Tampereen yliopisto

Samuel Saariaho

HAJAUTETUN SÄHKÖNTUOTANNON VAIKUTUKSET VERKON KÄYTTÖVAR-MUUTEEN

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaattitutkielma
Elokuu 2021

TIIVISTELMÄ

SAMUEL SAARIAHO: Hajautetun sähköntuotannon vaikutukset verkon käyttövarmuuteen
Tampereen teknillinen yliopisto
Kandidaatintyö, 22 sivua
Joulukuu 2020
Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma
Pääaine: Sähkövoimatekniikka
Tarkastaja: professori Sami Repo

Sähkönjakelu on jo vuosisadan ajan toteutettu säteittäisellä verkolla, jossa sähkö siirtyy siirtoverkon isoilta tuotantolaitoksilta alenevan jännitteen suuntaan asiakkaille. Viime aikoina hajautettu sähköntuotanto on nopeasti kasvattanut asemaansa perinteisen keskitetyn tuotannon rinnalla, mikä on seurausta mm. sähkömarkkinoiden vapautumisesta sekä ympäristösyistä. Jakeluverkkoon kytkeytyvä tuotanto monimutkaistaa sähköverkkoa, mikä vaikuttaa verkon käyttövarmuuteen. Tilanne on pakottanut jakeluverkonhaltijat toimimaan, jotta hajautetun tuotannon vaikutukset vaarantamisen sijaan parantaisivat verkon käyttövarmuutta. Tapoja, miten jakeluverkonhaltijat pyrkivät varmistamaan verkon käyttövarmuuden hajautettujen tuotantolaitosten määrän kasvaessa, ovat esimerkiksi: Tiukat tekniset vaatimukset verkkoon liittyville tuotantolaitoksille (kattaen synkronoinnin, ohjauksen ja suojauksen) sekä osallistuminen verkon tukemiseen häiriöiden aikana

Työn tuloksena saatiin, että hajautetun tuotanto lähtökohtaisesti heikentää käyttövarmuutta. Hajautettu tuotanto kuitenkin edesauttaa siirtymistä käyttövarmuuden kannalta parempiin ratkaisuihin, kuten silmukoituihin verkkoihin. Teknologian kehittyminen yhdessä hajautetun tuotannon lisääntyvän kapasiteetin kanssa varmistavat, että hajautetun tuotannon vaikutukset käyttövarmuuteen tulevat olemaan yhä keskeisemmässä roolissa lähitulevaisuudessa.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 3
2. HAJAUTETTU SÄHKÖNTUOTANTO 4
2.1 Käyttövarmuus 4
2.2 Nykytilanne 5
2.3 Tuotantotavat 7
3. HAJAUTETTUJEN TUOTANTOLAITOKSIEN LIITTÄMINEN VERKKOON . 9
3.1 Tavoitteet 9
3.2 Kytkeminen verkkoon 9
3.3 Suojaus 10
4. HAJAUTETUN TUOTANNON VAIKUTUKSET KÄYTTÖVARMUUTEEN .. 13
4.1 Verkon jäykkyys 13
4.2 Fault Ride Through 13
4.3 Jännitekuopat 14
5. SOVELLUKSET 16
5.1 Saarekekäyttö 16
5.2 Kytkeytyminen kylmään verkkoon 17
6. YHTEENVETO 18
LÄHTEET 19

1. JOHDANTO

Hajautetun sähköntuotannon vaikutukset verkossa ovat tulleet yhä keskeisemmiksi viime aikoina, johtuen hajautetun tuotannon määrän nopeasta kasvusta. Hajautetun tuotannon lisääntyminen monimutkaistaa perinteistä säteittäiseksi suunniteltua verkkoa, mikä pakottaa verkonhaltijat tekemään muutoksia nykyiseen verkkoon.

Työ on kirjallisuusselvitys, jonka tarkoituksena on käydä läpi hajautetun sähköntuotannon vaikutuksia verkon käyttövarmuuteen, joka on ihmisten riippuvuudesta sähköön johtuen noussut sähkönjakelun keskeisimpiin laatutekijöihin. Työssä käyttövarmuutta tarkastellaan verkon suoriutumisena sähkönjakelussa niin verkon normaalissa toiminnassa kuin vikojen aikana. Tarkoitus on vastata kysymyksiin: miten hajautettu sähköntuotanto vaikuttaa jakeluverkon käyttövarmuuteen ja miksi.

Aluksi määritellään, mitä hajautettu sähköntuotanto on. Miksi ja miten se on viimevuosina kasvattanut osuuttaan keskitetyn sähköntuotannon rinnalla, mihin yhteiskuntien sähköistäminen on perustunut jo vuosisadan ajan. Lisäksi käyttövarmuuden käsite määritellään raportin tarkoitusperän täsmentämiseksi.

Luvussa kolme käydään läpi, minkälaisia asioita tulee ottaa huomioon, kun hajautettuja tuotantolaitoksia liitetään verkkoon. Luvussa kerrotaan, mitä verkkoon liittymisvaatimuksia jakeluverkonhaltijalla on hajautetuille tuotantolaitoksille, ja mitkä ovat syyt näiden vaatimuksien takana. Lisäksi käsitellään verkon suojaukseen liittyviä asioita.

Luvussa neljä perehdytään hajautettujen tuotantolaitoksien vaikutuksiin verkon käyttövarmuuteen. Kuinka hajautettu tuotanto vaikuttaa verkon ominaisuuksiin sekä normaali että yleisimmissä vikatilanteissa.

Viimeisessä kappaleessa viisi käydään läpi hajautetun tuotannon sovelluksia, jolla voidaan parantaa verkon käyttövarmuutta. Esitetyt sovellukset keskittyvät verkon palauttamiseen normaalitoimintaan vikatilanteista.

2. HAJAUTETTU SÄHKÖNTUOTANTO

Hajautettu sähköntuotanto tarkoittaa suhteellisesti pienen voimalaitoksen tuotantoa, joka sijaitsee tyypillisesti lähellä kulutusta. [1] Siirtoverkon sijaan se on kytketty jakelu- tai pienjänniteverkkoon. Tuotanto on tarkoitettu käytettäväksi kaupallisesti jakeluverkon kanssa rinnan tai syöttönä omille kuormille. [2] Keskitettyyn sähköntuotantoon verrattuna hajautetulla tuotannolla saavutettuja etuja ovat mm. paikallisten energialähteiden hyödyntäminen, käyttökatkojen väheneminen sekä verkon pienenevä saneeraustarve. Tavoitteiden saavuttaminen edellyttää, että hajautetun tuotannon liittäminen verkkoon on sekä suunniteltu että toteutettu tarkasti.

Huomioitavaa on, että käsitteenä hajautettua sähköntuotantoa on vaikeaa määritellä yksiselitteisesti. Käsitteen määritteleminen on vaikeaa, koska hajautetulla sähköntuotannolla on hyvin paljon ominaispiirteitä, jotka vaihtelevat käytetyn tuotantotavan mukaan. [3] Hajautetulle sähköntuotannolle löytyy esimerkiksi määritelmiä, jossa on määritelty tuotantolaitosten teholle tarkkoja raja-arvoja. Hajautettujen sähköntuotantolaitosten teho kuitenkin vaihtelee suuresti käytetyn tuotantoteknologian mukaan. Myös saman tuotantotavan sisällä tuotantolaitosten teho vaihtelee suuresti. Esimerkiksi on jakeluverkkoon kytkeytyviä pieniä tuulivoimaloita ja sitten tuulipuistoja, jotka ovat teholtaan niin suuria, että ne kytketään siirtoverkkoon [4]. Tästä eteenpäin hajautetusta sähköntuotannosta puhutaan hajautettuna tuotantona raportin mielekkyyden lisäämiseksi.

2.1 Käyttövarmuus

Sanaa käyttövarmuus voidaan tulkita suomen kielessä erittäin laajasti. Sanan englanninkielinen vastike (reliability) koostuu useammasta käsitteestä (security, adequacy). [5] Reliability kuvaa verkon käyttövarmuutta pitkällä aikavälillä. Käsite mittaa järjestelmän elementtien toimintakykyä sekä tehonsiirron onnistumista määrällisesti ja standardien mukaisesti. Mittarina käytetään aikakeskiarvoja, jotka on laskettu verkolle erilaisissa kuormitus- ja vikatilanteissa.

Security keskittyy tarkemmin edellä mainittuihin elementteihin, jotka kattavat tehonsiirtoon sekä suojaukseen käytetyt komponentit. [5] Käsite mittaa, kuinka verkko kestää häiriöitä, kuten oikosulkuja tai yllättäen verkosta irtoavia komponentteja.

Adequacy kuvaa järjestelmän kykyä toimittaa kulutuksen mukaisesti tehoa tuotantolaitoksilta kuluttajille. Adequacy ottaa huomioon sekä suunnitellut että tahattomat keskeytykset. Tehotasapainossa tapahtuu jatkuvasti muutoksia verkon toimiessa normaalisti,

mutta tehotasapaino häiriintyy myös esimerkiksi verkosta tahattomasti irtautuvien tuotantolaitosten takia. Englannin kielessä joskus käytetään myös sanaa dependability, jonka tarkoitus on yleisesti kuvata käyttövarmuutta ja sen edellä mainittuja alakäsitteitä.

Työn pääpainona on tarkastella käyttövarmuutta verkon komponenttien kykynä reagoida hetkellisiin muutostilanteisiin sekä toimitusvarmuuteen jakeluverkkotasolla. Verkon tila muuttuu, kun esimerkiksi verkkoon liitetään uusi hajautettu tuotantolaitos. Nyt käyttövarmuutta voidaan tarkastella tilariippuvana, jolloin verkon tilan muutosten vaikutuksia ei tarvitse tarkastella aikakeskiarvojen ja todennäköisyyksien avulla. [5] Käyttövarmuuden tarkastelu tehdään sovittujen säädösten alaisena, mikä mahdollistaa vertailukelpoisuuden. Käyttövarmuuden tilariippuvainen tarkastelu auttaa hahmottamaan verkon käyttövarmuudentason myös pitkällä aikavälillä.

2.2 Nykytilanne

2000-luvun vaihteessa sähköenergiamarkkinat vapautuivat, ilmastonmuutoksen takia regulaatiota tiukennettiin päästöjen suhteen ja uusiutuvien sähköenergiateknologioiden parissa tapahtui huomattavaa kehitystä. [6] Nämä tekijät yhdessä loivat hajautetuista tuotantolaitoksista taloudellisesti ja teknisesti järkeviä ratkaisuja. Tämän seurauksena hajautettu tuotanto on nopeasti kasvattanut osuuttaan kokonaisenergiantuotannosta. Kasvu on ollut nopeaa erityisesti viime vuosina ja sen oletetaan jatkuvan tulevaisuudessakin.

Ennen sähkömarkkinoiden vapautumista koko maan sähköntuotannosta vastasi suhteellisen pieni määrä tuotantolaitoksia. Sähkömarkkinoiden vapautuminen helpotti huomattavasti uusien tuottajien liittymistä osaksi sähköverkkoa. Tämän lisäksi hajautettuun tuotantoon investoimiseen löytyi motiiveja sekä kuluttajien että voimalaitosten rakentajien näkökulmasta [5]. Näitä motiiveja on listattu taulukossa 1. Uusien tuottajien myötä markkinoilla lisääntynyt kilpailu ajoi tuottajat käyttämään kustannustehokkaita ratkaisuja sähköntuottamiseksi. [6] Verkonhaltijoiden asettamat vaatimukset tuotantolaitoksille varmistavat, että kustannusten minimointi ei voi tapahtua käyttövarmuuden ja laadun kustannuksella.

Taulukko 1. *Verkon asiakkaiden ja voimalaitosten omistajien motiiveja investoida hajautettuun tuotantoon. [4]*

kuluttajan näkökulmasta	Voimalaitoksen omistajan näkökulmasta
- Ympäristöystävällinen vaihtoehto	- Lyhyt rakentamisaika

- Taloudelliset syyt (verokevennys, optio myydä sähköä verkkoyhtiölle, valtion tuet, siirtomaksun välttäminen…)	- Valtion myöntämät verokevennykset
- Lyhentyneet käyttökatkot	- Helppo laajentaa
	- Valtion maksama tuki tuotetusta energiasta ja/tai investoinnista tuotantolaitokseen

Hajautetun tuotannon avulla tavoitellaan siis taloudellisia hyötyjä sekä ympäristöystävällisempiä ratkaisuja sähköntuottamiseksi. Nykypäivänä vallitseva ihmisten riippuvuus sähköstä tuo kolmannen näkökohdan edellä mainittujen lisäksi, joka on käyttövarmuus. [6] Pohjoismaissa siirtoverkot suunnittelemaan ns. n-1-periaatella, joka tarkoittaa sitä, että verkon pitäisi pystyä jatkamaan toimintaansa (yhdestä) verkkoviasta huolimatta. Toiminnan jatkaminen tarkoittaa sitä, että siirtoverkon vika ei näy jakeluverkkoon ja siitä eteenpäin katkona. Tilanne voi kuitenkin muuttua, jos siirtoverkko on hyvin ylikuormittunut. Ylikuormittuneen siirtoverkon vika voi pahimmillaan johtaa laajoihin häiriöihin sähkönjakelussa.

Jakeluverkko tasolla n-1-periaatetta ei käytännössä vielä saavuteta, mutta sitä kohti voidaan pyrkiä, ainakin paikoittain. Esimerkiksi kaupungissa silmukoidut verkkorakenteet releohjauksella toteutettuna mahdollistaisivat varasyöttölähteeseen vaihtamisen pääsyötön vikaantuessa. Lisäksi asentamalla oikea määrä, ja/tai kontrolloimalla oikein hajautettua tuotantoa, pystyttäisiin parantamaan verkon käyttövarmuutta. Käyttövarmuus paranisi, koska lisätty tuotanto mahdollistaisi edellä mainitut varasyöttötoteutukset. Lisäksi hajautettu tuotanto kattaa osan kulutuksesta, jolloin johdoilla siirrettävän tehontarve pienenee. [7] Huonosti toteutettuna seurauksena voi olla esimerkiksi jälleenkytkentöjen häiriöt. [4] Pikajälleenkytkennän jälkeen verkko ei ole täysin jännitteetön hajautetun tuotantolaitoksen takia, minkä seurauksena vian valokaari ei sammu. Aikajälleenkytkentä puolestaan saattaa johtaa saarekekäyttöön, jossa tehotasapaino epätodennäköisesti toteutuu.

Nykypäivänä verkon käyttövarmuutta on pyritty parantamaan verkon kehittämistoimenpiteillä. [4] Aluksi lähinnä kaupunkien verkot oli kaapeloitu ja haja-asutusalueilla löytyi mahdollisesti PAS-johtoa, mutta nykypäivänä jakeluverkkoyhtiöt aktiivisesti kaapeloivat

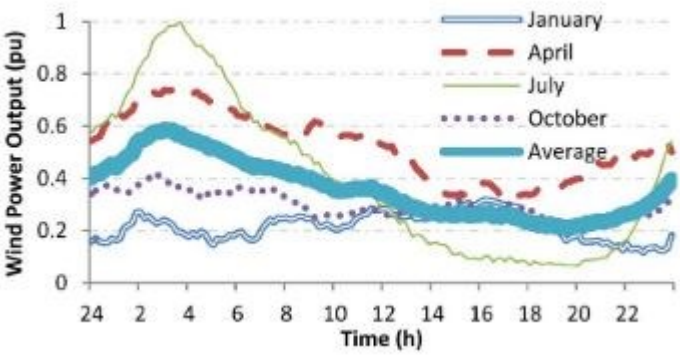
jo haja-asutus alueiltakin. Kaapeliverkko on käyttövarmuuden näkökulmasta paras vaihtoehto, koska sillä saavutetaan ns. säävarma verkko. Arvion mukaan kaapelilla on parhaillaan n. 50 % pienempi vikataajuus kuin avojohdolla. [4] Huomioitavaa on kuitenkin, että kaapeliverkossa vikojen korjaaminen on hitaampaa kuin avojohtojen. Kaapeloituun verkkoon siirtymisen taustalla on vuonna 2013 voimaan astunut sähkömarkkinalaki, joka säätelee taajama-alueiden keskeytyksien maksimi pituudeksi 6 tuntia ja haja-asutus alueille vastaavasti 36 tuntia.

Tulevaisuudessa hajautetun tuotannon liittäminen verkkoon tulee olla yhtä rutiininomaista kuin tänä päivänä kulutuksen liittäminen, minkä seurauksena suojauksen toteuttamisvastuukin tulee jakaa tasaisemmin osapuolien välille. [4] Luonnollisesti sähkönkuluttajan rooli puhtaasta kuluttajasta muuttuu osittaiseksi tuottajaksi, milloin vastuu kasvaa myös. [8] Molemmat osapuolet tekevät nyt yhteistyötä joustavan, käyttövarman ja kustannustehokkaan verkkotoiminnan takaamiseksi. Näiden pientuottajien tuotantolaitokset luovat lisämotiivia paikoittain silmukoituun verkkorakenteeseen siirtymiselle, koska lisääntyneet syöttösuunnat todennäköisesti aiheuttavat joka tapauksessa säteittäiseen verkkoon toimenpiteitä. [4] Tämä vaikuttaa merkittävästi verkon käyttöön ja suunnitteluun, mutta lopputuloksena on käyttövarmuuden kannalta parempi verkko.

2.3 Tuotantotavat

Hajautettu sähköntuotanto voidaan jakaa työn kannalta merkityksellisesti kahteen kategoriaan niiden primäärienergialähteen ohjattavuuden mukaan: ohjattaviin ja ei-ohjattaviin tuotantotapoihin. Kategorioihin jakaminen on perusteltua, koska käyttökohteet ja -tavat näiden välillä ovat tyypillisesti erilaisia. [9] Ei-ohjattaviin perustuvat generaattorit, kuten aurinko- ja tuulivoimalat, toimivat tyypillisesti rinnan verkon kanssa kattaen osan energiantarpeesta. On kuitenkin myös valtavia aurinkovoimaloita ja tuulipuistoja, jotka syöttävät energiansa kantaverkkoon. Ohjattaviin energianlähteisiin perustuvat, kuten dieselgeneraattorit ja polttokennot, toimivat puolestaan enemmän poikkeustilanteissa, kuten varaenergianlähteenä verkon vikatilanteissa.

Käyttövarmuuden näkökulmasta merkittävää on siis kyky pystyä ohjaamaan hajautetun tuotantolaitoksen tuotantoa. Tuuli- ja aurinkovoimaloiden tuottama energia vaihtelee voimakkaasti sääolosuhteiden mukaan, johon ihminen ei pysty vaikuttamaan. [10] Tuotannon heilahtelua ajan suhteen pyritään havainnollistamaan kuvassa 1.



Kuva 1: Tuulivoimalan tuottaman tehon vaihtelu ajan suhteen. [10]

Kuvasta 1 nähdään tuulivoimalan ulostulon voimakas vaihtelu ajan suhteen, sekä päivä että vuodenaika tasolla. Tilanne on ongelmallinen, koska arvaamattomasti ajan suhteen heilahteleva tuotanto vaikeuttaa tehotasapainon toteuttamista. [11] On kuitenkin uusiutuvia tuotantotapoja, jota voidaan ohjata säätämällä niiden primäärienergian lähdettä (esimerkiksi veden virtausta vesivoimalassa). Lisäksi tuotannon heilahteluun pystytään vaikuttamaan tehoelektroniikalla ja/tai akkuvarastoilla toteutetun ohjauksen avulla. [12] Menettelyllä tehontuotannosta saadaan ohjattavaa.

Ohjattaviin energianlähteisiin perustuvat hajautetut tuotantolaitoksia voidaan käyttää tarvittaessa verkon rinnalla tai saarekkeena, joka luo joustavuutta sähkönjakelun toteutukseen. Niiden tuottamaa tehoa on helppo ohjata, koska tuotettu teho ei ole riippuvainen vallitsevista oloista. [11] Riippumattomuus tarkoittaa sitä, että tuotantolaitoksen kapasiteetti ja sen säätömahdollisuudet eivät muutu ajan myötä. Ohjattaviin energianlähteisiin perustuvien tuotantolaitosten ohjaamiseen ei täten välttämättä tarvita muuta, kuin kyky erottaa ne verkosta kokonaan tai saarekkeeksi, ulkoisen verkon vikaantuessa.

3. HAJAUTETTUJEN TUOTANTOLAITOKSIEN LIITTÄMINEN VERKKOON

3.1 Tavoitteet

Hajautetun tuotantolaitoksen tuottama energia voidaan käyttää paikallisesti omien kuormien syöttönä tai siirtää ulkoiseen verkkoon. Jos hajautettu tuotantolaitos toimii osana ulkoista verkkoa, niin sen toteutuksen täytyy olla sellainen, että tuotantolaitos ei osaltaan vaaranna verkon käyttövarmuutta. Vaatimukset on listattu verkonliityntävaatimuksiin (Grid code), jotka vaihtelevat maakohtaisesti. [11] Liityntävaatimuksissa on listattu ehdot verkon normaalitilanteeseen sekä dynaamiseen tilaan verkkovikojen aikana. Voimalaitoksen tulee kestää järjestelmän taajuusvaihtelut, se ei saa aiheuttaa häiriöitä järjestelmään ja tarjota tarvittavat tiedot voimalaitoksesta ja sen käytöstä verkonhaltijalle.

Verkonhaltija vaatii yleisesti mahdollisuuden loistehon ohjaukseen, mutta joskus myös pätötehon. [2] Tulevaisuudessa ohjauksella voidaan saavuttaa esimerkiksi kyky tasoittaa epäsymmetrisiä kuormia. [10] Tämä tapahtuu ohjaamalla generaattori tuottamaan epäsymmetrisiä virtoja, joiden avulla epäsymmetriset kuormitusvirrat saadaan tasoitettua symmetrisiksi. Tämä on oleellista, koska epäsymmetristen kuormien aiheuttamat virrat voivat joskus kasvaa hyvin suuriksi, josta voi seurata mm. komponenttien vaurioitumisia. Ongelma korostuu verkoissa, joiden sähkönjakelu on toteutettu yksivaiheisena. Epäsymmetristen virtojen tasoittaminen edellyttää, että ohjauskomponentti kykenee ohjaamaan jokaista vaihetta erikseen.

Tämän lisäksi ohjauskomponenteilta edellytetyt ominaisuudet vaihtelevat generaattorin käyttötarkoituksen mukaan. [13] Verkkoon kytketyiltä generaattoreilta vaaditaan erilaisia toimintoja ja sovelluksia synkronointiin ja suojaukseen liittyen, kuin esimerkiksi generaattorilta, joka on suunniteltu saarekekäyttöön vikatilanteissa.

3.2 Kytkeminen verkkoon

Ennen kuin uusi generaattori voidaan kytkeä verkkoon tai toimimaan toisen generaattorin rinnalle, täytyy varmistua, että jännitetaso ja taajuus osapuolien välillä ovat mahdollisimman lähellä toisiaan. [14] Käytännössä tämä voidaan toteuttaa kahdella tapaa. Pyörivien koneiden tapauksessa synkronointikomponentti sen sijaan kontrolloi suoraan generaattorin pyörimisnopeutta, asettaakseen jännitteen ja sen taajuuden halutulle tasolle. [14]

Toinen vaihtoehto on PLL (phase-locked loop), jossa generaattorin jännitettä ja taajuutta seurataan synkronointireleellä. Synkronointireleelle on asetettu synkronointikriteerit, jonka täyttymistä rele seuraa. Kriteerien täyttyessä rele sulkee kytkimen, jolloin generaattori kytkeytyy rinnan verkon (tai toisen generaattorin) kanssa. Invertteri generaattorit synkronoidaan yleisesti PLL-menetelmällä.

Kytkeytymisen tapahtuessa hetkenä, jolloin osapuolet eivät ole synkronoituneet keskenään, muodostuu piiriin haitallinen oikosulkuvirtakomponentti. Roottorillisen generaattorin tapauksessa virheellinen kytkeytyminen saa generaattorin akselin oskilloimaan, mikä johtaa tyypillisesti generaattorin ja muiden sähkökomponenttien vaurioitumiseen. [14]

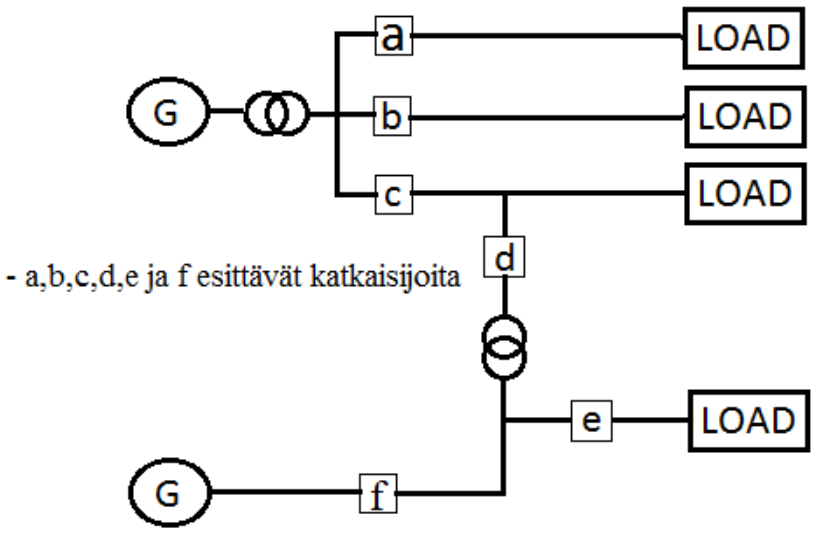
Kun hajautettua tuotantolaitosta kytketään jakeluverkkoon, on tuotantolaitoksen tahtikäynnin lisäksi tärkeä miettiä toimintasuunnitelma vikatilanteita varten. [15] Vian esiintyessä tuotantolaitos voidaan joko eristää saarekkeeksi, tai irrottaa verkosta pääsyötön kanssa. Jälkimmäisessä ratkaisussa, lähdön releen havaitessa vian, pääsyötön katkaisija laukeaa (Loss-of-Mains -suoja). Tällöin hajautetun tuotantolaitoksen suojauksen täytyy havaita pääsyötön vika ja irtautua verkosta. On tärkeää huomata, että hajautettujen tuotantolaitoksen suojaustoteutuksia on erilaisia. Saarekekäytössä hajautetun tuotantolaitoksen halutaan toimivan takasyöttönä verkkoon pääsyötön vikaantuessa. Tähän palataan tarkemmin kappaleessa 5.2

3.3 Suojaus

Kun verkon rinnalle kytketään uusi generaattori, täytyy varmistua, että verkon suojaus ei häiriinny. [3] Tämä edellyttää sitä, että uuden generaattorin yhteydessä asennetaan suojausmenetelmä sekä generaattorin että verkon suojaamiseksi. Verkon suojaus on yleensä suunniteltu ajatellen, että vikavirralla on ainoastaan yksi lähde. [5] Hajautetut tuotantolaitokset kuitenkin aiheuttavat verkon häiriössä oman vikavirtakomponenttinsa. Tämä voi sekoittaa verkon suojauksen, minkä takia verkon suojauksen toteutuminen täytyy tarkistaa, kun uusi tuotantolaitos liitetään verkkoon. Tuotantolaitoksen täytyy pystyä havaitsemaan, mikäli verkon jännite ja/tai taajuus poikkeavat sallitulta vaihteluväliltä, milloin suojauksen tulee kytkeä tuotantolaitos irti verkosta. [15]

Ongelma voi olla esimerkiksi kuvan 2 kaltaisessa verkossa tapahtuva tilanne, jossa syöttöä suojaava katkaisija c laukeaa vaiheella aiheutuneen vian seurauksena, mutta verkon rinnalla oleva generaattori ei havaitse vikaa. Generaattori jatkaa toimintaansa normaalisti,

eikä irtoa verkosta niin kuin pitäisi. Tämän seurauksena generaattori alkaa toimia ns. takasyöttönä verkkoon, mistä ei ole haittaa generaattorin ollessa pieni, mutta tarpeeksi suuri generaattori pystyy ylläpitämään lähdön jännitteisenä. [15] Pikajälleenkytkentä ei siis onnistu poistamaan verkon vikaa. Tilanne rasittaa vikavirtaa syöttäviä tuotantolaitoksia. Lisäksi tilanne voi aiheuttaa vahinkoja asiakkaiden laitteille, sekä mahdollisia vaaratilanteita vian korjaukseen liittyvissä kytkentätilanteissa sekä huoltotoimenpiteissä.



Kuva 1. *Kuva esittää jakeluverkkoa, jonka rinnalle on kytketty toimimaan generaattori. [9]*

Esimerkki mahdollisesta ratkaisusta takasyötön välttämiseksi on suora keskinäiskatkaisu (direct transfer trip, DTT), jolloin syötön katkaisijan c lauetessa aukeaa myös generaattorin katkaisija (d tai f), erottaen generaattorin verkosta. Syötön c rele voidaan myös valita siten, että se lähettää block-käskyn generaattorin katkaisijalle. Menettelyllä vältytään generaattorin tarpeettomalta irtautumiselta. [15] Tällainen irtautuminen voi olla seurausta esimerkiksi pikajälleenkytkennöistä tai viereisellä lähdöllä tapahtuvista vioista. Turha erottautuminen saattaa myös johtaa siihen, että generaattori täytyy synkronoida uudelleen verkon kanssa, mikä aiheuttaa ylimääräistä vaivaa. Block ja trip releillä saadaan toteutettua verkolle nopeammin reagoiva suojaus.

Hajautettu tuotantolaitos voi myös vaarantaa jakeluverkon muuntajan alajännitepuolta suojaavan releen toiminnan. Verkkovian syntyessä lähdön loppupäähän, syötön rinnalla toimiva hajautettu tuotantolaitos tuottaa osan vikavirrasta, jonka seurauksena syötön alussa olevan releen läpi kulkeva vikavirta pienenee. [16] Pienempi vikavirta ei välttä-

mättä enää riitä suojauksen laukeamiseen. Ilmiötä kutsutaan vapaasti suomennettuna suojauksen sokeutumiseksi (protection blinding) ja se on toinen yleinen hajautetun tuotannon aiheuttama ongelma jakeluverkon suojaukselle. Ongelman voi korjata säätämällä releen laukeamisarvot herkemmäksi. [16] Toimenpide vaatii kuitenkin äärimmäistä tarkkuutta, koska suojaus ei saa kuitenkaan laueta verkon normaalitoiminnan aikaisesta virtapiikistä. Virtapiikkejä voi syntyä esimerkiksi verkon ollessa erityisen kuormittunut sekä pyörivien koneiden käynnistysvirroista.

4. HAJAUTETUN TUOTANNON VAIKUTUKSET KÄYTTÖVARMUUTEEN

Kappaleessa kolme käytiin läpi hajautetuissa tuotantolaitoksissa käytettyjä teknisiä ratkaisuja mm. ohjaukseen ja suojaukseen liittyen. Käytettyjen ratkaisujen takana olivat sähköverkonhaltijan asettamat verkkoon liityntävaatimukset. Verkonhaltijan vaatimukset eivät kuitenkaan rajoitu ainoastaan tuotantolaitosten liittämiseen verkkoon, vaan myös käyttöön liittyen on vaatimuksia. [11]

Hajautetun tuotannon kasvanut kapasiteetti on muuttunut tilannetta sähkömarkkinoilla, mikä on pakottanut verkonhaltijat reagoimaan muuttuneeseen tilanteeseen. [17] Muutos näkyy mm. verkkokytkentöjen määrällisenä kasvuna ja lisäksi hajautettu tuotanto on tullut merkittävämmäksi osaksi tehotasapainon toteutumista. Lisäksi hajautetun tuotannon vaikutukset verkon käyttövarmuuteen näkyvät erityisesti verkon vikatilanteiden aikana. Seuraavissa luvuissa käydään tarkemmin läpi edellä mainittuja asioita.

4.1 Verkon jäykkyys

Käyttövarmuuden näkökulmasta hajautetulla tuotannolla on laskeva vaikutus verkon jäykkyyteen, joka kuvaa kuinka haavoittuvainen verkko on tehotasapainon poiketessa. [17] Verkon jäykkyys määräytyy verkossa kiinni olevan suoraan kytketyn pyörivän kapasiteetin ja tuotannon tyypin mukaan. Hajautetun tuotannon määrän kasvaessa, verkon jäykkyys yleensä laskee, koska hajautettuun tuotantoon ei varaudu taajuuden muutosta vastustavaa inertiaa. Hajautettu tuotanto voi kuitenkin paikallisesti parantaa jännitejäykkyyttä. Jäykkä verkko sekä toipuu nopeammin että häiriön vaikutus alkujaankaan ei ole yhtä suuri kuin heikossa verkossa.

Hajautetun tuotannon lisääntyminen heikentää verkkoa ja tulee aiheuttamaan ongelmia erityisesti kysynnän ollessa pientä, kuten kesäaikaan. Tällöin ei ole kannattavaa ajaa suuria tuotantolaitoksia, mikä johtaa hajautetun tuotannon suhteellisen kapasiteetin kasvuun kokonaiskapasiteetista. Lopputuloksena on erityisen heikko verkko, minkä seurauksena suurhäiriöiden todennäköisyys lisääntyy huomattavasti. [17]

4.2 Fault Ride Through

On myös tärkeää tarkastella hajautettujen tuotantolaitosten vaikutusta käyttövarmuuteen verkkovikojen aikana. Verkossa tapahtuvat häiriöt, kuten jännitekuopat, saattavat johtaa tuotantolaitosten vaurioitumiseen, koska tuotantolaitokset saattavat joutua toimimaan nimellisjännitteettään pienemmillä jännitteillä, jolloin niiden toiminta on arvaamatonta. [3]

Jännitekuoppia käsitellään tarkemmin kappaleessa 4.3. Tuotantolaitokset suunnitellaan ajatellen, että ne pystyvät pysymään kiinni verkossa jännitekuoppien aikana. Menettelyllä halutaan välttyä esimerkiksi tilanteelta, jossa tuulivoimala havaitsee viereisellä lähdöllä syntyneen jännitekuopan, ja irtoaa verkosta sen seurauksena. Tuulivoimalan turhan irtoamisen seurauksena jännitekuoppa syvenee entisestään. Turha irtautuminen saattaa käynnistää ketjureaktion, jonka seurauksena useampi tuotantolaitos irtoaa turhaan verkosta. Kantaverkon viat aiheuttavat kaikista laajimmat vahingot, koska vian vaikutusalue kattaa eniten muita tuotantolaitoksia. [12]

Nyt hajautetut tuotantolaitokset eivät suoranaisesti palvele verkon asiakkaita vaan itse verkkoa. Järjestelmävaatimusten mukaan tuotantolaitokset saavat erota verkosta vasta kun jännitetaso tuotantolaitoksen kytkentäpisteessä on pitkäkestoisesti laskenut verkonhaltijan asettaman rajan alapuolelle. [12] Ennen järjestelmävaatimukset koskivat ainoastaan siirtoverkkoa, mutta nykypäivänä jo lähes kaiken tuotannon täytyy standardien mukaan osallistua verkon tukemiseen vikojen aikana. [18] Tämä on seurausta mm. hajautetun tuotannon kasvaneesta määrästä. Hajautetut tuotantolaitokset, kuten tuuli- ja aurinkovoimalat, osallistuvat syöttämällä loistehoa verkkoon vian aikana. [19] Tuotetun loistehon on tarkoitus yli kompensoida jakelujohtoja, jonka seurauksena jännitteenalenema johdoilla pienenee, mikä mahdollistaa useamman asiakkaan sähköistämisen vian aikana [5]. Lisäksi hajautetut tuotantolaitokset lisäävät verkossa kiinni olevaa kapasiteettia, jolla voidaan korvata esimerkiksi verkosta tippuneen ison tuotantolaitoksen mukana menetettyä kapasiteettia.

Jossakin maissa on myös tuotantolaitoksia, joiden odotetaan tuottavan tietty määrä tuotantoa aina verkon normaalitilanteessa (Reliability Must Run, RMR). [20] Tällaisten tuotantolaitoksien tehoille on asetettu raja, joka niiden tuotannon tulee aina ylittää. Tuotantolaitosten tuotanto ei ole kaupallista, ellei niille määrättyä RMR-rajaa alenneta jostain syystä. Tällöin kyseisen rajan ylittävä tuotanto voidaan myydä verkossa normaalisti. Menettelyn tarkoituksena on taata, että verkossa on aina ns. perustuotantoa tarpeeksi.

4.3 Jännitekuopat

Jännitekuopaksi määritellään tilanne, jossa jakelujännitteen tehollisarvo tilapäisesti alenee 10–90 %:iin nimellisjännitteestään. [19] Jännitekuoppa on hetkellinen ilmiö, joten jakelujännite palautuu kuopasta hetken kuluttua normaaliksi. Verkon jännitejäykkyys ja verkon suojauksen toiminta-aika vaikuttavat voimakkaasti järjestelmän palautumisnopeuteen. Jännitekuopat ovat seurausta poikkeuksellisen suurien virtojen aiheuttamista jännitehäviöistä järjestelmän impedansseissa. [4] Jännitekuoppia pidetään verkon vakavimpina häiriöinä heti käyttökatkojen jälkeen [22]. Seuraavaksi käydään läpi jännitekuoppien yleisimmät aiheuttajat ja mikä on hajautettujen tuotantolaitosten rooli niiden vaikutuksissa.

Jakeluverkossa tapahtuvat oikosulut ovat yleisin jännitekuoppien aiheuttaja. [21] Verkossa esiintyvät oikosulut voivat olla kaksi- tai kolmevaiheisia. Oikosulut sulkevat piirin eristysvian tai ulkoisen kosketuksen seurauksena vikaimpedanssin kautta [4]. Myös vaiheen ja maan väliset maasulut luetaan mukaan oikosulkuihin. Oikosulun seurauksena verkkoon syntyy oikosulkuvirta, jonka suuruuteen vaikuttaa vian etäisyys sähköasemasta ja syöttävän verkon jännitejäykkyys. [4] Mitä lähempänä sähköasemaa vika on, sitä suurempi oikosulkuvirta muodostuu. Huomioitavaa on, että hajautetut tuotantolaitokset vaikuttavat oikosulkuvirran suuruuteen myös. [21] Hajautettu tuotanto kasvattaa verkon oikosulkuvirtaa, mikä täytyy ottaa huomioon verkon mekaanista ja termistä kestävyyttä laskiessa. Tämän lisäksi hajautettu tuotanto vaikeuttaa tilannetta, koska uusien syöttöjen myötä oikosulkuvirran kulkusuunta ei ole enää itsestään selvä. Tilanne muodostuu ongelmalliseksi erityisesti perinteisen säteittäiskäyttöön suunnitellun verkon suojaukselle [4]. Hajautetun tuotannon tyyppi, kytkeytymiskohta ja tuotantolaitoksen yhteydessä mahdollisesti oleva muuntaja ovat esimerkiksi asioita, jotka vaikuttavat syntyvän oikosulkuvirran suuruuteen.

Jännitekuoppia voi aiheutua myös epätahtikoneiden huolimattomaton käyttö. [22] Epätahtikoneita löytyy esimerkiksi vanhoista tuulivoimaloista. Epätahtikoneet vaativat suuren magnetoimisvirran käynnistyäkseen, joka verkosta otettuna voi johtaa jännitekuoppaan. Virta käynnistyshetkellä on tyypillisesti n. 5–7-kertainen moottorin nimellisvirtaan nähden. Virtapiikkiä voidaan pienentää esim. tähti-kolmiokäynnistyksellä tai pehmokäynnistin. [23] Tällöin koneen käämit ovat tähtikytkennässä käynnistymishetkellä. Tähtikytkentä muuttuu kolmiokytkennäksi, kun kone saavuttaa nimellisen pyörimisnopeutensa. Menetelmällä saadaan käynnistysvirta laskemaan n. 30 %. Pienentyneestä käynnistysvirrasta seuraa myös pienempi käynnistysmomentti.

5. SOVELLUKSET

Tähän mennessä esille tulleet hajautetun tuotannon vaikutukset verkon käyttövarmuuteen ovat olleet lähinnä negatiivisia. Hajautetulla tuotannolla on kuitenkin myös sovelluksia, jotka parantavat käyttövarmuutta. Hajautettujen tuotantolaitosten avulla pystytään esimerkiksi toteuttamaan vaihtoehtoisia syöttöreittejä, jotka varmistavat sähkönjakelun pääsyötön katketessa. Tällainen toteutus voi olla kannattava esimerkiksi etäisen ja paljon sähköä kuluttavan tehtaan sähkönjakelua suunniteltaessa. Lisäksi hajautettujen tuotantolaitosten käynnistysominaisuudet palvelevat hyvin verkkoa suurien tuotantolaitosten uudelleen käynnistämisessä kriittisten verkkovikojen jälkeen.

5.1 Saarekekäyttö

Saarekekäyttö tarkoittaa sähköverkosta eristäytynyttä järjestelmää, joku koostuu hajautetusta tuotantolaitoksesta ja sen syöttämistä kuormista. [25] Sähköverkossa generaattori saattaa tahattomasti ajautua saarekekäyttöön verkkovian seurauksena, mikäli suojaus ei toimi oikein. Joskus irtautuminen muusta järjestelmästä saarekkeeksi on kuitenkin tarkoituksenmukaista. Tällöin tavoitteena on käyttökatkoista aiheutuneiden tappioiden minimointi. Kyky irtautua saarekkeeksi on haluttua erityisesti kohteissa, jossa sähkönsaanti on kriittistä, kuten esimerkiksi sairaalat.

Hajautetun tuotantolaitoksen soveltaminen saarekekäyttöön edellyttää suunnittelua, koska saarekekäytössäkin tuotannon ja kulutuksen tulee vastata toisiaan. Tämän on toinen syy, turvallisuuskysymysten lisäksi, miksi saarekkeeseen vahingossa ajautuminen ei yleensä toimi. [4] Suunnitelmaa tehdessä täytyy miettiä, kuinka suuri saareke tuotantolaitoksella voidaan kattaa. Saarekkeen suuruuteen vaikuttaa tarkoitukseen käytetyn tuotantolaitoksen kapasiteetti. Tuotantolaitoksella pyritään kattamaan mahdollisimman monen asiakkaan energiantarve, kuitenkaan ylikuormittamatta tuotantolaitosta. Jos saarekekäyttöön suunniteltu tuotantolaitos on hyvin suuri, saarekkeen alueella olevat asiakkaat yleensä priorisoidaan. [25] Tällöin verkkovian seurauksena irtautunut saareke sähköistää kriittisimmät asiakkaat ensimmäisenä. Verkon normaalitilanteessa käyttöön suunniteltu hajautettu tuotantolaitos kattaa osan energiantarpeesta, mutta pääosa energiasta tulee ulkoisesta verkosta. [26] Vian tapahtuessa oikosulkuvirta laukaisee katkaisijan, joka erottaa hajautetun tuotantolaitoksen ja sen syöttämät kuormat omaksi saarekkeeksi.

Eristäytyäkseen saarekkeeksi sähkökatkon aikana, täytyy tuotantolaitoksen täyttää saarekekäytön edellyttämät tekniset vaatimukset. [3] Toteutuksen täytyy olla sellainen, että saarekekäytössä toimiva tuotantolaitos ei missään tapauksessa syötä virtaa ulkoiseen verkkoon vian aikana. Kun sähkökatkon aiheuttanut vika saadaan korjattua, generaattori

täytyy synkronoida uudelleen verkon kanssa, mikäli se on tarkoitettu toimimaan verkon rinnalla normaalitilanteessa.

Kaikki saarekekäyttöön suunnitellut generaattorit eivät kuitenkaan osallistu verkon toimintaan verkon normaalitilassa. On siis myös generaattoreita, jotka on tarkoitettu käytettäväksi ainoastaan käyttökatkojen aikana. Erityisesti polttomoottoreihin perustuvat bensa- ja dieselgeneraattorit ovat yleisesti käytettyjä tähän tarkoitukseen. [19] Tällaiset generaattorit ovat kooltaan tyypillisesti 1-5 kilowattia, mutta isoimmat ovat jopa 20 MW. Fossiilisiin polttoaineisiin perustuvien generaattoreiden etuna nähdään helppo ohjattavuus ja riippumattomuus ulkoisista tekijöistä. Haittapuolena fossiilisista polttoaineista syntyvät päästöt, jonka takia niiden käyttöä pyritään rajoittamaan. Tekstissä [27], Nayar esittää järjestelmän, joka koostuu aurinkovoimalasta, dieselgeneraattorista, akusta ja vaihtosuuntaimesta. Järjestelmän tarkoituksena on toimia tehonlähteenä, jonka jakelu ei voi pysähtyä häiriön seurauksena.

Hajautettua tuotantoa voidaan käyttää myös saarekekäytössä jakeluverkon palvelemiseksi. Esimerkiksi päämuuntajavaurion aikana, voidaan varavoimakone kytkeä häiriöalueen sähköasemalle tai 20kV-johdolle lisäämään verkon siirtokykyä. [4] Varavoimakoneena voisi toimia aggregaatti tai akkuvoimalaitos, mutta näistä jälkimmäinen on vielä nykypäivänä yleensä liian kallis vaihtoehto.

5.2 Kytkeytyminen kylmään verkkoon

Hajautetun sähköntuotannon kyky käynnistyä itsestään on tärkeä ominaisuus verkon suurhäiriöissä laajan myrskyn tai kriittisten vikojen seurauksena. [18] Tämä ominaisuus mahdollistaa verkon palautumisen nopeasti normaalitilaansa, erityisesti jos verkon kaatumisen aiheuttaja ei ole saanut verkkoa mekaanisesti vaurioitumaan.

Käytännössä tämä tapahtuu kytkemällä itsestään käynnistyvät tuotantolaitokset rinnan tuotantolaitosten kanssa, jotka eivät kykene käynnistymään jännitteettömässä verkossa. [8] Menettelyn avulla saadaan suuria tuotantolaitoksia takaisin käyttöön, jonka avulla voidaan lähteä tavoittelemaan koko verkon palautusta jännitteiseksi. Kun koko verkko on saatu jännitteiseksi, kaikki tuotantolaitokset voivat käynnistyä, jonka jälkeen voidaan lähteä toteuttamaan tehotasapainoa.

2000-luvulle asti vesivoimalat ovat olleet käytetyimpiä tuotantoyksiköitä kylmän verkon palauttamisessa normaalitilaan, mutta nopea teknologian kehittymisen myötä. [8] Esimerkiksi ennen tuulivoimaloita ei voitu käyttää kylmän verkon elvyttämiseen, koska niiden primäärienergiaa ei välttämättä ole saatavilla tarvittaessa. Nykypäivänä tuulivoimaloista voidaan kuitenkin tehdä kykeneviä tehtävään invertterien avulla. [28]

6. YHTEENVETO

Työssä käytiin läpi hajautetun sähköntuotannon vaikutuksia verkon käyttövarmuuteen. Hajautetun tuotannon vaikutukset verkossa ovat tulleet ajankohtaisiksi, johtuen sen nopeasti kasvaneesta kapasiteetista. Hajautetun tuotannon määrän kasvu on ollut seurausta mm. muutoksista sähkömarkkinalaissa sekä teknologian kehittymisestä. Tuotannon määrän kasvu on pakottanut jakeluverkonhaltijat reagoimaan muuttuneeseen tilanteeseen. Muutokset näkyvät esimerkiksi siinä, että asetukset hajautettujen sähköntuotantolaitosten ja suurten keskitettyjen tuotantolaitosten toiminta- ja verkkoon liityntävaatimukset alkavat yhä enemmän vastata toisiaan. Asetukset kattavat mm. tahdistamisen, kytkemisen ja suojauksen hajautettujen tuotantolaitoksien ja verkon välillä.

Työn tuloksena saatiin, että hajautetun tuotannon vaikutukset verkon käyttövarmuuteen ovat pitkälti negatiivisia. Hajautetun tuotannon suhteellinen kasvu tuotannosta heikentää verkkoa ja vaikeuttaa tehotasapainon toteutumista. Lisääntyneet tehon syöttösuunnat monimutkaistavat erityisesti säteittäistä verkkoa, joka näkyy mm. ongelmina suojauksen toteutuksessa. Käyttövarmuutta parantavia sovelluksia löytyi myös muutama, jotka keskittyivät vikatilanteista toipumiseen. Sovellukset lisäävät joustavuutta sähkönjakelun toteutukseen ja auttavat verkon palautumista täyskaatumisen jälkeen. Huomioitavaa on, että hajautetun tuotannon negatiiviset vaikutukset ovat huomattavasti useammin ajankohtaisia, kuin positiiviset sovellukset. Lisäksi nykypäivänä käyttövarmuus ongelmiin löytyy yleensä taloudellisesti kannattavampi ratkaisu muualta, kuten jakeluverkkojen tapauksessa kaapelointi. Sähkömarkkinalain päivittyessä tilanne voi kuitenkin muuttua.

LÄHTEET

[1] M. Jasemi, F. Adabi, B. Mozafari, S. Salahi, Optimal Operation of Micro-grids Considering the Uncertainties of Demand and Renewable Energy Resources Generation, International Journal of Renewable Energy Development; Semarang, Vol. 5, Iss. 3, 2016, pp. 233-248. http://search.proquest.com/docview/1856542826/abstract/71AABFD0417F4A92PQ/1.

[2] B. Olek, M. Wierzbowski, Local Energy Balancing and Ancillary Services in Low-Voltage Networks With Distributed Generation, Energy Storage, and Active Loads, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, Iss. 4, 2015, pp. 2499-2508.

[3] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, W. D'haeseleer, Distributed generation: definition, benefits and issues, Energy Policy, Vol. 33, Iss. 6, 2005, pp. 787-798. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421503003069.

[4] E. Lakervi, Sähkönjakelutekniikka, Otatieto Helsinki University Press, 2008, .

[5] L. Pottonen. A method for the probabilistic security analysis of transmission grids , 2005. http://lib.tkk.fi/Diss/2005/isbn9512275929/isbn9512275929.pdf.

[6] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, W. D'haeseleer, Distributed generation: definition, benefits and issues, Energy Policy, Vol. 33, Iss. 6, 2005, pp. 787-798. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421503003069.

[7] A. Faza, Analysis of the effects of distributed generation sources on power grid reliability, 2015 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), IEEE, pp. 1-6.

[8] Murtaza Hashmi. Survey of smart grid concepts worldwide, 2011, https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/workingpapers/2011/W166.pdf

[9] N. Silva, N. Delgado, N. Costa, A. Maia Bernardo, A. Carrapatoso, Control architectures to perform voltage regulation on low voltage networks using DG, IET Conference Proceedings; Stevenage, The Institution of Engineering & Technology, Stevenage, United Kingdom, .

[10] M. Mohaqeqi, M. Kargahi, M. Dehghan, Adaptive Scheduling of Real-time Systems Cosupplied by Renewable and Nonrenewable Energy Sources, ACM Trans. Embed. Comput. Syst., Vol. 13, Iss. 1s, 2013, pp. 36:1–36:28. http://doi.acm.org/10.1145/2536747.2536758.

[11] Fingrid, 2018, https://www.fingrid.fi/kantaverkko/liitynta-kantaverkkoon/voimalaitosten-jarjestelmatekniset-vaatimukset/

[12] J.M. Guerrero, F. Blaabjerg, T. Zhelev, K. Hemmes, E. Monmasson, S. Jemei, M.P. Comech, R. Granadino, J.I. Frau, Distributed Generation: Toward a New Energy Paradigm, IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol. 4, Iss. 1, 2010, pp. 52-64.

[13] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A.V. Timbus, Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, Iss. 5, 2006, pp. 1398-1409.

[14] C. Cho, J.H. Jeon, J.Y. Kim, S. Kwon, K. Park, S. Kim, Active Synchronizing Control of a Microgrid
, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, Iss. 12, 2011, pp. 3707-3719.

[15] D.M. Bradley, Connecting DG to the grid, Transmission & Distribution World; Overland Park, Vol. 51, Iss. 13, 1999, pp. 32-37.
http://search.proquest.com/docview/211146738/abstract/77AF4F2E6D9F4DA4PQ/1.

[16] Sami Repo, Kari mäki, Pertti Järventausta, Blinding of Feeder Protection caused by Distributed Generation in Distribution Network, 2005, https://www.researchgate.net/publication/242270178_Blinding_of_Feeder_Protection_caused_by_Distributed_Generation_in_Distribution_Network

[17] N. K. Roy, H. R., Pota, Current Status and Issues of Concern for the Integration of Distributed Generation Into Electricity Networks, Sept 2015

[18] G.R. Jenkins, V. Hamidi, Assessment of Fault Ride Through Requirement for Distributed Generators
, IET Conference Proceedings, The Institution of Engineering & Technology, Stevenage, United Kingdom, .

[19] T.N. Boutsika, S.A. Papathanassiou, Short-circuit calculations in networks with distributed generation, Electric Power Systems Research, Vol. 78, Iss. 7, 2008, pp. 1181-1191. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779607002131.

[20] C. Yingvivatanapong, W.J. Lee, E. Liu, Multi-Area Power Generation Dispatch in Competitive Markets
, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, Iss. 1, 2008, pp. 196-203.

[21] D. Shin, K.J. Lee, J.P. Lee, D.W. Yoo, H.J. Kim, Implementation of Fault Ride-Through Techniques of Grid-Connected Inverter for Distributed Energy Resources With Adaptive Low-Pass Notch PLL, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, Iss. 5, 2015, pp. 2859-2871.

[22] H. Vaitiomaa, Epätahtikone varavoimageneraattorina, 2013. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/57856/Vaitomaa_Harri.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[23] ABB, 2011, Pehmokäynnistinopas, . https://library.e.abb.com/public/d11f99611045fef8c125796e00473a8a/OPAS%20Pehmokaynnistys%201FI12_01.pdf

[24] A. Medina, J.C. Hernández, M.J. Ortega, F. Jurado, DC current injection into the network from transformerless and LF transformer photovoltaic inverters, 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp. 234-238.

[25] Q. Chen, X.L. Li, J.H. Zhang, Reliability Evaluation in Modern Urban Distribution Considering Islands Impacts
, Applied Mechanics and Materials; Zurich, Vol. 48-49, 2011, pp. 886.
http://search.proquest.com/docview/1443618467/abstract/7094CECD83AA41B5PQ/1.

[26] J.M. Guerrero, J. Matas, L.G.d. Vicuna, M. Castilla, J. Miret, Decentralized Control for Parallel Operation of Distributed Generation Inverters Using Resistive Output Impedance, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, Iss. 2, 2007, pp. 994-1004.

[27] C.V. Nayar, M. Ashari, W.W.L. Keerthipala, A grid-interactive photovoltaic uninterruptible power supply system using battery storage and a back up diesel generator, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, Iss. 3, 2000, pp. 348-353.

[28] Clyde Loutan, Peter Klauer, Sirajul Chowdhury, and Stephen Hall, Demonstration of Essential Reliability Services by a 300-MW Solar Phovoltaic Power Plant, 2018, https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/67799.pdf