



Sähköjakeluverkon ja siihen liitetyn hajautetun tuotannon sähköteknisen suojauksen kehittäminen

Kirjoittajat Lauri Kumpulainen, Ilari Ristolainen

Julkisuus: Julkinen

Suorittajaorganisaatio ja osoite VTT PL 1000 02044 VTT	Tilaaja Teknologiakeskus Oy Merinova Ab PL 810 65101 Vaasa	
Projektin vastuuhenkilö Lauri Kumpulainen	Tilaajan yhdyshenkilö Sauli Jäntti	
Projektin asiakirjanumero (VTT) VTT-R-05644-06	Tilaajan tilaus- tai viitenumero	
Hankkeen nimi, lyhytnimi ja suoritettunnus Sähkönjakeluverkon ja siihen liitetyn hajautetun tuotannon sähkötekni- sen suojaustekniikan kehittäminen, Suojaus.	Raportin numero ja sivumäärä VTT-R-05644-06, 144 s.	Päiväys 19.06.2006

Projektiraportin nimi ja kirjoittajat SÄHKÖNJAKELUVERKON JA SIIHEN LIITETYN HAJAUTETUN TUOTANNON SÄHKÖTEKNISEN SUOJAUKSEN KEHITTÄMINEN LAURI KUMPULAINEN, ILARI RISTOLAINEN	
Tiivistelmä Tutkimusraportti on DENSY-teknologiaohjelmaan kuuluvan projektin ”Sähköverkon ja siihen liitetyn hajautetun tuotannon sähkötekni- sen suojaustekniikan kehittäminen” loppuraportti. Tutkimuksessa on selvitetty simulointien ja kirjallisuustutkimuksen avulla, millaisia vaikutuksia hajautetulla sähköntuotannolla on jakeluverkkojen suojaukseen ja turvallisuuteen. Selvitys paljasti, että hajautettu tuotanto voi estää verkon suojauksen normaalin toiminnan tai hidastaa sitä, aiheuttaa verkon suojalaitteiden tarpeettomia toimintoja ja tuotantoyksiköiden tarpeettomia laukaisuja. Näiden seurauksena sähkön laatu ja sähköturvallisuus voivat vaarantua. Selvityksessä on esitetty tuotantoyksiköiden verkkoon liittämiseksi asetettavia teknisiä vaatimuksia, joita voidaan hyödyntää ohjeiden ja suositusten laadinnassa. Todettuihin ongelmiin on esitetty ratkaisuvaihtoehtoja, joista on koottavissa suojauskonsepteja erilaisille verkoille tilanteeseen, jossa verkkoon on kytketty runsaasti hajautettua tuotantoa. Monet ongelmista ovat ratkaistavissa perinteisen suojaustekniikan keinoin, mutta myös uusia ratkaisuja tarvitaan. Keskeisimmäksi hajautettuun tuotantoon liittyväksi ongelmaksi todettiin eroonkytkentäsuojauksen eli saarekekäytön estosuojauksen. Eroonkytkentäsuojauksen erityisen haastavaa, jos verkossa käytetään jälleenkytkentöjä. Myös pienjänniteverkkoon kytkettyjen tuotantoyksiköiden eroonkytkentä keskijänniteverkon maasulkutilanteissa on ongelmallista. Tutkimuksessa on osoitettu yleisimpien nykyisin käytössä olevien eroonkytkentäsuojauksen menetelmien tehokkuus ja selektiivisyys puutteelliseksi. Tutkimuksessa on kehitetty eroonkytkentäsuojauksen menetelmäkonsepti, jonka periaatteellinen toimivuus on osoitettu simulointien avulla. Kehitetty menetelmä ratkaisee sekä herkkyyden että selektiivisyysongelman, ja se sopii universaalisti erilaisten tuotantoyksiköiden yhteydessä käytettäväksi. Menetelmälle on haettu patenttia.	
Jakelu: Oy Merinova Ab, Tekes, ABB Oy, Vaasan Sähköverkko Oy, VAMP Oy, Wärtsilä Oyj, Tukes, SVK-pooli, Energiategollisuus ry, Pori Energia.	Julkisuus Julkinen

Projektin vastuuhenkilö Lauri Kumpulainen, tutkija	Tarkastus- ja hyväksymisallekirjoitukset Osmo Auvinen, teknologiapäällikkö
--	--

TIIVISTELMÄ

Tutkimusraportti on DENSY-teknologiaohjelmaan kuuluvan projektin ”Sähköverkon ja siihen liitetyn hajautetun tuotannon sähköteknisen suojaustekniikan kehittäminen” loppuraportti.

Tutkimuksessa on selvitetty simulointien ja kirjallisuustutkimuksen avulla, millaisia vaikutuksia hajautetulla sähköntuotannolla on jakeluverkkojen suojaukseen ja turvallisuuteen. Selvitys paljasti, että hajautettu tuotanto voi estää verkon suojauksen normaalin toiminnan tai hidastaa sitä, aiheuttaa verkon suojalaitteiden tarpeettomia toimintoja ja tuotantoyksiköiden tarpeettomia laukaisuja. Näiden seurauksena sähkön laatu ja sähköturvallisuus voivat vaarantua. Selvityksessä on esitetty tuotantoyksiköiden verkkoon liittämiseksi asetettavia teknisiä vaatimuksia, joita voidaan hyödyntää ohjeiden ja suositusten laadinnassa.

Todettuihin ongelmiin on esitetty ratkaisuvaihtoehtoja, joista on koottavissa suojauskonsepteja erilaisille verkoille tilanteeseen, jossa verkkoon on kytketty runsaasti hajautettua tuotantoa. Monet ongelmista ovat ratkaistavissa perinteisen suojaustekniikan keinoin, mutta myös uusia ratkaisuja tarvitaan.

Keskeisimmäksi hajautettuun tuotantoon liittyväksi ongelmaksi todettiin eroonkytkentäsuojaus eli saarekekäytön estosuojaus. Eroonkytkentäsuojaus on erityisen haastavaa, jos verkossa käytetään jälleenkytkentöjä. Myös pienjänniteverkkoon kytkettyjen tuotantoyksiköiden eroonkytkentä keskijänniteverkon maasulkutilanteissa on ongelmallista. Tutkimuksessa on osoitettu yleisimpien nykyisin käytössä olevien eroonkytkentäsuojausmenetelmien tehokkuus ja selektiivisyys puutteelliseksi.

Tutkimuksessa on kehitetty eroonkytkentäsuojaukseen menetelmäkonsepti, jonka periaatteellinen toimivuus on osoitettu simulointien avulla. Kehitetty menetelmä ratkaisee sekä herkkyys- että selektiivisyysongelman, ja se sopii universaalisti erilaisten tuotantoyksiköiden yhteydessä käytettäväksi. Menetelmälle on haettu patenttia.

ALKUSANAT

Tämä raportti on teknologiaohjelmaan ”Hajautettujen energiajärjestelmien teknologiat 2003-2007” (DENSY) kuuluvan tutkimusprojektin ”Sähkönjakeluverkon ja siihen liitetyn hajautetun sähköntuotannon suojaus” loppuraportti. Projektia on koordinoanut Oy Merinova Ab, ja VTT on vastannut tutkimustyöstä.

Kiitämme projektin johtoryhmää kannustavasta ohjauksesta ja työtovereitamme hyödyllisistä kommentteista ja ajatuksia kirkastaneista keskusteluista. Hannu Laaksosta kiitämme microgrid-konseptin selventämisestä. VTT:n palveluksesta jo pois siirtynyt Pekka Saari ansaitsee kiitokset verkkoonliityntävaatimusten kokoamisesta. Erityisesti kiitämme tiimimme vetäjää Risto Komulaista hyvästä esimiestyöstä.

Vaasan yliopiston professori Kimmo Kauhaniemeä kiitämme sekä korvaamattomasta työstä simuloinnin mahdollistamiseksi että asiantuntevista kommentteista koko hankkeen aikana.

Kiitämme myös Merinovan Sauli Jänttiä ja Kari Luomaa hankkeen hallinnoinnista, joka on antanut tutkijoille mahdollisuuden keskittyä tutkimustyöhön.

Vaasassa 19.6.2006

Lauri Kumpulainen

Ilari Ristolainen

SISÄLTÖ

1	Johdanto	11
2	Suomen sähköjakeluverkkojen nykytilasta ja kehitysnäkymistä	12
2.1	Haja-asutusalueen verkot	12
2.2	Kaupunkiverkot	14
2.3	Verkkojen ja hajautetun tuotannon kehitysnäkymistä.....	14
3	Hajautetun tuotannon vaikutuksia keskijänniteverkon suojaukseen.....	15
4	Jälleenkytkennät.....	18
4.1	Jälleenkytkentöjen merkitys	18
4.2	Hajautetun tuotannon vaikutus valokaaren sammumiseen.....	18
4.3	Valokaarimallin simulointitulosten ja Korsnäsin mittaustulosten vertailu	19
4.4	Tahdistamaton pikajälleenkytkentä	22
4.4.1	Vaiheopposition riski.....	22
4.4.2	Tahdistamattoman jälleenkytkennän haitat	24
4.4.3	Tahdistamattoman jälleenkytkennän estäminen	25
5	Pienjänniteverkkojen tarkastelu	26
5.1	Aikaisemmat tutkimukset.....	26
5.1.1	Julkaistujen tutkimustulosten vähäisyys.....	26
5.1.2	Ranskalainen tutkimus.....	26
5.2	Verkon, tuotannon ja sulakkeen mallinnus	27
5.2.1	AMKA-verkon malli	27
5.2.2	Tuotantoyksiköiden mallit.....	27
5.2.3	Sulakkeen mallinnus.....	29
5.3	Simulointituloksia	29
5.3.1	Sulakkeen toiminnan hidastuminen (suojausten toiminnan estyminen)....	29
5.3.2	Tuotantoyksikön tarpeeton laukeaminen	32
5.3.3	Verkon sulakkeen tarpeeton toiminta	33
6	Keskijänniteverkon maasulun havaitseminen pienjänniteverkossa	34
6.1	Yleistä maasulun havaitsemisesta	34
6.2	Jännitteen vastakomponentti	35
6.2.1	Kirjallisuustutkimus.....	35
6.2.2	Simuloinnit	36
6.3	Pienjänniteverkon jännitteen ja taajuuden tarkastelu keskijänniteverkon maasulussa	37

6.4	Suuntaajaan perustuvan pienjänniteverkkoon liitetyn tuotantoyksikön syöttämä teho keskijänniteverkon maasulussa	41
7	Sähköturvallisuuskysymyksiä.....	44
7.1	Vastuu turvallisuudesta	44
7.2	Työturvallisuus.....	45
7.2.1	Järjestelmän monimutkaistuminen	45
7.2.2	Työmaadoittaminen ja erotuskytkin	45
7.2.3	Varavoimakoneet	46
7.3	Maasulkusuojaukselle syntyvät haasteet	47
7.3.1	Yleistä	47
7.3.2	Vian pitkittyminen ja maasulun laukaisuajan epämääräisyys	47
7.3.3	Simuloinnit maasta erotetun verkon mallilla.....	48
7.3.4	Simulointi sammutetun verkon mallilla.....	49
7.3.5	Maakontaktin menetys resistanssin kautta maadoitetussa järjestelmässä...52	
7.4	Suojauksen toiminnan hidastuminen tai estyminen	52
7.5	Saarekekäytön edellyttämä suojaus.....	52
8	Muiden maiden verkoista ja hajautetun tuotannon vaikutuksista	53
8.1	Ruotsi.....	53
8.2	Norja	53
8.3	Tanska	54
8.4	Iso-Britannian verkoista ja hajautettuun tuotantoon liittyvistä suojauksekysymyksistä	55
8.4.1	Keskijänniteverkkojen rakenteesta ja suojauksesta	55
8.4.2	Hajautetun tuotannon verkkoon liittämiseen liittyviä vaatimuksia Iso-Britanniassa.....	57
8.4.3	Potentiaalisia ongelmia ja niihin esitettyjä ratkaisuja.....	59
8.4.4	Brittiverkon simulointitarkastelut	61
8.5	Saksa.....	66
8.6	USA:n verkoista ja niiden suojauksesta	66
8.6.1	Pohjoisamerikkalainen haja-asutusalueen ilmajohtoverkko.....	66
8.6.2	Network Distribution System	69
8.6.3	Verkostoautomaation kehityksestä	70
8.7	CIGRE Benchmark –verkkomallit hajautetun tuotannon integroinnin suunnitteluun	71
9	Ratkaisuvaihtoehtoja keskijänniteverkkojen suojaukseen.....	73
9.1	Hajautetun tuotannon määrän rajoittaminen	73
9.2	Suojauksen toiminnan varmistaminen.....	73
9.2.1	Aliulottuman poistaminen	74

9.2.2	Suuntaaja liitälaitteena	75
9.2.3	Muut oikosulkuvirran rajoittamiskeinot	75
9.2.4	Distanssirele.....	75
9.2.5	Yksinkertaistettu suojauksen toiminnan tarkistuslaskenta	76
9.3	Epätahdissa tapahtuvan jälleenkytkennän estäminen	76
9.4	Suunnattu ylivirtarele virhelaukaisujen poistajana.....	77
9.5	Siirtolaukaisu takasyötön estämiseksi kiskoviassa.....	77
9.6	Eroonkytkentäsuojaus	78
9.7	Tarkoituksellinen saarekekäyttö	78
9.7.1	Saarekekäytöistä	78
9.7.2	Microgridin suojauskysymyksiä	80
10	Ratkaisuvaihtoehtoja pienjänniteverkkojen suojaukseen	82
10.1	Välisulake suojauksen toiminnan varmistajana	82
10.2	Alijännitelaukaisun aika-asettelu ja selektiivinen eroonkytkentäsuojaus	82
10.3	Relesuojaus sulakkeiden sijasta.....	82
11	Saarekekäytön esto.....	83
11.1	LoM-suojausmenetelmien jaottelu	83
11.2	Katvealue	84
11.3	Passiivisten menetelmien ja tehotasapainotilanteen tarkastelu	85
11.4	ROCOF- ja Vector Shift –menetelmien puutteita	87
11.5	ROCOF- ja Vector Shift -simuloinnit	90
11.6	Jännitteen myötäkomponenttiin perustuva LoM-suojaus.....	93
11.7	Tuulivoimaloiden alikompensointi.....	94
11.8	Särötason tarkkailu LoM-menetelmänä	95
11.8.1	Yleistä THD:n tarkkailusta	95
11.8.2	THD-tason muutokset.....	96
11.8.3	THD osana monikriteerialgoritmia.....	96
11.8.4	THD-tason tarkkailuun perustuvien menetelmien edut ja heikkoudet	98
11.9	Aktiiviset menetelmät.....	98
11.9.1	Yleistä	98
11.9.2	REED ja verkon oikosulkutehon tarkkailu	98
11.9.3	Generaattorin säätömoodin vaihtoon perustuva ratkaisuehdotus	99
11.10	Moottoreiden vaikutus LOM –suojaukseen	102
11.11	Tietoliikenteeseen perustuvista menetelmistä	105
11.11.1	Siirtolaukaisu.....	105
11.11.2	Signaalipohjainen LoM	106

12	Jatkuvuussignaaliin perustuva eroonkytkentäsuojauksen ratkaisuehdotus.....	107
12.1	Ratkaisun yleispiirteet	107
12.2	Potentiaalisia tiedonsiirtoratkaisuja.....	109
12.2.1	Matalataajuinen signaali.....	109
12.2.2	Kantoaaltosignaali	109
12.3	LoM-suojausratkaisun laitetekniikka	109
12.3.1	Lähetin	109
12.3.2	Vastaanotin	110
12.4	Vastaanottimen sijaintipaikasta	110
12.5	Jatkuvuussignaalin menetelmän arviointia.....	111
12.5.1	Signaalin voimakkuus	111
12.5.2	Hajautetun tuotannon vaikutus signaalin etenemiseen	112
12.5.3	Signaalin syntymahdollisuus muista lähteistä.....	113
12.5.4	Signaalin eteneminen verkon vikojen aikana.....	113
12.6	Ripple-signaalin simuloinnit	113
12.6.1	Lähttimen ja vastaanottimen kuvaaminen	113
12.6.2	Simuloinnit maasta erotetun verkon mallilla	114
12.6.3	Simuloinnit kompensoidun ja resistanssin kautta maadoitetun verkon malleilla	116
12.6.4	Hajautetun tuotannon määrän vaikutus signaaliin	116
12.6.5	Signaalin leviäminen vaikutus siirtoverkkoon.....	117
12.6.6	Signaalipohjaisen LoM-menetelmän simulointi IEEE 13 Node Test Feeder –verkkomallilla	117
13	Verkkoonliittynälle asetettavia teknisiä vaatimuksia.....	120
13.1	Suosituksot ja standardit	120
13.2	Yleistä vaatimuksista.....	121
13.3	Jännitetaso pysyvä muutos	121
13.4	Jännitteen nopeat muutokset	122
13.5	Jännitteen välkyntä	122
13.6	Virran yliaaltokomponentit	123
13.7	Virran DC-komponentti	124
13.8	Tehokerroin ja tahdistaminen	125
13.9	Vaikutukset ohjaussignaaleihin ja resonanssit verkon kanssa.....	125
13.10	Epäsymmetriset kytkennät	125
13.11	Verkon tukeminen suojausalueen ulkopuolisten vikojen aikana.....	126
13.12	Erotuslaite.....	126
13.13	Suojausvaatimukset	126

14 Suojauskonsepteista	128
14.1 Yleistä suojauksen muutostarpeista.....	128
14.2 Suojauskonsepti keskijänniteverkoille	128
14.2.1 Tarkastelunäkökulma.....	128
14.2.2 Suojauksen muutostarpeita ja mahdollisuuksia	128
14.3 Pienjänniteverkon suojauksen muutostarpeita	130
14.4 Suojaustekniikan mahdollisuuksia	131
15 Jatkotutkimustarpeet	133
15.1 Verkkoon liittämisen suositukset ja suunnittelutyökalut.....	133
15.2 Käytännön kohteen tarkastelu simuloinnein ja mittauksin.....	133
15.3 Signaalipohjaisen Loss-of-Mains -ratkaisuidean jatkokehitys	133
15.4 Saarekekäytöt ja varavoimakysymykset	133
15.5 1 kV:n järjestelmä	134
15.6 Hajautetun tuotannon vaikutus laskennalliseen vianpaikannukseen ja vianilmaisinten toimintaan	134
15.7 Standardiverkkomalleihin perustuvat suojauksen simulointidemonstraatioalustat	134

Käytetyt lyhenteet

AI	anti-islanding, saarekekäytön esto
CHP	combined heat and power, sähkön ja lämmön yhteistuotanto
DG	distributed generation, hajautettu tuotanto
DLC	distribution line carrier, jakeluverkkokantoaalto
DNO	distribution network operator, jakeluverkon haltija
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
LOM	Loss-of-Mains, verkkoyhteyden katkeaminen, joutuminen saareketilaan
NDZ	non detection zone, suojauksen katvealue
NRECA	National Rural Electrical Cooperative
NREL	National Renewable Energy Laboratory
pjk	pikajälleenkytkentä
RMU	ring main unit, muuntamokojeisto
ROCOF	rate of change of frequency, taajuuden muutosnopeus
SIP	session initiation protocol
THD	total harmonic distortion, harmoninen kokonaissärö

1 JOHDANTO

Tämä raportti on teknologiaohjelmaan *Hajautettujen energiajärjestelmien teknologiat 2003-2007* (DENSY) kuuluvan tutkimusprojektin *Sähkönjakeluverkon ja siihen liitetyn hajautetun sähköntuotannon suojaus* loppuraportti. Projektia on koordinoanut Oy Merinova Ab, ja VTT on vastannut tutkimustyöstä. Hanketta ovat rahoittaneet Tekesin ja Merinovan ohella ABB Oy, VAMP Oy, Wärtsilä Oyj, Vaasan Sähköverkko Oy, Energiategollisuus ry, Tukes ja Pori Energia.

Pienten, jakeluverkkoon liitettävien sähköntuotantoyksiköiden uskotaan yleistyvän lähivuosikymmeninä. Tämän kehityksen ajaviksi voimiksi voidaan nähdä fossiilisten polttoaineiden ehtyminen, energian hinnan nousu, pyrkimys eroon tuontienergiasta, kasvihuonekaasu- ja ilmastoasiat, poliittinen päätöksenteko sekä voimakkaat panostukset teknologian kehittymiseen. Joissakin maissa, kuten esimerkiksi Tanskassa ja Saksassa, jakeluverkkoon on tukipolitiikan myötävaikutuksella liitetty jo merkittävästi hajautettua tuotantoa.

Koska EU:n nykyinen politiikka suosii hajautettua tuotantoa ja uusiutuvia energianlähteitä ja koska EU pyrkii harmonisoimaan jäsenmaiden lainsäädäntöä, on myös Suomessa odotettavissa hajautetun tuotannon kasvua.

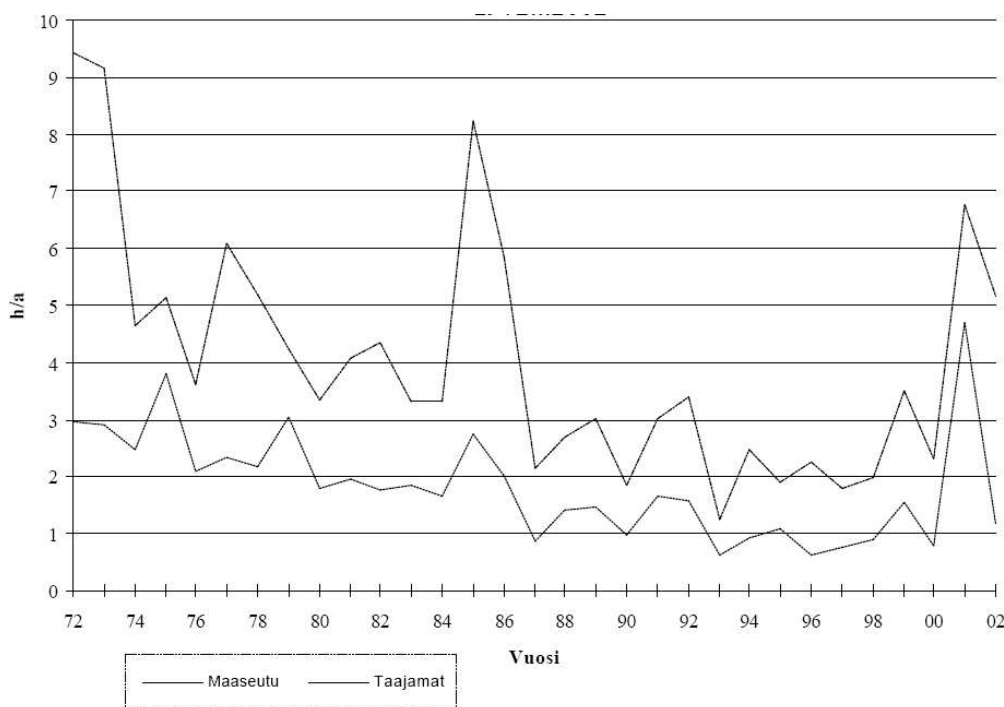
Laajasti käyttöön otettu hajautettu tuotanto muuttaa perinteisesti passiivisen, yhdestä suunnasta syötetyn jakeluverkon aktiiviseksi, monesta pisteestä syötetyksi. Jännitteen hallinnan ohella merkittävimmiten vaikutuksiksi katsotaan yleensä suojauskysymykset. Tämän tutkimuksen tarkoitus on ollut selvittää hajautetun tuotannon vaikutuksia jakeluverkkojen suojaukseen ja kehittää ratkaisuja, joita käyttämällä voidaan varmistaa verkon käyttövarmuus ja turvallisuus myös silloin, kun jakeluverkkoon on liitetty tuotantoyksiköitä.

2 SUOMEN SÄHKÖNJAKELUVERKKOJEN NYKYTILASTA JA KEHITYSNÄKYMISTÄ

2.1 HAJA-ASUTUSALUEEN VERKOT

Suomen haja-asutusalueiden jakeluverkkojen vahvoiksi puoliksi voidaan katsoa pienjänniteverkon luotettavuus sekä kehittynyt keskijänniteverkkojen automaatio ja tiedonhallinta laskennallisine vianpaikannuksineen, numeerisine suojareleineen ja kauko-ohjattavine kytkinlaitteineen.

Suomen sähköjakeluverkkojen nykytilaa arvioitaessa ongelmat painottuvat keskijänniteverkkoon. Maaseutusähköjakelussa käytetty perinteinen avojohtorakenne on erityisesti metsäisillä osuuksilla altis häiriöille. Kuten kuvasta 1 ilmenee, asiakkaan kokema keskeytysaika on mm. verkostoautomaation avulla saatu lyhenemään, mutta viime vuosina kehitys näyttää pysähtyneen. Yhteiskunnan digitalisoituminen ja automaation lisääntyminen on johtanut aikaisempaa huomattavasti kireämpiin luotettavuusodotuksiin, joihin ei pystytä vastaamaan nykyisillä maaseutuverkoilla.

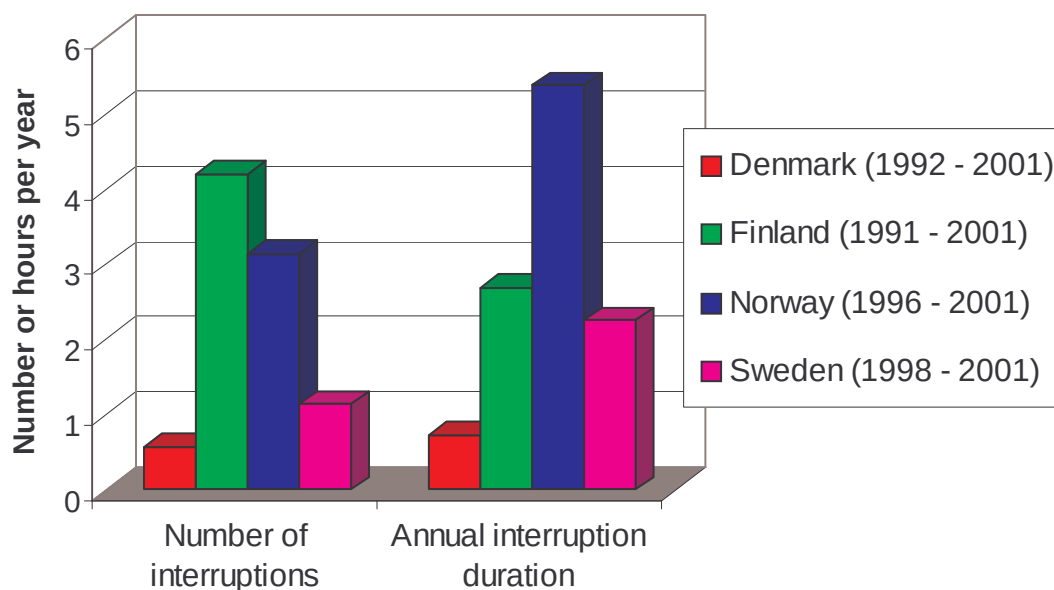


Kuva 1. Asiakkaiden keskimääräinen häiriökeskeytysaika 1972–2002 (Sener 2003).

Käyttövarmuusongelmaa pahentaa suomalainen käytäntö, jossa koko keskijännitelähtö on yhtä suojausaluetta. Tällöin vika missä tahansa lähdon osassa aiheuttaa häiriön koko

johtolähdölle. Suomalaisena ratkaisuna on ollut käyttää kauko-ohjattuja erotinasemia tyypillisesti kymmeniä kilometrejä pitkien johtolähtöjen pilkkomiseen ja vikojen erottamiseen, mutta tästä aiheutuu kuitenkin koko johtolähtöä koskevia jälleenkytkentöjä ja lyhytaikaisia keskeytyksiä.

Suuret suojausalueet aiheuttavat suurehkon vikatiheyden. Toisaalta verkostoautomaation avulla Suomessa on saatu vikojen kesto aika kohtuulliseksi muihin Pohjoismaihin verrattuna. Tämä ilmenee myös kuvasta 2, jota tulkittaessa on otettava huomioon maiden erilaiset ympäristöolosuhteet, erityisesti Suomen metsäisyys.



Kuva 2. Pohjoismaiden keskeytystaajuuden ja keskeytysaikojen vertailu (Kjolle 2006).

Toinen merkittävä haja-asutusalueiden keskijänniteverkkojen kysymys on verkkojen, erityisesti puupylväiden ikääntyminen. Suuri osa verkoista on rakennettu 1960- ja 1970-luvuilla, ja vaikka kyllästetyn pylvään käyttöikä on ylittänyt aiemmat arviot, rappeutuvien pylväiden ongelma tulee vääjäämättä vastaan melko läheisessä tulevaisuudessa. Erään näkemyksen mukaan suomalainen sähköverkko tulee 5-10 vuoden kuluessa ikään, jolloin alan yhteisenä haasteena on sähkön jakelun ja sen laadun turvaaminen (Vattenfall 2006). Verkon laaja uudistamistarve antaa mahdollisuuden olennaisiin muutoksiin luotettavuuden parantamiseksi.

Kuormituksen kasvu on haja-asutusalueella pientä, jopa negatiivista. Sähkötekniisesti verkot ovat varsin hyvässä kunnossa. Ympäristökysymykset ovat saamassa enemmän huomiota osakseen, ja maankäyttöasiat ovat hankaloituneet.

2.2 KAUPUNKIVERKOT

Taajamaverkot on pääosin kaapeloitu, eikä merkittäviä luotettavuusongelmia ole. Kaupunkien keskusta-alueilla on kuitenkin keskeytyksille erittäin kriittisiä asiakkaita, joiden määrän voi odottaa lisääntyvän.

Toisin kuin haja-asutusalueella, joissakin kaupungeissa kuormat ja kuormitustiheydet jatkavat kasvuaan mm. rakennuskannan uusiutumisen myötä. Tällöin ongelmaksi nousee siirtokyvyn kasvattaminen, mikä on tiiviisti rakennetulla alueella vaikeaa tilaongelmien vuoksi. Lisää siirtokykyä tarvitaan kasvavilla alueilla myös alueverkkoon.

2.3 VERKKOJEN JA HAJAUTETUN TUOTANNON KEHITYSNÄKYMISTÄ

Sähkönjakeluverkkojen elinkaaret ovat kymmenien vuosien pituisia. Nykyisten maaseutuverkkojen tarjoama epätydyttävä luotettavuus ja ikärakenne ovat johtamassa normaalia uusiutumistahtia oleellisesti nopeampiin muutoksiin. Suurimmilla verkkoyhtiöillä (Fortum, Vattenfall) tämä näkyy jo erityisinä luotettavuuspainotteisina ohjelmina. Keinovalikoimassa mainittu tekniikka on pitkälti perinteistä: sähköasematiheyden lisääminen, maasulkuvirran kompensointi, kauko-ohjattavat erottimet, mutta myös uusia ratkaisuja etsitään (Vattenfall 2006). Olemassa olevaa tekniikkaa ovat myös 1 kV:n järjestelmä, jonka avulla on mahdollista saada mm. suojausalueita pienemmiksi, sekä uudet 110 kV:n johtorakenteet.

Kansallisen Verkkovisio-projektin odotetaan tuovan näkemystä verkkojen uudistamiseen ja siinä tarvittavan teknologian kehittämiseen. Yksi huomioon otettavista toimintaympäristön potentiaalisista muutoksista on hajautetun tuotannon mahdollinen murros myös Suomessa. Äkillistä hajautetun tuotannon kasvua tuskin on odotettavissa, ellei tukipolitiikassa tai teknologisessä kehityksessä tapahdu yllättäviä käänteitä.

3 HAJAUTETUN TUOTANNON VAIKUTUKSIA KESKIJÄNNITEVERKON SUOJAUKSEEN

Tutkimuksen aikaisemmassa vaiheessa on raportoitu (väliraportit vuosilta 2003 ja 2004) ja simulointien avulla todennettu seuraavia hajautetun tuotannon vaikutuksia suojaukseen:

Suojauksen toiminnan estyminen tai hidastuminen: Johtolähdölle kytketyn tuotantoyksiköt voivat pienentää johdon suojareleen näkemää vikavirtaa ja estää tällä tavoin suojauksen asianmukaisen toiminnan.

Verkon suojauksen tarpeeton laukaisu: Viereisen johtolähdön viassa hajautetun tuotannon yksiköt voivat syöttää vikaan niin suuren vikavirran, että oma johtolähtö laukeaa ylivirrasta.

Takasyöttö kiskoviassa: Kiskoviassa johdoille kytketyt generaattorit voivat ylläpitää kiskovikaa syöttökatkaisijan laukeamisen jälkeen.

Tuotantoyksiköiden tarpeettomat laukaisut: Tuotantoyksiköt voivat tarpeettomasti laueta oman johtolähdön ulkopuolella tapahtuvien vikojen ja muiden muutostilanteiden seurauksena.

Jälleenkytkennän epäonnistuminen: Tuotantoyksiköt voivat jatkaa virran syöttämistä vikaan jälleenkytkennän jännitteettömäksi tarkoitetun väliajan aikana ja siten ylläpitää vikavalokaarta, mikä johtaa jälleenkytkennän epäonnistumiseen. Koska jälleenkytkentöihin liittyvät ongelmat ovat keskeinen hajautettuun tuotantoon liittyvä ongelma, niitä on tarkasteltu laajemmin luvussa 4.

Epätahdissa tapahtuva jälleenkytkentä: Jos tuotantoyksiköt eivät ole kytkeytyneet irti verkosta ennen jälleenkytkentää, ne voivat olla ajautuneet epätähtiin, pahimmassa tapauksessa vaiheoppositioon, pääverkon kanssa. Tällöin jälleenkytkentä voi aiheuttaa transientteja ja laitevaurioita. Jälleenkytkentöjä on tarkasteltu erityiskysymyksenä seuraavassa luvussa.

Oikosulkuvirtojen muutokset: Hajautettu tuotanto voi johtaa verkon oikosulkuvirtatason kasvuun, mistä voi aiheutua kytkinlaitteiden ja johtojen mitoituksen sekä suojauksen muutostarpeita. Jos hajautetun tuotannon osuus on suuri, se voi johtaa myös oikosulkuvirtatason pienenemiseen, koska perinteistä oikosulkumagnetoinnilla varustettuja tahtigeneraattoreita käyttävää tuotantoa kytketään pois tuotannosta. Pienentynyt oikosulkuvirtataso voi vaarantaa ylivirtasuojauksen toiminnan, minkä lisäksi sillä on kielteisiä vaikutuksia sähkön laatuun.

Jänniteongelmat: Hajautettu tuotanto yleensä lisää jännitteen vaihtelualuetta verkossa. Tyypillisiä ongelmia ovat jännitteen nousu sekä irti kytkeytymisestä aiheutuvat

alijännitetilanteet. Jos hajautetun tuotannon osuus on suuri, tuotannon irti kytkeytyminen saattaa johtaa laajoihin jänniteongelmiin. Tällainen tilanne voi syntyä esimerkiksi jälleenkytkentöjen yhteydessä, kun tuotantoyksiköt kytkeytyvät irti verkosta jälleenkytkennän väliaikana. Ongelma on pahimmillaan verkon huippukuormituksen aikana, jolloin myös hajautettu tuotanto on todennäköisimmin toiminnassa. Tällaisen alijännitetilanteen välttäminen nähdään jopa merkittävimmäksi hajautetun tuotannon määrää rajoittavaksi tekijäksi (Dugan 2004, Lemström 2002).

Aggregaatin toiminnan häiriintyminen: Hajautettu tuotanto voi johtaa aggregaatilla syötetyn saarekkeen stabiilisuuden menetykseen (Metzger et al. 2005). Asian vahvisti myös Rainer Bässman N-ERGIE –yhtiöstä lokakuussa 2005.

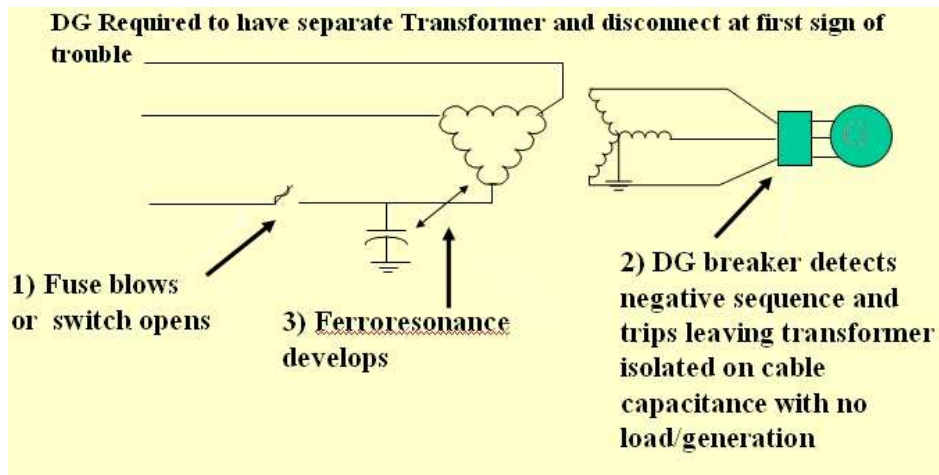
Maasulkusuojauksen muutostarpeet: Hajautettu tuotanto saattaa pitkittää maasulkua, mikä tarkoittaa, että verkon suojalaitteiden toiminnasta huolimatta maasulkua ei laukaista pois turvallisuusvaatimusten edellyttämässä ajassa. Ongelmia saattaa aiheutua myös siitä, että keskitetysti kompensoidussa verkossa tai resistanssin kautta maadoitetussa verkossa saarekkeeksi lähtökatkaisijan toiminnan seurauksena kytkeytyneen verkon osan maadoitustapa muuttuu maasta erotetuksi. Tällöin esimerkiksi kompensoidussa verkossa maasulkuvirta saattaa lähdön laukaisun jälkeen jopa kasvaa, koska kompensointi kytkeytyy pois. Resistanssin kautta maadoitetussa verkossa tuotantoyksiköiden yhteydessä oleva maasulkusuojaus puolestaan ei voi toimia resistanssin kautta maadoitetun verkon suojausperiaatteiden mukaan. Näitä maasulkusuojausten kysymyksiä on käsitelty tarkemmin sähköturvallisuuskysymyksiä tarkastelevassa luvussa.

Vaarajännite: Ilman saarekekäytön estävää suojausta tuotantoyksiköt voivat pitää maahan pudonneita johtimia jännitteisinä ja aiheuttaa hengenvaaran.

Resonanssiylijännitteet: Saareketilanteessa hajautettu tuotanto voi aiheuttaa resonanssiylijännitteitä verkkoon kytkeytyjen kondensaattoreiden kanssa. Ilmiö on sama kuin epätahtimoottoreiden yhteydessä tunnettu itseherätys. (Barker 2002, Pedersen et al. 2000)

Ferroresonanssi: Yksivaiheisia kytkinlaitteita käytettäessä hajautettu tuotanto voi myötävaikuttaa ferroresonanssitilanteen syntymiseen (Barker 2002, Dugan 2004, Mäki et al. 2003). Jos esimerkiksi pienvoimalaa syöttävää kaapelia edeltävä sulake toimii (yksi vaihe) ja voimala kytkeytyy eroon verkosta, johdon kapasitanssi ja generaattorin muuntaja voivat muodostaa ferroresonanssipiirin kuvan 3 esittämällä tavalla. Hajautettuun tuotantoon liittyvää ferroresonanssia on tarkasteltu tarkemmin viitteessä (Bronfeld 1988).

Vastaava ferroresonanssitilanne voi syntyä myös johdinkatkoksen seurauksena, ilman yksivaiheisen kytkinlaitteen toimintaa, ja se voi esiintyä myös muusta syystä tyhjäkäyvän muuntajan yhteydessä, joten ongelma ei ole suoranaisesti hajautettuun tuotantoon liittyvä.



Kuva 3. Ferroresonanssin muodostuminen (Dugan 2004).

4 JÄLLEENKYTKENNÄT

4.1 JÄLLEENKYTKENTÖJEN MERKITYS

Ilmajohtoverkoissa jälleenkytkennät ovat vallitseva käytäntö niin Euroopassa kuin Amerikassakin. Arviolta 70-90 % vioista voidaan selvittää jälleenkytkennöillä, erityisesti pikajälleenkytkennän avulla.

Pikajälleenkytkentöjen avulla suuri osa keskeytyksistä saadaan lyhennetyksi hetkellisiksi. Niitäkin pidetään kiusallisina nykyisten herkkien kuormitusten vuoksi. Verkkoyhtiöillä on pyrkimyksiä vähentää jälleenkytkentöjä. Yksi keino on muuttaa verkon maadoitustapa maasta erotetusta kompensoiduksi. Keskitetysti kompensoidussa verkossa maasulkuvirta saadaan niin pieneksi, että vika voi sammua itsestään, ilman katkaisijan toimintaa.

Toinen tehokas keino pikajälleenkytkentöjen vähentämiseksi on siirtyä jakelumuuntamoiden ylijännitesuojauksessa kipinävälisuojusta venttiilisuojiin käyttöön. Tämän menettelyn tehokkuus on osoitettu Heinen (2004) tutkimuksessa.

Jälleenkytkentöjen määrää voidaan edellä esitetyillä keinoilla vähentää, mutta niistä luopuminen ei kuitenkaan näytä todennäköiseltä. Tästä syystä jälleenkytkentöihin ja hajautettuun tuotantoon liittyvien kysymysten tutkiminen on perusteltua.

4.2 HAJAUTETUN TUOTANNON VAIKUTUS VALOKAAREN SAMMUMISEEN

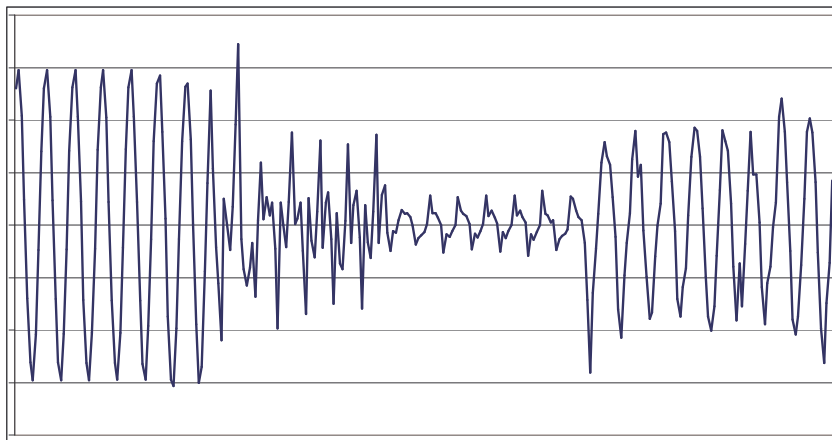
Koska jälleenkytkennät ovat vallitseva käytäntö ilmajohtoverkoissa joka puolella maailmaa, niihin liittyvät tarkastelut ovat verkon luotettavuuden kannalta olennaisia. Eroonkytkentä jälleenkytkennöissä lienee hankalimpia hajautetun tuotannon verkostokysymyksiä. Esimerkiksi viitteessä (Ye et al. 2003) on testattu eroonkytkentäsuojauksen menetelmiä vain IEEE 1547:n asettaman 2 sekunnin aikavaatimuksen näkökulmasta. Tutkimuksessa todetaan, että koordinoitua jälleenkytkennän kanssa ei ole tarkasteltu ja että tämä koordinaatio saattaa edellyttää erikoisjärjestelyjä joko lisälaitteiden tai paljon nopeamman eroonkytkentäsuojauksen avulla.

Horganin (Horgan et al. 2002) mukaan pieni jännite riittää ylläpitämään kerran syttynyttä valokaarta. Jotta jälleenkytkentä onnistuisi, hajautetun tuotannon nopea poiskytkentä on kriittisen tärkeää. Valokaaren sammumisen ja hajautetun tuotannon eroon kytkeytymisen varmistamiseksi Dugan on ehdottanut jälleenkytkennän väliajan pidentämistä vähintään 1 s pituiseksi (Dugan et al. 2002). Tämä tuskin on hyväksyttävää

kiristyvien sähkön laatuvaatimusten näkökulmasta. Gomezin (2003) mukaan pjk:n jännitteettömiä väliaikoja päinvastoin halutaan lyhentää.

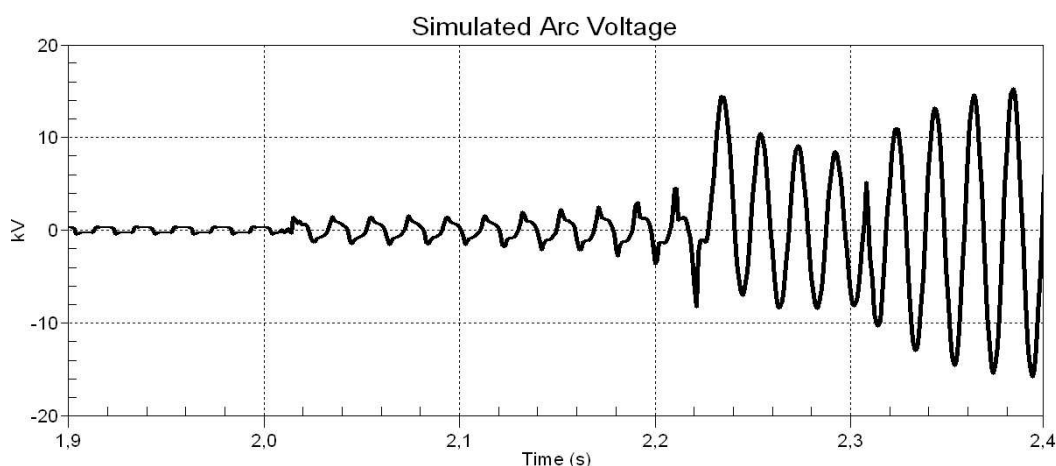
4.3 VALOKAARIMALLIN SIMULOINTITULOSTEN JA KORSNÄSIN MITTAUSTULOSTEN VERTAILU

Vaasan Sähkön ja ABB:n kautta saatiin häiriötallentimen rekisteröimiä tietoja Korsnäsän sähköasemalta. Tiedoista muodostetuissa kuvissa näkyy tuulivoimaloiden vaikutus verkon jännitteiden käyttäytymiseen mm. pikajälleenkytkennän aikana. Myös valokaarijännitteen käyttäytymistä voidaan vertailla simulointituloksiin. Kuvassa 4 on esimerkki mitatusta jännitteestä.



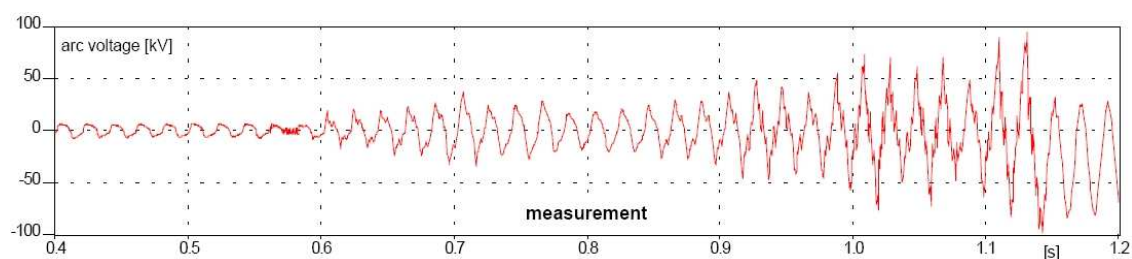
Kuva 4. Mitattu jännitteen käyrämuoto vikatilanteessa, jossa verkkoon on kytkettyä tuulivoimaloita.

Kuvassa 5 on esitetty simuloitu jännite tilanteesta, jossa maasulkuvalokaari sammuu ennen jälleenkytkentää. Kuvan simuloinnissa lähtö laukeaa hetkellä $t = 2,0$ s, minkä jälkeen tuulivoimalat pitävät yllä toisiovalokaarta, kunnes valokaari sammuu noin hetkellä $t = 2,22$ s. Jälleenkytkentähetki on $t = 2,3$ s. Toisiovalokaaren jännitteen käyrämuoto ja jännitteen palautuminen normaaliksi näyttää olevan hyvin samankaltainen kuin kuvassa 6 esitetyssä mitatussa tapahtumassa.



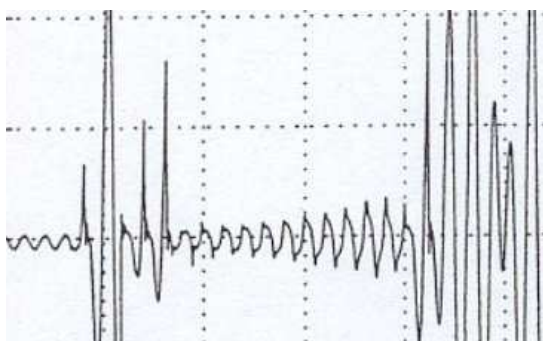
Kuva 5. Simuloitu tuulivoimaloita verkossa sisältävä maasulkutilanne, jossa maasulkuvalokaari sammuu.

Kuvassa 6 on esitetty suurjänniteverkosta mitattu valokaaren jännite. Siirtyminen ensiövalokaaresta (ennen laukaisua) toisiovalokaareen ja toisiovalokaaren käyrämuoto ovat hyvin samankaltaisin kuvan 5 simulointitulosten kanssa.



Kuva 6. Priklerin (Prikler et al. 2002) mittaama valokaaren jännite.

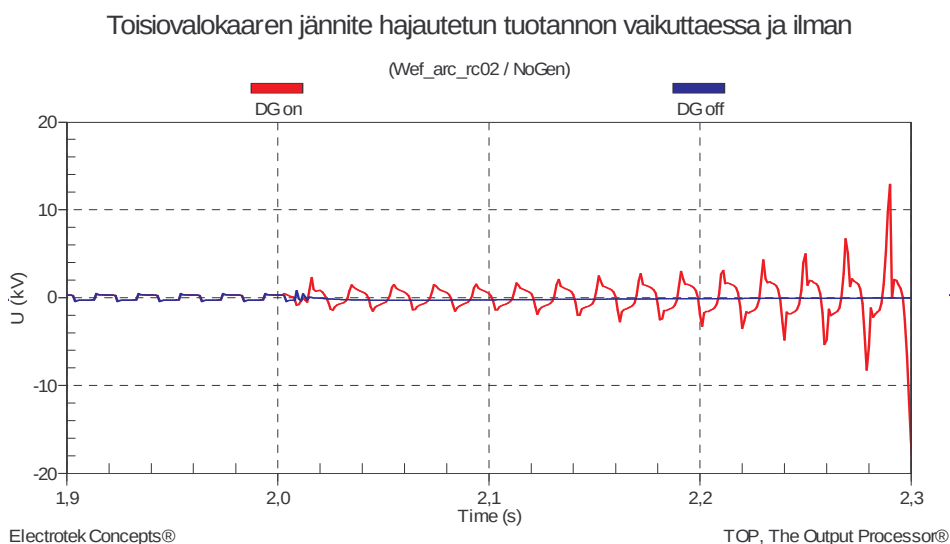
Myös Nikanderin (Nikander 1998) tutkimuksissa mitatun valokaarijännitteen käyrämuoto (kuva 7) on lähellä simuloinnin tuloksia.



Kuva 7. Mitattu valokaaren jännitteen käyrämuoto keskijänniteverkossa (Nikander 1998).

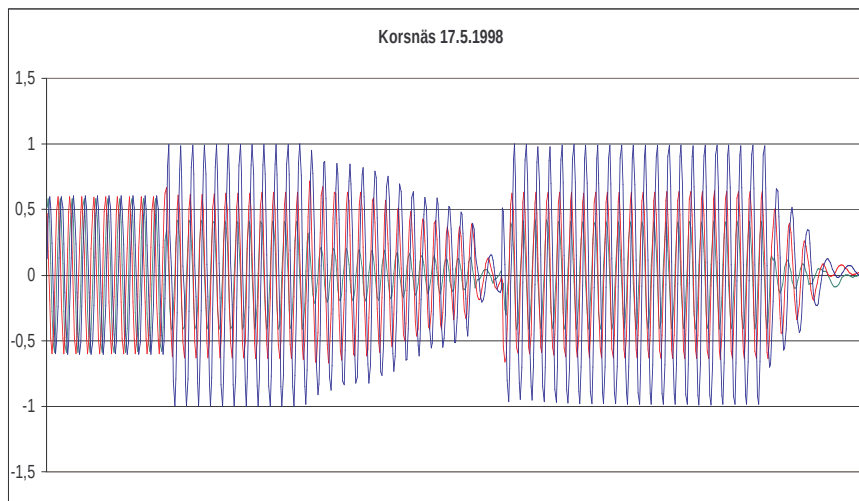
Vertailujen perusteella arvioiden käytetty valokaarimalli kuvaa valokaaren käyttäytymistä tyydyttävästi myös keskijänniteverkossa, vaikka mallin on kehitetty alun perin suuremmille jännitteille. Suurjänniteverkoissa jälleenkytkentä toteutetaan usein yksivaiheisena, jolloin vaiheiden välinen keskinäiskytkentä pitää yllä toisiovalokaarta. Suomalaisissa keskijänniteverkoissa jälleenkytkentä toteutetaan kolmivaiheisena, ja ilman hajautetun tuotannon vaikutusta valokaari sammuu nopeasti.

Käytetyn valokaarimallin ongelmana on valokaaren sammumisen ehtojen huono soveltuvuus keskijänniteverkkoihin sekä mallinnuksen rajoittuminen ennen katkaisijan sulkeutumista tapahtuviin ilmiöihin. Simuloinnit kyseisellä valokaarimallilla ovat kuitenkin antaneet vahvistuksen käsitykselle, että hajautettu tuotanto pystyy pitämään vikavalokaarta yllä. Tämä ilmenee erityisesti kuvasta 8. Kuvan 8 simuloinneissa hajautettu tuotanto ylläpitää toisiovalokaarta, jota ei ilmene ollenkaan tapauksessa, jossa hajautettua tuotantoa ei ole.

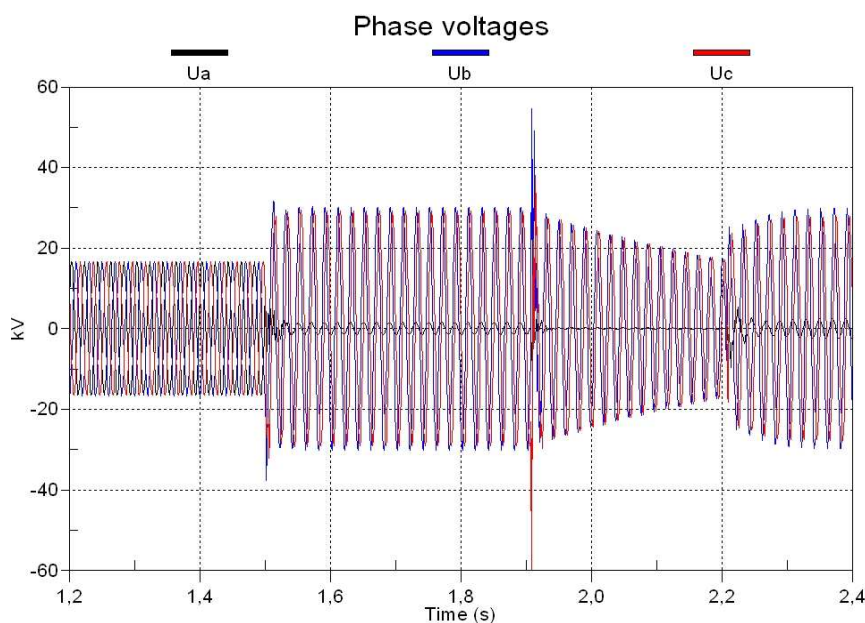


Kuva 8. Simuloitu valokaaren jännite tuulivoimaloiden vaikuttaessa ja ilman tuulivoimaloita.

Kuvassa 9 esitetyssä todellisessa tapauksessa tuulivoimalat jatkavat toimintaansa ja pitävät verkkoa jännitteisenä ainakin lähes jälleenkytkentähetkeen asti, ja jälleenkytkentä epäonnistuu. Vastaavankaltaisen tilanteen simulointituloksia on esitetty kuvassa 10.



Kuva 9. Korsnäsissä taltioitu epäonnistunut jälleenkytkentä, jossa tuulivoimaloiden vaikutus on selvästi havaittavissa.



Kuva 10. Simuloitu epäonnistunut jälleenkytkentä tuulivoimaloiden vaikuttaessa (Wef01_demo).

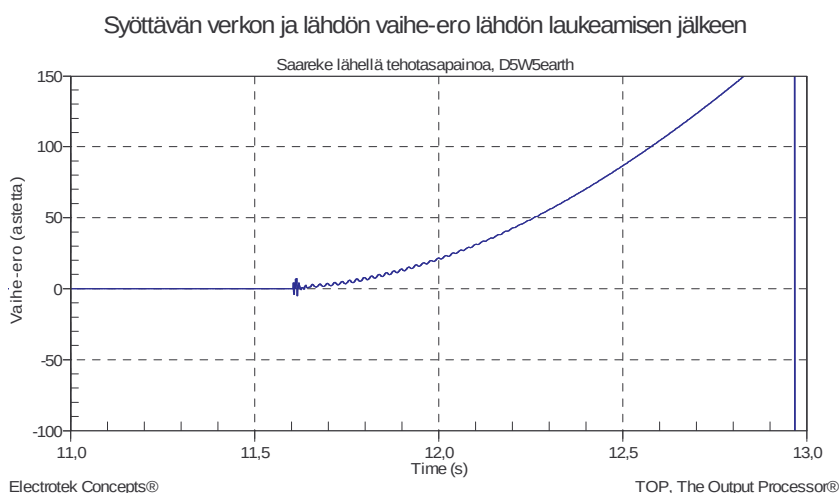
4.4 TAHDISTAMATON PIKAJÄLLEENKYTKENTÄ

4.4.1 Vaiheopposition riski

Pikajälleenkytkennässä on vaiheopposition riski erityisesti silloin, kun johtolähdön tuotanto ja kulutus eivät ole lähellä tasapainoa. Tällöin hajautetun tuotannon yksiköt voivat joko kiihtyä tai hidastua ja ajautua siten kauas pääverkon tahdista. Lähellä tehotasapainotilannetta riski vaiheoppositiosta on pienempi, koska oletettavasti

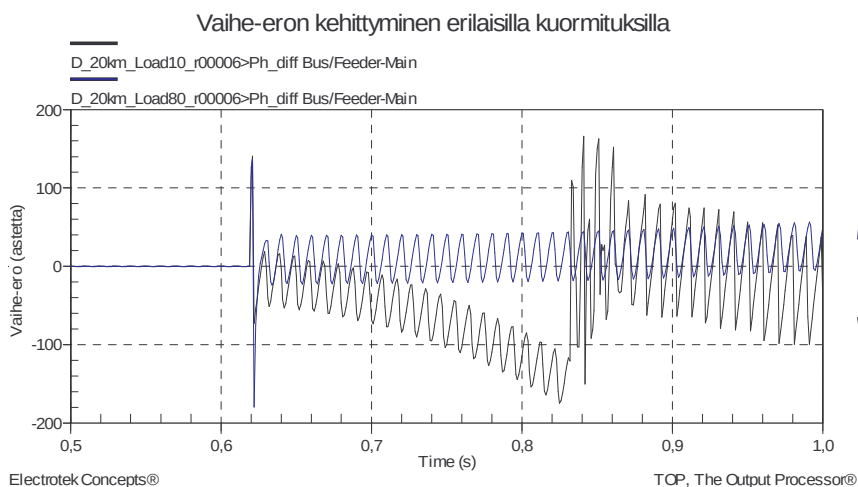
saarekkeen taajuus ei ehdi siirtyä merkittävästi eroon pääverkon taajuudesta. On kuitenkin huomattava, että tahdistamaton kytkentä on haitallinen, vaikka se ei tapahtuisikaan vaiheoppositiossa.

Kuvassa 11 on esimerkki lähellä tehotasapainoa olevan järjestelmän vaihe-eron kehittymisestä lähdön laukeamisen jälkeen. Kyseessä on johtolähtö, jolle on kytketty sekä dieselvoimala että tuulivoimala. Lähdön ja syöttävän verkon vaihe-ero kasvaa melko hitaasti lähdön laukeamisen ($t = 11,6$ s) jälkeen, joten esimerkiksi 0,3 sekunnin kuluttua tapahtuvassa jälleenkytkennässä vaihe-ero olisi vielä kohtuullisen pieni.



Kuva 11. Vaihe-eron kehittyminen lähdön lauettua.

Kuvassa 12 on esitetty kaksi erilaisella kuormituksella simuloitua tilannetta: lähtö on 10 %:n ja 80 %:n kuormassa. Johdolle on kytketty dieselvoimala ja tarkasteltava vikatilanne on 2-vaiheinen oikosulku. Kun johtolähtö on kevyessä kuormassa, dieselvoimala kiihtyy nopeasti ja laukeaa irti jo noin 0,2 s kuluttua lähdön laukeamisesta (nopeusrele). Raskaammalla kuormalla voimala sen sijaan jatkaa toimintaansa lähes vakionopeudella.

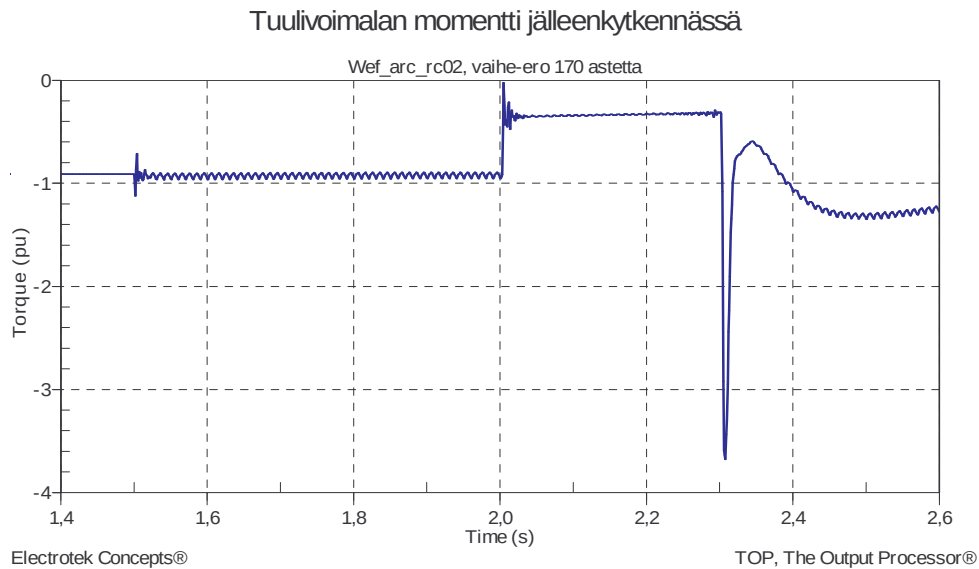


Kuva 12. Vaihe-eron kehittyminen kahdella erilaisella kuormituksella.

4.4.2 Tahdistamattoman jälleenkytkennän haitat

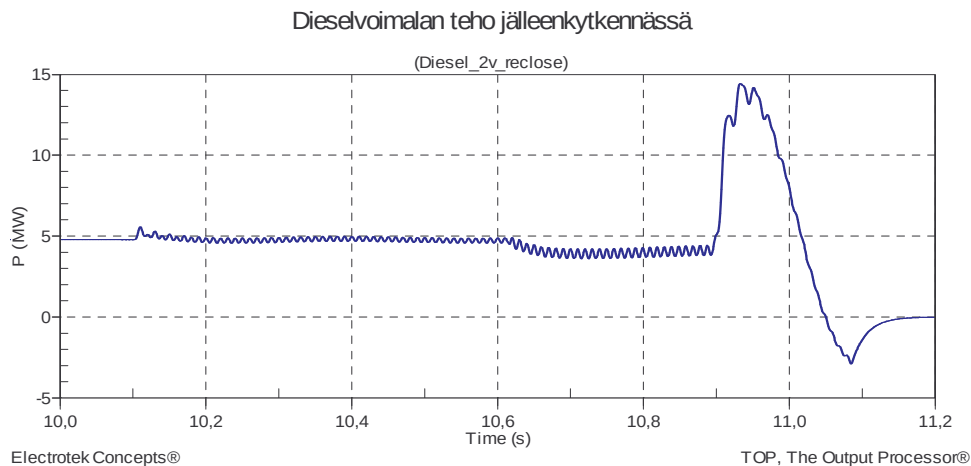
Tahdistamaton jälleenkytkentä aiheuttaa virta-, jännite- ja vääntömomenttitransientteja, jotka rasittavat erityisesti generaattoria ja voivat aiheuttaa ylimääräisiä rasituksia myös verkon komponenteille. Täysin vaiheoppositiossa tapahtuva kytkentä aiheuttaa suuren laiteaurioriskin.

Jälleenkytkentöjen voimaloille aiheuttamasta vääntömomenttitransientista on esimerkki kuvassa 13. Kyseessä on tuulivoimaloiden simulointi maasulkutilanteessa.



Kuva 13. Tuulivoimalan sähköinen vääntömomentti lähes vaiheoppositiossa tapahtuvassa jälleenkytkennässä.

Kuvassa 14 on esitetty simuloitu dieselvoimalan tehon käyttäytyminen jälleenkytkennän yhteydessä. Vikatilanteena on kaksivaiheinen oikosulku.



Kuva 14. Dieselvoimalan tehon käyttäytyminen jälleenkytkennässä.

4.4.3 Tahdistamattoman jälleenkytkennän estäminen

Tahdistamattoman jälleenkytkennän estämiseksi johtolähdön katkaisija voidaan varustaa synchronism check –releellä. Rele voidaan asettaa sallimaan pikajälleenkytkentä vain, jos pääverkko ja johtolähtö ovat tahdissa tai jos lähtö on jännitteetön. Jos sähköasemalla käytetään jännitteeseen verkkoon kytkemisen estävää relettä jälleenkytkennän estämiseen, verkkoon toimimaan jäänyt hajautettu tuotanto voi estää jälleenkytkennän. Tällaisten releiden asentaminen saattaisi antaa vaikutelman, että hajautettu tuotanto on etusijalla kuluttajien sähkön laatuun nähden. Ne voidaan katsoa kuitenkin myös erityisen eroonkytkentäsuojauksen varasuojaksi epätahtisen jälleenkytkennän estämisessä.

Jos hyväksytään sähkön laadun heikkeneminen (osa pikajälleenkytkennöistä jää toteutumatta) hajautetun tuotannon verkkoon kytkemisen seurauksena, jälleenkytkennän väliajan pidentämistä yhdessä sync check –releiden sekä generaattoreiden eroonkytkentäsuojien kanssa voidaan pitää ratkaisuna jälleenkytkentöjen ongelmiin.

Dugan (2004) pitää lähes varmana, että pikajälleenkytkentää (instantaneous reclosing, katkaisijan aukioloaika alle 0,5 s) käytettäessä jotkut yksiköt eivät kytkedy riittävän nopeasti irti. Siksi hän suosittelee 1-2 sekunnin väliaikaa. Jotkut verkkoyhtiöt USA:ssa ovat pidentäneet jälleenkytkentäajan 5 sekuntiin lähdöillä, joille on kytketty hajautettua tuotantoa.

Koska sähkön toimitusvarmuuteen kohdistuu aikaisempaa suurempia odotuksia, jälleenkytkennän väliajan pidentämistä helpommin hyväksyttävissä oleva ratkaisu lienee tehokas eroonkytkentäsuojaus, joka kytkee tuotantoyksiköt nopeasti pois verkosta verkon katkaisijan lauettua tai jopa jo ennen sitä. Eroonkytkentäsuojauksen vaihtoehtoja on tarkasteltu myöhemmin yksityiskohtaisemmin.

Suojareleisiin sisällytetyn signaalinkäsittelyn kehittyessä voi tulevaisuudessa tulla mahdolliseksi tunnistaa valokaari mittausten avulla. Siirtoverkkojen suojausta varten on jo kehitetty ratkaisuja, joissa jälleenkytkentä toteutetaan adaptiivisesti vasta, kun valokaaren sammuminen on havaittu (Khoroshev et al. 2004)

5 PIENJÄNNITEVERKKOJEN TARKASTELU

5.1 AIKAISEMMAT TUTKIMUKSET

5.1.1 Julkaistujen tutkimustulosten vähäisyys

Pienjänniteverkoilla tehtyjä hajautetun tuotannon vaikutusten simulointitarkasteluja löytyy kirjallisuudesta varsin vähän. Varsinkin suojausta käsitteleviä tutkimustuloksia on julkaistu erittäin niukasti. Cairen (Caire et al. 2002, 2003) tutkimukset ovat painottuneet pienjänniteverkkoon kytketyn tuotannon vaikutuksiin keskijänniteverkossa, eivätkä ne käsittele pienjänniteverkon suojausta. Aurinkosähköjärjestelmiä tarkastelevissa tutkimuksissa on usein keskitytty yliaalto- ja jännitekysymyksiin. Yleisesti ottaen pienjänniteverkkoon kytkettyjen tuotantoyksiköiden vaikutuksista sulakesuojaukseen on vaikea löytää tutkimustuloksia.

5.1.2 Ranskalainen tutkimus

Tran-Quocin (Tran-Quoc et al. 2003) tutkimuksessa on selvitetty pienten tuotantoyksiköiden vaikutuksia pienjänniteverkkoon. Simulointeja on toteutettu EMTP- ja tehonjakolaskentaohjelmistoilla. Tarkastelun kohteena on ollut kolmen tyyppinen eurooppalainen pienjänniteverkko: kaupunkiverkko (urban), maaseutuverkko (rural) ja sekaverkko (near urban), joista ainakin kaupunkiverkko poikkeaa huomattavasti suomalaisista ratkaisuista. Tuotantoyksikön koko on vaihdellut muutamasta kVA:sta 250 kVA:han. Tuotantoyksiköiden tyyppiä tai mallinnusta ei valitettavasti ole raportoitu.

Oikosulkutarkastelut on tehty vain urban ja near urban –tyyppisille verkoille. Tutkimuksessa todetaan, että hajautetulla tuotannolla ei ole vaikutusta pääverkon syöttämään oikosulkuvirtaan. Sulakesuojauksessa ei katsota tarvittavan mitään muutoksia. Tuloksia voitaneen pitää yllättävinä. Ne ovat ristiriidassa muiden tutkimustulosten kanssa, joiden mukaan hajautettu tuotanto voi estää verkon ylivirtasuojauksen asianmukaisen toiminnan (suojauksen toiminnan estyminen tai hidastuminen). Suojalaitteen näkemän virran pienenemisen teorialtarkastelu on esitetty viitteessä (Kauhaniemi et al. 2004-1).

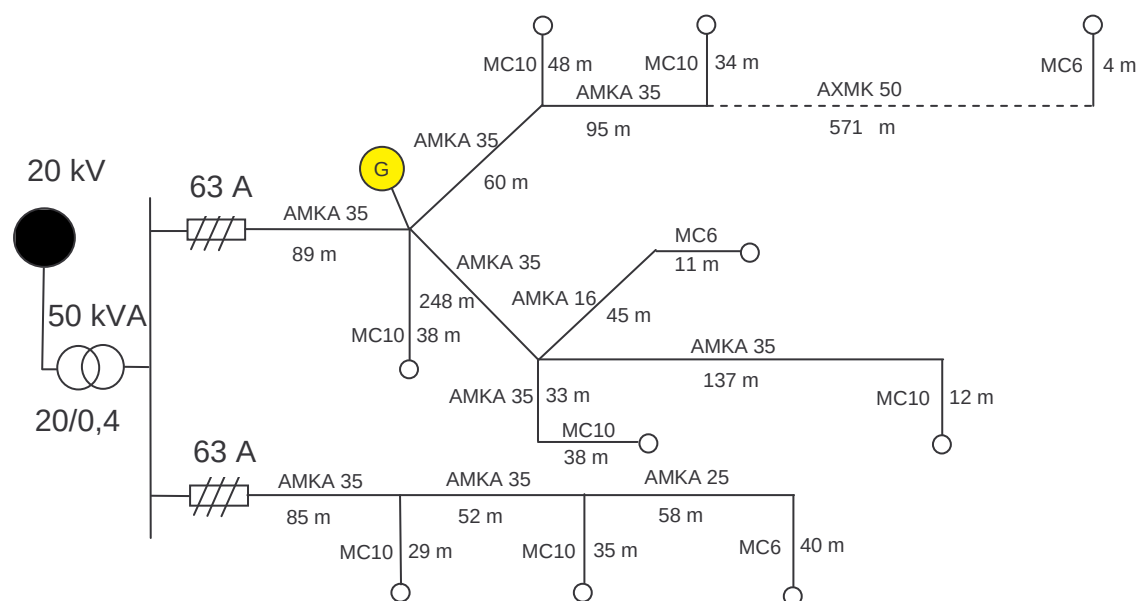
Tutkimuksen mukaan taajamaverkko sietää pieniä tuotantoyksiköitä selvästi paremmin kuin maaseutuverkko. Pääasiallisia rajoittavia tekijöitä ovat jännitteen hallinta ja haarojen virrat.

Mielenkiintoinen tieto on myös, että ranskalaisten säädösten mukaan hajautettu tuotanto edellyttää omaa johtolähtöä tai toista muuntajaa, mikäli tuotantoyksikön teho ylittää 40 % muuntajan tehosta.

5.2 VERKON, TUOTANNON JA SULAKKEEN MALLINNUS

5.2.1 AMKA-verkon malli

Hajautetun tuotannon vaikutusta AMKA-verkkojen sulakesuojaukseen tarkasteltiin kuvan 15 mukaisella verkkomallilla. Malli perustuu todelliseen muuntopiiriin. Todellisen verkkomallin käyttäminen simulointien perustana antoi mahdollisuuden verrata simuloinnin antamia vikavirtojen arvoja verkostolaskennan tuottamiin tuloksiin.



Kuva 15. AMKA-verkon malli.

5.2.2 Tuotantoyksiköiden mallit

Generaattorina AMKA-verkon simuloinneissa käytettiin tahtigeneraattoria sekä vaihtosuuntaajaa, jonka voidaan ajatella kuvaavan esimerkiksi mikroturbiini- tai polttokennopohjaista tuotantoyksikköä. Tahtigeneraattorin nimellisteho S_n oli 40 kVA ($P_n = 32$ kW). Sen arvot on otettu viitteestä (Caire et al. 2003) ja esitetty taulukossa 1.

Tuotantoyksikön suojausasetteluina käytettiin alla esitettyjä arvoja. Ne eivät ole suoraan minkään normin tai suosituksen mukaiset, mutta noudattavat pitkälti maailmalla käytettyjä suositusarvoja. Jännite- ja taajuusreleen asetukset on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 1. Tahtigeneraattorin arvoja.

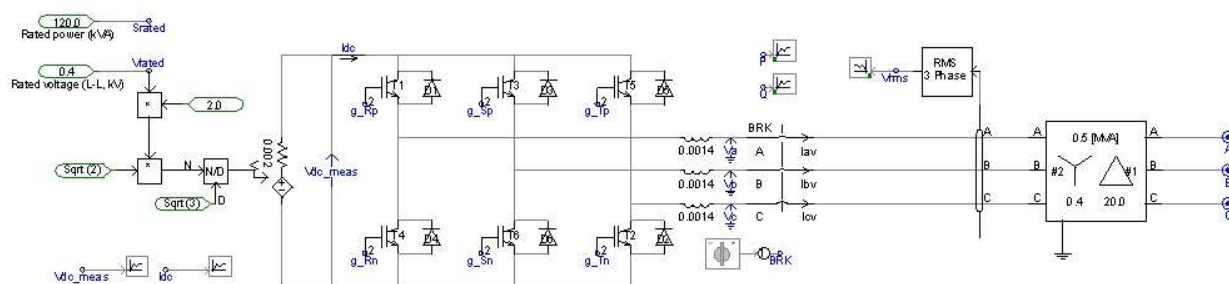
R_a	0.008 pu
X_p	0.062 pu
X_d	2.5 pu
X_d'	0.109 pu
T_{d0}'	1.16 s
X_d''	0.054 pu
T_{d0}''	0.01 s
X_q	1.5 pu
X_q'	0.109 pu
T_{q0}'	1.16 s
X_q''	0.07 pu
T_{q0}''	0.01 s
Air Gap factor	0.8
H	0.1234 MWs/MVA

Taulukko 2. Jännite- ja taajuusreleen asetukset.

Suure	Asettelu	Aikahidastus
Ylijännite		
- ylempi porras	110 %	0,2 s
- alempi porras	106 %	30 s
Alijännite		
- ylempi porras	90 %	2 s
- alempi porras	80 %	0,2 s
Ylitaajuus	50,5 Hz	0,2 s
Ylitaajuus	49,5 Hz	0,2 s

Ylivirtareleen asetusarvoina käytettiin seuraavia arvoja: 0,15 kA/0,5 s ja 1,0 kA/0,1 s.

Vaihtosuuntaajamallin nimellisteho oli 120 kW, mutta sen teho oli säädetty arvoon 50 kW ja tehokerroin arvoon 1. Mallin kaavio on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. PWM-vaihtosuuntaajan PSCAD-malli (Kauhaniemi et al. 2004-2).

5.2.3 Sulakkeen mallinnus

Sulakkeesta kehitettiin Simulointiympäristö-hankkeessa PSCAD-komponenttimalli. Käytännössä sulakkeet ovat 1-vaiheisia, mutta käytettävyyden parantamiseksi on kehitetty myös 3-vaiheinen sulakemalli. Malli perustuu ABB:n OFAA gG-tyypin pienjännitesulakkeeseen, kuitenkin siten, että käyttäjä pystyy itse ohjelmoimaan malliin haluamansa sulamiskäyrän. Täten sulake saadaan tarvittaessa toimimaan minkä tahansa valmistajan tuotteiden mukaisesti. Sulakkeisiin ei ole mallinnettu virranrajoitusominaisuutta. (Kauhaniemi et al. 2004-2)

Pienjänniteverkon simuloinneissa sulakkeita käytettiin sekä johtolähdöillä että generaattorin suojana. Generaattorin ja verkon välissä oli simuloinneissa 160 A:n sulake (OFAA gG, 690 V).

5.3 SIMULOINTITULOXSIA

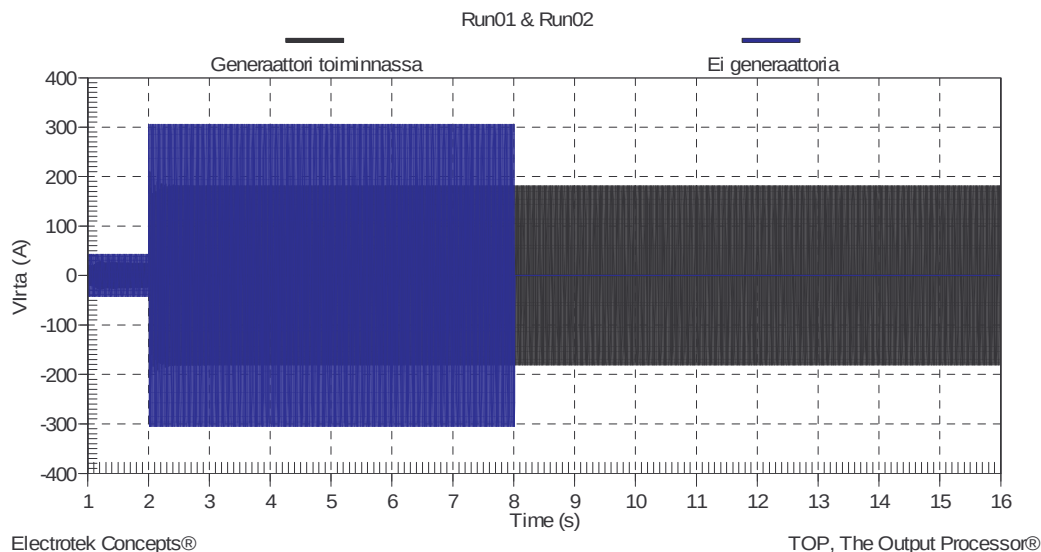
5.3.1 Sulakkeen toiminnan hidastuminen (suojauskeinon toiminnan estyminen)

Tahtigeneraattorin vaikutus sulakkeen näkemään vikavirtaan selvitettiin simuloimalla 1-vaiheinen oikosulkutilanne ensimmäisen johtolähdön loppuosalla, AXMK-kaapelin loppupäässä. Lähdön alkupään sulakkeen läpi kulkeva vikaantuneen vaiheen vaihevirran hetkellisarvokäyrä on esitetty kuvassa 17.

Kun generaattori ei ollut toiminnassa, lähdön alkupään sulakkeen läpi kulkeva vikavirta oli noin 215 A eli noin 3,4-kertainen 63 A:n sulakkeen nimellisvirtaan nähden. Sulake paloi 7 sekunnin kuluttua vian alkamisesta. Kun tahtigeneraattori on kytkettynä lähdön alkuosalle, sulakkeen läpi kulki vain noin 128 A:n virta, joka ei polttanut sulaketta edes 15 sekunnin kuluessa. Määräysten mukaan vikavirran olisi pitänyt olla vähintään kolminkertainen sulakkeen nimellisvirtaan nähden.

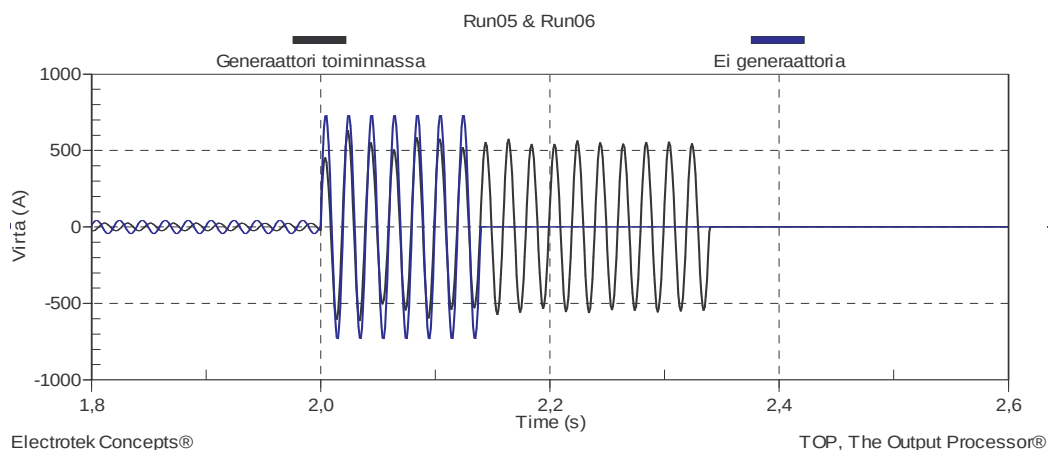
Kun vikapaikkana oli paikka 2, ennen kaapeliosuutta, vikavirrat käyttäytyivät kuvan 18 esittämällä tavalla. Generaattorin vaikutuksesta sulakkeen toiminta-aika piteni.

Vaiheen A virta 1-vaiheisessa oikosulussa



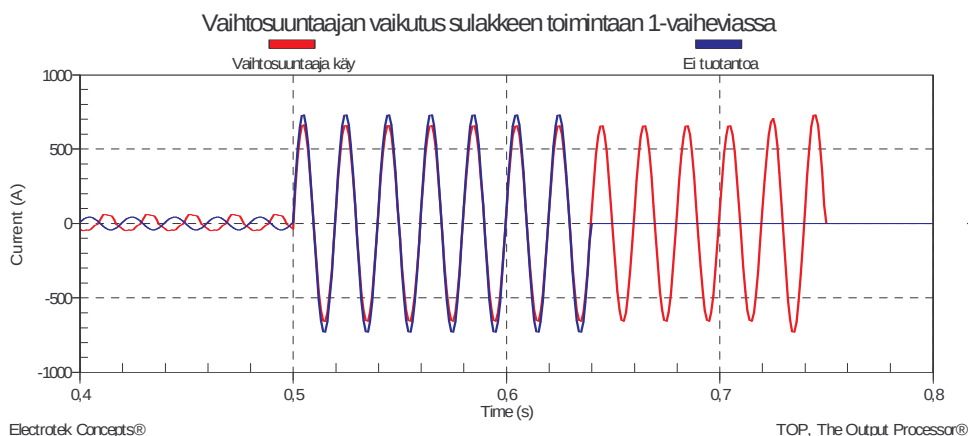
Kuva 17. Sulakkeen läpi kulkeva virta (hetkellisarvo) generaattorin toimiessa ja ilman generaattoria, vikapaikka 1.

Sulakkeen virta generaattorin toimiessa ja ilman generaattoria, 1-vaiheinen vika



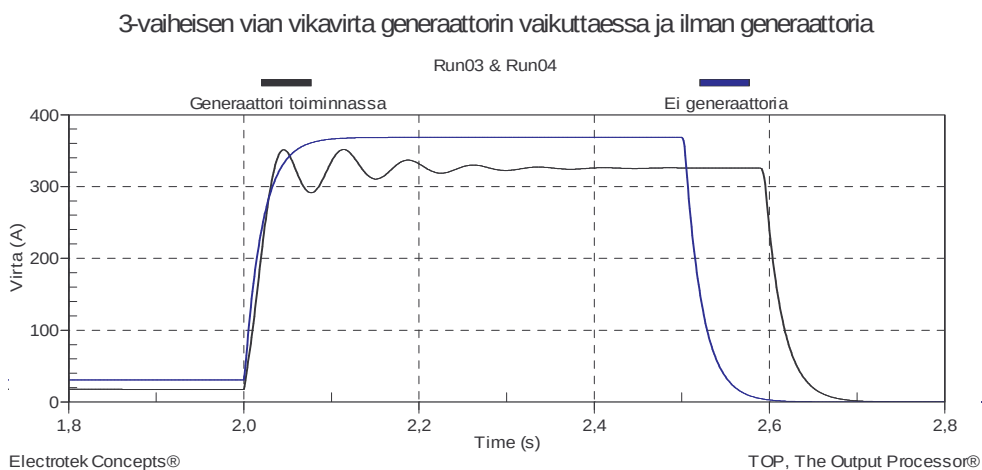
Kuva 18. Sulakkeen läpi kulkeva virta (hetkellisarvo) generaattorin toimiessa ja ilman generaattoria, vikapaikka 2.

Vastaavaa tilannetta simuloitiin myös vaihtosuuntaajan vaikuttaessa. Myös suuntaajan syöttämä oikosulkuvirta pidensi 1-vaiheviassa sulakkeen toiminta-aikaa, kuten kuvasta 19 ilmenee.



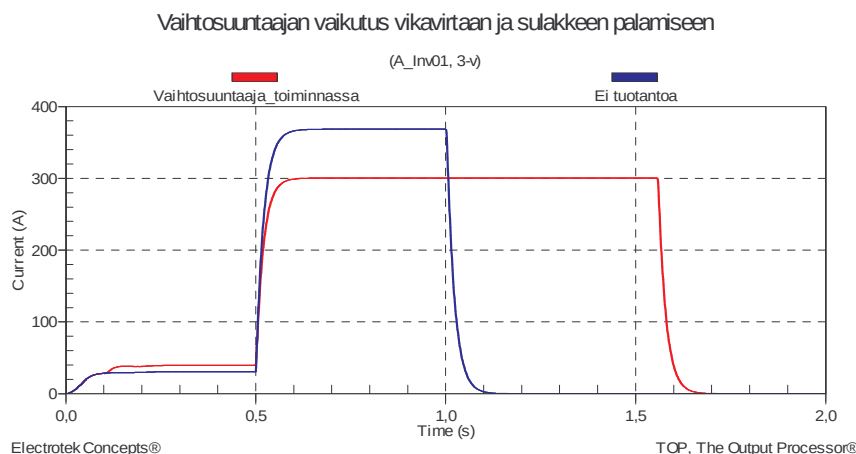
Kuva 19. Vaihtosuuntaajan vaikutus 1-vaiheviassa, vikapaikka 2.

Kolmivaiheisessa viassa tahtigeneraattorin suhteellinen vaikutus on selvästi pienempi kuin yksivaiheisessa viassa. Kuvassa 20 esitettyjen simulointitulosten mukaan virta kuitenkin pienenee ja sulakkeen toiminta-aika kasvaa.



Kuva 20. Virran tehollisarvo kolmivaiheisessa viassa tahtigeneraattorin vaikuttaessa ja ilman generaattoria, vikapaikka 1.

Kuvassa 21 esitettyjen vaihtosuuntaajan simulointitulosten perusteella vaihtosuuntaaja näyttää vaikuttavan kolmivaiheisessa viassa yllättävän paljon vikavirtaan ja sulakkeen toimintaan.



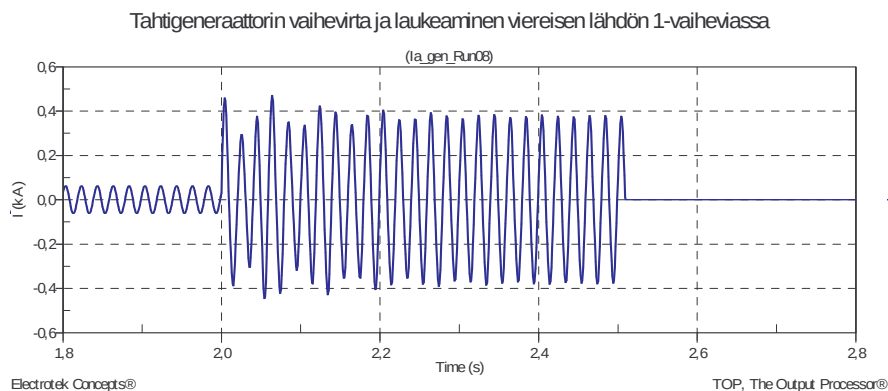
Kuva 21. Vaihtosuuntaajan vaikutus sulakkeen toimintaan 3-vaiheviassa, vikapaikka 1.

AMKA-verkon mallilla toteutetut simuloinnit vahvistavat käsityksen, että hajautettu tuotanto voi myös pienjänniteverkossa hidastaa suojausta ja estää sen asianmukaisen toiminnan. Kyseessä on sama ilmiö kuin keskijänniteverkossa todettu aliulottuma tai suojauksen toiminnan estyminen. Ongelma ilmenee sitä voimakkaammin, mitä suurempi on tuotantoyksikön tuottama vikavirta ja mitä suurempi on tuotantoyksikön ja vikapaikan välinen impedanssi eli mitä pitempi johto on.

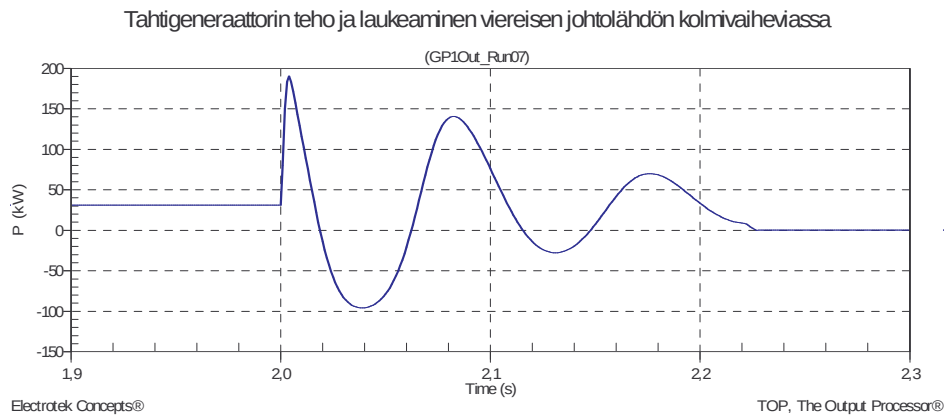
Toistaiseksi simulointeja ei ole tehty käyttäen kaapeliverkon malleja. On kuitenkin ilmeistä, että myös kaapeliverkossa tuotantoyksiköt voivat pidentää sulakkeiden toiminta-aikaa.

5.3.2 Tuotantoyksikön tarpeeton laukeaminen

Tuotantoyksikön tarpeettoman laukaisun mahdollisuutta tarkasteltiin simuloimalla vikatilanteita viereisellä lähdöllä. Kun viereisen lähdön ensimmäinen johto-osa vaihdettiin AMKA 70:ksi, lähdön sulakkeeksi 160 A ja vikapaikkana oli ko. johdon loppupää, 1-vaihevian simuloinnissa (kuva 22) tahtigeneraattori laukesi ylivirrasta (ylivirtarele) ja 3-vaiheviassa (kuva 23) alijännitteestä (jännite- ja taajuusrele).



Kuva 22. Tahtigeneraattorin vaihevirta ja tarpeeton laukeaminen ylivirrasta viereisen johtolähdön 1-vaiheviassa.

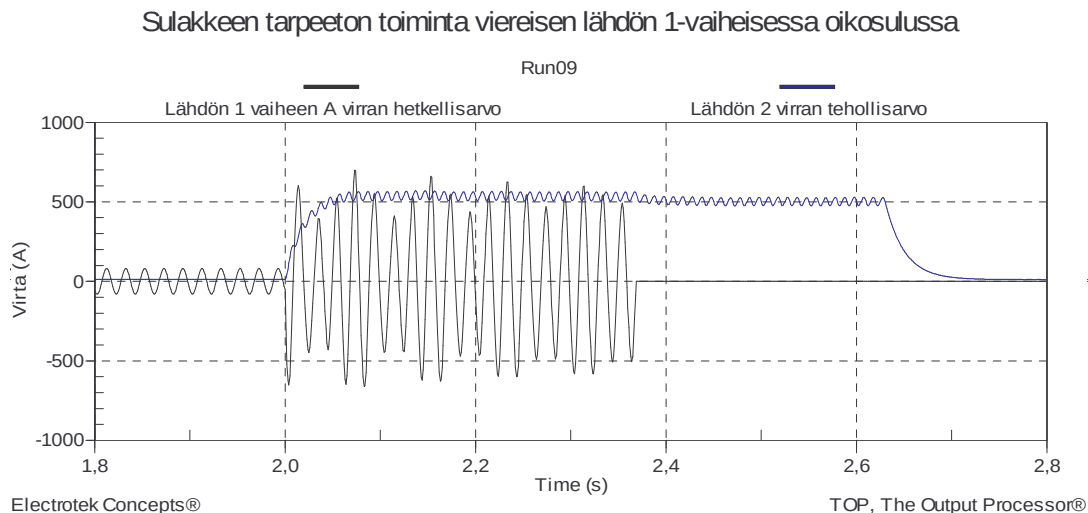


Kuva 23. Tahtigeneraattorin teho ja tarpeeton laukeaminen alijännitteestä viereisen johtolähdön 3-vaiheviassa.

On selvää, että myös keskijänniteverkon tai syöttävän suurjänniteverkon vikojen aiheuttamat jännitekuopat voivat aiheuttaa tuotantoyksikön tarpeettoman laukeamisen.

5.3.3 Verkon sulakkeen tarpeeton toiminta

Hajautettu tuotanto voi aiheuttaa myös verkon sulakkeen virheellisen palamisen viereisen johtolähdön viassa. Kuvassa 24 on esitetty simuloitu lähtösulakkeen palaminen viereisen lähdön 1-vaiheisessa viassa, kun lähdölle on kytketty kaksi 40 kVA:n tahtigeneraattoria. Tällaisen ongelman syntyminen käytännön verkoissa lienee kuitenkin hyvin epätodennäköistä.



Kuva 24. Lähdön sulakkeen virheellinen toiminta viereisen lähdön viassa.

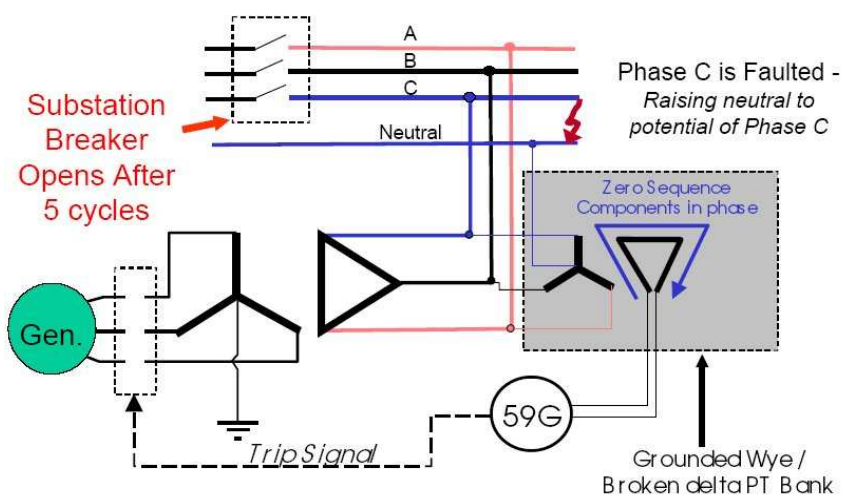
6 KESKIJÄNNITEVERKON MAASULUN HAVAITSEMINEN PIENJÄNNITEVERKOSSA

6.1 YLEISTÄ MAASULUN HAVAITSEMISESTA

Keskijänniteverkossa tapahtuvaa maasulkua ei voida havaita pienjänniteverkosta Dyn-kytketyn jakelumuuntajan alajännitepuolelta nollajännitteen perusteella, koska muuntaja katkaisee nollaverkon. Jos pienjänniteverkkoon kytkettyjen tuotantoyksikköjen suojaus ei havaitse keskijänniteverkon maasulkua, tuotantoyksiköt jatkavat toimintaansa. Keskijännitelähdön laukeamisen jälkeen tuotantoyksiköiden toiminta riippuu mm. lähdön tehotasapainosta, ja pitkäaikainen vikaantunut saareke on mahdollinen. Jos hajautettu tuotanto pystyy pitämään keskijänniteverkon jännitettä yllä, seuraa useita ongelmia:

- mahdollisen maasulkuvalokaaren sammuminen vaarantuu
- epätahdissa tapahtuva jälleenkytkentä on mahdollinen
- keskijänniteverkon terveiden vaiheiden ylijännite pitkittyy
- laukaiseva maasulkusuojaus ei toteudu keskijänniteverkon suojauksen mukaisessa laukaisuajassa, joten kosketusjännitesuojaus vaarantuu.

Suomalaiset ja ruotsalaiset hajautetun tuotannon verkkoon liittämistä koskevat suositukset mainitsevat nollajännitteen mittaamisen keskijännitepuolelta hajautetun tuotannon yksiköille mahdollisena optiona. Samaa ratkaisua vastaavaan ongelmaan esittää Barker (2002) kuvan 25 mukaisella järjestelyllä.



Kuva 25. Keskijänniteverkon nollajännitteestä aiheutuvan laukaisukäskyn välitys pienjänniteverkkoon kytketyille generaattorille (Barker 2002).

Jotta pienjänniteverkkoon kytkettyjen tuotantoyksiköiden laukaisu keskijänniteverkon maasuluissa olisi selektiivinen, ts. ne eivät laukeaisi viereisen lähdön maasulussa, laukaisuaika pitää koordinoida lähtöjen maasulkulaukaisun aikahidastusten kanssa. Mikäli lähtöjen hidastusajat ovat eripituiset, koordinointi on vaikeaa. Jos sen sijaan kaikkien lähtöjen maasulkulaukaisujen aikahidastukset ovat samat, tuotantoyksiköiden nollajännitelaukaisu voidaan asettaa lähtöjen laukaisua hitaammaksi. Tällöin tuotantoyksiköt kuitenkin voivat häiritä pikajälleenkytkentää.

Keskijänniteverkon suureiden mittaamiseen ja välittämiseen pienjänniteverkkoon kytketyille laitteille verkkoyhtiö voi suhtautua kielteisesti. Helsingin Energia on selkeästi kieltänyt pj-verkkoon kytkettyjen tuotantoyksiköiden mittaukset keskijännitepuolelta: ”Suojareleiden ja jakeluverkon jännitteellisyyttä osoittavat mittaussuureet tulee mitata liittymän verkosta, pääkatkaisijan alapuolelta jakeluverkosta päin katsottuna.” (Helsingin Energia 2006)

Keskijänniteverkon nollajännitteeseen perustuva suojaus aiheuttaa tarvittavasta mittaus- ja suojaustekniikasta johtuen melko suuria kustannuksia. Nollajännitetiedon välittäminen syvälle pienjänniteverkkoon kytketyille generaattoreille voi olla myös teknisesti hankalaa.

6.2 JÄNNITTEEN VASTAKOMPONENTTI

6.2.1 Kirjallisuustutkimus

Vastajärjestelmän suureisiin perustuvaa suojausta on tarkasteltu mm. viitteessä Hindle (2001). Cooper Power Systemsin rele-esitteessä (2004) vastakomponenttia tarkkaileva elementti on tarkoitettu nimenomaan nollajärjestelmän katkaisevien muuntajien toisiopuolella tapahtuvaan vian havaitsemiseen.

Caleron (2003) mukaan maasta erotettujen tai kompensoitujen verkkojen maasulkusuojaus ei kuitenkaan voi perustua vastakomponenttiin, koska sekä jännitteen että virran vastakomponentit ovat tähän tarkoitukseen liian pieniä. Apostolov (2004) sen sijaan esittää, verkon maadoitustapaa tosin käsittelemättä, että virran vastakomponenttia voidaan käyttää sekä oiko- että maasulkusuojauksessa.

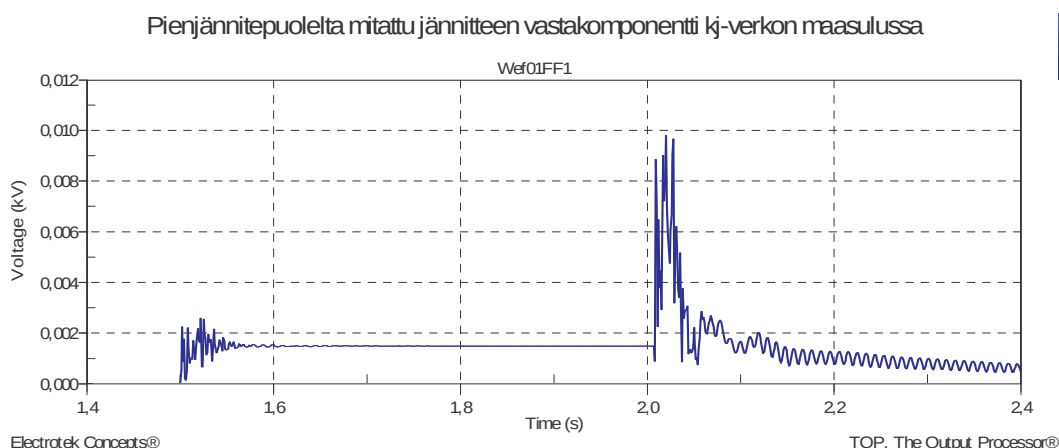
Johnsonin raportissa (Johnson 2003) on mainittu tapaus Hess Microgen, jossa maasulun havaitseminen Dy-kytketyn muuntajan toiselta puolelta on ratkaistu jännitteen vastakomponenttia käyttäen. On kuitenkin huomattava, että kyseessä on amerikkalainen, todennäköisesti tehollisesti maadoitettu verkko.

Viitteessä (Jang et al. 2004) on esitetty mielenkiintoinen monikriteerimenetelmä eroonkytkentäsuojaukseen. Invertteripohjaiseen tuotantoon tarkoitettussa menetelmässä tarkkaillaan jännite-epäsymmetriaa (vastakomponentin avulla, NS/PS), virran säröä (THD) ja pääjännitteen tehollisarvoa. On kuitenkin huomattava, että menetelmässä tarkastellut suureet mitataan muuntajan yläjännitepuolelta.

6.2.2 Simuloinnit

Simuloinnit maasta erotetulla verkolla eivät tue käsitystä jännitteen vastakomponentin tarkkailun käyttökelpoisuudesta suomalaisissa jakeluverkoissa.

Kuvassa 26 on esitetty esimerkki maasulkusimuloinnista, jossa jännitteen vastakomponentti on mitattu tuulivoimalan muuntajan alajännitepuolelta. Kuvan tilanteessa lähtö laukeaa 0,5 sekunnin aikahidastuksella, ja tuulivoimalat jatkavat toimintaansa. Vastakomponentti jää erityisesti lähdön laukeamisen jälkeen liian pieneksi, jotta sitä voitaisiin käyttää saarekkeeseen joutumisen indikaattorina.



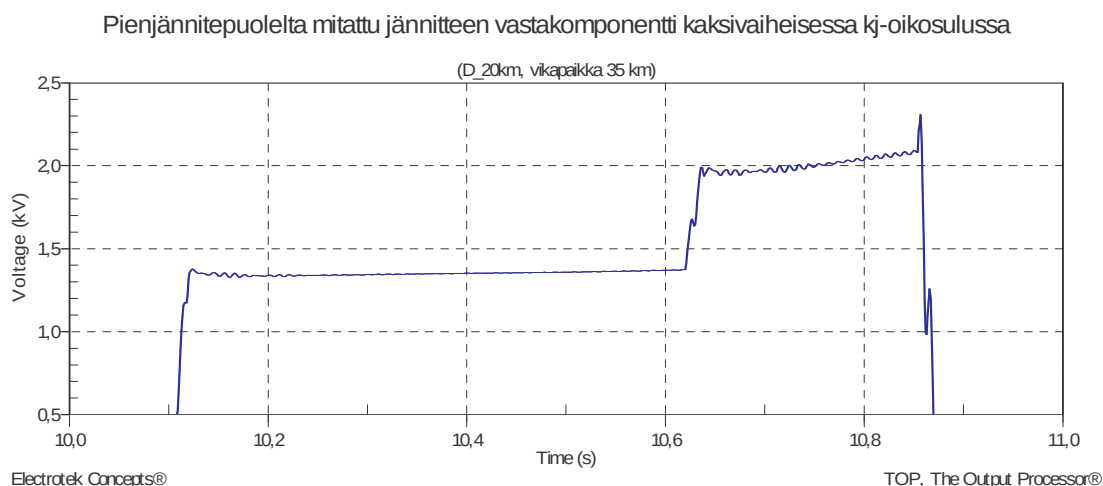
Kuva 26. Tuulivoimalan muuntajan alajännitepuolelta mitattu (simuloitu) jännitteen vastakomponentti maasulkutilanteessa.

Simulointiesimerkki, jossa vastakomponentti mitattiin dieselvoimalan muuntajan alajännitepuolelta, antoi hyvin samankaltaisen tuloksen.

Standardi SFS-EN 50160 asettaa jakelujännitteen epäsymmetriaa tarkastellessaan jännitteen vastakomponentilla rajan 2 % myötäkomponentista (95 % 10 minuutin keskiarvoista). Epäsymmetrinen kuormitus voi siis vaikeuttaa vastakomponentin käyttöä maasulun indikaattorina.

Yhteenvedona kirjallisuustutkimuksesta ja simuloinneista voidaan päätellä, että jännitteen vastakomponenttiin perustuva eroonkytkentäsuojaus pienjännitepuolella ei näytä toteuttamiskelpoiselta maasta erotetussa verkossa.

Kaksivaiheisen oikosulun havaitsemiseen jännitteen vastakomponentti sopinee erittäin hyvin. Kuvassa 27 on esitetty esimerkki dieselvoimalan muuntajan alajännitepuolelta mitatun vastakomponentin käyttäytymisestä 2-vaiheisessa oikosulussa. Johtolähtö laukeaa hetkellä $t = 10,6$ s ja dieselvoimala hetkellä $t = 10,85$ s.



Kuva 27. Jännitteen vastakomponentti pienjänniteverkossa, kun lähdölle on kytketty sekä diesel- että tuulivoimala.

6.3 PIENJÄNNITEVERKON JÄNNITTEEN JA TAAJUUDEN TARKASTELU KESKIJÄNNITEVERKON MAASULUSSA

Passiiviset eroonkytkentäsuojauksen menetelmät perustuvat yleensä jännitteen, taajuuden tai näiden johdannaisten tarkkailuun. Näissä suureissa tapahtuvat muutokset jäävät kuitenkin pieniksi, jos saarekkeen tuotanto ja kulutus ovat likimain tasapainossa. Tällöin kyseiset suojausmenetelmät ovat tehottomia, jolloin voidaan puhua niiden katvealueesta (non-detection zone).

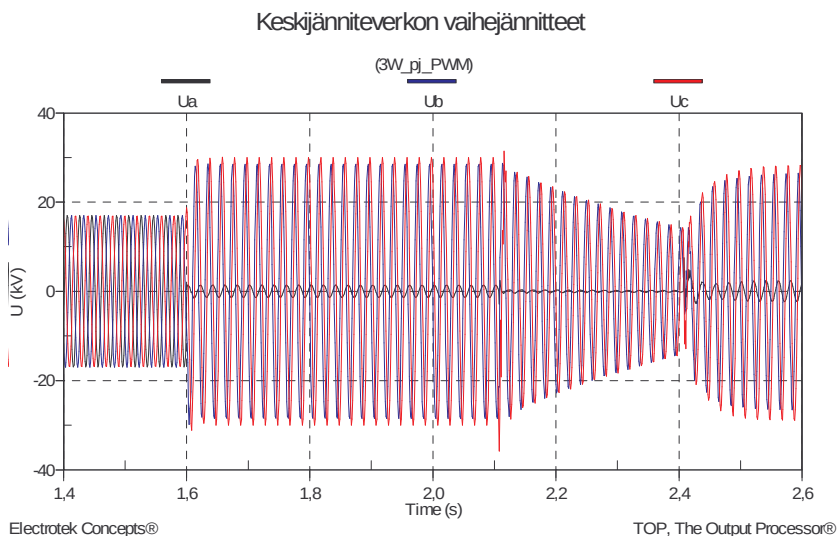
Taajuuden ja jännitteen kehittymistä keskijänniteverkon maasulussa ja lähdön maasulkulaukaisun jälkeen tarkasteltiin simuloinneilla, jossa verkkoon oli kytketty sekä epätahtigeneraattoria käyttävää tuulivoimaa että vaihtosuuntaajalla verkkoon liitettävää tuotantoa. Tuulivoimalat oli liitetty verkkoon omilla muuntajillaan, kun taas vaihtosuuntaaja oli sijoitettu pienjänniteverkkoon, jossa oli myös kulutusta.

Ensimmäisessä simuloinnissa kolme 1,65 MW:n tuulivoimalaa oli sijoitettu 35 km pitkän keskijännitejohdon loppuun. Johdolla oli kuormitusta 1,75 MW, tehokerroin 0,95 (ind). Tuulivoimalat syöttivät näin ollen pätötehoa johdon kautta sähköasemalle. Suuri pätötehon siirto olisi nostanut johdon loppupään jännitteen liian suureksi, yli 21 kV:n, joten tuulivoimaloiden kompensoinnista kytkettiin puolet pois. Tällöin puolestaan loistehoa siirrettiin huomattavasti sähköasemalta tuulivoimaloille, mistä seurasi johtolähdön virran kasvaminen. Johdon näennäisteho oli n. 3,83 MVA. Ennen vikatilannetta pätötehoa siirtyi sähköaseman suuntaan 2,78 MW ja loistehoa lähdön suuntaan 2,64 MVA.

Vaihtosuuntaaja, jonka tuottamaksi tehoksi oli aseteltu 50 kW tehokertoimella 1, oli kytketty 2 km:n etäisyydellä sähköasemalta sijaitsevan 100 kVA:n tehoisen jakelumuuntajan syöttämään pienjänniteverkkoon. Kyseinen jakelumuuntaja oli noin puolessa kuormassa kuormituksen jakautuessa kahdelle pienjännitejohtolähdölle. Vaihtosuuntaaja oli sijoitettu 89 metrin etäisyydelle muuntajasta.

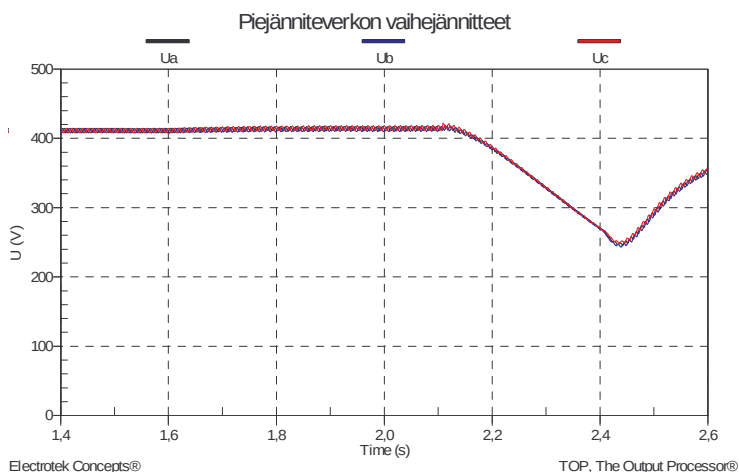
Simuloitu vikatilanne oli 1-vaiheinen maasulku 20 km:n etäisyydellä sähköasemalta. Vika syntyi hetkellä $t = 1,6$ s, ja sähköaseman katkaisija laukesi 0,5 s aikahidastuksen jälkeen. Käytössä oli myös pikajälleenkytkentä, joka sulki katkaisijan hetkellä $t = 2,4$ s.

Keskijänniteverkon vaihejännitteet käyttäytyivät odotetulla, kuvan 28 osoittamalla tavalla. Maasulun vaikuttaessa terveiden vaiheiden jännitteet nousivat, ja lähdön laukeamisen jälkeen tuulivoimalan pitivät verkossa jännitettä jälleenkytkentään asti, joskin loistehovajeesta johtuen jännite pyrki laskemaan.



Kuva 28. Keskijänniteverkon vaihejännitteet maasulussa, lähdön laukeamisen jälkeen ja jälleenkytkennässä.

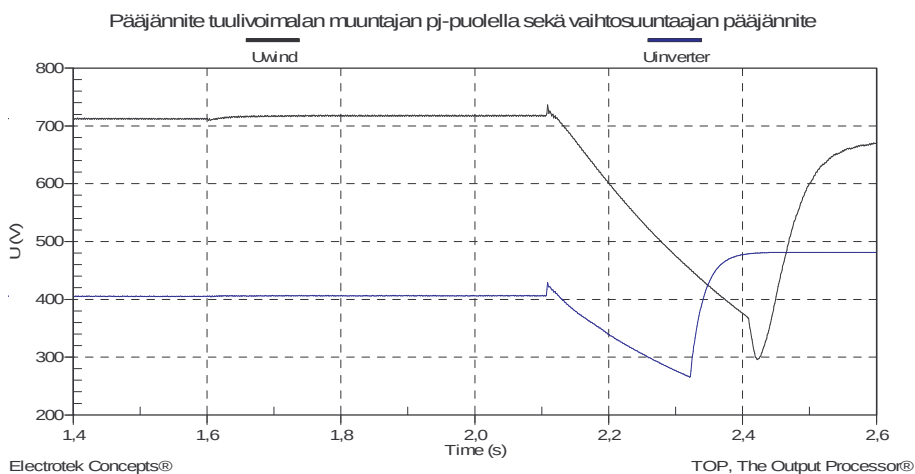
Pienjännitepuolelta mitatuissa vaihejännitteissä ei sen sijaan ole havaittavissa mainittavaa muutosta, ennen kuin lähtö laukeaa. Kuvan 29 simuloidut jännitteet on mitattu tuulivoimalan muuntajan alajännitepuolelta.



Kuva 29. Simuloidut vaihejännitteet tuulivoimalan muuntajan alajännitepuolella keskijännitepuolen maasulussa ($t=1,6$ s), lähdön laukeamisen jälkeen ($t=2,1$ s) ja jälleenkytkennässä ($t=2,4$ s).

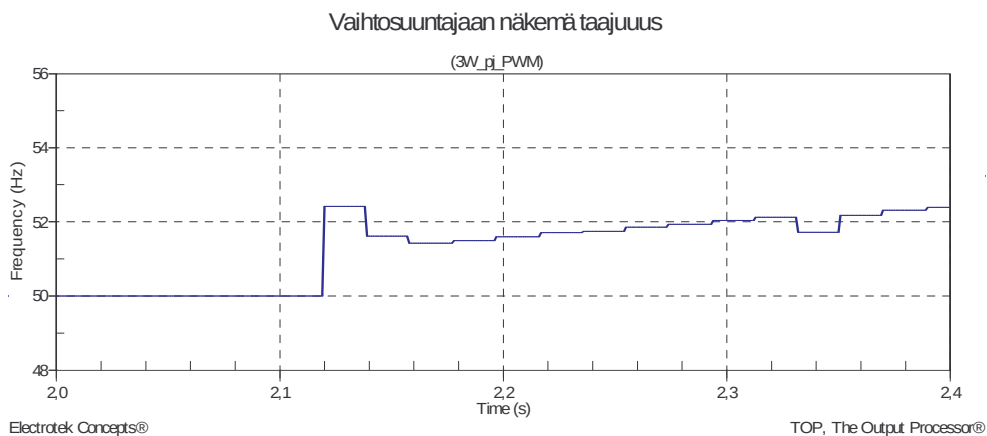
Kuvassa 29 esitetyissä pienjänniteverkon vaihejännitteissä keskijänniteverkon maasulku ei näy kj-lähdön ollessa kytkettynä (ennen hetkeä $t = 2,1$ s) mitenkään, mikä vahvistaa käsitystä siitä, että keskijänniteverkon maasulkua on erittäin vaikea havaita pienjännitepuolelta. Jos eroonkytkentäsuojaus toimii vasta keskijännitelähdön laukeamisen jälkeen havaittavien muutosten perusteella, sen tulee olla erittäin nopea pikajälleenkytkentöjä käytettäessä.

Kuvassa 30 on esitetty tuulivoimalan ja vaihtosuuntaajan pääjännitteet edellä kuvatun vikatilanteen aikana. Vaihtosuuntaaja kytkeytyy kuvan simuloinnissa eroon verkosta hetkellä $t = 2,31$ s, ennen lähdön jälleenkytkentää. Eroonkytketymisen syy on taajuuspoikkeama, sillä vaihtosuuntaajan taajuusreleen asetteluarvo on 50,5 Hz/0,2 s.



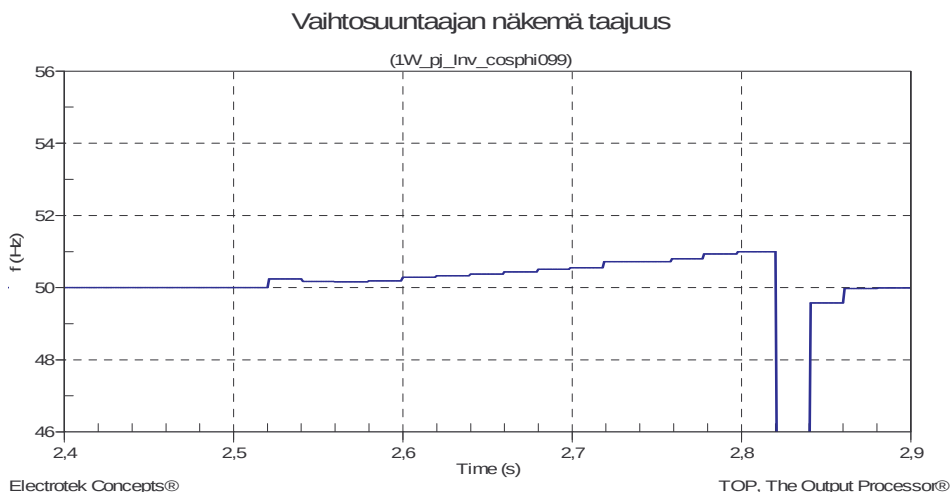
Kuva 30. Maasulun ja siitä aiheutuvan kj-lähdön laukeamisen näkyminen pienjännitepuolen pääjännitteissä.

Kuvassa 31 havaittava taajuuden muutos, joka on mitattu vaihtosuuntaajan katkaisijan verkon puolelta, johtuu pätötehon epätasapainosta syntyvässä saarekkeessa. Lähempänä pätötehotasapainoa taajuuden muutos olisi vielä pienempi ja vaikeammin havaittavissa. Tehotasapainon lähellä saarekekäyttöön siirtyminen on vaikea erottaa muista verkon häiriöistä, esimerkiksi viereisen johtolähdön vikatilanteista.



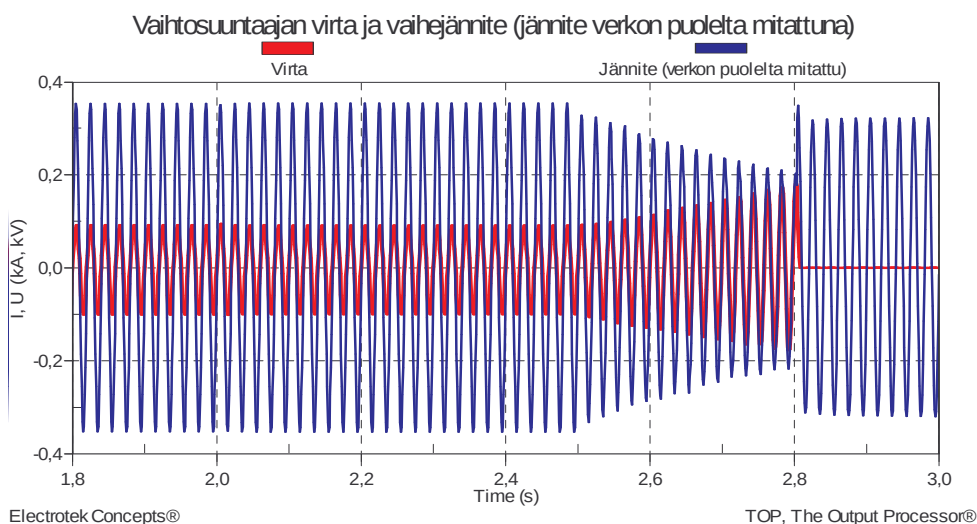
Kuva 31. Vaihtosuuntaajan näkemä taajuus edellä kuvatussa simuloinnissa.

Kuvassa 32 on esitetty vaihtosuuntaajan näkemä taajuus keskijännitelähdön katkaisijan laukeamisen ($t = 2,5$ s) yhteydessä, kun lähtö on edellistä tapausta lähempänä tehotasapainoa. Edelliseen tilanteeseen verrattuna taajuuden muutos on selvästi pienempi, ja vaihtosuuntaajan eroonkytkentä tapahtuukin tässä tapauksessa hitaammin ja alijännitteen perusteella. Vaihtosuuntaajan kytkeytyy irti vasta 0,3 sekunnin kuluttua saarekkeen syntymisestä, joten se syöttää vikaan virtaa ja osallistuu verkon jännitteisenä pitämiseen koko pjk:n väliajan.



Kuva 32. Vaihtosuuntaajan näkemä taajuus, kun lähtö on lähempänä tehotasapainoa.

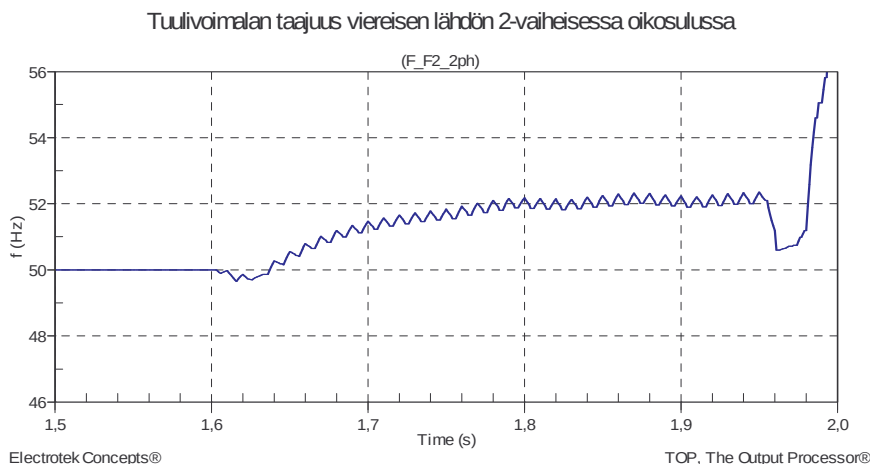
Kuvassa 33 on esitetty vaihtosuuntaajan vaihevirran sekä verkon puolelta mitatun jännitteen hetkellisarvot. Vaihtosuuntaaja kytkeytyy irti likimain samalla hetkellä ($t = 2,8$ s), jolla keskijänniteverkon jälleenkytkentä tapahtuu.



Kuva 33. Vaihtosuuntaajan virta ja verkon puolen jännite maasulkutilanteessa.

Viereisen johtolähdön vikatilanteiden vaikutusta pienjänniteverkossa näkyvään taajuuteen ja jännitteeseen selvitettiin pistokokeen luonteisesti simuloimalla 2-vaiheinen oikosulku 10 km:n etäisyydellä lähdöllä 2. Lähdöllä 1 oli toiminnassa 3 tuulivoimalaa

etäisyydellä 35 km. Kuvassa 34 on esitetty taajuuden kehittyminen kyseisessä tilanteessa. Taajuuden muutos on suurempi kuin edellä kuvatussa tapauksessa, jossa oma johtolähtö joutui saarekekäyttöön.. Kuvan 34 simuloinnissa tuulivoimalat laukesivat (tarpeettomasti) verkosta alijännitteen vuoksi ennen viereisen johtolähdön laukeamista.



Kuva 34. Taajuus tuulivoimaloilla viereisen johtolähdön 2-vaiheisessa oikosulussa.

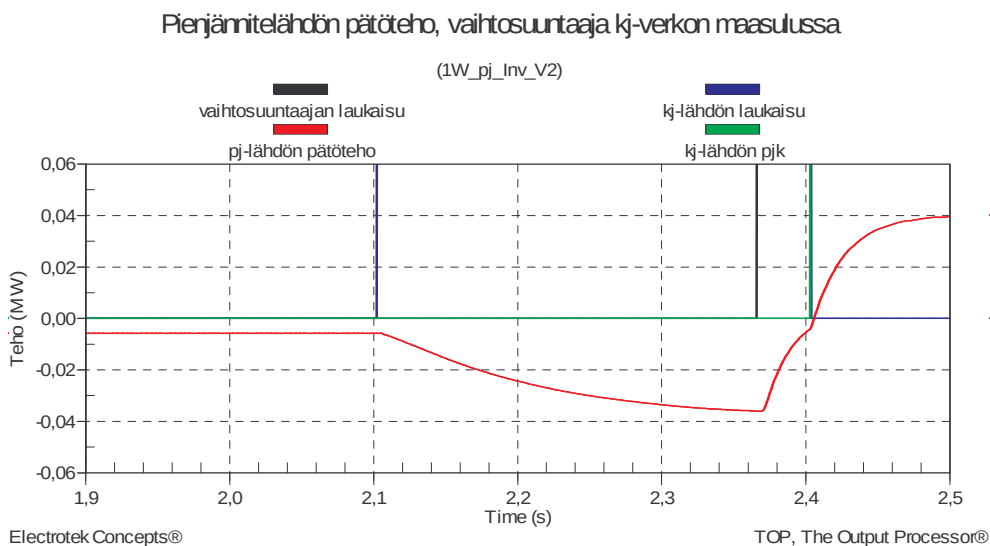
Edellä esitetyt simuloinnit vahvistavat käsitystä siitä, että taajuuteen ja jännitteeseen perustuvat eroonkytkentäsuojausmenetelmät ovat puutteellisia. Niiden puutteina ovat tehotasapainotilanteen katvealue sekä virheellinen laukaisu viereisten lähtöjen vikatilanteissa tai verkon muutostilanteissa.

6.4 SUUNTAAJAAN PERUSTUVAN PIENJÄNNITEVERKKOON LIITETYN TUOTANTOYKSIKÖN SYÖTTÄMÄ TEHO KESKIJÄNNITEVERKON MAASULUSSA

Pienjänniteverkkoon vaihtosuuntaajalla liitetyn tuotantoyksikön vaikutuksia keskijänniteverkon maasulussa havainnollistettiin vielä erillisellä simuloinnilla, jonka avulla pyrittiin selvittämään verkkoon syötettyä tehoa vikatilanteen aikana. Keskijänniteverkon vikatilanteena oli 1-vaiheinen maasulku, ja pikajälleenkytkentä oli käytössä. Keskijänniteverkossa oli vaikuttamassa yksi tuulivoimala, teholtaan 1,65 MW, joka piti yllä saarekkeen jännitettä. Pienjänniteverkkoon kytketyn tuotantoyksikön tehoksi aseteltiin 50 kW. Mitattu teho oli n. 48 kW. Normaalitilanteessa tästä tehosta suurin osa, n. 42 kW, kulutetaan ko. pienjännitelähdön kuormituksissa, ja vain n. 6 kW siirtyy muuhun verkkoon.

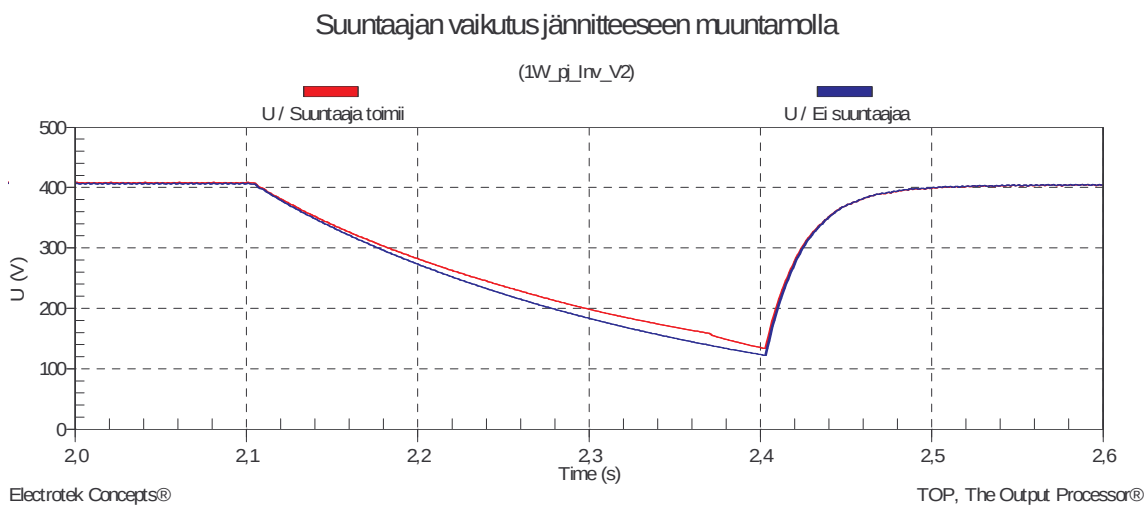
Kuvassa 35 on tarkasteltu pienjännitejohtolähdön, jolle tuotantoyksikkö on kytketty, pätötehon käyttäytymistä tilanteen aikana. Ennen vikaa ja ennen kj-lähdön laukeamista ($t = 2,1$ s) verkkoon päin virtasi n. 6 kW. Keskijännitejohdon laukeamisen jälkeen verkon jännite alkoi laskea. Vakioteholle säädetty vaihtosuuntaaja kasvatti virtaansa jännitteen laskiessa, kuten edellä olleesta kuvasta 34 ilmenee. Koska johtolähdön kuormitusten ottama teho pieneni jännitteen laskiessa, verkkoon päin virtasi

saareketilanteessa enemmän tehoa kuin kj-lähdön ollessa kiinni muussa verkossa. Vaihutosuuntaaja osallistui näin ollen verkon jännitteen ylläpitoon, kunnes se laukesi verkosta juuri ennen keskijännitelähdön pikajälleenkytkentää. Vaihutosuuntaajan lauettua irti ja jälleenkytkennän tapahduttua tehon suunta vaihtui, ja johtolähdölle virtaava teho kasvoi nopeasti yli 40 kW:n.

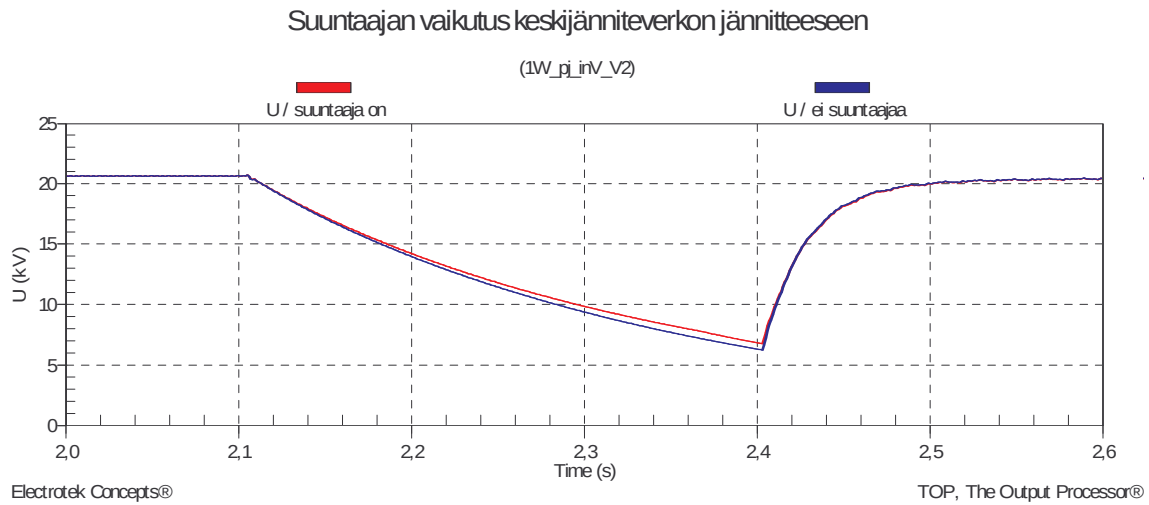


Kuva 35. Pienjännitejohtolähdöltä ja –lähdölle virtaava teho keskijänniteverkon maasulkutilanteessa, kun lähdölle on kytketty vaihtosuuntaajaan perustuva tuotantoyksikkö.

Kuvissa 36 ja 37 on esitetty jännitevertailu em. tilanteen simuloinneista vaihtosuuntaajan vaikuttaessa ja ilman vaihtosuuntaajaa. Kuvan 36 jännite on mitattu jakelumuuntajan alajännitepuolelta ja kuvan 37 jännite kj-johdolta 20 km etäisyydellä sähköasemalta.. Vaihutosuuntaajan laukeaminen hetkellä $t = 2,366$ erottuu pienjänniteverkosta mitatussa jännitteessä.



Kuva 36. Jännite muuntajan alajännitepuolella kj-lähdön lauettua suuntaajan vaikuttaessa ja ilman suuntaajaa.



Kuva 37. Jännite keskijänniteverkossa (etäisyydellä 20 km) kj-lähdön lauettua suuntaajan vaikuttaessa ja ilman suuntaajaa.

Vaikka vaihtosuuntaaja on pienitehoinen (nimellisteho 100 kW, asettelu 50 kW), sen vaikutus näkyy selvästi myös keskijänniteverkon puolella, jossa toisena vaikuttavana generaattorina on tuulivoimala. Tämä simulointi vahvistaa käsitystä siitä, että pienjänniteverkkoon kytketyt tuotantoyksiköt osallistuvat kj-verkon jännitteen ylläpitoon kj-verkon maasulussa. Pienten yksiköiden yhteisvaikutus voi olla merkittävä.

7 SÄHKÖTURVALLISUUSKYSYMYKSIÄ

7.1 VASTUU TURVALLISUUDESTA

Vastuu sähkönjakeluverkon turvallisuudesta kuuluu verkkoyhtiölle. Taloudellinen vastuu mahdollisten hajautetun tuotannon aiheuttamien vahinkojen tapahtuessa on mielenkiintoinen kysymys. USA:ssa sähkölaitokset edellyttävät usein, että hajautetun tuotannon omistajat ottavat huomattavan suuren vastuuvakuutuksen, mitä on pidetty yhtenä hajautetun tuotannon esteenä.

Iso-Britanniassa Econnectin raportti (2001) korostaa verkonhaltijan vastuuta:

In all the cases it is the DNO that has the responsibility for the distribution network and is therefore liable for the possible consequences of contravening statutory obligations during inadvertent island operation. It is therefore the DNO that has the primary duty to protect the network and its customers from these hazards. This means that the DNO must ensure appropriate means are in place for safety or prevent extended islanded operation where such operation may contravene these obligations and put customers at risk.

Johnsonin (2003) raportin mukaan USA:n sähkölaitokset ovat haluttomia aktiivisesti tukemaan hajautetun tuotannon verkkoon liittämistä, jos ne katsovat turvallisuusvastuunsa lisääntyvän generaattorin verkkoon liittämisen myötä. Turvallisuus ja suojauskysymykset, erityisesti saarekekäytön estäminen, katsotaan tärkeimmiksi teknisistä kysymyksistä. Toisaalta yhtiöillä ei ole suuressa määrin esittänyt todellisia esimerkkejä siitä, miten turvallisuus tai verkon yhtenäisyys olisi toistaiseksi vaarantunut verkkoon kytketyn hajautetun tuotannon vaikutuksesta. Vain Idaho Power on raportoinut asentajan kuolemaan johtaneesta onnettomuudesta, jossa hajautetun tuotannon yksikkö oli vaikuttamassa.

Suomessa on Tukesin tietoon tullut kesään 2004 mennessä tieto kahdesta verkkoyhtiön korjaushenkilöstölle sattuneesta sähköiskusta takasyöttötilanteessa. Kyseiset onnettomuudet ovat aiheutuneet varavoiman väärästä liittämistavasta sähkökatkoksen aikana, eivät varsinaisesta hajautetusta tuotannosta (Westerlund 2004).

Hajautettujen tuotantoyksiköiden vaikutukset ulottuvat järjestelmään huomattavasti laajemmalle kuin vain liityntäkohtaan. Koska vastuu verkon turvallisuudesta kuuluu verkkoyhtiölle, verkkoyhtiöillä lienee sekä oikeus että velvollisuus määritellä liityntärajojen suojausvaatimukset. Jos suojalaitteet jäävät asiakkaan omistukseen ja hallintaan, tulee myös varmistaa verkonhaltijan oikeus muutoksiin järjestelmän muuttuessa. Samoin tulee varmistaa suojalaitteiden edellyttämä kunnossapito määräaikaistarkastuksineen ja koestuksineen.

7.2 TYÖTURVALLISUUS

7.2.1 Järjestelmän monimutkaistuminen

Yhdestä suunnasta tapahtuvan tehonsyötön muuttuminen monesta suunnasta tapahtuvaksi vähentää verkon selväpiirteisyyttä ja lisää tapaturmariskejä. Se lisää myös verkoston kytkentöjen tarvetta. Esimerkiksi jakelumuuntamolla tapahtuvissa töissä on perinteisesti riittänyt keskijänniteverkon puolella sijaitsevan kytkinlaitteen avaaminen, koska takajännitevaaraa ei ole ollut.

7.2.2 Työmaadoittaminen ja erotuskytkin

Työmaadoituksia koskevat perusvaatimukset on annettu Sähkötyöturvallisuutta koskevassa standardissa SFS 6002. Sen mukaan jännitteettömyys on todettava ennen työskentelyn aloittamista myös niissä tapauksissa, joissa ei vaadita työmaadoittamista.

Pienjännitelaitteistossa on katsottu riittäväksi yleensä yksi työkohteessa tai sen välittömässä läheisyydessä tehty työmaadoitus. Kohteissa, joissa on vaara laitteiston tulosta jännitteiseksi esimerkiksi varavoimageneraattoreiden vaikutuksesta, pitää erikseen selvittää työmaadoitusten tarve ja maadoituspaikkojen sijainti. Suurjänniteasennuksissa ilmajohtojen ja paljaiden johtimien työmaadoittaminen pitää tehdä työalueeseen nähden kaikilla suunnilla kaikissa johtimissa eräitä poikkeuksia lukuun ottamatta. Eristetyille johtimille työmaadoittaminen pitää suorittaa kaikista syöttösuunnista erotuskohtien paljaissa osissa tai mahdollisimman lähellä näitä pisteitä. (SFS 6002 1999)

Yleinen käytäntö eri maissa on, että verkkoyhtiö edellyttää pienjänniteverkkoon kytketyltä hajautetulta tuotannolta erotuskytkintä, joka on aina verkkoyhtiön käytettävissä, lukittavissa ja joka on verkkoyhtiön vaatimusten mukainen.

Cook (2004) tarkastelee ulkoisen, verkkoyhtiön käytettävissä olevan erotuskytkimen tarvetta kolmesta näkökulmasta:

1. Kaikki asentajat suhtautuvat verkkoon ikään kuin verkko olisi jännitteinen. Kaikki työt tehdään jännitetöiden edellyttämällä turvallisuudella.
2. Asentajat maadoittavat sekä työkohteen yläpuolisen verkon että alapuolisen verkon.
3. Vain yläpuolinen verkko maadoitetaan. Tämä edellyttää, että kaikki alapuolisen verkon erotuskytkimet on käytävä avaamassa.

Kolmas tapa aiheuttaa Cookin näkemyksen mukaan vaaran työtekijöille, koska erotuskytkimiä on vain hyväksytyillä piengeneraattoriasennuksilla. Tuotantoyksiköt, jotka on kytketty verkkoon ilman verkkoyhtiön suostumusta, voivat aiheuttaa vaarallisen takajännitteen. Cookin mukaan laittomat generaattorit ovat yleisempiä kuin luvalliset.

Cook pitää ulkoista erotuskytkintä tarpeettomana ja hajautetulle tuotannolle (aurinkosähköjärjestelmille) tarpeettomia kustannuksia aiheuttavana. Yhtenevyyttä suomalaisiin olosuhteisiin on siinä, että Suomessakaan verkkoyhtiöt eivät tarkasti tiedä asiakkaiden verkkoon kytkemistä generaattoreista. Hajautetun tuotannon ja varavoimakoneiden yleistyessä työkohteen maadoittaminen molemmilta puolilta lienee ainoa varma keino varmistaa työkohteen jännitteettömyys. Tällaiseen käytäntöön siirtyminen lisää kustannuksia ja hidastaa vikojen korjaamista.

Belgiassa katsotaan, että verkkoyhtiöllä ei ole velvollisuutta käyttää verkkoa olettaen verkko aina jännitteiseksi. Jotta jatkuvalta jännitetyöltä ja kytkinten manuaaliselta avaamistarpeelta vältytään, on kehitetty automaattinen erotusjärjestely, joka perustuu taajuuden ja jännitteen tarkkailuun, eroonkytkentäsuojaan ja kahteen sarjassa olevaan kytkinlaitteeseen. Järjestelmän toiminta-asetukset ovat AREI/RGIE art 235.01:n vaatimusten mukaisesti seuraavat (Minne 2004):

- Vähintään toisen kytkinlaitteista on oltava galvaanisen erotuksen varmistava kaikki navat aukaiseva laite.
- Jännitesuojan on toimittava 0,2 sekunnin kuluessa rajojen $80 \% < U_n < 106 \%$ ulkopuolella.
- Taajuussuojan on toimittava 0,2 sekunnin kuluessa, yli 0,2 Hz:n taajuuspoikkeamassa.
- Saarekekäyttö estetään 5 sekunnin kuluessa.
- Kytkeytymistä takaisin verkkoon ei sallita, mikäli verkon jännite tai taajuus ei ole yllä mainittujen rajojen sisällä.

Keski-Euroopan kaapeloiduissa verkoissa yllä mainittu saarekekäytön esto 5 sekunnin kuluessa on riittävä vaatimus, koska jälleenkytkentöjä ei käytetä. Verkkoon takaisin kytkeytymisen ehtoihin puolestaan liitetään usein aikaehto, esim. IEEE 1547 edellyttää liityntälaitteistolta säädettävää kytkeytymisaikaa tai kiinteää 5 minuutin aikaa. Olennaisinta takaisin kytkeytymisessä kuitenkin on, että se sallitaan vain jännitteiseen verkkoon.

7.2.3 Varavoimakoneet

Varavoimakoneiden, joita ei ole tarkoitettu rinnankäyttöön verkon kanssa, turvallinen käyttö edellyttää vaihtokytkintä, jolla rinnankäyttö on estetty. Siirrettävien varavoimakoneiden kytkeminen maatiloilla verkkoon pitkien sähkökatkojen aikana on yleistynyt. Tällöin ei aina osata ottaa turvallisuusnäkökohtia riittävästi huomioon. (Westerlund 2004)

Varavoimakoneisiin liittyy myös epäily saarekkeena toimivan verkon sisäisen suojauksen toiminnasta. Sulakkeisiin perustuva suojaus ei välttämättä toimi suunnitellusti, kun oikosulkuvirtataso pienenee huomattavasti siirryttäessä saarekekäyttöön.

7.3 MAASULKUSUOJAUKSELLE SYNTYVÄT HAASTEET

7.3.1 Yleistä

Puuttumatta tässä kohdassa jälleenkytkentöihin hajautetun tuotannon yksiköistä aiheutuu seuraavia haasteita maasulkusuojauskelle:

- Vikojen kestoajat voivat pitkittyä generaattoreiden ylläpitäessä verkon jännitettä ja vikavalokaarta. Tällöin maasulkulaukaisuaika voi muuttua epämääräiseksi. Myös kaksoismaasulun riski kasvaa.
- Sammutetuissa verkoissa ja resistanssin kautta maadoitetuissa verkoissa sähköasemalta laukaistavan lähdön maadoitustapa muuttuu, mikä voi vaikeuttaa lähdölle kytkettyjen tuotantoyksiköiden maasulkusuojausta. Lähdön maasulkuvirta voi saarekkeeseen siirryttäessä jopa kasvaa.
- Resistanssin kautta maadoitetuissa järjestelmissä saarekkeen syntymiseen liittyy riski maakontaktin menettämisestä, mistä voi aiheutua turvallisuusriskejä.

7.3.2 Vian pitkittyminen ja maasulun laukaisuajan epämääräisyys

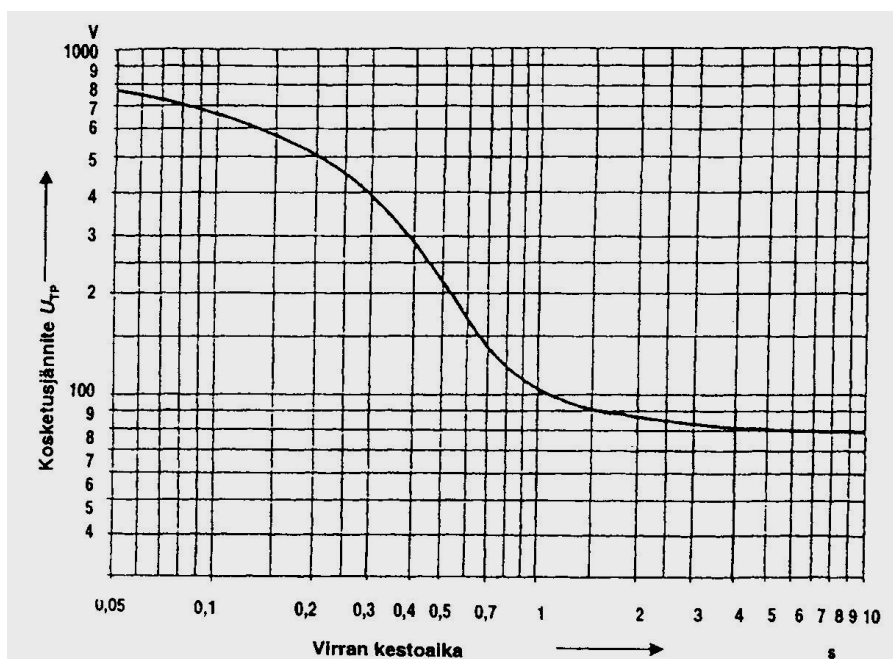
Hajautetun tuotannon yksiköt voivat pitää yllä vikavalokaarta pääverkon suojalaitteen toiminnan jälkeen. Tämä ongelma korostuu, jos tuotantoyksiköt on kytketty pienjänniteverkkoon. Keskijänniteverkon maasulkua on vaikea havaita pienjännitepuolelta, koska keskijänniteverkon vaihejännitteiden muutos ei välity Dyn-kytkentäisen muuntajan pienjännitepuolelle. Tätä kysymystä on tarkasteltu tarkemmin kappaleessa 4.3.

Senerin suositus (Sener 2001) jättää verkonhaltijan päätettäväksi, edellytetäänkö pienjänniteverkkoon kytketyltä pienvoimalalta keskijänniteverkon suuria tarkkailevaa nollajänniterelettä, jota suositus pitää täydentävänä suojana. Toisaalta Senerin suositus edellyttää, että laitteiston suojauksen on toimittava samalla johtolähdöllä tapahtuvassa maasulussa, jos lähdön suojaus on laukaiseva. Lähdöillä, joilla käytetään pikajälleenkytkentää, laitteiston tulisi kytkeytyä eroon jännitteettömänä väliaikana. Suositus ei ota kantaa siihen, tarvitaanko tuotantoyksikön laukaisun ja verkon jälleenkytkennän väliin aikaa valokaaren sammumiselle.

Jos pienvoimalat eivät havaitse keskijänniteverkon maasulkua, ne saattavat ylläpitää jännitettä keskijänniteverkossa lähdön maasulkulaukaisun jälkeen. Vian kestoaikaa on tällöin vaikea arvioida, samoin kosketus- ja askeljännitteitä. Suurjännitestandardin SFS 6001 soveltaminen saattaa aiheuttaa tulkintaongelmia. Standardin mukaan:

- Jokainen maasulku kytketään pois automaattisesti tai käsin. Siten hyvin pitkäaikaista tai jatkuvaa kosketusjännitettä ei esiinny maasulkujen seurauksena.
- Jos maasulkua ei kytketä pois automaattisesti, on maasulusta tullava hälytys, joka saatetaan verkon käytöstä vastaavan henkilön tietoon. Vian selvittämiseen on ryhdyttävä välittömästi ja maasulku on kytkettävä pois kahden tunnin kuluessa. Pitkäaikaisen maasulun aikana maadoitusjännitteet eivät saa ylittää kaksinkertaisesti kuvan 9.1 mukaista sallittua pitkäaikaisen kosketusjännitteen arvoa ($U_E \leq 2 \times 75 \text{ V}$ eli 150 V).

Standardin käyrä (kuva 9.1) sallituista kosketusjännitteistä virran kestoajan funktiona on esitetty kuvassa 38. Hajautetun tuotannon vaikutuksesta virran kestoajan määrittely voi muuttua vaikeaksi. Ilman hajautettua tuotantoa virran kesto aika on yksikäsitteisesti lähdön maasulun laukaisuaika. Tällöin esimerkiksi maadoitusvaatimukset ovat yksinkertaisesti selvitettävissä. Kun pienet, erityisesti pienjänniteverkkoon kytketyt tuotantoyksiköt jatkavat toimintaansa jonkin aikaa lähdön laukaisun jälkeen, virran kesto aika muuttuu epämääräiseksi. Myös maasulkuvirran suuruus muuttuu yhteen kytketyn verkon maakapasitanssin muuttuessa.



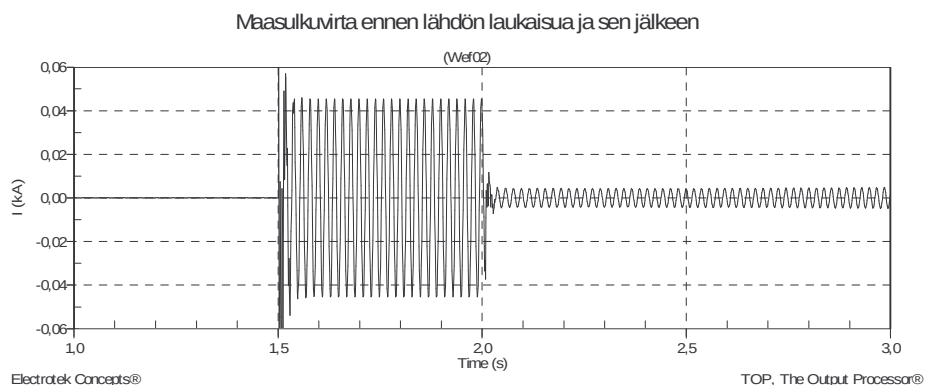
Kuva 38. SFS-standardin SFS 6001 kuva 9.1: Sallitut kosketusjännitteet U_{Tp} virran kestoajan funktiona, kun maasulku tapahtuu suurjännitejärjestelmässä.

Lienee aiheellista selvittää tarkemmin, miten standardin vaatimuksia tulee tulkita ja soveltaa käytäntöön verkossa, johon on kytketty hajautettua tuotantoa.

Maasulun pitkittymisen riskeihin kuuluu myös lisääntynyt kaksoismaasulun mahdollisuus. Jos kaksoismaasulun toinen vika syttyy muuntamalla, jolla on yhdistetty maadoitus, maadoitusjännite siirtyy pienjänniteverkon PEN-johtimen potentiaaliksi ja sitä kautta kaikkien kuluttajaliittymien laitteiden runkoihin ja suko-liuskoihin. Tästä aiheutuu kosketusjännitevaara (Westerlund 2004).

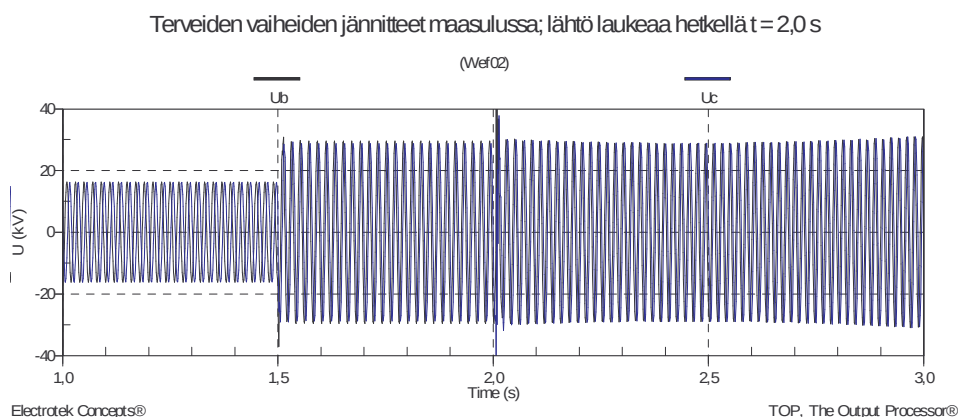
7.3.3 Simuloinnit maasta erotetun verkon mallilla

Kuvassa 39 on esitetty maasta erotetun verkon simuloitu maasulkuvirta, kun lähdölle on kytketty kolme tuulivoimalaa, joiden kaikki loistehon kompensointiparistot on kytketty päälle. Tällöin tuulivoimalat jatkavat toimintaansa lähdön laukeamisen jälkeen ylläpitäen saarekkeeksi kytkettyneen lähdön jännitettä ja maasulkuvirtaa.



Kuva 39. Maasta erotetun verkon maasulkuvirta ennen lähdön laukeamista saarekkeeksi ja sen jälkeen.

Kuvassa 40 on esitetty vastaavasta tilanteesta terveiden vaiheiden vaihejännitteiden käyttäytyminen. Tuulivoimaloiden vaikutuksesta terveiden vaiheiden ylijännitetilanne pitkittyy, mikä mm. lisää kaksoismaasulun syntymisen riskiä.

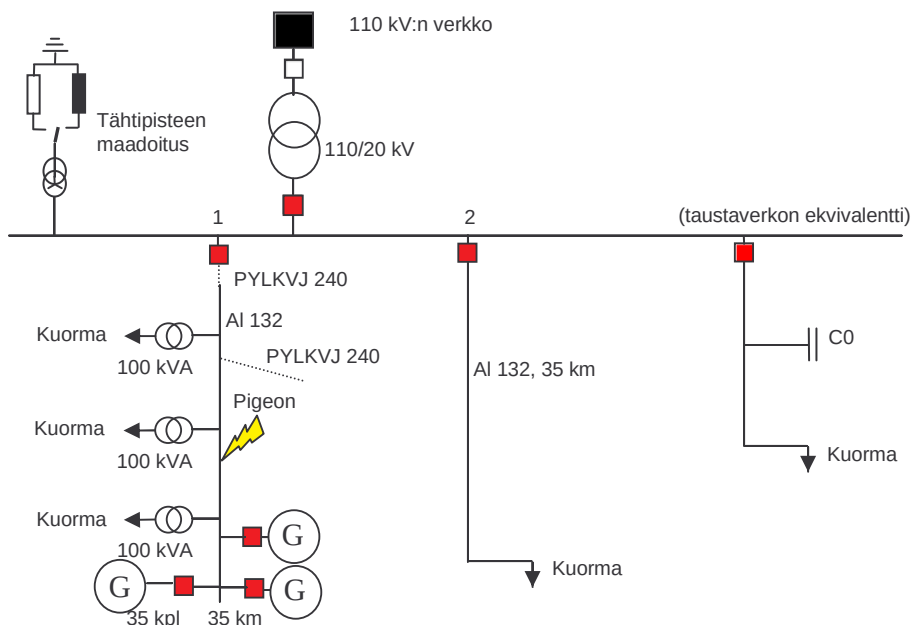


Kuva 40. Terveiden vaiheiden ylijännitteiden jatkuminen tuulivoimaloiden vuoksi.

Jos johtolähdöllä on käytössä jälleenkytkennät, nopea eroonkytkentäsuojaus on tarpeellinen, jotta vika ehtisi poistua ennen jälleenkytkentää ja jotta jälleenkytkentä ei tapahtuisi epätahdissa. Lähdöillä, joilla ei käytetä jälleenkytkentöjä, nopean eroonkytkennän vaatimus voi aiheutua kosketusjännitesuojausvaatimuksista.

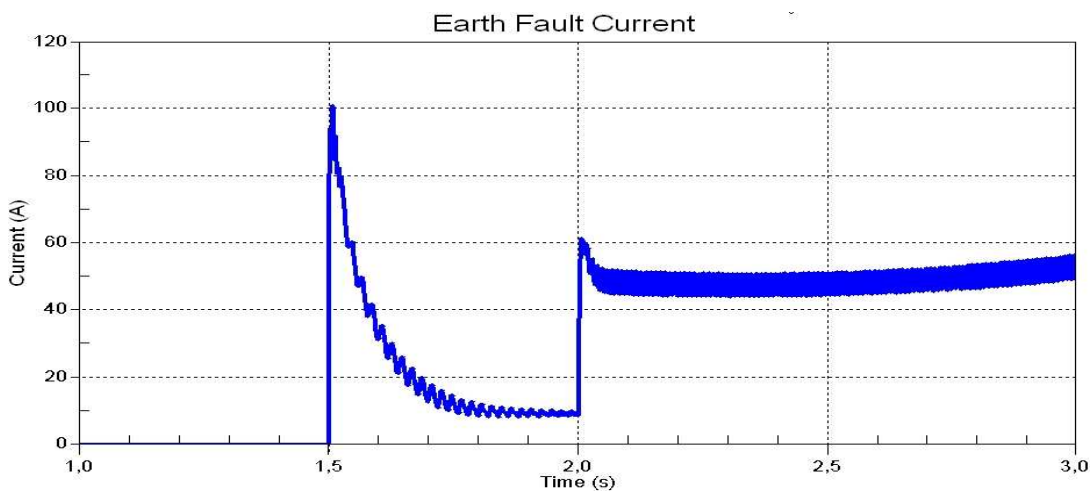
7.3.4 Simulointi sammutetun verkon mallilla

Keskitetysti sammutetussa järjestelmässä mielenkiintoiseksi asian tekee se, että lähdön lauettua saarekkeeksi ko. saareke on maasta erotettu. Tällöin on mahdollista, että saarekkeessa lähdön maasulkuvirta voi jopa kasvaa, mikä vaikeuttaa kosketusjännitesuojauksen toteutumista. Tällaisen mahdollisuuden havainnollistamiseksi toteutettiin simulointi kuvan 41 mukaisella verkkomallilla, joka poikkeaa muissa simuloinneissa käytetyistä avojohtoverkon malleista vain siinä, että tarkasteltavalle lähdölle on kytketty 9 km pitkä kaapeliosuus. Kaapeliosuus on lisätty, jotta maasulkuvirran kasvaminen saadaan havainnollistetuksi.



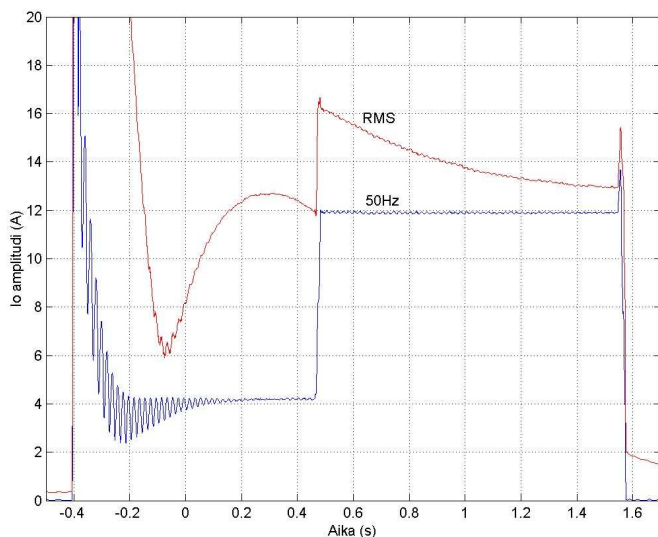
Kuva 41. Kompensoidun verkon maasulkusimuloinnissa käytetty verkkomallin kaavio.

Simuloitu tilanne oli 1-vaiheinen vikaresistanssiton maasulku etäisyydellä 20 km. Simuloinnissa vikaantunut lähtö laukesi 0,5 s aikahidastuksen jälkeen. Saarekkeeseen jääneellä lähdöllä tuulivoimalat jatkoivat toimintaansa ja pitivät sen jännitettä yllä. Koska yhteyttä tähtipisteen maadoitukseen ja siis kompensointiin ei ollut, saareke oli maasta erotettu. Lähdön maakapasitanssit tuottivat selvästi suuremman maasulkuvirran kuin mitä vikapaikassa oli ennen lähdön laukeamista kulkenut. Vikavirran käyttäytyminen on esitetty kuvassa 42.



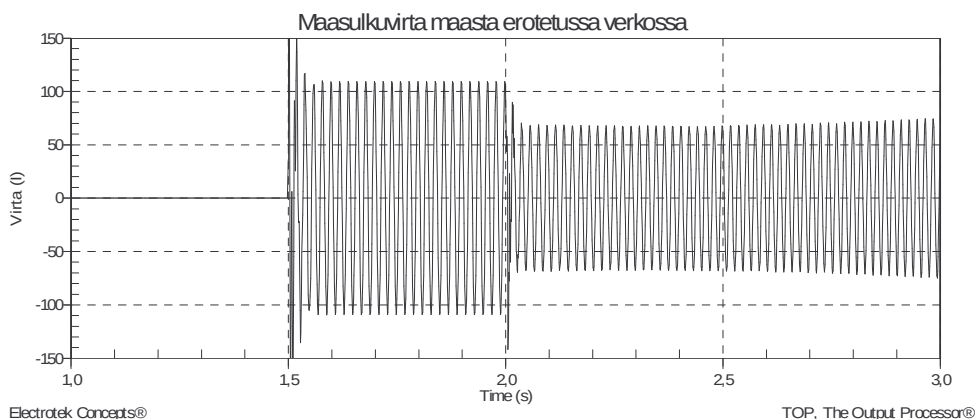
Kuva 42. Maasulkuvirran kasvu kompensoidussa verkossa lähdön lauetessa saarekkeeksi.

Simuloinnille (virran käyttäytyminen) saadaan jälleen tukea mittaustuloksista, joita on esitetty kuvassa 43. Kuvan tilanteessa virran kasvu ei aiheudu lähdön laukeamisesta vaan lisävastuksen kytkeytymisestä.



Kuva 43. Releen mittaama nollavirran RMS-arvo sekä perustaajuinen komponentti (Autio 2005).

Vertailusimuloinnissa samalla verkkomallilla, mutta maasta erotettuna, maasulkuvirta käyttäytyy kuvan 44 osoittamalla tavalla. Virta luonnollisesti pienenee lähdön laukeamisen jälkeen, koska yhteys taustaverkkoon katkeaa. Kuvassa on esitetty virran hetkellisarvon simuloitu käyttäytyminen.



Kuva 44. Maasulkuvirta maasta erotetussa verkossa.

Jos sammutetun verkon laukaisuaika määritetään sammutetun tilanteen maasulkuvirran mukaan ja jos hajautettu tuotanto jatkaa toimintaansa lähdön laukaisun jälkeen, kosketusjännitevaatimukset eivät toteudu. Ongelman esiintymisen todennäköisyyttä pienentää kuitenkin sammutetulle verkolle ominainen ohimenevien valokaarivikojen poistuminen itsestään ilman kytkinlaitteiden toimintaa.

7.3.5 Maakontaktin menetys resistanssin kautta maadoitetussa järjestelmässä

Resistanssin kautta maadoitetuissa järjestelmissä saarekkeen syntymiseen liittyy riski maakontaktin menettämisestä. Tästä voi seurata turvallisuusriskejä järjestelmän maadoitustavan muuttumisen seurauksena, kun osa verkosta irtoaa saarekkeeksi (Redfern et al. 2001). Iso-Britanniassa keskijänniteverkot ovat tyypillisesti yhdestä pisteestä (sähköasemalla) impedanssin kautta maadoitettuja. Saarekkeeksi kytkeytynyt keskijännitelähtö on kuitenkin tällöin maasta erotettu, eikä suojausjärjestelmää ole suunniteltu näitä tilanteita ajatellen. Tällaisia tilanteita ajatellen on kehitetty (Redfern) erityinen Loss-of-earth –rele, jonka menestyksestä markkinoilla ei kuitenkaan ole tietoa. Kyseessä on eräs LOM-releen muoto, joten tarvittava suojaus olisi toteutettavissa myös nopealla eroonkytkentäreleellä, ilman erityistä maakontaktin menetyksen tunnistusta.

Jos verkon vikatilanteissa erillisiksi saarekkeiksi jakava järjestelmäkonsepti tulee käyttöön, syntyy tarvetta adaptiiviselle suojaustekniikalle, joka ottaa myös mahdollisen maadoitustavan muuttumisen huomioon.

7.4 SUOJAUKSEN TOIMINNAN HIDASTUMINEN TAI ESTYMINEN

Sekä keskijänniteverkon että pienjänniteverkon simuloinnit ovat osoittaneet, että hajautettu tuotanto, voi hidastaa suojauksen toimintaa tai jopa kokonaan estää verkon suojauksen asianmukaisen toiminnan. Nämä vakavia sähköturvallisuusriskejä aiheuttavat ongelmat on käsitelty tarkemmin tämän tutkimusraportin aiemmissa kohdissa. Ratkaisuvaihtoehtoja puolestaan tarkastellaan jäljempänä.

7.5 SAAREKEKÄYTÖN EDELLYTTÄMÄ SUOJAUS

Jos verkon osaa halutaan käyttää hajautetun tuotannon tai varavoimakoneen syöttämänä saarekkeena, on otettava huomioon todennäköisesti huomattavasti pienentynyt vikavirtataso. Normaalin ylivirtasuojauksen sijasta voi olla välttämätöntä siirtyä muihin suojausratkaisuihin. Saarekekäytön edellyttämän suojauksen kehittäminen rajataan kuitenkin tämän tutkimuksen ulkopuolelle, mutta jäljempänä on tarkasteltu kehitteillä olevan saarekekäyttökonseptin yleispiirteitä. Sähköturvallisuuden kannalta mielenkiintoista on myös se, miten vikavirtasuojaus toteutuu nykyisiä varavoimaratkaisuja käytettäessä.

8 MUIDEN MAIDEN VERKOISTA JA HAJAUTETUN TUOTANNON VAIKUTUKSISTA

8.1 RUOTSI

Ruotsissa on ryhdytty erittäin laajamittaiseen verkkojen uusimiseen, jota on vauhdittanut talvella 2005 koettu Gudrun-myrsky. Ensisijaisena ratkaisuna on keskijänniteverkkojen laajamittainen kaapelointi, mm. E.ON aikoo rakentaa 90 %:sesti maakaapeleilla (Lindqvist 2006). Vattenfallilla rakenteiden soveltamisjärjestys on maakaapeli, ilmakaapeli, päällystetty avojohto (Hansson 2006). Ruotsalaisten näkemyksen mukaan Gudrunin opetuksiin kuului, että mikään ilmajohtorakenne ei kestä hirmumyrskyä. Ilmajohtoja tarvitaan kuitenkin paikoissa, joissa kaapelointi ei onnistu ilman kohtuuttomia kustannuksia.

Laajamittainen kaapelointi näyttää Ruotsissa pakottavan hajautettuun kompensointiin ja uusiin muuntamorakenteisiin. Laajamittaisen kaapeloinnin verkkovaikutuksia selvitetään, mikä käsittänee myös verkkojen suojauksen tarkastelua.

Hajautetun tuotannon voimakkaaseen tulemiseen ei Ruotsissa erityisen näkyvästi varauduta. 10 vuotta sitten laadittu visio (Bergman 1997) yliarvioi voimakkaasti hajautetun energiantuotannon ja energiavarastojen kehittymisen aikavälillä 1996-2010. Nyt Ruotsissa ollaan tässä mielessä varovaisempia.

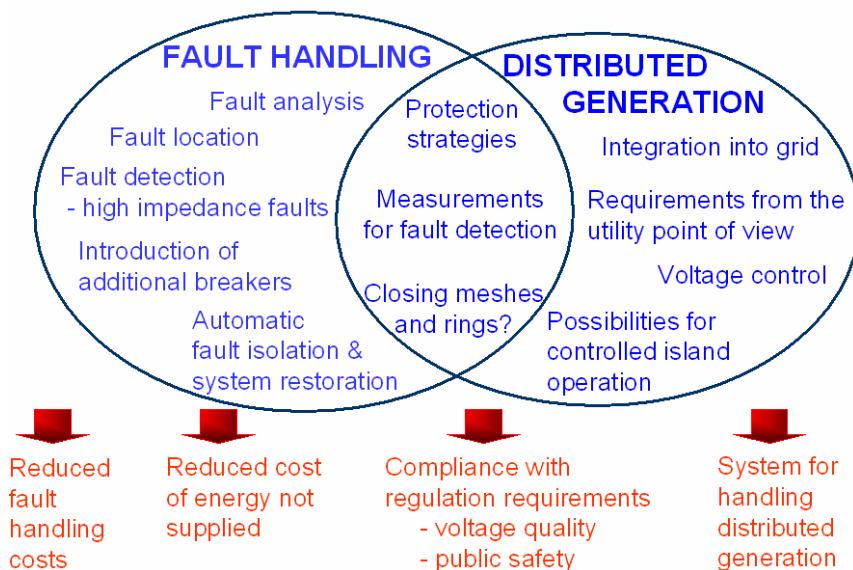
8.2 NORJA

Norjassa on käynnistetty Distribution 2020 –projekti, jonka tavoitteen on kehittää uusia verkkoratkaisuja, joiden avulla voidaan minimoiden seuraavien verkkojen päähaasteiden seuraamuksia ja kustannuksia:

- Vikatilanteiden hallinta
- Hajautetun tuotannon verkkoon liittäminen.

Projektin tutkimusalueet ja tavoitteet on kuvattu tarkemmin kuvassa 45.

Distribution 2020 – TOPICS & GOALS



Kuva 45. Distribution 2020 –hankkeen osa-alueet ja tavoitteet (Kjolle 2006).

8.3 TANSKA

Tanskasta saatu näkemys perustuu pääosin Jyllannin niemimaalla ja Fynin saarella toimivalta Eltra-yhtiöltä saatuihin tietoihin (Kjaergaard 2004). Huomioon on otettava kaksi asiaa:

- Tanskassa kaapeloitujen keskijänniteverkkojen osuus on noin 90 % (Lågland 2004). Voitaneen olettaa, että keskijänniteverkoissa harvoin käytetään jälleenkytkentää.
- Eltra on varsinaisesti siirtoverkko-operaattori (60 kV ja ylemmät jänniteportaat), ja pienet jakeluyhtiöt hoitavat varsinaisen sähkönjakelun. Kokemukset hajautetun tuotannon vaikutuksesta painottunevat täten siirtoverkon asioihin.

Eltra käyttää jännitteen myötäkomponenttia LOM-suojauksessa. $U_{1s} <$ -rele voi havaita saarekekäytön vain oikosulkutapauksissa. Tämän vuoksi Eltra suosittelee ROCOF-suojaa varasuojaksi. Sen sijaan vector shift –suojat ovat usein erittäin herkkiä, minkä vuoksi ne kytkevät hajautetun tuotannon yksiköitä tarpeettomasti pois verkosta myös kaukana vikapaikasta. Joillakin ROCOF-releillä on havaittu sama piirre, ja ainakin kaksi relevalmistajaa on tehnyt muutoksia releeseensä Eltran testauksen perusteella. Jännitteen myötäkomponenttiin perustuvaa suojausta pidetään toimivana myös jälleenkytkennöissä.

Eltra on vaihtanut monta ylivirtasuojasta suunnatuiksi.

Tuotantoyksiköiden tarpeeton laukeaminen on vakava ongelma. 3-vaiheisissa oikosuluissa on menetetty jopa 1/3 toimivasta tuotannosta. Tämän vuoksi etsitään edelleen ratkaisua, jonka avulla epätahdissa tapahtuva jälleenkytkentä voitaisiin estää, mutta joka minimoisi nuisance tripping –ongelman.

Tanskassa pääongelma oikosulkuvirtatason kanssa on se, että kun vain rajallinen määrä suuria voimalaitoksia on toiminnassa, suuri määrä tuulivoimaa korvaa isot voimalaitokset ja oikosulkuvirtataso jää varsin alhaiseksi. Tästä seuraa ongelmia sähkön laadussa (mm. jännitejähkyys) ja HVDC-linkkien kanssa (todennäköisesti yliaaltojen sietokyky).

Hajautetun tuotannon suojaus on Tanskassa tavallisesti sijoitettu generaattorin puolelle, mutta verkko-operaattori vastaa suojauksen asetteluista. Suojauksen sijoittamiselle operaattorin puolelle voi löytyä hyviä argumentteja.

Koska Eltran alueella hajautetun tuotannon osuus on suuri, Eltralla on voimakas tarve verkkojen uusille suojauskonsepteille (Kjaergaard 2004). Frismoose Jensenin (2006) mukaan Tanskassa on asennettava eri jännitetasoille lisää tekniikkaa turvaamaan järjestelmän stabiilisuutta. Suojauksessa tarvitaan useita asetteluja verkon konfiguraation mukaan. Eroonkytkentäsuojauksessa näyttää edelleen olevan ongelmia, ja tulevaisuuden LoM-tekniikaksi ehdotetaan verkon oikosulkuvirtatason muutokseen perustuvaa suojausta.

Viitteen (Matevosyan et al. 2004) mukaan tuulipuistojen omistajilta edellytetään tuulivoimaloiden simulointimallien toimittamista, jotta siirtoverkkoyhtiöt voivat analysoida voimaloiden verkkovaikutukset. Myös rekisteröintilaitteiden (häiriötallennin) asennus vaaditaan, jotta mallit voidaan verifioida. Eltra vaatii lisäksi kaikkien erilaisten tuulivoimaloiden mallit, jos tuulipuisto koostuu useista voimalatyypeistä.

Jauch (Jauch et al. 2004) puolestaan arvioi, että tanskalaiset siirtoverkko-operaattorit tulevat tulevaisuudessa vaatimaan tuulipuistoilta samanlaista käyttäytymistä kuin konventionaalisilta voimalaitoksilta. Tämä johtaisi nykyistä tiukempiin vaatimuksiin, erityisesti loistehoa ja jännitteen säätöä koskien. Myös Matevosyanin arvion mukaan vaatimukset tulevat vielä muuttumaan.

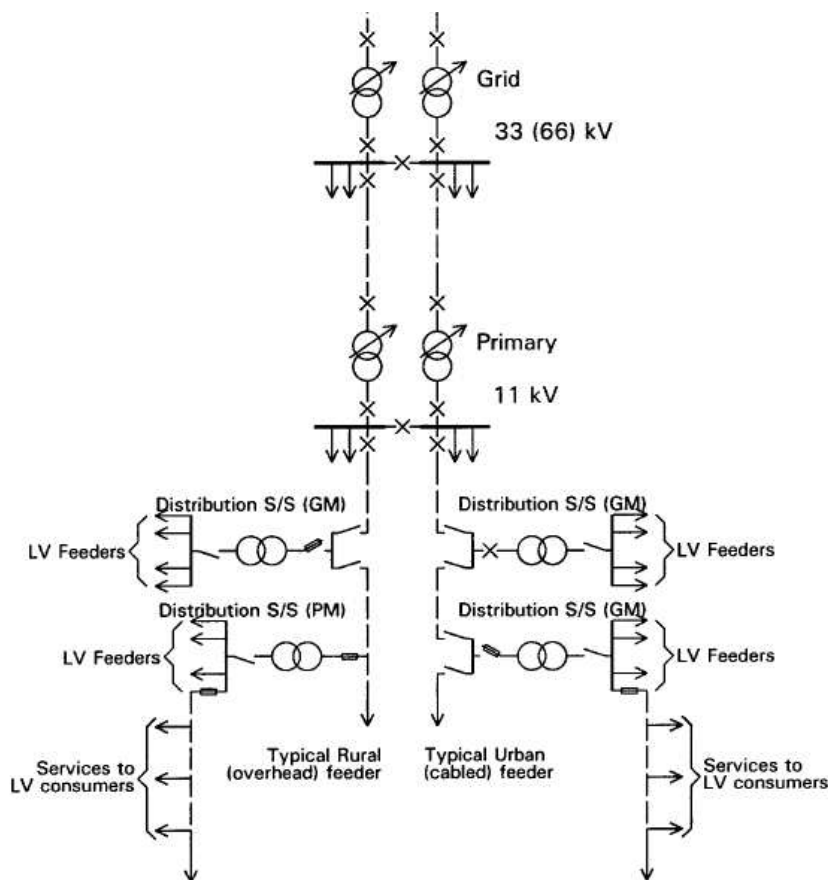
Vaatimusten tiukentumista voitaneen pitää erittäin mielenkiintoisena kysymyksenä, kun otetaan huomioon vaatimus siitä, että vaatimukset eivät saisi asettaa eriarvoiseen asemaan aikaisemmin ja myöhemmin liittyviä tuotantoyksiköitä.

8.4 ISO-BRITANNIAN VERKOISTA JA HAJAUTETTUUN TUOTANTOON LIITTYVISTÄ SUOJAUSKYSYMYKSISTÄ

8.4.1 Keskijänniteverkkojen rakenteesta ja suojauksesta

Kuvassa 46 on esitetty brittiläistyyppisen jakeluverkon rakenne. Keskijänniteverkko on yleensä sähköasemalla yhdestä pisteestä suoraan maadoitettu (Redfern et al. 2001). Keskijänniteverkkojen ylivirtasuojaus on toistaiseksi lähes kaikissa verkoissa suuntaamaton. Suunnattuun suojaukseen siirtymistä pidetään minimivaatimuksena, mutta distanssisuojaukseen perustuvaa konseptia kehitellään. Suunnattujen

ylivirtareiden ongelmana pidetään toiminnan hitautta vaaditun porrastuksen vuoksi. Tästä voi aiheutua stabiilisuusongelmia.



Kuva 46. Brittiläisen verkon rakenne (MacDonald 2004)

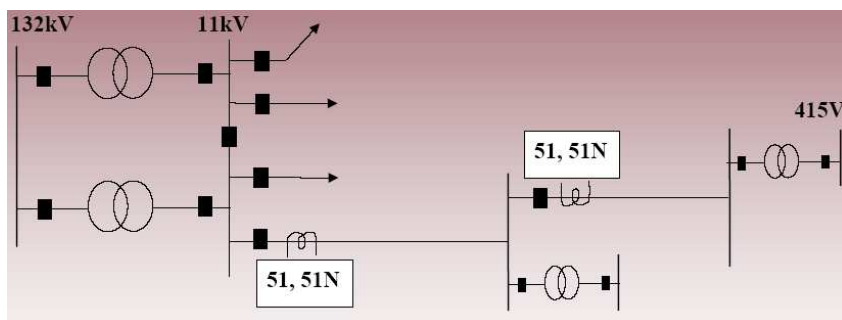
LOM-suojauksessa käytetään pääasiassa ROCOF- ja vector shift -menetelmiä tuulivoimaloissa (epätahtigeneraattorit) sekä CHP-laitoksissa ja muissa tahtigeneraattoriin perustuvissa voimaloissa. ROCOF-menetelmää pidetään käyttökelpoisimpana, koska vector shift -menetelmä on alttiimpi virhelaukaisuille. ROCOFin ongelmana on puolestaan katvealue lähellä saarekkeen tehotasapainotilannetta. Tyypillisiä releasetteluja ovat ROCOF-menetelmällä 0,124 Hz/s ja vector shift -menetelmällä 6°. (Chilvers 2004)

Tuulipuistoilta tultaneen edellyttämään ride-through -ominaisuuksia verkon häiriöissä, käytännössä jännitekuopissa. Scottish Power vaatii tätä jo sen verkkoon kytketyiltä tuulivoimaloilta.

Huolenaiheisiin kuuluu myös LOM-suojauksen toimimattomuus erityisesti jälleenkytkentätilanteissa. Yleisesti ottaen hajautetun tuotannon osuuden kasvattaminen suureksi edellyttää yli 50 vuotta käytössä olleiden suojausmenetelmien uudistamista.

Brittiläistyyppisen, yhdestä pisteestä suoraan maadoitetun keskijänniteverkon suojauksessa ei yleensä tarvita jännitemuuntajia (Chilvers 2003). Vaihekohtaiset ja

summavirtaa tarkkailevat ylivirtareleet riittävät (kuva 47). Maasulkuvirta on selvästi suurempi kuin maasta erotetussa verkossa.



Kuva 47. Keskijänniteverkon suojaus ylivirtareleillä (Crossley 2003)

Yhdestä pisteestä maadoitetun verkon hankaluutena on, että saarekkeeksi lauennut keskijänniteverkon osa muuttuu maasta erotetuksi. Tätä ongelmaa on tarkastellut Redfern (2001).

8.4.2 Hajautetun tuotannon verkkoon liittämiseen liittyviä vaatimuksia Iso-Britanniassa

Engineering recommendation G83 (October 2002)

G83 on tekninen suositus pienten, enintään 16 A/vaihe –suuruisten tuotantoyksiköiden kytkemisestä julkisiin pienjänniteverkkoihin. Se asettaa mm. taulukossa 3 esitetyt toiminta-arvot suojaukselle:

Taulukko 3. Suojasasettelut G83:n mukaan.

Parameter	Trip setting (maximum range)	Trip time (maximum value)
Over Voltage	264 volts (230 +14.7%)	1.5 seconds
Under Voltage	207 volts (230 –10%)	1.5 seconds
Over Frequency	50.5 Hz (50 Hz +1%)	0.5 seconds
Under Frequency	47 Hz (50 Hz –6%)	0.5 seconds
Loss of Mains	See 5.3.2	0.5 seconds

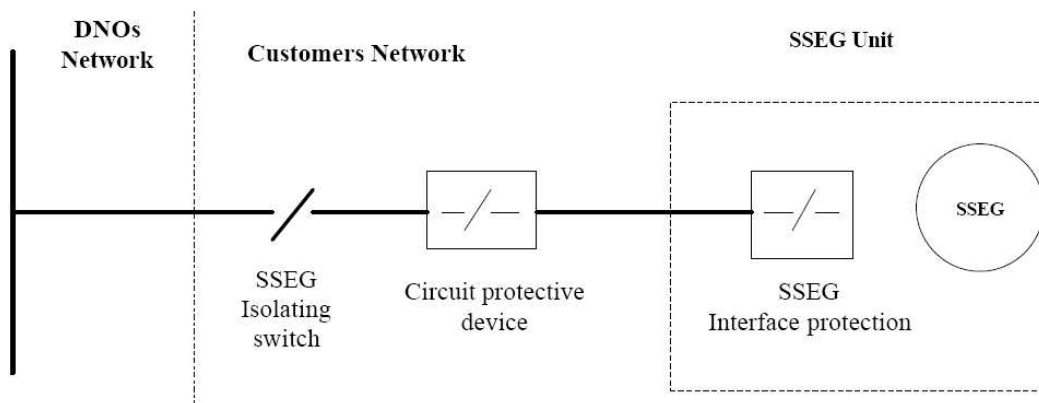
Note 1: Voltage and frequency is referenced to the supply terminals.

Note 2: To reduce the risk of nuisance tripping for normal system disturbances of short duration, the trip times for under and over voltage have been extended from the 0.5 seconds specified in Engineering Recommendation G59/1. In the event of the SSEG being installed on a circuit controlled by an auto-reclosing circuit breaker the Loss of Mains protection will ensure that the SSEG is disconnected before the circuit breaker can reclose after tripping on fault.

Huomautuksessa 2 todetaan tarpeettoman laukaisun riski sekä jälleenkytkentöihin liittyvä näkökulma. Selvää LoM-vaatimusta ei kuitenkaan anneta.

G83:n kohdassa 5.3.2 on annettu LoM-vaatimukset. LoM pitää toteuttaa tunnustetulla tekniikalla. Tunnustetut tekniikat on annettu liitteessä. De facto standardeina pidetään ROCOF- ja Vector Shift –menetelmiä, joita britit ovat esittäneet niiden tunnetuista puutteista huolimatta myös CENELEC-standardiin. Aktiivisia menetelmiä ei pidetä sopivina. Laukaisun asetteluarvon tulee varmistaa eroonkytkentä verkosta 0,5 sekunnin kuluessa riippumatta siitä, missä verkon kohdassa saareketilanne syntyy.

Esimerkkikaavio pienen generaattorin suojalaitteista on esitetty kuvassa 48.



Kuva 48. Esimerkkikaavio pienen tuotantoyksikön verkkoon liittämisestä (G83).

Kuvan 48 kaaviossa on huomionarvoista, että erotuskytkin kuuluu vaatimuksiin ja että kaikki suojalaitteet jäävät asiakkaan puolelle.

Tuotantolaitteen omistajan tulee ilmoittaa verkkoyhtiölle maksimi oikosulkuvirta, jonka tuotantoyksikkö voi verkkoon syöttää.

Engineering recommendation G59/1 (1991) ja Engineering Technical Report 113 (revision 1, 1995)

G59/1:n otsikko on ”Recommendations for the connection of embedded generating plant to the public electricity suppliers’ distribution systems”, ja se käsittelee enintään 20 kV:n verkkoja ja enintään 5 MW:n tuotantoyksiköitä. Suositus on melko yleisluonteinen, ja se suojauskysymyksissä se antaa lähinnä vain raja-arvot jännitteelle ja taajuudelle sekä asettaa LoM-vaatimuksen. G59/1:n tueksi on tuotettu tekninen suositus ETR 113, joka sisältää tarkempaa ohjeistusta esimerkkeineen.

ETR 113 antaa esimerkkejä mm. siitä, miten tuotantoyksiköiden tuottama vikavirta voidaan laskea, sekä LoM-suojausehdotuksia. LoM-suojauksessa voidaan suosituksen mukaan käyttää

- takatehorelettä,
- loistehon suuntarelettä,
- alitehorelettä,
- siirtolaukaisua tai
- Loss-of-Mains –relettä

Verkoissa, joissa käytetään jälleenkytkentää, voidaan ETR 113:n mukaan käyttää siirtolaukaisua tai jännitelukitusta, jotta ei tapahdu tahdistamatonta jälleenkytkentää.

8.4.3 Potentiaalisia ongelmia ja niihin esitettyjä ratkaisuja

Britit ovat nähneet hajautetun tuotannon tuomina potentiaalisina teknisinä ongelmina ensisijaisesti jännitteen nousun ja kasvavan oikosulkuvirtatason, joka uhkaa kytkinlaitteiden kestoisuutta. Hamilton (2004) näkee hajautetun tuotannon uhkana myös verkon luotettavuudelle. Loss-of-Mains –suojausessa brittien suunnalla on yrityksiä saada ROCOF- ja Vector Shift –menetelmät yleisiksi standardimenetelmiksi, vaikka niiden puutteet tuunnustetaan (Beddoes 2005, 2006). Niiden alkuperäinen käyttöfilosofia perustui tilanteeseen, joka ei ole enää voimassa, eli siihen, että hajautetun tuotannon osuus on pieni.

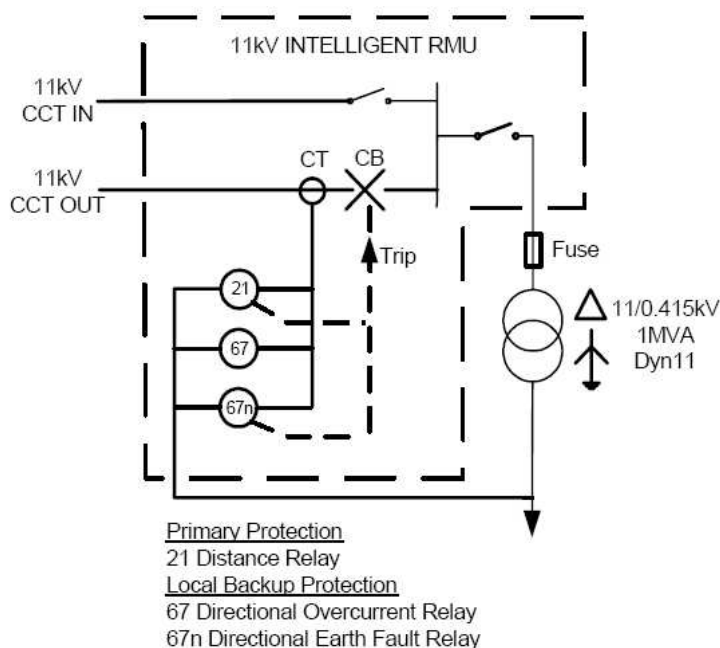
LoM-suojaus on nostettu tuoreessa tutkimuksessa yllättävän tärkeäksi kysymykseksi. Suojausasioita sivuaa runsaasti esillä oleva näkemys tarpeesta siirtyä verkkojen hallinnassa passiivisesta tarkkailusta aktiiviseen verkonhallintaan hajautetun tuotannon kasvavan osuuden myötä. Iso-Britannian kauppa- ja teollisuusministeriön (DTI) alaisuudessa on toteutettu mm. tutkimusprojekti ”Novel Protection Methods for Active Distribution Networks with high penetration of Distributed Generation”. University of Strathclyden ja University of Manchesterin toteuttaman tutkimuksen yhteenvedossa pääkysymyksiksi on nostettu seuraavat (DTI 2005):

- 1) Loss-of-Mains. On todettu, että loss-of-mains suojaus ei toimi oikein useissa tilanteissa. Tavallisin virheteroiminto on tuotantoyksikön tarpeeton laukaisu. Mahdollisia ratkaisuja: Parannettu taajuuden tarkkailuun perustuva algoritmi, tietoliikenteeseen perustuvat ratkaisut.
- 2) Islanding. Tähän asti saarekekäyttöä ei ole pidetty toteuttamiskelpoisena. Tilanne kuitenkin todennäköisesti muuttuu, ja myös suojauksen odotetaan toimivan sekä tuotantoyksikön ollessa pääverkkoon kytkettynä että saareketilanteessa. Mahdollisiksi ratkaisuihin on esitetty adaptiivista suojausta ja tietoliikenteeseen perustuvaa tuotantoyksikköjen suojausta.
- 3) Protection discrimination. Selektiivisyysongelma kasvaa erityisesti 33 kV:n ja 11 kV:n jänniteportaissa hajautetun tuotannon osuuden kasvaessa. Nykyiset ratkaisut ovat kalliita. Mahdollisina ratkaisuinahan on esitetty optisia mittauksia ja siirtoverkkoratkaisujen tapaisia suojausratkaisuja kuten distanssisuojausta.

Chilversin (2004) näkemyksen mukaan potentiaalisia hajautetun tuotannon ongelmia ovat suojauksen (erityisesti varasuojauksen) sokaiseminen, jälleenkytkentöihin liittyvä LoM-suojaus, terveiden lähtöjen virheelliset laukaisut, tuotantoyksiköiden tarpeettomat laukaisut ja ongelmat oikosulkuvirtatason kanssa. Yleisesti brittien verkkojen suojausratkaisut ovat 50 vuotta vanhoja, ja niitä on kehitettävä, kun hajautetun tuotannon osuus kasvaa.

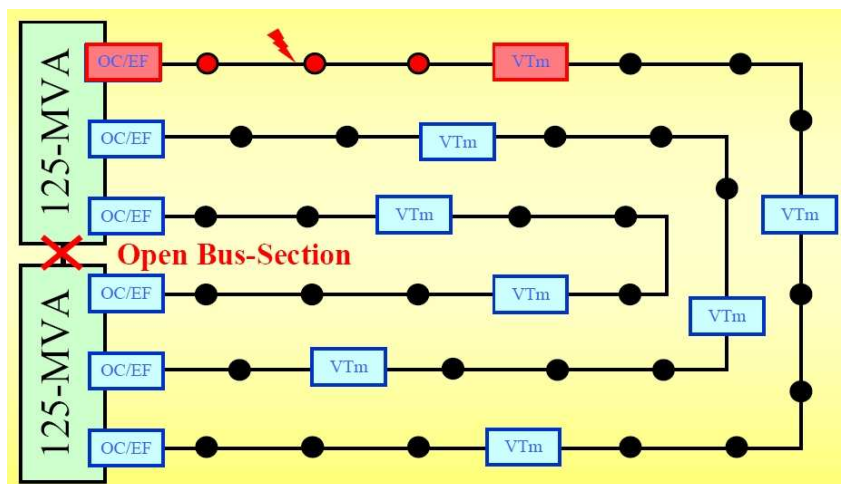
Oikosulkuvirtojen kasvusta huolestuminen on ymmärrettävää, koska 11 kV:n jännite on melko alhainen, mistä johtuen virrat ovat suurehkoja, ja koska laitekanta on vanhaa.

Chilvers esittää keskijänniteverkon suojaukseen distanssireleen käyttöä kaapeloidun verkon jakelumuuntamoilla. Hänen mukaansa ylivirtareleitä käytettäessä aikahidastukset muodostuvat liian pitkiksi 11 kV verkon kolmivaihevioissa hajautetun tuotannon tahdissa pysymistä ajatellen. Kuvassa 49 esitetyssä ratkaisussa olennaista on jännitteen mittauksen toteutus pienjänniteverkosta, millä menettelyllä vältetään kj-puolelle sijoitettavilta jännitemuuntajilta.



Kuva 49. Chilversin ehdotus: distanssirele jakelumuuntamolla (Chilvers et al. 2004).

Hamilton (2004) puolestaan esittää yleiseksi suojausratkaisuksi rengaskäyttöä ja jänniteohjattua ylivirtasuojausta. Lähellä vikaa jännite putoaa eniten, ja lähimpänä olevat suojat toimivat (kuva 50)

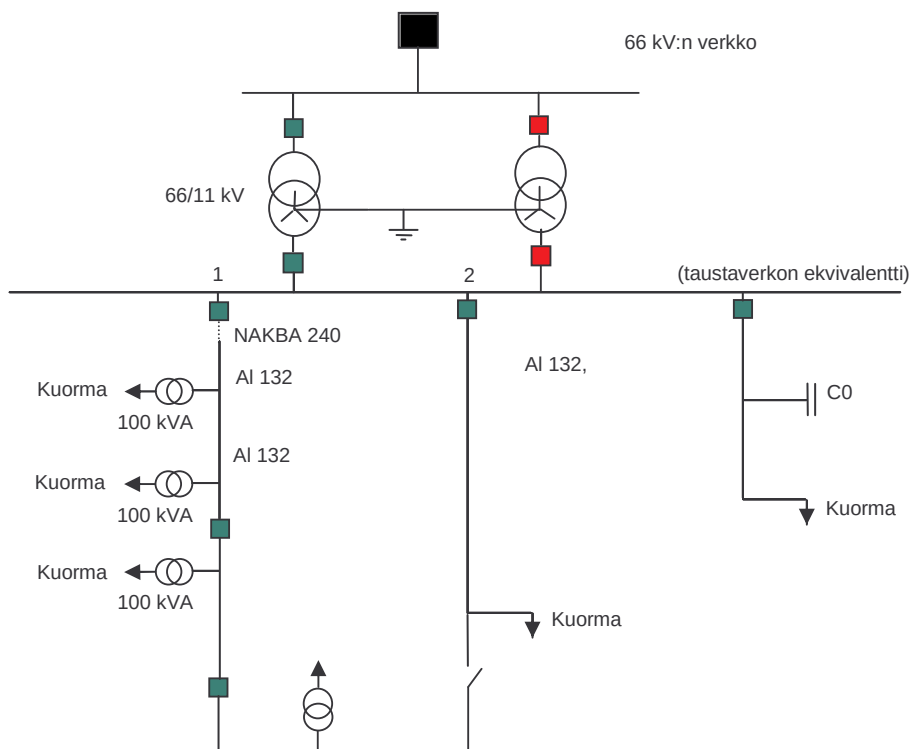


Kuva 50. Rengaskäyttö ja jänniteohjattu ylivirtasuojaus (Hamilton 2004).

8.4.4 Brittiverkon simulointitarkastelut

8.4.4.1 Simuloinneissa käytetty verkkomalli

Simuloinneissa käytettiin sekä taajamatyyppisen kaapeliverkon että maaseutumaisen ilmajohtoverkon malleja. Molemmat mallit ovat perusrakenteeltaan samoja. Kuvassa 52 on esitetty maaseutuverkon kaavio.



Kuva 51. Maaseutuverkon kaavio.

Verkkomallien ominaisuuksia ovat seuraavat:

- Sähköasemalla on kaksi päämuuntajaa, joista voi olla kytkettynä toinen tai molemmat.
- 11 kV verkon tähtipiste on yhdestä pisteestä suoraan maadoitettu.
- Taajamaverkossa johdinlajina koko verkossa on NAKBA 3x240SM
- Maaseutuverkossa ensimmäisen 100 m pituisen kaapelin jälkeen koko verkko on tyyppiä AI 132.

- Muuntajia on taajamaverkossa 300 m:n välein, maaseutuverkossa 1 km:n välein
- Taajamalähdön peruspituus on 6,1 km, maaseutulähdön 20 km
- Johtolähdön 2 pituus on 20 km (muutettavissa), ja se on kytkettävissä renkaaseen lähdön 1 kanssa.
- Taajamaverkossa jakelumuuntajien koko on 800 kVA, maaseutuverkossa 100 kVA.
- Kuormitusaste on käyttäjän valittavissa.
- 11 kV:n johtolähtö on jaettu katkaisijoiden avulla useaan suojausalueeseen.
- Sekä oikosulku- että maasulkusuojaus on toteutettu käänteisaikaylivirtareleillä. Edes nollavirtarelettä ei ole (suomalaistyyppinen maasulkurele $[U_0, I_0, \phi]$ on otettu pois käytöstä).

8.4.4.2 Simuloinnit taajamaverkon mallilla

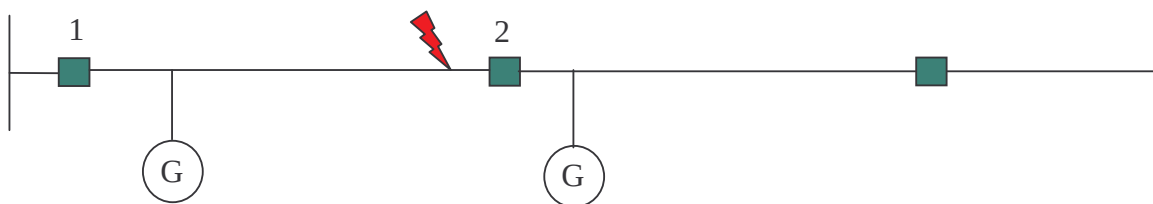
Simuloinnit tehtiin verkkokonfiguraatiolla, jossa molemmat päämuuntajat ovat kytkettyinä. Koska simuloinneissa ei noussut esille erityisiä hajautetun tuotannon aiheuttamia suojausongelmia, tulokset esitetään seuraavassa vain suppeasti ja sanallisessa muodossa.

Taajamaverkko on sähköisesti tukeva, joten siellä pienten tuotantoyksiköiden vaikutukset jäävät pienehköiksi. Tuotantotyyppistä riippuen oikosulkuvirrat kasvavat, jos syöttävä verkko pysyy ennallaan (perusvoimalaitokset toiminnassa). Jos hajautetun tuotannon osuus nousee niin suureksi, että perinteisiä voimalaitoksia suljetaan, oikosulkuvirtataso voi myös laskea, mikä voi vaarantaa suojauksen toiminnan. Suojareleiden näkemät vikavirrat voivat hajautetun tuotannon vaikutuksesta pienentyä ja releiden toiminta-ajat näin ollen pidentyä. Verkon suojauksen virheellinen laukaisu esimerkiksi viereisen johtolähdön viassa on mahdollinen mutta epätodennäköinen.

8.4.4.3 Simuloinnit maaseutuverkon mallilla

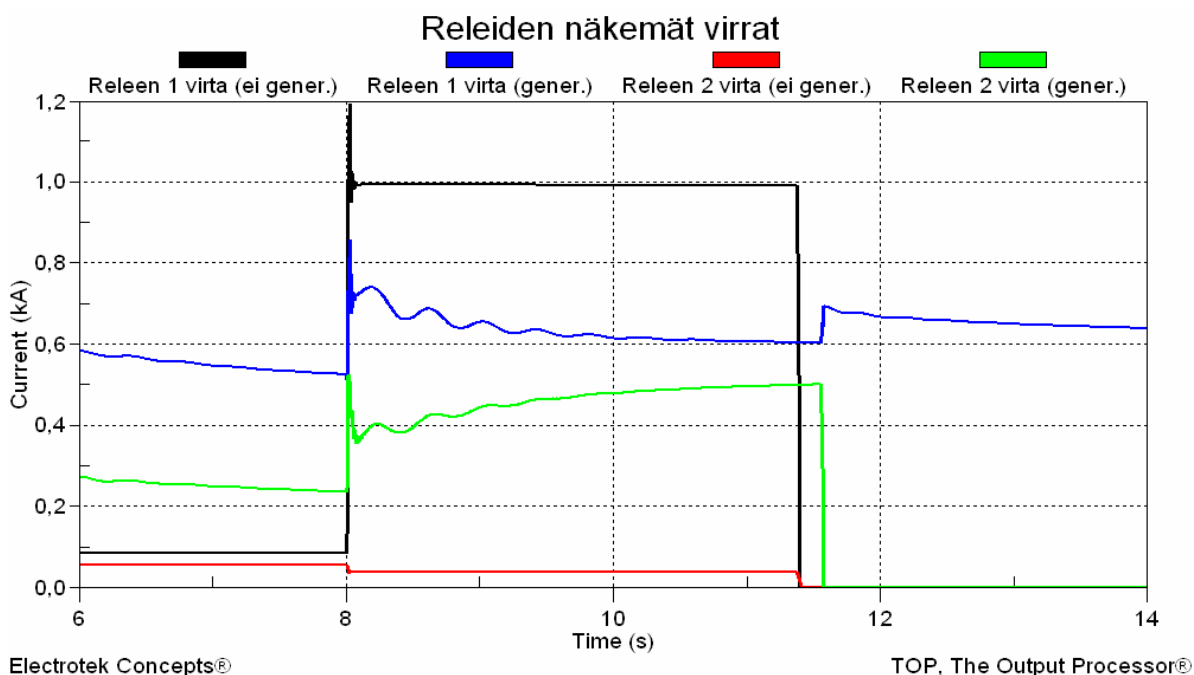
Virhelaukaisu ja suojauksen sokaistuminen

Kuvassa 51 esitetyn maaseutuverkon malliin lisättiin tarkasteltavalle lähdölle (lähtö 1) kaksi dieselgeneraattoria (7,94 MVA, aseteltu tehoon 6 MW). Päämuuntajista vain toinen 10 MVA:n muuntaja oli kytkettynä, ja jakelumuuntajien kuormitusaste oli 75 %. Simuloitu tilanne on kärjistetty, jotta potentiaaliset ongelmat on saatu selvästi esiin. Yksivaiheisen maasulun paikkana simuloinnissa oli ensimmäisen johto-osuuden loppupää kuvan 52 mukaisesti.



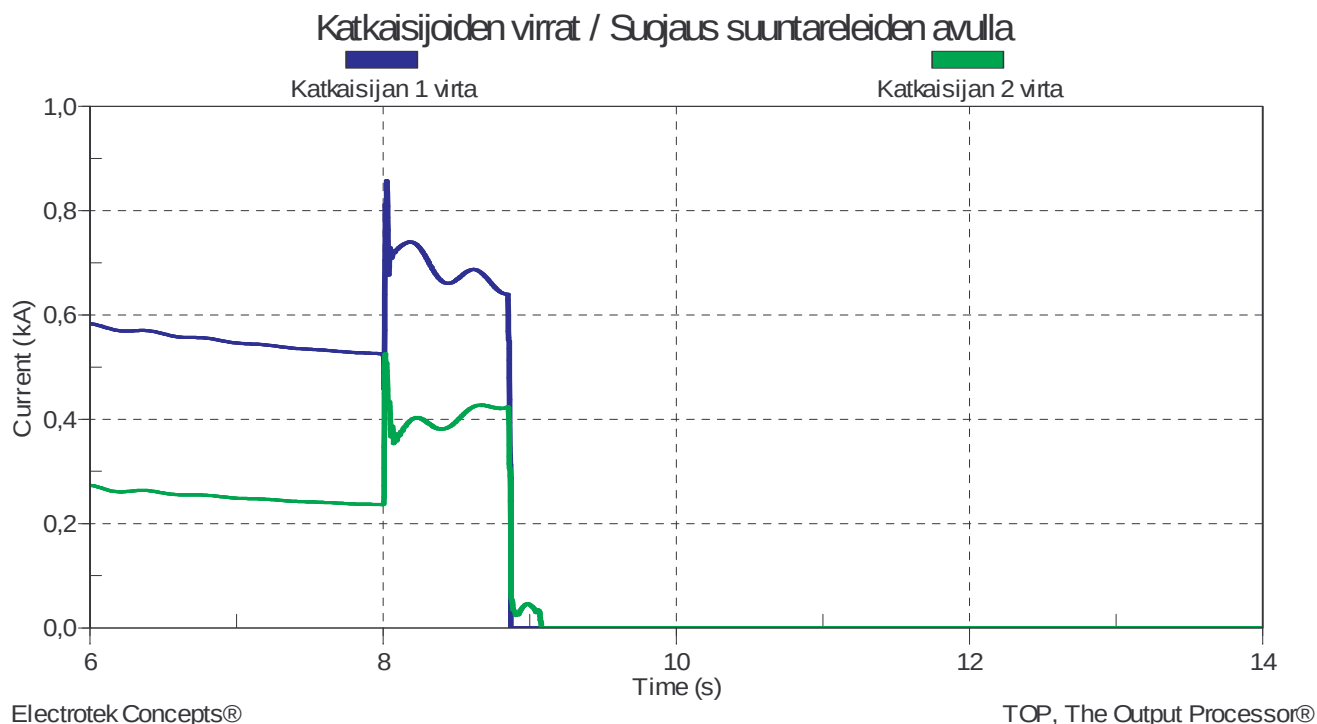
Kuva 52. Generaattoreiden ja vian sijainti johtolähdöllä

Vikatilanne simuloitiin ilman generaattoreita ja generaattoreiden vaikuttaessa. Vika alkaa hetkellä $t = 8$ s. Releiden 1 ja 2 näkemät virrat on esitetty kuvassa 53. Kun generaattoreita ole, rele 1 laukaisee asianmukaisesti (musta käyrä). Kun generaattorit ovat toiminnassa, rele 1 ei pienentyneen vikavirran vuoksi laukaise ollenkaan (sininen), joten vika jää tarkasteluaikana selvittämättä. Generaattorin toiminta siis sokaisee suojareleen. Rele 2 kuitenkin laukaisee generaattorien vaikuttaessa (vihreä), mitä voidaan pitää toisaalta oikeana, toisaalta virheellisenä. Rele 2 laukaisee vikapaikan takana olevan katkaisijan ja siten erottaa vikapaikan takana olevan tuotantoyksikön omaksi saarekkeekseen. Tarkoituksenmukainen suojauksen toiminta olisi ollut releen 1 laukaisu ja sitä seuraava molempien tuotantoyksiköiden nopea LoM-laukaisu.



Kuva 53. Releiden näkemät virrat (simulointi UK_ohl_virhelauk_GEN).

Kuvassa 54 on esitetty simuloitu katkaisijoiden virran käyttäytyminen, kun suojaus on toteutettu suunnatuilla maasulkureleillä (I_0 , U_0 , $\cos \phi_0$). Tällöin maasulkurele laukaisee asianmukaisesti katkaisijan 1, mutta ei katkaisijaa 2. Generaattorin 2 erottaminen verkosta voisi tapahtua LoM-releen tai U_0 -releen avulla.

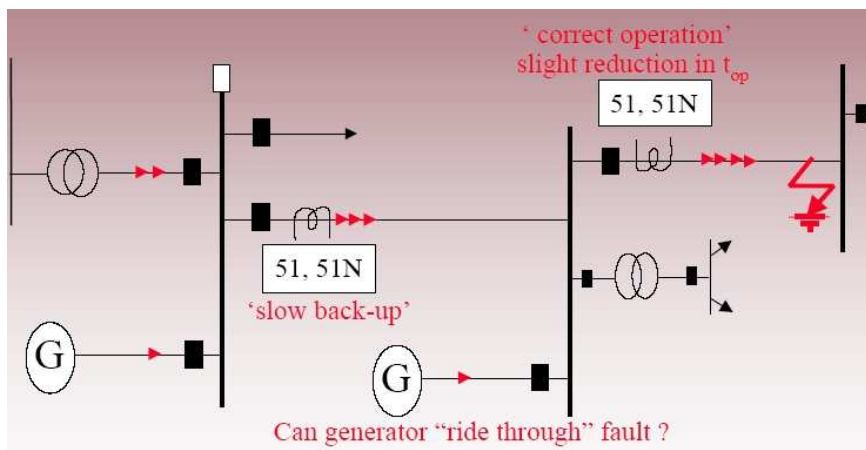


Kuva 54. Katkaisijoiden virrat, kun suojaus on toteutettu onnistuneesti suuntareiden avulla (simulointi UK_ohl_EF_relay_GEN).

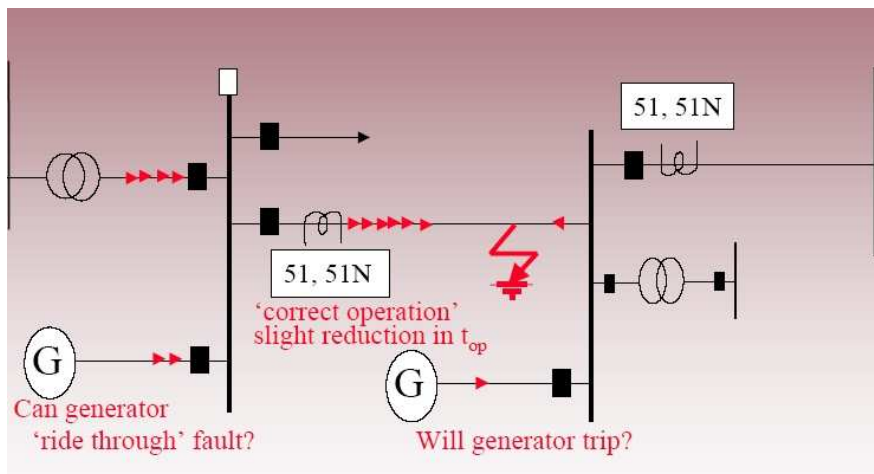
Monet brittiläiseen keskijänniteverkkokäytäntöön ja hajautettuun tuotantoon liittyvät ongelmat ovat ratkaistavissa selektiivisellä LoM-suojauksella. Kysymyksiä on seuraavassa tarkasteltu Crossleyn (2003) esityksen pohjalta. Crossley luettelee hajautetun tuotannon vaikutuksia ylivirtasuojaukseen:

- Releen näkemä vikavirta voi kasvaa tai pienentyä
 - Riippuu releestä ja vikapaikasta, verkon vikavirtatasosta, tuotantoyksiköiden tyypistä, koosta ja sijainnista
- Releiden porrastustarkasteluissa tulee ottaa huomioon
 - Kaikkien mahdollisten tuotantoyksiköiden minimi- ja maksimisyötöt
 - Ongelmia: tuotantoyksiköiden epäsäännöllinen luonne
- Pääongelma
 - tuotantoyksikön ja verkon liityntärajapinnan suojaus, joka täytyy koordinoida verkon suojauksen kanssa kaikkia käyttötilanteita ajatellen.

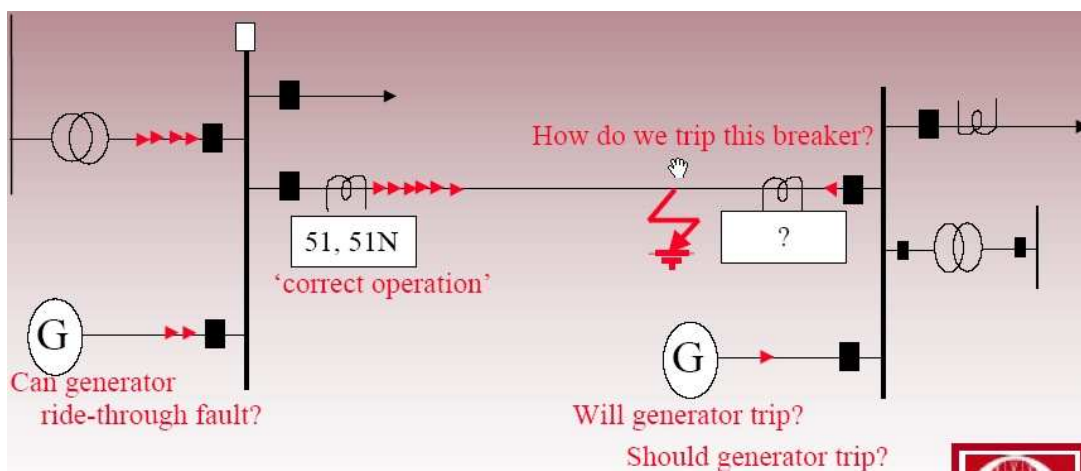
Kuvissa 55-57 on esitetty mahdollisia ongelmatilanteita.



Kuva 55. Suojausalueen ulkopuolisen vian aiheuttaman jännitekuopan ongelma (Crossley)



Kuva 56. Jännitekuoppaongelma ja vian havaitsemisen tai saarekekäytön havaitsemisen ongelma (Crossley).



Kuva 57. Saarekekäyttöön liittyvä ongelma (Crossley).

Kuviin 55-57 liittyvät ongelmat lienevät ratkaistavissa selektiivisen LoM-suojauksen avulla. Verkkosignaaliin perustuvaa LoM-menetelmää voidaan hyödyntää myös kuvan 16 esittämässä tarkoituksellisessa saarekekäytössä. Signaali tai sen puuttuminen voi antaa indikaation siirtymisestä saarekekäyttöön.

8.5 SAKSA

Saksassa verkot on perinteisesti suunniteltu käyttövarmuutta maksimoiden. Kaapeliverkkojen osuus on suuri, ja vianilmaisimet ovat laajasti käytössä. Ajankohtaisena kysymyksenä on hajautetun tuotannon, erityisesti tuuli- ja aurinkovoiman integrointi, koska tukipolitiikan seurauksena uusiutuviin energianlähteisiin perustuva tuotanto on ollut erittäin voimakkaassa kasvussa.

Yhtenäistä politiikkaa esimerkiksi verkon suojauksessa ei ole. Maasta löytyy monella tavalla maadoitettuja verkkoja ja erilaisia suojausratkaisuja. Keskijänniteverkossa jotkut yhtiöt käyttävät myös distanssirelettä esimerkiksi avoimen rengasverkon suojana. Distanssisuojan perusteluna on toiminnan nopeus. Maaseutumaisia verkkoja voidaan ajaa myös renkaissa jännitteen vakauden saavuttamiseksi. (Melzer 2005)

N-ERGIE –yhtiö vaatii hajautetun tuotannon yksiköiden eroon kytkeytymistä 100 ms kuluessa, jos verkossa on jälleenkytkennät käytössä (Melzer 2005). Useimmat tuotantoyksiköt on varustettu jännite- ja taajuussuojilla, joissakin tapauksissa käytetään vector shift –releitä. Kuitenkin tunnustetaan, että tällä hetkellä ei ole varmaa saarekekäytön estosuojaa. (Bässman 2006)

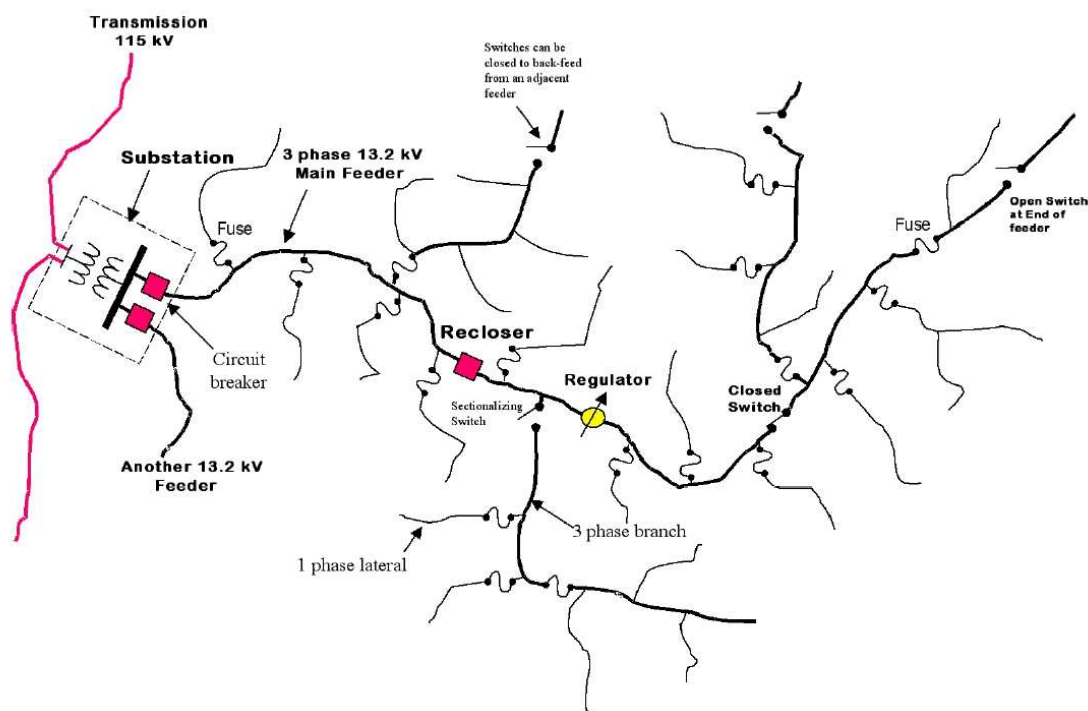
8.6 USA:N VERKOISTA JA NIIDEN SUOJAUKSESTA

8.6.1 Pohjoisamerikkalainen haja-asutusalueen ilmajohtoverkko

Pohjois-Amerikassa on tyypillistä rakentaa haja-asutusalueen keskijänniteverkko kuvan 58 esittämällä tavalla.

Suomessa suojausalueita on yleensä vain yksi, jolloin missä tahansa verkon kohdassa tapahtuva vika aiheuttaa koko verkkoa koskevan keskeytyksen. Jälleenkytkennät tehdään sähköasemalla sijaitsevalla katkaisijalla, ja vian erottamisessa hyödynnetään usein kauko-ohjattuja erotinasemia.

Kuvan 58 verkossa suojaus poikkeaa olennaisesti suomalaisesta käytännöstä. Amerikkalaisessa järjestelmässä suojaus on huomattavasti hajautetumpi. Koska järjestelmä on monesta pisteestä maadoitettu, myös maasulkusuojaus on hoidettavissa ylivirtasuojilla. Tunnusomaisia kytkinlaitteita ovat recloserit, joiden avulla lähtö jakautuu usean suojausalueeseen. Sectionalizer on puolestaan laite, jolla ei ole vikavirran katkaisukykyä, mutta se lukittuu auki jälleenkytkentöjen lukumäärän perusteella jännitteettömänä aikana. Sectionalizereiden avulla pitkähkön jälleenkytkentäsekvenssin aikana vikaantunut verkon osa erotetaan siten automaattisesti.



Kuva 58. Esimerkki keskijänniteverkon suojauksesta (Herman 2003).

Runkojohdosta erkanevat haarajohdot ovat usein 1- tai 2-vaiheisia ja suojattu sulakkeilla tai sectionalizerilla. Sulaketta käytettäessä haarajohdolla tapahtuvasta viasta aiheutuu runkojohdolle mahdollisesti vain jännitekuoppa. Recloserin ja sulakkeiden koordinaatiossa voidaan harrastaa joko fuse saving tai fuse blowing –politiikkaa. Sulakkeita säästettäessä jälleenkytkentä tehdään nopeasti, jolloin sulake ei ehdi palaa, mutta recloserin jälkeinen verkon osa kokee hetkellisen keskeytyksen. Tällöin recloser suojaa koko sen perässä olevaa verkkoa ohimeneviltä vioilta. Sulaketta polttavalla politiikalla jälleenkytkentä sen sijaan toteutetaan hidastettuna, minkä vuoksi sulake ehtii toimia ennen recloserin toimintaa, ja terve verkon osa kokee vain jännitekuopan. Jälleenkytkennät voidaan toteuttaa myös 1-vaiheisinä.

Jännitettä säädetään yleensä myös johdon varrella jännitteensäätäjien ja kondensaattoreiden avulla. kondensaattoreita käytetään huomattavasti enemmän kuin Euroopassa.

Suomeen amerikkalaisesta mallista voitaisiin soveltaa seuraavia periaatteita:

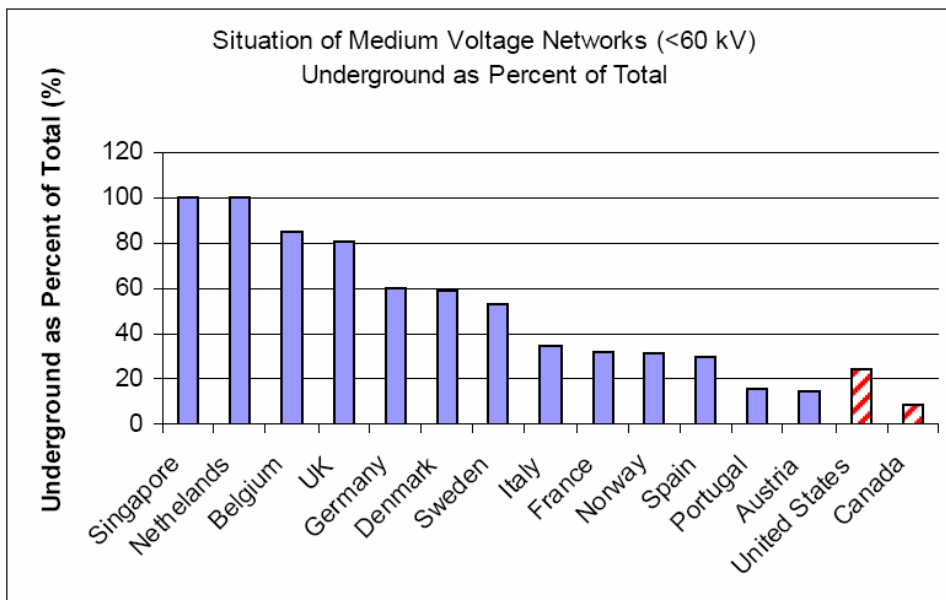
- jälleenkytkennällä – mahdollisesti yksivaiheisella – varustettu välikatkaisija
- haarajohdot pois runkoverkon suojausalueelta, mahdollisia keinoja:
 - o haarajohdon alkuun kevyt katkaisija
 - o haarajohdon alkuun muuntaja, mahdollisesti 20 kV/1 kV
 - o haarajohto DC-tekniikalla (tulevaisuuden mahdollisia ratkaisuja)

- käytännöllisenä ratkaisuna voisi olla myös haarajohdon alkuun sijoitettavat vianilmaisimet ja kauko-ohjattava tai itsenäisesti jännitteettömänä aikana toimiva erotin.
- 1-vaiheinen jakelu voi osoittautua taloudelliseksi tehoelektroniikan kehittyessä.

Hajautetun tuotannon vaikutukset amerikkalaisen käytännön mukaisen maaseutujakelujärjestelmän suojauksen toimintaan ovat samoja kuin suomalaisessa järjestelmässä. Moniportaisessa, usein recloseriin ja haarajohdon sulakkeisiin perustuvassa suojauksessa nousee korostuneesti esille suojalaitteiden keskinäisen koordinaation hankaloituminen, mikä voi ilmetä mm. sulakkeiden tarpeettomana palamisena ja toisaalta katkaisijan sokaistumisena. Ei-toivotun saarekkeen syntyminen on yksi keskeisistä huolenaiheista, samoin tuotantoyksikön ja muuntajan maadoitusratkaisut. Finneyn (Finney et al. 2003) raportin mukaan hajautettuun tuotantoon liittyvä suojaustekniikka on saarekekäytön estosuojausta lukuun ottamatta olemassa.

Hajautetun tuotannon verkkoon liittämisestä on kehitetty IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE 1547-2003. Suuntaajaan perustuvissa liittynöissä sovelletaan UL 1741 –standardia (Standard for Inverters, Converters, and Controllers for Use in Independent Power Systems).

Pohjois-Amerikan verkoille on tunnusomaista voimakas kustannustietoisuus. Yleensä vain kaupunkien ydinkeskustat on kaapeloitu, ja ilmajohtoverkko hallitsee kaupungeissakin. Kuva 59 osoittaa, että Pohjois-Amerikan keskijänniteverkot ovat hyvin ilmajohtovaltaisia. Painetta kaapelointiin on kuitenkin alkanut tulla ennen kaikkea maisemallisista syistä (Abi-Samra 2005).

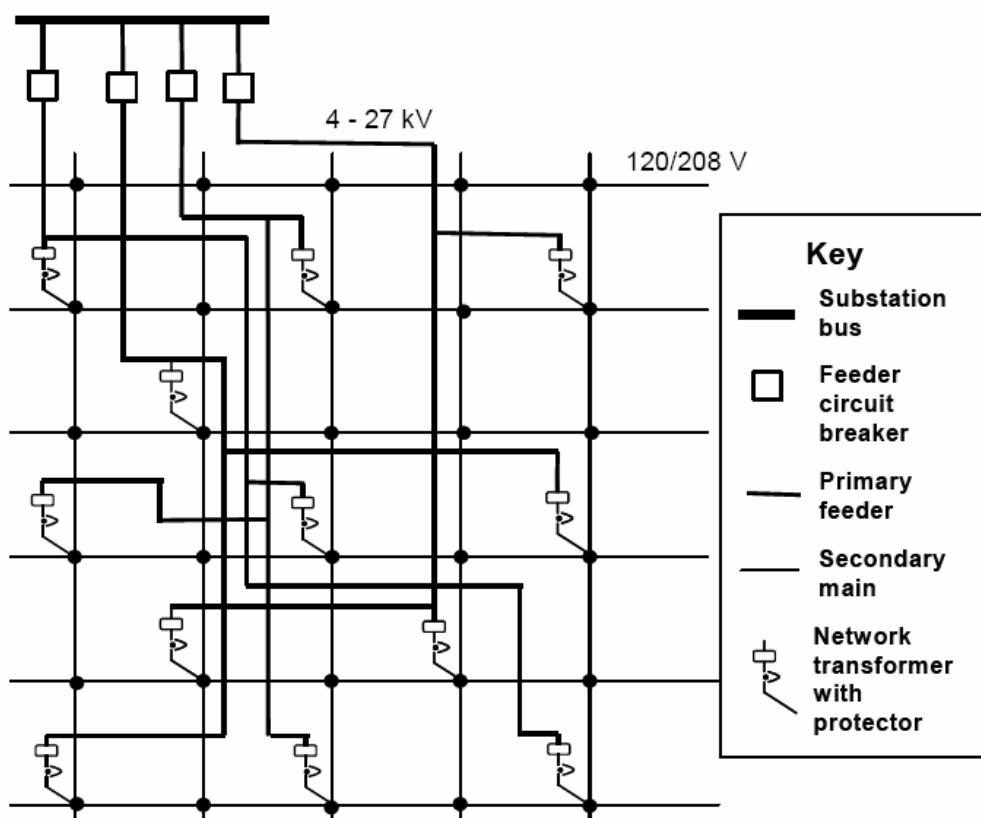


Kuva 59. Eri maiden keskijänniteverkkojen kaapelointiasteen vertailu (Abi-Samra 2005).

8.6.2 Network Distribution System

Network distribution system tarkoittaa suurkaupungeissa käytettävää jakelujärjestelmää, jonka erityisenä piirteenä on se, että yksittäinen verkon vika ei aiheuta asiakkaalla keskeytystä. Muuntajan tai keskijännitelähdön vikaantuessa syöttö jatkuu muita reittejä pitkin. Muuntajat on varustettu ”network protector” –suojalaitteilla, jotka ovat kyseisen keskijännitelähdön katkaisijan kanssa koordinoitusti toimivia katkaisijoita suojausalueineen. Laitteet toimivat samalla takatehoreleen tavoin. Esimerkkikaavio järjestelmästä on esitetty kuvassa 60. (Freeman 2005, Sironi 2006, Herman 2003, Abi-Samra 2005)

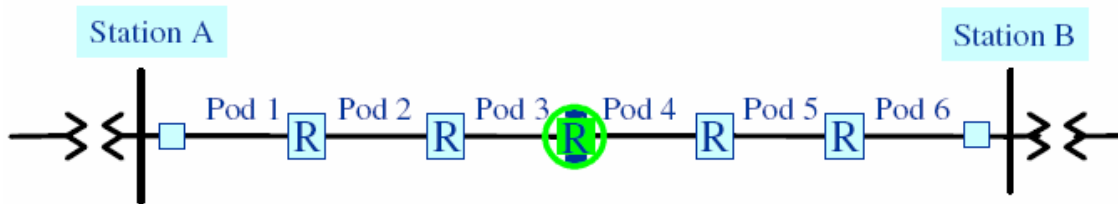
Network-järjestelmän kannalta hajautettu tuotanto on hankala, koska tuotantoyksiköt voivat aiheuttaa network protector –laitteiden toiminnan (takateho) ja johtaa siten saareketilanteeseen. Tämän estämiseksi voi olla tarpeen rajoittaa hajautetun tuotannon pieneksi tai muodostaa tarkoituksellinen saareke (Herman 2003). Network-järjestelmä näyttää siis sopeutuvan huonosti hajautettuun tuotantoon ainakin käytettäessä nykyisiä suojausratkaisuja. Tulevaisuuden mahdollisena ratkaisuna esitetty microgrid-konsepti voi ratkaista tämän ongelman.



Kuva 60. Esimerkkikaavio Network Distribution System –järjestelmästä (Freeman 2005).

8.6.3 Verkostoautomaation kehityksestä

Kuuden sähköyhtiön perustama Distribution Vision 2010 (DV2010) –projekti on kehittänyt verkostoautomaatiota. Yksi perusratkaisuista on esitetty kuvassa 61. Automaatiokonsepti perustuu johdolle hajautettuihin automaattisiin kaksisuuntaisesti toimiviin reclosereihin, joilla vikaantunut verkon osa erotetaan nopeasti ja samalla kytketään terveille verkon osille varasyöttö. Recloserit voivat toimia joko itsenäisesti tai niitä voidaan kauko-ohjata (Huber 2003).



Kuva 61. DV2010-hankkeen verkostoautomaatoratkaisu (Fanning 2005).

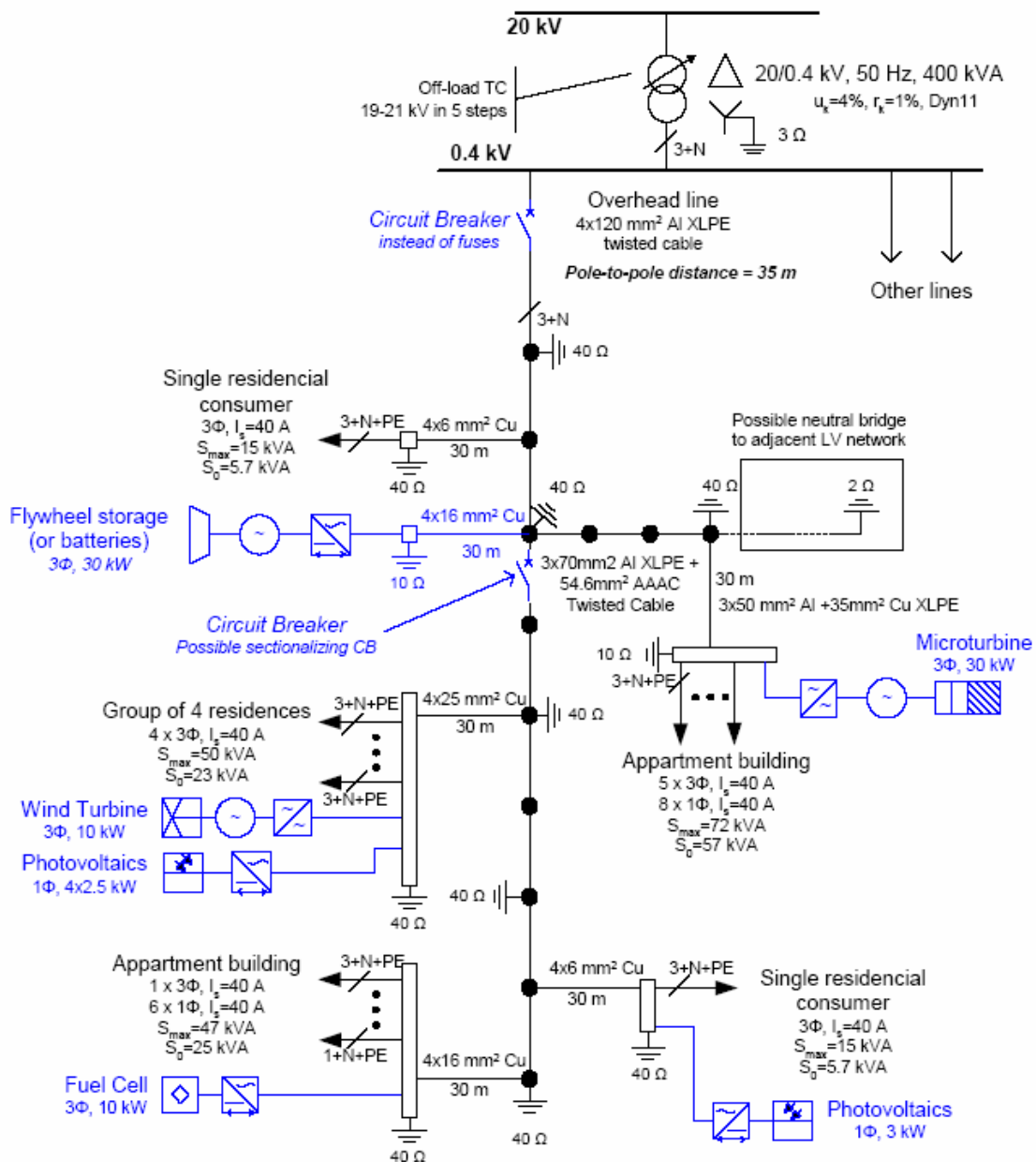
Esimerkki laitetekniikan kehitymisestä on uudenlainen recloser, S&C Electric Companyn IntelliRupter (kuva 62). Integroidun laitteen erityisiin ominaisuuksiin kuuluu molemminpuolisen jännitemittauksen ja laajahkojen suojausominaisuuksien lisäksi toiminto, jossa vikaa vastaan sulkeutumisen sijasta vian jatkumista testataan verkkoon lähetettävällä virtapulssilla. Varsinainen jälleenkytkentä tehdään vain terveeseen verkkoon. Laite voi toimia itsenäisesti tai laajemman verkostoautomaation osana. (S&C Electric Company 2006)



Kuva 62. IntelliRupter® PulseCloser (S&C Electric Company 2006)

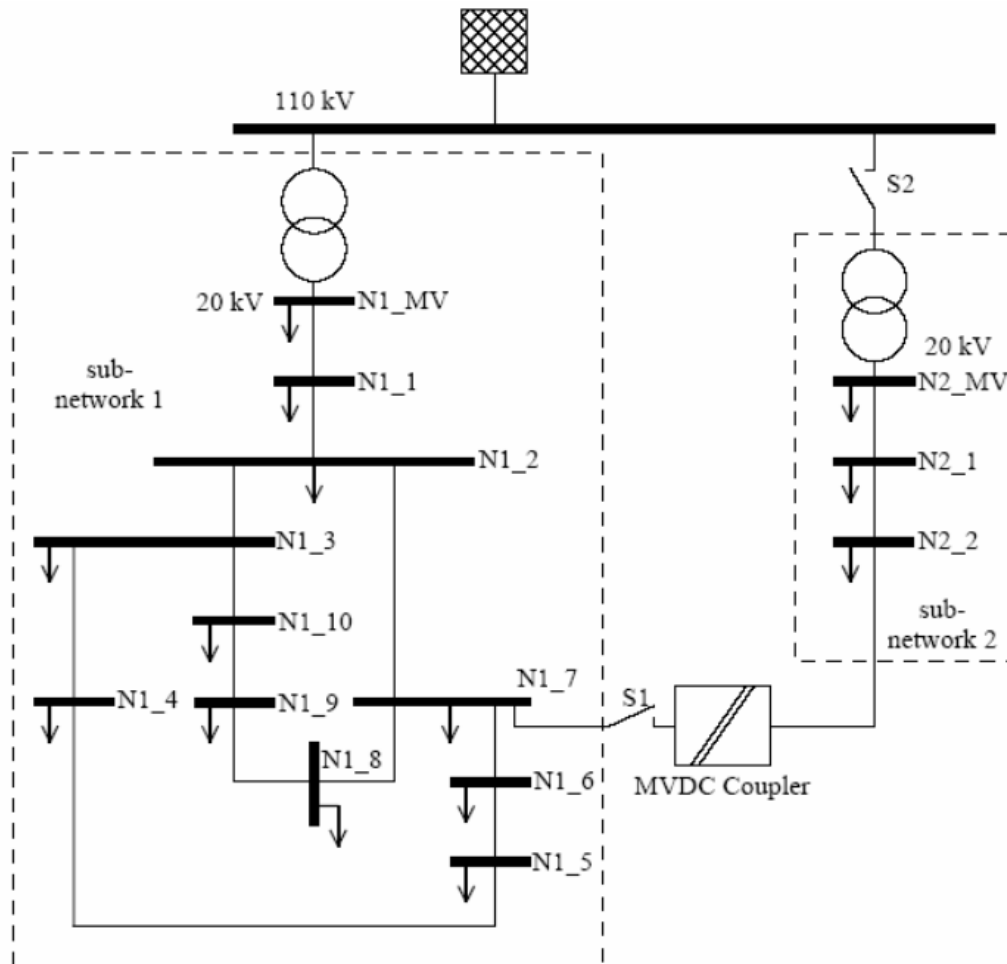
8.7 CIGRE BENCHMARK –VERKKOMALLIT HAJAUTETUN TUOTANNON INTEGROINNIN SUUNNITTELUUN

CIGRE:n Task Force C6.04.02 on kehittänyt benchmark-verkkomalleja hajautetun tuotannon verkko-vaikutusten selvittämistä varten. Pienjänniteverkosta on luotu erikseen normaalin verkon ja microgrid-käyttöön tarkoitetun verkon mallit. Kuvassa 63 on esitetty microgrid-benchmark –malli.



Kuva 63. Microgrid-benchmark -malli pienjänniteverkon tarkasteluun (Papathanassiou et al. 2005).

Samoin on luotu benchmark-malli keskijänniteverkosta. Kuvassa 64 on esitetty saksalaiseen käytäntöön perustuva keskijänniteverkon malli, jossa on sekä taajamaverkkoa että maaseutuverkkoa pääpainon ollessa maaseutumaisessa verkossa.



Kuva 64. CIGRE:n kj-verkon benchmark-malli (Strunz et al. 2005)

CIGRE:n benchmark-mallit ovat lähellä suomalaisia verkkokäytäntöjä, joten niiden mallintaminenkin lienee helpohkoa suomalaisten mallien pohjalta. Malleja voitaneen hyödyntää Suomessa kehitettyjen ratkaisujen toimivuuden osoittamiseen. Standardiverkon mallilla osoitettu toimivuus lienee huomattavasti uskottavampaa kuin muulla verkkomallilla simuloidut tulokset.

9 RATKAISUVAIHTOEHTOJA KESKIJÄNNITEVERKKOJEN SUOJAUKSEEN

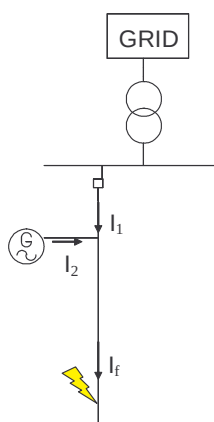
9.1 HAJAUTETUN TUOTANNON MÄÄRÄN RAJOITTAMINEN

Koska ongelmista monet ilmenevät vasta, kun hajautettua tuotantoa on kytketty verkkoon merkittävästi, ongelmat voidaan estää rajoittamalla verkkoon kytkettävän hajautetun tuotannon määrää. Tällaista tarkastelua on käytetty esimerkiksi NREL:n tutkimuksessa (Davis et al. 2003), jossa on mm. selvitetty amerikkalaiseen käytännön mukaiseen verkkoon ongelmitta kytkettävän hajautetun tuotannon määrää.

Tuotannon määrän rajoittaminen tuskin kuitenkaan on käytännössä toteuttamiskelpoinen ajatus, koska yleisesti tähdätään nimenomaan hajautetun tuotannon lisäämiseen ja tasapuolisiin liittymisehtoihin (EU 2001). Ei voitane ajatella, että jokin verkon osa tulisi ikään kuin täyteen hajautettua tuotantoa, koska verkkoja voidaan kehittää ja vahvistaa samaan tapaan kuin nykyään tapahtuu kuormitusten lisääntyessä. EU:n linjausten mukaan verkkoja tulee kehittää siihen suuntaan, että hajautettu tuotanto on niihin helposti integroitavissa.

9.2 SUOJAUKSEN TOIMINNAN VARMISTAMINEN

Suojauksen toiminta voi estyä lähtöreleen näkemän vikavirran pienenemisen seurauksena. Ongelma on mahdollinen erityisesti tilanteessa, jossa lähdön alkuosalle on kytketty tuotantoa, ja vika tapahtuu pitkän johdon loppuosalla (kuva 65). Jos releasettelujen muutoksella ei päästä tyydyttävään tulokseen, ongelma voidaan poistaa seuraavilla ratkaisuilla.



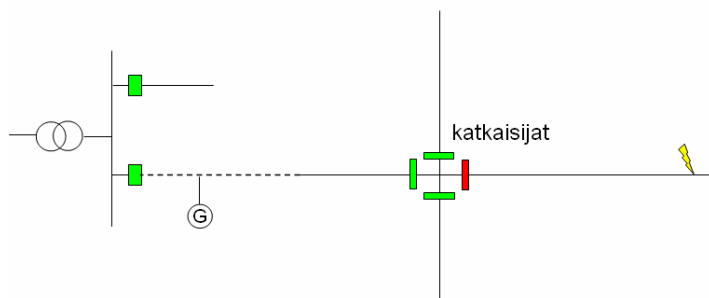
Kuva 65. Releen näkemän vikavirran pieneneminen ja suojauksen toiminnan estyminen.

9.2.1 Aliulottuman poistaminen

9.2.1.1 Välikatkaisija

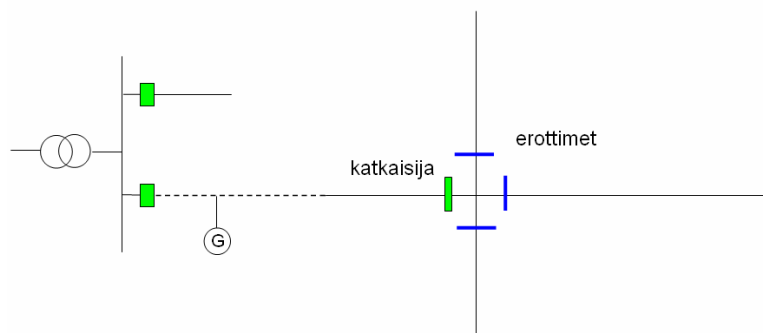
Kun keskiännitejohdolle sijoitetaan välikatkaisija, sähköasemalla sijaitsevan lähtöreleen asettelut voidaan asettaa ulottumaan vain välikatkaisijaan asti. Välikatkaisija on ratkaisuna kallis, mutta se toisi mukanaan myös huomattavia muita etuja suojauksen toiminnan varmistamisen lisäksi. Kevyet recloser-tyyppiset pylväskatkaisijat, joita käytetään laajasti esim. USA:ssa ja Iso-Britanniassa, voisivat korvata erottimia kauko-ohjattavilla erotinasemilla.

Nykyisten kauko-ohjattavien erotinasemien uudistaminen katkaisija-asemiksi on kiinnostava mahdollisuus. Kuva 66 esittää tällaista ratkaisua. Haarajohtojen viat voidaan laukaista syvällä verkossa, minkä ansiosta suurin osa johtolähdön asiakkaista välttää keskeytyksen. Myös pikajälleenkytkentä voitaisiin toteuttaa välikatkaisijalla, mikä vähentäisi merkittävästi asiakkaiden kokemia jälleenkytkentöjä, koska pj-koskisi vain vikaantunutta johtohaaraa. Katkaisija-asema vähentäisi myös kokeilukytkennöistä aiheutuvia verkoston rasituksia.



Kuva 66. Välikatkaisija suojauksen aliulottuman poistajana.

Katkaisija-asema voitaisiin toteuttaa joko pylväskatkaisijoilla tai sisätiloihin sijoitettavilla katkaisijoilla. Tällainen kytkinlaitos sopisi maakaapeliverkon ja ilmajohtoverkon rajakohtaan. Kustannustehokas ratkaisu verkon alkuosan herkkien kuormitusten käyttövarmuuden turvaamiseksi olisi kuvan 67 mukainen ratkaisu, jossa vain yksi kytkemön kytkinlaitteista on katkaisija.



Kuva 67. Yhden katkaisijan kytkemö johdon varrella.

Johdolle sijoitettava katkaisija on myös yksittäisenä laitteena erittäin kiinnostava. Haarajohtojen alkuun sijoitettavien kevyiden katkaisijoiden avulla saataisiin vikojen vaikutusalueet olennaisesti pienemmiksi, erityisesti, jos runkojohto olisi rakennettu käyttövarmalla tekniikalla. Katkaisijaa edullisempi vaihtoehto olisi kauko-ohjattavan erottimen ja vianilmaisimen yhdistelmä, mutta tämä ratkaisu ei ole yhtä tehokas luotettavuuden kannalta. Myös amerikkalaisten käyttämä sectionalizer, joka lukittuu jälleenkytkennän väliaikana auki, on kiinnostava vaihtoehto.

Yksittäisen katkaisijan saaminen taloudellisesti kannattavaksi voi edellyttää yksinkertaistettuja ratkaisuja esimerkiksi mittaustekniikassa ja releen sähkönsyötössä.

9.2.1.2 Muut suojausalueen jakamiskeinot

Aliulottumaan ja ennen kaikkea verkon luotettavuuden paranemiseen johtaisivat myös muut keinot, joilla saadaan keskijännitelähti jaetuksi useampaan suojausalueeseen. Näitä ovat esimerkiksi haarajohtojen rakentaminen 1 kV:n jännitteellä tai muulla jännitteellä. 1 kV:n järjestelmä on jo pilotoitua tekniikkaa, ja sillä on oma käyttöalueensa. Futuristisemmat vaihtoehdot, kuten microgrid tai DC-verkko, edellyttävät vielä kehittelyä.

9.2.2 Suuntaaja liitälaitteena

Kun tuotantoyksikkö liitetään verkkoon suuntaajan välityksellä, vältetään yksikön syöttämiltä suurilta oikosulkuvirroilta. Suoraan verkkoon kytketyt pyörivät generaattorit tuottavat useita kertoja nimellisvirtansa suuruisen oikosulkuvirran, kun taas konverterin välityksellä liitetyt yksiköt tuottavat tyypillisesti enintään nimellisvirtaansa nähden kaksinkertaisen oikosulkuvirran. Tällöin mm. riskit suojauksen toiminnan estymisestä tai suojalaitteen virheellisestä toiminnasta viereisen lähdön viassa jäävät vähäisemmiksi.

Suuntaajaratkaisuun on mahdollista kehittää sähkön laatua parantavia toimintoja (power conditioning) sekä loistehon ja jännitteen säätöä. Vaihtosuuntaaja on luonnollinen ratkaisu myös energiavaraston verkkoon liittämiseksi.

9.2.3 Muut oikosulkuvirran rajoittamiskeinot

Koska suojauksen toiminnan estyminen aiheutuu hajautetun tuotannon syöttämästä oikosulkuvirrasta, hajautetun tuotannon syöttämää oikosulkuvirtaa voidaan pyrkiä rajoittamaan. Generaattorin ja verkon väliin voidaan sijoittaa kuristin tai muuntajan oikosulkuimpedanssi voidaan valita suureksi. Nämä vaihtoehdot ovat tuskin kuitenkaan taloudellisia ja käytännöllisiä

9.2.4 Distanssirele

Releen ulottumaongelmien ratkaisemista on tarkasteltu viitteessä (Chilvers et al. 2003), jossa kuvataan 11 kV verkkoja varten luonnosteltu distanssisuojaukonsepti. Konseptissa distansssireleet on sijoitettu jakelumuuntamoiden yhteyteen (RMU-yksiköt).

Erillistä jännitemuuntajaa ei tarvita vaan jännite mitataan jakelumuuntajan pj-puolelta. Ratkaisu sopii sekä oikosulku- että maasulkusuojaukseen brittiläisessä järjestelmässä.

Jännitesensorit voivat olla parempi ratkaisu jännitteen mittaamiseen, koska tällöin välttyttäisiin jakelumuuntajan ja sen kuormituksen vaihtelun aiheuttaman virheen kompensointiongelmalta. Sensorien käyttö olisi perusteltavissa myös nollajännitteen mittauksella maasulkusuojausta varten distanssin tarvitseman mittaustiedon lisäksi.

Distanssirele ei havaitse maasulkuja maasta erotetussa eikä kompensoidussa verkossa (Mörsky 1993). Tämän vuoksi distanssireleen käytölle suomalaisen keskijänniteverkon suojauksessa lienee vaikea löytää perusteluja, mikäli tavanomaisemmillä suojareleratkaisuilla päästään tyydyttäviin ratkaisuihin.

Saksassa distanssirelettä käytetään avoimen rengasverkon suojana. Käytössä on sekä sähkömekaanisia, analogisia että digitaaliroleit. Distanssireleen käyttöä perustellaan nopeusvaatimuksella (Melzer 2005), mutta porrasajat voivat kuitenkin olla luokkaa 0,4 s, joten voitaneen kysyä, eikö suunnatulla ylivirtareleellä päästäisi vähintään yhtä hyviin tuloksiin.

9.2.5 Yksinkertaistettu suojauksen toiminnan tarkistuslaskenta

Nykyisin suomalaisten verkkoyhtiöiden käytössä olevat verkostolaskentaohjelmat eivät tarjoa tyydyttäviä mahdollisuuksia hajautetun tuotannon vaikutusten selvittämiseen. Vikatilanteiden laskentaa varten tarvitaan uusia ominaisuuksia. Tuotantoyksiköiden mallintaminen on haastava tehtävä.

Ennen laskentaohjelmistojen kehittymistä voitaneen turvautua yksinkertaisempiin menetelmiin. Yksi keino voi olla kaikkien tuotantoyksiköiden mallinnus tahtigeneraattorina, joka on vikavirtavaikutuksiltaan hankalin tuotantotyyppi. Vielä yksinkertaistumpi tapa useiden tuotantoyksiköiden yhteisvaikutusten arviointiin olisi niiden tehojen laskeminen yhteen ja näin saadun tehon suuruisen tahtigeneraattorin sijoittaminen lähdon alkupäähän. Tällöin saataisiin turvallisella puolella oleva tulos suojauksen ulottumaa ajatellen.

9.3 EPÄTAHDISSA TAPAHTUVAN JÄLLEENKYTKENNÄN ESTÄMINEN

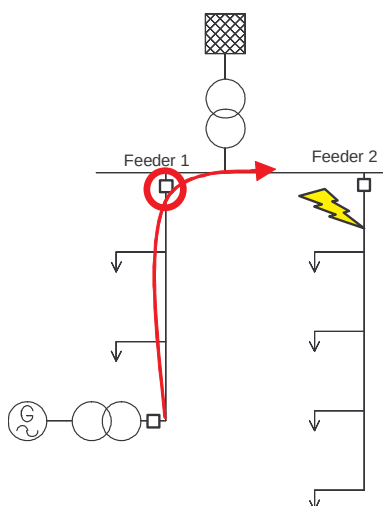
Pikajälleenkytkentää käytettäessä on riski siitä, että tuotantoyksiköt eivät ehdi kytkeytyä irti verkosta jälleenkytkennän väliaikana. Saareketilaan joutunut verkko voi ajautua pois tahdistaa pääverkon kanssa, ja pahimmassa tapauksessa jälleenkytkentä tapahtuu vaiheoppositiossa. Tämä voidaan estää varustamalla katkaisija jännitteisen verkon tunnistuksella ja myös tahtikäynnin tunnistuksella (voltage-check, synchro-check), jotka estävät kytkennän epätahdissa. Tällä menettelyllä olisi kuitenkin huonona puolena se, että se tavallaan antaisi hajautetun tuotannon yksiköille mahdollisuuden jatkaa toimintaansa saarekkeessa ja siten estää jälleenkytkennän onnistumisen. Tämä johtaisi

käyttövarmuuden heikkenemiseen. Kaikkien katkaisijoiden varustaminen näillä toiminnoilla olisi myös kallista.

Jännitteen tunnistus ja tahtikäynnin tunnistus voitaisiin korvata myös älykkäällä jälleenkytkennällä. On mahdollista varustaa suojarеле algoritmeilla, jotka päättävät, onko valokaari sammunut. Tämä mahdollistaa jälleenkytkennän väliajan dynaamisen adaptoitumisen (Hakola 2005).

9.4 SUUNNATTU YLIVIRTARELE VIRHELAUKAISUJEN POISTAJANA

Johdon laukeaminen viereisen johtolähdön viassa (kuva 68) hajautetun tuotannon syöttämän vikavirran vuoksi on estettävissä käyttämällä suunnattua ylivirtarelettä. Toisin kuin jotkut kirjallisuusviitteet antavat ymmärtää, uudet suunnatut releet eivät ole merkittävästi hitaampia kuin suuntaamattomat.



Kuva 68. Lähdön laukeaminen virheellisesti viereisen johtolähdön viassa.

9.5 SIIRTOLAUKAISU TAKASYÖTÖN ESTÄMISEKSI KISKOVIASSA

Kiskovikojen yhteydessä mahdollinen takasyöttö on estettävissä siirtolaukaisulla, jossa syöttökennon laukaisu välitetään kaikille johtolähdöille. Tällainen siirtolaukaisu kiskovioissa estää myös moottorien tuottaman vikavirran takasyötön lähdöiltä kiskostoon.

9.6 EROONKYTKENTÄSUOJAUS

Edellä on esitetty ratkaisuja muutamiin hajautetun tuotannon tuomiin keskijänniteverkon suojaushaasteisiin. Merkittävimmät tarkempaa tarkastelua edellyttävät ongelmat näyttävät kuitenkin kiteytyvät eroonkytkentäsuojaukseen. Toimiva saarekekäytön estosuoja eliminoisi tuotantoyksiköiden tarpeettoman laukeamisen sekä jälleenkytkentöihin ja maasulkusuojauseseen liittyvät ongelmat.

Vaikka eroonkytkentäsuojausta on tutkittu laajasti jo vuosia, saarekekäytön estäminen näyttää säilyvän merkittävänä tutkimusongelmana. Viitteessä (Ye et al. 2004-2) siitä (anti-islanding, AI) todetaan seuraavasti:

AI is still a major concern to utilities based on a recent survey. The top list of concerns includes: 1) anti-islanding, 2) voltage regulation, 3) protection coordination, and 4) power quality. Therefore, islanding is an issue that must be addressed.

Käsitystä asian merkityksellisyydestä tukee myös GE:n raportin (Finney et al. 2003) loppupäätelmä:

With the exception of anti-islanding, the protection elements required for DG are currently available with no major application restrictions. Further research is necessary to develop an anti-islanding scheme that is fast, reliable, and secure for various operating modes and system configurations.

Myös tuore brittiläinen raportti (DTI 2006) korostaa eroonkytkentäsuojauksen merkitystä. Raportin mukaan hajautetun tuotannon yleistyessä kolme tärkeintä asiaa suojaustekniikan kannalta ovat LoM, saarekekäyttö ja suojauksen selektiivisyys.

Eroonkytkentäsuojausta on sen merkityksellisyyden vuoksi tarkasteltu jäljempänä huomattavasti yksityiskohtaisemmin.

9.7 TARKOITUKSELLINEN SAAREKEKÄYTTÖ

9.7.1 Saarekekäytöistä

Saarekekäyttöön pystyvien tuotantoyksiköiden säätö ja suojaus on oma, laaja alueensa, jota tässä selvityksessä käsitellään vain hyvin lyhyesti. Saarekekäyttöä on Suomessa ollut käytössä suurissa teollisuuslaitoksissa sekä katkeamatonta sähkönsyöttöä edellyttävissä kohteissa, kuten sairaaloissa.

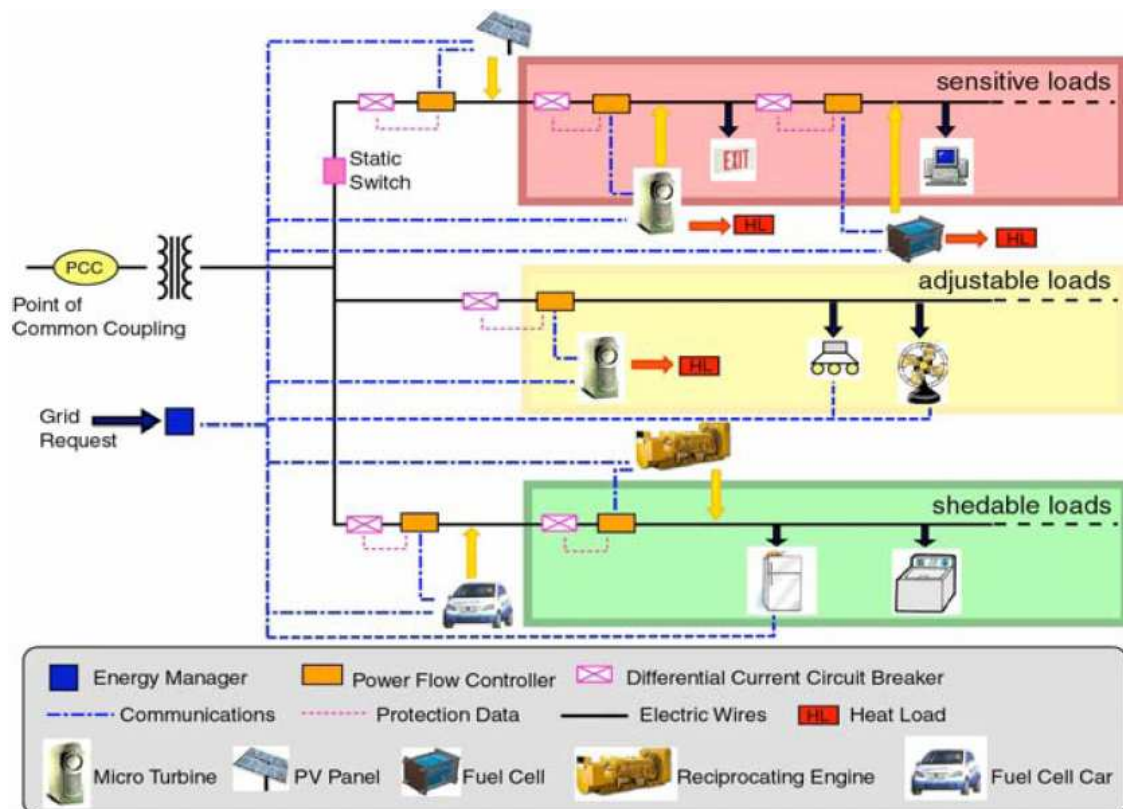
Pienten varavoimakoneiden käyttöä on tutkittu viitteessä (Pihala et al. 1991). Tärkeimpänä suojaustarpeena rinnankäytössä on nähty varavoimalaitoksen erottaminen saarekekäyttöön verkon pika- ja aikajälleenkytkentöjen ajaksi.

Castro-Sayas (Castro-Sayas et. al 2002) luettelee seuraavat tekniset kysymykset, jotka voivat rajoittaa hajautetun tuotannon saarekekäyttöä:

- Saarekekäyttö voi jättää osan verkosta ilman järjestelmän maadoitusta.
- Saarekkeen vikavirtataso voi olla riittämätön, jotta suojalaitteet toimisivat oikein.
- Taajuuden säätö.
- Jännitteen säätö.
- Ylimääräisten suoja- ja kytkinlaitteiden tarve saarekkeen luomisessa ja tasapainon luomisessa.
- Synkronointilaitteiston tarve kytkettäessä saareke takaisin pääverkkoon.

Microgrid-konseptin nimellä on käynnissä huomattava määrä tutkimustoimintaa. Sekä Amerikassa että Euroopassa. EU:n rahoittama MicroGrids-hanke on saanut jatkohankkeen, *More Microgrids*, joka kestää vuoden 2009 loppuun. Hankkeen budjetti on lähes 8 miljoonaa euroa. (Microgrids 2006)

Microgrid-konseptin perusajatuksena on hajautetun tuotannon mahdollistamien itsenäisten saarekkeiden käyttömahdollisuus paikallisen käyttövarmuuden parantamiseksi. Saarekkeissa on useita tuotantoyksiköitä, joita voidaan ohjata keskitetysti. Liityntä pääverkkoon toteutetaan yhdessä pisteessä. Kuvassa 69 on esitetty eräs microgrid-konseptin periaate, ja tämän raportin luvussa 4.7 on esitetty benchmark-malli microgridin tutkimiseen.



Kuva 69. Microgridin periaate (Marnay et al 2004).

Täydellisesti toimiessaan microgrid pystyy irtautumaan katkottomasti saarekkeeksi pääverkon vikaantuessa ja varmistaa microgridin kuormitusten sähkönsaannin. Tämä edellyttää erittäin nopeaa tuotannon ja kulutuksen yhteensovittamista, mikä on haastavaa.

Verkon kannalta mikrogridin tuomiin potentiaaleihin etuihin kuuluvat mahdollisuus keskitetympään eroonkytkentäsuojaukseen sekä keskijänniteverkkoon ulottuvan mikrogridin tapauksessa aliverkon muodostama oma suojausalue, jonka sisällä tapahtuvat viat voidaan hoitaa microgridin sisällä, ilman että pääverkko mainittavasti häiriintyy. Tuotantoyksiköiden näkökulmasta microgrid voi tulevaisuudessa tarjota mahdollisuuden plug & play -tyyppiseen verkkoon liittymiseen ja siten edistää mikroluokan tuotantoyksiköiden yleistymistä.

Britanniassa on esitetty epäilyjä siitä, voiko laajamittainen saarekekäyttö yleistyä lähivuosina. Hyödyt saavutettuihin kustannuksiin nähden voivat jäädä pieniksi, joten mikrogridin mahdollinen käyttöalue jäänee lähivuosina hyvin pieneksi. (Econnect 2001, Castro-Sayas et al. 2002)

Saarekkeen ja verkon välisen suojauksen koordinointi voi olla haasteellista, mutta myös itsenäisen saarekkeen sisäinen sähkötekkinen suojaus lienee haastavaa. Koska saarekkeen vikavirtataso on huomattavasti verkkoon kytkettyä tilannetta pienempi, ellei suuri osa saarekkeen tuotannosta perustu tahtigeneraattoreihin tai erityisesti suurivirtaisiksi suunniteltuihin vaihtosuuntaajiin, perinteinen sulakkeilla toteutettu ylivirtasuojaus tuskin tulee kysymykseen. Sähköturvallisuuden varmistamiseksi voidaan ehkä käyttää laajamittaisesti vikavirtasuojakytkimiä tai alijännitteeseen perustuvaa suojausta. Pecos Lopez (2003) pitää nollajännitteeseen tai differentiaalisuojaukseen perustuvia ratkaisuja lupaavina.

Yksinomaan jännitteeseen perustuvasta suojauksesta on esimerkkinä Audringin (2001) esittämä polttokennon suojaus vain jännitereleen avulla (0,8..1,1 p.u.). Kyseessä ei ole saarekekäyttöön suunniteltu järjestelmä. Vikatilanteessa invertteri syöttää virtaa vikaan, kunnes alijännitesuojaus laukaisee invertterin katkaisijan. Tällainen suojaus on riittämätön, jos jännite ei vikatilanteessa merkittävästi laske, mikä voi tapahtua esimerkiksi muun hajautetun tuotannon ylläpitäessä jännitettä tai keskijänniteverkon puolella tapahtuvassa maasulussa. Toisaalta jännitteeseen perustuva suojaus voi olla epäselektiivinen sen laukaistessa toisilla johtolähdöillä tapahtuvissa vioissa, ellei suojaukseen liitetä selvää aikahidastusta.

Viitteessä (Tran-Quoc et al. 2004-2) on tarkasteltu tarkoituksellista saarekekäyttöä. Siinä esitetään yleisellä tasolla, että saarekkeessa oikosulkusuojaus voi perustua jännitteen ja taajuuden muutosten tarkkailuun. Tarkempaa suojauksen tarkastelua ei kuitenkaan ole esitetty.

9.7.2 Mikrogridin suojauskysymyksiä

Seuraavassa tarkastellaan suojausta mikrogridin sisäisissä vioissa, kun tuotantoyksiköt on liitetty verkkoon suuntaajatekniikan avulla. Tällöin on todennäköistä, että

tuotantoyksikön käyttäytyminen riippuu voimakkaasti suuntaajan tai sovelluksen suunnittelutavoitteista.

Selvää on, että invertterin vikavirransyöttökyky on alle kaksinkertainen nimellisvirrasta, ellei invertteriä ole varta vasten suunniteltu syöttämään suurta vikavirtaa esim. ylimitoittamalla kriittisiä komponentteja. Tämän vuoksi saarekekäytössä vian havaitseminen virran perusteella ei välttämättä ole toimiva ratkaisu. On siis oltava jokin muu kuin vika- ja normaalitilanteen virtojen suhteeseen perustuva menetelmä, jolla microgridin sisäiset viat ja vikatyypit voidaan havaita. Mikäli riittävä vikavirtataso invertteriliitännäisiä tuotantoyksiköitä sisältävässä saarekeverkossa halutaan säilyttää ylimitoittamatta suuntaajien komponentteja, niin yksi vaihtoehto on käyttää vauhtipyörää perustuvaa energiavarastoa (Jayawarna 2005). (Feero et al. 2002)

Lähteessä (Al-Nasser et al. 2005) on esitetty miten invertteriliitännäisistä tuotantoyksiköistä muodostuvan saarekkeen sisäisten vikojen havainnointi ja vikatyypin tunnistus voisi tapahtua tuotantoyksiköiden liityntäpisteessä jännitteen d- ja q-komponenttien avulla.

Saarekekäyttöön siirryttäessä on myös varmistuttava siitä, että saarekeverkon maadoitus on tarkoituksenmukainen. Lähteessä (Jayawarna et al. 2005) päädytty siihen, että TT ja TN-C-S maadoitusjärjestelmät soveltuisivat parhaiten pj-verkosta muodostuvalle microgridille. Saarekkeessa toimittaessa nollajohdin on oltava maadoitettu ainakin yhdestä pisteestä, vaikka paikallista nollajohtimen maadoitusta jokaisen tuotantoyksikön luona ei tarvitakaan.

VTT:n microgrid-tutkimuksessa (Laaksonen 2006) tehtyjen simulointien perusteella voidaan päätellä, että invertterin/taajuusmuuttajan välityksellä verkkoon liitetyn tuotantoyksikön käyttäytymiseen vikatilanteessa vaikuttavat komponenttien mitoituksen ja suojausjärjestelmien lisäksi myös tuotantoyksikön säätöperiaatteet, jotka voivat vaihdella valmistajan tai sovelluskohteen suunnittelutavoitteista yms. johtuen. Jotta suojaus voidaan saada microgridin sisäisissä vioissa aukottomaksi, tulisi invertterien ja taajuudenmuuttajien käyttäytyminen erilaisissa vikatilanteissa olla ennakoitavissa esim. standardien tai muiden säädösten ja ohjeiden avulla.

10 RATKAISUVAIHTOEHTOJA PIENJÄNNITEVERKKOJEN SUOJAUKSEEN

10.1 VÄLISULAKE SUOJAUKSEN TOIMINNAN VARMISTAJANA

Ratkaisuna sulakkeen toiminta-ajan pitenemiseen voidaan käyttää välittömästi generaattorin jälkeen sijoitettavaa välisulaketta. Sen huonona puolena on kuitenkin mahdollinen epäselektiivisyys. Jos sulake on samaa kokoa kuin lähtösulake, se ei ole selektiivinen lähdön sulakkeen kanssa. Jos välisulakkeen koko taas on pienempi, se ei välttämättä kestä kuormitusvirtaa. Pienjänniteverkossa erityinen huomio kiinnittyy suojauksen kustannuksiin. Yksinkertaista sulakesuojausta tuskin lähdetään helposti korvaamaan muilla ratkaisulla. Koska pienjänniteverkossa yhden suojalaitteen takana on yleensä huomattavasti vähemmän asiakkaita kuin keskijänniteverkossa, selektiivisyysvaatimus tuskin on yhtä ehdoton.

10.2 ALIJÄNNITELAUKAISUN AIKA-ASETTELU JA SELEKTIIVINEN EROONKYTKENTÄSUOJAUS

Tuotantoyksikkö voi laueta tarpeettomasti alijännitteestä keskijänniteverkon jännitekuopan aikana. Tarpeettoman alijännitelaukaisun todennäköisyyttä voidaan pienentää tuotantoyksikön alijännitesuojauksen aika-asettelua kasvattamalla. Tällöin on kuitenkin otettava huomioon eroonkytkentäsuojauksen vaatimukset, jotka koskevat myös keskijänniteverkon vikatilanteita. Erityisen haastavaa on suojauksen toiminta keskijänniteverkon maasuluissa. Tarvittaisiin selektiivinen eroonkytkentäsuojaus, joka ei ole riippuvainen jännitteestä tai taajuudesta. Mahdollinen eroonkytkentäsuojauksen konsepti esitellään jäljempänä.

10.3 RELESUOJAUS SULAKKEIDEN SIJASTA

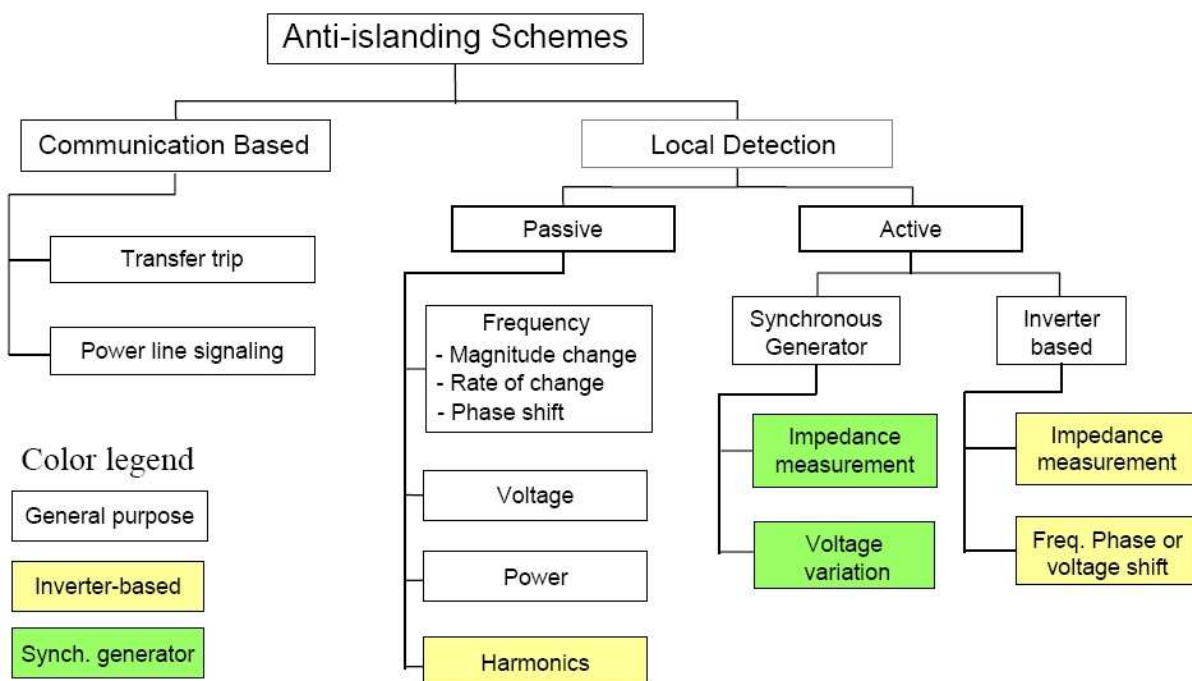
Keskijänniteverkossa suunnattu ylivirtarele estää lähdön tarpeettoman laukaisun viereisen johtolähdön viassa. Jos lähtösulakkeen tarpeeton palaminen, mikä lienee harvinainen ilmiö, halutaan pienjänniteverkoissa estää, voidaan myös pienjänniteverkossa käyttää suunnattua relettä. Siirtyminen sulakesuojauksesta relesuojaukseen aiheuttaisi huomattavia lisäkustannuksia, joita tulee arvioida suhteessa epäselektiivisyysriskin suuruuteen ja vaikutuksiin.

11 SAAREKEKÄYTÖN ESTO

11.1 LOM-SUOJAUSMENETELMIEN JAOTTELU

Edellä on todettu, että eroonkytkentäsuojauksen lienee keskeisin ratkaisematon suojausongelma, joka liittyy hajautettuun tuotantoon. Saareketilanteen estämiseen tarkoitetusta suojauksesta käytetään Euroopassa yleisesti termiä Loss-of-Mains protection (LoM). Amerikassa vakiintuneempi termi on anti-islanding. Suomessa on esitetty nimitystä yksinään syötön estosuojaus (YSE) (Sener 2001), mutta koska tuotantoyksiköitä voi saarekkeessa olla useampia, termit *saarekekäytön estosuojaus* ja *eroonkytkentäsuojauksen* lienevät osuvampia.

LoM-suojausmenetelmät luokitellaan usein passiivisiin, aktiivisiin ja tietoliikennettä hyödyntäviin menetelmiin. Kanadalainen LoM-suojausmenetelmiä varsin laajasti käsittelevä tutkimus (Xu et al. 2004) tekee jaottelun vielä tarkemmin kuvan 70 kaaviossa.



Kuva 70. LoM-suojausmenetelmien luokittelu (Xu et al. 2004).

Passiivisissa menetelmissä suojalaite vain tarkkailee verkosta mitattuja suureita. Aktiivisissa menetelmissä suojalaite sen sijaan tarkastelee järjestelmän vastetta laitteen itse aiheuttamaan muutokseen. Vaste on erilainen verkkoon kytkettynä ja saarekkeessa. Aktiivisessa menetelmässä tuotantoyksikkö esimerkiksi injektioi verkkoon pulssin,

jonka vastetta tarkkailemalla yritetään päätellä, ollaanko kiinni pääverkossa vai saareketilassa. Tällainen aktiivinen menetelmä on monimutkainen passiivisiin menetelmiin verrattuna. Muina aktiivisen menetelmän mahdollisina haittapuolina pidetään sähkön laadun huononemista, sekä useiden tuotantoyksiköiden aktiivisten eroonkytkentäsuojausmenetelmien ei-toivottua keskinäistä vuorovaikutusta.

11.2 KATVEALUE

Merkittävä haaste LoM-suojaukselle on sellaisen saareketilanteen havaitseminen, jonka syntyessä saarekkeen kulutus ja tuotanto ovat sekä pätö- että loistehon suhteen tasapainossa ja jonka syntymiseen ei liity verkon vikaantumista. Tehotasapainotilanteessa erityisesti passiivisten LoM-menetelmien tehokkuus voidaan kyseenalaistaa.

Viitteessä (Ye et al. 2003) on tutkittu eroonkytkentäsuojauksen menetelmien tehokkuutta NDZ-käsitteen (Non Detection Zone) näkökulmasta. Raportissa vedetään mm. seuraavat johtopäätökset:

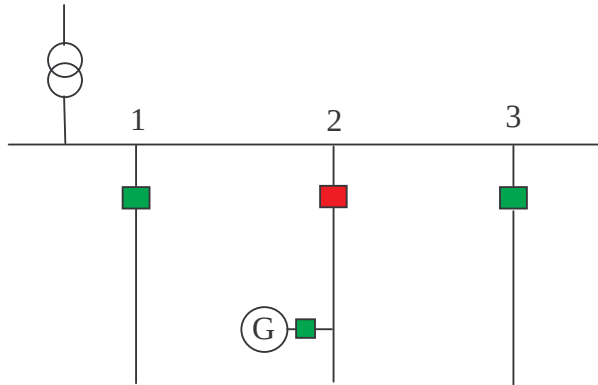
- Kaikki passiiviset menetelmät, jotka perustuvat jännitteen ja taajuuden tai niiden johdannaisten tarkkailuun, voivat pettää.
- Sekä teoreettiset tarkastelut että fysikaaliset koejärjestelyt ovat osoittaneet, että jokaisella yksittäisellä passiivisella menetelmällä on NDZ.
- NDZ:n lisäksi passiivisten menetelmien huono puoli on tuotantoyksiköiden tarpeeton laukaisu.
- Tehonsuuntareleen avulla on saavutettavissa kattava suojaus, mutta tämä suojaustapa rajoittaa hajautetun tuotannon käyttöaluetta.
- Jotkut aktiiviset suojausmenetelmät eivät ehkä toimi, jos hajautettua tuotantoa on useita yksiköitä. Edelleen epäillään, joskaan asiaa ei ole vielä loppuun asti tutkittu, että joillakin aktiivisilla menetelmillä on kielteisiä vaikutuksia verkon dynamiikkaan.
- Vaihtosuuntaajaan perustuvassa hajautetussa tuotannossa olisi parasta käyttää aktiivisia menetelmiä passiivisten sijasta vaihtosuuntaajan dynaamisten ominaisuuksien ja ohjattavuuden vuoksi.

Edellä mainittu tutkimus koskee kuitenkin vain IEEE 1547:ssä mainittua 2 sekunnin vaatimusta saarekekäytön estosuojaukselle. Raportti erityisesti mainitsee, että se ei tarkastele koordinointia jälleenkytkentöjen kanssa. Jälleenkytkennöissä arvellaan tarvittavan joko lisälaitteita tai selvästi nopeampia eroonkytkentäratkaisuja.

Tuotantoyksiköiden valmistajien on usein vaikea ymmärtää eroonkytkentäsuojausvaatimuksia. Johnsonin raportin (2003) mukaan esimerkiksi Cummins Engine pitää IEEE 1547:n 2 sekunnin eroonkytkentäaika vaatimusta epärealistisena ja pitää 10 sekunnin vaatimusta kohtuullisena. Samassa raportissa Offshore Services Ltd. esittää, että teoriassa tuulivoimaloilla ei tarvitsisi olla lainkaan suojareleitä, koska epätahtigeneraattori ei voi toimia ilman verkkoa.

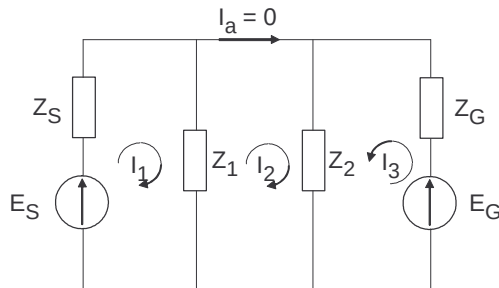
11.3 PASSIIVISTEN MENETELMIEN JA TEHOTASAPAINOTILANTEEN TARKASTELU

Seuraavan tarkastelun tarkoitus on selvittää passiivisten LoM-menetelmien toimintaedellytyksiä tilanteessa, jossa saarekkeen tuotanto ja kulutus ovat tehotasapainossa. Tarkastelun tavoitteita selventää kaavio 71, jossa tarkasteltava saareke muodostuu hajautettua tuotantoa sisältävän keskijännitejohtolähdön laukeamisesta.



Kuva 71. Kaavio tarkasteltavasta saareketilanteesta

Piiristä voi muodostaa kuvan 72 mukaisen ekvivalenttipiirin.



Kuva 72. Verkkorakennetta vastaava ekvivalenttipiiri.

Alaindeksillä S on merkitty taustaverkon suureita. Alaindeksillä G on merkitty hajautetun tuotannon generaattorin suureita. Z_1 vastaa sähköaseman kaikkea kuormaa pois lukien Z_2 . Z_2 vastaa johtolähdön kuormaa, jossa generaattori sijaitsee. Johtolähdöllä 2 vallitsee tehotasapainotilanne, joten taustaverkkoon tai taustaverkosta ei siirry tehoa eli virta I_a on nolla.

Piirille pätee:

$$\begin{bmatrix} Z_1 + Z_S & -Z_1 & 0 \\ -Z_1 & Z_1 + Z_2 & Z_2 \\ 0 & Z_2 & Z_2 + Z_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_S \\ 0 \\ E_G \end{bmatrix} \quad (1)$$

Matriisiyhtälöstä saadaan ratkaistuksi virta I_2

$$I_2 = \frac{\frac{Z_1}{Z_1 + Z_S} E_S - \frac{Z_2}{Z_2 + Z_G} E_G}{Z_1 + Z_2 - \frac{Z_2^2}{Z_2 + Z_G} - \frac{Z_1^2}{Z_1 + Z_S}} \quad (2)$$

Johtolähdölle 2 oletetaan siis täydellinen tehotasapainotilanne, jolloin I_a on nolla. Tästä seuraa, että myös ekvivalenttipiiriä kuvaavassa matriisiyhtälössä virta I_2 on nolla. Tehdään vielä oletus, että verkon ja generaattorin jännitteet ovat yhtä suuria, eli $E_G = E_S$. Tällöin voidaan kirjoittaa

$$\frac{Z_1}{Z_1 + Z_S} E_S = \frac{Z_2}{Z_2 + Z_G} E_G \quad (3)$$

Ratkaistaan Z_1

$$Z_1 = \frac{Z_2 Z_S}{Z_G} \quad (4)$$

Matriisiyhtälöstä saadaan I_3 lausekkeeksi

$$I_3 = \frac{(Z_1 + Z_S)(Z_1 + Z_2)E_G - Z_1 Z_2 E_S - Z_1^2 E_G}{(Z_1 + Z_S)(Z_1 + Z_2)(Z_2 + Z_G) - (Z_1 + Z_S)Z_2^2 - (Z_2 + Z_G)Z_1^2} \quad (5)$$

Johtolähdöllä 2 sijaitsevan generaattorin näkemä admittanssi eli $1/Z$, kun tiedetään, että virta I_2 on nolla ($I_a = 0$)

$$Y = Z^{-1} = \frac{I_3}{E_G} = \frac{(Z_1 + Z_S)(Z_1 + Z_2) - Z_1 Z_2 \frac{E_S}{E_G} - Z_1^2}{(Z_1 + Z_S)(Z_1 + Z_2)(Z_2 + Z_G) - (Z_1 + Z_S)Z_2^2 - (Z_2 + Z_G)Z_1^2} \quad (6)$$

Kun käytetään tehtyä oletusta $E_S = E_G$ sekä tehdään vielä oletus, että $Z_S Z_G \approx 0$ verrattuna impedansseihin Z_1 ja Z_2 (sekä Z_1 että $Z_2 \gg Z_S Z_G$). Sovelletaan edellä esitettyjä oletuksia ja sievennetään lauseketta, saadaan

$$Z^{-1} = \frac{Z_1 Z_S + Z_2 Z_S}{Z_1 Z_2 Z_G + Z_1 Z_2 Z_G} \quad (7)$$

Sijoittamalla saatuun lausekkeeseen Z_1 lauseke, voidaan kirjoittaa

$$Z^{-1} = \frac{\frac{Z_2 Z_S}{Z_G} Z_S + Z_2 Z_S}{\frac{Z_2 Z_S}{Z_G} Z_2 Z_G + \frac{Z_2 Z_S}{Z_G} Z_2 Z_S} = \frac{Z_2 \left(1 + \frac{Z_S}{Z_G}\right)}{Z_2^2 \left(1 + \frac{Z_S}{Z_G}\right)} = \frac{1}{Z_2} \quad (8)$$

Lopputulokseksi saadaan täten

$$Z = Z_2 \quad (9)$$

Tämä tarkoittaa sitä, että generaattorin luona ei havaita verkon impedanssissa muutosta, kun johtolähtö laukeaa saarekkeeksi. Saatu tulos pätee perusaaltotarkasteluille. Tällä perusteella tehoihin, jännitteisiin tai virtoihin tai niiden johdannaisiin perustuvilla passiivisilla LoM-suojausmenetelmillä esiintyy katvealue aina tehotasapainotilanteessa. Aktiivimenetelmillä käytetyt taajuudet poikkeavat tyypillisesti perusaaltotaajuudesta.

11.4 ROCOF- JA VECTOR SHIFT –MENETELMIEN PUUTTEITA

ROCOF-menetelmää (df/dt) on hyvin yleisesti käytetty eroonkytkentäsuojan toimintaehtona ja ROCOF-releitä on pidetty standardiratkaisuna. ROCOF-suojan heikkoutena on pidetty sen aiheuttamia turhia laukaisuja heikoissa verkoissa, joissa taajuus heilahtelee. Jännitevektorin vaihesiirtymä (Vector Shift, voltage vector jump, vector surge) on ROCOF:in lisäksi yleinen eroonkytkentäehto. ROCOF-toiminnon sisältäviä tai vaihesiirtymään toimintansa perustavia releitä on markkinoilla yleisesti saatavana.

Olemassaolevat LoM-tekniikat, kuten ROCOF, eivät pysty kaikissa tilanteissa erottamaan LoM-tapahtumaa muista järjestelmän häiriöistä (Ding et al. 2004) vaan ovat alttiita virhetoiminnoille, erityisesti, kun saarekkeen kuorma ja tuotanto ovat yhtä suuret. Täysin tyydyttävää ratkaisua ei ole onnistuttu kehittämään. Tehotasapainotilanteen (sekä pätö- että loisteho) alueella on usein suojauksen katvealue, non-detection zone (NDZ), jossa em. menetelmät eivät pysty havaitsemaan saarekkeen syntymistä.

Vektorihyppyä eli jännitevektorin vaihesiirtymää tarkkaileva rele on alun perin kehitetty vikojen nopeaan havaitsemiseen, ei niinkään saareketilanteen tunnistamiseen. Sitä pidetään myös erityisen alttiina muualla verkossa tapahtuvista vioista aiheutuville tarpeettomille laukaisuille. Toisaalta myös epäherkkyys pienille muutoksille on todettu sen haittapuoleksi (Salman et al. 1999). Suositeltu asetteluarvo on luokka 6..10 astetta (Econnect 2001). ESB Networks (2003) pitää tyypillisenä asetteluarvona 6 astetta. Vektorihyppymenetelmää on arvioitu ali- ja ylijännite sekä ali- ja ylitaajuussuojauksen ohella viitteessä (Ye et al. 2004-1), joskin lähinnä suuntaajaan perustuvan verkkoonkytkennän näkökulmasta.

Yorkshire Electricity on kieltänyt ROCOF- ja vector shift –menetelmien käytön yli 1 MW:n generaattoreilla. Se vaatii siirtolaukaisun, jos minimikuormitus $< 2 \times$ yhteenlaskettu tuotanto saarekkeessa. Syy tällaiseen vaatimukseen on saatu sekä suojausmenetelmien toimimattomuudesta että virheellisestä yleislaukaisusta. Näkemys perustuu ERA:n tutkimukseen sekä teollisuuden kokemuksiin. Econnectin raportti vahvistaa, että passiivisia menetelmiä käytettäessä ei ole mahdollista täydellisesti erotella saarekkeeksi joutumista muista verkkotilanteista. (Econnect 2001)

Affonso on tutkinut ROCOF-releiden toimintaa dynaamisen simuloinnin avulla (Affonso et al. 2005). Selvityksen kohteena on ollut erityisesti ROCOF-releen tehokkuus ja siihen vaikuttavat tekijät sekä ROCOF-releen turhat laukaisut viereisten lähtöjen vioissa. Tutkimuksen mukaan ROCOF-rele voi menettää tehokkuutensa, jos tehoepätasapaino on pienempi kuin 15 %. Tehokkuuteen vaikuttavista tekijöistä generaattorin suuren inertian on todettu hidastavan releen toimintaa.

Saman tutkimuksen mukaan ROCOF-releet ovat myös hyvin alttiita virheelliselle toiminnalle. Seuraavat järjestelmän ominaisuudet johtavat helpommin tarpeettomiin laukaisuihin: generaattorin suuri kuormitus, pieni oikosulkuvirtataso, lähdön pieni X/R-suhte, generaattorin pieni hitausmomentti, suuri järjestelmän kuormitus ja vikojen hidas laukaisu.

Samaan lopputulokseen samoilla tutkimusmenetelmillä on päätynyt Freitas (Freitas et al. 2005). Tutkimuksesta käy ilmi myös ROCOF –releiden pienempi katvealua (NDZ) verrattuna VS –releisiin, mutta ROCOF –releet ovat samalla herkempiä virhelaukaisuille kuin VS –releet.

Myös Ding toteaa ROCOF-releen ja VS –releen puutteiksi alttiuden virhelaukaisuille sekä tehottomuuden tehoetasapainotilanteessa (Ding et al. 2004). Lisäksi epätahtimoottorikuormat tekevät eroonkytkentäsuojista tehottomia tietyissä tilanteissa. Suuri moottorin inertia yhdessä huomattavan kompensoinnin kanssa on tällainen käytännön tilanne (NREL 2003).

Suojauksen kannalta on merkitystä sillä, miten suuri osuus tuotannosta on hajautettua tuotantoa. Jos hajautettua tuotantoa on vain vähäinen määrä, se voidaan kytkeä vikatilanteessa pois. Jos hajautetun tuotannon osuus on sen sijaan merkittävä, tuotannon irti kytkeminen voi johtaa laajaan häiriöön. Tämä kysymys tulee esille erona siinä, miten siirtoverkko-operaattorit ja jakeluverkko-operaattorit suhtautuvat hajautettuun tuotantoon. Jakeluyhtiöt edellyttävät eroonkytkentäsuojauksia, kun taas siirtoverkkoyhtiöt asettavat esimerkiksi tuulipuistoille järjestelmäteknisiä vaatimuksia mm. toiminnan jatkamisesta verkon vikojen aikana. (Matevosyan 2004). Erilainen näkemys eroonkytkentää vaativien jakeluverkkojen ja ride-through –ominaisuutta edellyttävien siirtoverkkojen välillä on todettu myös viitteessä (Areva 2002), jossa nämä kysymykset tuodaan esille ROCOF- ja vector shift –menetelmien soveltamiseen liittyvien asetteluongelmien yhteydessä.

Itse asiassa näyttää siltä, että näennäinen ristiriita eroonkytkentävaatimuksen ja jännitekuoppasietoisuuden välillä johtuu eroonkytkentäsuojauksen menetelmien

epäselektiivisyydestä. Epäselektiivisten suojausmenetelmien vuoksi tuotantoyksiköt laukeavat tarpeettomasti tilanteissa, joissa niiden ei tulisi kytkeytyä irti.

Toisaalta suuria tuulipuistoja, jotka liitetään siirtoverkkoon, ei voida enää pitää hajautettuna tuotantona, koska hajautettu tuotanto määritellään yleensä nimenomaan jakeluverkkoon liitettäväksi tuotannoksi. Aivan selvää on myös se, että meritulipuistojen siirtoverkkoon liittämisen suojauskysymykset poikkeavat olennaisesti jakeluverkkoon liitettävien pienvoimaloiden aiheuttamista haasteista verkon suojaukselle.

Kuvassa 73 on esitetty Tanskassa tapahtunut tilanne, jossa siirtoverkon 2-vaiheisen oikosulun seurauksen yli 400 MW pienimittakaavaista CHP-tuotantoa (yli 2 MW laitoksia) putosi pois verkosta. Näiden lisäksi verkosta laukesi tuntematon määrä tuulivoimaloita sekä pienempiä CHP-yksiköitä. ROCOF-rele on aiheuttanut Tanskassa paljon tarpeettomia CHP-yksiköiden laukeamisia. (Nielsen 2003). Tapaus ei ole ainutlaatuinen, vastaavankaltaisia laajan alueen tarpeettomia laukaisuja on tapahtunut myöhemminkin.



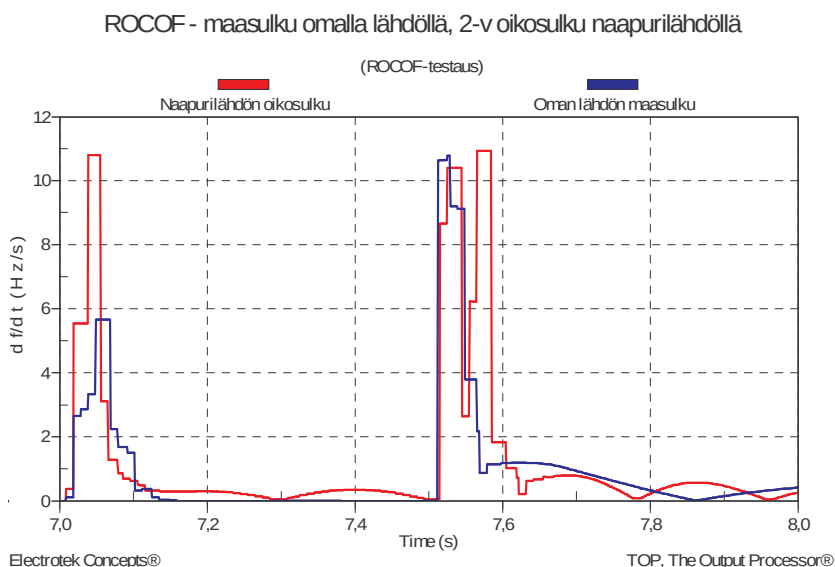
Kuva 73. Yksittäisen vian aiheuttamat yli 2 MW:n CHP-laitosten laukaisut (Nielsen 2003).

Beddoes on tehnyt vertailevaa tutkimusta eri valmistajien LoM-suojien kesken (Beddoes et al. 2005). Yhtenä havaintona oli alttius virhelaukaisuille. Toinen päähavainto oli, että samalla verkkorakenteella, samalla LoM-menetelmällä ja samoilla releasetteluilla, mutta käyttämällä eri valmistajan relettä, järjestelmän käyttäytyminen on hyvin erilaista huolimatta samanlaisesta verkon häiriötilanteesta. Tutkimuksessa kaikille releille on syötetty samoja, todellisten, sähkönlaatumittarilla verkosta mitattujen häiriöiden mukaisia jännitteitä (1~ tai 3~).

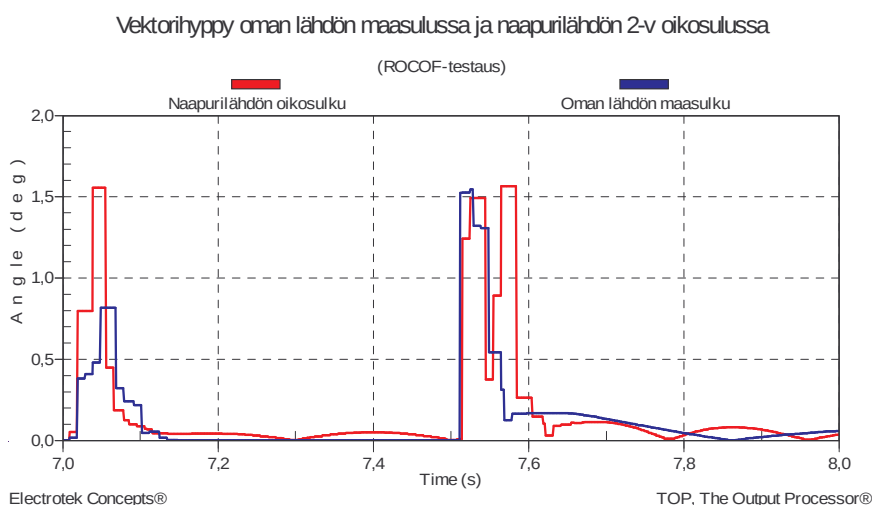
ROCOF-releen alttiutta virhelaukaisuilla voidaan ehkä pienentää esim. THD-lisäehdolla. JA-ehdon käyttäminen edellyttäisi kuitenkin THD-menetelmän tarkkaa tuntemista, jotta THD-ehdon täyttymättömyys ei estäisi suojauksen toimintaa aidossa saareketilanteessa. Särötason tarkkailua LoM-menetelmänä on tarkasteltu jäljempänä.

11.5 ROCOF- JA VECTOR SHIFT -SIMULOINNIT

ROCOF ja VS -releiden toimintaa erilaisissa verkon häiriötilanteissa on tarkasteltu simulointien avulla. Releiden tulisi mm. havaita, onko häiriö omalla vai viereisellä lähdöllä ja välttää virhelaukaisut. Alla olevissa kuvissa (74 ja 75) on havainnollistettu releiden toimintaa kahdessa erilaisessa häiriötilanteessa, joista toinen on viereisellä lähdöllä ja toinen omalla lähdöllä. Vika alkaa hetkellä $t = 7,0$ s ja lähdön suojaus toimii 0,5 sekuntia myöhemmin.



Kuva 74. ROCOF-releen toiminta viereisen lähdön oiko- ja oman lähdön maasulussa.

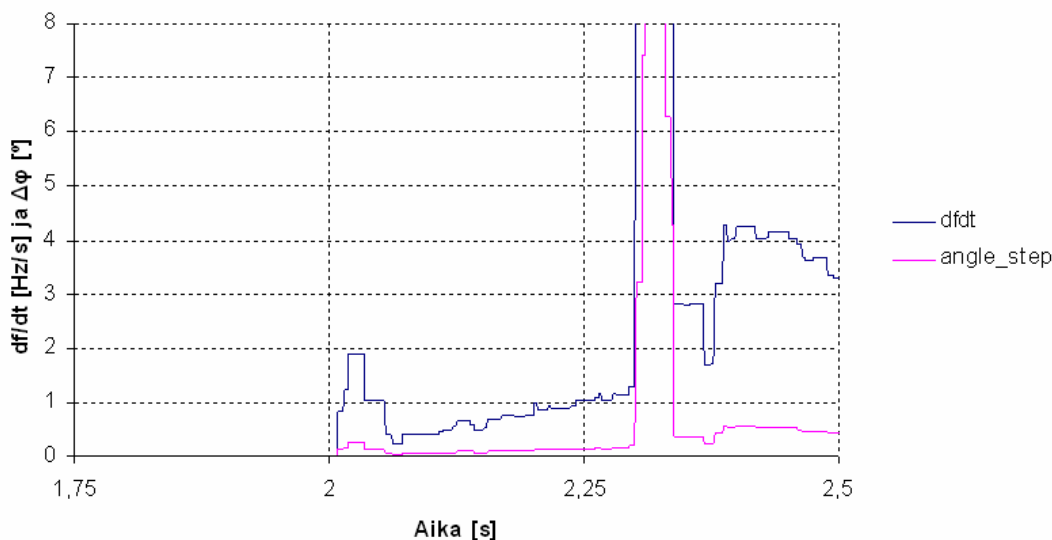


Kuva 75. VS-releen toiminta viereisen lähdön oiko- ja oman lähdön maasulussa.

Kuten kuvista voi havaita, on asetteluiden tekeminen tietyissä tilanteissa vaikeaa, erityistilanteissa jopa mahdotonta, kun suojauksen pitäisi olla riittävän herkkä, mutta kuitenkin tulisi säilyttää suojauksen selektiivisyys ja välttää virhelaukaisut.

Hankaluuksia aiheuttaa myös tehotasapainotilanteen läheisyydessä tapahtuvien saarekkeeksi siirtymisten havaitseminen. Saarekkeeksi siirtymisen yhteydessä ei esiinny välttämättä vikatilannetta. Alla olevat kuvat havainnollistavat kyseistä tilannetta. Kuvan 76 tilanteessa lähdöllä vallitsee lähes pätötehotasapaino (tehoepätasapaino 0,014 pu), mutta loisteho poikkeaa selvästi (0,18 pu). Saarekkeeksi siirryttäessä (hetkellä $t = 2$ s) df/dt raja-arvo (1 Hz/s) ylittyy hetkellisesti ja rele havahtuu, mutta laukaisua ei tapahdu. Taajuus lähtee kasvamaan ja df/dt raja-arvo ylittyy uudelleen ja laukaisu tapahtuu viivästyneenä hetkellä 2,292 s eli 292 ms saarekkeeksi siirtymisen jälkeen (df/dt aikahidastus 50 ms). ROCOF ja jännitevektorin vaihesiirtymä on toteutettu samalla releellä erillisinä toimintoina.

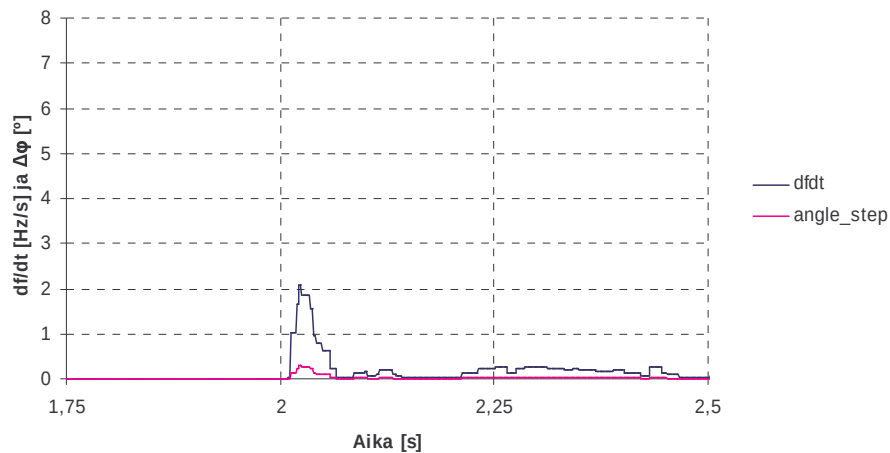
Tehotasapainotilanne (P 1.4% ja Q 18,3%)



Kuva 76. Rocof ja VS –releen mittaamat taajuuden muutosnopeus ja kulmamuuutos saarekkeeksi siirryttäessä (2 s kohdalla), kun lähdöllä vallitsee lähes tehotasapaino.

Affonso (2005) raportoi, että sekä ROCOF- että Vector Shift -menetelmät menettävät tehokkuutensa, mikäli tehoepätasapaino on pienempi kuin 15 % (0,15 pu). Sama menetelmien tehottomuus nähdään kuvan 77 kuvaajista. Lähdöllä vallitsi lähes täydellinen tehotasapaino. Pätötehon epätasapaino oli 2,1 % (0,021 pu) ja loistehon epätasapaino oli -1,8% (-0,018 pu). Saarekkeeksi siirryttäessä (hetkellä $t = 2$ s), df/dt raja-arvo (1 Hz/s) ylittyy hetkellisesti ja rele havahtuu, mutta laukaisua ei tapahdu. Taajuus pysyy tämän jälkeen käytännössä vakiona eikä df/dt -arvossa tai vaihesiirtymässä ole havaittavissa merkittävää muutosta. Rele ei siis havainnut saareketilannetta lainkaan eikä irtilaukaisua tapahtunut. ROCOF ja jännitevektorin vaihesiirtymä on toteutettu samalla releellä erillisinä toimintoina. Saareketilanne havaittaisiin vasta kuormitustilanteen muuttuessa saarekkeessa riittävästi.

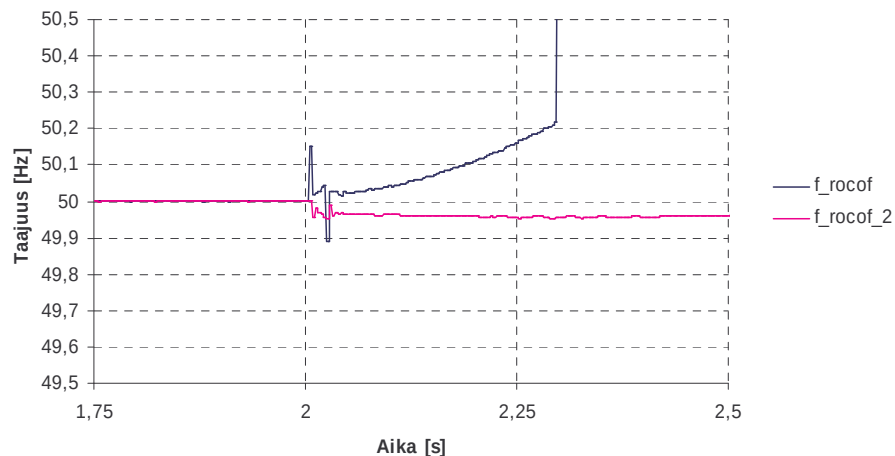
Tehotasapainotilanne (P 2,1% ja Q -1,8%)



Kuva 77. Rocof ja VS –releen mittaamat taajuuden muutosnopeus ja kulmamuuutos saarekkeeksi siirryttäessä (2 s kohdalla), kun lähdöllä vallitsee lähes täydellinen tehotasapaino.

Kuvan 78 simuloinneilla on vertailtu taajuuden käyttäytymistä saarekkeeseen siirryttäessä lähellä loistehotasapainoa ja kauempana siitä. Käyrä f_{rocof} vastaa tilannetta, jossa loistehon suhteen lähdöllä vallitsi 0,183 pu epätasapainotilanne. Käyrä $f_{\text{rocof_2}}$ vastaa tilannetta, jossa loistehon suhteen lähdöllä vallitsi -0,018 pu epätasapainotilanne.

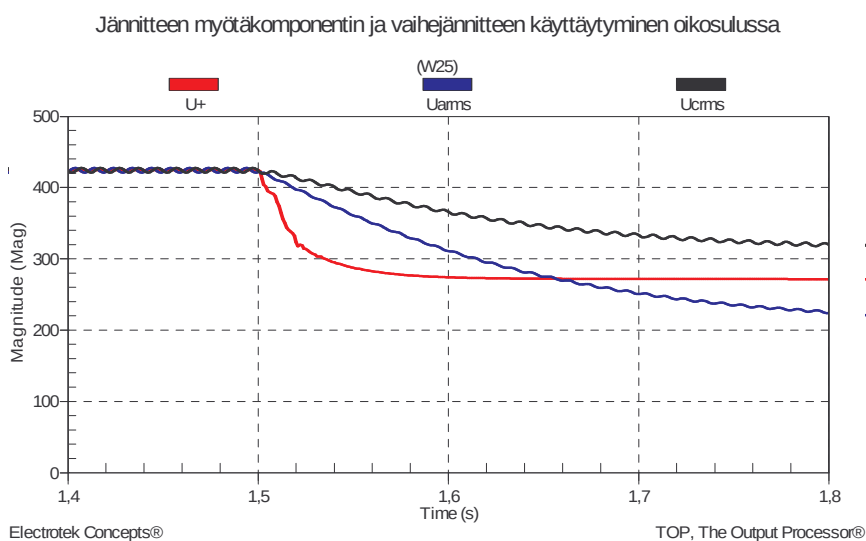
Tehotasapainotilanne



Kuva 78. Taajuuden käyttäytyminen saarekkeeksi siirryttäessä kahdella loistehon arvolla.

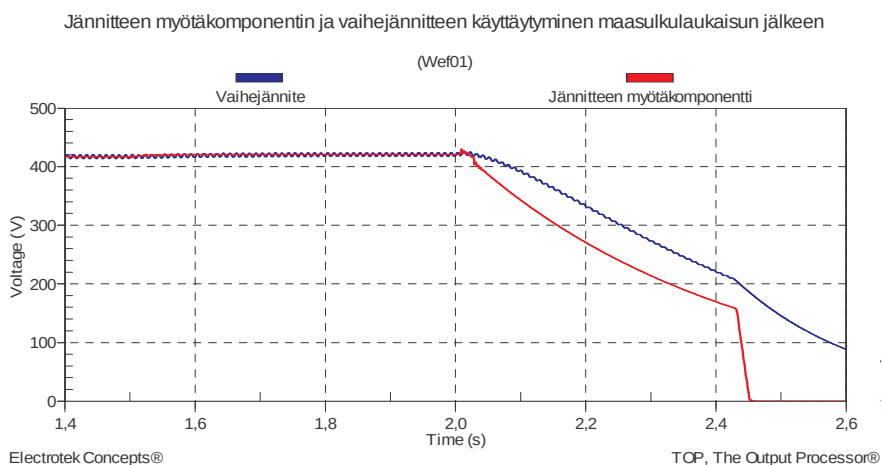
11.6 JÄNNITTEEN MYÖTÄKOMPONENTTIIN PERUSTUVA LOM-SUOJAUS

Tanskassa Eltra pyrkii estämään tahdistamattomat jälleenkytkennät käyttämällä nopeaa jännitteen myötäkomponenttiin perustuvaa suojausta. Laukaisuaika on alle 50 ms. Jännitteen myötäkomponenttiin perustuva suojaus laukaisee yksiköt oikosulkuvioissa jo ennen kuin saareketilanne syntyy, joten se voi laukaista tuotantoyksiköitä myös tarpeettomasti. (Nielsen 2003) Kuvassa 79 on esitetty simuloitu jännitteen myötäkomponentin ja vaihejännitteen käyttäytyminen oikosulussa.



Kuva 79. Jännitteen myötäkomponentin ja kahden vaihejännitteen käyttäytyminen 2-vaiheisessa oikosulussa etäisyydellä 35 km sähköasemalta, jännitemittaus tuulivoimaloiden luona 20 km etäisyydellä.

Maasulussa myötäkomponentin edut eivät ole niin selviä kuten kuvassa 80 esitetyistä simulointituloksista ilmenee.

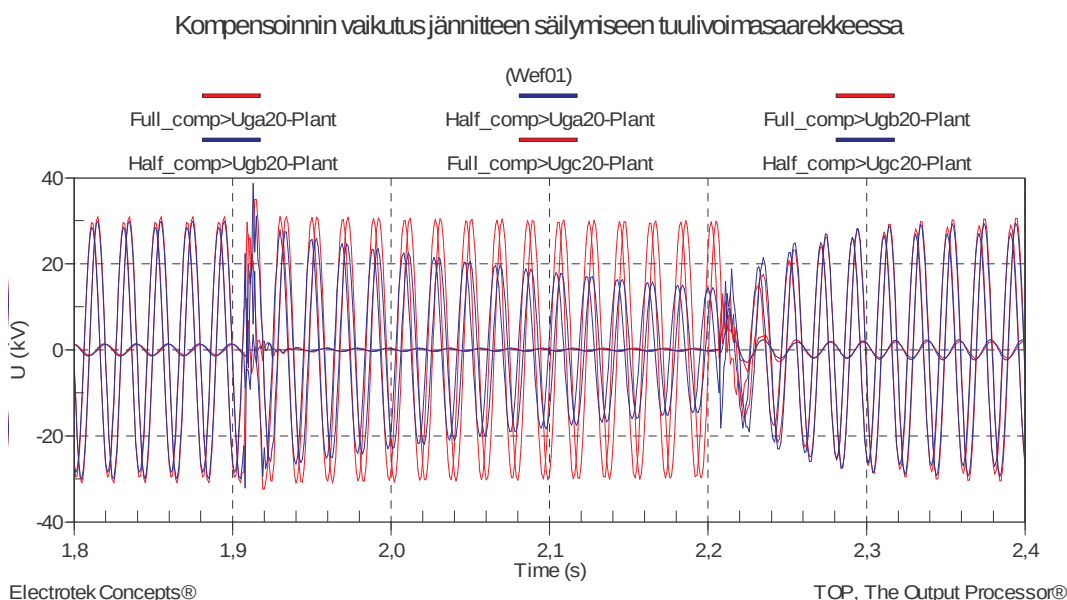


Kuva 80. Vaihejännitteen ja jännitteen myötäkomponentin käyttäytyminen maasulkulaukaisun jälkeen tuulivoimaloiden vaikuttaessa.

11.7 TUULIVOIMALOIDEN ALIKOMPENSOINTI

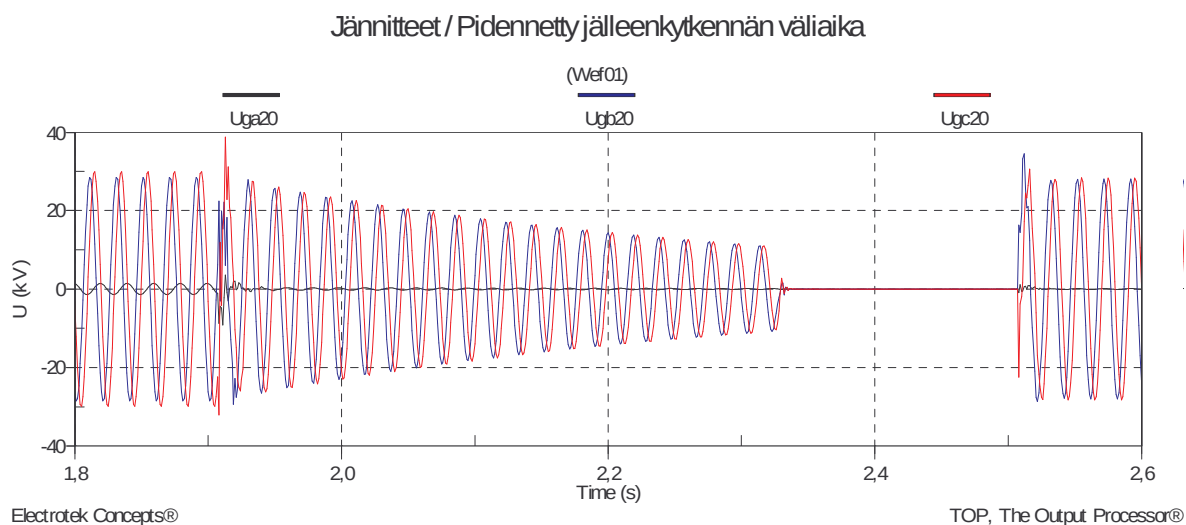
Yksittäisten epätahtigeneraattoripohjaisten tuulivoimaloiden, jotka ovat kyseisen johtolähdön ainoita hajautetun tuotannon yksiköitä, taipumusta jäädä saarekkeeseen voidaan jonkin verran pienentää asettamalla rajoittamalla kompensointi aina alikompensoidulle puolelle. Simuloinnit ovat osoittaneet, että epätahtigeneraattoriin perustuvan tuulivoimalan jännitteen säilyminen riippuu voimakkaasti kompensoinnin suuruudesta.

Kuvassa 81 on esitetty maasulkutilanteen simulointiesimerkki, jossa punaiset jännitekäyrät kuvaavat tuulivoimalan luona vaikuttavia verkon vaihejännitteitä, kun kaikki tuulivoimaloiden kompensointiparistot ovat kytkettyinä, ja siniset käyrät tilannetta, jossa puolet kompensoinnista on kytketty pois. Koska jälleenkytkennän väliaika on simuloinneissa vain 0,3 sekuntia, molemmissa tapauksissa jälleenkytkentä tapahtuu jännitteeseen verkkoon.



Kuva 81. Kompensoinnin vaikutus tuulivoiman ylläpitämään jännitteeseen johtolähdön laukeamisen jälkeen.

Kuvassa 82 on esitetty vastaava simulointitilanne puolella kompensoinnilla, kun samalla jälleenkytkennän väliaika on pidennetty 0,6 sekuntiin. Kompensoinnin pienenemisen ansiosta jännite laskee kohtuullisen nopeasti, ja pidennetty väliaika johtaa tuulivoimaloiden kytkeytymiseen pois verkosta ennen jälleenkytkentää. Yleisestikin väliajan pidentäminen parantaisi jälleenkytkennän onnistumisen todennäköisyyttä.



Kuva 82. Vaihejännitteet maasulun jälleenkytkennän aikana, kun kompensointi on puolitettu ja jälleenkytkennän väliaika pidennetty 0,6 sekuntiin.

11.8 SÄRÖTASON TARKKAILU LOM-MENETELMÄNÄ

11.8.1 Yleistä THD:n tarkkailusta

Jännitteen THD-tasoa tarkkailemalla on teoriassa mahdollista havaita saarekkeeseen siirtyminen, eikä tehotasapainotilanne aiheuta katvealuetta menetelmälle. Joillakin itsekommutoivilla suuntaajilla verkkovirran särö on tyypillisesti alle 2 %, mikä tekee THD-tason tarkkailun näissä tilanteissa tehottomaksi (verkossa särö on tyypillisesti 1 ...2 %). Näin pieniin säröarvoihin ei kylläkään ole mahdollista päästä verkkokommutoivilla suuntaajilla (Stevens et al. 2000). Etenkin edellä mainitussa tilanteessa ja yleisemminkin käyttökelpoisten rajojen löytyminen saattaa olla mahdotonta (Xu et al. 2004, Bower et al. 2002). Kun saarekkeen havaitseminen virheettömästi (ei katvetta eikä virhelaukaisuja) on useissa tilanteissa tai lähes poikkeuksetta mahdotonta passiivisilla THD-pohjaisilla menetelmillä, menetelmät ovat käyttökelvottomia (Jeraputra et al. 2004, Timbus et al. 2004). Yhtenä ratkaisuna ja erikoistapauksena voidaan mainita kytkentätaajuuden tarkkailu, kun liityntälaitteena on PWM-invertteri (Bower et al. 2002).

Haettaessa sopivia rajoja tulee ottaa huomioon, että alarajan on oltava korkeampi kuin verkossa normaalitilanteissa esiintyvä THD-taso, ja ylärajan on oltava alhaisempi kuin saarekkeena oltaessa kahdessa alla esitetyllä mekanismilla syntyen esiintyy. Laitteen verkkovirran THD-tason on oltava määräysten mukaan alle 5 %, mutta laitteet on tyypillisesti suunniteltu jättäen marginaali määräystasoon. Rajojen tulisi olla siis käytännössä alle 5 %, mutta tyypillisesti verkossa esiintyvää tasoa 1...2 % korkeampi. Hankaluuksia aiheuttavat verkossa normaalitilanteissa esiintyvät korkeammat THD-tasot. Näitä aiheuttavat kytkentäilmiöt ja niihin verrattavat ilmiöt (mm. kondensaattori-paristojen kytkennät ja viereisten lähtöjen viat). Verkossa olevat merkittävät epälineaariset kuormat saattavat myös nostaa särötason yli 5 %:n (Xu et al. 2004).

11.8.2 THD-tason muutokset

THD-tason muutokseen on kaksi ensisijaista aiheuttajaa. Ensinnäkin invertteriliitännäisissä laitteissa (joita on merkittävä osa tuotantolaitteista kuten esimerkiksi aurinkokenno, polttokenno, mikroturbiini ja osa tuulivoimaloista) tuotannon liityntälaitte itse. Normaalissa toiminnassa verkon jäykkyys pitää virran särön jännitteelle aiheuttaman särön kurissa (jännitteen THD ≈ 0 , käytännössä 1...2 %). Kun siirrytään saarekkeeseen, Ohmin lain ja superposition perusteella jännitteen THD-taso muuttuu ja poikkeaa normaalitilanteesta (invertterin näkemän verkon impedanssi muuttuu selvästi). Tämä THD-tason muutos havaitaan ja sitä voidaan käyttää LoM-suojan perustana.

Toinen mekanismi särön muodostumisessa on liitännässä käytetty muuntaja. Hajautetun tuotannon syöttämän muuntajan magnetoitumispiirin hystereesi (epälineaarinen kuorma) aiheuttaa jännitteeseen kolmannen yliaallon kasvamisen aina viisinkertaiseksi tai jopa suuremmaksi. Tämä edellyttää, että katkaisija on muuntajan verkon puolella (Bower et al. 2002). Tutkimuksessa on tarkasteltu kuitenkin ilmeisesti ainoastaan tilannetta, jossa katkaisija on välittömästi muuntajan yläpuolelle eikä esimerkiksi sähköasemalla. Muuntajan ollessa kuormittamaton magnetointivirta edustaa muuntajan kokonaisvirtaa ja säröytyy voimakkaasti. Kuormitettuna paria prosenttia edustava kuormituksesta riippumaton magnetointivirta ei saa virtaa merkittävästi säröytymään (Stevens et al. 2000). Samaan kategoriaan kuuluvat myös muut saarekkeessa olevat epäsymmetriset kuormat, kuten esimerkiksi tasa-suuntaajat, jotka kasvattavat kolmatta yliaaltoa saarekkeeksi siirryttäessä (Bower et al. 2002).

Suojauksen kannalta olennaisin tilanne, jossa koko keskijännitelähtö laukeaa saarekkeeksi ja jossa lähdöllä on useita tuotantoyksiköitä, lienee molempien edellä kuvattujen menetelmien kannalta hankalampi.

11.8.3 THD osana monikriteerialgoritmia

THD-tason tarkkailua käytetään myös osana useamman parametrin tarkkailusta koostuvaa ehdotettua menetelmää (Jang et al. 2002, 2004). Tällä pyritään eliminoimaan parametrikohdaisia katvealueita. Jännitteen amplitudiin, vaihekulmaan, taajuuteen sekä virran säröön perustuen on kehitetty menetelmä, jossa ehtolausekkeilla rajataan parametriavaruudesta alue, jossa toimiminen indikoi saareketoimintaa.

Seuraavassa on esitetty neljää parametria käyttävät loogiset ehtolausekkeet.

IF (($V_{rms} < 0,9p.u.$) AND ($\Delta PH > 5^\circ/jakso$) AND ($df/dt > 0,3Hz/s$)) THEN (DG on saarekkeessa)

IF (($V_{rms} > 0,9p.u.$) AND ($\Delta PH < 5^\circ/jakso$) AND ($df/dt < 0,3Hz/s$) AND ($\Delta THD > 75\%/jakso$)) THEN (DG on saarekkeessa)

IF (($V_{rms} < 0,9p.u.$) AND ($\Delta PH > 5^\circ/jakso$) AND ($df/dt < 0,3Hz/s$) AND ($\Delta THD < -100\%/jakso$)) THEN (DG on saarekkeessa)

Jangin (2002) tutkimuksessa testattiin myös normaaleja kuormamuutoksia verkossa, jotka eivät aiheuttaneet virheellisiä laukaisuja. Tuloksia verrattiin perinteisten parametrien tarkkailulla saatavaan tulokseen, jolloin ko. tilanteissa olisi aiheutunut virheellisiä laukaisuja. Tutkimuksessa käytettiin IEEE 34 -testiverkkomallia.

Edellistä menetelmää on jatkokehitetty yksinkertaisempaan suuntaan. Parannetussa versiossa tarkkaillaan jännite-epäsymmetriaa, virran THD-tasoa sekä jännitteen amplitudia (yhden jakson keskiarvo 3~ pääjännitteistä). Virran THD-tason muutoksille saarekkeeksi siirryttäessä ei esitetty perusteluja. Jännite-epäsymmetria on laskettu

$$VU = \frac{V_-}{V_+} * 100$$

Saarekkeeseen siirryttäessä jännite-epäsymmetrian muutoksen uskotaan aiheutuvan verkon topologian ja kuormitusten muutoksista. Tämän uskottavuutta eurooppalaistyyppisissä perusrakenteeltaan symmetrisessä verkossa voitaneen epäillä.

Saareketoimintaa valvovat ehdot on koottu yhteen loogiseen ehtolausekkeeseen.

IF ($V_{rms} < 0,5$ p.u.) THEN (DG on saarekkeessa)

ELSEIF((($\Delta THD > 75\%/jakso$) OR ($\Delta THD < -100\%/jakso$)) AND (($\Delta VU > 50\%/jakso$) OR ($\Delta VU < -100\%/jakso$))) THEN (DG on saarekkeessa)

Ensimmäisellä ehtolausekkeella havaitaan nopeasti suuret muutokset (merkittävät erot tehotasapainotiloissa, kun siirrytään saarekkeeseen) ja laukaisukäsky annetaan välittömästi. Toisella ehtolausekkeella tarkkaillaan pienten muutosten (lähellä tehotasapainoa oltaessa, kun siirrytään saarekkeeseen) vaikutusta suureisiin, ja laukaisukäsky annetaan, mikäli tilanne on jatkunut vähintään kahden jakson ajan. Tässä on päädytty samoihin tuloksiin kuin edellisessä tarkastelussa, mutta nyt on käytetty osittain eri parametreja sekä yksinkertaisempaa loogista ehtolauseketta. Virhelaukaisuja ei simuloinneissa esiintynyt, mutta menetelmällä havaitaan myös tehotasapainon vallitessa tapahtuvat saarekkeeseen siirtymiset.

Tutkimuksessa tarkasteltiin myös 3-vaiheisen epätahtimoottorin sekä kondensaattoripariston kytkemistä verkkoon hajautetun tuotannon läheisyydessä. Symmetrisyytensä ansiosta kytkentätilanne ei aiheuta virhelaukaisua, kuten olisi tilanne perinteisiä menetelmiä käytettäessä. Myöskään yksivaiheisten kuormien verkkoon tai pois verkosta kytkeminen ei aiheuttanut virhelaukaisua, vaikka kuormien suuruus vastasi tehon epätasapainotilannetta. (Jang et al. 2004)

Molemmissa menetelmissä on kyse monikriteerialgoritmista. Kumpikin menetelmä on silti ns. passiivinen menetelmä eli tarkastellaan paikallisia mitattuja verkon parametreja. Epävarmuutta menetelmissä aiheuttaa todellisessa verkossa esiintyvien THD-tasojen suuruus ja siitä aiheutuvien mahdollisten virhelaukaisujen todennäköisyys tai vastavuoroisesti katvealueen suuruus. Myös jälkimmäisen menetelmän edellyttämä suuri epäsymmetrian muutos epäilyttää.

11.8.4 THD-tason tarkkailuun perustuvien menetelmien edut ja heikkoudet

Verkkojännitteen särön tarkkailuun perustuvan menetelmän etu on katvealueen puuttuminen tehotasapainotilanteissa. Heikkoutena voidaan pitää tietyillä verkkorakenteilla, kuormituksilla ja liityntälaiteyhdistelmillä väistämättä eteen tulevia tilanteita, joissa käyttökelpoisia rajoja ei ole löydettävissä. THD-tason tarkkailuun perustuvaa menetelmää ei voida täten pitää aukottomana. Digitaalinen signaalinkäsittely saattaa helpottaa ongelman ratkaisua, kun lisäksi liityntälaitteen valinta ja verkkokatkaisijan sijoittelu on toteutettu THD-tason tarkkailua tukevasti.

Yksi potentiaalinen käyttö THD-tason tarkkailulle voisi löytyä ROCOF –menetelmän tarpeettomien laukaisujen estämisessä. ROCOF –rele voitaisiin ehkä asettaa erittäin herkäksi, jos laukaisun lisäehtona olisi THD-tason muutos. Täysin kattavaksi ja selektiiviseksi suojausta ei kuitenkaan tälläkään yhdistelmällä saada.

11.9 AKTIIVISET MENETELMÄT

11.9.1 Yleistä

GE:n tutkimusraportin mukaan (Finney et al. 2003) aktiiviset menetelmät ovat luonnostaan monimutkaisempia kuin passiiviset menetelmät. Useat niistä on suunniteltu vain invertteripohjaiseen hajautettuun tuotantoon. Muina mahdollisina haittapuolina pidetään sähkön laadun huononemista sekä useiden tuotantoyksiköiden aktiivisten eroonkytkentäsuojausmenetelmien ei-toivottua keskinäistä vuorovaikutusta. Aktiivisia menetelmiä on esitelty tämän tutkimuksen aiemmissa raporteissa.

11.9.2 REED ja verkon oikosulkutehon tarkkailu

Reactive export error detection (REED) on tahtigeneraattoreille soveltuva menetelmä, jossa generaattorin magnetointia säätämällä pidetään generaattorin tuottama loisvirta vakiona, mikä onnistuu vain, jos yhteys pääverkkoon on olemassa. Tämä on luotettava menetelmä, mutta liian hidas, jos pikajälleenkytkentä on käytössä. (O’Kane et al. 1997)

Verkon oikosulkutehon tarkkailua, jossa verkon impedanssi mitataan lähellä jännitteen nollakohta lähetettävän häiriöjännitepiikin vasteen perusteella, on esitetty LoM-menetelmäksi (O’Kane et al. 1997). Se ei kuitenkaan näytä saavuttaneen kaupallista menestystä.

11.9.3 Generaattorin säätömoodin vaihtoon perustuva ratkaisuehdotus

11.9.3.1 Yleistä

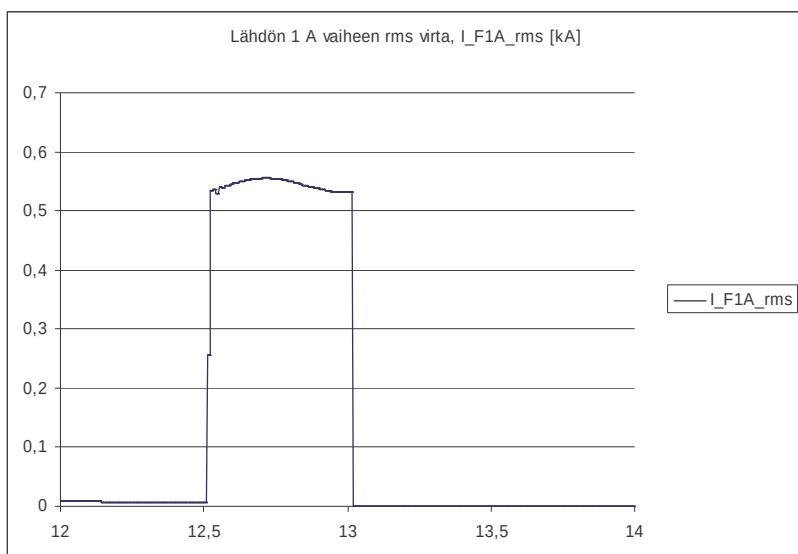
Wärtsilän kokemusten mukaan jonkin tason eroonkytkentäsuojaus on toteutettavissa dieselvoimaloiden vakiotehosäätömenetelmällä. Sen haittapuolena on alttius tarpeettomille laukaisuille (Riihimäki 2004). Kyseistä säätömenetelmää on käytetty tämän tutkimuksen simuloinneissa, eikä pitkäaikaista saareketta olekaan onnistuttu synnyttämään. Pikajälleenkytkentään vaikuttavia tilanteita sen sijaan on simuloitu, ja niissä on todettu, että vakiotehosäätöä ja nopeusrelettä ei voida pitää jälleenkytkennöissä sovellettavana nopeana eroonkytkentäsuojausmenetelmänä. Mikäli jälleenkytkentöjä ei verkossa käytetä, menetelmä voi olla käyttökelpoinen.

Käytännössä vakiotehomenetelmää voitaisiin ehkä soveltaa siten, että esimerkiksi herkkä Vector Shift –rele antaisi voimalalle indikaation siirtyä vakiotehomoodiin, joka nopeasti paljastaisi, onko kyseessä saareketilanne vai muun verkonosan häiriö.

Seuraavassa tarkastellaan simulointien valossa dieselgeneraattorin LoM-suojan toteutusmahdollisuutta hyödyntämällä Vector Shift –relettä säätömoodin muuttajana. Kun VS –rele havaitsee verkossa häiriön, se antaa dieselin säädölle käskyn muuttaa säätöperiaatteen nopeus Droop-moodista ConstPQ (vakio pätö- ja loistehosäätö) periaatteeksi. ConstPQ-säädöllä diesel ajautuu nopeasti suojalaitteiden havaitsemaan epänormaaliin käyttötilanteeseen, kun toimitaan saarekkeessa, jossa vallitsee tehon epätasapainotilanne. Seuraavat tarkastelut on tehty noin 10 % epätasapainotilanteen vallitessa (pätötehon osalta). Simuloinnit on tehty maasta erotetun keskijänniteavojohtoverkon mallilla ja 7,95 MVA dieselgeneraattorin mallilla.

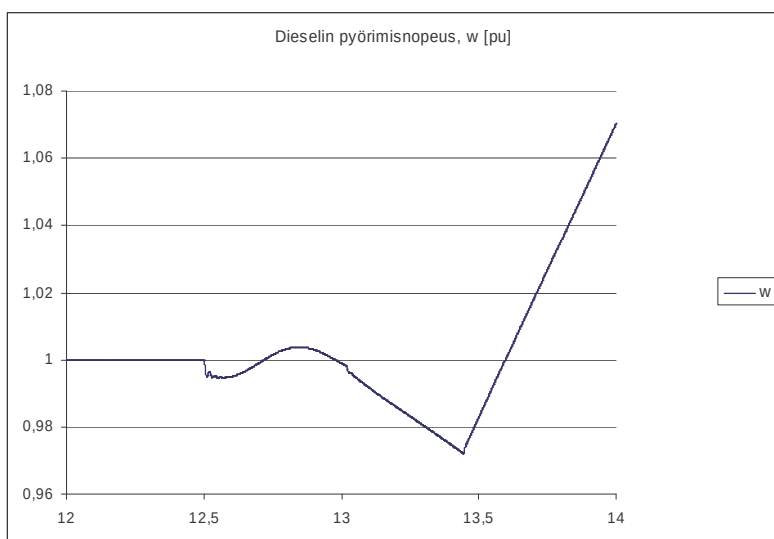
11.9.3.2 Simulointitestaus kolmivaiheisessa oikosulussa omalla lähdöllä

Kuvassa 83 on esitetty lähdön 1 alusta mitattu vaihevirta ennen vikaa ja vian aikana. Ennen vian syntymistä lähtö on lähellä tehotasapainoa. Kolmivaiheinen oikosulku etäisyydellä 35 km sähköasemalta syntyy hetkellä $t = 12,5$ s ja lähdön katkaisija laukeaa hetkellä $t = 13,018$ s.



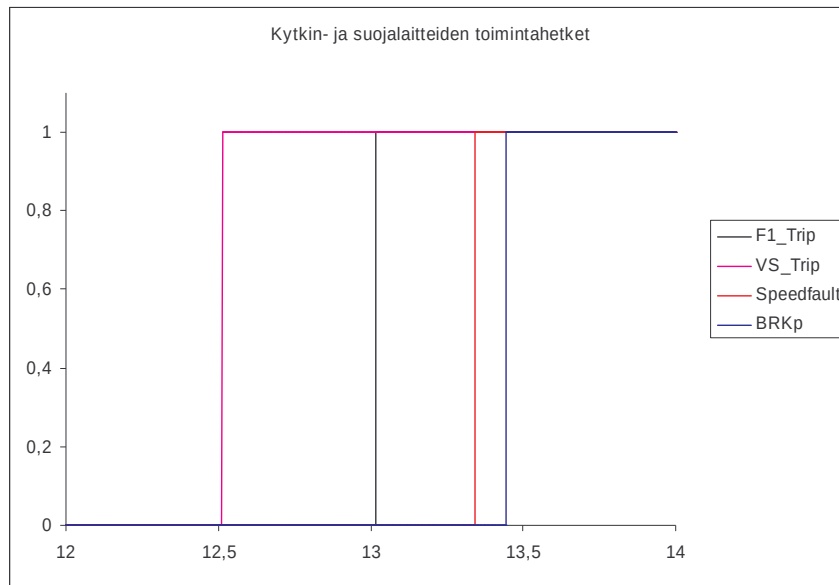
Kuva 83. Lähdön virran käyttäytyminen vikatilanteessa.

Kuvassa 84 on esitetty samassa tilanteessa simuloitu dieselin pyörimisnopeuden käyttäytyminen.



Kuva 84. Dieselin pyörimisnopeuden käyttäytyminen vikatilanteen jälkeen. Vian alku $t = 12,5$ s, diesel jää saarekkeeseen lähdön 1 suojalaitteiden toimiessa $t = 13,018$ s ja voimalan kytkeytyminen irti verkosta generaattorisuojien toimiessa $t = 13,444$ s.

Kuvaan 85 on koottu kytkin- ja suojalaitteiden toimintahetket.



Kuva 85. Kytkein- ja suojalaitteiden havahtumis- ja toimintahetkiä vikatilanteen jälkeen.

VS_Trip: $t = 12,513$ s, Vector Shift -rele havaitsee häiriön (asetteluarvot: $\phi = 6^\circ$ ja $t > 0,0$ s) verkossa ja antaa signaalin säätömoodin muuttamiseksi nopeusdroopista constPQ-säädöksi.

F1_Trip: $t = 13,018$ s, lähtö 1 kytetään irti verkosta ja diesel jää saarekkeeseen (ylivirtareleen asetteluarvot: $I > 0,35\text{kA}$ ja $t > 0,5\text{s}$).

Speedfault: $t = 13,344$ s, dieselin nopeusvahti havahtuu, nimellinen pyörimisnopeus on 500min^{-1} , (nopeusvahdin asetteluarvot: $\omega = \pm 10\text{min}^{-1}$ ja $t > 0,1\text{s}$).

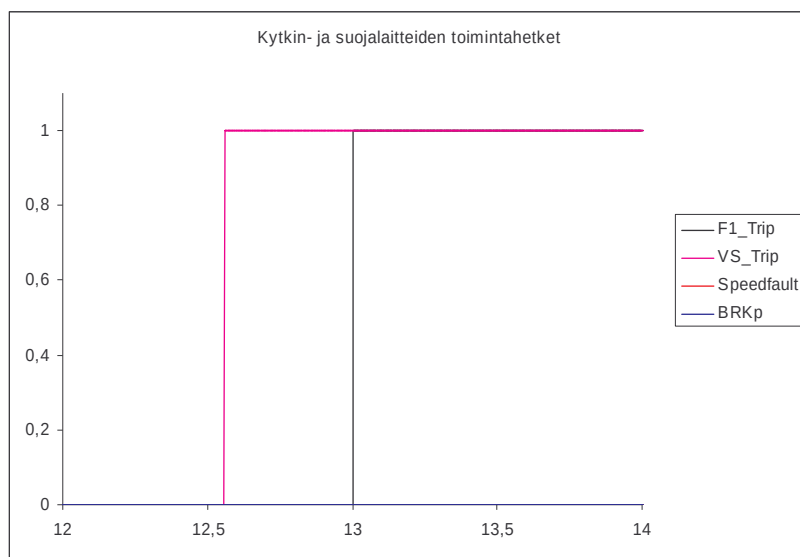
BRKp: $t = 13,444$ s, dieselin generaattorisuoja kytkee voimalan irti verkosta nopeusvahdilta tulevan ohjauksen johdosta.

Lähdön jäätyä saareketilaan voimala kytetään irti verkosta 0,426 s kuluttua. Nopeusvahti havahtuu 0,326 s kuluttua, nopeusvahdissa on 0,100 s aikahidastus. Näillä asetteluilla ei saavuteta riittävää toimintanopeutta, jos pj:n jännitteetön väliaika on tyypillinen suomalainen arvo 0,4 s.

Vastaavan tilanteen simuloinnissa ilman Vector Shift -releen laukaisemaa generaattorin säätömoodin vaihtoa generaattori jäi droop-säädöllä toimimaan saarekkeessa.

11.9.3.3 Simulointitestaus 1-vaiheisessa maasulussa omalla lähdöllä

Moodinvaihtosimulointi oman lähdön maasulkutilanteessa tuotti kuvan 86 mukaiset simulointitulokset. Vika alkaa hetkellä $t = 12,5$ s, ja Vector Shift -rele antaa nopeasti moodinvaihtokäskyn generaattorille. Lähdön laukeamisesta huolimatta generaattori jatkaa toimintaansa.



Kuva 86. Kytkin- ja suojalaitteiden havahtumis- ja toimintahetkiä vikatilanteen jälkeen.

Yllä esitetyt simuloinnit vahvistava käsitystä, jonka mukaan moodinvaihtomenetelmällä ei saavuteta riittävää toimintanopeutta, jos pikajälleenkytkentä on käytössä. Jos pjkt:ta ei käytetä, menetelmä saattaa olla käyttökelpoinen.

11.10 MOOTTOREIDEN VAIKUTUS LOM –SUOJAUKSEEN

Kirjallisuudessa on esitetty tarkasteluja, joissa käsitellään oikosulkumoottorin vaikutusta inverttereiden LoM-suojaukseen. Epätahtimoottori ei voi toimia generaattorina, ellei jättämä ole negatiivinen. Jos verkossa on 60 Hz:n taajuus ja moottorin jättämä on 0,05 (5 %), moottori muuttuu generaattoriksi 57 Hz:n taajuudella. Ennen kuin taajuus laskisi näin alas, inverttereiden alitaajuussuojaus toimisi, mistä seuraa, että epätahtikone ei voi aiheuttaa saareketilan pitkittymistä (pitempää jälkikäyntiä) hajautetun tuotannon vaikutuksesta. Tästä syystä on katsottu, että LoM-suojauksen testipiireissä ei tarvita moottoreita, RLC-komponentit riittävät. (Ropp et al. 2002)

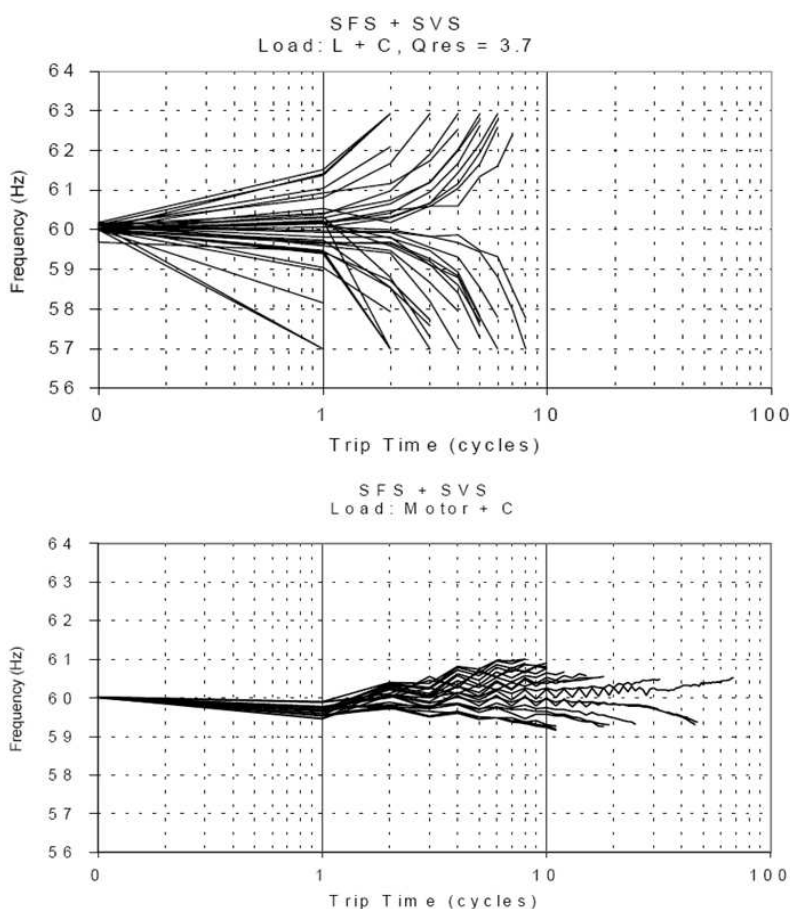
Argumentteina on käytetty myös parametrien vaihtelevuutta moottorikuorman ollessa mukana testipiireissä. Erot käytetyissä materiaaleissa, käämityksen toteutus, laakerien laatu ja kunto sekä inertia vaikuttavat kaikki moottorin ominaisuuksiin ja siten myös vaikeuttavat testin selkeää määriteltävyyttä ja toistettavuutta. Parametrien vaihtelevuuden vaikutuksen suuruudesta ei ole kuitenkaan esitetty. Lisäksi moottoreiden vaikutusta pidetään niin pienenä, että sen sisällyttämistä testikuormaan ei pidetä tarpeellisenä. (Bower et al. 2002)

Päinvastaista esittää mm. Igarashi (Igarashi et al. 2005), jonka mukaan moottori voi aiheuttaa saareketilanteen estosuojauksen pettämisen.

Tarkastelemalla tilannetta, jossa moottorin jättämä on oletetusti 5 %, saarekkeeeksi siirtyminen vaikuttaa tehotasapainoon tilanteessa, jossa taajuus putoaa. Tällöin

moottorin kuormitustilannetta ja pyörimisnopeutta vastaavan taajuuden ja saarekkeessa olevan verkon taajuuden erotus laskee jättämätaajuuden alle, jolla moottori toimi ennen saareketta. Tämä pienentää moottorikuormaa saarekkeen alkuhetkinä, jolloin varsinkin suuren inertian omaavien moottorikäyttöjen pyörimisnopeuden voidaan olettaa pysyvän lähes vakiona ja saareketilannetta edeltäneellä tasolla saarekkeen alkuhetkinä. Tehotasapaino muuttuu siis suojauksen kannalta epäedullisempaan suuntaan ja saattaa pahimmassa tilanteessa muuttaa tehotasapainon sen kriittisen rajan yli, jolla saarekkeen havaitseminen passiivisilla menetelmillä on luotettavasti mahdollista.

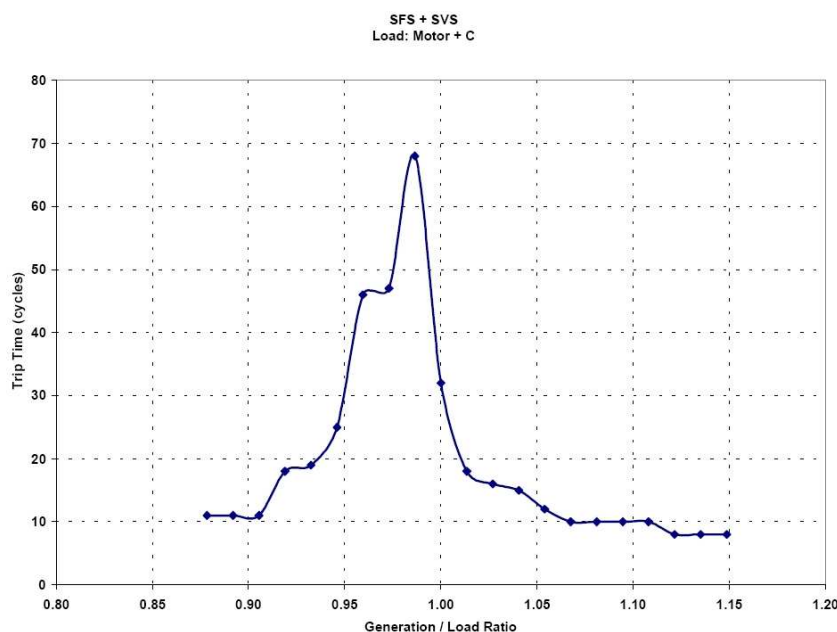
Tukea edellä esitetylle antaa tutkimus, jossa invertterin kautta verkkoon kytketyn tuotantolaitoksen kuormana oli erilaisia kombinaatioita RLC-kuormasta sekä epätahtimoottori yhdessä kondensaattorin kanssa (asetettu $\cos\phi = 1$). Kuormitusaste vaihteli välillä 0,88 ... 1,15 (tuotanto/kulutus –suhde). Testeissä moottoreiden vaikutus tuli selvästi esille. Näissä Sandia-laboratorioiden testeissä (Stevens et al. 2000) tutkittiin ensisijassa inverttereitä varten kehitettyjen aktiivisten LoM-suojausmenetelmien toimivuutta (Sandia Voltage Shift, Sandia Frequency Shift). Suojien teho heikkeni olennaisesti, kun testikuormaan sisältyi moottori pelkän RLC-kuorman sijasta. RLC-kuorman resistanssina testeissä oli ainoastaan kuristimen vastus. Tuloksia on esitetty kuvassa 87.



Kuva 87. Taajuuteen perustuva laukaisuaika verkkojaksoina, kun kuormana on LC – piiri ja toisaalta epätahtimoottori ja kondensaattori. (Stevens et al. 2000)

Kuvista havaitaan, että testattujen menetelmien laukaisuaajat pitenivät olennaisesti, kun kuormitukseen sisältyi moottori. Kun menetelmät toimivat normaalisti alle 10 jakson aikana, moottorin vaikutuksesta toiminta-aika piteni jopa 70 jaksoon, kun kuormitus ja tuotanto olivat lähellä tasapainoa. Jännitteeseen perustuvan aktiivisen menetelmän (SVS) testitulokset olivat lähes identtisiä taajuuteen perustuvan menetelmän kanssa.

Moottoreiden eroonkytkentäaika pidentävä vaikutus ilmenee myös kuvassa 88 esitetyistä testituloksista. Stevensin raportissa (2000) on kuitenkin yllättävästi väitetty, ettei moottorin tai vauhtipyörän lisääminen yleensä vaikeuttanut testeissä saareketilanteen havaitsemista RLC-kuormaan verrattuna.



Kuva 88. Laukaisuaika tuotanto/kulutus –suhteen funktiona, kun inverttereiden kuormituksena oli epätahtimoottori ja kondensaattori. (Stevens et al. 2000)

Jos toisaalta tarkastellaan suuruusluokaltaan 250 kW:n moottoreita, on nimellisjättämä joidenkin moottoreiden tapauksessa vain 0,0053 (0,53 %). Tällöin jättämää vastaava taajuus on 49,73 Hz (50 Hz verkossa). Tilanne muuttuu vielä hankalammaksi, jos moottori toimii saarekkeeksi siirtymisen hetkenä tyhjäkäynnissä, jolloin jättämä $s \approx 0$ eli moottorilla on mahdollisuus muuttua generaattoriksi jo lähes nimellistaajuudella (myös muiden ehtojen on täyttyttävä). Tällöin moottorikuormalla on edellytyksiä ylläpitää tai tukea jännitettä saareketilanteen alkuhetkillä ja näin pitkittää hajautetun tuotannon kytkeytymistä pois verkosta. Kuormituksen suhteen hankalin tilanne on silloin, kun toimitaan lähellä tehotasapainoa kuorman ollessa hiukan tuotantoa suurempi (kuormitusaste luokkaa 0,95...0,99 saarekkeessa, tuotanto/kulutus –suhde). Kuormitusaste on tällöin ennen saarekkeeksi siirtymistä moottorin kuorman verran suurempi. Tällöin taajuus laskee melko hitaasti, jolloin taajuussuojan rajataajuus saavutetaan myöhään sekä generaattoriksi muuttuneen moottorin tukema jännite pysyy jännitesuojan rajajännitteen yläpuolella kauemmin. Myös ROCOF- sekä vector shift -tyyppisille LoM –suojille tasapainotilan vallitessa tapahtuvat saarekkeeksi siirtymiset ovat vaikeita havaita.

Jännitteen alenemisen nopeus riippuu moottorin koosta ja moottorin ja kuormituksen kokonaisineriasta siten, että mitä suurempi inertia, sitä pitempään jännite säilyy. (Higgins et al 1990, Kumpulainen et al. 2002, Coyle 2004)

Invertteripohjaisen tuotannon LoM-suojausta varsin laajasti tarkastelleen Yen (Ye et al 2004) mukaan RLC-kuorma, vaikka se onkin otettu standardien testikuormaksi, ei vastaa todellisuutta. Todellisuudessa esimerkiksi moottoreiden dynaaminen käyttäytyminen on otettava huomioon.

Edellä olleen perusteella voitaneen kyseenalaistaa LoM-suojauksen menetelmien ja laitteiden testauksessa käytettyjen RLC-kuormien vastaavuus todellisuuteen. Todellisissa verkoissa voi olla moottoreiden lisäksi useita erilaisia tuotantoyksiköitä toiminnassa. Tällöin menetelmät, jotka perustuvat ”yksinään syötön esto”-ajatteluun ja testaukseen tuskin tarjoavat kattavaa suojauksia. Tämä koskee sekä passiivisia että aktiivisia suojausmenetelmiä.

Testaukseen liittyvä tehotasapainovaatimus voidaan myös kyseenalaistaa. On esitetty (CENELEC 2005) 25 % tehoepätasapainolla tehtävän testauksen olevan riittävä. Testauksessa tulisi kuitenkin todentaa suojan toiminta myös tehotasapainon läheisyydessä. Tämä on laajasti tunnettu ja tunnustettu ongelma-alue LoM-suojauksessa, niin pyörivien generaattoreiden kuin myös invertterin välityksellä kytkeytyvien tuotantolaitosten tapauksissa. Lisätutkimuksia lienee kuitenkin tehtävä, jotta voidaan varmuudella edellyttää moottorikuorman lisäämistä testikuormaan. Moottorin mukanaolo kuitenkin vaikeuttaa sekä testien toistettavuutta että testiparametrien määriteltävyyttä (eroavuudet testimoottoreissa).

11.11 TIETOLIIKENTEeseen PERUSTUVISTA MENETELMISTÄ

11.11.1 Siirtolaukaisu

Jarrettin (2004) ja BSCE:n (2004) mukaan ainoa tapa taata LOM-suojaus on käyttää siirtolaukaisua sähköasemalla olevan katkaisijan kanssa. Jos suojauksen aukottomuudesta ei lähdetä tinkimään, tietoliikenteeseen perustuvat ratkaisut voivat osoittautua välttämättömiksi.

Myös USA:ssa siirtolaukaisua (transfer trip / intertripping) on pidetty ainoana luotettavana LOM-menetelmänä. Esimerkiksi Alliant Energy -yhtiö (Iowa) sekä Conectiv (Delaware) käyttävät transfer trip -suojausta, jos eroonkytkentä ei releiden avulla näytä onnistuvan. Long Island Power Authority vaatii alle 300 kVA:n tahti- ja epätahtigeneraattoreille, joilla ei ole tyyppihyväksyntää, siirtolaukaisun (Johnson 2003). Siirtolaukaisujärjestelmän kustannukset tulevat hajautetun tuotannon maksettaviksi.

NRECA:n IEEE 1547:ää koskeva ohje (2003) toteaa, että siirtolaukaisusignaalin pitäisi lähteä myös johdoilla olevilta kytkinlaitteilta, ei ainoastaan sähköaseman katkaisijalta.

Muilta kuin jälleenkytkentöjä tekeviltä kytkinlaitteilta edellytettävä siirtolaukaisu voinee kuitenkin olla hitaampi. Esimerkiksi kytkettäessä verkon osa eroon kauko-

ohjattavan erottimen avulla vaaraa nopeasta jälleenkytkennästä ei ole, joten hajautetun tuotannon irtikytkeytymiselle voidaan sallia selvästi pitempi aika.

Econnectin raportissa (2001) on tarkasteltu mm. siirtolaukaisussa käytettäviä mahdollisia viestiyhteyksiä. Kustannusten lisäksi siirtolaukaisun huonona puolena nähdään useilla tiedonsiirtomenetelmillä verkon kytkentätilan muuttamisesta aiheutuva siirtolaukaisujen muutostarve.

11.11.2 Signaalipohjainen LoM

Verkon jatkuvuuden ilmaisevaa signaalia on esitetty käytettäväksi saarekekäytön estämiseen seuraavissa viitteissä:

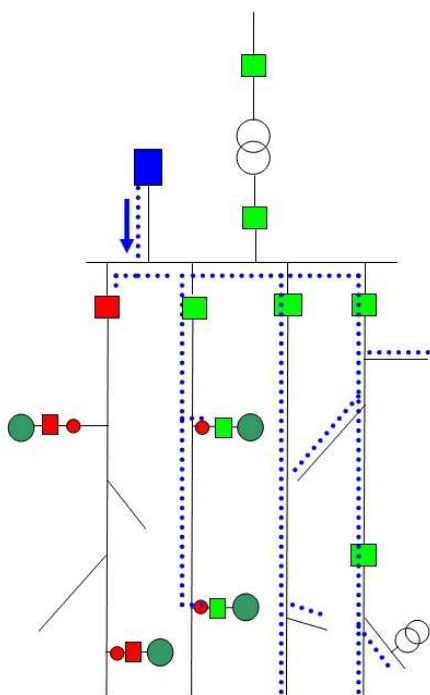
- Ropp et al. 2000
- Caldon et al. 2001
- Benato et al. 2003

Tätä LoM-suojauksen periaatetta on tarkasteltu laajemmin seuraavassa luvussa.

12 JATKUVUUSSIGNAALIIN PERUSTUVA EROONKYTKENTÄSUOJAUKSEN RATKAISUEHDOTUS

12.1 RATKAISUN YLEISPIIRTEET

Jatkuvuussignaaliin perustuvan menetelmän periaate on esitetty kuvassa 89. Verkkoon (joko sähköaseman keskijännitekiskostoon tai jopa 110 kV verkkoon) sijoitetaan lähetin, joka syöttää jatkuvatoimisesti signaalia verkkoon. Tuotantoyksiköiden yhteyteen sijoitettavat vastaanottimet saavat tiedon verkkoyhteydestä signaalin kautta. Jos vastaanotin ei havaitse signaalia, yhteys pääverkkoon on poikki, eli tuotantoyksikkö on jäänyt saarekkeeseen. Kuvan 89 tapauksessa vasemmalla olevan lähdön katkaisijan avautuminen estää signaalin siirtymisen ko. lähdölle, joten lähdölle kytketyt tuotantoyksiköt laukeavat irti.



Kuva 89. Verkon jatkuvuussignaaliin perustuvan eroonkytkentäsuojauksen periaate.

Saareke voi syntyä lähdön katkaisijan, johdolla sijaitseva kytkinlaitteen tai sulakkeen toimittua. Kaikissa edellä mainituissa tapauksissa vastaanotin havaitsee verkkoyhteyssignaalin puuttumisen ja voi antaa tuotantoyksikön kytkinlaitteelle laukaisukäskyn.

Jatkuvuussignaaliin perustuvan suojausjärjestelmän etuja ovat seuraavat:

- Jos signaalitaso säilyy viereisten johtolähtöjen vikojen aikana, suojauksesta voidaan tehdä erittäin selektiivinen, ja virhelaukaisujen riski on pieni.
- Verkon kytkentätilan muutos ei aiheuta muutostarvetta tietoliikenneyhteyksissä, ainakaan, ellei muutos tapahdu sähköasemien välillä.
- Keskijänniteverkon maasulkuja ei tarvitse yrittääkään havaita jakelumuuntajan pienjännitepuolelta.
- Minkä tahansa pääverkon ja tuotantolaitteen välisen kytkinlaitteen välisen kytkinlaitteen (lähtökatkaisija, välikatkaisija, erotin, sulake) toiminta havaitaan. Siirtolaukaisua ei tarvita.
- Ei tarvita erillistä tietoliikennekanavaa siirtolaukaisua varten.
- Verkkokäskyohjauksen signaalien etenemisestä jakeluverkossa on erittäin laaja kokemus. Vastaavankaltainen laitekanta lienee helpohkosti kehitettävissä. Myös muita tietoliikennevaihtoehtoja on olemassa.
- Vastaanotinlaite asetteluineen voi olla verkkoyhtiön hallinnassa, jolloin ei olla pientuottajan suojauksen asetteluiden varassa. Yhtenäisen ja lähes kokonaan verkkoyhtiön hallinnassa olevan eroonkytkentäsuojauksen toteuttaminen lienee helpompaa kuin perinteistä suojareletekniikkaa käytettäessä. Verkkoyhtiö voi edellyttää tuotantoyksiköiltä standardiratkaisua.
- Suurina sarjoina valmistettavat vastaanottimet mahdollistavat kohtuulliset kustannukset, joten tekniikkaa voidaan soveltaa myös erittäin pienille tuotantoyksiköille.
- Sähköturvallisuus paranee, kun tuotantoyksikön kytkeytyminen verkkoon on estetty, ellei signaalia havaita.

Jatkuvuussignaaliin perustuvan menetelmän heikkouksiksi on arvioitu (Finney et al. 2002) seuraavat:

- Vaatii lähettimen ja vastaanottimen asennukset.
- Edellyttää lähettimeltä suurta luotettavuutta.
- Menetelmä saattaa pettää järjestelmän vian aikana.

On perusteltua esittää myös seuraavia kysymyksiä menetelmän käyttökelpoisuudesta:

- Voidaanko riittävän voimakasta signaalia syöttää verkkoon jatkuvatoimisesti?
- Vaikuttaako hajautettu tuotanto kielteisesti signaalin etenemiseen?
- Voiko signaali syntyä verkkoon muista lähteistä?

12.2 POTENTIAALISIA TIEDONSIIRTORATKAISUJA

12.2.1 Matalataajuinen signaali

Ropp (2000) esittää matalataajuisia (500 Hz tai alle) signaalia, koska suuritaajuinen signaali vaimenee verkossa. Informaatiota signaaliin ei tarvitse syöttää olleenkaan tai vain vähän, jos halutaan välttää vähäinen riski siitä, että ferresonanssi tai moottorin aliharmoninen värähtely aiheuttaa verkkoon vastaavantaajuisen signaalin. Roppin menetelmän prototyypitestauksessa on käytetty Hunt Technologies Inc:n automaattiseen mittarinlukuun kehittämää, kaksisuuntaiseen tiedonsiirtoon soveltuvaa matalataajuisia (aliharmonista) menetelmää. Menetelmää ei ole vielä kaupallistettu, mutta tutkimus jatkuu edelleen (Ropp 2004).

Matalaa tiedonsiirtotaajuutta on hyödynnetty vanhassa verkkokäskyohjauksessa, jossa ohjauspulsseja on summattu 50 Hz:n jännitteeseen. Käytetty taajuus on tyypillisesti alueella 110-750 Hz., mutta se voi olla myös korkeampi. Suomessa on käytössä mm. taajuus 216 2/3 Hz Vantaalla (Helsingin Energia 2003). Menetelmän käyttöä koskeva standardi on SFS-EN 61334 (IEC 61334). Varmennusta järjestelmään saataisiin käyttämällä kahta taajuutta.

Verkkokäskyohjaussignaalia (Ripple Control) käytettäessä lähetinlaitteisto on suurehko investointi. Kustannussäästöjä lienee mahdollista saavuttaa syöttämällä signaali verkkoon 110 kV:n jänniteportaassa. Tällaisesta on kokemusta verkkokäskyohjauksessa ainakin Serbiassa (Lazarevic 2004). Tästä oli etuna myös se, että verkon kytkentämuutos, joka siirtää verkon osan toisen sähköaseman syötettäväksi, aiheuttaisi todennäköisesti vähemmän hankaluuksia.

12.2.2 Kantoaaltosignaali

Italialaiset (Caldon et al. 2001, Benato et al. 2003) ovat tutkineet huomattavasti korkeampitaajuisen eli 72 kHz:n signaalin käyttöä. Korkea taajuus edellyttää keskijänniteverkkoon toistimia 10-15 km välein.

Kaupallisia DLC-järjestelmiä (Distribution Line Carrier) on esim. ABB:n DartNet, joka käyttää taajuusaluetta 20-95 kHz. Toistimia tarvitaan keskijänniteverkossa 10 km:n välein. Järjestelmällä voidaan toteuttaa mittarinluku ja verkon kytkinlaitteiden ohjaukset. Sen mahdollisesta soveltuvuudesta jatkuvuussignaaliin perustuvaan eroonkytkentäsuojaukseen ei ole tietoa.

12.3 LOM-SUOJAUSRATKAISUN LAITETEKNIikka

12.3.1 Lähetin

Lähettimen tekniikka voi perustua teollisuudessa paljon käytettyyn ja varmatoimiseen suuntaajatekniikkaan. Tällaisen massatuotantolaitteissa käytetyn tekniikan soveltaminen

ripple –signaalin lähetinlaitteisiin ei vaatine suuria teknisiä muutoksia jo markkinoilla oleviin sovelluksiin. Periaatteessa lähettimiksi soveltuisi jännitevälipiirillä varustettu PWM –ohjattu taajuusmuuttaja, josta voidaan karsia tyypillisesti moottorikäyttöä varten tarkoitettuja ominaisuuksia ja komponentteja. Optimiratkaisu vaatisi oletettavasti hiukan enemmän räätälöintiä.

Eräiden menetelmän luotettavuutta parantavien ominaisuuksien toteuttaminen vaatii ohjelmallisia muutoksia perustaajuusmuuttajassa käytettyyn säätöön nähden, mutta on yksinkertaisesti toteutettavissa. Minimissään lähinnä ohjelmamuutoksia edellyttävän taajuusmuuttajan kustannukset saataneen pysymään kohtuullisina, kun lähtetimen tehoaluekin on oletettavasti muutama kymmenen kilowattia.

12.3.2 Vastaanotin

Vastaanotin voi olla toteutukseltaan melko yksinkertainen. Vastaanotin tarkkailee signaalitasoja valituissa taajuusikkunoissa ja lähettää kytkinlaitteelle laukaisukäskyn, mikäli signaalitasot ovat alle asetellun arvon kaikissa taajuusikkunoissa.

Tulosignaalista suodatetaan ensin taajuusikkunoiden ulkopuoliset taajuudet pois (esimerkiksi riittävän korkea-asteinen Butterworth-kaistanpäästösuoitin tai useampi suodin), minkä jälkeen DFT/FFT –laskennalla saadaan haluttujen taajuuksien tasot selville. Vastaanotin voi olla itsenäinen mikropiiripohjainen komponentti tai se voidaan toteuttaa ohjelmallisesti suojareleessä.

12.4 VASTAANOTTIMEN SIJAINNIPAIKASTA

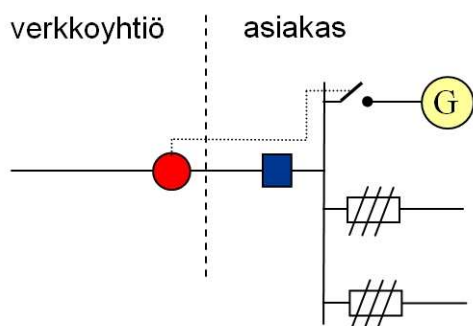
Eroonkytkentäsuojauksen vastaanottimen sijoittamiselle liityntäkohdassa verkonhaltijan puolelle löytyy seuraavia perusteluja:

- Eroonkytkentä verkostotöiden ajaksi on tällöin yksinkertaisempaa, ei tarvitse mennä liittyjän tiloihin.
- Verkonhaltija on vastuussa verkostaan ja sen suojauksesta. Verkon turvallisuus ja käyttövarmuus eivät ole täysin riippuvaisia asiakkaan omistamien laitteiden toiminnasta.
- Suojauksen asettelut ovat verkonhaltijan hallinnassa. Niitä voidaan muuttaa verkon muuttuessa muutostöiden tai kytkentätilan muuttamisen seurauksena.
- Relekoestukset ym. määräaikaisten kunnossapitotoimien, kuten mahdollisen akuston kunnossapito, ovat verkkoyhtiön hallinnassa.
- Verkkoyhtiöltä löytyy yleensä parempi sähkötekniikan asiantuntemus.

Jos tuotantoyksikkö käy kuormituksen rinnalla asiakkaan tiloissa, lienee kohtuutonta vaatia eroon kytkevää kytkinlaitetta verkon puolelle. Vikatilanteissa suoja kytkisi generaattorin lisäksi asiakkaan passiiviset kuormat pois. Tästä seuraisi, että ne

asiakkaat, joilla on omaa tuotantoa, kytkettäisiin jälleenkytkennöissä pitemmäksi aikaa verkosta eroon, kun taas ilman omaa tuotantoa olevat asiakkaat kärsisivät vain jälleenkytkennän jännitteettömän väliajan pituisen keskeytyksen.

Näissä tapauksissa vastaanotin ja mahdollinen releistys sijoitetaan kuvan 90 mukaisesti verkonhaltijan puolelle, mutta kytkinlaite, jolla generaattori erotetaan muusta verkosta, voidaan sijoittaa asiakkaan verkkoon, jolloin muut kuormitukset voivat jäädä verkon pikajälleenkytkentätilanteissa päälle. Käytännössä jouduttaneen kuitenkin usein sijoittamaan kaikki suojalaitteet asiakkaan tiloihin, jolloin ne saadaan sisätiloihin.



Kuva 90. Vastaanottimen sijoittaminen verkkoyhtiön puolelle ja laukaisun välitys generaattorille.

12.5 JATKUVUUSSIGNAALIMENETELMÄN ARVIOINTIA

12.5.1 Signaalin voimakkuus

IEC:n komitea on vuonna 2000 esittänyt ns. Meister-käyrää sallitulle signaalinvoimakkuudelle. Käyrä on esitetty kuvassa 91.

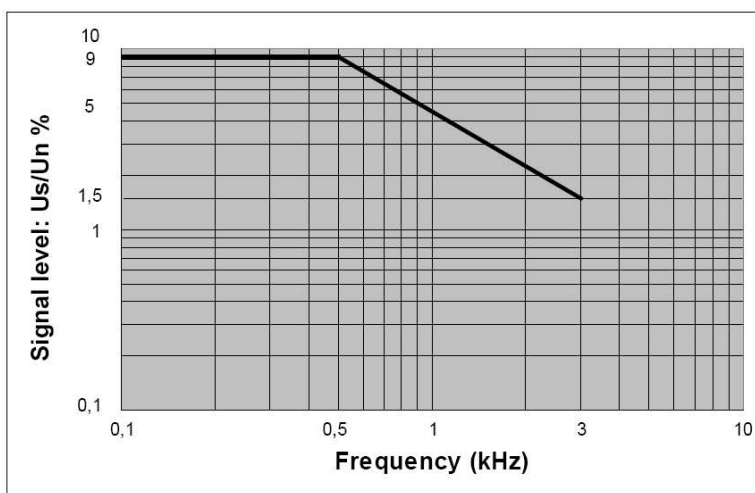


Figure 3 – Meister curve for ripple control systems in public networks (100 Hz to 3000 Hz)

Kuva 91. Meister-käyrä (IEC 2000).

SFS-standardi (SFS-EN50160) toteaa seuraavaa: ”Joissakin maissa sähköntoimittaja voi käyttää yleistä jakeluverkkoa viestien siirtoon. Yli 99 % päivästä tulee signaalijännitteen kolmen sekunnin keskiarvon olla pienempi tai yhtä suuri kuin kuvassa 1 annetut arvot.” Standardin kuva poikkeaa Meister-käyrästä siten, että kun taajuus on välillä 0,9-10 kHz, sallitaan 5 % nimellisjännitteestä, siis suurempi signaalitaso kuin Meister-käyrässä.

Stones (Stones et al. 2002) on tutkinut verkkokäskyohjaukseen tarkoitettua ripple-signaalin etenemistä 22 kV:n verkossa. Simuloinnit oli tehty PSCAD/EMTDC –ohjelmistolla ja mittaukset todellisessa verkossa, jossa oli käytössä verkkokäskyohjaus boilerien ohjaukseen. Tehtyjen simulointien ja mittausten perusteella verkkosignaali saattaa aiheuttaa ongelmia tietyillä signaalitaajuuksilla ja tietyn tyyppisillä verkkorakenteilla. Riippuen ilmajohtojen ja maakaapelien osuuksista verkon resonanssitaajuus saattaa olla liian lähellä signaalitaajuutta, kun lisäksi otetaan huomioon mahdolliset kompensointikondensaattoriparistot. Tällöin signaalitaso voi nousta liian korkeaksi. Tutkitussa tapauksessa verkkosignaalin taajuus oli korkeahko, 1050 Hz, ja suurimmillaan resonanssipiirin vahvistus oli tällä taajuudella noin 1,3.

Ensisijainen ratkaisu Stonesin raportoimaan potentiaaliseen ongelmaan on käyttää matalampaa taajuutta (alle 750 Hz, tyypillisesti luokkaa 200 Hz). Tätä taajuusalueta on käytetty vuosikymmeniä verkkokäskylaitteissa, joka on tunnettua ja koeteltua tekniikkaa. Muutoinkin käytettävät signaalitaajuudet on valittava sijaintipaikan olosuhteet, mm. resonanssit ja vaimenemiset, huomioon ottaen.

12.5.2 Hajautetun tuotannon vaikutus signaalin etenemiseen

Eräissä tutkimuspapereissa (Belhomme et al. 2004, Caire et al. 2002) on esitetty, että hajautetulla tuotannolla voi olla kielteinen vaikutus ripple control –signaalin etenemiseen. Tran-Quocin (Tran-Quoc et al. 2003) mukaan pyörivillä koneilla on taipumus absorboida signaalia. Tarkemman tutkimuksen (Tran-Quoc et al. 2004-1) mukaan signaalin vaimentumisesta ei ole odotettavissa liiallista ongelmaa. Invertteriliitännäiset yksiköt eivät häiritse signaalin vastaanottamista, jos kytkentätaajuus on riittävän kaukana verkkosignaalin taajuudesta, mikä on tavallinen tilanne. Muutoinkin signaalitaso säilyi riittävänä kaikilla kolmella tutkitulla verkkorakenteella, joita olivat kaupunkiverkko, kaupunki- ja maaseutuverkon yhdistelmä sekä maaseutuverkko. Käytetyt signaalitaajuudet olivat 175 Hz, 188 Hz ja 251 Hz. Sallitut tai vaaditut signaalitasot olivat seuraavat:

- 2,3 lähettimen signaalitaso k_j –kiskostossa,
- $>1,4$ kaikkialla k_j –verkossa,
- $>0,9$ kaikkialla p_j –verkossa ja
- $<0,4$ s_j –verkossa.

Jos hajautetun tuotannon yksikkö häiritsee signaalia, se voidaan varustaa suodattimella (Tran-Quoc et al. 2004-1).

12.5.3 Signaalin syntymahdollisuus muista lähteistä

Roppin (Ropp et al. 2000) mukaan ferresonanssi tai moottorin värähtely voisivat tuottaa matalataajuisen signaalin, mutta hän pitää niiden esiintymistä harvinaisena. Niiden, samoin kuin mahdollisten tarkoituksellisesti signaalia tuottavien laitteiden häiritsevä vaikutus lienee poistettavissa lisäämällä signaaliin pieni tietomäärä, joka erottaa signaalin muista samantaajuisista signaaleista.

12.5.4 Signaalin eteneminen verkon vikojen aikana

Kriittinen kysymys jatkuvuussignaalin käytölle eroonkytkentäsuojauksessa on signaalin eteneminen verkon vikojen aikana. Jännitteen tarkkailuun perustuvalle suojaukselle on tyypillistä reagoida muun verkonosan vikoihin laukaisemalla tuotantoyksikköjä tarpeettomasti. Tällöin voi tapahtua kaikkien tuotantoyksiköiden yleinen laukeaminen, mikä voi johtaa pahempiin järjestelmätason jänniteongelmiin.

Jos signaali katoaa jännitekuoppien aikana, myös jatkuvuussignaalin menetelmää käytettäessä tapahtuu tarpeettomia laukeamisia. Toisaalta, jos tämä ongelma voidaan eliminoida, menetelmällä lienee suuria mahdollisuuksia kehittyä nykyisin vallitsevia menetelmiä huomattavasti selektiivisemmäksi. Perusasioita signaalin varmistamiseksi verkon vikojen aikana on lähettimen sähkönsyötön varmistaminen.

12.6 RIPPLE-SIGNAALIN SIMULOINNIT

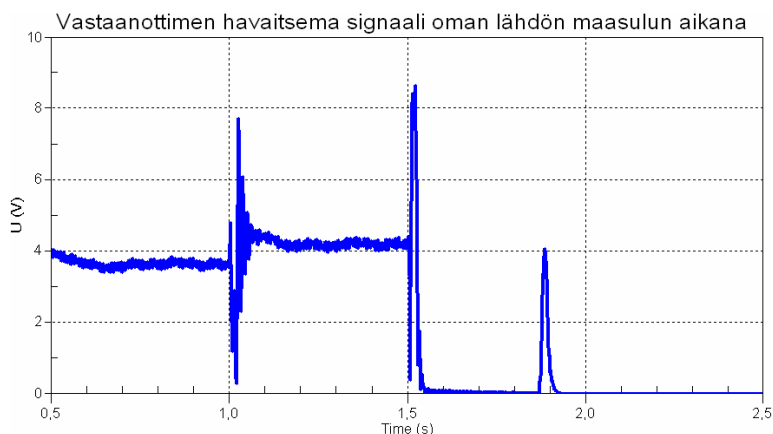
12.6.1 Lähettimen ja vastaanottimen kuvaaminen

Signaalin etenemistä verkossa tutkittiin simulointien avulla. Verkkomallina oli suomalaisen ilmajohtoverkon malli, jossa tarkasteltavalle lähdölle oli perustilanteessa kytketty 1,65 MW:n tehoinen tuulivoimala 35 km:n etäisyydelle sähköasemalta. Perussimuloinneissa verkko oli maasta erotettu. Sähköaseman keskijännitekiskostoon kytketyn jatkuvatoimisen lähettimen malli oli invertteripohjainen. Lähetin sovitettiin kiskostoon resonanssipiirillä, jonka resonanssitaajuus oli signaalin taajuus eli 168 Hz. Resonanssipiirin arvot: $C = 3 \mu\text{F}$, $L = 299,1578788 \text{ mH}$ ja $R = 10,0 \text{ m}\Omega$. Signaalin lähetystaso oli 2 % nimellisjännitteestä. Simuloinneissa ei lähettimen ja kiskon välissä ollut muuntajaa, joten tältä osin simulointi ei vastanne todellista tilannetta. Pääfunktiona oli halutun tasaisen ripple-signaalin tuottaminen keskijänniteverkkoon.

Signaalia mitattiin vastaanottimia kuvaten sekä keskijänniteverkossa että pienjänniteverkossa. Vastaanottimilla jännitemittaus suodatettiin Butterworth-ylipäästösuodattimella ja haluttu taajuus otettiin signaalista ulos PSCAD:in FFT-komponentin avulla.

12.6.2 Simuloinnit maasta erotetun verkon mallilla

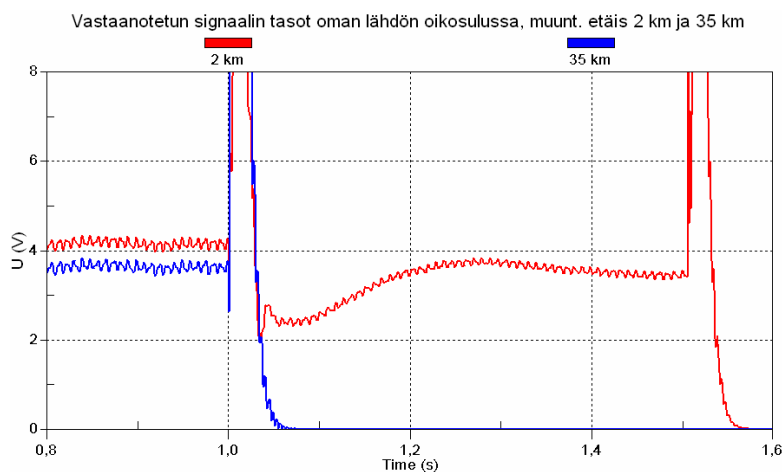
Kuvassa 92 on esitetty 35 km:n etäisyydellä sähköasemalta sijaitsevan muuntamon pienjänniteverkossa havaittu signaali, kun omalla keskijännitelähdöllä tapahtuu maasulku, joka laukaisee lähdön pois.



Kuva 92. Vastaanottimen maasulkutilanteessa havaitsema signaali syvällä pienjänniteverkossa 35 km etäisyydellä sähköasemasta sijaitsevassa muuntopiirissä. (Ripple_EF)

Yksivaiheinen maasulku tapahtuu omalla lähdöllä hetkellä $t=1,0$ s, ja lähtö laukeaa hetkellä 1,5 s. Hetkellä 1,9 s näkyvä piikki johtuu lähdölle kytketyn tuulivoimalan laukeamisesta. Kuvasta havaitaan, että vastaanotettava signaali katoaa nopeasti lähdön laukeamisen jälkeen, mikä mahdollistaa nopean eroonkytkentäsuojauksen.

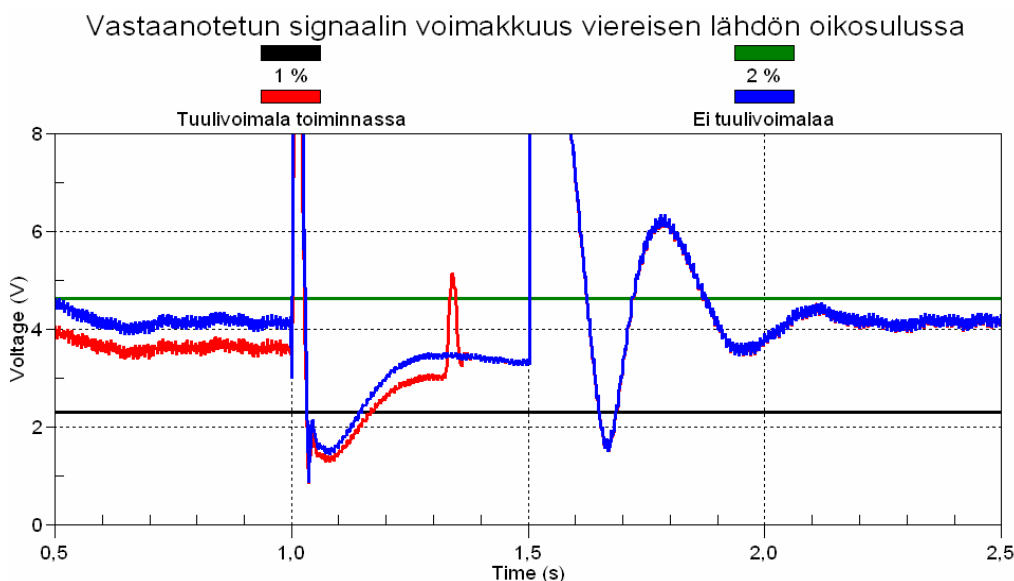
Vastaavasti kuvassa 93 on esitetty etäisyyksillä 2 km ja 35 km sijaitsevien muuntopiirien pienjänniteverkon loppupäästä mitatut signaalivoimakkuudet, kun omalla johtolähdöllä tapahtuu kolmivaiheinen oikosulku etäisyydellä 20 km.



Kuva 93. Etäisyyksillä 2 km ja 35 km sähköasemalta sijaitsevien muuntopiirien p-j-verkon loppupäästä mitatut signaalivoimakkuudet oman lähdön 3-vaiheisessa oikosulussa etäisyydellä 20 km. (Simulointi Ripple_SC)

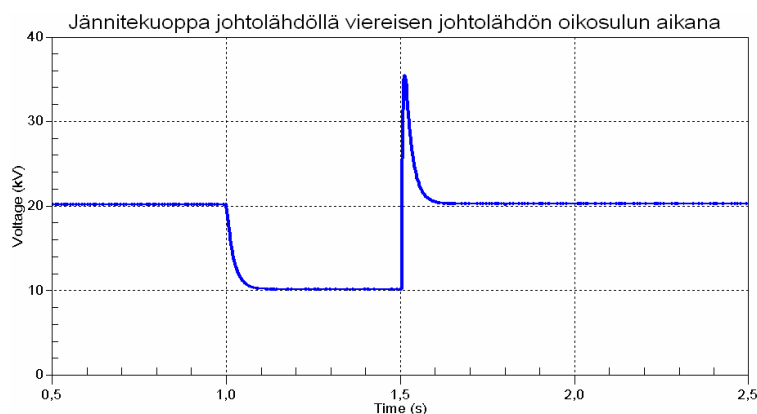
Etäisyydellä 35 signaalin taso putoaa nolleen oikosulun seurauksena, mistä seuraisi LoM-suojauksen kannalta oikea toiminto, eroonkytkentä. Etäisyydellä 2 km signaalin voimakkuus pienenee, ja tuotantoyksikön laukaisu tapahtuisi todennäköisesti vasta saareketilanteen syntymisen jälkeen eli lähdön lauettua hetkellä $t=1,5$ s. Tämä antaa mahdollisuuden selektiiviseen moniportaiseen suojaukseen ajatellen esimerkiksi välirikattaisijan käyttöä.

Perinteisiä LoM-menetelmiä käytettäessä tyypillinen ongelma on tuotantoyksiköiden laukaisu viereisten johtolähtöjen viassa. Kuvassa 95 on esitetty signaalin voimakkuuden käyttäytyminen, kun oikosulku tapahtuu naapurilähdöllä 7 km:n etäisyydellä sähköasemalta.



Kuva 94. Signaalitaso pj-verkossa muuntopiirissä, joka sijaitsee 35 km:n etäisyydellä sähköasemalta, viereisen lähdön oikosulun aikana ilman tuulivoimalaa ja tuulivoimalan vaikuttaessa omalla lähdöllä.

Kuvan 94 tilanteessa oikosulku alkaa hetkellä $t=1,0$ s, ja viereinen lähtö laukeaa hetkellä 1,5 s. Oikosulun vaikuttaessa jännitekuoppa näkyy myös ripple-signaalissa. Signaalissa näkyvä jännitekuoppa on kuitenkin huomattavasti lievempi kuin johdolla näkyvä jännitekuoppa, joka on esitetty kuvassa 95. Ero johtuu siitä, että simuloinnissa käytetyssä invertteripohjaisen lähtimen mallissa säätö on toteutettu virtaohjatusti, mistä johtuen lähtimessä lisää lähetystehoaan jännitekuopan aikana. Tämän ansiosta vastaanottimilla näkyvä signaali nousee notkahduksen jälkeen lähelle alkuperäistä tasoa. Kuvassa 95 näkyy vian poistumisen jälkeen huomattavaa värähtelyä, jonka poistaminen onnistunee lähtimen säätötekniikan tarkistamisella.



Kuva 95. Lähdöllä näkyvä jännitekuoppa.

Signaalin jännitekuopan aikaisen voimistamisen lisäksi lievennyskeinoja jännitekuopan aiheuttamaan signaalin heikkenemiseen voivat olla seuraavat:

- Vastaanotinlaitteiden edellyttämää signaalitasoa voitaneen vastaavasti alentaa jännitekuopan aikana (jännitteestä riippuva signaalin tunnistus). Tunnistettava signaalitaso voisi ehkä olla johonkinajaan asti suhteellisarvo (signaalin taajuuden voimakkuuden suhde perustaajuuden jännitteeseen).
- Syviä jännitekuoppia aiheuttavat viat, oikosulut lähtöjen alkupäässä, laukaistaan pikalaukaisua käyttäen, ja hajautetun tuotannon eroonkytkennässä käytetään pientä aikahidastusta.

12.6.3 Simuloinnit kompensoidun ja resistanssin kautta maadoitetun verkon malleilla

Maasulkutilanteen simulointitulokset kompensoidun ja resistanssin kautta maadoitetun verkon malleilla antoivat samanlaiset tulokset kuin edellä tehdyt maasta erotetun verkon mallilla tehdyt simuloinnit.

12.6.4 Hajautetun tuotannon määrän vaikutus signaaliin

Hajautetun tuotannon vaikutusta signaalitasoihin tarkasteltiin tuulivoimalayksiköiden määrää varioimalla. Alkutilanteessa lähdöllä oli yksi 1,65 MW:n tuulivoimala 35 km etäisyydellä sähköasemasta. Lähdölle lisättiin 1,65 MW:n tuulivoimala 100 m, 5 km ja 20 km etäisyyksille sähköasemasta. Neljän voimalan tapauksessa lähdöllä oli noin 4,6 MW enemmän tuotantoa kuin kulutusta. Signaalitasot saatiin FFT-analyysillä. Tarkastelujakso on 25 jaksoa ajanhetkestä 0,7 s eteenpäin (25 jaksoa). Tällöin signaalitasot ovat tarkastelujakson aikaisia keskiarvotasoja. (WPP = Wind Power Plant)

Taulukossa 4 on esitetty signaalitasot sekä absoluuttisina että suhteellisina arvoina. Tuulivoimaloiden lisääminen alensi jonkin verran mutta ei kovin merkittävästi signaalitasoja. Tulos on yhtäpitävä mm. edellä mainittujen Belhommen, Cairen ja Tran-Quocin tutkimusten kanssa.

Taulukko 4. Tuulivoimaloiden lukumäärän vaikutus signaalitasoihin.

Mittauspiste	WPP lkm	50Hz	168Hz	168Hz
Kj (35km)	1xWPP	11858 V	171 V	1,44 %
Kj (35km)	4xWPP	11892 V	164 V	1,38 %
Pj (2km + 815m)	1xWPP	221,8 V	3,7 V	1,68 %
Pj (2km + 815m)	4xWPP	221,8 V	3,6 V	1,62 %
Pj (35km + 815m)	1xWPP	226,8 V	3,3 V	1,44 %
Pj (35km + 815m)	4xWPP	229,5 V	2,9 V	1,27 %

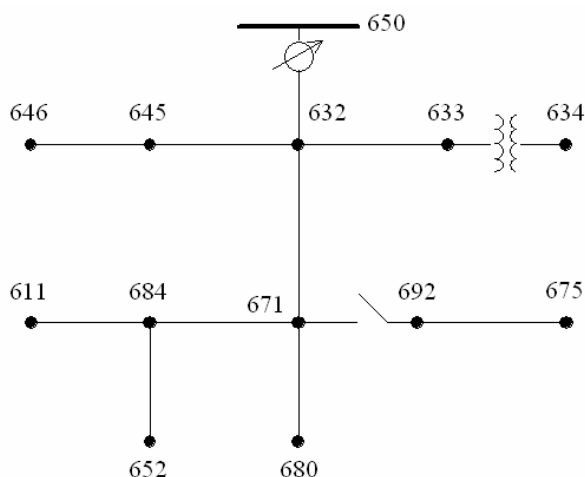
12.6.5 Signaalin leviäminen vaikutus siirtoverkkoon

Signaalin leviämistä siirtoverkkoon tarkasteltiin samalla mallilla kuin millä edellä esitetyt tarkastelut on tehty. Tarkastelussa lähdöllä oli kytkettynä yksi 1,65 MW tehoinen tuulivoimala etäisyydellä 35 km sähköasemasta. Signaali mitattiin suurjännitekiskostosta (110 kV). Ajonaikaista FFT –analyysiä ei tehty sj-mittauksen osalta.

Perustaaajuinen eli 50 Hz:n jännite oli 62,866 kV ja 168 Hz signaalin taso oli 0,099 kV, joka vastaa 0,16 %. Tämä täyttää edellä esitetyn ehdon, jonka mukaan signaalitaso tulisi olla alle 0,4 % suurjänniteverkossa.

12.6.6 Signaalipohjaisen LoM-menetelmän simulointi IEEE 13 Node Test Feeder –verkkomallilla

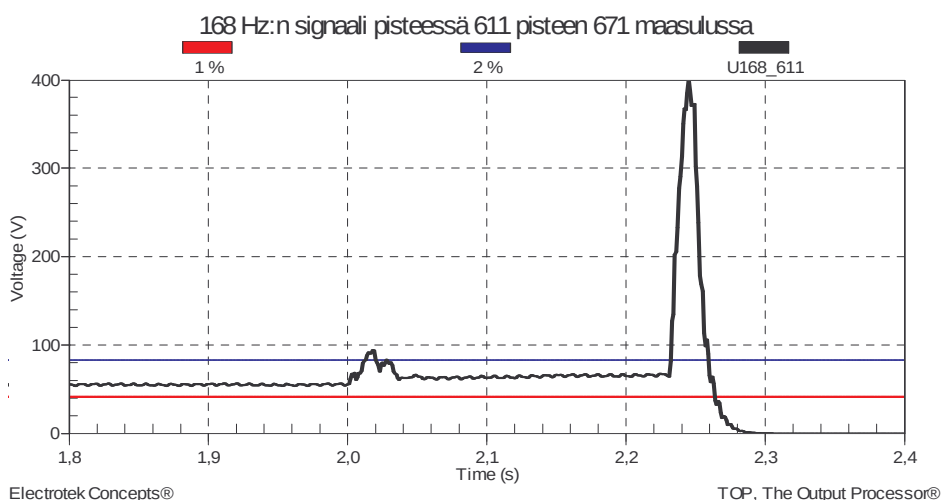
IEEE 13 Node Test Feeder –keskijänniteverkkomallin karkea kaavio on esitetty kuvassa 96. Verkon nimellisjännite on 4,16 kV. Solmun 634 jännite on 480 V. Haara johto-osuudet 632-645-646 ja 671-684 ovat kaksivaiheisia ja haarat 684-611, 684-652 yksivaiheisia. Kolmivaiheisiin johto-osiin on kytkettynä sekä 3- että 1-vaiheista kuormitusta ja kondensaattoreita. Simuloinnissa käytetystä verkkomallista puuttui jännitteensäädin, muilta osin malli oli standardin mukainen. Verkkomalli oli varustettu käänteisaikaylivirtareleillä ja useilla katkaisijoilla.



Kuva 96. IEEE 13 Node Test Feeder (IEEE 2006).

Verkkomallilla toteutettiin useita simuloiteja, joiden mukaan 168 Hz:n signaali etenee hyvin myös amerikkalaistyyppisessä verkossa. Erityisesti simuloitiin kaksi vikatilannetta, yksivaiheinen maasulku sekä kolmivaiheinen oikosulku pisteessä 671. Näissä vikatilanteissa verkkomallissa johto-osan 632-671 alkuun sijoitettu katkaisija laukesi.

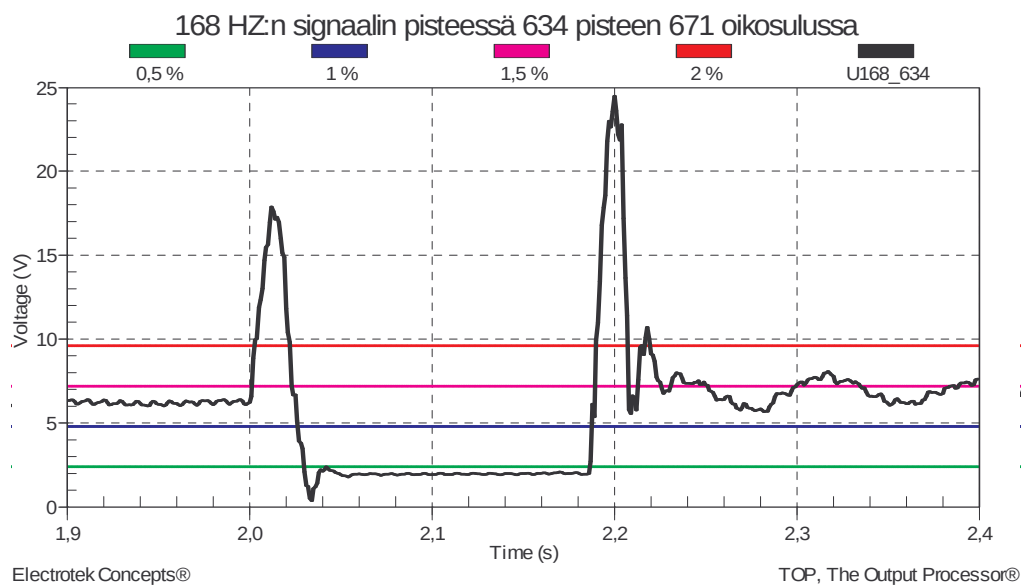
Simulointien tulokset on esitetty kuvissa 97 ja 98. Kuvan 97 simuloinnissa signaalin voimakkuutta tarkkaillaan pisteessä 611. Maasulkutilanne syntyy hetkellä $t = 2,0$ s, ja laukaisu tapahtuu hetkellä 2,23 s. Kuvasta havaitaan, että saareketilanteen syntymisen jälkeen signaalin taso laskee alle järkevien asettelurajojen nopeammin kuin 50 millisekunnissa.



Kuva 97. Pisteessä 611 mitattu signaalitaso pisteessä 671 tapahtuvan maasulun aikana.

Kuvan 98 simuloinnissa on kyse pisteen 671 kolmivaiheisesta oikosulusta, joka selvitetään verkossa pisteessä 632 sijaitsevalla katkaisijalla. Signaalin voimakkuutta tarkastellaan pisteessä 634, 4000/480 V muuntajan alajännitepuolelta. Oikosulku syntyy hetkellä $t = 2,0$ s, ja välikatkaisija laukeaa hetkellä $t = 2,185$ s.

Kuva 98 havainnollistaa mahdollisen signaalin hetkellisen vahvistustoiminnon hyödyllisyyden, selektiivisyyden parantajana. Signaalitaso pisteessä 634 laskee oikosulun vaikutusaikana alle 0,5 %:n, mikä voisi olla mielekäs asetteluvarvo LoM-suojalle. Pisteseen 634 kytketyn tuotantoyksikön laukeaminen olisi siis virhetoiminto, epäselektiivinen laukeaminen. Tällaisten tarpeettomien laukaisujen riski pienenesi, jos ko. tilanteessa signaalin voimakkuutta tilapäisesti kasvatettaisiin. Tällöin pisteeseen 634 kytketyn tuotantoyksikön luona signaali olisi voimakkaampi, ja tuotantoyksikkö voisi pysyä verkossa.



Kuva 98. Pisteessä 634 mitattu signaalitaso pisteessä 671 tapahtuvan kolmivaiheisen oikosulun aikana.

13 VERKKOONLIITYNNÄLLE ASETETTAVIA TEKNISIÄ VAATIMUKSIA

13.1 SUOSITUKSET JA STANDARDIT

Hajautetun tuotannon verkkoon liittamisestä ei ole olemassa laajoja kansainvälisiä standardeja. USA:ssa IEEE:n standardi 1547TM on laaja yleinen järjestelmästandardi, mutta Euroopassa verkkoonliittämisen vaatimukset ja suositukset ovat korkeintaan kansallisia, usein jopa yrityskohtaisia. Laitestandardia sen sijaan on runsaasti sekä olemassa että kehitteillä. Viitteessä (CIGRE 2005) on laaja yhteenveto eri maiden vaatimuksista.

CENELEC:n johdolla yritetään luoda eurooppalaista standardia mikroluokan generaattoreiden verkkoon liittämiseksi, standardi EN 50438, *Requirements for the connection of micro-cogenerators in parallel with public low-voltage distribution networks*. Yhteisten pelisääntöjen luominen on kuitenkin hidasta.

Suomessa hajautetun tuotannon verkkoon liittamisestä on käytettävissä Senerin ohje ”Pienvoimaloiden liittäminen jakeluverkkoon” (SENER 2001), mutta yksityiskohtaisempaa ohjeistusta löytyy esimerkiksi Helsingin Energian laatimista ohjeista ”Ohjeet sähköä tuottavan laitteiston liittämiseksi Helsingin Energian sähköjakeluverkkoon” (Helsingin Energia 2006). Suomessa lienee tarve kehittää valtakunnalliset, eurooppalaisen standardoinnin huomioon ottavat yksityiskohtaisemmat liityntäsuositukset. Muualta löytyviä ohjeita voitaneen käyttää perustana.

Myös suomalaisten lienee syytä olla aktiivisesti mukana kansainvälisten suositusten ja standardien laadinnassa, jotta mm. sähköturvallisuus ja laitteiden yhteensopivuus järjestelmän osaksi voidaan varmistaa. Esimerkki vaarallisesta suuntauksesta on CENELEC-standardin luonnoksen (CENELEC 2005) liitteessä C selostettu LoM-suojan tyyppitestaus. Ko. testi toteutetaan 25 %:n tehoepätasapainossa, joten lähellä tehotasapainotilannetta tapahtuvaa saarekkeeseen joutumista ei tarvitsisi havaita. CIGRE:n (2005) selvitys ottaa kuitenkin selvän kannan: tyyppitestaus tulee suorittaa realistisissa verkon olosuhteissa, kuten tehotasapainotilanteessa.

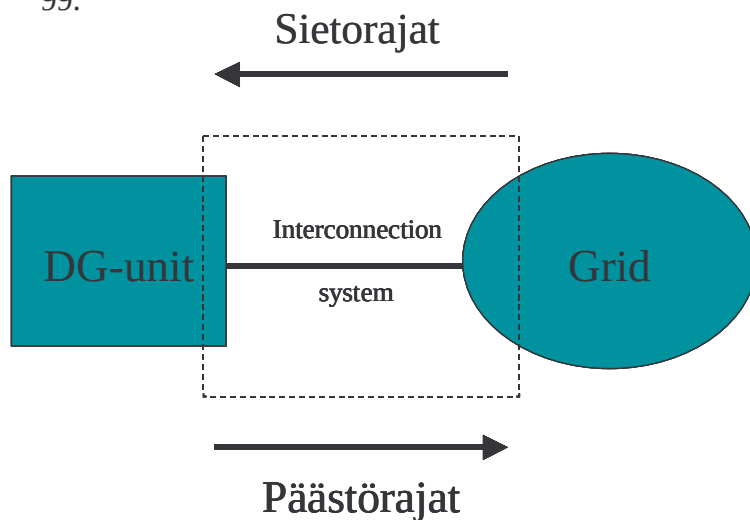
Laitteiden tyyppitestaukseen liittyvää kysymystä moottorikuorman vaikutuksesta on tarkasteltu edellä luvussa 11.

13.2 YLEISTÄ VAATIMUKSISTA

Hajautetun tuotannon verkkoon liittämisessä huomioon otettavia tekijöitä ovat ainakin seuraavat:

- Jännitetason pysyvä muutos
- Jännitteen nopea muutos kytkentätilanteissa
- Jännitteen välkyntä
- Virran yliaallot
- Virran DC-komponentti
- Tehokerroin
- Tahdistaminen
- Vaikutukset verkon ohjaussignaaleihin
- Epäsymmetriset kytkennät
- Suojauskysymykset, erotuslaite
- Takaisinkytkentä verkkoon
- Vikasietoisuus ("Ride Through" -ominaisuus)

Sähkön laatua ajatellen tuotantoyksikölle tulee asettaa päästörajat, joiden puitteissa sen on toimittava. Vastaavasti tuotantoyksikön tulee sietää verkossa olevia tai tapahtuvia epäideaalisuuksia. Verkon ja tuotantoyksikön välinen vuorovaikutus on esitetty kuvassa 99.



Kuva 99. Verkon ja hajautetun tuotannon välinen vuorovaikutus.

13.3 JÄNNITETASON PYSYVÄ MUUTOS

Jännitetason muutoksen suuruuteen vaikuttaa verkon liittymispisteen oikosulkutehon ja liitettävän tuotannon tehon välinen suhde. Nämä sitoo toisiinsa seuraava yhtälö:

$$S_{grid} \geq \left(\frac{1}{u_{max}} S_{gen} \right) \cdot 100\%$$

missä u_{max} suurin sallittu jännitteen nousu
 S_{grid} on verkon oikosulkuteho liittymispisteessä
 S_{gen} on kaikkien liittymispisteeseen liitettyjen tuotantoyksiköiden yhteenlaskettu nimellisteho

Käytännössä liittymispisteen oikosulkutehon tulee siis olla tarpeeksi suuri liitettävään tehoon nähden. Mitä jäykempi verkko, sitä vähemmän jännite muuttuu. Jos suurin sallittu jatkuvan tilan jännitteenmuutos on esimerkiksi 4 %, saadaan:

$$\frac{S_{grid}}{S_{gen}} \geq \left(\frac{1}{4\%} \right) \cdot 100\% = 25$$

Verkon oikosulkutehon tulee siten olla vähintään 25-kertainen liittymispisteeseen liitettyyn tuotantotehoon nähden, mikäli jännitteeseen sallitaan 4 % muutos. Mikäli verkon impedanssi on voimakkaasti induktiivinen, yllä mainittu yhtälö hieman muuttuu. Jakeluverkkotasolla yhtälöllä saadaan kuitenkin hyvä arvio tilanteesta.

13.4 JÄNNITTEEN NOPEAT MUUTOKSET

Jännitteen nopealla muutoksella tarkoitetaan tässä esimerkiksi tuotantolaitteistojen kytkennöistä (pälle/pois) aiheutuvia hetkellisiä jänniteheilahduksia. Suurin hetkellinen jännitteen muutos voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä:

$$d_{cmax} = \left(\frac{S_{gen}}{S_{grid}} \frac{I_{start_gen}}{I_{n_gen}} \right) 100\%$$

missä S_{grid} on liittymispisteen oikosulkuteho
 S_{gen} on tuotantolaitteiston nimellisteho
 I_{start_gen} on tuotantolaitteiston käynnistysvirta
 I_{n_gen} on tuotantolaitteiston nimellisvirta
 d_{cmax} suurin sallittu jännitteenmuutos

Edellä on esitetty jännitteen nousulle maksimiarvo $u_{max} = 4\%$. Tämä aiheuttaa sen, että suhde S_{grid}/S_{gen} saa olla minimissään 25. Jos jännitteen muutokseksi d_{cmax} sallittaisiin esimerkiksi enintään 5 %, saisi tuotantolaitteiston käynnistysvirta suhteessa sen nimellisvirtaan olla enintään 1,25-kertainen, sillä:

$$\frac{I_{start_gen}}{I_{n_gen}} \leq \frac{S_{grid}}{S_{gen}} d_{cmax} = 25 \cdot 0,05 = 1,25$$

13.5 JÄNNITTEEN VÄLKYNÄ

Myös jännitteen välkynnälle tulisi antaa raja-arvot. Pienjänniteverkkojen osalta esimerkiksi standardeissa EN 61000-3-3 ja EN 61000-3-11 annetaan välkynyttä koskevia

raja-arvoja. Taulukossa 5 on esitetty näissä standardeissa esiintyvät raja-arvot sekä pitkäaikaiselle että lyhytaikaiselle häiritsevyysindeksille.

Taulukko 5. Raja-arvoja jännitteen välkyntälle pj-verkossa.

Suure	
P_{st}	1
P_{lt}	0,65

missä P_{lt} on pitkäaikainen häiritsevyysindeksi ja P_{st} on lyhytaikainen häiritsevyysindeksi.

Esimerkiksi Saksassa on käytössä seuraavanlaiset raja-arvot pj- ja kj-verkkoihin liitettäville tuotantoyksiköille:

$$A_{lt} \leq 0.1 \text{ tai}$$

$$P_{lt} \leq 0.46$$

A_{lt} ja P_{lt} on määritelty seuraavasti:

$$A_{lt} = \left(c \frac{S_{gen}}{S_{grid}} \right)^3 \text{ ja } P_{lt} = c \frac{S_{gen}}{S_{grid}}$$

missä c on tuotantoyksikön ns. välkyntävakio (flicker coefficient).

Standardissa IEC 61400-21 ”Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines” on määritelty, miten välkyntävakio voidaan määrittää tuulivoimaloille.

13.6 VIRRAN YLIAALTOKOMPONENTIT

Suurimmat sallitut yliaaltokomponentit tulee määrittää nimenomaan virralle, sillä jännitteen yliaallon suuruus riippuu aina verkon impedanssista ohmin lain mukaan. Ohjeissa täytyy ottaa huomioon myös yliaallot, joiden järjestysluku on suuri sillä esimerkiksi tehoelektroniikkalaitteet aiheuttavat yliaaltoja kilohertsi-luokan kytkentätaajuuksien läheisyyteen.

Helsingin Energian verkkoonliityntäohjeessa (Helsingin Energia 2006) käytetään samoja raja-arvoja (taulukot 6 ja 7) yliaaltovirroille kuin on esitetty Senerin oppaassa ”Loistehon kompensointi ja yliaaltojen rajoittaminen”. Näissä oheissa pienjännitepuolella määritellään rajat järjestysluvuittain vasta yli 200 A laitteille. Vastaavasti kj-puolella määritellään kaikille tehoille komponenteittain sallitut yliaaltotasot. Referenssinä käytetään sulakepohjaisessa liittymässä pääsulakkeen

nimellisvirtaa ja tehopohjaisessa liittymässä liittymissopimuksen tehosta laskettua virtaa.

Taulukko 6. Sallitut yliaaltopitoisuudet komponenteittain, pj-verkko.

Referenssivirta	Suositeltava raja	
$\leq 25 \text{ A}$	Saa käyttää laitestandardin mukaisia laitteita	
$25 \text{ A} \dots 200 \text{ A}$	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 10 % referenssivirrasta	
$> 200 \text{ A}$	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 8 % referenssivirrasta, mutta kuitenkin vähintään 20 A sallitaan. Lisäksi yksittäisten yliaaltojen osalta:	
	Järjestysluku n	Sallittu arvo referenssivirrasta
	< 11	7,0 %
	11 – 16	3,5 %
	17 – 22	2,5 %
	23 – 34	1,0 %
	> 34	0,5 %

Taulukko 7. Sallitut yliaaltopitoisuudet komponenteittain, kj-verkko.

Referenssivirta	Suositeltava raja	
Kaikki	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 8 % referenssivirrasta. Lisäksi yksittäisten yliaaltojen osalta:	
	Järjestysluku n	Sallittu arvo referenssivirrasta
	< 11	7,0 %
	11 – 16	3,5 %
	17 – 22	2,5 %
	23 – 34	1,0 %
	> 34	0,5 %

Saksassa liittymispisteelle on annettu tietyt maksimi-arvot, joita ei saa ylittää, oli generaattoreita kytkettynä samaan pisteeseen miten monta tahansa. Tämä tarkoittaa, että generaattoreiden määrän kasvaessa yksittäisen generaattorin sallitut päästörajat tiukentuvat.

13.7 VIRRAN DC-KOMPONENTTI

Virran DC-komponentti aiheuttaa mm. muuntajien kyllästymistä, mikä heikentää muuntajan kuormitettavuutta. Tämän vuoksi on perusteltua, että tuotantoyksikön ulostulovirran DC-komponentille täytyisi antaa raja-arvo.

IEEE 1547 esittää, että DC-komponentti ei saa ylittää arvoa $0,5 \% \times I_n$. Vastaavasti esimerkiksi draft-versio prEN 50438 (CENELEC 2005) esittää maksimiarvoksi 20 mA. Tämä luonnos koskee kuitenkin vain pj-verkkoon kytkettäviä alle 16A laitteita.

13.8 TEHOKERROIN JA TAHDISTAMINEN

Tehokertoimen säädöllä voidaan vaikuttaa verkon jännitetasoon. Tehokertoimelle tulee siis antaa tietyt rajat, joissa laitoksen tulee toimia.

Tahdistaminen voidaan tehdä manuaalisesti tai automaattisesti. Automaattinen tahdistus on luonnollisesti suositeltavampi vaihtoehto. Helsingin Energia antaa seuraavanlaiset tahdistusehdot:

Generaattoreiden tai generaattorin syöttämän asiakasverkon kytkennässä jakeluverkon jännitteeseen tulee noudattaa seuraavia **tahdistusehtoja**:

- Synkronigeneraattori: $\Delta U < \pm 8\% U_N$, $\Delta f < \pm 0,5 \text{ Hz}$, $\Delta \phi < \pm 10^\circ$
- Asynkronigeneraattori: Tahdistamaton verkkoonkytkentä sallittu jos kierroslukuero $\Delta n \leq \pm 5\% n_N$. Muutoin sovelletaan synkronigeneraattoreille annettuja arvoja.
- Vaihtosuuntaajalaitteet: Vaihtosuuntaaja voidaan kytkeä verkkoon ilman erillistä tahdistinta, jos verkko-osa synkronoituu automaattisesti ja kytkeminen ei aiheuta haitallista käynnistysvirtasysäystä. Muutoin sovelletaan synkronigeneraattoreille annettuja arvoja.

13.9 VAIKUTUKSET OHJAUSSIGNAALeihin JA RESONANSSIT VERKON KANSSA

Hajautetun tuotannon yksikkö ei saa aiheuttaa resonansseja verkon kanssa eikä estää ohjauksiin käytettävien signaalien kulkeutumista verkossa. Resonansseja verkon kanssa voivat aiheuttaa esimerkiksi taajuusmuuttajissa käytettävät ulostulosuodattimet.

Saksassa on ohjaussignaaleja koskien annettu vaatimus, jonka mukaan tuotantoyksikkö ei saa heikentää ohjaussignaalia (taajuusalueella 100...1500 Hz) enempää kuin 10-20 % (signaalin nimellisarvosta). Tuotantoyksikön tuottama jännitehäiriö ei saa ylittää arvoa 0,1 % U_n signaalin taajuudella (ja tätä lähellä olevilla taajuuksilla). Taajuuksilla, jotka ovat $\pm 100 \text{ Hz}$ signaalin taajuudesta, jännitehäiriön suuruus täytyy olla alle 0,3 % $x U_n$.

Tulkinnanvaraiseksi jäänee tilanne, jossa usean tuotantoyksikön yhteisvaikutus uhkaa ohjaussignaalin (verkkokäskyohjaus tai signaalipohjainen LoM-suojau) voimakkuutta.

13.10 EPÄSYMMETRiset KYTKENNÄT

1-vaiheisten tuotantoyksiköiden liittäminen 3-vaiheverkkoon vaikuttaa jännitteen epäsymmetriaan. Mikäli 1-vaiheiset laitteet sallitaan, täytyy varmistua siitä, ettei jännitteen epäsymmetria kasva liian suureksi.

Saksassa sallitaan 1-vaiheinen kytkentä enintään 4,6 kVA tehoisille tuotantoyksiköille. Lisäksi mikäli samaan liityntäpisteeseen kytketään useampi 1-vaiheinen laite, täytyy kytkennät jakaa vaiheiden välillä siten, että vaiheiden välillä oleva teho-ero on maksimissaan 4,6 kVA.

13.11 VERKON TUKEMINEN SUOJAUSALUEEN ULKOPUOLISTEN VIKOJEN AIKANA

Hajautetun tuotannon määrän kasvaessa tuotantoyksiköiltä on alettu vaatia vikasetoisuutta eli kykyä pysyä verkossa tietyn aikaa, vaikka jännite ja taajuus poikkeavat normaaliarvojen ulkopuolelle. Esimerkiksi Saksassa siirtoverkkotasolle kytketyiltä tuulipuistoilta E.ON Netz edellyttää tuulivoimaloiden verkossa pysymistä ja näin verkon tukemista, vaikka jännite putoaisi hyvinkin alas. Jakeluverkkotasolla on tyypillisempää vaatia nopea eroonkytkentä kuin edellyttää jännitekuoppasetoisuutta. Ristiriitaiselta vaikuttava tilanne johtunee passiivisten LoM-menetelmien aiheuttamasta nuisance tripping –ongelmasta.

CIGRE:n (2005) raportissa on esitetty näkemys, että tuotantoyksiköt voidaan jakaa kahteen luokkaan:

- yksiköt, jotka irrottautuvat verkosta aina havaitessaan häiriötilanteen ja
- yksiköt, jotka tukevat järjestelmää ja tarjoavat lisäarvopalveluja.

Tietoliikenteeseen perustuvan LoM-menetelmän merkittäviin potentiaalsiin etuihin passiivisiin menetelmiin verrattuna kuuluu mahdollisuus jatkaa tuotantoyksikön toimintaa jännitekuoppien yli.

13.12 EROTUSLAITE

Erotuslaitteen kysymyksiä on tarkasteltu laajemmin tämän raportin luvussa Sähköturvallisuus. Yleinen käytäntö eri maissa on, että verkkoyhtiö edellyttää pienjänniteverkkoon kytketyltä hajautetulta tuotannolta erotuskytkintä, joka on aina verkkoyhtiön ympärivuorokautisesti käytettävissä, lukittavissa ja joka on verkkoyhtiön vaatimusten mukainen. Suomessa erotuskytkimestä on määräyksiä SFS-standardeissa.

13.13 SUOJAUSVAATIMUKSET

Hajautetun tuotannon yksikön suojauskysymykset voidaan jakaa järjestelmän suojaukseen ja tuotantoyksikön sisäiseen suojaukseen. Sisäisen suojauksen vaatimukset riippuvat pitkälti tuotantolaitteen tyypistä ja koosta ja ne katsotaan yleisesti laitteen omistajan tai valmistajan vastuulle kuuluviksi. Tuotantoyksiköillä on kuitenkin vaikutuksia verkon suojaukseen, mistä johtuen tuotantoyksikön suojaus on koordinoitava verkon suojauksen kanssa.

Yleensä hajautetun tuotannon vaikutukset järjestelmän suojaukseen täytyy selvittää tapauskohtaisesti (CIGRE 2005). Tarkastelun kohteita ovat verkon suojauksen herkkyyss ja selektiivisyys. Erityinen osa-alue on eroonkytkentäsuojaus saareketilanteiden estämiseksi.

Keskeisiä suojausvaatimuksia järjestelmän kannalta ovat seuraavat:

- Tuotantoyksikön täytyy lopettaa tehonsyöttö, mikäli verkko, jossa tuotantoyksikkö on kiinni, on vikaantunut.

- Hajautetun tuotannon yksiköiden tulee irrottautua jälleenkytkennän jännitteettömänä aikana. Vaatimus eroonkytkentäajasta on syytä asettaa tiukemmaksi kuin jälleenkytkennän väliaika, jotta valokaaren sammumiselle ja ionisoituneen valokaarikanavan poistumiselle jää riittävästi aikaa.
- Vikatilanteen jälkeen tapahtuva takaisinkytkentä voidaan sallia vasta, kun verkon taajuus ja jännite ovat olleet tiettyjen rajojen sisällä tietyn aikaa. Vianselvityksen tulisi siis olla jollakin todennäköisyydellä ohitse. Näin ollen vältyttäisiin tuotantoyksikön turhilta irrottautumisilta ja takaisinkytkennöiltä.
- Takaisin verkkoon kytkeytyminen on toteutettava tahdistetusti.
- Tuotantoyksikön on kytkeydyttävä irti verkosta, jos taajuus ja jännite eivät ole asetelluissa rajoissa. Eroonkytkentäaika riippuu järjestelmän tarpeista ja liittyy LoM-suojaukseen. Erityisesti suuremmilta tuotantoyksiköiltä voidaan edellyttää verkossa pysymistä esimerkiksi jännitekuoppien aikana.

Suojauskoordinaatiosta huolehtiminen kuuluu verkkoyhtiön vastuulle, joten jos jakeluverkkoon kytkettävän tuotannon määrää ei voida rajoittaa, verkko-operaattorin on tarvittaessa muutettava verkon suojausta esimerkiksi verkon suojauksen asetteluarvoja tai suojausratkaisuja muuttamalla. Lähtökohtana tuskin voidaan pitää sitä, että verkkoon kytkettävä tuotanto ei saa aiheuttaa mitään muutostarpeita verkon käytössä olevaan suojaukseen. Verkon suojaus täytyy siis mukauttaa hajautetun tuotannon aiheuttamiin vaikutuksiin asettaen kuitenkin myös hajautetulle tuotannolle selkeästi määritellyt suojausvaatimukset.

14 SUOJAUSKONSEPTEISTA

14.1 YLEISTÄ SUOJAUKSEN MUUTOSTARPEISTA

Vaikka hajautettu tuotanto saattaa kääntää tehon virtaussuunnan vastakkaiseksi, sen vaikutuksesta verkkojen suojaukseen ei yleensä tarvita mullistavia muutoksia. Suojausjärjestelmä monimutkaistuu, mutta suuri osa tarvittavista muutoksista on toteutettavissa olemassa olevalla tekniikalla ja suojausten asetteluarvojen tarkistuksella.

14.2 SUOJAUSKONSEPTI KESKIJÄNNITEVERKOILLE

14.2.1 Tarkastelunäkökulma

Seuraavassa tarkastellaan keskijänniteverkkojen suojausta lähtien nykyisten suojausratkaisujen muutostarpeesta, joka aiheutuu hajautetun tuotannon verkkoon kytkeytymisestä. Esitetyistä yksittäisistä ratkaisuista on koottavissa suojauskonseptikokonaisuus. Tarkastelut koskevat erityisesti suomalaisen käytännön mukaista maasta erotettua verkkoa tai keskitetysti kompensoitua verkkoa, mutta pääosa niistä on sovellettavissa suoraan esimerkiksi tähtipisteestään maadoitetuille verkoille, koska niissä ongelmat ovat pitkälti samoja.

Lähtötilanteeksi oletetaan verkolla olevan perinteinen suojausjärjestelmä, jonka pääpiirteet ovat seuraavat:

- suuntaamattomat ylivirtareleet oikosulkusuojina
- suunnatut maasulkureleet maasulkusuojina
- jälleenkytkentää käytetään ilmajohto- ja sekaverkossa
- sähköaseman kiskosuojaus toteutettu seuraavasti:
 - ylivirtasuojaus suuntaamattomalla ylivirtareleellä, joka toimii samalla lähtöjen releiden varasuojana
 - maasulkusuojaus U_0 -releellä, jonka toimii lähtöjen maasulkusuojausten varasuojana
 - kisko-oikosulkusuojausta on täydennetty valokaarireleellä, jossa on virtaehto.

14.2.2 Suojauksen muutostarpeita ja mahdollisuuksia

Suojauskonseptin määrittelyyn vaikuttavat hajautetusta tuotannosta aiheutuvat potentiaaliset ongelmat ja ratkaisuvaihtoehtojen kuvaukset on esitetty seuraavassa luettelossa. Keskeinen suojauksen kehitystarve, eroonkytkentäsuojaus, jonka

ratkaiseminen selvittää useita ongelmia, on käsitelty lopuksi yksityiskohtaisemmin. Seuraavassa on lueteltu muutostarpeet ja esitetyt ratkaisut.

1. Johtolähdön tarpeeton laukeaminen viereisen johtolähdön viassa omalle johtolähdölle kytketyn tuotannon syöttämän oikosulkuvirran vaikutuksesta

- Suunnattu ylivirtarele laukaisee lähdön vain, jos vikavirta kulkee lähdölle päin.

2. Takasyöttö lähdöiltä kiskoviassa, kun kiskosuoja laukaisee vain syöttökatkaisijan.

- Siirtolaukaisu johtolähtöjen katkaisijoille. Kiskosuojana toimiva valokaarirele tai ylivirtarele antaa laukaisukäskyn myös kaikkien johtolähtöjen katkaisijoille.

3. Suojauksen toiminnan estyminen (aliulottuma) hajautetun tuotannon syöttämän vikavirran pienentäessä lähdön releen näkemää vikavirtaa.

- Välikatkaisija johtolähdölle. Välikatkaisijan avulla selvitetään johdon loppupään viat. Esimerkiksi kauko-ohjattavien erotinasemien tehoerottimet voidaan korvata kevyillä, recloser-tyyppisillä katkaisijoilla. Samalla sähkön luotettavuus paranee.
- Suuntaaja liitälaitteena. Suuntaaja tuottaa oikosulkuvirtaa tyypillisesti enintään kaksi kertaa nimellisvirtansa verran.

4. Tuotantoyksikön tarpeeton laukeaminen

- Selektiivinen eroonkytkentäsuojaus ei laukaise tuotantoyksikköä viereisen johtolähdön viassa.

5. Jälleenkytkennän epäonnistuminen hajautetun tuotannon jatkaessa virran syöttämistä vikaan

- Selektiivinen eroonkytkentäsuojaus. Jatkuvuussignaaliin perustuva suojaus kytkee hajautetun tuotannon nopeasti irti verkosta. Erityinen hyöty muihin menetelmiin verrattuna on Dyn-kytkettyjen jakelumuuntajien taakse pienjänniteverkkoon kytkettyjen yksiköiden eroonkytkentä kj-verkon maasulussa. Ennen tietoliikennepohjaisten menetelmien käyttöönottoa suuret, omalla muuntajalla kytketyt yksiköt voidaan varustaa U_0 -suojauksella, jonka aikahidastus on koordinoitava lähtöjen suojauksen kanssa.
- Älykäs adaptiivinen jälleenkytkentä, ts. jälleenkytkennän väliajan määräytyminen releen analysoiman virtatiedon perusteella. Potentiaalinen tulevaisuuden ratkaisu.

6. Epätahdissa tapahtuva jälleenkytkentä

- Synchronism check –rele sähköasemalla estää tahdistamattoman jälleenkytkennän. Saattaa yhdessä hajautetun tuotannon kanssa johtaa

onnistuneiden jälleenkytkentöjen vähenemiseen, mikä tarkoittaa käyttövarmuuden heikkenemistä.

- Nopea eroonkytkentäsuojaus tuotantoyksiköllä (varasuojana synchro-check). Ennen mahdollista tietoliikennepohjaista ratkaisua voitaneen käyttää esimerkiksi ROCOF-releitä eroonkytkentäsuojana täydentämässä jännite- ja taajuusreileillä toteutettua perussuojauksia.
- Pikajälleenkytkennän väliajan pidentäminen pienentää epätahdissa tapahtuvan jälleenkytkennän riskiä; adaptiivinen jälleenkytkentä saattaa eliminoida ongelman kokonaan.

7. Verkon maadoitustavan muuttuminen lähdön lauetessa saarekkeeksi ja siitä seuraavat kosketusjänniteongelmat

- Nopea eroonkytkentäsuojaus. Tietoliikenteeseen perustuvat ratkaisut voivat olla tehokkaita myös pienjänniteverkkoon kytketyn hajautetun tuotannon yhteydessä.

8. Eroonkytkentäsuojaus

- ROCOF- ja vector shift –menetelmillä päästään melko kattavaan suojaukseen. Ennen kuin parempia menetelmiä on markkinoilla saatavilla, esim. ROCOF-rele voitaneen asettaa vaatimukseksi tuotantoyksiköille tavanomaisen jännite- ja taajuussuojauksen ohella. Ongelmiksi jäävät katvealue, tuotantoyksiköiden tarpeettomat laukaisut sekä kysymys siitä, miten pieniltä yksiköiltä suoja tulee vaatia.
- Jatkuvuussignaaliin perustuva eroonkytkentäsuojaus on hyvin potentiaalinen yleispäteväksi ratkaisuksi.

14.3 PIENJÄNNITEVERKON SUOJAUKSEN MUUTOSTARPEITA

Pienjänniteverkkojen sulakkeisiin perustuvaa suojaukskonseptia ei tarvitse radikaalisti muuttaa hajautetun tuotannon vuoksi. Koska hajautettu tuotanto vaikuttaa vikavirtoihin, on varmistettava, että suojaus toimii kaikissa tilanteissa. Nykyisin käytettävissä olevilla suunnittelutyökaluilla tämä lienee kuitenkin vaikeaa.

Hajautettu tuotanto voi aiheuttaa pienjänniteverkossa suojauksen sokaistumisen samaan tapaan kuin keskijänniteverkossa. Tämä voidaan ratkaista välisulakkeilla, jotka tosin joissakin tapauksissa voivat vähentää suojausjärjestelmän selektiivisyyttä. Kun otetaan huomioon pienjänniteverkon pieni asiakasmäärä keskijänniteverkkoon verrattuna, välisulake on kuitenkin kustannustehokas ratkaisu.

Hajautettu tuotanto voi joissakin tilanteissa aiheuttaa verkon sulakkeen tarpeettoman toiminnan, mutta tällaisen ongelman todennäköisyys lienee pieni ja vaikutuksetkin vähäisiä.

Tuotantoyksiköiden tarpeetonta laukeamista jännitekuopissa voidaan ehkäistä alijännitelaukaisun aikahidastuksella. Asetteluja määrittelyssä on kuitenkin otettava huomioon eroonkytkentäsuojauksen vaatimukset. Jatkuvuussignaaliin perustuvaa suojausta käytettäessä suojaus voitaneen saada riippumattomaksi jännitteestä.

Pienjänniteverkkoon kytkettyjen tuotantoyksiköiden vaikutuksia arvioitaessa on otettava huomioon pienten yksiköiden yhteisvaikutus tai niiden toiminta suurempien tuotantoyksiköiden rinnalla.

Erityisen tärkeissä pienjänniteverkoissa suojaus voidaan toteuttaa suojareleiden ja katkaisijan avulla sulakkeiden sijasta, kuten jo nyt toteutetaan monissa teollisuuden verkoissa ja 1 kV:n jakeluverkoissa. Microgrid-tekniikoista voi pitkällä aikavälillä kehittyä käyttökelpoinen ratkaisuvaihtoehto keskeytymätöntä sähkönsyöttöä edellyttävälle verkoille.

14.4 SUOJAUSTEKNIIKAN MAHDOLLISUUKSIA

Tulevaisuuden jakeluverkoilta kaikkialla odotetaan maailmassa todennäköisesti selvästi nykyistä parempaa luotettavuutta. Luotettavuuden parantamisessa suojaustekniikalla ja verkostoautomaatiolla on merkittävä rooli verkon rakenteellisten ratkaisujen ohessa.

Suomessa on jo käynnissä verkkojen luotettavuutta parantavien ratkaisujen käyttöönotto ja pilotointi. Tällaisia ratkaisuja, joista monista löytyy pitkäaikaisia käyttökokemuksia muista maista, ovat esimerkiksi seuraavat:

- kevyet sähköasemat jakavat verkon pienempiin suojausalueisiin ja pienentävät samalla riskiä hajautetun tuotannon aiheuttamasta suojauksen aliulottumasta.
- välikatkaisijat, joko yksittäiset, mahdollisesti pylvääseen sijoitettavat tai katkaisija-asemille sijoitettavat, samoin jakavat verkon pienempiin suojausalueisiin.
- 1 kV:n järjestelmä muodostaa sekin oman suojausalueensa, lisäksi 1 kV:n AMKA-johto vähentää 20 kV:n avojohtoa korvatesaen verkon alttiutta häiriöille.
- vianilmaisimet, erityisesti kauko-ohjattujen kytkinlaitteiden yhteydessä.

Sähkönjakelun luotettavuus paranisi olennaisesti, jos runkojohdot olisivat erittäin käyttövarmoja, ja haarajohtojen viat eivät häiritsisi muuta verkkoa. Haarajohdon alkuun sijoitettava kevyt katkaisija suojaisi muun verkon haarajohdon vioilta, jolloin yksittäisen vian vaikutusalue pienenesi ratkaisevasti. Katkaisijaa edullisempi ratkaisu olisi vianilmaisimella varustettu kauko-ohjattava erotin, mutta sitä käytettäessä huomattavasti suurempi joukko asiakkaita kärsisi kytkentäajan pituisen keskeytyksen. Todennäköistä on, että nykyisen sähköasemalle keskittyneen suojauskonseptin sijaan alkaa tietoliikennemahdollisuuksien ja kytkinlaitetekniikan kehittymisen myötä myös Suomessa kehittyä hajautettu suojauskonsepti.

Hajautetun tuotannon yleistyessä ja verkkojen muuttuessa passiivisista verkoista aktiivisiksi syntyy tarvetta verkkojen hallintajärjestelmien laajentamiselle. Hajautetun energijärjestelmän hallintakonseptia on hahmoteltu PAREE-hankkeessa (Valkonen et al. 2005). Samankaltaista visiointia verkon hallinnan, säädön ja automaation merkityksen korostumisesta on esitetty EU:n SmartGrids-hankkeen suunnitelmassa (European Commission 2006). Provoostin (Provoost 2006) näkemyksen mukaan suojaus ja ohjaukset hoidetaan tulevaisuudessa erillislaitteiden sijasta yhdellä sähköasemakohtaisella integroidulla laitteella.

Sähkönjakelujärjestelmien pitkän aikavälin visioissa ennakoitaan, että varsinaisen sähköjärjestelmän rinnalle kehittyy asiakkaille asti ulottuva kaksisuuntainen tietoliikenneinfrastrukturi, joka palvelee sekä teknisiä että kaupallisia tarpeita (European Commission 2006, EPRI 2006). Tällaiset ratkaisut tekevät mahdolliseksi Wide Area Protection –tyyppiset ratkaisut myös jakeluverkoissa.

15 JATKOTUTKIMUSTARPEET

15.1 VERKKOON LIITTÄMISEN SUOSITUKSET JA SUUNNITTELUTYÖKALUT

Tutkimuksessa on simuloinnein osoitettu potentiaalisia ongelmia, joita hajautettu tuotanto voi aiheuttaa. Tarkkoja rajoja sille, milloin ongelmia esiintyy, on vaikea esittää. Verkoston suunnittelua varten tarvittaisiin kuitenkin käytännön tilanteita varten käytännöllisiä teknisiä ohjeita tai suosituksia hajautetun tuotannon verkkoon liittämisestä sekä laskentatyökaluja tuotantoyksiköiden vaikutusten analysoimiseksi. Kansallisten suositusten kehittämisen pohjaksi löytyy muualta maailmasta runsaasti aineistoa. Sen sijaan verkkotietojärjestelmien laskentamenetelmien kehittäminen lienee vaativampi tehtävä mm. tuotantoyksiköiden mallintamisen sekä dynaamisten ilmiöiden laskentatarpeen vuoksi. Käytännön työkaluiksi riittänevät lähivuosina yksinkertaistettuihin malleihin perustuvat laskentaohjelmat.

15.2 KÄYTÄNNÖN KOHTEN TARKASTELU SIMULOINNEIN JA MITTAUKSIN

Suosituksen ja ohjeiden kehittämistä tukisi käytännön kohteen simulointeihin ja käytännön mittauksiin perustuva tutkimus, jonka avulla olisi mahdollista myös verrata simulointitulosten ja käytännön vastaavuutta. Projektissa tulisi tarkastella verkon, sen suojausten ja hajautetun tuotannon yksiköiden käyttäytymistä erilaisissa vika-, kytkentä- ja kuormitustilanteissa.

15.3 SIGNAALIPOHJAISEN LOSS-OF-MAINS -RATKAISUIDEAN JATKOKEHITYS

Tutkimuksen päätuloksiin kuuluvaa LoM-ratkaisuehdotusta lienee syytä kehittää edelleen ja arvioida sen kaupallisia ja teknisiä toteuttamismahdollisuuksia.

15.4 SAAREKEKÄYTÖT JA VARAVOIMAKYSEMYKSET

Microgrid-konseptia ja tarkoituksellista saarekekäyttöä tutkitaan maailmalla laajasti. Tässä kehitystyössä suomalaisella tehoelektroniikka-, säätö- ja suojausteknisellä osaamisella ja tärkeissä kohteissa jo käytössä olevan tekniikan soveltamisella on todennäköisesti pitkällä aikavälillä potentiaalia.

15.5 1 kV:N JÄRJESTELMÄ

Tässä tutkimuksessa ei ole tarkasteltu hajautetun tuotannon vaikutuksia 1 kV:n järjestelmään kytkettynä. 1 kV järjestelmien yleistyessä myös niiden ja hajautetun tuotannon vuorovaikutus kannattanee selvittää.

15.6 HAJAUTETUN TUOTANNON VAIKUTUS LASKENNALLISEEN VIANPAIKANNUKSEEN JA VIANILMAISINTEN TOIMINTAAN

Hajautettu tuotanto vaikuttaa verkossa esiintyviin vikavirtoihin, joten sillä voi olla vaikutusta laskennallisen vianpaikannuksen tarkkuuteen sekä vianilmaisinten toimintaan. Erityinen haaste voi aiheutua hajautetun tuotannon vaihtelusta, koska tuotantoyksiköt voivat olla kytkettyinä tai poissa verkosta.

15.7 STANDARDIVERKKOMALLEIHIN PERUSTUVAT SUOJAUKSEN SIMULOINTIDEMONSTRAATIOALUSTAT

Suomalaisten tuotteiden menestystä vientimarkkinoilla edistäisi todennäköisesti se, että laitteiden ja järjestelmien toimivuus olisi demonstroitavissa simuloinnin keinoin. Demonstraatiot olisivat uskottavampia, jos niissä hyödynnettäisiin vertailukelpoisia standardiverkkomalleja, kuten IEEE Test Feeders tai CIGRE Benchmarking Models. Mallien kehittäminen ja simuloinneissa saatavien tulosten vertailu muiden saamien tulosten kanssa edistää myös suomalaisen tutkimuksen kansainvälistymistä ja verkottumista.

Lähteet

Abi-Samra, N.: *Electric Power Distribution in Northern America. A Survival Guidebook*. EPRI Solutions, 2005.

Affonso, C.M., Freitas, W., Xu, W., da Silva, L.C.P.: *Performance of ROCOF relays for embedded generation*. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 152, No 1, January 2005.

Al-Nasseri, H., Redfern, M. A. & O'Gorman, R.: *Protecting Micro-grid Systems containing Solid-State Converter Generation*, Proc. Future Power Systems 2005 Conference, Amsterdam, Netherlands, November 16-18, 2005.

Apostolov, A.P.: *Improving power quality by optimizing the protection of distribution systems*. Developments in Power System Protection, 5-8 April, Amsterdam, 2004. p. 595-598.

Areva: *Network Protection & Automation Guide*. Generator and Generator Transformer Protection, 2002. Available at <http://www.areva-td.com/> (6.9.2004)

Audring, D., Balzer, G., Schmitt, O., Wildenhain, A.: *Impact on power system by fuel cells supplying residential buildings*. Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto, Volume: 4 , 10-13 Sept. 2001 Pages:6 pp. vol.4.

Autio, K.: *Maasulkuvirran kompensointi*. Seminaariesitys. Ylläpitoinvestoinneilla käyttövarmuutta ja laadukasta sähköä, Adato Energia Oy, 13.-14.12.2005, Vaasa.

Barker, P.: *Overvoltage considerations in applying distributed resources on power systems*. Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE , Volume: 1 , 21-25 July 2002 Pages:109 - 114 vol.1

Belhomme, R., Corenwinder, C.: *Wind Power Integration in the French Distribution Grid Regulations and Network Requirements*. Nordic Wind Power Conference, 1-2 March, 2004, Chalmers University of Technology.

Beddoes, A.: *Loss of Mains protection relay performances when subjected to network disturbances / events*. CIRED 2005, 18th International Conference on Electricity Distribution, Turin, 6-9 June 2005.

Beddoes, A.: *The needs of a 'Future Distribution Network' to embrace increasing levels of Distributed Generation*. European Distribution Grid Reliability Forum, 9-10th February 2006, Stockholm.

Benato, R., Caldon, R., Cesena, F.: *Carrier signal-based protection to prevent dispersed generation islanding on MV systems*. CIRED 2003, Barcelona 12-15 May, 2003.

Benato, R., Caldon, R., Cesena, F.: *Application of Distribution Line Carrier-based protection to prevent DG islanding: an investigation procedure*. IEEE PowerTech Conference, 23-26 June 2003, Bologna, Italy.

Bergman, S.: *Visions of future Distribution Systems*. Conference Publication No. 438, CIRED 97, 2-5 June 1997, IEE.

Bower, W., Ropp, M.: *Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utility-interactive power systems*. Report IEA PVPS T5-09: 2002.

Bronfeld, J.D.: *Ferroresonant Overvoltages Associated with Utility Interconnection of Independent Power Producers*. Proceedings of the 1988 IEEE Southern Tier Technical Conference, 19 Oct. 1988. Pages: 22 – 33.

BSCE: *Technical Guide for Connection of Renewable Generators to the Local Electricity Network*. Australian Business Council for Sustainable Energy, August 2004.

Bässman, R.: Sähköpostiviesti 1.6.2006.

Caire, R.; Retiere, N.; Martino, S.; Andrieu, C.; Hadjsaid, N.: *Impact assessment of LV distributed generation on MV distribution network*. Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, Volume 3, 21-25 July 2002. pp. 1423-1428.

Caire, R., Tran-Quoc, T., Andrieu, C., Martino, S.: *Case studies on the operating of 20 kV distribution networks with large scale low-voltage dispersed generators*. CIRED 17th International Conference on Electricity Distribution, Barcelona, 12-15 May 2003.

Caldon, R., Scala, A., Turri, R.: *Grid-connected dispersed generation: investigation on anti-island protections behaviour*. First International Symposium on Distributed Generation: Power System and Market Aspects, Stockholm 2001.

Calero, F.: *Rebirth of negative-sequence quantities in protective relaying with microprocessor-based relays*. Schweitzer Engineering Laboratories, Technical Paper 6155. Available at <http://www.selinc.com/techpprs/6155.pdf> (23.4.2004)

Castro-Sayas, F., Clarke, G.D.: *The costs and benefits of embedded generation islanding operation*. Report Number K/EL/00284/REP. DTI/Pub URN 02/1531. 2002. Available at <http://www.dti.gov.uk/energy/renewables/publications/pdfs/kel00284.pdf> (4.10.2004)

CENELEC: *European Standard (EN) - Requirements for the connection of micro-generators in parallel with public low-voltage distribution networks*. CLC/TC8XWG2, prEN50438, August 17th, 2005.

Chilvers, I.M., Jenkins, N., Crossley, P.A.: *The use of 11 kV distance protection to increase generation connected to the distribution network*. Developments in Power System Protection, Amsterdam, 5-8 April 2004. IEE.

Chilvers, I.: Sähköpostiviesti 30.7.2004.

CIGRE, Task Force C6.04.01: *Connection criteria at the distribution network for distributed generation*. Draft, October 2005.

Cook, C.: *Interconnected PV – The Utility Accessible External Disconnect Switch*. Available at <http://www.e3energy.com/Extdisc.doc> (11.05.2004)

Cooper Power Systems: *Multifunction Overcurrent Relay, IM30DRE Feeder Protection Relay*. Brochure. 1998. Available at <http://www.cooperpower.com/Library/pdf/15015.pdf> (22.1.2004)

Crossley, P.: *Protection of Distribution Networks with Distributed Generation*. IEE Seminar on Stability of Distributed Generation, 2003.

Davis, M., Costyk, D., Narang, A.: *Distributed and Electric Power System Aggregation Model and Field Configuration Equivalency Validation Testing*. NREL 2003.

Ding, X., Crossley, P.A., Morrow, D.J.: *Protection and control of networks with distributed generators capable of operating in islanded mode*. Proceedings of Developments in Power System Protection, IEE, Amsterdam 5-8 April 2004. Page(s):567 – 570.

DTI Centre for Distributed Generation and Sustainable Electrical Energy: *Novel Methods for Active Distribution Networks with High Levels of Distributed Generation*. Poster, Workshop 18 October, 2005.
<http://www.sedg.ac.uk/Workshop%2018%20Oct%202005/Poster%20-%20Active%20Distribution%20Networks.pdf>
(27.3.2006)

Dugan, R.C., McDermott, T.E.: *Distributed Generation. Operating conflicts for distributed generation interconnected with utility distribution systems*. IEEE Industry Applications, Mar/Apr 2002.

Dugan, R.C.: *Power Quality Impacts of Distributed Generation*. Tennessee Tech., February 9, 2004. Available at www.ece.tntech.edu/hexb/research/TnTech2004.ppt (4.8.2004)

Econnect: *Assessment of islanded operation of distribution networks and measures for protection*. DTI/Pub URN 01/1119. DTI, 2001.

EPRI: <http://www.epri.com/IntelliGrid/> (7.6.2006)

ESB Networks: *Conditions Governing Connection to the Distribution System: Connections at MV and 38kV, Embedded Generators at LV, MV and 38kV*. ESB Networks, September 2003.

EU: *DIRECTIVE 2001/77/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of September 27 2001 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market*. European Commission, European SmartGrids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. EUR 22040, 2006.

Fanning, R.: *Distribution Vision 2010: Planning for Automation*. Power Engineering Society General Meeting, IEEE, June 12-16 2005.

Feero, W.E., Dawson, D.C. & Stevens, J.: *White Paper on Protection Issues of The MicroGrid Concept*. Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, 2002, 24 s.

Finney, D., Kasztenny, B., Adamiak, M.: *Generator Protection Needs in DG Environment*. GE Power Management 2003. Available at <http://pm.geindustrial.com/FAQ/Documents/G60/GER-4003.pdf> (12.1.2004)

Finney, D., Kasztenny, B., Adamiak, M.: *Generator Protection Needs in DG Environment*. Power Systems 2002 Conference: Impact of Distributed Generation, March 13-15, 2002, Ramada Inn, Clemson, SC
Available at <http://www.ces.clemson.edu/powsys2002/ppt/presens.htm> (27.10.2004)

Freeman, L., van Zandt, D.T., Powell, L.J.: *Using a probabilistic design process to maximize reliability and minimize cost in urban central business districts*. CIRED 2005, 18th International Conference on Electricity Distribution, Turin, 6-9 June 2005.

Freitas, W., Xu, W.: *False Operation of Vector Surge Relays*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 19, No 1, January 2004.

Freitas, W., Xu, W., Affonso, C.M., Huang, Z.: *Comparative Analysis Between ROCOF and Vector Surge Relays for Distributed Generation Applications*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, April 2005, pp 1315-1324.

Frismoose Jensen, S.: *Impact of use of Distributed Energy Resources. A Danish Case Study*. Substation Automation Conference, 22-23 May, 2006

Gomez, J.C., Tourn, D.H, Amatti, J.C.: *Experimental determination of the reclosing time self-extinguish current for its application to distributed generation – reclosers coordination studies*. CIRED, Barcelona 12-15 May, 2003.

Hakola, T.: *Yksi laite, monta tehtävää*. Esitelmä, ABB:n suojareleiden 40/20-vuotisjuhlaseminaari, Vaasa. 2005.

Hamilton, K.: *Renewables their integration and the need for what are called – active power zones*.
http://www.iee.org/OnComms/PN/powersysequip/KeithHamilton_PnB.pdf (27.3.2006)

Hansson, B.: *Improving the security of supply to meet with customers' demands*. European Distribution Grid Reliability Forum, 9-10 February 2006, Stockholm.

Hatziargyriou, N., Strbac, G.: *Microgrids – A Possible Future Energy Configuration*. IEA Seminar “Distributed Generation: Key issues, challenges, roles”, Paris 1st March, 2004. Available at <http://www.iea.org/dbtwwpd/Textbase/work/2004/distgen/Hatziargyriou.pdf> (4.10.2004)

Heine, P., Lehtonen, M.: *Measured faults in an unearthed medium voltage network*. Nordic Distribution and Asset Management Conference, Espoo, 23-24.8.2004.

Helsingin Energia: *Ohjeet sähköä tuottavan laitteiston liittämiseksi Helsingin Energian sähköjakeluverkkoon*. Helsingin Energia 2006. <http://www.helsinginenergia.fi/sahko/urakointiohjeet/SU60806.pdf> (2.5.1006)

Helsingin Energia: *Estokelalla varustettujen loistehon kompensointilaitteiden viritystaajuus Vantaan Energia Oy:n jakeluverkossa*. <http://www.helsinginenergia.fi/sahko/urakointiohjeet/SU7032003.doc> (2.5.2006)

Herman, D.: *Integrating Distributed Generation into the Electric Distribution System*. EPRI PEAC, 2003.

Hindle, P. J., Chapman, K.G.: *Conventional directional overcurrent & earth fault protection – not always straightforward*. Developments in Power System Protection, Conference Publication No 479, IEE 2001. pp. 543..546

Horgan, S., Iannucci, J., Whitaker, C., Cibulka, L., Erdman, W.: *Assessment of the Nevada Test Site as a Site for Distributed Resource Testing and Project Plan*. NREL/SR-560-31931, 2002.

Huber, R. L.: *Distribution Vision 2010*, New Berlin Pilot. New Berlin Pilot Customers, November 20, 2003. http://www.newberlin.org/ImageLibrary/Public/Planning/EconDev/DV2010_New_Berlin_11-20-03_presentation_.pdf (3.5.2006).

IEC 61400-21: *Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines*. International Electrotechnical Commission, 2001.

IEEE: 1547TM. *IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*. IEEE Standards Coordinating Committee 21, 2003.

IEEE: <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html> (5.5.2006)

Igarashi, H., Kurokawa, K., Suenaga, S., Sato, T.: *About the Influence on the Islanding Detection Device by the Difference in the Motor Load*. 15th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-15), Shanghai, China, 2005.

Jang, S.-I., Kim, K.-H.: *An Islanding Detection Method for Distributed Generations Using Voltage Unbalance and Total Harmonic Distortion of Current*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 19, No 2, April 2004.

Jarrett, K., Hedgecock, J., Gregory, R., Warham, T.: *Technical guide to the connection of generation to the distribution network*. K/EL/00318/REP, DTI/UK, 2004.

Jauch, C., Sorensen, P., Bak-Jensen, B.: *International Review of Grid Connection Requirements for Wind Turbines*. Nordic Wind Power Conference – 2004: Grid Integration and Electrical Systems of Wind Turbines and Wind Farms. Chalmers University of Technology, Göteborg, 1-2 March 2004.

Jayawarna, N., Jenkins, N., Barnes, M., Lorentzou, M., Papthanassiou, S. & Hatziargyriou, N.: *Safety Analysis of a Microgrid*. Proc. Future Power Systems 2005 Conference, Amsterdam, Netherlands, November 16-18, 2005

Jeraputra, C., Enjeti, P.N., Hwang, I.H.: *Development of A Robust Anti-Islanding Algorithm for Utility Interconnection of Distributed Fuel Cell Powered Generation*. IEEE Transactions on Power Electronics. Volume 19, Issue 5, Sept. 2004.

Johnson, M.: *Current Solutions: Recent Experience in Interconnecting Distributed Energy Resources*. NREL/SR-560-34864, 2003.

IEC TC 77A: *Low Frequency Phenomena*. Committee draft for vote, 2000.

Kauhaniemi, K., Kumpulainen, L.: *Impact of distributed generation on the protection of distribution networks*. Developments in Power System Protection, Amsterdam, 5-8 April, 2004. (2004-1)

Kauhaniemi K., Ristolainen, I., Saari, P., Långland, H., Salminen, H.J., Hokkanen, M., Brännbacka, B.: *Simulointiympäristö. Väliraportti 2. Vaasan yliopisto*, 2004. (2004-2)

Khoroshev, M., Faybisovich, V.: *Analysis of Adaptive Single Phase Autoreclosing for High Voltage Transmission Lines with Various Compensation Levels*. IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, New York 10-13 October, 2004.

Kjaergaard, J.P.: E-mail 17.05.2004.

Kjolle, G.: *The Cost of Energy not Supplied (CENS) model for incentive based regulation of supply quality*. European Distribution Grid Reliability Forum, 9-10 February 2006, Stockholm.

Kumpulainen, L., Hautala, J., Kauhaniemi, K.: *Teollisuuden jännitekuoppien lievennysmahdollisuuksia suojausteknisin keinoin*. TESLA-raportti 63/2002, 2002.

Laaksonen, H., VTT Tutkimus ja kehitys. Keskustelu 15.5.2006.

Lemström, B.: *Network Impact of a Wind Farm – an Interesting Case*. Distributed Generation related Power System Behaviour, NEFP Seminar, 24.-25. April 2002, Vaasa. Available at <http://www.uwasa.fi/itt/teti/sahko/NEPF/> (30.9.2004)

Lindqvist, C.: *Securing the electricity supply in the rural area distribution networks*. European Distribution Grid Reliability Forum, 9-10 February 2006, Stockholm.

Lågland, H.: *Keskijänniteverkkojen analyysi mallintamista varten*. Diplomityö, Vaasan yliopisto, 2004.

Malins, A.: *Demand Side Developments*. Operational Forum 5th March 2003. Available at http://www.nationalgrid.com/uk/indinfo/balancing/pdfs/demand_side_developments032003.pdf (10.11.2004)

Marnay, C., Bailey, O.C.: *The CERTS Microgrid and the Future of the Macrogrid*. Energy Analysis Department. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California Berkeley, 2004.

Matevosyan, J., Ackermann, T., Bolik, S., Söder, L.: *Comparison of International Regulations for Connection of Wind Turbines to the Network*. Nordic Wind Power Conference – 2004: Grid Integration and Electrical Systems of Wind Turbines and Wind Farms. Chalmers University of Technology, Göteborg, 1-2 March 2004.

Melzer, H., Sähköpostiviesti 22.12.2005.

Metzger, C., Nestle, D.: *Einsatz von Ersatzversorgungsanlagen in Niederspannungsnetzen mit dezentraler Energieerzeugung*. Elektrizitätswirtschaft Jg 104 (2005), Heft 5.

Microgrids: <http://microgrids.power.ece.ntua.gr/micro/index.php> (8.5.2006)

Minne, F.: Extract_C10_11_laborelec.doc. EnirDGnet-projektin työpaperi, Laborelec, Belgia, 2004.

Mäki, K., Järventausta, P., Repo, S.: *Tuulivoimaan perustuvan hajautetun sähköntuotannon vaikutus keskijänniteverkon suojaukseen*. TTY, raportti 4-2003.

Mäki, K., Repo, S., Järventausta, P.: *Protection issues related to distributed generation in a distribution network using ring operation mode*. Nordic Wind Power Conference, 1-2 March 2004, Chalmers University of Technology.

Mörsky, J.: *Relesuojaustekniikka*. Otakustantamo, no. 154. 1993. 549 s.

Nielsen, J.E.: *Analysis of how large scale DG affects network business*. CODGUNet project report, Eltra, 2003.

Nikander, A.: *Keskijänniteverkon maasulkuvirran kompensoinnin kehittäminen maasulkukokeiden ja EMTP-verkkomallin avulla*. Lisensiaatintyö, TTKK, 1998.

O’Kane, P.O., Fox, B.: *Loss of mains detection for embedded generation by system impedance monitoring*. Developments in Power System Protection, 25-27th March 1997, Conference Publication no. 434, IEE, 1997.

Ottosson, H., Akkermans, H. (editors): *State of the Art and Initial Analysis of PLC Services*. Deliverable D5, PALAS – Powerline as an Alternative Local Access, IST-1999-11379, June 28, 2000. Available at <http://www.enersearch.se/palas/D5.pdf> (2.11.2004)

Papathanassiou, S., Hatziargyriou, N., Strunz, K.: *A benchmark low voltage microgrid network*. CIGRE Symposium: Power Systems with Dispersed Generation, Athens, Greece, April 2005.

Pecas Lopez, J.A., Tomé Saraiva, J., Hatziargyriou, N., Jenkins, N.: *Managament of MicroGrids*. JIEEC, Bilbao, 28-29 October 2003.

Pedersen, J.K., Akke, M., Poulsen, N.K., Pedersen, K.O.: *Analysis of Wind Farm Islanding Experiment*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 15, No 1, March 2000.

Pihala, H., Tuomela, J., Kärkkäinen, S.: *Pienten varavoimakoneiden käyttö sähkön huipputehon leikkauksessa*. VTT Tutkimuksia, 732, 1991. 135 s.

Prikler, L., Kizilcay, M., Bán, G., Handl, P.: *Improved secondary arc models based on identification of arc parameters from staged fault test records*. Proceedings of 14th Power Systems Computation Conference (PSCC), Sevilla 24-28 June 2002.

Provoost, F.: *Intelligent Distribution Systems*. Substation automation conference, Amsterdam, May 22, 2006.

Redfern, M.A., Brown, D., Bartlett, M.G.: *Detecting loss of earth for embedded generation*. Developments in Power System Protection, Conference Publication No 479, IEE 2001. pp. 90..93

Riihimäki, V.: Puheenvuoro projektin johtoryhmän kokouksessa 31.5.2004.

Ropp, M.E.; Aaker, K.; Haigh, J.; Sabbah, N.: *Using power line carrier communications to prevent islanding [of PV power systems]*. Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE , 15-22 Sept. 2000.

Ropp, M., Bonn, R., Gonzalez, S, Whitaker, C.: *Investigation of the Impact of Single-phase Induction machines in Islanded Loads, Summary of Results*. Sandia Smart Anti-Islanding Project. SAND2002-1320, 2002.

Ropp, M.E. Sähköpostiviesti 12.2.2004.

S&C Electric Company: <http://www.sandc.com/> (4.5.2006)

Salman, S.K., King, D.J.: *Monitoring Changes in System Variables Due to Islanding Condition and Those Due to Disturbances at the Utilities' Network*. IEEE Transmission and Distribution Conference, 11-16 April 1999, Volume 2, pages 460-465.

Sener: *Pienvoimaloiden liittäminen jakeluverkkoon*. Sähköenergialiitto ry SENER, 2001.

Sener: *Keskeytystilasto 2002*. Sähköenergialiitto ry SENER, Helsinki 2003.

Sironi, R. Sähköpostilla toimitettu selvitys (Toronto Hydro), 27.2.2006.

Standata: Electrical Safety Information Bulletin, March 2003.

Stevens, J., Bonn, R., Ginn, J., Gonzalez, S.: *Development and Testing of an Approach to Anti-Islanding in Utility-Interconnected Photovoltaic Systems*. SAND 2000-1939. Sandia National Laboratories, 2000.

Stones, J., Perera, S., Gosbell, V., Browne, N.: *Mains Signal Propagation Through Distribution Systems*. AUPEC'02, Sept-Oct 2002, Melbourne, Australia.

Strunz, K., Barsali, S., Styczynski, Z.: *CIGRE Task Force C6.04.02: Developing benchmark models for integrating distributed energy resources*. CIGRE Study Committee C6 Colloquium, Cape Town, South Africa, October 2005.

Suomen Standardisoimisliitto SFS: *SFS 6002 –standardi, Sähköturvallisuus*. 1999.

Suomen Standardisoimisliitto SFS: *SFS-EN 50160 –standardi, Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet*. 2000.

Tran-Quoc, T., Andrieu, C., Hadjsaid, N.: *Technical impacts of small distributed generation units on LV networks*. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 13-17 July 2003.

Tran-Quoc, T., Andrieu, C., Hadjsaid, N.: *Influence of distributed resources on the ripple control signal transmission*. IEEE General Meeting 2004, Colorado, USA, June 2004. (Tran-Quoc et al. 2004-1)

Tran-Quoc, T., Hadjsaid, N., Rami, G., Le-Tranh, L., Bernard, L., Verneau, G., Mertz, J.L., Corenwinder, C., Michalak, P., Boll, M.: *Dynamic analysis of an insulated distribution network*. IEEE Power Systems Conference and Exposition, New York, 10-13th October, 2004. (Tran-Quoc et al. 2004-2)

Valkonen, J., Tommila, T., Jaakkola, L., Wahlström, B., Koponen, P., Kärkkäinen, S., Kumpulainen, L., Saari, P., Keskinen, S., Saaristo, H., Lehtonen, M.: *Paikallisten energiasurssien hallinta hajautetussa energiajärjestelmässä*. VTT Tiedotteita 2284, 2005.

Vattenfall, www.vattenfall.fi (31.3.2006)

Westerlund, H.: Sähköpostiviesti 15.7.2004.

Xu, W., Mauch, K., Martel, S.: *An assessment of Distributed Generation Islanding Detection Methods and Issues in Canada*. CANMET Energy Technology Centre (CETC), July, 2004.

Ye, Z., Finney, D., Zhou, R., Dame, M., Premerlani, B., Kroposki, B., Engleretson, S.: *Testing of GE Universal Interconnection Device*. NREL Technical Report, August 2003.

Ye, Z., Kolwalkar, A., Zhang, Y., Du, P., Walling, R.: *Evaluation of Anti-Islanding Schemes Based on Nondetection Zone Concepts*. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 19, No 5, September 2004. (Ye et al. 2004-1)

Ye, Z., Walling, R., Garces, L., Zhou, R., Li, L., Wang, T.: *Study and Development of Anti-Islanding Control of Grid-Connected Inverters*. General Electric Global Research Center. NREL/SR-560-36243, 2004. (Ye et al. 2004-2)