

SIMULERINGSSTUDIE AV SPENNINGSKVALITET I LAVSPENNINGSNETT MED PLUSSKUNDER

Av Bendik Nybakk Torsæter og Henrik Kirkeby, SINTEF Energi AS

Sammendrag

En økt inntreden av plusskunder i det norske lavspenningsnettet vil potensielt kunne ha stor innvirkning på spenningskvaliteten hos nettkunder. Tilknytning av plusskunder er en spesielt stor utfordring i norsk IT-nett, ettersom balanserende trefaseomformere tilpasset PV-anlegg i IT-nett er en mangelvare. Ubalansert distribuert produksjon vil kunne medføre økt spenningsnivå og -usymmetri i nettet. Dette er et meget aktuelt tema i forskningsprosjektene SPESNETT og ProAktiv, som denne simuleringsstudien er en del av.

Lastflytanalyser i et realistisk IT kabelnett med plusskunder danner grunnlaget for simuleringsstudien. DIgSILENT PowerFactory er benyttet som simuleringsprogram. Gjennom å variere penetrasjonsgrad, fasefordeling og geografisk fordeling av plusskunder i nettet, har plusskunders innvirkning på spenningen blitt undersøkt for ulike nettstyrker. Denne rapporten har et fokus på spenningskvalitet i svake nett. Studien resulterer i en veiledende oversikt over hvilken nettstyrke som behøves for å overholde kravene til spenningsnivå og -usymmetri.

1. INNLEDNING

I distribusjonsnett med høy andel av distribuert produksjon (DG) kan det oppstå utfordringer knyttet til spenningskvalitet. Økt inntreden av DG, for eksempel solcellepanel (PV-panel), kan blant annet påvirke spenningsnivå og -usymmetri i lavspenningsnettet. Denne rapporten undersøker hvilken innvirkning et økt antall plusskunder vil kunne ha på spenningskvaliteten i det norske IT-nettet. Lastflytanalyse i DIgSILENT PowerFactory danner grunnlaget for analysen.

Ved tilkobling av solcelleanlegg til distribusjonsnettet er det nødvendig med en vekselretter. For større PV-anlegg bør dette være en trefaseomformer, slik at produksjonen fordeles jevnt utover de tre fasene. 400 V TN-nett er dominerende i store deler av Europa, og dagens trefaseomformere er derfor utviklet for dette nettsystemet. Ettersom det norske IT-nettet verken har 400 V linjespenning eller nøytralleder (N-leder), kan ikke disse trefaseomformerne benyttes ved tilknytning

av PV i Norge. Ved tilknytning av solcellepanel i Norge må det derfor benyttes én eller flere enfaseomformere. For å unngå problemer med ubalanse bør det enten settes en øvre grense for tillatt enfaseproduksjon, eller benyttes flere enfaseomformere som kommuniserer seg imellom slik at produksjonen som mates inn på nettet balanseres [1].

Det norske kraftnettet er dimensjonert for sentral produksjon og lokalt forbruk, dvs. at nettet er designet for nedstrøms spenningsfall i distribusjonsnettet. Tidligere har utfordringene i nettet vært knyttet til lav spenning ved tung last i svake nett. Med økt *penetrasjonsgrad av plusskunder*¹ introduseres også utfordringer knyttet til forhøyede spenninger ved høy distribuert produksjon i svake nett, ettersom effektflyten kan begynne å flyte oppstrøms i distribusjonsnettet. Dette problemet forsterkes ved ubalansert produksjon.

Spenningsforskjeller i lavspenningsnettet avhenger av *nettstyrken*². I svake nett er spenningsvariasjonene større enn i sterke nett. Hvor betydelig spenningsforskjellen er mellom nettstasjon og enden av linjen avhenger derfor av hvor nettkundene er geografisk plassert. Ifølge en undersøkelse gjort av Energi Norge har kun 30-40 % av norske nettkunder et sterkere nett enn *referanseimpedansen*, som i IT-nett tilsvarer en minimum kortslutningsstrøm på $I_{k2,min} = 1172 \text{ A}$ [2].

Krav til spenningskvalitet i lavspenningsnettet er beskrevet i *Forskrift om Leveringskvalitet i kraftsystemet* (FoL). I FoL er det spesifisert at langsomme spenningsvariasjoner til enhver tid skal være innenfor $\pm 10 \%$ av nominell spenning (U_n) i tilknytningspunkt (gjennomsnitt over ett minutt), samt at maksimal spenningsubalanse/-usymmetri ikke skal overstige 2 % (gjennomsnitt over ti minutter).

2. METODE

2.1 Eksempelnett, antagelser og simuleringsverktøy

Simuleringene gjennomføres i et lavspent kabelnett med 40 kunder. Det er valgt å gjennomføre simuleringene ved lett last – høy produksjon (LLHP), ettersom dette kriteriet gir størst innvirkning på spenningsstigning (*RENblad 3006*) [3]. Hver kunde i kabelnettet er antatt å ha 1 kW symmetrisk last i lettlast. Plusskunder har en konstant produksjon

¹ Penetrasjonsgrad av plusskunder er et mål på andelen plusskunder i et gitt område av nettet.

² Nettstyrke måles ved hjelp av kortslutningsytelse, -strøm eller nettimpedans. Et nett med lav nettstyrke (svakt nett) har høy nettimpedans, og svake nett vil derfor kunne ha høyt spenningsfall fra nettstasjon til kunde. I denne studien måles nettstyrke med minimum kortslutningsstrøm ($I_{k2,min}$).

på 4 kW, hvor innmating vil være både balansert og ubalansert i ulike case. Fordelingssystemet er IT-nett, og på sekundærsiden av fordelingstransformatoren er det 240 V stiv spenning. Alle stikkledninger og inntakskabler er neglisjert i analysen.

Eksempelnettet som benyttes er gitt av én av prosjektpartnerne i SPESNETT og ProAktiv. Nettet representerer et typisk eldre kabelnett i et storbyområde. Tekniske data til kablene er hentet fra *Planboka* til SINTEF og REN, i kapitlet *Tekniske data* [4].

Lastene i simuleringene modelleres som rent resistive. Dette betyr at det kun er reaktivt forbruk i kablene og i fordelingstransformatoren. PV-anleggene produserer kun aktiv effekt (DC), men i usymmetriske nett med enfaseomformere er det ofte nødvendig at omformeren produserer eller forbruker reaktiv effekt i tilknytningspunktet for å oppnå ønsket aktiv effekt [5].

PowerFactory har verktøy som muliggjør simulering av både balansert og ubalansert lastflyt. For å få en riktig representasjon av IT-nett i PowerFactory, er det viktig å spesifisere at enfaselaster og solcellepanel med enfaseomformer skal tilknyttes fase-fase og ikke fase-nøytral.

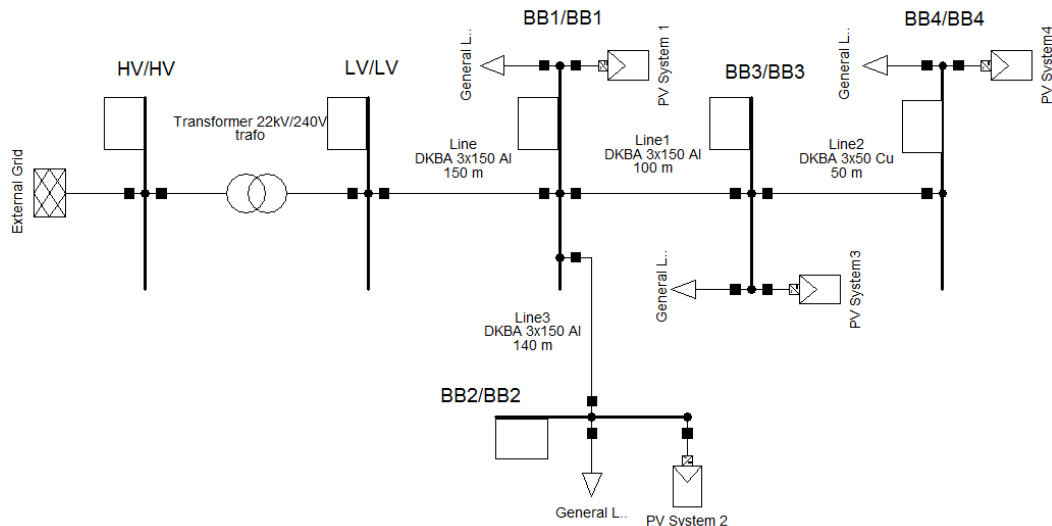
2.2 Spenningsfall i balanserte og ubalanserte IT-nett

Ved beregninger av spenningsfall og spenningsstigning i IT-nett, er det viktig å skille mellom symmetriske og usymmetriske systemer. Dersom kun én enkelt enfaselast er tilkoblet nettet, vil trefasesystemet være fullstendig ubalansert. Spenningsfallet i nettet vil da være forskjellig fra i et deltakoblet trefasesystem med balansert enfase-/trefaselast, ettersom strømmen vil flyte på en annen måte.

Det kan vises at dersom størrelsen på lasten er den samme, vil linjespenningsfallet i et *balansert trefasesystem* reduseres med 50 % sammenlignet med i et fullstendig *ubalansert trefasesystem* [5]. Dette vil selvsagt også gjelde for spenningsstigning dersom effekten flyter i motsatt retning.

3. RESULTATER

For å undersøke hvor stor andel plusskunder som må til for å skape problemer i lavspenningsnettet, vil simuleringer med ulike betingelser bli utført både i symmetrisk og usymmetrisk nett. Eksempelnettet som skal undersøkes er presentert i Figur 1.



Figur 1: PowerFactory – Kabelnett med DG jevnt fordelt ($I_{k2,min} \approx 1200 \text{ A}$)

Kabelnettet består av et stivt nett (external grid), en fordelings-transformator (transformer) og fire kabelskap med tilknyttede kunder (BB1, BB2, BB3 og BB4). Kablene er av typen DKBA 3x150 Al i hele kabelnettet, foruten kablen ut til BB4 som er DKBA 3x50 Cu. Kabellengdene i Figur 1 er valgt slik at det svakeste punktet i nettet (BB4) har en minimum kortslutningsstrøm ($I_{k2,min}$) på omtrent 1200 A, noe som kan anses som et sterkt nett. Disse kabellengdene vil varieres slik at simuleringer kan gjennomføres med ulik nettstyrke.

Hver av lastene (General Load) er satt til å være 10 kW for å representere 10 kunder i lettlast. Som Figur 1 viser gir dette totalt 40 kunder i kabelnettet, og dermed 40 kW symmetrisk last under nettstasjonen. Linjespenningen på sekundærsiden av nettstasjonen er som tidligere nevnt 240 V. Denne spenningen er spesifisert i *RENblad 6021*, og er anbefalt som utgående spenning fra nettstasjoner i IT-nett [6]. Dersom ikke annet er spesifisert, er plusskundene geografisk jevnt fordelt utover kabelnettet. Hvert av kabelskapene har da én tilkoblet PV-enhet (PV system). Produksjonen til PV-enheten bestemmes av penetrasjonsgraden. Eksempelvis vil det ved 50 % penetrasjonsgrad være slik at 5 av 10 kunder på hvert kabelskap har et 4 kW solcellepanel, som summeres til 20 kW per kabelskap.

3.1 Symmetrisk nett – PV tilkoblet nettet via trefaseomformer

Som tidligere nevnt må spenningsnivået ifølge FoL være innenfor et intervall på $\pm 10 \%$ av nominell spenning, som i norsk IT-nett er 230 V. Det tillatte spenningsintervallet i IT-nett er derfor som gitt i ligning (1).

$$0,9 \cdot 230 \text{ V} \leq U \leq 1,1 \cdot 230 \text{ V} \quad (1)$$

$$207 \text{ V} \leq U \leq 253 \text{ V}$$

Det tas utgangspunkt i et symmetrisk nett med tilkobling av PV-anleggene via trefaseomformere, og en kortslutningsstrøm ($I_{k2,min}$) i nettets svakeste punkt på omtrent 1200 A. Da vil en penetrasjonsgrad av plusskunder på 70 % være mulig uten at kravet i ligning (1) brytes. Dersom $I_{k2,min}$ reduseres til 800 A, vil derimot spenningen overstige 253 V i store deler av nettet ved 70 % penetrasjonsgrad.

Det må her gjøres oppmerksom på at spenningen på lavspenningssiden av fordelingstransformatoren er modellert som en stiv spenning på 240 V. I virkeligheten vil denne spenningen variere grunnet spenningsvariasjoner i overliggende nett. Dette betyr at det i praksis vil være risikabelt å tillate at spenningsstigningen fra PV-anlegg når 253 V.

3.2 Usymmetrisk nett – PV tilkoblet nettet via enfaseomformer

Simuleringene i dette delkapitlet vil gi en mer realistisk representasjon av utfordringene i norsk IT-nett, ettersom ubalanse tas med som en faktor. For å undersøke hvilken påvirkning ubalansert produksjon har på spenningsnivå og -usymmetri i lavspenningsnettet, er det valgt å gjøre simuleringer med tilkobling av PV-anlegg via enfaseomformere. Bortsett fra dette har simuleringene det samme utgangspunktet som i forrige delkapittel. $I_{k2,min}$ er satt til å være omtrent 800 A i nettets svakeste punkt (BB4) gjennom hele delkapitlet.

3.2.1 Jevn geografisk fordeling av plusskunder i kabelnettet

I denne delen tas det utgangspunkt i Figur 1, dvs. at plusskundene er jevnt fordelt i kabelnettet. I Tabell 1 er det valgt å skape en så stor usymmetri som mulig, ved at alle PV-anlegg kobles mellom de samme to fasene (L1-L2). U_{ij} er linjespenningen mellom fase i og j .

Tabell 1: All PV koblet på L1-L2

| Penetrasjonsgrad | Linjespenning | Kabelskap ($I_{k2,min}$) | | | |
|------------------|---------------|----------------------------|--------------|--------------|-------------|
| | | BB1 (2128 A) | BB2 (1096 A) | BB3 (1221 A) | BB4 (805 A) |
| 30 % | U_{12} | 249 V | 251 V | 252 V | 254 V |
| | U_{23} | 240 V | 240 V | 240 V | 240 V |
| | U_{31} | 234 V | 233 V | 232 V | 231 V |
| 50 % | U_{12} | 258 V | 262 V | 265 V | 269 V |
| | U_{23} | 244 V | 245 V | 246 V | 247 V |
| | U_{31} | 235 V | 234 V | 234 V | 233 V |

Linjespenninger som ligger utenfor kravet i FoL er merket med mørkegrå bakgrunn. Det er tydelig at spenningsnivået i Tabell 1 bryter med FoL ved en mye lavere penetrasjonsgrad enn i det symmetriske tilfellet. Grunnen til dette er at enfasetilkobling av solcellepanelene i dette tilfellet gir en stor ubalanse i nettet, noe som gir en betydelig høyere linjespenningsstigning over de to fasene som solcellepanelene er tilkoblet. Som forklart i innledningen er kravet i FoL at graden av usymmetri ikke skal overstige 2 %. Spenningsusymmetrien på BB4 ved 50 % penetrasjonsgrad beregnes som vist i ligning (2).

$$\beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2} = 0,3381 \rightarrow \frac{U_+}{U_-} = \frac{\sqrt{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}}{\sqrt{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \cdot 100 = 8,5 \% \quad (2)$$

8,5 % spenningsusymmetri er langt utenfor kravet i FoL. Dersom det ikke hadde vært reaktive tap i transformator og kabler, ville spenningsnivået på U_{23} og U_{31} vært identisk, og usymmetrien ville vært redusert. Spenningsusymmetrien er altså også avhengig av reaktansen i nettet [5].

Tabell 2 viser spenningsnivået på de tre fasene når plusskundene fordeles jevnere utover de tre fasene.

Tabell 2: PV koblet 40 % på L1-L2, 30 % på L2-L3 og 30 % på L3-L1

| | | Kabelskap ($I_{k2,min}$) | | | |
|------------------|---------------|----------------------------|--------------|--------------|-------------|
| Penetrasjonsgrad | Linjespenning | BB1 (2128 A) | BB2 (1096 A) | BB3 (1221 A) | BB4 (805 A) |
| 30 % | U_{12} | 242 V | 243 V | 243 V | 243 V |
| | U_{23} | 241 V | 242 V | 242 V | 242 V |
| | U_{31} | 241 V | 241 V | 241 V | 241 V |
| 50 % | U_{12} | 248 V | 250 V | 251 V | 253 V |
| | U_{23} | 246 V | 248 V | 249 V | 250 V |
| | U_{31} | 245 V | 247 V | 248 V | 249 V |

Selv om det også i Tabell 2 er noe forhøyede spenninger, er spenningsnivået nå innenfor kravet i FoL. Dette var ikke tilfelle i Tabell 1. Usymmetrien på BB4 ved 50 % penetrasjonsgrad er nå kun 1,0 %.

3.2.2 Ujevn geografisk fordeling av plusskunder i kabelnettet

Geografisk plassering av plusskunder i lavspenningskretsen har stor innvirkning på spenningsnivået. Hvis plusskundene er tilknyttet der nettet er sterkt, dvs. i nærheten av nettstasjonen, blir ikke spenningsstigningen så høy. I motsatt fall, dersom de tilknyttes der nettet er svakt, vil spenningsstigningen kunne bli betydelig. I Tabell 3 er alle plusskundene tilknyttet BB4, hvor nettstyrken er lavest.

**Tabell 3: PV koblet 40 % på L1-L2, 30 % på L2-L3 og 30 % på L3-L1.
Plusskunder plassert langt unna nettstasjon**

| Penetrasjons-grad | Linje-spenning | Kabelskap ($I_{k2,min}$) | | | |
|-------------------|----------------|----------------------------|--------------|--------------|-------------|
| | | BB1 (2128 A) | BB2 (1096 A) | BB3 (1221 A) | BB4 (805 A) |
| 30 % | U_{12} | 242 V | 240 V | 246 V | 253 V |
| | U_{23} | 241 V | 239 V | 244 V | 250 V |
| | U_{31} | 240 V | 239 V | 243 V | 249 V |
| 50 % | U_{12} | 247 V | 245 V | 255 V | 266 V |
| | U_{23} | 246 V | 244 V | 252 V | 262 V |
| | U_{31} | 245 V | 243 V | 251 V | 261 V |

Dersom all distribuert produksjon blir flyttet langt unna nettstasjonen, vil altså spenningsnivået bli hele 266 V (15,7 % over U_n) i nettets svakeste punkt. Spenningsusymmetrien på BB4 er 1,2 %.

Hvis alle plusskundene derimot flyttes til BB1, hvor nettet er sterkest, vil spenningsnivået holde seg innenfor kravet i FoL med god margin. Det høyeste spenningsnivået vil da bli 248 V på BB1, og maksimal usymmetri vil bli 0,7 %.

3.2.3 Sammenlagret ubalanse

Det antas nå at det kun finnes to plusskunder i kabelnettet. De to plusskundene er tilknyttet henholdsvis BB4 og BB3, og de er tilknyttet samme fase. Dersom det tillates at plusskunde 1 forårsaker en ubalanse på 1,5 % på BB4, som i dette tilfellet tilsvarer en produksjon på 7 kW, hvor høy effekt kan plusskunde 2 på BB3 mate inn før kravene i FoL brytes? Dette er undersøkt i Tabell 4.

Tabell 4: Maksimal størrelse på enfaseproduksjon hos plusskunde 2 når plusskunde 1 har en produksjon på 7 kW (1,5 % ubalanse) på samme fase

| Linjespenning på BB4 | Størrelse på solcellepanel tilknyttet BB3 (Plusskunde 2) | | | |
|----------------------|--|--------|--------|--------|
| | 10 kW | 6 kW | 4 kW | 3 kW |
| U_{12} | 241 V | 239 V | 238 V | 237 V |
| U_{23} | 234 V | 233 V | 232 V | 232 V |
| U_{31} | 230 V | 230 V | 230 V | 230 V |
| Spenningsubalanse | 2,75 % | 2,27 % | 2,07 % | 1,79 % |

Å tillate at en plusskunde forårsaker en viss ubalanse kan altså være risikabelt, ettersom dette kan føre til en sammenlagret ubalanse som bryter med FoL. Tabell 4 viser at dette kan skje ved så lav produksjon som 3 kW dersom to plusskunder tilknyttes den samme fasen i den svake delen av et eldre kabelnett.

3.3 Minimum nettstyrke for å overholde FoL

Plusskundene er nå nok en gang geografisk jevnt fordelt i nettet. Oversikten i Tabell 5 presenterer hvilken nettstyrke ($I_{k2,min}$) som kreves i nettets svakeste punkt (BB4) for å overholde FoL, når penetrasjonsgrad og fasefordeling av plusskunder varieres. Hvilket av kravene i FoL som er begrensende er merket med mørkegrå bakgrunn.

Tabell 5: Minimum nettstyrke for å overholde kravene i FoL

| PV i lavspenningsnettet | | Begrensende krav – FoL | | Resultat |
|-------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|--|
| Penetrasjons-grad | Fasefordeling (L1, L2, L3) | Spenningsstigning | Spenningsusymmetri | Minimum nettstyrke ($I_{k2,min}$) på BB4 |
| 30 % | 50 %, 25 %, 25 % | 17 V (7,5 %) | 2,0 % | 593 A |
| | 40 %, 30 %, 30 % | 22 V (9,5 %) | 2,0 % | 208 A |
| | Symmetrisk | 23 V (10 %) | 0 % | 118 A |
| 50 % | 50 %, 25 %, 25 % | 23 V (10 %) | 1,9 % | 980 A |
| | 40 %, 30 %, 30 % | 23 V (10 %) | 1,0 % | 805 A |
| | Symmetrisk | 23 V (10 %) | 0 % | 626 A |
| 70 % | 50 %, 25 %, 25 % | 23 V (10 %) | 1,6 % | 1757 A |
| | 40 %, 30 %, 30 % | 23 V (10 %) | 0,7 % | 1484 A |
| | Symmetrisk | 23 V (10 %) | 0 % | 1254 A |

Det er viktig å bemerke at minimum nettstyrke som kreves for å overholde FoL avhenger av flere parametere enn de som varieres i Tabell 5. Basert på resultatene kan allikevel følgende punkter noteres:

- Ved lav penetrasjonsgrad av plusskunder er det kravet om usymmetri som er begrensende, mens det for høy penetrasjonsgrad er kravet om spenningsnivå som er begrensende. Årsaken til dette er at den lokale produksjonen dekker den lokale lasten på fasene i større grad ved høy penetrasjonsgrad. Dette er ikke tilfellet ved lav penetrasjonsgrad, noe som gjør at strømmen kan flyte i ulike retninger på de tre fasene. Ulik strømretning på de tre fasene medfører økt usymmetri
- Ved penetrasjonsgrad av plusskunder på opptil 50 % vil det være tilstrekkelig med $I_{k2,min} = 1200$ A for å overholde FoL
- Ved penetrasjonsgrad av plusskunder på 70 % og høyere vil det være krav om sterkt nett ($I_{k2,min} > 1200$ A) for å overholde FoL
- Ved økt usymmetri øker behovet for høy nettstyrke

4. KONKLUSJON

Det er vist at en økt andel av plusskunder i det norske IT-nettet kan ha stor innvirkning på spenningskvaliteten, noe som i verste fall kan føre til at spenningsnivået og -usymmetrien i kabelnettet havner utenfor kravene i FoL. I norske IT-nett vil det være spesielt store utfordringer knyttet til spenningsusymmetri, ettersom enfaseomformere ofte benyttes som grensesnitt mellom PV-anlegg og lavspenningsnett. Dette fører til en forhøyelse av spenningsnivået sammenlignet med i symmetriske system, noe som betyr at nettselskapene bør etterstrebe å fordele plusskunder så godt som mulig utover de tre fasene.

Det er gjennom rapporten vist at nettstyrke i nettets svakeste punkt, samt geografisk fordeling av plusskundene i nettet, har stor betydning for plusskundenes innvirkning på nettet. Rapporten oppsummeres med en oversikt over hvilken nettstyrke som kreves for å overholde FoL ved ulike betingelser, og det er vist at en nettstyrke på $I_{k2,min} = 1200$ A vil være tilstrekkelig i det aktuelle eksempelnettet for en penetrasjonsgrad av plusskunder på opptil 50 %.

5. REFERANSER

- [1] VDE, "VDE-AR-N 4104: Power generation systems connected to the low-voltage distribution network," 2011.
- [2] H. Kirkeby and H. Seljeseth, "TR A7448 - Utfordrende elektriske apparater," *SINTEF Energi AS*, 2015.
- [3] REN, "RENblad 3006: Råd om nettanalyse," 2011.
- [4] SINTEF Energi AS, "Tekniske data," *Planleggingsbok for kraftnett*, 2010.
- [5] B. N. Torsæter, "AN 16.12.69 - Simuleringsstudie av spenningskvalitet i lavspenningsnett med plusskunder," *SINTEF Energi AS*, 2016.
- [6] REN, "RENblad 6021: Nettstasjon - Transformator - Oljeisolerte (O) og (K) - Spesifikasjon," 2015.