

Dag F. Slålien

Bruk av DC for energiframføring i husstander med solcelleanlegg og batterilagring

Masteroppgave i Energi og Miljø

Veileder: Steve Vøller

Juni 2021

Dag F. Slålien

Bruk av DC for energiframføring i husstander med solcelleanlegg og batterilagring

Masteroppgave i Energi og Miljø
Veileder: Steve Vøller
Juni 2021

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk
Institutt for elkraftteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

Tradisjonelt sett har AC vært å foretrekke foran DC for energifremføring i husstander. Dette har vært tilfellet siden Nikola Tesla med sitt AC-system utkonkurrerte Thomas Edison med sitt DC-system på slutten av 1800-tallet. I senere tid har DC-systemet tatt igjen noe av forspranget, særlig når det kommer til overføring av energi over lange strekninger.

I dag er en stor andel av lastene vi bruker daglig avhengig av DC-teknologi for å fungere. Dette være seg PC, TV, mobiltelefon eller annen elektronikk. Alle disse lastene konverterer AC-spenningen fra nettet til DC-spenning, enten internt eller via en ekstern adapter. I tillegg til denne endringen på lastsiden er det et økende fokus på å produsere ren og fornybar energi. Dette gjøres økende i grad av privatpersoner med private solcelleanlegg. Siden solcelleanlegg også er DC-teknologi er det tenkelig at et DC-system for energiframføring i husstander kan være en mulig løsning i framtiden.

I dette arbeidet er det derfor undersøkt om et system som helt eller delvis forsyner lastene med DC-spenning kan være et alternativ til det eksisterende AC-systemet. Dette er gjort ved at det er designet to alternative systemløsninger, et hybrid-system og et rent DC-system. I hybrid-systemet forsynes lastene med intern DC-spenning fra en egen DC-bus gjennom en AC-DC-konverter, mens de originale AC-lastene fortsatt forsynes fra AC-nettet. I DC-systemet er det antatt at alle lastene kan forsynes fra DC.

Systemene er undersøkt ved modellering i programmet Matlab/Simulink. Her er de tre systemene simulert for tre scenarier, med en tidsperiode på henholdsvis 1 dag og 1 uke. Scenariene er; kun nettilkobling, nettilkobling og solproduksjon, og nettilkobling, solproduksjon og batterilagring.

Simuleringene resulterte i en gjennomsnittlig systemeffektivitet for AC- hybrid- og DC-systemet på henholdsvis 94,0 %, 96,2 % og 92,5 %. En feil gjort under simuleringene gjør at effektiviteten til DC-systemet egentlig er noe lavere enn 92,5 %. De årlige tapene sammenlignet med AC-systemet er 45 % lavere og 11 % høyere for henholdsvis hybrid- og DC-systemet. I tillegg er virkningen av batterilagring i systemer med lokal produksjon av solenergi undersøkt. Her er det funnet at graden av importert energi fra nettet kan reduseres til under 10 % sommerstid.

Det er, basert på simuleringene, samt sikkerhet og økonomiske vurderinger konkludert med at hybrid-system kan være et bra alternativ til dagens AC-system. Det understrekes likevel at det fortsatt kreves mye arbeid når det gjelder utvikling av praktiske løsninger, samt standarder for DC-baserte løsninger.

Abstract

Traditionally AC has been the preferred method for energy distribution in households. This has been the case since Nikola Tesla with his AC-system outcompeted Thomas Edison with his DC-system in the late 19th century. DC-systems has risen in later years due to its benefits regarding high power transfer across large distances.

Today a big part of our daily used loads are in need of DC-technology to work. PCs, TVs, mobile phones, and other electronics are more often than not powered by DC in some way. Either it is by internal conversion from AC to DC or from an external adapter. In addition to this change in technology on the load side there is an increasing wish to produce clean and renewable energy. This is increasingly done in homes with private photovoltaic systems. Since these systems are also DC based technology there is an idea that a DC based system could replace the existing AC system.

In this work it has been conducted a study to see if a DC or partly DC system could be an efficient replacement for the existing system. This is done by designing two DC based system. The first system is a hybrid system where the DC based loads are connected to a DC bus fed by an AC-DC converter. The second system is a DC system where all loads are assumed to be DC loads.

The systems are studied by modelling in Matlab/Simulink. The systems are simulated for three different scenarios. The first is where the systems are only connected to the grid. The second one is with grid connection and photovoltaic system. The third one is with grid connection, photovoltaic system and battery storage.

The results from the simulations show that the average efficiency for the AC, hybrid and DC systems are 94.0 % 96.2 % and 92.5 %. However, a mistake was made during the simulations that made the efficiency for the DC system higher than it really is. In addition to system efficiency yearly losses has been calculated. These are for the hybrid system 45 % lower than in the AC-system. For the DC system the yearly losses are found to be 11 % higher than in the AC system. The results also show that with battery storage the degree of imported energy from the grid can be reduced to under 10 %.

Based on the simulations together with safety reasons and an economical evaluation it is concluded that a hybrid system could be a valuable alternative to the existing AC system. There is however still a lot of work to be done regarding practical solutions for the DC based systems. In addition, standards regarding DC systems need to be developed.

Forord

Denne rapporten er skrevet i faget TET4905 Elektrisk energi, masteroppgave våren 2021, ved Norges naturvitenskaplige universitet (NTNU).

Jeg vil gjerne takke:

- Veileder Steve Vøller for god hjelp gjennom hele prosjektperioden.
- Rohit Agrawal og Juan Sagarduy for god hjelp med Matlab/Simulink.
- Eilif Hugo Hansen for hjelp ved bruk av smarthuset til NTNU.

Trondheim, Juni 2021

Dag F. Slålien

Innhold

Sammendrag	i
Abstract	ii
Forord	i
Symboler og forkortelser	vi
Tabeller	vii
Figurer	xii
1 Innledning	1
2 Teorigrunnlag	3
2.1 AC og DC gjennom historien	3
2.2 Fordeler og ulemper	4
2.2.1 Fysiske forskjeller	4
2.2.2 Vern i AC- og DC-systemer	5
2.2.3 Leveringskvalitet	7
2.2.4 Sikkerhet	8
2.3 Standarder for DC-systemer	8

2.4	Spenningsnivå	9
2.5	Kabler i AC- og DC-systemer	10
2.6	Ekstra utfordringer med DC-systemer	12
2.7	Solceller i husholdninger	12
2.8	Batterilagring i husholdninger	15
2.8.1	Pris på batterilagring	15
2.9	DC-systemer i utvikling	17
2.9.1	Hengelo	17
2.9.2	DC flexhouse	17
2.9.3	ABN AMRO bank i Amsterdam	17
2.9.4	Green Datacenter AG	17
3	Teori for modell	19
3.1	Konvertere	19
3.1.1	Introduksjon til konvertere	19
3.1.2	Den sentrale konverteren (VSC-konverter)	20
3.1.3	AC-last konverter (PFC-konverter/diode-bru konverter)	21
3.1.4	Solcelle-konverter (MPPT boost-konverter)	24
3.1.5	Batteri konverter (Buck-boost-konverter)	24
3.1.6	DC-last konverter (buck-konverter)	25
3.1.7	Oppsummering - konvertere	26
4	Systemdesign	27
4.1	Introduksjon til systemdesign	27
4.2	Smarthuset	27
4.3	Det eksisterende systemet - AC	30
4.3.1	Last	30

Metode for kartlegging av laster	30
Lastprofil	31
4.3.2 Det eksisterende systemet - AC - med solcelle og batteri	35
4.3.3 Solproduksjon	35
4.3.4 Batteri - dimensjonering	36
4.4 Forslag til alternative systemløsninger	37
4.4.1 LØSNING 1: Hybrid	37
Valg av DC-spenning	37
Dimensjonering av DC-DC-konverter	38
4.4.2 LØSNING 2: DC-system	40
Valg av DC-spenning	42
Dimensjonering av DC-DC-konverter	43
4.5 VSC/Inverter	45
5 Modell	46
5.1 Introduksjon til modellering	46
5.1.1 Modelleringsprosessen	47
5.2 Beskrivelse av modell	47
5.2.1 Ytre nett	48
5.2.2 AC-laster	48
5.2.3 DC-laster	50
5.2.4 VSC	51
5.2.5 Sol	52
5.2.6 Batteri	53
Kontroll	53
5.3 Beregning av tap	55
5.4 Svakheter ved modellen	56

6 Simulering	57
7 Resultater	60
7.1 Introduksjon til resultater	60
7.2 Nett	60
7.3 Nett + sol	63
7.4 Nett + sol + batteri	66
7.5 DC - 1 uke	68
7.6 Spenning DC-bus 1 og 2	71
7.7 Oppsummering av resultater	72
7.8 Det økonomiske aspektet	77
8 Diskusjon	79
8.1 Systemløsning	79
8.2 Sammenligning med litteraturverdier	80
8.3 AC versus DC	80
8.4 Metode	81
8.5 Kommentar til feil gjort ved simulering	82
9 Konklusjon	84
9.1 Videre arbeid	85
Bibliografi	91
A Vedlegg	i
A.1 Dokumentasjon av DC-forsyning	i
A.2 Lastprofil og solprofil - 1 UKE	ix
A.3 Resultater - rådata	xi

Symboler og forkortelser

<i>A</i>	ampere
<i>AC</i>	alternating current
<i>Ah</i>	amperetimer
<i>BESS</i>	battery energy storage system
<i>BIPV</i>	bygningsintegrerte solceller
<i>C</i>	kapasitans
<i>DC</i>	direct current
<i>E</i>	energi
<i>F</i>	farad
<i>Hz</i>	hertz
<i>I</i>	strøm
<i>IGBT</i>	insulated-gate bipolar transistor
<i>Kr</i>	kroner
<i>kWh</i>	kilowatt timer
<i>LED</i>	lysemitterende diode
<i>m</i>	meter
<i>MPPT</i>	maximum power point tracking
<i>NEK</i>	norsk elektroteknisk komite
<i>P</i>	elektrisk kraft
<i>PC</i>	personal computer
<i>PFC</i>	power factor corrector
<i>PI</i>	proporsjonal integrasjon
<i>USB</i>	universal serial bus
<i>V</i>	spenning
<i>VA</i>	voltampere
<i>VSC</i>	voltage source converter
<i>W</i>	watt
<i>Wp</i>	watt peak

Tabeller

2.1	Eksempel på automatsikringer som er laget for DC-systemer.	7
2.2	Viser fordeler og ulemper med de ulike spenningsnivåene.	10
3.1	En oppsummering av virkningsgrad, eventuelt hvor man kan finne den, for de ulike konvertertypene.	26
4.1	Alle kartlagte laster med merkeeffekt, brukstid per døgn, energiforbruk per døgn og kabellengde når lastene er plassert i smarthuset.	32
4.2	Virkningsgrad for AC-DC-konvertere som forsyner de interne DC-lastene.	34
4.3	Viser fordelingen av DC-lastene mellom DC-bus 1 og DC-bus 2.	38
4.4	Viser potensielle energibesparelser ved overgang til DC-produkter. Data for besparelser er hentet fra [1].	41
4.5	Viser fordelingen av laster mellom DC-bus 1 og DC-bus 2.	43
6.1	Viser en oversikt over scenarioene som skal simuleres for en tidsperiode på 1 dag.	58
6.2	Viser en oversikt over scenarioene som skal simuleres for en tidsperiode på 1 uke.	59
7.1	Viser de totale tapene i de tre systemene ved nettilkobling, solproduksjon og batterilagring. I tillegg er de totale tapene for et helt år regnet ut og markert med gult til høyre. Ved utregning av de årlige tapene er det antatt at tapene for sommer og vinter gjelder for et halvt år hver.	75

Figurer

2.1	Grafen til venstre viser en AC-spenning der RMS og toppunkt er merket. Grafen til høyre viser en DC-spenning med konstant amplitude. Hentet fra [2].	4
2.2	Grafen til venstre viser et typisk forløp for ein feil i et AC-nett. Grafen til høyre viser det samme for et DC-nett. Hentet fra [3].	6
2.3	Figuren til venstre viser en fase-jord feil, mens figuren til høyre viser en fase-fase feil. Hentet fra [4].	7
2.4	Figuren viser maksimal overførbar effekt som funksjon av kabellengde for henholdsvis 48 V (tykk linje) og 120 V (tynn linje). Hentet fra [5]. . .	11
2.5	Figuren viser maksimal overførbar effekt som funksjon av kabellengde for henholdsvis 230 V (tykk linje) og 326 V (tynn linje). Hentet fra [5]. . .	12
2.6	Figuren viser den totale installerte sol-effekten i Norge i 2017, 2018 og 2019. Den viser også hvordan effekten er fordelt. Hentet fra [6].	13
2.7	Figuren viser utviklingen av solkraft i Norge fra 2010 til 2020. Hentet fra [7].	14
2.8	Figuren viser prisutviklingen på solceller for husholdninger (grå linje), det kommersielle markedet (oransje linje) og det industrielle markedet (svart linje) i Norge fra 2013 til 2019. Hentet fra [6].	14
2.9	Prisutviklingen for litium-ion batterier fra 2010 til 2018. Hentet fra [8]. . .	16
2.10	Forventet pris på litium-ion batterier i perioden fram mot 2030. Hentet fra [8]	16

3.1	Figuren viser konseptuelt hvordan en konverter er bygd opp. Her vises en konverter som styres ved hjelp av en kontroll-løkke. Signalet ut av konverteren prosesseres av en kontroller slik at signalet kan styres slik man ønsker.	20
3.2	Kretsskjema for en VSC-konverter.	21
3.3	Kretsskjema for en bru-likeretter.	22
3.4	Kretsskjema for en PFC-konverter.	22
3.5	Virkningsgrad for AC-DC-konvertere med merkeffekt mellom 0 og 250 W. Data er hentet fra [9].	23
3.6	Virkningsgrad for AC-DC-konvertere med merkeffekt mellom 0 og 3000 W. Data er hentet fra [10].	23
3.7	Kretsskjema for en buck-boost-konverter.	24
3.8	Kurve for virkningsgrad for en DC-DC-konverter med merkeffekt på 1200 W. Hentet fra [11].	25
4.1	Plantegning av smarthus. Sikringsskapet er inntegnet for referanse.	28
4.2	Kursfortegnelse for kursene i smarthuset.	29
4.3	Enlinjeskjema for det eksisterende AC-systemet. Figuren viser de to måtene en last kan være koblet til AC-bussen på.	30
4.4	Lastprofil for kjøleskap. Dette er et eksempel på en last som er aktiv hele døgnet.	33
4.5	Lastprofil for tørketrommel. Dette er et eksempel på en last som er aktiv kun i sekvenser.	33
4.6	Total lastprofil for alle kartlagte laster.	34
4.7	Figuren til venstre viser en forenklet versjon av systemet og er inspirert fra [12]. Figuren til høyre viser enlinjeskjemaet til AC-systemet med BESS (battery energy storage system) og solcelleanlegg.	35
4.8	Viser solproduksjonen for sommer (gul linje) og vinter (blå linje).	36
4.9	Figuren til venstre viser en forenklet versjon av systemet og er inspirert fra [12]. Figuren til høyre viser enlinjeskjemaet til hybrid-systemet med BESS (battery energy storage system) og solcelleanlegg.	37

4.10	Viser lastprofilen til lastene på DC-bus 2.	39
4.11	Figuren til venstre viser en forenklet versjon av systemet og er inspirert fra [12]. Figuren til høyre viser enlinjeskjemaet til DC-systemet med BESS (battery energy storage system) og solcelleanlegg.	40
4.12	Viser lastprofilen etter at besparelsene ved overgang til DC-produkter er tatt med.	42
4.13	Viser lastprofilen til alle lastene som er forsyne fra DC-bus 2.	44
4.14	Tabellen viser en oversikt over samtidigehtsfaktorer for boliger og andre bygg [13].	44
5.1	Viser hele modelloppsettet i Simulink.	48
5.2	Viser hvordan det ytre nettet er modellert i Simulink. Dette er her modellert som en trefase spenningskilde.	48
5.3	Viser hvordan en intern DC-last er modellert i Simulink.	49
5.4	Viser hvordan en direkte AC-last er modellert i Simulink.	49
5.5	Viser hvordan en DC-last forsynt fra DC-bus 1 er modellert i Simulink.	50
5.6	Viser hvordan en DC-last forsynt fra DC-bus 2 er modellert i Simulink.	50
5.7	Viser VSC-konverteren som kobler AC-bussen sammen med DC-bus 1.	52
5.8	Solproduksjon er implementert i modellen ved bruk av en ideell strømkilde.	52
5.9	Batteriet er implementert i modellen ved bruk av en ideell strømkilde som kontrolleres av en batterikontroller. Konverteren som er koblet til strømkilden er kun for å inkludere tap i konverteren.	53
5.10	Viser batterikontrolleren til systemet. Kontrolleren er en PI-regulator som når den er aktiv regulerer lastflyten til batteriet slik at systemet ikke utveksler noe effekt med det ytre nettet.	54
5.11	Viser flytdiagrammet som kontrollerer om batterikontrolleren er aktiv eller ikke.	55
7.1	Viser systemeffektiviteten når systemene kun er koblet til nettet, uten solproduksjon og batterilagring.	61
7.2	Viser fordelingen av tapene om sommeren i systemene ved kun nettkobling.	62

7.3	Viser fordelingen av tapene om vinteren i systemene ved kun nettilkobling.	62
7.4	Viser graden av import fra nett når systemene kun er koblet til nettet.	63
7.5	Viser systemeffektiviteten når systemene er koblet til nettet og har lokal produksjon av solenergi. Systemet er har ikke batterilagring i dette tilfellet.	63
7.6	Viser fordelingen av tapene om sommeren i systemene ved nettilkobling og lokal produksjon av solenergi.	64
7.7	Viser fordelingen av tapene om vinteren i systemene ved nettilkobling og lokal produksjon av solenergi.	65
7.8	Viser graden av import fra nett når systemene er koblet til nettet og har lokal produksjon av solenergi.	65
7.9	Viser systemeffektiviteten når systemene er koblet til nettet, har lokal produksjon av solenergi og batterilagring.	66
7.10	Viser fordelingen av tapene om sommeren i systemene ved nettilkobling, lokal produksjon av solenergi og batterilagring.	67
7.11	Viser fordelingen av tapene om vinteren i systemene ved nettilkobling, lokal produksjon av solenergi og batterilagring.	67
7.12	Viser graden av import fra nett når systemene er koblet til nettet, har lokal produksjon av solenergi og batterilagring.	68
7.13	Viser systemeffektiviteten til DC-systemet ved 100 % solproduksjon og henholdsvis 100 % (til venstre) og 200 % (til høyre) batterikapasitet.	69
7.14	Viser systemeffektiviteten til DC-systemet ved 200 % solproduksjon og henholdsvis 100 % (til venstre) og 200 % (til høyre) batterikapasitet.	70
7.15	Viser importgraden til DC-systemet ved 100 % solproduksjon og henholdsvis 100 % (til venstre) og 200 % (til høyre) batterikapasitet.	70
7.16	Viser importgraden til DC-systemet ved 200 % solproduksjon og henholdsvis 100 % (til venstre) og 200 % (til høyre) batterikapasitet.	71
7.17	Viser spenningsprofil for lastene på DC-bus 1.	71
7.18	Viser spenningsprofil for lastene på DC-bus 2.	72
7.19	SOC (state of charge) for batteriet i DC-systemet med nettilkobling, lokal produksjon av solenergi og batterilagring. Grafen er for sommer-scenarioet. Y-aksen går fra 0 til 1, mens x-aksen viser simulasjonstiden i sekunder.	74

7.20	Viser SOC for DC-systemet med 100 % solproduksjon og 100 % batterikapasitet. Y-aksen går fra 0 til 1, mens x-aksen viser simulasjonstiden i sekunder.	76
7.21	Viser SOC for DC-systemet med 100 % solproduksjon og 200 % batterikapasitet. Y-aksen går fra 0 til 1, mens x-aksen viser simulasjonstiden i sekunder.	77
A.1	Viser komponentene i en kjøleskap-krets. Hentet fra: [14].	ii
A.2	Viser komponentene i en oppvaskmaskin-krets. Hentet fra: [15].	iii
A.3	Viser komponentene i en aircondition-krets. Hentet fra: [16].	iv
A.4	Viser komponentene i en vaskemaskin-krets. Hentet fra: [17].	v
A.5	Viser komponentene i en 4K LCD TV. Hentet fra: [18].	vi
A.6	Viser komponentene i en LED-krets. Hentet fra: [19].	vii
A.7	Viser eksempel på en PC-adapter.	viii
A.8	DC-lastprofil for 1 uke.	ix
A.9	Profil for solproduksjon for 1 uke, sommerstid.	ix
A.10	Profil for solproduksjon for 1 uke, vinterstid.	x
A.11	Resultater fra simuleringene.	xi

Kapittel 1

Innledning

Historisk sett har vekselstrøm (AC) trumfet likestrøm (DC) når det gjelder energiframføring i husstander. Dette ble i stor grad avgjort i strømkrigen mellom Nikola Tesla og Thomas Edison sent på 1800-tallet [20]. I senere år har derimot DC fått sin revansje. Flere og flere av lastene vi bruker daglig forsynes i dag med DC-spenning. Laster som PC, mobiltelefon, TV og annen forbrukerelektronikk er avhengig av DC for å fungere. Siden distribusjonen fortsatt foregår med AC må spenningen konverteres fra AC til DC for å kunne forsyne disse lastene. Disse AC-DC-konverterene kan ha effektivitet på under 90 % og vil derfor føre med seg en del tap [9].

Samtidig som at en større andel av lastene på en eller annen måte er DC-teknologi, øker mengden kraft som produseres fra solcelleanlegg. Bare i 2020 ble det installert 40 MW ny solkraft i Norge. Solcelleanlegg er DC-basert teknologi og kraften fra solcellene må konverteres til AC i dagens forsyningssystem. Denne konverteringen fører også med seg tap.

Med økende bruk av DC-teknologi både på last- og produksjonssiden er det naturlig å undersøke muligheten for å ha et DC-system for energiframføring i husstander. I et DC-system vil man kunne unngå mange av konverteringene mellom AC og DC som skjer i dagens tradisjonelle AC-system. Dette vil potensielt føre til lavere tap i systemet.

Målet med dette arbeidet er derfor å undersøke i hvilken grad det er mulig å forsyne lastene i en husstand med DC. Dette vil gjøres ved at det utarbeides to alternative systemløsninger til det utbredte AC-system. Et hybrid-system der energien forsynes både med AC og DC, og et rent DC-system der alle lastene er antatt å være DC-laster. Begge systemene vil designes med solcelleanlegg og batterilagring. De to alternative systemløsningene vil sammenlignes med AC-systemet på punkter som effektivitet, og i hvor stor grad systemene er avhengig av energi fra nettet. Disse systemene vil modelleres ved bruk av

Matlab/Simulink. I tillegg vil det økonomiske aspektet vurderes sammen med aspekter som leveringskvalitet og sikkerhet.

Første del av rapporten vil ta for seg ulike aspekter om DC-teknologi. Dette vil blant annet være historisk utvikling, fordeler og ulemper med AC og DC, spenningsnivå, kabler og standarder for DC-systemer. Videre vil de ulike systemløsningene designes og beskrives. Deretter vil modellen som er brukt beskrives i detalj. Avslutningsvis vil resultatene sammen med en rekke andre aspekter diskuteres før det vil bli lagt fram en konklusjon som oppsummerer arbeidet.

Kapittel 2

Teorigrunnlag

2.1 AC og DC gjennom historien

Tidlig i elektrisitetens historie var det Edison og hans DC-system som var mest utbredt. Edison sitt system var basert på tett plasserte kullkraftverk som produserte energi til nærliggende kunder. Dette viste seg derimot raskt å være lite effektivt da DC-systemet ikke var egnet for å frakte energi over lengre avstander. Mulighetene ble dermed noe begrenset. Edisons største konkurrent, Nikola Tesla, utviklet derimot et system som var bedre egnet for nettopp dette. AC-systemet med komponenter som generatoren, induksjonsmotoren og særlig transformatoren gjorde det mulig å frakte energien over lengre avstander samtidig som tapene i systemet ble holdt på et akseptabelt nivå. Den store fordelen med AC-systemet på denne tiden var at spenningen kunne transformeres opp og ned slik som det passet seg, denne luksusen hadde ikke Edison med sitt DC-system og han ble dermed utkonkurrert [21] [20].

I dag er det gjort store teknologiske framskritt som har gjort DC-systemet til en reell konkurrent til AC-systemet. Dette gjelder særlig for overføring av høy effekt over lang avstand. I slike systemer har DC-teknologi store fordeler, sammenlignet med AC-systemet, som lavere tap og mulighet for bedre kontroll av energiflyten [22].

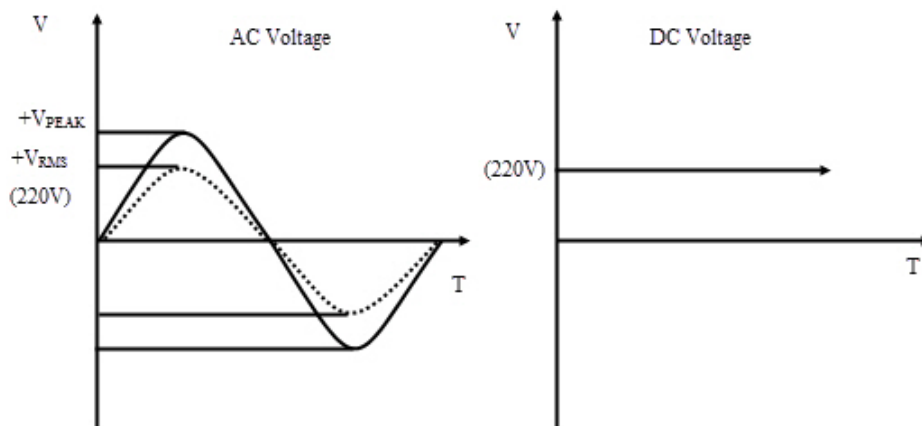
På forbrukersiden har også DC-teknologi blitt mer og mer utbredt i løpet av de siste tiårene. En økende del av lastene som er i bruk i dag er forsynt med DC. Dette er laster som forbrukerelektronikk, datamaskiner og belysning (LED). Disse lastene blir forsynt med DC enten fra en intern eller en ekstern konverter. Disse konverteringene mellom AC og DC i nettet fører med seg tap og andre forstyrrelser som harmoniske strømmer [22].

2.2 Fordeler og ulemper

2.2.1 Fysiske forskjeller

Av natur er AC- og DC-systemer svært forskjellige. Den største forskjellen er at i et AC-system så svinger spenninger og strømmer med en system-frekvens som i Norge er 50 Hz. Et DC-system derimot har ingen frekvens og spenninger og strømmer har konstant amplitude slik som vist til høyre i figur 2.1. Et system uten frekvens fører med seg både fordeler og ulemper. En fordel er at uten frekvens vil ikke systemet ha noen induktans som vil redusere den totale impedansen som igjen reduserer eventuelle spenningsfall. Et DC-system har heller ingen «skinneffekt» som eliminerer utfordringen med at ikke hele tverrsnittet i kabler kan benyttes. Dette fører videre til at kabeltverrsnittet i DC-systemer kan reduseres som igjen vil redusere vekt og kostnad [23].

En fordel med et system med frekvens, som AC-systemet, er at man enklere kan heve og senke spenningen ved hjelp av en transformator. Dette må i et DC-system gjøres ved hjelp av avansert og kostbar kraftelektronikk som sammenlignet med transformatoren må sies å være relativt ny teknologi [24].



Figur 2.1: Grafen til venstre viser en AC-spenning der RMS og toppunkt er merket. Grafen til høyre viser en DC-spenning med konstant amplitude. Hentet fra [2].

Et DC-system har som følge av at det ikke har noen frekvens heller ikke frakt av reaktiv effekt. Frakt av reaktiv effekt i et AC-system fører til høyere tap da det vil flyte en høyere strøm for å overføre samme mengde energi. En lavere strøm betyr også at det kan benyttes lavere tverrsnitt på kabler som igjen reduserer kostnad [25].

Figur 2.1 viser også sammenhengen mellom RMS-verdien av en AC-spenning og amplituden til en DC-spenning. Dette er en viktig sammenheng da RMS-verdien til en AC-

spenning kan defineres som den spenningen som må til for å skape samme effekt i et varmelement med samme verdi på DC-spenning. Sagt med et eksempel; en AC-spenning med amplitude på 311 V gir i følge ligning 2.1 en RMS-verdi på 220 V, en DC-spenning vil da måtte ha en amplitude på 220 V for å utvikle samme effekt i et varmelement [26] [27].

$$V_{RMS} = \frac{V_{peak}}{\sqrt{2}} \quad (2.1)$$

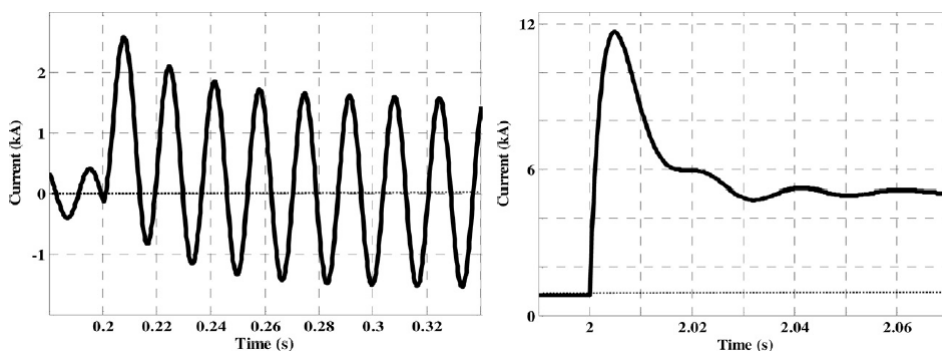
En annen fordel med DC-spenning sammenlignet med AC-spenning er at det kreves en høyere DC-spenning før det oppstår gjennomslag i isolasjonsmateriale eller annet utstyr. Dette kan forklares med ligning 2.2 som viser spenningspåkjenningen for DC sammenlignet med AC. Dette fører videre til at mengden isolasjonsmateriale kan reduseres i et DC-system som igjen kan redusere kostnad [23].

$$V_{DC} = \sqrt{2} \cdot V_{AC} \quad (2.2)$$

2.2.2 Vern i AC- og DC-systemer

En av de største forskjellene mellom AC- og DC-systemer er hvordan systemet skal beskyttes ved feil. Når feilstrømmer skal brytes har DC-systemet noen ekstra utfordringer sammenlignet med AC-systemet. Feilstrømmer i et AC-system brytes av automatsikringer som enten bryter strømmen ved høye kortvarige kortslutninger, eller langvarig overbelastning. Disse automatsikringene benytter seg av at AC-strømmer krysser null to ganger hver periode. Denne nullgjennomgangen gjør det mye enklere å bryte feilstrømmen da amplituden til strømmen vil være nær null. Kurven til venstre i figur 2.2 viser et typisk feilforløp for en AC-feil [3].

Som allerede nevnt har DC-systemer noen ekstra utfordringer når det kommer til bryting av feilstrømmer sammenlignet med et AC-system. Siden strømmer og spenninger i DC-systemet ikke svinger med en frekvens, vil heller ikke feilstrømmene gjøre det. Altså har ikke DC-feilstrømmer nullgjennomgang. Dette gjør at vern som brukes i AC-systemer ikke kan brukes i DC-systemer da bryting av disse strømmene krever andre egenskaper hos vernene. Kurven til høyre i figur 2.2 viser et typisk feilforløp for en DC-feil [3].

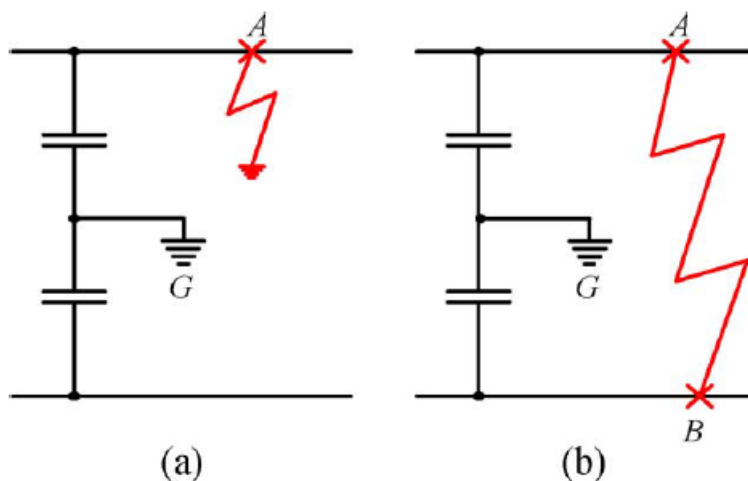


Figur 2.2: Grafen til venstre viser et typisk forløp for ein feil i et AC-nett. Grafen til høyre viser det samme for et DC-nett. Hentet fra [3].

En annen utfordring ved bryting av feilstrømmer i DC-systemer er amplituden på feilstrømmene. I et AC-system vil feilstrømmen begrenses av resistansen og reaktansen i systemet. Da DC-systemer ikke har reaktans vil det i et DC-system kun være resistansen som begrenser strømmen. Dette fører til at amplituden på feilstrømmene i et DC-system kan bli høyere enn i et AC-system. I tillegg vil den reduserte mengden av demping i systemet føre til at DC-feilstrømmer stiger mye raskere en AC-feilstrømmer. Dette kan føre til skader på kraftelektronikk og andre skjøre komponenter [28].

Den raske stigningen til DC-feilstrømmer kan også føre til problemer med selektiviteten i systemet. Det krever svært raske vern for at selektiviteten i et DC-system skal opprettholdes. Det kan også benyttes vern med digital kommunikasjon som kan bedre selektiviteten ytterligere [3].

I tillegg til den tekniske utfordringen med å bryte en DC-strøm er et DC-system ofte mer komplisert enn et tradisjonelt AC-system. Et DC-system er tenkt å inneholde solcelleproduksjon, batteri i tillegg til å være koblet til AC-nettet gjennom en konverter. Alt dette er faktorer som må tas hensyn til når vern av et DC-system skal designes [3].



Figur 2.3: Figuren til venstre viser en fase-jord feil, mens figuren til høyre viser en fase-fase feil. Hentet fra [4].

Type	Produsent	U[V]	I[kA]	System
Automat	ABB [29]	220/440	10	AC/DC
Automat	Scheiner [30]	110-220	6-20	DC
Automat	Siemens [31]	400	20-35	AC/DC

Tabell 2.1: Eksempel på automatsikringer som er laget for DC-systemer.

2.2.3 Leveringskvalitet

Hvor bra et elektrisk system fungerer kan ofte måles på leveringskvaliteten. Leveringskvalitet er av de viktigste aspektene når et AC-system skal designes. Det vil derfor være svært viktig at et DC-system oppfyller de samme kravene for at det skal kunne ta opp konkurransen med det utbredte AC-systemet.

I [24] er det fokusert på den sentrale AC-DC-konverteren når leveringskvaliteten undersøkes. Det er nevnt at en stabil og solid konverter som kan konverterte AC-spenning til DC-spenning uten å overføre forstyrrelser fra AC-nettet vil forbedre leveringskvaliteten. Videre nevnes det at en konverter som kan tolerere spenningsvariasjoner fra +10 % til -15 % vil bedre spenningskvaliteten til lastene. Dersom konverteren i tillegg kan takle et spenningsfall på 50 % i 1/10 sekund vil man kunne oppnå et system som i svært liten grad påvirkes av frekvensvariasjoner i nettet. Dette vil bedre leveringskvaliteten kraftig da spenning- og frekvensvariasjoner er de to feilkildene som fører til størst økonomisk tap i det norske nettet.

2.2.4 Sikkerhet

Det vil alltid være en viss fare knyttet til et elektrisk system. De to hovedkildene til fare i en husholdnings-installasjon er brannfare og sjokkskade. Svakheter i installasjonen kan føre til varmgang som igjen kan føre til brann. Feil ved systemet kan også føre til at mennesker kan utsettes for elektrisk støt. Sikkerhet er derfor prioritert nummer en når et elektrisk system skal designes [32].

En stor kilde til brannfare i husholdninger er varmgang i konvertere i elektriske komponenter som f.eks ladere til mobiltelefon eller PC. I et DC-system vil antallet slike konvertere reduseres samtidig som de nødvendige konverterene vil være av høy kvalitet. Dette vil være med å redusere brannfaren betydelig. I tillegg er det sannsynlig at deler av et DC-system har lavere systemspenning som igjen vil redusere sjansen for isolasjonsfeil som kan føre til brannfare og fare for elektrisk støt [24].

2.3 Standarder for DC-systemer

Ved design og bygging av elektriske systemer er riktig bruk av regelverk avgjørende for riktig funksjon og sikkerhet. For det eksisterende AC-systemet er det etablerte standarder som skal følges. Denne standarden i Norge er kalt NEK 400. Dette er en normsamling som skal sikre riktig utførelse av elektriske lavspenningsanlegg [33]. Sitatet under er hentet direkte fra NEK 400 og beskriver hva normsamlingen er.

«NEK 400 spesifiserer krav til prosjektering, utførelse og verifikasjon av elektriske installasjoner. Kravene skal sikre personer, husdyr og eiendom mot farer og skader som kan oppstå ved bruk av installasjonen, og sikre at installasjonen er egnet for den forutsatte bruk.»

NEK 400 tar i hovedsak for seg hvordan AC-systemer skal utføres og er foreløpig ikke veldig utfyllende når det gjelder DC-systemer. Dette er naturlig da AC-systemer er langt mer utbredt. NEK 400 nevner likevel noen temaer som er relatert til DC-systemer, som utkoblingstid ved feil og berøringsspenning ved jordfeil [34].

Det er i dette arbeidet ikke funnet noen norsk standard som omhandler DC-systemer direkte. Når det gjelder internasjonale standarder har EMerge Alliance en oversikt over standarder som omhandler DC-systemer [35]. IEC publiserte også i 2015 et skriv med tittelen «Code of Practice for Low and Extra Low Voltage Direct Current Power Distribution in Buildings». Det har ikke lyktes å få tilgang til dette dokumentet, men det kan leses fra beskrivelsen at det inneholder krav for design, operasjon og vedlikehold av DC-systemer. I tillegg inneholder det blant annet løsninger for hvordan eksisterende AC-kabel-nettverk kan benyttes i nye DC-systemer [36].

2.4 Spenningsnivå

Ved design av et DC-system vil valg av spenningsnivå være avgjørende for funksjonaliteten til systemet. Et av hovedmålene med å introdusere et DC-system er å redusere antallet konverteringer mellom AC og DC, og mellom ulike spenningsnivåer. Ulike laster forsynes fra ulike spenningsnivåer, dette gjelder både de eksisterende interne DC-lastene og eventuelle fremtidige DC-lastene. Dersom DC-systemer blir utbredte er det grunn til å tro at det vil skje en utvikling mot direkte DC-forsyning av laster som i dag er forsynt fra AC. Det er derfor avgjørende at spenningsnivået(-ene) i DC-systemet designes slik at det passer overens med spenningsnivået på eksisterende og framtidige DC-lastene.

Det er gjort ulike studier på temaet spenningsnivå i DC-systemer. I [5] er det blant annet undersøkt mulighetene for å benytte DC-systemer i næringsbygg. Det er i dette arbeidet sett på tap og spenningsfall i systemet for flere ulike spenningsnivåer. De undersøkte spenningsnivåene i dette studiet er 48 V, 120 V, 230 V og 326 V. Punktene under beskriver hvorfor akkurat disse spenningsnivåene er valgt.

- 48 V er valgt fordi denne spenningen går under kravet om beskyttelse mot direkte kontakt med spenningsførende del.
- 120 V er valgt fordi denne spenningen går under kravet om beskyttelse mot indirekte kontakt. Indirekte kontakt vil si kontakt med anleggsdel som kan bli spenningsførende ved feil.
- 230 V er valgt da dette er den DC-spenningen som tilsvarer 230 V AC RMS. Denne DC-spenningen vil, som allerede forklart i kapittel 2.2.1, utvikle den samme varmen i en resistans som 230 V AC RMS.
- 326 V er valgt da dette er output-spenningen til en standard diodelikeretter som er å finne i mange interne DC-lastene.

Resultatene av arbeidet i [5] er at med systemspenning på 48 V vil spenningsfall og tap i kabler være for høye til at man kan benytte samme kabler som i det originale AC-nettet. For de andre spenningsnivåene er det mulig å benytte samme kabler med akseptable nivåer av spenningsfall og tap. Det konkluderes i dette arbeidet med at 326 V er det optimale spenningsnivået av de spenningsnivåene som ble undersøkt her.

I [37] er også de samme spenningsnivåene som over undersøkt. I tillegg er 400 V DC undersøkt. Dette arbeidet tar for seg både husstander og kommersielle anlegg. Det er her konkludert med at 48 V DC gir best resultater for husstander, mens 400 V DC gir best resultater for kommersielle anlegg som ofte består av større laster.

EMerge Alliance har satt 380 V DC som standard systemspenning for sine datasenter med DC energiforsyning. I følge Emerge Alliance er 380 V den spenningen som vil gi best balanse mellom sikkerhet og kostnad for komponenter i framtiden. Denne spenningen er også fordelaktiv i forhold til standard AC-spenning når det gjelder tap i kabler [38].

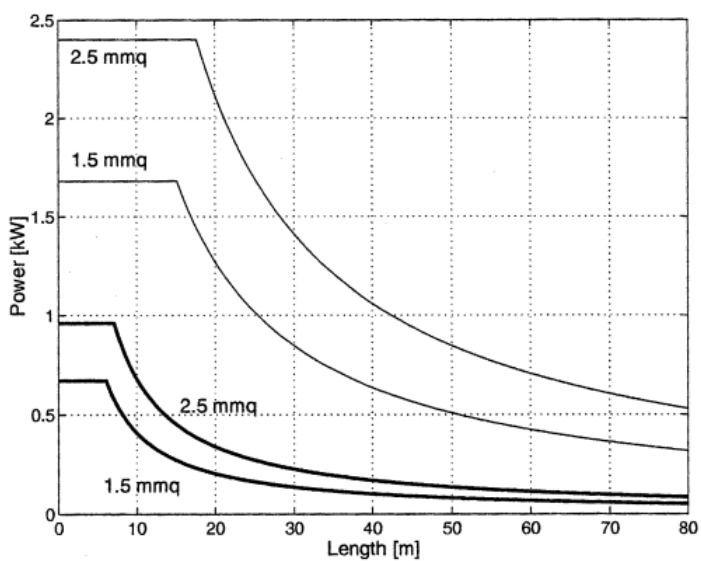
Spenningsnivå[V]	Fordeler	Ulemper
48	Sikkerhet Lave tap ved lave laster	Høye tap ved høye laster
120	Lite spenningsfall	Ingen klare
230	Lite spenningsfall Direkte kompatibel med resistive laster brukt i dagens AC-nett	Ingen klare
326	Kan benytte samme kabler som dagens AC-nett	Krever bedre jording og mer robuste vern Høyere berøringsfare
380/400	Lite tap ved høye laster	Krever bedre jording og mer robuste vern Høyere berøringsfare

Tabell 2.2: Viser fordeler og ulemper med de ulike spenningsnivåene.

2.5 Kabler i AC- og DC-systemer

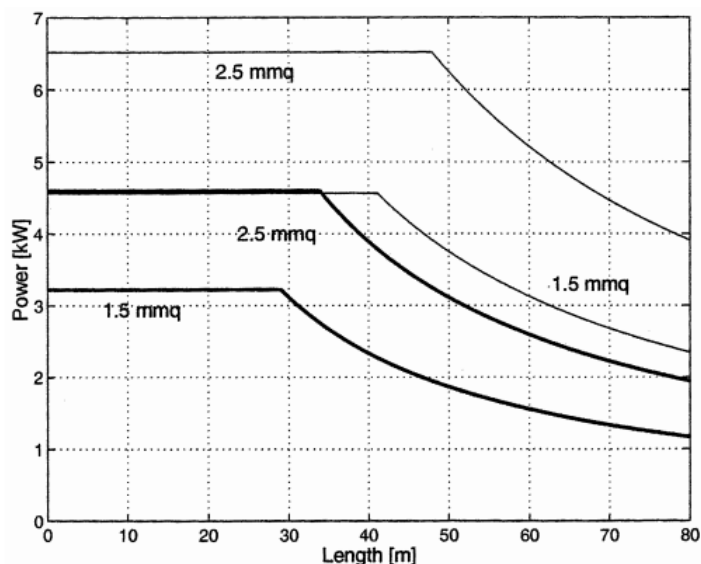
Ved design av et DC-system er valg av kabel viktig for å sikre høy leveringskvalitet, god spenningskvalitet og lave tap i systemet. Dersom man ser for seg å bygge om et eksisterende AC-system til et DC-system er det også en stor fordel dersom eksisterende kabler kan benyttes. Dette vil redusere både arbeid med ombygging og kostand betydelig.

Valg av kabel går på flere måter hånd i hånd med valg av spenningsnivå, da spenningsnivået til en viss grad avgjør hvilke kabler som kan brukes. I [5] er det gjort undersøkelser for to ulike kabeldimensjoner for 4 ulike DC spenningsnivå. Figurene 2.4 og 2.5 viser hvor mye effekt som kan overføres for ulike kabellengder for 1,5mm²- og 2,5mm²-kabel. Figur 2.4 viser resultatene for 48 V (tykk linje) og 120 V (tynn linje). Grafen viser tydelig begrensningen et system med 48 V vil ha når det gjelder kabellengder da maksimal overførbar effekt faller drastisk ned fra 1 kW allerede ved ca 8 meter for en 2,5mm²-kabel.



Figur 2.4: Figuren viser maksimal overførbar effekt som funksjon av kabellengde for henholdsvis 48 V (tykk linje) og 120 V (tynn linje). Hentet fra [5].

Figur 2.5 viser resultatene for spenningsnivåene 230 V (tykk linje) og 326 V (tynn linje). Ved disse spenningsnivåene er det mulig å overføre større mengder effekt over kabellengder som i stor grad er lengre enn de man finner i en vanlig husstand [5].



Figur 2.5: Figuren viser maksimal overførbar effekt som funksjon av kabellengde for henholdsvis 230 V (tykk linje) og 326 V (tynn linje). Hentet fra [5].

2.6 Ekstra utfordringer med DC-systemer

Dersom DC-systemer blir utbredt er det flere aspekter det er viktig å ta høyde for når det gjelder driften av slike systemer. Siden det er elektrikerne som skal utføre jobben med å bygge slike anlegg, er det svært viktig at riktig opplæring gis og at riktig utstyr brukes. For eksempel vil riktig og god merking av kabler i systemer der det er både AC- og DC-kabler være svært viktig for sikkerheten ved arbeid på systemet. Det må derfor utarbeides gode standarder og prosedyrer som sørger for at dette utføres på riktig måte. Et annet eksempel er målinger av spenninger i DC-systemer kontra AC-systemer. Et multimeter vil måtte innstilles spesifikt for hvilket system det skal måles på slik at man ikke risikerer å arbeide på system med spenning. Dette er også prosedyrer som er viktig å ha på plass dersom slike systemer blir utbredt [39].

2.7 Solceller i husholdninger

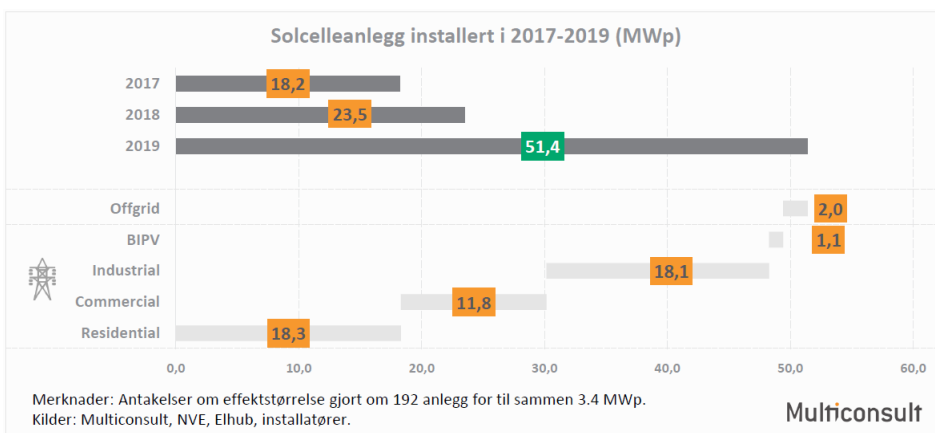
I arbeidet med å sammenligne det eksisterende AC-systemet med et eventuelt DC-system vil produksjon av lokal, DC-basert energi, være et viktig argument for DC-systemet. Hovedmotivasjonen for et DC-system er å redusere antallet konverteringer mellom AC og DC. Ved å ha DC-basert energiproduksjon i systemet vil man kunne forsyne en varierende grad av DC-lastene med denne energien. Dette vil redusere mengden energi som er nødvendig å trekke fra nettet, som igjen vil redusere mengden energi som må konverteres

fra AC til DC. Dette vil redusere tapene i systemet [22].

I Norge vil den lokale energiproduksjonen i stor grad komme fra private solcelleanlegg. I Multiconsult sin årlige rapport om det norske solcelle-markedet er det lagt fram tall for volum og pris for det aktuelle året, samt historisk utvikling [6].

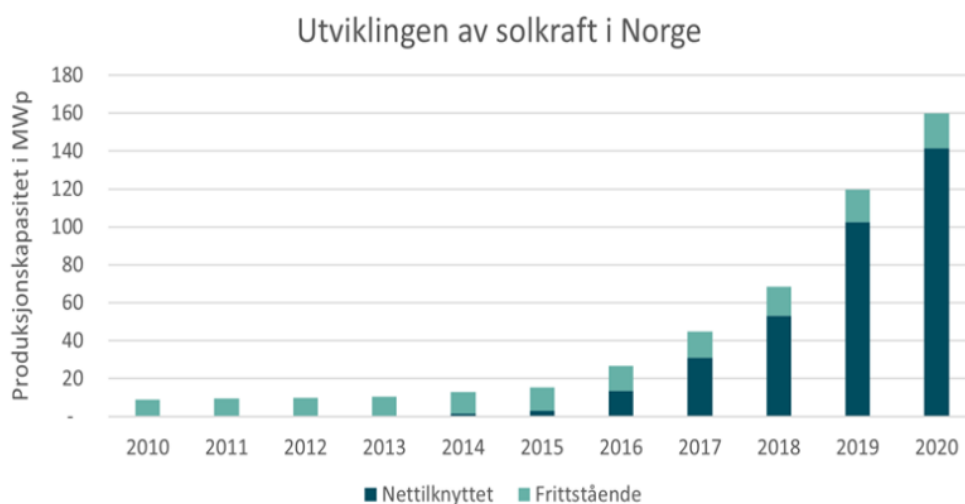
I figur 2.6 er den totale installerte sol-effekten i 2017, 2018 og 2019 vist. Grafen viser at nyinstallert effekt for 2019 var over det dobbelte av det i 2018. Grafen viser også at anlegg i industri og private boliger utgjør ca 35 % av totalen hver. De resterende anleggene er fordelt på offgrid og BIPV (byggningsintegreerte solceller) [6].

Rapporten nevner at mengden installert sol-effekt i 2019 tilsvarer det årlige elektriske forbruket til 2200 norske husholdninger [6].



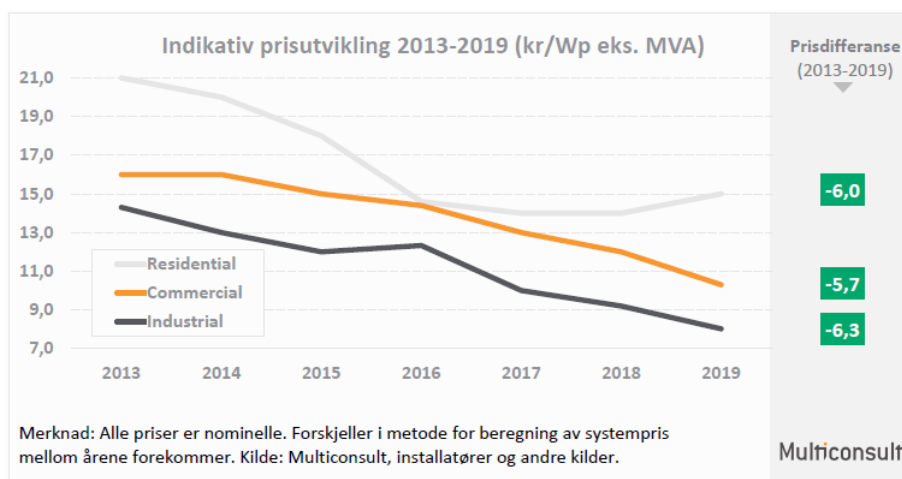
Figur 2.6: Figuren viser den totale installerte sol-effekten i Norge i 2017, 2018 og 2019. Den viser også hvordan effekten er fordelt. Hentet fra [6].

Grafen i figur 2.7 viser utvikling av installert sol-effekt i Norge i perioden 2010-2020. Den installerte effekten lå relativt stabilt fram til 2015, fra 2015 til 2020 viser grafen en sterk stigning. Graden av nettilknyttet effekt har også endret seg fra 0 % i perioden 2010-2013, til over 85 % i 2020 [6].



Figur 2.7: Figuren viser utviklingen av solkraft i Norge fra 2010 til 2020. Hentet fra [7].

Grafen i figur 2.8 viser hvordan prisene i det norske solcelle-markedet har utviklet seg i perioden 2013-2019. Prisene er redusert med 6 kr, 5,7 kr og 6,3 kr for henholdsvis boligmarkedet, det kommersielle markedet og industrimarkedet. Prisene er per Wp [6].



Figur 2.8: Figuren viser prisutviklingen på solceller for husholdninger (grå linje), det kommersielle markedet (oransje linje) og det industrielle markedet (svart linje) i Norge fra 2013 til 2019. Hentet fra [6].

2.8 Batterilagring i husholdninger

Ethvert system med solproduksjon er avhengig av en eller annen form for energilagring for å kunne utnytte den produserte energien på best mulig måte. Det finnes ulike måter å lagre energien lokalt på, men den mest utbredte i Norge er ved hjelp av en batteribank. Ønsker man et system som mer eller mindre er selvforsynt med energi er også batteri en svært sentral komponent.

Hovedgrunnen til at man ønsker å ha batterilagring i et system med lokal energiproduksjon er for å kunne bruke så mye som mulig av den produserte energien i eget system. Dette gjøres i hovedsak ved at batteriet lades opp dersom energiproduksjonen er høyere enn lasten i systemet, for så å kunne forsyne lasten dersom energiproduksjonen er lavere. På denne måten reduseres mengden energi som utveksles med nettet [40]. I følge Per Lindberg i Multiconsult bør batteriet være av en slik størrelse at all overproduksjon av energi kan lagres på batteriet, videre bør batteriet lades ut i de periodene der solproduksjonen er lav eller fraværende, slik at batteriet er klart til å lades opp på ny dagen etter [40].

Mulighetene ved bruk av batteri kan utvides ytterligere dersom ladingen av batteriet styres av en kontroller. Grunnleggende parametre som kontrolleres er ofte hva øvre og nedre grense for ladenivå på batteriet skal være, samt maksimal ladestrøm. I tillegg kan kontrolleren designes slik at lading av batteriet styres mer avansert utifra last og solproduksjon, for eksempel for å unngå at batteriet lades fra nettet [40] [41].

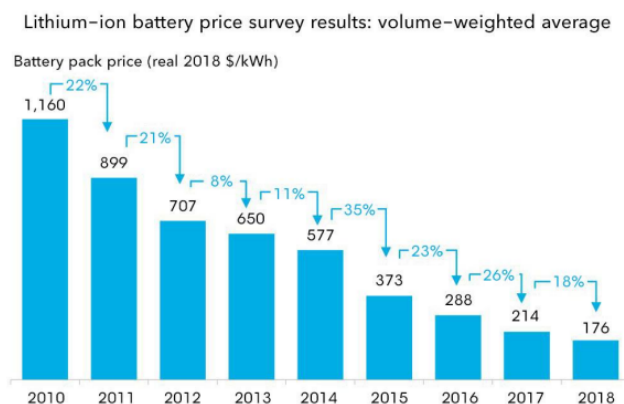
Det finnes ulike typer batterier, der de mest utbredte er blybatterier og litiumbatterier. Litiumbatterier er i sterk framvekst og har flere fordeler sammenlignet med andre typer. Litiumbatterier har generelt lavere vekt og lavere volum enn andre batterier. I tillegg lades litiumbatteriene mye raskere. Eksempelvis kan et 100 Ah batteri lades opp på 1,5 timer, der et blybatteri ville brukt mange timer. Litiumbatterier takler også mange sykluser og har heller ikke behov for regelmessig topplading [42].

I følge [43] bør SOC for et lithium-batteri ligge mellom 20 % og 80 %. Dette vil si at batteriet ikke bør lades ut til under 20 % SOC, og ikke lades opp til over 80 % SOC.

2.8.1 Pris på batterilagring

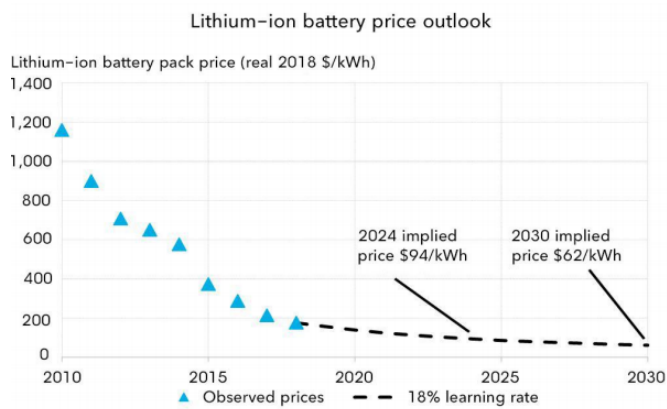
Selv om batterilagring er svært gunstig i et system med solproduksjon har det historisk sett vært kostbar teknologi å implementere. Den høye prisen har gjort at utbredelsen er noe begrenset. Prisen er derimot på veg ned, noe en studie fra BloombergNEF fra 2019 viser [8]. Data fra dette studiet er gjengitt under.

Figur 2.9 viser prisedgangen for litium-ion batterier i tidsperioden 2010 til 2018. Prisen har i denne perioden gått ned fra 1160 \$/kWh til 176 \$/kWh, dette tilsvarer en prisreduksjon på 85 %.



Figur 2.9: Prisutviklingen for litium-ion batterier fra 2010 til 2018. Hentet fra [8].

Prisen på denne typen batteri er ventet å synke videre i årene framover. Figur 2.10 viser forventet pris på litium-ion batterier fram mot 2030 da den er antatt å ligge på 62 \$/kWh. Det er derfor god grunn til å tro at bruken av batteri i private anlegg vil bli mer utbredt i tiden framover.



Figur 2.10: Forventet pris på litium-ion batterier i perioden fram mot 2030. Hentet fra [8]

2.9 DC-systemer i utvikling

I senere år er det utført en rekke prosjekter relatert til DC-teknologi i både husstander og kommersielle bygg. Under er det gjort en liten litteraturstudie for tre slike prosjekter. Disse prosjektene er en liten pekepinn på hva som kan forventes av DC-systemer i framtiden.

2.9.1 Hengelo

Hos Eaton i Nederland er det laget et demo-system for å teste DC-forsyning i et kontorbygg. Prosjektet varer i perioden 2019-2021 og har samarbeidspartnere som Nexans og CityTech. Demo-systemet inneholder følgende [44]:

- System med 700 V DC.
- Lokal produksjon av solenergi.
- Batterier for håndtering av topplast og støtte til nettet.
- Mulighet for toveis lading av elbil.
- Mulighet for både 350 V og 48 V for tilkobling av laster i hus.
- USB-C som tilkobling.

2.9.2 DC flexhouse

I perioden 2015-2019 ble det kjørt et prosjekt kalt «DC flexhouse». Målet med prosjektet var å undersøke muligheten for å erstatte AC-systemet med DC-teknologi i husstander. Det nevnes fordeler som enklere integrering av fornybar energiproduksjon, høyere effektivitet og enklere kontroll av lastflyt. Prosjektet er utført i samarbeid med blant annet ABB og Siemens [45].

2.9.3 ABN AMRO bank i Amsterdam

ABN AMRO bank i Amsterdam er verdens første bygning med DC-system som energiframføring. Systemet er basert på 350 V DC og har et stort solcelleanlegg med tilhørende batterisystem. I bygningen er USB-C i stor grad brukt som tilkobling for laster som PC, skjermer, mobiler og belysning. Systemet har i tillegg et 230 V AC system som forsyner laster som ikke er kompatible med USB-C. Prosjektet er utført i samarbeid med blant annet ABB og ble utført i perioden 2016-2017 [46].

2.9.4 Green Datacenter AG

I 2011 ble det bestemt at Green Datacenter AG i Zurich skulle forsynes med DC. Prosjektet ble gjort i samarbeid med ABB. Her er det benyttet et spenningsnivå på 400 V

DC. Resultatene fra dette prosjektet viser at effektiviteten til systemet kan forbedres med 10 % ved overgang til DC. I tillegg nevnes fordeler som lavere energibehov til kjøling av servere [47]. I tillegg nevnes det i [47] at DC i datasenter kan ha fordeler som lavere investeringskostnader og mindre plassbehov.

Kapittel 3

Teori for modell

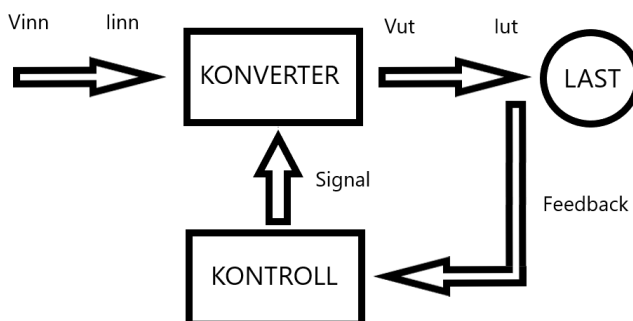
Det første steget i dette arbeidet var å designe alternative systemløsninger til dagens eksisterende AC-system. Før designprosessen beskrives vil det i dette kapitlet legges fram nødvendig teori om konverterne som inngår i systemene.

3.1 Konvertere

3.1.1 Introduksjon til konvertere

Konvertere er sentrale komponenter når et DC-system skal designes. Det vil i dette kapitlet bli gjennomgått fem forskjellige typer konvertere som alle er å finne i et DC-system. Dette vil gi en grunnleggende forståelse for funksjonen til konverterne før design av ulike systemer vil bli vist i neste kapittel.

Figur 3.1 viser konseptuelt hvordan en konverter er bygd opp. Spenningen og strømmen (V_{inn} og I_{inn}) på input-siden av konverteren konverteres i henhold til et signal fra kontrolleren. Kontrollen av konverteren kan enten gjøres med feedback, kalt en lukket løkke (som på figuren), eller en åpen løkke der kontrollsignalet er forhåndsbestemt og uavhengig av outputen (V_{ut} og I_{ut}).

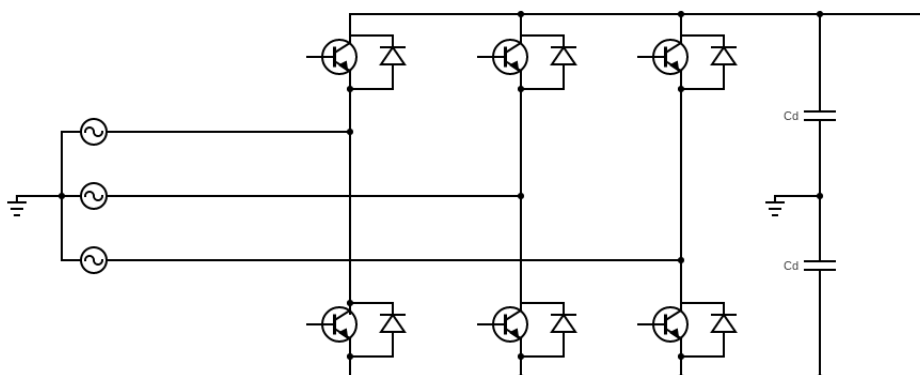


Figur 3.1: Figuren viser konseptuelt hvordan en konverter er bygd opp. Her vises en konverter som styres ved hjelp av en kontroll-løkke. Signalet ut av konverteren prosesseres av en kontrollør slik at signalet kan styres slik man ønsker.

3.1.2 Den sentrale konverteren (VSC-konverter)

Det er muligens den viktigste komponenten i et nett-tilkoblet DC-system. Den sentrale konverteren kobler DC-systemet sammen med det eksterne AC-nettet. Denne konverteren sørger for at DC-lastene kan forsynes med energi fra nettet dersom solproduksjonen ikke er tilstrekkelig, samtidig som overskytende solprodusert energi kan sendes ut i nettet.

I flere tidligere studier på feltet er det valgt en «Voltage Source Converter» som den sentrale konverteren. Det samme er gjort i dette arbeidet. En VSC-konverter kan transportere energi både fra AC- til DC-siden og motsatt. Spenningen på DC-siden av konverteren holdes konstant og med samme polaritet, blant annet ved hjelp av en kondensator plassert på DC-bussen [48]. Et eksempel på kretsskjema for VSC-konverter er vist i figur 3.2. Den er bygd opp av seks IGBT-er med parallelle dioder. DC-buss kondensatoren er merket C_d . VSC-konverteren har fordeler som lite harmoniske forstyrrelser og at den tar liten plass [49].

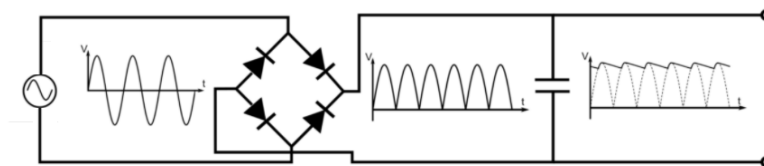


Figur 3.2: Kretsskjema for en VSC-konverter.

Den viktigste egenskapen til den sentrale konverteren i dette arbeidet er virkningsgraden. Tapet i konverteren vil ha mye å si når det alternative DC-systemet skal sammenlignes med det eksisterende AC-systemet. I [24] er det sagt at virkningsgraden må være minst 97,7 % for at et DC-system skal være lønnsomt. I [24] er det kun sett på et DC-system uten solproduksjon og batterilagring, dette gjør muligens kravet til virkningsgrad enda høyere. Dette fordi et DC-system med solproduksjon og batteri vil ha andre fordelsområder i tillegg til høy virkningsgrad på VSC-konverteren. Effektiviteten til denne type konvertere ligger typisk mellom 95 % og 97 % [50] [12].

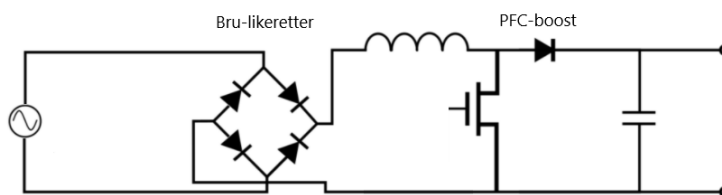
3.1.3 AC-last konverter (PFC-konverter/diode-bru konverter)

Noe av motivasjonen bak å undersøke muligheten for et DC-system er å redusere antallet konverteringer mellom AC og DC. Disse konverteringene skjer i laster som internt er forsynt med DC-spenning. Det er i all hovedsak to typer konvertere som er brukt i slike laster, dette er bru-likereettere og «Power Factor Corrector»(PFC)-likereettere. Oppbyggingen til en bru-likereetter er vist i figur 3.3. Fire dioder snur polariteten til den negative delen av AC-spenningen før en kondensator glatter spenningen til en DC-spenning. Dette er en svært enkel og billig likeretter som fører til mye harmoniske forstyrrelser på nettet [51].



Figur 3.3: Kretsskjema for en bru-likereetter.

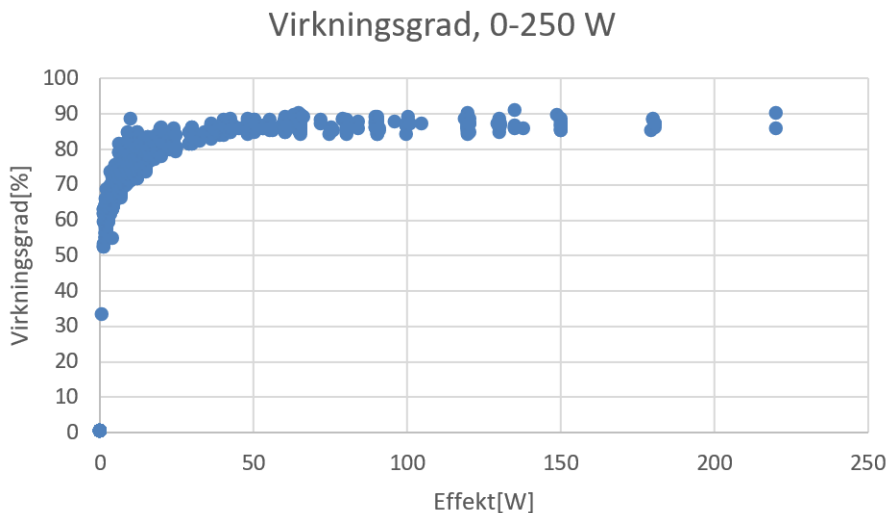
For å redusere mengden harmoniske forstyrrelse er det i stor grad en PFC-konverter som er i bruk. Denne likeretteren består av en bru-likereetter, boost-konverter og et filter. En slik konverter bedrer power-faktoren betraktelig og reduserer forstyrrelser på nettet [52].



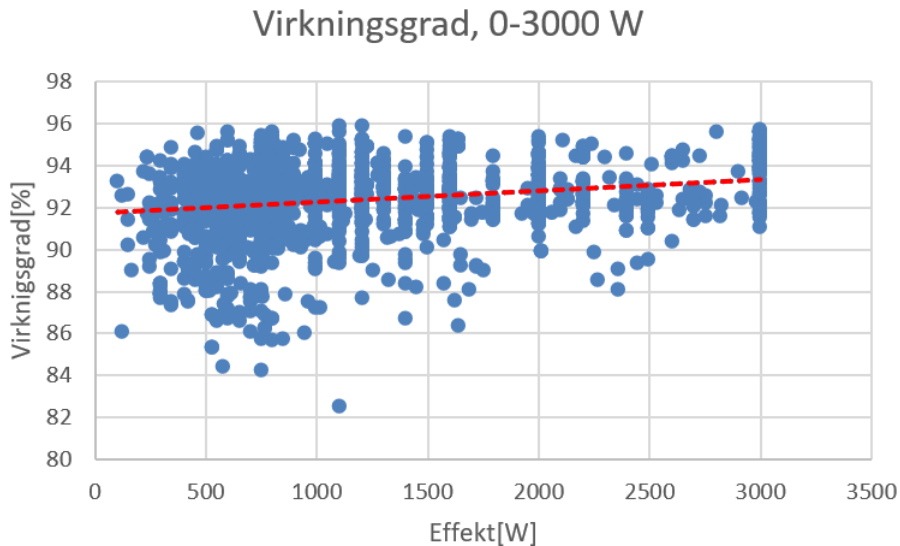
Figur 3.4: Kretsskjema for en PFC-konverter.

For PFC-konverteren er det også virkningsgraden som er den mest interessante parameteren i dette arbeidet. Denne kan variere stort fra produkt til produkt. I Aurora Foss [24] sitt arbeid er det designet tre PFC-konvertere, alle med forskjellig kapasitet, disse har alle virkningsgrad på 93 %. Det finnes også PFC-konvertere med virkningsgrad opp mot 99 %, for eksempel har Texas Instruments et referanse-design for en 3,5 kW PFC-konverter med 98,6 % maksimal effektivitet [53].

Figur 3.5 og 3.6 viser virkningsgraden for AC-DC-konvertere brukt i AC-laster med intern DC-spenning. Figurene viser data for konvertere med kapasitet opp til 3000 W [10].



Figur 3.5: Virkningsgrad for AC-DC-konvertere med merkeeffekt mellom 0 og 250 W. Data er hentet fra [9].



Figur 3.6: Virkningsgrad for AC-DC-konvertere med merkeeffekt mellom 0 og 3000 W. Data er hentet fra [10].

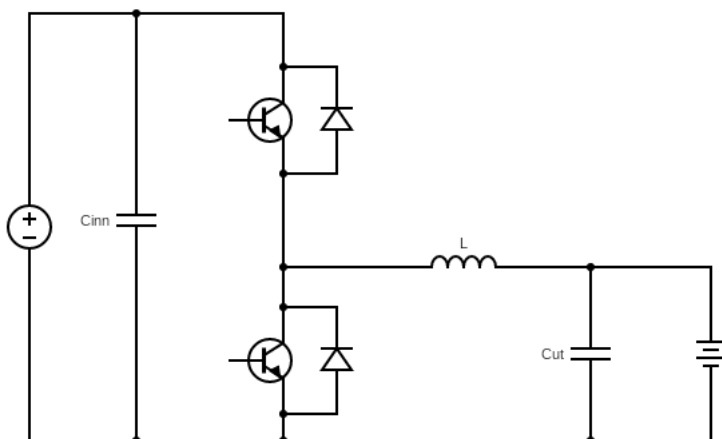
3.1.4 Solcelle-konverter (MPPT boost-konverter)

I et system med solcelleproduksjon er det nødvendig med en konverter for å koble solcelleanlegget sammen med det øvrige systemet. En slik konverter kan være enten en buck- eller en boost-konverter, etter hvilket spenningsnivå solcelleanlegget og det øvrige systemet har. En slik konverter har som hovedoppgave å optimalisere effekten som trekkes fra solcelleanlegget. Dette gjøres ved hjelp av en algoritme som kalles «Maximum Power Point Tracking», eller MPPT. Denne algoritmen sørger for at solcellene til en hver tid produserer maksimal effekt. En slik konverter har typisk virkningsgrad på 93-97 % [54].

Denne konverteren er utenfor avgrensningen til dette arbeidet og vil derfor ikke undersøkes videre.

3.1.5 Batteri konverter (Buck-boost-konverter)

For å kunne koble batteri til et system er det nødvendig med en konverter som styrer lastflyten inn og ut av batteriet. Dette gjøres ved hjelp av en to-veis DC-DC-konverter. Denne konverteren er en kombinasjon av en boost- og en buck-konverter, derfor også kalt buck-boost-konverter. Figur 3.7 viser kretsskjema til en slik konverter som kobler en DC-kilde til et batteri. Konverteren opererer som en buck-konverter når batteriet lades opp med overskuddsenergi, og opererer som en boost-konverter når batteriet forsyner energi til systemet [55].



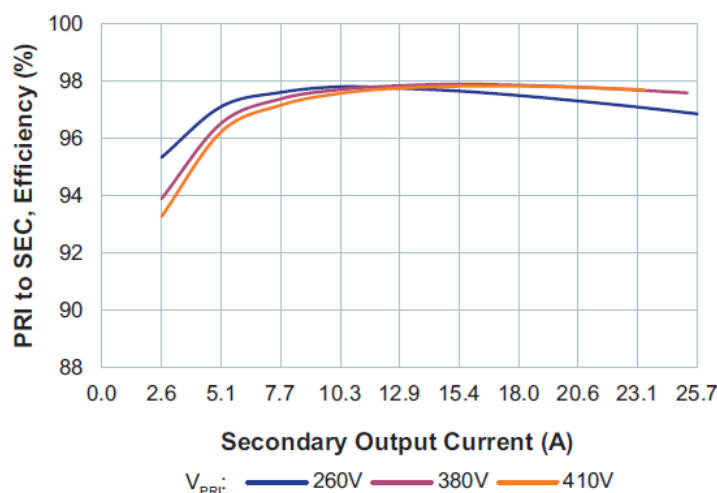
Figur 3.7: Kretsskjema for en buck-boost-konverter.

Dette er en konverter med høy virkningsgrad som er sentral i et system med lokal solproduksjon. Konverteren sørger for at energien som solcelleanlegget produserer brukes på den mest effektive måten i systemet. Det er ønskelig at en så stor andel som mulig av den produserte energien brukes av lastene lokalt. Dette gjøres ved at den overskytende energien lagres på batteriet for så å kunne brukes til å forsyne lastene når solproduksjonen er lavere. På denne måten reduseres også energiutvekslingen med nettet. For at dette skal gjøres på en så effektiv måte som mulig er det viktig at kontrollen av konverteren gjøres på riktig måte [12]. Ved valg av kontrollstrategi er det flere aspekter som må tas med. Blant annet må det tas hensyn til hvor langt ned batteriet kan lades. Det må også tas hensyn til om batteriet kun skal lades opp med energi fra solproduksjon, eller om det skal være mulig å lade med energi fra nettet.

Effektiviteten til denne konverteren er i litteratur funnet til å være 98 % [41] [56].

3.1.6 DC-last konverter (buck-konverter)

For å kunne ha et DC-system med flere spenningsnivå er det nødvendig med en DC-DC-konverter som kan transformere spenningen mellom de ulike nivåene. Effektiviteten til denne konverteren vil ha mye å si for den totale effektiviteten til systemet. Figur 3.8 viser en typisk kurve for effektiviteten til en DC-DC-konverter med merkeeffekt på 1200 W [11].



Figur 3.8: Kurve for virkningsgrad for en DC-DC-konverter med merkeeffekt på 1200 W. Hentet fra [11].

3.1.7 Oppsummering - konvertere

Tabell 3.1 viser en oppsummering av effektiviteten, eller hvor man kan finne effektiviteten, til de ulike konverterne. Det er verdiene, og figurene det er linket til i denne tabellen, som vil bli brukt videre i modelleringen.

Konverter type	Effektivitet
VSC	95 %
AC-last	Figur 3.5 og 3.6
DC-last	Figur 3.8
Batteri	98 %

Tabell 3.1: En oppsummering av virkningsgrad, eventuelt hvor man kan finne den, for de ulike konvertertypene.

Kapittel 4

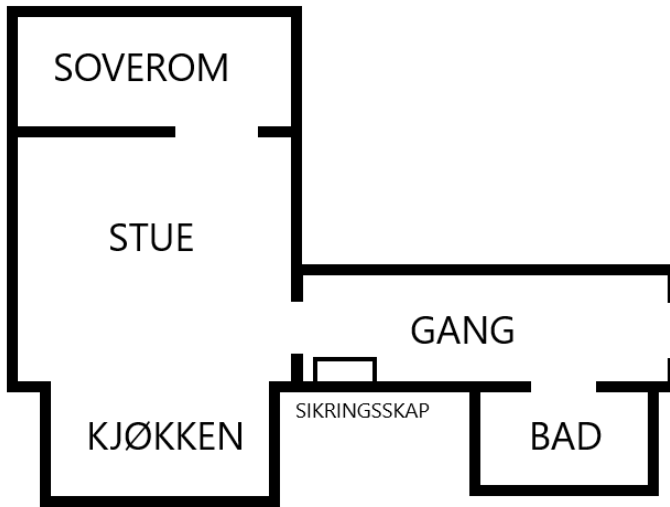
Systemdesign

4.1 Introduksjon til systemdesign

Hoveddelen i dette arbeidet vil være å modellere og simulere ulike system-topologier for forsyning av energi i lavspente systemer med solproduksjon og batterilagring. I dette kapitlet vil først det fysiske eksisterende systemet som simulasjonen er basert på presenteres. Deretter vil det legges fram ulike løsninger der DC-spenning er ryggraden i deler av eller hele systemet.

4.2 Smarthuset

For at simulasjonen skal ha rot i virkeligheten er det valgt å bruke et eksisterende fysisk system som grunnlag. Systemet det er tatt utgangspunkt i er NTNU sitt smarthus lokalisert i EL-bygget på Gløshaugen i Trondheim. Smarthuset er etablert av NTNU for å kunne brukes i arbeid med ulike prosjekter som bacheloroppgaver og masteroppgaver. Smarthuset er ikke et faktisk hus, men en leilighet på 64 kvadratmeter. Den er fullt møblert og utstyrt med alle fasiliteter. Dette innebærer blant annet fullt utstyrt kjøkken, stue og bad. Utstyret i leiligheten er i stor grad ny teknologi der mange av lastene er utstyrt for å kunne kobles til internett. Leiligheten skal brukes til forskning på blant annet smart styring av laster som kan føre til lavere energibruk. En plantegning av leiligheten er vist i figur 4.1 [57].



Figur 4.1: Plantegning av smarthus. Sikringsskapet er inntegnet for referanse.

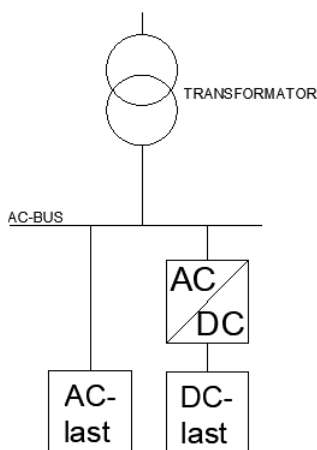
Leiligheten består som vist i figur 4.1 av bad, gang, kjøkken, stue og soverom. Figur 4.2 viser kursfortegnelsen som hører til det elektriske anlegget i leiligheten. Kursfortegnelsen manglet i utgangspunktet kabellengder. Det ble derfor gjort en grov oppmåling av kabellengdene i leiligheten som en del av arbeidet i denne rapporten. Kabellengdene er derfor ikke helt nøyaktige, men målingene er vurdert til å være nøyaktige nok for dette arbeidet.

Nummer	Kurs	Beskrivelse	Sikring	Tverrsnitt[mm ²]	Lengde[m]
1	XQ116	Kjøkken gjennomstrømningsvarmer	2P C40A	5G10	13
2	XQ117	Kjøkken platetopp	4P C25A	5G6	10
3	XQ118	Kjøkken stekeovn	2P C20A	3G4	10
4	XQ119	Bad vvb	2P C16A	3G2,5	11
5	XQ120	Bad vaskemaskin	2P C16A	3G2,5	4
6	XQ121	Bad tørketrommel	2P C16A	3G2,5	4
7	XQ122	Bad toalett, dusj, håndtørker, speil	2P C16A	3G2,5	16
8	XQ123	Entre stikk, dørlås, vannskap	2P C16A	3G2,5	16
9	XQ124	Kjøkken oppvaskmaskin	2P C16A	3G2,5	10
10	XQ125	Kjøkken mikro	2P C16A	3G2,5	10
11	XQ126	Kjøkken ventilasjon	2P C16A	3G2,5	13
12	XQ127	Kjøkken kjøleskap, ventilator, persiener, vindu	2P C16A	3G2,5	13
13	XQ128	Kjøkken stikk over benk og kjøkkenøy	2P C16A	3G2,5	15
14	XQ129	Stue stikk vegg vindu og vegg mot soverom	2P C16A	3G2,5	19
15	XQ130	Soverom stikk	2P C16A	3G2,5	22
16	XQ131	Stue stikk vegg ved tv	2P C16A	3G2,5	10
17	XQ132	Entre varmpumpe	2P C16A	3G2,5	8
18	XQ133	Stue varmefolie	2P C16A	3G2,5	8
19	XQ134	Sov varmefolie	2P C16A	3G2,5	18
20	XQ135	Entre varmefolie, Bad varmekabel	2P C16A	3G2,5	7
21	XQ136	Stue/kjøkken/soverom/entre/bad grunnbelysning	2P C10A	3G1,5	25
22	XQ137	Stue/kjøkken/soverom/entre/bad LYS interiør	2P C10A	3G1,5	10
23	XQ138	Stue stikk varmpumpe	2P C16A	3G2,5	7

Figur 4.2: Kursfortegnelse for kursene i smarthuset.

4.3 Det eksisterende systemet - AC

Figur 4.3 viser enlinje-skjemaet for det eksisterende systemet, altså smarthuset. Systemet er enkelt og består i utgangspunktet bare av transformator og laster. Lastene i systemet er i form av AC-laster koblet direkte til nettet, og interne DC-laster som er koblet til nettet gjennom AC-DC-konvertere. Denne konverteringen fra AC til DC skjer internt i lasten, eller via en ekstern adapter. Det originale systemet inneholder hverken solcelleanlegg eller batterilagring.



Figur 4.3: Enlinjeskjema for det eksisterende AC-systemet. Figuren viser de to måtene en last kan være koblet til AC-bussen på.

4.3.1 Last

Lastene i systemet er basert på arbeidet gjort i forprosjektet til denne oppgaven. I forprosjektoppgaven ble det gjort en kartlegging av laster i en typisk norsk husstand. Lastprofilen er basert på laster fra NTNU sitt smarthus. I tillegg er det supplert med laster fra eget hjem slik at lastprofilen representerer et fullverdig utvalg av laster [27].

Metode for kartlegging av laster

Kartleggingen ble gjort ved at alle elektriske artikler i smarthuset, samt et utvalg fra eget hjem, ble registrert. Punktene under er hentet direkte fra prosjektoppgaven, og beskriver hvordan data for de ulike lastene er registrert [27].

- Data for lastene kjøleskap, oppvaskmaskin, pc, panelovner, varmepumpe, vaskemaskin, tørketrommel, avfukter og støvsuger er målt av Steve Vøller privat.

- For belysning er formen på lastprofilen hentet fra [58]. Denne er tilpasset merkeeffekten som er brukt i denne rapporten.
- For varmtvannsbereder er lastprofilen reprodusert fra [59].
- For laster der det ikke var mulig å oppdrive tidsserier, i dette tilfellet mindre laster som stavmikser, kjøkkenmaskin og hårføner, er det tatt tiden av et typisk bruksmønster og antatt at den trekker merkeeffekt under hele brukstiden.
- Der det ikke var mulig å oppdrive nøyaktig merkeeffekt for en last er det hentet data fra tilsvarende artikler på elkjop.no og lampegiganten.no.

Det er understreket at de registrerte lastene muligens ikke dekker alle laster men kan finne i en husstand, men at lastprofilen er representativ for en vanlig norsk husstand [27].

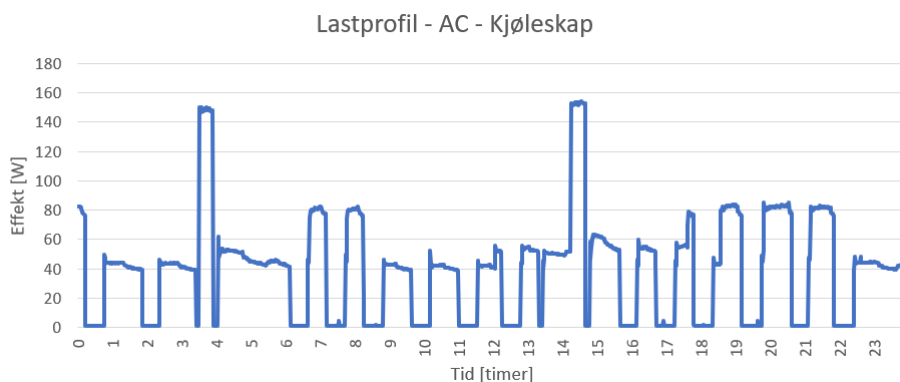
Lastprofil

Tabell 4.1 viser alle de kartlagte lastene med merkeeffekt, brukstid per døgn og energiforbruk. Den totale lasten for alle lastene er summert til 50,80 kWh. Tabellen viser også hvilke kabellengder som hører til hver last i systemet.

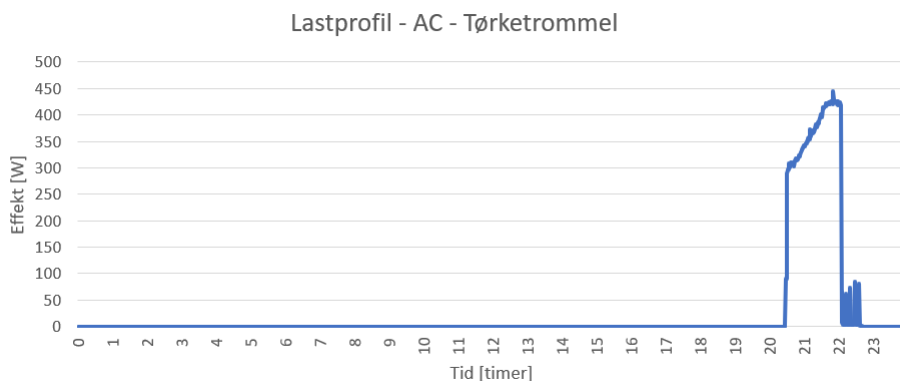
Artikkel	Effekt[W]	Brukstid per døgn[t]	Energiforbruk[kWh]	Kabellengde[m]
Kjøkken				
Kjøleskap	160	24 t	0,99	13
Kaffetrakter	1520	6 min	0,15	13
Vannkoker	1630	3 min	0,09	13
Komfyrtopp	8600	25 min	Summert under stekeovn	10
Stekeovn	1400	40 min	2,18	10
Mikrobølgeovn	700	6 min	0,07	10
Oppvaskmaskin	2000	2t 47min	1,50	10
Avtrekksvifte	150	33 min	0,08	13
Stavmikser	1000	2 min	0,03	13
Kjøkkenmaskin	800	7 min	0,09	13
Stue				
Tv	84	2t 32 min	0,21	10
Pc	300	24 t	4,54	19
Panelovn 1	500	17 t	3,15	19
Panelovn 2	1000	24 t	9,53	16
Panelovn 3	600	24 t	2,46	22
Gang				
Varmepumpe	2000	24 t	8,13	8
Bad				
Vaskemaskin	2000	1t 23min	0,80	4
Tørketrommel	500	2t 17min	0,60	4
Varmtvannsbereeder	4200	24t	12,3	11
Avfukter	210	24t	2,83	19
Hårføner	2200	3 min	0,11	16
Lys				
Lys	120	239min(90W), 261min(120W)	0,90	25
Annet				
Støvsuger	1200	11min	0,18	19
SUM			50,80	

Tabell 4.1: Alle kartlagte laster med merkeeffekt, brukstid per døgn, energiforbruk per døgn og kabellengde når lastene er plassert i smarthuset.

Figur 4.4 og figur 4.5 viser eksempel på to lastprofiler for henholdsvis kjøleskap og tørketrommel. Figurene illustrerer de to typene lastprofiler som er kartlagt. Kjøleskapet er et eksempel på en døgnkontinuerlig last, mens tørketrommelen er et eksempel på en sekvenslast. Den døgnkontinuerlige lasten er en baselast i systemet som er aktiv 24 timer i døgnet, mens sekvenslasten er en langt mer fleksibel last som ikke nødvendigvis er aktiv hver dag.

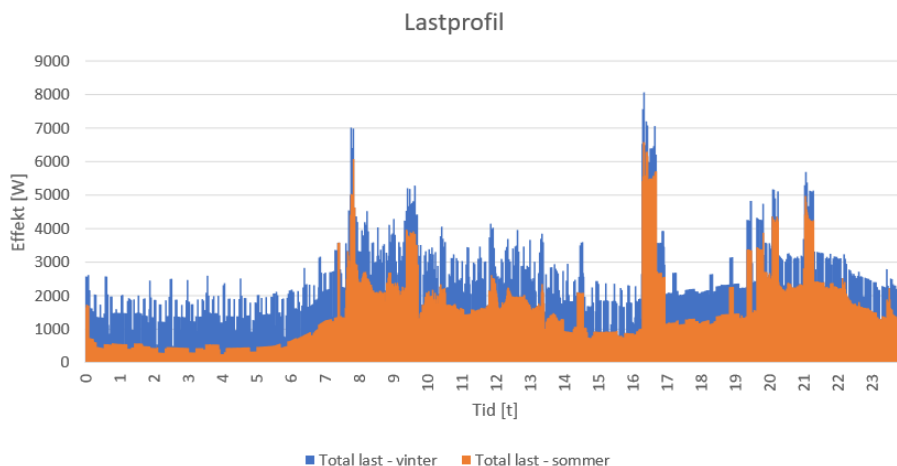


Figur 4.4: Lastprofil for kjøleskap. Dette er et eksempel på en last som er aktiv hele døgnet.



Figur 4.5: Lastprofil for tørketrommel. Dette er et eksempel på en last som er aktiv kun i sekvenser.

Figur 4.6 viser den totale lastprofilen for alle de kartlagte lastene. Dette er en typisk lastprofil for et norsk hjem der man har døgkontinuerlige laster som kjøleskap, varmepumpe, panelovn, osv., som sørger for et kontinuerlig effekttrekk. I tillegg viser lastprofilen topper i forbruket i tidsrommene ca 07:00-08:00 og ca 16:00-17:30 som et resultat av at forbruker gjerne bruker mer elektrisitet til matlaging osv. i disse periodene. Figur 4.6 viser lastprofil både for sommer og for vinter. Forskjellen på de to profilene er at sommerprofilen ikke inneholder oppvarmingslastene [27]. Totalt last per dag sommerstid er 35 kWh.



Figur 4.6: Total lastprofil for alle kartlagte laster.

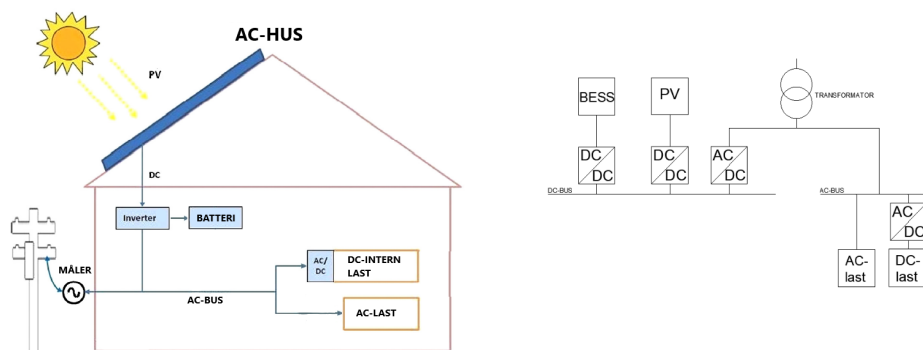
I tillegg til at det ble gjort en kartlegging av energiforbruket til laster, er det også undersøkt hvor mange av lastene som er forsynt med DC-spenning internt i lasten. Tabell 4.2 viser hvilke laster som er funnet til å være forsynt internt med DC-spenning. Dokumentasjon for dette arbeidet kan finnes i A.1 [27]. I tillegg viser tabell 4.2 effektiviteten til AC-DC-konverteren som forsyner lasten med DC-spenning. Data for effektivitet er funnet ved å sammenligne merkeeffekten til lasten med graf for effektivitet i figur 3.5 og 3.6 i kapittel 3.1.3.

Artikkel	Effekt [W]	AC-DC virkningsgrad [%]
Kjøleskap	160	87
Oppvaskmaskin	2000	91
Tv	84	87
Pc	300	87
Varmepumpe	2000	91
Vaskemaskin	2000	91
Tørketrommel	500	87
Lys	120	87

Tabell 4.2: Virkningsgrad for AC-DC-konvertere som forsyner de interne DC-lastene.

4.3.2 Det eksisterende systemet - AC - med solcelle og batteri

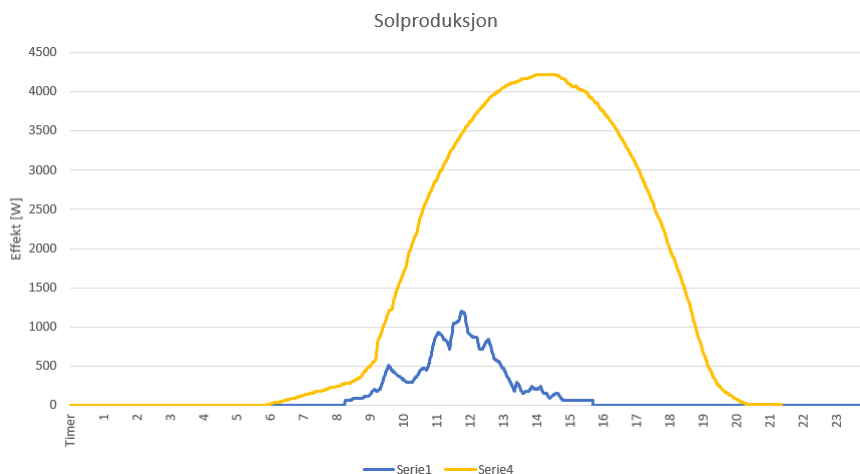
I arbeidet med å undersøke mulige DC-system er solcelleanlegg og batterilagrings sentrale komponenter. For at det skal være mulig å sammenligne funksjonaliteten til de ulike systemene (AC, hybrid og DC) vil derfor solproduksjon og batterilagrings legges til det eksisterende AC-systemet. Figur 4.7 viser system-topologien framstilt på to ulike måter. Lastsiden av systemet er identisk som i foregående delkapittel. Batteri og solcelleanlegg er koblet til en felles DC-bus via DC-DC-konvertere. Energien fra DC-bussen blir overført til AC-siden via en DC-AC-inverter.



Figur 4.7: Figuren til venstre viser en forenklet versjon av systemet og er inspirert fra [12]. Figuren til høyre viser enlinjeskjemaet til AC-systemet med BESS (battery energy storage system) og solcelleanlegg.

4.3.3 Solproduksjon

Figur 4.8 viser solproduksjon for henholdsvis vinter (blå graf) og sommer (gul graf). Data for solproduksjon er hentet fra målinger fra et eksisterende solcelleanlegg med merkeeffekt på 4,5 kW. Målingene er foretatt med et intervall på 5 minutter. Grunnet ønske om minuttverdier for modellering er datasettet interpolert for å oppnå dette. Det er logget data for både sommer og vinter for å kunne simulere et variert utvalg av scenarier. Mengden energi solcelleanlegget produserer når det opererer som vist i figur 4.8 er henholdsvis 31,2 kWh og 2,97 kWh for sommer og vinter.



Figur 4.8: Viser solproduksjonen for sommer (gul linje) og vinter (blå linje).

4.3.4 Batteri - dimensjonering

Dimensjonering av batteri er gjort etter at simulasjonene er gjort for systemene med solproduksjon. På denne måten er det hentet ut tall for hvor mye av den produserte solenergien som eksporteres til nettet uten batterilagring i systemet. Grunnet et ønske om å ha samme batteristørrelse for alle systemene er dimensjoneringen gjort på bakgrunn av et gjennomsnitt av den eksporterte energien for de tre systemene. Gjennomsnittet er 15,7 kWh. Dette er regnet om til ampertimer som vist under:

$$E_{batteri}[Ah] = \frac{E_{eksport}[kWh]}{V_{dc}[V]} \quad (4.1)$$

$$E_{batteri}[Ah] = \frac{15,7kWh}{380V} = 41,3Ah \quad (4.2)$$

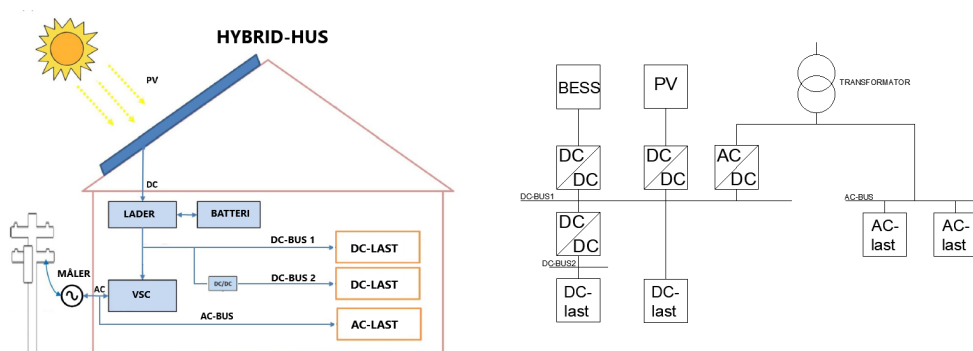
Siden lastprofilen som er brukt i modellen er tilnærmet maksimallast er det sannsynlig at gjennomsnittslasten over en lengre periode vil være lavere, og at mer energi eksporteres til nettet. På bakgrunn av dette velges det et batteri med størrelse 50 Ah.

4.4 Forslag til alternative systemløsninger

Hovedmålet med dette arbeidet er å undersøke om det er fordelaktig å forsyne deler av, eller alle lastene i en husstand med DC. Det vil derfor i dette delkapittelet legges fram to ulike løsninger for hvordan et slikt DC-system kan se ut. Det vil først designes et hybrid-system der lastene forsynes med AC eller DC ut i fra naturen til lasten. Det vil deretter designes et rent DC-system der alle lastene forsynes med DC.

4.4.1 LØSNING 1: Hybrid

Det første systemet som skal designes er et hybrid-system. Figur 4.9 viser topologien til hybrid-huset på to ulike måter. AC-lastene vil beholde sin tilknytning til AC-nettet og forsynes direkte med AC som før. DC-lastene vil bli forsynt fra et eget DC-system som består av to DC-busser med forskjellige spenningsnivå. DC-systemet er koblet til AC-nettet gjennom en VSC-konverter som kan håndtere flyt av effekt begge veier. Lastene på DC-bus 2 blir forsynt gjennom en DC-DC konverter fra DC-bus 1. Størrelsen på denne konverteren blir bestemt senere i kapitlet. Solcelleanlegget og batteribanken er koblet til DC-bus 1 gjennom hver sin DC-DC konverter. DC-DC konverteren til batteribanken er en to-veis-konverter.



Figur 4.9: Figuren til venstre viser en forenklet versjon av systemet og er inspirert fra [12]. Figuren til høyre viser enlinjeskjemaet til hybrid-systemet med BESS (battery energy storage system) og solcelleanlegg.

Valg av DC-spenning

Som allerede nevnt i kapittel 2.4 om spenningsnivå i DC-systemer, er valg av riktig spenningsnivå avgjørende for god og sikker funksjon av systemet. For denne systemtopologien er det valgt å ha to DC-busser med ulike spenningsnivå. Dette er gjort for å kunne forsyne høyeffekts-laster med en høy DC-spenning, mens laster med lavere effekt kan forsynes med en lavere DC-spenning. Spenningsnivåene som er valgt er 120 V og 380 V.

- 120 V er valgt grunnet lavere krav om beskyttelse som fører til et sikrere, enklere og billigere system. Selv om 48 V har enda lavere krav om beskyttelse viser teori om kabler i DC-systemer at maksimal kabeldistanse ville blitt svært begrenset dersom dette spenningsnivået ble valgt. 120 V kombinerer derfor akseptable tap i kabler samtidig som krav om beskyttelse er på et lavere nivå enn for et høyere spenningsnivå.
- 380 V er valgt for å kunne forsyne laster som trekker høy effekt. Teori om kabel i DC-systemer viser at et 120 V system maksimalt kan overføre 2,5 kW før tapene blir for høye. For 380 V ligger denne begrensningen mye høyere. EMerge Aliance sin spådom om at dette spenningsnivået vil bli standard for en del utstyr i framtiden er et annet argument for dette valget.

Fordeling av laster på DC-bussen

Fordeling av lastene på de to spenningsnivåene er gjort basert på merkeeffekten til lasten. Utifra figur 2.4 i kapittel 2.5 er det bestemt at alle laster under 2000 W skal forsynes fra DC-bus 2 med en spenning på 120 V. De resterende lastene med høyere effekt skal forsynes fra DC-bus 1 med 380 V.

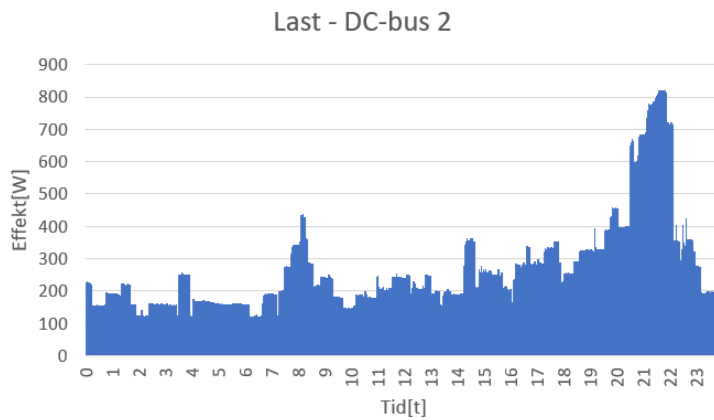
Tabell 4.3 viser hvordan lastene er fordelt på de to spenningsnivåene.

DC-bus 1 - 380 V		DC-bus 2 - 120 V	
Artikkel	Effekt [W]	Artikkel	Effekt [W]
Oppvaskmaskin	2000	TV	84
Varmepumpe	2000	PC	300
Vaskemaskin	2000	Lys	120
		Kjøleskap	160
		Tørketrommel	500
SUM	6000		1164

Tabell 4.3: Viser fordelingen av DC-lastene mellom DC-bus 1 og DC-bus 2.

Dimensjonering av DC-DC-konverter

Ved dimensjonering av DC-DC-konverteren som skal forsyne lastene på DC-bus 2 er det tatt utgangspunkt i den maksimale belastningen som kan trekkes, sammen med lastprofilen for lastene på DC-bus 2. Det maksimale effekttrekket er i tabell 4.3 summert til å være 1164 W dersom alle lastene er aktive på samme tid. I følge figur 4.10 er maksimalt effekttrekk i løpet av en typisk dag ca 825 W. Basert på denne informasjonen velges det en DC-DC-konverter med merkeeffekt 1200 W. Dette er gjort fordi dette er et sett med laster som det er stor sannsynlighet for at er aktive på samme tid.

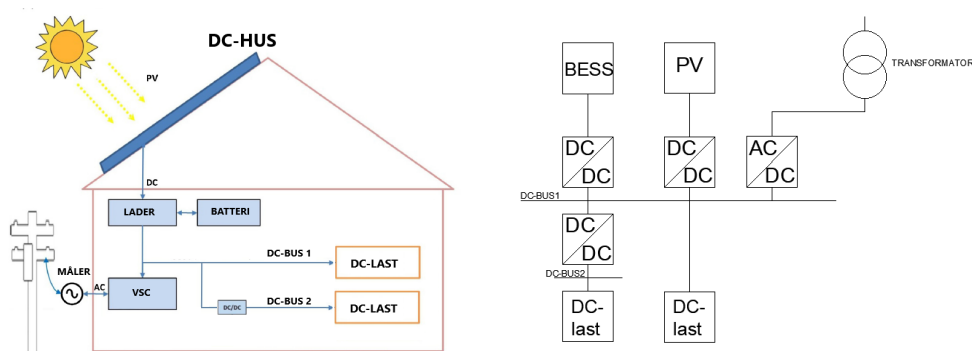


Figur 4.10: Viser lastprofilen til lastene på DC-bus 2.

Effektiviteten til denne konverteren er som vist i figur 3.8. Denne effektivitetskurven er for en konverter med sekundærspenning 50 V, kurven må derfor tilpasses 120 V før den implementeres i modellen.

4.4.2 LØSNING 2: DC-system

Det andre systemet som skal designes er et rent DC-system. I dette systemet forsynes alle laster i systemet med DC-spenning. I figur 4.11 er systemtopologien vist på to ulike måter. Alle lastene er forsynt via DC-bus 1 og DC-bus 2. Batterisystemet og solcelleanlegget er koblet til DC-bus 1 på samme måte som i de to foregående systemene.



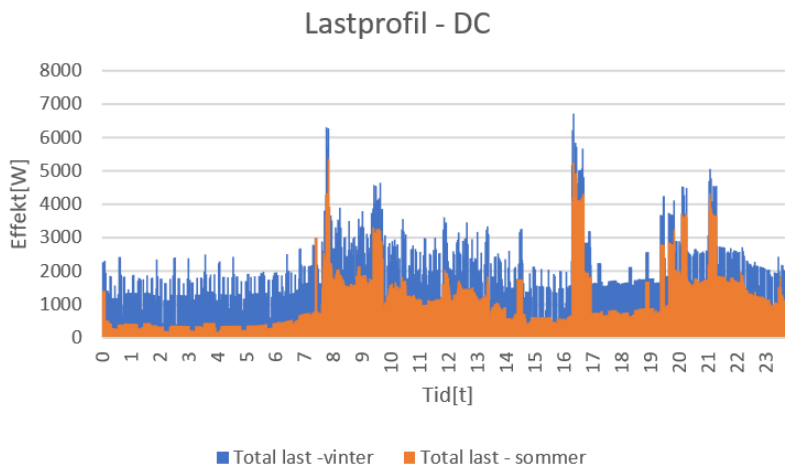
Figur 4.11: Figuren til venstre viser en forenklet versjon av systemet og er inspirert fra [12]. Figuren til høyre viser enlinjeskjemaet til DC-systemet med BESS (battery energy storage system) og solcelleanlegg.

Dette systemet er ikke praktisk realiserbart i dag da det i følge arbeid gjort i forprosjektet ikke finnes DC-alternativer til alle lastene i den aktuelle husstanden [27]. For at det skal være mulig å tenke seg et rent DC-system kreves det derfor noen antagelser. I [1] er det gjort et arbeid for å undersøke potensielle energibesparelser dersom det ble designet DC-laster som erstatter dagens AC-laster. Resultatene av dette arbeidet for de ulike lastene er gjengitt i tredje kolonne i tabell 4.4. På bakgrunn av dette er det derfor for denne systemtopologien antatt at alle lastene kan forsynes med DC-spenning med effekt-trekket regnet ut i fjerde kolonne i tabell 4.4. Bruksmønsteret er antatt å være det samme som for de to foregående systemene.

Artikkel	Effekt [W]	Energibesparelse ved bruk av DC-teknologi [%]	Effekt [DC]
Kjøkken			
Kjøleskap	160	59,1	65
Kaffetrakter	1520	0	1520
Vannkoker	1630	0	1630
Komfyrtopp	8000	22,6	6656
Stekeovn	1400	22,6	1084
Mikrobølgeovn	700	0	700
Oppvaskmaskin	2000	56,9	862
Avtrekksvifte	150	0	150
Stavmikser	1000	0	1000
Kjøkkenmaskin	800	0	800
Stue			
Tv	84	0	84
Pc	300	0	300
Panelovn 1	500	0	500
Panelovn 2	1000	0	1000
Panelovn 3	600	0	600
Gang			
Varmepumpe	2000	0	2000
Bad			
Vaskemaskin	2000	39,1	1218
Tørketrommel	500	51,1	245
Varmtvannsbereder	4200	56,0	1848
Avfukter	210	0	210
Hårføner	2200	0	2200
Lys			
Lys (LED)	120	18,8	98
Annet			
Støvsuger	1200	0	1200

Tabell 4.4: Viser potensielle energibesparelser ved overgang til DC-produkter. Data for besparelser er hentet fra [1].

I figur 4.12 er lastprofilen for systemet med DC-laster plottet for sommer og vinter. Total last sommer og vinter er henholdsvis 25,3 kWh og 41 kWh.



Figur 4.12: Viser lastprofilen etter at besparelsene ved overgang til DC-produkter er tatt med.

Valg av DC-spenning

Spenningsnivået i DC-systemet er valgt på samme bakgrunn som i kapittel 4.4.1 om hybrid-systemet. Spenningsnivåene på DC-bus 1 og DC-bus 2 er derfor også her satt til 380 V og 120 V.

Fordeling av DC-laster

På samme måte som for hybrid-systemet må lastene fordeles mellom DC-bus 1 og DC-bus 2. Det er også i dette systemet bestemt at alle laster under 2000 W skal forsynes fra DC-bus 2 (120 V), mens de resterende lastene skal forsynes fra DC-bus 1 (380 V). Lastene i tabell 4.4 er fordelt på de to spenningsnivåene som vist i tabell 4.5.

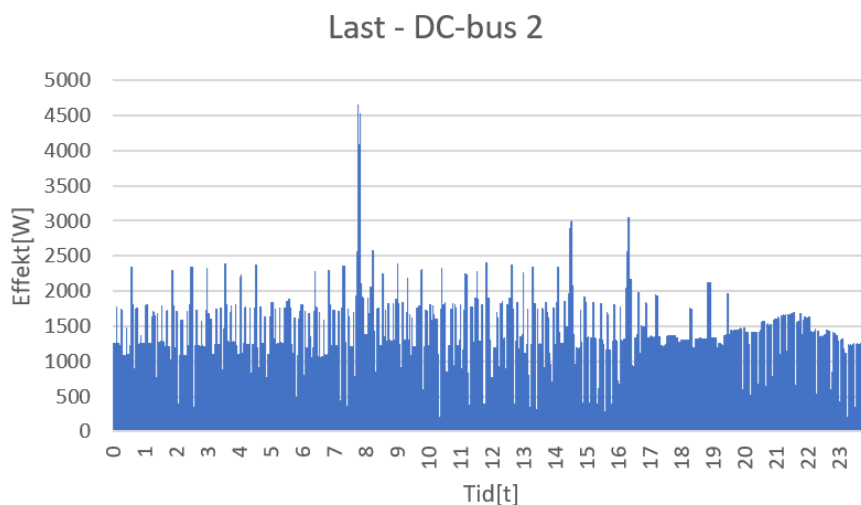
DC-bus 1 - 380 V		DC-bus 2 - 120 V	
Artikkel	Effekt [W]	Artikkel	Effekt [W]
Komfyrtopp	6650	TV	84
Varmepumpe	2000	PC	300
Hårføner	2000	Lys	98
		Kjøleskap	65
		Tørketrommel	245
		Kaffetrakter	1520
		Vannkoker	1630
		Stekeovn	1084
		Mikrobølgeovn	700
		Avtrekksvifte	150
		Stavmikser	1000
		Kjøkkenmaskin	800
		Panelovn 1	500
		Panelovn 2	1000
		Panelovn 3	600
		Avfukter	210
		Vaskemaskin	1218
		Oppvaskmaskin	862
		Varmtvannsbereider	1848
		Støvsuger	1200
SUM	10560		15114

Tabell 4.5: Viser fordelingen av laster mellom DC-bus 1 og DC-bus 2.

Dimensjonering av DC-DC-konverter

Ved dimensjonering av DC-DC-konverteren som skal forsyne DC-bus 2 i DC-systemet er det tatt utgangspunkt i lastprofilen til lastene på DC-bus 2, i tillegg er det tatt utgangspunkt i den maksimale effekten som kan trekkes fra DC-bus 2.

Figur 4.13 viser lastprofilen for alle lastene på DC-bus 2 for en dag der alle lastene er aktive på ett eller annet tidspunkt i løpet av dagen. Maksimal effekt som trekkes er her ca. 4700 W.



Figur 4.13: Viser lastprofilen til alle lastene som er forsyne fra DC-bus 2.

Basert på tabellen i figur 4.5 er maksimal effekt som trekkes dersom alle lastene er aktive på samme tid summert til 15114 W. Denne effekten må korrigeres med en samtidighetsfaktor. Tabellen i figur 4.14 viser samtidighetsfaktoren for fire ulike antall kurser for boliger og andre bygg.

Antall kurser	Bolig	Andre bygg
2-3	0,8	0,9
4-5	0,7	0,8
6-9	0,6	0,7
≥10	0,5	0,6

Figur 4.14: Tabellen viser en oversikt over samtidighetsfaktorer for boliger og andre bygg [13].

Velger her faktoren for over 10 kurser for boliger, som er 0,5. Dette gir:

$$P_{dim} = 15114W \cdot 0,5 = 7557W \quad (4.3)$$

Størrelsen på DC-DC-konverteren velges derfor utifra den høyeste effekten som er 7557 W. Det trengs derfor en konverter med merkeeffekt på 8000 W.

For denne konverteren er det brukt samme kurve for effektivitet som i hybridsystemet. Kurven må derimot tilpasses en konverter med merkeeffekt 8000 W før den implementeres i modellen.

4.5 VSC/Inverter

For VSC/inverteren i de ulike systemene er det ikke gjort en dimensjonering på lik linje med DC-DC-konverteren som forsyner DC-bus 2. Dette er fordi dette er komponenter som i hovedsak ikke er å finne på markedet i den formen det er tenkt her. Det er derfor gjort en forenkling ved at denne konverteren kun er modellert med hensyn til effektivitet. Det er her valgt å bruke en effektivitet på 95 % for både inverter og VSC. Mer om hvordan denne konverteren er modellert er vist i kapittel 5.2.4.

Kapittel 5

Modell

5.1 Introduksjon til modellering

Siden hovedmålet med arbeidet i denne rapporten er å undersøke systemeffektiviteten, samt i hvor stor grad systemene er avhengig av energi fra nettet, var det ingen grunn til å lage en for komplisert modell. Hovedfokuset har derfor vært å lage en så enkel modell som mulig, som kun inkluderer de nødvendige aspektene. Disse er:

- Lastflyt
- Påvirkning av solproduksjon
- Påvirkning av batterilagring
- Komponenteffektivitet
- Systemeffektivitet

Verktøyet som er valgt for simulering er Matlab/Simulink. Dette er i utgangspunktet ikke et program laget for lastflytanalyser, men mangelen på alternativer beregnet for bruk på lavspenningsanlegg gjorde dette til det beste alternativet. Grunnen til dette er blant annet at det er svært enkelt å hente inn datamålinger som input til modellen. I tillegg er programmet godt egnet til å modellere kraftelektronikk, samt at kontroll av batteri og andre komponenter kan gjøres på en oversiktlig og enkel måte.

Modellen er en videreutviklet og utvidet versjon av modellen som ble laget i forprosjektet til dette arbeidet. Den gamle modellen hadde tydelige mangler da den hverken inneholdt DC-laster, tap i kabler eller kraftelektronikk [27]. Basert på kapitlet «Videre arbeid» i forprosjektoppgaven skal modellen derfor inneholde følgende:

- Tap i kabler
- AC-laster
- DC-laster
- Tap i AC-DC-konvertere
- Tap i DC-DC-konvertere
- Tap i batterisystem
- Ulike DC-spenningsnivå

5.1.1 Modelleringsprosessen

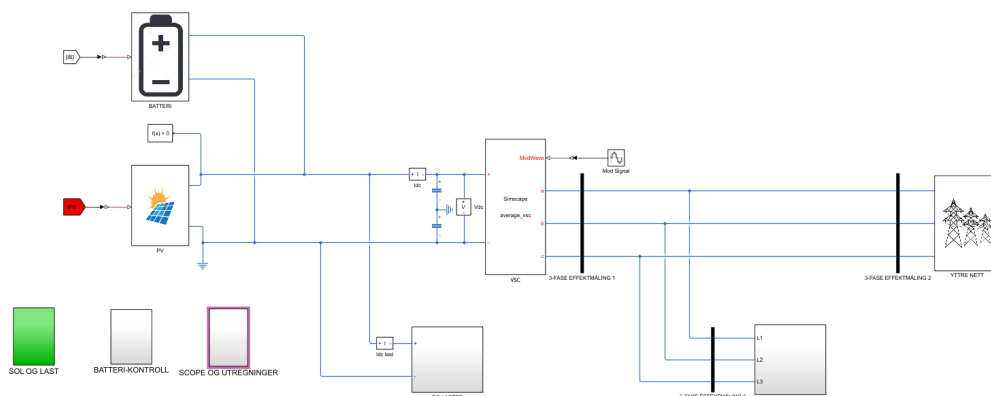
Arbeidet med modellen begynte med å undersøke tidligere arbeid gjort på feltet for å få en oversikt over hvordan et slikt system kunne modelleres. I [55] er system med solproduksjon og batteri koblet til en felles DC-bus simulert ved hjelp av Matlab. Her er fokuset på responser i systemet med simulasjonstid. I [41] er både AC- og DC-systemtopologier undersøkt for tap i kabler og konvertere, mens det i [12] er gjort lignende undersøkelser med data for ulike stater i USA.

Prosessen gikk så videre med å utvikle de ulike modulene som skulle inngå i modellen. Her ble etterhvert bidrag fra Juan Sagarduy og Rohit Agrawal i Mathworks sitt service-team viktige for videre fremgang [60]. Undertegnede ble gjort oppmerksom på ny versjon av Matlab som inneholdt komponenter som gjorde modelleringen mer tilpasset dette arbeidets behov. Dette gjaldt særlig modellering av kraftelektronikk som vil bli vist senere i kapitlet. Versjonen av Matlab som er brukt i dette arbeidet er R2021a.

5.2 Beskrivelse av modell

Figur 5.1 viser hele modellen. Denne består av ytre nett, AC-laster koblet til en AC-bus, VSC konverter som kobler AC- og DC-siden sammen, DC-laster, solcelle og batteri, alle koblet til en felles DC-bus. Dette kapitlet vil beskrive oppbyggingen av alle disse blokkene i detalj.

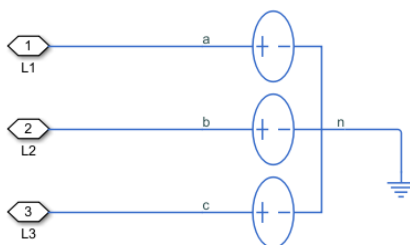
Felles for alle konvertere i modellen er at de er modellert som «Average model». Dette er en forenklet måte å modellere kraftelektronikk på som ikke tar hensyn til svitsjing. Dette har en rekke fordeler som raskere simulering, mindre kompleks modellering og enklere kontrolldesign. Ulempene er at modellen vil inneholde mindre informasjon om dynamikken til systemet, i tillegg til at modellen vil kunne bli mindre nøyaktig [61]. Denne måten å simulere på egner seg godt til effektflytanalyser, men egner seg for eksempel ikke til å analysere harmoniske forstyrrelser.



Figur 5.1: Viser hele modelloppsettet i Simulink.

5.2.1 Ytre nett

Det ytre nettet er modellert som en trefase spenningskilde med 230 V fase-fase RMS spenning. Frekvensen er 50 Hz med en kortslutningseffekt på 10e6 VA. Det ytre nettet forsyner energi til systemet når det er mangel på energi i systemet, og absorberer overskytende energi fra systemet når dette er tilfellet.



Figur 5.2: Viser hvordan det ytre nettet er modellert i Simulink. Dette er her modellert som en trefase spenningskilde.

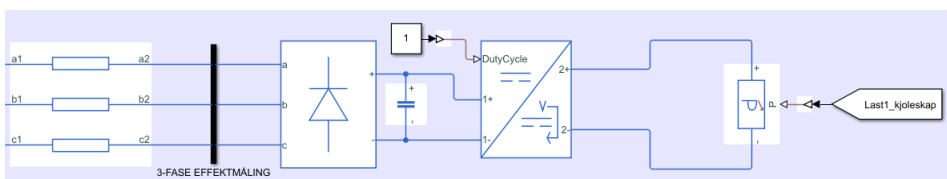
5.2.2 AC-laster

AC-lastene i systemet er modellert på to ulike måter. En for de interne DC-lastene, og en for direkte AC-laster. Som figur 5.3 og 5.4 viser er kabelene modellert som trefase-kabler. Den valgte kabel-blokken er ekvivalent til en enfase-kabel. Kablene er modellert som en ren resistans da det er antatt at den induktive delen kan neglisjeres.

Det er to grunner til at kabelen er modellert som en trefase-kabel. Den første grunnen er at komponentbiblioteket til Matlab ikke inkluderer enfase AC-DC-konvertere. Det

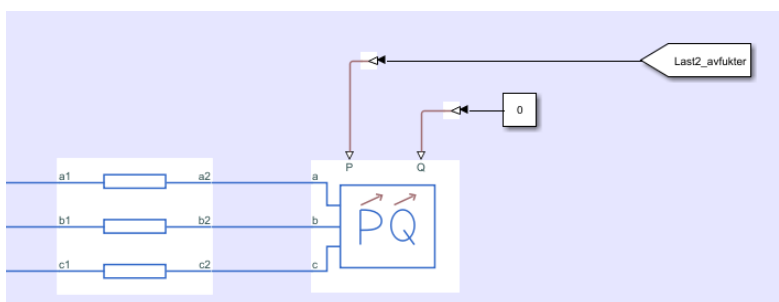
var derfor nødvendig å modellere det på denne måten for å få trefase-input til AC-DC-konverteren vist i figur 5.3. Den andre grunnen er for å unngå ubalansert last på AC-bussen. Dette er ønskelig å unngå for å sikre riktig funksjon av VSC-konverteren. Det er derfor verdt å kommentere at systemet ikke er egnet for å simulere usymmetriske laster, dette er uproblematisk da dette ikke var en del av omfanget til dette arbeidet.

Figur 5.3 viser en intern DC-last. Denne typen last er modellert med en AC-DC-konverter i serie med en DC-DC-konverter. Dette er for å kunne modellere effektiviteten til konverteren. Dette er mulig i DC-DC-konverter-blokken, men ikke i AC-DC-konverterblokken. AC-DC-konverteren er derfor modellert som en ideell komponent, mens DC-DC-konverteren er modellert med data for effektivitet fra tabell 4.2 i kapittel 4.3.1. Signalet for «duty cycle» for DC-DC-konverteren er satt til 1 for enkelhets skyld. Selve lasten er modellert ved hjelp av en «Dynamic Load»-blokk som tar lastprofilen for den aktuelle lasten som inngangsverdi.



Figur 5.3: Viser hvordan en intern DC-last er modellert i Simulink.

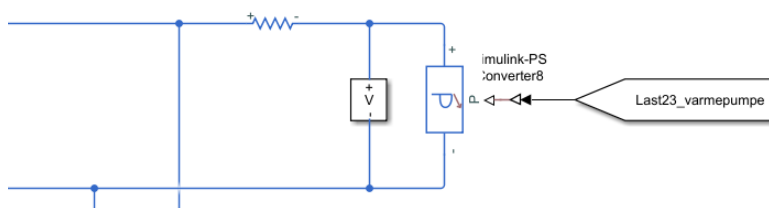
Figur 5.4 viser hvordan den direkte AC-lasten er modellert. Denne er modellert ved hjelp av en «Dynamic Load (Three-Phase)»-blokk som tar lastprofilen for den aktuelle lasten som inngangsverdi.



Figur 5.4: Viser hvordan en direkte AC-last er modellert i Simulink.

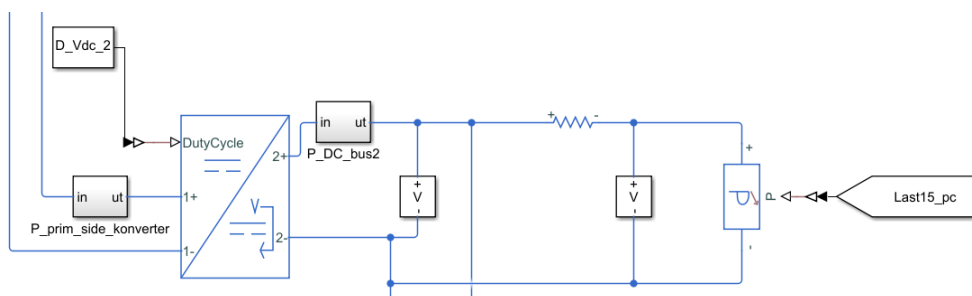
5.2.3 DC-laster

DC-lastene i systemet er modellert som vist i figur 5.5. Denne figuren viser en DC-last som er direkte koblet til DC-bus 1. Lasten er modellert med en «Dynamic Load»-blokk som tar effekten til den aktuelle lasten som inngangsverdi. Kabelen er modellert ved bruk av en resistans i serie med lasten. Den induktive delen er også her neglisjert.



Figur 5.5: Viser hvordan en DC-last forsynt fra DC-bus 1 er modellert i Simulink.

Figur 5.6 viser hvordan DC-laster som er koblet til DC-bus 2 er modellert. Lastene er modellert med en «Dynamic Load»-blokk i serie med en resistans (kabel). Lastene på DC-bus 2 er forsynt av en DC-DC-konverter som konverterer 380 V på DC-bus 1 til 120 V på DC-bus 2.



Figur 5.6: Viser hvordan en DC-last forsynt fra DC-bus 2 er modellert i Simulink.

Ligning 5.1 viser formelen for «duty cycle» for DC-DC-konverteren som forsyner DC-bus 2.

$$D_{DC-bus2} = \frac{V_{DC-bus2}}{V_{DC-bus1}} \quad (5.1)$$

5.2.4 VSC

AC-DC-konverteren som kobler sammen AC- og DC-siden er modellert ved hjelp av blokken «Average-Value Voltage Source Converter». Denne blokken har tre muligheter når det gjelder modellering av effektiviteten til konverteren. Disse tre er konstant tap, koeffisient-basert tap og tap som funksjon av strømmen gjennom konverteren. I utgangspunktet skulle tapet i konverteren modelleres som funksjon av strømmen, men denne funksjonen fungerte derimot ikke som den skulle på det aktuelle tidspunktet. Det ble derfor, i samarbeid med Juan Sagarduy fra Mathworks sitt serviceteam, bestemt at tapene skulle modelleres ved å tilpasse metoden som modellerer tapene med koeffisienter [60]. Denne metoden regner ut tapene ved hjelp av ligning 5.2.

$$P_{tap} = P_{konstant} + k_s \cdot V_{DC} \cdot I_{rms} + kc1 \cdot I_{rms} + kc2 \cdot I_{rms}^2 \quad (5.2)$$

$P_{konstant}$ som er det konstante tapet i konverteren skal ikke modelleres her. Denne konstanten fjernes derfor fra ligningen. Deretter fjernes k_s og $kc2$, mens $kc1$ omdøpes til k . Konstanten k er nå forholdet mellom tapet til konverteren og strømmen gjennom konverteren.

$$P_{tap} = k \cdot I_{rms} \quad (5.3)$$

Tap kan også beskrives med følgende ligning:

$$P_{tap} = (1 - Effektivitet_{VSC}) \cdot P \quad (5.4)$$

Dette kan også skrives som:

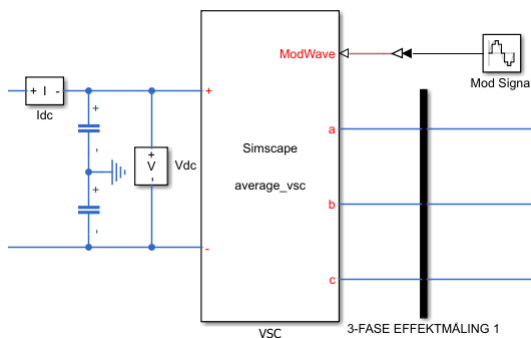
$$P_{tap} = (1 - Effektivitet_{VSC}) \cdot \frac{V_{DC}}{I_{RMS}} \quad (5.5)$$

Ved å kombinere ligning 5.3 og 5.5 kan k uttrykkes som funksjon av effektiviteten til konverteren og V_{DC} .

$$k = (1 - Effektivitet_{VSC}) \cdot V_{DC} \quad (5.6)$$

Figur 5.7 viser VSC-konverteren i midten og DC-bus 1 til venstre. Kontrollsignalet til VSC-konverteren er en sinusurve med frekvens 50 Hz og amplitude 0,989. Denne amplituden bestemmer verdien på DC-spenningen på DC-siden av konverteren. Lavere verdi på signal-amplituden gir høyere DC-spenning og omvent. Signal-amplituden er funnet

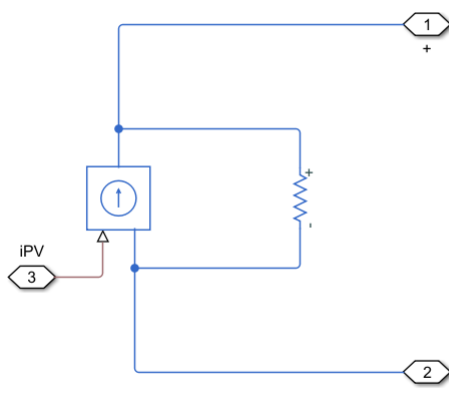
ved manuell innstilling for å oppnå ønsket spenning på DC-bus 1. Kondensatorene på DC-bus 1 har en størrelse på $3200 \mu\text{F}$.



Figur 5.7: Viser VSC-konverteren som kobler AC-bussen sammen med DC-bus 1.

5.2.5 Sol

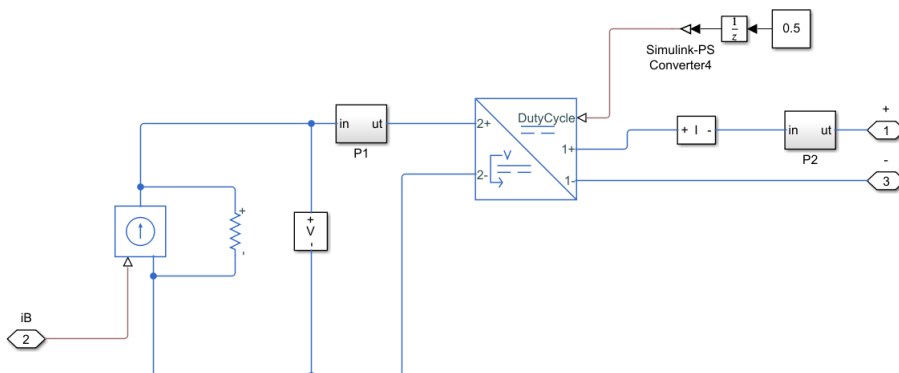
Solproduksjonen i systemet er modellert som en styrbar ideell strømkilde. Strømkilden tar den målte dataen som input. I et fysisk system ville solcelleanlegget vært koblet til systemet gjennom en DC-DC-konverter med en optimaliseringsalgoritme. Denne konverteren er ikke en del av omfanget til dette arbeidet og er derfor ikke inkludert i modellen.



Figur 5.8: Solproduksjon er implementert i modellen ved bruk av en ideell strømkilde.

5.2.6 Batteri

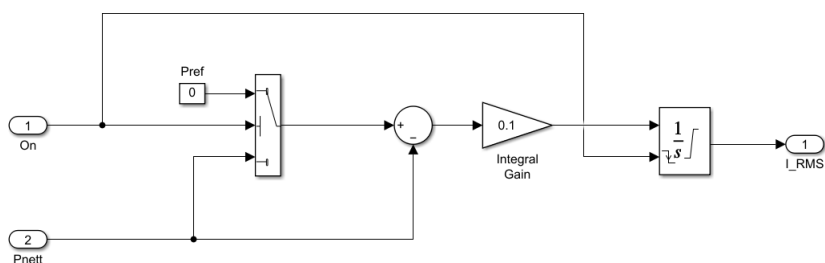
Figur 5.9 viser hvordan batterisystemet er modellert. Batteriet er modellert som en ideell strømkilde. Strømkilden er koblet til resten av systemet via en DC-DC-konverter. Metoden å modellere batteriet som en strømkilde er hentet fra [62]. Dette vil bli forklart i detalj senere i delkapittelet.



Figur 5.9: Batteriet er implementert i modellen ved bruk av en ideell strømkilde som kontrolleres av en batterikontroller. Konverteren som er koblet til strømkilden er kun for å inkludere tap i konverteren.

Kontroll

Kontroll av batteriet er som allerede nevnt basert på arbeidet gjort i [62]. Figur 5.10 viser hvordan batteristrømmen regnes ut av en PI-regulator. Regulatoren er designet slik at når den er aktiv er det ingen utveksling av effekt med nettet. Regulatoren tar inn målingen P_{nett} som referanse og gir ut batteristrømmen I_{RMS} . P_{nett} er effektflyten mellom systemet og det ytre nettet.



Figur 5.10: Viser batterikontrolleren til systemet. Kontrolleren er en PI-regulator som når den er aktiv regulerer lastflyten til batteriet slik at systemet ikke utveksler noe effekt med det ytre nettet.

Regulatoren slås av og på basert på en rekke betingelser vist i flytdiagrammet i figur 5.11. Flytdiagrammet tar de to variablene SOC og P_{diff} som input. SOC (state of charge) er ladenivået til batteriet til en hver tid, mens P_{diff} er differansen mellom produsert solenergi og last i systemet. SOC regnes ut ved hjelp av ligning 5.7.

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \int_0^t \frac{I}{C_{bat}} \cdot dt \quad (5.7)$$

Der:

$SOC(t)$ er ladenivå på batteri [%]

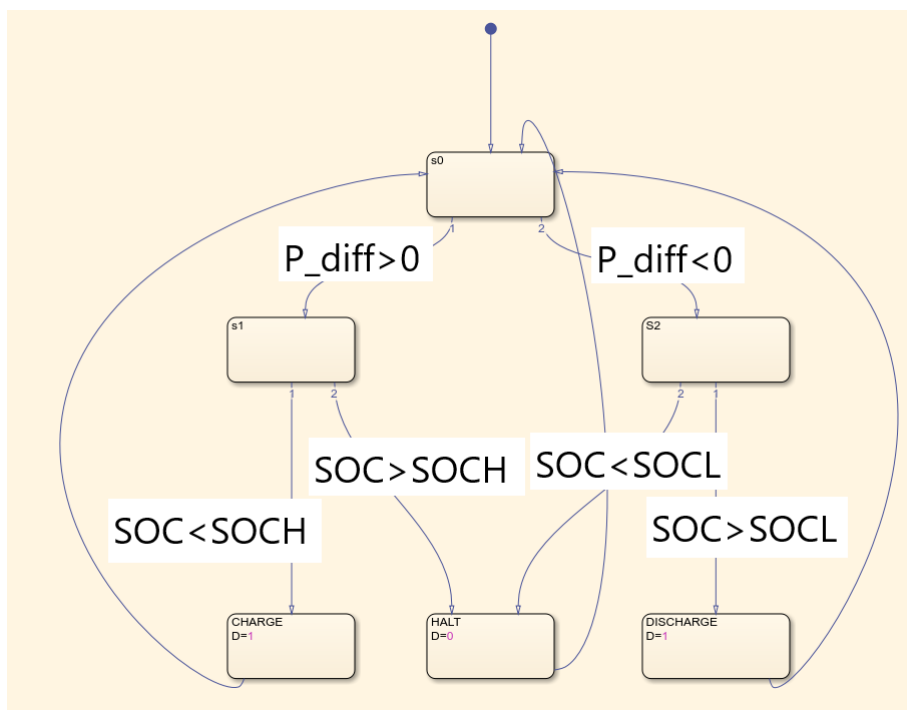
$SOC(t-1)$ er ladenivå på batteri ved start [%]

I er ladestrøm [I]

C_{bat} er batterikapasitet [Ah]

Basert på tilstanden til SOC og P_{diff} kontrolleres batterikontrolleren som vist i figur 5.11. Flytdiagrammet er designet slik at:

- Batteriet lades opp dersom solproduksjonen er høyere enn lasten, og SOC er lavere enn SOCH (øvre grense satt for SOC).
- Batteriet lades ut dersom solproduksjonen er lavere enn lasten, og SOC er høyere enn SOCL (nedre grense satt for SOC).
- Batteriet ikke er aktivt dersom solproduksjonen er høyere en lasten samtidig som SOC er høyere enn SOCH, eller dersom solproduksjonen er lavere enn lasten samtidig som SOC er lavere enn SOCL.



Figur 5.11: Viser flytdiagrammet som kontrollerer om batterikontrolleren er aktiv eller ikke.

5.3 Beregning av tap

En av fordelene med å modellere med et verktøy som Matlab/Simulink er at man kan gjøre målinger der man ønsker det i systemet. Alle tapene i systemet er regnet ut basert på målinger.

Tap i konvertere

Ligning 5.8 er en generell ligning som beskriver hvordan tapet i konvertere er regnet ut i modellen.

$$P_{tap, konverter} = P_{prim} - P_{sek} \quad (5.8)$$

Tap i kabler

Ligning 5.8 er en generell ligning som beskriver hvordan tapet i kabler er regnet ut i modellen.

$$P_{tap,kabel} = P_{for-kabel} - P_{etter-kabel} \quad (5.9)$$

5.4 Svakheter ved modellen

Under er det gitt en liste over forenklinger/svakheter for modellen:

- Ingen standby-tap i konvertere.
- Det er ikke benyttet effektivitetskurve for alle konverterene.
- Batteriet er satt til 20 % SOC ved simuleringsstart.
- Det er ikke tatt hensyn til kjemiske tap i batteri.
- Det er ikke tatt hensyn til dynamikk i konvertere.

Kapittel 6

Simulering

Simulasjonene vil bli gjort for to ulike tidsperioder. Alle tre systemløsningene vil bli simulert i 1 dag for en rekke scenarioer som vist i tabell 6.1. I tillegg vil det bli gjort simulasjoner med en tidsperiode på 1 uke for DC-systemet. scenarioene for dette er vist i tabell 6.2.

For alle simulasjonene som skal utføres vil følgende parametere måles:

- Tap i kabler
- Tap i AC-DC-konvertere
- Tap i DC-DC-konvertere
- Tap i VSC/inverter
- Tap i batteri-konverter
- Utveksling av energi med nett
- SOC (state of charge) for batteriet
- Spenning på DC-bus 1 og 2

System	Nett	Sol	Batteri	Sommer	Vinter
AC	X			X	
AC	X	X		X	
AC	X	X	X	X	
AC	X				X
AC	X	X			X
AC	X	X	X		X
Hybrid	X			X	
Hybrid	X	X		X	
Hybrid	X	X	X	X	
Hybrid	X				X
Hybrid	X	X			X
Hybrid	X	X	X		X
DC	X			X	
DC	X	X		X	
DC	X	X	X	X	
DC	X				X
DC	X	X			X
DC	X	X	X		X

Tabell 6.1: Viser en oversikt over scenarioene som skal simuleres for en tidsperiode på 1 dag.

Grunnet lang simuleringstid er det valgt å kun simulere lengre tidsperioder for DC-systemet. Systemet vil for alle scenarioene ha nettilkobling, solproduksjon og batterilagring. Det vil simuleres ulike kombinasjoner der solproduksjon og batterikapasitet settes til 100 % og 200 % som vist i tabell 6.2. Dette vil gjøre det mulig å se nærmere på hvordan systemet opererer når enten solproduksjon eller batterikapasiteten varierer.

For å kunne simulere en lengre tidsperiode er det konstruert en lastprofil og en profil for solproduksjon for 1 uke. Den totale lasten for sommer og vinter er henholdsvis 129,3 kWh og 239,3 kWh. Den totale solproduksjonen for sommer og vinter er henholdsvis 168 kWh og 16 kWh. Lastprofilene er lagt ved i vedlegg A.2.

System	BATTERI		SOL		SOMMER	VINTER
	100 %	200 %	100 %	200 %		
DC	X		X		X	
DC	X			X	X	
DC		X	X		X	
DC		X		X	X	
DC	X		X			X
DC	X			X		X
DC		X	X			X
DC		X		X		X

Tabell 6.2: Viser en oversikt over scenarioene som skal simuleres for en tidsperiode på 1 uke.

Beregning av systemeffektivitet

I vurderingen av de ulike systemene vil den totale effektiviteten til systemet være en viktig faktor. Det er viktig å understreke at systemeffektiviteten vil bli brukt til å sammenligne systemene når systemtopologien er den samme. Det vil f.eks si at AC-systemet med solproduksjon kun vil bli sammenlignet med hybrid- og DC-systemet med solproduksjon. Dette er viktig å få fram da et system med solproduksjon muligens vil ha høyere tap enn et system uten. Dette betyr likevel ikke at det ikke er fordelaktig med lokal solproduksjon i systemet selv om tapene muligens vil øke.

Ligning 6.1 viser hvordan den totale effektiviteten til systemene regnes ut. Totalt tap er summen av alle tapene i systemet, mens totalt energibehov er summen av totalt tap og total last i systemet.

$$\text{Systemeffektivitet}[\%] = 100 \cdot \left(1 - \frac{\text{Totalt tap [kWh]}}{\text{Totalt energibehov [kWh]}} \right) \quad (6.1)$$

Kapittel 7

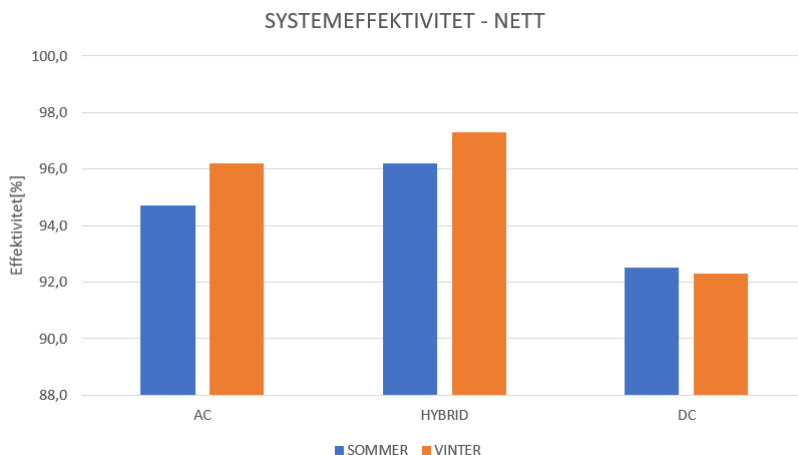
Resultater

7.1 Introduksjon til resultater

I dette kapittelet vil resultatene fra simuleringen legges fram. Resultatene som vil presenteres er systemeffektivitet og tap, spenningsnivå på DC-bus 1 og DC-bus 2, og i hvor stor grad systemene er avhengig av energi fra nettet. Det er som vist i forrige kapittel gjort simulasjoner for to ulike tidsperioder, en dag og en uke. Resultatene vil presenteres slik at de tre ulike systemløsningene kan sammenlignes på en oversiktlig måte. Resultatene for de tre systemløsningene vil legges fram slik at de kan sammenlignes for henholdsvis kun nettilkobling, nettilkobling og solproduksjon, og nettilkobling, solproduksjon og batterilagring. På denne måten kan oppførselen til de tre systemløsningene sammenlignes for de tre ulike måtene å drifte systemene på.

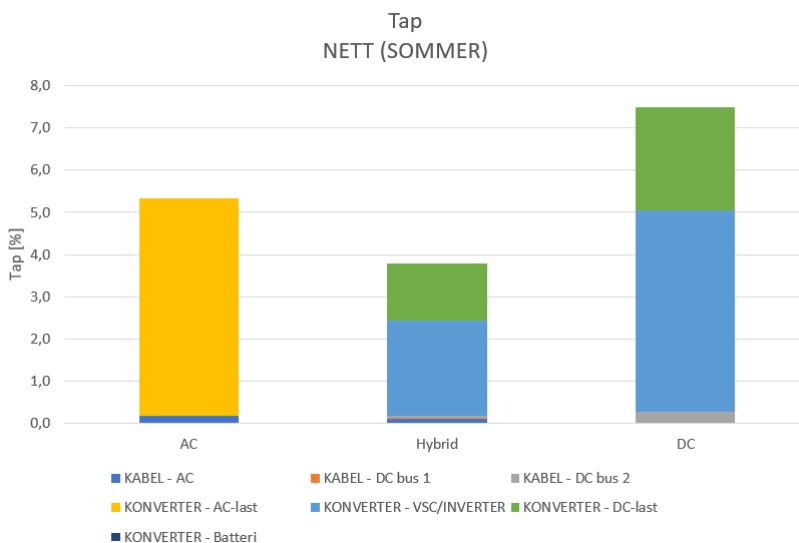
7.2 Nett

Figur 7.1 viser den totale effektiviteten til systemet for de tre systemløsningene ved kun nettilkobling. Figuren viser at hybrid-systemet har høyest effektivitet, mens DC-systemet har lavest. For AC- og hybrid-systemet er effektiviteten høyest om vinteren, mens den for DC-systemet er høyest om sommeren.

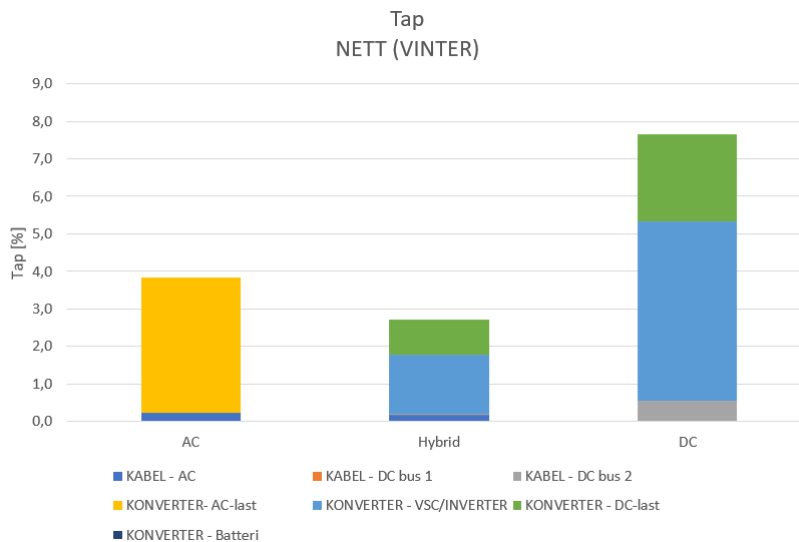


Figur 7.1: Viser systemeffektiviteten når systemene kun er koblet til nettet, uten solproduksjon og batterilagring.

Figur 7.2 og 7.3 viser sammensetningen av tapene i systemet for henholdsvis sommer og vinter. En umiddelbar observasjon er at tapet i kablene utgjør en liten del av det totale tapet i systemet. Dette gjelder for alle de tre systemene for alle scenarioene. I AC-systemet er det i hovedsak to kilder til tap, dette er kabler og AC-DC-konvertere som forsyner lastene med intern DC-spenning. I hybrid-systemet er tapene fordelt mellom både AC- og DC-kabler, VSC-konverteren og DC-DC-konverteren som forsyner lastene på DC-bus 2. Over 95 % av tapene oppstår i de to konverterene. I DC-systemet oppstår også over 95 % av tapene i konverterene, det resterende kommer fra kablene fra DC-bus 2. Tapet fra kablene på DC-bus 1 er svært lave. Forskjellen mellom tapene om sommeren og vinteren er lavere tap om sommeren grunnet fraværet av oppvarmingslast.

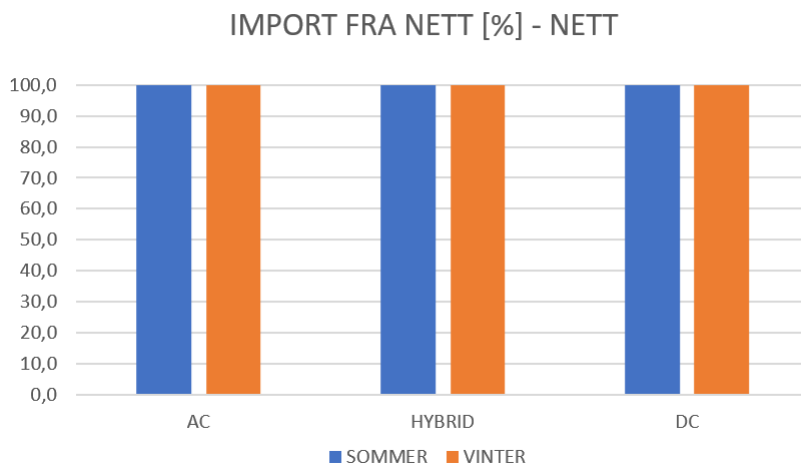


Figur 7.2: Viser fordelingen av tapene om sommeren i systemene ved kun nettilkobling.



Figur 7.3: Viser fordelingen av tapene om vinteren i systemene ved kun nettilkobling.

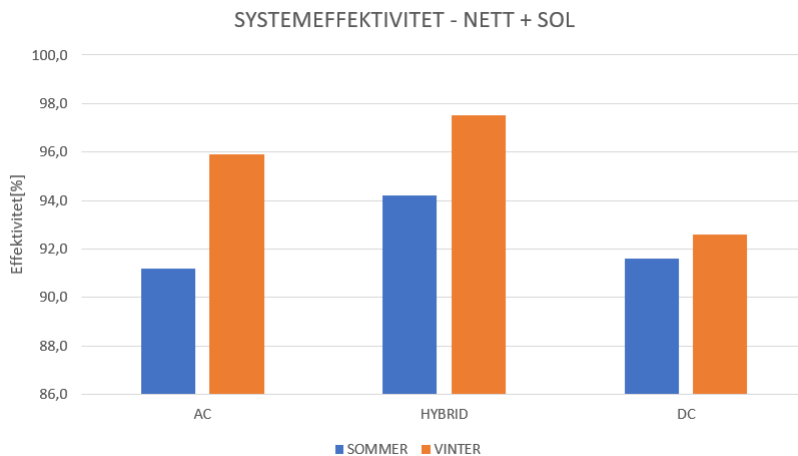
Figur 7.4 viser hvor stor del av det totale energibehovet i systemet som importeres fra nettet. For scenarioriet med kun nettilkobling importeres 100 % av energien fra nett da systemet ikke har lokal solproduksjon.



Figur 7.4: Viser graden av import fra nett når systemene kun er koblet til nettet.

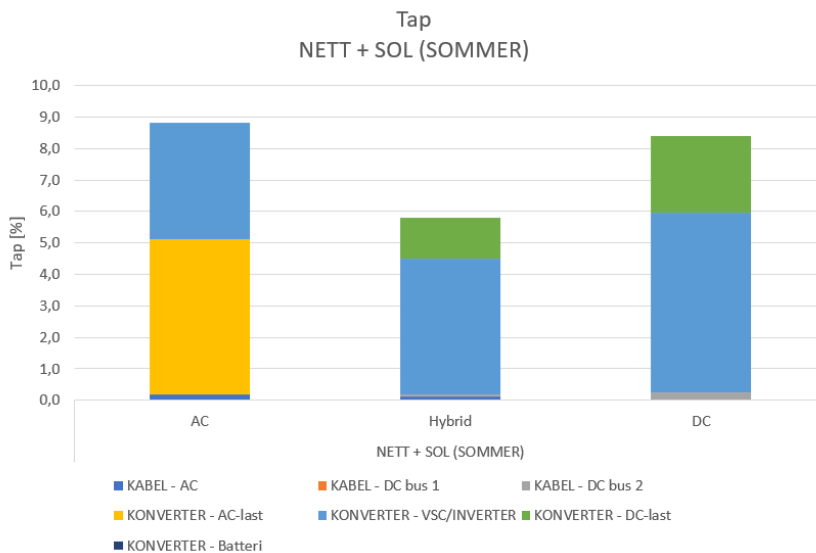
7.3 Nett + sol

Figur 7.5 viser den totale systemeffektiviteten for de tre systemløsningene når systemene har nettilkobling og solproduksjon. Figuren viser at om sommeren er hybrid-systemet mest effektivt, og AC-systemet det minst effektive. Om vinteren er hybrid mest effektivt, mens DC er minst effektivt.

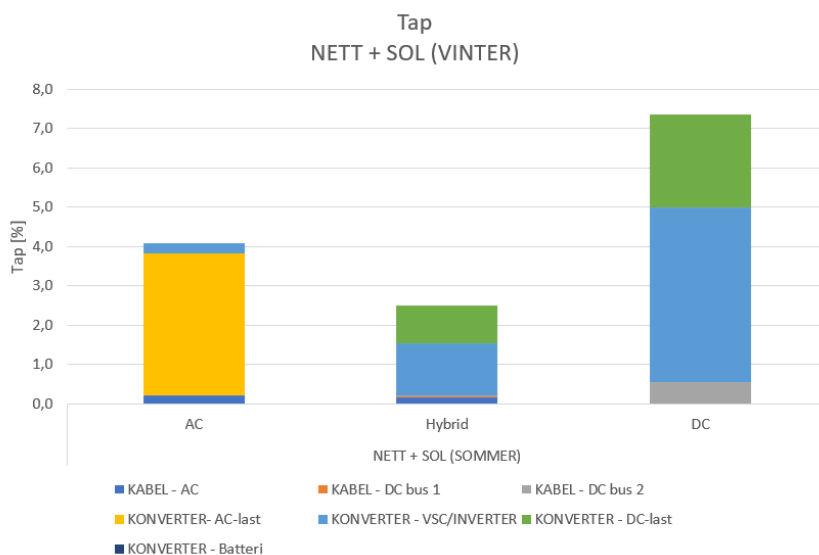


Figur 7.5: Viser systemeffektiviteten når systemene er koblet til nettet og har lokal produksjon av solenergi. Systemet er har ikke batterilagring i dette tilfellet.

Figur 7.6 og 7.7 viser fordelingen av tapene i systemet for henholdsvis sommer og vinter. I AC-systemet kommer tapene i hovedsak fra AC-last-konverterene og inverteren som konverterer solenergien fra DC-siden til AC-siden. I hybrid-systemet kommer tapene fra VSC-konverteren og DC-last-konverteren, det samme gjelder for DC-systemet. Tapsandelen er en god del lavere for vinter-scenariot for både AC- og hybrid-systemet, mens det kun observeres en liten nedgang for DC-systemet.

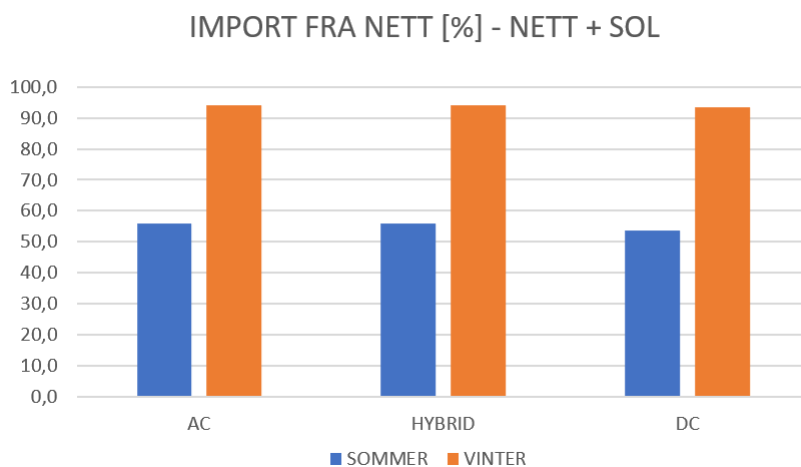


Figur 7.6: Viser fordelingen av tapene om sommeren i systemene ved nettilkobling og lokal produksjon av solenergi.



Figur 7.7: Viser fordelingen av tapene om vinteren i systemene ved nettilkobling og lokal produksjon av solenergi.

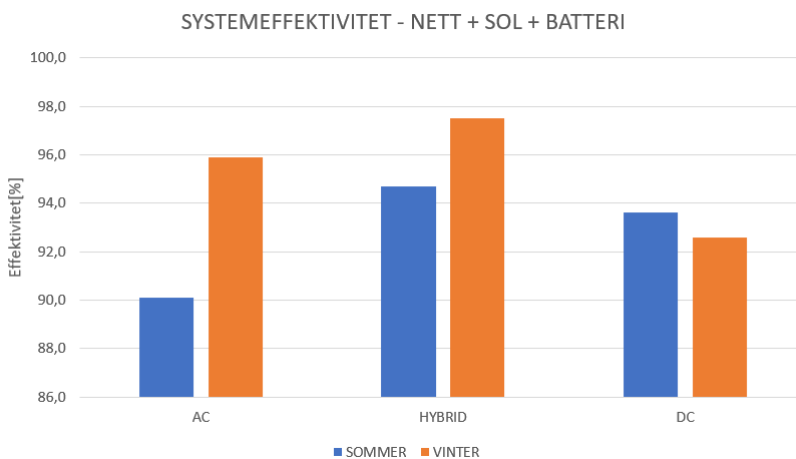
Figur 7.8 viser hvor stor del av det totale energibehovet i systemet som importeres fra nettet. For dette scenarioet med både nettilkobling og lokal solproduksjon er andelen importert energi om sommeren, ca 55 % for alle de tre systemløsningene. Om vinteren er importgraden over 90 % for alle.



Figur 7.8: Viser graden av import fra nett når systemene er koblet til nettet og har lokal produksjon av solenergi.

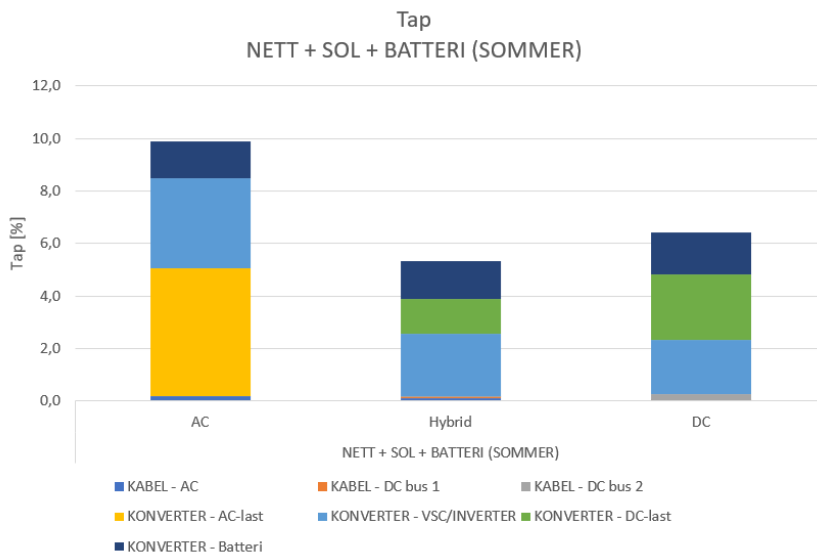
7.4 Nett + sol + batteri

Figur 7.9 viser den totale systemeffektiviteten til systemet for de tre systemløsningene når systemet har nettilkobling, solproduksjon og batterilagring. For dette scenarioet viser resultatene at hybrid-systemet er det mest effektive både sommer og vinter. AC-systemet er minst effektivt om sommeren, mens DC-systemet har lavest effektivitet om vinteren.

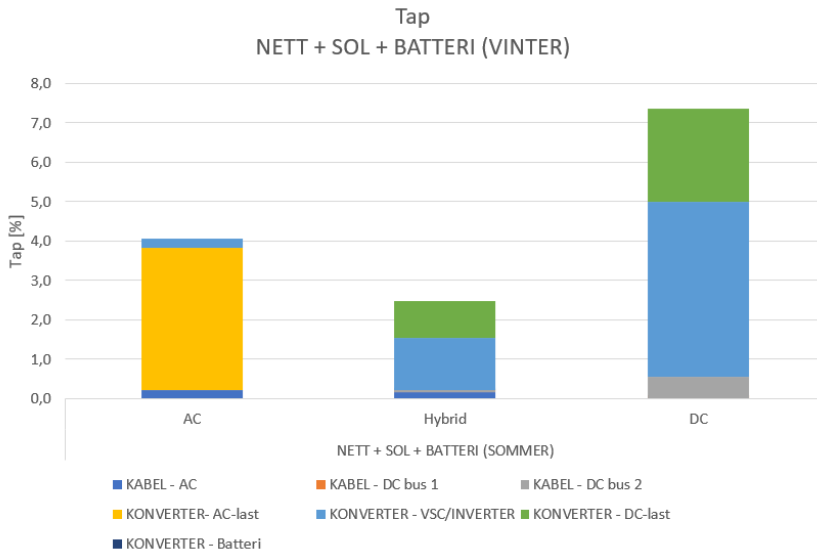


Figur 7.9: Viser systemeffektiviteten når systemene er koblet til nettet, har lokal produksjon av solenergi og batterilagring.

Figur 7.10 og 7.11 viser hvor tapene oppstår i systemet for henholdsvis sommer og vinter. I AC-systemet kommer tapene i hovedsak fra AC-last-konverterene, inverteren og batteri-konverteren. I hybrid- og DC-systemet kommer tapene i hovedsak fra VSC-konverteren, DC-last-konverteren og batteri-konverteren. Om vinteren reduseres tapene for AC- og hybrid-systemet, mens det øker for DC-systemet. Tapsøkningen i DC-systemet kommer primært fra VSC-konverteren da tilnærmet all last må forsynes gjennom denne.

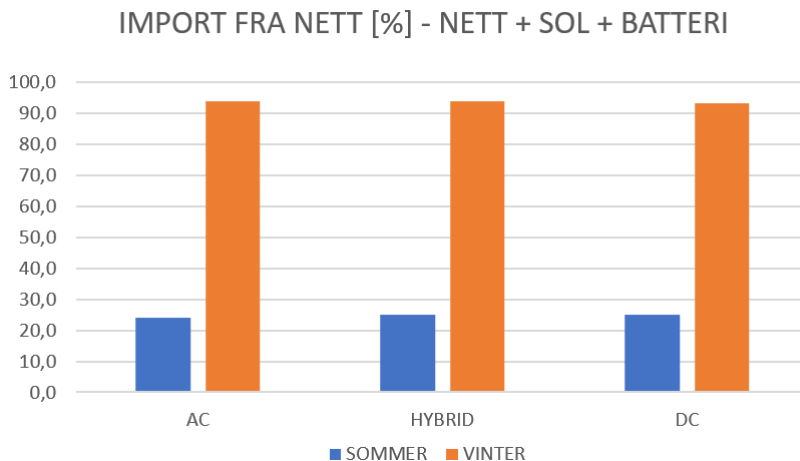


Figur 7.10: Viser fordelingen av tapene om sommeren i systemene ved nettilkobling, lokal produksjon av solenergi og batterlagring.



Figur 7.11: Viser fordelingen av tapene om vinteren i systemene ved nettilkobling, lokal produksjon av solenergi og batterlagring.

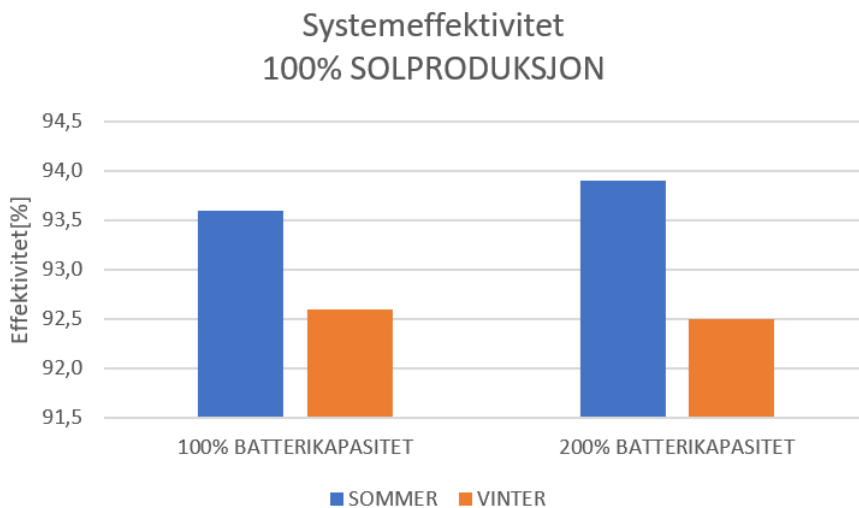
Figur 7.10 viser hvor mye av systemets totale energibehov som importeres fra nettet. Også i dette scenarionet er resultatene tilnærmet like for alle tre systemløsningene. Ca 25 % av energibehovet importeres fra nettet sommerstid, mens nesten 95 % importeres vinterstid.



Figur 7.12: Viser graden av import fra nett når systemene er koblet til nettet, har lokal produksjon av solenergi og batterilagring.

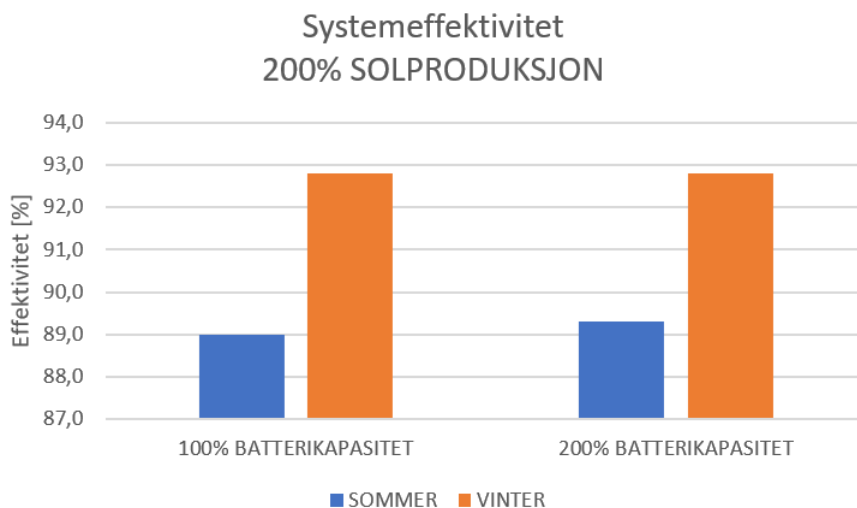
7.5 DC - 1 uke

Ved å simulere et system i en kort tidsperiode som gjort over er det vanskeligere å se det fulle bildet av hvordan systemet oppfører seg. Det er derfor gjort simulasjoner for en tidsperiode på 1 uke for å bedre kunne undersøke virkningen av blant annet batterilagring. Disse simulasjonene er kun gjort for DC-systemet. Figur 7.13 viser systemeffektiviteten for DC-systemet med 100 % solproduksjon og batterikapasitet på henholdsvis 100 % og 200 %. Effektiviteten til DC-systemet øker noe sommerstid når batterikapasiteten dobles da en større del av solproduksjonen anvendes på DC-siden av VSC-konverteren. Vinterstid er resultatene tilnærmet like.



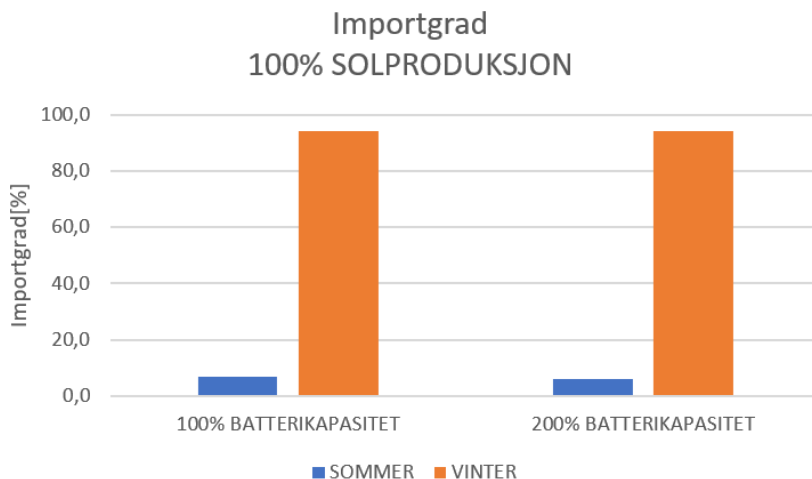
Figur 7.13: Viser systemeffektiviteten til DC-systemet ved 100 % solproduksjon og henholdsvis 100 % (til venstre) og 200 % (til høyre) batterikapasitet.

Figur 7.14 viser systemeffektiviteten til DC-systemet med 200 % solproduksjon og henholdsvis 100 % og 200 % batterikapasitet. Med overproduksjon av solenergi i systemet synker effektiviteten til systemet da en stor andel av solenergien må eksporteres til nettet. For vinter-scenarioet holder effektiviteten seg ganske stabil.

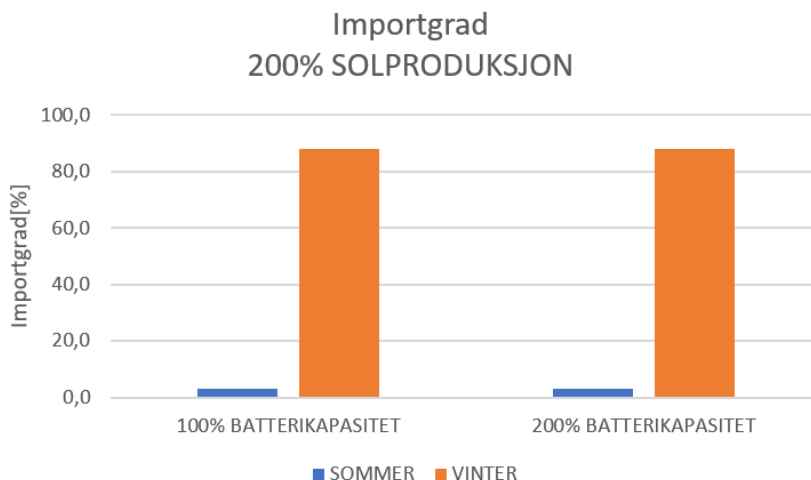


Figur 7.14: Viser systemeffektiviteten til DC-systemet ved 200 % solproduksjon og henholdsvis 100 % (til venstre) og 200 % (til høyre) batterikapasitet.

Figur 7.15 og figur 7.16 viser importgraden til systemet for de ulike scenarioene som er simulert. Også her er startverdien til batterinivået satt til 20 %. Importgraden er her under 7 % for alle tilfeller.



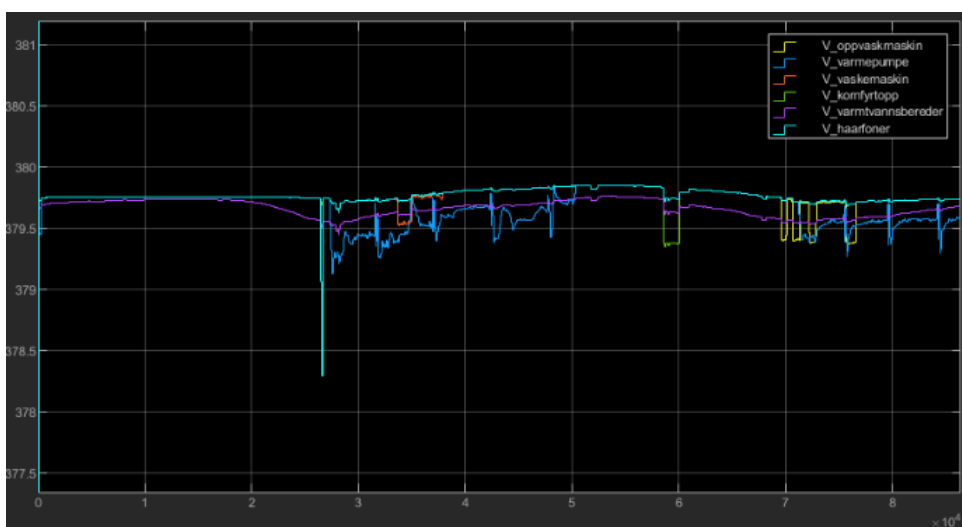
Figur 7.15: Viser importgraden til DC-systemet ved 100 % solproduksjon og henholdsvis 100 % (til venstre) og 200 % (til høyre) batterikapasitet.



Figur 7.16: Viser importgraden til DC-systemet ved 200 % solproduksjon og henholdsvis 100 % (til venstre) og 200 % (til høyre) batterikapasitet.

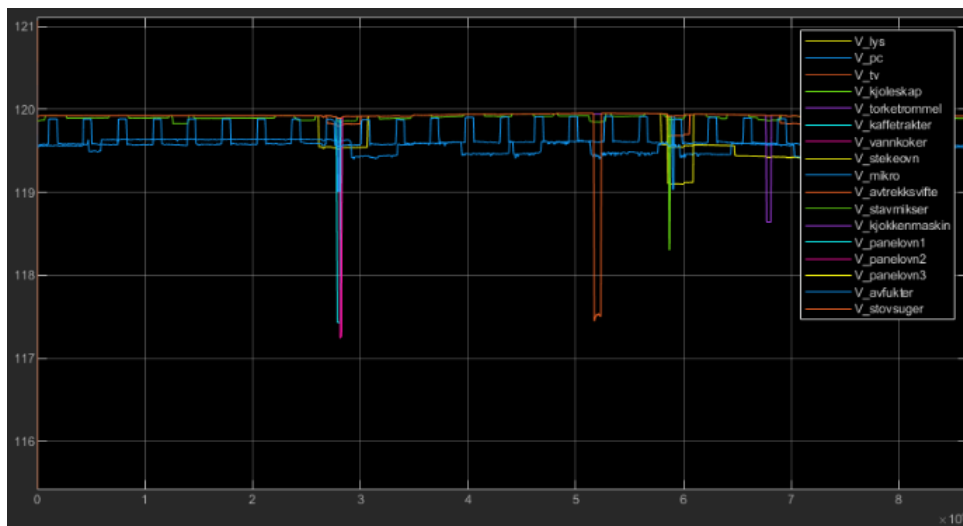
7.6 Spenning DC-bus 1 og 2

Figur 7.17 og 7.18 viser spenningsmålinger for henholdsvis DC-bus 1 og 2 i DC-systemet. Som figurene viser er spenningsfallet over kablene svært lavt både for 380 V og 120 V. Det høyeste spenningsfallet på DC-bus 1 er på ca 1,5 V eller 0,4 %.



Figur 7.17: Viser spenningsprofil for lastene på DC-bus 1.

Det høyeste spenningsfallet på DC-bus 2 er på ca 2,7 V eller 2,3 %.



Figur 7.18: Viser spenningsprofil for lastene på DC-bus 2.

7.7 Oppsummering av resultater

NETT:

Resultatene når de tre systemløsningene er simulert med kun nettilkobling viser at DC-systemet er det minst effektive. Hovedgrunnen til dette er at uten solproduksjon i systemet må all lasten i denne systemtopologien forsynes gjennom VSC-konverteren. Dette fører med seg tap som ikke oppstår i det originale AC-systemet der all lasten forsynes direkte fra nettet. Resultatene viser også at hybrid-systemet er det mest effektive systemet i dette tilfellet. Dette viser at det i dette tilfellet er mer effektivt å forsyne de interne DC-lastene fra en egen DC-bus enn gjennom individuelle AC-DC-konvertere. Resultatene viser også at det i dette tilfellet er mer effektivt å beholde AC-lastene koblet til AC-nettet enn at alle lastene er forsynt med DC.

NETT + SOL

I neste steg er systemene utvidet med lokal solproduksjon. Dette vil ha størst innvirkning på resultatene om sommeren da solproduksjonen for vinter-scenariet er svært lav. Også med solproduksjon er hybrid-systemet det mest effektive. Effektiviteten til AC-systemet om sommeren har gått ned fra ca 94,7 % til ca 91,2 % grunnet høyere tap som følge av at den produserte solenergien må konverteres fra DC- til AC-siden. For hybrid-systemet har effektiviteten sommerstid sunket fra 96,2 % til 94,2 %. Dette er fordi store deler

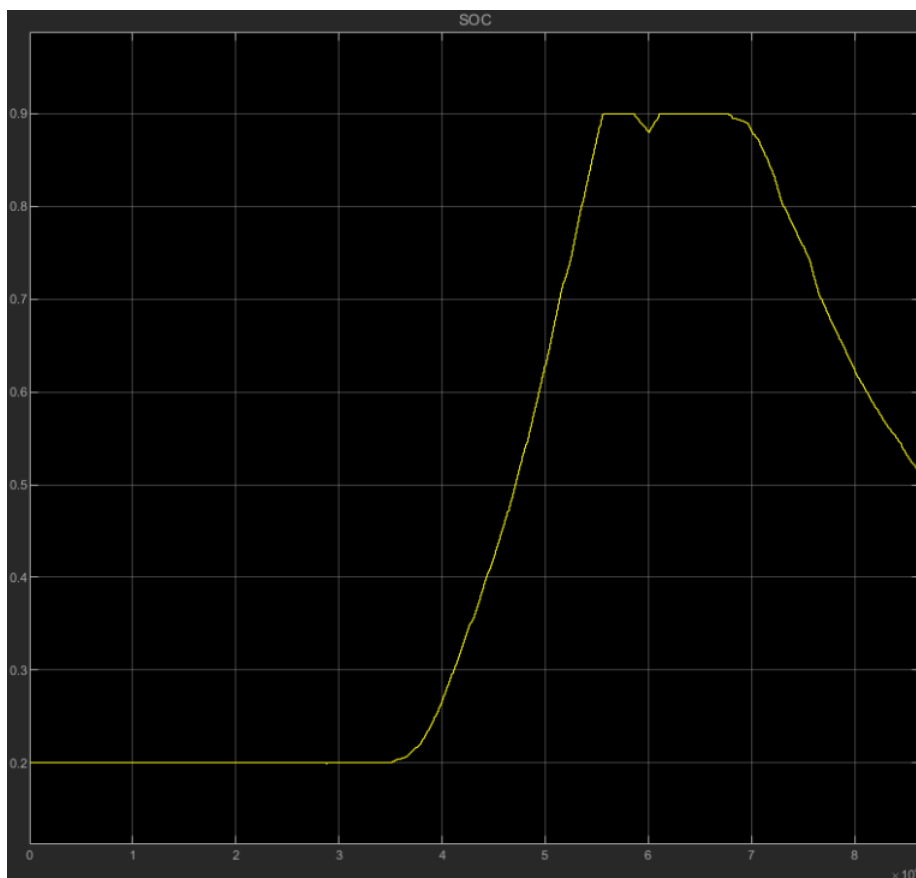
av den produserte solenergien flyter gjennom VSC-konverteren. For DC-systemet har effektiviteten gått ned fra 92,5 % til 91,6 %. Dette kan muligens virke ulogisk da både last og solproduksjon befinner seg på samme side av VSC-konverteren. Det kan trolig forklares med at lastbehovet er lavere i DC-systemet samtidig som solproduksjonen er den samme, i tillegg til at solproduksjonen og lastbehovet ikke inntreffer til samme tid på døgnet. Dette vil føre til at en del av solproduksjonen eksporteres til nettet.

Det er her svært viktig å understreke at selv om systemeffektiviteten synker for alle systemene ved å legge til lokal produksjon av solenergi, så vil et solcelleanlegg totalt sett redusere brukskostnadene da en større andel av energibehovet produseres lokalt. Det at effektiviteten til systemet går ned vitner likevel om at store deler av den lokalt produserte energien eksporteres til nettet. Dette viser tydelig behovet for batterilagring i denne typer system.

Resultatene i figur 7.8 viser, at selv om solproduksjonen for en dag sommerstid kun er noen få kWh lavere enn lastbehovet, så importeres ca 55 % av den nødvendige energien fra nettet. Dette er et annet bevis på behovet for batterilagring i systemer med lokal solproduksjon. Særlig i deler av verden der lasten og solproduksjonen ikke sammenfaller tidsmessig.

NETT + SOL + BATTERI

Det neste steget i analysen var å legge til batterilagring til systemene. Også for denne delen av analysen er hybrid-systemet det mest effektive. Introduksjonen av batterilagring i systemet førte til redusert effektivitet for AC-systemet. For hybridssystemet økte effektiviteten med 0,5 %, mens den for DC-systemet økte fra 91,6 % til 93,6 %. Ut i fra resultatene er det tydelig at det er DC-systemet som drar størst fordel av å ha batterilagring. Batteriet fører i DC-systemet til at en større andel av den produserte solenergien benyttes på DC-siden av VSC-konverteren og tapene i konverteren reduseres følgelig. Ser man på figur 7.12 ser man at importgraden er redusert til ca 25 % for alle systemløsningene. Noe av grunnen til at importgraden ikke er enda lavere er at alle simulasjonene er gjort når batteriet er antatt å være helt utladet (20 %) ved starten av simulasjonen. Dette fører til at lastene må forsynes fra nettet fram til solproduksjonen begynner. En optimal syklus for batteriet hadde vært at det var utladet rett før solproduksjonen startet neste dag, ikke ved midnatt slik det er simulert her. Dette tatt i betraktning kunne batteriet muligens vært noe større. Ser man i tillegg på grafen for SOC (state of charge) i figur 7.19 er det tydelig at batteriet burde hatt høyere kapasitet da ladingen av batteriet kuttet selv om systemet fortsatt har overskudd av energi.



Figur 7.19: SOC (state of charge) for batteriet i DC-systemet med nettilkobling, lokal produksjon av solenergi og batterilagring. Grafen er for sommer-scenariot. Y-aksen går fra 0 til 1, mens x-aksen viser simulasjonstiden i sekunder.

Siden målet med dette arbeidet var å undersøke hvordan et helt eller delvis DC-system fungerte sammenlignet med det originale AC-systemet er det av stor interesse og se nærmere på hvorfor resultatene viser at hybrid- og DC-systemet er mer effektivt enn AC-systemet. Dette gjelder sommerstid, vinterscenariot viser at DC-systemet er det minst effektive.

Når systemene består av både solproduksjon og batterilagring utnyttes den produserte solenergien bedre i hybrid- og DC-systemet enn i det originale AC-systemet. En av hovedgrunnene til at AC-systemet er mindre effektivt enn de to andre er tapene i AC-DC-konverterene som forsyner lastene med intern DC-spenning. Ved å unngå disse tapene øker effektiviteten til systemet. Hovedkilden til tapene i hybrid- og DC-systemet er batteri-konverteren, VSC-konverteren og DC-last-konverteren. Den største forskjell-

len mellom de to DC-baserte systemene er at tapene i konverteren som forsyner lasten på DC-bus 2 er en del høyere i DC-systemet. Dette er logisk da lasten på DC-bus 2 er høyere i DC-systemet enn i hybrid-systemet. Det kan likevel tenkes at tapene i DC-last-konverteren kunne vært redusert dersom lastene hadde vært fordelt annerledes mellom de to DC-bussene. Dersom en mindre andel av lasten hadde vært forsynt gjennom DC-last-konverteren kunne tapene vært redusert og effektiviteten til systemet vært høyere. Et annet alternativ for å oppnå høyere effektivitet i DC-systemet kunne vært å designe DC-siden av systemet på en litt annen måte. F.eks ved at DC-bus 1 hadde hatt lavere spenning slik at hoveddelen av lasten kunne vært forsynt direkte, mens lastene som krever høyere spenning hadde vært forsynt gjennom en DC-DC-konverter. Dette kunne muligens forbedret systemeffektiviteten.

Årlige tap

Tabell 7.1 viser tap i de ulike systemene i kWh. Verdiene i tredje og fjerde kolonne er hentet direkte fra resultatene fra modelleringen. De årlige tapene i kolonne fire er regnet ut ved å anta at tapene sommer og vinter gjelder for et halvt år hver. Dette er en kraftig forenkling, men vil gjøre det mulig å sammenligne tapene over et helt år. Det er også viktig å understreke at disse tapene er målt når alle lastene i systemet er aktive hver dag, dette vil ikke være tilfelle dersom man tar i betraktning et helt år.

System	Tap [kWh]		
	Sommer - 1 dag	Vinter - 1 dag	År
AC	3,8	2,2	1095
Hybrid	2	1,3	602,3
DC	1,7	3,3	912,5

Tabell 7.1: Viser de totale tapene i de tre systemene ved nettilkobling, solproduksjon og batterilagring. I tillegg er de totale tapene for et helt år regnet ut og markert med gult til høyre. Ved utregning av de årlige tapene er det antatt at tapene for sommer og vinter gjelder for et halvt år hver.

Resultatene fra tabell 7.1 viser at tapene i hybrid- og DC-systemet er redusert med henholdsvis 45 % og 17 % sammenlignet med AC-systemet.

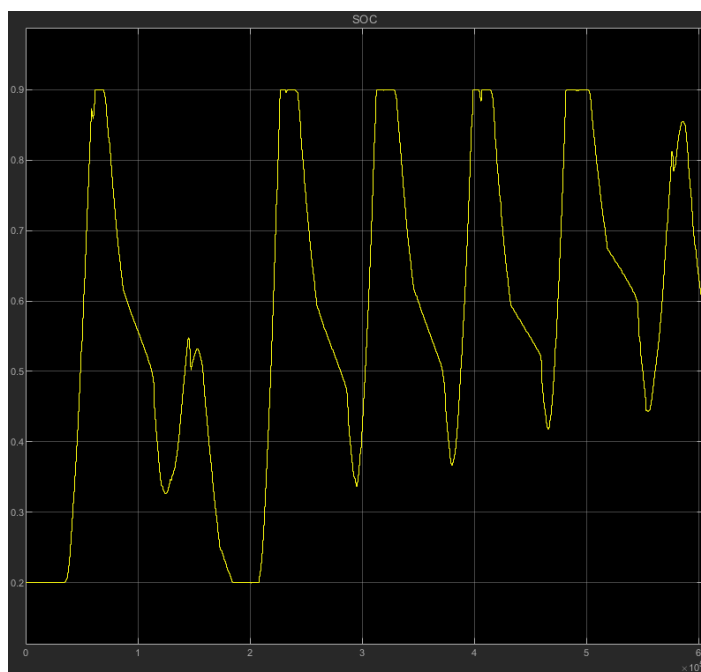
DC 1 uke

Målet med å simulere DC-systemet i en periode på en uke var å få et bedre bilde på virkningen batteriet har på systemet. Den største forskjellen fra simulasjonene på en dag er at importgraden er redusert kraftig. Når systemet simuleres i en lenger periode er importgraden under 10 % for alle kombinasjonene av solproduksjon og batteri. Dette gjelder sommerstid, om vinteren er naturligvis importgraden fortsatt høy. Grunnen til at import-

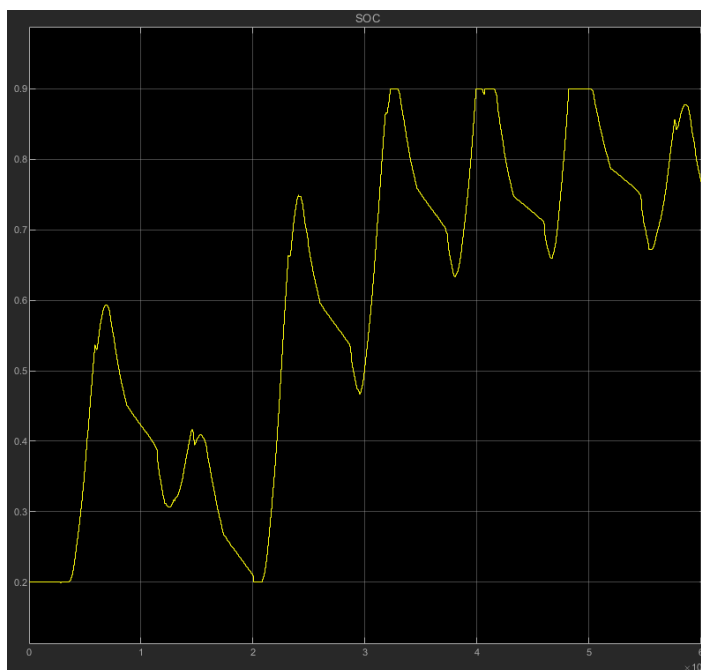
graden er lavere når systemet simuleres lenger er at batteriet lades opp i løpet av første dag og vil dermed kunne forsyne systemet før solproduksjonen starter på dag 2. Det er også her viktig å nevne at solproduksjonen er høyere enn lasten slik at batteriet i dette tilfellet vil lades opp litt mer hver dag. Basert på at importgraden til systemene har vært svært lik i de foregående simulasjonene er det grunn til å tro at det samme ville vært tilfellet her dersom AC- og hybrid-systemet hadde vært simulert for 1 uke.

Figur 7.20 og 7.21 viser systemet med 100 % solproduksjon, og henholdsvis 100 % og 200 % batterikapasitet. Figuren til høyre viser at batteriet ikke er stort nok til å kunne lagre all solproduksjon selv om kapasiteten dobles. Dette er fordi solproduksjonen i gjennomsnitt er høyere enn lastebehovet hver dag. Det er derimot ikke nødvendigvis batteriet som er for lite, men heller solcelleanlegget som er for stort i forhold til lastbehovet i systemet. Dersom det ikke er ønskelig å eksportere energi til nettet er det derfor viktig å dimensjonere solcelleanlegget riktig i forhold til sitt lastbehov.

Også for simulasjonene på en uke hadde det vært mulig å sette en høyere startverdi for batterikapasiteten. Som figur 7.20 og 7.21 viser hadde det vært logisk å sette startverdien til batterikapasiteten noe høyere da grafen viser at batteriet for fem av sju dager ikke lades helt ut.



Figur 7.20: Viser SOC for DC-systemet med 100 % solproduksjon og 100 % batterikapasitet. Y-aksen går fra 0 til 1, mens x-aksen viser simulasjonstiden i sekunder.



Figur 7.21: Viser SOC for DC-systemet med 100 % solproduksjon og 200 % batterikapasitet. Y-aksen går fra 0 til 1, mens x-aksen viser simulasjonstiden i sekunder.

7.8 Det økonomiske aspektet

I [41] er det gjort simulasjoner for et DC-system og et AC-system i et kontorbygg. Begge systemene inkluderer solproduksjon og batterilagring. Alle lastene i begge systemene er her antatt å være interne DC-laster. Den økonomiske analysen i dette arbeidet inkluderer blant annet totalt installert effekt, årlig elektrisitet konsum og livssyklus-besparelser. Kostnaden på et installert anlegg er 16 % lavere for DC-systemet, mens total energirekk fra nettet er 43 % lavere. Resultatene fra arbeidet viser at et DC-system kan være fordelaktiv i kommersielle bygninger dersom systemet inneholder solproduksjon og batterilagring. Det er nevnt at det kun er tatt hensyn til nye anlegg, og at å ettermontere et DC-system vil innebære større kostnader.

Selv om dette ikke inngår i selve analysen er en rekke andre aspekter drøftet i [41]. Installasjonskosten er ventet å være høyere i et DC-system. Videre er det nevnt at et DC-system kan ha fordeler som ikke er relaterte til energibesparelser som høyere leveringssikkerhet og leveringskvalitet, samt bedre isolasjon fra forstyrrelser fra AC-systemet. I tillegg er det antydnet at et DC-system vil inkludere færre komponenter som gjør vedlikehold enklere og billigere.

I [63] er det gjort undersøkelser på et system med lignende lastsammensetning som i denne rapporten. Det analyserte systemet inneholder ikke solproduksjon og batterlagring. Det er gjort analyser for tre ulike spenningsnivåer, 230 V AC, 48 V DC og 24 V DC. Selv om de lave spenningsnivåene fører til en drastisk økning i kabel-tap er det konkludert med at det over 20 år kan spares 13000 SEK ved å forsyne lastene med 48 V DC kontra 230 V AC.

Kapittel 8

Diskusjon

8.1 Systemløsning

Et av hovedmålene med dette arbeidet har vært å komme med et forslag til hvordan et potensielt DC-system kan designes. Det har derfor blitt designet to ulike systemer som ved hjelp av simulasjoner er sammenlignet med et tradisjonelt AC-system. Det er designet et hybrid-system og et rent DC-system. Ideen bak hybrid-systemet er at lastene med intern DC-spenning skal forsynes direkte fra en egen DC-bus slik at unødvendige konverteringer mellom AC og DC kan unngås. I hybrid-systemet er det kun lastene med intern DC-spenning som forsynes med DC, de lastene som i utgangspunktet er forsynt direkte med AC vil fortsatt forsynes på denne måten. Dette systemdesignet muliggjør direkte bruk av solenergi til lastene uten store tap i konvertere. Avhengig av størrelsen på solcelleanlegget må likevel noe av den produserte energien konverteres til AC-siden som fører med seg noe tap.

I tillegg til hybrid-systemet er det designet et system der all lasten forsynes direkte med DC-spenning. Ved design av dette systemet er det gjort antagelser om at det finnes DC-alternativer til samtlige laster og at disse har et redusert effektbehov som gitt i tabell 4.4. Fordelingen av lastene mellom spenningsnivåene er i dette arbeidet basert på tap og spenningsfall i kabler. Denne fordelingen er kun et forslag basert på merkeffekt og ikke på hvilke spenning de ulike lastene faktisk ville hatt. Fordelingen av lastene kunne muligens vært gjort på en måte som hadde optimalisert tapene i systemet på en bedre måte. Dette kunne påvirket resultatene i positiv retning for DC-systemet.

Et viktig punkt å ta med i sammenligningen av de tre systemene er at et rent DC-system, designet på premissene satt i dette arbeidet, ikke er realiserbart per i dag. Det finnes i følge arbeidet gjort i denne rapporten, samt i [27], ikke DC-alternativer til alle lastene i

en vanlig norsk husstand. For at et rent DC-system skal være realiserbart er det derfor avgjørende at flere DC-produkter blir tilgjengelige på markedet i framtiden.

Valget av spenningsnivå i de to systemene er gjort på bakgrunn av undersøkelser om tap i kabler i [5] og standard spenningsnivå for kommersielle DC-systemer satt av EMerge Alliance [38]. Ser man på resultatene for tap og spenningsfall i kabler er disse så lave at det kunne vært mulig å forsynt en del av lastene med enda lavere spenning. I dette systemet med relativt korte kabellengder kunne man muligens oppnådd tilfredsstillende resultater med 48 V som systemspenning på DC-bus 2. Et slikt system ville derimot vært mindre egnet for standardisering da maksimal lengde på kabler ville blitt svært begrenset.

I arbeidet med å undersøke de to systemene er det potensielle energibesparelser som har vært i fokus. Det er ikke gått i dybden på hvordan systemene i praksis kan realiseres. For at systemene skal være realiserbare må det løses en rekke utfordringer som; hvordan kabelnettverket skal utføres, hvordan tilkobling av laster skal gjøres, og hvor den sentrale konverteren skal plasseres.

8.2 Sammenligning med litteraturverdier

Gjennomsnittlig effektivitet for alle simulerte scenarier for de tre systemene er 94,0 %, 96,2 % og 92,5 % for henholdsvis AC, hybrid og DC. Dette er høye verdier sammenlignet med verdiene fra [41]. Her er det kun to scenarier der effektiviteten overstiger 90,0 % i tillegg til at differansen mellom AC- og DC-systemet er større. Det er ikke kjent hvilken data for konverter-effektivitet som er brukt i [41], dette gjør en direkte sammenligning vanskelig. Det er likevel logisk at effektiviteten i mitt arbeid i gjennomsnitt er høyere da det ikke er tatt hensyn til kjemiske tap i batteri og tap i solcelle-konverteren, noe det er gjort i [41]. Det er også logisk at differansen mellom systemene er større i [41], da det simulerte systemet er et kontorbygg med større grad av laster med intern DC-spenning. Dette vil forsterke fordelene for DC-systemet.

I Aurora Foss [24] sitt arbeid er det designet et DC-system som forsyner en etasje i et kontorbygg. Det er her konkludert med at den sentrale VSC-konverteren må ha en effektivitet på minimum 97,9 % for at DC-systemet skal være mer effektivt enn AC-systemet. I mitt arbeid er effektiviteten til VSC-konverteren satt til 95,0 %. Dersom denne hadde vært satt til 97,7 % hadde muligens resultatene sett annerledes ut. Særlig er systemeffektiviteten i DC-systemet i stor grad bestemt av effektiviteten til VSC-konverteren.

8.3 AC versus DC

Som resultatene fra simulasjonene viser er det ikke veldig stor forskjell på effektiviteten til systemene. Ser man likevel på tabell 7.1 ser man at det over et helt år vil gi utslag. Tapene for et år i DC- og hybrid-systemet er redusert med henholdsvis 17 % og 54 % sammenlignet med AC-systemet.

Resultatene viser at DC-systemet har lavere tap enn det originale AC-systemet, men det har også noe lavere effektivitet. Særlig vinterstid er tapene i DC-systemet høyere enn i de to andre systemene. Dette kommer av at all lasten må forsynes gjennom konvertere. For lastene som er naturlige AC-laster vil DC-systemet introdusere tap som ikke eksisterer i AC-systemet. I tillegg til dette er det per i dag ikke DC-alternativer tilgjengelig for alle laster i systemet. Basert på dette kan det derfor stilles spørsmål ved om et rent DC-system per i dag er den beste løsningen for energiframføring i husstander. Kanskje vil et DC-system passe bedre i et kontorbygg der en større del av lasten er DC-basert. Et eksempel der DC-system kan være en god løsning er i datasenter. Datasenter består i stor grad av mange relativt like laster som er basert på DC-teknologi. Å forsyne disse lastene med et DC-system vil derfor kunne bedre effektiviteten [47].

Resultatene viser også at hybrid-systemet både har høyest systemeffektivitet og lavest årlige energitap. En reduksjon i tapene på 45 % er et sterkt argument for hybrid-systemet i dette tilfellet. I hybrid-systemet kan også de naturlige AC-lastene beholde sin tilkobling til AC-nettet samtidig som interne DC-laster kan forsynes via en felles DC-bus. En hake ved hybrid-systemet er hvorvidt det er praktisk med to systemer for energiframføring i samme husstand. Praktiske løsninger for dette er ikke noe som er inkludert i dette arbeidet og er noe som må løses før et slikt system eventuelt kan realiseres.

Når det gjelder sikkerhet for personer og materiell i et DC-basert system sammenlignet med et AC-system er det tenkelig at det å redusere antall konvertere i tillegg til å redusere tap også vil redusere brannfaren. I tillegg kan AC-DC-konvertere brukt i elektronikk være av lavere kvalitet enn de konverterne som eventuelt vil bli brukt i et DC-system. Dette vil ytterligere redusere brannfaren. Fare for elektrisk sjokk er en annen farekilde i et elektrisk system. I systemene som er designet her, der en del av systemet er basert på 120 V, vil dette kunne redusere faren for skade ved et eventuelt elektrisk sjokk.

Leveringskvalitet er også et viktig moment som må vurderes nøye dersom det i framtiden blir aktuelt å erstatte det eksisterende systemet med en form for DC-system. Som nevnt i kapittel 2.2.3 vil en solid sentral AC-DC-konverter kunne sørge for at systemet nærmest er immun mot både spenningsvariasjoner og frekvensvariasjoner fra nettet. Utover dette er det all grunn til å tro at det vil forventes at et DC-system skal ha minst like høy leveringskvalitet som det eksisterende systemet.

I framtiden vil videre utarbeiding av standarder for DC-system være avgjørende for om denne type system blir utbredt. Per idag finnes det få standarder som inkluderer retningslinjer for DC-system.

8.4 Metode

I modelleringen av systemene er det gjort en rekke forenklinger, både for å bevisst gjøre arbeidet enklere, men også på grunn av uforutsette utfordringer med den valgte pro-

gramvaren. Blant annet er det for en del av konverterne i systemet valgt å implementere effektiviteten på en forenklet måte. For AC-DC-konverterne som forsyner de interne DC-lastene er det valgt å bruke konstant effektivitet for alle lastene. Dette er gjort fordi det ikke lyktes å oppdrive data for dette. Samtidig er det usikkert om det å ha effektivitetskurve for disse konverterne hadde gjort resultatet mer realistisk, da det uansett er gjort en antagelse ved kartleggingen av disse konverterne.

For VSC-konverteren er det også brukt konstant effektivitet. Det var i utgangspunktet tenkt å implementere effektiviteten til VSC-konverteren som en funksjon, men grunnet feil i denne blokken i Simulink var ikke dette mulig på det aktuelle tidspunktet. Dette er en klar svakhet i modellen som kan ha hatt en betydelig påvirkning på resultatene. En fysisk VSC-konverter vil ikke operere med maksimal effektivitet uansett effekt. Siden effektflyten gjennom denne konverteren, særlig sommerstid, sjelden er veldig høy, ville muligens tapene vært høyere dersom en effektivitetskurve hadde vært benyttet.

En annen forenkling er at det ikke for noen av konverterne i systemet er tatt hensyn til standby-tap. Dette er et konstant tap i konvertere. I [63] er standby-tap vurdert til å stå for 68 % av tapene. Det er imidlertid usikkert hvor stor forskjell det ville vært på standby-tap i det eksisterende systemet som i et DC-basert system da begge typer system har konvertere som bidrar med standby-tap. Dette er likevel en svakhet ved modellen som må tas i betraktning når resultatene vurderes.

For å få et enda bredere bilde på funksjonaliteten til et DC-basert system kunne det muligens vært kjørt enda flere scenarioer. Profilen for solproduksjon kunne vært variert i større grad. I tillegg kunne 1-dags simulasjonene vært gjort for flere ulike lastsituasjoner. Simuleringene var derimot tidkrevende arbeid som gjorde avgrensninger nødvendig.

8.5 Kommentar til feil gjort ved simulering

Sent i prosjektperioden ble det oppdaget en feil gjort under simuleringen. Det viste seg at data for effektivitet til DC-DC-konverteren som forsyner DC-bus 2 ikke ble endret da DC-systemet skulle simuleres. Altså er DC-DC-konverteren i DC-systemet simulert med samme kurve for effektivitet som i hybrid-systemet. Dette gjør at effektiviteten til konverteren i DC-systemet i store deler av tiden har operert med høyest mulig effektivitet da konverteren i hybrid-systemet kun har merkeeffekt 1200 W, sammenlignet med 8000 W i DC-systemet. Dermed ble tapene i DC-systemet lavere enn de skulle vært. Grunnet mangel på tid var det ikke mulig å kjøre alle simulasjonene på nytt. Det ble derfor bestemt at det skulle kjøres en simulasjon for å undersøke hvilken innvirkning dette hadde på resultatet.

Det er valgt å kjøre scenarioet med DC-system, med solproduksjon og batterilagring. Resultatene fra denne simulasjonen viser at tapene i DC-DC-konverteren i DC-systemet øker fra 0,67 kWh/dag til 1,47 kWh/dag om sommeren. For vinteren øker tapene fra 1

kWh/dag til 2 kWh/dag. De resterende tapene i systemet holder seg uendret. Disse endringene i tapene i DC-DC-konverteren vil være lik for systemet med og uten solproduksjon og batterilagring.

Ny beregning av årlige tap etter endringen viser at tapene øker fra 912,5 kWh/år til 1233,7 kWh/år. Dette tilsvarer en økning på 26 % og gjør at DC-systemet er det systemet med høyest årlige tap.

Selv om denne feilen er uheldig for resultatet belyser det et relevant problem ved dimensjonering av konvertere i et slikt system. Nemlig at konvertere som skal forsyne laster i en husstand må dimensjoneres for effekter langt høyere enn det de i store deler av tiden faktisk må levere. Dette fører til at konverteren ofte opererer med lavere effektivitet. Konvertere som opererer med høy effektivitet også ved lave effekter vil derfor redusere tapene kraftig i et slik system.

Kapittel 9

Konklusjon

I dette arbeidet er det undersøkt hvorvidt et system der lastene helt, eller delvis forsynes fra DC kan være et alternativ til det eksisterende AC-systemet som er utbredt i dag. De ulike systemene er sammenlignet ved at de er simulert i Matlab/Simulink. Det er gjort simulasjoner for henholdsvis 1 dag og 1 uke. Basert på metodene brukt i dette arbeidet kan følgende konklusjoner dras fra simulasjonene for 1 dag:

- Hybrid-systemet har i gjennomsnitt litt høyere effektivitet enn både DC- og AC-systemet. Gjennomsnittlig effektivitet for systemene er funnet til å være 94,0 %, 96,2 % og 92,5 % for henholdsvis AC, hybrid og DC.
- Årlige tap i hybrid- og DC-systemet er redusert med henholdsvis 45 % og 17 % sammenlignet med AC-systemet.
- Andelen importert effekt fra nettet om sommeren reduseres fra 55,2 % i gjennomsnitt til 24,7 % i gjennomsnitt, ved å introdusere batterilagring med 20 % SOC ved simulasjon-start. Dette gjelder for alle tre systemløsningene.
- I tillegg kan det fra simulasjonene på 1 uke konkluderes med at andelen importert effekt fra nettet kan reduseres til under 10 %.

Det må her nevnes at en feil gjort under simuleringene gjør at resultatene for effektivitet og tap ser litt annerledes ut enn det som er nevnt over. Blant annet førte denne feilen til at effektiviteten til DC-systemet ble noe høyere. Samt at årlige tap i DC-systemet egentlig er 11 % høyere enn i AC-systemet, istedenfor 17 % lavere.

I tillegg kan det fra tidligere arbeid oppsummeres at:

- Et DC-basert system kan ha fordeler som lavere brannfare grunnet færre konvertere, samt lavere fare for elektrisk sjokk grunnet lavere spenningsnivå i deler av systemet.
- Et DC-basert system kan være økonomisk fordelaktig både i kommersielle bygg og husstander.

Tendensen fra simulasjonene er at hybrid-systemet leverer best resultater. Dette i sammenheng med at DC-systemet per i dag ikke er realiserbart, grunnet mangelen på DC-alternativer til mange av lastene, gjør muligens hybrid-systemet til den beste løsningen. Begge de alternative-systemløsningen krever likevel fortsatt mye arbeid når det gjelder utvikling av praktiske løsninger, samt standarder for DC-baserte løsninger.

9.1 Videre arbeid

Under er en liste over aspekter det er mulig å arbeide videre med:

- Inkludere standby-tap i konvertere og kjemiske tap i batteri i analysen.
- Undersøke dynamikken til konverterene i systemet i normaldrift og ved feilsituasjoner.
- Foreta en dypere analyse av kravene til kvalitet på konvertere i systemet. Dette gjelder krav til nivå av harmoniske forstyrrelser, samt håndtering av spenning- og frekvens-variasjoner fra nettet.
- Undersøke praktiske løsninger for hvordan et hybrid- eller DC-system kan utføres.
- Foreta en dypere økonomisk undersøkelse for nybygg av et DC-system sammenlignet med å bygge om et eksisterende AC-system til et DC-system.

Bibliografi

- [1] K. Garbesi, V. Vossos, and H. Shen, “Catalog of dc appliances and power systems.” Hentet fra: https://www.researchgate.net/publication/321949821_Catalog_of_DC_Appliances_and_Power_Systems. Lastet ned: 16.06.2021.
- [2] Electronics Hub, “RMS Voltage of AC Waveform.” Hentet fra: <https://www.electronicshub.org/rms-voltage-of-ac-waveform/>. Lastet ned: 12.10.2020.
- [3] M. Monadi, M. A. Zamani, J. Candela, A. Luna, and P. Rodriguez, “Protection of AC and DC distribution systems Embedding distributed energy resources: A comparative review and analysis,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 1578–1593, 11 2015.
- [4] J. Park and J. Candelaria, “Fault Detection and Isolation in Low-Voltage DC-Bus Microgrid System,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 779–787, 2013.
- [5] A. Sannino, G. Postiglione, and M. H. J. Bollen, “Feasibility of a DC network for commercial facilities,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 5, pp. 1499–1507, 2003.
- [6] M. S. Dale, “Assessment of the Norwegian Solar PV Market in 2019.” Hentet fra: http://solenergiklyngen.no/app/uploads/sites/4/10218328-tvf-not-001_norway-2019-solar-pv-market-sizing_english-summary.pdf. Lastet ned 20.10.2020.
- [7] NVE, “40 MW solkraft ble installert i 2020 - NVE.” Hentet fra: <https://www.nve.no/nytt-fra-nve/nyheter-energi/40-mw-solkraft-ble-installert-i-2020/>. Lastet ned: 30.05.21.
- [8] BloombergNEF, “A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices.” Hentet fra: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>. Lastet ned: 10.23.2020.

-
- [9] Energy Star, “External Power Supplies | ENERGY STAR.” Hentet fra: https://www.energystar.gov/index.cfm?c=archives.power_supplies. Lastet ned: 23.04.21.
- [10] CleaResult, “80 PLUS® Certified Power Supplies and Manufacturers | CLEAResult.” Hentet fra: <https://www.clearesult.com/80plus/manufacturers/115V-Internal>. Lastet ned: 13.04.21.
- [11] VICOR, “BCM Bus Converter.” Hentet fra: https://www.mouser.com/datasheet/2/685/ds_BCM6123xD1E5126yzz-1115002.pdf. Lastet ned: 28.05.21.
- [12] V. Vossos, K. Garbesi, and H. Shen, “Energy savings from direct-DC in U.S. residential buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 68, pp. 223–231, 2013.
- [13] J. E. Ormbostad, *Montørhåndboka : NEK 400:2010*. Oslo: Elforlaget, 4 ed., 2010.
- [14] Texas Instruments, “Refrigerator & freezer integrated circuits and reference designs.” Hentet fra: <https://www.ti.com/solution/refrigerators-and-freezers?variantid=34078&subsystemid=13868>. Lastet ned: 12.18.2020.
- [15] Texas Instruments, “Dishwasher system integrated circuits and reference designs.” Hentet fra: <https://www.ti.com/solution/dish-washer?variantid=34393&subsystemid=13724>. Lastet ned: 12.18.2020.
- [16] Texas Instruments, “Air conditioner indoor unit integrated circuits and reference designs.” Hentet fra: <https://www.ti.com/solution/air-conditioner-indoor-unit?variantid=34874&subsystemid=16065>. Lastet ned: 12.18.2020.
- [17] Texas Instruments, “Washer and dryer integrated circuits and reference designs.” Hentet fra: <https://www.ti.com/solution/washer-dryer?variantid=34075&subsystemid=33903>. Lastet ned: 12.18.2020.
- [18] Texas Instruments, “Lcd tv system integrated circuits and reference designs.” Hentet fra: <https://www.ti.com/solution/lcd-tv?variantid=30721&subsystemid=31087>. Lastet ned: 12.17.2020.
- [19] Texas Instruments, “Led power supply system integrated circuits and reference designs.” Hentet fra: <https://www.ti.com/solution/led-power-supply>. Lastet ned: 12.17.2020.
- [20] Wikipedia, “War of the currents.” Hentet fra: https://en.wikipedia.org/wiki/War_of_the_currents. Lastet ned: 12.04.2020.
- [21] A. Lantero, “The War of the Currents: AC vs. DC Power.” Hentet fra: <https://www.energy.gov/articles/war-currents-ac-vs-dc-powe>. Lastet ned: 05.10.2020, 2014.

- [22] J. Hofer, B. Svetozarevic, and A. Schlueter, "Hybrid AC/DC building microgrid for solar PV and battery storage integration," in *2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, pp. 188–191, 2017.
- [23] R. Chauhan, B. Singh, R. Hebner, S. Singh, and F. Gonzalez-Longatt, "Voltage Standardization of DC Distribution System for Residential Buildings," *Journal of Clean Energy Technologies*, vol. 4, pp. 167–172, 05 2016.
- [24] A. B. Foss, "Dc supply in buildings." Hentet fra: <http://hdl.handle.net/11250/258068>. Lastet ned: 12.08.2020, 2014.
- [25] K. Engelen and E. L. S. et al., "The Feasibility of Small-Scale Residential DC Distribution Systems," in *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, pp. 2618–2623, 2006.
- [26] Wikipedia, "Root mean square." Hentet fra: https://en.wikipedia.org/wiki/Root_mean_square. Lastet ned: 12.10.2020.
- [27] D. Slålien, "Comeback av DC? Kan eksisterende hus bli energiautonome med sol- og batterisystemer, ved å bytte til DC-apparater?," prosjektrapport i TET4510, NT-NU, 12 2020.
- [28] C. Jin, R. Dougal, and S. Liu, "Solid-state Over-current Protection for Industrial DC Distribution Systems." Hentet fra: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2006-4023>. Lastet ned: 29.03.2021.
- [29] ABB, "Ny unik automatsikringsserie for bruk i både ac- og dc-systemer." Hentet fra: <https://new.abb.com/news/no/detail/47774/ny-unik-automatsikringsserie-for-bruk-i-bade-ac-og-dc-systemer>. Lastet ned: 12.05.2020.
- [30] Schneider, "Automatsikring - c60 for dc | schneider electric norge." Hentet fra: <https://www.se.com/no/no/product-range/61095-c60-for-dc/>. Lastet ned: 12.05.06.
- [31] Siemens, "AhlSELL - automat 10ka 2-pol 16a-d - automat siemens 10ka." Hentet fra: <https://www.ahlsell.no/33/elektro/gr.-11---25-installasjonsmaterieill/16a--sikringsmaterieill/automatsikringer-og-jordfeilbrytere/automatsikring/1645374/>. Lastet ned: 12.05.2020.
- [32] E. H. Hansen, *Elektroinstallasjoner*, pp. 10–15. Trondheim: Classica, 2010 ed., 2010.
- [33] Wikipedia, "NEK 400." Hentet fra: https://no.wikipedia.org/w/index.php?title=NEK_400&oldid=20540601. Lastet ned: 11.04.2020.

-
- [34] *Elektriske lavspenningsinstallasjoner*. Oslo: Norsk elektroteknisk komite, 6. ed., 2018.
- [35] EMerge Alliance, “Our standards.” Hentet fra: <https://www.emergealliance.org/standards/our-standards/>. Lastet ned: 12.18.2020.
- [36] IET, “Code of Practice for Low and Extra Low Voltage Direct Current Power Distribution in Buildings.” Hentet fra: <https://shop.theiet.org/code-of-practice-for-low-and-extra-low-voltage-direct-current-power-distribution-in-buildings>. Lastet ned: 30.04.21., 2015.
- [37] S. Anand and B. G. Fernandes, “Optimal voltage level for DC microgrids,” in *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 3034–3039, 2010.
- [38] EMerge Alliance, “Standard faqs – emerge alliance.” Hentet fra: <https://www.emergealliance.org/standards/data-telecom/standard-faqs/>. Lastet ned: 28.04.21.
- [39] IET, “Technical considerations for d.c. installations.” Hentet fra: <https://electrical.theiet.org/wiring-matters/years/2015/59-winter-2015/technical-considerations-for-dc-installations/>. Lastet ned: 30.04.21., 2015.
- [40] P. Lindberg, “Energilagring - mer enn bare lagring.” Hentet fra: https://static1.squarespace.com/static/597512eb579fb3d3de0207aa/t/5d8bc81c08f4b11975d8ea59/1569441829644/6b.+Solenergidagen_2019_Per_Lindberg.pdf. Lastet ned: 10.12.2020.
- [41] D. L. Gerber, V. Vossos, and W. e. a. Feng, “A simulation based comparison of AC and DC power distribution networks in buildings,” in *2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, pp. 588–595, 2017.
- [42] Sparelys, “Beregning av forbruk og batterikapasitet.” Hentet fra: <https://www.sparelys.no>. Lastet ned: 11.24.2020.
- [43] S. Völler, “Forelesning - TET4175 - energy storage,” 2019.
- [44] DC systems, “DC Systems - Demo DC Grid Hengelo.” Hentet fra: <https://www.dc.systems/applications/building/8-main/138-demo-dc-grid-hengelo>. Lastet ned: 26.05.21.
- [45] DC systems, “DC Systems - DC Flexhouse.” hentet fra: <https://www.dc.systems/applications/homes/8-main/131-dc-flexhouse>. Lastet ned: 26.05.21.

- [46] DC systems, “DC Systems - Circl Pavilion of ABN AMRO Bank Amsterdam.” Hentet fra: <https://www.dc.systems/applications/building/8-main/133-circl-pavilion-of-abn-amro-bank>. Lastet ned: 26.05.21.
- [47] A. Schärer, “DC for efficiency: Low voltage DC power infrastructure in data centers.” Hentet fra: https://www.researchgate.net/publication/293203774_DC_for_efficiency_Low_voltage_DC_power_infrastructure_in_data_centers. Lastet ned: 12.06.2021.
- [48] T. Navpreet and M. T. et al., “Voltage Source Converters as the building block of HVDC and FACTS Technology in Power Transmission System: A Simulation based Approach.” Hentet fra: <https://www.imedpub.com/articles/voltage-source-converters-as-the-building-block-of-hvdc-and-factstechnology-in-power-transmission-system-a-simulation-based-approa.pdf>. Lastet ned 04.07.2021, 2012.
- [49] Wikipedia, “HVDC converter - Wikipedia.” Hentet fra: https://en.wikipedia.org/wiki/HVDC_converter. Lastet ned: 08.04.21, 2021.
- [50] DC systems, “DC Systems - AC/DC Converters.” Hentet fra: <https://www.dc.systems/applications/homes/8-main/172-products-ac-dc-converters>. Lastet ned: 23.04.21.
- [51] Electronics Tutorials, “Full Wave Rectifier and Bridge Rectifier Theory.” Hentet fra: https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_6.html. Lastet ned: 05.05.21.
- [52] MPS, “Power Factor Correction (PFC) Explained | Article | MPS.” Hentet fra: <https://www.monolithicpower.com/en/power-factor-correction>. Lastet ned: 08.04.21.
- [53] Texas Instrumentals, “TI Designs: TIDA-00779.” Hentet fra: <https://www.ti.com>. Lastet ned: 08.04.21, 2016.
- [54] V. Kotak and P. Tyagi, “DC To DC Converter in Maximum Power Point Tracker,” *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 2, 12 2013.
- [55] I. Mirza and I. M. Kafiul, “Design And Simulation Of A PV System With Battery Storage Using Bidirectional DC-DC Converter Using Matlab Simulink,” *International Journal of Scientific Technology Research*, vol. 06, pp. 403–410, 07 2017.
- [56] Victron Energy, “Victron EasySolar 24/3000/70-50 MPPT 150/70 Color Control - Farco AS.” Hentet fra: <https://www.farco.no/lader/-/inverter/kombi-lader-og-inverter/victron-easysolar-24/3000/70-50-mppt-150/70-color-control>. Lastet ned: 12.05. (Accessed on 05/12/2021).

-
- [57] I. Haugan, "Åpnet nytt smarthus-laboratorium." Hentet fra: <https://gemini.no/2019/09/apner-nytt-smarthus-laboratorium/>. Lastet ned: 04.06.21.
- [58] K. Darcovich and E. e. a. Entchev, "An International Survey of Electrical and DHW Load Profiles for Use in Simulating the Performance of Residential Micro-generation Systems," 10 2014.
- [59] A. Moreau, "Control Strategy for Domestic Water Heaters during Peak Periods and its Impact on the Demand for Electricity," *Energy Procedia*, vol. 12, pp. 1074–1082, 12 2011.
- [60] J. Sagarduy and R. Agrawal. Personlig kommunikasjon, 04-06 2021.
- [61] S.D.Sudhoff, "Lecture 5: Cm average value model," 2005.
- [62] Matlab, "Simplified Model of a Small Scale Micro-Grid - MATLAB & Simulink." Hentet fra: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/simplified-model-of-a-small-scale-micro-grid.html>. Lastet ned: 11.28.2020.
- [63] M. Amin and Y. Arafat, "Feasibility study of low voltage DC distribution system for house," *International Conference on Environmental Aspects of Bangladesh*, 09 2011.

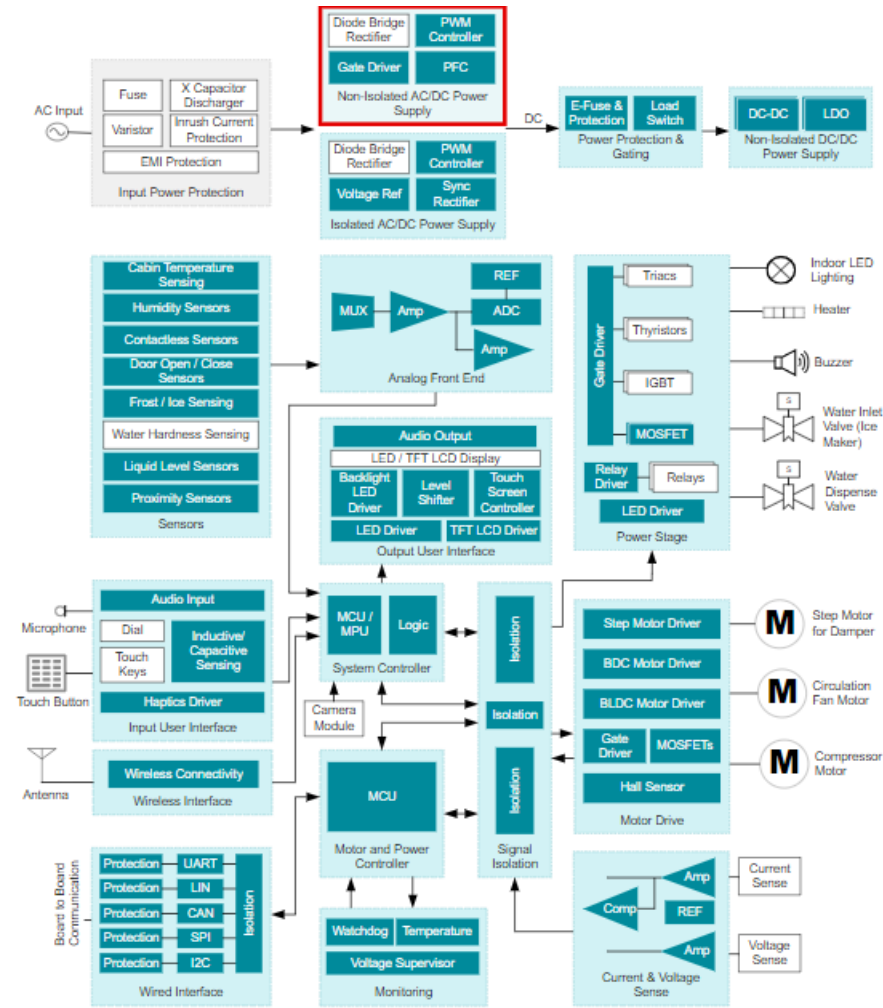
Tillegg A

Vedlegg

A.1 Dokumentasjon av DC-forsyning

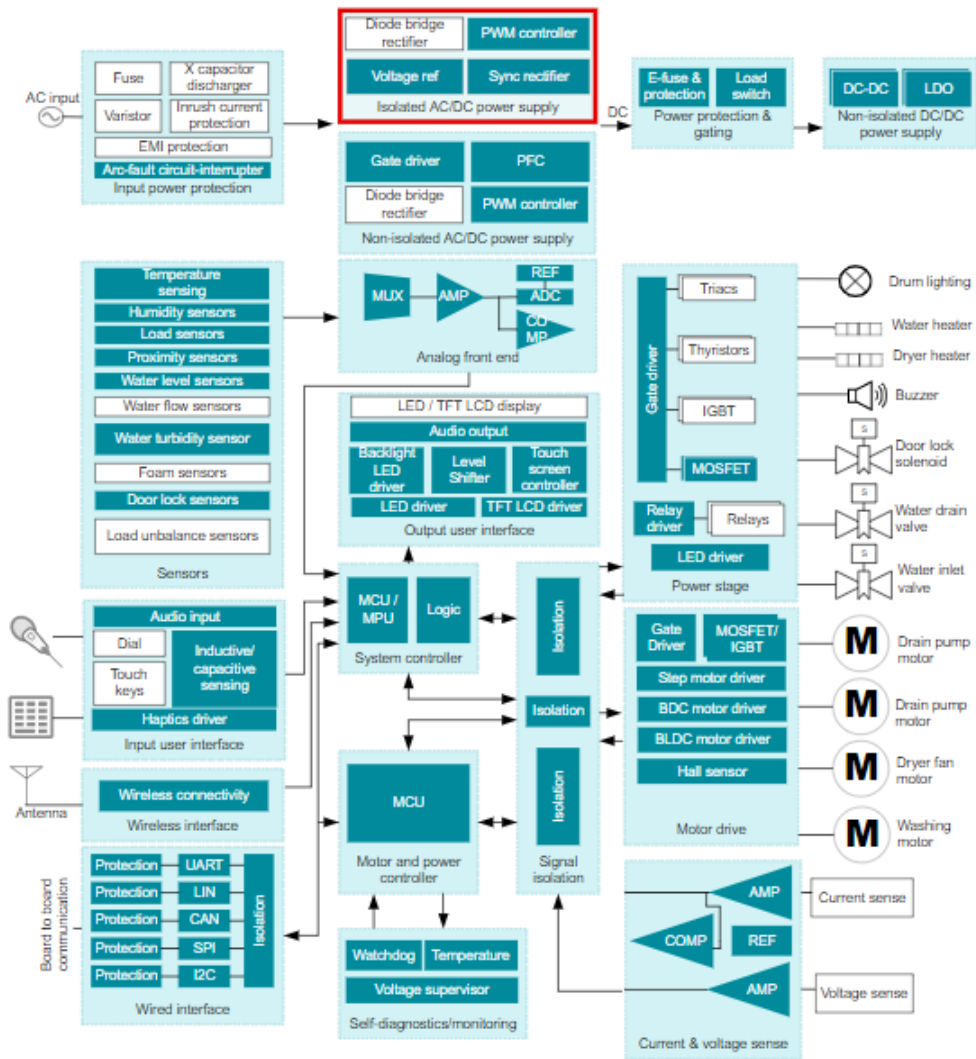
Dette vedlegget viser dokumentasjon for de artiklene som har DC-forsyning, enten internt eller via adapter. Figurene under er hentet fra Texas Instruments sine referanseguider til design av moderne elektriske artikler. I figurene er AC-DC-kilden merket med rødt. Oppvaskmaskinen som er vist her er en kombinasjon med innebygd tørkefunksjon. Vedleggene er hentet direkte fra forprosjektet [27].

Kjøleskap



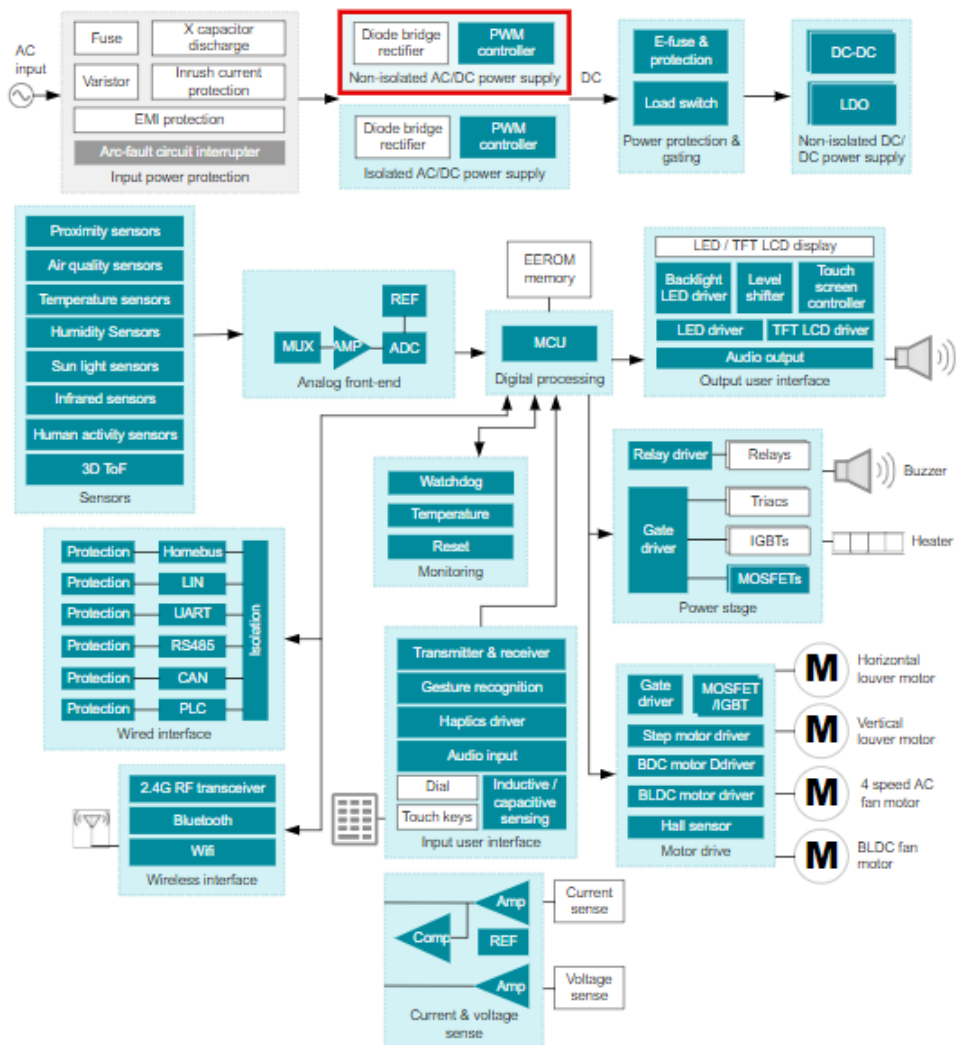
Figur A.1: Viser komponentene i en kjøleskap-krets. Hentet fra: [14].

Oppvaskmaskin



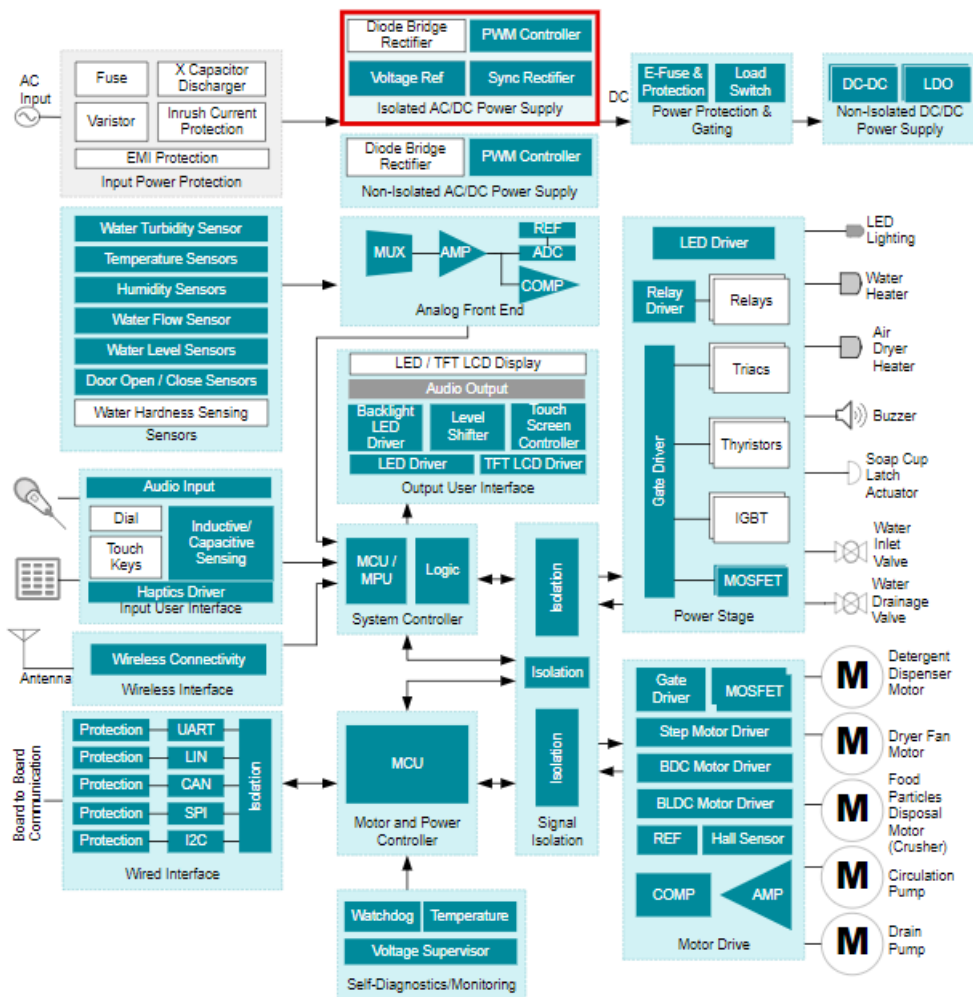
Figur A.2: Viser komponentene i en oppvaskmaskin-krets. Hentet fra: [15].

Varmepumpe



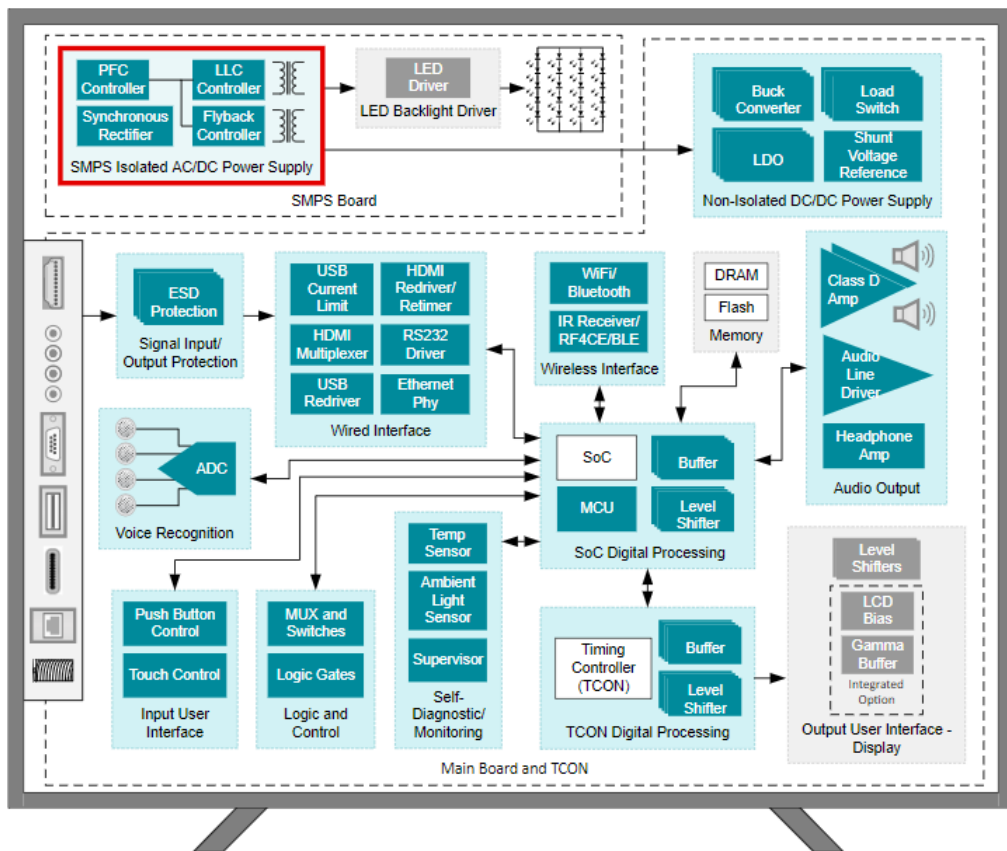
Figur A.3: Viser komponentene i en aircondition-krets. Hentet fra: [16].

Vaskemaskin



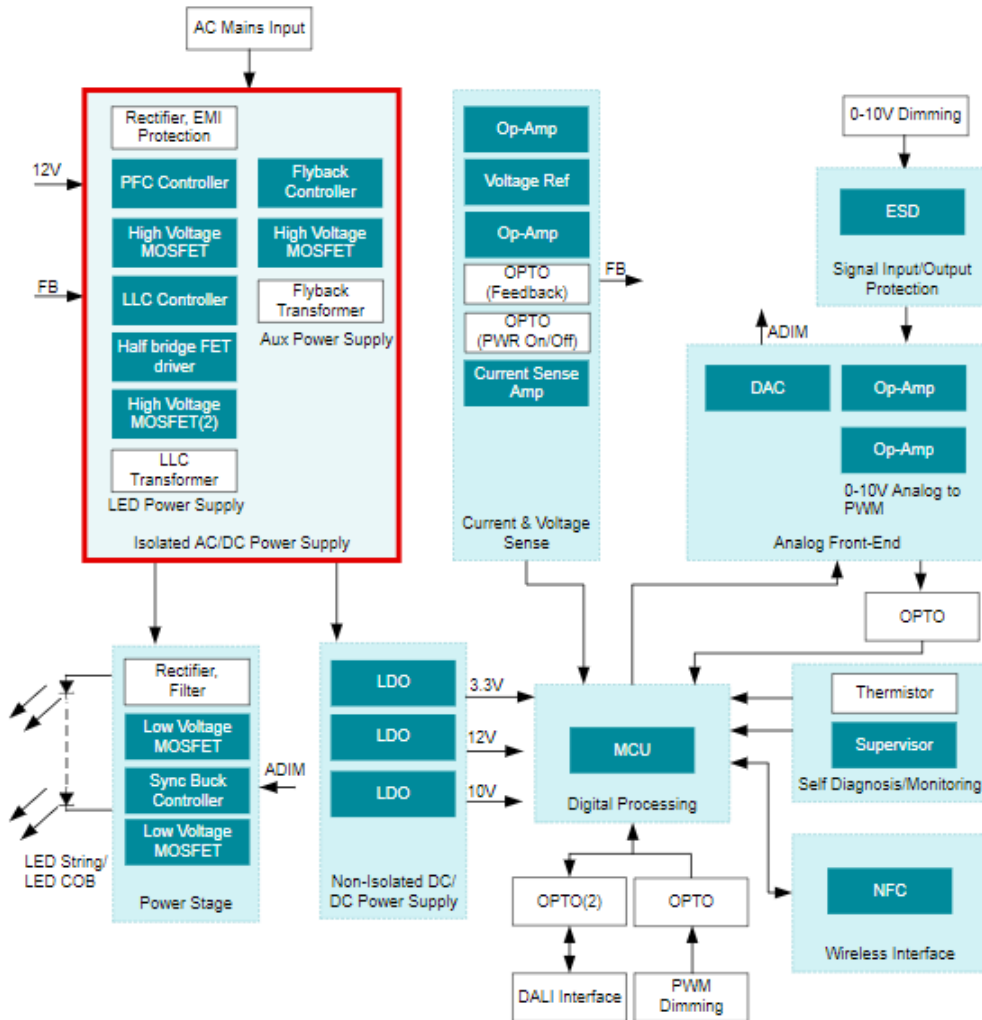
Figur A.4: Viser komponentene i en vaskemaskin-krets. Hentet fra: [17].

TV



Figur A.5: Viser komponentene i en 4K LCD TV. Hentet fra: [18].

Lys(LED)



Figur A.6: Viser komponentene i en LED-krets. Hentet fra: [19].

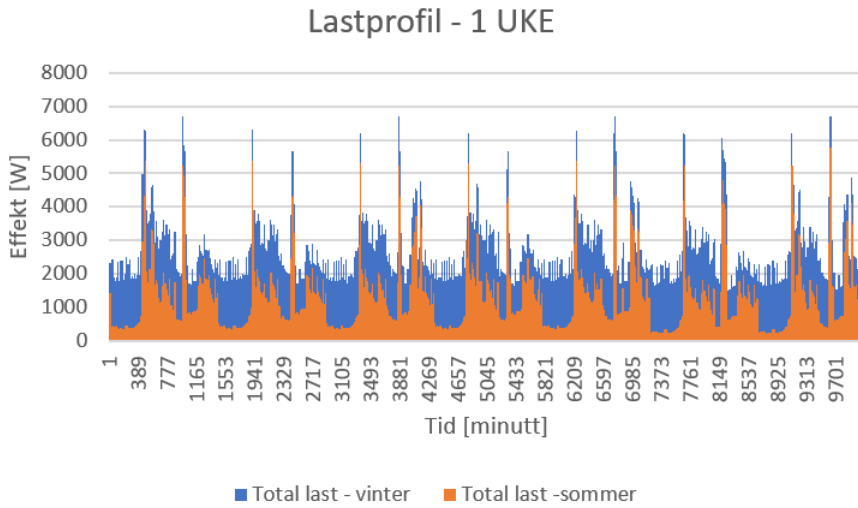
PC

En PC blir forsynt med DC fra en ekstern adapter som konverterer AC-spenningen fra nettet. Et eksempel på en slik adapter er vist i figur A.7. Denne konverterer spenningen fra nettet til 20 V DC som forsyner PCen.

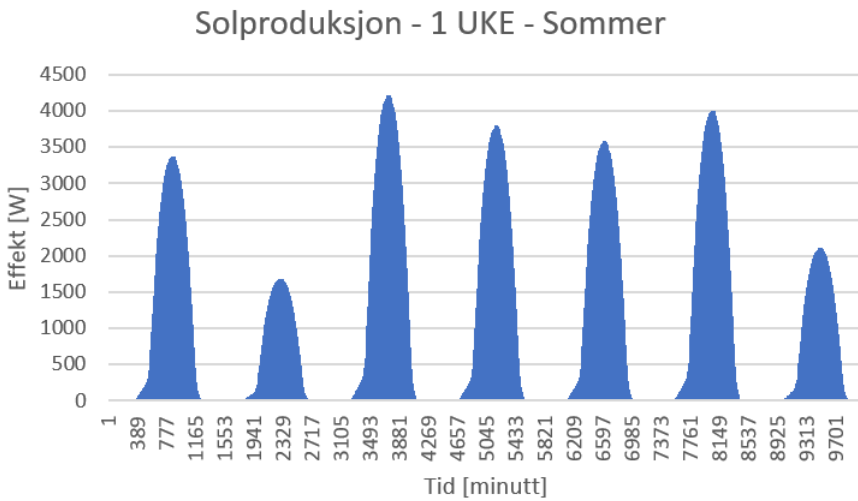


Figur A.7: Viser eksempel på en PC-adapter.

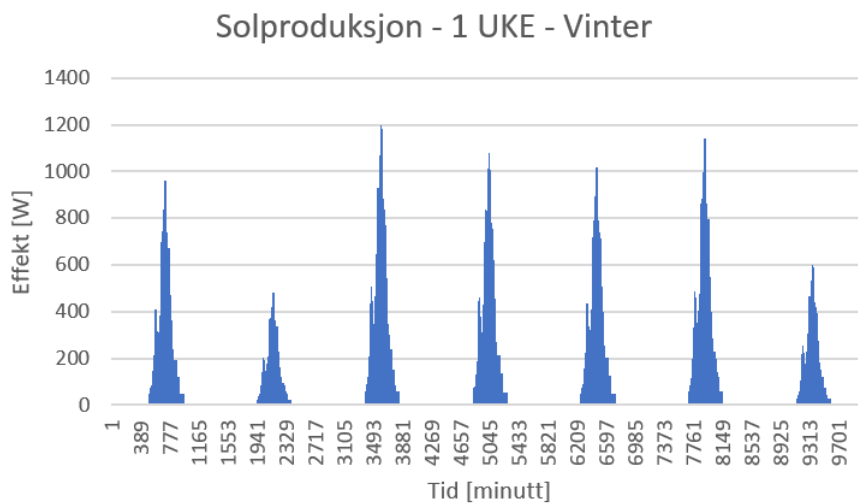
A.2 Lastprofil og solprofil - 1 UKE



Figur A.8: DC-lastprofil for 1 uke.



Figur A.9: Profil for solproduksjon for 1 uke, sommerstid.



Figur A.10: Profil for solproduksjon for 1 uke, vinterstid.

