

VAASAN YLIOPISTO

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SÄHKÖTEKNIikka

Sampo Voima

**HAJAUTETUN TUOTANNON SUOJARELEISTYKSEN TOIMINNALLISET
VAATIMUKSET**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 09.11.2009

Työn valvoja

Erkki Antila

Työn ohjaaja

Kimmo Kauhaniemi

ALKULAUSE

Haluan kiittää eri osapuolia, jotka ovat mahdollistaneet tämän työn tekemisen. Eritoten ABB Oy, Sähkönjakeluautomaatiota, jonka tilaustutkimuksen pohjalta tämä työ on tehty sekä tutkimuksen toteutuksesta vastanneen Vaasan energiainstituutin osapuolia.

Erityinen kiitos työn ohjaajana toimineelle professori Kimmo Kauhaniemelle ohjauksesta ja hyvistä kommentteista, joita ilman työn suorittaminen ei olisi ollut mahdollista. Professori Erkki Antilaa haluan kiittää työn valvomisesta, asiantuntevista kommentteista ja tarkastuksesta.

Lisäksi mitä lämpimimmät kiitokset myös työtovereilleni, tutuille ja ystäville ja erityisesti niille jotka ovat auttaneet tämän prosessin ja koko opiskelujeni läpiviemisessä.

Vaasassa 3.11.2009

Sampo Voima

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	2
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	5
TIIVISTELMÄ	7
ABSTRACT	8
1. JOHDANTO	9
2. HAJAUTETUN TUOTANNON VERKKOONLIITYNTÄ	11
2.1. Hajautettu tuotanto	11
2.2. Eri verkkoratkaisuja	12
2.3. Verkkoonliityntäehtoja	14
2.3.1. Verkkoonliityntäehtojen vaatimuksia	15
2.3.2. Jännitekuoppavaatimus	17
2.4. Hajautetun tuotannon suojauskysymyksiä	18
2.5. Hajautetun tuotannon verkostovaikutuksia	19
2.5.1. Generaattorityyppien vaikutukset	19
2.5.2. Tehon kulkusuunta	20
2.5.3. Vikavirtatasojen nousu	20
2.5.4. Jännitteen nousu ja jännitetason muutokset	21
3. HAJAUTETUN TUOTANNON SUOJAUS	23
3.1. Suojauksen toimintaperiaatteet	23
3.1.1. Suojausmenetelmiä	24
3.1.2. Jälleenkytkennät	25
3.2. IEC 61850	26
3.3. Saarekekäytön estosuoja	27
3.3.1. Passiivisia suojausmenetelmiä	28
3.3.2. Aktiivisia suojausmenetelmiä	29
3.3.3. Tietoliikenteeseen perustuvat ratkaisut	30
3.4. Virhelaukaisujen mahdollisuuksia	31
3.4.1. Sokaistuminen	32
3.4.2. Johtolähdön tarpeeton laukaisu	32
3.4.3. Epäonnistunut jälleenkytkentä	34
3.4.4. Saarekekäyttö	34
3.5. Hajautetun tuotannon releet – eri valmistajien ratkaisuja	35
4. TUTKITTAVIEN TAPAUSTEN MÄÄRITTELY	37
4.1. Tarkasteltavien verkkorakenteiden esittely	38
4.1.1. Verkkorakenne a	39
4.1.2. Verkkorakenne b	41
4.1.3. Verkkorakenne c	43

4.2.	Tarkasteltavat vikatilanteet	44
4.2.1.	Vika samalla lähdöllä hajautetun tuotannon kanssa	45
4.2.2.	Vika lähdöllä 2	45
4.2.3.	Vika kiskostossa	45
5.	SUOJAUKSEN TOIMINNAN ANALYSOINTI ERI VIKATILANTEISSA	46
5.1.	Oikosulkuvirtojen käyttäytyminen	46
5.2.	Jännitteen käyttäytyminen oikosulun aikana	49
5.3.	Maasulku rengasverkossa	50
5.4.	Muut vikatilanteet	56
5.4.1.	Turha laukaisu	57
5.4.2.	ROCOF ja VS	57
6.	TOIMINNALLISET VAATIMUKSET	59
6.1.	Vika lähdöllä 1	60
6.1.1.	2-vaiheinen oikosulku lähdöllä 1	63
6.1.2.	Maasulku lähdöllä 1	69
6.2.	Vika lähdöllä 2	71
6.3.	Vika kiskostossa	74
6.4.	Saarekekäytön esto	77
6.5.	Jälleenkytkennät	79
6.6.	Katsaus toiminnallisiin vaatimuksiin	82
7.	YHTEENVETO	85
	LÄHDELUETTELO	87

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

SYMBOLIT

ΔU	pienvoimalan kytkemisestä aiheutuvan jännitteen muutos
ΔU_S	jännitetason suhteellinen muutos
φ	vaihekulma ($^\circ$)
I_0	nollavirta
I_R	summavirta
i_{suhde}	pienvoimalan kytkentävirran suhde nimellisvirtaan
P_N	generaattorin nimellispäteho (MW)
Q_N	generaattorin nimellisoistoeho (MVar)
R_f	vikaresistanssi
R_K	verkon oikosulkuresistanssi (Ω)
S_K	verkon oikosulkuteho ensimmäisessä muun kuluttajan kanssa olevassa yhteisessä pisteessä
S_n	pienvoimalan nimellisteho
t	aika
U	pääjännite (kV)
U_0	nollajännite
U_n	nimellisjännite
U_v	verkon vaihejännite
X_K	verkon oikosulkureaktanssi (Ω)

LYHENTEET

AJK	Aikajälleenkytkentä
GE	General Electric
GOOSE	Generic Object Oriented Substation Event
Helen	Helen Sähköverkko Oy
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
KJ	Keskijännite

PCC	Liityntäpiste (Point of Common Coupling)
PJ	Pienjännite
PJK	Pikajälleenkytkentä
ROCOF	Taajuuden muutosnopeus (Rate of Change of Frequency)
SENER	Sähköenergialiitto ry
VS	Vektorihyppy (Voltage Shift, Voltage Surge, Voltage Vector Jump)

VAASAN YLIOPISTO**Teknillinen tiedekunta**

Tekijä:	Sampo Voima
Diplomityön nimi:	Hajautetun tuotannon suojarleistyksen toiminnalliset vaatimukset
Valvojan nimi:	Professori Erkki Antila
Ohjaajan nimi:	Professori Kimmo Kauhaniemi
Tutkinto:	Diplomi- insinööri
Oppiaine:	Sähkötekniikka
Opintojen aloitusvuosi:	2002
Diplomityön valmistumisvuosi:	2009

Sivumäärä: 92

TIIVISTELMÄ

Hajautetun tuotannon lisääntyessä kasvaa myös tarve kehittää entistä kattavampia hajautetun tuotannon suojausratkaisuja. Perinteiset menetelmät hajautetun tuotannon suojaamiseen eivät kata kaikkia mahdollisia ongelmatilanteita. Esimerkiksi saarekekäytön havaitseminen tehotasapainon vallitessa saarekkeessa on nykyisillä passiivisilla menetelmillä hankalaa tai jopa mahdotonta.

Työssä tutustutaan hajautetun tuotannon suojausongelmiin, samalla perehtyen olemassa oleviin suojausmenetelmiin sekä hajautettua tuotantoa koskeviin verkkoonliityntäehtoihin. Näiden lisäksi tutkitaan, miten hajautetun tuotannon relesuojauksen toimivuuteen vaikuttavat niin käytössä olevat suojausmenetelmät kuin hajautetun tuotannon tyyppi.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää hajautetun tuotannon suojarleistykselle asettamia toiminnallisia vaatimuksia, jotka sisältävät kuvauksen suojarleistyksen toiminnasta verkon eri poikkeavissa käyttötilanteissa. Työssä tutkitaan miten hajautetun tuotannon relesuojauksessa voidaan hyödyntää modernien suojarleiden tietoliikenneominaisuuksia ja mitä etuja tietoliikenteen käyttö tuo perinteisiin passiivisiin suojausmenetelmiin verrattuna.

Työn tutkimusosa koostuu kolmen erityyppisen verkkorakenteen tarkastelusta. Suojauksen toiminnalliset vaatimukset laaditaan eri verkkorakenteiden vikatilanteiden tarkastelun perusteella.

Työn keskeisenä tuloksena todetaan, että tietoliikennettä apuna käyttäen hajautetun tuotannon relesuojauksesta on mahdollista saada nopea ja täysin aukoton.

AVAINSANAT: Hajautettu tuotanto, relesuojaus, tietoliikenne, etälaukaisu

UNIVERSITY OF VAASA**Faculty of technology**

Author: Sampo Voima
Topic of the Thesis: Functional requirements for the relay protection of distributed generation
Supervisor: Professor Erkki Antila
Instructor: Professor Kimmo Kauhaniemi
Degree: Master of Science in Technology
Major of Subject: Electrical Engineering
Year of Entering the University: 2002
Year of Completing the Thesis: 2009

Pages: 92

ABSTRACT

As the share of distributed generation increases so does the need to develop a broader, more comprehensive solutions for protection of distributed generation. Traditional protection methods can not cover every possible problem situation. For example, detecting islanding situation with passive loss of mains protection is difficult or even impossible when there's power balance in an island.

This thesis studies the problems connected to distributed generation and the existing protection methods, as well as the connection requirements for distributed generation. The functionality of distributed generation's relay protection is affected by the protection methods together with the generator type used in distributed generation.

The aim of this study is to find functional requirements for distributed generation's relay protection, which include a description of the operation of the network's relay protection in abnormal operating conditions. The thesis examines how modern relay communication capabilities can be used in the protection of distributed generation and the benefits of telecommunication based protection compared to traditional passive protection methods.

Research part of the thesis consists of examining protection behaviour in three different types of network structure. Each network structure is studied in abnormal operating conditions and the results will provide the functional requirements for the relay protection of distributed generation.

Key findings states that using telecommunication it is indeed possible to achieve fast and complete protection scheme for distributed generation.

KEYWORDS: Distributed generation, relay protection, telecommunication, intertrip

1. JOHDANTO

Mielenkiinto hajautettua tuotantoa kohtaan on lisääntynyt räjähdysmäisesti viimeisen vuosikymmenen aikana. Kasvun myötä nykyajan sähköjakelujärjestelmä muistuttaa meitä jollakin tapaa sähköjärjestelmien alkuaajoista, jolloin sähköä tuotettiin pelkästään hajautetusti. George Westinghousen vaihtovirtaan perustuvan jakelujärjestelmän myötä yksittäiset sähköjärjestelmät kuitenkin yhdistyivät nopeasti ja siirryttiin yhä enemmän keskitettyyn energiantuotantoon.

Nykyinen sähköjakelujärjestelmämme on suunniteltu keskitetyn energiantuotannon tarpeita silmälläpitäen. Hajautetun tuotannon lisäys muuttaa kauan vallinneita käsityksiä tehon kulkusuunnasta ja verkon suojauksesta. Sähköjakeluverkkojen rakenne monimutkaistuu hajautetun tuotannon lisääntyessä ja samalla myös sähköjakeluverkkojen relesuojaukselle kohdistuvat vaatimukset monimutkaistuvat.

Energian hinta, huoli ilmastosta ja ympäristöstä sekä paikallisten resurssien hyödyntäminen tekevät hajautetusta tuotannosta mielenkiintoisen ja kannattavan kohteen. Suomeen onkin suunnitteilla vuoteen 2020 mennessä 2000 MW tuulivoimatuotantoa.

Hajautetun tuotannon suojaus poikkeaa perinteisestä sähköjakeluverkon suojauksesta. Huomioon otettavia tekijöitä on runsaammin ja kokonaisvaltaisen suojauksen toteutus monimutkaistuu. Hajautetun tuotannon suojaus on altis virhelaukaisuille, kuten myös suojauksen toiminnan hidastumiselle tai jopa estymiselle. Myös muu verkon suojaus voi häiriintyä hajautetun tuotannon lisäämisen seurauksena.

Tutkimuskohteina tässä työssä ovat hajautetun tuotannon, sekä sen yhteydessä olevan verkon relesuojaus. Tavoitteena on selvittää hajautetun tuotannon suojarahleistykselle asettamia toiminnallisia vaatimuksia. Vaatimukset sisältävät kuvauksen suojarahleistyksen toiminnasta verkon eri osien vikaantuessa. Suojarahleistyksen toimintaa tutkitaan verkon eri vikatilanteissa ja lisäksi myös hajautetun tuotannon suunnittelemattoman saarekekäytön yhteydessä. Yhtenä tutkimuksen kohteena on miten relesuojauksessa voidaan hyödyntää modernien suojarahleiden tietoliikenneominaisuuksia ja mitä etuja tietoliikenteen käyttö tuo perinteisiin passiivisiin suojausmenetelmiin verrattuna.

Työn aluksi käydään läpi hajautetun tuotannon lisäämisen tuomia verkostovaikutuksia tutustuen myös hajautetun tuotannon verkkoonliityntään sekä verkkoonliitynnän vaatimukseen. Lisäksi voidaan hajautetun tuotannon verkkoonliitynnän aiheuttamia suojausongelmia. Kokonaisvaltaisen sähkönjakeluverkon suojauksen aikaansaamiseksi tässä työssä on määritetty hajautetulle tuotannolle suojausjärjestelmien toiminnalliset vaatimukset. Toiminnallisten vaatimusten kartoitus tapahtuu tutkimalla relesuojauksen toimintaa kolmessa toisistaan erilaisessa verkkorakenteessa. Eri verkkorakenteiden vikatilanteiden analyysin perusteella voidaan lopuksi määrittää relesuojaukselle toiminnalliset vaatimukset.

2. HAJAUTETUN TUOTANNON VERKKOONLIITYNTÄ

Hajautettua tuotantoa on ollut olemassa ensimmäisen sähköjärjestelmän olemassaolosta saakka. Vuosien saatossa yksittäiset sähköjärjestelmät ovat yhdistyneet ja kytkeytyneet toisiinsa sähkön siirtoverkkojen välityksellä. Samalla sähkön tuotanto on yhä enemmän keskittynyt suurempiin voimalaitoksiin. Sähköjärjestelmän tärkeimpänä tehtävänä on tuottaa energiaa kuluttajien tarpeeseen ja toimitusvarmuuden parantamiseksi on tullut tarpeen suojata sähköjärjestelmiä erilaisten vikatilanteiden aiheuttamilta häiriöiltä ja vahingoilta. Nykyaikaisen relesuojauksen tehtävänä ei ole ehkäistä vikoja, vaan tunnistaa niiden olemassaolo ja erottaa vika selektiivisesti siten, että vain mahdollisimman pieni osa sähköjärjestelmästä irtautuu (Mörsky 1992: 14–16). Yhä suurempi osa sähkön tuotannosta tullaan tulevaisuudessa toteuttamaan hajautetuilla tuotantolähteillä. Samat suojausperiaatteet pätevät perinteisten sähköjärjestelmien ohella myös hajautettuun tuotantoon. Hajautetun tuotannon lisääminen sähkönjakeluverkkoihin monimutkaistaa niiden rakennetta. Vastaavasti hajautetun tuotannon ja sähkönjakeluverkkojen suojaus monimutkaistuu, vikojen tunnistaminen voi käydä entistä vaikeammaksi mm. muuttuneen tehon kulkusuunnan vaikutuksesta.

2.1. Hajautettu tuotanto

Hajautetulla tuotannolla tarkoitetaan suhteellisen pieniä voimalaitoksia, joiden tuottama teho vaihtelee kilowateista noin kymmeneen megawattiin saakka. Hajautetulle tuotannolle on ominaista sen läheisyys kulutukseen sekä liityntä pienjännite- (PJ) tai keskijänniteverkkoon (KJ). Hajautettu tuotanto yhdistetään usein uusiutuviin energianlähteisiin. Sitä se myös usein onkin, mutta hajautetun tuotannon käyttämiä polttoaineita ei ole mitenkään rajattu, joten uusiutuvien energianlähteiden lisäksi polttoaine voi olla myös fossiilista ja uusiutumaton. Erilaisia hajautetun tuotannon muotoja on esitetty kuvassa 1. Niitä voivat olla esimerkiksi aurinko-, tuuli-, mikroturbiini-, diesel- ja polttokennovoimalaitokset. Lisäksi myös pienvesivoima ja biomassaa polttoaineenaan käyttävät voimalat ovat hajautettua tuotantoa. Usein hajautetussa tuotannossa voidaan hyödyntää paikallisia energialähteitä, kuten on kyse tuulivoiman tai aurinkovoiman tuotannossa.



Kuva 1. Eri hajautetun tuotannon muotoja (Karlsson & Kåll 2004; Capstone 2008; O'Malley 2009).

Hajautetun tuotannon suojauksen kannalta on suuri merkitys sillä, minkä tyyppinen generaattori on käytössä. Lähteessä Abdel-Galil, Abu-Elanien, El-Saadany, Girgis, Mohamed, Salama & Zeineldin (2007: 37) on hajautetussa tuotannossa käytetyt voimalaitokset jaettu kahteen ryhmään niiden verkkoonkytkentätavan mukaan; yhdessä ryhmässä ovat suoraan pyörivien generaattoreiden avulla liitetyt tuotantolaitokset ja toiseen ryhmään kuuluvat tehoelektronikkaan perustuvien tehonmuokkainten välityksellä verkkoon liitetyt tuotantolaitokset. Pyöriviin sähkökoneisiin perustuvat generaattorit voidaan jakaa vielä tahti- ja epätahtigeneraattoreihin.

2.2. Eri verkkoratkaisuja

Kuluttajille sähköenergiaa jakavan jakeluverkon rakenne koostuu muuntoasemasta, jolla siirtojännite muunnetaan 10–30 kV jakelujännitteeksi, jakelumuuntamoista ja jakelumuuntamoiden välisistä keskijänniteverkoista, sekä jakelumuuntamoiden jälkeisistä pienjänniteverkoista (Lågland 2004: 16). Käytössä oleva keskijännitejakeluverkon verkkomuoto vaikuttaa verkon relesuojauksen toteutukseen ja toteutuksen monimutkai-

suuteen. Seuraavassa käydään lyhyesti läpi yleisesti käytössä olevia ja tässä työssä esiintyviä erilaisia verkkoratkaisuja.

Keskijännitejakeluverkolla voi olla monia erilaisia verkkomuotoja, joista perusmuotoja ovat maaseudun säteittäisverkko ja taajamien avoin rengasverkko. Säteittäisverkot muodostuvat runko- ja haarajohdoista ilman varasyöttömahdollisuuksia. Tosin myös avoimia rengasverkkoja käytetään säteittäisinä. Säteittäisverkkoja käytetään haja-asutusalueilla, missä varayhteyksien rakentaminen tulee kalliiksi. (Lakervi 1996: 29.)

Kaksi samalta muuntoasemalta lähtevää runkojohtoa voidaan liittää yhteen jakelukeskeyksien vaikutuksien vähentämiseksi. Avoin jakeluverkko on kaapeliverkon yleisin verkkomuoto, jossa renkaat liittyvät saman sähköaseman kiskostoon. Renkaaseen liitty useita jakelumuuntamoita ja sitä käytetään säteittäisenä. (Lågland 2004: 33.)

Verkon käyttövarmuutta voidaan parantaa yhdistämällä avoin rengasverkko suljetuksi rengasverkoksi katkaisijalla, joka on normaalisti kiinni. Vian ollessa renkaassa katkaisijan avulla terveen rengaspuoliskon käyttö voi jatkua säteittäisen verkon tapaan. Suljettu rengasverkko yleistyy tulevaisuudessa viestiyhteyksien lisääntyessä ja verkostoautomaatiomahdollisuuksien parantuessa. (Lakervi 1996: 29; Areva 2005: 447.)

Suljetun rengasverkon suojaus on monimutkaisinta ja säteittäisen verkon suojaus puolestaan näistä yksinkertaisinta. Suljetussa rengasverkossa oikosulkuvirrat ovat yleisesti suurempia kuin säteittäisessä, tai avoimessa rengasverkossa.

Samaan tapaan kuin verkon topologia vaikuttaa sen relesuojauksen toteutukseen on verkon maadoitustavan valinnalla suuri vaikutus sen maasulkusuojaukseen. Maadoitusmenetelmät vaihtelevat maittain, alueittain ja sähkölaitoksittain hyvinkin paljon. Maadoitustavan valintaan vaikuttavat mm. verkon rakenne, sen laajuus ja kuormitustiheys. Käytössä olevista eri maadoitustavoista onkin syytä käydä läpi niiden erityispiirteet ja vaikutus maasulkusuojauksen toteutukseen.

Maasta erotettua verkkoa ei ole tarkoituksenmukaisesti yhdistetty erikseen maahan, verkko kuitenkin on yhteydessä maahan vaihejohtimien maakapasitanssien kautta. Maakapasitanssien kautta kulkeva osa verkon varausvirroista muodostaa symmetrisen

järjestelmän. Maasulun sattuessa syntyvän epäsymmetrian seurauksena varausvirtojen summa poikkeaa nolasta, jolloin maasulku aikaansaa ainoastaan heikon virran terveiden vaiheiden maakapasitanssien kautta (ABB 2000: 248). Maasulkuvirran suuruuteen vaikuttavat ainoastaan galvaanisesti yhteenkytketyn verkon tyyppi ja pituus. Keskijänniteverkon nolajärjestelmän komponenteilta puuttuu kulkutie, joten siirtoverkko tai pienjänniteverkko ei vaikuta maasulun suuruuteen (Lågland 2004: 42). Låglandin (2004: 44) mukaan maasta erotettuja verkkoja käytetään mm. Japanissa, Suomessa, Italiassa ja Irlannissa.

Resistanssin kautta maadoitetussa verkossa tähtipisteeseen kytketyn resistanssin avulla voidaan rajoittaa maasulkuvirran suuruutta. Resistanssin avulla voidaan myös pienentää verkossa syntyvien ylijännitteiden suuruutta. Käytettävän resistanssin suuruus vaikuttaa myös vikavirran suuruuteen yhdessä viallisen vaiheen impedanssin ja vikaresistanssin kanssa (Lågland 2004: 44–47).

Kompensoidussa verkossa verkon tähtipisteen ja maan välille kytketyn kuristimen avulla voidaan kompensoida kapasitiivista maasulkuvirtaa. Vikapaikassa kulkeva maasulkuvirta pienenee huomattavasti kompensoinnin ansiosta ja voi olla niin pieni, että valokaarimaasulut sammuvat itsestään (ABB 2000: 254, 263; Lågland 2004: 47). Griffelin (Griffel, Leitloff, Harmand & Bergeal 1997) mukaan kompensoituja verkkoja käytetään Saksassa, Skandinaviassa ja Itä-Euroopassa.

Suoraan maadoitetussa verkossa on sähköaseman päämuuntaja maadoitettu suoraan ilman impedanssia. Tällöin vikavirta nousee suureksi ja on yhtä suuri kuin oikosulkuvirta vaiheen ja maan välillä (Lågland 2004: 50). Suoraa maadoitusta käytetään Isossa-Britanniassa sekä Yhdysvalloissa ja Kanadassa (Griffel ym. 1997).

2.3. Verkkoonliityntäehtoja

Hajautetun tuotannon verkkoon liittämiseksi tietyt määräykset tulee täyttyä. Vaatimukset on usein tehnyt verkon haltija. Monet nykyiset verkkoonliityntäehdot vaativat hajautetun tuotannon irrottamista verkosta vian tai häiriön sattuessa. Tulevaisuudessa keski-

tytään yhä enemmän hajautetun tuotannon käyttäytymiseen vian tai häiriön aikana. Uusien määräyksien kaksi tärkeää osa-aluetta ovat tuotantolaitoksen jännitekuoppavaatimus, sekä voimalan osallistuminen tehotasapainon ylläpitoon taajuuden karatessa (Stråth 2005: 17). Määräyksillä pyritään varmistamaan voimalan turvallinen käyttö voimalan ja myös jakeluverkon kannalta. Seuraavassa tarkastellaan verkkoonliityntäehtojen erilaisia vaatimuksia, sekä jännitekuoppavaatimuksia.

2.3.1. Verkkoonliityntäehtojen vaatimuksia

Hajautetun tuotannon määrän kasvaessa myös määräykset näiden laitosten verkkoon liittymiseksi uudistuvat ja kehittyvät. Suomessa sähköenergialiitto (SENER) on antanut suosituksen pienvoimaloiden liittämiseksi jakeluverkkoon. Suomessa myös paikalliset sähköverkko-operaattorit voivat antaa ohjeita generaattorilaitteistojen liittämiseksi heidän verkkoonsa. Esimerkkinä tässä kappaleessa käydään läpi Helen Sähköverkko Oy:n (Helen) julkaiseman ohjeen mukaisia vaatimuksia generaattorilaitteiston suojalaitteiden toiminnalle.

Mozina (2008: 18–25) pohtii artikkelissaan hajautetun tuotannon tuomia vaikutuksia ja tuo esille, kuinka osa verkkoonliityntäehdoista on riittämättömiä ja kipeästi kaipaisivat uudistamista. Mozina käsittelee vuonna 2003 julkaistua IEEE 1547-standardia, joka on suunnattu hajautetun tuotannon verkkoonliittämiseen. IEEE 1547-standardi (IEEE 1547 2003: 10) vaatii hajautetun tuotannon erottamista kahden sekunnin sisällä suunnittele mattoman saareketilanteen muodostumisesta.

Mikään verkkoonliityntäohje ei salli suunnittelematonta saarekekäyttöä oman verkkonsa rinnalla ja vaatii tämänlaisessa tapauksessa hajautetun tuotannon nopeaa erottamista. Hajautetun tuotannon verkosta erottamiseen sallittu suurin aika vaihtelee verkkoonliityntäehtojen laatijan mukaan.

Taulukossa 1 on esimerkkinä Tanskan, Hollannin ja Helenin verkkoonliityntäehdoista voimaloille asetettavia jännite- ja taajuusehtoja.

Taulukko 1. Tanskan, Hollannin ja Helenin (Elkraft System & Eltra 2004: 7, 13; Office of Energy Regulation 2007: 15–16; Helen 2009).

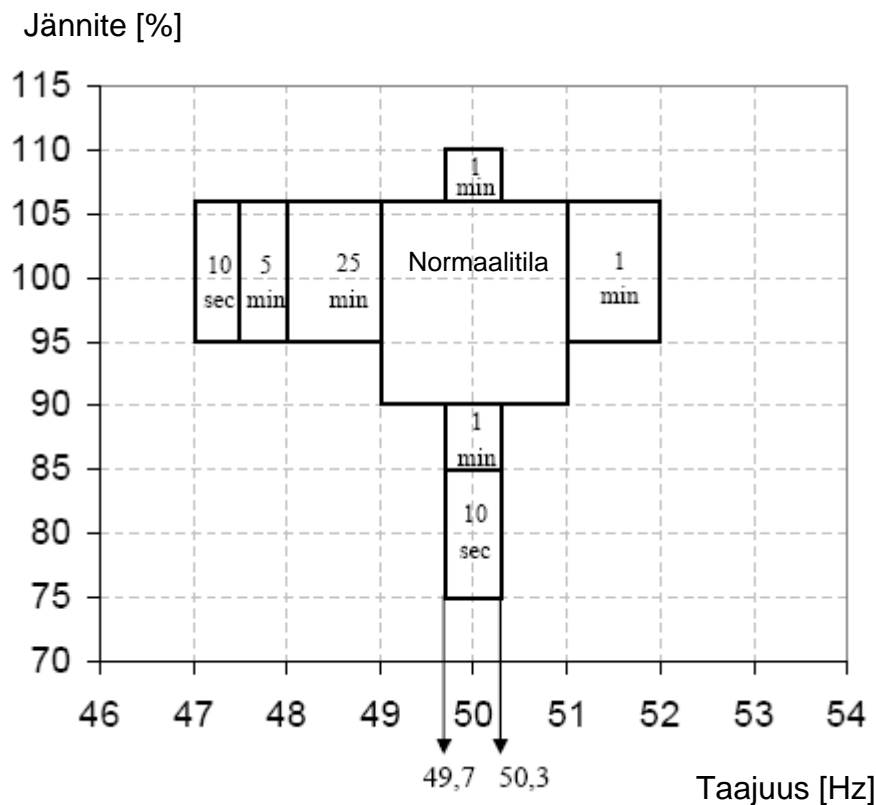
	Ylitaajuus	Toiminta-aika	Alitaajuus	Toiminta-aika	Ylijännite	Toiminta-aika	Alijännite	Toiminta-aika
Tanska	51 Hz 51,8 Hz ¹⁾	200 ms 200 ms	47 Hz	200 ms	$1,06 * U_n$ $1.1 * U_n$	60 s 200 ms	$0,9 * U_n$	10 s
Hollanti	52 Hz	2 s	48 Hz	2 s	$1,06 * U_n$	2 s	$0,8 * U_n$ $0,7 * U_n$	2 s 200 ms
Helen	51 Hz	200 ms	48 Hz	500 ms	$U_n + 10 \%$ $U_n + 15 \%$	1,5 s 150 ms	$U_n - 15 \%$ $U_n - 50 \%$	5 s 150 ms

¹⁾ Jos voimalaitoksella on käytössä jännitteen säätö

U_n on nimellinen jännite.

Kuvassa 2 on Tanskalainen versio jännitteelle ja taajuudelle asetetuista sallituista rajoista. Muiden verkkoonliityntäehtojen vaatimukset saattavat poiketa kuvan 2 vaatimuksista, mutta pääpiirteet pysyvät silti samoina. Verkon jännitteen tai taajuuden poiketessa riittävästi normaalista on tuotantolaitos erotettava verkosta joko heti tai jännite- tai taajuuspoikkeaman saneleman viiveen mukaan.

Jännite- ja taajuuspoikkeaman määrittämiseksi tarvitaan hajautetun tuotannon yhteyteen suojalaitteet niiden mittaamista varten. Jännitettä määritettäessä suojarele saa mittaus-tiedon mittamuuntajalta, jonka perusteella suojarele laskee jännitteen arvon. Taajuuden mittaamiseksi voidaan myös käyttää jännitemittausta, josta yli/alitaajuusrele laskee hetkellisen taajuuden arvon. Jännite- ja taajuusreleillä pitäisi vielä olla mahdollista asettaa useampia aika-asetuksia erisuuruisia poikkeamia varten.

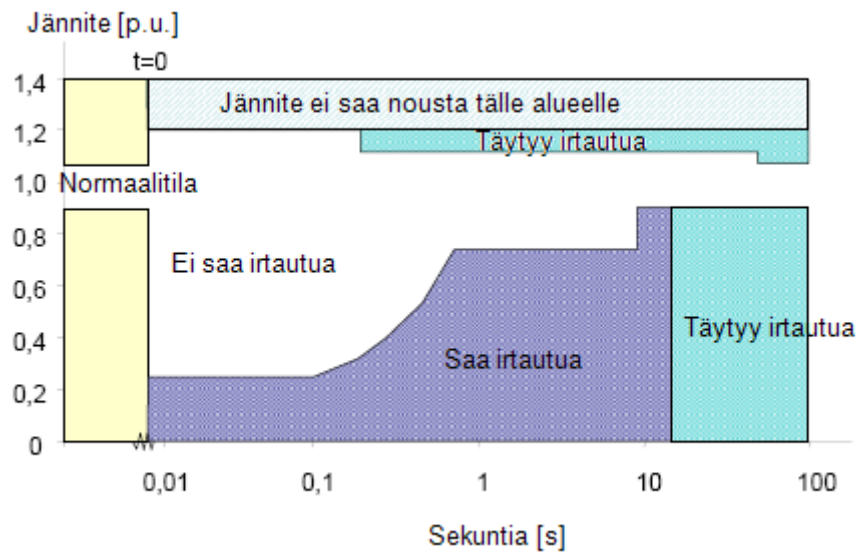


Kuva 2. Jännitteen ja taajuuden operatiiviset rajat (Elkraft System & Eltra 2004: 11).

2.3.2. Jännitekuoppavaatimus

Yleisten verkkoonliityntäehtojen lisäksi hajautetun tuotannon tulee monesti täyttää niin sanottu jännitekuoppavaatimus. Jännitekuoppavaatimus on yksi osa hajautetun tuotannon verkkoonliityntäehtoja ja se tarkoittaa voimalan kykyä selvitä mm. vikojen seurauksena syntyvistä yhden tai kaikkien vaiheiden hetkellisistä jännitekuopista.

Jännitekuoppavaatimuksia voidaan kuvata kuvaajalla, jossa sallittu jännitekuopan syvyys ja kesto ilmaistaan, kuten on esitetty kuvassa 3. Kuva 3 esittää Tanskan alle 100 kV verkkoon kytketyille tuulivoimaloille annettua vaatimusta. Vastaavanlaisia vaatimuksia on muilla mailla, peruseriaatteiden pysyessä samoina. Jännitekuopan syvyys ja kesto vaihtelevat vaatimuksen laatijan mukaan.



Kuva 3. Esimerkki jännitekuoppavaatimuksesta (Elkraft System & Eltra 2004: 14).

2.4. Hajautetun tuotannon suojauskysymyksiä

Keskitettyyn tuotantoon suunnitellun säteittäisen keskijännitejakeluverkon suojaus on melko suoraviivaista. Hajautetun tuotannon lisääminen monimutkaistaa suojausta; pelkän kulutuksen lisäksi verkossa on myös tuotantoa, sekä tehoa voi kulkea eri suuntiin. Suojauksen tulisi toimia myös hajautetun tuotannon ollessa irti verkosta, tämä tekee suojauksesta entistä monimutkaisempaa. Lähteessä Repo, Laaksonen, Mäki, Mäkinen & Järventausta (2005: 8) on esitelty mitä tilanteita suojauksen kannalta tulisi tarkastella:

- johtojen ja komponenttien oikosulkukestoisuudet,
- lähdön suojauksen havahtuminen erilaisissa vikatilanteissa,
- pienvoimalan toiminta jälleenkytkennän yhteydessä,
- pienvoimalan aseman kautta viereiselle lähdölle syöttämä vikavirta,
- jännitekuopat ja niiden voimalalle aiheuttamat häiriöt,
- varasyöttötilanteet.

Näiden tilanteiden lisäksi saarekekäytön estosuojan toiminta on yksi suuri kysymys hajautetun tuotannon suojausta suunniteltaessa. SENERin (2001: 13, 19–21) pienvoima-

loiden jakeluverkkoon liittämislle julkaistun suosituksen mukaisesti suojauksen on erotettava pienvoimala verkosta, kun verkkoa ei syötetä muualta tai, kun verkon jännite katoaa kokonaan tai osittain. Hajautetun tuotannon verkostovaikutuksia, kuten myös hajautetun tuotannon mahdollisesti aikaansaamia suojauksen virhelaukaisutilanteita on tarkasteltu myöhemmin.

2.5. Hajautetun tuotannon verkostovaikutuksia

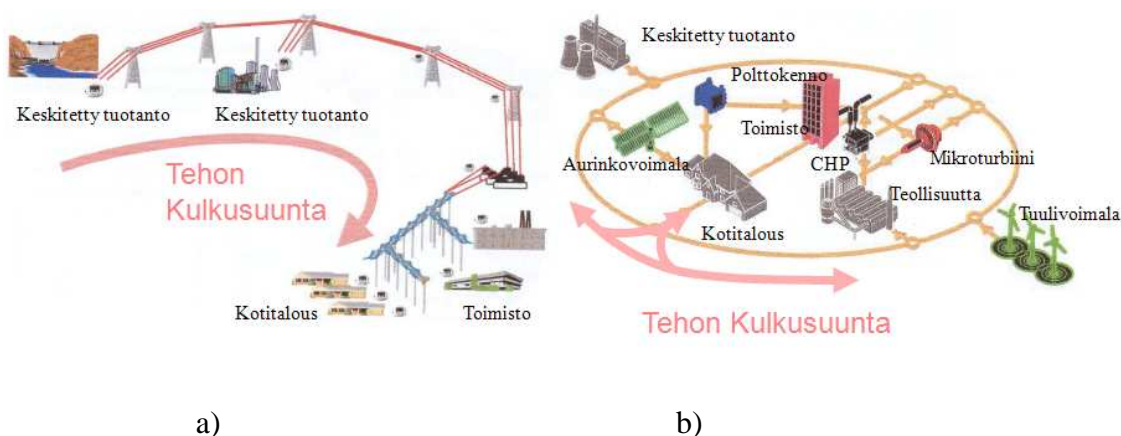
Hajautetulla sähköntuotannolla on moninaisia vaikutuksia sähkönjakeluverkkoon. Yhtenä merkittävimmistä vaikutuksista on hajautetun tuotannon vaikutukset verkon suojaukseen ja suojauksen koordinointiin. Toisaalta taas hajautettu tuotanto voi mm. syöttää paikallisia kuormia ja kuormituksen kasvaessa vähentää verkon vahvistuksen tarvetta, tai auttaa huipputehon tasauksessa. Hajautetulla tuotannolla on positiivisia ja negatiivisia vaikutuksia, joista osa käydään läpi tässä kappaleessa.

2.5.1. Generaattorityyppien vaikutukset

Hajautetussa tuotannossa käytettävät generaattorityypit jaettiin aiemmin kolmeen eri ryhmään; tahti- tai epätahtigeneraattoriin (induktiogeneraattori) ja tehoelektroniikkapohjaisiin suuntaajiin. Tahtigeneraattori pystyy normaalitilassa säätämään jännitettä ja taajuutta. Vikatilanteessa tahtigeneraattorilla on generaattorin magnetoinnista riippuen kyky tuottaa suuria oikosulkuvirtoja pitkän aikaa. Induktio- tai epätahtigeneraattorin syöttämä oikosulkuvirta saattaa aluksi olla suuri, mutta se pienenee nopeasti magnetoinnin häipymisen myötä (Jenkins, Allan, Crossley, Kirschen & Strbac 2000: 109–111, 125–126). Tehoelektroniikkapohjaiset suuntaajat pystyvät parhaimmillaankin tuottamaan vain noin kaksi kertaa nimellisvirtansa verran oikosulkuvirtaa, eivätkä siten edesauta perinteisen ylivirtasuojauksen käyttöä hajautetun tuotannon suojaamisessa (Kumpulainen ym. 2006: 75).

2.5.2. Tehon kulkusuunta

Nykyaikainen sähköjakoverkosto on suunniteltu keskitetyn sähköntuotannon tarpeisiin. Tässä järjestelmässä keski- ja pienjännitejakeluverkoissa teholla on ollut vain yksi kulkusuunta; tuotantolaitoksesta kuluttajalle, jota kuva 4 a esittää. Hajautetun tuotannon lisääminen sähköjakoverkkoihin ei ole täysin ongelmaton, sillä edellisenkaltaiset yleiset käsitykset saattavat muuttua. Hajautetun tuotannon lisäämisen seurauksena tehon kulkusuunta voi paikallisesti vaihtua. Kuva 4 b havainnollistaa hajautetun tuotannon aikaansaamia muutoksia tehon kulkusuuntaan, sekä verkkotopologiaan. Hajautetun tuotannon lisääminen vaikuttaa lisäksi myös häviöihin siirtoverkosta vähentyneen tehontarpeen myötä, jolloin virtatasot ja sen seurauksena myös häviöt laskevat. Häviöt voivat tosin myös kasvaa, jos lois- tai pätötehoa joudutaan siirtämään pitkiä matkoja. (Jenkins ym. 2000: 9–10; SENER 2001: 10.)



Kuva 4. a) Tehon kulkusuunta säteittäisessä verkossa. b) Tehon kulkusuunta mahdollisessa tulevaisuuden verkkokonfiguraatiossa (Suurmond 2009).

2.5.3. Vikavirtatasojen nousu

Kaikki hajautettu tuotanto nostaa vikavirtatasoja. Käytetyn generaattorin tyypistä riippumatta vikavirtatasot nousevat, mutta erilaisten generaattorityyppien käyttäytyminen vikatilanteessa on erilaista. Vikavirtatasojen nousu ei saa vaikuttaa verkossa käytettyjen komponenttien, kuten katkaisijoiden ja johtojen rikkoutumisiin liiallisen vikavirran ta-

kia. Komponenttien oikosulkukestoisuus on varmistettava tuotantoa suunniteltaessa. Komponenttien uusiminen voi koitua kalliiksi ja siten jopa estää hajautetun tuotannon rakentamista. Vikavirtojen tasoa on mahdollista rajoittaa muuntajien tai reaktorien avulla, tämä kasvattaa kuitenkin samalla häviöitä ja johtaa myös generaattorin jännitteen laajempaan vaihteluun. (Jenkins ym. 2000: 14.)

2.5.4. Jännitteen nousu ja jännitetason muutokset

Keskijänniteverkon jännite nousee, kun sinne lisätään hajautettua tuotantoa. Hajautetun tuotannon irtikytkytyminen puolestaan laskee jännitettä ja näin jännitteen vaihteluväli kasvaa. Jatkuvat nopeat jännitteen vaihtelut voivat näkyä kuluttajalle mm. välkyntänä. Pienvoimalan lisäämisestä johtuva jännitetason suhteellinen muutos voidaan likimäärin laskea yhtälöllä (Jenkins ym. 2000: 11–12; SENER 2001: 6)

$$\Delta U_s \approx \frac{R_K \cdot P_N + X_K \cdot Q_N}{U}, \quad (1)$$

missä

P_N = generaattorin nimellispäteho [MW]

Q_N = generaattorin nimellisloisteho [MVA_r]

R_K = verkon oikosulkuresistanssi [Ω]

U = verkon pääjännite liittymispisteessä [kV]

X_K = verkon oikosulkureaktanssi [Ω].

SENERin suositusten (2001: 12) mukaisesti pienvoimalan verkkoon kytkemisestä aiheutuvan jännitemuutoksen suuruus voidaan laskea yhtälöllä

$$\Delta U = i_{\text{suhde}} \cdot \frac{S_n}{S_k} \cdot U_v, \quad (2)$$

missä

i_{suhde} = pienvoimalan kytkentävirran suhde nimellisvirtaan

S_k = verkon oikosulkuteho ensimmäisessä muun kuluttajan kanssa olevassa yhteisessä verkon pisteessä

S_n = pienvoimalan nimellisteho

U_v = verkon vaihejännite.

SENERin (2001: 12) mukaan pienvoimalan suunnittelussa kannattaa suurimmaksi sallituksi jännitemuutokseksi ottaa 4 %. Yhtälöstä (2) saadaan nyt johdettua vaatimus verkon liityntäpisteen oikosulkuteholle sijoittamalla siihen $\Delta U/U_v = 0,04$. Jolloin verkkoon kytkeminen voidaan sallia, jos liityntäpisteen oikosulkuteho toteuttaa yhtälön

$$S_k \geq 25 \cdot i_{\text{suhte}} \cdot S_n . \quad (3)$$

SENER (2001: 12) mainitsee hyväksi ohjeeksi pienvoimaloiden verkkoon kytkemiselle tavan, jolla käynnistys- tai kytkentävirta rajoittuu lähes nimellisvirran suuruiseksi.

3. HAJAUTETUN TUOTANNON SUOJAUS

Jokainen sähköjärjestelmän elementti on altis vikaantumiselle. Syitä eri komponenttien vikaantumiselle on monia ja tarpeen vaatiessa vika on pystyttävä erottamaan vaaratilanteiden välttämiseksi. Sähköjärjestelmän suojauksen tehtävänä on havaita ja erottaa mahdollisimman pieni osa verkosta. Hajautetun tuotannon ollessa osa sähköjärjestelmää myös se ja sitä ympäröivä verkko täytyy olla sähköisesti suojattu. Tämä kappale käsittelee ensiksi yleisimpiä sähköjakelujärjestelmän suojana olevia suojausmenetelmiä ja jälleenkytkentöjä. Hajautetun tuotannon saarekekäytön varalta on pystyttävä erottamaan hajautettu tuotanto saarekekäytön estosuojan avulla. Näiden lisäksi tarkastellaan hajautetun tuotannon mahdollisesti aiheuttamia virhelaukaisuja ja lopuksi tutustutaan kaupallisessa tuotannossa oleviin hajautetun tuotannon suojaamiseen tarkoitettuihin ratkaisuihin.

3.1. Suojauksen toimintaperiaatteet

Sähköjakeluverkkojen relesuojauksen tehtävänä on tarkkailla sähköverkon tilaa ja havaita mahdolliset vikatilanteet, sekä tarpeen mukaan erottaa vika selektiivisesti siten, että mahdollisimman pieni osa verkosta irtautuu. Relesuojaukselle yleisesti asetettuja vaatimuksia ovat toiminnan selektiivisyys, jolloin vian seurauksena vain mahdollisimman pieni osa sähköjärjestelmästä erotetaan katkaisijoiden avulla. Suojauksen tulee olla tarpeeksi herkkä havaitakseen kaikki mahdolliset vikatilanteet, sekä tarpeeksi nopea häiriöiden minimoimiseksi. Suojauksen tulee toimia luotettavasti myös tilanteissa, joissa ensisijainen suojaus on syystä tai toisesta vioittunut. Tämän takia verkko jaetaan suojausalueisiin, jotka yhdessä muodostavat kokonaisen suojauksen ja jotka osaksi peittävät toisensa varasuojauksen mahdollistamiseksi. (Mörsky 1992: 14–17.)

Seuraavassa käydään läpi tässä työssä vastaan tulevia sähköverkon suojausmenetelmiä sekä jälleenkytkentöjä.

3.1.1. Suojausmenetelmiä

Keskijännitejakeluverkoissa johtolähtöjen oikosulkusuojana on yleisesti käytetty ylivirtaan perustuvaan suojausta. Suojaus havahtuu, kun mitattu virran arvo ylittää sille asetellun arvon. Ylivirtareleet on jaoteltu niiden toimintatavan mukaan hetkelliseen, vakioaikaiseen ja käänteisaikaiseen ylivirtareleeseen. Ylivirtareleiden käyttö edellyttää niiden sijaintipaikalla esiintyvän pienimmän ja suurimman mahdollisen oikosulkuvirran tuntemista (Mörsky 1992: 35–36). Vikavirran kulkiessa molempiin suuntiin releen mittauspaiikalla on mahdollista käyttää suunnattua ylivirtasuojaa havaitsemaan virran kuluuunta ja samalla vaikuttamaan siihen toimiiko rele vai ei. Suunnatun ylivirtasuojan toiminnan edellytyksenä on virran asetteluarvon ylittyminen ja suuntakriteerin täytyminen. Vikavirran suunnan havaitsemiseen on olemassa erilaisia keinoja, joille kaikille on yhteistä jännitemittauksen tarve (Areva 2005: 133–134).

Lähdön suojauksen lisäksi ylivirtasuojaa voidaan käyttää havaitsemaan hajautetun tuotannon vikaan syöttämä vikavirta. Tämä edellyttää kuitenkin hajautetulta tuotannolta kykyä pystyä syöttämään suurehkoja vikavirtoja, joka puolestaan riippuu käytetystä generaattorityypistä.

Maasulkuviat ovat yleisimpiä vikoja sähkönjakeluverkoissa. Verkon maadoitustavasta riippuen maasulkusuojauksen toteutusperiaatteet voivat vaihdella hyvinkin paljon. Maasta erotetussa, kompensoidussa tai suuren resistanssin kautta maadoitetussa verkossa yksivaiheisia maasulkuja ei voida havaita oikosulkusuojauksen avulla, vaan verkko on varustettava erillisillä maasulkusuojilla (ABB 2000: 259).

Suoraan maadoitetuissa verkoissa maasulkuvirrat ovat oikosulkuvirtojen suuruisia ja maasulkusuojaus on mahdollista toteuttaa käyttämällä hyväksi ylivirtasuojia (ABB 2000: 265).

Suuntaamaton maasulkusuojaus maasta erotetussa ja suuren resistanssin kautta maadoitetussa verkossa voidaan toteuttaa summavirtaa (I_R) mittaavalla releellä, jossa summavirta $3I_0$ merkitään I_R ja jossa I_0 on nollavirta. Maasta erotetussa verkossa maasulun seurauksena nollajännite (U_0) nousee koko verkossa ja suuntaamaton maasulkusuojaus

onkin mahdollista toteuttaa myös nollajännitettä mittaamalla. Suunnatun maasulkusuojan toiminta maasta erotetussa, kompensoidussa ja suuren resistanssin kautta maadoitetussa verkossa perustuu maasulkuvirran loiskomponentin suuruuteen ja suuntaan tai kulmamittausperiaatteeseen. Kulmamittausperiaatteen ollessa kyseessä suojaus toimii, kun summavirran ja -jännitteen suuruudet ylittävät asetteluarvot ja summavirran vaihekulma nollajännitteeseen nähden on asetetulla sektorilla. (ABB 2000: 260–261, 263, 265.)

Differentiaalisuojausta voidaan käyttää moneen tarkoitukseen, se soveltuu muuntajien, johtojen, kiskoston ja generaattorien suojaamiseen. Ominaista sille on suojattavan kohteen absoluuttinen suojaus ja erittäin nopea toiminta. Suojauksen absoluuttisuus perustuu differentiaalisuojauksen toimintatapaan, se mittaa yhtä tai useampaa suojausvyöhykkeensä päissä olevaa suuretta ja vertailee näitä keskenään. Jos mitattavat suuret poikkeavat toisistaan enemmän kuin suojaan aseteltujen arvojen verran, seuraa laukaisu. (Mörsky 1992: 46; ABB 2000: 229.)

3.1.2. Jälleenkytkennät

Avojohtoverkoissa ylivoimaisesti suurin osa vioista, noin 80–90 % on valokaarimaasulkuja. Näitä syntyy pääasiassa ilmastollisten ylijännitteiden synnyttämistä ylilyönneistä, tuulen tai jään ja lumen aikaansaamista kosketuksista joko puun tai toisen johtimen kanssa. Jälleenkytkentöjen avulla virtapiiri erotetaan verkosta ja vikapaikka tehdään jännitteettömäksi siksi aikaa, että valokaari deionisoituu ja sammuu. Valokaaren sammumisen jälkeen syöttö pystytään palauttamaan ja täten tehokkaasti pienentämään pysyvien vikatapausten määrää. Jälleenkytkentöjä suoritettaessa tulee varmistua verkon tahdistuksesta, jos syöttösuuntia on enemmän kuin yksi (Blackburn 1998: 490–491). Generaattoreille ja siten myös hajautetulle tuotannolle väärin tahdistettu jälleenkytkentä aiheuttaa termisten rasitusten lisäksi staattorikäimitykselle erittäin suuria mekaanisia rasituksia, jotka pahimmillaan saattavat johtaa eristysvaurioon. Myös jälleenkytkentä saattaa epäonnistua virheellisen tahdistuksen seurauksena (Mörsky 1992: 349).

Kaapeliverkossa viat ovat yleensä pysyviä, eikä jälleenkytkentöjä yleensä kannata käyttää. Kaapelissa läpilyönti aiheuttaa eristykselle vaurioita, joita jälleenkytkennän käyttö

ei poista. Johto-osuudella, jolla on sekaisin avojohtoa ja kaapelia jälleenkytkentää käytetään yleensä silloin kun avojohdon osuus on suurempi (Blackburn 1998: 491).

Valokaaren deionisoitumiseen tarvittava aika määräytyy käytetyn jännitteen mukaisesti. Tarvittava deionisoitumisaika voi pidentyä jos generaattoreita jää ylläpitämään jännitettä vikapaikassa. Tarvittava deionisoitumisaika kolminapaisille jälleenkytkennöille voidaan Blackburnin (1998: 490) mukaan likimääräisesti laskea kaavalla:

$$t = \frac{U}{34,5} + 10,5 \text{ jaksoa}, \quad (4)$$

missä

U = nimellinen pääjännite kilovolteissa [kV].

Jälleenkytkennät suoritetaan ennalta ohjelmoidun logiikan mukaisesti. Ensimmäinen jälleenkytkentä suoritetaan mahdollisimman pian vian havaitsemisen jälkeen ja katkaisija ohjataan takaisin kiinni ennalta määrätyn jännitteettömän väliajan jälkeen. Tätä toimenpidettä kutsutaan pikajälleenkytkennäksi (PJK). Jos suojarole ei PJK:n jälkeen enää havaitse vikaa, voidaan palata normaaliin vikaa edeltäneeseen tilaan. Jos vika ei ole poistunut vielä PJK:n aikana on mahdollista tehdä viivästetty jälleenkytkentä, jota kutsutaan aikajälleenkytkennäksi (AJK). Viivästettyjä jälleenkytkentöjä voidaan suorittaa useampiakin. AJK voidaan tehdä myös ilman PJK:ta, jos PJK:n onnistumismahdollisuudet tiedetään heikoiksi. (Mörsky 1998: 352–356.)

3.2. IEC 61850

IEC (International Electrotechnical Commission) 61850-standardi on kehitetty silmälläpitäen tavoitteita saada aikaiseksi yksi kansainvälinen standardi sähkönjakeluautomaation tiedonsiirrolle. IEC 61850-standardi onkin lyhyessä ajassa saavuttanut vankan aseman, ei vain sähköasema-automaatioalalla, vaan myös suunnitellun alkuperäisen sovel-lusalueensa ulkopuolella. Standardi määrittelee sähköaseman ja siihen liittyvien laitteiden välisen kommunikaation. IEC 61850-standardi mahdollistaa eri laitteiden liittämi-

sen toisiinsa yhteentoimivalla tavalla ja ottaa samalla askeleen kohti älykkäitä jakeluverkkoja. Yhden kansainvälisen standardin käyttö eliminoi tarpeet tehdä yksilöllisiä sovelluksia ja mahdollistaa eri valmistajien tuotteiden yhteentoimivuuden. (ABB 2008; Goodman 2008: 54–59; IEC 2009.)

IEC 61850-standardi hyödyntää ethernet-lähiverkkoteknologiaa, joka yhdessä GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event)-viestien kanssa mahdollistaa kommunikation avulla yksiköiden välisten monipuolisten loogisten toimintojen toteuttamisen sähköverkkojen suojaamiseksi. GOOSE-viesteillä voidaan välittää tietoa sähköaseman tapahtumista, hälytyksistä tai viesteistä. GOOSE-viestien avulla voidaan kommunikoida molempiin suuntiin myös hajautetun tuotannon suojalaitteiden kanssa. Näin mm. hajautetun tuotannon lukitus ja etälaukaisu on mahdollista toteuttaa nopeasti ja varmasti. (ABB 2008; Goodman 2008: 54–59.)

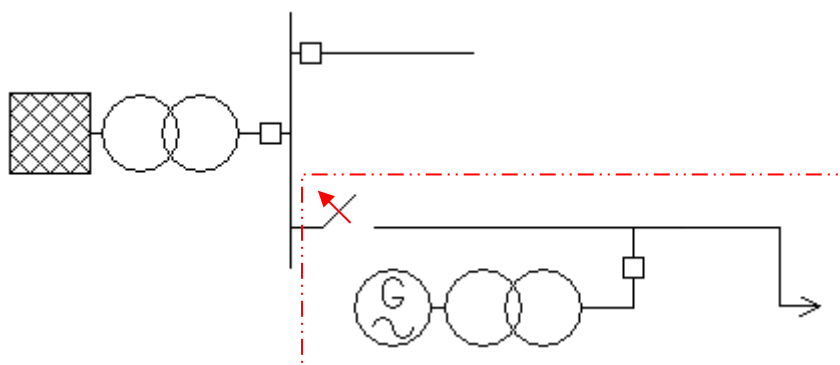
3.3. Saarekekäytön estosuoja

Hajautetun tuotannon suojausta suunniteltaessa on otettava huomioon mahdollinen pienvoimalan saarekekäyttö. Saarekekäyttö terminä tarkoittaa tilannetta, kun saarekkeeksi jäänyttä verkon osaa syöttää yksi tai useampi voimalaitos (Stråth 2005: 2). Kuvassa 5 on esimerkki siitä, kuinka katkaisijan avautuessa pienvoimala jää yksin syöttämään omaa lähtöä ja sillä olevia kuormia. Yksin saarekettä syöttämään jäänyt voimala on erotettava mahdollisimman nopeasti, sillä muuten on vaarana verkkojännitteen palautuessa joko jälleenkytkennän tai muun kytkentätapahtuman seurauksena syntyvä tahdistamaton kytkentä. Saarekekäytön estosuojalla on vaikutusta myös henkilöturvallisuuteen, sillä verkon kanssa työskentelevien ihmisten turvallisuuden kannalta ei voimala saa syöttää verkkoon takajännitettä ja on siten erotettava mahdollisten vaaratilanteiden välttämiseksi (Econnect 2001: 14; SENER 2001: 19–20).

Saarekekäytön estomenetelmät (islanding detection, loss of mains protection) jaetaan kolmeen ryhmään: passiivisiin, aktiiviseen ja tietoliikenteeseen perustuviin ratkaisuihin. Passiiviset menetelmät perustuvat mitattujen verkkosuureiden tarkkailuun. Aktiivisissa menetelmissä jännitettä tai taajuutta poikkeutetaan hieman ja tarkkaillaan järjestelmän

antamaa vastetta. Tietoliikennettä käyttävät ratkaisut perustuvat tuotantoyksikön erottamiseen tiedonsiirtoa apuna käyttäen (Stråth 2005: 29, 35–36). Kaikilla menetelmillä on niin hyviä kuin huonojakin puolia. Lähtien passiivisille menetelmille ominaisesta suojauksen katvealueesta aktiivisten monimutkaisuuteen ja aina tietoliikennetarkaisuiden kalliimpaan hintaan (Kumpulainen ym. 2006: 84, 98, 105).

Stråth (2005: 16) listaa saarekekäytön estosuojalle vaatimuksiksi kyvyn havaita kaikki saareketilanteet, ominaisuuden olla reagoimatta virheellisesti, sekä nopeuden. Yhdessä kaikkien ominaisuuksien toteutuessa muodostuu luotettava kokonaisuus saareketilanteen havaitsemiseksi ja poistamiseksi.



Kuva 5. Saareketilanteen muodostuminen.

3.3.1. Passiivisia suojausmenetelmiä

Pienvoimalalle asetettavat perussuojat ovat SENERin (2001: 17–21) suositusten mukaisesti yli- ja alijännitereleet jokaiselle vaiheelle, yksivaiheiset yli- ja alitaajuusreleet sekä ylivirtarele oikosulkuja vastaan. Jännite- ja taajuusreleet ovat pienvoimaloilla yleisimmin käytetyt saarekekäytön estomenetelmät. Näiden menetelmien nopeus ja tarkkuus voivat jäädä vaaditusta tasosta suuren katvealueensa takia. Näiden passiivisten menetelmien lisäksi pienvoimalaan on mahdollista lisätä myös muita suojausmenetelmiä mahdollisen saareketilanteen tehokkaampaa havaitsemista varten. Yleisimpiä lisäsuojia ovat taajuuden muutosnopeutta (rate of change of frequency – ROCOF) mittaava rele ja

jännitteen vaihesiirtymää, tai vektorihyppyä (voltage shift, voltage surge, voltage vector jump – VS) mittaava rele.

Hajautettua tuotantoa suojaavat yli- ja alijännitereleet sekä yli- ja alitaajuusreleet erottavat voimalan, jos niiden mittaama taajuus tai jännite poikkeaa asetteluarvoista. Niiden tehtävänä on myös huolehtia, että kuluttajien jännitteen laatu on hyväksyttävällä tasolla.

Saarekkeeksi siirryttäessä saarekkeen taajuus muuttuu, jos saarekkeen sisällä kulutus ja tuotanto eroavat toisistaan. Taajuuden muutosnopeutta tarkkaileva rele havahtuu, jos taajuuden muutosnopeus on tarpeeksi suuri. Jännitteen vaihesiirtymää tarkkaileva rele laskee sähköisen jakson kestoa ja vertaa saatua tulosta edellisiin. Sähköisen jakson pituuden muuttuessa rele suorittaa laukaisun. Tehotasapainon vallitessa saarekkeessa niin päto- kuin loistehonkin osalta muodostuu katvealue, jolloin ROCOF- ja VS-releet eivät välttämättä havaitse yksinsyöttötilannetta. Katvealueen lisäksi molemmat menetelmät ovat alttiita virhelaukaisuille muualla verkossa tapahtuvien vikojen tai kytkentätilojen muutosten seurauksena.

ROCOF ja VS suojausmenetelmien puutteellisuudesta antaa viitteitä Yorkshire Electricityn verkkoonliityntäehdot, jotka kieltävät kyseisten menetelmien käytön, jos generaattorin koko on yli 1 MW. Täydentävänä kohtana he mainitsevat, että etälaukaisuun perustuva yksinsyötön estosuojan tulee olla käytössä, jos muodostuvassa saarekkeessa on yhteenlaskettua tuotantoa kaksi kertaa enemmän kuin sen pienin kuorma (Econnect 2001).

3.3.2. Aktiivisia suojausmenetelmiä

Finneyn, Kasztempyn & Adamiakin (2003) mukaan aktiiviset menetelmät ovat luontaisesti monimutkaisempia passiivisiin menetelmiin verrattuna. Osa aktiivisista menetelmistä soveltuu käytettäväksi ainoastaan tehoelektroniikkapohjaisten tuotantolaitosten kanssa.

Aktiiviset menetelmät perustuvat jännitteen tai tehon manipulointiin. Jännitteen tai tehon manipulointi tuottaa muutoksen, jonka aikaansaamaa vastetta tarkkaillaan. Vaste on

erilainen riippuen siitä onko verkko saarekkeena vai ei. Aktiivisilla menetelmillä on lisäksi arveltu olevan negatiivinen vaikutus sähkön laatuun (Stråth 2005: 35).

Ropp, Begovic & Rohatgi (1999) esittävät julkaisemassaan raportissa menetelmän, joka perustuu pakotettuun taajuuden muutokseen. Menetelmässä taajuutta koetetaan muuttaa joko suuremmaksi tai pienemmäksi ja järjestelmän vasteen perusteella päätellään onko kyseessä saareketilanne. Menetelmällä on olemassa pieni katvealue, jolloin yksinsyöttötilanne jää huomaamatta.

Loistehon tuotantoa hyväksi käytävässä menetelmässä generaattorin magnetointia säätämällä pidetään generaattorin syöttämä loisvirta vakiona, mikä onnistuu ainoastaan jos yhteys pääverkkoon on olemassa. Menetelmä on luotettava, mutta sen toiminta-aika on liian hidaskäytön estosuojan vaatimaa nopeutta silmälläpitäen (O’Kane & Fox 1997).

O’Kane & Fox (1997) tuovat esille vielä verkon oikosulkutehon tarkkailuun perustuvan menetelmän. Tässä menetelmässä verkon impedanssia mitataan lähellä jännitteen nollassa kohtaa verkkoon lähetettävän jännitepiikin vasteen avulla.

3.3.3. Tietoliikenteeseen perustuvat ratkaisut

Etälaukaisuun perustuvassa ratkaisussa sähköasemalla olevat releet ovat yhteydessä hajautetun tuotannon releeseen tietoliikenneyhteyden avulla. Sähköasemalta käsin johtolähdön katkaisijan lauetessa voidaan automaattinen laukaisusignaali lähettää myös hajautetun tuotannon kytkinlaitteille ja siten tehokkaasti ja nopeasti poistaa mahdollinen saareketilanteen synty.

Jatkuvuussignaaliin perustuvassa menetelmässä verkon sähköasemalle tai 110 kV verkkoon sijoitetaan lähetin, joka syöttää jatkuvatoimisesti signaalia verkkoon. Tuotantoyksiköt vastaanottavat signaalia ja mikäli signaalia ei havaita, on yhteys pääverkkoon poikki. Jatkuvuussignaalin siirtyminen johdolle estyy esimerkiksi katkaisijan toimiessa, jolloin hajautetun tuotannon kytkinlaitteelle annetaan laukaisukäsky (Kumpulainen ym. 2005: 107).

Erilaisia tiedonsiirtoreittejä ja medioita on monenlaisia ja niitä esitelty Econnectin (2001) raportissa. Näitä ovat mm. suoraan etälaukaisuun perustuva radiolähettimien avulla tapahtuva tiedonsiirto ilmassa, sekä erillinen kaapelilla tai valokuidulla toteutettu yhteys. Yhteistä kaikille menetelmille raportin mukaan kuitenkin on korkea hinta, joka rajoittaa tietoliikenteeseen perustuvien ratkaisuiden käyttöä. Toisaalta voimalan kaukovalvonnasta on tulossa yhä tärkeämpää ja esimerkiksi IEEE 1547-standardi vaatiikin valmiutta kaukovalvontaan yli 250 kVA voimalaitoksilta (IEEE 2003: 7). IEEE 1547-standardin mukaan kaukovalvonnan avulla tulee saada tieto voimalaitoksen liityntäpisteen kytkentätilasta, päto- ja loistehosta sekä jännitteestä. Tanskassa alle 100 kV verkkoon kytketyiden tuulivoimaloiden pitää niille annettujen määräysten (Elkraft System & Eltra 2004: 26–27) mukaan pystyä lähettämään tietoja mm. voimalan lois- ja pätoehon tuotannosta, jännitteestä ja toteutumatta jääneestä tuotannosta ohjauskeskukseen. Voimalan pitää lisäksi pystyä vastaanottamaan ja toteuttamaan käskyjä ohjauskeskuksesta. Eräs käsky voi olla tarve rajata voimalan tuottamaa tehoa, jolloin osa tuotannosta jää toteutumatta. Tiedonsiirron voimalalta tulee tapahtua automaattisesti jonkun mitatun arvon muuttuessa.

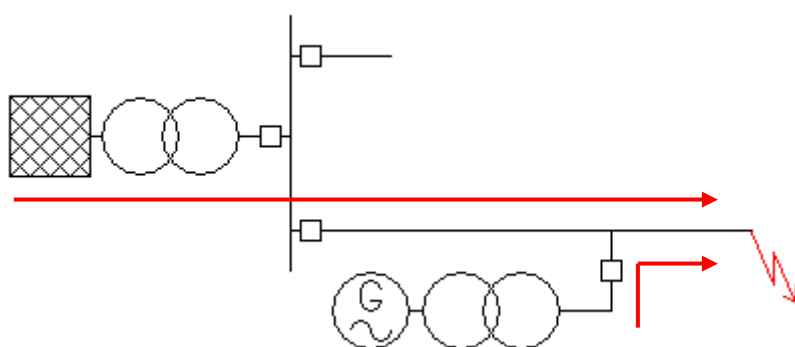
Samaa tietoliikenneväylää olisikin mahdollista hyödyntää voimalaitoksen kaukovalvontaan ja suojaukseen, mikä tekisi etälaukaisuun perustuvasta saarekekäytön estosuojasta taloudellisesti kannattavamman ratkaisun. Näin erillisellä tiedonsiirtoväylällä voitaisiin parantaa verkon turvallisuutta ja hallittavuutta sekä mahdollisesti myös voimalan käytönhallintaa.

3.4. Virhelaukaisujen mahdollisuuksia

Edellisten hajautetun tuotannon aiheuttamien verkkovaikutusten lisäksi erityisesti suojausten kannalta tarkasteltavia kohtia ovat mahdolliset tilanteet, joissa suojaus voi toimia väärin tai puutteellisesti.

3.4.1. Sokaistuminen

Kaikki samalla lähdöllä hajautetun tuotannon kanssa tapahtuvat oikosulkutilanteet voivat aiheuttaa havahtumisongelmia johtolähdön ylivirtasuojaukselle. Lähdön näkemä vikavirta pienenee, kun hajautettu tuotanto syöttää vikavirtaa rinnakkain verkon kanssa. Johtolähdön näkemä vikavirta saattaa pienentyä merkittävästikin ja hidastaa johtolähdön suojauksen toimintaa. Pahimmassa tapauksessa verkosta syötetty vikavirta pienenee niin paljon, että lähdön ylivirtasuojaus ei havaitse vikatilannetta ollenkaan, tällöin on kyse sokaistumisesta. Pahimpia tilanteita sokaistumisen kannalta ovat lähdön lopussa tapahtuvat suuriresistanssiset ja kaksivaiheiset viat. Vian tyyppin lisäksi sokaistumiseen vaikuttavat myös generaattorin tyyppi ja tarkemmin sen syöttämä vikavirran taso. Ongelma on sitä voimakkaampi, mitä enemmän generaattori pystyy syöttämään oikosulkuvirtaa. Myös generaattorin paikka lähdöllä vaikuttaa sokaistumisongelman vakavuuteen, ongelma voimistuu kun generaattori on kaukana lähdön alusta (Mäki 2007: 21–24). Kuvassa 6 on havainnollistettu hajautetun tuotannon aiheuttamaa lähdön ylivirtasuojauksen toiminnan estymistä.

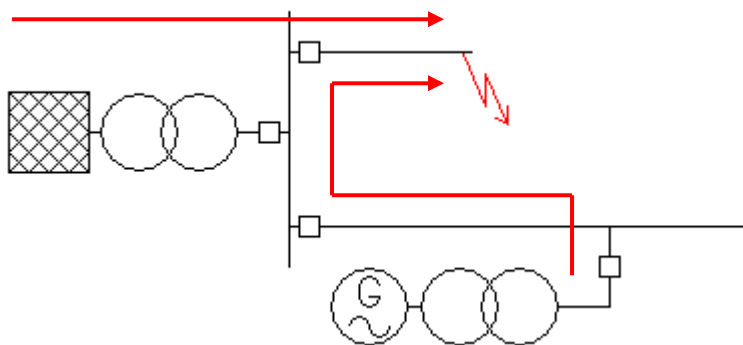


Kuva 6. Hajautetun tuotannon aiheuttama lähdön ylivirtasuojauksen toiminnan estyminen.

3.4.2. Johtolähdön tarpeeton laukaisu

Hajautettu tuotanto voi aiheuttaa terveeseen lähdön tarpeettoman laukaisun. Hajautetun tuotannon viereisen lähdön vikatilanteessa syöttämä vikavirta voi aiheuttaa hajautetun

tuotannon lähdön ylivirtasuojan tarpeettoman havahtumisen ja laukaisun. Viereisen lähdön vikatilanteissa hajautettu tuotanto syöttää vikavirtaa sähköaseman kiskon kautta vikapaikkaan kuvan 7 esittämällä tavalla. Tällöin oman lähdön ylivirtareleen näkemä vikavirta saattaa ylittää sille asetellun havahtumisrajan. Myös tässä generaattorin tyypillä ja paikalla on suuri merkitys, kuten on myös vian tyypillä ja paikalla. Hajautetun tuotannon viereisen lähdön vikaan syöttämän vikavirran suuruus muuttuu generaattorin koon mukaan. Nimellisteholtaan suurempi generaattori pystyy tuottamaan suurempia vikavirtoja vastaavanlaiseen nimellisteholtaan pienempään generaattoriin verrattuna. Generaattorityypillä ja erityisesti sen kyvyllä syöttää oikosulkuvirtaa on suuri vaikutus yhdessä sen kytkentäpaikan kanssa. Lähempänä lähdön alkua oleva generaattori tuottaa suurempia vikavirtoja viereisen lähdön vikoihin generaattorin näkemän vikaimpedanssin pienentyessä. Samalla tavalla viereisen lähdön alussa oleva vika aikaansaa generaattorin syöttämään suurempia vikavirtoja vikaimpedanssin pienentyessä. Vikatilanteista 3-vaiheisessa oikosulussa on kyseessä suurimmat vikavirrat.



Kuva 7. Hajautetun tuotannon aiheuttama tarpeeton laukaisu.

Samaan tapaan kuin oman lähdön ylivirtasuoja voi havahtua viereisen lähdön vioissa saattaa hajautetun tuotannon yhteydessä oleva ylivirtasuoja havahtua ja laueta tarpeetomasti.

3.4.3. Epäonnistunut jälleenkytkentä

Jälleenkytkentöjä suorittamalla merkittävä osa avojohtoverkon vioista poistuu jännitteettömän väliajan aikana. Jälleenkytkentöjen käyttö yhdessä hajautettua tuotantoa sisältävällä lähdöllä voi olla haastavaa. Jos hajautettua tuotantoa ei irroteta verkosta jälleenkytkentöjen ajaksi, on jälleenkytkennöillä suuri mahdollisuus epäonnistua. Verkkoon jäänyt hajautettu tuotanto voi säilyttää verkossa jännitettä ja siten ylläpitää vikapaikassa olevaa valokaarta. Valokaaren kerran sytyttyä sen ylläpitämiseen riittää vain pieni jännite (Horgan, Lannucci, Whitaker, Cibulka & Erdman 2002: 43). Näin jälleenkytkennän toimiessa normaalisti ohimenevä vika ei olekaan poistunut ja ohimenevät viat voivat suojauksen näkökulmasta näyttää pysyviltä (Mäki 2007: 26).

Jälleenkytkennän ajaksi verkkoa syöttämään jäänyt hajautettu tuotanto voi ajautua jälleenkytkennän jännitteettömän aikana pois tahdistamattoman syöttävän verkon kanssa, jolloin aiheutuu vaiheopposition riski. Tahdistamattoman jälleenkytkentä voi aiheuttaa generaattorille jännite-, virta- ja momenttirasituksia. Muille verkon komponenteille voi tahdistamattoman jälleenkytkennän seurauksena tulla ylimääräisiä rasituksia (Kumpulainen & Ristolainen 2006: 22–24). Hajautetun tuotannon irtautuminen jälleenkytkennän jännitteettömänä väliaikana on tärkeää. Jälleenkytkentöjen aikahidastusta kasvattamalla parannetaan mahdollisuuksia hajautetun tuotannon irtikytketymiselle. Lisäksi SENERin (2001: 13–14) suositusten mukaisesti pienvoimala ei saa aiheuttaa jälleenkytkennän epäonnistumista.

3.4.4. Saarekekäyttö

Hajautettu tuotanto mahdollistaa joko tahallisen tai tahattoman saarekekäytön. Tahattomassa saarekekäytössä yhteys syöttävään verkkoon katoaa ja hajautettu tuotanto jää yksin syöttämään muodostunutta saarekettä, kuten on jo aiemmin kuvailtu kohdassa 2.5. Tahattoman saarekekäytön ongelmina ovat sen vaikea havaittavuus passiivisilla menetelmillä tehotasapainon vallitessa. Lisänä voitaneen mainita mahdollinen maadoituksen muuttuminen keskijänniteverkkoa syöttävän lähdön erottuessa kiskostosta.

Suunnitelmallistakin saarekekäyttöä on tutkittu lähinnä käyttövarmuuden parantamistarkoituksessa, jolloin kuluttajien tarvitsema sähkönsyöttö saadaan ns. microgrid-verkosta. Microgrid-verkkoa voidaan hyödyntää mm. syöttävän verkon vikaantuessa, jolloin osa verkosta jää itsenäiseksi saarekkeeksi. Tällä tavalla kuluttajien sähkön laatua voidaan parantaa jakelukeskeytyksiä vähentämällä. Esimerkki suunnitellusta saarekekäytöstä on sairaala, jolta vaaditaan katkeamatonta sähkönsyöttöä (Stråth 2005: 2).

3.5. Hajautetun tuotannon releet – eri valmistajien ratkaisuja

Schweitzer Engineering Laboratories on tuonut hajautetun tuotannon suojaukseen tarkoitetun relemallin, jossa suojausfunktioina ovat yli- ja alitaajuus sekä yli- ja alijännite. Näiden lisäksi erillinen tahdistuksen valvonta-toiminto estää epätahdissa tapahtuvan hajautetun tuotannon kytkemisen (Schweitzer Engineering Laboratories 2009). Myös Basler on tuonut markkinoille vastaavanlaisilla ominaisuuksilla varustetun releen (Basler 2009). Siemensillä ja Arevalla on generaattorisuojaksi tarkoitettu rele myös samoin ominaisuuksin, mutta ne tukevat lisäksi IEC 61850-standardiin perustuvaa tiedonsiirtoa (Areva 2008; Siemens 2008). Lisäksi Areva markkinoi erillisiä siirtolaukaisuun tarkoitettuja releitä.

General Electric (GE) on kehittänyt langattoman ratkaisun saarekekäytön estosuojaksi. Ratkaisu perustuu siirtolaukaisuun, jossa siirtolaukaisusignaali kulkee langattomasti. Siirtolaukaisukäsky lähetetään aina sähköaseman katkaisijan auetessa. Siirtolaukaisukäsky lähetetään sähköasemalta tarvittaessa erilliselle matkan varrella olevalle toistimelle, josta signaali jatketaan edelleen hajautetulle tuotannolle. Sähköasemalle lähetetään vielä varmistus hajautetun tuotannon verkosta irtoamisesta. GE lupaa siirtolaukaisusignaalin perillemenon 30 millisekunnissa. Erillisen toistimen avulla samaan konseptiin on mahdollista sisällyttää useampi hajautetun tuotannon laitos. GE:n tarjoama suojausratkaisu mahdollistaa myös verkon tilan valvonnan langattomasti. (GE 2009.)

Crompton Instruments ja Motherwell (Crompton Instruments 2009; Motherwell 2009) ovat kumpikin tuoneet markkinoille nimenomaan hajautetulle tuotannolle tarkoitetun

yksinsyötön estoreleen. Molempien valmistajien relemalleissa yksintyötön esto perustuu ROCOF ja VS menetelmiin. Kummankin valmistajan releessä ROCOF ja VS toiminnot ovat käytössä samanaikaisesti, mutta näille voidaan antaa toisistaan riippumattomat ha-vahtumisrajat.

Patentti- ja rekisterihallituksen Vamp Oy:lle myöntämässä patentissa (Pat. FI 120122 B 2009) on menetelmä saarekekäytön estosuojaksi toteutettuna sähköverkossa kulkevaa ylläpitosignaalia tarkkailemalla. Sähköaseman kiskostolta syötetään verkkoon signaalia, jota tarkkaillaan tuotantolaitokselta käsin ja signaalin kadottua on kyse saareketilanteesta, jolloin voimalaitos voidaan erottaa verkosta.

ABB (ABB 2009) tarjoaa saarekekäytön estosuojaksi linjadifferentiaaliin perustuvaa ratkaisua, jonka avulla on mahdollista suojata säteittäisiä lähtöjä joiden varrella on hajautettua tuotantoa. RED615 tuotesarja tukee IEC 61850-standardiin perustuvaa tiedon-siirtoa. Kyseinen tuotesarja on mahdollista oikosulkusuojan lisäksi varustaa myös suun- taamattomalla tai vaihtoehtoisesti suunnatulla maasulkusuojalla.

4. TUTKITTAVIEN TAPAUSTEN MÄÄRITTELY

Hajautetun tuotannon suojarleistyksen toiminnallisia vaatimuksia tutkittiin selvittämällä suojarleistyksestä vaadittavia toimintoja kolmella erityyppisellä verkkoratkaisulla. Tässä kappaleessa määritellään tutkittavat verkkorakenteet, sekä perehdytään verkkoratkaisuissa oleviin mahdollisiin muuttujiin ja teknisiin variaatioihin. Nämä voivat vaikuttaa hajautetun tuotannon suojarleistyksen toiminnallisiin vaatimuksiin. Teknisistä variaatioista jännitetaso, johtolaji ja maadoitus on kiinnitetty verkkoratkaisuihin sopiviksi, eikä niiden osalta nähdä muutoksia. Kuormien ja tuotannon etäisyydet toisiinsa ja kiskostoon nähden sekä generaattorin tyyppi voivat vaihdella ja työssä on pyritty ratkaisuun, joka kattaa nämä muutokset. Verkkorakenteiden määrittelyn jälkeen määritellään tarkasteltavat vikatilanteet.

Mahdollisia teknisiä variaatioita ja muuttujia eri verkkorakenteilla ovat:

- keskijännitteen jännitetaso
- kuormien ja tuotannon etäisyydet toisiinsa ja kiskoon nähden
- johtolaji
- maadoitus
- generaattorin tyyppi.

Keskijännitteen taso vaihtelee suuresti käytetystä lähteestä riippuen. IEEE 1623–2004 (IEEE 2005: 1)-standardi määrittelee keskijännitteen olevan välillä 1–35 kV. NECA/MACSCB 600–2003 (NECA/MACSCB 2003)-standardi puolestaan viittaa keskijännitekaapeleihin nimellisjännitteeltään 600–69 000 V. Keskijännitteen jännitetasoksi on valittu 20 kV seuraten Suomessa yleisesti käytössä olevaa keskijännitejakeluverkon jännitetasoa. Kuormien ja tuotannon paikat voivat keskijänniteverkossa vaihdella paljonkin, samalla etäisyydet näiden ja kiskoston välillä vaihtelevat. Johtolajina voi olla joko avojohto tai maakaapeli. Näistä kahdesta johtolajista koostuva verkko, jossa on sekaisin avojohtoa ja kaapelia on myös mahdollinen. Verkon maadoitustapa voi olla mm. maasta erotettu, kompensoitu, resistanssin kautta maadoitettu tai suoraan maadoitettu. Keskijännitejakeluverkon maadoitustavaksi kaikissa verkkorakenteissa on valittu

maasta erotettu verkko. Mahdollisia hajautetussa tuotannossa käytettäviä generaattori-tyyppejä on kolme, tahtigeneraattori, epätahtigeneraattori ja tehoelektroniikkaan perustuva muunnin.

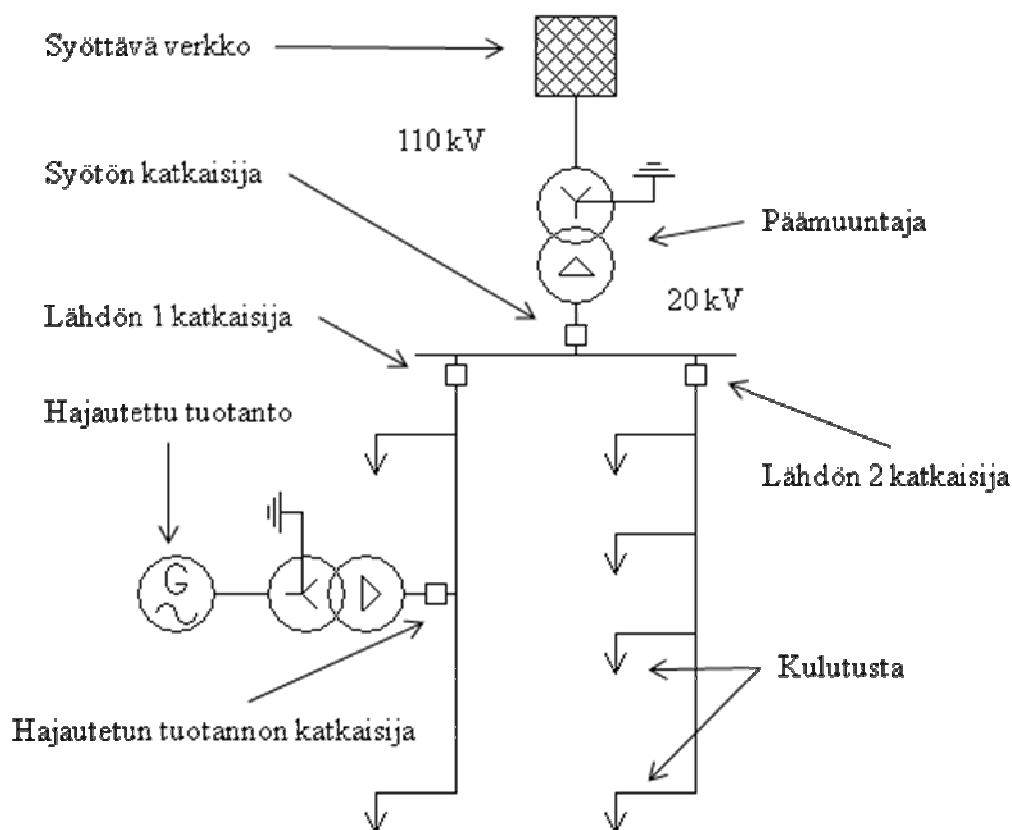
Yhtenä tärkeänä muuttujana tässä työssä on käytetty tietoliikenneyhteyttä. Suojauksen toiminnallisia vaatimuksia tutkitaan tietoliikenneyhteyden ollessa käytössä ja myös ilman sitä.

4.1. Tarkasteltavien verkkorakenteiden esittely

Seuraavaksi esitellään kolme erilaista verkkorakennetta. Erona näillä on verkkojen rakenne, sekä hajautetun tuotannon sijoituspaikka. Hajautetun tuotannon suojaus sijaitsee sen liityntäpisteessä (PCC, Point of Common Coupling). Liityntäpisteenä toimii verkon ja tuotantolaitoksen rajapinta. Kaikille verkkorakenteille yhteiset katkaisijat ovat nimetty kuvan 8 osoittamalla tavalla. Jokaista katkaisijaa ohjaa siihen liitetty samanniminen rele, esimerkiksi syötön katkaisijaa ohjaa syötön rele. Kuvasta 8 käy ilmi myös muita kaikille verkkorakenteille yhteisiä piirteitä. Näitä ovat:

- Syöttävä verkko: 20 kV keskijänniteverkkoa syöttävä 110 kV verkko.
- Päämuuntaja: 20 kV keskijänniteverkkoa syöttävä muuntaja.
- Syötön katkaisija: syötön ja kiskoston erottava katkaisija.
- Lähdön 1 katkaisija: lähdön 1 erottava katkaisija.
- Hajautettu tuotanto: lähdön varrelle sijoitettu hajautettu tuotanto.
- Lähdön 2 katkaisija: lähdön 2 erottava katkaisija.
- Kulutusta: molempien lähtöjen varrella mahdollisesti olevaa kulutusta.
- Hajautetun tuotannon katkaisija: hajautetun tuotannon erottava katkaisija.

Kaikkia verkkorakenteita syötetään 110 kV siirtoverkon kautta, keskijännitteen tason kiskostossa ja jakeluverkossa ollen 20 kV. Kaikki verkkorakenteet sisältävät tarkasteltavien lähtöjen lisäksi taustaverkkoa. Taustaverkkoa ei tässä tarkastella, koska taustaverkon lähtöjen suhteen voidaan toteuttaa samanlainen tarkastelu, kuin lähdön 2 osalta on tehty.



Kuva 8. Katkaisijoiden ja releiden nimet.

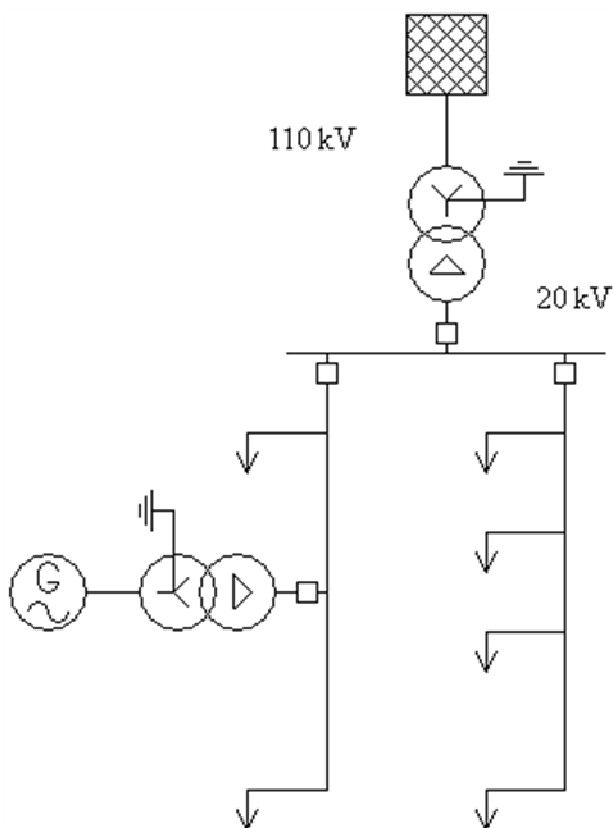
4.1.1. Verkkorakenne a

Ensimmäinen tarkasteltava verkkorakenne (verkkorakenne a) käsittelee tilannetta, jossa hajautettu tuotanto on liitettyä keskijännitelähdölle jolla on myös kuormaa. Esimerkiverkossa on kaksi johtolähtöä, joista toinen sisältää ainoastaan kulutusta. Käytännössä verkko voi kuitenkin sisältää useampia johtolähtöjä ja myös useampaan johtolähtöön voi olla liitettyä hajautettua tuotantoa.

Verkkorakenne sisältää kaksi variaatiota. Näistä ensimmäinen (kuva 9) käsittää kaksi lähtöä, joista toisella on hajautettua tuotantoa. Jälkimmäisessä tapauksessa (kuva 10) on hajautettua tuotantoa sisältävälle lähdölle lisätty välikatkaisija hajautetun tuotannon jälkeen. Verkkorakenteeksi molemmissa tilanteissa on valittu säteittäinen verkko. Kumpi-

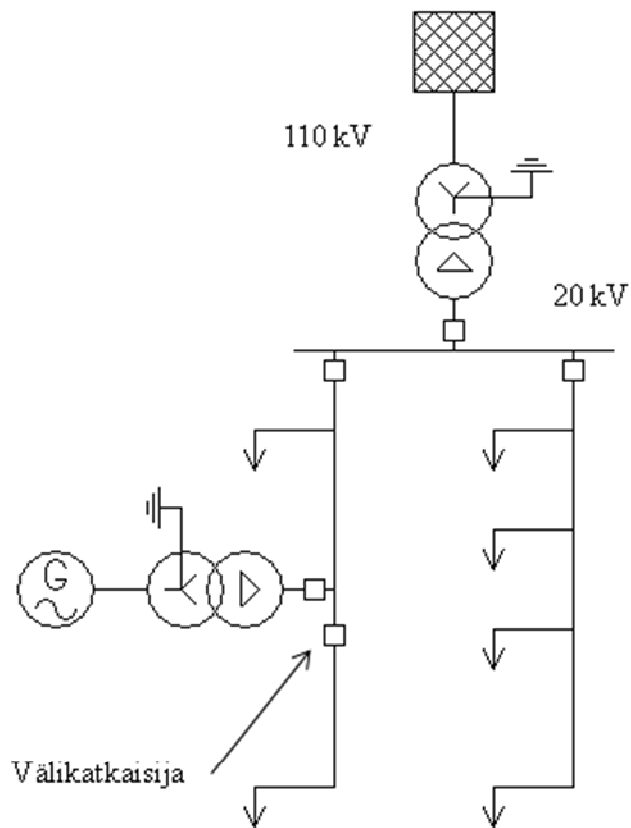
kin verkko koostuu perinteisen maaseudulla käytetyn säteittäisen verkon tapaan pääosin ilmajohdoista.

Verkon suojaamiseksi verkko on varustettu erilaisilla suojalaitteilla. Lähdön 2 oikosulkuja varten on kyseinen lähtö varustettu ylivirtasuojalla. Lähdön 2 maasulkujen varalta on kyseinen lähtö ylivirtasuojan lisäksi varustettu suunnatulla maasulkusuojauksella. Lähtö 1 on myös varustettu ylivirtasuojalla, sekä suunnatulla maasulkusuojalla. Sähköaseman kiskostossa on ylivirtasuojaja ja suuntaamaton maasulkusuojaja. Lisäksi hajautettu tuotanto on varustettu ylivirtasuojalla, yli- ja alijännitesuojalla sekä yli- ja alitaajuussuojalla. Erillisiä saarekekäytön estosuojia on myös mahdollista lisätä hajautetun tuotannon yhteyteen.



Kuva 9. Periaatekuva verkkorakenteesta a.

Kuvan 10 tapauksessa lähdölle 1 on lisätty välikatkaisija johtolähdön suojausten so-
kaistumisen estämiseksi. Lähdön 1 rele sisältää samat suojalaitteet, mitä edellä on ker-
rottu, joiden lisäksi välikatkaisija on varustettu ylivirtasuojalla ja suunnatulla maasul-
kusuojalla.

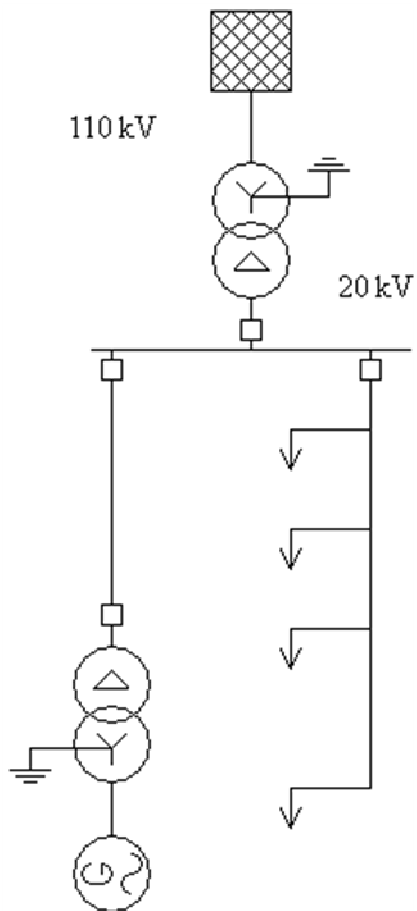


Kuva 10. Periaatekuva verkkorakenteesta a välikatkaisijalla.

4.1.2. Verkkorakenne b

Verkkorakenne b käsittelee tilannetta, jossa hajautettu tuotanto on liitettyinä lähtöön, jol-
la ei ole kulutusta vaan se on tarkoitettu pelkästään hajautettua tuotantoa varten. Periaa-
tekuva tilanteesta on esitetty kuvassa 11. Verkko koostuu kahdesta lähdöstä, joista vain
toisella (lähtö 2) on kulutusta.

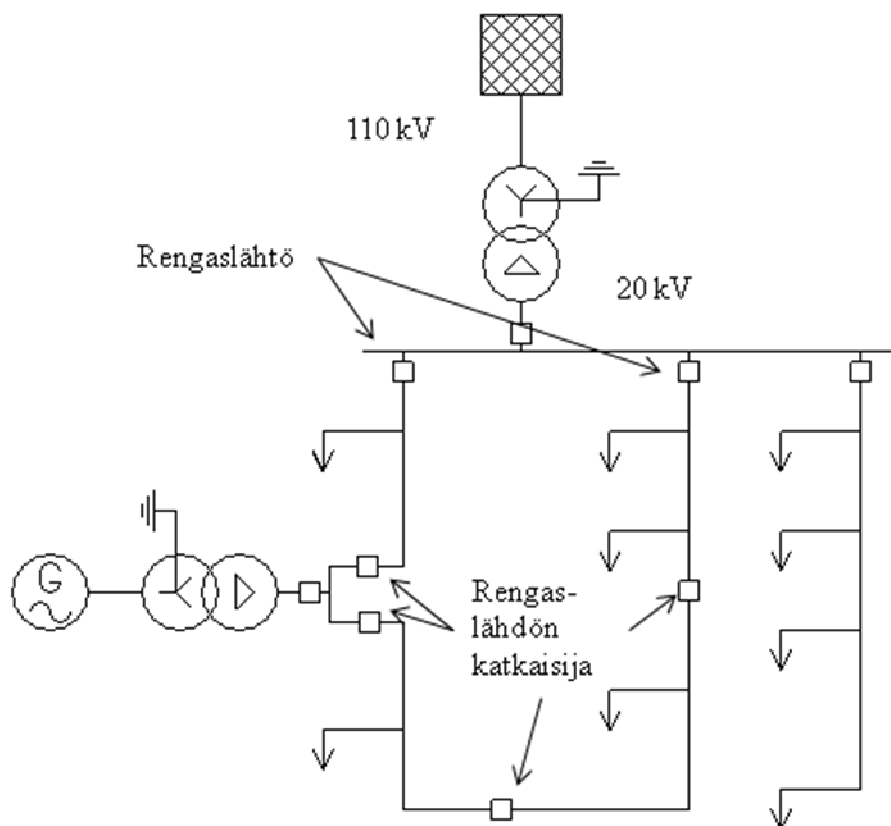
Samaan tapaan kuin verkkorakenteessa a on tämäkin verkko rakenteeltaan säteittäinen ja myös pääosin ilmajohtoa. Verkon suojauksen osalta lähdön 2 ja kiskoston suojaus pysyy muuttumattomana edelliseen tapaukseen nähden. Verkkorakenteen a kohdalla mainittujen lähdön 1 ja hajautetun tuotannon suojausmenetelmien lisäksi on lähtö mahdollista suojata differentiaalisuojalla.



Kuva 11. Periaatekuva verkkorakenteesta b.

4.1.3. Verkkorakenne c

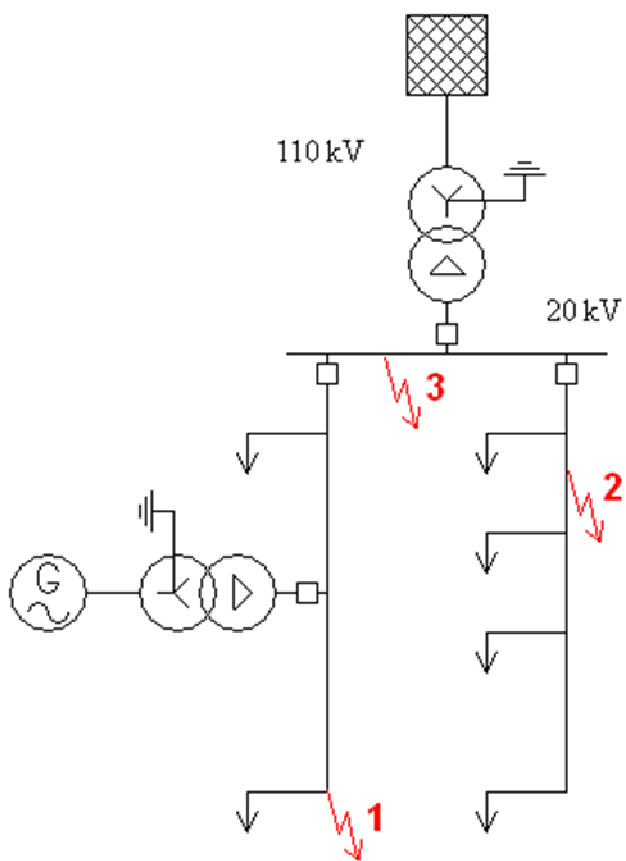
Verkkorakenne c edustaa hajautetun tuotannon käyttöä suljetussa rengasverkossa, josta on esitetty periaatekuva kuvassa 12. Rengasverkko on mahdollista kytkeä avoimeksi rengasverkoksi siellä olevien katkaisijoiden avulla. Tutkittava rengasverkko sisältää kolme eri vyöhykettä, jotka on erotettu katkaisijoiden avulla ja joista yhteen on kytketty hajautettua tuotantoa. Hajautetun tuotannon lisäksi rengasverkko sisältää myös kulutusta. Rengasverkon lisäksi tutkittavana on yksi viereinen lähtö (lähtö 2), jonka verkkomuoto on säteittäinen. Rengasverkko soveltuu parhaiten taajamiin, joissa johtolajina usein on maakaapeli. Siispä rengasverkon johtolaji on pääosin maakaapelia. Suojalaitteina verkossa on rengasverkon lähdöillä ylivirtasuoja, sekä suunnattu maasulkusuoja. Renkaan eri alueisiin jakavat katkaisijat on varustettu suunnatuilla ylivirtasuojilla. Lähtö 2, kuten myös syötön katkaisija on edeltävien verkkorakenteiden tapaan suojattu ylivirtasuojalla ja suunnatulla maasulkusuojalla.



Kuva 12. Periaatekuva verkkorakenteesta c, silmukoitu verkkorakenne.

4.2. Tarkasteltavat vikatilanteet

Suojareleistyksen tulee toimia niin erilaisilla verkkorakenteilla kuin erilaisissa vikatilanteissakin. Verkkomallista riippumatta erilaisia vikapaikkoja on kolme, jotka käydään läpi seuraavaksi kukin omassa alakappaleessaan. Vikapaikoista on esitetty periaatekuva perustuen verkkorakenteen a verkkomalliin kuvassa 13. Eri vikatilanteita puolestaan voivat olla vikapaikasta riippuen kaksi- ja kolmevaiheiset oikosulut sekä yksivaiheinen maasulku. Näiden vikatilanteiden lisäksi voidaan tarkastella saarekekäyttötilannetta, jossa hajautettu tuotanto äkisti lähdön katkaisijan auetessa jää yksin syöttämään kyseistä lähtöä.



Kuva 13. Eri vikapaikat verkkorakenteessa a.

4.2.1. Vika samalla lähdöllä hajautetun tuotannon kanssa

Vian ollessa samalla lähdöllä kuin hajautettu tuotanto (lähtö 1) vikatilanteet joita tutkimalla relesuojauksen toiminnallisia vaatimuksia tarkastellaan, ovat kaksivaiheinen oikosulku ja yksivaiheinen maasulku.

Kaksivaiheisen oikosulun tarkasteltava paikka vaihtelee verkkorakenteen mukaan. Verkkorakenteessa a kaksivaiheisen oikosulun paikka on lähdön lopussa, kuten on esitetty kuvassa 13. Verkkorakenteessa b vian paikkana on lähdön alku ja verkkorakenteessa c hajautetun tuotannon viereisellä alueella renkaassa kumpaan suuntaan tahansa.

4.2.2. Vika lähdöllä 2

Kaikissa tutkittavissa verkkorakenteissa lähtö 2 on samankaltainen, koostuen säteittäisestä johtorakenteesta ja ainoastaan kuormista. Kaikissa tutkittavissa verkkorakenteissa myös tarkasteltavat vikatapaukset ovat samanlaisia, kolmivaiheinen oikosulku ja yksivaiheinen maasulku. Lähdön 2 alussa tapahtuvaan kolmivaiheiseen oikosulkuun hajautettu tuotanto syöttää suurimman mahdollisen vikavirran, jonka se voi syöttää viereisen lähdön vikoihin. Tämän vuoksi hajautetun tuotannon voi olla vaikea pelkän vikavirran perusteella erottaa vian paikkaa ja tarkasteltavaksi vikapaikaksi on valittu lähdön 2 alku. Yksivaiheisen maasulun paikalla ei lähdöllä 2 ole merkitystä, joten se voi sijaita missä tahansa.

4.2.3. Vika kiskostossa

Kiskostossa sattuvissa vioissa eri vikatyyppejä ei ole eroteltu, koska kaikissa vikatapauksissa suojauksen tulisi toimia samalla tavalla tehden kiskostosta jännitteettömän. Samalla hajautetun tuotannon tulisi erottua verkosta. Suojauksen toiminta on samanlaista kaikilla eri verkkorakenteilla.

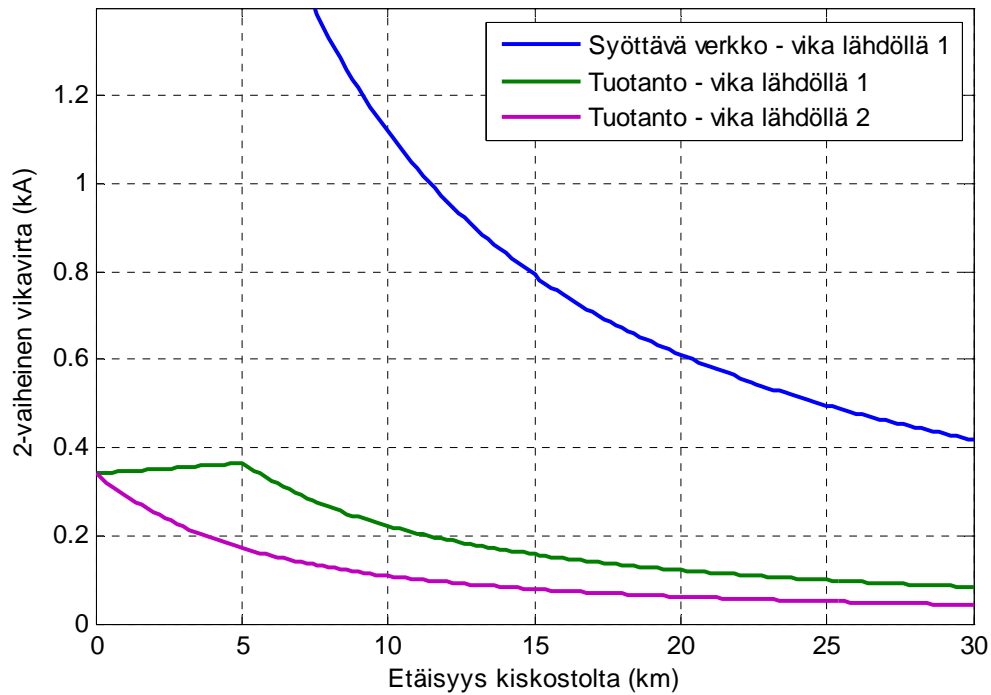
5. SUOJAUKSEN TOIMINNAN ANALYSOINTI ERI VIKATILANTEISSA

Suojauksen toimintaa on mahdollista analysoida monin eri tavoin. Tässä kappaleessa sitä on ensin analysoitu oikosulkuvirtojen ja jännitteen käyttäytymisen avulla. Tämän jälkeen on rengasverkon maasulkusuojauksen toimintaa tutkittu simulointien avulla. Lopuksi ylivirtasuojauksen turhaa laukaisua ja saarekekäytön estoreleiden toimintaa käydään läpi jo aiemmin eri raportissa tehtyjen simulointien perusteella.

5.1. Oikosulkuvirtojen käyttäytyminen

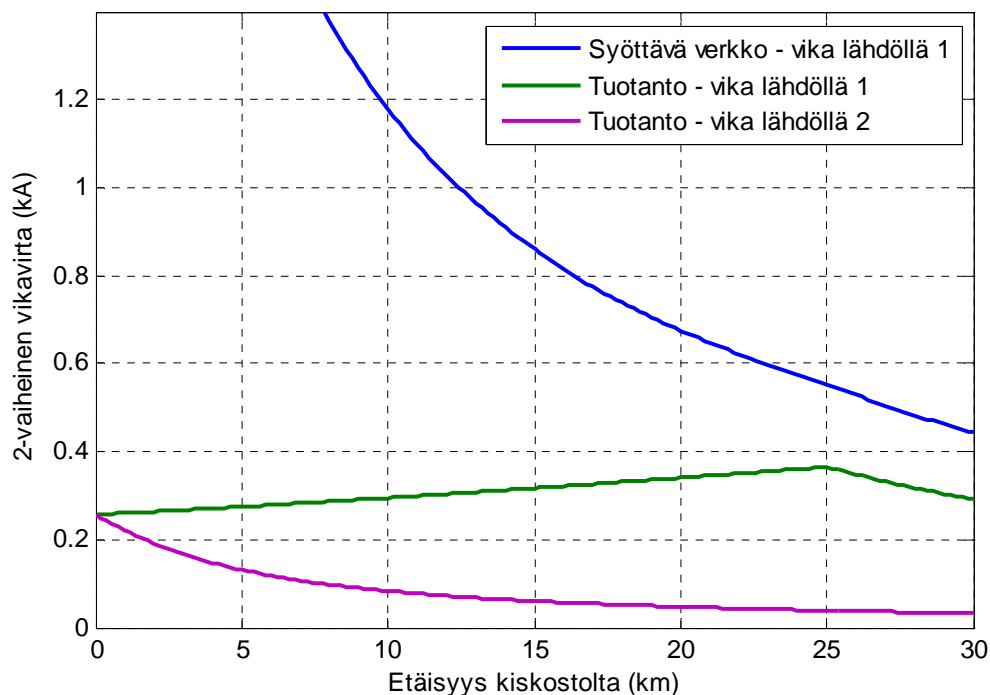
Seuraavaksi tarkastellaan verkosta ja hajautetulta tuotannolta syötetyn oikosulkuvirran tasoja yksinkertaisessa esimerkkiverkossa.

Kuvassa 14 on esitetty yksinkertaisen esimerkkiverkon 2-vaiheisten oikosulkuvirtojen tasoa etäisyyden funktiona. Esimerkkiverkko on rakennettu verkkorakenteen a kaltaiseksi verkoksi, jossa on kaksi lähtöä, mutta nyt lähdöille ei kuitenkaan ole mallinnettu kuormaa. Lähdön 1 pituus on tässä 30 km johtolajin ollessa Raven. Hajautettu tuotanto on kuvan 14 esimerkissä sijoitettu 5 km päähän lähdön alusta. Syöttävän verkon oikosulkuteho on 1000 MVA ja keskijänniteverkkoa syöttävän muuntajan (110/20 kV) nimellisteho on 16 MVA ja sen suhteellinen oikosulkuimpedanssi on 0,1 p.u. Hajautetun tuotannon tuottama oikosulkuteho on 14,6 MVA. Kuvan ylin käyrä kuvaa syöttävästä verkosta lähdölle 1 syötetyn 2-vaiheisen oikosulkuvirran suuruutta. Kaksi muuta käyrää kuvaavat hajautetulta tuotannolta syötettävää 2-vaiheista oikosulkuvirtaa. Näistä kahdesta ylempi puolestaan kuvaa hajautetulta tuotannolta syötetyn oikosulkuvirran suuruutta vian ollessa lähdöllä 1 ja alempi vastaavan virran suuruutta vian ollessa lähdöllä 2. Molemmilla lähdöillä on johtolajina Raven.



Kuva 14. Syötetyn vikavirran osuus verkosta ja hajautetulta tuotannolta 2-vaiheiseen oikosulkuun vian etäisyyden funktiona vian ollessa lähdöillä 1 ja 2.

Kuvan 15 esimerkiverkko on samankaltainen kuvassa 14 käytetyn verkon kanssa, hajautetun tuotannon paikkaa on kuitenkin muutettu ja se sijaitsee nyt 25 km päässä lähdön alusta.

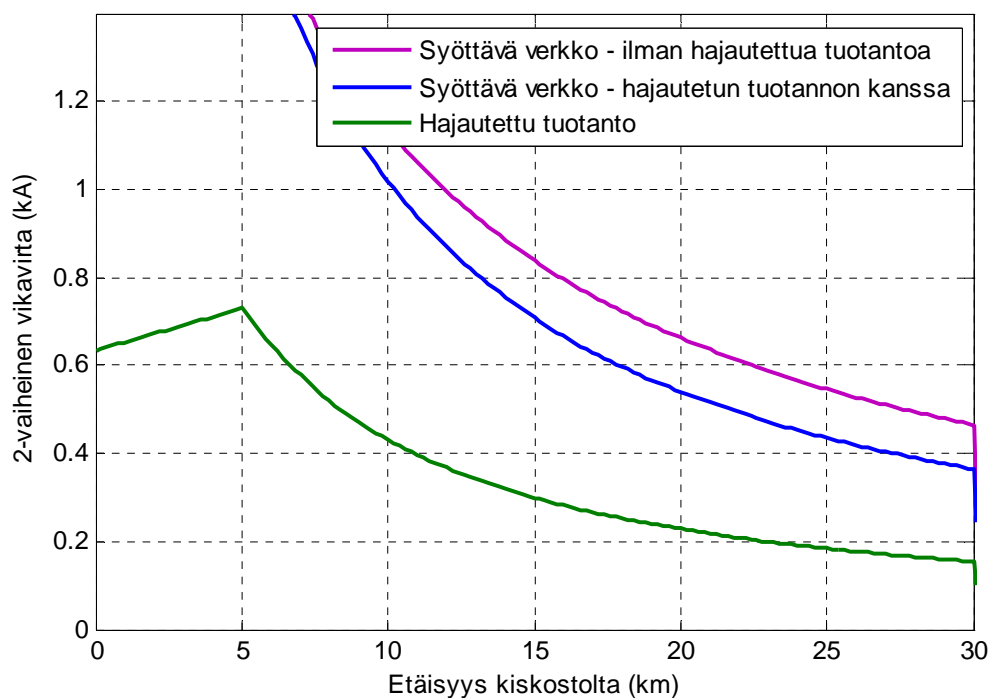


Kuva 15. Syötetyn vikavirran osuus verkosta ja hajautetulta tuotannolta 2-vaiheiseen oikosulkuun vian etäisyyden funktiona vian ollessa lähdöillä 1 ja 2.

Hajautetun tuotannon vaikutus verkosta syötetyn tehon ja lähdön 1 oikosulkusuojauksen sokaistumisen havainnollistamiseksi on kuvassa 16. Edellä mainitun verkon ja hajautetun tuotannon parametreja muutettu. Syöttävän verkon oikosulkuteho on pienennetty puoleen edellisestä arvoon 500 MVA ja hajautetun tuotannon oikosulkutehoa on kasvatettu kaksinkertaiseksi arvoon 29,2 MVA. Hajautettu tuotanto sijaitsee nyt 5 km lähdön 1 alusta katsottuna. Ylimpänä kuvaajassa oleva käyrä kuvaa verkon syöttämää 2-vaiheista oikosulkuvirtaa, kun verkkoon ei ole liitettynä hajautettua tuotantoa. Sitä alemmassa käyrässä on verkosta syötetty 2-vaiheinen oikosulkuvirta, hajautetun tuotannon ollessa liitettynä verkkoon. Alin käyrä on hajautetulta tuotannolta syötetty 2-vaiheinen oikosulkuvirta. Kuvan 16 tapauksessa vika on lähdöllä 1.

Kuvan 16 tilanne ei kuitenkaan ole realistinen, vaan esimerkkinä korostaen tehty. Verkkoonliityntäehdot eivät salli näin ison generaattorin liittämistä. Kappaleessa 2.5.4. sivul-

la 22 olevan yhtälön (3) mukaan voidaan laskea verkkoon liittyvän generaattorin suurin sallittu teho.



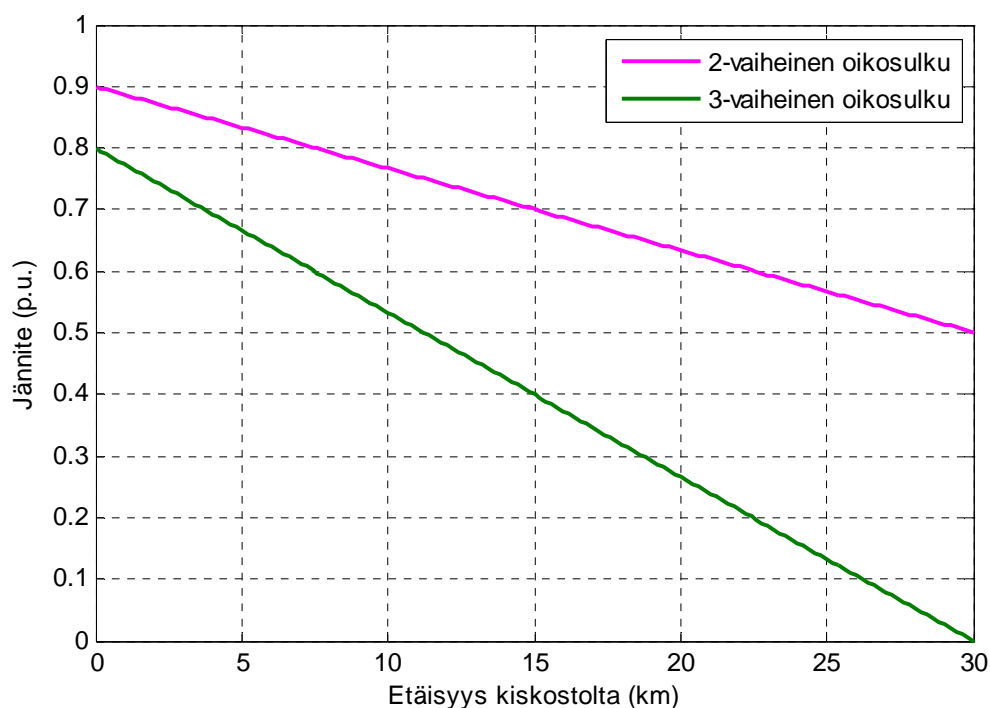
Kuva 16. Verkosta ja hajautetulta tuotannolta syötettyjen vikavirtojen osuus 2-vaiheiseen oikosulkuun vian etäisyyden funktiona.

Kuvan 16 perusteella voidaan nähdä, kuinka hajautetulla tuotannolla on vaikutusta lähdön 1 releen näkemään 2-vaiheiseen oikosulkuvirtaan. Hajautetun tuotannon lisäämisen seurauksesta lähdön 1 releen näkemä 2-vaiheinen vikavirta lähdön loppupäässä tapahtuvaan 2-vaiheiseen oikosulkuun pienenee huomattavasti.

5.2. Jännitteen käyttäytyminen oikosulun aikana

Seuraava kuva (kuva 17) havainnollistaa jännitekuopan syvyyttä vian aikana lähdön varrella, vian tapahtuessa aivan lähdön lopussa. Alkuun jännite alenee hieman syöttävän

verkon impedanssien vaikutuksesta. Tämän jälkeen johtolajin ollessa koko lähdön matkan sama, jännite putoaa lähestulkoon lineaarisesti. 2-vaiheisessa oikosulussa jännite putoaa noin puoleen nimellisestä vikapaikan kohdalla ja suorassa (vikaresistanssi $R_f = 0$ Ω) 3-vaiheisessa oikosulussa jännite romahtaa vikapaikassa täysin.

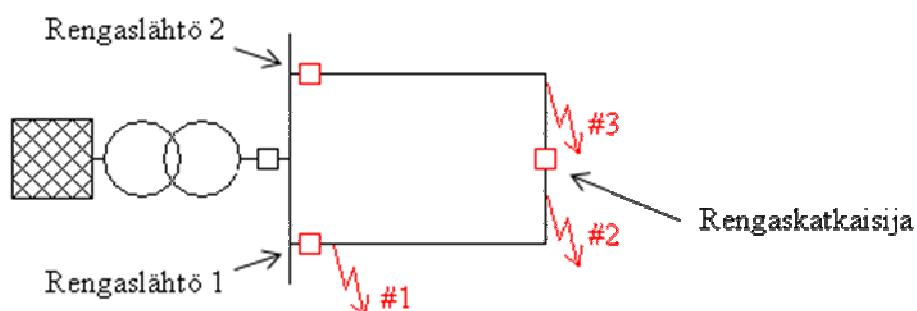


Kuva 17. Jännitteen arvo etäisyyden funktiona 2- ja 3-vaiheisen vian aikana, vian ollessa lähdön 1 lopussa.

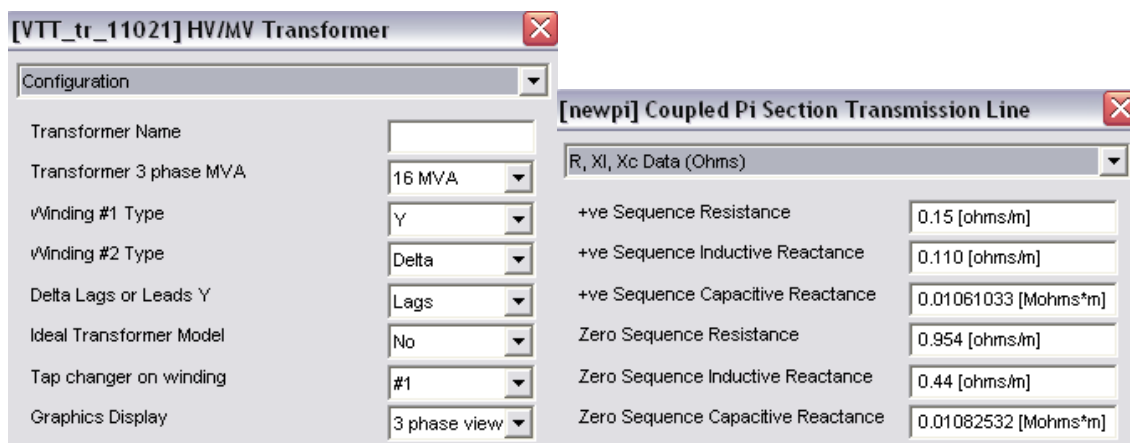
5.3. Maasulku rengasverkossa

Tässä työssä on simulointien avulla tutkittu maasulun paikantamista suljetussa rengasverkossa maadoitustavan ollessa maasta erotettu käyttämällä PSCAD®/EMTDC™ simulointiohjelmalla, joka on monipuolinen työkalu sähköjärjestelmien transienttisimulointeihin. Simulointimallina on käytetty Simulointiympäristö-hankkeessa kehitettyä keskijänniteverkon mallia, jonka loppuraportissa (Kauhaniemi, Ristolainen, Saari, Lågland, Salminen, Hokkanen & Brännbacka 2005) on mallin suunnittelu ja työstäminen kuvattu. Käytetty verkkomalli on alun perin ollut avoin rengasverkko, joka on tässä muutettu

suljetuksi rengasverkoksi. Muutettu verkko sisältää kaksi rengaslähtöä sekä yhden rengaskatkaisijan keskellä rengasta. Mallin periaatteellinen rakenne, verkossa olevat katkaisijat sekä simuloitujen vikojen paikat on esitetty kuvassa 18. Simulointimallissa syöttävän verkon oikosulkutasoksi on määritelty 1000 MVA. Päämuuntajan (110/21 kV) nimellisteho on 16 MVA ja sen parametrit on esitetty kuvassa 19 a. Rengasverkko on 8,4 km pitkä ja se koostuu maakaapelista (AHXAMK-W 3x240), jonka parametrit ovat luettavissa kuvasta 19 b. Päämuuntajaa kuormitetaan simulointien ajan 12 MVA teholla ja rengaslähdön osuus siitä on 5,6 MVA. Verkosta mitataan summavirta jokaiselta katkaisijalta sekä verkossa vaikuttava nollajännite. Välikatkaisijalta ja molempien lähtöjen alusta mitataan lisäksi summavirran ja nollajännitteen vaihekulma (φ).



Kuva 18. Vikapaikat ja katkaisijat renkaassa.



a)

b)

Kuva 19. a) Muuntajan parametrit. b) AHXAMK-W 3x240 maakaapelin parametrit.

Verkolla suoritettavat simuloinnit on tehty kahdessa osassa, joista ensimmäisessä tarkastellaan summavirran I_R (joka merkitään $I_R = 3I_0$ ja jossa I_0 on nollavirta) mittaukseen perustuvan suuntaamattoman maasulkusuojauksen toimintaa. Toisessa osassa on tutkittu $I_{R\sin(\varphi)}$ periaatteella toimivan suunnatun maasulkusuojan toimintaa.

Verkkoon on mallinnettu kolme relettä. Releiden mittauspaikkoina ovat kiskosto ja molempien rengaslähtöjen alkupäät. Kiskostoa suojaava maasulkurele havahtuu U_0 portaan ylitettyä sille asetellun arvon, rele toimii myös varasuojana rengaslähdölle. Molemmilla rengaslähdöillä on oma releensä, jotka toimivat joko I_R mittaukseen tai $I_{R\sin(\varphi)}$ periaatteeseen perustuen riippuen onko kyseessä suuntaamaton vai suunnattu suojaustapa. Näiden lisäksi rengaskatkaisijalta mitataan summavirta ja nollajännite, joiden välistä vaihekulmaa tarkastellaan suunnatun maasulkusuojan tapaan simulointien toisessa osassa. Simuloinneissa on simuloitu kolmea eri vikapaikkaa, jotka ovat esitetty kuvassa 18. Ensimmäinen vikapaikka sijaitsee 0,6 km päässä rengaslähtö 1:n alusta katsoen. Toinen ja kolmas vikapaikka sijaitsevat renkaan keskellä rengaskatkaisijan molemmin puolin. Kaikissa simuloinneissa taustaverkon tuottamaksi maasulkuvirraksi on valittu 70 A.

Ensimmäisessä osassa simuloitteja I_R mittaukset on suoritettu molempien rengaslähtöjen alusta sekä rengaskatkaisijan kohdalta. Suunnattujen maasulkusuojien asetteluarvot on esitetty taulukossa 2. Suuntaamattoman suojan asetuksina on ainoastaan taulukossa 2 esitetty I_φ aikahidastuksella 0,5 s.

Taulukko 2. Suunnattujen maasulkusuojien asetteluarvot.

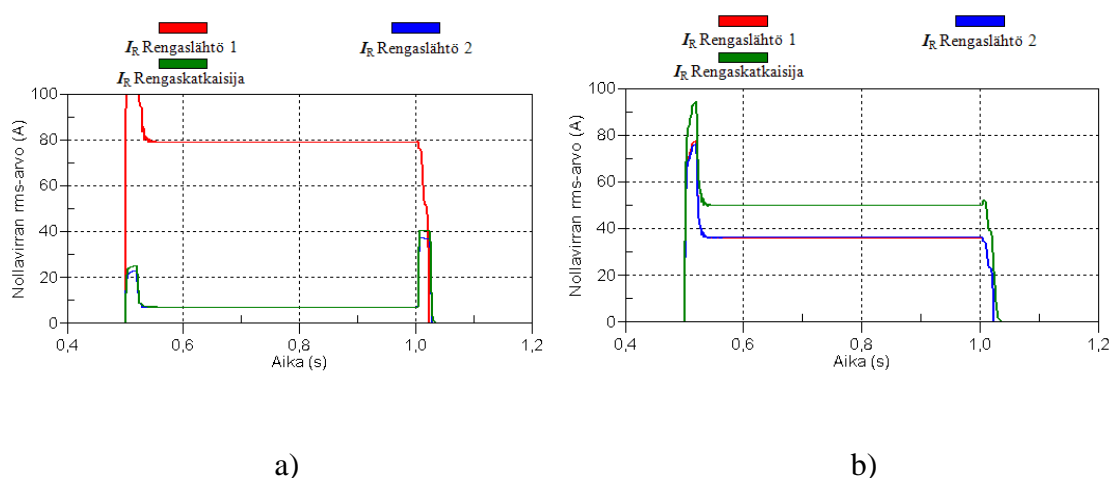
	Rengaslähtö 1	Rengaslähtö 2	Syöttö
$I_\varphi >$	0,0024 kA	0,0024 kA	
$t >$	0,5 s	0,5 s	0,8 s
$U_0 >$	0,58 kV	0,58 kV	1,5 kV

Simulointien ensimmäinen osa on toteutettu suuntaamattomilla summavirran mittaukseen perustuvilla maasulkusuojilla. Verkkoon aiheutetaan yksivaiheinen maasulku 0,5 s kohdalla ja taulukosta 3 ja kuvasta 20 voidaan nähdä, kuinka kaikissa kolmessa vikatilanteessa molempien lähtöjen releet havahtuvat ja poistavat vian 0,5 sekunnin kuluttua vian alkamisesta. Lisäksi myös syötön rele havahtuu, mutta ei ennätkä laukaisemaan suu-

remman aikahidastuksen takia. Suuntaamattoman maasulkusuojan havahtuessa ei kuitenkaan saada viitteitä siitä missä osassa rengasta maasulku sijaitsee.

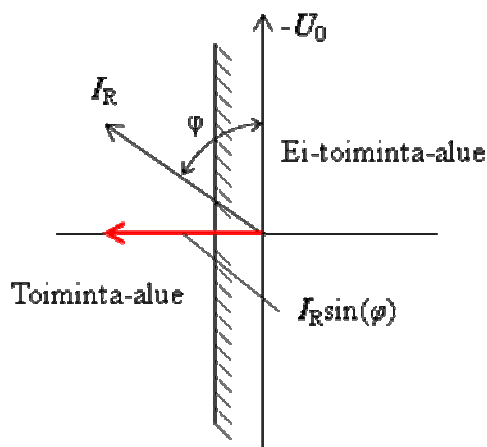
Taulukko 3. Simuloinneissa mitattujen summavirtojen ja nollajännitteiden rms-arvot.

Vikapaikka	I_R rms rengaslähtö 1	I_R rms rengaslähtö 2	I_R rms rengaskatkaisija	U_0
#1	7,2 A	79 A	6,7 A	11,9 kV
#2	50 A	36 A	36 A	11,9 kV
#3	50 A	36 A	36 A	11,9 kV



Kuva 20. Summavirran rms-arvo maasulun aikana a) vikapaikka 1 b) vikapaikat 2 ja 3.

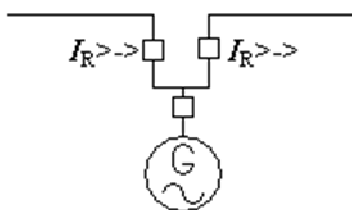
Toisessa osassa simulointeja releiden asetellut ovat edelleen taulukon 2 mukaiset. Nyt kuitenkin rengaslähtöjen maasulkusuojana on $I_R \sin(\varphi)$ periaatteella toimiva suunnattu maasulkusuojaus. Suunnatun maasulkusuojaus toimintaperiaate on esitetty kuvassa 21. $I_R \sin(\varphi)$ periaatteella toimiva suunnattu maasulkusuojaus perustuu summavirran, nollajännitteen ja näiden välisen vaihekulman φ mittaukseen. Vaihekulman sini-arvo kerrotaan summavirralla jolloin saadaan virta $I_R \sin(\varphi)$. Suoja havahtuu, kun seuraavat ehdot täyttyvät: virta $I_R \sin(\varphi)$ ja nollajännite U_0 ylittävät niille asetellut arvot.



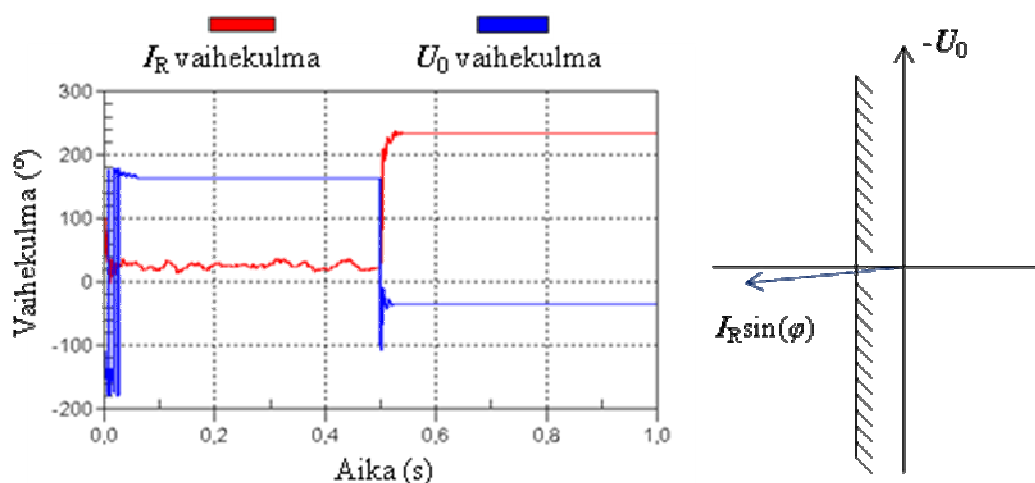
Kuva 21. Toimintaperiaate $I_R \sin(\varphi)$.

Taulukossa 3 esitellyt summavirran ja nollajännitteen rms-arvot pysyvät samoina myös tässä osassa simulointeja. Kuvissa 23 ja 24 on esitetty summavirran ja nollajännitteen vaihekulmat rengaskatkaisijalta mitattuna sekä piirretty mille alueelle $I_R \sin(\varphi)$ asettuu. Rengaskatkaisijan kohdalla virran mittauksissa myötäsuuntana on kuvan 18 mukaisessa verkossa vastapäivään kulkeva virta ja siksi se havaitsee kolmannessa vikapaikassa olevan maasulun normaalin toiminta-alueensa puitteissa, mutta vikapaikoissa 1 ja 2 tapahtuvat viat ovat ei-toiminta-alueella.

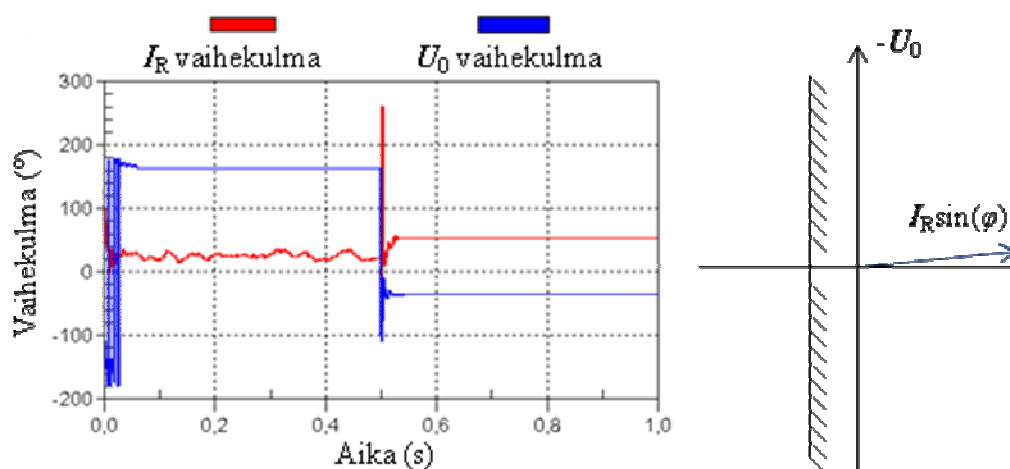
Sijoittamalla kuvan 22 mukaisesti rengasverkossa olevan hajautetun tuotannon yhteyteen sen molempiin syöttösuuntiin suunnattu maasulkusuoja voidaan hajautetulta tuotannolta käsin saada selville, kummassa syöttösuunnassa maasulku sijaitsee.



Kuva 22. Hajautetun tuotannon yhteydessä oleva suunnattu maasulkusuojaus.



Kuva 23. Rengaskatkaisijalta mitattujen summavirran ja -jännitteen vaihekulma maasulun ollessa vikapaikassa 3.

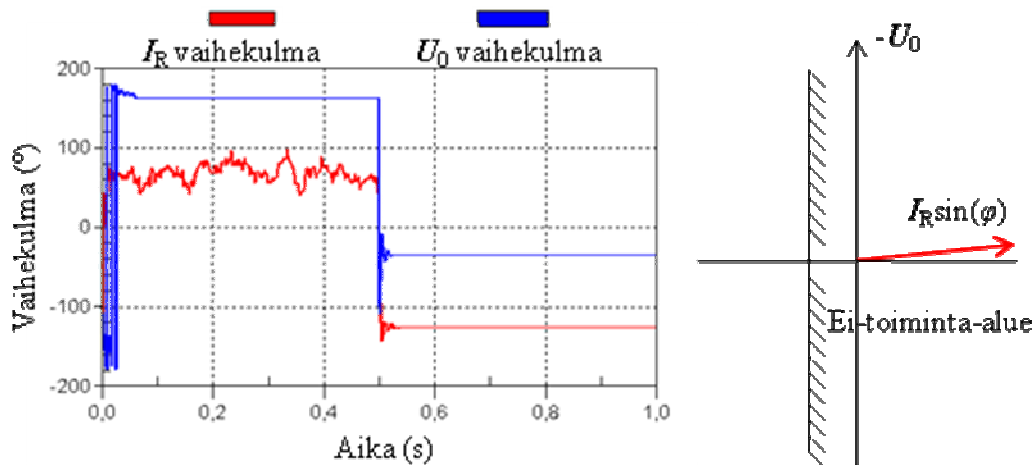


Kuva 24. Rengaskatkaisijalta mitattujen summavirran ja -jännitteen vaihekulma maasulun ollessa vikapaikoissa 1 ja 2.

Vian ollessa vikapaikassa 1 rengaslähdön 2 katkaisijalta mitatut summavirran ja nollajännitteen vaihekulmat sekä $I_R \sin(\varphi)$ on piirretty kuvaan 25. Tässä tapauksessa kyseinen rele ei havaitse vikaa, koska $I_R \sin(\varphi)$ asettuu suojan ei-toiminta-alueelle. Syynä tälle on rengasverkon syöttämä maasulkuvirta, joka rengaslähtö 2:n kohdalla kulkee kiskostolle

päin. Nyt rengaskatkaisija 1 havaitsee vian ja erottaa rengaslähdön 1, jolloin rengaslähtö 2:n kohdalla maasulkuvirran kulkusuunta muuttuu ja se havahtuu. Verkon varasuojana toimiva kiskoston U_0 mittaukseen perustuva suoja ennättää kuitenkin erottaa koko verkon ennen kuin rengaslähtö 2 erotetaan.

Simulointien ensimmäisessä osassa olleilla releasetteluilla maasulkusuojat poistivat tämän tilanteen suunnitellusti. Suuntaamattomat maasulkusuojat kuitenkin havahtuisivat myös viereisen lähdön maasulkuihin, joten pelkkään I_R mittaukseen perustuvia maasulkusuoja ei lähdöillä voida käyttää. Samasta syystä johtuen ei rengaslähtöjen suunnatuilla maasulkusuojailla voida ottaa käyttöön myös vastasuuntaan tapahtuvia laukaisuja.



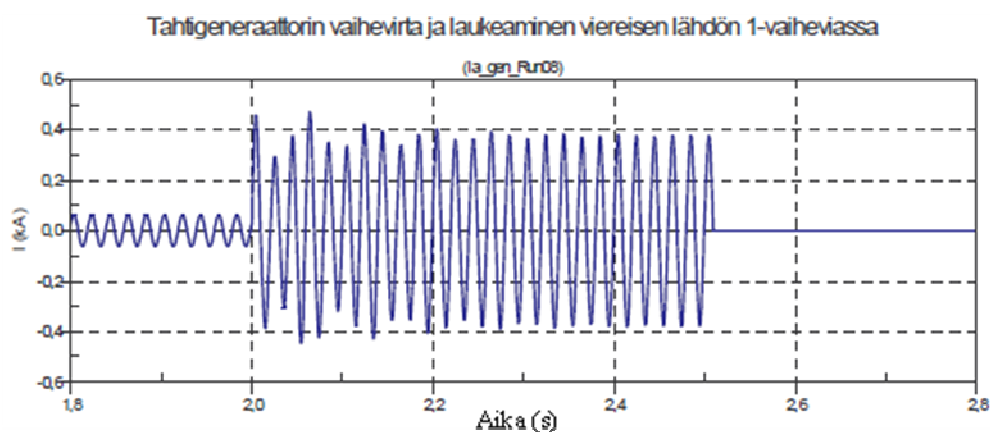
Kuva 25. Rengaslähdöltä 2 näkyvä summavirran ja -jännitteen vaihekulma maasulun ollessa vikapaikassa 1.

5.4. Muut vikatilanteet

Muita tarkasteltavia tilanteita ovat hajautetun tuotannon tarpeeton laukaisu sekä saarekekäytön estosuojaen toiminta eri verkon vikatilanteissa. Näitä on simuloitu jo aiemmissa hankkeissa mm. Kumpulaisen ym. (2006) toimesta ja tulokset näistä simuloinneista on esitetty seuraavassa.

5.4.1. Turha laukaisu

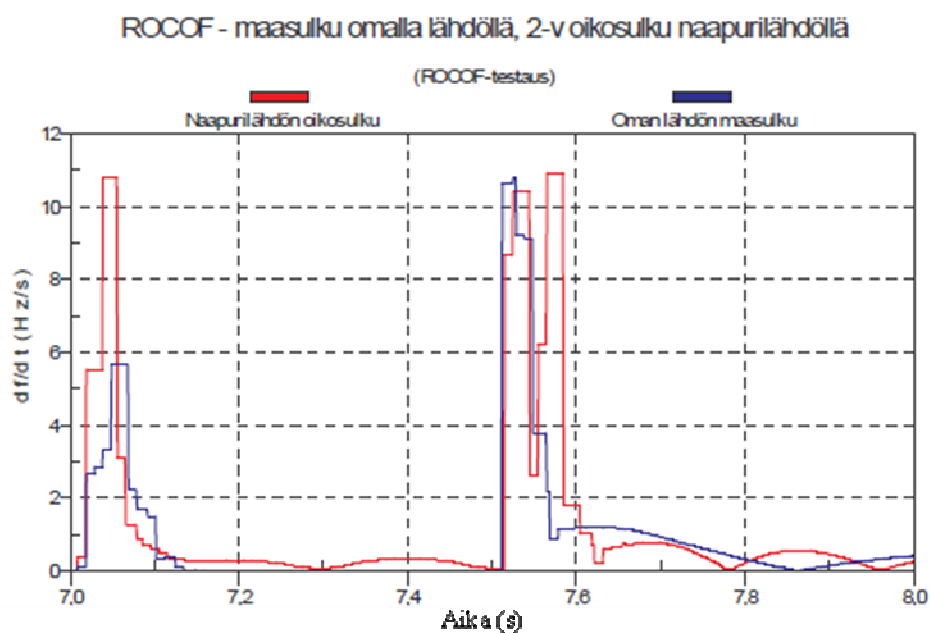
Kumpulainen ym. (2006: 32–33) ovat raportissaan tarkastelleet tuotantoyksikön tarpeetonta laukaisua. Kuvassa 26 on esitetty simuloitua tilannetta, jossa tahtigeneraattori syöttää vikavirtaa viereisellä lähdöllä olevaan 1-vaiheiseen vikaan ja laukeaa turhaan.



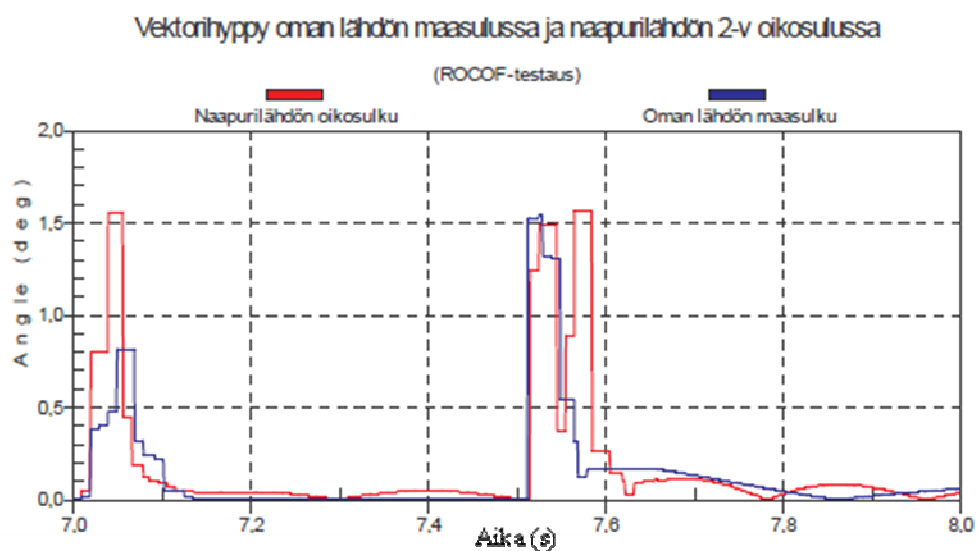
Kuva 26. Tahtigeneraattorin vaihevirta ja tarpeeton laukeaminen ylivirrasta (Kumpulainen ym. 2006: 32).

5.4.2. ROCOF ja VS

Kumpulainen ym. (2006: 90–91) on tarkastellut simulointien avulla ROCOF- ja VS-releiden toimintaa erilaisissa verkon häiriötilanteissa. Kuvassa 27 on tilanne, jossa ROCOF-rele havahtuu omalla lähdöllä olevan maasulun ohella viereisen lähdön oikosulkuun. Samaan tapaan kuvassa 28 VS-rele havahtuu myös oman lähdön maasulun ohella viereisen lähdön oikosulkuun. Molemmissa kuvissa vika alkaa 7,0 sekunnin kohdalla ja suojaus toimii 0,5 sekunnin kuluttua.



Kuva 27. ROCOF-releen toiminta oman lähdön maasulussa ja viereisen lähdön oikosulussa (Kumpulainen ym. 2006: 90).



Kuva 28. VS-releen toiminta oman lähdön maasulussa ja viereisen lähdön oikosulussa (Kumpulainen ym. 2006: 90).

6. TOIMINNALLISET VAATIMUKSET

Tähän kappaleeseen on koottu hajautetun tuotannon suojarleistykselle asetettavia toiminnallisia vaatimuksia. Toiminnalliset vaatimukset sisältävät kuvauksen suojarleistyksen toiminnasta verkon eri vikatilanteissa. Suojarleistyksen toimintaa arvioidaan kahdesta eri lähtökohdasta, ensin ilman tietoliikenneyhteyttä hajautetun tuotannon releistyksen ja lähdön releen välillä. Tämän jälkeen suojaus toimintaa arvioidaan uudestaan tietoliikenneyhteyden kanssa. Tarkoituksena on määrittää missä tilanteissa tietoliikenneyhteys on käyttökelpoinen ja mitä etuja tietoliikenneyhteyden käytöstä hajautetun tuotannon suojaamisessa voidaan saavuttaa.

Suojaus toimintaan mahdollisesti vaikuttavat tekniset muuttujat ja variaatiot on selvitetty neljännessä kappaleessa ja tarpeen mukaan on päädytty kiinnittämään eri teknisiä ratkaisuja vakioiksi, kuten esimerkiksi keskijänniteverkon jännitetaso. Myös eri tarkasteltavat verkkorakenteet ja vikatilanteet on määritelty neljännessä kappaleessa. Suojaus toimintaa käsitellään vikatapauskohtaisesti käyden läpi mahdollisia vikatilanteita aloittaen viasta lähdöllä 1, jolle on liitetty hajautettua tuotantoa. Seuraavaksi tarkastellaan vikatilanteita lähdöllä 2, jonka jälkeen tarkasteltavana vikapaikkana on syöttökentän kiskosto. Lopuksi perehdytään yhteen erikoistilanteeseen, suunnittele mattomaan saareketilanteeseen ja suojarleistyksen kykyyn erottaa hajautettu tuotanto saareketilanteen synnyttyä.

Tässä työssä maadoitusmenetelmäksi on valittu maasta erotettu verkko. Maasulkusuojaus osalta esitettävii ratkaisuja voidaan käyttää myös kompensoidussa verkossa. Suoraan maadoitetuissa verkoissa maasulkuvirta on suhteellisen suuri, lähellä oikosulkuvirtojen tasoa ja se voidaan havaita ylivirtasuojujen avulla. Näin ollen myös suoraan maadoitetuissa verkoissa suojaus toiminta on hyvin samankaltainen lukuun ottamatta erillisen maasulkusuojaus tarvetta.

Hajautetun tuotannon käytön kannalta sen automaatiojärjestelmälle täytyy olla saatavilla erinäisiä tietoja. Näitä tarvitaan esimerkiksi päättämään onko generaattorin verkkoon liittäminen suotavaa. Myös onnistuneen jälleenkytkennän jälkeen voisi olla mahdollista nopea verkkoon takaisin liittyminen generaattorityypistä ja verkkoonliityntäehdoista

riippuen. Hajautetun tuotannon tulee vähintäänkin tietää ainakin sen liityntäpisteen katkaisijan kytkentätila.

Lisäksi osa verkkoonliityntäehdoista, esimerkiksi IEEE 1547 (IEEE 2003: 7) vaatii jo pieniltä voimalaitoksilta mahdollisuuden kaukovalvontaan ja Tanskan alle 100 kV verkkoon liitetyille tuulivoimaloille annetun verkkoonliityntäohjeen mukaan (Elkraft System & Eltra 2004: 26–27) voimaloiden tulee pystyä lähettämään ja vastaanottamaan tietoja esimerkiksi ohjauskeskuksesta käsin. Asiaa on sivuttu jo aiemmin kohdassa 3.3.3. sivuilla 30–31.

Yksi suojaukselle asetettavista vaatimuksista on suojauksen selektiivisyys. Suojareleiden ohjaamat katkaisijat muodostavat suojausvyöhykkeitä, joiden muodostaman alueen sisällä suojauksen on suunniteltu toimivan. Suojausvyöhykkeet voivat peittää täysin tai osittain toisiaan, jolloin suojausvyöhykkeet voivat toimia varasuojana oman suojausvyöhykkeensä ulkopuolisille alueille. Muodostamalla suojausvyöhykkeitä voidaan suojauksesta saada selektiivinen, jolloin vika voidaan eristää erottamalla vain mahdollisimman pieni osa verkosta. Suojausvyöhykkeiden selektiivisyys perustuu joko virta- tai aikaselektiivisyyteen.

Kahdessa ensimmäisessä verkkorakenteessa (a ja b) on kolme eri suojausvyöhykettä. Lähtö 1, jolla hajautettu tuotanto sijaitsee, lähtö 2 ja näitä syöttävä kiskosto. Verkkorakenteessa a mahdollisesti käytettävä välikatkaisija muodostaa lähdölle 1 vielä yhden suojausvyöhykkeen lisää. Verkkorakenteessa c hajautettua tuotantoa sisältävä rengaslähtö on lisäksi jaettu erillisiin suojausvyöhykkeisiin, jotka renkaan sisällä olevat katkaisijat rajaavat.

6.1. Vika lähdöllä 1

Samalla lähdöllä hajautetun tuotannon kanssa sattuvissa vioissa tarkasteltavia vikatapauksia ovat kaksivaiheinen oikosulku sekä maasulku. Kaksivaiheisen oikosulun paikka vaihtelee verkkorakenteesta riippuen. Maasulun paikkaan verkkorakenne ei vaikuta, sil-

lä jokaisessa verkkorakenteessa maasulun toimintamekanismit pysyvät samoina: maasulku aikaansaa nollajännitteen nousun koko galvaanisesti yhteenkytketyssä verkossa.

Verkkorakenteessa a kaksivaiheisen oikosulun paikka on aivan lähdön lopussa. Tällöin syöttävästä verkosta syötetty oikosulkuvirta on mahdollisimman pieni, joka voi vielä pienentyä, kun hajautettu tuotanto syöttää rinnakkain syöttävän verkon kanssa oikosulkuvirtaa. Lähdöltä syötetyn vikavirran pienentyessä on myös suurin mahdollisuus lähdön 1 ylivirtasuojan toiminnan hidastumiselle tai jopa täydelliselle sokaistumiselle.

Verkkorakenteessa b kaksivaiheisen oikosulun paikkana on lähdön alku. Oikosulkuvirta hajautetulta tuotannolta on tällöin mahdollisimman pieni ja syöttävän verkon oikosulkuvirta puolestaan suurin mahdollinen oman lähdön kaksivaiheiseen oikosulkuun syötämä vikavirta.

Verkkorakenteessa c kaksivaiheisen oikosulun paikalle on kaksi mahdollisuutta. Yksi myötäpäivään ja toinen vastapäivään hajautetusta tuotannosta nähden.

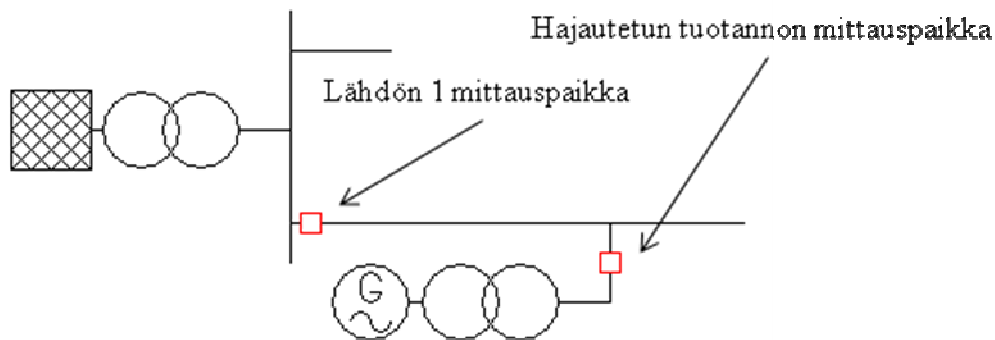
Verkkorakenteissa a ja b vian ollessa samalla lähdöllä hajautetun tuotannon kanssa tulisi hajautetun tuotannon irrota verkosta. Myös lähtö jolla vika on, tulisi erottaa kyseisen lähdön katkaisijan toimesta. Verkkorakenteessa c yksittäinen vika suljetussa renkaassa ei vielä pakota hajautettua tuotantoa irtoamaan verkosta. Suojauksen tulisi erottaa vain se osuus verkosta, jolla vika on ja näin ollen verkkorakenne muuttuu ja muodostuu kaksi säteittäistä lähtöä, joista toisella hajautettu tuotanto sijaitsee.

Katkaisijat ja niitä ohjaavat releet on nimetty aiemmin kappaleessa 4.1. ja nyt käydään läpi mitä suureita hajautetun tuotannon ja lähdön 1 releiden täytyy pystyä mittaamaan.

Lähdön 1 releellä olevia suojaustoimintoja ovat ylivirta, suunnattu ylivirta ja suunnattu maasulku. Ylivirran laskemiseksi releen täytyy saada mittaustietona lähdön jokaisen vaiheen virta. Suunnattuun ylivirtaan tarvitaan vaihevirtojen lisäksi mittaustiedot vaihejännitteistä. Suunnattu maasulkusuojaus vaatii mittaustiedon summavirrasta ja nollajännitteestä.

Verkkoonliityntäehdot sanelevat pakollisia suojaustoimintoja hajautetulle tuotannolle. SENER (2001: 18) vaatii pienvoimaloilta yli- ja alijännite, yli- ja alitaajuus sekä ylivirtasuojan. SENERin suosituksessa on mahdollisena lisäsuojana mainittu nolajännitteen mittaamiseen perustuva suuntaamaton maasulkusuojaus. Näiden lisäksi hajautettu tuotanto voi vielä lisäksi olla varustettu erillisillä saarekekäytön estosuojilla, kuten ROCOF ja VS toiminnoilla. Eräissä tapauksissa hajautetun tuotannon varustamisesta suunnatulla ylivirtasuojalla on etuja. Mittauksina hajautetulla tuotannolla on oltava vaihejännitteiden sekä vaihevirtojen mittaukset. Lisänä suuntaamaton maasulkusuojaus vaatii nolajännitteen mittauksen. Yli- ja alijännite, yli- ja alitaajuus sekä ROCOF ja VS suojaustoiminnot vaativat kaikki jännitteen mittaamista. Mikäli hajautettu tuotanto on vielä varustettu suunnatulla maasulkusuojalla, vaaditaan siltä myös summavirran mittaus.

Kuvassa 29 on esitetty lähdön 1 releen sekä hajautetun tuotannon releen mittauspaiikat käyttäen esimerkkinä verkkorakennetta a. Lähdön 1 mittauspaiikkana on lähdön alku. Hajautetun tuotannon releen mittauspaiikkana on mahdollisen muuntajan ensiöpuoli, eli mittaus suoritetaan keskijänniteverkon puolella. Tällöin hajautetulta tuotannolta on mahdollista havaita maasulkutilanteet koko galvaanisesti yhteenkytketyn verkon alueelta.



Kuva 29. Lähdön 1 releen ja hajautetun tuotannon releen mittauspaiikat.

6.1.1. 2-vaiheinen oikosulku lähdöllä 1

Hajautetun tuotannon releessä voidaan käyttää ylivirtasuojaa suojaamaan lähtöä samalla lähdöllä tapahtuvissa oikosulku tapauksissa. Ylivirtasuojaa havaitsee hajautetulta tuotannolta syötetyn virran. Hajautetulta tuotannolta syötetyn oikosulkuvirran taso riippuu vikaimpedanssista, etäisyydestä vikaan ja hajautetussa tuotannossa käytetystä generaattorista sekä sen koosta. Oikosulkuvirran käyttäytyminen vaihtelee käytetyn generaattorityypin mukaan. Käytettäessä oikosulkugeneraattoria oikosulkuvirta vaimenee nopeasti, eikä siten välttämättä pysty syöttämään tarpeeksi oikosulkuvirtaa ylivirtasuojan laukaisemiseksi. Samankaltainen tilanne voi tulla vastaan käytettäessä tehoelektroniikkapohjaisia suuntaajaa generaattorina. Kumpulaisen ym. (2006: 75) mukaan tehoelektroniikkapohjaiset suuntaajat pystyvät parhaimmillaankin tuottamaan noin kaksi kertaa nimellisvirtansa verran oikosulkuvirtaa. Tahtigeneraattori on generaattorityypeistä ainut, joka kykenee tuottamaan tarpeeksi pitkään tarpeeksi suuria oikosulkuvirtoja ylivirtasuojan vaatimiin tarpeisiin.

Seuraavaksi tarkastellaan hajautetun tuotannon ja lähdön 1 releiden toimintaa ilman niiden välillä olevaa tietoliikenneyhteyttä.

Oikosulkujen havaitsemiseksi hajautetulla tuotannolla sijaitsevan ylivirtasuojan tulee olla aseteltu alle pienimmän hajautetulta tuotannolta lähdön 1 kaksivaiheiseen vikaan syöttämän vikavirran. Kuvassa 14 kappaleessa 5.1 sivulla 47 on kuvattu hajautetulta tuotannolta sekä verkosta syötettyjen vikavirtojen tasoa etäisyyden funktiona. Kuvaajasta voidaan nähdä, kuinka hajautetun tuotannon ollessa lähellä lähdön 1 alkua täytyy ylivirtasuojauksen havahtumisraja asettaa niin alas, että se samalla havaitsee vikoja myös pitkälle lähdön 2 alkuun.

Hajautetun tuotannon sijaitessa lähdön 1 loppupäässä on tilanne hieman erilainen. Tässä tilanteessa hajautetulta tuotannolta sekä verkosta syötettyjä vikavirtoja on havainnollistettu sivulla 48 esitettyssä kuvassa 15. Tällöin hajautetun tuotannon ylivirtasuojaa on mahdollista asettaa siten, että sen suojausalue rajoittuu vain vähän lähdön 2 alkuun.

Hajautetun tuotannon pystyessä syöttämään suurehkoja ylivirtoja on ylivirtasuojaus nopea ja luotettava suojauskeino lähdöllä 1 tapahtuvien oikosulkujen havaitsemiseksi.

Hajautetun tuotannon syöttäessä niin pientä ylivirtaa, että pienimmän mahdollisen ylivirran ja nimellisvirran välinen erotus ei ole tarpeeksi suuri ylivirtasuojan toiminnan varmistamiseksi vaaditussa ajassa ei ylivirtasuojasta voida käyttää suojauksen toimimattomuuden johdosta. Ylivirtasuoja olisi mahdollista asettaa entistä alemmas pienienkin oikosulkuvirtojen havaitsemiseksi, mutta tällä toimenpiteellä vaarannettaisiin hajautetun tuotannon turha verkosta erottaminen sen syöttäessä nimellisvirtaa.

Hajautetun tuotannon ylivirtasuojan asettelemiseksi pätevät seuraavat periaatteet:

- ylivirtaraja on valittu hajautetun tuotannon lähdön 1 kaksivaiheiseen oikosulkuun syöttämän pienimmän virran mukaan,
- jos pienimmän hajautetulta tuotannolta syötetyn oikosulkuvirran ja nimellisvirran välinen marginaali ei ole tarpeeksi suuri, ei oikosulkusuojasta voida käyttää.

Hajautetulta tuotannolta syötetyn ylivirran ollessa liian pieni ylivirtasuojan luotettavaa käyttöä varten voidaan osassa tapauksista lähdön 1 kaksi- ja kolmivaiheiset oikosulut havaita käyttämällä alijännitesuojaa. Jännitteen käyttäytymistä lähdöllä 1 tapahtuvissa oikosulkutapauksissa on havainnollistettu kappaleessa 5.2 sivulla 50 kuvassa 17. Kaksivaiheisen oikosulun kohdalla jännite putoaa vikapaikalla noin puoleen vikaa edeltäneestä tilasta ja kolmivaiheisen oikosulun ollessa kyseessä jännite romahtaa täysin. Näin alijännitteeseen perustuvaa suojausta on mahdollista hyödyntää oikosulkujen havaitsemisessa. Alijännitesuojan asettelu täytyy kuvan 17 perusteella olla selvästi yli 0,5 p.u. 2-vaiheisten oikosulkujen havaitsemiseksi. Normaaleista jänniteenvaihteluista johtuen alijännitesuojan asetusten täytyy olla alle 0,9 p.u. Alijännitesuojan arvoksi voitaisiin valita esimerkiksi 0,85 p.u., kuten on yhdeksi alijänniterajaksi esitetty Helenin (2009) ohjeessa. Alijännitteeseen perustuvassa suojauksessa alijännitteen aikahidastuksen tulee olla pidempi, kuin lähdön 2 suojauksen, jotta alijännitteeseen perustuva suojaus ei turhaan erottaisi tuotantoa lähdön 2 vioissa.

Alijännitteeseen perustuvan oikosulkusuojan käyttöä hankaloittaa kuitenkin verkkoonliityntäehdot, joiden mukaan hajautetun tuotannon tulee selvitä hetkellisistä jännitekuopista verkosta eroamatta. Näin ollen hajautetun tuotannon erottaminen voi jännitekuoppavaatimusten seurauksesta entisestään pidentyä.

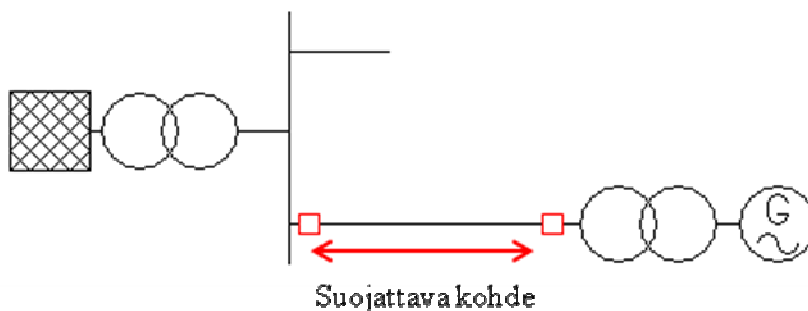
Alijännitesuojan hyödyntäminen oikosulkuvikoihin on kuitenkin tapauskohtaista ja sen soveltuvuuteen vaikuttavat suuresti sähköjärjestelmän impedanssit sekä vian etäisyys hajautettuun tuotantoon suhteessa lähdön pituuteen. Kuvan 17 mukaisesti on mahdollista, että alijännitesuoja ei havaitse kaukana hajautetusta tuotannosta tapahtuvaa vikaa, koska hajautetun tuotannon näkemä vian aikaansaaman jännitekuopan syvyys jää pieneksi. Alijännitteeseen perustuva oikosulkusuojaus kuitenkin edellisenkaltaisessakin tilanteessa toimisi lähdön 1 katkaisijan lauettua, jolloin syöttävä verkko ei enää pysty ylläpitämään jännitettä. Seurauksena on suuri jännitteenalenema, jonka tuloksena on alijännitteeseen perustuen hajautetun tuotannon verkosta erottaminen.

Lähdön 1 vikatapauksissa hajautetun tuotannon erottamisen lisäksi lähdön 1 katkaisijan tulisi erottaa lähtö 1 verkosta. Lähdöllä 1 toimiva ylivirtasuojia on tehokas keino kaksija kolmivaiheisten oikosulkujen havaitsemiseksi ja erottamiseksi. Kaksivaiheinen oikosulku lähdön lopussa on oikosulkusuojauksen tarkastelun kannalta tärkein, koska silloin syöttävästä verkosta syötettävä oikosulkuvirta on pienimmillään. Hajautetun tuotannon lisäys voi entisestään pienentää lähdön 1 releen näkemää oikosulkuvirtaa, kun hajautettu tuotanto syöttää vikavirtaa rinnakkain verkon kanssa, kuten on havainnollistettu kappaleessa 5.1 sivulla 49 kuvassa 16. Lähdön ylivirtasuojan toiminta voi hidastua tai jopa täysin sokaistua. Sokaistumisen estämiseksi voidaan lähdölle sijoittaa välikatkaisija, jolloin muodostetaan yksi suojausvyöhyke lisää ja lähdön 1 suojausvyöhykkeen ei tarvitse kattaa koko lähdön pituutta vaan lähdön 1 suojausvyöhykkeen tarvitsee ulottua ainoastaan välikatkaisijaan asti. Välikatkaisijan paikka lähdöllä tulisi valita siten, että lähdön 1 ylivirtasuojia toimii välikatkaisijan kohdalla tapahtuvassa kaksivaiheisessa oikosulussa, mutta ei välttämättä enää havaitse pidempänä lähdoillä tapahtuvia vikoja. Sokaistumisilmiön voimakkuuteen ja siten välikatkaisijan paikkaan vaikuttaa pääosin syöttävän verkon jäykkyys sekä hajautetun tuotannon ylivirran syöttökyky. Sokaistuminen on voimakkaampaa syöttävän verkon ollessa heikko, jolloin sen syöttämä oikosul-

kuvirtakin on pienempi. Samaan tapaan hajautetun tuotannon oikosulkutehon kasvaessa sokaistumisilmiö voimistuu.

Verkkorakenteessa b, jossa ei lähdöllä 1 ole ollenkaan kuormaa on mahdollista käyttää differentiaalisuojaa ylivirtaan perustuvan suojauksen sijasta. Differentiaalisuojan käyttö on mahdollista myös tapauksissa, joissa ylivirtaan perustuvaa suojausta ei vähäisen vikavirran takia ole mielekästä käyttää. Differentiaalisuoja kattaa koko lähdön, kuten on esitetty kuvassa 30, lisäksi differentiaalisuoja on absoluuttisesti selektiivinen omalla suojausvyöhykkeellään. Mm. Rintamäki & Kauhaniemi (2009) ovat artikkelissaan ehdottaneet differentiaalisuojan käyttöä hajautetun tuotannon suojaamiseen.

Differentiaalisuoja tarvitsee toimiakseen tietoliikenneyhteyden suojausalueen päiden välille. Tätä samaa tietoliikenneyhteyttä voisi olla mahdollista käyttää myös hajautetun tuotannon kaukovalvontaan ja ohjaukseen. Differentiaalisuojauksen ohella täytyy hajautettu tuotanto olla varustettu myös verkkoonliityntäehtojen vaatimilla yli- ja alijännite ja yli- ja alitaajuus suojilla. Viat tietoliikenneyhteydessä estävät differentiaalisuojausta toimimasta, jolloin on mahdollista differentiaalisuojan havaitessa häiriön tietoliikenneyhteydessä ottaa käyttöön ylivirtaan, yli- ja alijännitteeseen sekä yli- ja alitaajuuteen perustuva suojaus.

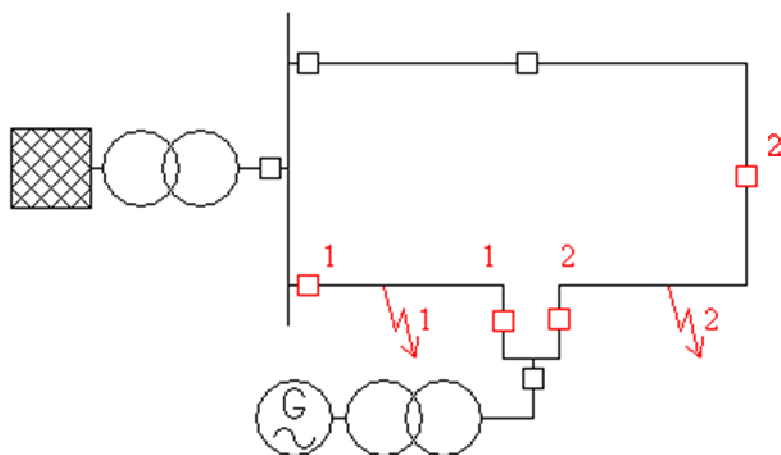


Kuva 30. Differentiaalisuojauksen toimintaperiaate.

Suljetun rengasverkon sisällä tapahtuvista oikosuluista johtuen hajautetun tuotannon ei tulisi irrota verkosta vaan vikaa lähinnä olevien katkaisijoiden tulee toimia. Suojauksen

pitäisi irrottaa vain vikaantunut alue renkaasta ja terveiden osien tulisi jatkaa toimintaansa. Kuvassa 31 on kaksi mahdollista oikosulkutapausta esiteltyinä, sekä katkaisijat joiden tulee kyseisissä vikatapauksissa erottaa vain vikaantunut osa verkosta. Suojauksen toiminnan kannalta suljetussa renkaassa olevat katkaisijat ja niitä ohjaavat releet tulee olla ylivirtasuojien lisäksi varustettuja suunnatuilla ylivirtasuojilla. Ylivirtasuojat on asetettava aikaselektiivisesti suljetun rengasverkon sisällä olevien suojausvyöhykkeiden kesken. Mahdollinen hajautetun tuotannon lisäävä vaikutus oikosulkuvirtojen tasoihin on myös huomioitava.

Viawan, Karlsson, Sannino & Daalder (2006) puoltavat artikkelissaan suljetun rengasverkon käyttöä hajautetun tuotannon yhteydessä. Heidän mukaansa suljetun rengasverkon hyötyinä ovat lisääntynyt toimitusvarmuus, mutta haittapuolena kasvanut vian poistamiseen tarvittava aika. Viewan ym. (2006) kannattavat suljetun rengasverkon oikosulkujen poistamiseksi suljetun rengasverkon erottamista kahdeksi säteittäiseksi lähdöksi vian havaitsemisen jälkeen. Vika erotetaan tämän jälkeen samaan tapaan, kuin säteittäisessä verkossa. Vian mahdollisesti poistuttua palataan takaisin suljettuun rengasverkkoon. Repo ym. (2005: 53) yhtyvät Viewan ym. (2006) näkemykseen siitä, että mahdollisena haittapuolena tälle menettelytavalle vian poistamiseen tarvittava aika saattaa kasvaa. Vian poistoajan kasvamisen lisäksi Repo ym. (2005: 53–54) mainitsevat, että rengasverkon avaamisesta johtuvien nopeiden jännitteenmuutosten seurauksena voi olla tuotantoyksikön turha verkosta irtautuminen.



Kuva 31. 2-vaiheinen oikosulku suljetussa rengasverkossa.

Tietoliikenneyhteyden ollessa käytössä lähdön 1 releen ja hajautetun tuotannon välillä suojauksen toimintaa voidaan muuttaa oleellisesti. Tietoliikenneyhteys mahdollistaa mm. laukaisun lukitus- ja etälaukaisusignaalien lähettämisen lähdöltä hajautetulle tuotannolle. Verkkorakenteissa a ja b hajautetun tuotannon suojaus voidaan perustaa pitkälti etälaukaisuun, jolloin hajautettu tuotanto saadaan erotettua verkosta nopeasti.

Hajautetun tuotannon suojausratkaisun perustuessa etälaukaisuun, lähettää lähdön 1 rele laukaisukäskyn aina lähdön 1 katkaisijan lisäksi hajautetun tuotannon katkaisijalle. Tällöin lähdön 1 katkaisijan lisäksi lähdön 1 rele ohjaa hajautetun tuotannon katkaisijan auki. Laukaisukäsky lähetetään lähdön releen ylivirtasuojan toimiessa. Hajautetulla tuotannolla on oltava varasuojana myös samat suojausratkaisut, kuin mitä siellä olisi ilman tietoliikenneyhteyttä. Varasuojat voidaan ottaa automaattisesti käyttöön, jos tietoliikenneyhteyden havaitaan vikaantuneen. Tällöin suojaus toimii samalla tavalla kuin ilman tietoliikenneyhteyttäkin. Lisäksi suojauksen varmemman toimivuuden kannalta on pää- ja varasuojauksessa hyvä käyttää eri valmistajien tuotteita tai eri suojausalgoritmiin perustuvia ratkaisuja.

Lähdön 1 releen sokaistuminen on mahdollista estää sijoittamalla lähdölle välikatkaisija. Myös välikatkaisija on mahdollista liittää tietoliikenneyhteyden avulla hajautettuun tuotantoon ja lähdön 1 releeseen. Välikatkaisija voi tietoliikenneyhteyden avulla havahduessaan lähettää hajautetulle tuotannolle sekä lähdölle lukituskäskyn. Näin vian ollessa välikatkaisijan suojausvyöhykkeellä ei lähtö 1 eikä hajautettu tuotanto altistu virhelaukaisuille. Tällä keinoin voitaisiin myös välikatkaisijan lisäämisen muuten tuoma aikaselektiivinen porras poistaa ja siten saada suojauksen toiminta nopeammaksi.

Differentiaalisuojan käyttö verkkorakenteessa b vaatii tietoliikenneyhteyttä suojattavan alueen, eli lähdön 1 alun ja hajautetun tuotannon välille. Differentiaalisuojaus erottaa automaattisesti suojattavan kohteen molempien päiden katkaisijan, jolloin lähtö 1 ja hajautettu tuotanto irtoavat verkosta samanaikaisesti.

Verkkorakenteessa c ei tietoliikenneyhteyden käytöllä saavuteta merkittävää hyötyä, elleivät kaikki renkaassa olevat releet ole yhteydessä keskenään tietoliikenneyhteyden avulla. Ilman kaikkien releiden yhteenliittämistä hajautetun tuotannon ja oman lähdön

välinen tiedonsiirtotarve vähenee huomattavasti. Lähdön releen lauetessa vikavirran taikka maasulun seurauksena sen ei kannata lähettää laukaisukäskyä hajautetulle tuotannolle, koska hajautettu tuotanto voi jatkaa syöttämistä toista kautta. Ainoastaan, jos molemmat rengaslähdön katkaisijat laukeavat tulisi hajautetulle tuotannolle lähettää etälaukaisukäsky.

6.1.2. Maasulku lähdöllä 1

Seuraavana käsitellään hajautetun tuotannon ja lähdön 1 releiden toimintaa lähdön 1 maasuluissa ilman, että niiden välillä olisi tietoliikenneyhteyttä. Tämän jälkeen tarkastellaan suojausten toimintaa uudelleen tietoliikenneyhteyttä hyödyntämällä.

Hajautetulla tuotannolla on maasulkusuojana nollajänniterele, joka mittaa verkon nollajännitteen suuruutta ja havahtuu nollajännitteen ylittäessä sille asetellun arvon. Käytöstä maadoitusjärjestelmästä johtuen maasulku missä tahansa keskijänniteverkossa aikaansaa nollajännitteen nousun koko galvaanisesti yhteenkytketyssä verkossa. Nollajännite nousee likimäärin yhtä paljon koko verkossa, näin myös lähdöllä 2 tapahtuvat maasulut havaitaan hajautetulta tuotannolta käsin. Nollajännitteeseen perustuva suojaus ei siten edesauta vian paikantamisessa. Tästä syystä hajautetun tuotannon maasulkusuojaus tulee olla aikahidastettu niin paljon, että maasulun ollessa lähdöllä 2 ennättää lähdön 2 maasulkusuoja poistaa vian ennen hajautetun tuotannon erottamista. Näin vältetään hajautetun tuotannon turha laukaisu vian ollessa muualla, kuin lähdöllä 1.

Lähdön 1 alussa oleva suojaus havaitsee ja erottaa omalla lähdöllään olevat maasulkutilanteet suunnatun maasulkusuojan avulla. Suunnatun maasulkusuojan ansiosta lähdön rele ei havaitse syöttökentässä tai lähdöllä 2 tapahtuvia maasulkuja. Lähdön 1 maasulkusuojauksessa voidaan käyttää samoja aikahidastuksia maasulkusuojauksessa kuin lähdön 2 releelläkin. Haittapuolena tällöin kuitenkin on hajautetun tuotannon suurempi aikahidastus, jolloin se jää hetkeksi yksin syöttämään syntynyttä saarekettä ja maasulkuja. Ongelma voitaisiin välttää pidentämällä lähdön 1 maasulkusuojauksen aika-asetuksia ja tekemällä niistä yhteneväisiä hajautetun tuotannon aika-asetusten kanssa. Tällöin kuitenkin vian annetaan olla päällä pidempään kuin on pakollista.

Verkkorakenteessa b sattuvan maasulun seurauksena lähtö 1 ja hajautettu tuotanto on molemmat erotettava verkosta. Rintamäki & Kauhaniemi (2009) arvelevat differentiaalisuojauksen tarvitsevan maadoitusjärjestelmästä riippuen rinnalleen erillisen maasulkusuojauksen tarpeellisen tarkkuuden saavuttamiseksi. Maasulkusuoja tarvitaan joka tapauksessa niin lähdölle kuin hajautetulle tuotannollekin mahdollisen differentiaalisuojauksessa ilmenevän vian johdosta. Differentiaalisuojauksen ollessa toimintakunnossa voidaan lähdön 1 releen suunnattua maasulkusuojaa hyödyntää myös hajautetun tuotannon erottamiseksi. Lähdön 1 suunnatun maasulkusuojan annettua laukaisukäskyn lähdön katkaisijalle välitetään samalla differentiaalisuojausta apuna käyttäen hajautetun tuotannon katkaisijalle laukaisukäsky.

Tietoliikenneyhteyden ollessa käytössä voidaan verkkorakenteessa a hyödyntää etälaukaisua hajautetun tuotannon verkosta erottamiseksi. Lähdön 1 releen lauetessa maasulun seurauksena lähettää se etälaukaisukäskyn hajautetulle tuotannolle. Hajautetun tuotannon nopea laukaisu maasulkutilanteissa on mahdollinen ainoastaan hyväksikäyttämällä etälaukaisua.

Verkon ollessa varustettu välikatkaisijalla voidaan myös silloin hyödyntää tietoliikenneyhteyttä. Vian ollessa välikatkaisijan suojausvyöhykkeellä ei hajautetun tuotannon tai lähdön 1 tulisi laueta. Tämä voidaan estää lähettämällä lukituskäsky hajautetun tuotannon ja lähdön 1 releille aina, kun välikatkaisija havahtuu maasulkuihin.

Suljetussa rengasverkossa maasulkujen paikannus on hankalaa. Kappaleessa 5.3 sivuilla 50–56 suoritetuissa simuloinneissa nähdään, että käytettäessä suunnattuja maasulkureleitä ei selektiivistä maasulkusuojausta voida saavuttaa. Kuvassa 25 esitetyn simuloinnin perusteella voidaan nähdä, että jopa yhden rengaslähdön alussa olevaa maasulkua ei havaita toiselta rengaslähdöltä käsin, vaan maasulun seurauksena varasuojana oleva syötön katkaisija erottaa koko verkon. Rengaslähdöllä olevat suunnatut maasulkusuojat kykenevät kuvissa 23 ja 24 esitettyjen tulosten perusteella erottamaan mihin suuntaan maasulkuvirta kulkee. Tällöin maasuluissa verkko on mahdollista jakaa kahteen osaan rengaskatkaisijan avulla, jolloin maasulun erottaminen voi tapahtua samoilla periaatteilla kuin säteittäisessä verkossa. Hajautetulla tuotannolla täytyy tosin tällöin olla pitkä havahtumisaika, jos halutaan välttyä turhilta hajautetun tuotannon verkosta erottamisil-

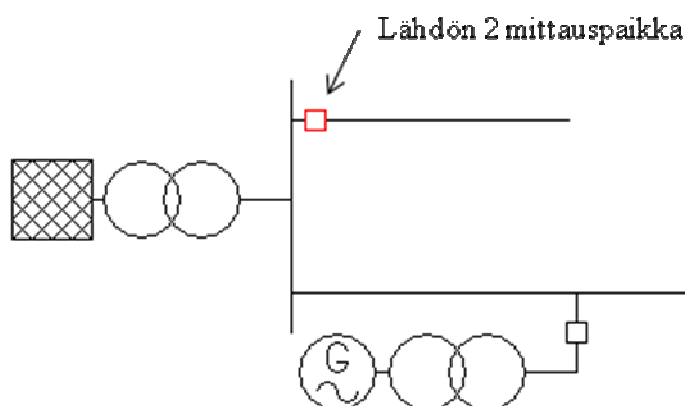
ta. Rengaslähtöjen ja jokaisen rengaskatkaisijan ollessa kytkettynä toisiinsa tietoliikenneyhteyden välityksellä voidaan suorittaa vertailua releiden välillä, jotka osoittavat missä suunnassa vika sijaitsee ja siten päätellä millä suojavyöhykkeellä vika on.

6.2. Vika lähdöllä 2

Lähdöllä 2 tapahtuvaan vikaan vikavirtaa syöttävän verkon lisäksi syöttää myös hajautettu tuotanto. Hajautetulta tuotannolta syötetty oikosulkuvirta vaihtelee vian tyyppin, generaattorin tyyppin sekä generaattorin ja vikapaikan välisen etäisyyden mukaan. Suurin mahdollinen vikavirta hajautetulta tuotannolta syötetään kolmivaiheiseen vikaan, kun generaattori on mahdollisimman lähellä vikaa. Näin lähdön 2 vikaantuessa kaikilla kolmella verkkorakenteella tarkasteltavana on kolmivaiheinen oikosulku lähdön 2 alussa. Tarkasteltavana on lisäksi maasulku lähdöllä 2.

Kaikissa verkkorakenteissa vian ollessa lähdöllä 2 ainoastaan lähdön 2 releen tulee toimia. Hajautetun tuotannon tulisi pysyä verkossa kiinni ja jatkaa toimintaansa normaalisti.

Lähdön 2 releen mittauspaikka on esitetty kuvassa 32. Tarvittavia suojaustoimintoja lähdön 2 releelle ovat ylivirtasuojat lähdöllä tapahtuvien ylivirtojen havaitsemiseksi, sekä suunnattu maasulkusuojat lähdön maasulkuja varten. Ylivirtasuojan tarvitsemia mitaustietoja ovat vaihevirrät. Suunnattu maasulkusuojat tarvitsee toimiakseen mittaukset nollajännitteestä ja summavirrasta.



Kuva 32. Lähdön 2 mittauspaikka.

Verkkorakenteesta riippumatta lähdön 2 rele havaitsee omalla lähdöllään olevat viat ja erottaa lähdön.

Verkkorakenteessa a lähdön 1 releellä on normaalisti ilman tietoliikennettä tapahtuvassa suojauksessa oikosulkusuojana ylivirtasuojaja. Hajautetun tuotannon lisääminen verkkoon voi aikaansaada muutoksen tehon kulkusuuntaan releen 1 mittauspaikassa. Muuttunut tehon kulkusuunta sekä hajautetulta tuotannolta syötetty suuri vikavirta viereisen lähdön alussa olevaan kolmivaiheiseen oikosulkuun saattaa aiheuttaa lähdön 1 releen ylivirtasuojan havahtumisen. Ilmiötä on aiemmin kuvattu kappaleessa 3.4.2. sivuilla 32–33 sekä kappaleessa 5.1 sivuilla 48–49. Ongelma on poistettavissa korvaamalla lähdön 1 ylivirtasuojaja suunnatulla ylivirtasuojalla, joka on suunnattu johtolähdölle päin. Näin hajautetun tuotannon syöttämää ylivirtaa ei havaita lähdöltä 1.

Hajautetun tuotannon lähdön 2 alussa olevaan kolmivaiheiseen oikosulkuun syöttämä vikavirta voi olla suurempi kuin lähdöllä 1 tapahtuvaan kaksivaiheiseen oikosulkuun. Kuten kappaleessa 3.4.2. sivuilla 32–33 myös mainittiin ja myöhemmin sivulla 47 olevan kuvan 14 perusteella voidaan nähdä, niin myös hajautetun tuotannon ylivirtasuojaja voi havaita lähdölle 2 syötetyn ylivirran ja siten turhaan erottaa hajautetun tuotannon. Hajautetun tuotannon suojausvyöhykkeen ulottuessa pitkälle lähdölle 2 turhan laukaisun estäminen onnistuu muuttamalla hajautetun tuotannon suojaus aikaselektiiviseksi läh-

dön 2 suojausten kanssa. Tämä tarkoittaa pidentämällä hajautetun tuotannon ylivirrälle tarvittavaa havahtumisaikaa, jolloin lähdöllä 1 olevissa vikatapauksissa hajautetun tuotannon irtautuminen verkosta viivästyy.

Tilanteen ollessa enemmän kuvan 15 mukainen, jossa hajautetun tuotannon suojausvyöhyke ulottuu vain vähän lähdön 2 alkuun, on lähdöllä 2 mahdollista ottaa käyttöön hetkellinen ylivirtaporras. Tämän hetkellisen ylivirtaportaan tarvitsee kattaa vain hajautetun tuotannon ulottuma viereiselle lähdölle, sekä aika-asettelun täytyy olla aseteltu vähintään yhtä aikaporrasta hajautettua tuotantoa nopeammaksi. Tällöin hajautetulla tuotannolla ja lähdöllä 2, lukuun ottamatta hetkellistä ylivirtaporrasta, voi olla samat aika-asetukset ja lähdön 1 vikatilanteissa hajautettu tuotanto voidaan erottaa nopeammin. Sovellus on kuitenkin tapauskohtainen ja vaatii hajautetun tuotannon olevan sijoitettu lähdön 1 loppupäähän.

Välikatkaisijan käyttö verkkorakenteessa a ei vaikuta lähdön 2 suojaukseen.

Verkkorakenteessa b käytetty differentiaalisuoja ei absoluuttisen selektiivisyytensä ansiosta havaitse lähdön 2 oikosulkuja, eikä siten aiheuta turhia laukaisuja lähdön 2 oikosulkuilanteissa. Differentiaaliyhteyden ollessa pois käytöstä voidaan suojaus toteuttaa verkkorakenteen a tapaan. Nyt tilanne on kuvan 15 mukainen ja lähdön 2 oikosulkusuojalla voidaan ottaa käyttöön edellä kuvailtu hetkellinen porras.

Suljetun rengasverkon ollessa kyseessä täytyy hajautetun tuotannon olla riittävästi aikahidastettu, ettei se laukea rengaslähdön oikosulkuihin. Tämä aikahidastus riittää saavuttamaan selektiivisyyden myös lähdön 2 oikosulkusuojan kanssa.

Kaikilla kolmella verkkorakenteella lähdön 2 maasuluissa lähtöjen 1 ja 2 maasulkusuojat ovat selektiivisiä keskenään suunnattujen maasulkusuojien ansiosta. Hajautetun tuotannon maasulkusuojaus kuitenkin perustuu nolajännitteeseen. Tästä syystä hajautetun tuotannon maasulkusuoja havahtuu lähdön 2 maasulkuihin. Ainoana keinona välttää hajautetun tuotannon turha laukaisu lähdön 2 maasuluissa on kasvattaa hajautetun tuotannon havahtumisaikaa. Samalla myös kasvatetaan lähdön 1 maasuluissa tarvittavaa poistoaikaa.

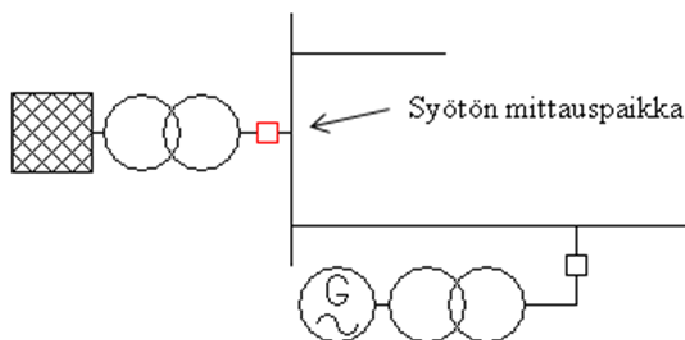
Tietoliikenneyhteyttä apuna käyttäen voidaan lukituskäskyjä hyödyntää hajautetun tuotannon sekä lähdön 1 turhien laukaisujen välttämiseksi. Tietoliikenneyhteys muodostaa väylän lähdön 1 ja hajautetun tuotannon lisäksi lähtöjen 1 ja 2 releiden välille. Tietoliikenneväylää pitkin on lähtöjen releiden mahdollista olla yhteydessä toistensa kanssa ja lähettää sekä vastaanottaa signaaleja keskenään. Lähdön 2 releen havahtuessa ylivirran perusteella se lähettää lähdölle 1 ja hajautetulle tuotannolle lukituskäskyn, joka estää signaalin vastaanottaneita releitä laukaisemasta ylivirran perusteella. Vastaavasti maasulkujen tapauksessa käytetään maasululle tarkoitettua estokäskyä. Käytännöstä on hyötyä etenkin maasulkujen tapauksessa, hajautetun tuotannon havahtuessa aina viereisen lähdön maasulkuihin. Eritoten verkkorakenteissa a ja b, missä hajautetun tuotannon maasulkusuojaa joudutaan muuten aikahidastamaan, tämä käytäntö on hyödyllinen, koska lukituskäskyn avulla lähdön 1 maasulkusuojauksesta saadaan nopeampi. Myös verkkorakenteissa c lukituskäskyä voidaan käyttää, mutta sillä ei saavuteta samoja hyötyjä kuin verkkorakenteissa a ja b, koska tällöin hajautetun tuotannon suojaustoimintoja joudutaan hidastamaan rengasverkossa käytetyn suojauksen luonteesta johtuen.

Lähdöllä 2 tapahtuvat viat aiheuttavat jännitteenaleneman, joka voidaan havaita hajautetulta tuotannolta. Tällöin tulee varmistua, että hajautetulla tuotannolla käytössä oleva alijännitesuoja ei turhaan laukea. Verkkoonliityntäehdoissa oleva jännitekuoppavaatimus edesauttaa voimalaa säilymään verkossa viereisen lähdön aiheuttaman jännitteenaleneman ajan. Alijännitettä oikosulkusuojanaan käyttävä hajautettu tuotanto edustaa vastakkaista kantaa, jolloin hajautettu tuotanto olisi erotettava mahdollisimman nopeasti vian ollessa lähdöllä 1. Tietoliikenteen ollessa käytössä näiltä ongelmilta voidaan välttyä, koska lähdön 2 rele lähettää hajautetulle tuotannolle laukaisun lukituskäskyn.

6.3. Vika kiskostossa

Kiskoston kaikissa vikatapauksissa syötön katkaisijan tulee irrottaa koko sen takana oleva verkko. Samalla myös hajautetun tuotannon tulisi irrota verkosta, sillä muutoin hajautettu tuotanto jää yksin syöttämään muodostunutta saarekettä.

Syötön mittauspaikkana on päämuuntajan toisiopuoli (kuva 33), jolloin koko verkko ja kiskosto kuuluvat sen suojausvyöhykkeeseen. Syötön rele toimii ensisijaisena suojana kiskostolle ja varasuojana lähdöille. Kyseisen releen suojaustoimintoja ovat ylivirta ja nollajännitteeseen perustuva suuntaamaton maasulkusuoja. Mittaustietonaan rele tarvitsee vaihevirrat sekä nollajännitteen.



Kuva 33. Syötön mittauspaikka.

Syötön rele havaitsee kiskostossa tapahtuvat oikosulut ja maasulut verkkorakenteesta riippumatta. Lisäksi syötön rele havaitsee lähdöillä tapahtuvat maasulut sekä asetuksista riippuen myös oikosulut. Kyseiset toiminnot ovat yleensä kuitenkin aikahidastettuja lähdön vastaavia suojia hitaammiksi selektiivisyyden säilyttämiseksi. Edelleen samaan tapaan kuin lähdön 2 vikatapausten kanssa on mahdollista, että myös hajautetun tuotannon rele havaitsee kiskoston vikatilanteet.

Ilman tietoliikenneyhteyttä syötön releen aikahidastusten ansiosta hajautettu tuotanto ennättää irrottautumaan verkosta ennen syötön katkaisijan aukeamista. Turvallisuuden parantamiseksi on kuitenkin kehitetty entistä nopeampia kiskoston suojausmenetelmiä ja nykyaikaiset nopeat valokaaren suojausmenetelmät mahdollistavatkin kiskoston valokaaren havaitsemisen ja syötön katkaisun Karrin (2009: 59–60) mukaan jo muutamassa millisekunnissa. Kiskoston valokaaren nopea katkaisu on erityisen tärkeää henkilöturvallisuuden kannalta. Hajautettu tuotanto ei kykene näin nopeaan verkosta irtautumiseen ja ilman hajautetun tuotannon nopeaa erottamista nopeasta valokaarisuojasta saa-

vutettu hyöty katoaa hajautetun tuotannon ylläpitäessä valokaarta. Syötön katkaisijan lisäksi nopean valokaarisuojan tulisikin avata myös kaikkien lähtöjen katkaisijat, joilla on hajautettua tuotantoa. Näin valokaari saadaan sammumaan, eikä hajautetun tuotannon ole mahdollista ylläpitää sitä. Samaa käytäntöä tulisi noudattaa myös muissa kuin nopeissa valokaarisuojissa ja hajautettua tuotantoa sisältävät lähdöt pitäisi automaattisesti erottaa syötön katkaisijan auetessa. Lähdön katkaisijan automaattisesti auetessa eliminoidaan takasyötön vaara ja siten tehdään mahdollisista korjaustoimenpiteistä turvallisempia. Menetelmä on kuitenkin ongelmallinen, sillä hajautettua tuotantoa sisältävän lähdön katkaisijan auetessa luodaan saareketilanne, jossa hajautettu tuotanto jää yksin syöttämään omaa lähtöään.

Tietoliikenneyhteyttä voidaan hyödyntää kiskoston vikatapauksissa kaikilla verkkorakenteilla. Tietoliikenteen avulla kiskoston suojausten muodostama saareketilanne saadaan poistettua. Lähdön 1 katkaisijan auetessa lähettää se aina hajautetun tuotannon releelle etälaukaisukäskyn. Verkkorakenteen c kohdalla avataan rengaslähdön molemmat katkaisijat, jonka yhteydessä hajautetulle tuotannolle lähetetään etälaukaisukäsky.

Syötön releen ja lähtöjen releiden ollessa yhdistettynä toisiinsa tietoliikenneyhteyden avulla on mahdollista saada kiskoston oikosulku- ja maasulkusuojausta nopeammaksi käyttämällä lukitussuojausta. Ilman lukitussuojausta kiskostossa käytetyn ylivirtasuojan on oltava koordinoitu aikaselektiiviseksi kaikkien syöttösuunnassa alapuolella sijaitsevien suojalaitteiden kanssa. Tällöin kiskostoa suojaavassa releessä aikaviive on valittava niin suureksi, että kiskostossa oleva vika ehtii aiheuttaa suuria vahinkoja. Lukitussuojaus mahdollistaa vian poistamisen ilman normaalin ylivirtasuojan vaatimaa porrasaikaa. Lukitussuojaus toimii siten, että vika jollakin lähdöllä aikaansaa syöttävän releen ja kyseisen lähdön releen havahtumisen, jonka jälkeen havahtunut lähtö lukitsee syötön releen. Vian ollessa kiskostossa syötön releen lisäksi mikään lähdön releistä ei havaitse vikaa ja syötön releen annetaan laukaista vika nopeasti. Hakala-Ranta, Rintamäki & Starck (2009) esittävät artikkelissaan kiskoston lukitussuojaukseen käytettäväksi IEC 61850-standardin mukaisia GOOSE-viestejä. Etuina he näkevät selvän parannuksen lukitussuojauksen toiminta-aikoihin, jolloin myös kiskoston suojaus saadaan entistä nopeammaksi.

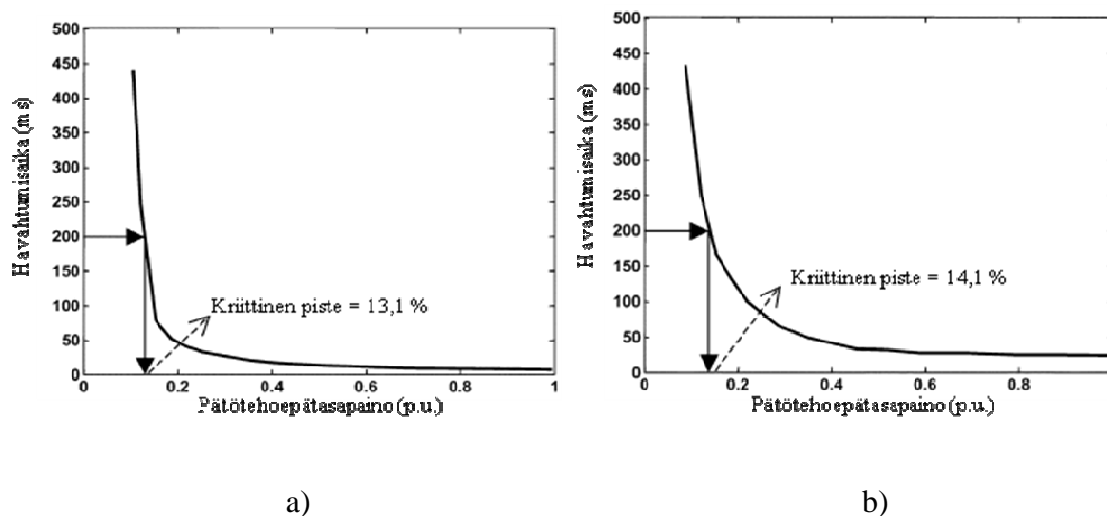
6.4. Saarekekäytön esto

Saareketilanne muodostuu, kun syötön, tai oman lähdön katkaisija äkisti aukeaa kadottaen yhteyden syöttävään verkkoon ja jättäen hajautetun tuotannon syöttämään yksin jäljelle jäävää verkkoa. Saareketilanne tulee poistaa kytkemällä hajautettu tuotanto irti verkosta mahdollisimman nopeasti.

SENERin suositusten (2001: 17–21) mukaisesti pienvoimalan perussuojaukseen kuuluu yli- ja alijännite sekä yli- ja alitaajuusreleet. Näiden lisäksi voidaan voimala varustaa erillisillä saarekekäytön estosuojilla, joita ovat ROCOF- ja VS-releet. Edellä mainittujen passiivisten menetelmien lisäksi tarkastellaan myös tietoliikenteen avulla suoritettavaan etälaukaisuun perustuvaa saarekekäytön estosuojausta.

Kaikille passiivisille menetelmille ominainen piirre on niillä esiintyvä suojauksen katvealue, jonka perusteella Ye, Kolwalkar, Zhang, Du & Walling (2004) määrittelevät suojauksen suorituskyvyn. Katvealueella tarkoitetaan aluetta, jossa syntyvän saarekkeen sisällä tehotasapainon ollessa tarpeeksi pieni ei suojaus havaitse saarekkeen syntymistä vaaditussa ajassa. Passiiviset suojausmenetelmät ovat myös alttiita virhelaukaisuilla vian ollessa viereisellä lähdöllä. Mm. Kumpulainen ym. (2006: 90–92) ovat simulointien avulla pyrkineet havainnollistamaan tätä ongelmaa ja näiden simulointien tuloksia on esitetty aiemmin kohdassa 5.4.2. olleissa kuvissa 27 ja 28.

Freitas, Xu, Affonso & Huang (2005) ovat vertailleet ROCOF- ja VS-releiden toimintaa määrittämällä suojaustoiminnoille kriittisen pisteen, joka määräytyy millä pätötehon epätasapainolla suojaus ei enää havaitse saarekettä alle 200 millisekunnissa. ROCOF-releelle pätötehon kriittinen piste oli 13,1 %, jota pienemmällä pätötehon epätasapainolla ei suojaus enää alle 200 millisekunnissa havaitse saareketilannetta. VS-releelle sama arvo oli 14,1 %. Freitas ym. (2005) mukaan loistehon epätasapainolla ei juurikaan ole vaikutusta ROCOF- ja VS-releiden havahtumisaikaan. Freitas ym. (2005) ovat lisäksi päätyneet tulokseen, että ROCOF-releillä on pienempi katvealue, kuin VS-releillä, mutta he ovat samalla herkempiä virhelaukaisuille kuin VS-releet.



Kuva 34. a) ROCOF-releen suorituskykyä mittaava käyrä, releasetteluna on 1,2 Hz/s
 b) VS-releen suorituskykyä mittaava käyrä, releasetteluna on 2° (Freitas ym. 2005).

Suomessa Helen (2009) vaatii 0,15 s toiminta-aikaa saarekekäytön estosuojilta. Freitas ym. (2005) artikkelin pohjalta tämä vaatimus voi kuitenkin tietyissä tilanteissa olla mahdoton saavuttaa. Lisäksi suojauksen toiminnan kokonaisaikaan on releen havaitumisaajan lisäksi otettava vielä huomioon katkaisijan toiminta-aika (yleisesti noin 50 ms), jolloin suojauksen kokonaisajaksi muodostuu helposti yli 150 ms.

Tietoliikenneyhteyttä apuna käyttäen saareketilanne on mahdollista poistaa nopeasti ja luotettavasti etälaukaisun avulla. Hajautetulle tuotannolle lähetetään etälaukaisukäsky aina, kun lähdön 1 rele avaa lähdön 1 katkaisijan. Tällöin myös hajautettu tuotanto irtautuu verkosta ja suunnittelematon saareketilanne poistetaan. Tietoliikenneyhteyttä käytettäessä yksinsyötön estosuojauksen toiminta-aika koostuu ainoastaan tietoliikenteestä aiheutuvasta viiveestä. Lähdön 1 releen lähettäessä laukaisukäskyn samalla lähdön 1 ja hajautetun tuotannon releille muodostuu tietoliikennemediasta, käytetystä tietoliikennemetodista ja releiden välisestä etäisyydestä riippuvainen viive. Tietoliikenneyhteyttä ja GOOSE-viestejä hyödyntävän saarekekäytön estosuojan tiedonsiirtoviivettä on tutkittu Rintamäen & Kauhaniemen (2009) julkaisemassa artikkelissa. Tietoliikenneviive on tutkimuksessa saatu välille 24–30 ms ja tutkimuksen tulokset on esitetty taulukossa 4. Taulukon 4 tietojen perusteella voidaankin päätellä, että GOOSE-viestipohjaiseen

tietoliikenteeseen perustuva saarekekäytön estosuojaus toteuttaa tiukimmatkin suojausten nopeusvaatimukset.

Taulukko 4. Tietoliikennesignaalin viive (Rintamäki ym. 2009).

Signaalin viive	Testiajojen määrä
24 ms	143
25 ms	416
26 ms	1352
27 ms	1274
28 ms	1079
29 ms	637
30 ms	99
	Σ 5000

Verkkorakenteessa b differentiaalisuojan ollessa toiminnassa saareketilanteen muodostuminen on mahdollista estää samaan tapaan, kuin tietoliikenneyhteyttä apuna käyttäen.

Tietoliikenneyhteyden ollessa toiminnassa täytyy hajautetulla tuotannolla silti olla verkkoonliityntäehtojen sanelemat saarekekäytön estomenetelmät. Näitä ovat yli- ja alitaajuus sekä yli- ja alijännitesuojat. Huomattavasti hitaamman toiminta-aikansa tähden nämä suojat toimivat varasuojana tietoliikenneyhteyden mahdollistamalle etälaukaisulle.

6.5. Jälleenkytkennät

Jälleenkytkennät ovat tärkeä osa sähköverkon suojausta. Jälleenkytkentöjen avulla jakeluverkosta voidaan saada luotettavampi sekä lyhentää asiakkaiden kokemia jakelukeskeytyksiä.

Suuri osa avojohtoverkoissa sattuvista vioista on valokaarimaasulkuja, jotka sammuvat itsestään kun johdin tehdään jännitteettömäksi. Kaapeliverkkojen viat ovat luonteeltaan eristysvikoja ja useimmiten pysyviä. Tästä syystä kaapeliverkoissa ei ole kannattavaa käyttää jälleenkytkentöjä (Blackburn 1998: 490–491). 20 kV keskijännitejakeluverkossa

valokaaren deionisoitumiseen tarvittava aika voidaan likimäärin laskea kappaleessa 3.1.2. sivulla 26 esitellyn kaavan (4) avulla seuraavasti:

$$t = \frac{20}{34,5} + 10,5 \text{ jaksoa} = 11,1 \text{ jaksoa} .$$

Jolloin tarvittavaksi deionisoitumisajaksi muodostuu noin 11 sähköistä jaksoa, joka millisekunneiksi muutettuna 50 Hz taajuudella on likimain 220 millisekuntia.

Jälleenkytkennän käyttö yhdessä hajautetun tuotannon kanssa edellyttää hajautetun tuotannon irtoamista verkosta jälleenkytkennän jännitteettömänä aikana. Lisäksi vielä hajautetun tuotannon tulee irrottautua verkosta siten, että jälleenkytkennän alun ja verkosta irtautumisen väliin jäävä aika on vähintäänkin kaavan (4) mukainen. Muuten voimala voi estää jälleenkytkennän onnistumisen pitämällä jännitettä yllä ja siten ylläpitämällä valokaarta. Hajautetun tuotannon on lisäksi oltava irti verkosta koko jälleenkytkentöjen suorittamisen ajan. Hajautetun tuotannon jäädessä syöttämään verkkoa jälleenkytkentöjen alkuun asti on jälleenkytkennällä suuri mahdollisuus epäonnistua ja lisäksi voimala voi ajautua eri vaiheeseen syöttävän verkon kanssa. Voimalan ollessa eri vaiheessa syöttävän verkon kanssa jälleenkytkentöjen alkaessa voi epätahdissa tapahtuva jälleenkytkentä aikaansaada mekaanisia vaurioita niin voimalaitokselle kuin verkon eri komponenteillekin.

Lehesvuon (2004: 73) mukaan ensimmäinen jälleenkytkentä halutaan käynnistää mahdollisimman nopeasti vian havaitsemisen jälkeen noin 0,04–0,2 sekunnin viiveellä. Ensimmäisen jälleenkytkennän, PJK:n aika on hyvin yleisesti 0,3 sekuntia. Tämä tarkoittaisi, että hajautetun tuotannon olisi irtauduttava verkosta viimeistään noin 0,3 sekuntia vian alkamisesta. Ilman tietoliikenneyhteyttä on mahdotonta varmistua onko hajautettu tuotanto irtautunut verkosta ennen jälleenkytkentöjen alkua. Vaihtoehtoisesti jälleenkytkentöjen jännitteetöntä väliaikaa olisi mahdollista pidentää, jolloin hajautetulle tuotannolle annetaan enemmän aikaa irtautua verkosta.

Viereisen lähdön vioista ja pikajälleenkytkennöistä voi aiheutua jännitteenalenema hajautetun tuotannon kohdalla. Tällöin alijännitesuojan toiminta voi aikaansaada turhan

hajautetun tuotannon laukaisun. Alijännitesuoja on siksi asetettava viereisen lähdön jälleenkytkentöjä silmälläpitäen. Ristiriitaiseksi tilanteen tekevät oman lähdön vikatilanteet ja mahdollinen alijännitteeseen perustuva sivuilla 64–65 kohdassa 6.1.1. esitelty hajautetun tuotannon oikosulkusuojaus, jolloin kuitenkin hajautettu tuotanto olisi erotettava mahdollisimman nopeasti. Oman lisänsä tuovat vielä verkkoonliityntäehdot ja osassa niistä jo mukana oleva kappaleessa 2.3.2. sivuilla 17–18 esitelty jännitekuoppavaatimus. Suojauksen selektiivisyyttä ja verkkoonliityntäehtojen vaatimuksia silmälläpitäen 0,5 s vian havaitsemisesta alkava jälleenkytkentä onkin kova vaatimus hajautetun tuotannon suojaukselle.

Edellä mainituista syistä johtuen jälleenkytkentöjä ei voida suorittaa, ellei hajautetun tuotannon verkosta irtoamisesta voida varmistua.

Tietoliikenteen ollessa käytössä voidaan jälleenkytkennät suorittaa normaalisti verkkorakenteilla a ja b, sillä etälaukaisun ollessa käytössä varmistutaan hajautetun tuotannon tarpeeksi nopeasta erottamisesta. Suljetussa rengasverkossa ei jälleenkytkentöjä useimmiten kannata tehdä, johtuen useista syöttösuunnista ja rengasverkon voidaan sen käyttötarkoituksesta johtuen yleensä olettaa olevan suureksi osaksi kaapeliverkkoa. Suljetussa rengasverkossa, joka muutetaan säteittäiseksi vian havaitsemisen jälkeen, voisi toki olla mahdollista suorittaa jälleenkytkentöjä verkkorakenteen a tapaan.

Hajautetun tuotannon verkkoon takaisin liittäminen onnistuneen jälleenkytkentäsekvenssin jälkeen voisi periaatteessa tapahtua, kun on varmistettu jännitteen ja taajuuden olevan sallituissa rajoissa. Tietoliikenneyhteyden ollessa käytössä lähdön rele voi vielä välittää tiedon jälleenkytkennän onnistumisesta hajautetulle tuotannolle. Suomessa ainakin Helenin (2009) julkaisemassa ohjeessa generaattorilaitteistoiden liittämiseksi heidän verkkoonsa on kerrottu, että jakeluverkon jännitteen palatessa generaattorilaitteisto saa kytkeytyä jakeluverkkoon, kun jakeluverkon jännite on ollut normaaliarvoissaan vähintään 10 minuuttia. Vastaavanlainen vaatimus on myös Hollannin verkkoonliityntäehdoissa (Office of Energy Regulation 2007: 16), jossa vaaditaan vähintään kahden minuutin viivästyä generaattorin verkkoon liittämiseksi sen siitä irrottua.

Jälleenkytkentöjä on mahdollista suorittaa verkkorakenteessa b differentiaalisuojan ollessa käytössä. Jälleenkytkentöjen mielekkyyttä tässä tapauksessa voidaan kuitenkin kyseenalaistaa, koska lähdöllä ei ole ollenkaan kulutusta. Toisaalta generaattorityypin mahdollistaessa voitaisiin tuotantolaitos ohimenevän vian ja onnistuneen jälleenkytkennän jälkeen liittää nopeasti takaisin verkkoon määräysten niin salliessa.

6.6. Katsaus toiminnallisiin vaatimuksiin

Tässä kappaleessa on käyty läpi hajautetun tuotannon suojaukselle asetettavia toiminnallisia vaatimuksia. Suojauksen kannalta kriittisiä tilanteita on tarkasteltu kolmessa eri verkkorakenteessa ja kahdelta eri näkökannalta; ilman releiden välillä olevaa tietoliikenneyhteyttä ja tietoliikenneyhteyden avulla tapahtuvaa suojausta.

Hajautetulla tuotannolla olevan ylivirtasuojan käyttöä voi rajoittaa voimalan pieni oikosulkuvirran syöttökyky. Tällöin ylivirtasuoja ei välttämättä havahdu voimalan syöttämään oikosulkuvirtaan, jolloin ylivirtaan perustuvaa oikosulkusuojaukseen ei voida hajautetulla tuotannolla käyttää. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää alijännitteeseen perustuvaa oikosulkusuojaukseen, mutta sen käyttö on tapauskohtaista ja sen toiminta voi joissain tilanteissa hidastua. Maasulkutilanteissa hajautetun tuotannon rele havahtuu aina myös lähdön 2 maasulkuihin, jolloin hajautetun tuotannon maasulkusuojauksen tulee olla riittävästi aikahidastettu, jotta välttyään turhilta laukaisuilta maasulun ollessa muualla kuin lähdöllä 1.

Lähdön 1 oikosulkusuojan toiminta voi hajautetun tuotannon lisäämisen seurauksena hidastua tai jopa kokonaan sokaistua. Tämä on mahdollista välttää asentamalla lähdölle välikatkaisija sopivaan paikkaan.

Tietoliikenneyhteyden käytöstä oikosulkusuojauksessa saadaan kahdessa ensimmäisessä verkkorakenteessa (a ja b) merkittävä hyöty. Verkkorakenteessa a voidaan tietoliikenneyhteyden avulla saada hajautetun tuotannon suojauksesta nopea ja aukoton hyväksikäyttämällä lähdön 1 releen alulle panemaa etälaukaisua. Verkkorakenteessa b käytetty differentiaalisuoja vaatii tietoliikenneyhteyden käyttämistä lähdön ja hajautetun tuotan-

non välillä. Differentiaalisuoja on absoluuttisesti selektiivinen omalla suojausvyöhykkeellään ja pystyy nopeasti ja tehokkaasti erottamaan hajautetun tuotannon oikosulun sattuessa. Myös maasulkutilanteissa differentiaalisuojauksen käytöstä on hyötyä, sillä hajautetun tuotannon erottaminen voi perustua lähdön 1 alkuun asennetun suunnatun maasulkusuojan toimintaan.

Verkkorakenteessa c suojauksen toteutus monimutkaistuu ja vian poistamiseen tarvittava aika kasvaa, mutta verkon toimitusvarmuus paranee. Oikosulun sattuessa renkaassa olevat suunnatut oikosulkusuojat erottavat vikaantuneen osan verkosta. Maasulkujen poistaminen selektiivisesti suljetussa rengasverkossa on haastavaa ja suoritettujen simuloitien perusteella aiheuttaa jopa tietyissä tilanteissa virheellisiä syötön laukaisuja. Tietoliikenneyhteyden käytöstä verkkorakenteessa c ei saada merkittävää hyötyä, elleivät rengaslähdöt ja kaikki rengaskatkaisijat ole liitettynä toisiinsa.

Hajautetun tuotannon suojaus voi havaita lähdöllä 2 olevia vikoja ja turhaan erottaa hajautetun tuotannon. Muuttamalla hajautetun tuotannon suojaus aikaselektiiviseksi lähdön 2 suojauksen kanssa on turhilta hajautetun tuotannon erottamisilta mahdollista välttää, mutta samalla kasvatetaan hajautetun tuotannon toiminta-aikaa. Tietoliikenneyhteyden avulla lähdön 2 releen on mahdollista havahtuessaan lähettää lukituskäsky hajautetun tuotannon releelle ja siten välttää hajautetun tuotannon turha laukaisu aikaasetuksia muuttamatta. Verkkorakenteessa käytetty differentiaalisuoja ei suojausperiaatteensa takia havaitse ollenkaan lähdön 2 vikatilanteita ja toimii siten luotettavasti myös lähdön 2 vikaantuessa.

Syöttävän verkon kiskoston vikaantuessa tulisi kiskosto erottaa syöttävästä verkosta mahdollisimman nopeasti turvallisuuden parantamiseksi. Nopeimmat kiskoston valokaarisuojat pystyvät toimimaan jo muutamassa millisekunnissa ja nopeudesta saavutetun hyödyn säilyttääkseen tulisi myös ne lähdöt, joilla on hajautettua tuotantoa erottaa. Näin luodaan saareketilanne, joka on tietoliikenneyhteyden ja etälaukaisukäskyn avulla mahdollista poistaa nopeasti.

Passiivisilla saarekekäytön estomenetelmille ominaisia piirteitä ovat niillä esiintyvä suojauksen katvealue sekä mahdollinen virheellinen toiminta. Pätötehon tehotasapaino

syntyneessä saarekkeessa voi pidentää suojauksen toiminta-aikaa yli sallitun. Tietoliikenneyhteyttä ja etälaukaisuja hyväksikäyttämällä saarekekäyttö voidaan estää kokonaan, jolloin tiukimmatkin suojauksen nopeusvaatimukset täyttyvät.

Jälleenkytkentöjen avulla voidaan avojohtoverkoissa tapahtuvista vioista poistaa suurin osa tehden verkon käytöstä luotettavampaa sekä lyhentää asiakkaiden kokemia jakelukeskeytyksiä. Hajautettu tuotanto voi ylläpitämällä valokaarta vikapaikassa aikaansaada jälleenkytkentöjen epäonnistumisen ja muuttaa ohimenevän vian pysyväksi. Jälleenkytkennät halutaan yleisesti käynnistää mahdollisimman nopeasti, jolloin hajautettu tuotanto tulisi pystyä erottamaan verkosta ennen jälleenkytkentäsekvenssin alkua. Ristiriitaiseksi tilanteen tekevät jännitekuoppavaatimukset, joiden mukaan voimalan tulee sietää jännitekuoppia lyhyitä aikoja. Käyttämällä passiivisia suojausmenetelmiä hajautetulla tuotannolla on mahdoton varmistua onko voimala irtautunut verkosta ennen jälleenkytkentöjen alkua. Tällöin olisi mahdollista hidastaa ensimmäisen jälleenkytkennän alkamista. Tietoliikenteeseen perustuvaa etälaukaisua käyttämällä hajautettu tuotanto on mahdollista erottaa verkosta nopeasti, jolloin jälleenkytkennät voidaan suorittaa normaalisti.

7. YHTEENVETO

Hajautetun tuotannon osuus kokonaisenergiantuotannosta tulee lisääntymään tulevaisuudessa. Hajautetun tuotannon lisäystä vauhdittaa huoli ympäristöstä sekä paikallisten energiaressurssien parempi hyödyntäminen. Hajautetun tuotannon lisääminen sähköjakeluverkkoihin muuttaa verkon rakennetta ja huomioon otettavien tekijöiden lisääntyessä verkon suojaus monimutkaistuu.

Sähköjakeluverkkojen suojausten monimutkaistuessa täytyy verkon suojausten ja suojauksissa käytettävien releiden ja menetelmien kehittyä ja pystyä vastaamaan uusiin haasteisiin. Tässä työssä on tarkasteltu hajautetun tuotannon suojaruleistyksen toiminnallisia vaatimuksia kahdesta eri näkökulmasta, perinteisten passiivisten suojausmenetelmien kautta ja kuinka relesuojauksessa voidaan hyödyntää modernien suojaruleiden tietoliikenneominaisuuksia.

Toiminnallisten vaatimusten määrittämisen lähtökohtana on ollut kolmen toisistaan erilaisen verkkorakenteen vikatilanteiden tarkastelu. Tarkastelun perusteella perinteisiä passiivisia suojausmenetelmiä käyttäen suojaus on altis virhelaukaisuille niin oikosulkujen kuin maasulkujenkin kohdalla. Virhelaukaisut voidaan välttää kasvattamalla suojausten toiminta-aikaa. Pidentyneellä suojausten toiminta-ajalla on kuitenkin haittapuolensa, mm. verkon turvallisuuden, selektiivisyyden ja jälleenkytkentöjen kannalta. Avajohtoverkkojen vioista suuri osa on ohimeneviä, jotka saadaan poistettua jälleenkytkentöjen avulla samalla parantaen sähköjakelun luotettavuutta. Hajautettu tuotanto voi kuitenkin ylläpitää valokaarta vikapaikassa ja siten aiheuttaa jälleenkytkentöjen epäonnistumisen. Tärkeä osa hajautetun tuotannon suojausta on saarekekäytön estosuojaus, jonka toteuttaminen passiivisilla menetelmillä on vähintäänkin haastavaa ja jopa mahdotonta joidenkin verkkoyhtiöiden vaatimassa 0,15 sekunnin ajassa. Hajautetun tuotannon suojausten toiminnalta odotettavat vaatimukset ovat osittain ristiriitaisia, kun verkkoonliityntäehdot tulevat yhä enemmän vaatimaan voimalalta kykyä sietää jännitekuoppia, mutta voimala olisi siitä huolimatta pystyttävä erottamaan verkosta nopeasti ja kyettävä toimimaan selektiivisesti yhdessä verkon muun suojausten kanssa.

Suojauksen toimintaa voidaan monessa tilanteessa oleellisesti parantaa tietoliikenneyh-teyden avulla. Tietoliikenneyhteys mahdollistaa suojauksen nopean ja aukottoman toi-minnan kaikissa verkoston vikatapauksissa. Lisäksi hajautetun tuotannon aikaansaama jälleenkytkentöjen epäonnistuminen voidaan välttää käyttämällä tietoliikenneyhteyden mahdollistamaa hajautetun tuotannon nopeaa verkosta erottamista.

Passiivisten suojausmenetelmien toimintaa voidaan tulevaisuudessa vielä parantaa yh-distämällä useampia suojaustoimintoja keskenään. Näin saaduilla algoritmeilla on suo-jauksessa ilmenneitä aukkoja mahdollista karsia sekä saarekekäytön estosuojan katve-alueita pienentää. Suojausalgoritmien kehityksestä huolimatta passiivisille menetelmille on ominaista pieni suojauksen katvealue, joka on mahdollista poistaa hyväksikäyttämäl-lä modernien suojareiden tietoliikenneominaisuuksia.

Hajautetun tuotannon lisääntyminen on yksi askel kohti älykkäitä jakeluverkkoja. Älyk-käiden sähköverkkojen avulla verkon eri osat toimivat keskenään helpottaen energian hallinnassa samalla parantaen sähköjakelun luotettavuutta. Muuttuvassa sähköverkossa relesuojauksella on merkittävä rooli ja kokonaisvaltainen sähköjakeluverkon suojaus-konseptin tarkastelu on edellytys yhä älykkäämmäksi muuttuvan sähköverkon toteutuk-sessa.

LÄHDELUETTELO

- ABB (2000). *Teknisiä Tietoja ja Taulukoita*. 9. painos. Vaasa: Suomalaiset ABB-yhtiöt. 626 s. ISBN 951-99366-0-2.
- ABB (2008). *Standardilla kohti tulevaisuuden sähköverkkoa* [online] [siteerattu 26.6.2009]. Saatavana World Wide Webistä <URL: <http://www.abb.fi/cawp/seitp202/286bb84c3befd7f2c125750d0024a3e4.aspx>>.
- ABB (2009). Internet sivut [online] [siteerattu 23.10.2009]. Saatavana World Wide Webistä <URL: <http://www.abb.fi/product/db0003db004281/207b10566a2a8e1ec12574d600368370.aspx?productLanguage=fi&country=FI>>.
- Abdel-Galil, Tarek K., Ahmed E.B. Abu-Elanien, Ehab F. El-Saadany, Adly Girgis, Yasser A.-R. I. Mohamed, Magdy M.A. Salama & Hatem H.M. Zeineldin (2007). *Protection Coordination Planning With Distributed Generation* [online]. Natural Resources Canada [siteerattu 4.6.2009]. 179 s. Saatavana World Wide Webistä: <URL: <http://cetc-ctec.nrcan-rncan.gc.ca/fichier.php/codectec/En/2007-149/2007-149e.pdf>>.
- Areva (2005). *Network Protection & Automation guide*. 3. painos. Paris: Areva. 475 s. ISBN 2-9518589-0-6.
- Areva (2008). Internet sivut [online] [siteerattu 9.7.2009]. Saatavana World Wide Webistä <URL: <http://www.areva-td.com>>.
- Basler (2009). Internet sivut [online] [siteerattu 9.7.2009]. Saatavana World Wide Webistä <URL: <http://www.basler.com>>.
- Blackburn, J. Lewis (1998). *Protective Relaying: Principles and Applications*. 2. painos. New York: Marcel Dekker, Inc. 538 s. ISBN 0-8247-9918-6.

- Capstone Turbine Corporation (2008). Internet sivut [online] [siteerattu 2.6.2009]. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://www.microturbine.com>>.
- Crompton Instruments (2009). *Installation and Operating Instructions R.O.C.O.F Protection relay* [online] [siteerattu 10.9.2009]. Saatavana World Wide Webistä <URL: <http://www.crompton-instruments.com/rocof.pdf>>.
- Econnect (2001). *Assessment of Islanded Operation of Distribution Networks and Measures for Protection*[online]. [Siteerattu 16.6.2009] Saatavana World Wide Webistä <URL: <http://www.berr.gov.uk/files/file15099.pdf>>.
- Elkraft System & Eltra (2004). *Wind turbines connected to grids with voltages below 100 kV*, English version of Technical Regulations TF 3.2.6. 41 s.
- Finney, Dale, Bogdan Kasztenny & Mark Adamiak (2003). *Generator Protection Needs in a DG Environment* [online]. GE Power Management [siteerattu 16.6.2009] Saatavana World Wide Webistä <URL: <http://pm.geindustrial.com/faq/documents/g60/ger-4003.pdf>>.
- Freitas, Walmir, Wilsun Xu, Carolina A. Affonso & Zhenya Huang (2005). Comparative Analysis Between ROCOF and Vector Surge Relays for Distributed Generation Applications. *IEEE Transactions on Power Delivery* 20:2, 1315–1324. ISSN 0885-8977.
- General Electric (2009). Internet sivut [online] [siteerattu 8.7.2009]. Saatavana World Wide Webistä <URL: <http://www.gedigitalenergy.com/smartGeneration.htm>>.
- Goodman, Frank R. (2008). Distributed Energy Resources and the IEC 61850 Standards. *PAC World Summer 2008 Issue/Volume 5*, 54–59.

- Griffel, D., V. Leitloff, Y. Harmand & J. Bergeal (1997). A New Deal for Safety and Quality on MV Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery* 12:4, 1428 – 1433. ISSN 0885-8977.
- Hakala-Ranta, Antti, Olli Rintamäki & Janne Starck (2009). Utilizing Possibilities of IEC 61850 and GOOSE. *20th International Conference on Electricity Distribution*. Prague, Czech Republic 8–11 June 2009.
- Helen (2009). *Ohjeet sähköä tuottavan laitteiston liittämiseksi Helen Sähköverkko Oy:n sähkönjakeluverkkoon*. Helsingin Energia. 14 s.
- Horgan, S., J. Lannucci, C. Whitaker, L. Cibulka & W. Erdman (2002). *Assessment of the Nevada Test Site as a Site for Distributed Resource Testing and Project Plan* [online]. [siteerattu 12.6.2009] 75 s. Saatavana World Wide Webistä <URL: <http://www.nrel.gov/docs/fy02osti/31931.pdf>>.
- IEC (2009). Internet sivut [online] [siteerattu 29.6.2009]. Saatavana World Wide Webistä <URL: <http://www.iec.ch>>.
- IEEE 1547 (2003). *IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 16 s. ISBN 0-7381-3720-0.
- IEEE 1623 (2005). *IEEE Guide for the Functional Specification on Medium Voltage (1 kV–35 kV) Electronic Shunt Devices for Dynamic Voltage Compensation*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 25 s. ISBN 0-7381-4671-4.
- Jenkins, Nick, Ron Allan, Peter Crossley, David Kirschen & Goran Strbac (2000). *Embedded Generation*. 1. painos. London: The Institution of Electrical Engineers. 273 s. ISBN 0-85296-774-8.

- Karlsson, Jan & Greger Käll (2004). Wärtsilä 20 Powerskid for the 1–3 MW HFO market. *Wärtsilä Energy News* Issue 20, 6–9. ISSN: 1456-3274.
- Karri, Tuomas (2009). *Valokaarisuojausmenetelmien vertailu*. Vaasan yliopisto. Diplomityö. 101 s.
- Kauhaniemi, Kimmo, Ilari Ristolainen, Pekka Saari, Henry Lågland, Heikki J. Salmi-
nen, Martti Hokkanen & Bertil Brännbacka (2005). *Simulointiympäristö Loppura-
portti*. 129 s.
- Kumpulainen, Lauri & Ilari Ristolainen (2006). *Sähkönjakeluverkon ja siihen liitetyn
hajautetun tuotannon sähköteknisen suojauksen kehittäminen*. Projektiraportti. 144
s.
- Lakervi, Erkki (1996). *Sähkönjakeluverkkojen Suunnittelu*. Helsinki: Otatieto Oy. 110
s. ISBN 951-672-220-2.
- Lehesvuo, Veikko (2004). *Releen jälleenkytkentätoimintojen kehittäminen sähkön ja-
kelu- ja siirtoverkkoja varten*. Teknillinen korkeakoulu. Diplomityö. 126 s.
- Lågland, Henry (2004). *Keskijänniteverkkojen analyysi mallintamista varten*. Vaasan
yliopisto. Diplomityö. 111 s.
- Motherwell (2009). Internet-sivut [online] [siteerattu 10.9.2009]. Saatavana Worls
Wide Webistä <URL: [http://www.motherwell.net.au/pd/212/lmr-122d-loss-of-
mains-relay](http://www.motherwell.net.au/pd/212/lmr-122d-loss-of-mains-relay)>.
- Mozina, J. Charles (2008). The Impacts of Distributed Generation. *PAC World Sum-
mer 2008 Issue/Volume 5*, 18–25.

Mäki, Kari (2007). *Novel Methods for Assessing the Protection Impacts of Distributed Generation in Distribution Network Planning*. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Väitöskirja. 69 s. ISBN 978-952-15-1884-3.

Mörsky, Jorma (1992). *Relesuojaustekniikka*. 2. painos. Helsinki: Otatieto. 459 s. ISBN 951-672-175-3.

NECA/MACSCB 600–2003 (2003). *Recommended Practice for Installing and Maintaining Medium-Voltage Cable (ANSI)*. Bethesda: National Electrical Contractors Association. 40 s.

O’kane, P. & B. Fox (1997). Loss of Mains Detection for Embedded Generation by System Impedance Monitoring. *Sixth International Conference on Developments in Power System Protection*, Nottingham, England March 25–27 1997.

O’Malley, Mark (2009). Case Ireland: Wind Power Experience and Research. *Wind Power Integration Seminar*, Helsinki 28–29.4.2009.

Office of Energy Regulation (2007). *Network Code*. 56 s.

Pat. FI 120122 B (2009). *Menetelmä ja järjestelmä saarekekäytön estosuojaukseen*. Vamp Oy, Vaasa, Suomi. (Kumpulainen, Lauri, Kimmo Kauhaniemi, Ilari Ristolainen & Pekka Saari). 13 s.

Repo, Sami, Hannu Laaksonen, Kari Mäki, Antti Mäkinen & Pertti Järventausta (2005). *Hajautetun sähköntuotannon vaikutukset keskijänniteverkossa*. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. 170 s. ISBN 952-15-1382-9.

Rintamäki, Olli & Kimmo Kauhaniemi (2009). Applying Modern Communication Technology to Loss-of-Mains Protection. *20th International Conference on Electricity Distribution*. Prague, Czech Republic 8–11 June 2009.

- Ropp, M.E., M. Begovic & A. Rohatgi (1999). Analysis and Performance Assessment of the Active Frequency Drift Method of Islanding Prevention. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 14:3, 810–819. ISSN 0885-8969.
- Schweitzer Engineering Laboratories (2009). Internet sivut [online] [siteerattu 8.7.2009]. Saatavana World Wide Webistä <URL: <http://www.selinc.com/SEL-547>>.
- SENER (2001). *Pienvoimaloiden liittäminen jakeluverkkoon*. Helsinki: Sähköenergialiitto ry. 25 s. ISSN 1239-8047.
- Siemens (2008). Internet sivut [online] [siteerattu 9.7.2009]. Saatavana World Wide Webistä <URL: <http://www.siemens.com>>.
- Stråth, Niklas (2005). *Islanding Detection in Power Systems*. Lund: Lund University. Lisensiaattitutkimus. 113 s. ISBN 91-88934-42-X.
- Suurmond, Stefan (2009). *Electricity network regulation in a changing energy sector – The help of economics* [online] [siteerattu 8.7.2009]. Saatavana World Wide Webistä <URL: <http://www.slideshare.net/ssuurmond/electricity-network-regulation-in-a-changing-energy-sector-the-help-of-economics>>.
- Viewan, Ferry A., Daniel Karlsson, Ambra Sannino & Jaap Daalder (2006). Protection Scheme for Meshed Distribution Systems with High Penetration of Distributed Generation. *Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication and Distributed Resources*. s 99–104. Clemson, SC 14–17 March 2006.
- Ye, Zhihong, Amol Kowalkar, Yu Zhang, Pengwei Du & Reigh Walling (2004). Evaluation of Anti-Islanding Schemes Based on Nondetection Zone Concept. *IEEE Transactions on Power Electronics* 19:5, 1171–1176. ISSN 0885-8993.