

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP



Forord

Denne masteroppgaven er utført våren 2013 ved Institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT) ved Universitetet for miljø- og biovitenskap (UMB) og avslutter mastergraden min ved studieretningen Miljøfysikk og fornybar energi. Jeg ønsket å skrive en masteroppgave under temaet kraftnett og tok kontakt med professor Petter H. Heyerdahl for å finne en oppgave innen dette emnet. Jeg ble satt i kontakt med Elvedin Grudic i Hafslund Nett som foreslo analyse av solcellepanel som mulig oppgave. Det ble til masteren 'Analyse av spenningskvalitet i lokalt bygningsnett med solcellepanel tilknyttet'.

Arbeidet med oppgaven har vært svært lærerikt med interessante tema som spenningskvalitet og utfordringer i kraftnettet. Måling og logging av spenningskvalitetsparametere, samt innsamling og systematisering av data for strøm fra vekselretter og drift av elektrisk utstyr på bygget Fløy IV hvor solcellepanelet var tilknyttet har vært en del av oppgaven. Analyse og vurderinger av de data som ble målt har vært interessant og utfordrende. Forhåpentligvis kan denne oppgaven være den første av flere oppgaver ved IMT som ser på utfordringer ved solcellepaneler og tilknytning av solcellepaneler til distribusjonsnettet.

Jeg vil takke min hovedveileder ved Universitetet for miljø- og biovitenskap, Petter H. Heyerdahl, og min bi-veileder hos Hafslund Nett, Elvedin Grudic, for inspirasjon og hjelp underveis med oppgaven. Jeg vil også takke overingeniør Bjørn O. Kasin og overingeniør Tom Ringstad for hjelp med data fra vekselretteren og informasjon om drift av det elektriske anlegget på bygget. Jeg vil tilslutt takke familie og venner for tålmodighet, støtte og hjelp i løpet av masterarbeidet.

Ås, mai 2013

Anette Saltnes Skram Ellingsen

Sammendrag

I andre deler av verden er distribuert fornybar generering av elektrisitet mer utbredt enn i Norge. Med introduksjon av Norges vassdrag- og energidirektorats plusskundeordning forenkles prosessen med tilknytning av mindre fornybare produksjonsenheter til nettet og salg av elektrisitet til det lokale nettselskapet. Denne ordningen kan forhåpentligvis stimulere til vekst i antall sluttbrukere av elektrisk energi som også ønsker å generere og levere elektrisitet til distribusjonsnettet.

Denne oppgaven har innledningsvis sett på utfordringer ved mer distribuert generering i kraftnettet. En av utfordringene er i hvilken grad og hvordan spenningskvaliteten i nettet påvirkes ved tilkobling av mindre produksjonsenheter i distribusjonsnettet. I denne oppgaven er det gjort en analyse av spenningskvaliteten ved tilkoblingspunktet mellom solcellepanelet og bygningsnettet ved Energilaboratoriet ved Institutt for matematiske realfag (IMT) ved Universitetet for miljø- og biovitenskap (UMB) i Ås.

Måleperioden var mellom 20.2.2013 og 16.4.2013. I løpet av denne perioden ble det benyttet to nettanalysatorer. Parameterne som ble målt og logget er sammenlignet med krav i forskrift om leveringskvalitet (FoL). Det ble kun registrert overskridelse av grenseverdiene for flimrer for én av nettanalysatorene. Årsaken høye flimmerverdier er uviss, men det antas ikke at solcellepanelet er årsak til dette. De andre parameterne som ble målt overholdt krav fastsatt i FoL.

Det ble innsamlet data for innkommende strøm fra solcellepanelet til vekselretteren og utgående strøm fra vekselretteren. Det ble gjennomført befaringer på bygget hvor solcellesystemet er installert og hentet inn informasjon om driftstidspunkt for potensielle kilder for fenomener som kunne forringe spenningskvaliteten. Sammenligning av forekomst av spenningskvalitetsparametere med strøm fra vekselretteren og tidspunkt for drift av elektrisk utstyr på bygget ble utført i forsøk på å finne årsaken til forekomst av parameterne og hvorvidt solcellepanelene kunne være årsak til disse. Det er ingen klare indikasjoner på at solcellepanelet bidrar til å svekke spenningskvaliteten. Flere av parameterne opptrer hyppigst i ukedager og i normal arbeidstid. Dette indikerer at det sannsynligvis er drift av elektrisk utstyr i bygget som bidrar til å redusere spenningskvaliteten.

Abstract

Renewable distributed generation of electricity is more widespread in other parts of the world than in Norway. The introduction of Norwegian Water Resources and Energy Directorates scheme 'Plusskundeordningen' simplifies the process of connecting small renewable production units to the grid and sale of electricity to the local grid company. This could stimulate a growth in the number of end-users of electricity who also wants to generate and supply electricity to the grid.

This Master thesis has looked in to the challenges of more distributed generation in the power grid. One of the challenges is in what extent and how the voltage quality in the grid is affected by the connection of smaller production units in the distribution network. A part of the work with this thesis has been an analysis of power quality at the point of connection between the solar panel and the network at the Energy Laboratory in the Department of Mathematical Sciences and Technology at the University of Life Sciences in Ås.

The period of measurements was between February 20th 2013 and April 16th 2013. During this period, two electrical networks analysers were used. The parameters which were measured and logged are compared with the requirements of Norwegian regulations stated in 'Forskrift om leveringskvalitet' (FoL). The only parameter that exceeded its limits was the measurements of flicker from one of the network analysers. The causes of the high flicker values are uncertain, but it is not expected that the solar panel is the reason of these high values. The other parameters which were measured complied with the requirements laid down in FoL.

Data for incoming electrical currents from the solar panels and output currents from the inverter was collected. It was conducted inspections of the building where the solar system is installed and retrieved information about the time of operating for potential sources of phenomena that could impair the voltage quality. Comparison of occurrence of phenomena with currents from the inverter and operation of potential sources of phenomena was carried out. The reason for comparison was an attempt to determine the cause of these phenomena and whether solar panels could be the cause of these. There are no clear indications that the solar panel contributes to the phenomena that impair

voltage quality. Several phenomena occur frequently on weekdays and during normal working hours. This indicates that there probably are different electrical equipment in the building that contributes to the recorded phenomena.

Innholdsfortegnelse

Symbolliste	
Nomenklatur	
1 Innledning.....	1
2 Teori.....	3
2.1 Plusskunder	3
2.1.1 Hva er en plusskunde?	3
2.1.2 Plusskundeordningen	3
2.1.3 Tariffering	4
2.1.4 Regelverk og krav	5
2.1.5 DG- enheter	6
2.1.6 Smarte nett.....	8
2.2 Utfordringer og effekter ved tilknytning av plusskunder til distribusjonsnettet	8
2.2.1 Dagens kraftnettstruktur i Norge	9
2.2.2 Fra enveis til toveiseffektflyt i kraftnettet.....	10
2.2.3 Øydrift.....	11
2.2.4 Reserver.....	11
2.2.5 Kraftelektronikk.....	12
2.3 Spenningskvalitet	12
2.3.1 Frekvens.....	13
2.3.2 Langsomme variasjoner i spenningens effektivverdi	14
2.3.3 Spenningsspang	14
2.3.4 Kortvarige overspenninger	15
2.3.5 Kortvarige underspenninger.....	16
2.3.6 Flimmer.....	17
2.3.7 Spenningsusymmetri	18
2.3.8 Harmoniske spenninger.....	18
2.3.9 Transienter	21
2.4 Solenergi.....	22
2.4.1 Solcelleteknologi – Fra solstråler til elektrisitet	23
2.4.2 Solcellesystemer	28
2.5 Beskrivelse av det lokale bygningsnettet og det tilknyttede solcellesystemet.....	31
2.5.1 Solcellesystemet ved energilaboratoriet, Fløy IV	31
2.5.2 Solcellepaneler	31
2.5.3 Vekselretter	32
2.5.4 Beskrivelse av det elektriske nettet og potensielle kilder til spenningsforstyrrelser i bygget Fløy IV hvor solcellesystemet er installert.....	32
2.5.5 Jordfeil	34

3	Metode og måleutstyr	37
3.1	Måleutstyr	37
3.1.1	Nettanalysator C.A.8335 Qualistar+	37
3.1.2	Nettanalysator Medcal N	38
3.1.3	Vekselretter THEIA He-T	38
3.2	Oppkobling av måleutstyr og datainnsamling	39
3.3	Analyse og databehandling	42
3.3.1	Analyse av spenningskvalitet mot grenseverdier i FoL	42
3.3.2	Sammenligning av spenningskvalitet, solcellepanel og drift av elektrisk utstyr	42
4	Resultater	45
4.1	Spenningsanalyse	45
4.1.1	Frekvens.....	45
4.1.2	Spenning.....	45
4.1.3	Spenningsprang	46
4.1.4	Kortvarige over- og underspenninger	47
4.1.5	Flimmer.....	47
4.1.6	Harmoniske spenninger.....	47
4.1.7	Transienter	48
5	Diskusjon	51
6	Konklusjon	55
7	Videre arbeid	57
8	Litteraturliste.....	59
	Vedlegg A.....	63
	Vedlegg B.....	65
	Vedlegg C.....	67
	Vedlegg D.....	69
	Vedlegg E.....	71
	Vedlegg F.....	73
	Vedlegg G	75
	Vedlegg H	79
	Vedlegg I.....	83

Symbolliste

Symbol	Forklaring
AMS-systemer	Avanserte måle- og styresystemer
CENELEC	European committee for electrotechnical standardization
CHP	Combined Heat and Power
DG	Distribuert generering
DG-enhet	Enhet som benyttes til distribuert generering
EN 50160	Europnorm 50160
FoL	FOR-2004-11-30-1557, forskrift for leveringskvalitet i kraftsystemet
m-CHP	Mikro CHP
MPP	Maksimum Power Point
MPPT	Maksimum Power Point Tracker
NVE	Norges vassdrag- og energidirektorat
P_{st}	Korttidsflimmer
P_{lt}	Langtidsflimmer
REN	Rasjonell elektrisk nettvirksomhet
RMS	(Root mean square) Effektivverdi
THD	(Total harmonic distortion) Total harmonisk forvrengning

Nomenklatur

Symbol	Forklaring	Enhet
AC	Vekselstrøm (Alternating current)	A
DC	Likestrøm (Direct current)	A
E_c	Ledningsbånd	
E_F	Ferminivået	eV
E_g	Det forbudte båndgap	eV
I_D	Diodestrøm	
I_L	Strøm generert fra sollys	A
I_0	Mørkestrømmen til dioden	A
k_B	Boltzmanns konstant: $1,38 * 10^{-23} \text{J/K}$	J/K
E	Energi (Megawatt-time)	MWh
T	Temperatur	K
q	Elementærladningen: $1,60 * 10^{-19} \text{C}$	C
V	Spenning	V
V_{oc}	Åpen kretsspenning	V

1 Innledning

Verdens energibehov blir stadig større, samtidig som klimagassutslipp verden over øker. Et større miljøfokus viser mulighetene og vilje til å erstatte fossile brensler og langreist energi med fornybar og kortreist energi. Miljøfokus, bedre og billigere teknologi og økonomiske intensiver gjør at distribuerte generering av elektrisitet er utberedt i resten av Europa og andre deler av verden. Interessen for distribuert generering er voksende også i her til lands. Norge har etter Norges vassdrag- og energidirektorats (NVEs) vedtak av 16.3.2010 fått sine første plusskunder. Plusskunder er sluttbrukere som også genererer elektrisitet som kan mates inn på nettet ved produksjonsoverskudd.

Mange land har de siste årene fått et mer liberalisert kraftmarked. Nettet gjøres tilgjengelig for sluttbrukere som vil levere elektrisitet og myndighetene oppmuntrer til fornybar produksjon fra sluttbrukere. Årsaken til dette er blant annet klimakrav om reduserte klimagassutslipp og økt fornybarandel av energimiksen. For å nå klimamålene må man øke produksjonen av fornybar energi. Per i dag er det ofte billigere å benytte fossile energikilder enn fornybare energikilder. Det er derfor i mange land enda nødvendig med støtteordninger som favoriserer fornybare løsninger fremfor fossile løsninger gjennom skatter, avgifter og utslippskvoter for fossile brensler [1]. I flere land er det innført feed-in tariffen som gjør at fornybare løsninger favoriseres i kraftmarkedet og produsenter av fornybar energi får høyere priser for generert elektrisitet enn produsenter som baserer seg på fossil energi, eksempler er land som Tyskland, Spania og Italia [2].

Masteroppgaven tar utgangspunkt i et prosjektforslag fra SINTEF Energi AS med tittel 'Aktive Kunder i Fremtidens Distribusjonsnett'. Noen av målene til prosjektet er å vinne erfaring med plusskunder for å være forberedt den dagen et større marked kommer, få kunnskap om produksjonsmønster og vurdere konsekvensen for distribusjonsnettet som følge av distribuert generering fra plusskunder.

I denne oppgaven vil det gjennom måling og analyse belyses mulige konsekvenser for spenningskvaliteten ved distribuert generering basert på solceller. I den teoretiske delen vil plusskunder og solcelleteknologi bli beskrevet. Videre vil konsekvenser av distribuert generering

basert på solceller og tilknytning av enheter som benyttes ved distribuert generering (DG-enheter) til distribusjonsnettene bli belyst. Ved Universitetet for miljø- og biovitenskap (UMB) er det installert 9 solcellemoduler som genererer elektrisitet til skolens nett. Fra februar til april ble det ved uttaket fra vekselretteren logget data for spenningskvalitetsparametere. I analysedelen blir observerte fenomener fra måling og logging vurdert mot myndighetenes krav og grenseverdier. Videre diskuteres mulige årsaker til de observerte fenomenene og hvorvidt solcellepanelet kan være årsaken.

2 Teori

2.1 Plusskunder

2.1.1 Hva er en plusskunde?

Plusskunder er av NVE definert som sluttbrukere av elektrisitet som også genererer elektrisitet til eget forbruk. En forutsetning for å være plusskunde er at den kraftproduserende enheten som genererer elektrisitet ikke er konsesjonspliktig eller leverer elektrisitet til andre sluttbrukere [3]. I gjennomsnitt skal årsproduksjonen fra en plusskunde ikke overstige eget forbruk. Når plusskunden produserer mer elektrisitet enn den bruker, kan den levere elektrisitet tilbake på nettet og bli kompensert av nettselskapet for dette.

2.1.2 Plusskundeordningen

Plusskundeordningen beskrives i NVEs vedtak av 16.3.2010, og er en frivillig ordning mellom sluttbruker og områdekonsesjonær som har til hensikt å gjøre det enklere for sluttbrukere å levere kraft til nettet. Dette gjøres ved å gi dispensasjon fra bestemmelsen om tariffing av innmating, i forskrift av 11. mars 1999 nr. 302 om økonomisk og teknisk rapportering, inntektsramme for nettvirksomheten og tariffing, heretter kun kalt kontrollforskriften [4]. Plusskunder og områdekonsesjonær må inngå en tilknytnings- og nettleieavtale hvor områdekonsesjonær kan stille krav til tilknytning av plusskunden til områdekonsesjonærens nett. Områdekonsesjonær er det lokale nettselskap [3].

Enheter som omsetter elektrisk energi må i følge energiloven i utgangspunktet ha omsetningskonsesjon, men kan få unntak fra konsesjonsplikt hvis det åpenbart er unødvendig [3]. Vanligvis må en kraftprodusent som ønsker å selge kraft på engrosmarkedet inngå en balanseavtale direkte med Statnett eller gjennom en balanseansvarlig. Plusskundeordningen gir fritak for kravet om balanseansvar da plusskunden ikke selger kraft på engrosmarkedet eller til andre sluttbrukere, men til områdekonsesjonæren [3]. Det er ikke satt en øvre grense for produksjon fra plusskunder [5]. Som plusskunde må man ha målere som kan måle både inntak og uttak av elektrisitet [4]. NVE anbefaler at plusskunden betaler kostandene for en slik måler [4].

NVE vurderer nå endringer i forhold til dagens plusskundeordning og jobber med nødvendige forskriftsendringer for å innføre en permanent plusskundeordning. Det vurderes om ordningen også skal omfatte kunder som har årsoverskudd av elektrisitet og om elektrisiteten skal selges til kraftleverandør i stedet for nettselskap.

2.1.3 Tariffering

Sluttbrukere av elektrisk kraft uten effektavregning betaler nettleie for uttak som består av et fastledd og et energiledd. For sluttbrukere med effektavregning inkluderer nettleien også et effektledd. Andre tariffledd omfatter fastledd og effektledd, hvor fastledd er en fast sum, mens effektleddet avhenger av hvor mye effekt kunden har tatt ut i et bestemt tidsrom [6]. Grenser for når det beregnes effektledd varierer mellom nettselskapene og er ofte satt som følge av størrelse på hovedsikringene [5, 6]. Foreløpig vil en plusskunde vanligvis ikke ha effektavregning, som er mer vanlig for større anlegg og næringskunder [7]. Plusskunder tarifferes fastledd for uttak på lik linje med andre sluttbrukere, men fritas for tariffering av andre tariffledd for innmating og får en forenklet nettleie i forhold til andre produsenter av elektrisk energi.

Energiledd avregnes nettobasert. Det vil si at nettleie for innmating beregnes for de timer det er netto innmating av elektrisitet og nettleie for uttak beregnes for de timer det er netto uttak av elektrisitet [3]. «Energileddet skal gjenspeile de marginale tapskostandene som påføres nettet og defineres som den deriverte av tapet og øker proporsjonalt med overføringen» [7]. Energileddet varierer med sesong og for vinterdag, vinternatt, helg og sommer[4] og beregnes som følger:

$$\text{Energiledd} = \text{Innmating/uttak (MWh)} * \text{marginaltapssats (\%)} * \text{områdepris (kr/MWh)} \text{ [8].}$$

Områdekonsesjonæren kjøper overskuddskraften som produseres av plusskunden. Overskuddskraft fra plusskunden kan være med og dekke tap i områdekonsesjonærens nett [4]. Pris avtales mellom områdekonsesjonær og plusskunde, men NVE anbefaler at prisen skal reflektere markedsprisen i området [3].

2.1.4 Regelverk og krav

Plusskunder må forholde seg til regelverk og krav som kraftprodusenter og sluttbrukere og i egenskap av å være tilknyttet kraftnettet. Hvis et nettselskap og en sluttbruker inngår avtale om at sluttbrukeren blir plusskunde i henhold til NVEs vedtak av 16.3.2010, så fritas kunden fra enkelte krav i forskrifter og lover som kan forenkle prosessen med salg av overskuddskraft til nettselskapet.

For å installere en DG-enhet og levere kraft til nettet må det tas hensyn til retningslinjer som omhandler prosjektering, utførelse, drift og vedlikehold av anlegget [9]. Før DG-enheten tilkobles nettet må det vurderes hvordan enheten vil påvirke nettet. Det er viktig at sikkerhet og leveringskvalitet opprettholdes [9]. Plusskunder må inngå tilknytnings- og nettleieavtale med nettselskapet de selger overskuddskraften til og nettselskapet stiller krav til plusskunden for å sikre at nettselskapets nettanlegg overholder krav fastsatt i lover og forskrifter. Vedtak av 16.3.2010 påpeker at NVEs ordning ikke innebærer endring av: «rettigheter og plikter til leverings- og spenningskvalitet, tilknytningsplikt, leveringsplikt, anleggsbidrag m.v.» [4].

Det er ønskelig å ha felles retningslinjer for tilknytning av plusskunder for alle nettselskap i landet, slik at kunder, entreprenører og installatører har samme prosedyre og regler å forholde seg til, uavhengig av nettselskap. Flere nettselskaper har utformet egne retningslinjer for tilknytning av plusskunder. Rasjonell elektrisk nettvirksomhet (REN) utformer og leverer bransjeretningslinjer for norske nettselskaper og har utarbeidet mal relatert tilknytnings- og nettleieavtale for innmatingskunder i distribusjonsnettet [10]. REN arbeider nå med bransjeretningslinjer for blant annet lavspente PV-enheter, som kan være en mal til tilknytnings- og nettleieavtale mellom nettselskaper og plusskunder med solcellepanel.

I denne oppgaven vil det fokuseres på krav til spenningskvalitet fra plusskunders DG-enheter. Krav til leverings- og spenningskvalitet i Norge er gitt i energiloven og dekkes i FOR-2004-11-30 nr. 1557: Forskrift for leveringskvalitet i kraftsystemet (FoL). Denne forskriften gjelder for alle som «helt eller delvis eier, driver eller bruker elektriske anlegg eller elektrisk utstyr som er tilkoblet i det norske kraftsystemet, samt den som i henhold til energiloven er utpekt som systemansvarlig» [11] og gjelder dermed for plusskunder. Fra og med 1. januar 2014 trer flere endringer til FoL i kraft i henhold til FOR

2012-12-07 nr. 1183: Forskrift om endring i forskrift om leveringskvalitet i kraftnettet. Denne forskriften innebærer ikke store forandringer i krav til spenningskvalitetsparametere.

Det finnes internasjonale standarder og normer for spenningskvalitet. Europeanormen EN 50160 gjelder som norsk norm og er utarbeidet av European committee for electrotechnical standardization (CENELEC). EN 50160 ligner på FoL, men FoL har noe strengere krav [12].

2.1.5 DG- enheter

Plusskunder har lokal generering av kraft, kalt distribuert generering. Produksjonsenheter benyttet ved distribuert generering blir kalt DG-enheter og det finnes flere aktuelle DG-teknologier. Størrelsen på plusskunders anlegg kan variere, men for privatkunder som også er plusskunder vil anleggene som regel være små, uten større produksjon enn kundens eget forbruk. I Norge er de fleste plusskunder forbrukskunder som har installert solcellepaneler. I denne oppgaven vil det være mest interessant å se på teknologier som passer for mindre DG-enheter som kan benyttes av plusskunder i Norge. Dette vil være vannkraft, vindkraft, solceller og Combined Heat and Power (CHP).

I følge SINTEF Energi har Norge et stort potensial for utbygging av distribuert produksjon basert på fornybar energi fra vann- og vindkraft [13]. Vannkraft utnytter potensiell energi i oppdemmet vann eller kinetisk energi i fall eller elver. Elektrisk effekt fra vannturbiner avhenger av nedbør og vannstrøm. Variasjoner i nedbørsmengde gjennom år og mellom år varierer over hele verden. I Norge er det gunstige forhold for vannkraft, med mye nedbør og fjellandskap. Vindkraft har størst potensiale i kyststrøk eller i fjellområder. I by-områder med bolighus vil det være en utfordring med bygningsmasse som bremser vinden. Vindkraft er som solkraft uforutsigbar og varierer med tiden. Uforutsigbarhet og sterk variasjon i hvor mye elektrisitet som genereres til enhver tid er en utfordring for kraftnett som knytter til seg slike enheter. Avgitt effekt fra solceller avhenger av værforhold og skygging, samt døgn- og årsvariasjoner. Skygging fra skyer og andre objekter kan føre til brå endringer i generering av elektrisitet. For private hus er det vanligst å montere solceller på taket, men det finnes også andre teknologier som gjør det mulig å integrere solceller i andre materialer og bygningsflater ved for eksempel tynnfilmsteknologi. CHP-enheter genererer elektrisitet og gjenvinner varme. Mikro-CHP (m-CHP) er mindre enheter beregnet for generering av elektrisitet

og oppvarming av bolighus. Slike enheter har en fordel ved å kunne levere forutsigbar og stabil kraft. Drivstoff kan være biomasse, biogass eller fossile brensler. [1]

En potensiell positiv virkning av økt integrering av DG-enheter er økt integrering av fornybar energi i kraftnettet. Distribuert generering åpner for muligheter for å benytte seg av lokale fornybare kilder og utnytting av arealer som i utgangspunktet ikke ville blitt benyttet til elektrisitetsgenerering. Eksempler er solcellepaneler og vindturbiner montert på tak til bolighus, mindre vannkraftverk og biologisk avfall til CHP-enheter.

DG-enheter kan bidra til økt produksjon i kraftnettet, som kan være med å dekke behovet for elektrisitet når forbruket er høyest. Peak-load situasjoner er tidspunkt med høyest belastning av kraftnettet. I Norge er elektrisitetsetterspørselen vanligvis høyest på morgen og tidlig kveld. I varmere klima vil solceller ha høyest produksjon midt på dagen når solinnstrålingen er høyest. Da vil også behovet for luftkjøling være størst og elektrisiteten som produseres fra solcellepanelene vil være med på å avlaste nettet i en toppbelastningssituasjon [1].

For uforutsigbare energikilder eller kilder som genererer elektrisitet når behovet for elektrisitet er lavt, kan det være fornuftig med lagringsmedier. Energilagre bør kunne lagre energien når den genereres og ha energi tilgjengelig for uttak ved behov, som for eksempel i perioder med toppbelastning. Dette kan også gi økonomiske fordeler ved at man kan selge elektrisitet når den er dyrest. Det finnes flere alternativer for lagring, men mange er kostbare og har kort lagringstid. Batterier benyttes ofte som lademetode for solcellepaneler. Det mest effektive alternativet for lagring av energi ved DG-produksjon er pumpekraftverk i tilknytning til vannkraftverk [7]. Andre mindre utbredte lagringsmuligheter er svinghjul som bruker rotasjonsenergi som lager, komprimering av luft som kan benyttes til å øke ytelsen på gassturbiner, superkondensatorer hvor et elektrisk felt brukes som energilager eller å danne hydrogen som har høy energitetthet [1, 14].

2.1.6 Smarte nett

Ved et økt innslag av distribuert generering og fornybare energikilder med uforutsigbart effektmønster er det nødvendig med nye løsninger i kraftnettet. Smarte nett er definert som «framtidens kraftsystem som tar i bruk informasjons- og kommunikasjonsteknologi og nye måle- og styresystemer» [15]. Framtidens nett skal benytte avanserte måle- og styresystemer (AMS-systemer) for å kunne ha en toveiskommunikasjon mellom nettselskap og sluttbruker og for å ha en bedre kontroll over nettsystemet. Smarte strømmålere skal måle timesverdier for forbruk hos sluttbrukeren og føre til at både sluttbruker og nettselskap har bedre oversikt over forbruk. For at plusskunder skal kunne levere egen generert elektrisitet er det et krav med 4-kvadrantsmålere som måler både innmating og uttak av aktiv og reaktiv effekt.

2.2 utfordringer og effekter ved tilknytning av plusskunder til distribusjonsnettet

Kraftnettet skal sørge for at elektrisitet transporteres fra produsenter og distribueres til forbrukere. Ved distribuert generering vil forbruker også kunne bli produsent av elektrisitet og mate elektrisitet inn på nettet. De fleste plusskunder vil mate elektrisitet inn på distribusjonsnettet med lavere spenningsnivå. Ved flere DG-enheter tilknyttet distribusjonsnettet vil overføringsbehovet av elektrisitet fra nett med høyere spenning bli mindre. Generering av elektrisitet nær forbruker vil minske behovet for utbygging av distribusjonsnettet og vil også føre til redusert effekttap ettersom effekttap er proporsjonalt med avstand.

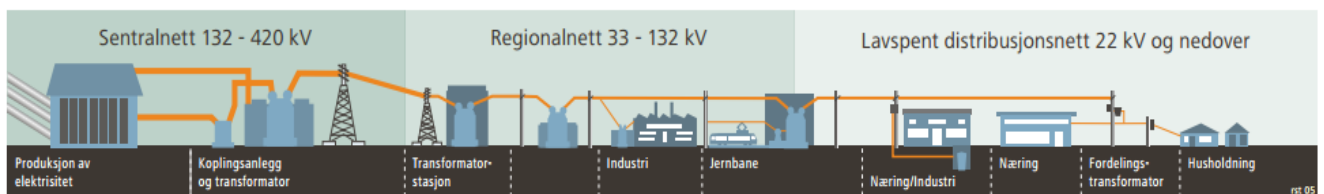
Alle som er tilknyttet kraftnettet påvirker kvaliteten på elektrisiteten som leveres fra kraftnettet [16]. I hvilken grad kraftnettet påvirkes av DG-tilkobling avhenger av mengden DG-enheter i nettet, mengden generert kraft fra DG-enheter, DG-enhetenes plassering i nettet, kraftnettets karakteristikk og overføringskapasitet [9]. Et lite antall mindre DG-enheter vil i hovedsak ha lokale effekter på kraftkvaliteten i distribusjonsnettet, men et større innslag og større DG-enheter vil kunne ha effekter på hele kraftsystemet. Selv om DG-enheter ikke gir store bidrag til forstyrrelser i kraftnettet, så vil mange enheter føre til en total økning av fenomener som kan forringe kvaliteten på elektrisiteten i nettet [1]. Dette kan være med som en begrensende faktor for hvor mye distribuert generering som kan tillates i nettet [1].

Ulike kvalitetsparametere definerer hvilke krav som stilles til leveringskvaliteten fra DG-enheter. Leveringskvalitet omfatter leveringspålitelighet, spenningskvalitet og ulike ikke-tekniske elementer som kundeservice og informasjon. Redusert leveringskvalitet kan blant annet føre til feilfunksjon, havari og økonomisk tap for alle som er knyttet til kraftsystemet. Leveringspålitelighet omfatter avbrudd og dermed tilgjengelighet av elektrisk kraft, mens spenningskvalitet omfatter kvaliteten på den kraften som blir levert. [16]

Det har alltid vært forstyrrelser i nettet og forringelse av kvaliteten på elektrisiteten i nettet. Nyere elektronisk utstyr kan være mer sårbart for forstyrrelser og feilsituasjoner i nettet. Halvlederkomponenter og mikroprosessorer som blant annet finnes i pc'er er eksempler på sensitivt utstyr. Forstyrrelser kan føre til problemer ved automatiserte og avanserte prosesser og produksjonsmetoder og gi store økonomiske tap. Spenningsfall, korte avbrudd og harmoniske spenningskomponenter er de forstyrrelsene i kraftnettet som fører til størst kostander. [17]

2.2.1 Dagens kraftnettstruktur i Norge

Kraftnettet i Norge kan deles i tre hovednivåer ulike spenningsnivåer, som vist i figur 2.1. Spenningen transformeres ned i transformatorer mellom de ulike nettnivåene fra høyspent sentralnett til lavspenning distribusjonsnett. Sentralnettet har ofte et spenningsnivå på 300 kV og 420 kV og transporterer elektrisitet fra kraftstasjoner til regionalnettet. Regionalnettet har et spenningsnivå på 66 kV og 132 kV og transporterer elektrisitet fra sentralnettet til distribusjonsnettet. Distribusjonsnettet transporterer elektrisitet fra regionalnettet til sluttbrukere og som mottar strøm med spenning mellom 230 V og 400 V. [18]



Figur 2.1 viser det norske kraftsystemet. Her vises de tre hovednivåene: sentralnett, regionalnett og distribusjonsnett. [19]

Kraftnettet i Norge består både av radialnett og maskenett. Sentralnettet og regionalnettet består hovedsakelig av maskenett som er nett med flere inn- og utganger. Det lavspente distribusjonsnettet har i hovedsak radiell struktur med direkte enkeltstående linjer. Distribusjonsnettet utgjør omtrent 91 % av den totale lengden av kraftnettet, mens regionalnettet og sentralnettet utgjør henholdsvis 6 % og 3 % av den totale lengden av kraftnettet i Norge. Radialnett og maskenett reagerer forskjellig på driftsforstyrrelser og utfall. Generelt kan det sies at maskenett har mer komplekse reaksjonsmønstre, mens radialnett er mer forutsigbare. I radielle nett vil ofte flere forbrukere på direkte enkeltstående linjer være forsynt av samme kraftkilde og det er fare for utfall hvis det oppstår feil en plass i én av radialene. I maskenett vil forbrukere gjerne være forsynt av flere kraftkilder og ikke være så sårbare for utfall. [20]

2.2.2 Fra enveis til toveiseffektflyt i kraftnettet

Tidligere har det kun vært enveis effektflyt i kraftnettet, fra kraftverk via ledningsnettet til forbruker. Når DG-enheter som er tilknyttet distribusjonsnettet leverer elektrisitet til nettet oppstår toveis effektflyt hvor elektrisitet leveres fra distribusjonsnettet til forbruker og fra DG-enheter inn på kraftnettet. Toveis effektflyt er en utfordring for nett som i utgangspunktet var dimensjonert for enveis effektflyt. Ved enveis effektflyt har man avtagende spenning fra transformator til sluttbruker grunnet tap i ledningsnettet, men ved DG-enheter innkoblet i nettet vil dette spenningsforholdet gjennom linja endres og dermed også belastningen på linja [9].

Vernstrukturen i distribusjonsnettet er i hovedsak basert på radialnett med ensidig innmating av feilstrøm og overstrømsvern som ikke er retningsbestemt. Overstrømsvernet i distribusjonsnettet skal sikre utkobling ved overstrøm og kortslutning [14]. Vern som ikke er retningsbestemt kan bli en utfordring ved tosidig innmating i distribusjonsnettet. Dette kan føre til en overgang til retningsbestemt overstrømsvern, som benyttes i maskede nett. Uten retningsbestemt overstrømsvern vil automatisk utkobling (tripping) bestemmes av størrelsen på strømmen og være uavhengig av retning på feilstrømmen og det kan føre til at bryteren tripper feilaktig. [1, 21].

2.2.3 Øydrift

Øydrift er en tilstand hvor en del av kraftnettet med én eller flere DG-enhet er koblet fra resten av nettet. Ved øydriftstilstand vil det kunne oppstå unormale frekvens og spenningsverdier [21]. Ukontrollert øydrift inntreffer hvis nettet kobles ut, mens DG-enheten fortsetter å generere elektrisitet og ikke kobler ut. Dette kan være svært farlig for personer som arbeider på nettet og kan føre til skader på utstyr [21]. Det er i dag utfordringer med detektering av øydrift og øydriftsvern [21]. Det kan oppstå feil i nettet som gjør at ukontrollert øydrift ikke detekteres [1]. I dag er det ikke tillat med øydrift på grunn av sikkerhetsaspektet, men unødvendig tripping av DG-enheter kan føre til avbrudd og alvorlige konsekvenser for forbrukere og nettet. Hvis DG-enheter kobler ut ved små endringer i spenning og frekvens så vil dette kunne føre til unødvendige avbrudd. Disse avbruddene kan fort få kritiske konsekvenser for brukere som sykehus, flytrafikkontroll, beredskapssentraler, finansinstitusjoner og generelt for datalagring [17]. Det er viktig å sikre leveringspålitelighet og sikkerhetsaspekt må veies mot leveringspålitelighet.

2.2.4 Reserver

Kraftnettet har reserver som skal sikre strømforsyningen ved store endringer og ubalanse mellom last og produksjon, som for eksempel utfall av kraftstasjoner eller økt last som følge av lave temperaturer. Stabiliteten i nettet endres ved at man går fra enheter med mye kinetisk energi i store kraftverk til mindre enheter gjerne uten roterende masse. Som reserve er det viktigste ikke mengden energi som er viktigst, men hvor fort energien i roterende masse kan gjøres tilgjengelig for kraftsystemet [1]. Mer fornybar energi fører til at nettet har mindre reserver og gjør forutsigbarheten av forholdet mellom last og produksjon i nettet vanskeligere, samtidig som behovet for reserver øker [1]. En måte å løse dette på kan være å bygge elektronisk treghet hos DG-enheter som for eksempel solcellesystemer, men en må da også ha en løsning for energilagring.

2.2.5 Kraftelektronikk

Komponenter med kraftelektronikk benyttes i tilkoblingspunktet mellom DG-enhet og kraftnettet og omformer eller styrer elektrisitet ved å benytte kontrollerte elektroniske brytere. Valg av komponenter påvirker kostnad, kompleksitet og effektiviteten til DG-enheten. Kraftelektroniske komponenter skal hjelpe å overføre elektrisitet fra DG-enheten til kraftnettet og sørge for at elektrisiteten tilfredsstiller nettes krav til kvalitet. Kraftelektronikk kan være kilde for harmoniske strømmer og spenninger. Viktige egenskaper ved kraftelektroniske apparater er at de skal minimere harmoniske strømmer og detektere nettes spenningsvinkel samt forbedre ytelsen til DG-enheter. Flere komponenter kan benyttes for spenningsregulering og regulering av reaktiv effekt. Static Var Compensators (SVC) kan benyttes som spenningsregulator for å unngå flimmer og kontrollere reaktiv effekt [22]. Static synchronous compensator (STATCOM) består av en kildespenningsomformer (VSC) og kan utveksle reaktiv effekt og redusere spenningsfluktasjoner og harmoniske spenninger [23]. [1]

2.3 Spenningskvalitet

Spenningskvalitet beskriver leveringskvaliteten i kraftnettet når det ikke er avbrudd [24]. Kvaliteten på elektrisiteten som leveres fra DG-enheter vil påvirkes av ulike kraftelektroniske komponenter og det er ønskelig at utstyr hverken er en kilde til forstyrrelser eller er sensitiv for forstyrrelser selv [17]. Kraftelektroniske komponenter kan også forbedre spenningskvaliteten ved å kontrollere strømstyrke, fasevinkelen til strømmen sammenlignet med spenningen og strømmens bølgeform [1].

Spenningskvalitetsfenomener som kan øke som følge av flere DG-enheter er særlig harmoniske, spenningsfluktasjoner og ubalanse [1]. Spenningsforstyrrelser kan føre til redusert levetid for komponenter, feilaktig tripping og skade på utstyr [1].

For å beskrive spenningskvalitet kan vi skille mellom parametere som påvirker spenningsfrekvens, spennings effektivverdi og spenningskurveform som illustrert i tabell 1.

Spenningsusymmetri beskrives i kapittel 2.3.7 men vil ikke bli behandlet videre i analysen da målingene er utført ved et enfaset nett.

Tabell 1 Oversikt over hvilke spenningsparametere som kan påvirke spenningskvaliteten og som behandles videre i oppgaven.

Spennings frekvens	Frekvens
Spennings effektivverdi	Langsomme variasjoner i spennings effektivverdi
	Spennings sprang
	Kortvarige overspenninger
	Kortvarige underspenninger
	Flimmer
	Spenningsusymmetri
Spennings kurveform	Harmoniske spenninger
	Transienter

2.3.1 Frekvens

FoL stiller følgende kvalitetskrav til frekvensen til den grunnharmoniske spenningen:

«Systemansvarlig skal sørge for at spennings frekvens- og tidsavvik normalt holdes innenfor bestemmelser i nordisk systemdriftsavtale. Systemansvarlig skal i områder som er uten fysisk tilknytning til tilgrensede overføringsnett, sørge for at spennings frekvens normalt holdes innenfor $50 \text{ Hz} \pm 2 \%$ » [11]. Bestemmelser i nordisk systemdriftsavtale sier for øvrig at ved normal drift skal frekvensen være $50 \text{ Hz} \pm 0,2 \%$, altså mellom 49,9 til 50,1 Hz [24].

Roterende masse i kraftverk sørger for stabil frekvens i nettet. Frekvensvariasjoner har tidligere ikke vært et særlig problem i det norske kraftsystemet med mange store vannkraftverk [24]. For at frekvensen skal holdes stabil er det viktig med likevekt mellom generering som forbruk. Med økt innslag av DG-enheter vil produksjonen kunne være uforutsigbar og variabel, som ved generering av elektrisitet fra PV-anlegg og vindturbiner. Uforutsigbar og varierende generering og forbruk kan være et problem for frekvensens stabilitet. Lite roterende masse ved DG-generering gjør at kraftelektronikk må kunne levere stabil og korrekt frekvens [14].

2.3.2 Langsomme variasjoner i spennings effektivverdi

Langsomme variasjoner i spennings effektivverdi defineres av FoL som: «Endringer i spennings stasjonære effektivverdi, målt over et gitt tidsintervall» [11]. FoL setter følgende kvalitetskrav til langsomme spenningsvariasjoner: «Nettselskap skal sørge for at langsomme variasjoner i spennings effektivverdi, er innenfor et intervall på $\pm 10\%$ av nominell spenning, målt som gjennomsnitt over ett minutt, i tilknytningspunkt i lavspenningsnettet» [11].

Elektrisk utstyr hos sluttbrukere og komponenter i kraftnettet er designet for gitte spenningsforhold. For høye eller for lave spenningsverdier kan føre til store problemer i kraftnettet og tilknyttede komponenter. Spenningsendringer skyldes i hovedsak lastvariasjoner. Ved for høy spenning i nettet kan utstyr og isolasjon skades og få forkortet levetid. Lav spenning kan gi økte tap i overføringslinjer og transformatorer og kan føre til at utstyr får dårlig ytelse og at automatiserte prosesser og dataprosesseringssystemer stopper. [17]

2.3.3 Spenningsspang

FoL definerer spenningsprang er som følgende: «En endring av spennings effektivverdi innenfor $\pm 10\%$ av avtalt spenningsnivå, som skjer hurtigere enn $0,5\%$ av avtalt spenningsnivå pr. sekund. Spenningsprang uttrykkes ved stasjonær og maksimal spenningsendring som er gitt ved henholdsvis:

$$\% U_{\text{stasj}} = \frac{\Delta U_{\text{stasj}}}{U_{\text{avtalt}}} \cdot 100 \%$$

og

$$\% U_{\text{maks}} = \frac{\Delta U_{\text{maks}}}{U_{\text{avtalt}}} \cdot 100 \%$$

der ΔU_{stasj} er stasjonær spenningsendring som følge av en spenningsendningskarakteristikk, ΔU_{maks} er den maksimale spenningsdifferansen i løpet av en spenningsendningskarakteristikk og U_{avtalt} er avtalt spenningsnivå» [11].

Grenseverdier for spenningsprang i tilknytningspunkt er vist i tabell 2. Disse grenseverdiene gjelder også for kortvarige over- og underspenninger.

Tabell 2 viser grenseverdier for spenningsprang i tilknytningspunkt fastsatt i FoL, U_N er gitt i [kV]. [11]

Spenningsprang	Maksimalt antall tillatt pr. døgn	
	$0,23 \leq U_N \leq 35$	$35 < U_N$
$\Delta U_{stasjonær} \geq 3\%$	24	12
$\Delta U_{maks} \geq 5\%$	24	12

Unntak for grenseverdiene gjelder: «spenningsendringer som skyldes jord- eller kortslutninger i nettet, innkobling av transformatorer, gjeninnkobling etter feil, og nødvendige driftskoblinger for å opprettholde en tilfredsstillende leveringskvalitet som helhet» [11]. Ved FOR2012-12-07 nr. 1183 med ikrafttredelse 1.1.2014 gjøres mindre endringer til dagens FoL. I tabell 2 endres ordlyden ved at «maksimalt antall tillatt pr. døgn» endres til «maksimalt antall tillatt pr. flytende 24-timers periode [kV]» og tabellen inkluderer kortvarige over – og underspenninger [25].

Spenningsprang er en hurtig endring av spennings effektivverdi og kan forekomme ved stor endring i last som ved innkobling eller utkobling av transformatorer, lynnedslag eller som følge av jord- eller kortslutninger [12, 24]. Konsekvenser av spenningsprang er vanligvis kun endring i lysintensitet.

2.3.4 Kortvarige overspenninger

Kortvarige overspenninger er «hurtig økninger i spennings effektivverdi til høyere enn 110 % av avtalt spenningsnivå, med varighet fra 10 millisekunder til 60 sekunder.» [11]. Med FOR 2012-12-07 nr. 1183 med ikrafttredelse 1. Januar 2014 vil følgende punkt tilføyes definisjonen på kortvarige overspenninger: «I et system der et elektrisk anlegg eller elektrisk utstyr forsynes med mer enn én forsyningsspenning vil en kortvarig overspenning inntreffe når spenningen på minst én av forsyningsspenningene stiger over 110 % av avtalt spenning og opphøre når alle forsyningsspenningene faller til 110 % eller mindre av avtalt spenning.» [25]

Kortvarige overspenninger skyldes ofte reduksjon av stor last. SINTEF Energi har utført forsøk som viser at husholdningsapparater tåler ganske godt kortvarige overspenninger[24], men vedvarende overspenninger kan ødelegge husholdningsapparater [17]. NVE kan pålegge de som omfattes av FoL å redusere omfanget eller konsekvensene av kortvarige overspenninger. Spenningsendringene skal ikke overstige verdier gitt i tabell 2 i avsnitt 2.3.3. Samme unntak som for spenningsprang gjelder også for kortvarige over- og under spenninger.

2.3.5 Kortvarige underspenninger

Kortvarige underspenninger er: «hurtig reduksjon i spennings effektivverdi til under 90 %, men større enn 1 % av avtalt spenningsnivå, med varighet fra 10 millisekunder til 60 sekunder» [11]. Ved FOR 2012-12-07 tilføyes følgende definisjonen av kortvarige underspenninger: « I et system der et elektrisk anlegg eller elektrisk utstyr forsynes med mer enn én forsyningsspenning vil en kortvarig underspenning inntreffe når minst én av forsyningsspenningene faller under 90 % av avtalt spenning og opphøre når alle forsyningsspenningene stiger til 90 % eller mer av avtalt spenning»[25].

NVE kan pålegge de som omfattes av FoL å redusere omfanget eller konsekvensene av kortvarige overspenninger og grenseverdier gitt i tabell 2 i avsnitt 2.3.3. skal ikke overstiges. Samme unntak som for spenningsprang gjelder også for kortvarige over- og under spenninger. Kortvarige underspenninger har ofte større spenningsendring enn kortvarige overspenninger og forekommer 10 ganger så ofte som kortvarige overspenninger [24].

Lokalt vil mer DG styrke nettet og hindre antall kortvarige underspenninger hos forbruker, men hvis store kraftverk erstattes av flere små DG-enheter så vil nettet kunne svekkes og antallet kortvarige underspenninger øke [1]. Kortvarige underspenninger kan forekomme ved kortslutninger, ved korte avbrudd, gjeninnkoblinger mot feil og brå økning i last. Konsekvenser av kortvarige underspenninger kan være feil ved signaloverføring, feilfunksjon, utkobling av elektrisk utstyr og havari på svakt utstyr. [17, 24]

2.3.6 Flimmer

Flimmer defineres av FoL som «synlig variasjon i lys hvor luminansen eller spektralfordelingen varierer med tiden», og flimmerintensitet skilles mellom korttidsflimmer (P_{st}) og langtidsflimmer (P_{lt}) [11]. P_{st} måles over ti minutter, mens P_{lt} beregnes fra 12 P_{st} verdier over to timer i henhold til følgende uttrykk:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}}$$

Kvalitetskrav til flimmerintensitet er gitt i tabell 3.

Tabell 3 viser grenseverdier for korttidsflimmer P_{st} og P_{lt} fastsatt i FoL. U_N er gitt i [kV]. [11]

	$0,23 \leq U_N \leq 35$	$35 < U_N$	tidsintervall
Korttidsintensitet av flimmer, P_{st} [pu]	1,2	1,0	95 % av uken
Langtidsintensitet av flimmer, P_{lt} [pu]	1,0	0,8	100 % av tiden

Ved FOR 2012-12-07 nr. 1183 legges det til at Flimmerintensiteten som skyldes jord- eller kortslutninger i nettet, innkobling av transformatorer eller gjeninnkobling etter feil ikke omfattes av grenseverdiene oppgitt i tabell 3 [25].

Flimmer er variasjon i lysintensitet og måles mot verdien 1, hvor minst halvparten av alle personer vil bli sjenert av flimmeret. Flimmer kan observeres ved at lys ikke har konstant intensitet, uten at man kan se de enkelte endringene. De fleste personer vil oppleve flimmer som ubehagelig, selv om de ikke kan se det. Studier har vist at flimmer som ikke kan observeres fører til økt aktivitet i enkelte deler av hjernen [1]. Hodepine og tretthet kan oppleves som følge av lang tids eksponering for flimmer [1]. Flimmer skyldes endringer i spenningens effektivverdi med frekvens fra 25 Hz ned til noen tidels Hz [26]. DG-enheter med variabel produksjon kan føre til flimmer [12].

2.3.7 Spenningsusymmetri

FoL definerer spenningsusymmetri slik: «Tilstand i flerfaset system hvor linjespenningenes effektivverdier (grunnharmoniske komponent), eller fasevinklene mellom etterfølgende linjespenninger, ikke er helt like. Grad av usymmetri beregnes ved forholdet mellom spennings negative og positive sekvenskomponent, og kan uttrykkes ved:

$$\frac{U_-}{U_+} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3-6\beta}}{1 + \sqrt{3-6\beta}}} \cdot 100 \%$$

der U_- er spennings negative sekvenskomponent og U_+ er spennings positive sekvenskomponent,

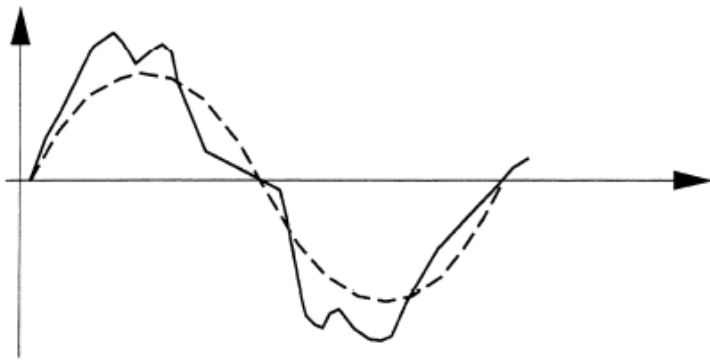
$$\beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2}$$

og U_{ij} representerer linjespenningens grunnharmoniske komponent mellom de nummererte faser» [11]. FoL stiller følgende krav til usymmetri: «grad av usymmetri ikke overstiger 2 % i tilknytningspunkt, målt som gjennomsnitt over ti minutter» [11].

Solceller kan bidra til usymmetri mellom fasene i distribusjonsnettet hvis de gjennom vekselretteren sender ut enfaset strøm til tilknyttet nett [12].

2.3.8 Harmoniske spenninger

Harmoniske spenninger er forvrenging av spenningskurven, som illustrert i figur 2.2. Harmoniske spenninger kan deles i to hovedgrupper: overharmoniske spenninger og underharmoniske spenninger. Mer distribuert generering i kraftnettet kan føre til at tidligere sjeldnere frekvenskomponenter nå opptrer oftere. Eksempler på sjeldnere spenningskomponenter kan være like harmoniske, odde harmoniske som er et multiplum av 3 og interharmoniske. Frekvenser som tidligere er blitt benyttet til linjekommunikasjon kan opptre oftere, noe som kan føre til forstyrrelse av kraftlinjekommunikasjon. Målinger utført på et 37kW og et 101 kW solcellesystem viser at de dominerende harmoniske ordenene ble målt til å være 3., 5., 7., og 9. orden og total harmonisk forvrengning (THD) ble målt til 3,5 %. [1]



Figur 2.2 viser en forvrengt kurve mot en sinusformet kurve. Summen av ulike harmoniske utgjør den forvrengte kurven. [24]

Overharmoniske spenninger

Overharmoniske spenninger er spenninger med frekvens som er et heltallsmultiplum av den grunnharmoniske frekvensen og som adderes til den grunnharmoniske sinusurveformen [11]. Det skilles mellom ulike ordner av overharmoniske spenninger, hvor 2.orden harmoniske vil ha en frekvens på 100Hz, mens 7.ordens harmoniske har en frekvens på 350 Hz. FoL definerer total harmonisk forvrengning og individuell harmonisk forvrengning for hvert multiplum av den grunnharmoniske frekvensen som følgende:

«Total harmonisk forvrengning av spenningen uttrykkes ved:

$$\% \text{ THD}_U = \frac{\sqrt{\sum_2^{40} U_h^2}}{U_1} \cdot 100 \%$$

Individuell harmonisk forvrengning for hvert multiplum av den grunnharmoniske frekvensen uttrykkes ved:

$$\% U_h = \frac{U_h}{U_1} \cdot 100 \%$$

Der U_1 er spenningens grunnharmoniske komponent, U_h er en gitt harmonisk spenningskomponent, og h er komponentens harmoniske orden.» [11]

FoL stiller følgende kvalitetskrav til overharmoniske spenninger: «Nettselskap skal sørge for at total harmonisk forvrengning av spenningens kurveform ikke overstiger 8 % og 5 %, målt som gjennomsnitt over henholdsvis ti minutter og én uke, i tilknytningspunkt med nominell spenning fra og med 230V til og med 35kV. Nettselskap skal sørge for at individuelle overharmoniske spenninger ikke overstiger følgende verdier, målt som gjennomsnitt over ti minutter, i tilknytningspunkt med nominell spenning fra og med 230V til og med 35kV» [11]:

Tabell 4 Grenseverdier for individueller overharmoniske spenninger som ikke skal overstiges målt som gjennomsnitt over ti minutter. [11]

Odde harmoniske				Like harmoniske	
Ikke multiplum av 3		Multiplum av 3			
Orden h	U_h	Orden h	U_h	Orden h	U_h
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	>9	0,5 %	> 4	0,5 %
13	3,0 %				
17	2,0 %				
19, 23, 25	1,5 %				
> 25	1,0 %				

Kraftelektronikk som vekselrettere kan være kilde til overharmoniske spenninger. Konsekvenser av overharmoniske spenninger kan være redusert ytelse, økte tap og overbelastning av tilknyttede komponenter. [24]

Interharmoniske spenninger

Interharmoniske spenninger er spenninger hvor frekvensen ikke er et heltallsmultiplum av den grunnharmoniske frekvensen på 50 Hz, men hvor frekvensen ligger mellom de overharmoniske frekvensene. NVE kan ifølge FoL fastsette grenseverdier for interharmoniske spenninger, men det er per i dag ikke fastsatt grenseverdier for interharmoniske spenninger i FoL. Årsaken til denne type forstyrrelser kan være frekvensomformere og konsekvenser kan være flimmer [26].

2.3.9 Transienter

Det stilles ikke krav til hverken transiente overspenninger eller koblingstransienter i FoL. Energien i transienter avhenger av varighet og effekt [27]. Impulsive transienter med høy effekt og kort varighet er ofte mindre energirike enn oscillatoriske transienter med lengre varighet.

Transiente overspenninger

Transiente overspenninger defineres i FoL som følgende: «Høyfrekvente eller overfrekvente overspenninger med varighet normalt innenfor en halvperiode (10 ms). Stigetiden kan variere fra mindre enn ett mikrosekund til noen få millisekunder» [11]. Slike transienter kan opptre ved kortslutninger i nettet samt ved feil i kraftelektronisk utstyr eller ved lynnedslag og konsekvenser kan være havari, feilfunksjon og reduserte levetid av komponenter i og tilknyttet kraftsystemet [24].

Koblingstransienter

Koblingstransienter er forvrenging av spenningens kurveform. Årsaker til denne typen transienter kan være overspenninger som følge av innkoblinger av kondensatorbatterier eller trafoer og kan føre til havari, feilfunksjon og utkobling av utstyr [24].

2.4 Solenergi

Sola er jordas største energikilde. Årlig innstråling til jorda fra sola er 5, 460 000 EJ og hvis all solinnstråling som når jorda kunne utnyttes vil 0,01 av solinnstrålingen kunne dekke jordas energiforbruk [28]. Solceller er én måte å utnytte denne energien ved direkte konvertering av sollys til elektrisitet.

Ved atmosfærens ytterkant regner man at solintensitet er 1366 W/m^2 [28]. Hvor stor effekt som når jorda varierer med flere parametere. På en skyfri dag regner man at sola leverer en effekt på 1000 W/m^2 til en flate på jordoverflaten som er vinkelrett på solstrålene. Den viktigste faktoren som påvirker mengde solinnstråling til jordoverflaten i klarvær er lengden på lysbanen. Kortest vei gjennom atmosfæren er gunstigst og inntreffer når sola står rett over innstrålingspunktet.

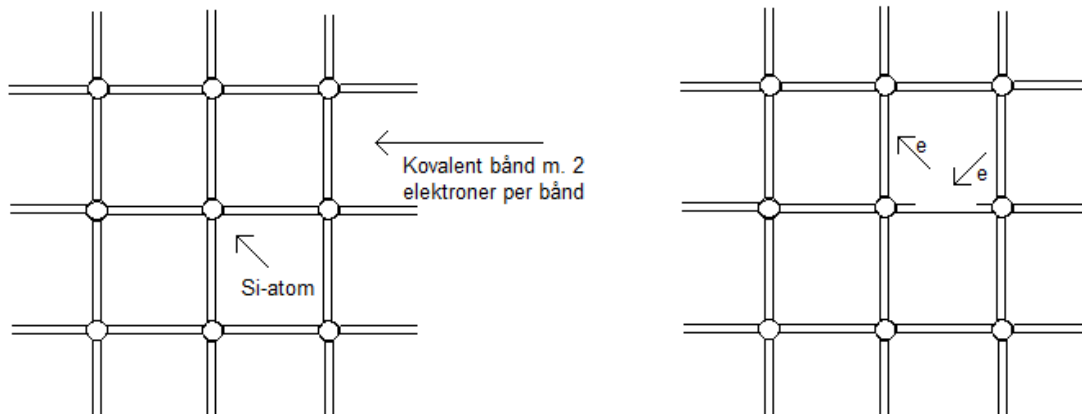
Andre faktorer som kan redusere intensiteten til solstrålingen er refleksjon, spredning og absorpsjon av solstråler i atmosfæren. Oksygen, ozon, vanndamp og karbondioksid kan absorbere solstråler, mens aerosoler og små partikler kan spre solstråler. Solstrålene som når jordoverflaten er dermed både direkte stråling fra sola og diffus stråling som følge av spredning i atmosfæren. Diffus solstråling har en annen spektral fordeling enn direkte solstråling og mange PV-systemer vil kun kunne utnytte direkte stråling.

Effektiv utnyttelse av solenergien som når jorda avhenger igjen av mange faktorer som jordas rotasjon rundt sola, rotasjon rundt egen akse og helning. Andre mer lokale faktorer som helning i forhold til solinnstrålingsvinkel, skygging, vind og værforhold som skyer er også viktige faktorer som spiller inn på effekten som oppnås fra solcellepanelet. For høyere breddegrader vil det være gunstig med sørvendte solcellepaneler for å få mest mulig effekt fra solcellepanelet.

2.4.1 Solcelleteknologi – Fra solstråler til elektrisitet

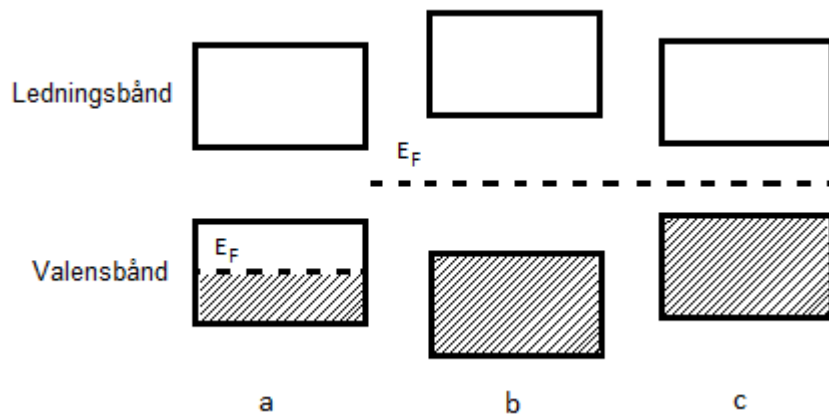
Solceller genererer elektrisitet direkte fra sollys. For å beskrive prosessen fra sollys til elektrisitet er det nødvendig å forklare oppbygning av solceller og prosesser i solcellematerialet. Omtrent 90 % av dagens solceller er laget av halvledermateriale [28]. Den første krystallinske silisiumsolcellen ble laget i 1954 og i dag utgjør disse cellene 70 – 80 % av dagens solceller [28]. Effektiviteten på monokrystallinske silisiumceller er på 15 - 20 % mens polykrystallinske silisiumceller har noe lavere virkningsgrad på 14 -16 % [29]. Galliumarsenid (GaAs) kan brukes til å lage krystallinske halvlederceller og har høyere effektivitet enn andre solceller [30]. Det finnes ulike typer tynnfilmceller som krever mindre material, men som til gjengjeld har lavere virkningsgrad enn krystallinske solceller [29]. Tynnfilmceller kan lages av kadmiumtellurid (CdTe), kadmiumsulfid (Cds), CIGS, eller av amorf silisium som har en ikke-krystallinsk struktur. Andre typer solceller er tandemsolceller med flere lag, fotoelektrokjemiske solceller, tolags organiske solceller og fargestoffsensiterte solceller [31].

Krystallinske solceller har en periodisk atomstruktur, som vil si at atomene ligger i faste mønstre som gjentar seg. Figur 2.3 viser en båndmodell for silisiumatomer. Til venstre ser vi et silisiumatom med fire kovalente bindinger, hvor hver binding deler to elektroner mellom to atomer. Til høyre i figuren har ett elektron fått høy nok energi til å frigjøres fra den kovalente bindingen. Hvis temperaturen er tilstrekkelig høy vil elektroner kunne løsnes fra sine kovalente bindinger og etterlate hull. Disse hullene vil kunne fylles av nabo-elektroner fra nabo-bindingene som da løsnes og danner hull i nabo-bindingene. [30]



Figur 2.3 viser en båndmodell av Si-atomer som er bundet sammen ved kovalente bindinger, hvor hver binding deler to elektroner. Til høyre ser vi at et elektron har brutt seg løs fra en kovalent binding og er blitt et fritt elektron. Et annet elektron fra en nabo-binding løsriveres og fyller hullet som oppsto ved det første elektronets frigjøring. [30]

Elektronet som rives løs kalles et fritt elektron og kan bevege seg fritt i krystallen. Det frie elektronet kan sies å være i ledningsbåndet, mens hullet i den kovalente bindingen kan sies å være et hull i valensbåndet. Isolerte atomer har diskrete energinivåer hvor det er tillatt for elektroner å oppholde seg. Disse energinivåene kan bli kontinuerlige energibånd bestående av flere energinivåer, om flere atomer er nærme hverandre, som i en krystallstruktur. Hvert nivå kan okkuperes av to elektroner med motsatt spinn. Elektronene vil ved lav temperatur oppholde seg i de laveste energinivåene opp til Fermi-nivået E_F som er forskjellig for ulike elektronbåndstrukturer. Elektroner kan bevege seg til energinivåer høyere enn E_F , ved høyere temperaturer. Figur 2.4 viser E_F for (a) metaller, (b) isolatorer og (c) halvledere. Et fullt energibånd kalles valensbånd og det laveste tomme energibåndet kalles ledningsbånd. Avstanden mellom bunnen av ledningsbåndet (E_c) og øverste del av valensbåndet kalles det forbudte båndgapet $E_g = E_c - E_v$. For metaller ligger E_F i valensbåndet, mens for isolatorer og halvledere ligger E_F i det forbudte båndgapet. Som figur 2.4 viser har isolatorer og halvledere fullt valensbånd og tomt ledningsbånd, mens båndgapet til halvledere er mindre enn isolatorer, og på størrelsen mindre enn 1eV og opp til noen få eV [28]. Det vil si at det kreves mindre energi for et elektron å løsrive seg fra valensbåndet og bevege seg til ledningsbåndet for en halvleder enn en isolator. [30]

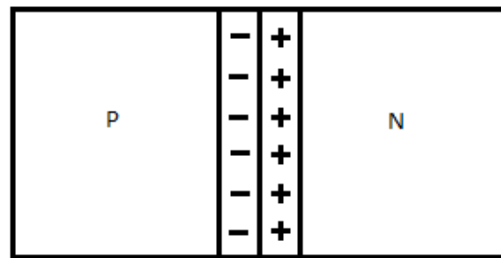


Figur 2.4 viser a) et metall, b) en isolator og c) en halvleder. Den stiplede linjen illustrerer fermivånet E_F . [30]

Energibånd som er helt fulle eller helt tomme vil ikke bidra til elektronstrøm. Innkommende fotoner kan eksitere elektroner fra valensbåndet om de har energi større en båndgapet. Slik dannes elektronhullpar. Elektroner som eksiteres fra et fullt valensbånd til et ledningsbånd vil kunne bidra til elektronstrøm i både valensbånd og ledningsbånd ved hulldannelse i valensbånd og ved elektrontilførsel i ledningsbånd. For mest effektive solceller er det lurt å benytte materialer med båndgap lik midten av solspekteret. De fleste solceller har båndgap som tilsvarer bølgelengden til fotoner i synlig lys og nær infrarødt lys. [28, 30, 31]

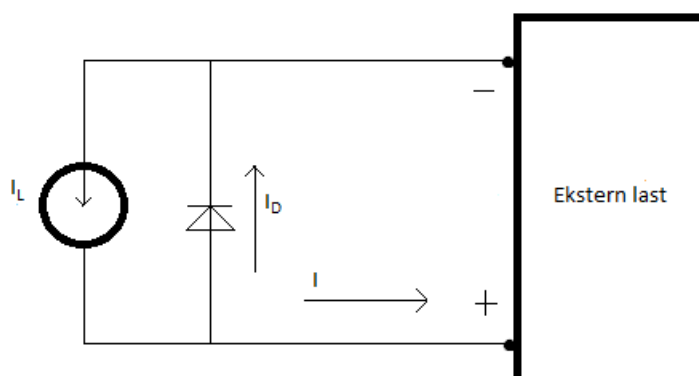
Ledningsevnen til halvledere avhenger av temperatur og urenheter. Halvledere kan dopes med urenheter for å øke ledningsevnen. Slik innføres tillatte energinivåer i det forbudte båndgap. Da erstatter man eller setter inn et ekstra atom fra en annen periodegruppe. For krystallinske silisiumceller benyttes atomer i gruppe III eller gruppe V. P-doping benytter atomer fra gruppe III og kalles akseptorer og da disse har elektronunderskudd og E_F ligger rett over valensbåndet. Eksempler på ulike stoffer benyttet som akseptorer er B, Al, Ga og In. N-doping benytter atomer fra gruppe V og kalles donorer da disse har elektronoverskudd og E_F ligger rett under ledningsbåndet. Eksempler på ulike stoffer benyttet som donorer er N, P, As og Sb. Urenhetene bestemmer konsentrasjonen av elektroner i ledningsbånd og valensbånd.

Ved å sette sammen p-dopet og n-dopet materiale dannes en pn-overgang. N-laget vil ha overskudd av elektroner som diffunderer mot p-siden med elektronunderskudd. Mellom lagene dannes et deplesjonslag uten frie ladningsbærere hvor noen elektroner dras mot den positive p-siden og hullene dras mot den negative n-siden og det settes opp et elektrisk felt. En pn-overgang med deplesjonslag er illustrert i figur 2.5.



Figur 2.5 viser en skisse av en pn-overgang med deplesjonslag mellom n-laget og p-laget.

Fotoner fra innkommende sollys kan frigjøre elektroner i pn-overgangen. Frie elektroner vil som følge av det elektriske feltet i pn-overgangen dras mot n-materialet og videre gå i en ytre krets før de rekombinerer med hull i p-laget. Pn-overgangen som benyttes i en solcelle ligner på en pn-diode [32]. En solcelle kan beskrives som en strømkilde i parallell med en pn-diode. Den totale strømmen I , avhenger av strømmen generert av sollys, I_L , diodestrøm I_D og tap i solcellen [33]. Figur 2.6 illustrerer en ekvivalentkrets for en solcelle.



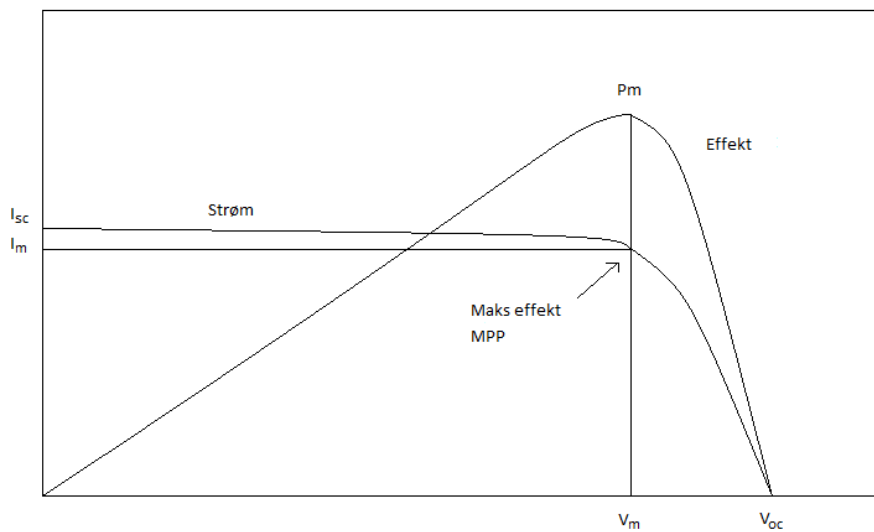
Figur 2.6 viser en ekvivalentkrets for en solcelle. I_L er strømmen generert fra sollys, I_D er diodestrøm og I er den totale strømmen som går til en ekstern last. [34]

Strømmen i den eksterne kretsen blir:

$$I = I_L - I_0 \cdot \left(e^{\frac{qV}{T k_B}} - 1 \right)$$

Her er I total strøm, I_L er strømmen generert fra sollys, I_0 er mørkestrømmen til dioden, q er elementærladningen, V er spenning, T er temperatur og k_B er Boltzmanns konstant.

Solceller har en åpen krets spenning V_{OC} som er omtrent 0,5 – 0,6 V. Derfor kobles solceller i serie for å få større spenning og effekt [34]. I-V kurven i figur 2.7 illustrer effekt fra et solcellepanel. Hvis det ikke er koblet noen last til solcellepanelet mens det absorberer solstråler, så vil det dannes en åpen kretsspenning V_{OC} , men ingen strøm og dermed avgis ingen effekt. Hvis cellen kortslutter så vil det flyte en kortslutningsstrøm men det er ingen spenning og dermed avgis ingen effekt. Maks effekt er gitt i punktet maksimum power point (MPP). [34]

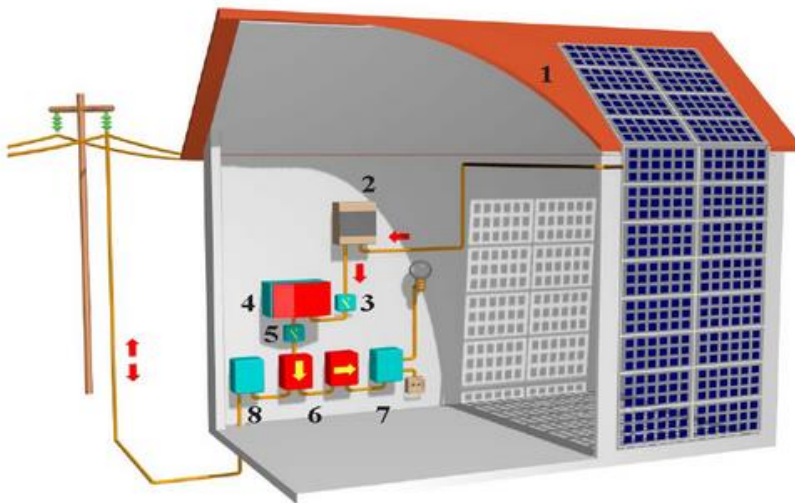


Figur 2.7 viser en IV-kurven for et solcellepanel. [34]

2.4.2 Solcellesystemer

Det finnes mange solcellepaneler i Norge som genererer elektrisitet, men kun noen få er tilknyttet elektrisitetsnett. De fleste er frittstående systemer montert i tilknytning til hytter eller feriehus og bruker DC-strøm til opplading av batterier. Det er i dag rundt 100 000 hytter eller feriehus i Norge som har installert solcellepanel og fritidsbruk utgjør 80 – 90 % av Norges solcellemarked [2].

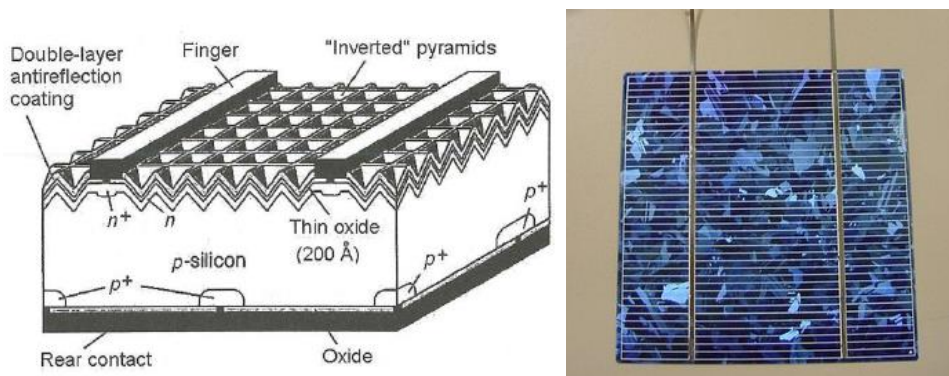
Solcellesystemer består av flere komponenter. I tillegg til solcellepanelet er de viktigste komponentene montasjesystem, kabler og vekselretter hvis solcellene skal levere AC-strøm er nettilknyttet. I figur 2.8 vises et nettilknyttet solcellesystem. Kablene skal overføre DC-strøm fra solcellepanelet og AC-strøm fra vekselretteren. Vekselretteren har som regel innebygd overvåkingssystem for produksjon. Det kan også monteres andre overvåkings- og målesystemer som for eksempel kan måle solinnstråling og levere værmelding. [2]



Figur 2.8 viser et nettilknyttet solcellesystem med vekselretter og ulike brytere og målere. 1) Solcellemoduler, 2) koblingsboks, 3) DC-bryter, 4) vekselretter, 5) AC-bryter (ikke påkrevd), 6) energimålere, 7) fordelingskap med sikringer, 8) tilkoblingspunkt til elektrisitetsnett. [35]

Solceller

Krystallinske silisiumsolceller utgjør hoveddelen av verdens solcellemarked. Solcellene består av silisiumwaferer på tykkelse 100 - 300 μm . I utgangspunktet reflekteres 30 % av innkommende sollys av silisiumwaferer, men dette kan reduseres med antirefleksjonslag. Figur 2.9 til venstre viser en typisk høyeffektivitets silisiumsolcelle. Denne cellen har dobbelt antirefleksjonslag og begge sider er passivisert med et lag med SiO_2 som er en isolator for å redusere overflate rekombinasjon. Kontakter er festet i små hull i SiO_2 -filmen. Hver enkelt solcelle har V_{OC} som er omtrent 0,5 – 0,6 V og kobles i serie for å få en høyere spenning. Koblingen mellom cellene skjer med flat wire som vist i figur 2.9 til høyre. [28]



Figur 2.9 viser til venstre et snitt av en solcelle. Her vises strukturen til solcellen med p- og n-dopet materiale, oksidlag, antirefleksjonslag, wire og bakplate [28]. Til høyre vises et bilde av en vanlig silisiumsolcelle med wire som brukes for sammenkobling med andre celler [36].

Solceller kobles sammen i serie til solcellemoduler. Hvor mange celler og hvordan disse er satt sammen kan variere, men det er i dag vanlig med 60 solceller i serie som danner en 36 V kilde [2]. 20 celler kobles til en streng hvor hver streng leverer 12 V. Solceller er sårbare for ytre påvirkninger og moduler innkapsles i en plastfolie og beskyttes med et glasslag for å unngå slitasje og korrosjon av metalltråder og elektriske kontakter [2, 37]. Videre har modulene en bakplate og ramme.

Vekselrettere

Vekselrettere benyttes for å omforme DC-strøm til AC-strøm, men innehar også andre viktige funksjoner. For at et solcellepanel skal kunne levere elektrisitet på nettet er det viktig at vekselretteren sørger for at spenning og frekvens på AC-strømmen som sendes ut er tilpasset

spenning og frekvens i nettet. For å hindre skader fra nettet på solcellesystemet og for å hindre strømleveranse til nett som er koblet ut vil vekselrettere ha innebygd sikkerhetsfunksjoner med grenseverdier for utkobling. De fleste vekselrettere har måle- og gjerne loggesystemer for elektrisiteten som genereres fra solcellepanelet. [2]

Dagens vekselrettere har høy virkningsgrad med tap på 1 – 3 % [2]. For å ha så høy som mulig virkningsgrad har mange vekselrettere innebygd en tracker kalt MPPT som skal søke optimale driftsforhold ved å justere strøm og spenning. Figur 2.7 illustrerer forhold mellom spenning og strøm for en solcelle. Punktet MPP viser det optimale forhold mellom strøm og spenning for solcellepanelet, slik at det leverer størst mulig effekt.

Det finnes ulike typer vekselrettere etter ulike formål. Mikrovekselretteren er dimensjonert for én modul og er mulig å integrere i solcellemodulen. Strengvekselretteren er dimensjonert for høyere spenning og kan benyttes hvis flere moduler er koblet sammen. De leverer ofte kraft kun på én fase. For solparker og stor takanlegg er det nødvendig med større vekselrettere som sentralvekselrettere. Både strengvekselrettere og sentralvekselrettere har flere moduler koblet sammen i strenger. [2]

2.5 Beskrivelse av det lokale bygningsnett og det tilknyttede solcellesystemet

2.5.1 Solcellesystemet ved energilaboratoriet, Fløy IV

Solcellesystemet benyttet for analyse i denne oppgaven er montert ved energilaboratoriet ved Institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT) ved UMB. Systemet består av solcellepaneler fra REC som er montert på taket av bygget kalt Fløy IV og vekselretter fra Eltek Valere som er montert inne i energilaboratoriet i bygget Fløy IV. Elektrisitet generert fra solcellepanelet omformes av vekselretteren og sendes så direkte ut på nettet i bygget. UMB er ikke plusskunde og solcellepanelet er ikke koblet opp mot distribusjonsnettets slik at solcellepanelet kan levere elektrisitet direkte til distribusjonsnettets.

2.5.2 Solcellepaneler

På taket av Energilaboratoriet ved UMB er det montert 9 solcellemoduler fra REC. Hver solcellemodul består av 60 multikrystallinske solceller. Modulene er koblet sammen 3 og 3 på en regulerbar treramme. Figur 2.10 illustrerer hvordan solcellene er montert sammen. Til venstre ser man baksiden av solcellemodulene og montasjesystemet. Til høyre ser man fremsiden til tre av solcellemodulene. Trerammen er justert slik at solcellemodulene nå har 36° vinkel hele året.



Figur 2.10 viser forside og bakside av solcellepanelene som er montert på justerbare trerammer. Til venstre vises baksiden av panelene og monteringsløsning hvor 3 og 3 moduler er koblet sammen og montert på én treramme. Til høyre vises fremsiden av tre solcellemoduler som er koblet sammen og montert på samme treramme. Foto: Anette Ellingsen.

Modulene på taket til Fløy IV er fra REC Energy Series. Noen av de 9 solcellemodulene er av ulike modeller, men er svært like. Hver modul har et areal på 1,65 m², veier 18 kg og dimensjonene er 166,5 cm * 99,1 cm * 3,8 cm. Modulene er dekket av glass med antirefleksjonsoverflate og har en bakplate som består av et dobbelt lag med høy-resistent polyester. Modulene består av tre strenger, hver med 20 celler, og tre dioder. Maks effekt fra hver av modulene ligger mellom 220 W og 240 W. [38]

2.5.3 Vekselretter

Vekselretteren montert inne i energilaboratoriet er en strengvekselretter fra Eltek Valere av modellen Theia 4,4 HE-t. Modellen har høy effektivitet og MPP-tracking for optimalisert effekt. Vekselretteren skal kunne tåle temperaturendringer, høy fuktighet og støv. En integrert web-server sørger for oversikt over driftsforhold. Vekselretteren måler og logger DC-strøm inn fra solcellepanelet, AC-strøm ut fra solcellepanelet, spenning inn til vekselretteren og spenning ut fra vekselretteren. I tillegg beregner den innkommende og utgående effekt. Minuttverdier for innkommende og utgående strøm for måleperioden benyttes i analysearbeidet senere i oppgaven. [39]

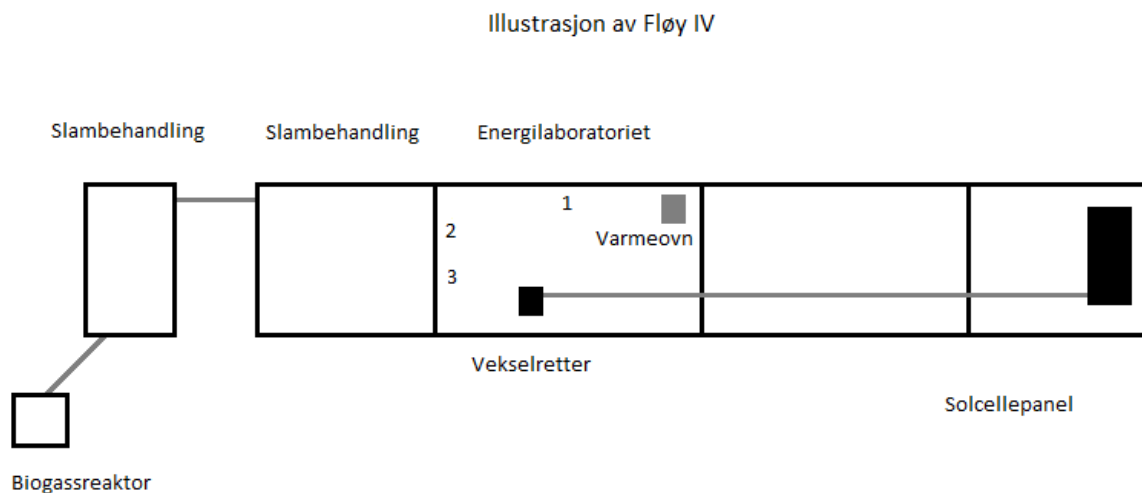
2.5.4 Beskrivelse av det elektriske nettet og potensielle kilder til spenningsforstyrrelser i bygget Fløy IV hvor solcellesystemet er installert

Fløy IV ved UMB er en ombygd garasje som nå huser flere avdelinger for laboratoriearbeid. Figur 2.11 viser til venstre den delen av bygget som det drives laboratoriearbeid i og til høyre sees solcellepanelet på taket som er montert rett mot syd. Solcellesystemet består av solcellepanel på taket av bygget og vekselretter er montert inne i bygget. Solcellepanel og vekselretter er tegnet inn i skisse over bygget i figur 2.12.



Figur 2.11 viser til venstre fremsiden av Fløy IV, og til venstre vises solcellepanelene som er montert på taket .
Foto: Anette Ellingsen.

Hovedinntaket for strøm er i samme ende som solcellepanelet er montert. Nettet på energilaboratoriet er via hovedinntaket tilkoblet en nyere transformator som står i nabobygget. Bygningsnettets i Fløy IV er ikke dimensjonert for den lasten som maskiner og andre elektroniske komponenter i bygget nå trekker. Fra hovedinntaket går det en kabel til energilaboratoriet. Denne kabelen går til tre sikringskap som videre fordeler strømmen i underfordelinger, som er enfase eller trefase. Sikringskapene er tegnet inn med tallene 1, 2, 3 i figur 2.12.



Figur 2.12 er en skisse av Fløy IV hvor solcellesystemet er installert. Solcellepanelet er montert på taket. Vekselretteren er montert inne i energilaboratoriet i Fløy IV.

Sikringskaps 1 har uttak som går til en frekvensomformer som går kontinuerlig for drift av ventilasjonsanlegg. Fra samme sikringskaps er det uttak til en varmeovn som benyttes til forsøk. Varmeovnen er satt sammen av to varmeelementer av modellen SMU 150, som gir en maks effekt mellom 7kW – 10kW [40]. Ovnens kjøres i perioder og med variabel effekt. Ved høy effekt vil den utgjøre en stor last i forhold til annen last på bygget. Hver oppstart og stop av ovnen, samt endring i temperatur er notert og benyttes i analysedelen av oppgaven. Det antas at ovnen har nullgjennomgangsbrytere for smidigere oppstart og justering av effekt. Ovnens er tilkoblet nettet i bygget via en transformator og dette vil kunne begrense spredning av potensielle forstyrrelser ovnen kan gi opphav til. Sikringskaps 2 forsyner vifter og en frekvensomformer. Viftene og frekvensomformeren er i drift ved demonstrasjonsforsøk på energilaboratoriet. Sikringskaps 3 forsyner to pumper og kompressoren til en varmepumpe i en kjøletank. Kjøletanken startes manuelt to ganger daglig ca. kl 07:00 og nærmer kl 18:00. Etter hver oppstart går kjøletanken noen timer inntil vannet er kjølt ned til ønsket temperatur. Pumpene er tilkoblet solfangertanker i labben og solfangere på taket. Pumpene er små og vil sannsynligvis ikke påvirke bygningsnettet i TF Fløy IV.

Slambehandlingsanlegget vegg-i-vegg med energilabben får strøm fra hovedinntaket på bygget via energilaboratoriet. Strømmen brukes til å drifte flere pumper og frekvensomformere som går døgntkontinuerlig. Pumpene er i størrelsesorden 0,5kW til 3,0kW. Utenfor labben er det enda en forgreining med uttak som går til et slambehandlingssystem og en biogassreaktor. Dette systemet består av slamtanker med pumper, frekvensomformere, varmtvannsbeholder og en biogassreaktor. Pumpene har makseffekter på 0,5kW til 7,5 kW. Varmtvannsbeholderen trekker ikke så mye effekt om våren, men mye om vinteren for å varme opp slammet til ønsket temperatur. Biogassreaktoren går kontinuerlig døgnet rundt og skal ikke trekke mer strøm om dagen enn om natten. Unntaket kan være perioder der innmating har måttet foregå manuelt i en periode på 0,5 til 1. time per dag.

2.5.5 Jordfeil

Det antas å være en permanent jordfeil i eller utenfor Fløy IV. Jordfeil oppstår hvis strømførende ledninger kommer i kontakt med jordede anleggsdeler eller direkte mot jordleder og skyldes ofte feil på kabler eller utstyr [41]. Ved jordfeil vil lekkasjestrømmer mot jord kunne oppstå. Disse jordstrømmene kan være så små at jordfeilbrytere ikke slår ut. Ved feil på kun én av fasene vil anlegget fremdeles kunne være i drift men da med potensielt høye spenninger mellom den andre

fasen og jord [42]. I IT-nett er transformatorens nullpunkt isolert fra jord og nullpunkt som ikke er jordet kan gi flytende spenning.

3 Metode og måleutstyr

3.1 Måleutstyr

For denne spenningsanalysen ble det målt og logget spenningskvalitetsparametere på nettet i Energilaboratoriet ved Fløy IV, hvor solcellesystemet er installert. Det ble benyttet to nettanalysatorer av modellene C.A.8335 Qualistar+ og Medcal N. Vekselretteren i solcellesystemet er av modellen Theia He-t og leverer enfase strøm og logger innkommende og utgående energi, effekt, strøm og spenning.

3.1.1 Nettanalysator C.A.8335 Qualistar+

For måling og logging av spenningskvalitetsparametere fra uttaket av vekselretteren ble det benyttet en nettanalysator fra Chauvin Arnoux Group av modellen C.A.8335 Qualistar+, videre referert til som Qualistar+. Nettanalysatoren er en trefase-analysator og kan benyttes ved 50Hz og 60Hz nett og som kan logge elektriske verdier, effekter og forstyrrelser i elektrisitetsnettet, listet opp i vedlegg A. Figur 3.1 viser til venstre Qualistar+ som har 5 spenningsinnganger og fire strøminnganger hvor tilkobling avhenger hvorvidt man måler på et 3-fasesystem eller et 1-fasesystem. Strømtang av modellen MN93 ble benyttet som strømsensor og er vist til høyre i figur 3.1. Data overføres fra nettanalysator til PC ved USB-overføringskabel hvor de leses av og behandles i dataprogrammene Excel og Dataview. [43, 44]



Figur 3.1 viser til venstre nettanalysatoren C.A.8335 Qualistar+ og til høyre en figur av en strømtang av modellen MN93 som ble benyttet ved målingene. [44]

3.1.2 Nettanalysator Medcal N

Nettanalysatoren Medcal N er en enfase-måler som kan logge elektriske verdier og forstyrrelser i enfase-nett. Apparatet er vist i figur 3.2 og kan kobles direkte i stikkontakt og starter da automatisk med loggingen. Medcal N måler effektivverdien for spenning og frekvens hvert femte millisekund og lagrer største-, minste- og gjennomsnittsverdi av målingene innenfor et gitt intervall. For våre målinger er intervallet på 1 minutt. Overharmoniske spenninger og P_{st} -verdier måles kontinuerlig og lagres hvert 10. minutt. P_{it} beregnes som et gjennomsnitt av de 12 siste P_{st} -verdiene. Transienter logges når høyfrekvente forstyrrelser i spenningen inntreffer ved at det er avvik fra 50 Hz-sinuskurven, og ved at en fastsatt grenseverdi for spenningen overskrides. Kortvarige over- og underspenninger logges hvis spenningsverdien går utover grenseverdiene fastsatt i FoL. Spenningsprang over 3 % og 5 % av spenningens effektivverdi logges. Medcal N vil logge spenning over fase1-fase2, fase1-jord og fase2-jord. Verdiene overføres fra måleren til PC ved USB-overføringskabel. For videre databehandling benyttes programmet Medcal Scope. [45]



Figur 3.2 viser nettanalysatoren Medcal N som ble benyttet ved måling og logging av spenningskvalitetsparametere ved Energilaboratoriet ved UMB. [45]

3.1.3 Vekselretter THEIA He-T

Vekselretteren for PV-panelene logger minuttverdier for innkommende og utgående effekter, strøm og spenning. Innkommende data vil være fra DC-siden av vekselretteren, mens utgående data vil være fra AC-siden av vekselretteren. I videre analyse benyttes kun data for innkommende og

utgående strøm og spenninger. Verdiene kan hentes direkte fra vekselretteren med USB-port. Vekselretteren er beskrevet nærmere i kapittel 2.5.3.

3.2 Oppkobling av måleutstyr og datainnsamling

Nettverksanalysator Qualistar+ ble tilkoblet nettet på Energilaboratoriet i Fløy IV 23.1.2013. Instrumentet ble koblet opp med to tangamperemetre på strømmuttaket fra vekselretteren og målte spenning mellom fase1 og fase2, fase1-jord og fase2-jord. Ustabile spenningsverdier medførte omkobling av apparatet 13.2.2013 for å se om tilkoblingen kunne være årsaken til sprikende spenningsverdier. Etter omkoblingen 13.2.2013 måles verdier kun for én fase og spenningen måles mellom fase1- jord. Figur 3.3 viser oppkobling av måleutstyr i sikringsskap og direkte på strømmuttaket fra vekselretteren.



Figur 3.3 viser oppkobling av Qualistar+. Til høyre sees tilkobling ved uttaket fra vekselretteren og til venstre sees tilkobling i sikringsskapet. Foto: Anette Ellingsen.

Det ble logget store datamengder for de ulike parameterne som er beskrevet i vedlegg A. Store datamengder gjorde det vanskelig å overføre større måleserier med små intervaller til Excel og DataView. Ulike måleserier har dermed ulike intervaller avhengig av lengden på måleseriene. Så langt mulig ble data avlest daglig og det ble flere dager gjort mindre målinger midt på dagen mellom kl. 11:00 og kl. 13:00. Slik ble det logget dataserier med sekundintervaller for perioder med klarvær og

perioder med skyer. Årsaken til dette var å kunne sammenligne data for spenningsfenomener ved ulik innstråling.

Det inntraff mindre avbrudd mellom målingene, for eksempel når en måleserie ble avsluttet og en ny ble startet. I tillegg inntraff større avbrudd 2.4.2013 og mellom 5.4.2013 og 8.4.2013 grunnet problemer med batteriet i nettanalysatoren. Qualistar+ har kapasitet til å logge og lagre data for 210 transienter. Det inntraff enkelte perioder hvor transientminnet ble fullt og det dermed ikke ble logget transienter utover de 210. Dette inntraff 19.3.2013 og ettermiddagene 2.4.2013 og 3.4.2013 i tillegg til tidspunktene for avbrudd.

Samme dag som omkobling av Qualistar+ ble Medcal N plassert i en stikkontakt på veggen rett ved vekselretteren som vist til venstre i figur 3.4. Medcal N ble tilkoblet for å kunne sammenligne data fra de to nettanalysatorene, da Qualistar+ viste seg å gi varierende spenning for fase1-fase2, fase1-jord og fase2-jord. Det ble gjennomført to måleserier i hele tidsperioden. Eneste avbrudd i logging med Medcal N i måleperioden var et mindre avbrudd på noen få minutter som inntraff mellom de to måleseriene.



Figur 3.4 viser vekselretter, og begge nettanalysatorer oppkoblet på nettet. I venstre bilde sees Medcal N helt til venstre. I høyre bilde ser man Qualistar+ og oppkobling av strømtang på uttaket fra vekselretteren. Foto: Anette Ellingsen.

På grunn av avbrudd og omkoblinger analyseres data for begge nettanalysatorene og vekselretteren kun i tidsperioden fra 20.2.13 til 16.4.13. De to nettanalysatorene logger verdier for fenomener gitt i oversikten nedenfor. Medcal N logger verdier med et intervall på ett minutt, mens Qualistar+ logger verdier med et intervall på ett sekund. Verdiene for Medcalmålingene kan leses av for hvert minutt i Medcal Scope. Måleverdiene for Qualistar+ leses av i Excel og Dataview og har ulike intervaller, avhengig av størrelsen på måleserien.

Det måles og logges flere parametere for begge nettanalysatorene. Arbeidet i denne oppgaven begrenses til kun å analysere og sammenligne parametere listet opp i oversikten som følger:

C.A.8335 Qualistar+:

- Spenning: fase-jord
- Frekvens
- Transienter
- Harmoniske spenninger
- Flimmer
 - P_{st}
 - P_{lt}

Medcal N:

- Spenning: fase1-fase2, fase1- jord, fase2-jord
- Frekvens
- Transienter
- Harmoniske spenninger
- Flimmer
 - P_{st}
 - P_{lt}
- Kortvarige underspenninger
- Kortvarige overspenninger
- Spenningsprang

3.3 Analyse og databehandling

Analysen i denne oppgaven har vært to-delt. Første del var å analysere de data som nettverksanalyatorene hadde målt og logget og på bakgrunn av dette kunne si noe om spenningskvaliteten og hvorvidt de målte verdiene tilfredsstillt kravene til spenningskvalitet satt i FoL. Andre del var å sammenligne data for spenningsfenomener med innkommende og utgående strøm fra vekselretteren og informasjon om drift som muligens kan påvirke spenningskvaliteten i bygget. Formålet var å kunne si noe om årsakene til at fenomener og avvik oppstår, og eventuelt overskrider grenseverdier satt i FoL.

3.3.1 Analyse av spenningskvalitet mot grenseverdier i FoL

Analysen av data fra Medcal N og Qualistar+ omfatter vurdering av data i forhold til krav satt i FoL for å kunne gi en beskrivelse av spenningskvaliteten i nettet. Dette gir grunnlag for diskusjon om hvorvidt spenningskvaliteten er tilfredsstillende.

3.3.2 Sammenligning av spenningskvalitet, solcellepanel og drift av elektrisk utstyr

Ved analyse av data blir det også sett på ved hvilke tidspunkt avvik og fenomener inntreffer. Videre sammenlignes data fra nettanalyatorene med data fra vekselretteren og informasjon om drift på bygget. Dette gir grunnlag for diskusjon om hva årsaken til fenomener og avvik som påvirker spenningskvaliteten kan være.

Nettanalyatoren Qualistar + måler og logger data fra uttaket av vekselretteren og Medcal N måler spenningen i en stikkontakt rett ved vekselretteren. De elektriske parametre som er logget vil være påvirket av drift av elektrisk utstyr og hendelser på byggets nett. I kapittel 2.5.4 beskrives ulike elektriske komponenter som er tilknyttet nettet i Fløy IV og hvilke perioder i løpet av døgnet og uken disse er i drift. Tidspunkt for oppstarts og temperaturjustering av ovnen i Energilaboratoriet er notert og er i analysen sammenlignet med tidspunkt for fenomener og avvik som påvirker

spenningskvaliteten. Ved sammentreff av tidspunkt kan det antas at ovnen muligens er årsak i eller forsterker de fenomenene som observeres i samme tidsrom.

4 Resultater

4.1 Spenningsanalyse

Analysene er gjort på bakgrunn av data målt og logget i perioden 20.2.2013 til 16.4.2013. Det er ett mindre avbrudd i målingene fra Medcal N, men noen større avbrudd for målinger fra Qualistar+. Resultatene som følger viser hvilke verdier som ble målt for de ulike parameterne og hvorvidt verdiene overholdt krav satt i FoL. Vurdering av årsakene til fenomener og avvik drøftes i diskusjonsdelen.

4.1.1 Frekvens

Frekvensverdiene målt ved begge nettverksanalyatorene er notert i tabell 4 og er innenfor FoL sitt krav for frekvensverdier som er mellom 49 Hz og 51 Hz, som beskrevet i kapittel 2.3.1. Vedlegg B viser tidsutvikling for alle frekvensverdier målt av Medcal N i tidsperiodene 20.02.13 – 8.3.2013 og 8.3.2013 – 16.4.2013. Vedlegg C viser alle målte frekvensverdier for Qualistar+, men gir ikke en korrekt tidsutvikling grunnet ulike måleintervaller. Da frekvensverdiene er innenfor kravene satt i FoL så er det ikke gjort noen videre analyse av frekvensverdier.

Tabell 5 viser maksimums og minimumsverdier for frekvensen målt for begge nettanalysatorene ved nettet i Energilaboratoriet måleperioden 20.2.2013 – 16.4.2013.

Nettanalysator:	Frekvensens minimumsverdi [Hz]	Frekvensens maksimumsverdi [Hz]
Qualistar+	49,84	50,21
Medcal N	49,854	50,163

4.1.2 Spenning

Qualistar+ måler spenning mellom fase-jord. Minimumsverdi og maksimumsverdi er vist i tabell 6. Det er stor variasjon i spenningsverdier målt ved Qualistar+. Store variasjoner i spenningsverdier mellom fase-jord kan indikere at det er en jordfeil i eller utenfor nettet. Ved avlesning av resultater observeres det i skjermbildet for Qualistar+ at spenningene varierer ofte og mye.

Tabell 6 viser maksimums og minimumsverdier for spenning fra nettanalysatoren Qualistar+ målt på Energilaboratoriet i tidsrommet 20.2.2013 til 16.4.2013

	Minimumsverdi [V]	Maksverdi [V]
Spenning fase-jord Qualistar +:	93,90	199,50

Medcal N måler spenning mellom fase1-fase2, fase1-jord og fase2-jord. Vedlegg D viser spenningsmålinger for periodene 20.2.2013 – 8.3.2013 og 8.3.2013 – 16.4.2013. Vedlegg D, samt tabell 7 viser at fase-fase spenningen for Medcal N gir verdier innefor FoL sine grenseverdier for spenning på mellom 207 V og 253 V. Spenningen mellom fase-jord derimot viser store variasjoner i spenningsverdien som også er vist med Qualistar+. Vi ser i vedlegg D at gjennomsnittsverdien svinger mellom ca. 130 V og 170 V.

Tabell 7 viser maksimums og minimumsverdier for spenning fra nettanalysatoren Medcal N målt på Energilaboratoriet i tidsrommet 20.2.2013 til 16.4.2013

Spennings effektivverdi	Minimumsverdi [V]:	Maksverdi [V]:
Spenning fase-fase Medcal N:	222,50	237,25

Det kan konkluderes med at spenningen fase-fase målt ved Medcal N er ganske stabil spenning innenfor FoL sine grenser. Spenningen fase-jord målt ved begge nettanalysatorene gir store variasjoner i spenningsverdien.

4.1.3 Spenningsprang

Det er kun Medcal N av de to nettanalysatorene som måler spenningsprang. I måleperioden er det målt 4 spenningsprang, listet opp nedenfor. Disse spenningsprangene er mellom 5 % og 10 % av nominell spenning.

Tidspunkt for spenningsprang:

- 1.3.13 kl. 15:12:10
- 13.3.13 kl. 10:18:51
- 14.3.13 kl. 9:11:02
- 20.3.13 kl. 22:37:15

4.1.4 Kortvarige over- og underspenninger

Det er kun Medcal N som måler og logger kortvarige over- og underspenninger. I måleperioden ble det kun målt én kortvarig underspenning og ikke noen kortvarige overspenninger. Den kortvarige underspenningen ble registrert 11.4.2013 kl. 9:22:51.

4.1.5 Flimmer

Flimmerverdierne for målinger fra Qualistar+ viser at verdier for korttidsflimmer (P_{st}) og langtidsflimmer (P_{lt}) er utenfor grenseverdiene i FoL som beskrevet i kapittel 2.3.6. P_{st} skal være innenfor 1,2 [pu] 95 % av uken. Ved å analysere alle måleseriene i måleperioden viser det seg at grenseverdien for P_{st} overstiges ofte, og er over 1,2 % i perioder mellom 20 % og 60 % av uken. Det er ikke gjort en grundigere analyse med eksakte ukeverdier. P_{lt} skal ikke overstige grenseverdien på 1,0 [pu] 100 % av tiden, men også her registreres overskridelse av grenseverdien i flere perioder.

Målinger fra Medcal N viser ingen overskridelser av grenseverdi for flimmer. Vedlegg E viser flimmerverdier målt ved Medcal N. Den største målte P_{lt} -verdien var 0,666, som ikke er overskridelse av grenseverdien på 1,0 [pu]. Den største P_{st} -verdien var 1 som også innenfor grenseverdien på 1,2 [pu].

4.1.6 Harmoniske spenninger

Definisjon og krav til harmoniske spenninger er beskrevet i kapittel 2.3.8. Total harmonisk forvrengning (THD) skal ikke overstige 8 % målt som gjennomsnitt i en periode på ti minutter og 5 % målt som gjennomsnitt i en periode på én uke. Hverken Qualistar+ eller Medcal N måler THD over disse grenseverdiene. Den høyeste THD-verdien målt for Qualistar+ var på 2,8 %. Medcal N målte maksverdi for snittet for én uke til å være 1,326 % og maksverdi for snittet for en ti minutters periode til å være 1,758 %. Tabell 5 viser hvilke harmoniske ordner som er registrert hos de to nettanalysatorene. Medcal N kan måle opp til 50. orden harmoniske, mens Qualistar+ kan måle opp til 33. ordens harmoniske. Det ble ikke gjort noen målinger som viser overskridelse av grenseverdier

for de enkelte harmoniske. Grenseverdiene er vist i tabell 4 i kapittel 2.3.8. Medcal N viser at det er harmoniske spenninger av orden 3, 5, 7 og 11 som forekommer mest i løpet av måleperioden.

Tabell 8 viser hvilke harmoniske spenninger som ble målt hos de to nettanalysatorene i måleperioden.

Harmoniske orden	Forekomst hos Medcal N	Forekomst hos Qualistar+
2	ja	nei
3	ja	ja
5	ja	ja
7	ja	ja
9	ja	Ja
11	ja	Ja
13	ja	Ja
15	ja	Ja
17	ja	Ja
19	ja	Ja
23	ja	Ja
25	nei	ja

4.1.7 Transienter

Definisjonen av transienter er beskrevet i kapittel 2.3.9. Medcal N har logget færre transienter i løpet av måleperioden enn Qualistar+ i samme tidsintervall. Transienter som kun er brå spenningsendringer eller amplitudeendringer er ikke analysert videre og eksempler på slike transienter kan sees i vedlegg F. I analysen er det kun fokusert på transienter som viser forvrenging av kurveform og lengre varighet enn impulsive transienter, da disse er mer energirike. Eksempler på denne type transienter registrert fra Qualistar+ og Medcal N kan sees i vedlegg G.

Den 2.4.2013 målte Qualistar+ hyppig forekomst av transienter med forvrenging av kurveform i perioden 14:33:00 – 14:53:29. Disse transiente var voldsomme endringer av kurveformen, og noen av disse er vist i vedlegg H. Tidspunktet på figuren er én time forskjøvet fordi klokken i nettanalysatoren enda ikke var stilt til sommertid på dette tidspunktet. Korrekt tidsintervall for transientene er 14:33:00 – 14:53:29. Tidspunkt for transienter med forvrengning av kurveform er listet opp i vedlegg I.

5 Diskusjon

Analyse av spenningskvalitetsparametere som ble målt ved energilaboratoriet i tidsrommet 20.2.2013 til 16.4.2013 viser at det ble målt og logget forstyrrelser i form av flimmer, transienter, harmoniske spenninger, spenningsprang og kortvarige underspenninger med Medcal N. Videre ble det logget forstyrrelser som flimmer, transienter og harmoniske spenninger med Qualistar+. Sammenligning av grenseverdier fastsatt i FoL mot de målte verdiene fra de to nettanalysatorene viser at alle parametere som ble målt av Medcal + overholdt kravene satt i FoL. Målinger fra Qualistar+ viser at noen av de samme parameterne har overskredet grenseverdiene i FoL.

Ved analyse av spenningsverdier vises det at fase-fase spenning målt ved Medcal N gir spenningsverdier innenfor krav i FoL. Fase-jord verdier for spenningen viser store og hyppige variasjoner ved begge analysatorene, hvor spenningen ofte stiger brått. Dette kan være indikasjoner på at det er en jordfeil som fører til flytende spenning for fase-jord. Ved å studere vedlegg B vises det at Medcal N logger stor variasjon mellom maksimums og minimumsverdier for spenning målt mellom jord og fasene. De største endringene i spenningsverdien observeres i ukedager og i normal arbeidstid når det er drift på bygget. Det sees ingen klar sammenheng mellom driften av ovnen eller strøm fra solcellepanelet og store endringer i spenningsverdier mellom fase-jord. Dette indikerer at det er generell drift av elektrisk utstyr på bygget som initierer store endringer i spenningsverdien.

Medcal N registrerer 4 hendelser som spenningsprang og en hendelse som kortvarig overspenning. Det sees ikke noen klare sammenhenger ved sammenligning av innkommende og utgående strøm fra vekselretteren og data for drift av ovnen på energilaboratoriet med tidspunkt for noen av disse hendelsene.

Flimmerverdier målt av Qualistar+ overskrider kravene stilt i FoL. Det antas at flimmer forårsakes av endringer i spenningens effektivverdi [26]. Ved nærmere studie av tidspunkt for flimmerverdier målt ved Qualistar+ observeres det ingen tydelig sammenheng mellom forekomst eller størrelse på flimmer i forhold til tid på døgnet eller hvorvidt det er helg eller ukedag. Flimmerverdier målt ved Medcal N overstiger aldri grenseverdier fastsatt i FoL, men det registres forekomster av både P_{st} og P_{it} . Fra vedlegg C ser vi at flimmer ofte forekommer i perioder midt på dagen, men det vises også

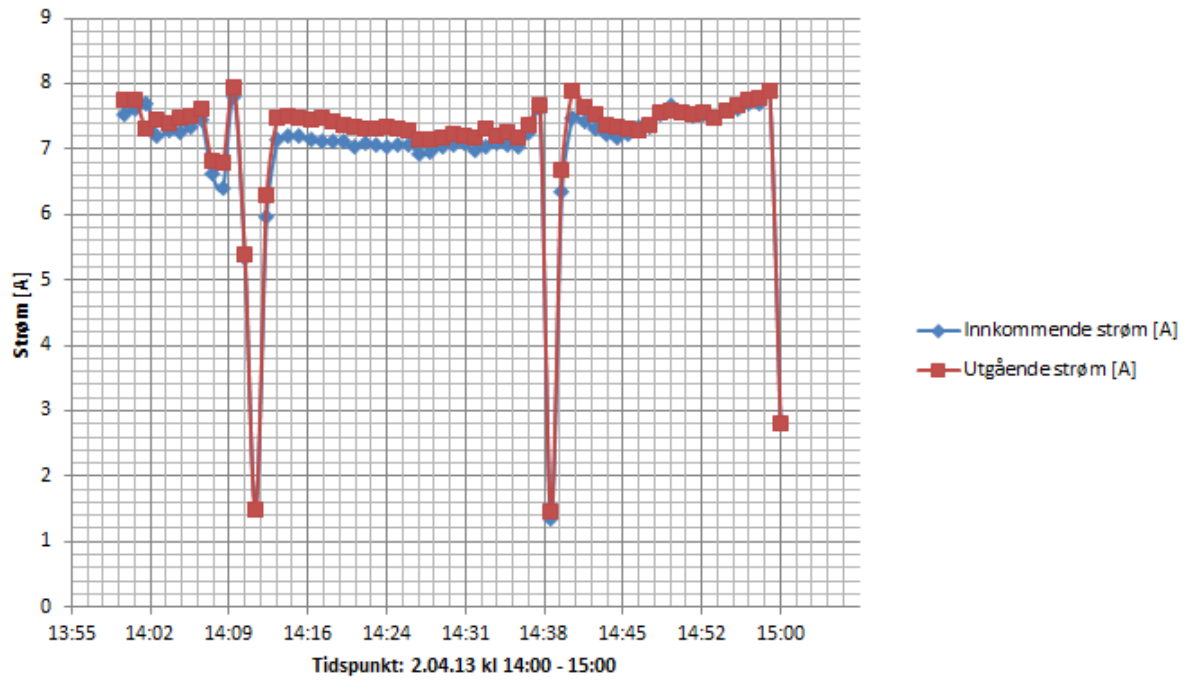
noen forekomster nattetid. Det sees ingen klare sammenhenger mellom strøm fra solcellepanelet eller drift av ovn og flimmerforekomst.

Forekomsten av harmoniske spenninger overskrider ikke grenseverdier fastsatt i FoL. Ved sammenligning med forekomst av harmoniske spenninger fra solcellesystemet beskrevet i kapittel 2.3.8 ser vi at THD målt ved solcellesystemet i denne oppgaven er lavere. Begge systemene registrerer høyere forekomst av 3., 5. og 7. ordens harmoniske, mens panelet ved UMB registrerer høyere forekomst av 11. ordens harmoniske enn 9. ordens harmoniske. Kraffelektroniske komponenter som vekselrettere antas å være kilde til harmoniske spenninger. Det var derfor interessant å sammenligne strømkurver og brå endring i produksjon mot tidsutvikling av harmoniske spenninger i nettet. Det sees ingen tydelig sammenheng mellom tidsutvikling for harmoniske spenninger og strøm fra vekselretteren. Ved sammenligning av tidspunkt for drift av ovnen i energilaboratoriet sees heller ingen tydelig sammenheng.

Gjennom et døgn oppstår de fleste transienter mellom kl. 06:00 og 18:00, og hovedsakelig på formiddagen. Det registreres enkelte transienter nattetid. Data for strøm til og fra vekselretteren i denne perioden og data for drift av ovnen på energilaboratoriet gir ikke noen klar sammenheng mellom forekomst av transienter.

Den 2.4.2013 ble det logget mange transienter i form av forvrengning av kurveform. Denne dagen var ovnen ikke i drift og skal dermed ikke kunne virke inn på spenningskvaliteten. Figur 5.1 viser innkommende DC-strøm fra solcellepanelet og AC-strøm ut fra vekselretteren i perioden kl. 14:25 – 14:50. Strømverdien faller mot 1A ved noen tidspunkt mellom kl. 14:00 og kl. 15:00, men kun ett av disse tidspunktene samsvarer med tidspunkt for transienter i samme tidsrom. Ved sammenligning av kurver over innkommende og utgående strøm med transienter som forvrenger kurveformen sees ingen klar sammenheng. Ved noen få tidspunkt er det sammenfall mellom stor endring i strømforhold og transienter. Hvorvidt dette er tilfeldig sammenfall eller ikke er uvisst. Det kan dermed ikke konkluderes med noen tydelig sammenheng mellom solinnstråling og forekomst av transienter. Det observeres dager med variable strømforhold og brå endringer i strøm, uten at det registreres transienter.

Innkommende og utgående strøm målt fra vekselretteren Theia HE-t



Figur 5.1 viser innkommende (DC) og utgående(AC) strøm fra vekselretteren installert i Energilaboratoriet i tidsperioden 2.4.2013 kl. 14:00 – 15:00.

6 Konklusjon

Analyse av data fra nettanalysatorene viser at det oppstår noen forstyrrelser av spenningskvaliteten i nettet på energilaboratoriet i tidsperioden 20.2.2013 til 16.4.2013. Målinger av parametere fra Qualistar + gir verdier som er innenfor krav fastsatt i FoL, bortsett fra for flimrer. Årsaken til dette er uvisst. En mulig forklaring kan være en jordfeil som fører til fluktuerende spenning. Målinger av parametere fra Medcal N gir verdier som er godt innenfor krav for antall forekomster av fenomener og grenseverdier satt i FoL. Det sees ingen tydelige sammenhenger mellom drift av ovnen på energilaboratoriet eller strøm fra solcellepanelet og forekomst av spenningsfenomener. Noen spenningsfenomener inntreffer på nattetid og i helger, men de fleste er observert i normal arbeidstid. Det antas dermed at det er generell drift av elektrisk utstyr i bygget Fløy IV som i hovedsak påvirker spenningskvaliteten. Hvorvidt den antatte jordfeilen spiller inn på målingene er uvisst. Da denne analysens resultater ikke viser tydelig sammenheng mellom strøm målt fra solcellepanelet og observerte fenomener som påvirker spenningskvaliteten konkluderes det med at spenningskvaliteten i bygningsnettet i Fløy IV ikke påvirkes av det tilkoblede solcellesystemet.

Som diskutert i kapittel 2.2 vil enkelte mindre DG-enheter kunne ha lokale virkninger på nettet, men flere og større DG-enheter vil også kunne påvirke andre nettnivåer. I dag er nettilknyttede solcellepaneler i Norge ingen stor utfordring for spenningskvaliteten i distribusjonsnettet eller nett med høyre spenning. Hvis det skulle komme mange nye nettilknyttede DG-enheter og mange nettilknyttede solcellepaneler vil påvirkningen på nettet lokalt og i høyere nettnivåer kunne øke og muligens vil utfordringene kunne være hyppigere forekomster av tidligere sjeldnere spenningsfenomener som diskutert i kapittel 2.3.8.

Hvorvidt solcellemarkedet i Norge vil øke og det blir flere nettilknyttede solcellepaneler er enda uvisst. En mulig forklaring på hvorfor Norge per i dag ikke har flere nettilknyttede DG-enheter er mangel på økonomiske incentivordninger som i Tyskland hvor fornybar energi favoriseres. Nedgang i pris på solcellepaneler og plusskundeordningen er intenciver som kan føre til en økning av solcellepaneler i distribusjonsnettet. NVE jobber med endringer i dagens plusskundeordning. Hvis endringene fører til en permanent ordning som også gjelder kunder med større generering av elektrisitet enn eget forbruk kan det tenkes at flere sluttbrukere fristes til å investere i nettilknyttede

solcellepaneler og andre DG-løsninger. Det er viktig at potensielle utfordringer ved nettilknytning er kartlagt før en eventuell større integrering av DG-enheter finner sted.

7 Videre arbeid

Denne oppgaven har målt og analysert spenningsfenomener og avvik i et tidsrom og sammenlignet tidspunkt for fenomener med data fra vekselretter og drift av elektrisk utstyr på Fløy IV. Det kunne vært interessant å fortsette målingene med nettanalysatorene, og koblet fra solcellepanelet for å verifisere at solcellepanel med vekselretter ikke er årsak til spenningsfenomener som observert i dette studiet.

I denne analysen ble kun tidsutvikling for THD analysert og ikke hver enkelte ordens harmoniske spennings tidsutvikling. Siden vekselrettere kan være kilde til harmoniske spenninger kunne det være interessant å se på tidsutvikling av harmoniske spenninger av ulik orden og se dette opp mot strømkurver for samme tidsperioder.

Hvis det skal gjøres videre analyse av spenning eller effekter fra solcellepanelet som krever tilkobling til nettet i energilaboratoriet bør den antatte jordfeilen i eller utenfor bygget utbedres. Hvorvidt jordfeilen påvirker fenomenene som logges er uvisst. For å kunne si noe sikkert om årsaker til fenomener og avvik bør en feilsituasjon som jordfeil fjernes.

En mulig fortsettelse av denne oppgaven vil være å gjøre flere liknende målinger og analyser hos plusskunder med ulike DG-enheter, i ulike nett.

8 Litteraturliste

1. Bollen, M., Hassan, F. (2011). *Integration of distributed Generation in the Power System*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc. 507 s.
2. Asplan Viak, Multiconsult. (2012). *Solstrøm i Norge*. 2.utg. 41 s. Tilgjengelig fra: http://www.enova.no/upload_images/558DF5FE0C544A9FBE48C6B930A56956.pdf (lest: 23.02.2013).
3. Norges vassdrag- og energidirektorat. (2013). *Plusskunder*. Tilgjengelig fra: <http://www.nve.no/no/Kraftmarked/Nettleie1/Beregning-av-tariffer-for-innmating-fra-produksjon/Plusskunder/> (lest: 24.02.2013).
4. Norges vassdrag- og energidirektorat. (2010). *Håndtering av plusskunder og vedtak om dispensasjon fra forskrift 302 om økonomisk og teknisk rapportering m.v.* Tilgjengelig fra: <http://www.nve.no/PageFiles/9733/Plusskunder.pdf> (lest: 26.02.2013).
5. Energy Creative Group. (2011). *Vilkår for plusskunder*. Tilgjengelig fra: <http://www.energinorge.no/getfile.php/FILER/MEDLEMSTJENESTER/N%C6RINGSPOLITIKK/MARKED/Vilk%E5r%20for%20plusskunder%20-%20ECGroup.pdf> (lest: 5.3.2013).
6. Norges vassdrag- og energidirektorat. (2010). *Komponenter i nettleien*. Tilgjengelig fra: <http://www.nve.no/no/Kraftmarked/Nettleie1/Om-nettleie/> (lest: 23.04.2013).
7. Biørnstad, H. (2012). *Vurdering av plusskunder sine rammebetingelser i framtidens distribusjonsnett (SmartGrid) - med fokus på AMS og produksjonsteknologi*. Masteroppgave. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for elkraftteknikk. 155 s.
8. Eidsiva. (2012). *Tariffhefte 2013*. Tilgjengelig fra: [https://www.eidsivanett.no/Documents/Tariffer/Regionalnett/Tariffhefte%202013%20Eidsiva%20R-nett%20\(2\).pdf](https://www.eidsivanett.no/Documents/Tariffer/Regionalnett/Tariffhefte%202013%20Eidsiva%20R-nett%20(2).pdf) (lest: 22.02.13).
9. Petterteig, A., Mogstad, O., Henriksen, T., Håland, Ø. (2006). *Tekniske retningslinjer for tilknytning av produksjonsenheter, med maksimum aktiv effektproduksjon mindre enn 10 MW med tilkobling til distribusjonsnettet*. Trondheim: SINTEF Energiforskning AS. 58 s. Tilgjengelig fra: https://www.sintef.no/project/Distribution_2020/Publikasjoner/TR_A6343.01.pdf (lest: 28.02.2013).
10. *Rasjonell elektrisk nettviksomhet. Standard for nettilknytning av produksjon*. Tilgjengelig fra: <http://www.ren.no/web/guest/smaakraft> (lest: 17.02.2013).
11. Norges vassdrag- og energidirektorat. (2004). FOR-2004-11-30 nr 1557: *Forskrift om leveringskvalitet i kraftssystemet*. Tilgjengelig fra: <http://www.lovdata.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-20041130-1557.html> (lest:23.1.2012).
12. Tranøy, H. (2012). *Tekniske retningslinjer for tilknytning av plusskunder i lavspenningsnett*. Masteroppgave. Oslo: Norges teknisk-naturvitenskapelig universitet, Institutt for elkraftteknikk. 135 s.
13. SINTEF Energi AS. (2012). *Planleggingsbok for kraftnett: Systematikk for integrasjon av distribuert produksjon i distribusjonsnett*. Tilgjengelig fra: http://www.ren.no/c/document_library/get_file?uuid=7021d008-a7a0-458f-9966-5ef31a202ce3&groupId=10206 (lest: 17.02.13).
14. Lefstad, T., Petersen, K., Grøtterud, M., Wisur S., Jørstad, J. (2011). *Eksperter i team - Smarte nett: Smarte nett i et norsk øysamfunn*. Prosjektrapport. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. 33 s. Tilgjengelig fra: <http://smartgrids.no/wp-content/uploads/2012/11/Prosjektrapport-gruppe-4.pdf> (lest: 23.1.2013). .
15. *Smartgrids*. Tilgjengelig fra: <http://smartgrids.no/> (lest: 08.04.2013).

16. Norges vassdrag- og energidirektorat. (2009). Leveringskvalitet og avbruddstatistikk. Tilgjengelig fra: <http://www.nve.no/no/Energi1/Kraftsystemet/Leveringskvalitet/> (lest: 04.02.2013).
17. Strzelecki, R., Benysek, G. (2008). *Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks*. London: Springer-Verlag. 414 s.
18. Statnett. Sentralnett, regionalnett, lokalnett. Tilgjengelig fra: <http://www.statnett.no/no/Om-Statnett/Statnett-pa-1-2-3/Sentralnett-regionalnett-lokalnett/> (lest: 05.04.2013).
19. Norges vassdrag- og energidirektorat. *Energistatus*. (2011). 99 s. Tilgjengelig fra: <http://webby.nve.no/publikasjoner/diverse/2011/energistatus2011.pdf> (lest: 06.03.2013).
20. Olje- og energidepartementet. *Infrastruktur for energi – fjernvarme og nettutbygging*. Tilgjengelig fra: <http://www.regjeringen.no/nb/dep/oed/dok/NOU-er/2012/nou-2012-9/14.html?id=675588> (lest: 06.04.2013).
21. Lund, P., Mogstad, O., Neimane, V., Pleym, A., Samuleson, O. (2003). *Connection of distributed generation - effect on the power system*. Technical report SINTEF Energy Research. 115 s.
22. Mohan, N., Undeland, T., Robbins, W. *Power Electronics Converters, Applications, and Design*. 3. utg. New Dehli, India: Wiley. 802 s. . 2012.
23. Andersen, S., Eikås, Ø., Ellefsen, C. (2012). *Nettilknyttede solcelleanlegg. Prosjektrapport i ENE304*. Grimstad: Universitetet i Agder, Fakultetet for teknologi og realfag. 131 s.
24. SINTEF Energi AS. (2011). *Planleggingsbok for kraftnett: Spenningskvalitet*. Tilgjengelig fra: http://www.ren.no/c/document_library/get_file?uuid=74190d68-f0bc-49a8-9fce-67eae2d73c1a&groupId=10206 (lest: 23.01.13).
25. Norges vassdrag- og energidirektorat. (2012). FOR 2012-12-07 nr 1183: Forskrift om endring i forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet. Tilgjengelig fra: <http://www.lovdata.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-20121207-1183.htm> (lest: 29.01.2013).
26. Sand, K. *Spenningskvalitet - fenomen for fenomen*. Tilgjengelig fra: <http://dok.ebl-kompetanse.no/Foredrag/2008/Grunnlegg%20innføring%20spkv/02%20Fenomenbeskrivelse.pdf> (lest: 16.03.13).
27. *Industry logic*. Tilgjengelig fra: <http://www.industrologic.com/transient.pdf> (lest: 29.04.13).
28. Chen, C. (2011). *Physics of Solar Energy*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc. 326 s. .
29. *Solceller*. Tilgjengelig fra: <http://www.fornybar.no/solenergi/elektrisk-energi-fra-solen/solceller> (lest: 13.03.2013).
30. Green, M. (1992). *Solar cells Operating Principles, Technology and System Application*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall Inc. 274 s.
31. Nygård, H. *Solenergi*. Universitetet for miljø og biovitenskap (forelesning: 16.10.2012).
32. Ramos, J.A.H., Campayo, J.J.M., Zamora, I.B., Larrañaga, J.L., Zulueta, E.G., Pérez, E.P. (2010, Mars 23 - 25). *Modeling of Photovoltaic Module*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Granada, Spain.
33. Brnic, K. (2005). *Aleneståedne solvarmeanlegg med solceller til styring og drift*. Hovedoppgave. Oslo: Universitetet i Oslo, Fysisk Institutt. 107s.
34. *School of Electrical and Information Engineering, University of Sydney*. (2011). *Lab 1 Electrical Characterisitcs of Photovoltaic Cells*.
35. *Komponenter i solcellesystemet*. Tilgjengelig fra: <http://www.fornybar.no/solenergi/elektrisk-energi-fra-solen/komponenter-i-solcellesystemet> (lest: 22.3.2013).
36. *PV-Modul*. Tilgjengelig fra: <http://pveducation.org/pvcdrom/manufacturing/module> (lest: 22.03.2013).
37. *Module structure*. Tilgjengelig fra: <http://pveducation.org/pvcdrom/modules/modules-structure>. (lest: 22.04.2013).
38. *REC Peak Energy Series. High Performance Solar Modules*. Datablad.
39. *Eltek Valere. Theia HE-t Solar Inverters*. Datablad.

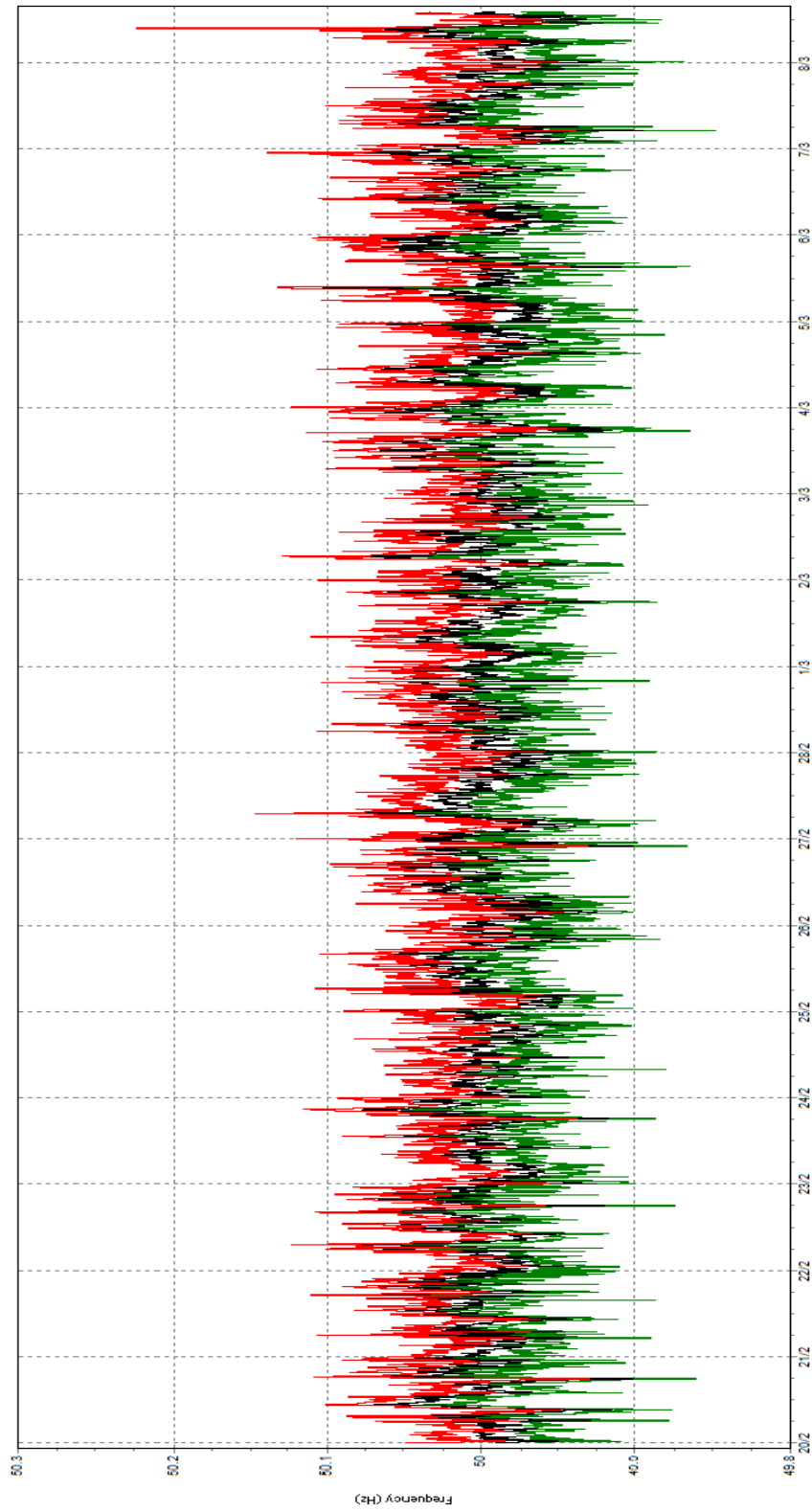
40. *KANTHAL AB. Superthal - Heating Modules for Customized Furnaces and Heaters. Datablad. Tilgjengelig fra: <http://heatingelements.hitempproducts.com/Asset/Superthal-Heating-Modules-for-Customized-Furnaces.pdf> (lest: 25.04.2013).*
41. *Lyse Energi. Jordfeil. Tilgjengelig fra: <http://www.lysenett.no/nyttig-informasjon/jordfeil-article12402-13493.html> (lest: 15.04.2013).*
42. *Store Norske Leksikon. Nettsystemer. Tilgjengelig fra: <http://snl.no/nettsystem> (lest: 01.05.2013).*
43. *Elma Instruments. CA 8335 QualiStar - Nettanalysator m/AmpFlex 450mm. Tilgjengelig fra: <http://www.elma-instruments.no/nb-NO/v:2278;130000?visma5.prodno=5706445291281> (lest:29.04.2013).*
44. *Chauvin Arnoux. Operating manual C.A 8335 Qualistar Plus.*
45. *CEE Energiteknikk. Brukermanual for Medcal N.*

Vedlegg A

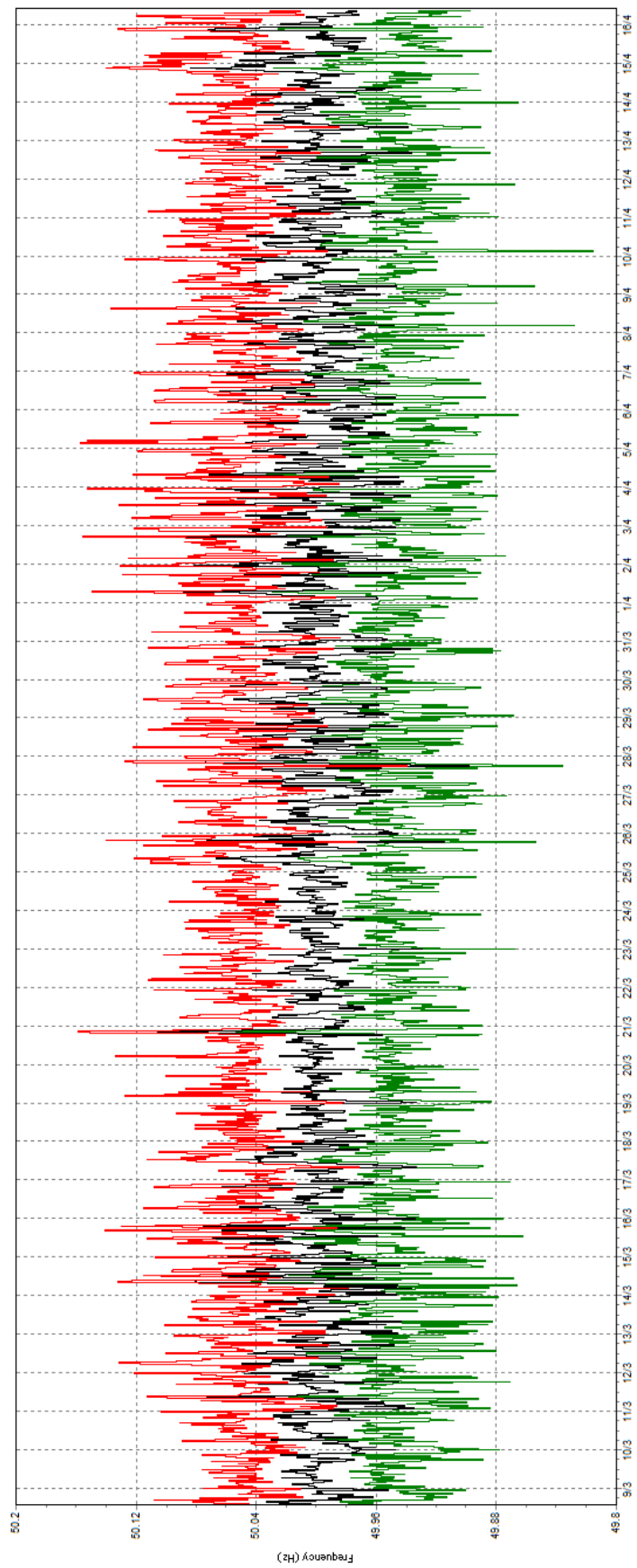
Tabellen illustrerer hvilke parametere som kan måles og logges av nettanalysatoren Qualistar +. I analysen er kun enkelte av disse parameterne studert nærmere.

Forkortelse	Beskrivelse
Hz	Frekvens
U RMS	RMS-verdi spenning fase-fase
V RMS	RMS-verdi fase-null fase -null
A RMS	RMS-verdi strøm
Uthd	Overharmonisk spenning fase-fase
Vthd	Overharmonisk spenning fase-null
Athd	Overharmonisk strøm
Ucf	Krest-faktor spenning fase-fase.
Vcf	Krest-faktor spenning fase-null
Acf	Krestfaktor strøm
Vunb	Ubalanse spenning fase-null, angis i prosent
Aunb	Ubalanse strøm, angis i prosent
PST	Korttidsflimmer. Måling gjøres over kort periode (minutter).
Akf	K faktor for transformator
W	Aktiv effekt
Wh	Aktiv energi
VAR	Reaktiv effekt
VARh	Reaktiv energi
VA	Tilsynelatende effekt
VAh	Tilsynelatende energi
PF	Power factor (Effekt faktor)
Cos φ	Displacement Power Factor. Fasevinkelen mellom spenning og strøm.
Tan	tan φ .
Vh	Overharmonisk spenning
Ah	Overharmonisk strøm

Vedlegg B



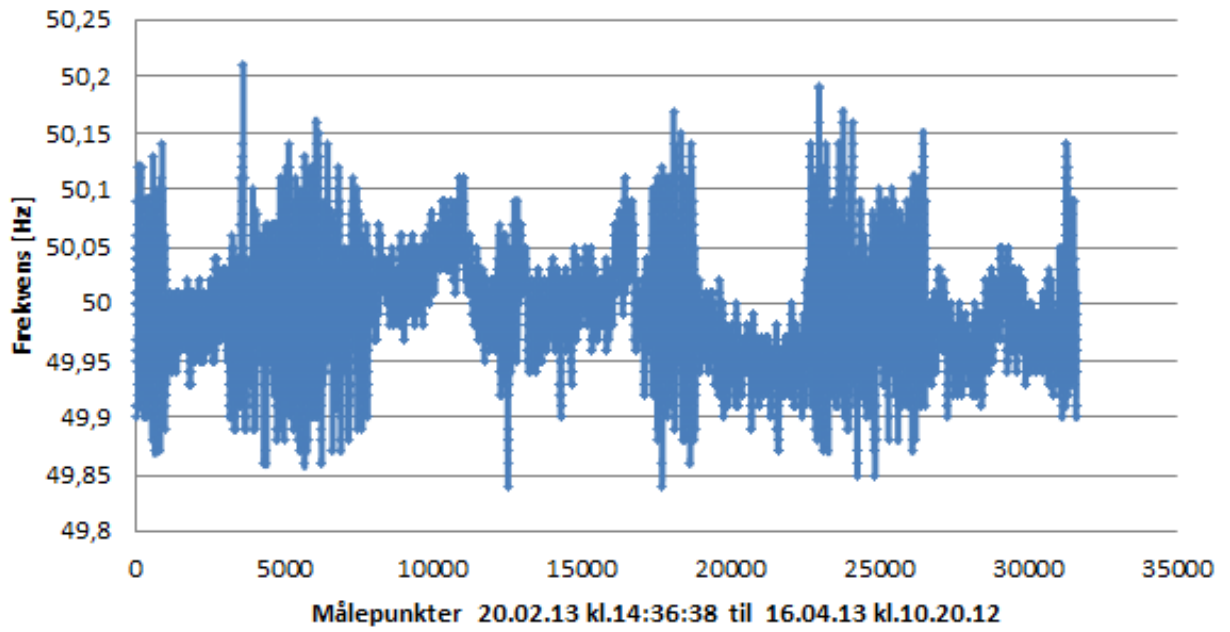
Frekvens 20.2.2013 – 8.3.2013. Rød: maksimum, grønn: minimum, sort: gjennomsnitt.



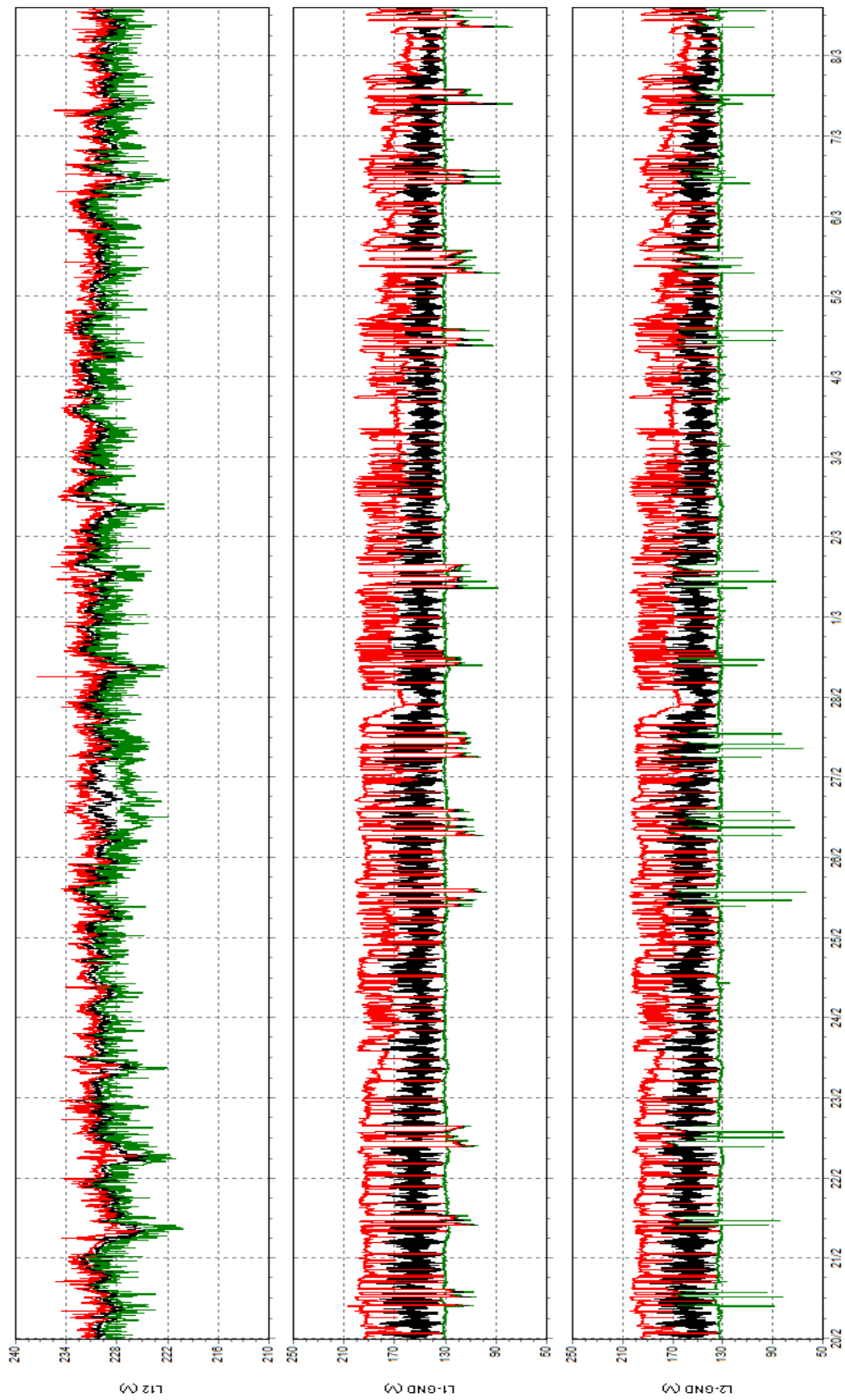
Frekvens 8.3.2013 – 16.4.2013. Rød: maksimum, grønn: minimum, sort: gjennomsnitt.

Vedlegg C

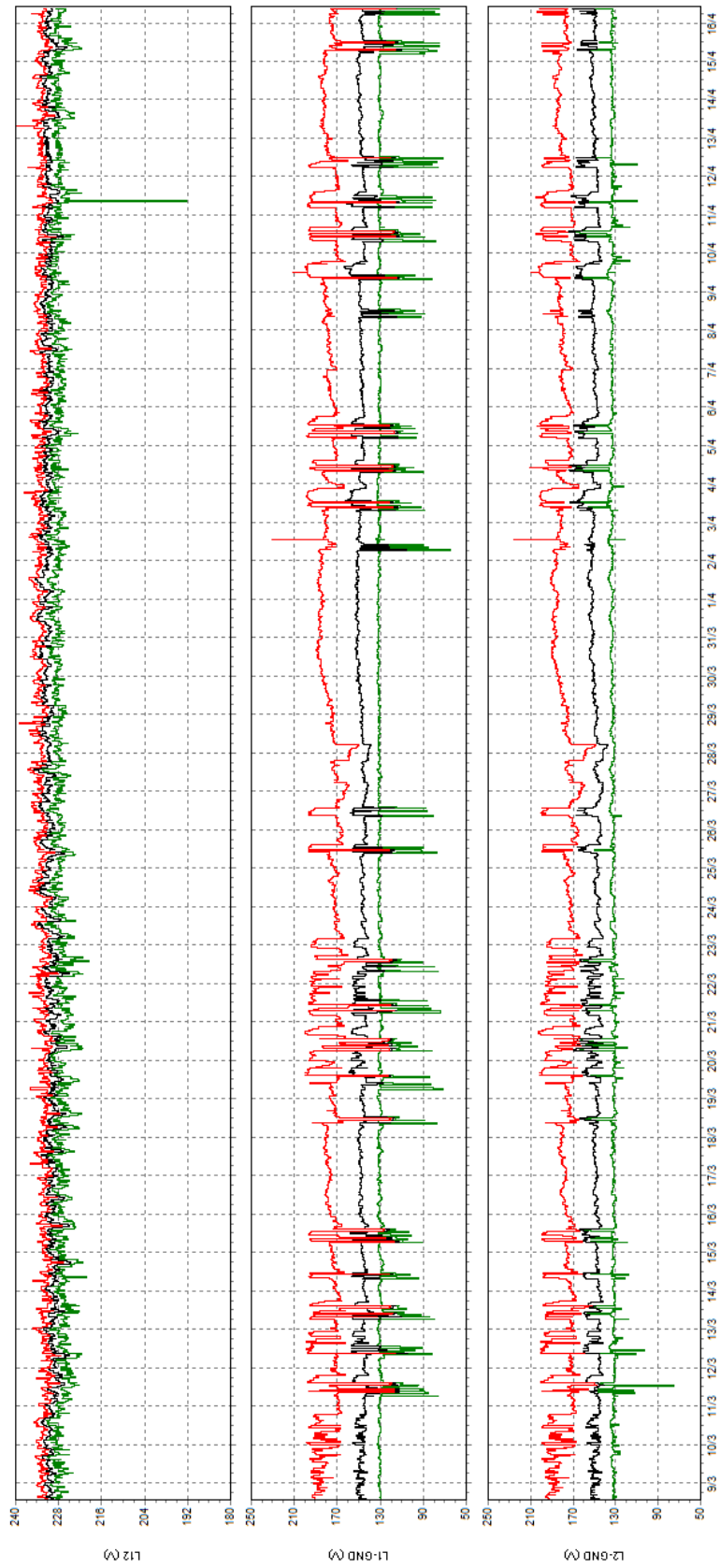
Frekvensmålinger for C.A.8335 Qualistar+



Vedlegg D

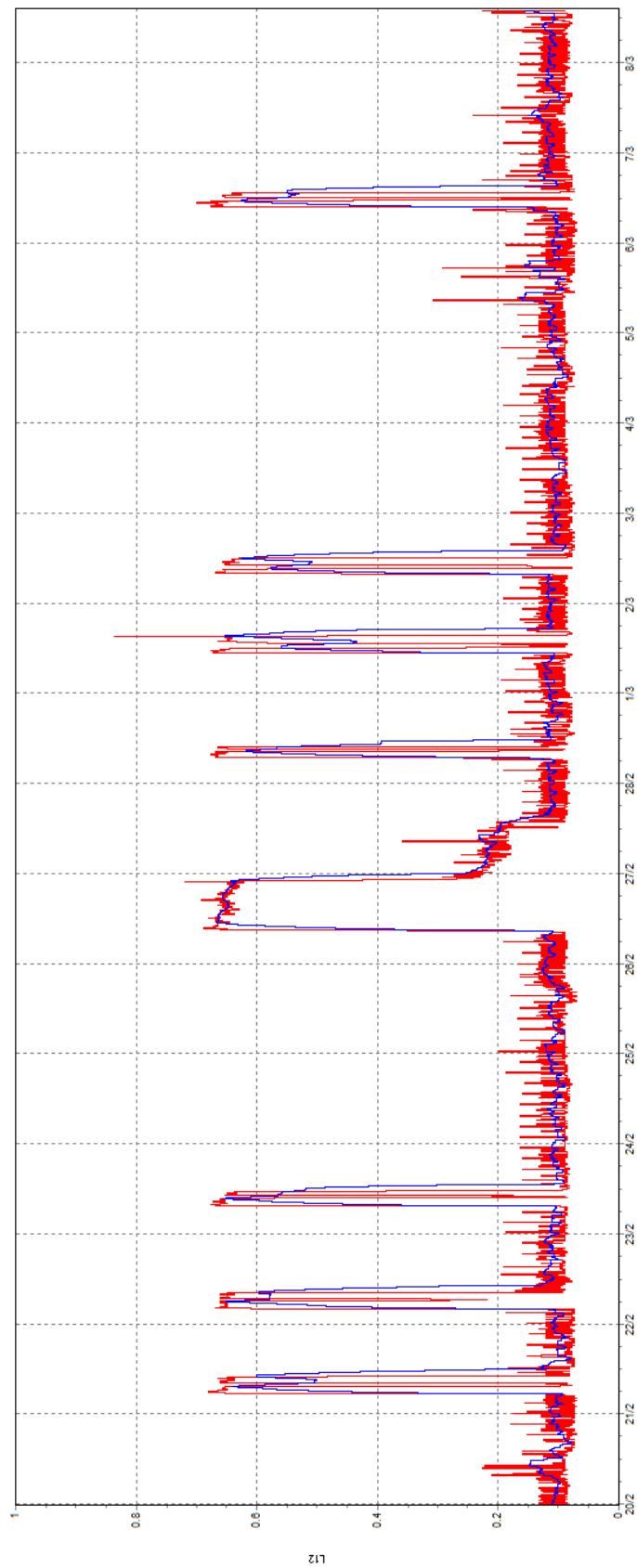


Spenning 20.2.2013 – 8.3.2013. Rød: maksimum, grønn: minimum, sort: gjennomsnitt.

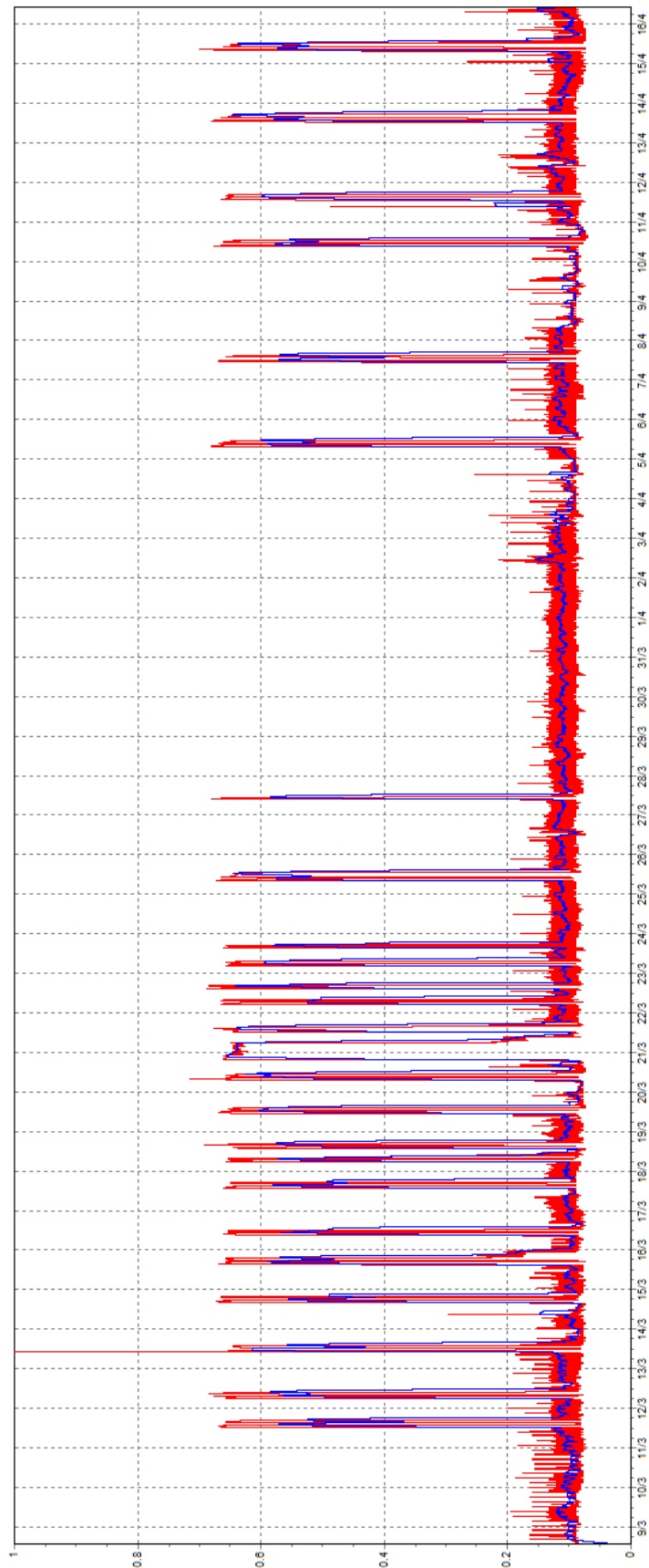


Spenning 8.3.2013 – 16.4.2013. Rød: maksimum, grønn: minimum, sort: gjennomsnitt.

Vedlegg E



Flimmerverdier 20.2.13.2013 – 8.3.2013. Rød: Pst, blå: Plt.

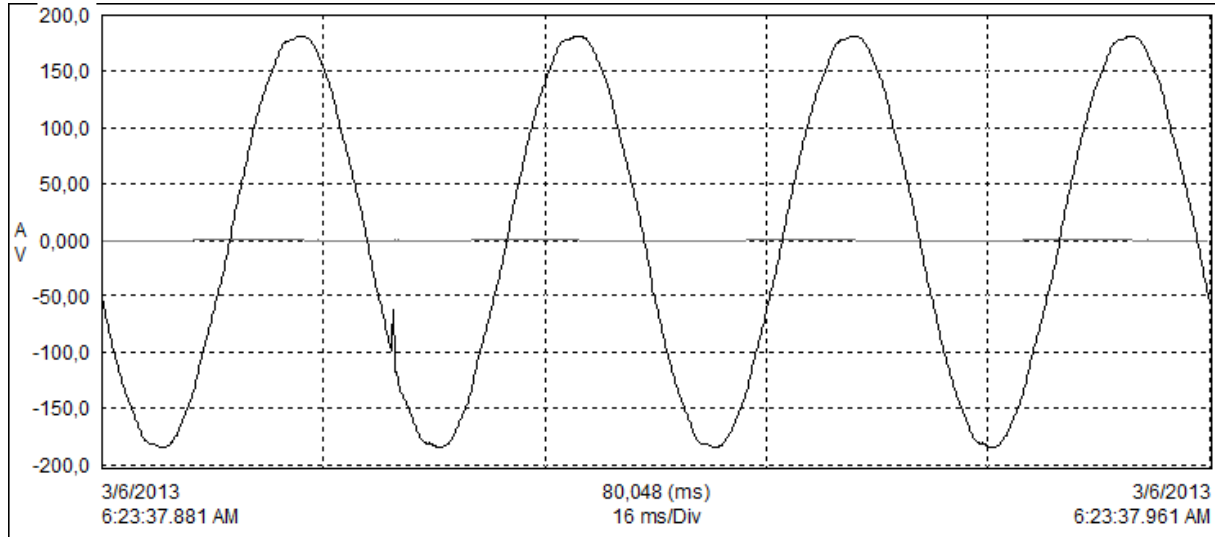


L17

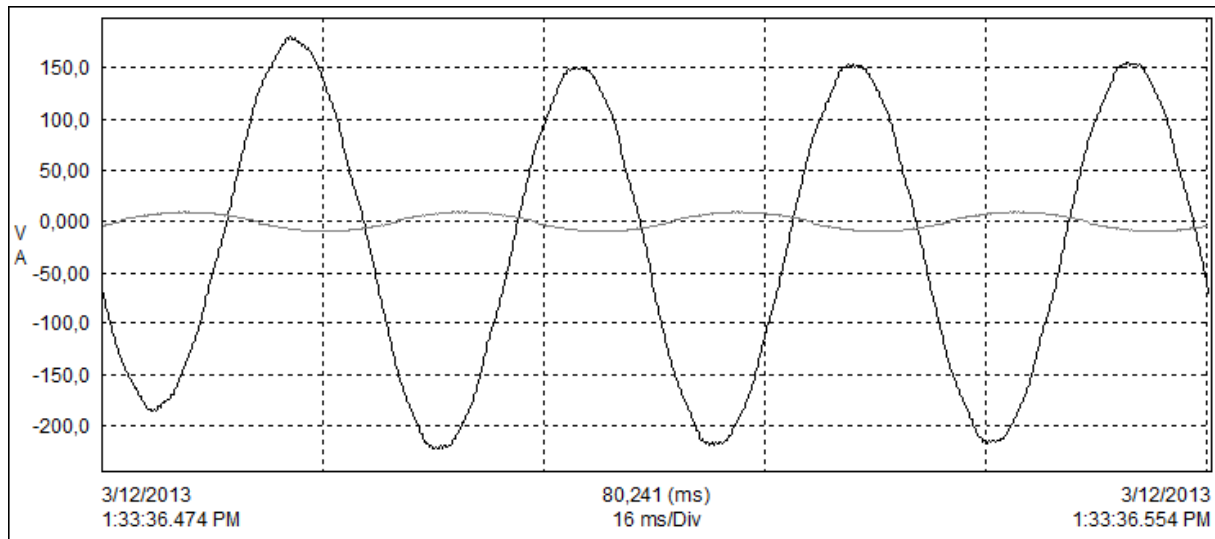
Flimmerverdier 8.3.2013 – 16.4.2013. Rød: Pst, blå: Plt.

Vedlegg F

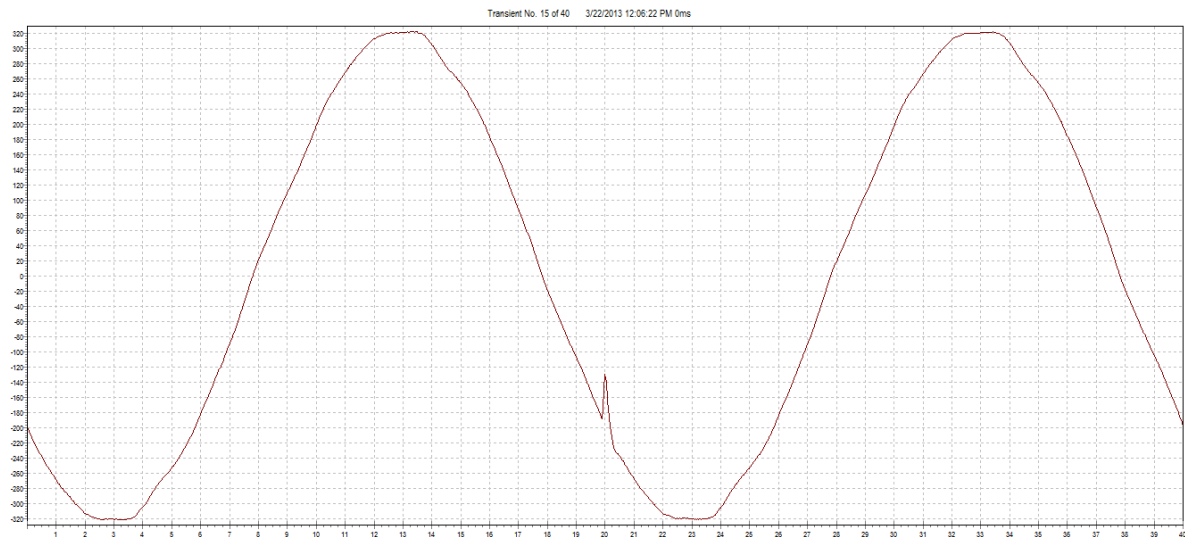
Eksempel på hvilke type transienter som ikke er interessante for analyse i denne oppgaven:



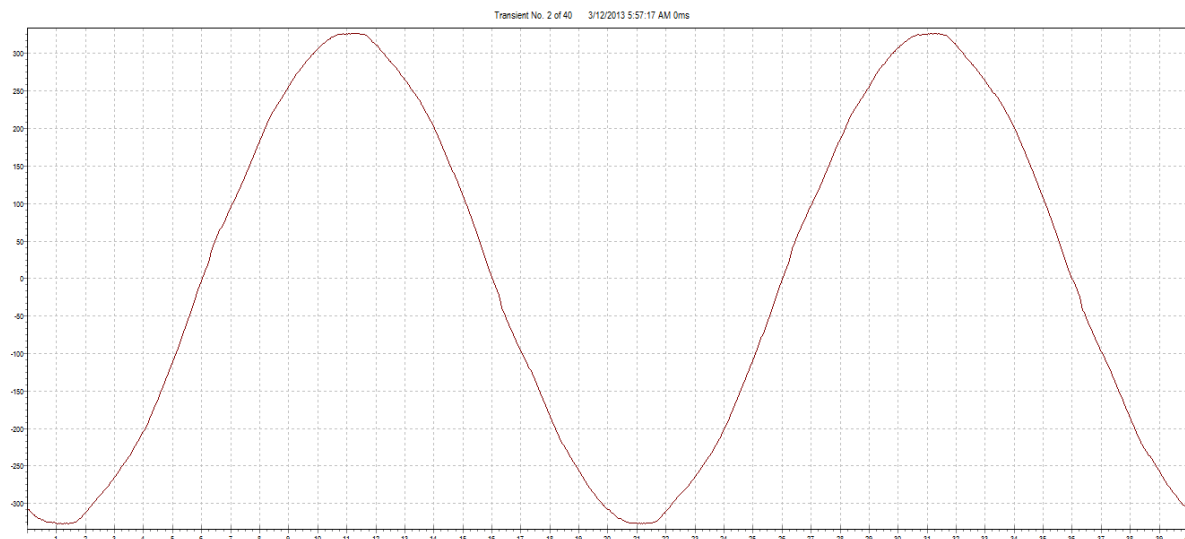
Impulsiv transient målt av Qualistar +, 6.3.2013 kl. 6:23:37



Transient som gir mindre endring i amplitude, målt av Qualistar +, 12.3.2013 kl. 13:33:36.



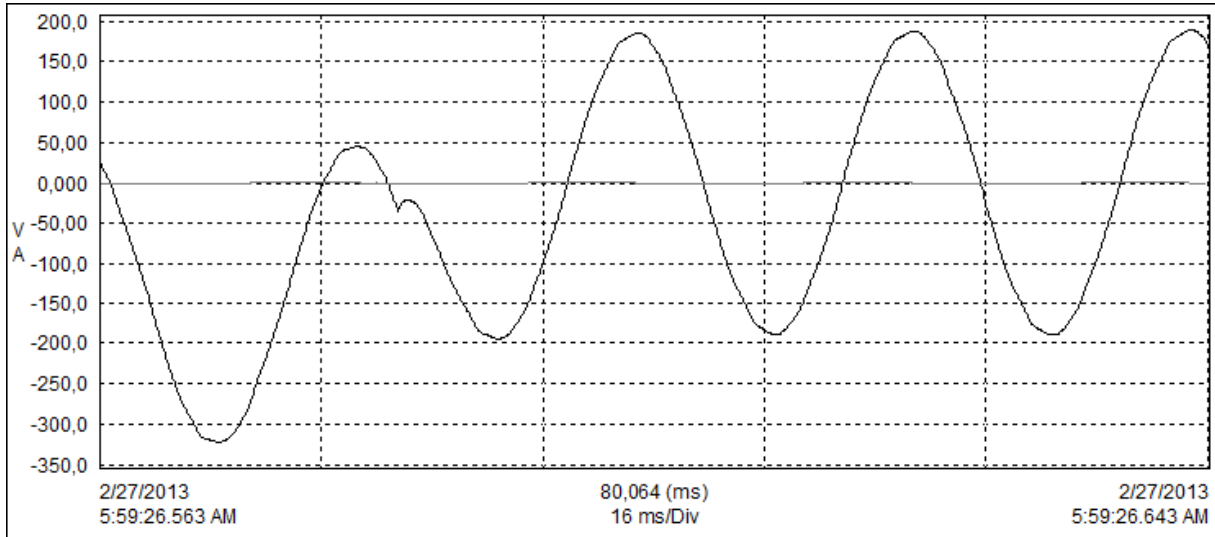
Impulsiv transient som med mindre endring i amplitude, målt av Medcal N 22.3.2013 kl. 12:03:13.



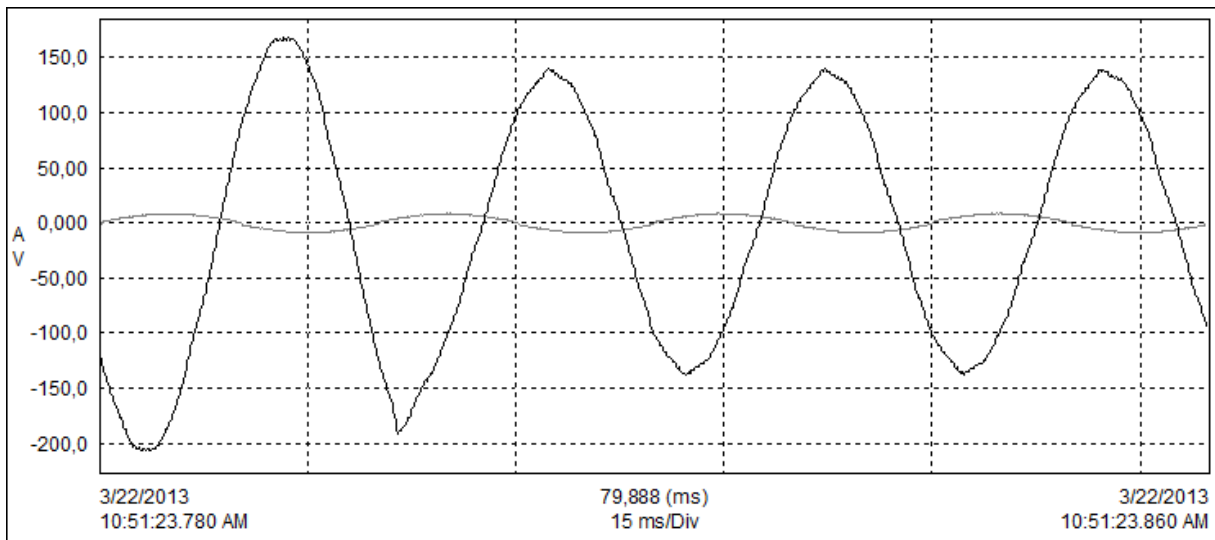
Transient som gir mindre endring i forvrenging av spenningskurve, målt av Medcal N, 12.3.2013 kl. 05:57:17.

Vedlegg G

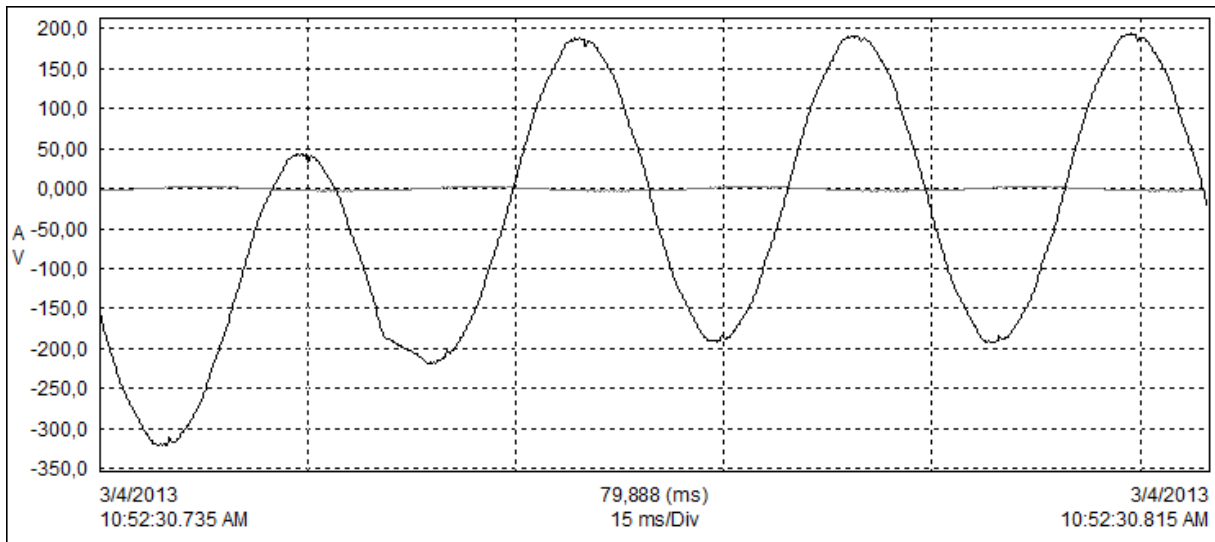
Eksempel på hvilke type transienter som er interessante for analyse:



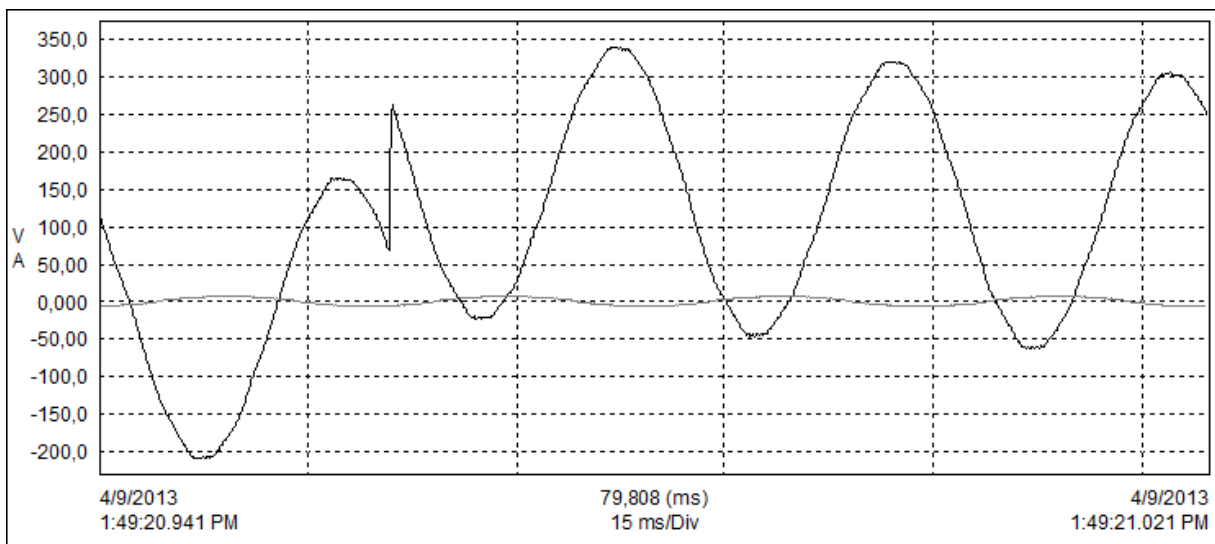
Transient som gir større endring i kurveform, målt av Qualistar +, 27.2.2013 kl. 5:59:26.



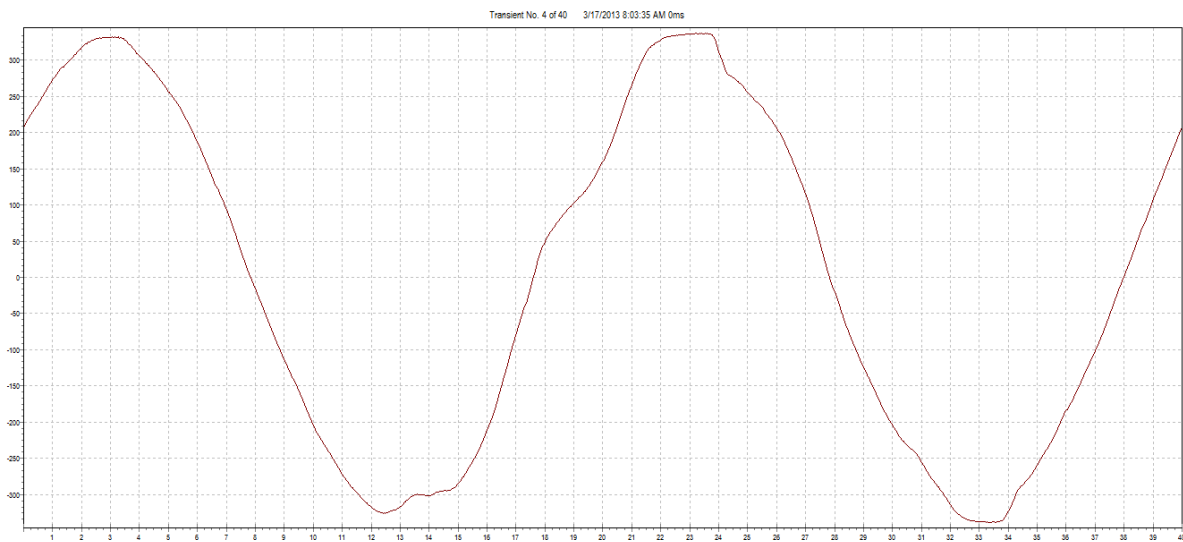
Transient som gir større endring i kurveform, målt av Qualistar +, 22.3.2013 kl. 10:51:23.



Transient som gir endring i kurveform, målt av Qualistar +, 4.3.2013 kl. 10:52:30.



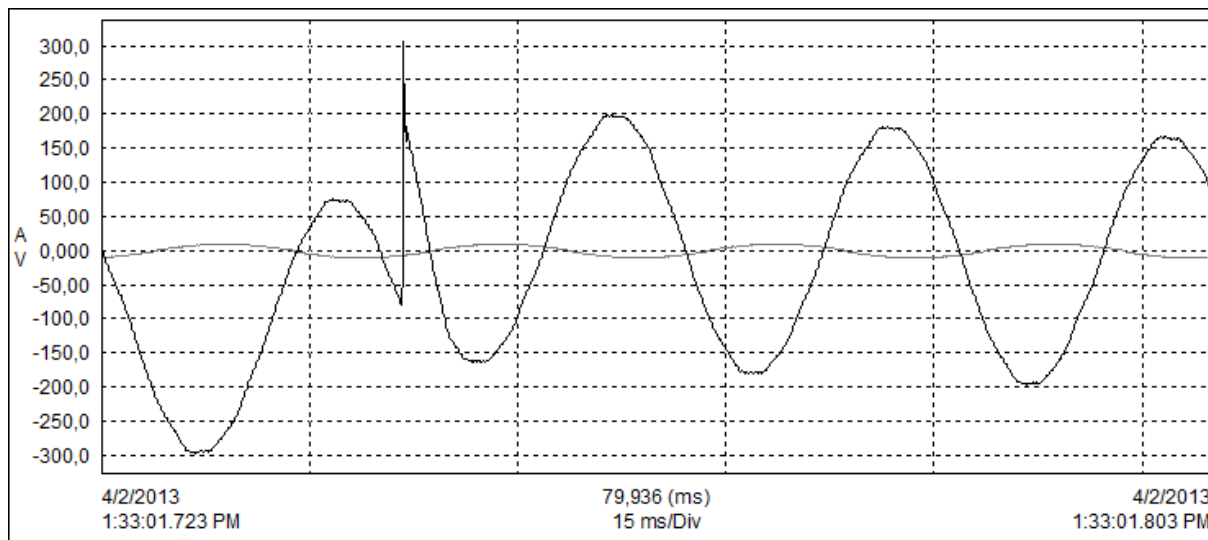
Transient som gir større endring i kurveform, målt av Qualistar +, 9.4.2013 kl. 13:49:20.



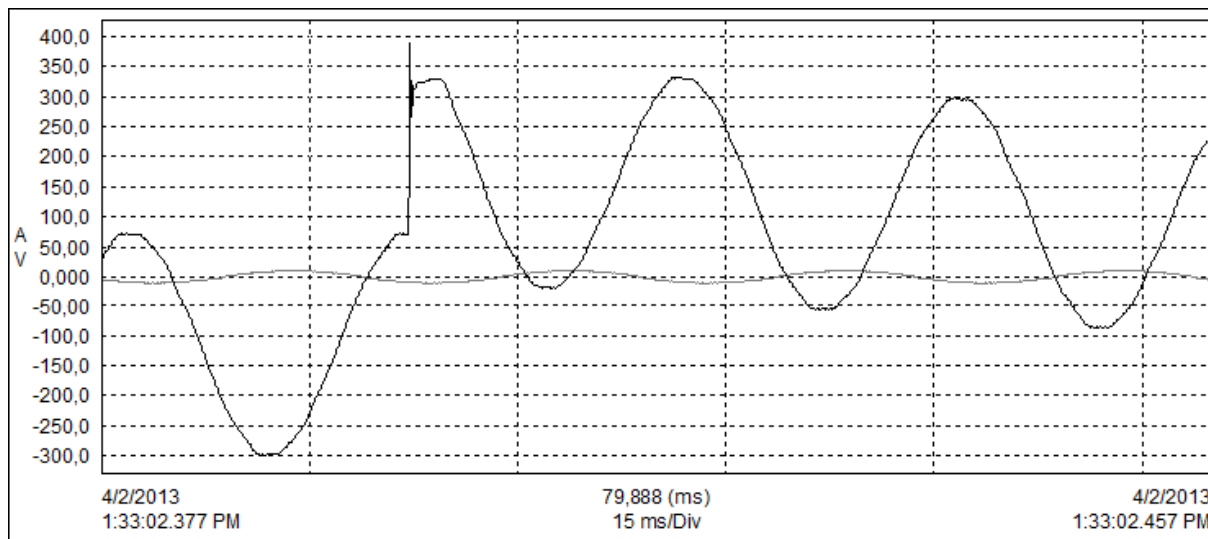
Transient som gir større endring i kurveform, målt av Medcal N 17.3.2013 kl. 08:03:35.

Vedlegg H

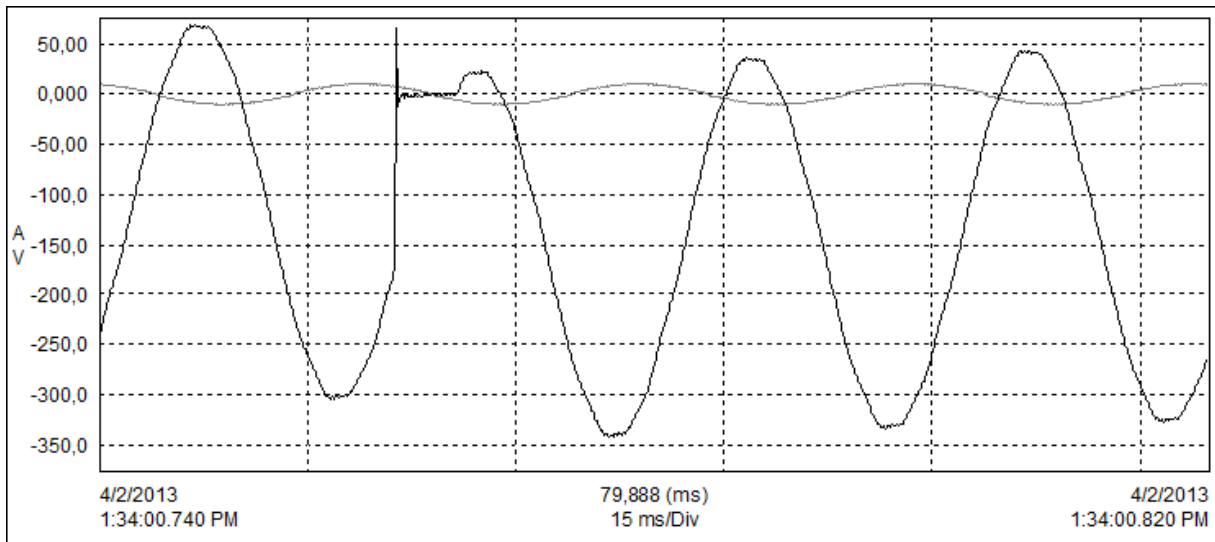
Eksempler på transienter målt av Qualistar + i tidsrommet 2.4.2013 14:33:00 – 14:53:29:



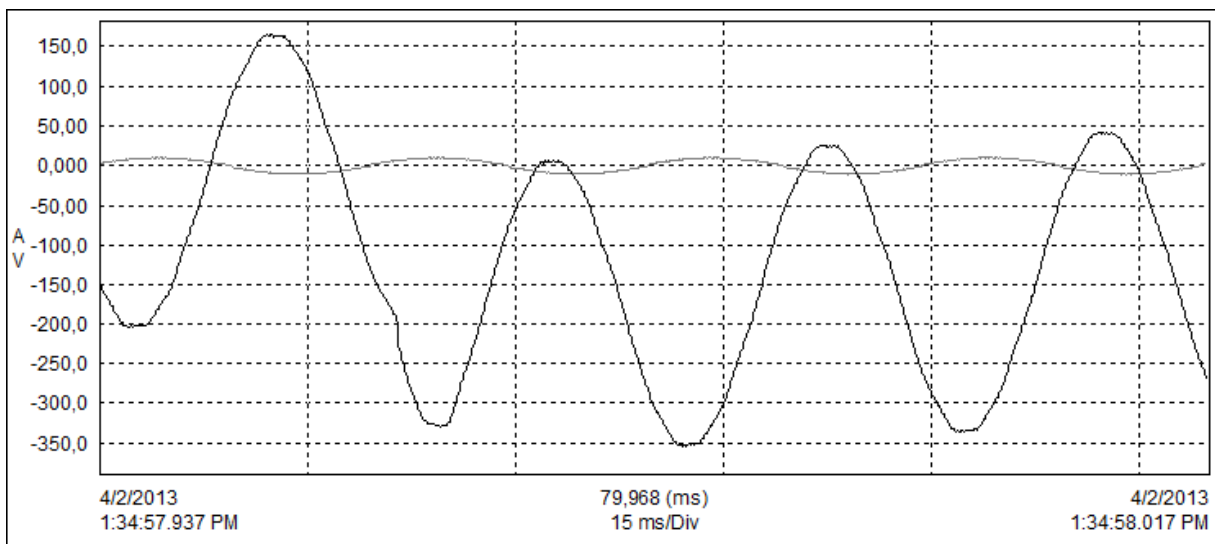
Transient målt av Qualistar +, 2.4.2013 kl. 14:33:01.



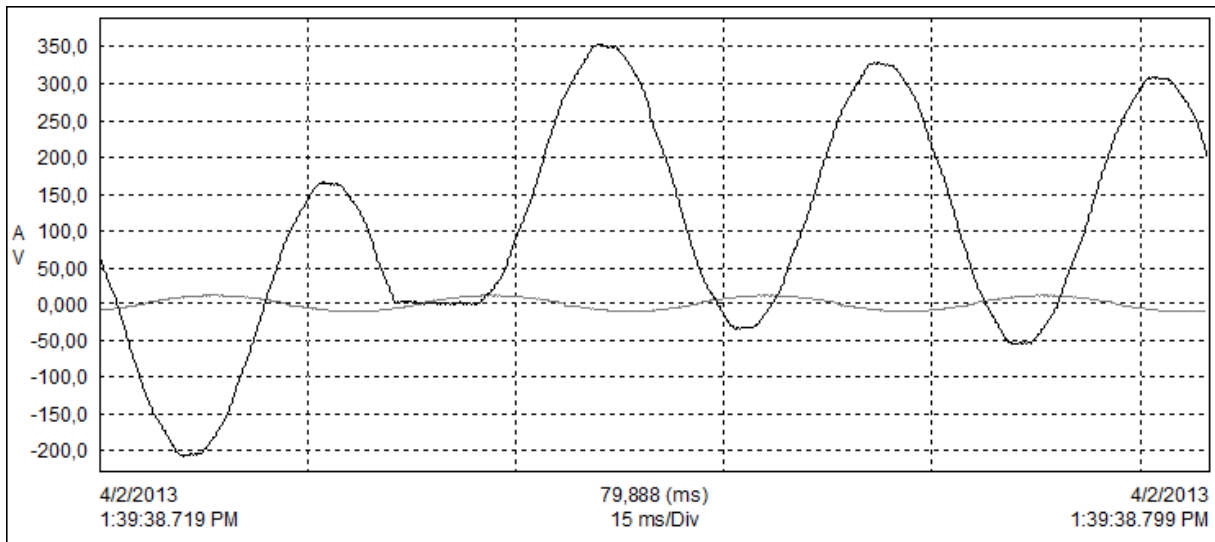
Transient målt av Qualistar +, 2.4.2013 kl. 14:33:02.



Transient målt av Qualistar +, 2.4.2013 kl. 14:34:00.



Transient målt av Qualistar +, 2.4.2013 kl. 14:34:57.



Transient målt av Qualistar +, 2.4.2013 kl. 14:39:38.

Vedlegg I

Tidspunkt for transienter som viser større kurveforvrengning:

Medcal:

17.03.13 kl. 8:03:35

28.03.13 kl. 19:10:00

11.04.13 kl. 9:22:51

13.04.13 kl. 7:58:31

Qualistar +:

21.02.13 kl. 6:01:02

22.01.13 kl. 12:08:26

26.02.13 kl. 11:13:01

27.02.13 kl. 5:59:26

27.02.13 kl. 8:31:54

1.03.13 kl. 8:26:51

4.03.13 kl. 10:52:30

4.03.13 kl. 11:31:20

6.03.13 kl. 22:54:15

14.03.13 kl. 8:21:51

15.03.13 kl. 9:08:02

15.03.13 kl. 13:01:00

19.03.13 kl. 6:38.31

22.03.13 kl. 10:51:53

02:04.13 kl. 14:33:01

02:04.13 kl. 14:33:01

02:04.13 kl. 14:33:02

02:04.13 kl. 14:33:58

02:04.13 kl. 14:33:59

02:04.13 kl. 14:34:00

02:04.13 kl. 14:34:01

02:04.13 kl. 14:34:57

02:04.13 kl. 14:34:58

02:04.13 kl. 14:39:06

02:04.13 kl. 14:39:08

02:04.13 kl. 14:39:15

02:04.13 kl. 14:39:19

02:04.13 kl. 14:39:38

02:04.13 kl. 14:41:40

02:04.13 kl. 14:41:41

02:04.13 kl. 14:44:02

02:04.13 kl. 14:53:29

09.04.13 kl. 13:49:20

11.04.13 kl. 12:39:27