



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2017 60 stp**

REALTEK  
Sonja Monica Berlijn  
Kjetil Solberg

# **Kartlegging av ledningsbundet støy fra solcellesystemer i norske lavspenningsnett**

**Dag Stabell Storhaug**

Miljøfysikk og Fornybar Energi  
REALTEK



# Innhold

<b>1</b>	<b>Sammendrag</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Introduksjon</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Bakgrunn</b>	<b>9</b>
3.1	Spenningskvalitet . . . . .	9
3.2	Det ideelle kraftsystem . . . . .	9
3.3	Hva er støy . . . . .	10
3.4	Hvorfor ønsker vi god spenningskvalitet . . . . .	10
3.5	Ledningsbundet støy . . . . .	11
3.5.1	Harmoniske forstyrrelser . . . . .	11
3.5.2	Transienter . . . . .	12
3.5.3	Flikker . . . . .	13
3.5.4	Effektfrekvensvarians . . . . .	14
3.5.5	Spenningsubalanse . . . . .	15
3.6	Forstyrrelser på DC siden. . . . .	15
3.7	Utstrålt støy . . . . .	16
3.8	Jordingssystemer . . . . .	16
3.9	Spenningskvalitet og sikkerhet . . . . .	18
3.10	Standarder . . . . .	18
3.11	EMC-design for solcelleanlegg . . . . .	19
3.12	Tidligere Forskning . . . . .	19
3.13	Oppgavens Begrensninger . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Metode</b>	<b>21</b>
4.1	Litteraturundersøkelse . . . . .	21
4.2	Anlegget på Sørås . . . . .	21
4.3	Måleinstrument . . . . .	22
4.4	Invertere . . . . .	24
4.5	Oppkobling . . . . .	24
4.6	Analyse . . . . .	27
<b>5</b>	<b>Resultater</b>	<b>31</b>
5.1	Harmoniske forstyrrelser . . . . .	31
5.2	Flikker . . . . .	35
<b>6</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>41</b>
6.1	Harmoniske overspenninger . . . . .	41
6.2	Flikker . . . . .	43
6.3	Transienter, sags og swells . . . . .	44
6.4	Frekvens . . . . .	44
6.5	Reaktiv effekt . . . . .	44
6.6	Feilkilder . . . . .	45
<b>7</b>	<b>Videre Arbeid</b>	<b>47</b>
<b>8</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>49</b>



# Nomenklatur

(PV) Array: En rekke sammenkoblede solcellemoduler.

DSB: Direktorat for Samfunnssikkerhet og Beredskap.

EMC: Eng. Electromagnetic Compability. Elektromagnetisk kapabilitet [1].

EME: Eng. Electromagnetic Environment. Elektromagnetisk miljø [1].

EMI: Eng. Electromagnetic Immunity. Elektromagnetisk immunitet [1].

Flikker: Hurtige endringer i et spenningssignal. Flikker er synlig spesielt i elektriske lyskilder, som synlig flimmer i lysstyrke [2].

Harmonisk forstyrrelse: En forstyrrelse på et signal som oppstår som et heltals multiplum av det fundamentale signalet [2].

IT-nett: Er. Isoleé Terre. En type strømnnett der nullpunktet i transformatoren er flytende og faselederne er fraskilt jord med en impedans [3].

NMBU: Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet. Tidligere UMB.

MPP: Eng. Maximum Power Point. Det punktet på I/V kurven til et solcellepanel som gir ut mest effekt [4].

MPPT: Eng. Maximum Power Point Tracking. En teknikk i bruk i solcellesystemer for å maksimere effekt som produseres av alle tilkoblede paneler før spenningen omformes i en inverter [4].

Innkoblingspunkt: Oversatt fra engelsk Point of Interconnect. Beskriver et fysisk punkt der et lokalt elektrisk lavspenningssystem, eksempelvis et hushold, kobles til et ytre distribusjonsnett.

PE: Eng. Protective Earthing. Beskyttelsesjordleder på norsk [3].

Plusskunde: En strømkunde som har installert en effektgenerator (f.eks. et solcelleanlegg) som ønsker å selg overskuddseffekt til sin strømleverandør.

p.u.: Per unit. Brukes for å beskrive en kvantitet som en fraksjon av en nominell verdi. Eksempelvis vil den nominelle verdien ha per-unit verdien 1. En verdi som er 10% høyere enn nominell verdi har per-unit verdien 1.1.

PV: Eng. Photovoltaics. Fotovoltaikk, solceller.

RF: Radiofrekvens.

PWM: Eng. Pulse width modulation. Pulsbreddemodulasjon på norsk. En metode å endre formen til et signal. Brukes i solcelleinvertere for å omgjøre likestrøm til vekselstrøm [5].

rms: Eng. Root mean square. På norsk: Kvadratisk gjennomsnitt. En størrelses effektivverdi. Vekselstrøm og -spenning oppgis som rms-verdi.

Spenningsubalanse: Noen ganger bare ubalanse. Definert som maksimalt avvik fra snittverdien av en trefaset spenning eller strøm, delt på snittverdien av trefasespenningen eller strømmen. Oppgis i prosent [2].

Syklus: I denne oppgaven omtales en syklus som tiden det tar for en bølgelengde i et strøm- eller spenningssignal å passere et vilkårlig satt punkt i rommet.

THD: Eng. Total Harmonic Distortion. Mål på innhold av harmoniske signal på en bølgeform i prosent [2].

TN-nett: Fr. Terre Neutre. En type strømnett der nullpunktet i transformatoren er jordet og forbundet med en nøytralleder som føres ut til forbruker. [3]

# 1 Sammendrag

Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap (DSB) har fått henvendelser med bekymringer om at spenningskvaliteten i lavspenningsnett forstyrres av småskala solcelleanlegg.

Installasjon av nye private solcelleanlegg øker raskt i Norge, derfor er DSB bekymret for at samlet støy fra disse vil føre til forstyrrelser i nettet.

Denne oppgaven beskriver en studie av spenningskvaliteten fra et solcelleanlegg tilkoblet et 230 V IT-nett. Studien er utført fordi DSB har behov for å finne ut om disse bekymringene er reelle.

I første omgang ble det begått en litteraturstudie. Standarder og begrensinger på elektrisk støy både nasjonalt og internasjonalt ble undersøkt for å sette problemet i kontekst. Det ble undersøkt dokumenter om spenningskvalitetsproblemer i Norge og liknende forsøk som har blitt gjort andre steder i verden.

I litteraturen ble det funnet at de største problemene som oppstår fra solcelleanlegg er spenningsflicker, harmoniske forstyrrelser og reaktiv effekt. I tillegg til det er det funnet at elektrisk støy er ekstra forstyrrende i norske strømmnett fordi vi i hovedsak bruker nett uten nøytralleder som kan lede bort støy. Det har ikke blitt funnet andre forsøk av denne typen som har blitt gjort under norske forhold.

Norske og internasjonale standarder for spenningskvalitet og solcelleanlegg brukes i denne oppgaven for å bestemme om målt spenningskvalitet er på et akseptabelt nivå.

Oppgavens målinger ble foretatt med en spenningskvalitetsmåler som ble koblet opp på to ulike punkter ved et solcelleanlegg. De to målepunktene ble valgt for å se hvordan spenningsforstyrrelsene fra solcelleanlegget oppførte seg etter å ha blitt ledet over en distanse. Ett punkt like ved panelene og ett punkt 100 m unna i ledningslengde ved innkoblingspunktet med strømmettet. Det ble registrert harmoniske forstyrrelser, spenningsubalanse, frekvens, flikkerinnhold, transienter, aktiv- og reaktiv effekt i sommermånedene juli og august.

Resultatene fra spenningskvalitetsmålingene ble satt i sammenheng med innstrålingsdata. Det ble vist fra resultatene at alle målte faktorer for spenningskvalitet lå under forskriftssatte grenser. De mest prominente resultatene var spenningsflicker, harmoniske spenninger og harmoniske strømmer. Av disse er det vist at de harmoniske spenningene ikke hadde sammenheng med solcelleanlegget, men hadde andre kilder utenfor anlegget. Flicker og harmoniske strømmer er emittert fra solcelleanlegget. Flikkermengden har en tydelig sammenheng med innstråling. I innkoblingspunktet med nettet var flikkermengden halvert og det var ikke mulig å finne igjen kurveformen til harmoniske forvrengninger på strømsignalet der.

Det har ikke blitt registrert problematiske mengder av verken ubalanse, frekvensforskyving, reaktiv effekt eller transienter.

Oppgavens hovedkonklusjon er at solcelleanlegg emitterer ikke-trivielle mengder med spenningsflicker og harmoniske strømmer, som vil kunne registreres i nærområdet som irriterende elektrisk støy. Spesielt vil dette kunne oppleves ved høy penetrering av solcelle-effekt.

En anbefaling går ut til DSB om å undersøke flikker og interharmoniske spenninger fra solceller næremere enn denne oppgaven har gjort. Flikker i denne oppgaven har blitt målt med en oppløsning på 1 måling hvert 10. minutt, men det skjer antagelig store kortvarige flikkerkonsentrasjoner som ikke synes på målingene. Interharmoniske spenninger er interessant fordi det er med på å skape flikker [4].



## 2 Introduksjon

Denne oppgaven er skrevet i samarbeid med Direktorat for Samfunnssikkerhet og Beredskap (DSB). Oppgavens formål er å oppdage og kvantifisere støy i spenningen til spenningsomformere tilkoblet solcelleanlegg. Oppgaven skal fungere som et grunnlag for framtidige standarder og forskrifter som skrives omkring spenningskvalitet på solcelleanlegg. Det utarbeides derfor ikke i denne oppgaven løsninger på eksisterende problemer, det kartlegges hvilke problemer som eksisterer og forslag til preventive tiltak og videre forskning presenteres.

Oppgaven er en masteroppgave skrevet ved Fakultet for Realfag og Teknologi (REALTEK) ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet (NMBU) på Ås. Problemstillingen er valgt ut av DSBs elsikkerhetsavdeling (ELS) som en respons på henvendelser de har fått fra strømkunder som har opplevd spenningskvalitetsproblematikk i områder der det finnes plusskunder med installerte solceller. Problemene arter seg eksempelvis som flimrende lyskilder eller elbiler som ikke vil lade.

DSBs oppgave er å holde overblikk over sårbarheter i samfunnet, og drive forebyggende arbeid for å unngå skade på personer eller infrastruktur. Prosjektet er interessant for DSB fordi en dårlig spenningskvalitet fører til økt risiko for feil i tilkoblet elektrisk utstyr og feil i strømmettet [6].

En ideell trefase forsyningskurve har tre jevne sinuskurver, som alle er forskjøvet  $120^\circ$  fra hverandre. Om forsyningsanlegg sender ut strøm med lav kvalitet på nettet kan det føre til tæring på utstyr, varmeutvikling, effekttap og feil i utstyrs virkemåte. I verste fall kan det medføre personskafer, enten ved utilsiktet berøringsspenning eller ved skadelig funksjonsfeil i utstyr.

Oppgaven skal fokusere på småskala solcelleanlegg med tilkobling til lavspennings strømmett.

Målet med oppgaven er å registrere spenningskvalitet og elektrisk støy fra solcelleanlegg. Spesielt interessant er anlegg koblet til IT-nett med lav kortsluttningsytelse. Referansenett som brukes for EMC-testing er TN-nett med kortsluttningsytelse på  $i_{kmin} = 800A$ . Svakere nett, altså nett med lavere kortsluttningsytelse, fører til mer støy [7]. IT nett er mer utsatt for støy fordi en fase i hushold hentes ut fra to faser i nettet. I tillegg er nullpunktet i transformatorene flytende, isolert fra jord.

Om et nett har en nøytralleder, kan denne brukes til å lede bort støystrømmer. Nøytralleder i IT systemer er ulovlig i Norge [3].

Norge har et distribusjonssystem som består av omtrent 80% 230 V IT-nett (målt i antall kunder tilknyttet nettet) [8]. I europeisk sammenheng er IT-nett uvanlig. Det vanligste jordingssystemet i resten av Europa er TN-nett [9]. Siden mange invertere produseres i Sentraleuropa, vet vi ikke definitivt hvilken innvirkning disse inverterne har på IT systemer.

Hypotesen er at invertere til solcelleanlegg emitterer elektrisk støy og at støyen kommer til større uttrykk i et IT nett enn den ville gjort i TN-nett. Grunnlaget for det er at all strømmen vil flyte i et IT-nett, pga. mangel på nøytralleder [3].

Oppgaven dreier seg hovedsaklig om problematikk som kan oppstå i lavspenningsnett med tilkoblede plusskunder med installerte solceller. Derfor er anleggstypen som er interessant å undersøke solcellepaneler tilkoblet enfase-invertere. Det er heller uvanlig for privateide solcelleanlegg å være tilknyttet en trefase DC/AC inverter, siden hushold drives på enfase-strøm. Trefase-invertere er bedre egnet for storskalaanlegg, som mater rett ut på et nett.

Med den synkende kostnaden på solcelleanlegg følger en økt andel med privatpersoner som vil installere det på sine hus, og ønske å selge bort overskuddseffekt på strømmettet. Selv i Norge og Sverige, land med lavere grad av innstråling enn områder nærmere ekvator, har solceller vist seg å være en enkel og , etter hvert, billig kilde for fornybar energi [10] [11]. Om det skulle skje en masseutbygging av småskala solenergi i Norge, er det viktig å på forhånd ha kartlagt hva slags problematikk som kan oppstå som konsekvens. Det kan være det emitteres plagsomme mengder elektrisk støy i det tilknyttede strømmettet, forårsaket av mange små tilkoblede solcelleanlegg. Denne oppgaven ser primært på ledningsbundet støy som har opphav i solcelleanleggenes invertere. Utstrålt støy er også interessant å studere, men det er aller viktigst lokalt, direkte i nærhet av støykilden. For hushold med installerte solceller kan det forårsake problemer i nærhet av installasjonen. Det er mindre sannsynlig at det vil oppdages andre steder i strømmettet.

I denne oppgaven er vi interessert i hvordan støyen kan påvirke andre applikasjoner i kraftsystemet utenfor husholdet med det produserende solcelleanlegget. Det vil si at det hovedsaklig er støyen som beveger seg i ledningsnett som diskuteres.

## 3 Bakgrunn

Solcellepaneler brukes for å omdanne energi i sollys til elektrisk likestrøm. Ved å gjøre likestrømmen om til vekselstrøm i en inverter, kan strømmen brukes som normal enfaselig husholdsstrøm, eller sendes ut på strømmettet. Strømleverandører står under visse krav om leveringskvalitet på sitt distribusjonssystem (blant annet i Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet (FoL)). Småkraft, slik som private installasjoner av solceller, som sender ut overskudd til strømmettet kan forstyrre leveringskvaliteten.

### 3.1 Spenningskvalitet

Spenningskvalitet i denne oppgaven er løst oversatt fra det engelske "Power Quality" som direkte oversatt betyr effektkvalitet. Det brukes som et paraplybegrep for en rekke hendelser i et kraftsystem, manifestert i spenningssignalet, strømsignalet eller frekvens som kan forårsake feiloperasjon eller misnøye hos lasten i et kraftsystem. Ved høy konsentrasjon av slike hendelser kalles spenningskvaliteten dårlig. På motsatt side; om ingen slike hendelser finner sted i et system, er spenningskvaliteten god. Spenningskvalitet, som mange andre begreper som innefatter kvalitet, er vanskelig å kvantifisere. Det finnes en rekke underbegreper som kan måles og settes i system, men det finnes ikke en spesifikk referanseramme for hva som kvalifiseres som kvalitets-spending [2]. Noen underbegreper av spenningskvalitet diskuteres i denne oppgaven. Referanserammen som brukes er eksisterende standarder og forskrifter. Det vil ikke si at alt under standard eller forskriftssatte grenser regnes som god kvalitet. Deres funksjon er å sette en grense for hva som er uakseptabelt, så kan det ekstrapoleres derfra hva som kan regnes som høy kvalitet innenfor det akseptable spektret.

Fagområdet spenningskvalitet har stort overlapp med fagområdet EMC som beskrives senere i dette kapitlet. Implikasjonen er at spenningskvalitet i større grad refererer til fenomener inne i lederne i et kraftsystem.

### 3.2 Det ideelle kraftsystem

Strømmettets oppgave er å bringe effekt fra produksjonsanlegg og ut til den behøves. Underveis skal leveringssikkerhet og leveringskvalitet holdes på best mulig nivå. Et kraftig leveringssystem gir få strømbrydd, og utsetter ikke elektriske apparater for farlige eller ødeleggende feil. Denne oppgaven har det norske distribusjonsnett i fokus. Det er bestemt at det ideelle distribusjonsnett skal være en trefaset vekselstrøm med rms spenning på 230 V og en frekvens på 50 Hz. Ethvert avvik fra denne bølgeformen regnes som et spenningskvalitetsproblem.

### 3.3 Hva er støy

Støy i kontekst av kraftteknologi refererer til en tilfeldig fluktuering i det elektriske signalet. Det kan forårsakes av komponenter i det elektriske systemet eller fra miljøet som omgir systemet. Siden vi befinner oss i den virkelige verden, er ingen komponenter ideelle. Det vil si at det finnes en grad av støy i alle elektriske systemer [2].

#### EMC

Elektromagnetisk kapabilitet omfatter problemstillinger med utstrålt/innstrålte forstyrrelser og ledningsbundet støy. Det er et komplekst begrep som er viktig å tenke over i alle situasjoner der elektriske apparater skal koeksistere. Et apparats EMC-karakteristikk beskriver hvor godt det motstår andre apparaters forstyrrelser, samt hvor lite forstyrrelser det selv sender ut. Elektromagnetisk miljø (EME) omfatter alle elektromagnetiske fenomener som påvirker et avgrenset område. Når man beskriver EME er målet å få en oversikt over hva slags problematikk som kan dukke opp om det installeres et nytt apparat eller elektromagnetisk aktiv komponent i det beskrevne området. En beskriver elektromagnetisk miljø ved å:

- Liste opp og karakterisere kilder til interferens og kvantiteter på området som betraktes.
- Liste opp og karakterisere installasjonens spesialiteter.
- Dokumentasjon for EMC-tiltak som er tatt til ettertanke.
- Liste opp og karakterisere ikke-elektriske kilder til EMC-problematikk.

Elektromagnetisk immunitet (EMI) beskriver et spesifikt apparats evne til å motstå elektromagnetiske forstyrrelser, både utstrålt og ledet. [1]

### 3.4 Hvorfor ønsker vi god spenningskvalitet

#### Økonomi

Hovedgrunnen til å bry seg om spenningskvalitet er økonomi. Ved lav spenningskvalitet kastes det bort effekt på ikke-ønskelige fenomen, som for eksempel varmgang i elektriske apparater. Det fører til et høyere effektforbruk hos kunden og spesielt for industrielle laster, som øker strømrregningen. I tillegg kan lav spenningskvalitet føre til kortere levetid på sensitive tilkoblede apparater. Ved at de eksempelvis får inn ujevn spenning eller overoppheves av spenningsøkning. Spesielt i nyere tid er dette viktig, da større deler av lasten i elektriske systemer inneholder sensitive elektriske komponenter som mikroprosessorer, som er mer fintfølede for spenningskvalitets-problemer [2].

#### Sikkerhet

I områder som er sårbare ved strømløshet, som f.eks. sykehus, er det viktig at spenningskvaliteten holdes på et godt nok nivå til å ikke slå ut vern eller forårsake langvarige strømbrudd. Spesielt for slik vital infrastruktur finnes det krav for avbruddsfri strøm. Det er blant annet krav i NEK 400 til at det skal være IT-nett i medisinsk område der det skal utføres kirurgiske inngrep der feil kan medføre fare for liv og helse. Det er fordi første feil ikke fører til at

strømmen kuttes, siden IT-nett ikke vil endre potensialforskjell imellom faser etter overspenningsvernet til jord slår ut. I tillegg er det krav til nødkraft som kan kobles inn i fall strømmen skulle falle bort i medisinske områder [3].

### Komfort

Hjemmedatamaskiner og internett-bruk har hatt en stabil økning siden 90-tallet. Idag er personlig datamaskin og internett-tilgang nærmest en selvfølge. Det medfølger at terskelen for irritasjon når disse ikke fungerer blitt betydelig lavere. Mange moderne apparater er veldig følsomme overfor spenningskvalitet. Det har for eksempel blitt observert at ladestasjoner for elbil er designet for å avbryte lading, heller enn å utsettes for dårlig spenningskvalitet.

En annen potensielt ubehagelig virkning av dårlig spenningskvalitet er flimmer i lyskilder. Mennesker er sensitive for slikt flimmer. Dårlig spenningskvalitet, spesifikt spenningsflikker, får lyskilder til å flimre. Dette kan være spesielt irriterende når flimmeret oppstår i dataskjermer, lyspærer eller lysrør. Fenomenet spenningsflikker er forklart nærmere i kapittel 3.5.3.

## 3.5 Ledningsbundet støy

Ideelt sett skal spenningskurven i et vekselstrøm-system være en jevn sinuskurve (de kan potensielt ha periodiske former som ikke er sinusoidale). Dessverre er moderne kraftsystemer store og komplekse, og ethvert system inneholder utallige lastkomponenter der ingen fungerer som en ideell ohmsk motstand. Disse komponentene, samt generatorsystemer, kan få den i utgangspunktet ideelle sinuskurven til å ikke gjenkjennes som sinusoidal i det hele tatt hvis lasten ligger langt ute i et system med mange slike komponenter.

### 3.5.1 Harmoniske forstyrrelser

I elektriske systemer oppstår det ofte høyfrekvente avvik fra den jevne 50 Hz sinusformen som vi ønsker i distribusjonssystemet vårt. I noen få tilfeller oppstår det tilfeldige bølgeformer, men i de aller fleste tilfeller har forstyrrelsene som oppstår en frekvens som er et heltalls-multiplum av den fundamentale bølgeformens frekvens. Disse forstyrrelsene kalles harmoniske forstyrrelser. Eksempelvis er en bølge på 100 Hz andreharmonisk til en 50 Hz fundamental, og en 150 Hz bølge er tredjeharmonisk. Harmoniske forstyrrelser oppstår ofte periodisk, og består i flere sykluser. Om man studerer et kraftsystem over lang tid kan man ofte se mønstre i hvilke og hvor store harmoniske forstyrrelser som dukker opp på ulike tider av døgnet. Harmoniske spenninger er ofte et resultat av ikke-lineære laster i nettet, det vil si en last som ikke trekker strøm proporsjonalt med den påsatte spenningen. Når sinusoidal spenning settes over en ikke-lineær last, blir den resulterende strømkurven forvrent. Den nye forvrengte strømkurven er lik fra periode til periode, og den kan uttrykkes som en sum av sinusbølger. Frekvensen til hver sinusbølge er et heltallsmultiplum av fundamentalfrekvensen og denne summen kan uttrykkes som en *Fourier-rekke*. På grunn av denne egenskapen, er det mulig å dekomponere en forvrent strøm- eller spenningskurve til summen av sine harmoniske komponenter[12].

Ulineære laster er svært vanlig i nettet, og vanligvis står de innkoblet i signifikante perioder. Forstyrrelser kan oppstå som ikke-heltalls multiplum av fundamentalen og kalles da Interharmoniske. Hovedårsaken til interharmoniske forstyrrelser er kraftelektronikk som bedriver frekvensomforming av spenningssignalet. Det kan også oppstå i systemer med lysbueovner eller store induksjonsovner [2]. I solcelleanlegg oppstår harmoniske forvrengninger gjerne i inverteren. Inne i inverterne skjer det hele tiden raske automatiske omkoblinger for å omdanne likestrømmen produsert i solcellene til vekselstrøm.

**Total Harmonisk Forvrengning** (eng. Total Harmonic Distortion (THD)) er et mål på hvor mye harmonisk forstyrrelse i alle frekvenser som finnes på et signal. I denne oppgaven er signalet som er interessant spennings- og strømkurver.

THD er definert som raten til summen av rms-verdien av et sett harmoniske frekvenser mot rms-verdien til fundamentalen.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} M_h^2}}{M_1} \quad (3.1)$$

THD beskriver den *effektive* verdien til den harmoniske komponenten. Det kan brukes til å estimere en forventet varmetvikling som stammer fra harmonisk forvrengning [2].

### Triplen-harmoniske

Triplen-harmoniske er odde multipler av den tredjeharmoniske, dvs. av harmonisk orden  $h = 3, 9, 15$  osv. I IT-nett risikerer man overoppheting i transformatorer som leverer til enfase laster med stort triplenharmonisk innhold [2].

## 3.5.2 Transienter

En transient, ofte omtalt som transient overspenning, er en uønsket momentan endring i spenningsnivåer. En transient forstyrrelse forsvinner ofte i løpet av noen få sykluser. Transienter kan oppstå som et resultat av lynnedslag, momentane feil eller kondensatorer som kobles til eller fra. Transienter er ofte observert i forbrukersiden av nettet som et resultat av koblingsfenomener hos brukere.

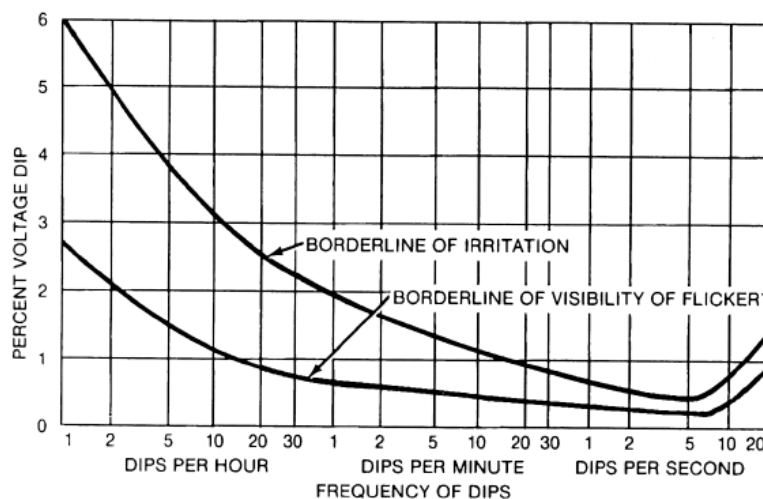
Transienter kan også oppstå i kraftelektronikk som f.eks. transformatorer pga et fenomen som kalles *ferroresonans*. Ferroresonans beskriver en form for resonans som oppstår om man har en kapasitans i sammenheng med en jernkjerne induktans. Det kan skape problemer i kretser der man eksempelvis har en kapasitans i serie med en transformator [2]. Spenningene som oppstår av ferroresonans er gjerne svært kaotisk formet og har ikke konstant frekvens. Forstyrrelsene kan også ha høye spenninger og strømmer. Om ikke fluktueringene er kraftige nok til å slå ut vern, kan forbrukere merke at elektriske lyskilder flimrer som resultat av de raske spenningsvariasjonene.

Inverterne som er brukt i denne oppgaven er transformatorløse. De bruker en teknikk som kalles Pulse Width Modulation (PWM). Denne metoden for å generere AC-strøm produserer også transienter og harmoniske forvrengninger på grunn av omkoblinger av halvledere [5].

Store transienter og overspenninger kan oppstå som resultat av lynnedslag. Det skal ikke tas hensyn til i denne oppgaven, da det allerede er krav i dagens standarder for tilstrekkelig beskyttelse fra lynnedslag i kraftelektronikk.

Linjematingstransienter oppstår når en bryter slås inn, som kobler en strømlinje til et kraftsystem. Disse transientene har vanligvis liten spenning i forhold til fundamentalen og dør ut etter omtrent en halv syklus. De skaper vanligvis ikke problemer [2].

### 3.5.3 Flikker



Figur 3.1: General Flicker Curve, hentet fra IEEE 141 [13]

Flikker er et mål på ustabilitet i spenningssignalet. Ved flikker i et kraftsystem, kan det oppleves at elektriske lyskilder hurtig svekkes og styrkes i intensitet. Noen ganger kan det observeres som flimmer i dataskjermer, eller ustabil internettilkobling dersom et modem utsettes for flikker. Variasjonen i potensial som et resultat av spenningsflikker er ofte innenfor satte driftsgrenser, men det oppleves gjerne som irriterende hos strømkunder. Flikker er altså et problem hovedsaklig når det observeres [2]. Det er ikke vanlig at flikker måles ved laster i kraftsystemet, men registreres heller om kunder klager. I figur 3.1 vises den menneskelige grensen for å registrere flimmer i en lyskilde på forskjellige spenningsnivåer (borderline of visibility), samt den menneskelige grensen for irritasjon over flimmer i en lyskilde (borderline of irritation). Det er denne kurven som er brukt som basis for grensene satt i standarder og forskrifter. Da er det *borderline of irritation* kurven som benyttes for relevante spenningsnivåer.

Når flikker måles, gjøres det i intervaller på 10 minutter ( $P_{st}$  short time flicker) og 2 timer ( $P_{lt}$  long time flicker). [14]

$$P = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_0} * 100 \quad (3.2)$$

Der  $V_{max}$  er høyeste måle spenningsverdi i tidsintervallet,  $V_{min}$  er laveste målte spenningsverdi og  $V_0$  er den gjennomsnittlige verdien av normal operasjonsspennning. Flikkerverdien  $P$  er gitt i prosent av  $V_0$ . Ifølge IEC61000-4-15 skal  $P_{lt}$  være en funksjon av 12 påfølgende  $P_{st}$ -verdier. [15]

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{sti}^3}{N}} \quad (3.3)$$

Der  $N=12$ .

Det er typisk for observerbart flikker å finnes i området mellom 0,5 til 30 Hz, og ha en amplitude på høyere enn omtrent 1% av grunnsignalet. Norske forskrifter har satt en begrensning på flimmerintensitet for systemer med nominelt spenningsnivå  $U_n$ ,  $230 V \leq U_n \leq 35 kV$ , til å være 1,2 p.u. for korttidsflimmer 95% av tiden i en uke og 1,0 p.u. for langtidsflimmer 100% av tiden i en uke. [14]

Flikker er et av de større problemene solcelleanlegg står ovenfor når det kommer til integrering i kraftsystemet, sammenliknet med andre generatoranlegg. Flikker i solcelleanlegg kommer når den mottatte strålingen på panelene er ustabil, raskt varierende. Det kan skje som konsekvens av skydekke, soloppgang/solnedgang, smuss eller skyggelegging på panelene.

I noen tilfeller kan flikker komme av interharmoniske spenninger. En rapport fra 2017 *IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia* [4] forteller at interharmoniske spenninger er normalt å oppleve i systemer med PV anlegg. Der vises det at disse signalene kommer fra blant annet MPPT-algoritmen, spesielt når anlegget opererer under lav-effekt tilstander [4] [16]. På grunn av at MPPT-funksjonen ønsker høyest mulig effekt transformert i inverteren, må den raskt endre på antall omkoblinger når innstrålingen er i rask endring. Flere omkoblinger fører til interharmoniske forstyrrelser, og da også flikker [5]. Mer om MPPT og påvirkning på spenningskvalitet kommer senere i dette kapittelet.

#### **Begrensning av flikker.**

En måte å senke påvirkningen av flikker hos lastene, er å øke kapasiteten til distribusjonssystemet. På den måten blir den relative innvirkningen til flikkeret mindre.

### **3.5.4 Effektfrekvensvarians**

I et kraftsystem er det kontinuerlig endring i lasten og generering av energi. I denne dynamiske balanseringen oppstår det forskyvinger av frekvens. Omfanget av frekvensforskyvingen vil være avhengig av hva som skjer i lasten og responsen fra generator. Ofte er store frekvensvariasjoner et resultat av at en stor del av lasten blir slått ut, eller om en signifikant del av generatorene slutter å produsere



energi. I et moderne sammenkoblet kraftsystem er det uvanlig å oppleve store frekvensvariasjoner. Det er mye mer sannsynlig at det skjer i isolerte systemer med få generatorer [2].

### 3.5.5 Spenningsubalanse

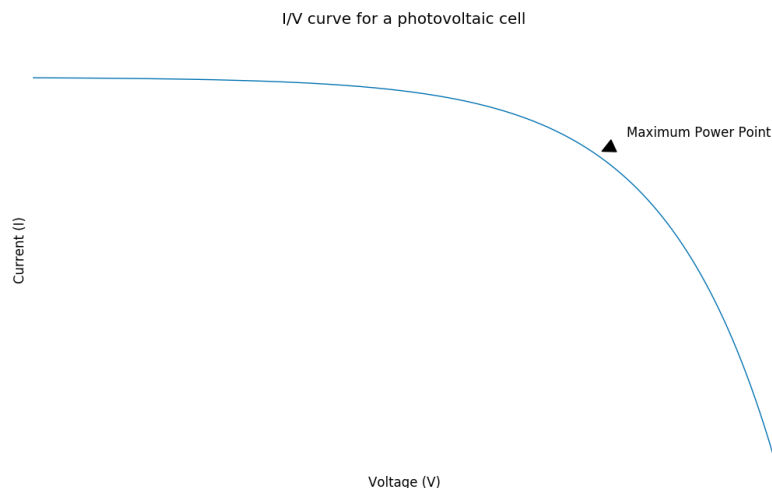
I fra den internasjonale standarden IEC61000-2-1 er definisjonen på spenningsubalanse: en tilstand der trefasespenninger har forskjellig amplitude eller er forskjøvet fra sine normale  $120^\circ$  faseforhold, eller begge deler.

Den vanligste årsaken til spenningsubalanse er ujevn fordeling av enfase-laster. I et lavspenningsystem er det vanlig for en enfase-last å være koblet imellom en av distribusjonssystemets faser og nøytral, eller imellom to faser, avhengig av om systemet er TN- eller IT-nett. Leverandøren ønsker å ha omtrent like høy belastning på hver av fasene for å opprettholde balanse. Det er når en av fasene opplever større eller lavere last enn de to andre ubalanse oppstår [17].

## 3.6 Forstyrrelser på DC siden.

RF-forstyrrelse på DC linjer genererer et elektromagnetisk felt rundt kabligen. Dette er noe man må ta hensyn til i anlegg som har lange DC-kabler før strømmen kan omgjøres. Det kan f.eks. være tilfelle i større solcelleanlegg som bruker sentralinvertere med mange tilkoblede arrayer.

### MPPT.



Figur 3.2: Framstilling av I/V karakteristikken til en enkelt solcelle. "kneet" på kurven, som er merket med *Maximum Power Point* er det optimale operasjonspunktet for maksimal effekt fra cellen.

Et solcellepanel har en I/V kurve som ser ut som figur 3.2. Det optimale driftspunktet for å få mest mulig effekt ut av panelet finnes på "kneet" i I/V kurven. Dette punktet kalles på engelsk Maximum Power Point (MPP). Dette

punktet endrer seg kontinuerlig på grunn av endringer i driftsoprasjoner som temperatur, luftfuktighet og innstråling. Siden det ønsket driftspunktet er i kontinuerlig bevegelse, er de fleste moderne solcelleanlegg utstyrt med en algoritme, Maximum Power Point Tracker (MPPT), som forsøker å holde driften av panelene på MPP til enhver tid. MPPT-algoritmen kan forårsake små sprang i spenningen på DC-siden. Om systemet opererer i lav-effekt situasjoner kan disse små spenningsprangene bli desto mer merkbare [4] [16].

### 3.7 Utstrålt støy

Fluktuerende spenninger i ledere skaper elektriske felter. På samme vis skaper fluktuerende strømmer magnetiske felter. Disse feltene kan bevege seg igjennom luft og kabelisolatorer. Etter å ha beveget seg en distanse tilsvarende  $\lambda/(2 * \pi)$ , der  $\lambda$  er bølgelengden, vil både elektriske og magnetiske felter være omdannet til planbølger (elektromagnetiske felter). Ledere med mye støy fungerer i praksis som ikke-intensjonelle radiosendere. Dette er et velkjent problem, og det finnes forskrifter om hvor store radiofrekvens-utslipp som er tillatt [18]. I et miljø der det finnes elektriske og magnetiske felter, vil ledere som utsettes for denne elektromagnetiske strålingen oppleve en indusert strøm. Den induserte strømmen vil forstyrre bølgeformen i en AC leder. For utstyr som opererer dårlig under støy, er det vanlig å omslutte det med en jordet metallboks. Metallboksen absorberer store mengder elektromagnetiske bølger, slik at utstyret på innsiden ikke gjør det. På det viset stoppes forstyrrelser fra direkte innstråling. Allikevel kan strålingen indusere forstyrrelser i ledere utenfor boksen, som kan forstyrre utstyret via ledningsbundet støy. På samme måte kan man redusere utstrålt støy ved å omslutte en strålingskilde med en jordet metallboks. Det kan allikevel utstråles fra utgående ledninger.

I vårt moderne samfunn brukes elektromagnetisk stråling i en stor mengde infrastruktur, f. eks. tv- og radiosignaler og telefoni. Kraftelektronikk som har høy utstråling kan kludre til disse signalene og senke signalkvaliteten. I verste fall blir signalene uleselige for mottakere, det oppleves da som det som kalles 'hvit støy'. Det kommer frem som grå/hvit/svart-kornet tv sending eller utolkelig skurring på radio.

### 3.8 Jordingsystemer

Jord i et kraftsystem er definert som en tilkobling til Jorden eller et annet stort ledende legeme. Det brukes for å etablere og opprettholde jordens potensiale i ledere tilkoblet, og for å lede jordstrøm til og fra jord. En tilkobling til jord må ha enten ingen impedans eller tilstrekkelig lav impedans til at strøm effektivt kan flyte til jord [19].

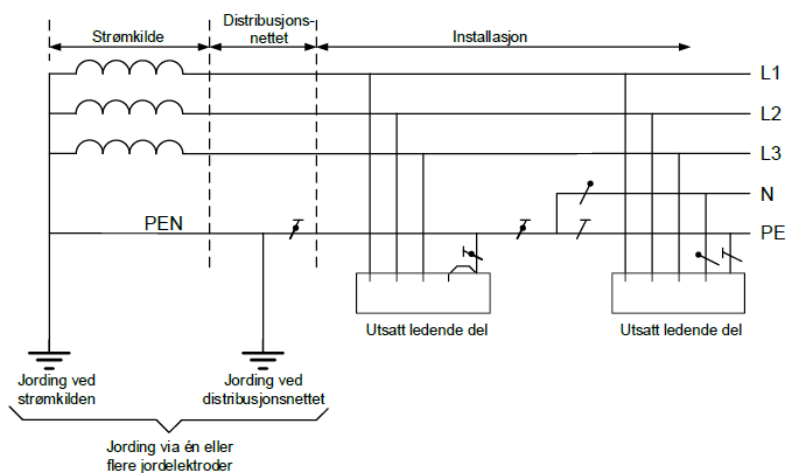
I Norge bruker vi to ulike jordingssystemer i lavspennings distribusjonssystemer. I omtrent 20% av Norge brukes TN-systemer, som forøvrig er vanligst andre steder i Europa [8]. Et TN-system er vist i figur 3.3.

Det meste av Norges distribusjonsnett er IT-system [8]. I et IT-system er transformatoren kun koblet til jord via en impedans. Nullpunktet i disse transformatorene kalles flytende, det har ingen fast referanse i jord slik som TN-transformatorene har. Et IT-system er vist i figur 3.4. Det er denne typen

jordingsystem det er mest interessant å undersøke for denne oppgaven, da hypotesen er at IT-nett er mest utsatt for EMC-problematikk. Laster i IT-nett er jordet separat eller felles [3].

Om ledningsbundet støy oppstår i et system kan det ledes bort til jord eller i en nøytralleder. For en PE-leder er den en øvre grense på 10 mA som kan flyte under normal drift. Om denne strømmen overstiges skal det benyttes en forsterket beskyttelsesleder [3].

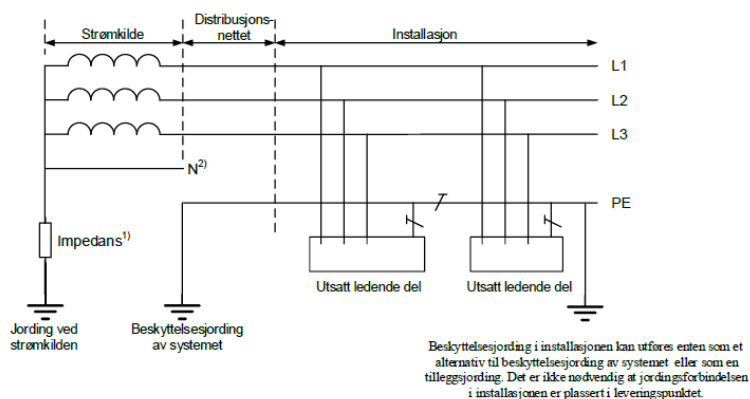
Det norske IT-nettet har generelt lav kortslutningsytelse ( $I_{kmin}$ ) [7].



MERKNAD – Det kan etableres tilleggsgjording av PE-leder i installasjonen.

VEILEDNING - Bruk av PEN-leder nedstrøms hovedfordeling i en bygning er ikke tillatt i Norge.

Figur 3.3: Et TN-C-system med PEN-leder. Bildet er hentet fra NEK 400 [3]



MERKNAD – Det kan etableres tilleggsgjording av PE-leder i installasjonen.

1) Systemet kan forbindes til jord via en tilstrekkelig høy impedans. Denne forbindelsen kan for eksempel etableres i nøytralpunktet, det kunstige nullpunktet eller i faseleder.

2) I Norge er distribuert nøytralleder ikke tillatt.

Figur 3.4: Et IT-system med delt jord ute i systemet. Bildet er hentet fra NEK 400 [3]

## 3.9 Spenningskvalitet og sikkerhet

### 3.10 Standarder

I Norge er det NVE som har hjemmel til å sette begrensinger på leveringskvalitet. De forvalter Forskrift om Leveringskvalitet i Kraftsystemet (FoL), som dekker mange av begrepene innenfor spenningskvalitet.

I Norge refererer vi også til NEK400 for spenningskvalitet-problemstillinger. NEK400 er en norsk bearbejdet versjon av IEC 60364-serien av internasjonale standarder og CENELEC HD 60364-serien av europeiske standarder. NEK400 omhandler sikkerhet i utførelse og operasjon av elektriske lavspenningsinstallasjoner.

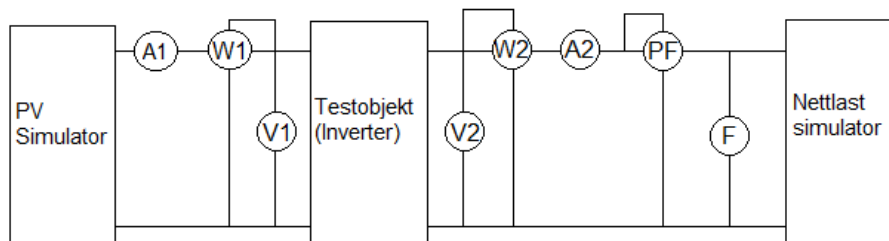
I EU-direktiver finnes det grenser for EMC-realterte problemer.

Her er en liste over spenningskvalitetsgrenser for lavspenningsnett med tilhørende standarder som benyttes i denne oppgaven:

- Spenningssignalenes usymmetri skal ikke overstige 2%, målt i gjennomsnitt over 10 minutter.
- Kortvarige overspenninger, underspenninger eller spenningsprang:  
 $\Delta U_{stasjonær} \geq 3\%$  maks 24 hendelser på en 24-timers periode.  
 $\Delta U_{maks} \geq 5\%$  maks 24 hendelser på en 24-timers periode.
- Flikkerintensitet:  
Korttidsintensitet,  $P_{st}$  [p.u.]  $\leq 1,2$  i 95% av tiden i løpet av en uke.  
Langtidsintensitet,  $P_{lt}$  [p.u.]  $\leq 1,0$  i 95% av tiden i løpet av en uke.
- Harmoniske forvrengninger:  
THD skal være lavere enn 8% i gjennomsnitt over 10 minutter og lavere enn 5% i gjennomsnitt over en uke. De følgende individuelle harmoniske spenninger skal ha en øvre grense på  $U_h$  i gjennomsnitt over 10 minutter:

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%				

Tabell 3.1: Tabell for forskriftssatte grenser for individuelle harmoniske spenninger på et spenningsignal med nominell spenning mellom 230 V til 35 kV. Hentet fra FoL. [14]



Figur 3.5: Standard test setup som beskrevet i IEC 61683

### 3.11 EMC-design for solcelleanlegg

**RF-filtre:** På DC-siden av inverteren kan det plasseres et radiofrekvens-filter. Som navnet tilsier, brukes disse filtrene til å fjerne radiofrekvens-forstyrrelser på et DC-signal. Radiofrekvenser på DC-ledere forårsaker signifikante utstrålte elektriske- og magnetiske felter. Med andre ord hjelper RF-filteret med å redusere systemets elektromagnetiske emisjon.

**Harmoniske filtre:** På AC siden av inverteren skal det være montert et LC-filter for å motvirke de harmoniske forstyrrelsene som oppstår når inverteren omdanner DC til AC.

#### EMC-testing

Testing av solcelleinvertere skal skje i henhold til den internasjonale standarden IEC 61683. Der kilden (som simulerer solcellene) og lasten (som simulerer det ytre strømmettet) er nye kontrollert, og kan varieres for å teste ekstremtilfeller som kan oppstå i virkeligheten. [20] Testoppsettet er som vist i figur 3.5. Der inverteren i midten blir utsatt for en variasjon av signaler inn fra en spenningsoscillator som simulerer et solcelleanlegg under forskjellige driftsoperasjoner. Samt en variabel last på høyresiden som simulerer et strømmett under diverse suboptimale forhold som kan gjøre operasjonen til inverteren vanskelig.

### 3.12 Tidligere Forskning

Et forsøk ble gjort på Ohau, Hawaii der målet var å finne under hvilke operasjonsvilkår flikker oppstod i strømmett med høy penetrering av PV-effekt. Fokuset var på ulikt skydekke og ulike årstider. I artikkelen beskrives det hvordan innstrålingsdata fra Ohau ble matet inn i en modell som simulerer en rekke solcelleanlegg som mater effekt ut til en simulert nett. Innsamlet innstrålingsdata ble analysert for å finne sprang i innstråling, siden innstrålingssprang er en kjent faktor i produsert flikker fra solcelleanlegg. Artikkelen insinuerer i sin konklusjon at dagens standarder for flikkeranalyse har for lav oppløsning når det kommer til å analysere flikker fra solcelleanlegg, siden endringer i produksjon fra solceller kan skje raskt med skiftende skydekke. Flikkeret som injiseres i nettet kan derfor være kortvarig, men merkbart. [21]

Et forsøk ganske likt det beskrevet i denne rapporten ble gjort i Hellas, der måling av THD og reaktiv effekt var i fokus. En rekke moderne 3-fase solcelleinvertere ble testet og de ble sammenliknet med henhold på de viktigste faktorene

for spenningskvalitet. Målet med eksperimentene som ble gjort var å kartlegge spenningskvalitetsproblemer som er til stede i solcelleinvertere. Målingene ble gjort under reell operasjon av inverterne der de ble matet med DC-spenning fra solcellepaneler og matet trefaset spenning ut til en reell last, og ikke imellom simulatorer i et laboratorium. Oppsettet for målingene til forsøket er ganske likt det som presenteres senere i denne oppgaven. Konklusjonen som ble nådd var at THD var høy i lavproduksjonsperioder, og sank jo nærmere nominelt produksjonsnivå inverterne fikk jobbe. Samt at THD målt på spenningssignalet antagelig er avhengig av aktiv effekt i output av inverteren. [22]

En omfattende rapport som forklarer utfyllende om EMC og sikkerhet rundt solcelleanlegg ble utgitt av en prosjektgruppe av tyske, østerrikske og spanske forskere. [1]

Disse tre ble brukt som inspirasjon til hvordan å strukturere denne oppgaven og dens målinger, parametre og omfang.

### 3.13 Oppgavens Begrensninger

Denne oppgaven ble utført uten midler tilgjengelig på budsjett. Instrumenter er valgt ut fra hva som var tilgjengelig på NMBU eller lett til låns fra lokale operatører. Anlegget ble valgt på grunn av sin nærhet til universitetet og lett tilgang. Andre anlegg i nærheten av Ås ble undersøkt som aktuelle, men med negativ eller ingen respons fra eierne. Sørås-jordet er en god lokasjon for disse målingene uansett, siden det ligger en meteorologistasjon med pyranometer for å måle innstråling. Da kan forskjellige faktorer for spenningskvalitet settes opp imot innstrålt effekt. I en ideell situasjon kunne en fullstendig EMC-uttredelse av anlegget blitt utført. En slik uttredelse krever mye dyrt utstyr og tilgang til et velutrustet laboratorium.

Derfor fokuserer denne oppgaven på ledningsbundet støy av variant som kan plukkes opp av Metrum SPQ, som ble lånt ut fra NMBUs eiendomsavdeling.

Det var ønskelig å måle interharmoniske forstyrrelser i denne oppgaven fordi interharmoniske spenninger er en kilde til flikker. Dessverre kunne ikke Metrum-instrumentet plukke de opp.

Siden Metrum SPQ var på utlån fra NMBUs Eiendomsavdeling, var det begrenset med tid til å utføre målinger med det. Eiendomsavdelingen behøvde utstyret selv for å utføre spenningskvalitetsmålinger på universitetets elektriske systemer. Det er derfor måleperiodene i denne oppgaven er valgt; for å få en periode i bunkeren, en periode like bak panelene og en referanseperiode i bunkeren og i tilfelle noe i systemet hadde endret seg iløpet av andre måleperiode.

Det er skrevet lite litteratur på temaet EMC og ledningsbundet støy på norsk, noe som gjør at ikke alle begreper like veldefinert på norsk som på engelsk. Noen ganger har forfatteren tatt seg friheter på å oversette enkelte begreper. Disse er nevnt i Nomenklatur-kapittelet øverst i denne oppgaven med engelsk oversettelse. Noen ganger brukes forkortede versjoner av uttrykk istedet for oversatte norske forkortelser, slik som eksempelvis THD, for å ikke skape forvirring med eksisterende litteratur. Disse forkortelsene finnes også i nomenklatur-kapittelet i starten av denne rapporten.

## 4 Metode

### 4.1 Litteraturundersøkelse

Første periode av 2017 ble brukt på å lete etter artikler og annen faglitteratur. Som referansedokument for stort sett alt som dreier seg om spenningskvalitet ble boken *Electrical Power Systems Quality* brukt. Tidligere forsøk med forskjellige likhetstrekk til forsøket som var ønsket å gjøre ble søkt opp. med søkeordene: Power quality, power quality measurements, PV inverters, EMC, harmonics from PV, flicker from PV, EMC PV systems, EMC in renewable energy, power quality issues in PV og power quality Mitigation.

Databasene som ble brukt er her listet opp i rekkefølgen mest brukt til minst brukt:

- IEEE Explore
- Research Gate
- Google Scholar
- Standard.no
- Lovdata.no
- Bibsys.no

I første omgang var det ønskelig å finne forsøk av liknende art. Rapporter som inneholdt beskrivelser av spenningskvalitetsmålinger som gjøres ved effektproduksjonsanlegg, for å finne hvilke parametre som var mulig og ønskelig å måle og på hvilken måte. Søkene ble dels brukt som inspirasjon til hvordan å utføre denne oppgaven og samtidig unngå å gjøre forskning som allerede er gjort på nytt. Fokus i søkene var også på relevante norske, europeiske og internasjonale standarder. Samt ikke-norske nasjonale standarder spesifikt vinklet mot solcelleanlegg.

Liknende forsøk har blitt gjort andre steder i verden. Norge er i en spesiell situasjon med tanke på kraftsystemet i det at vi er et av få land som bruker IT-nett i stor utbredelse.

I dokumentene som ble funnet interessante i søkeprosessen, ble kildelisten gjennomgått. Siteringer som så ut til å være av interesse ble også studert.

### 4.2 Anlegget på Sørås

Feltprøvene ble foretatt på Sørås meteorologiske stasjon på invertere som opererer under virkelige forhold (ikke i laboratorium), og leverer til en reell, ikke-optimal last. På denne måten kan anleggets karakteristikk under ulike operasjonsforhold kartlegges.

På Sørås meteorologiske stasjon er det satt opp to arrayer med 12 solcellemoduler på hvert. Solcellene leverer sammenlagt en effekt på 6 kW. Siden



Figur 4.1: Oversikt over de to arrayene med solceller på Sørås-jordet.



Figur 4.2: Bunkeren der sikringsskapet og sammenkoblingspunktet med distribusjonsnettets finnes.

modulene er koblet til invertere som sender ut en fase-strøm, er de koblet opp slik at array 1 mater ut strøm på fase **1** og **2**, og array 2 mater ut strøm på fase **2** og **3** for å balansere systemet på best mulig vis. Noe effekt brukes på stasjonen til å drive meteorologiske måleapparater, datamaskiner osv., men størsteparten sendes ut til et 230 V fordelingsnett på Ås.

Arrayene er satt opp slik at det er 75 m i ledningslengde fra innkoblingspunktet med nettet til første array. Fra første array til andre array er det 25 m i ledningslengde.

Rundt anlegget er det tilnærmet ikke noen andre kraftelektroniske komponenter. Signalene som måles ut fra solcellene regnes da til å være utkludret av annen kraftelektronikk.

Under målingene var panelene til en viss grad dekket av smuss. Smuss på panelene fungerer som en delvis jevn skyggelegging. Det vil bidra til redusert generert energi.

Før målingene startet, ble det sagt av de som driver anlegget at det har vært en uoppklart jordingsfeil på eller ved anlegget, og at jordfeilbryteren ofte slo ut. Apparatet ble koblet opp med dette i tankene, men det ble ikke observert at jordfeilbryteren slo ut i løpet av måleperioden. Det ble heller ikke observert noen store jordstrømmer.

### 4.3 Måleinstrument

Måleinstrumentet benyttet for å måle spenningskvalitet i denne oppgaven er av typen Metrum SPQ. Instrumentet har mulighet for tilkobling av fire sløyfer til måling av strøm i ledere og fire spenningsprober for måling av spenning i innkoblingspunktet. I denne oppgaven er det brukt tre strømsløyfer for å måle strøm i tre faser, og fire spenningsprober for å måle spenning i tre faser pluss referansejord. Bølgeformen for strøm og spenning på målepunktene måles med en samplingsfrekvens på 12,8 kHz slik at avvik fra bølgeformen kan plukkes opp.



Apparatet registrerer følgende parametre hvert tiende minutt:

- Rms verdi for spenning og strøm i tre faser.
- Flikkerverdier i kort tid, Pst.
- Aktiv, reaktiv og total effekt.
- THD i hver fase og individuelle harmoniske i hver fase opp til femtiende harmoniske. Både for spenning, strøm og effekt.
- Spenningsubalanse.
- Frekvens.

I tillegg registreres langtids-flikkerverdier hver andre time.

Apparatet kan innstilles til å registrere eventer. Når forutsetningene for en event møtes, lagres info om signalet (strøm eller spenning) med en oppløsning på 12,8 kHz. Tidsintervallet man ønsker lagret oppgis i antall perioder av grunnsignalet.

Følgende hendelser registreres av apparatet som "events":

- Kortvarige underspenninger eller overspenninger (sags/swells) registreres dersom spenningen varierer mer enn 0.1 p.u. fra nominell linjespenning. I noe litteratur omtales sags og swells som underkategorier av transienter. I denne oppgaven vil de bli omtalt separat.
- Transienter registreres dersom amplituden er større enn 0.5 p.u. av nominell linjespenning. Dette ble endret manuelt imellom måleperiode 1 og 2 til å registrere dersom amplituden var større enn 0.2 p.u. av nominell linjespenning istedet. Det var fordi få transienter hadde blitt registrert i måleperiode 1.

Eventer som registreres i måleperioden skrives ut som grafer i Metrum Viewer, som er leseprogramet som følger med måleapparatet. Om det er valgt at resultatene skal skrives ut i en rapport, kan eventene bli med i denne. Da skrives de bare ut som en event av en type (eksempelvis transient eller sags) og en størrelse gitt i p.u., uten bølgeform.

I laboratoriet ble apparatet testet. Den høyeste spenningsfrekvensen det klarte å måle var 2,5 kHz, som tilsvarer den 50ende harmoniske til en fundamental på 50 Hz. Selv om intervallet kan endres til å bli større i programmet (Metrum PQ Controller), så er den høyeste frekvensen som måles 2,5 kHz.

Apparatet registrerer når det dukker opp transienter, sags, swells samt kontinuerlig innsamling av verdier for langtids- og korttidsflikker, THD og individuell fordeling av harmoniske spenninger opp til 50ende harmoniske.

Apparatet har en samplingsfrekvens på 12,8 kHz. Ifølge *Nyquist-Shannon samplings teorem*, må man ha en samplingsfrekvens på dobbelt så mye som den høyeste frekvensen man har tenkt å måle [23]. I vårt tilfelle blir det da i beste fall mulig å fange opp frekvenser på 6,4 kHz. Det kan eksistere forstyrrelser med høyere frekvenser, og de kunne også være interessante å måle. De kommer derimot til å eksistere i nærhet av støykilden, siden hørfrekvente ledningsbundede forstyrrelser dempes raskt over ledningslengde. [2]

## 4.4 Invertere

Inverterne som er koblet opp på baksiden av solcellepanelene er mikroinvertere av typen APsystems YC500A. Hver inverter har merkeeffekt på 500 W og er koblet opp mot to paneler på 250 W merkeeffekt. Merkedata for inverterne er vist i tabell 4.1. Anlegget består av to PV-arrayer med 12 paneler og 6 invertere på hver. Anlegget har en total effekt på 6 kW. Det ville vært interessant å måle strøm- og spenningsforstyrrelser imellom inverterne. Da kunne det blitt observert hvordan forstyrrelsene bygger seg opp imellom dem og studere hvor mye hver enkelt støyer. Dessverre var koblingen inverterne imellom hermetisk forseglet. Ledninger måtte ha blitt kuttet over for å komme til med måleutstyr på disse punktene. Det ble da valgt et målepunkt nærmest mulig inverterne, i strømtavlen montert på baksiden av panelene. Dette målepunktet regnes å være en ubetydelig kabellengde fra modulene og inverterne på stativ 1, 25 m kabellengde fra stativ 2 og 100 m kabellengde fra innkoblingspunktet med nettet.

Det er viktig å notere seg for dette eksperimentet at inverterne som er brukt omtales av produsenten som sitt flaggskipprodukt. Det vil si at de antagelig er utstyrt med bedre filtreringsmekanismer mot støy enn de fleste mikroinvertere på markedet. Det er allikevel spennende å studere hvordan de støyer.

Parameter	Verdi
MPPT spenningsområde	22-45 V
Maksimal spenning input	55 V
Maksimal strøm input	12 A * 2
Nominell spenning output	240 V
Spenningsområde	211-264 V
Maksimal strøm output	2.08 A
Effektfaktor	>0.99
Total harmonisk forvrengning	<3%

Tabell 4.1: Merkedata for mikroinvertere APsystems YC500A. [24]

## 4.5 Oppkobling

Første måleperiode ble gjort i bunkeren ved innkoblingspunkt med lavspenningsnettet vist i figur 4.3. Spenningsproben ble koblet inn før jordfeilbryter og hovedbryter, på solcellesiden. På fasene markert med L1, L2 og L3 på figur 4.3. Den nøytrale spenningsproben ble koblet til jord. Strømsløyfene ble lagt rundt faselederne på venstre side av skapet. Disse er *etter* jordfeilbryter og hovedbryter. Slik at hvis en av disse skulle slås ut, så synes det på målingene ved at strømmen går til null. Siden spenningsproben er koblet til på solcellesiden av bryterne, ville det fortsatt være mulig å se spenningen på anlegget etter at jordfeilbryter er slått ut. Apparatet ble koblet til nettstrøm. Jordingen i stikkontakten her er en delt jord med solcelleanlegget.

Denne måleperioden varte i 13 dager. fra 13. juni til 26. juni. Etter denne observasjonsperioden, ble det ikke registrert noen transienter, sags eller swells som oversteg grensene satt i FoL [14]. Sensitiviteten til måleapparatet ble derfor satt opp med hensyn til transienter, sags og swells, etter anbefaling



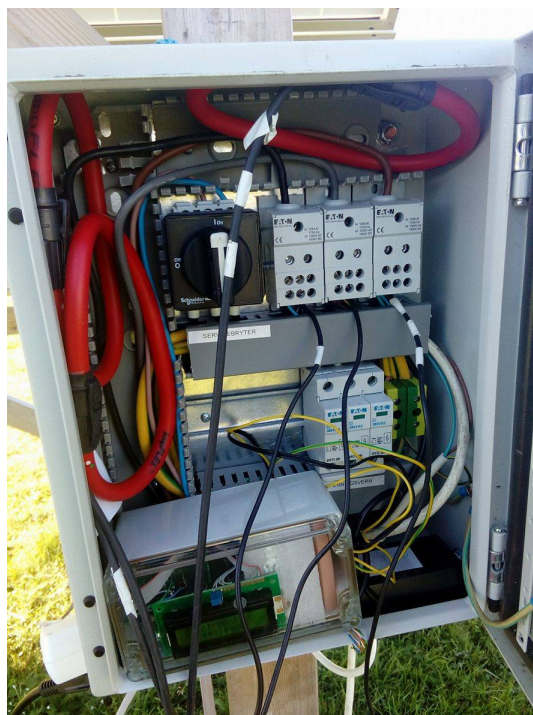
Figur 4.3: Hovedtavle for anlegget i bunkeren. Dette er ett av to målepunkter som ble benyttet i denne oppgaven.

fra veiledere. Grensen for at slike events skulle registreres av apparatet er i standardinnstillingene tatt rett ut ifra FoL. Det er i denne oppgaven et ønske om å også plukke opp transienter, sags og swells av lavere amplituder. Apparatet ble koblet fra i omtrent 20 minutter for å endre på innstillingene, slik at flere events ble plukket opp.

Registreringsterskelen for transienter ble endret til å være 20% av amplituden til nominell verdi i positiv og negativ retning. Og apparatet ble satt til å registrere bølgeform i to perioder før den respektive hendelsen og 5 perioder etter.

Etter målingene i bunkeren ble spenningskvaliteten målt ved tavlen plassert direkte bak solcellepanelene. Apparatet med strømsløyfer og spenningsprober passet ikke inn i skapet til strømtavlen. Derfor ble ledninger trukket ut fra skapet og ned til en plastboks på bakken der apparatet kunne ligge beskyttet fra vær og vind. Med ledninger trukket ut ifra skapet ble døren stående på gløtt. Siden skapet er utendørs, er det risikabelt å la døren stå åpen. Da er kretsene i skapet i fare for å bli utsatt for regnvann og dermed kortslutninger. For å ikke risikere lekkasje inn i skapet, ble det dekket til med byggplast.

Målingene ble foretatt på dette punktet i 7 dager. Tavlen er vist med måleapparat innkoblet i figur 4.4. Formålet med det var å se hvordan forstyrrelser dempes over avstand. Både forstyrrelser som kommer fra utenfor anlegget, altså fra strømmettet, og forstyrrelser fra anlegget. Siden høyfrekvente ledningsbundede forstyrrelser dempes fortere enn lavfrekvente over avstand, kommer det til å synes flere høyfrekvente forstyrrelser nær støykilden [2]. I en privat takmontert



Figur 4.4: Tavle ved solcellepanelene med påkoblede strømmålings-sløyfer rundt de utgående tre fasene og spenningsprober koblet inn på de korresponderende tre fasene til høyre for servicebryter. Nederst i skapet ligger en effektmåler som er tilknyttet et annet forskningsprosjekt på anlegget.

installasjon vil det bety at de høyfrekvente transientene kan skape trøbbel inne i huset der det er montert. Det er mindre sannsynlig at det kommer til å forstyrre andre hushold pga. distansen de må reise i ledninger.

Det var ønskelig å ha to måleperioder i bunkeren, en før og en etter måleperioden på panelene. Det var en periode på 20 dager der det ikke ble utført målinger etter måleperiode 1. I tillegg var sensitiviteten overfor sags, swells og transienter satt opp før måleperiode 2. Det fantes også en bekymring for at innstrålingsmengden var endret betydelig fra slutten av juli til midten av august på grunn av sesongbaserte værtilstander og endring i jordens tilt i forhold til solen. Selv om endret innstråling var hovedbekymringen, gjorde den ekstra måleperioden det også mulig å se på andre endringer som hadde skjedd i kraftsystemet på de 20 dagene uten måling. I innstrålingsgrafene som presenteres i kapittel 5, viser det seg at det var en nedgang i innstråling.

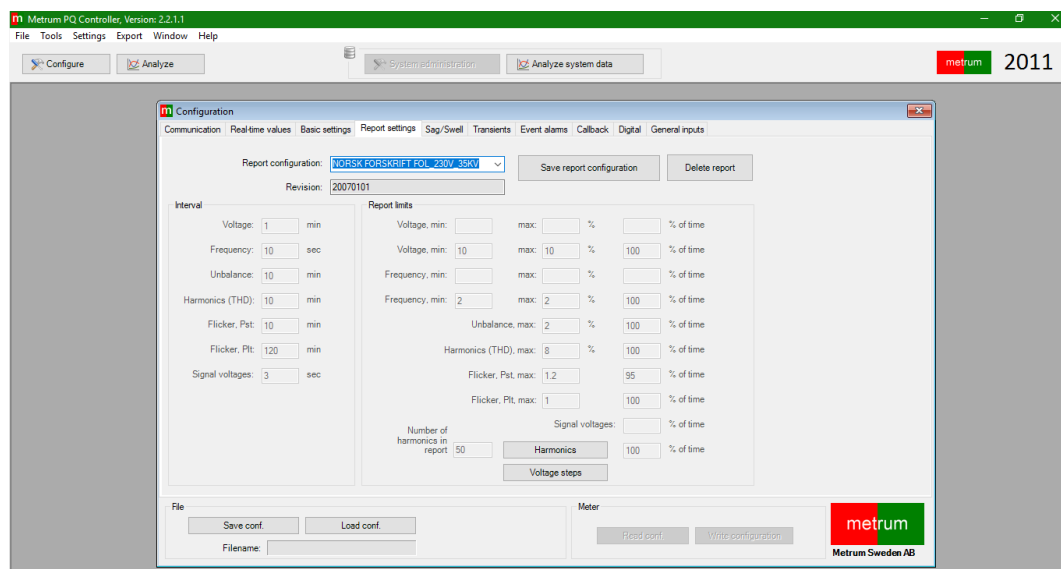
Måleperiode nr.	1	2	3
Målepunkt	Bunker	Panel	Bunker
Startdato	13. juli 2017	15. august 2017	22. August 2017
Sluttdato	26. juli 2017	22. august 2017	1. september 2017

Tabell 4.2: Tidsskjema for måling på ulike målepunkter.

I tabell 4.2 vises målepunktene og til hvilke tider de ble undersøkt. Første måling ble gjort over en periode på 2 uker, dobbelt så lang som de to andre måleperiodene. Det ble gjort for å bli kjent med måleapparatet og dets innstillinger. Grunnen til det lange tidsrommet på tre uker imellom første måling i bunkeren og andre måling ved panel var at det måtte legges ut et støpsel ved tavlen til panelene. Da måtte det autorisert personell til. Mellomtiden ble brukt på å analysere måleperiode 1 og elementer som kunne forandres i de senere måleperiodene.

Meteorologistasjonen der solcellene er plassert, registrerer global innstråling på et horisontalt plan i det synlige spekteret. Innstrålingen registreres i  $W/m^2$  og med 10 minutter imellom hvert målepunkt.

## 4.6 Analyse



Figur 4.5: Skjermdump av Metrum Controller. Bildet viser standard innstilling av måleapparatet med grenser satt til de som er gitt i FoL.

I programvaren som medfølger måleinstrumentet Metrum SPQ kan man lese ut mye relevant informasjon direkte i sanntid. Forskriftsmessige grenser for spenningskvalitet ligger inne i programmet, i henhold til FoL, den tilsvarende svenske forskriften EIFS 2011 og tilsvarende dansk forskrift DEFU-REK16 [14] [25] [26]. I dette forsøket ble det kun gjort målinger med norske forskrifter i tankene.

Om ønskelig kan det skrives ut en rapport som .docx fil, som kort forteller om spenningskvaliteten er akseptabel i forhold til parametrene som er lagt inn. I Norge vil disse parameterne vanligvis være grensene som er satt i FoL. I dette prosjektet er det ønskelig med høyere sensitivitet når transienter, sags og swells registreres. Det er relevant å se på mindre variasjoner i spenningskvalitet, siden formålet her er å utbedre forskrifter eller standarder.

Innstrålingsdata samlet inn på stasjonen har en oppløsning på ett målepunkt hvert tiende minutt. Lik oppløsning som spenningskvalitetsmåleren bruker for blandt annet harmoniske overspenninger og korttidsflikker. Hvert innstrålings-datapunkt er et gjennomsnitt av 60 øyeblikksverdier som måles med 10 sekunders mellomrom.

Etter alle målinger var fullført var det ønsket å sammenlikne måleresultater. Spesielt var det ønskelig å se på de ulike spenningskvalitets-målingene opp imot innstrålt effekt. Data for THD, produsert effekt, individuelle harmoniske og flikker ble eksportert til Excel, for å lettere behandle, så lastet inn i Python for å plote og analysere. Disse dataene ble sammenliknet med innstrålingsdata fra meteorologistasjonen for å studere påvirkningen forskjellige innstrålingssituasjoner har på spenningskvaliteten. Figurer av resultatene som er presentert i kapittel 5 er alle sammen produsert i Python. Pakkene som ble brukt er:

- **Numpy:** Ble benyttet fordi det er en praktisk pakke å benytte om man skal bearbeide tall. Spesielt om det gjelder store mengder tall. numpy inkluderer alternative metoder av allerede eksisterende operasjoner i Python, men de er mye raskere.
- **Matplotlib.pyplot:** Er den vanligste pakken som brukes om man skal lage figurer i Python. Den valgte presentasjonsstilen i grafene er *seafoam-colorblind*, som kommer med matplotlib-pakken.
- **Csv:** Denne pakken brukes for å importere datasett fra eksterne kommadelte tekstfiler (csv). Datasettet ble eksportert fra *Metrum Viewer* til excel, der det ble lagret som en csv-fil og til slutt importert til Python via csv-pakken.

Det var forventet at dager med ujevn innstråling hadde høyere flikkerinnhold enn dager med jevn innstråling. Derfor var det ønskelig å se på disse dagene mot hverandre. Data for flikker ble separert i dato, klokkeslett og i hvilket målepunkt de ble registrert. Innstrålingsverdier iløpet av månedene juli og august 2017 ble lagt inn i excel. Målepunktene for både korttidsflikker og innstråling er registrert med 10 minutters mellomrom.

Det ble så gjort en analyse der alle datapunkter for innstråling ble trukket fra datapunktet før. Absoluttverdien av dette er variansen. Formelen så slik ut:

$$\text{Varians} = |E_n - E_{n+1}| \quad (4.1)$$

Der E er innstrålt effekt.

Denne metoden er funnet i artikkelen *A Realistic Irradiance-based Voltage Flicker Analysis of PV Applied to Hawaii Distribution Feeders* [21]. I nevnte artikkel har de tilgang på innstrålingsmålinger med oppløsning på 1 målepunkt pr sekund. I denne studien er høyeste oppløsning tilgjengelig 1 måling hvert 10. minutt.

For dager med jevn innstråling vil det da komme ut en tabell med lave verdier. Dager med ujevn innstråling, altså sprang imellom påfølgende innstrålingsverdier, vil det komme ut en tabell med høye verdier. Dager som hadde høy snittverdi i disse tabellene, samt mange verdier over en semi-vilkårlig satt grense på  $200 \text{ W/m}^2$  ble sett på som ”støyete” dager. Dager der det var forventet å finne høyere flikkerinnhold pga. at utsendt effekt ikke vil ligge på nominelt

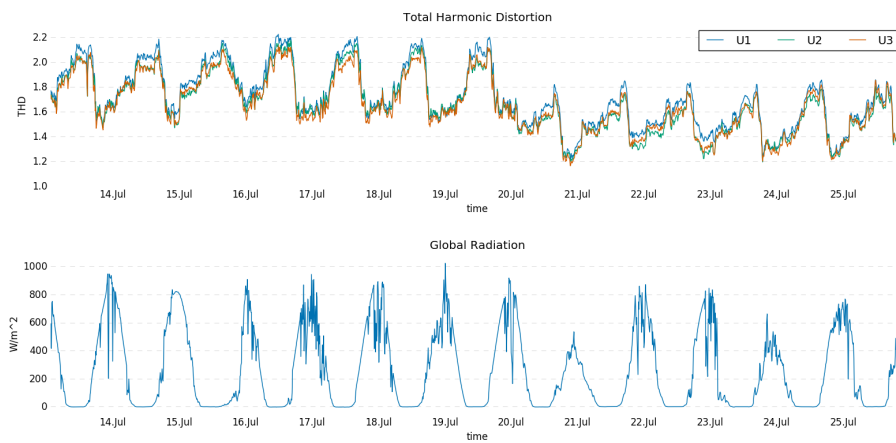
eller tilnærmet nominelt nivå. Disse dagene ble så sammenliknet med "ikke-støyete" dager for å finne omfanget av den ujevne innstrålingens innvirkning. En ikke-støyete dag er her bestemt å være en dag der innstrålingen ikke har en differanse på over  $200 \text{ W/m}^2$  pr. 10 minutter iløpet av et døgn.



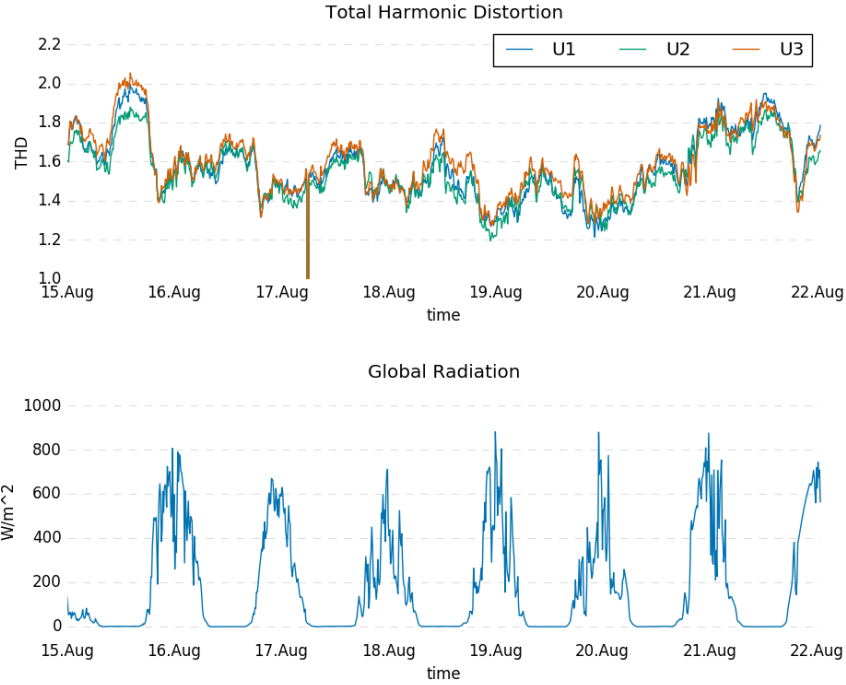


## 5 Resultater

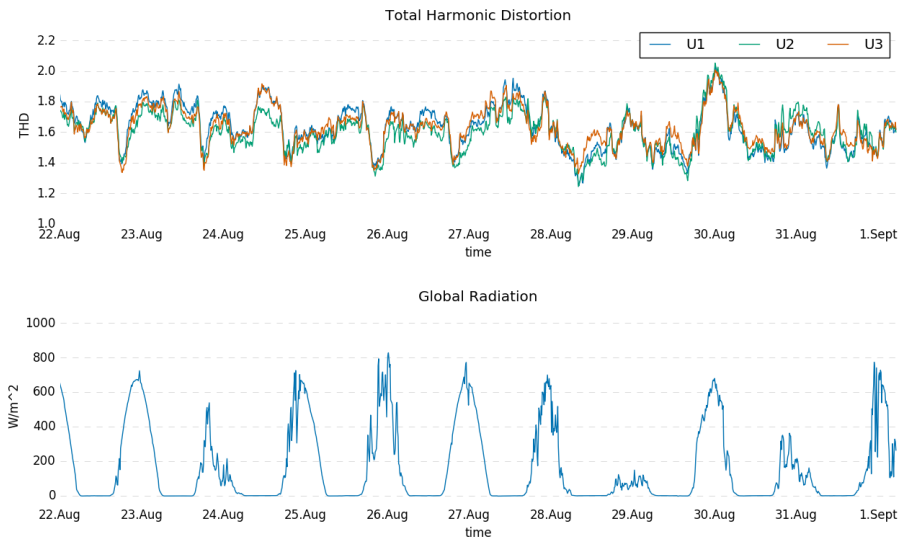
### 5.1 Harmoniske forstyrrelser



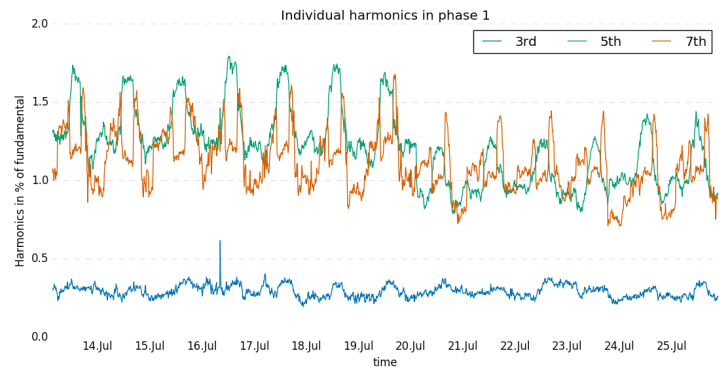
Figur 5.1: Global innstråling imot THD i måleperiode 1, i bunker.



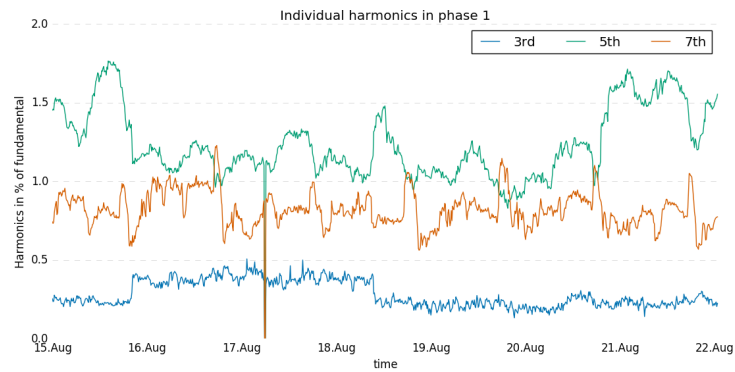
Figur 5.2: Global innstråling imot THD i måleperiode 2, ved panel.



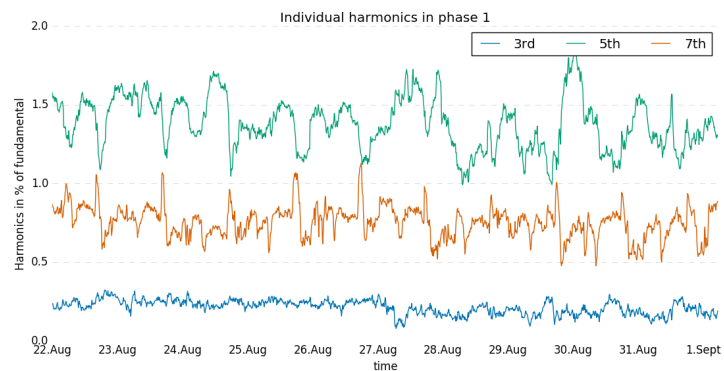
Figur 5.3: Global innstråling imot THD i måleperiode 3, i bunker.



(a)

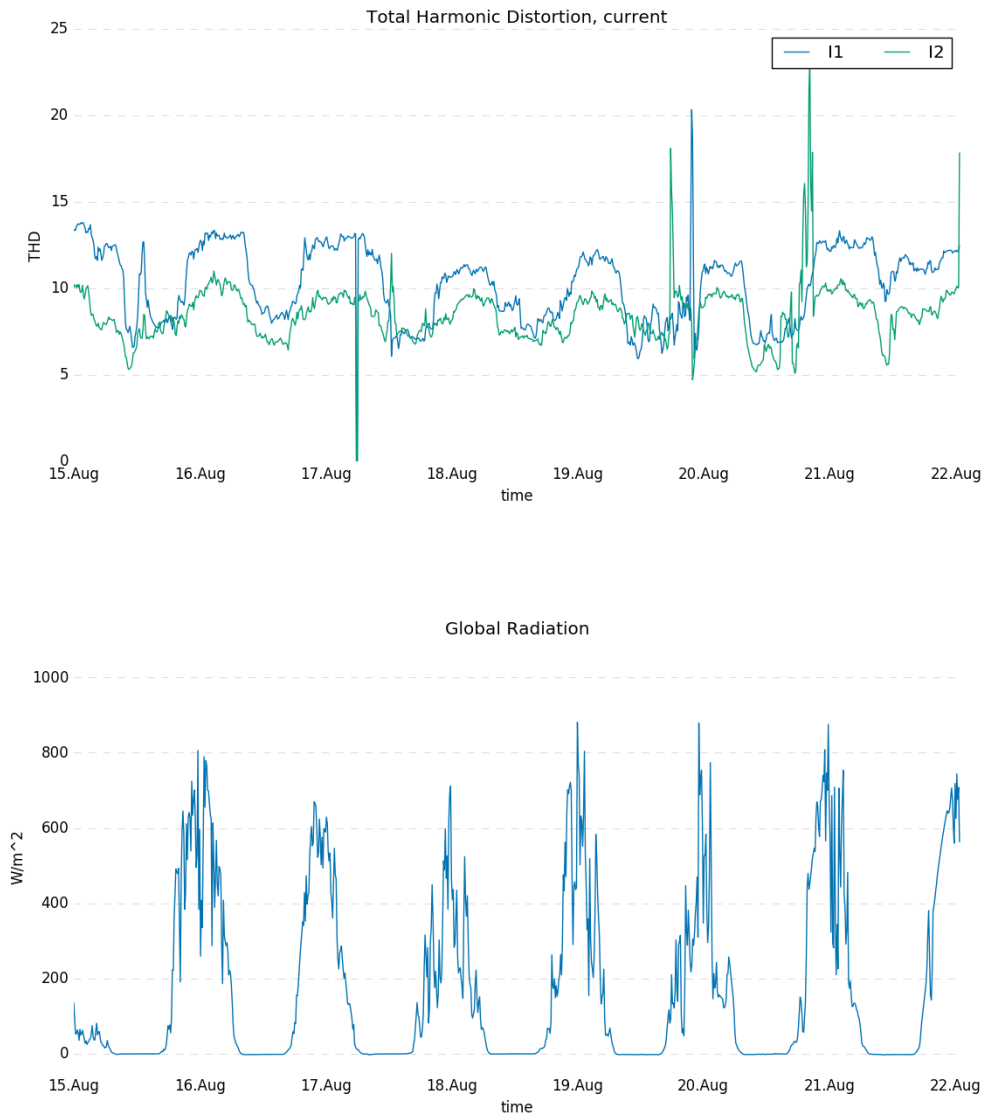


(b)



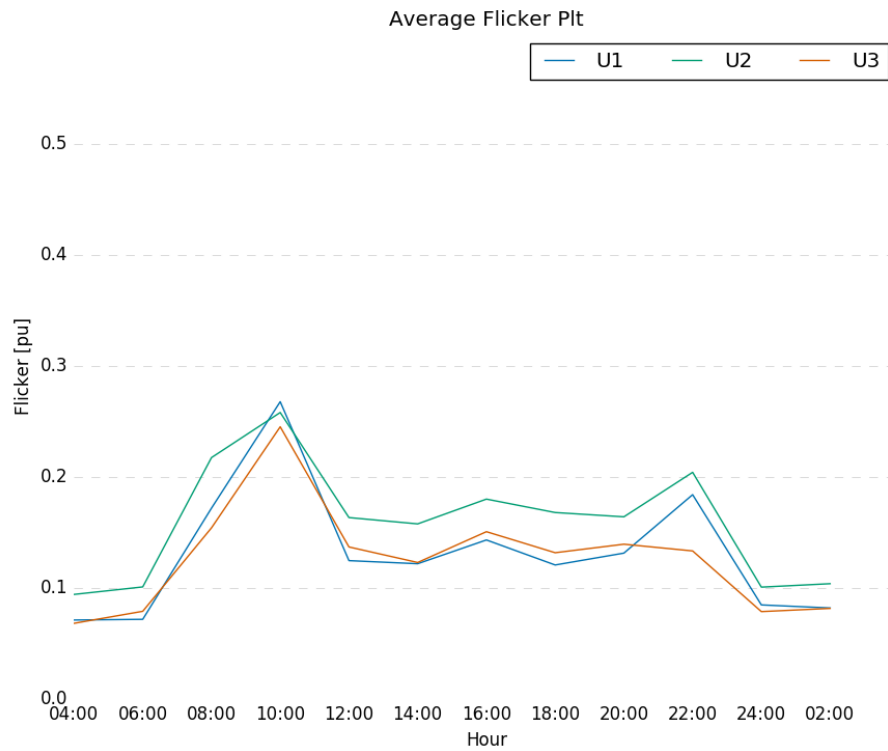
(c)

Figur 5.4: De mest prominente målte individuelle harmoniske overspenningene. (a) er måleperiode 1 i bunker, (b) er måleperiode 2 ved panel, (c) er måleperiode 3, også i bunker.

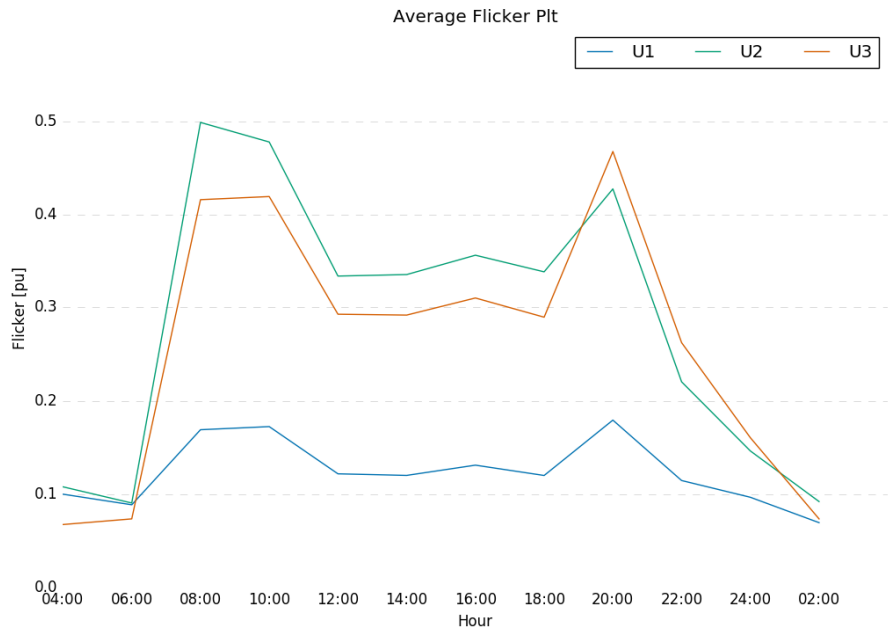


Figur 5.5: THD målt på strømsignalet ved panel i to faser.

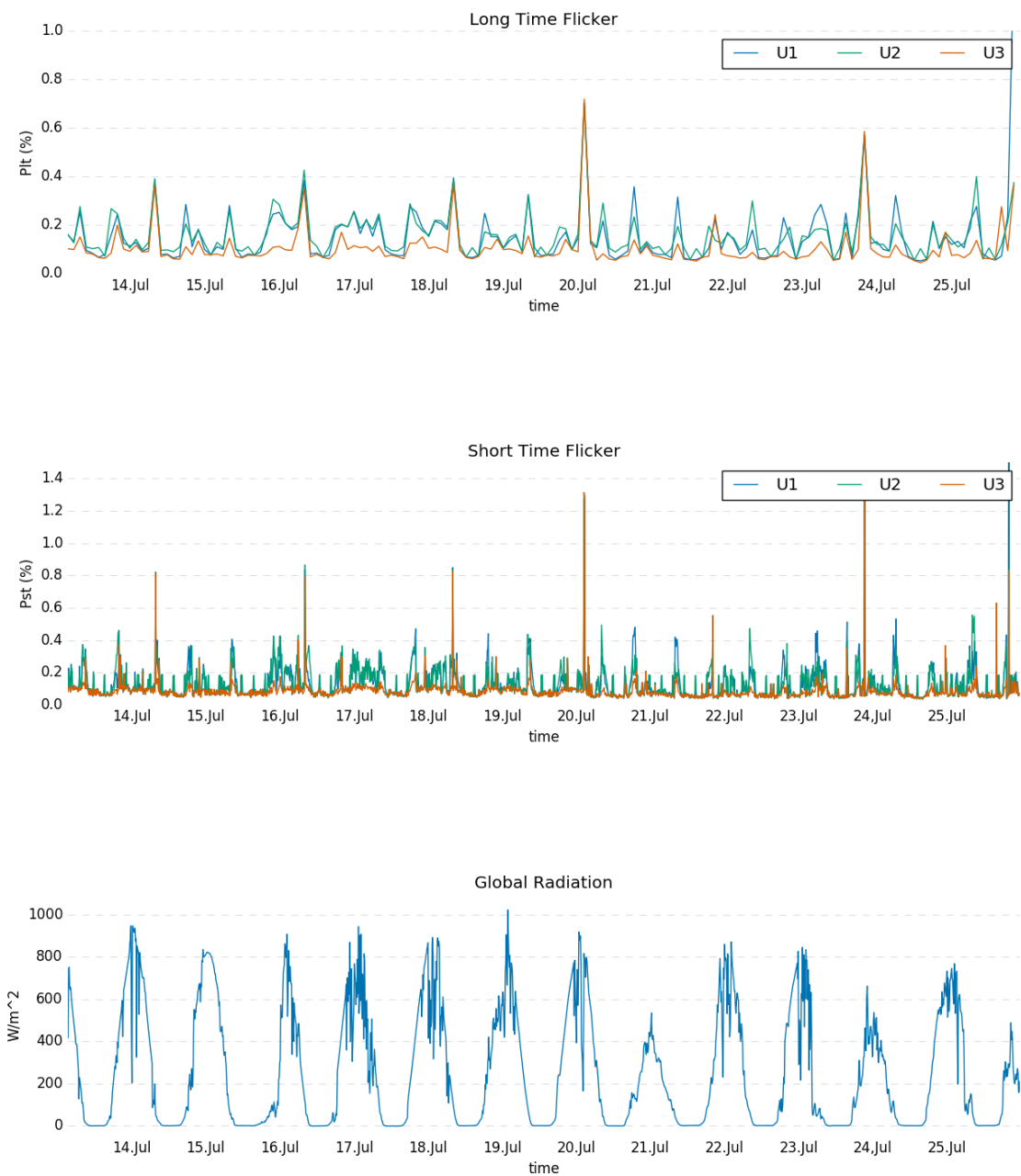
## 5.2 Flikker



Figur 5.6: En gjennomsnittlig dag med flikker i måleperioden. Målt i bunker, 100 m i ledningslengde unna panelene. Verdiene er gjennomsnittsverdier av måleperiode 1 og måleperiode 3.



Figur 5.7: En gjennomsnittlig dag med flicker i måleperioden. Målt på målepunkt bak solcellepanelene.

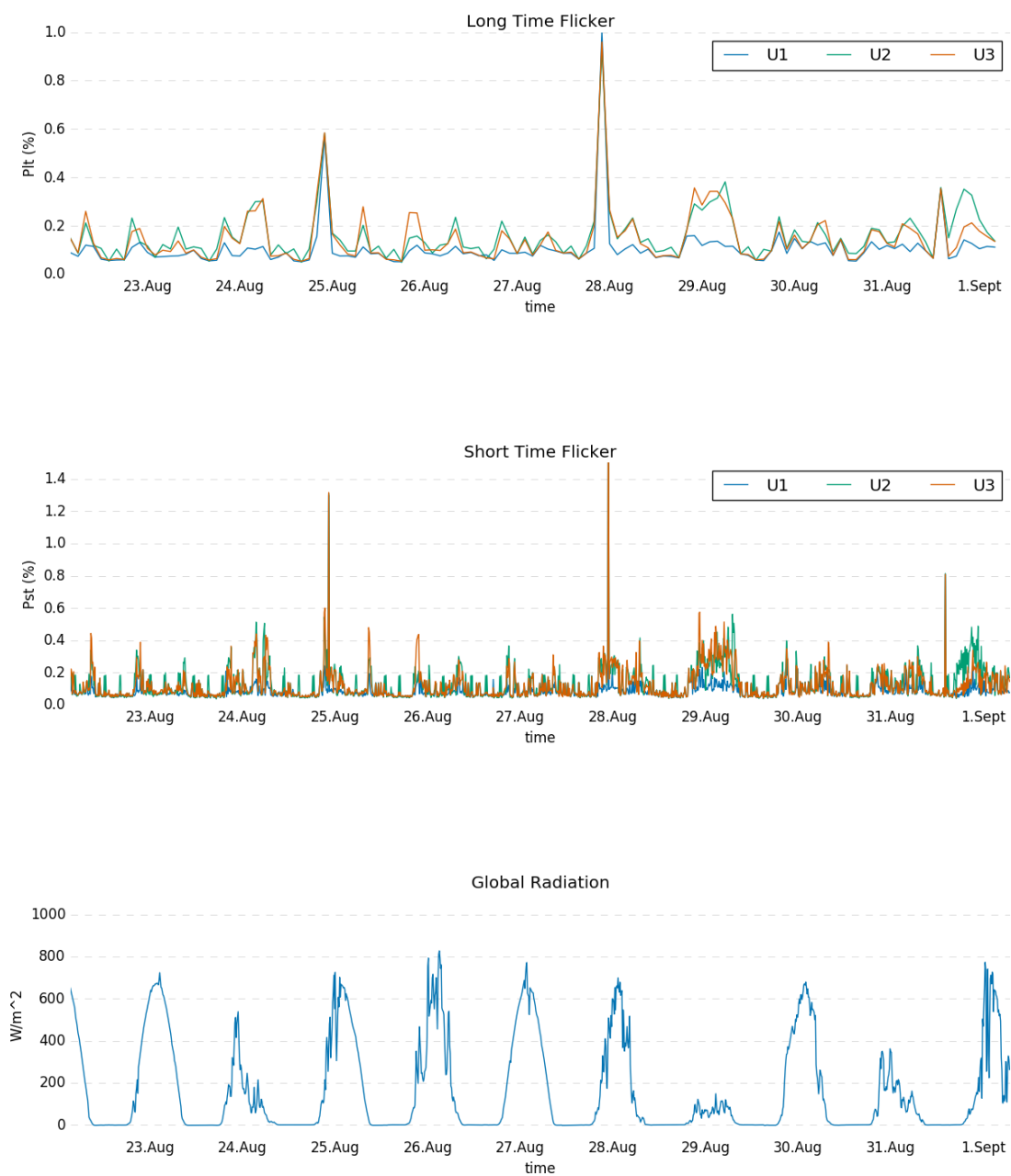


Figur 5.8: Langtidsflicker og korttidsflicker mot global innstråling i måleperiode 1, i bunker.



Figur 5.9: Langtidsflicker og korttidsflicker mot global innstråling i måleperiode 2, ved panel.





Figur 5.10: Langtidsflikker og korttidsflikker mot global innstråling i måleperiode 3, i bunker.



## 6 Diskusjon

### 6.1 Harmoniske overspenninger

Alle målinger av THD ble målt til å være under forskriftssatte grenser, og under den øvre grensen på 3% som ble nevnt i inverterens datablad [24]. De høyeste verdiene ble målt i perioder med lav eller ingen produksjon av aktiv effekt. De laveste målte verdiene av THD kom i perioder med produksjon tilnærmet lik nominell produsert effekt. Ifra figur 5.1 kan det tydes at i perioder der innstrålingen er høy, er også THD på sine laveste punkter. Motsatt ser det ut til at de høyeste verdiene dukker opp på nattetid. Denne effekten ser ut til å skje uten unntak i måleperioden på omtrent 13 dager. Det er antagelig på grunn av at det ikke produseres effekt i perioder uten innstråling, men anlegget trekker litt strøm når det ikke er produksjon. Det vil da si at anlegget ligger langt ute i nettet, eller i alle fall lenger unna en generator enn det gjør på dagtid der solcellene fungerer som generator.

Av en eller annen grunn ser det ut til å være en mye svakere sammenheng i THD nær panelene enn det er i bunkeren. På figur 5.1 og 5.3 er det et tydelig dropp i kurven en gang per døgn, på et omtrentlig tidspunkt der solen står opp i innstrålingsgrafene. Den samme sammenhengen kan tydes fra figur 5.2, men det ser ikke ut til å være et like stort utfall. Droppet ser ut til å dukke opp uavhengig av hvor mye innstråling det er på det tidspunktet.

Dette kan kanskje tyde på at droppet som skjer en gang om dagen ikke er fra solcellene som produserer, men heller en urelatert periodisk spenningshendelse i lasten.

I figur 5.1 skjer det et dropp på omtrent 0,4% i gjennomsnittlig THD. Kurven blir etter dette liggende å svinge om den nye verdien. Det synes på THD-verdiene i figur 5.2 og 5.3. Den store endringen kommer antagelig fra en stor last som ble koblet fra. Det kan for eksempel være at en av gårdene i nærheten koblet fra et eller flere støyproduserende utstyr.

I måleperiode 2, ble måleapparatet koblet fra i omtrent 20 minutter på ettermiddagen av 17. august for å endre på sensitiviteten overfor transienter. Det synes på figur 5.2 ved et skarpt dropp til null i en kort periode.

Det ser ikke ut til å være noen forskjell i mengden spennings-THD ved panelene og i bunkeren. Ifra måleresultatene i figur 5.1, 5.2 og 5.3, er det ikke mulig å si hvor mye harmoniske signaler anlegget produserer. Heller ikke de individuelle harmoniske, presentert i figur 5.4 forteller noe definitivt. I alle fall er mengden av harmoniske spenninger målt på både punkt bak panelene og i bunker på alle tidspunkter lavere enn forskriftssatte grenser.

I en studie som ble gjort i Hellas, der det ble målt PQ på ulike invertere, konkluderte de med at spenningskvaliteten ble bedre om inverterne fikk operere nær nominell effekt [22]. Det vil si at effekter som skygging av panelene og andre påvirkninger som skyver produksjonen bort fra nominell effekt, vil øke emisjon av elektromagnetisk støy. Selv om det ikke er mulig å trekke samme konklusjon fra målingene på THD i denne rapporten, kan det heller ikke utelukkes at invertere generelt vil injisere en større mengde harmoniske overspenninger i nettet

om innstrålingen er svak eller ujevn. Fra figur 5.4b og 5.4c kan det tydes at det er en økning i syvende harmoniske tidlig på dagen, kanskje som et resultat av soloppgang og at panelene begynner å produsere effekt. Det er ingen garanti for at panelene er skyldig i disse økningene.

Når det gjelder individuelle harmoniske spenninger, vist i figur 5.4, var det høyest innhold av 5. harmoniske spenninger, tett etterfulgt av 7. harmoniske. Høyere harmoniske spenninger hadde generelt en liten økning når THD var lav. Ingen målte harmoniske spenninger gikk noen gang over nivået som spesifiseres i FoL [14]. Det bør også noteres at amplituden til 5. harmoniske sank med synkende THD (som forventet, siden 5. harmoniske utgjør majoriteten av THD). Samtidig var det ikke uvanlig å se 7. harmoniske sin amplitude øke i samme intervaller.

Det er uvisst hva som har endret seg fra måleperiode 1 til måleperiode 3. Resultatene ser veldig forskjellige ut med tanke på innhold av 7. harmoniske. Måleperiode 1 har et betydelig større innhold av spesifikt 7. harmoniske enn både måleperiode 2 og 3. Det ser ut som om den 7. harmoniske følger den 5. harmoniske svært tett ved første måleperiode. I tredje måleperiode, på samme målepunkt, ligger den 7. harmoniske og svinger rundt en linje omtrent 0,5% lavere enn den gjorde i måleperiode 1.

Figur 5.4 viser kun målinger for fase 1, men den samme trenden finnes i alle fasene.

#### **THD på strømsignalet**

Det ser ut til å være en sammenheng imellom strøm-THD og produsert effekt. I perioder der panelene produserer, øker harmonisk innhold i strømsignalet. Økningen er ikke stor eller over grenser i forskrifter, men det er tydelig at inverteren injiserer en liten mengde harmoniske strømsignaler til nettet. Mengden strøm-THD har et lineært forhold til aktiv effekt i output fra inverterne.

Grunnen til at figur 5.5 kun viser to faser, er at inverterne på dette solcellearrayet mater til fase 1 og 2. Det flyter nesten ingen strøm i fase 3 på dette punktet.

Selv om de to kurvene har samme periode, kan det se ut som om perioden på strøm-THD er forskjøvet fra innstrålingskurven.

Imellom de to siste dagene dropper ikke kurven i et like langt intervall som de andre dagene.

Ved målinger i bunker, var det umulig å finne igjen dette mønsteret i harmoniske strøm-signaler.

Dette resultatet samsvarer med forsøket som ble gjort i Hellas på syv invertere. Der var konklusjonen at produsert aktiv effekt hadde lineær sammenheng med THD på strømsignalet. Samtidig som det ikke ble funnet noen signifikante harmoniske forstyrrelser på spenningssignalet.

## 6.2 Flikker

Flikker ser ut til å oppstå i systemet i et mønster. Det ser ut til å oppføre seg omtrent likt hver dag. Mengden flikker ser ut til å være høyest tidlig på dagen, omtrent når solen står opp, og sent på kvelden, omtrent når solen går ned. På dagtid er det et relativt stabilt nivå med flikker. Imellom solnedgang og soloppgang er det lavest flikkernivå. Også på dager med lav innstråling kan det sees at flikkernivået øker. Da ligger flikker på et omtrent jevnt nivå fra soloppgang til solnedgang. Det er istedet for den formen som oppstår på dager med jevn innstråling, der den har to perioder med høy verdi, ved soloppgang og solnedgang, og en periode som et søkk i kurven med relativt jevnt flikkernivå mellom soloppgang og solnedgang. Denne kurveformen er best synlig på gjennomsnittskurven i figur 5.7. Det kan vise til at flikkernivå øker i perioder med lav innstråling, eller variabel innstråling. Slik som en gradvis økende innstråling tidlig på dagen, eller gradvis minkende mot kvelden.

Det er også synlig at i perioder med ujevn innstråling, så øker flikkermengden. Det styrker påstanden om at flikker oppstår i perioder med ujevn produksjon og at det ikke bare er et urelatert periodisk fenomen.

Det er ikke utenkelig at tilskyggede solceller som sender effekt ut på et lokalt distribusjonsnettverk kan oppfattes som et flikkerproblem hos andre kunder tilkoblet det samme distribusjonsnettet.

At flikker fra solcelleanlegg øker med variert eller lav innstråling stemmer overens med målinger beskrevet i litteratur. [21]

Legg merke til i figur 5.9 at flikkernivået nære solcellene er over dobbelt så høyt som det målt ved interkoblingspunktet til det ytre nettet, vist i figur 5.8 og 5.10. Lettest synlig er forskjellen på gjennomsnittskurvene vist i figur 5.6 og 5.7. Flikkernivået er fremdeles langt under forskriftssatte grenser, men helt tydelig produsert av inverterne. Det synes også fra 5.7 at de to fasene som blir matet fra inverterne (grønn og rød kurve) på målepunktet har høyt flikkernivå og fasen som ikke blir matet fra inverteren (blå kurve) har et lavt flikkernivå.

Flikkermønsteret som er observert passer sammen med utsagnet om at flikker kan oppstå som resultat av interharmoniske. Ifølge rapporten *Interharmonics from grid-connected PV systems: Mechanisms and mitigation* [4], dannes det interharmoniske forstyrrelser i PV inverterne når de opererer på lav effekt pga. blant annet MPPT-algoritmer. Det er i følge figur 5.8, 5.9 og 5.10 under de samme lav-effektsforholdene det er registrert høyt flikkerinnhold i signalet fra solcelleanlegget på Sørås [4] [16].

Vi kan se på kurvene at harmoniske forstyrrelser synker i de tidsintervallene der flikker øker. Hypotesen sier at om det hadde blitt registrert interharmoniske forstyrrelser i målingene, ville det vært en synlig økning i perioder med ujevnt skydekke, soloppgang og solnedgang. De samme periodene vi opplever mye flikker.

## 6.3 Transienter, sags og swells

I perioden før sensitiviteten for transienter, sags og swells ble satt opp, i måleperiode 1 og de to første dagene av måleperiode 2, ble det registrert en eneste spennings-sag. Det vil altså si, én registrert event på totalt 16 måledager.

Etter økningen i sensitivitet ble det registrert hele 6 transienter på de resterende 5 dagene av måleperiode 2 og hele 27 transienter og 1 sag på de 11 dagene som var måleperiode 3. Størrelsen og signifikansen på disse er selvsagt svært små. De målte transientene tenderte mot å oppstå omtrent rundt klokken 08:00 på formiddagen, men ikke hver eneste dag. Det ble også registrert transienter til andre tider av døgnet. Det er ikke mulig å si om de små målte transientene som er målt kommer fra solcellene eller ikke. Det kan ikke utelukkes at de transientene som dukker opp rundt klokken 08:00 kommer fra oppstart av inverterne når solen står opp om morgenen og panelene begynner å produsere. Klokkeslettene matcher omtrent med soloppgang i august. Eller ihvertfall da solen står høyt nok på himmelen til at solcellene begynner å produsere.

## 6.4 Frekvens

Effektfrekvensen målt på de to forskjellige målepunktene er ikke signifikant forskjellig fra hverandre, som forventet. Den befinner seg også alltid innenfor forskriftssatte grenser, også som forventet, siden nettet er stort og sammenkoblet med flere generatorer som forsyner lastene. Sørås-solcelleanlegg, en enkelt generator, som i tillegg er av relativt liten effekt, kommer ikke til å ha en stor innvirkning på frekvensen når den kobles inn eller ut.

Kanskje om solceller hadde stått for majoriteten av effekt generasjon i et isolert system, kunne det forventes å se substansielle frekvensforskyvinger to ganger om dagen, når panelene begynner og slutter å produsere effekt. Et slikt system er suboptimalt av mange grunner. Frekvensproblemer er antagelig ikke hovedproblemet som vil oppstå i dette systemet.

## 6.5 Reaktiv effekt

Det kan se ut som om inverterne trekker en liten mengde reaktiv effekt på oppstart. Ellers er det ikke stor mengde med reaktiv effekt målt på noe målepunkt. Det er ingen garanti for at dette vil være tilfelle for alle invertere. Det ble beskrevet en rekke forskjellige invertere og deres aktive- og reaktive effekt-output i *Power Quality Field Measurements on PV Inverters* [22]. Reaktiv effekt i utgangssignalet fra inverterne var svært forskjellig avhengig av teknologi som ble brukt. Som tidligere nevnt, er inverteren i dette eksperimentet markedsført som et flaggskipprodukt hos sin produsent. Markedsføring skal ikke tas som bevis på produktets kvalitet, men utsagnet gir i alle fall en pekepin på at inverterne er blant bedre invertere, og kan forventes å produsere lite støy, eller ivertfall mindre støy enn en gjennomsnittlig inverter.

## 6.6 Feilkilder

### Valg av måleperioder

Det kan være at uken som ble brukt til å måle bak panelene var uheldig, i den forstand at det var mer ujevnt innstråling den uken i forhold til de to andre på grunn av høyere grad av skydekke. Derfor var det også ønskelig å plote dager med variert innstråling mot hverandre. Det kan også ha vært uheldig å ha tre ukers mellomrom imellom måleperiode 1 og måleperiode 2. Med det lange mellomrommet risikerte målingene å bli utsatt for sesongbaserte væringslag i tillegg til kortere døgn i august iforhold til i juli. En bedre måte å gjøre det på, i retrospekt, hadde vært å ha måleperiodene like etter hverandre. På den måten kunne ihvertfall noen av disse fallgruvene vært unngått. Det å ha måleperiode 3 i bunkeren på nytt var for å ha et ekstra sammenlikningsgrunnlag i perioden etter, for å forhåpentligvis komme rundt disse problemene.

Måleperiodene burde vært gjort over lengre tid, men dessverre måtte måleapparatet leveres tilbake til NMBUs eiendomsavdeling for bruk på campus. I utgangspunktet skulle også måleperiode 3 kun vare 7 døgn, men det ble mulighet for å låne måleapparatet i tre ekstra døgn. De tre ekstra dagene burde i retrospekt ha blitt brukt på å måle på målepunktet bak panelene, siden måleperiode 2 er den eneste som ble gjort bak panelene og er kortere enn de to andre periodene. Det er målingene fra måleperiode 2 som har vist seg mest interessant i analysen av resultatene.

### Tilgjengelige målepunkter

Om mulig, hadde det vært spennende å gjøre spenningskvalitetsmålinger lenger ute i nettet for å se hvordan kvalitetsproblemer brer seg utover, om de engang er mulig å detektere på målinger 500 meter eller mer unna. Dessverre var det ikke mulig å få innsikt i noen tilknyttede tilkoblingspunkter.

Det kunne også vært interessant å gjøre en måling på de to målepunktene brukt i denne oppgaven over noen få dager, der panelene var koblet fra. Da kunne forskjellen i spenningskvalitet blitt studert og et mer definitivt resultat på hvor mye forstyrrelser som beviselig kommer fra solcelleanlegget. Det var dessverre ikke anledning til å koble fra anlegget.

### Avbrudd i måling

Imellom måleperiode 1 og 2, ble sensitiviteten til måleapparatet økt med hensyn på å måle transienter, dips og swells. Etter to døgn med målinger i måleperiode 2 ble apparatet koblet fra i omtrent 20 minutter, for å ytterligere øke sensitiviteten til apparatet. Utkoblingen er synlig på figur 5.2, 5.4b og 5.5. Utkoblingen var på oppfordring fra veiledere, på grunnlag av hypotesen om at hvis få transienter ble registrert i den todagersperioden kunne sensitiviteten økes ytterligere. Siden måleperiode 3 skulle foregå i bunkeren, kunne antallet transienter i disse to periodene sammenliknes, for å studere hvordan transientene dempes eller drives frem i ledere. Ideelt sett, for et slikt eksperiment, skulle det vært montert opp et måleapparat i begge målepunktene samtidig. På den måten kunne en enkelt transient vært studert i begge punkter for å se hvor mye den ble dempet over distansen fra panel til innkoblingspunktet.

### Feil i innkobling

I måleperiode 1 ble spenningsprobene og strømsløyvene koblet til feil faser i tavlen. Fasenes markeringer U1, U2 og U3 korresponderte ikke med de tilsvarende markeringene på Metrum-instrumentet. Måleperiode 1 ble målt med fase 2 og fase 3 byttet om, Metrum tolket det som at disse var  $120^\circ$  ute av fase. Den målte spenningsubalansen ble derfor skyhøy som et resultat. I denne oppgaven blir ikke spenningsubalansen brukt til noen analyse, så innkoblingsfeilen hadde ingen stor konsekvens for oppgaven.

Unbalance			
% of time	Norm max (%)	Measured max (%)	Result
100	2	459300	Failed

Figur 6.1: Maksimalt målt ubalanse i måleperiode med to faser byttet om. Bildet er en skjermdump fra docx-rapporten som ble produsert av Metrum Viewer.

### Oppløsning på data

Som nevnt i artikkelen *A Realistic Irradiance-based Voltage Flicker Analysis of PV Applied to Hawaii Distribution Feeders* [21], hadde det vært ønskelig med høyere oppløsning i flikkerdata. Korttidsflikkerdata er idag målt i gjennomsnitt over 10 minutter. Spesifikt i solcellesammenheng er det intervallet antagelig for stort for å se representative flikkerhendelser. [21] Også instrålingsdata benyttes i denne oppgaven har antagelig for lav oppløsning til å vise representative instrålingsprang som kan knyttes til emitterte flikkerspenninger.

Samplingsfrekvensen til apparatet som ble brukt til å måle spenningskvalitet hadde en samplingsfrekvens på 12,8 kHz, nok til å plukke opp de fleste spenningsprang som transienter og flikker. Det er derimot ikke nok til å plukke opp eksakte bølgeformer.



## 7 Videre Arbeid

Målet til denne rapporten er å beskrive EMC problematikk som kan oppstå i elektriske systemer i Norge med tilkoblede solcelleanlegg. Fokuset har spesielt ligget på inverterne og ledningsbundet støy. Målet er å lage et grunnlag for framtidige standarder som beskriver EMC restriksjoner i solcelleanlegg. Siden rapporten ikke omfatter alle fasetter av EMC problematikk som kan oppstå, kan det i framtiden være nyttig å studere elektromagnetisk miljø utenom ledningsbundet støy. Eksempelvis med radioantenne-interferens studier. Denne rapporten maler ikke et fullstendig bilde av problematikk som kan oppstå i et komplekst kraftsystem som resultat av et høyt volum av PV-systemer som kobles inn.

Mye kan gjøres i vidreutvikling av Maximum Power Point Tracker-teknologi. Siden MPPT er vist å være skyldig i interharmoniske forstyrrelser og flikker [4]. Det er enda uvisst hva den spesifikke grunnen til disse forstyrrelsene er, men teorien er at det ligger i suboptimale algoritmer. Det er et omfattende tema der det kan utføres mange optimaliseringer og praktiske forsøk. Artikkelen *Interharmonics from grid-connected PV systems: Mechanism and mitigation* foreslår en MPPT-algoritme med en konstant referansespenning *Constant-Voltage MPPT Method* (CV-MPPT), siden den har vist seg å ha lavere støynivå enn andre MPPT-algoritmer. Algoritmens svakhet er at den senker nøyaktigheten til MPPT, som fører til en suboptimal generering av energi. Derfor er det foreslått en løsning om at CV-MPPT kun kobles inn i lavproduksjonsperioder.

Det er bemerket tidligere i oppgaven at panelene var til en viss grad tildekket av smuss under målingene. Smuss fungerer skyggende på panelene. Det kunne ha vært interessant å gjøre målinger med kontrollerte smussmengde på panelene, for å måle interharmoniske og flikker som kommer ut i AC-signalet fra inverteren. Da for å finne ut spesifikt hvor stor innvirkning en slik jevn tilskygging av panelene har på spenningskvaliteteten.



## 8 Konklusjon

Oppgaven er en studie av spenningskvalitetsproblematikk som kan oppstå i norske IT-nett som resultat av solcelleanlegg. Den resulterende rapporten skal kunne brukes som et referansedokument i DSB sitt arbeid med solcellerelatert spenningsproblematikk. Målingene i oppgaven er utført med en spenningskvalitetsmåler på to ulike punkter på anlegget.

Basert på henvendelser har DSB hatt en bekymring om at PV-invertere emitterer ledningsbundet støy. Studier på dette er gjort i andre land, men Norge er i den spesielle situasjonen at vi i stor grad bruker IT-nett, er det interessant å undersøke anlegg koblet til slike nett.

Harmoniske forstyrrelser og spenningsflikker har blitt studert opp imot innstråling, fordi det er disse som er omtalt som størst problemer i litteraturen og har størst utslag i denne oppgavnes målinger.

Konklusjoner fra analyse:

- Resultatene tilsier at spenningsflikker har stor sammenheng med innstrålt effekt. Det er tydelig på dager med lav eller ujevn innstråling, da øker flikkerinnholdet i utgangssignalet til inverterne. Den samme effekten synes også 100 meter unna i ledningslengde. På det punktet har flikkerinnholdet blitt redusert til omtrent halvparten av det som ble målt ved panelene pga. ledningenes resistans.
- Målte transiente overspenninger på anlegget er små og sjeldne. De vil ikke påvirke tilkoblede laster på merkbart vis.
- Harmoniske spenningsforstyrrelser målt er høy i perioder, men periodene med høye harmoniske forstyrrelser henger ikke sammen med produksjonsperioder for panelene. Derfor konkluderes det at anlegget produserer neglisjerbare mengder med harmoniske spenninger.
- Det har blitt målt ubalanse imellom fasespenning samt endringer i frekvens på anlegget. Ingen av disse målingene går utenfor forskriftssatte grenser.
- Inverterne forbruker en liten mengde reaktiv effekt i starten av en produksjonsperiode, men har ellers liten til ingen innvirkning på reaktiv effekt i systemet.

Hovedkonklusjon for studien er at anlegget emitterer støy som ligger under de forskriftssatte grensene på alle punkter. Problemer relatert til flikker vil fremdeles kunne merkes ute i strømmettet. Flikker fra solcelleanlegget kommer antagelig i store mengder over kort tid. Dette kommer ikke tydelig fram i resultatene vist i denne rapporten fordi korttidsflikker er standardisert til å måles i gjennomsnitt over 10 minutter. At korte, store flikkeremisjoner vil være merkbare kommer fra flikkerkurven 3.1.

Anbefalingen fra forfatter er å undersøke spenningsflicker fra solceller med høyere oppløsning enn snittverdier over 10 minutter. Samt studere interharmoniske spenninger fra solcelleinverterne siden disse bidrar til spenningflicker [4], [16]. Solcelleanlegget slipper ut en ikke-ubetydelig mengde med spenningsflicker. Utslippene er resultat av lav-operasjon og varer antagelig i kort, men observerbar tid.

En anbefaling går også ut til inverterprodusenter om å etterstrebe utvikling i MPPT-algoritmer som minimerer interharmoniske forstyrrelser og spenningsflicker spesifikt.

## Takk Til

Sonja Monica Berlijn, Statnett og Kjetil Solberg, DSB: Takk for samarbeidet og veiledningen underveis.

Tom Ringstad, NMBU: For å stille NMBUs anlegg til disposisjon og overse oppkobling og HMS.

Trond Langseth og eindomsavdelingen, NMBU: For utlån av nødvendig måleutstyr.

Metrum Support & Service: For bistand med software.

Korrekturlesere: Anneli Sverresdatter Vinje Erichsen, Martin Liplass Schei og Yngve Mardal Moe



## Bibliografi

- [1] A. Schulbe H Daub T. Degner, W. Enders. Emc and safety design for photovoltaic systems (esdeps). 11 2017.
- [2] S. Santoso H.W. Beaty R.C Dugan, M.F. McGranaghan. *Electrical Power Systems Quality Second Edition*. McGraw-Hill Professional, 2002.
- [3] Norsk Elektroteknisk Komite. *Norsk elektroteknisk norm, Elektriske Lavspenningsinstallasjoner*. Standard Online, 2014.
- [4] D. Sera F. Blaabjerg A. Sangwongwanich, Y. Yang. Interharmonics from grid-connected pv systems: Mechanism and mitigation. *Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia), 2017 IEEE 3rd International*, 2017.
- [5] M. Zuercher-Martinson S. Hong. Harmonics and noise in photovoltaic (pv) inverter and the mitigation strategies. *white paper, Solectria Renewables*, 2013.
- [6] Direktorat for Samfunnssikkerhet og Beredskap. Om dsb. <https://www.dsb.no/menyartikler/om-dsb/>, November 2017.
- [7] T. Solvang H. Seljeseth, K. Sand. Håndtering av utfordrende elektriske apparater som tilknyttet elektrisitetsnettet. *SINTEF Energi AS*, 2012.
- [8] Norges vassdrag og energidirektorat. 2012 andel anlegg målere 400v per selskap, 2012.
- [9] R. Calvas B. Lacroix. Earthing systems worldwide and evolutions. *Schneider Electric*, 1995.
- [10] C. Good et. al. Towards cost-efficient grid-connected pc power plants in northern scandinavia. *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2011*, 2011.
- [11] H. Persson et.al. Initial results from a grid-connected 2-axis solar tracking pv system at 65°n in piteå, sweden. *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2012*, 2012.
- [12] N. R. Watson A. R. Wood J. Arrillaga, B. C. Smith. *Power System Harmonic Analysis*. John Wiley & Sons Ltd., 1997.
- [13] *141-1993 - IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*. IEEE, 1994.
- [14] Olje og Energidepartementet. Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet, Januar 2014.
- [15] International Electrotechnical Comission. Electromagnetic compability (emc) - part 4-15: Testing and measurement techniques - flickermeter - functional and design specifications, 2010.

- [16] S. Z. Djokic J. Meyer M. Klatt R. Langella, A. Testa. On the interharmonic emission of pv inverters under different operating conditions. *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2016.
- [17] International Electrotechnical Commission. Electromagnetic compatibility (emc) - part 2: Environment - section 1: Description of the environment - electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems. 1990.
- [18] Samferdselsdepartementet. Forskrift om eøs-krav til elektromagnetisk kompatibilitet (emc) for utstyr til elektronisk kommunikasjon, April 2016.
- [19] M. Halpin. The ieeec green book. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2001.
- [20] International Electrotechnical Commission. Iec 61683:1999 photovoltaic systems - power conditioners - procedure for measuring efficiency, 1999.
- [21] S.D.J. MacPherson B.P. Quach D. Nakafuji R. Davis E.M. Stewart, T.P. Aukai. A realistic irradiance-based voltage flicker analysis of pv applied to hawaii distribution feeders. *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*.
- [22] S. Nanou S. Papathanassiou K.P. Kontogiannis, G.A. Vokas. Power quality field measurements on pv inverters. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2013.
- [23] C. E. Shannon. Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IRE*, 37(1):10–21, Jan 1949.
- [24] *APsystems YC500A Microinverter Datasheet*, 13.06.2017 edition.
- [25] Energimarknadsinspektionen. Energimarknadsinspektionens föreskrifter och allmänna råd om krav som ska vara uppfyllda för att överföringen av el ska vara av god kvalitet, 2011.
- [26] Dansk Energi Forskning og Udvikling. Spændingskvalitet i lavspændingsnet. 2011.







**Norges miljø- og biovitenskapelige universitet**  
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet  
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway