-batterier [43].

Forkortelse	Katode	Anode
LFP	LFP	Grafitt
LMO	LMO	Grafitt
LTO	LMO eller NMC	LTO
LCO	LCO	Grafitt
NCA	NCA	Grafitt
NMC	NMC	Grafitt, silikon

Elektrolytter i litiumion-batterier

Elektrolyttene i Li-ion-batterier inneholder vanligvis saltet $LiPF_6$ som løses i et organisk løsemiddel for å oppløse disse saltene effektivt. Salt tilsettes elektrolytten for å øke cellespenningen [29]. Disse elektrolyttene er tilpasset for lav temperatur, høy effekt og rask opp- og utladning ved bruk av løsninger med lav viskositet og frysepunkt. Nyere salter som $LiFSI$ og $LiPO_2F_2$ er også brukt for å øke ledningsevne og forbedre batteriets levetid under visse forhold [29].

4.1.4 Nikkel-kadmium-batteri

Nikkel-kadmium-batteriet (Ni-Cd) er et sekundærbatteri med kadmiumanode, nikkeloksidhydroksidkatode og kaliumhydroksid-elektrolytt. Batteriet fungerer ved reduksjon av nikkel [44].

4.1.5 Nikkel-metall-hydrid-batteri

Nikkel-metallhydrid-batterier (Ni-MH) representerer en annen kategori av sekundære nikkelkatodeceller. Ifølge Burheim [44] skiller Ni-MH-batterier seg hovedsakelig fra Ni-Cd ved at kadmiumelektroden er erstattet med en hydrogenreaksjon, og hydrogenet lagres inne i en metall-elektrode. Hydrogenet blir interstitielt lagret som atomer mellom større metallatomer og danner dermed et metallhydrid [44].

4.2 Superkondensator

Batterier har lenge vært et populært valg for energilagring på grunn av sin høye energitetthet. Batterier har imidlertid også sine begrensninger. Ved bruk i applikasjoner med høye effektkrav, kan de lide av forkortet levetid og begrenset sykluslevetid. Dette problemet har ført til utviklingen av spesialiserte høy-effektsbatterier eller ”pulsbatterier”. Disse batteriene har høy

effektetthet, men de har ofte dårligere energitetthet og levetid sammenlignet med konvensjonelle batterier [29].

Superkondensator (SK) eller elektrokjemiske kondensatorer er utviklet som et alternativ til puls-batterier. For å være et bedre alternativ, må SK-en ha mye høyere effekt og mye lengre levetid og sykluslevetid enn batterier. I de fleste tilfeller er det den lave energitettheten som begrenser bruksområdene for SK-er [29].

4.2.1 Virkemåte

SK-er består av to elektroder som er motsatt ladet, med en elektrolytt og en separator i midten. I en SK kan energien lagres på to hovedmåter, enten ved elektrisk ladning hvor energien lagres i elektrodens materiale eller ved grensesnittet mellom elektroden og elektrolytten [46].

Når det refereres til lagring av elektrisk energi ved grensesnittet mellom elektroden og elektrolytten snakkes det om lagring ved bruk av faradiske prosesser. Faradisk lagring av ladning kjennetegnes ved en elektrokjemisk reaksjon (redoksreaksjon) hvor elektronene (ladning) overføres mellom stoffene slikt som et batteri gjør [47].

Dette står i kontrast til lagring av ladning i elektrodematerialet, som er en kapazitiv prosess. Kapazitiv ladningslagring innebærer fysisk separasjon av ladning ved grensesnittet til en elektrode, som illustrert i figur 4.4. Denne prosessen kan også kalles elektrostatisk og er grunnlaget for hvordan platekondensatorer fungerer [46], [48].

HK lagrer energi gjennom en kombinasjon av begge lagringsmetodene som er nevnt [46].

Elektrolytt

Elektrolytter som kan brukes i SK-er består av enten en vannbasert eller ionisk væske eller organisk løsemiddel [46]. Vannbaserte elektrolytter har generelt lavere ESM og et lavere krav til minimum porestørrelse for elektrodene sammenlignet med organiske elektrolytter. Ulempen med vannbaserte elektrolytter er at de har lavere gjennomslagsspenninger. En lavere gjennomslagsspenning, fører til at SK-en har lavere celledspenning [48]. Organiske løsemidler har høyere gjennomslagsspenning, og kan kombineres med salter for å øke den ytterlige [46]. Selv om ioniske væsker har gode tekniske egenskaper, er de dyre. En oversikt over ulike elektrolytter som benyttes i SK-er og noen av deres egenskaper vises i vedlegg A.

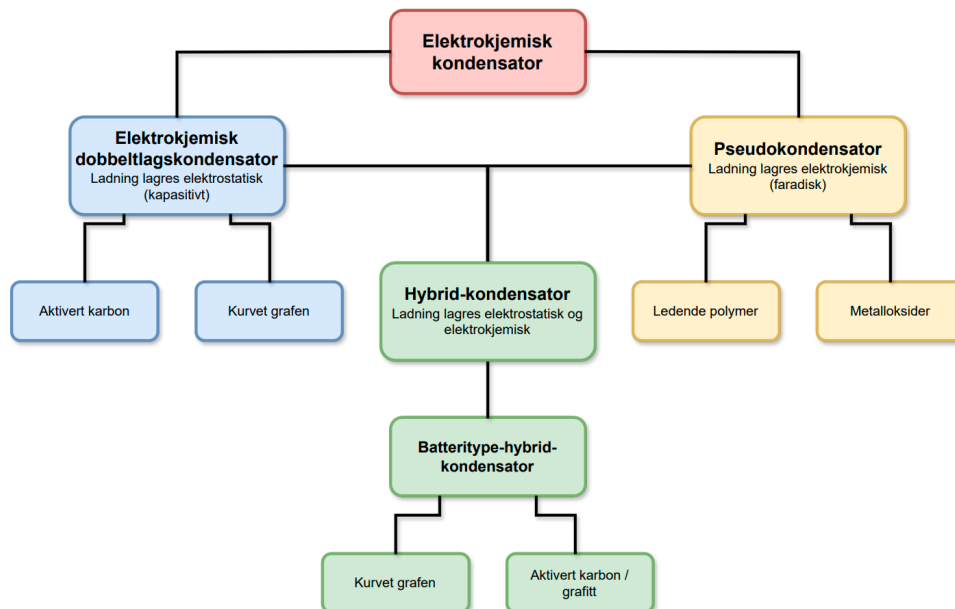
Overflatematerialet

Overflatematerialet som brukes i SK-er er karbon ettersom det har flere gode egenskaper; god kjemisk stabilitet og elektrisk ledningsevne, er rikelig tilgjengelig og har lav til moderat kostnad. Aktivert karbon er det mest brukte elektrodematerialet i EDLK-er på grunn av dets kostnadseffektivitet og høye overflateareal, som gjør at det får økt kapasitans. Porestørrelse er et nøkkelområde for SK-er, da den påvirker enhetens energi- og effektetthet [46].

Skeleton Technologies har utviklet en ny type karbon for sine EDLK-er og superbatteri som kalles kurvet grafen eller *curved graphene*. Stoffet er mest sannsynlig laget av en miks av to typer karbidavledet karbon [49]. En liste over karbonmatriell og deres egenskaper finnes i vedlegg B.

4.2.2 Klassifisering av superkondensator

SK-er klassifiseres etter deres ulike måter å lagre energi (ladning) på. De forskjellige typene vises i figur 4.2: Elektrokjemisk dobbeltlagskondensator (EDLK), pseudokondensator og hybridkondensator (HK) [50].



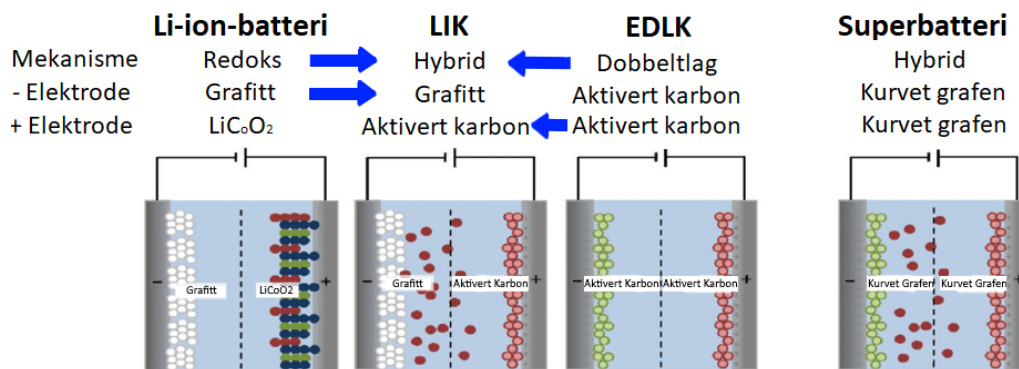
Figur 4.2: Blokkdiagram for ulike undergrupper av SK-er [46], [48], [51].

I tabell 4.2 vises en oversikt over elektrolytt- og elektrodetype som benyttes av SK-ene som gjennomgås i analysen (kap. 7).

Tabell 4.2: Elektrode og elektrolytt brukt i SK-er.

Navn	Utvikler	Gruppe	Elektrolytt	Elektrode	Kilde
SCA3200	Skeleton	EDLK	Organisk (ACN) m/salt	Kurve grafen	[51], [52]
SCX5000	Skeleton	EDLK	Organisk (ACN) m/ salt	Kurve grafen	[52]
BCAP3400	Ness/Maxwell	EDLK	Organisk (ACN) m/ salt	Aktivert karbon	[29], [53], [54], vedl. D
Aktivert karbon	Skeleton	EDLK	Organisk (ACN) m/ salt	Aktivert karbon	[29], [52], vedl. D
LIK	JSR Micro	BHK	Organisk m/ salt	Pre-lithated grafitt / aktivert karbon	[55]
LIK	JSR Micro	BHK	Organisk m/ salt	Pre-lithated grafitt / aktivert karbon	[55]
LIK	JSR Micro	BHK	Organisk m/ salt	Pre-lithated grafitt / aktivert karbon	[55]
Superbatteri	Skeleton	BHK	Organisk m/ salt	Kurve grafen	[51]

EDLK bruker karbonbaserte elektroder til å lagre energi elektrostatiske. Karbon-baserte materialer benyttes her som følge av deres porøsitet og store overflateareal. Disse er kjent for sin høye syklusstabilitet og kan dyplades opptil en million ganger [56]. Videre finnes det pseudokondensatorer, som i motsetning til EDLK lagrer energi elektrokjemisk på en måte som ligner på batterier [56]. Til slutt finnes det HK-er som kombinerer egenskapene til både EDLK og pseudokondensatorer for å oppnå bedre energitetthet uten å ofre for mye på effekttetthet. Hybridkondensatorer bruker både elektrostatiske og elektrokjemiske prosesser for å lagre ladning [48].

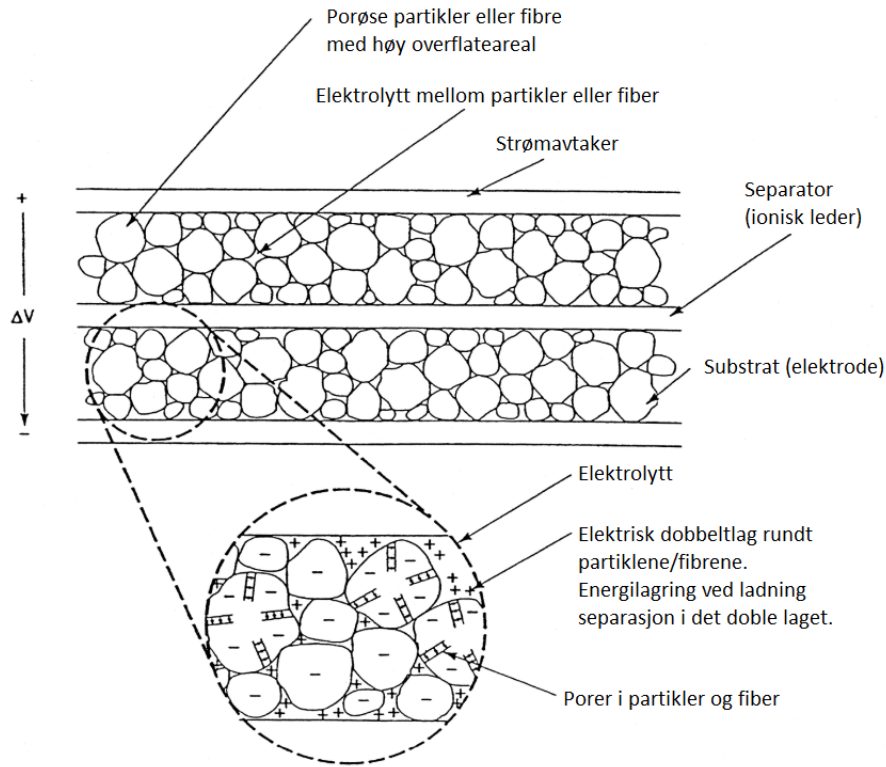


Figur 4.3: Hvordan Li-ion-batteri, LIK, EDLK og Skeletons superbatteri er oppbygd [46], [57].

4.2.3 Elektrokjemisk dobbeltdagskondensator

Det forekommer ingen ioneoverføring ved platekondensatorer, men dette skjer i SK-er [47]. Elektrokjemiske dobbeltdagskondensatorer (EDLK) består av et indre lag bestående av en solid elektrode og en elektrolytt med ioner [44], og dette vises i figur 4.4. Mellom elektrolytten og elektroden forekommer det en kapasitiv effekt som kalles ”doppeltdags-effekten” [44]. Det dannes et potensialforskjell, altså i mellom elektrolytten og elektroden, ved at ioner og dipoler i elektrolytten tiltrekkes den ladde overflaten [58].

Som sees på figur 4.4 er overflatemaerialet porøst, dermed kan ionene trekke seg inn i ”porene” i stoffet og dermed får materialet større overflateareal. Effekten er at det totale potensialet øker og dermed øker kapasitansen [44].



Figur 4.4: Oppbygning av EDLK-er. Illustrasjon hentet fra Burke [56].

4.2.4 Pseudokondensator

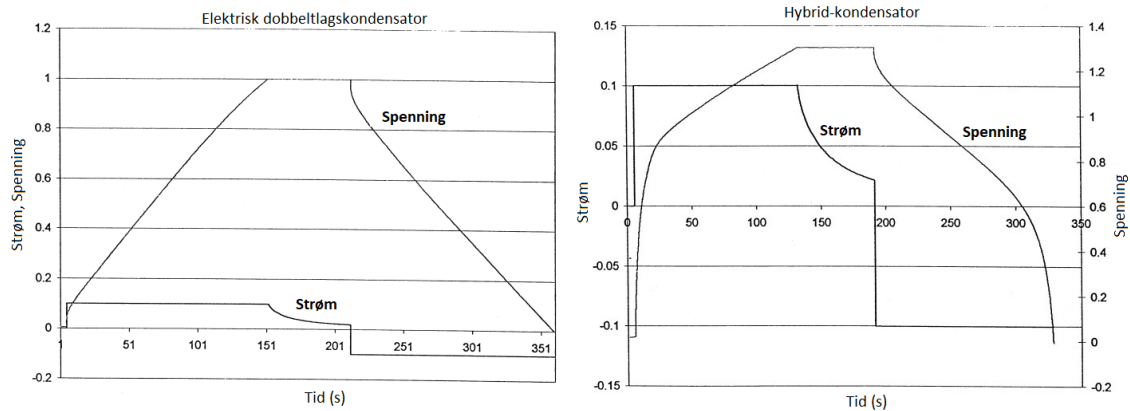
Pseudokondensatorer lagrer ladningen elektrokjemisk i motsetning til en EDLK som lagrer ladningen elektrostatisk. Pseudokondensatoren lagrer dermed energien mer som i et batteri, gjennom overføring av ladning mellom elektroden og elektrolytten [56]. De to hovedgruppene av elektrodematerialer som brukes til å lagre ladning i pseudokondensatorer er ledende polymerer og metalloksider [48].

4.2.5 Hybrid-kondensator

En hybrid-kondensator (HK) er laget for å optimalisere fordelene og minimere ulemper ved EDLK-er og pseudokondensatorer. Ved å kombinere elektrostatiske- og elektrokjemiske prosesser for å lagre ladning, utnytter hybrid-kondensatoren både elektrokjemiske reaksjoner ved elektrode-elektrolyttgrensesnittet og reversible redoksreaksjoner for å oppnå både lagringskapasitet tilsvarende en pseudokondensator og effektytelsen til en EDLK. Dette resulterer i at noen hybrid-kondensatorer kan oppnå større energi- og effekttettheter sammenlignet med EDLK [48].

Pseudokapasitansen og den elektriske dobbeltlagskapasitansen kombineres for å danne en integrert kapasitansverdi i en SK. Energitettheten til enheten kan være betydelig høyere enn for en ren EDLK. Imidlertid kan opp- og utladningskarakteristikken (spenning mot ladning) være

ikke-ideell, som illustrert i figur 4.5. Hybridløsningen kan også ha en viss negativ innvirkning på ladesykluser, noe som kan gjøre ladning og utladning mindre ideelle, men dette har blitt forbedret over tid [48], [56].



Figur 4.5: Oppladning og utladning for EDLK og HK. Hentet fra Burke [56].

Batteritype-hybrid-kondensator

Batteritype-hybrid-kondensator (BHK) består av en EDLK-elektrode og en batterielektrode for å dra nytte av styrkene til begge komponenter. Ulike typer BHK vises i figur 4.3. Forskningen har fokusert på bruk av nikkelfydrogen, bly-syre, eller litiumion-elektroder kombinert med aktivert karbon [48], og nyere produkt fra selskapet Skeleton Technologies har inkludert bruk av kurvet grafen [51], [59].

Li-ion-kondensator Litiumion-kondensator (LIK) er en HK som kombinerer en negativ elektrode av forbehandlet (*pre-lithiated*) grafitt og en positiv elektrode av aktivert karbon. Denne prosessen skiller seg fra den klassiske "gyngestol"-mekanismen i vanlige litiumion batterier, og fører til høyere arbeidsspenninger og potensielt høyere energi- og effekttetthet enn konvensjonelle EDLK-er [46].

Superbatteri Superbatteriet er en type HK som produseres av Skeleton. Begge elektrodematerialene som benyttes i superbatteri er laget av kurvet grafen. Superbatteriet benytter en spesialtilpasset kjemisk elektrolyttblanding, utviklet for å fungere effektivt med kurvet grafen (se figur 4.3). Den eksakte sammensetningen er hemmeligstemplett, men det antas at den ligner en konvensjonell LIK [51]. Basert på vedlegg A og et utsagn fra Sebastian Pohlmann (*VP of innovation* i Skeleton Technologies) [51], antas det at elektrolytten er et organisk løsemiddel med salt. Denne type elektrolytt benytter Skeleton i sine andre produkter og er vanlig for flere ulike LIK-typer [46], [52].

Kapittel 5

Kriterier for valg av energilagringssystemer

For å utføre en sammenlignende analyse av forskjellige ELE-er, er det nødvendig å ta hensyn til tekniske spesifikasjoner samt vurdere kostnader, miljømessige faktorer og sikkerhetshensyn. Dette kapittelet vil beskrive kriteriene som kan benyttes for å analysere ELE-er.

5.1 Tekniske spesifikasjoner

Her følger en beskrivelse av ulike tekniske kriterier som underveis benyttes for å sammenligne de ulike ELE-ene i analysen i kap. 7.

5.1.1 Energi og effekt

Energi og effekt er to viktige begreper innen energilagring, og det er viktig å poengtere forskjellen mellom dem. Energi kan tenkes på som evnen til å utføre et arbeid [60]. Energi defineres i Joule (J) og defineres av ligning 5.1 hvor t er tid og P er effekt [44]:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P dt \quad (5.1)$$

Videre defineres effekt som hastigheten arbeidet utføres, med måleenhet i J/s eller Watt (W), definert av [44]:

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (5.2)$$

Med en større effekt vil altså energien brukes opp raskere. Noen system trenger mye effekt over en kortere periode, mens andre trenger mye energi og har ikke store effektkrav.

Det er også en fordel at ELE-ene ikke tar for mye plass eller veier for mye. Det kan føre til at det blir transportkostnadene øker og mer masse enn nødvendig blir installert. Ofte er det behov for å finne et kompromiss mellom energi og effekt per masse. Disse to enhetene vil da gi balansen mellom spesifikk energi (W/kg) og spesifikk effekt (Wh/kg) [44].

Hva slags ELE som er best i henhold til hvilket parameter kan visualiseres ved å se på et *ragone-diagram*. Her viser en av aksene henholdsvis spesifikk energi og -effekt. Slik at det kan finnes en balanse for hvilke parametere som er viktigst for hvilket bruk [44].

Plass og vekt

Vekten og volumet til modulene som cellene er installert i er betydelig større enn for kun cellene alene. Det gjennomsnittlige pakkeforholdet for vekt er på 0.5 for SK og 0.7 for batteri. Forholdet for volum er ca. 0.4 for SK og 0.6 for batteri [29].

Beregning av maks effektuttak

Ifølge Beard *et al.* [29] er det to metoder for å beregne maks effektuttak: ved såkalt *matched impedance* P_{mi} og ved bruk av P_{ef} og P_{uc} . Metoden som benyttes er viktig å bemerke seg når effekt skal sammenlignes mellom batterier og SK-er.

Ved utregning av maks effektuttak ved bruk av *matched impedance* vises det i nesten alle tilfeller at effekten fra SK-er er mye høyere enn det er for batteriene. ELE-ens effektkapasitet er hovedsaklig avhengig av enhetens indre motstand og kjennskap av denne verdien er derfor essensiell for å finne den riktige verdien av maks effektuttak.

Det maksimale effektuttaket burde beregnes ved hjelp av P_{ef} og P_{uc} med henholdsvis formel 5.4 for batteri og 5.5 for SK. Dette gir en nyttigere fremstilling for sammenligning av effektpotensialet i forhold til metoden gitt av formel 5.3 (*matched impedance*) [61].

Maks effektuttak ved *matched impedance* finnes når halvparten av energien ved utladning medregnes som tap til varme og halvparten til utlevert effekt. Maks effektuttak ved dette punktet P_{mi} gis ved [29]:

$$P_{mi} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R_b} \quad (5.3)$$

hvor V_{OC} er ELE-ens tomgangsspenning og R_b er dets indre motstand [29]. Utladningseffektiviteten er 50% ved dette punktet.

Opp- og utladningseffekt (P_{ef}) for et batteri som funksjon av virkningsgraden gis ved [29]:

$$P_{ef} = (EF)(1 - EF)\left(\frac{V_{OC}^2}{R_b}\right) \quad (5.4)$$

hvor EF representerer virkningsgraden av høy-effektpulsen. Ved $EF = 0,95$, er forholdet $\frac{P_{ef}}{P_{mi}} = 0,19$. Med andre ord, når virkningsgraden er viktigst å ta hensyn til, er den brukbare effekten til ELE-en mye mindre enn maks effektuttak (P_{mi}) som ofte oppgis av produsenten [29].

For SK-er gis maks effektuttak for en puls (P_{uc}) ved spenning mellom V_o og $\frac{V_o}{2}$, hvor V_o er SK-ens nominelle spenning. Dette er gitt av [29]

$$P_{uc} = \frac{9}{16} \cdot (1 - EF)\left(\frac{V_o^2}{R_{uc}}\right) \quad (5.5)$$

hvor R_{uc} er SK-ens indre motstand.

Cellespenning I ELE-er med mange seriekoblede celler kan det være utfordringer med hensyn til både levetid og styring. For å oppnå riktig systemspenning må det ofte kobles mange celler i serie. Selv med cellebalanseringskretser kan cellen oppleve perioder med nær maksimalt spenningsnivå og temperaturen vil variere over hele pakken selv med kjøling. For å forbedre levetiden må faktorene ovenfor tas hensyn til. Høyere celledesign gjør at det trengs færre celler i serie. Dette kan redusere stress på styresystemet og redusere behovet for ”overnøyaktig” regulering av celledesignen [29].

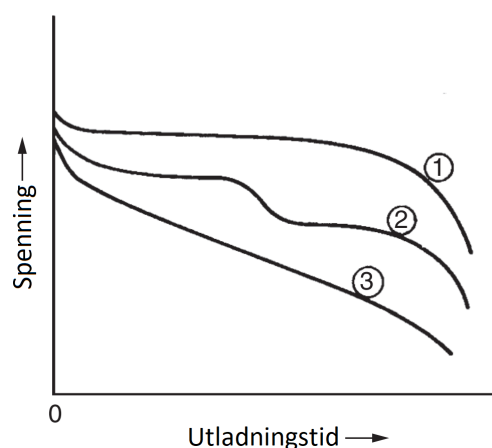
5.1.2 Opp- og utladningskarakteristikk

Batteri

State of charge og depth of discharge *State of charge (SoC)* og *depth of discharge (DoD)* kvantifiser kapasiteten i batteriet. SoC refererer til den maksimalt mulige mengden ladning som overføres mellom elektrodene og uttrykkes vanligvis som en prosentandel, der 0% = tomt og 100% = fullt. Den alternative formen for samme måling er DoD, som referer til mengden ladning som kan ha blitt brukt opp hvis cellen er fullstendig utladet (100% = tomt og 0% = fullt). Sammenhengen mellom SoC og DoD kan uttrykkes som $SoC = 100\% - DoD$ [44].

Oppladning av batteri Ladeaksept (*charge acceptance*) defineres som et batteris evne til å akseptere ladning. Dette kan påvirkes av temperatur, laderate og ladetilstand. Oppladning ved konstant strøm er den mest vanlige og grunnleggende metoden for å lade batterier. Vanligvis blir dette også gjort ved konstant spenning eller modifiserte metoder med konstant spenning, avhengig av type batteri og bruksområde [29]. Oppladning med for høy spenning kan føre til *thermal runaway* (se kap. 7.3.5 om brannfare). Derfor er det viktig med styringssystemer som kan regulere kjøling og strøm [29].

Utladning av batteri Hvordan et batteri utlades er også av interesse. Utladningsprofilene vil variere med hensyn på kjemisk sammensetning og celledesign [29].



Figur 5.1: Ulike utladningskurver for batteri. Hentet fra Beard *et al.* [29].

Utladningskarakteristikk vises i figur 5.1. Kurve 1 viser ideell utladningsprofil, altså flat utlading (*flat discharge*). Her forekommer det termodynamisk effektive kjemiske reaksjoner med nær fullstendig utnyttelse av det aktive materialet. Kurve 2 og 3 viser mindre gunstige utladningsprofiler som forårsakes av ujevne reaksjonsmønstre og termodynamiske krefter i de(t) aktive materialet/materialene. Dette fører til blant annet økt indre motstand og økt temperatur i materialet [29].

C-rate C-raten defineres som forholdet mellom batteriets cellekapasitet C (Ah) og strøm I . Den er nyttig for å bestemme strømmen som trengs for at en gitt batterikapasitet skal utlades innen en viss tid t i timer [29]:

$$t = \frac{C}{I} \quad (5.6)$$

C-raten referer til hvor lang tid det tar å lade en ELE fra 0% til 100% SoC eller omvendt. Dette kan benyttes for å utregne hvor mye som opp- eller utlades i timer [44]:

$$t = \frac{1}{C_r} \quad (5.7)$$

Eksempelvis referer 1C til en full oppladning på én time, 0,5C indikerer to timer og 2C én halvtime. En høyere absoluttverdi av C-raten er derfor en positiv indikator på ladehastigheten [44].

Selvutlading Batteriets evne til å holde på ladningen eller *charge retention*, minsker tapet fra selvutlading. Selvutlading forekommer i batterier hvor ioner diffunderer igjennom separatoren, selv om enheten ikke er i bruk [45]. Selvutlading er sterkt temperaturavhengig, og selvutladningsraten øker eksponentielt med økt temperatur. Både ladetilstanden og temperatur er betydelige faktorer for selvutladningshastigheten. Lavere temperaturer og lavere ladningsmengde vil bidra til mye lavere sjans for selvutlading [29].

Minneeffekt Minneeffekt oppstår i et batteri når det tilpasser sine elektriske egenskaper til en bestemt driftssyklus som det har vært utsatt for over lengre tid. Kapasiteten vil da degraderes og reduseres. Batteriet kan dermed ikke lagre like mye energi som når det var nytt. SK-er har ikke dette problemet [29].

Superkondensator

Beregning av opp- og utladningstid Tiden som kreves for opp- og utlading med en konstant strøm er gitt ved

$$t = C \cdot \frac{V_0 - V_1}{I} \quad (5.8)$$

Hvor V_0 og V_1 representerer start- og sluttspenning etter tiden $t(s)$, C er kapasitansen og I er den konstant laststrømmen [27].

Utladningstiden med en konstant motstandsutlading er gitt ved

$$t = -C \cdot R \cdot \ln \frac{V_1}{V_0} \quad (5.9)$$

Hvor R den konstante lastmotstanden [27].

De ovennevnte ligningene tar ikke i betraktning det interne motstandsfall (ESM). Avhengig av bruksområdet, kan dette gi betraktelige tap, og den bør derfor tas hensyn til i visse tilfeller. Eksempelvis kan tapene knyttet til ESM legges til i ligning 5.8 [27]:

$$t = \frac{C \cdot (V_0 - V_1) - (I \cdot ESR)}{I} \quad (5.10)$$

Spenning i opp- og utladning Spenningsforskjellen over en kondensator er proporsjonal med den lagrede ladningsforskjellen gitt av ligning 5.11:

$$V = \frac{C}{Q} \quad (5.11)$$

Hvor Q er ladningen, V er spenning og C er kapasitansen. I motsetning til batterier, forblir ikke kondensatorspenningen konstant når SK-en utlades [62].

Selvutladning SK-er har også selvutladning som følge av lekkasjestrøm, og denne er vanligvis høyere hos SK-er enn batterier. Ettersom SK-en vanligvis lades opp av en hovedkilde (eksempelvis kraftverk) og utladning foregår i kun en kort periode (sekunder), blir det i disse tilfellene ikke brukt nok energi til at selvutladningen utgjør betydelige tap. I applikasjoner hvor SK-en skal lagre energien over lengre tid må lekkasjestrømmen som følge av selvutladning tas i betraktning [27].

RC Tidskonstanten, τ , blir ofte brukt for å gi en indikasjon på tidsresponsen til enheten og beregnes ved bruk av produktet av motstand (R) ganget med kapasitans (C) vist i ligning 5.12 [46]:

$$\tau = RC \quad (5.12)$$

For kondensatorer er balanseringen mellom energitetthet og tidskonstanten til enheten et viktig designhensyn. Raskere opp- og utladning korrelerer med lavere RC. Generelt sett kreves det en ofring av energitetthet for å oppnå en betydelig reduksjon i tidskonstanten. Det medfører dermed en økning i effektkapasitet [29].

5.1.3 Effektivitet

Effektivitet referer til andelen av energi som kan nyttiggjøres i ELE-en og som ikke går til tap. Tap i systemet forekommer ved konvertering av energi og ekstra last i systemet fra elektronikk og kjøling [43]. Eksempelvis kan enhetens driftstemperatur kreve at mer effekt må forsynes til kjølingssystemet. Høyere virkningsgrad i systemet medfører mindre energitap og dermed lavere driftskostnader, noe som forbedrer kostnadseffektiviteten til systemet.

Indre motstand / Ekvivalent seriemotstand Den indre motstanden i et batteri og den ekvivalente seriemotstanden (ESM) i en superkondensator er begge ekvivalente motstander som er koblet i serie med den ideelle spenningskilden som enheten kan modelleres som. Disse motstandene forårsaker tap av energi i form av varme. Høy indre motstand fører til større tap,

redusert spenning og begrenset maks oppladning. Derfor er de mest effektive ELE-ene de som har lavest mulig indre motstand.

5.1.4 Levetid og sykluslevetid

ELE-ens *levetid* referer til den totale tiden den kan benyttes, gjerne oppgitt i antall år, før den degraderes til den grad at den ikke møter bruksspesifikasjonene den skal oppfylle. *Sykluslevetid* til en ELE defineres på liknende måte, men måles i antall sykluser. Ordet *syklus* referer til en fullkommen opp- og utladning av en ELE slik at den kan gå tilbake til sin opprinnelige tilstand [29].

Batteri

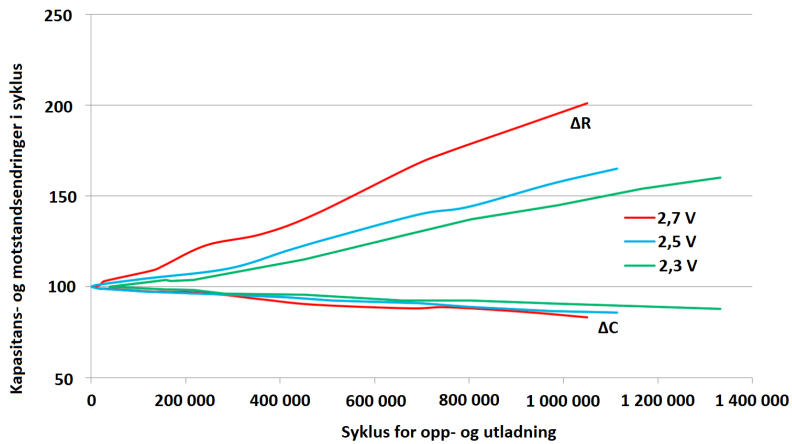
Batteriers levetid er avhengig av en rekke faktorer, deriblant opp- og utladningsmetode, DoD og miljøforhold som f.eks. temperatur. Materialene i batteriene gjennomgår kjemiske reaksjoner når de lades og utlades, hvor reaksjonene kan være ikke-reverserbare. Dersom batteriet lades og utlades ved høy DoD, vil sykluslevetiden og levetiden reduseres. Hyppig opp- og utladning kan minske sykluslevetiden til batteriet ytterligere [29]. For å forsikre at høyest mulig levetid må planlagt bruk av batteriet planlegges.

Mekanisk robusthet ved batteriseparatorer Den mekaniske styrken til batteriseparatorer er avgjørende for vellykket produksjon av batteriet, da høyhastighetsvikling, innpakning og stabling av elektroder er belastende for separatorer [29]. For å holde nede kostnaden og samtidig lage sikre og feilfrie battericeller med lang levetid er derfor dette en viktig egenskap som batterier kan ha.

Superkondensator

I motsetning til batteri har SK-er vanligvis mye høyere levetid enn batterier [27]. En vanlig definisjon på slutten av levetiden for SK-er som ofte listes opp i datablad, inkluderer 30% tap av kapasitans og at ESM fordobler seg [46]. I de fleste tilfeller anses SK-en som ubrukelig når den ikke lenger oppfyller kravene til anlegget. Levetid og sykluslevetid påvirkes hovedsaklig av driftstemperatur og spenning [27].

Driftsspenning har en påvirkning på SK-ens levetid. Dette vises i figur 5.2, [27]. I figuren vises det at motstanden øker og kapasiteten minsker etter gjentatte sykluser, og at endrings-hastigheten er avhengig av spenningsnivået.



Figur 5.2: Kapasitansreduksjon og motstandsøkning av SK ved sykling av ulike spenninger. Publisert av Skeleton [63].

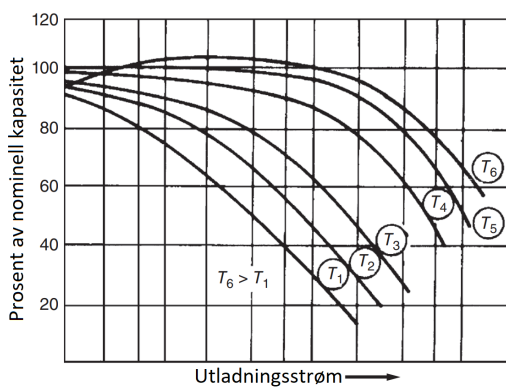
5.1.5 Temperatur

I ELS med batterier og SK-er spiller temperatur en rolle for enhetens ytelse og levetid. Høye temperaturer kan forårsake termisk overslag og forårsake feil og brann. Regulering av temperatur er derfor viktig del av ELS-et.

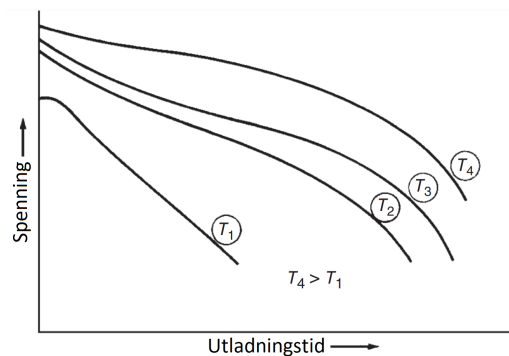
Over en viss temperaturgrense vil en økning på 10°C i temperatur halvere levetiden for både batterier [64] og SK-er [65].

Batteri

Temperatur har innvirkning på batteriets spesifikke energi og dets kapasitet over lengre tid, utgående spenning, utladningsrate og oppladningskarakteristikk [29]. I tillegg må driftstemperaturen til batteriet holdes innenfor databladets oppgitte temperaturområde for å unngå *thermal runaway* og andre feil [29].



(a) Påvirkning av temperatur på batterikapasitet.



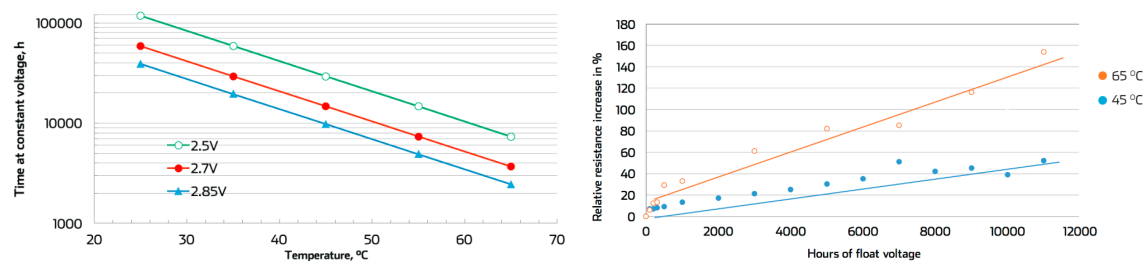
(b) Påvirkning av temperatur på batterispenning.

Figur 5.3: Påvirkning av temperatur på batteri. Hentet fra Beard *et al.* [29].

I figur 5.3 vises temperaturens innvirkning på batteriers spenningen og kapasiteten. Batteriene ble testet under forskjellige temperaturer fra kaldest T_1 til varmest T_6 hvor T_4 er normal romtemperatur. Figur 5.3b viser temperaturens innvirkning på spenningen til batteriet. Batteriene er testet ved konstant strøm. Det er færre kjemiske reaksjoner og økt intern motstand ved lavere temperaturer og dette reduserer spenningen. I figur 5.3a vises temperaturens innvirkning på batteriets kapasitet.

Batteriet ble testet ved ulike laststrømmer og tiden ble tatt fra 100% til 0% SoC for å fastslå kapasiteten. Lavere temperaturer gir lavest kapasitet. Begge testene viser at høyere temperaturer gir høyere spenning og kapasitet [29].

Superkondensator



(a) Levetid avhengig av temperatur og nominell spenning.

(b) Motstandsendringer i Superkondensator ved ulike temperaturer fra levetidstester.

Figur 5.4: Påvirkning av temperatur på SK-er. Publisert av Skeleton [63].

Levetid påvirkes av driftstemperatur, på samme måte som driftsspenning. Dette vises i figur 5.4a. I SK-er minsker levetiden med det dobbelte når temperaturen øker med ti grader celsius. Den indre motstanden (ESM) øker også med temperaturen, dermed øker og tapene som vist i figur 5.4b. Det anbefales å ikke overgå anbefalt driftsstrøm ved opp- og utladning av SK-en, da dette kan indusere selv-oppvarming og dermed øke driftstemperaturen kraftig. Dette vil ikke bare forkorte levetiden til SK-en, men kan også forårsake alvorlig skade. Tilstrekkelig kjøling bør derfor anvendes under applikasjoner med høy strøm og høy driftssyklus for å beskyttelse mot ekstrem varme. Som vil øke levetiden betraktelig [27].

5.2 Kostnad

Når det kommer til kostnadene for ELE-er og ELS, er det mange forskjellige faktorer som må tas hensyn til. Dette inkluderer selve investeringsprisen, vedlikeholdskostnad per kWh eller kostnad per syklus [29]. Kapittelet deles opp i generelle kostnader som kan påvirke kostnaden av ELE-er og informasjon om hvordan systemkostnaden kan beregnes når parametere fra kraftverket er kjent.

5.2.1 Faktorer som påvirker systemkostnaden

Faktorer som kan gi en pekepinn på generell kostnad for integrering av ELS til frekvensregulering er kostnad/kWh, kostnad/kW, kostnad/syklus, syklulevetiden, eventuell kompleksitet av styringssystemet og følger av farer for sikkerheten. Sykluslevetid og kostnad relatert til dette er mest relevant for frekvensregulering [29].

For andre bruksområder, som til lagring eller nødstrøm, hvor enheten ikke skal lades- og utlades ofte, kan det imidlertid være mer hensiktsmessig å vurdere batteriets levetid fremfor sykluslevetid, og dermed beregne kostnadene på et årlig basis [29].

Nåverdimetoden For å analysere kostnadene for systemets helhet, må alle inntekter og kostnader vurderes i løpet av systemets levetid. Her kan bruk av nåverdimetoden (NNV) benyttes for å anslå investeringens lønnsomhet. En NNV kan gi et anslag på om investeringen vil gi profitt eller tap etter endt levetid for systemet.

I en NNV vil alle fremtidige inntekter og kostnader diskonteres til verdien de ville hatt i året investeringen ble gjort [66]. Kostnadene knyttet til oppladning, vedlikehold og nødvendig tilleggsutstyr må tas i betraktning, dersom denne informasjonen kan opphentes. Det tas her i betraktning både tidsaspektet og investeringens risiko og det er viktig å påpeke at dette kun vil gi et anslag på lønnsomheten ved investeringen, og ikke en fasit. NNV er gitt ved 5.13:

$$NNV = -B_0 + \sum_{t=1}^N \frac{U_t}{(1+r)^t} \quad (5.13)$$

hvor B_0 er investeringskostnaden, U_t er pengestrømmen (inntekter - kostnader) i løpet av et år og r er kalkulasjonsrenten (investeringens avkastningskrav). NNV vil da vise om investeringen er lønnsom å foreta. Dersom NNV er positiv, vil investeringen være lønnsom; hvis den er negativ, vil investeringen resultere i tap [66].

5.3 Miljø og sikkerhet

Energilagringsteknologier bruker forskjellige råmaterialer med ulik miljøpåvirkning, deriblant farlig avfall, klimagasser og giftige gasser som akkumuleres igjennom enhetens bruk. Det kreves i tillegg energi fra utvinning av råmaterialer, transport, produksjon, håndtering og avhending og resirkulering [42].

ELE-er kan inneholde brennbare og giftige stoffer og derfor burde både sikkerhetstiltak og valg av ELE reflektere hensyn til denne faren. Batteripakker kan avgi gass, sprekke eller eksplodere dersom de benyttes på feil måte. Design av batteripakken bør inkludere beskyttelsesinnretninger og andre funksjoner som kan forhindre, eller minimere dette problemet [29].

For å vite i detalj hva slags miljøpåvirkning et produkt har, kan en rekke metoder benyttes. En av disse er livsløpsanalyse, som tar til sikte på å analysere de miljømessige konsekvensene fra et steg i prosessen til en annen, for eksempel fra utvinning til avfallshåndtering. Ulike påvirkningskategorier kan benyttes for å analysere ulike miljøkonsekvenser, som f. eks. ressurs- og energibruk.

Kapittel 6

Metode for sammenligning av energilagringseenheter

I dette kapittelet skal metoden gjøres rede for. Det skal fokuseres på hva som skal sammenlignes og vektlegges i analysen av de forskjellige ELE-ene, som diskuteres nærmere i resultatet i kap. 7.

En omfattende gjennomgang av litteraturen blir essensiell for å dekke temaer som kostnader, sikkerhet og miljømessige aspekter ved ELS-er. Disse temaene er komplekse, og det er utfordrende å fastslå den eksakte påvirkningen disse enhetene har på det totale systemet uten videre analyse av et bestemt system og dets spesifikke behov.

6.1 Vektlegging

Her følger forklaring av vektlegging av resultat for kriterier i analysen.

6.1.1 Teknisk analyse

Enheten må være laget for lang levetid, da den skal lades og utlades mye og ikke primært holde på energien lenge da kraftverket leverer effekt kontinuerlig. Effekttettheten må også være høy som følge av kravene i beskrevet i kap. 2.2.2 om FCR.

ELE-en burde ikke være nevneverdig dyrere eller mindre bærekraftig enn konkurrenten(e) med liknende egenskaper.

6.1.2 Kostnadsanalyse

Det er krevende å bestemme faktiske kostnader uten et bestemt system å modulere og deretter analysere, derfor må kostnadene for sammenligning basere seg på generelle kostnader for enhet med basis i kostnad per kWh og kostnad per kW oppgitt i litteraturen.

6.1.3 Miljø- og sikkerhetsaspekter

Miljøpåvirkning et produkt har ved utslipp av miljøgasser eller giftige stoffer og global oppvarming vil være svært kompleks å analysere med kun generell informasjon. Det ble derfor valgt å kun gjøre en lettere analyse av dette.

Miljø- og sikkerhetsmessige vurderinger baserer seg enten på materialene som produsenten oppgir eller eksterne kilder. Om det bemerkes negative miljø- eller sikkerhetsmessige problem ved batteritypen eller SK-en oppgis dette i kap. 7.3.3.

6.2 Utførelse av analyse

Utførelsen av analysen skal utføres i tre omganger. Først skal uegnede ELE-er utelukkes. Disse passer ikke formålet de er ment til, altså frekvensregulering. I andre omgang skal aktuelle batterityper og SK-typer velges i vurderes i forhold til hver sin egen kategori. Dette baserer seg på tekniske kriterier beskrevet i 5. Dermed skal enhetene sammenlignes med hverandre. Her skal det fokuseres på tekniske egenskaper for batteri og SK-er, samt forskjeller mellom kostnad, miljø og sikkerhet.

6.2.1 Uegnete energilagringssystemer

Det er ønskelig å kunne utelukke enheter som ikke har tilstrekkelige egenskaper før videre sammenligninger kan utføres. Først og fremst må følgende kriterier oppfylles:

- ELE-en må være konstruert for opp- og utladning.
- ELE-en må ikke befinne seg på ytterkantene av energi- og effekttetthet. Disse enhetene blir vurdert som lite hensiktsmessige å sammenligne videre som følge av kravene til FCR som beskrevet i kap. 2.2.2.

6.2.2 Aktuelle energilagringssystemer

Etter at kriteriene i 6.2.1 er oppfylt, skal det gjøres en analyse av ELE-enes tekniske spesifikasjoner. Separate sammenligninger av batterier og SK-er utføres i kap. 7.1 og 7.2.

Batteri

Mengden data som finnes om batterier tillater en enkel analyse for å begrense antall batterier for videre analyse. Batteriene velges utifra tabell fra Beard *et al.* vist i vedlegg C, hvor kommersielt tilgjengelige sekundærbatterityper er gitt en karakter fra 1 til 5, hvor 1 er best for:

- Energi- og effekttetthet
- Utladningsprofil
- Drift ved lave temperaturer
- *Charge retention* (grad av selvutladning) og *charge acceptance*
- Virkningsgrad
- Sykluslevetid

- Mekaniske egenskaper
- Kostnad

For å begrense utvalget av batterier som skal sammenlignes i analysen, summeres den totale karaktersummen fra alle disse kategoriene. I tillegg er det regnet sammen en separat karakter for effekt- og sykluslevetid, ettersom disse anses som spesielt viktige egenskaper.

Disse karakterene regnes dermed sammen, der den totale karaktersummen skal være mindre enn 25 og mindre enn 5 for effekttetthet og sykluslevetid. Sistnevnte er gjort for å utelukke flere alternativ for enklere analyse og for å få frem batterityper som har ønskede kvaliteter. Antallet batterier som skal analyseres begrenses dermed til fire stykker.

Superkondensator

Fagansvarlig for kap. 20 (*Electrochemical Capacitors*) i *Linden's Handbook of Batteries* av Beard *et al.* Andrew F. Burke (Univ. of California, Davis) målte og kalkulerte verdier for en rekke SK-er som er kommersielle tilgjengelige og lab- og prototyper. Burke brukte formlene i artikkelen [67] for å bestemme SK-enes kapasitans, motstand, energitetthet og effekttetthet. Burke gjorde deretter et utvalg av disse som vises i vedlegg D. Disse ble valgt med størst hensyn på høyest spesifikk effekt med formel 5.5. Det ble valgt ytterligere SK-er som ble testet av Burke som vises i vedlegg E.

Tabell 7.2 i analysen baserer seg på et utvalg av vedlegg E og D. Det ble valgt å fjerne alle ikke kommersielt tilgjengelige SK-er fra vedlegg D. I tillegg har det blitt lagt til en versjon til av en LIK med høy kapasitans produsert av JSR Micro (Ultimo 2300F ULR Prismatic). Skeleton Technologies' "karbidavledet karbon med grafen" ble erstattet med to nye modeller fra SkelCap-serien (SCA3200 og SCX5000) fra vedlegg E, ettersom førstnevnte er en eldre versjon av disse. Hafslund Eco Vannkraft uttrykte sitt ønske om å vurdere bruken av BHK-en "superbatteri" av Skeleton Technologies og derfor er verdier for denne enheten også lagt til i tabellen.

Disse cellene vurderes videre for analyse ettersom de representerer relativt nylig testede enheter (2018 og 2022). I tillegg er alle testet eksternt, bortsett fra superbatteriet av Skeleton, som øker dataens troverdighet.

6.2.3 Sammenligning av energilagringssystemer

Til slutt må det gjøres fornuftige vurderinger i forhold til dimensjoneringskriteriene beskrevet i kap. 5.1, samt kostnad-, miljø og sikkerhetsaspektene i kap. 5.2 og 5.3.

Begrensning for sammenligning

Tekniske data som er funnet for å utføre separate analyser av batterityper og SK-er seg imellom benyttes hovedsaklig ikke for å sammenligne forskjellene mellom batteri og SK-er. Dette er fordi det ofte benyttes ulike metoder og kalkulasjoner i de ulike publikasjonene. Å sammenligne tekniske data som effekt- eller energitetthet fra to ulike datasett vil derfor kunne gi upålitelig informasjon.

Eksempelvis benyttes ofte metoden *matched impedance* med formel 5.3 for å beregne spesifikk effekt, og i de fleste tilfeller vil SK-er gi en usannsynlig høy verdi i forhold til batterier (se kap. 5.1.1).

Tabellene 7.3 og 7.4 er produsert for å sammenligne forskjellene mellom batterityper og SK anses dermed som pålitelige.

6.3 Begrensninger

Begrensninger for analysen inkluderer mengden tilgjengelige data fra produsent grunnet konkurranseaspekter og mengden tilgjengelig informasjon fra kvalitetsikrede kilder. Noen system har vært mer i kommersielt i bruk enn andre, eksempelvis Li-ion-batterier. Da følger det at disse har blitt testet mer enn andre typer komponenter og kan gjøre at informasjon og resultater fra tester blir mer pålitelige. Eksempelvis er kostnadene for SK-er basert på tall fra 2018, noe som ikke er ideelt med tanke på hvor raskt bransjen utvikler seg.

I tillegg er det viktig å poengtere at komplekse system kan kreve mer avansert sammenligning enn den som gjøres i mulighetsanalysen her. Dette gjelder kriterier som omhandler kostnad- sikkerhet og miljøaspekter.

Anslagene for tekniske spesifikasjoner og kostnader mellom ulike ELE-er varierer. Dette gjelder spesielt for batterier, da mer informasjon finnes om dette emnet enn SK-er. I tillegg er det ikke gitt at cellene er testet likt ettersom ikke alltid er oppgitt. Derfor må resultat fra samme publikasjon og år ofte vurderes sammen.

Kapittel 7

Analyse

I dette kapittelet vil en analyse av ulike ELE-er gjennomføres. Først vil de tekniske egenskapene til batterier og SK-er sammenlignes hver for seg. Videre skal de tekniske egenskapene mellom batterier og SK-er sammenlignes. Deretter vil kostnadsfaktorer for de ulike ELE-ene bli vurdert. Til slutt fortelles det om sikkerhetsaspekter og miljøpåvirkning ved ELE-ene.

7.1 Sammenligning av batteri

For å begrense utvalget av forskjellige batterier, er det nødvendig å gjøre en analyse av ulike aktuelle batterityper i henhold til metodekapittel 6.2.1. Aktuelle batterityper som teoretisk sett kan brukes til frekvensregulerende formål inkluderer de fleste sekundærbatterier.

En sammenligning gjort av Beard *et al.* brukes til å velge ut batterier for videre analyse som vist i vedlegg C og forklart i metoden i kap. 6.2.2.

Batteriene som skal sammenlignes i analysen, må ha en total karaktersum mindre enn 25 og mindre enn 5 for effekt- og sykluslevetid. Antallet batterier begrenses til fire.

De fire batteriene som bestod kriteriene (lavest poengsum) i vedlegg C, inkluderer:

- Litium-ion (Li-ion)
- Ventilert nikkel-kadmium (Ni-Cd *sintered*)
- Forseglet nikkel-kadmium (Ni-Cd *sealed*)
- Nikkel-metall-hydrid (Ni-MH)

Tabell 7.1 viser at Li-ion-batterier har høy energi- og effekttetthet, lang levetid og lav selvutladning. De har en hellende utladningsprofil. Ventilert Ni-Cd-batterier har en flat utladningsprofil, bredt driftstemperaturområde, god levetid, men lav energitetthet. Ni-Cd-batterityper har generelt lavere effekt- og energitetthet. Ni-Cd-batterier har høyest selvutladning. Ni-MH-batterier har en flat utladningsprofil og høyere energitetthet enn Ni-Cd, men yter dårligere ved lave temperaturer. De har derimot litt lavere selvutladningsrate enn Ni-Cd-typerne.

Tabell 7.1: Sammenligning av batteritypene [29].

Type	Nikkel-kadmium	Nikkel-kadmium	Nikkel-metall-hybrid	Li-ion-batteri
	Vented sintered plate	Sealed		LCO
Kjemisk sammensetning				
Anode	Cd	Cd	MH	C
Katode	NiOOH	NiOOH	NiOOH	LiCoO ₂
Elektrolytt	KOH (vannbasert)	KOH (vannbasert)	KOH (vannbasert)	Organisk løsemiddel
Cellespenning (typisk) (V)				
<i>Nominell</i>	1,2	1,2	1,2	4
<i>Open circuit</i>	1,29	1,29	1,4	4,1
<i>Operating</i>	1,25 - 1,0	1,25 - 1,0	1,25 - 1,10	3,7
<i>End</i>	1,0	1,0	1,0	3,0
Driftstemperatur, C	-40 til 50	-20 til 70	-20 til 65	-20 til 50
Spesifikk energi (ved 20°) (Wh/kg)	30-37	35	90 - 110	203
Energitetthet (ved 20°) (Wh/L)	58-96	100	430	570
Utladningsprofil (relativ)	Veldig flat	Veldig flat	Flat	Hellende
Effektetthet	Høy	Moderat til høy	Høy	Høy
Selvtladningsrate (ved 20°)				
% tap per mnd.	10	15-20	15 - 30	2
Kalenderliv, år	3 - 10	5 - 7	5 - 10	N/A
Sykluslevetid, antall sykluser	500 - 2000	300 - 1000	500 - 1000	1000 +

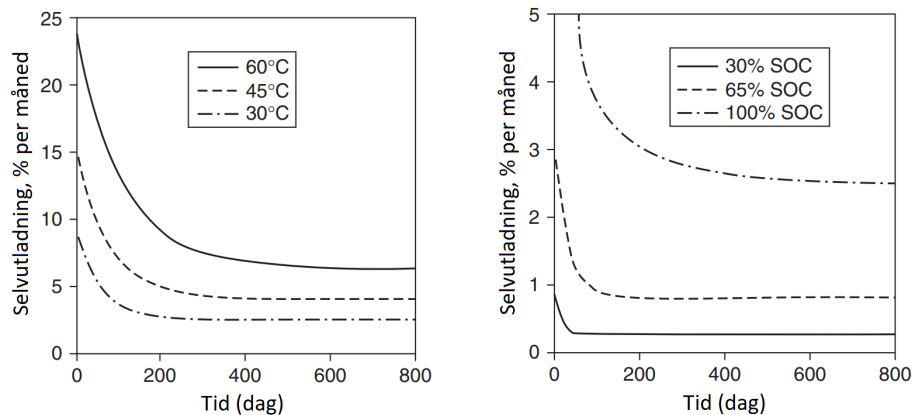
7.1.1 Li-ion-batteri

Li-ion-batteriet som vises i tabell 7.1 er et LCO batteri. LCO har høy spesifikk energi på 203 Wh/kg, en energitetthet på 570 Wh/L, ifølge tabell 7.1, og en spesifikk effekt fra 600 til 3000 ifølge Beard *et. al* [29]. Selv om LCO er en Li-ion-type som er konstruert for høy energitetthet (se vedlegg F), så har den fortsatt høy spesifikk effekt. Li-ion-systemene overgår både Ni-Cd-typene og Ni-MH med deres høye spesifikke energi og energitetthet. Li-ion-batteritypen kan ha en sykluslevetid på over 1000 sykluser ifølge tabell 7.1 og opptil 4000+ sykluser ved 100% DoD som sees på vedlegg F. Li-ion-typer opererer innenfor et bredt temperaturområde; de lades ved 0 til 50°C avhengig av type ifølge vedlegg G og har en driftstemperatur på ca. -20 til 50°C. Enkeltcellespenningen er litt høyere enn Ni-Cd- og Ni-MH-batterier, hvor den typiske nominelle spenningen er rundt 4 V. Dette betyr at færre celler er nødvendig for å oppnå en gitt systemspenning [29].

Li-ion-batterier har en lavere selvtladningsrate sammenlignet med andre batterityper, typisk mellom 1% og 4% per måned [29]. Dette er avgjørende for applikasjoner hvor batteriene kan stå ubrukte, men klare til bruk. I figur 7.1 vises selvtladning per mnd. for et NMC-type Li-ion-batteri. Figuren til venstre viser selvtladning etter oppladning til 100% SoC ved forskjellige temperaturer på 30°C, 45°C og 65°C. Figuren til høyre viser selvtladning ved en opplading til 30%, 65% og 100% SoC ved 30°C.

Li-ion-batterier tilbyr en rekke fordeler som forseglet vedlikeholdsfri konstruksjon, lang holdbarhet, høy energieffektivitet og fleksibilitet i design med sylindriske, prismatiske og polymerceller. De har ingen minneeffekt, noe som er en fordel sammenlignet med noen eldre batterityper [29].

De største ulempene med Li-ion-batterier inkluderer degradering under høye temperatu-



Figur 7.1: Selvutladning av Li-ion (NMC) ved forskjellige temperaturer og SoC. Graf hentet fra Beard *et al.* [29].

rer og et behov for beskyttelseskretser for å unngå overlading og termisk gjennomslag ved *thermal runaway* [29]. Li-ion-batteri har ingen mulighet for overlading, som vist i vedlegg G. Li-ion-batteriene har en hellende utladningsprofil som sett i tabell 7.1.

Forskjellige typer Li-ion-batterier

Ulike typer Li-ion-batterier gjennomgås i dette kapittelet. Li-ion-typene som sammenlignes er hentet fra Beard *et al.* [29]. Forkortelsene som brukes samsvarer med tabell 4.1. Vedlegg F benyttes for sammenligning av Li-ion-batterityper. Noen typer oppgis med samme tall i vedlegget. Li-ion-typene som er laget med *energy cells* i vedlegg F er laget kun for høy energitetthet og inkluderes ikke her.

NMC og LMO (power cells) LMO og NMC har en sykluslevetid opptil 500+ ved 100% DoD ifølge vedlegg F. LMO har høy termisk stabilitet, altså mindre sjanse for *thermal runaway* [43]. NMC har et veldig fleksibelt design som gjør at den kan lages som høyeffekt- eller høyenergiceller. Den har den høyeste (puls) spesifikke effekten sammen med LFP (~4000 ifølge vedlegg F). NMC og LMO er oppgitt med det høyeste spenningsområdet (2,5 - 4,2 V) av alle typene presentert her. LMO og NMC har lavere energitetthet enn LTO og LFP. LMO-typen er imidlertid koboltfri, noe som er positivt miljømessig.

LFP (power cell) Ifølge Beard *et al.* [29] er LFP-typen kjent for sin høye termiske stabilitet, altså lav sjanse for *thermal runaway*. Den krever også mindre sikkerhetskretser sammenlignet med andre Li-ion-batterier på markedet [29]. Til tross for sin lavere energitetthet, foretrekkes LFP-batterier for storskala stasjonær energilagring på grunn dets sikkerhet og holdbarhet ifølge Passerini *et al.* [68]. Denne har også den høyeste effekttettheten sammen med LMO (type *power cell*) ifølge vedlegg F. Batteriet har høy (puls) spesifikk effekt (~4000) og høy sykluslevetid (~1000+). Batteriet er oppgitt med høy C-rate, som kan komme opp i 125C. Dette betyr den kan ha rask opp- og utladning.

LTO Katoden til et LTO-batteri kan bestå av både NMC og LMO [43]. I vedlegg F benyttes LMO. Den er oppgitt med høy sykluslevetid, men relativt lav (puls) spesifikk effekt i forhold til andre høy-effektcelletyper (power cells) og har nesten lik energitetthet som typene LCO, NMC og NCA (*energy cells*). Batteritypen oppgis som generelt sikker og med god utladningskarakteristikk ved lav temperatur [43]. Det er også den eneste Li-ion-typen i vedlegg F som kan lades opp ved minusgrader. Den gjennomsnittlige cellespenningen er lavest i forhold til de andre Li-ion-batteriene (2,3 V).

7.1.2 Ventilert nikkel-kadmium

Ventilert Ni-Cd tilbyr en veldig flat utladningsprofil i forhold til Ni-MH- og Li-ion-batterier, ifølge tabell 7.1 noe som gir batteriet mer forutsigbar ytelse og mindre variasjon i spenningsområde. Ventilert Ni-Cd har den laveste energitettheten i forhold til de andre batteriene i tabell 7.1. Sykluslevetid er 500 til 2000 sykluser, som er litt mer enn forseglet Ni-Cd. Batteriet har et bredt driftstemperaturområde fra -40 til 50°C. I tillegg har den bra ytelse ved overlading og oppladningstemperaturområde på -55 til 75°C som vises i vedlegg G. Mulighet for overlading er på middels og kan være utslagsgivende for sikkerhetskretsen. Batteriet har også god langtidslagringsevne og god kapasitetsretensjon som kan gjenopprettes ved opplading. Nikkelbaserte batterier kan også tilby robuste sykluslevetid, men kortere levetid. Som beskrevet i kap. 5.2, er det viktigere med lang sykluslevetid enn levetid for frekvensreguleringsformål. Ulempene inkluderer en høyere kostnad sammenlignet med de andre ELE-er som vises i tabell 7.8, bekymring ved bruk av kadmium og minneeffekt som kan kreve spesifikke ladesystemer for å forbedre batteriets levetid. *Thermal runaway* er oppgitt som et problem med batterier med nikkelkatoder. Høy konstant spenning ved oppladning kan føre til *thermal runaway*, men hvis strømbegrensninger og kjøling brukes, kan problemet unngås. Ni-Cd har høy selvutladningsrate som kan kreve hyppig vedlikeholdslading [29].

Ifølge Burheim [44] benyttes Ni-Cd-batterier veldig lite i dag som følge av at batterier med høyere energitettheter utvikles til en lavere pris. I tillegg er kadmium dårlig for miljøet, ettersom det er et tungmetall.

7.1.3 Forseglet nikkel-kadmium

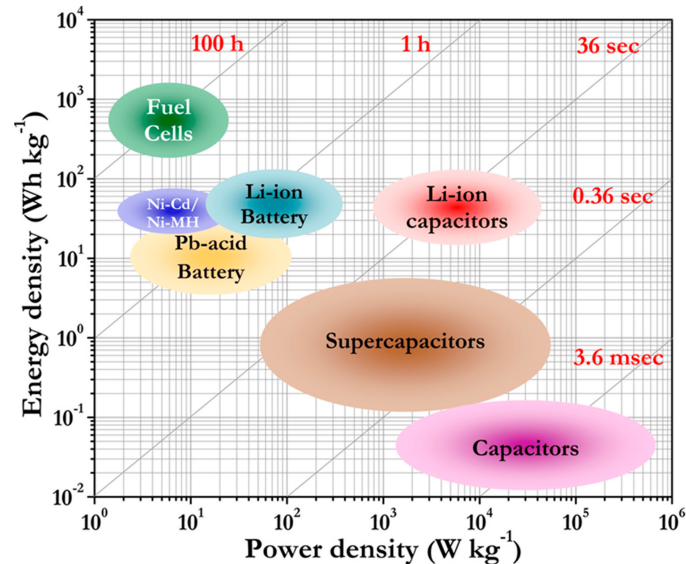
Forseglet Ni-Cd er kjent for sitt vedlikeholdsfrie design. Disse batteriene kan hurtiglades på mindre enn 30 minutter under kontrollerte forhold, og har en høy utladningsrate takket være lav intern motstand og konstant utladningsspenning. Batteriet har i tillegg lang holdbarhet ved hvilken som helst ladetilstand. De opererer effektivt over et bredt temperaturområde. Batteritypen har en oppladningstemperatur fra 0 til 40°C i likhet med Ni-MH som vises i tabell i vedlegg G og driftstemperatur fra -20 til 70°C. Noen av ulempene inkluderer minneeffekt under visse applikasjoner, lavere energitetthet enn andre konkurrerende batterier og miljøbekymringer knyttet til bruk av kadmium. Som nevnt i kap. 7.1.2 er det fare for *thermal runaway* for batteri med nikkelkatode. Ni-Cd har høy selvutladningsrate som kan kreve hyppig vedlikeholdslading [29].

7.1.4 Nikkel-metall-hydrid

Ni-MH sikrer sikker drift ved høy spenning opp til 750+ V og er utmerket for bruk i serie- og parallellkjeder. De har fleksible celle størrelser fra 0,06 til 260 Ah. Ni-MH batteriene har høyere energitetthet sammenlignet med Ni-Cd-batteriene som vist i tabell 7.1. De har også høyere energitetthet enn Ni-Cd, på lik linje som Li-ion-batterier som vist i tabell 7.1. Batteriet har middels overladningsmulighet som vist i tabell i vedlegg G ved forhøyede temperaturer og god ladningsretensjon i følge Beard *et al.* [29]. Den har videre god levetid ved dyp utlading, rask oppladningsevne og et vedlikeholdsfritt design. Den er i tillegg oppgitt som sikker, resirkulerbar og vedlikeholdsfri. Ulempene inkluderer blant annet at den må lades ved moderate temperaturer for å unngå minneeffekt, redusert ytelse ved lav temperatur og den begrensede kommersielle tilgjengeligheten ved kjøp av store batterier. Som nevnt i kap. 7.1.2 er det fare for *thermal runaway* for batteri med nikkelkatode, men fra vedlegg G oppgis det at Ni-MH har mindre sjanse for overlading enn Li-ion. Ni-MH har høy selvutladningsrate som kan kreve hyppig vedlikeholdslading [29].

7.2 Sammenligning av superkondensator

Den konvensjonelle platekondensatoren har for lite spesifikk energi for bruk i frekvensregulering og vil ikke vurderes videre [46]. SK-er har mye større spesifikk energi. Dette illustreres i ragone-diagrammet i figur 7.2, som viser et utvalg av SK-er, kondensatorer og konvensjonelle batterier.



Figur 7.2: Ragone-plot av ulike elektriske energilagringssystemer. Hentet fra Arumugam *et al.* [69].

Tabell 7.2 er basert på vedlegg D og E, bortsett fra superbatteriet fra Skeleton Technologies. Utregningene er basert på formler diskutert i kap. 6.2.2. Informasjonen rundt superbatteriet

som vises i tabell 7.2 er delvis hemmelighetsstemplet som forklart i kap. 4.2.5.

Tabell 7.2: Utvalgte superkondensatorer.

Navn	SCA3200	SCX5000	BCAP3400	Aktivert karbon	LIK Ultimo	LIK Ultimo	LIK Ultimo	Superbatteri
Utvikler	Skeleton Technologies	Skeleton Technologies	Ness/Maxwell	Skeleton Technologies	JSR Micro	JSR Micro	JSR Micro	Skeleton Technologies
Gruppe	EDLK	EDLK	EDLK	EDLK	BHK	BHK	BHK	BHK
Nominell spenning (V)	3,0	3,0	3,0	2,85	3,8	3,8	3,8	3,0 [*]
Kapasitans (C)	3320	5000	3650	3450	1100	1366	2300	N/A
RC (s)	0,83	1,25	0,98	0,26	1,26	1,6	1,77	N/A
R [†] (mΩ)	0,25	0,25	0,27	0,08	1,15	1,17	0,77	N/A
Wh/kg	5,6	8,4	6,5	5,4	10	7,6	7,6	65 [*]
W/kg 95% [‡]	1878	1783	1875	5891	2450	1366	1366	N/A
Sykluslevetid	1 mill. [*]	1 mill. [*]	1 mill. [*]	1 mill. [*]	>100k [*]	>100k [*]	>100k [*]	50k [*]
Driftstemperatur (°C)	-40 til +65 [*]	-40 til +65 [*]	-40 til +65 [*]	N/A	-30 til +70 [*]	N/A	-30 til +70 [*]	-30 til +50 [*]
Vekt (kg)	0,54	0,568	0,50	N/A	0,144	N/A	0,387	< 0,810 [*]
Kilde	[52], [70], vedl. E	[52], [70], vedl. E	[29], [54], vedl. D	[29], [52], vedl. D	[29], [71], vedl. D	[29], [71], vedl. D	[71], [72], [73], vedl. E	[51], [74]

^{*} Produsentens egen data

[†] Indre motstand (R) representerer stasjonærverdien. (*steady state*) og er tilsvarende ESM [29].

[‡] Effekttetthet regnet med: $P = 9/16 \times (1 - \text{EFF}) \times V^2/R$, EFF = 0.95.

De tekniske spesifikasjonene i kapittelet under referer til data i tabell 7.2. Generelt har EDLK høyere sykluslevetid (ca 1 mill.), høyere effekttetthet og lavere indre motstand (tap) enn BHK. LIK har gjennomsnittlig høyere indre motstand enn EDLK, som vises i tabell 7.2. Fordelen med BHK er generelt høy energitetthet og høy celledensitet som hovedsaklig følger av elektrolyttvalget [46]. Her skiller Skeletons kurvede grafen seg ut med en høyere energitetthet enn to av BHK. Skeletons superbatteri har en svært høy energitetthet i forhold til de andre SK-ene i tabellen.

Som vist i tabell 4.2 benytter alle produsenter organiske elektrolytter for lavere frysepunkt og bredere temperatur- og spenningsområde [46].

7.2.1 Skeleton - SCA3200



Figur 7.3: Fra venstre: SCA3200, SCX5000 og superbatteriet produsert av Skeleton. Hentet fra Skeleton [75].

SCA3200 er en type EDLK laget av Skeleton i SkelCap-serien bestående av elektrodematerialet kurvet grafen. Kurvet grafen er et spesielt karbonbasert materiale som benytter to eller flere karbidavlede karbon-typer i produksjonsmetoden [49].

Den har en høy responstid (RC) på 0,83 s og en svært høy sykluslevetid på over 1 mill. sykluser som oppgitt av produsent i tabell 7.2. Energitettheten er nest minst av SK-ene. Den

spesifikke effekten er litt lavere enn for EDLK-type aktivert karbon (Skeleton) og LIK-type Ultimo.

7.2.2 Skeleton - SCX5000

SCX5000 er en type EDLK produsert av Skeleton i SkelCap-serien. Begge elektrodene er laget med Skeletons kurvet grafen og det brukes organisk løsemiddel med salter som elektrolytt. Den har en høy responstid (RC) på 1,25 s, størst kapasitans av alle kandidatene og en svært høy sykluslevetid på over 1 mill. sykluser som oppgitt av produsent i tabell 7.2. Den spesifikke energien er bedre enn to av LIK-ene produsert av JSR Micro. Dette er bra mtp. at det er en EDLK. Den spesifikke effekten er litt lavere enn for de andre produktene som vises i tabell 7.2.

7.2.3 Nes/Maxwell - BCAP3400

BCAP3400 er produsert av Ness/Maxwell og laget av aktivert karbon på begge elektroder. Aktivert karbon er et material som har en fordel med relativt høyt overflateareal og har dermed høy kapasitans som vist i vedlegg B. EDLK med aktivert karbon har bevist gjennom lengre tid at kombinasjonen med dette stoffet gjør at EDLK-en klarer å oppnå en sykluslevetid på over 1 mill. sykluser [48], [46]. Dette er til forskjell fra Skeletons kurvede grafen som er et relativt nytt stoff ifølge Skeletons patentblad [49]. Det foreligger ingen undersøkelse fra en tredjepart som viser at den klarer 1 mill. sykluser. Likevel er EDLK-er kjent for å klare mange sykluser i løpet av sin sykluslevetid, så det er ikke utenkelig [46].

7.2.4 Skeleton - Aktivert karbon

Denne EDLK-en har samme elektrodeoppbygning som EDLK-en fra Maxwell/Ness. EDLK-en har lavest tidskonstand (RC), altså raskest opp- og utladningstid, av alle som er oppført i tabell 7.2 og lavest indre motstandsverdi av alle i tabellen. Andre faktorer som er verdt å bemerke er lav energitetthet og meget høy effektthet; den høyeste av alle i tabell 7.2. Som alle andre EDLK-er i tabell 7.2 så har også denne oppgitt 1 mill. sykluser som sykluslevetid.

7.2.5 JSR Micro - LIK Ultimo



Figur 7.4: LIK Ultimo produsert av JSR Micro. Hentet fra JSR Mikro [73].

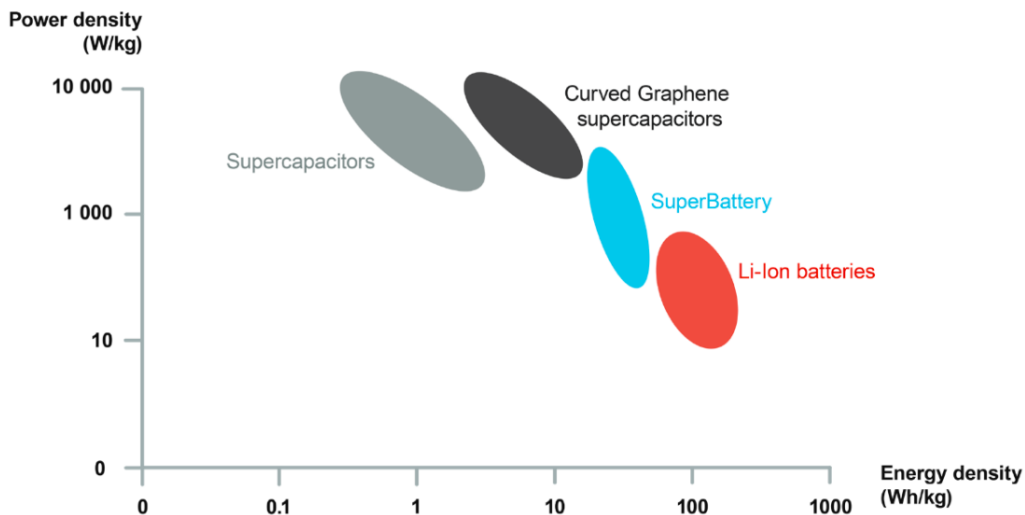
JSR Micro produserer en type LIK som er av typen dobbelt karbon-Li-ion kondensator, som består av elektrodematerialet *Pre-lithiated* grafitt og aktivert karbon. Noen av disse BHK har vist seg å ha en sykluslevetid på opp til 300 000 sykluser ved relativt høye hastigheter ved ($\sim 10^\circ\text{C}$) [46]. Tre av disse typene er oppgitt i tabell 7.2. Elektrolyttene i LIK-ene fra JSR Micro i tabell 7.2 består av et Li-ion salt og en batterielektrolytttype (organisk løsning) [55]. Det oppgis av Béguin og Frackowiak [46] at LIK har begrenset ladehastighet, spesielt ved veldig lave temperaturer.

De største forskjellene mellom disse tre LIK-ene fra JSR Micro er kapasitansen mellom dem. Ultimo (1100F) og Ultimo (1366F) har høyere indre motstand samtidig som LIK (2300F) har både mindre indre motstand og høyere kapasitanse. Derfor har sistnevnte minst interne tap. LIK (1366F) og LIK (2300) har oppgitt lik spesifikk effekt- og energi, mens LIK (1100) har høyest spesifikk effekt- og energi.

Cellespenningen for disse tre SK-ene er lik 3,8 V, den høyeste blant alle enhetene i tabell 7.2. Dette høyere spenningsnivået gir et større toleranseområde for styringssystemet. Dataene for LIK (1100F) og LIK (2300F) samsvarer med datablad fra JSR Micro ved navn "Ultimo 1100F ULR Laminated" og "Ultimo 2300F ULR Prismatic" [73].

7.2.6 Skeleton - Superbatteri

Superbatteri er en BHK. Superbatteriets elektrolytt er mest sannsynlig noe som likner på en konvensjonell LIK, ettersom Skeleton oppgir at de benytter noe liknende en Li-ion-batterielektrolytt [51]. Det er en kjemisk sammensetning som er laget for å virke sammen med kurvet grafen som begge elektrodene er laget av som forklart i kap. 4.2.5. Hva superbatteriet faktisk er laget av, er hemmelighetsstemplet av Skeleton [51]. Alle opplysningene som oppgis i tabell 7.2 er fra produsent og kan derfor antas som mindre troverdige enn resterende opplysninger fra eksterne tester.



Figur 7.5: Ragone-diagram for SK-er. Fra venstre: SK, kurvet grafen EDLK, superbatteri og Li-ion batterier. Hentet fra Skeleton [76].

Superbatteriet har høyest energitetthet av alle SK-ene oppgitt i tabell 7.2 som vist i figur 7.5.

Skeleton oppgir at sykluslevetid er rundt 50 000 sykluser. I forhold til andre BHK, er dette 50 000 mindre enn det som er normen i tabell 7.2. For å være en BHK har den en lav celledensitet.

7.3 Sammenligning av de utvalgte energilagringseenhetene

Alle batterier og SK-er skal her analyseres i forhold til hverandre. Analysen dekker tekniske egenskaper, kostnader og miljø og sikkerhetsaspekter ELE-ene. Målet er å få innsikt i hvilke bruksområder hver enhet er mest egnet for.

7.3.1 Teknisk sammenligning

I dette kapittelet skal tekniske sammenligninger utføres mellom batteri og SK-er. Batteritypen som oppgis her er blysyre, Ni-Cd og Ni-MH og EDLK for SK. Ulike Li-ion-batterier (LFP, LTO og NMC) og to SK-er av generisk type (EDLK og LIK) sammenlignes også. Relevant data for sammenligning vises i tabell 7.3 og 7.4.

Tabell 7.3: Sammenligning av EDLK og batteri hentet fra Beard *et al.* [46].

Egenskaper		EDLK	Batteri Ni-MH, Ni-Cd, blysyre
Spesifikk energi	(Wh/kg)	1-10	~20 - 150
Spesifikk effekt	(W/kg)	500-10000	<1000
Utladningstid	(t_d)	Sek. til min.	0,3 - 3 h
Oppladningstid	(t_c)	Sek. til min.	1 - 5 h
Effektivitet	(t_d/t_c)	0,85 - 0,99	0,7 - 0,85
Sykluslevetid	(sykluser)	$> 10^6$	1500
Levetid	(år)	> 10	~ 3
V_{max}^*	(V)	< 3	Lav
Utladningsprofil		Lineær trend (V/t)	Flat
Selvutladning		Moderat	Lav

* Maks celledensitet

Tabell 7.4: Sammenligninger spesifikk energi- og effekt mellom ulike batterier og superkondensatorer [29].

Enhetsteknologi	Nominell cellespenning	Spesifikk energi (Wh/kg)	90% Spesifikk effekt (kW/kg)
EDLK	2,7	5	2,5-10
LIK	3,8	12	2,5-5
Litium-ion batterier			
LFP	3,25	90-150	0,7-1,4
LTO	2,4	35-100	0,7-2,5
NMC	3,7	100-200	0,5-2,0

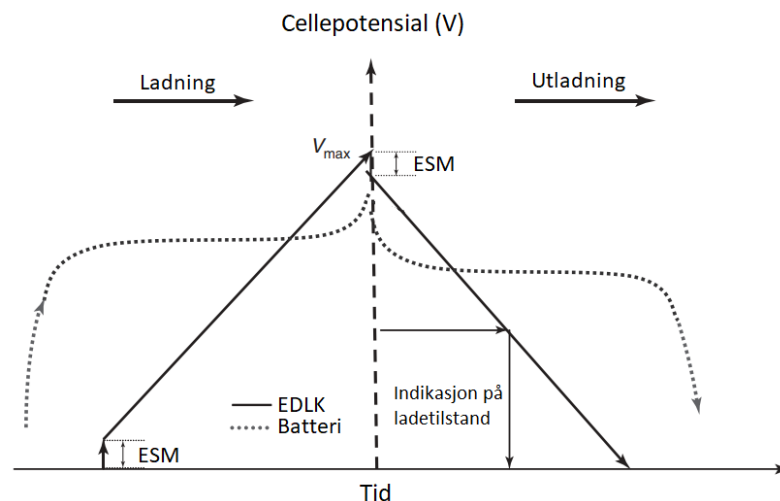
Energi og effekt

I tabell 7.3 vises det at batteri (Ni-Cd osv.) har mye større spesifikk energi enn EDLK. Dette gjelder også typiske Li-ion-batterier i tabell 7.4. LTO er i stand til å nå en tilsvarende spesifikk effekt som LIK og EDLK. På samme måte utkonkurrerer EDLK og BHK batteritypene i både tabell 7.3 og 7.4. Trenden vises også i ragone-diagrammet i figur 7.2.

Opp- og utladningskarakteristikk

SK-er tilbyr enestående opp- og utladningshastigheter sammenlignet med batterier, som kan være passende ettersom ELE-en skal forsynes med effekt kontinuerlig. SK-ene lades opp- og ned på sekunder til minutter, mens batterier (Ni-MH/Ni-Cd/blysyre) lades ned på 0,3 til 3 timer og opp på 1 til 5 timer ifølge tabell 7.3.

LFP er oppgitt som batteriet (i analysen) med høyest mulig C-rate på 10 til 125C ifølge vedlegg F, altså en opp- eller utladning på 6 min til 28,8 s ved bruk av formel 5.7.

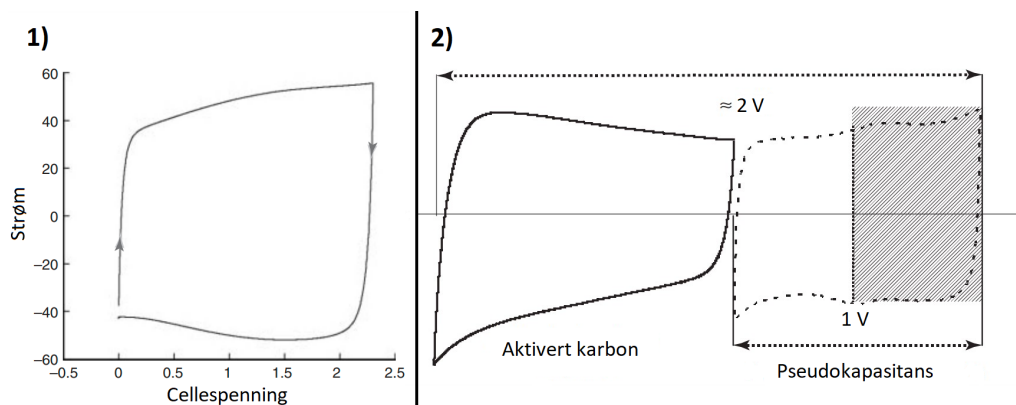


Figur 7.6: Sammenligning av laddings- og utladningsoppførsel for en ideell EDLK og et batteri. Graf hentet fra Beguin og Frackowiak [46].

Utladningsprofilen som er illustrert i figur 7.6 viser karakteristikken for en ideell EDLK og

konvensjonelt batteri. Utladningsprofilen for EDLK-er er lineær og for batteri flat ved opp- og utladning. Dette vil si at spenningsområdet for battericellen vil være mindre, mens den for SK-er vil være større. Ni-MH og Ni-Cd har flate utladningsprofiler, men svært lav sellespenning i forhold til Li-ion-batterier ifølge vedlegg F.

Spenning over SK-celler kan finnes med å bruke formel 5.11. LIK (BHK) opplever en krapp reduksjon av spenningsnivået (ved utladning) og en tilsvarende reduksjon av energitetthet. Dette fører til en skrånende utladningsprofil. HK-er er mer ustabile en EDLK-er som vist i voltammogrammet i figur 7.7, hvor EDLK-er har en mer stabil utladningsprofil enn HK-er.



Figur 7.7: Økningen i sellespenningen illustreres med et voltammogram. Figur 1: Elektrodemåling, EDLK. Figur 2: Elektrodemåling, HK-type. Graf hentet fra Beguin og Frackowiak [46].

Effektivitet

EDLK har en effektivitet (t_d/t_c) på 0,85 - 0,99 ifølge tabell 7.3. Dette er mye mer effektivt enn batteriene (0,7 til 0,85) for Ni-Cd/blysyre/Ni-MH. Ifølge tabell 7.5 er effektiviteten til Li-ion langt over de andre batteriene og dermed kan Li-ion-batteriet antas å ha over 0,85 i effektivitet

Tabell 7.5: Effektivitet for batteri (fra vedlegg G).

Batteritype	Ah (%)	Wh (%)
Li-ion	99	95
Ni-Cd (forseglet)	65 - 70	55 - 65
Ni-Cd (ventilert)	70 - 80	60 - 70
Ni-MH	65 - 70	55 - 65

Selvtlading Batterier som Li-ion har en lav selvtladringsrate, fra 1-5% per mnd. ifølge vedlegg F som viser tre typer Li-ion batterier, noe som er en fordel når energien skal lagres over lengre tid. Spesielt forseglet Ni-Cd og Ni-MH har høy selvtlading i forhold til Li-ion ifølge tabell 7.1. Høy selvtladringsrate for SK-er et kjent problem [29]. Selvtlading for en typisk EDLK (ACN) og LIK (C/Grafit) vises i tabell 7.6. EDLK har høy selvtladringsrate ift. BHK. Som kan føre til at EDLK-er kanskje må lades oftere på grunn av energitap fra

selvutladning, som beskrevet i [27].

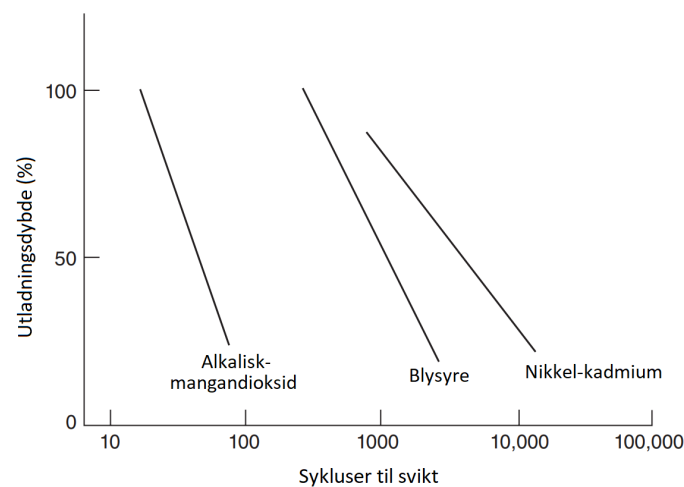
Tabell 7.6: Effektivitet og selvutladning for superkondensatorer [46].

SK-type	Effektivitet ved 10 s (%)	Selvutladning (%)
EDLK	> 98	< -20 etter 1 mnd.
LIK	> 90	-5 etter 3 mnd.*

* Kilde: [46], [55]

Levetid og sykluslevetid

En av de største fordelene med SK-er er deres lange sykluslevetid, med mange modeller som kan håndtere over en million ladesykluser ifølge produsentene. Dette er betydelig høyere sammenlignet med batterier, hvor selv de beste Li-ion-modellene vanligvis tilbyr et sykluslevetid på 500 opp til 4000+ sykluser ifølge vedlegg F. Batteriet som oppgis med lengst sykluslevetid i tabell 7.1, er Ni-Cd med opp til 2000 sykluser, men dette kan variere fra produsent til produsent. Enheten som skiller seg ut her er Skeletons superbatteri med 50 000 sykluser og LIK-en til JSR Micro med 100 000 sykluser. Ovennevnte tall er basert på 100% DoD. Mindre prosentandel av DoD eller dypsykluser, fører til lengre sykluslevetid for batterier som vist i figur 7.8. Her vises at Ni-Cd får mer enn 10 000 mer sykluser ved ca. 20% DoD enn fra 1000 sykluser ved 100% DoD.



Figur 7.8: Effekten av utladningsdybde på sykluslevetid til sekundærbatterisystemer. Graf hentet fra Beard *et al.* [29].

Temperatur

Hovedforskjellen mellom SK-er og batteri, er at SK-er har i de aller fleste tilfeller et bredere temperaturområde enn batteri. Lavere temperaturer forlenger typisk SK-ens levetid, og beskyttelse mot ekstrem varme øker sykluslevetid som forklart i 5.1.5. Likevel vil temperatur ha

en mindre innvirkning på SK-er generelt [29]. EDLK er den typen SK som har best temperaturegenskaper [46]. Ventilert Ni-Cd har et temperaturområde for oppladning på -55 til 75°C som vist i tabell i vedlegg G. Li-ion har derimot en oppladningstemperatur på 0 til 50°C og er dermed en av de dårligste sammen med Ni-Cd og Ni-MH 0 til 40°C. Ifølge Beard *et al.* [29] er kjøling av kondensatorer enklere enn batterier fordi kondensatorer har lavere indre motstand og høyere effektivitet og skaper derfor mindre varme.

Størrelsesforhold

Som nevnt i kap. 5.1.1 har SK-celler en pakkefaktor på 0,5 mot batteri på en faktor på 0,7. For vekt så har SK-celler en pakkefaktor på 0,4 mens batteri har en pakkefaktor på 0,6. Med andre ord tar batteri mindre plass og veier mindre. Batteriets bestemmes derimot vanligvis av systemets effektbehov, og ikke minimumskravet til systemets kapasitet. For SK-er er det motsatt og volum og vekt bestemmes vanligvis av minimumskravet til energilagring [29].

Forholdet mellom energi- og effekttetthet bestemmer størrelsen på ELS-et. Plassbehovet for SK-en vil bestemmes av kravet til spesifikk effekt, mens batteriets plassbehov vil bestemmes av større krav til energi. Dette vises for spesifikk effekt og energi i tabell 7.3 og 7.4.

7.3.2 Kostnad

Tabell 7.7 Sammenligner ulike typer ELE-er basert på kostnader, slik som kostnad per kW, kostnad per kWh, samt drifts- og vedlikeholdskostnader. De oppgitte dataene er hentet fra både akademisk forskning og industrielle bruksområder og anslagene spriker derfor en del. Tabellen brukes derimot bare for å illustrere generelle kostnadsforskjeller mellom ulike ELS.

Tabell 7.7: Sammenligning av kostnader i USD for ulike typer ELS av Dhegani-Sanji *et al.* [42].

Type ELS	USD/kW	USD/kWh	DV-kostnader*
Svinghjul	250 - 350	1000 - 14 000	~0,004 USD/kWh, ~20 USD/kW/år
Kondensator	200 - 400	500 - 1000	<0,05 USD/kWh, 13 USD/kW/år
Superkondensator	100 - 450	300 - 2000	0,005 USD/kWh, ~6 USD/kW/år
Batteri			
<i>Pb-A</i>	200 - 600	50 - 400	~50 USD/kW/år
<i>Li-ion</i>	1200 - 1590	600 - 3800	N/A
<i>Na-S</i>	350 - 3000	300 - 500	~80 USD/kW/år
<i>Ni-Cd</i>	500 - 1500	400 - 2400	~20 USD/kW/år
<i>Vanadium redoks</i>	600 - 1500	150 - 1000	~70 USD/kW/år
<i>Zn-Br</i>	200 - 2500	150 - 1000	N/A

* Drifts- og vedlikeholdskostnader

Batterikostnader

Tabell 7.8: Sammenligning av kostnad for ulike batterityper.

Batteritype	Li-ion *		Ni-Cd	Ni-MH	
		<i>Sintered</i>		<i>Forseglet</i>	
USD / kWh	70 - 119 [†]	Like dyrt som toppsjiktet av <i>forseglet</i>		325 - 487 [†]	100 - 1000
Karakter, kostnad [‡]	2	3		2	3
År	2024	2024		2024	2018
Kilde	[68]	[68]		[68]	[43]

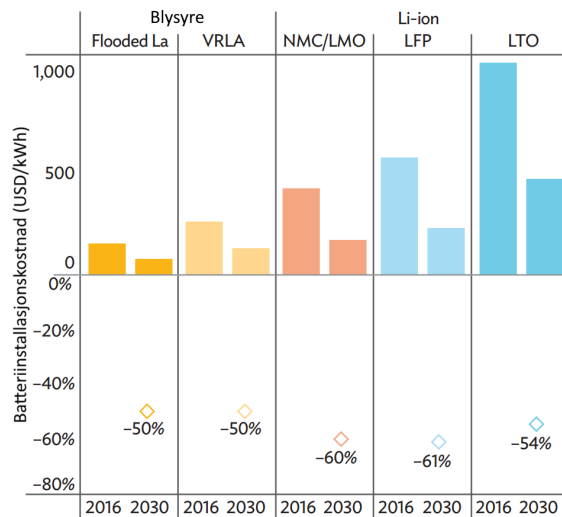
* Basert på kostnad for NMC-kombinasjoner av Li-ion-celler

[†] Fra EUR til USD (15.05.2024)

[‡] Hentet fra vedlegg C

Kostnadskarakterene for sekundærbatteriene i vedlegg C baserer seg på investering- og sykluslevetid. Antallet opp- og utladningssykluser som batteriet leverer under batteriets levetid gir en pekepinn på kostnad/syklus eller kostnad/kWh. De billigste kandidatene er ifølge tabell 7.8 Li-ion-batterier og Ni-Cd (forseglet type). Som nevnt i kap. 5.2.1 er kostnad/kWh en viktigere indikator på kostnad for bruksområder som frekvensregulering ifølge Beard *et al.* [29]. Kostnad/kWh kan derimot gi en generell pekepinn på prisprognosen.

I figur 7.9 vises kostnader i USD/kWh for år 2016 og prediksjoner for år 2030. Blysyre-batterier er en av de billigste alternativene på markedet og standarden for lav kostnad. Figur 7.9 illustrerer at NMC og LMO representerer de mest kostnadseffektive alternativene blant Li-ion-batteriene. Selv om kostnadene for LTO forventes å reduseres betydelig innen 2030, når de foreløpig ikke kostnadsnivået til de andre Li-ion-typene.



Figur 7.9: Sammenligning av kostnad for ulike Li-ion-batterityper og blysyre-batteri. Illustrasjon hentet fra Bank [43].

Kostnader for superkondensator

Per 2018, så var kostnaden for SK-er relativt høy, grunnet material- og produksjonskostnader. Med mer automatisert produksjon, redusert materialkostnader, kan prisen for en SK, med høyt produksjonsvolum nå kan det oppnås en billigere pris per kW eller kWh [29].

Kostnad for elektrode og elektrolytt En oversikt over type elektrode og elektrolytt som brukes i SK-ene vises i tabell 4.2. Elektrolytten som brukes for alle SK-ene er en variasjon av organisk løsemiddel med salt. Prisen er uklar men antas å ligge et sted mellom moderat og høy pris (se tabell 7.9).

Elektrodematerialet ”aktivert karbon” benyttes i noen typer EDLK og alle LIK (kun en av elektrodene). Materialet er billigere enn andre karbonmaterialer ifølge tabell 7.9. Ifølge Skeleton Technologies kan elektrodematerialet kurvet grafen også være relativt billig å produsere (se kap. [51]).

Superbatteriets produksjonskostnader er utfordrende å fastslå grunnet den ukjente elektrolytten og kombinasjonen med kurvet grafen ifølge tabell 4.2. Det antas imidlertid at Skeleton primært vil benytte organiske løsemiddel med salt i elektrolytten og denne har, som nevnt tidligere, moderat til høy pris. I produksjonen av LIK kreves grafitt som elektrode, i tillegg til litiumelektrolytt som også antas å være i samme prissjiktet som de andre organiske elektrolyttene (se tabell 4.2). Et usikkerhetsmoment for tabell 7.9 er for hvor mye salter som er i elektrolytten [29] ettersom salt er dyrere en organisk løsemiddel.

Tabell 7.9: Pris for elektrode og elektrolytt brukt i superkondensatorer.

Teknologitype	Utvikler	Pris			Kilde
		Elektrode 1	Elektrode 2	Elektrolytt	
SCA3200/SCX5000	Skeleton Technologies	L*	L*	M/H	[46], [51], vedl. A, tabell 4.2
BCAP3400	Ness/Maxwell	L	L	M/H	[46], [48], vedl. A, tabell 4.2
Aktivert karbon	Skeleton Technologies	L	L	M/H	[46], [48], vedl. A, tabell 4.2
LIK Ultimo	JSR Micro	L	L	M/H	[46], [29], vedl. A, tabell 4.2
Superbatteri	Skeleton Technologies	L*	L*	M/H†	[51], vedl. A, tabell 4.2, tabell 7.2,

* Indikerer at kilden er basert på intervju fra produsenten.

† Hemmelighetsstempling fører til usikkerhet.

På grunn av deres relativt lave energitetthet ift. batterier, kan ikke SK-er konkurrere med batterier når det gjelder USD/Wh ifølge Beard *et al.* [29]. Det kan de derimot være når det gjelder USD/kW og USD/enhet for visse bruksområder, altså rask leveranse av effekt (slik som frekvensregulering) [29]. Med andre ord kan kostnad per kW gi et bedre anslag enn kostnad per kWh.

I tabell 7.10 vises det at SK-en er fire ganger billigere per USD/kW sammenlignet med Li-ion-batteriet. Batteriet er billigere når det gjelder kostnad/kWh.

7.3.3 Miljø og sikkerhet

Både SK-er og batterier har ulike miljøpåvirkninger og sikkerhetsrisikoer avhengig av deres materiale og konstruksjon. Noen av utfordringene presenteres her. Det fokuseres på risiko

Tabell 7.10: Sammenligning av kostnader for et Li-ion-batteri og SK av Beard *et al.* (s 983) [29].

Li-ion *	Li-ion *	SK [†] (V = 3,0)	SK [†] (V = 3,0)
(USD/kWh)	(USD/kW)	(USD/kWh)	(USD/kW)
200	20	2453	4.9
300	30	3626	7.3
400	40	4800	9.6
500	50	5973	11.9

* Li-ion-batteri: 100 Wh/kg, 1000 W/kg

† SK: 5 Wh/kg, 2500 W/kg

assosiert med forskjellige stoffer som benyttes i SK-er og batterier. Dette kan gi en indikator på hvordan stoffet påvirker miljø og sikkerhet.

Batteri

Li-ion Disse batteriene bruker ikke-bærekraftige metaller som kobalt, men det finnes erstatninger som mangan og jern, som er miljøvennlige alternativer og er rikelig tilgjengelige og bærekraftige. Litiumkjemien er relativt miljøvennlig, men det er rom for forbedringer ifølge Deghani-Sanji *et al.* [42]. Gjenvinning av Li-ion-batterier er mulig, men energikrevende. Når det gjelder sikkerhet, er det risiko for intern kortslutning og en middels brannrisiko [42].

Ni-Cd Kadmium er giftig og må deponeres forsvarlig. Det er begrenset med nikkel tilgjengelig, men nikkel er ikke et sjeldent metall. Nikkel anses imidlertid ikke som et grønt alternativ på grunn av blant annet utfordrende utvinning [29], [42], [43].

Ni-MH Disse batteriene er stort sett ufarlige, men inneholder brennbare elektroder som kan selvantenne hvis de utsettes for luft. Selv om Ni-MH har noen av de samme miljøproblemene på grunn av nikkel som Ni-Cd, er Ni-MH foretrukket fremfor Ni-Cd på grunn av de større bekymringene knyttet til kadmium [42], [43].

Superkondensator

Aktivert karbon Aktivert karbon kan fremstilles fra flere forskjellige karbonkilder. Tidligere ble aktivert karbon blitt fremstilt av kull eller petroleum, noe som er skadelig for miljøet er kostbart. Nå har det blitt vanligere å produsere aktivert karbon av biomasse fra landsbrukavfall som sukkerrør bagasse, risskall, solsikkefrøskall osv. som gjør at produksjonen av aktivert karbon er mer bærekraftig. Å aktivere karbonet kan skje på flere måter som kjemisk, fysisk, en kombinasjon og mikrobølgeindusert. Å gjøre det kjemisk vil produsere aktivert karbon med stort overflateareal, men det vil også generere reaktanter og uorganisk avfall som må fjernes før bruk [77].

Grafitt Ifølge tabell 4.1 og 4.2 er grafitt et populært materiale for LIK-er og mesteparten av Li-ion-batteriene. Grafitt kan utvinnes naturlig men også fremstilles syntetisk. Det har blitt mer vanlig å fremstille grafitt syntetisk, grunnet mangelen på mengden naturlige grafittkilder med høy renhetsgrad [78]. Produksjon av syntetisk grafitt har en tendens til å ha større miljøpåvirkning i form av energikrevende fremstilling og utslipp i forbindelse med dette. Naturlig utvinning av grafitt er mindre energiintensivt, men utgjør en miljørisiko i form av støvutslipp og bruk av kjemikaler som kan være farlige for økosystemet og mennesker [79]. Dagens prosesser for resirkulering av grafitt benytter syrer, noe som har en negativ miljøpåvirkning. Ettersom grafitt er en karbonstruktur-type, finnes det et stort potensial for å utvikle en mer bærekraftig resirkuleringsmetode. For eksempel kan aktivert karbon produseres ved hjelp av lett tilgjengelige, bærekraftige alternativer [80].

Karbidavledet karbon Produksjon av dette materialet er energikrevende på grunn av høy temperatur, og det kan forekomme urenheter under fremstillingen. Det er usikker risiko knyttet til utslipp av nanopartikler ved resirkulering. Karbidavledet karbon er derimot ikke giftig [81]. Porøst karbon fra Skeleton kommer fra kokosnøttavfall ifølge produsenten [82].

Superbatteri Produsenten (Skeleton) hevder at BHK-en ikke inneholder kobalt, kobber eller grafitt, og mindre enn 5% litium. Prosessering er vannbasert og anode og katode kan gjenvinnes. Det er ingen risiko for brann eller eksplosjon under demontering ifølge Skeleton [74].

Elektrolytt - kondensator

Alle SK-er benytter organisk løsemiddel som elektrolytt som vist tabell 4.2. Denne har medium til høy toksisitet som vises i vedlegg A.

7.3.4 Sikkerhetsrisiko

Feil ved batterier

Beard *et al.* [29] oppsummerer de mest vanlige årsakene til feil ved batterier:

1. Kortslutning av batteriet
2. For høy utladnings- eller ladestrøm
3. Overlading eller utlading under den anbefalte driftsspenningen til cellene (inkluderer også spenningsreversering, eller utlading av cellen under 0 V)
4. Ubalanse mellom celler i serie (kan føre til overlading eller over-utlading av celler)
5. Ukorrekt lademetode

I et batteri-ELS er det viktig med røyk- og brannsikkerhet, ventilasjon, og sikker utgangstilgang. Elektrisk sikkerhet og beskyttelse mot naturkatastrofer er også avgjørende. Kommunikasjon med batteristyring og sikkerhetstiltak er nødvendig. Sikkerhet på celle-nivå kan forbedres med flammebestandige materialer. Analyse av ventilasjonsgass er viktig for å forstå risiko. Forskning på elektronikk-system og programvaredesign er nødvendig for å forhindre feil i store batterilagringssystemer [29].

Sikkerhetsutfordringer med noen superkondensatorer

Emballasjen for SK-er er fullstendig forseglet, uten gjenforseglingsventiler. De fleste enheter inneholder en høytrykkssikring for kontrollert åpning ved katastrofale feil, som kan oppstå ved overspenning og overtemperatur. Nedbryting av elektrolytten skjer ved høyere strøm og temperatur, spesielt når enheten opererer over sin nominelle spenning [27].

Ved lekkasje, identifisert ved hvite saltkrystaller, bør SK-en fjernes fra systemet for å unngå økt motstand eller korrosjon av tilkoblinger. Kompromittert emballasje, enten punktert eller knust, kan frigjøre elektrolyttvæske avhengig av SK-ens størrelse. Slik emballasje bør umiddelbart fjernes og plasseres i et godt ventilert område på grunn av elektrolyttens høye damptrykk og brennbare egenskaper [27].

I vedlegg A klassifiseres organisk elektrolytt sin toksisitet fra medium til høy toksisitet, mens vannbaserte og ioniske væsker er klassifisert under lav toksisitet. For alle produktene som er sett igjennom i oppgaven brukes salter oppløst i organiske løsemiddel som vist i tabell 4.2, [46], [52]. Dette betyr at alle SK-ene som er gjennomgått vil ha en medium til høy toksisitet. Acetonitril (ACN), som er elektrolytt i de gjennomgåtte EDLK-ene, er klassifisert som meget brannfarlig, skadelig ved innånding, hudkontakt og inntak, samt irriterende for øynene, men det er ikke klassifisert som skadelig for miljøet [83].

7.3.5 Brannfare

ELE-er utgjør en potensiell fare. Flere komponenter innebærer risikofaktorer som krever forbedelse før bruk. Disse enhetene inneholder betydelige mengder energi og består av materialer som kan være brannfarlige eller medføre eksplosjonsfare. En feil kan resultere i at den lagrede energien antennes eller forårsaker en eksplosjon [36], [37].

Brannfare fra batteri

Batterier utgjør en brannrisiko dersom de ikke kjøles tilstrekkelig eller blir skadet. Til tross for at batteriene er konstruert for å være så sikre som mulig, innebærer alle batterier en viss risiko for *thermal runaway* og brann [36].

Li-ion-batterier, som er veldig populært på markedet, inneholder en brennbar elektrolytt og en separator laget av et polymer som blir ustabil ved høye temperaturer. Separatoren kan smelte ved temperaturer over 130°C [84]. Dette skaper en temperaturgrense på 130-150°C. Når temperaturen på batteriet overgår denne grensen vil det startes en reaksjon mellom elektrodene og elektrolytten, noe som fører til produksjon av varme. Den økende temperaturen vil akselerere reaksjonshastigheten, noe som igjen vil øke temperaturen ytterligere og føre til *thermal runaway* [85]. Ved høye temperaturer under den eksoterme reaksjonen genererer elektrolytten brennbare gasser. Den positive elektroden kan frigjøre oksygen, noe som potensielt kan forårsake brann. Når dette skjer i en celle, kan det raskt spre seg til andre celler, og føre til at hele batteripakken opplever *thermal runaway* og antennes.

Et NMC Li-ion batteri som har startet *thermal runaway* kan ikke bli slukket selv hvis det blir nedsenket i flytende nitrogen. For å unngå termisk ustabilitet må derfor kjølesystemet kunne effektivt fjerne mer varme fra batteriene enn det den eksoterme reaksjonen genererer [86].

Brannfare fra kondensator

Noen BHK-er kan oppleve *thermal runaway*, men dette skjer ved høyere temperaturer enn batterier, typisk rundt 249°C. Når BHK-en når sin maksimale temperatur starter den å lekke røyk, men den begynner ikke å brenne og eksploderer ikke [37]. Det er noen BHK-er, som LIK Ultimo fra JSR Micro, hvor *thermal runaway* ikke kan forekomme, ettersom den positive elektroden ikke inneholder litium [55].

EDLK-er har imidlertid ingen eksoterm reaksjon som skaper *thermal runaway*. Hvis den overopphetes, vil det kun lekke ut røyk når trykket i EDLK-en blir for stort [87].

Kapittel 8

Diskusjon

Frekvensregulering er en viktig del av kraftnettet. Bruk av et ELS kan forbedre frekvensreguleringen og dermed sikre en mer pålitelig kraftforsyning. En økning i antall anlegg som kan utføre frekvensregulering vil også muliggjøre en større andel av fornybar energi som mangler treghetsmoment.

I dette kapittelet blir det sett nærmere på hvilke egenskaper som er viktigst for frekvensregulering når et ELS reguleres i samspill med et elvekraftverk. Målet er å identifisere hvilke typer ELE-er som er mest egnet til frekvensregulering og hvilke som er mindre passende. Dette baserer seg først og fremst på tekniske spesifikasjoner og så med en betraktning av kostnad og miljøpåvirkning. Det er i hovedsak den mest kostnadseffektive løsningen som vinner frem, og den skal ikke ha noen åpenbare miljøproblemer.

8.1 Hvilke tekniske kriterier er viktigst for frekvensregulering?

ELS-et vil reguleres sammen med elvekraftverket. Dette betyr at energilageret ikke trenger å lagre store mengder energi. Anlegget må kunne levere høy effekt i korte perioder, som nevnt i kapittel 2.3.1 og utifra hvordan ELS og kraftverk reguleres sammen (se kap. 3.3.1). Derfor vil høy spesifikk effekt være viktigere enn høy spesifikk energi. Etersom kraftnettet må stabiliseres kontinuerlig for FCR-N, som forklart i 2.2.2, er sykluslevetid viktig. Dette er illustrert i figur 3.10.

Temperaturen under opp- og utlading påvirker både sykluslevetiden og kapasiteten til batterier og SK-er, som nevnt i 5.1.5. Hvis en enhet kan operere effektivt over et stort temperaturområde, kan det redusere behovet for ekstra kjøling og minske risikoen for feil, noe som igjen kan redusere driftskostnadene. Effektivitet og selvutladning varierer betydelig mellom ulike ELE-er. Effektivitet og selvutladning vil mest sannsynlig ikke utgjøre en stor forskjell ettersom ELS-et er kontinuerlig i bruk. Det handler mer om kostnader, fordi enheten kanskje må lades oftere på grunn av energitap fra selvutladning, som beskrevet i kap. 7.3.1. Plass og vekt vil vurderes som mindre viktig, ettersom anlegget vanligvis skal være lokalisert utenfor tett befolkede områder. Anleggets volum og vekt varierer med systemets effekt- og energibehov og cellepakkeforholdet som beskrives i se kap. 7.3.1.

8.2 Sammenligning av energilagringssystemer

De tekniske egenskapene beskrevet i forrige kapittel som prioriteres i diskusjonen er altså følgende: Høy spesifikk effekt, sykluslevetid og bredt driftstemperaturområde. I tillegg vurderes kostnad, miljø og sikkerhetsmessige aspekter. Det er verdt å merke seg at de tekniske karakteristikkenes påvirker de sistnevnte faktorene. Med dette grunnlaget skal det diskuteres hvilke ELE-er som kan egne seg mest til frekvensregulerende formål og hvilke ELE-er som er mindre egnede.

8.2.1 Begrensninger ved noen energilagringssystemer

Ni-Cd- og Ni-MH-batterier anbefales ikke videre grunnet at de er teknisk dårligere enn Li-ion-batterier. I tillegg inneholder Ni-Cd et tungmetall. Ni-Cd og Ni-MH har mindre sellespenning enn Li-ion, som nødvendiggjør flere celler i serie og kan komplisere systemdesignet. Disse batteritypene har generelt lavere sykluslevetid og spesifikk energi. Med unntak av ventiltet Ni-Cd, viser de også et dårligere temperaturområde for oppladning som sett i kap. 7.3.1.

8.2.2 Anbefalte energilagringssystemer for frekvensregulering

Når det gjelder spesifikk effekt, overgår EDLK-er alle batterier. Ifølge tabell 7.4 kan visse typer Li-ion-batteri konkurrere med både EDLK og LIK. Som sett i tabell 7.7 er SK-er mer kostnadseffektive enn batterier når det gjelder kostnad per kW per år. LTO er oppført i tabellen med størst effektivitet av batteriene, men kostnadsprediksjonen mot 2030 per kWh er fortsatt høyere ift. de andre batteritypene ifølge figur 7.9. Dette kan gi et misvisende bilde av de faktiske kostnadene ved bruk av LTO-batterier, som har lavere spesifikk energi og høyere spesifikk effekt sammenlignet med andre Li-ion-batterityper (se vedlegg F). Som beskrevet i kap. 5.2.1 kan kostnad per kW gi et bedre bilde av kostnadene for frekvensreguleringsformål. Det er derfor en mulighet for at LTO-batterier faktisk er rimeligere enn andre Li-ion-varianter.

For å unngå risiko for brann er det kritisk å forhindre overlading av batterier, spesielt Li-ion-batterier som ikke tåler overlading (se vedlegg G). Andre batterityper tåler overlading bedre. Overlading kan lede til *thermal runaway* og potensielt resultere i brann (se kap. 7.3.5). Brannfaren fra SK-er er ikke like stor som for batterier, og for visse typer som JSR Micro Ultimo kan ikke *thermal runaway* forekomme (se kap. 7.3.5). Som forklart i kap. 7.3.1 er kjøling av SK-er mindre problematisk enn for batterier. Dette kan bidra til lavere driftskostnader for ELS-et. Imidlertid har temperatur mye å si for sykluslevetid (se kap. 5.1.5) og burde derfor uansett tas i betraktning.

Anbefaling

SK-er har en betydelig høyere sykluslevetid sammenlignet med batterier, spesielt EDLK. Gitt at spesifikk energi ikke er en like prioritert faktor, kan det argumenteres for at LIK ikke er like optimal for frekvensregulering. Basert på analysene gjennomført her, viser LIK-batteriene ikke nevneverdig høyere spesifikk energi sammenlignet med EDLK-ene (se tabell 7.2). LIK har dessuten en vesentlig lavere sykluslevetid sammenlignet med EDLK. Superbatteriet (Skeleton)

har kun halvparten av sykluslevetiden til LIK-ene. Blant batteriene, er det Li-ion-typene som er oppgitt med høyest sykluslevetid ved 100% DoD.

Li-ion-batterier kan hovedsaklig vurderes implementert i et ELS på grunnlag av kostnad. Li-ion batterier er billigere per kWh mens EDLK-er er billigere per kW. LIK er ikke en like utprøvd teknologitype som Li-ion-batterier og er mest sannsynlig dyrere enn Li-ion-batterier. EDLK har veldig høy sykluslevetid og kan gjøre opp for kostnaden ved investering. Når det gjelder miljøhensyn, er noen Li-ion-kjemier foretrukket enn andre, men etter informasjonen som ble funnet, er de ikke mer miljøvennlige enn SK-er. EDLK-enes elektroder består av aktivert karbon eller karbidavledet karbon og kan lages av lokalt landbruksavfall (se kap. 7.3.3). Videre er elektrolytten ikke miljøskadelig og har lavere risiko for brann (se kap. 7.3.4). EDLK skiller seg ut med generelt høy spesifikk effekt, høyest sykluslevetid og høy driftstemperatur.

Den største svakheten ved SK-er, spesielt EDLK, er lav spesifikk energi, men ettersom ELE-ene skal kontinuerlig være aktive og reguleres sammen med et kraftverk vil dette ikke være en stor svakhet. For å unngå behovet for å installere flere enheter på grunn av lav spesifikk energi, kan det være hensiktsmessig å investere i en enhet med noe høyere spesifikk energi, slik som SCX5000 (Skeleton) som vises i tabell 7.2. Denne tilbyr fortsatt relativt høy spesifikk effekt ift. de andre EDLK-ene.

Hvis ELS-et trenger stor lagringskapasitet kan det tenkes at Li-ion-batterier er billigere enn SK-er. Avhengig av hvor mye energi og effekt som systemet blir dimensjonert til vil det ikke være riktig å sammenligne investeringskostnadene til batteriene og EDLK-ene direkte. EDLK-ene har lengre sykluslevetid enn batteriene. Derfor må batteriene byttes ut oftere enn EDLK-ene. For en indikasjon på kostnadene ved betraktning av levetid ved ulike tekniske alternativer kan en netto nåverdi-analyse (NNV) benyttes, som beskrevet i kap. 5.2.1. En NNV kan vise at investeringskostnaden vil veie opp på lang sikt når ELE-en har lang forventet levetid. SK-er har meget lang levetid og dette vil gi et positivt utslag for nåverdien.

8.3 Usikkerhet og mangel på data

For å oppnå en detaljert forståelse av et produkts miljøpåvirkning, må det tas i bruk en metode som f. eks. livsløpsanalyse gjennom hele eller deler av livsløpet. Slike omfattende analyser er imidlertid utenfor denne oppgavens omfang.

Investeringskostnadene for ELE-ene er usikre da prisinformasjonen for SK-er ofte er konfidensiell og varierer for kunde og kjøpsvolum. Mangel på tilgjengelige data og hemmelighetsstempling av informasjon legger begrensninger på og skaper usikkerhet rundt videre undersøkelser uten tilgang. Spesielt er det usikkerhet knyttet til dataene for superbatteriet, siden disse ikke er verifisert av en uavhengig tredjepart, men derimot er oppgitt av produsenten og inneholder begrenset mengde informasjon.

Hvilke ELE-er som er mest egnet til frekvensregulering, kan variere fra kraftverk til kraftverk, hvorav hvert kraftverk vil trenge forskjellig mengde energi og effekt (se kap. 2.3.2).

8.4 Hybridkraftverk og implementering av fornybar energi

Denne oppgaven vil bidra til å fremme FNs bærekraftsmål, med særlig fokus på mål 7: "Ren energi til alle" [88] og delmål 7.2, som fordrer en betydelig økning i andelen fornybar energi i verdens samlede energiforbruk innen 2030 [88]. Implementeringen av et ELS kan beskytte kraftnettet mot den økende faren for frekvensavvik. Dette skapes av fornybare kilder uten treghetsmoment, slik som sol- og vindkraft. Et hybridkraftverk vil kunne forenkle integreringen av fornybare kilder i kraftnettet.

Selv om fokuset i denne oppgaven hovedsakelig har vært på frekvensregulering kraftnettet i Norden, er utfordringen med å opprettholde balanse i nettet relevant globalt. I Norge spiller vannkraft som en fornybar energikilde en viktig rolle i å stabilisere frekvensen, men dette er en fordel som ikke alle land har. Kunnskap om hvordan ELS kan brukes til å opprettholde balanse i kraftnettet kan dermed muliggjøre en økning av fornybare energikilder i flere deler av verden.

Kapittel 9

Konklusjon

Problemet som skulle besvares i oppgaven var å finne den mest egnede energilagringssystemet til bruk i samspill med vannkraftverk til frekvensregulering.

I oppgaven er det gitt innsikt om frekvensreserver, elvekraftverk og energilagringssystem. Tekniske spesifikasjoner, kostnad og miljø- og sikkerhetsmessige aspekter har blitt gått igjennom for ulike batterier og superkondensatorer.

Hovedfunnet i oppgaven er at superkondensatorer, spesielt EDLK-er, er spesielt godt egnet for frekvensregulering med vannkraftverk. Dette er grunnet enhetens høye sykluslevetid, brede temperaturområde for drift og evne til å levere høy effekt over korte perioder. Ved at EDLK-er har høyere sykluslevetid enn andre energilagringssystemer kan den høye investeringskostnaden til EDLK-er være overkommelig. De må ikke byttes ut like ofte som andre energilagringssystemer, som kan utgjøre et positivt utslag for nåverdien. For å vite nøyaktig hva som er mest kostnadseffektivt må parametere for elvekraftverket, ønsket lagret energi og ønsket levert effekt til frekvensreserver være kjent. Dersom energilagringssystemet må dimensjoneres for å lagre mer energi over lengre tid vil Li-ion batterier kunne være et alternativ til EDLK-ene. EDLK-er er sikrere enn batteri med at den ikke har eksoterm reaksjon, og ved høye temperaturer vil de ikke begynne å brenne eller eksplodere. EDLK-er er mindre miljøskadelige i og med at de ikke inneholder miljøskadelige og sjeldne materialer slik som noen batterier, og kan produseres lokalt med bærekraftige materialer. EDLK-er er dermed den energilagringssystemet som er mest egnet til å brukes til frekvensregulering i samspill med vannkraft.

Bibliografi

- [1] NVE, «Driften av Kraftsystemet 2022,» versjon RME Rapport nr.4/2023, s. 28, jun. 2023. adresse: https://publikasjoner.nve.no/rme_rapport/2023/rme_rapport2023_04.pdf.
- [2] Statnett. «Introduksjon til Statnett sine reservemarkeder.» (19. feb. 2024), adresse: <https://www.statnett.no/globalassets/05-dokumentlisteblokker/introduksjon-til-reserver/slik-fungerer-reservemarkedene.pdf> (sjekket 20.03.2024).
- [3] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals (Fourth Edition)*. McGraw-Hill, 2005, ISBN: 0-07-246523-9.
- [4] AEMO - Australian Energy Market Operator, «Inertia in the NEM explained,» adresse: <https://aemo.com.au/-/media/files/initiatives/engineering-framework/2023/inertia-in-the-nem-explained.pdf?la=en> (sjekket 02.02.2024).
- [5] Energifakta Norge. «Kraftproduksjon.» (2024), adresse: <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftforsyningen/> (sjekket 08.02.2024).
- [6] NVE, «Godkjenning av metode for ytterligere egenskaper for FCR etter SO GL artikkel 154.2,» versjon 202012931-21, 27. mar. 2023.
- [7] NVE, «Forskrift om systemansvaret i kraftsystemet (FOR-2002-05-07-448),» 29. jun. 2021. adresse: <https://lovdata.no/forskrift/2002-05-07-448> (sjekket 01.02.2024).
- [8] NVE. «Systemansvar.» (2024), adresse: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/regulering/nettvirksomhet/systemansvar/> (sjekket 08.02.2024).
- [9] Statnett. «Introduksjon til reservemarkedene.» (2024), adresse: <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/systemansvaret/kraftmarkedet/reservemarkeder/introduksjon-til-reserver/> (sjekket 08.02.2024).
- [10] Statnett, «Raske frekvensreserver - FFR,» adresse: <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/systemansvaret/kraftmarkedet/reservemarkeder/ffr/> (sjekket 26.01.2024).
- [11] ENTSO-E, «Technical Requirements for Frequency Containment Reserve Provision in the Nordic Synchronous Area,» 26. mai 2023. adresse: <https://www.statnett.no/globalassets/for-aktorer-i-kraftsystemet/market/reservemarkeder/fcr/pq-dokumenter/fcr-technical-requirements.pdf>.

- [12] Statnett, «Norsk støttedokument for FCR kravene,» versjon v2024-01-05, 5. jan. 2024. adresse: <https://www.statnett.no/globalassets/for-aktorer-i-kraftsystemet/marked/reservemarkeder/fcr/norsk-stottedokument-for-fcr-kravene-v2024-01-05.pdf>.
- [13] I. Norheim og K. O. Uhlen, «Kompenium - Modelling og Simulering,» Upublisert, 2023.
- [14] Statnett, «Tertiærreserver - mFRR,» adresse: <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/systemansvaret/kraftmarkedet/reservemarkeder/tertiarreserver/> (sjekket 26.01.2024).
- [15] Vidar Nylund, Maskin fagansvarlig hos Hafslund Eco, Intervju, 2024.
- [16] Statnett, «Primærreserver - FCR,» adresse: <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/systemansvaret/kraftmarkedet/reservemarkeder/primarreserver/> (sjekket 25.01.2024).
- [17] Statnett, «Vilkår - tilbud, aksept, aktivering, rapportering og avregning i marked for FCR til Statnett,» 1. jan. 2024, Dokument-id: 2023/3187-6. adresse: <https://www.statnett.no/globalassets/for-aktorer-i-kraftsystemet/systemansvaret/retningslinjer-fos/systemansvaret---vedlegg-til-retningslinjer-for-fos---9---vilkar-for-fcr-fra-01.01.2024.pdf> (sjekket 16.02.2024).
- [18] ENTSO-E, «Test Program for Prequalification of FCR in the Nordic Synchronous Area,» 29. nov. 2023.
- [19] Nord Pool. «Trading.» (2024), adresse: <https://www.nordpoolgroup.com/en/trading/> (sjekket 02.04.2024).
- [20] A. Kjølle, *Vannkraftmaskiner*. Universitetsforlaget, 1980, ISBN: 8200277801. adresse: http://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb_digibok_2021062848640.
- [21] Wikimedia Commons. «File:Water turbine (en).svg.» (2020), adresse: [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Water_turbine_\(en\).svg&oldid=452841766](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Water_turbine_(en).svg&oldid=452841766) (sjekket 14.05.2024).
- [22] D. Laban, «Hydro/Battery Hybrid Systems for frequency regulation,» masteroppg., UPC, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Departament d'Enginyeria Elèctrica, 2019. adresse: <http://hdl.handle.net/2117/167410>.
- [23] Kjetil Obstfelder Uhlen, Professor i elkraftteknikk hos NTNU, Skriftlig intervju, 2024.
- [24] J. Gallardo-Lozano, M. I. Milanés-Montero, M. A. Guerrero-Martínez og E. Romero-Cadaval, «Three-phase bidirectional battery charger for smart electric vehicles,» s. 371–376, 2011. DOI: 10.1109/CPE.2011.5942263.
- [25] L. S. Xavier, W. C. S. Amorim, A. F. Cupertino, V. F. Mendes, W. C. do Boaventura og H. A. Pereira, «Power converters for battery energy storage systems connected to medium voltage systems: a comprehensive review,» *BMC Energy*, årg. 1, nr. 7, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42500-019-0006-5>.

- [26] D. W. Gao, «Chapter 3 - Interfacing Between an ESS and a Microgrid,» i *Energy Storage for Sustainable Microgrid*, D. W. Gao, red., Oxford: Academic Press, 2015, s. 79–121, ISBN: 978-0-12-803374-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803374-6.00003-2>.
- [27] Tecate Group, «Ultracapacitor Technical Guide,» San Diego, California, tekn. rapp., 2020.
- [28] C. Ionescu, A. Vasile og R. Negroiu, «Investigations on balancing circuits for supercapacitor modules,» i *2016 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, 2016, s. 521–526. DOI: 10.1109/ISSE.2016.7563253.
- [29] K. W. Beard, *Linden's handbook of batteries*, 5. utg. Skippack, Pennsylvania: McGraw Hill, 2019.
- [30] A. Berrueta, A. Ursúa, I. S. Martín, A. Eftekhari og P. Sanchis, «Supercapacitors: Electrical Characteristics, Modeling, Applications, and Future Trends,» *IEEE Access*, årg. 7, s. 50 869–50 896, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2908558.
- [31] J. Gallardo-Lozano, M. I. Milanés-Montero, M. A. Guerrero-Martínez og E. Romero-Cadaval, «Electric vehicle battery charger for smart grids,» *Electric Power Systems Research*, årg. 90, s. 18–29, 2012, ISSN: 0378-7796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.03.015>.
- [32] F. Z. Peng, «Z-source inverter,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, årg. 39, nr. 2, s. 504–510, 2003. DOI: 10.1109/TIA.2003.808920.
- [33] N. Mohan, T. M. Undeland og W. P. Robbins, *Power Electronics, Converters, Applications, and Design*, 3. utg. Hoboken NY: John Wiley & Sons Inc, 2002, ISBN: 9780471226932.
- [34] S.-H. Kim, «Chapter 7 - Pulse width modulation inverters,» i *Electric Motor Control*, S.-H. Kim, red., Elsevier, 2017, s. 265–340, ISBN: 978-0-12-812138-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812138-2.00007-6>.
- [35] P. Kundur, *Power system stability and control*. McGraw-Hill, Inc., 1993, ISBN: 0-07-035958-X.
- [36] N. E. Galushkin, N. N. Yazvinskaya, D. N. Galushkin og I. A. Galushkina, «Causes Analysis of Thermal Runaway in Nickel–Cadmium Accumulators,» *Journal of The Electrochemical Society*, årg. 161, nr. 9, A1360, jun. 2014. DOI: 10.1149/2.0921409jes.
- [37] M. Wu, C. Zhang, C. Yang, Z. An og J. Xu, «Over-heating triggered thermal runaway characteristic of lithium ion hybrid supercapacitor based lithium nickel cobalt manganate oxide/activated carbon cathode and hard carbon anode,» *Solid State Ionics*, årg. 377, s. 115 883, 2022, ISSN: 0167-2738. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2022.115883>.
- [38] *Olje i trafo*, notater fra IELEG3399 Høyspenningsnett og anlegg, Gjøvik, Norge: Institutt for elektrisk energi, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, høst 2023.
- [39] M. Andresen og M. Liserre, «Impact of active thermal management on power electronics design,» *Microelectronics Reliability*, årg. 54, nr. 9, s. 1935–1939, 2014, SI: ESREF 2014, ISSN: 0026-2714. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2014.07.069>.

- [40] L. J. Hellborg, «Evaluation of battery storage in combination with hydro-power systems,» masteroppg., University of South-Eastern Norway, 2021. adresse: <https://hdl.handle.net/11250/2773843>.
- [41] K. Hofsvold og K. A. Rosvold. «Batteri.» (25. jan. 2023), adresse: <https://snl.no/energilagring> (sjekket 05.05.2024).
- [42] A. Dehghani-Sanij, E. Tharumalingam, M. Dusseault og R. Fraser, «Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, årg. 104, s. 192–208, 2019, ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.023>.
- [43] A. D. Bank, *Handbook on Battery Energy Storage System*. Creative Commons Attribution 3.0 IGO license (CC BY 3.0 IGO), 2018.
- [44] O. Stokke Burheim, *Engineering Energy Storage*. Academic Press, 2017.
- [45] I. Gunvaldsen, S. Mathiesen og K. A. Rosvold. «Batteri.» (11. des. 2023), adresse: <https://snl.no/batteri> (sjekket 19.04.2024).
- [46] F. Beguin og E. Frackowiak, *Supercapacitors: Materials, Systems, and Applications*, 1. utg. Poznań, Poland: Wiley-VCH, 2013.
- [47] T. Schoetz, L. Gordon, S. Ivanov, A. Bund, D. Mandler og R. Messinger, «Disentangling faradaic, pseudocapacitive, and capacitive charge storage: A tutorial for the characterization of batteries, supercapacitors, and hybrid systems,» *Electrochimica Acta*, årg. 412, s. 140 072, 2022, ISSN: 0013-4686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.140072>.
- [48] M. S. Halper og J. C. Ellenbogen, «Supercapacitors: A Brief Overview,» McLean, Virginia, tekn. rapp., 2006.
- [49] J. Leis, M. Arulepp og A. Perkson, «A carbon composite electrode for the electric double-layer capacitor,» Patent Number, 30. mai 2012.
- [50] M. Farsak og G. Kardaş, «2.12 Electrolytic Materials,» i *Comprehensive Energy Systems*, I. Dincer, red., Oxford: Elsevier, 2018, s. 329–367, ISBN: 978-0-12-814925-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00225-X>.
- [51] L. Blain. «Skeleton's high-power Superbattery is more interesting than we thought.» (2020), adresse: <https://newatlas.com/energy/skeleton-superbattery-curved-graphene/> (sjekket 04.04.2024).
- [52] K. Stubender. «Unlocking the Power of Electrolyte in Supercapacitors.» (2023), adresse: <https://www.skeletontech.com/skeleton-blog/unlocking-the-power-of-electrolytes-in-supercapacitors> (sjekket 04.04.2024).
- [53] A. Burke, «Ultracapacitor technologies and application in hybrid and electric vehicles,» *International Journal of Energy Research*, årg. 34, nr. 2, s. 133–151, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.1654>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/er.1654>.
- [54] Maxwell. «Maxwell's Highest Power and Energy Cell.» (2024), adresse: https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/08/3V_3400F_datasheet.pdf (sjekket 02.05.2024).

- [55] J. Micro. «JM Energy's Lithium Ion Capacitor: The Hybrid Energy Storage Advantage.» (2024), adresse: https://nccavs-usergroups.avs.org/wp-content/uploads/TFUG2009/2009_2banas.pdf (sjekket 02.05.2024).
- [56] A. Burke, «Ultracapacitors: why, how, and where is the technology,» *Journal of Power Sources*, årg. 91, nr. 14, s. 37–50, 2000. DOI: 10.1016/S0378-7753(00)00485-7.
- [57] W. B. Widayatno, W. A. Sukarto, N. Nursyafarinah og D. Junipuspita, «Low temperature preparation of chicken bone-based porous carbon for lithium ion capacitor (LIC) cathode,» *Journal of Physics Conference Series*, årg. 1191, nr. 7, s. 1–7, 2019.
- [58] A. Gaarud og G. M. Haarberg. «Elektrokjemisk dobbeltlag.» (26. jun. 2023), adresse: https://snl.no/elektrokjemisk_dobbeltlag (sjekket 11.05.2024).
- [59] E. Trend. «Estonian Startup and Germany's KIT Will Jointly Develop a "SuperBattery" Featuring 15-Second Charge.» (2020), adresse: <https://www.energytrend.com/news/20201012-19482.html> (sjekket 26.01.2024).
- [60] K. Hofstad. «Effekt (energi).» (21. des. 2021), adresse: https://snl.no/effekt_-_energi (sjekket 09.04.2024).
- [61] J. Zhao og A. F. Burke, «Review on supercapacitors: Technologies and performance evaluation,» *Journal of Energy Chemistry*, årg. 59, s. 276–291, 2021, ISSN: 2095-4956. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.11.013>. adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095495620307634>.
- [62] R. L. Boylestad, *Essentials of Circuit Analysis (International Edition)*, 1. utg. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education International, 2004.
- [63] Skeleton. «Ultracapacitor voltage, temperature, and lifetime.» (2016), adresse: https://f.hubspotusercontent00.net/hubfs/1188159/161122%20Whitepaper-ultracapacitor_voltage_temperature_lifetime.pdf (sjekket 01.05.2024).
- [64] P. Fu, L. Zhao, X. Wang, J. Sun og Z. Xin, «A Review of Cooling Technologies in Lithium-Ion Power Battery Thermal Management Systems for New Energy Vehicles,» *Processes*, årg. 11, nr. 12, 2023, ISSN: 2227-9717. DOI: 10.3390/pr11123450.
- [65] W. Zhou, Z. Liu, W. Chen, X. Sun, M. Luo, X. Zhang, C. Li, Y. An, S. Song, K. Wang og X. Zhang, «A Review on Thermal Behaviors and Thermal Management Systems for Supercapacitors,» *Batteries*, årg. 9, nr. 2, 2023, ISSN: 2313-0105. DOI: 10.3390/batteries9020128.
- [66] SINTEF, «Planleggingsbok for kraftnett, Grunnleggende økonomisk teori,» 15. sep. 2010.
- [67] J. Zhao og A. F. Burke, «Electrochemical Capacitors: Performance Metrics and Evaluation by Testing and Analysis,» *Advanced Energy Materials*, årg. 11, nr. 1, s. 2002192, 2021.
- [68] S. Passerini, L. Barelli, M. Baumann, J. F. Peters og M. Weil, *Emerging Battery Technologies to Boost the Clean Energy Transition, Cost, sustainability and Performance Analysis*, 1. utg. Rome, Italy: Springer Nature, 2024, ISBN: 9783031483592.

- [69] B. Arumugam, G. Mayakrishnan, S. K. Subburayan Manickavasagam, S. C. Kim og R. Vanaraj, «An Overview of Active Electrode Materials for the Efficient High-Performance Supercapacitor Application,» *Crystals*, årg. 13, nr. 7, 2023, ISSN: 2073-4352. DOI: 10.3390/cryst13071118.
- [70] S. Technologies, *SkelCap Data Sheet*, 02-DS-220909-SKELCAP-CELLS-1H, 2022. adresse: <https://1188159.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/1188159/02-DS-220909-SKELCAP-CELLS-1H.pdf> (sjekket 30.04.2024).
- [71] J. Banas og M. Peterson. «Advances in ULTIMO Lithium Ion Capacitor (LIC) Technology.» (2024), adresse: https://strategic-plan.avs.org/wp-content/uploads/Joint2012/2012_2Peterson.pdf (sjekket 30.04.2024).
- [72] A. F. Burke og J. Zhao, «Development, Performance, and Vehicle Applications of High Energy Density Electrochemical Capacitors,» *Applied Sciences*, årg. 12, nr. 3, 2022, ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app12031726.
- [73] JSR Mikro. «ULTIMO Lithium Ion Capacitor.» (2024), adresse: https://www.jsrmicro.be/sites/default/files/attachments/ultimo_lithium_ion_capacitor_brochure.pdf (sjekket 30.04.2024).
- [74] Skeleton, *SuperBattery Charged in 60 seconds, bridging the gap between supercapacitors and batteries*. adresse: <https://1188159.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/1188159/02-DS-SuperBattery-D60-view.pdf> (sjekket 20.04.2024).
- [75] Skeleton Technologies. «Ultracapacitor Technology.» (25. jan. 2023), adresse: <https://www.skeletontech.com/ultracapacitor-technology> (sjekket 09.05.2024).
- [76] J. Pikkarainen. «Unlocking the Power of Electrolyte in Supercapacitors.» (2022), adresse: <https://www.skeletontech.com/skeleton-blog/skeletons-superbattery-safe-high-power-energy-storage-to-enable-electrification> (sjekket 04.04.2024).
- [77] A. M. Abioye og F. N. Ani, «Recent development in the production of activated carbon electrodes from agricultural waste biomass for supercapacitors: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, årg. 52, s. 1282–1293, 2015, ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.129>.
- [78] S. Kulkarni, T.-Y. Huang, B. P. Thapaliya, H. Luo, S. Dai og F. Zhao, «Prospective Life Cycle Assessment of Synthetic Graphite Manufactured via Electrochemical Graphitization,» *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, årg. 10, nr. 41, s. 13 607–13 618, 2022. DOI: 10.1021/acssuschemeng.2c02937.
- [79] R. Pell, P. Whattoff og J. Lindsay, «Climate Impact of Graphite Production,» tekn. rapp., 2021. adresse: <https://www.minviro.com/resources/guides/climate-impact-graphite-production>.
- [80] I. Rey, C. Vallejo, G. Santiago, M. Iturrondobeitia og E. Lizundia, «Environmental Impacts of Graphite Recycling from Spent Lithium-Ion Batteries Based on Life Cycle Assessment,» *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, årg. 9, nr. 43, s. 14 488–14 501, 2021. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c04938.

- [81] Carbon Ukraine. «NanoporeU Carbide Derived Carbon.» (2024), adresse: [https://carbon.org.ua/nanoporeu#:~:text=Carbide%2Dderived%20carbon%20\(CDC\),shapes%2C%20with%20or%20without%20mesopores](https://carbon.org.ua/nanoporeu#:~:text=Carbide%2Dderived%20carbon%20(CDC),shapes%2C%20with%20or%20without%20mesopores) (sjekket 26.04.2024).
- [82] S. Pohlmann. «Ultracapacitors And Batteries: Differences And Synergies.» (2024), adresse: <https://fhi.nl/app/uploads/sites/74/2020/02/Nijkerk-Electronics-Skeleton.pdf> (sjekket 03.05.2024).
- [83] F. V. Marcos, C. C. Diéguez, J. L. T. Lluch og E. M. de Dios, «Acetonitrile - European Union Risk Assessment Report,» 2002. adresse: <https://echa.europa.eu/documents/10162/764c8da5-79e2-418d-bf1f-ab59592f8cc6>, (EINECS No: 200-835-2 CAS No: 75-05-8).
- [84] L. Kong, C. Li, J. Jiang og M. G. Pecht, «Li-Ion Battery Fire Hazards and Safety Strategies,» *Energies*, årg. 11, nr. 2191, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11092191>.
- [85] P. Balakrishnan, R. Ramesh og T. Prem Kumar, «Safety mechanisms in lithium-ion batteries,» *Journal of Power Sources*, årg. 155, nr. 2, s. 401–414, 2006, ISSN: 0378-7753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.12.002>.
- [86] X. Liu, D. Ren, H. Hsu, X. Feng, G.-L. Xu, M. Zhuang, H. Gao, L. Lu, X. Han, Z. Chu, J. Li, X. He, K. Amine og M. Ouyang, «Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries without Internal Short Circuit,» *Joule*, årg. 2, nr. 10, s. 2047–2064, 2018, ISSN: 2542-4351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.06.015>.
- [87] P. H. Smith, T. N. Tran, T. L. Jiang og J. Chung, «Lithium-ion capacitors: Electrochemical performance and thermal behavior,» *Journal of Power Sources*, årg. 243, s. 982–992, 2013, ISSN: 0378-7753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.06.012>.
- [88] FN-Sambandet. «FNs bærekraftsmål.» (1. feb. 2024), adresse: <https://fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal> (sjekket 14.05.2024).

Vedlegg A

Forskjeller mellom elektrolyttypeter

I tabellen vises en oversikt over ulike elektrolyttypeter. Forklaring på begrep:

- EV: celledspenning, V
- VL (veldig lav), L (lav), M (moderat), H (høy), VH (veldig høy)

Tabell A.1: Forskjeller mellom ulike elektrolyttypeter. Hentet fra Beguin og Frackowiak [46].

Elektrolytt	EV	Kostnad	Toksisitet
Vannbasert	L	L	L
Organisk	M	M/H	M/H
Ioniske væsker	H	VH	L

Vedlegg B

Elektrodetyper for superkondensatorer

Tabell B.1: Elektrodetyper for SK-er hentet fra Beguin og Frackowiak [46].

Elektrodemateriale	OVA* (m ² /g)	Vannbasert	C (F/g)	
			Organisk	Ioniske væsker
Aktivert karbon	1000–3000	200–400	100-150	100-150
Templat karbon	500–2500	120–350	120-135	150
Karbonnanorør	120–500	20–180	20-80	20-45
Karbidavledet karbon	1000–1600	—	100-140	100-150
Svart karbon	250–2000	<300	—	—
Aerogel/xerogel	400–1000	40–220	<160	—

* Overflateareal

Vedlegg C

Sammenligning av batteri

Tabell som benyttes for å begrense utvalget av batterityper som sammenlignes i analysen. Hvert kriterium rangeres fra 1 til 5, hvor 1 er best.

Begrensende poengsum:

- Total poengsum = <25
- Effekt- og sykluslevetid = <5 .

Tabell C.1: Sammenligning av sekundærbatterier hentet fra Beard *et al.* [29].

System	Energi-tetthet	Effekt-tetthet	Flat discharge profil	Drift ved lave temperaturer	Charge retention	Charge acceptance	Virkning-sgrad	Syklus-levetid	Mekaniske egenskaper	Kostnad	Total poengsum	Poengsum fra effekt- og sykluslevetid
Lead acid												
Pasted	4	4	3	3	4	3	2	3	5	1	32	7
Tubular	4	5	4	3	3	3	2	2	3	2	31	7
Planté	5	5	4	3	3	3	2	2	4	2	33	7
Sealed	4	3	3	2	3	3	2	3	5	2	30	6
<i>Lithium metal</i>	1	3	3	2	1	3	3	4	3	4	27	7
<i>Lithium ion</i>	1	2	3	2	1	1	1	1	2	2	16	3
Nickel-cadmium												
Pocket	5	3	2	1	2	1	4	2	1	3	24	5
Sintered	4	1	1	1	4	1	3	2	1	3	21	3
Sealed	4	1	2	1	4	2	3	3	2	2	24	4
<i>Nickel-iron</i>	5	5	4	5	5	2	5	1	1	3	36	6
<i>Nickel-metal hydride</i>	2	1	2	2	3	1	2	2	2	3	20	3
<i>Nickel-zinc</i>	2	1	2	3	4	3	3	4	3	3	28	5
<i>Silver-zinc</i>	1	1	4	3	1	1	5	2	3	4	25	3
<i>Silver-cadmium</i>	2	3	5	4	1	1	5	4	3	4	32	7
<i>Nickel-hydrogen</i>	2	3	3	4	5	3	5	2	3	5	35	5
<i>Silver-hydrogen</i>	2	3	4	4	5	3	5	2	3	5	36	5
<i>Zinc-manganese dioxide</i>	2	4	5	3	1	4	4	5	4	2	34	9

Vedlegg D

Karakteristikk for utvalgte superkondensatorer

Tabell D.1: Tekniske egenskaper for utvalgte superkondensatorer hentet fra Beard *et al.* [29].

Teknologitype	Utvikler	Status	Nominell spenning (V)	Kapasitans (F)	RC (s)	Wh/kg [*]	W/kg 95% [†]
Karbidavledet karbon med grafen	Skeleton Technologies	Prototype	3.4	3200	1.5	8.9	1730
Aktivert karbon/organisk elektrolytt	Ness/Maxwell	Kommersielt	3.0	3650	0.98	6.5	1875
Aktivert karbon/organisk elektrolytt	Skeleton Technologies	Kommersielt	2.85	3450	0.26	5.4	5891
For-litiumgrafitt/aktivert karbon	JSR Micro	Kommersielt	3.8	1100	1.2	10	2450
				1366	1,6	7,6	1366
For-litiumgrafitt/aktivert karbon	DAE-China	Prototype	3.8	850	3.5	12.4	993
Aktivert karbon blandet med metall oksider	Yunasko	Prototype	2.7	3200	7.8	30-35	3395
Hybrid karbon/PbO ₂ /svovelsyre	UCDavis	Lab ‡	2.2	13	2.8	9.7	1300
Li ₄ Ti ₅ O ₁₂ /CNF/aktivert karbon/organisk-elektrolytt	Tokyo Univ. Agric./Nippon Chemi-Con	Lab ‡	3.0	NA	NA	30 (estimert)	3000 (estimert)

* Brukbar energitetthet

† Effekttetthet utregnet med formel 5.5 (EF = 0,95)

‡ Uten emballasje, samlet vekt for alle aktive materialer i enheten

Vedlegg E

Karakteristikk for superkondensatorer

Tabell E.1: Egenskaper ved elektrokjemiske kondensatorer fra en rekke produsenter hentet fra Beard *et al.* [72].

Device	V Rate	C (F)	R ^c (mΩ)	RC (s)	Wh/kg ^a	W/kg ^b (95%)	W/kg ^d Match. Imped.	Vekt (kg)	Vol. (L)
EDLK-er									
Maxwell	2.7	2885	0.375	1.1	4.2	994	8836	0.55	0.414
Ioxus	2.85	3095	0.33	1.0	5.0	1355	12,065	0.51	0.41
Skeleton Tech.	2.85	3450	0.13	0.45	5.4	3353	29,809	0.52	0.39
Skeleton Tech.	3.4	3200	0.48	1.5	8.9	1730	15,400	0.40	0.096
Skeleton Tech.	3.0	3320	0.25	0.83	5.6	1878	17,310	0.54	0.39
Skeleton Tech.	3.0	1900	0.52	0.98	4.9	1430	13,520	0.34	0.22
Skeleton Tech.	2.85	4100	0.22	0.90	6.3	1956	19,230	0.53	0.39
Skeleton Tech	3.0	5000	0.25	1.25	8.4	1783	15,845	0.568	0.39
Yunasko *	2.75	1275	0.11	0.13	4.55	8791	78,125	0.22	0.15
DAE-China	2.7	1668	0.6	1.0	6.2	1734	15,420	0.197	0.15
DAE-China	2.7	990	1.8	1.78	4.9	801	6935	0.146	0.11
DAE-China	2.7	412	3.7	1.52	4.1	791	7037	0.07	0.054
NessMaxwell	3.0	3650	0.27	0.98	6.5	1875	16,666	0.50	0.394
Ness	2.7	3160	0.4	1.3	4.4	982	8728	0.522	0.379
HK-er									
Aowei-Kina	3,8	10 000	2,0	20	40	1142	9162	0,197	0,14
Aowei-Kina	4,1	10 000	2,0	20	65	1142	9162	0,197	0,14
DAE-Kina	3,8	850	4,5	3,8	12,4	993	8828	0,087	0,062
Yunasko	2,7	7200	1,4	10	26	1230	10 947	0,119	0,065
Yunasko	2,7	3200	1,5	7,8	30	3395	30 200	0,068	0,038
JSR Micro	3,8	2300	0,77	1,77	7,6	1366	12 200	0,387	0,214
JSR Micro	3,8	1100	1,15	1,26	10	2450	21 880	0,144	0,077

a) Energiinnhold ved konstant effekt på 400 W/kg, Vrated-1/2 Vrated; b) Effekt basert på $P = 9/16 \cdot (1 - EF) \cdot V_o^2/R$, EF = utladningseffektivitet; c) Steady-state motstand inkludert poremotstand; d) Tilpasset impedans effekt basert på $P = V_{oc}^2/4R_{DC}$; Alle enheter unntatt de med * er pakket i metall/plastbeholdere

Vedlegg F

Spesifikasjoner for ulike Li-ion cellyper

Tabell F.1: Generell karakteristikk for noen li-ion-celler [29].

Karakteristikk	LCO/grafitt NMC/grafitt NCA/grafitt <i>Energy cells</i>	NMC/grafitt LMO/grafitt <i>Power cells</i>	LFP/grafitt <i>Power cells</i>	LMO/LTO
Spenningsområde (V)	2,5–4,2 typisk 2,5–4,4 (noen celler)	2,5–4,2	2,5–3,6	2,8–1,5
Spenning (Gj. snitt) (V)	3,7–3,85	3,7	3,3	2,3
Spesifikk energi (Wh/kg)	175–275 sylindrisk 140–240 polymer	100–175	60–110	70
Energitetthet (Wh/L)	400–735 sylindrisk 370–600 polymer	250–460	125–250	120
<i>Continuous rate capability</i>	~3C	Over 30C	10 til 125C	10C
<i>Pulse-rate capability, C</i>	5	Over 100	Opp til 250	20
Sykluslevetid ved 100% DoD	500+	500+	1000+	4000+
Levetid	>5	>5	>5	>5
Selvtladringsrate (% / mnd.)	1–5	1–5	1–5	1–5
Oppladningstemperatur (°C)	0 til ~45	0 til ~45	0 til ~45	-20 til ~45
Utladningstemperatur (°C)	-20 til +60	-30 til +60	-30 til +60	-30 til +60
Minneffekt	Ingen	Ingen	Ingen	Ingen
Effekttetthet (puls) (W/L)	~2000	~10 000	~10 000	~2000
Spesifikk effekt (puls) (W/kg)	~1000	~4000	~4000	~1100

Vedlegg G

Ladeegenskaper for sekundærbatterier

Tabell G.1: Ladeegenskaper for sekundærbatterier [29].

System	Overladnings- mulighet	Temperaturområde for lading, °C	Effektivitet*	
			Ah, %	Wh, %
Litium-ion	Ingen	0 til 50	99	95
Nikkel kadmium:				
Sintered ventiler	Veldig bra	-55 til 75	70-80	60-70
Forseglet	Veldig bra	0 til 40	65-70	55-65
Nikkelmetallhydrid	Middels	0 til 40	65-70	55-65

* Dataen er relatert til normale opp- og utladningshastigheter ved romtemperatur

