



# PIENVOIMALOIDEN LIITTÄMINEN JAKELUVERKKOON

2001

## ALKULAUSE

Keskustelu hajautetusta energian tuotannosta ja pienvoimaloiden kytkemisestä yleiseen jakeluverkkoon on jatkuvasti lisääntynyt eri puolilla maailmaa. Jakeluverkonhaltijat ovat myös Suomessa toivoneet asiasta ajantasaista ohjetta.

Sähköenergialiitto ry Sener teetti tämän julkaisun *"Pienvoimaloiden liittämisen jakeluverkkoon"* konsulttityönä. Työn teki diplomi-insinööri Lauri Siltanen Helsingin Energiassa. Lauri Siltanen on perehtynyt pienvoimaloihin liittyvään ongelmakenttään jo aikaisemmin diplomityössään. Tämän julkaisun sisältöä on käsitelty myös Senerin sähkön laatu ja häiriöt –työryhmässä. Lisäksi monet verkkoyhtiöitten, korkeakoulujen ja VTT:n asiantuntijat ovat kommentoineet yksityiskohtia kesällä 2001 tehdyn lausuntokierroksen yhteydessä. Sähköenergialiitto ry Sener kiittää Lauri Siltasta asiantuntevasta ja tuloksellisesta työstä sekä kaikkia muita valmisteluun osallistuneita arvokkaasta panoksesta yksityiskohtien tarkistamiseksi.

Julkaisussa on käsitelty pienvoimaloiden jakeluverkkoon liittämisen aiheuttamia teknisiä turvallisuus-, suojaus- ja häiriönäkökohtia sekä niiden ratkaisumahdollisuuksia.

Julkaisu korvaa Suomen Sähkölaitosyhdistys r.y:n julkaisun 3/90 *"Suositus pienvoimalaitosten sähkönjakeluverkkoon liittämisestä"*.

Helsingissä joulukuussa 2001

## SISÄLLYSLUETTELO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. JOHDANTO .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2. PIENVOIMALOIDEN LUOKITTELU.....</b>                                    | <b>4</b>  |
| 2.1. ERILAISET KÄYTTÖTAVAT .....   | 4         |
| 2.2. ERILAISET GENERAATTORILAITTEISTOT .....                                 | 4         |
| <b>3. VERKKOVAIKUTUKSET .....</b>  | <b>5</b>  |
| 3.1. YLEISTÄ.....  | 5         |
| 3.2. TURVALLISUUS.....   | 5         |
| 3.3. JAKELUJÄNNITTEEN OMINAISUUDET .....                                     | 6         |
| 3.4. JÄNNITETASON MUUTOKSET JA LOISTEHO.....                                 | 6         |
| 3.5. NOPEAT JÄNNITEMUUTOKSET.....  | 7         |
| 3.6. YLIAALLOT .....   | 9         |
| 3.6.1. Yliaaltojännitteet.....   | 9         |
| 3.6.2. Yliaaltovirrat.....   | 9         |
| 3.7. HÄVIÖT .....  | 10        |
| 3.8. VIKAVIRTATASOJEN KASVU.....   | 11        |
| 3.9. PIENVOIMALAN KYTKEMINEN VERKKOON.....                                   | 11        |
| <b>4. SUOJAUS .....</b>  | <b>13</b> |
| 4.1. YLEISTÄ.....  | 13        |
| 4.2. ERILAISTEN VIKATAPAUSTEN KÄSITTELY.....                                 | 13        |
| 4.2.1. Jälleenkytkennän epäonnistumisen aiheuttaminen.....                   | 13        |
| 4.2.2. Terveiden lähtöjen ei-toivottu erottaminen.....                       | 14        |
| 4.2.3. Viallisen johtolähdön ylivirtasuojauksen toiminnan sekoittaminen..... | 15        |
| 4.2.4. Kanta- ja siirtoverkon viat.....                                      | 16        |
| 4.2.5. Sähköasemaviat.....   | 16        |
| 4.2.6. Keskijännitejohtojen viat.....  | 16        |
| 4.2.7. Pienjänniteverkon viat.....   | 17        |
| 4.3. PIENVOIMALAN PERUSSUOJAUS .....   | 17        |
| 4.3.1. Yleistä.....  | 17        |
| 4.3.2. Jännite- ja taajuusreleet.....  | 18        |
| 4.3.3. Ylivirtasuojaus.....  | 19        |
| 4.4. PIENVOIMALAN LISÄSUOJAUS .....  | 19        |
| 4.4.1. Saareke / Yksin syötön estosuoja.....                                 | 19        |
| 4.4.2. Nollajänniterele.....   | 21        |
| 4.4.3. Suuntareleet.....   | 21        |
| 4.4.4. Vianilmaisimet.....   | 22        |
| <b>YHTEENVETO .....</b>  | <b>23</b> |
| <b>LÄHDELUETTELO .....</b>   | <b>25</b> |

## 1. JOHDANTO

Yleisiin jakeluverkkoihin liitettyjen pienvoimaloiden määrän oletetaan lisääntyvän. Tällä hetkellä perinteinen varavoimatuotanto on tuotantotavoista yleisimpänä. Nämä varavoimakoneet eivät kuitenkaan ole tuottaneet verkonhaltijalle ongelmia, koska ne toimivat yleisestä jakeluverkosta erillään.

Niin sähkömarkkinoiden vapautumisesta kuin ”vihreisiin” energialähteisiin pohjautuvien pienvoimaloiden markkinoille tulosta johtuen jakeluverkon kanssa rinnankäyvät voimalat ovat yleistymässä ja tuovat mukanaan uusia teknisiä asioita verkonhaltijoiden selvitettäväksi. Tämän suosituksen tarkoituksena on antaa verkonhaltijoille ohjeita pienvoimalan yleiseen jakeluverkkoon liittämisesä huomioon otettavien asioiden käsittelyyn.

Lyhyen tähtäyksen suunnitelmissa pienvoimalat on sovittava nykyiseen jakeluverkkoon, jonka suunnittelussa niitä ei ole vielä huomioitu. Nykyiset verkot on rakennettu ”yksisuuntaista” tehonsiirtoa silmällä pitäen. Sen sijaan pidemmällä tähtäyksellä jakeluverkossa tapahtuva sähköntuotanto on mahdollisesti otettava huomioon jo verkonsuunnittelussa.

Pienvoimalat osallistuvat aktiivisesti verkon toimintaan, joten verkkoyhtiön niille asettamat tekniset vaatimukset ovat tarkempia kuin kuluttajien, jotka ovat verkon suuntaan enemmän passiivisia.

Haittaa aiheuttaa riittävän turvallisuuden saavuttaminen, jos pienvoimala jää yksin syöttämään verkkoa ja halutaan tehdä verkkotöitä johdolla, johon ko. voimala on liitetty. Vaikka johto erotetaan yleisestä verkosta, se voi silti olla toisesta suunnasta voimalan syöttämä ja siten jännitteinen. Vaarallisia tilanteita syntyy myös, jos erinäisissä vikatapauksissa voimalan suojaus ei toimi tai se sekoittaa jo olemassa olevan jakeluverkonhaltijan verkon suojauksen. Erityistä huomiota suojaukseen on kiinnitettävä, mikäli verkossa on käytössä automaattiset jälleenkytkennät.

Myös sähkönlaatuun liittyvät kysymykset ovat tärkeitä. Pienvoimalan tuottaman sähkön tulee olla laadultaan hyvää, jottei jakeluverkkoon leviä sähkönlaatua huonontavia ilmiöitä. Samoin tulee varmistaa, että verkon jännitetaso ei nouse liian korkeaksi.

Hyvin suunniteltua pienvoimantuotantoa voi verkonhaltija hyödyntää verkostohäviöiden vähentämiseksi. Verkkoyhtiöiden haasteena onkin hyödyntää tuotanto mahdollisimman hyvin ja samalla säilyttää sähköntoimitukseen liittyvät laatutekijät, verkon selkeä käyttö ja turvallisuus.

On hyvä muistaa, että jokaisen pienvoimalan jakeluverkkoon liittyminen on aina yksilöllinen tapaus, joka joudutaan yksilöllisesti tarkastelemaan. Näin ollen aikainen yhteydenotto verkonhaltijaan on tärkeää, jotta paikalliset vaatimukset ja mahdolliset verkostomuutosten ja suojausjärjestelmien rakentamis- ja muutosaikataulut saadaan selville hyvissä ajoin ennen voimalan rakentamista.

## 2. PIENVOIMALOIDEN LUOKITTELU

### 2.1. Erilaiset käyttötavat

Pienvoimalat voidaan yleisesti jakaa käyttötapojen ja syöttöjärjestelyjen mukaisesti neljään eri luokkaan:

- Luokka 1.* Voimalat, joita ei ole liitetty yleiseen jakeluverkkoon, ts. ne ovat aina erossa yleisestä jakeluverkosta.
- Luokka 2.* Voimalat, jotka toimivat vaihtoehtona yleiselle jakeluverkolle, ts. automaattisella/manuaalisella syötönvaihdolla toteutetut varavoimalaitteistot.
- Luokka 3.* Voimalat, jotka toimivat rinnan yleisen jakeluverkon kanssa ilman, että tuotettua sähköä siirretään yleiseen jakeluverkkoon (mm. kuorman huipunleikkaus).
- Luokka 4.* Voimalat, jotka toimivat rinnan yleisen jakeluverkon kanssa niin, että tuotettu sähkö voidaan siirtää osin tai kokonaan yleiseen jakeluverkkoon.

Tämä suositus koskee pienvoimaloita, jotka toimivat rinnan yleisen jakeluverkon kanssa joko jatkuvasti tai ajoittain (ts. luokat 3 ja 4).

Luokkien 2 – 4 tapauksissa ehdoista pienvoimalan liittämiseksi yleiseen jakeluverkkoon on aina sovittava verkonhaltijan kanssa etukäteen. Näissä tapauksissa suunnitelmat, joihin sisältyy teknisten tietojen lisäksi selvitykset voimalan verkkoon liittymisautomaatiikasta ja suojauksesta, sekä asiakkaan verkon pää- ja suojauskaaviot, tulee hyväksyttäväksi jakeluverkonhaltijalla ennen laitteiston käyttöönottoa.

Pienvoimaloissa käytetään mm. seuraavanlaisia tehonlähteitä:

- Akustot
- Aurinko- ja polttokennot
- Polttomoottorit
- Turbiinit (mm. tuuli-, vesi- ja kaasuturbiinit)
- Muu soveltuva tehonlähde

### 2.2. Erilaiset generaattorilaitteistot

Suosituksessa käsiteltävien pienvoimaloiden generaattorilaitteistot ovat seuraavanlaisia:

- Verkko- ja erillismagnetoituja tahtigeneraattoreita
- Verkko- ja itsemagnetoituja epätahtigeneraattoreita
- Verkko- ja itsekommutoituja staattisia vaihtosuuntaajia.

Magnetointi- ja kommutointitapojen on oltava sopivia generaattorilaitteiston käyttötarkoitukseen. Verkon kanssa rinnankäyvien vaihtosuuntaajien osalta olisi syytä käyttää vain verkkokommutointia.

### 3. VERKKOVAIKUTUKSET

#### 3.1. Yleistä

Jakeluverkko on perinteisesti mitoitettu ja rakennettu siirtämään siirtoverkosta tuleva teho keski- ja pienjänniteverkkoon liittyneille asiakkaille. Pienvoimaloiden liittäminen jakeluverkkoon muuttaa tilannetta paikallisen verkon haltijan kannalta, kun tehon (pätö- sekä loisteho) siirtosuunnat sekä siirrettävät määrät muuttuvat hajautetun tuotannon ja verkon kulutuksen vaihtelujen mukaan. Yksi suurimmista kysymyksistä on – kuinka säilyttää turvallisuus verkossa tässä uudessa tilanteessa.

Tehonlähteestä ja generaattorilaitteistosta riippuen tuottaja vaikuttaa myös paikallisesti verkon sähkönlaatuun. Samalla kun tuulivoimalaitteisto toimii saatavilla olevan vaihtelevan tuulen mukaan lämpövoimaan perustuvat pienet kaasuturbiinilaitteistot toimivat melko tasaisella kapasiteetilla koko ajan.

Vaikutukset voivat olla jännitetason muutoksia, nopeita jännitevaihteluja, kytkentöjen aiheuttamia jännitepiikkejä ja –kuoppia sekä muutoksia yksittäisten yliaaltojen määrässä tai kokonaissärössä. Voimalan tuottaman sähkön tulee täyttää yleiseen jakeluun tarkoitettujen sähkön laatu- ja yhteensopivuusnormien asettamat, sekä alan suositusten mukaiset vaatimukset.

Pienvoimala ei saa aiheuttaa häiriötä sähköverkkoon käynnistyksen eikä normaalin käytön aikana. Edellisten lisäksi myös oikosulkuvirtojen kasvuun, verkon häviöihin sekä maadoituksiin on kiinnitettävä huomiota suunniteltaessa pienvoimalan liittämistä jakeluverkkoon.

Tuottaja nostaa pääsääntöisesti verkon jännitettä ja johdon loppupäässä oleva kuluttaja voi hyötyä siitä, jos jännitteelle asetettuja raja-arvoja ei ylitetä. Hyvin suunnitellulla sähköntuotannolla voidaan saada helpotusta jakeluverkon jännitteen alenemiin. Mahdollisesti voidaan myös siirtää tarvittavia verkon vahvistuksia kauemmas tulevaisuuteen. Tässä yhteydessä on kuitenkin hyvä muistaa, että pienvoimaloiden käyttöasteet ovat usein melko alhaisia ja siten ne soveltuvat paremmin ylimääräiseksi kaupalliseksi tuotannoksi kuin paikalliseksi perustuotannoksi.

#### 3.2. Turvallisuus

Liitettäessä pienvoimalaa verkkoon on riittävän turvallisuuden saavuttaminen tärkeää. Suojauksen on erotettava voimala verkosta silloin, kun verkkoa ei syötetä muualta tai, kun verkon jännite katoaa kokonaan tai osittain. Erottaminen on tarpeen mm. työturvallisuuden varmistamiseksi.

Pienvoimala ei saa huonontaa muiden sähkönsyöttöjärjestelmien turvallisuutta ja oikeaa toimintaa.

Vaaratilanteita syntyy, jos pienvoimala jää yksin syöttämään verkkoa ja halutaan tehdä verkkotöitä ko. johdolla. Vaikka johto erotetaan yleisestä verkosta, se voi silti olla toisesta suunnasta voimalan syöttämä ja siten jännitteinen. Em. syystä kaikki jakeluverkossa toimivat voimalat tulisi olla verkon haltijan tiedossa. Pienvoimalaa syöttäviin johtolähtöihin ja muuntamoihin olisi syytä laittaa varoituskyllti esim. ”Takajännitevaara” tai ”Varo pienvoimala”.

Pienvoimala on aina varustettava laitteilla, joilla se voidaan erottaa yleisestä jakeluverkosta. Näiden laitteiden on oltava verkonhaltijan käytettävissä ja ne on voitava lukita auki-asentoon.

Ongelmallista on myös, jos pienvoimalan suojaus ei toimi tai voimala sekoittaa jo olemassa olevan jakeluverkonhaltijan verkon suojauksen. Jakeluverkkoon liitetyn pienvoimalan sähkölaitteilla ei pystytä estämään vaarallisten jännite- ja taajuuspoikkeamien syntymistä silloin, kun se jää yksin (saarekkeeseen) syöttämään verkkoa.

### 3.3. Jakelujännitteen ominaisuudet

Standardi SFS-EN 50160 määrittelee jakelujännitteen ominaisuudet pien- ja keskijänniteverkon normaaleissa käyttöolosuhteissa. Ko. standardia ei tule soveltaa pienvoimaloiden tapauksessa. Nykyaikaisten laitteistojen täytyy pystyä saavuttamaan standardia parempi jännitteen laatutaso. Tarvittaessa standardi on referenssi, mutta ei suunnittelun apuväline.

Yleensä kaikki jakeluverkkoon liitettävät ”aktiiviset” sähkölaitteistot lisäävät verkossa tapahtuvia muutosilmiöitä. Näin tapahtuu myös pienvoimaloiden kohdalla.

Suurimmassa osassa tapauksia tuotannon vaikutus sähkönlaatuun on kuitenkin pieni ellei voimalan tuottama teho ole suuri verkon oikosulkutehoon verrattuna. Riittävän sähkönlaadun varmistamiseksi voidaan asettaa ehtoja, jotka liittymispisteen ja itse pienvoimalan tulee täyttää. Tärkeimmät huomioon otettavat sähkönlaatutekijät ovat seuraavat:

- Jännitevaihtelut eivät saa olla liian suuria kytkettäessä tai erotettaessa pienvoimala verkosta
- Jännitetason on pysyttävä standardin rajoissa
- Nopeita jännitteen muutoksia ei saa esiintyä liikaa (välkyntä).

### 3.4. Jännitetason muutokset ja loisteho

Liitettäessä pienvoimala jakeluverkon säteittäisjohtoon, jolla on muita kuluttajia, jännitetason on pysyttävä standardien rajoissa. Liittymispisteessä tapahtuva sähköntuotannon aiheuttama jännitetason suhteellinen muutos verrattuna jännitetasoon, joka liittymispisteessä vallitsi ennen tuotannon lisäämistä voidaan likimäärin laskea yhtälöllä

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{R_K \cdot P_N + X_K \cdot Q_N}{U^2}, \quad (1)$$

missä  $P_N$  on generaattorin nimellispätöteho [MW]  
 $Q_N$  on generaattorin nimelliskoisteho [MVar]  
 $R_K$  on verkon oikosulkuresistanssi [ $\Omega$ ]  
 $U$  on verkon pääjännite liittymispisteessä [kV]  
 $X_K$  on verkon oikosulkureaktanssi [ $\Omega$ ].

Loistehon suunta ja suuruus riippuvat magnetoinnista, jota voidaan säätää jännitteen tai loistehon mukaan. Kun tehoa syötetään verkkoon, ovat sekä  $P_N$  että  $Q_N$  positiivisia. Generaattorilaitteiston magnetoinnin verkosta ottama loisteho on näin ollen negatiivinen ja pienentää jännitteenousua. Epätahti-

generaattori ei pysty tuottamaan loistehoa ja sen verkosta tarvitsemasta loistehosta suurin osa pyritään tuottamaan paikallisesti (kondensaattoreilla) Laskennassa on otettava huomioon mahdollisen kondensaattoripariston vaikutus. Loistehon kulutuksesta vähennetään mahdollisen kondensaattoripariston tuottama loisteho.

Yhtälöstä 1 nähdään, että jännite nousee enemmän, kun sekä pätö- että loistehoa syötetään vasten verkon impedanssia. Pienvoimalalla, jolla voi ohjata tuotannon tehokerrointa, voidaan verkkoyhtiön halutessa säädellä jännitteen muutosta. Kun jännite verkossa on korkeimmillaan pienennetään loistehon tuotantoa, jolloin jännite ei pääse nousemaan niin paljon. Vastaa- vasti, kun jännite on alhainen tuetaan sitä nostamalla loistehon tuotantoa.

Jos jännite johdolla kuitenkin nousee yli sähköasematason eli suhteessa enemmän kuin mitä verkon jännitteen alenema olisi ilman tuotantoa, tai sähköasemalla käytetään kuormitukseen perustuvaa jännitteensäätöä, on tilanteeseen kiinnitettävä erityistä huomiota.

Kun päämuuntajan jännitteensäätö on asetettu pitämään vakiona keskijänniteverkon syöttöjännitettä, pienentää pienvoimala jännitteen säätöön tarvittavien päämuuntajan käänäkierrosten käytettävissä olevaa lukumäärää. Kuormitusvirtaan perustuvassa vaihtelevassa jännitteensäädössä, voimala ei ainoastaan vaikuta sen säteittäisjohdon jännitteeseen, johon se on liitetty vaan myös kaikkiin muihin saman päämuuntajan syöttämien johtolähtöjen jännitteisiin.

Kuormitusvirtaan perustuvassa säädössä jännitettä nostetaan päämuuntajan kuormituksen kasvaessa ja vastaavasti lasketaan kuormituksen pienentyessä. Koska tuotanto pienentää päämuuntajan kuormitusta, päämuuntaja "sokaistuu" eikä näin ollen nosta jännitetasoa verkossa olevan todellisen kuormituksen mukaisesti. Tämä vaikuttaa kaikkiin ko. päämuuntajan syöttämiin kuluttajiin jännitetasoa alentavasti.

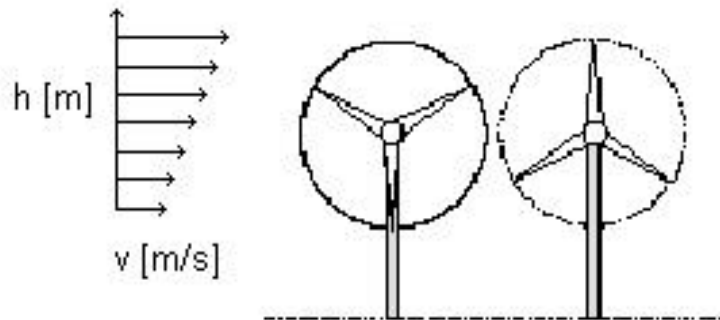
Pienvoimalan kanssa samalla johtolähdöllä olevat kuormat eivät laskusta yleensä kärsi, koska tuotanto nostaa paikallisesti saman johtolähdön jännitetasoa. Jos pienvoimala on liitetty sähköasemaan omalla johtolähdöllä, voidaan tuotannon vaikutus eliminoida lisäämällä kyseisen johtolähdön virta päämuuntajan kuormitusvirtaan. Näin ollen jännitteensäätö perustuu todelliseen kuormitukseen ja säätö toimii oikein.

Pienvoimalan verkosta erottaminen voi myös aiheuttaa hetkellisen jännite- tason muutoksen. Varsinkin suurempien voimaloiden olisi hyvä laskea tuotanto minimiin ennen verkosta eroamista. Jos erottamista ei voida tehdä hallitusti (vikatilanteet), voi jännitekuoppa olla suurikin. Jännitekuoppa tuskin on suurempi kuin käynnistyksessä (kts. kohta 4.9), joten pienvoimalan koolle ei tämän vuoksi tarvitse asettaa erillisiä lisäehtoja. Lähinnä on kysymys käyttöperiaatteista.

### 3.5. Nopeat jännitemuutokset

Lähes kaikki pienvoimalat lisäävät nopeita jännitemuutoksia. Muutokset johtuvat voimalan käynnistymisestä ja muista kytkennöistä. Jos jännitemuutoksia on useita kertoja minuutissa, alkavat muutokset aiheuttaa haitallista välkyntää. Välkyntä liitetään monesti tuulivoimaloihin.





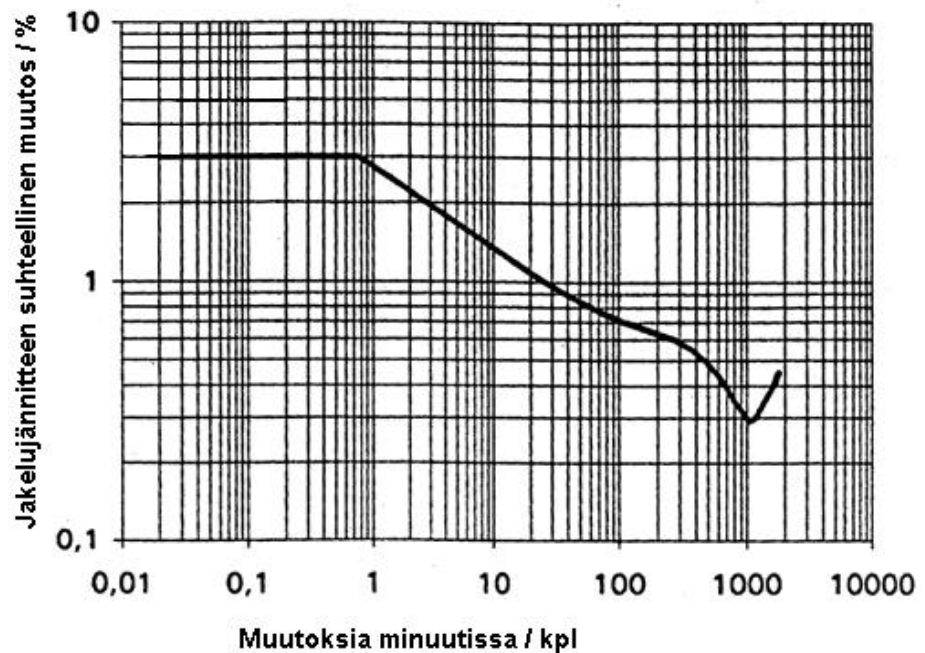
*Kuva 1. Tuulivoimalaitoksen tornin “varjo” ja tuulennopeuden muuttuminen korkeuden funktiona aiheuttavat nopeita muutoksia tuulesta saatuun tehoon aiheuttaen muutoksia myös jännitteeseen. Vasemman puoleisessa tilanteessa yksi roottorin lavoista on juuri tornin kohdalla ja samaan aikaan kaksi muuta lapaa ovat lähes korkeimmalla kohdallaan kovassa tuulella. Oikean puoleinen tilanne on lähes päinvastainen, kun vain yksi lavoista on korkealla ja muut lavat ovat niin kaukana tornin varjosta kuin tässä tilanteessa on mahdollista.*

Jotta valojen haitallinen välkkyminen voidaan torjua, nopeiden jännitemuutosten suuruus on pyrittävä rajoittamaan tiettyyn arvoon, joka riippuu jännitemuutoksen taajuudesta. Koska nopeat jännitemuutokset usein miten aiheutuvat sähkökäyttäjien ja –tuottajien laitteista, perustuu häiriöiden rajaaminen yhteistoimintaan verkonhaltijan kanssa.

Nopeiden jännitemuutosten vaikutusten mittaamiseen on kehitetty myös oma välkyntämittari. Siinä välkyntänsä ärsyttävyyttä arvostellaan lyhytaikaisella häiritsevyyssindeksillä ( $P_{st}$ ) ja tästä johdetulla pitkäaikaisella häiritsevyyssindeksillä ( $P_{lt}$ ). Standardissa jakelujännitteen välkyntälle on esitetty, että viikon mittausjaksolla 95 %  $P_{lt}$  –arvoista on oltava alle 1.

Välkyntämittareita ei kuitenkaan vielä ole kovinkaan yleisesti käytössä. Mittareiden mittausvarmuudessa on myös ollut vaihtelua. Asia tulee kuitenkin tulevaisuudessa muuttumaan. Monet tuulivoimaloiden valmistajat antavat yksinkertaisia kaavat miten em. häiritsevyyssindeksit lasketaan käyttäen valmistajien ilmoittamia voimalakohtaisia kertoimia.

Muutosilmiötä voi arvioida myös nyrkkisääntöjen avulla. Kuva 2 esittää toistuvien suorakaiteen muotoisten nopeiden jakelujännitemuutosten suositellut maksimi-arvot alueella 0,01 ... 2000 muutosta minuutissa. Koska välkyntäilmiötä on vielä tällä hetkellä hankala mitata, voidaan kuvan avulla tehdä sääntöjä jakeluverkkoon liitettöjä pienvoimaloita varten.



Kuva 2. Jakelujännitteen suositeltu suurin suhteellinen muutos muutostaajuuden funktiona. Käyrän mukaan harvoin toistuva jännitteen muutos saa olla enintään noin 3 %. Pienvoimalan käynnistyksestä aiheutuvat jännitemuutokset voidaan pitää kuitenkin hyväksyttävänä 5 % muutokseen asti, edellyttäen ettei käynnistys tapahdu kuin 2-3 kertaa tunnissa.

### 3.6. Yliaallot

#### 3.6.1. Yliaaltojännitteet

Normaalisti jakeluverkkoon kytketty pienvoimala ei kasvata jännitteen särötasoa kovinkaan paljon. Poikkeuksena ovat voimalat, joissa tehoelektronikkaa käytetään paljon hyväksi (taajuusmuuttajat, suuntaajat, pehmokäynnistimet).

Standardi EN 50160 antaa selvät raja-arvot viikon tarkastelujaksolla yksittäisten harmonisten yliaaltojännitteiden 10 minuutin tehollisarvoille, lisäksi raja-arvo annetaan harmoniselle kokonaissärölle.

Sovellettaessa jännitestandardia käytännössä pienvoimaloille, olisi järkevää asettaa suunnittelun lähtötavoite tiukemmaksi kuin em. standardin särörajat. Käytäntö on osoittanut, että standardin raja-arvoja lähestyttäessä merkitsee tilanne yleensä jo ongelmien esiintymistä. Tämän johdosta yliaalloille (erityisesti yliaaltovirroille), on verkon haltijan asetettava tiukemmat raja-arvot.

#### 3.6.2. Yliaaltovirrat

Pienvoimalan aiheuttamat sallitut yliaaltojen määrät on syytä antaa myös virtoina, koska verkon jännitteen säröytyminen riippuu kussakin verkon osassa kulkevista yliaaltovirroista. Vaikka jännitteen käyrämuoto pysyisikin yliaaltolähteen omistajan liittymiskohdassa hyväksyttävänä, on mahdollista, että sen aiheuttamat yliaallot yhdessä muiden käyttäjien yliaaltojen kanssa aiheuttavat jossakin muualla verkon jännitteen liiallisen säröytymisen. Aset-

tamalla verkkoon syötettäville yliaaltovirroille rajoituksia saadaan verkon yliaaltovirtojen sietokapasiteetti jaettua liittyjille tasaisesti. Sallittu kokonais­särö 5 % on hyvä suunnittelun pohjaksi.

*Taulukko 1. Pienvoimalalle sallittavat yksittäiset yliaaltovirrat  $I_h$  prosentteina liittymän referenssivirrasta  $I_R$ . Kokonaissärö saa olla enintään 5 %.*

| yliaallon järjestysluku<br>$h$ | Parittomat yliaaltovirrat<br>$I_h$ , prosenttia $I_R$ :sta | Parilliset yliaaltovirrat<br>$I_h$ , prosenttia $I_R$ :sta |
|--------------------------------|--|--|
| $h < 11$                       | 4,0 %  | 1,0 %  |
| $11 \leq h < 17$               | 2,0 %  | 0,5 %  |
| $17 \leq h < 23$               | 1,5 %  | 0,4 %  |
| $23 \leq h < 35$               | 0,6 %  | 0,2 %  |
| $35 \leq h < 50$               | 0,3 %  | 0,1 %  |

Sallitut yliaaltovirrat voidaan esittää suhteessa tuottajalle varattuun siirtokapasiteettiin referenssivirran  $I_R$  avulla. Referenssivirta voi olla sulakepohjaisessa liittymässä pääsulakkeen nimellisvirta  $I_N$  ja tehopohjaisessa liittymässä liittymissopimuksen mukainen virta. Referenssivirtaan perustuvasta menetelmästä voi lukea tarkemmin Senerin julkaisusta: Loistehon kompensointi ja yliaaltojen rajoittaminen.

### 3.7. Häviöt

Sähköntuotanto jakeluverkossa voi sekä kasvattaa että vähentää verkoston häviöitä, riippuen tuotannon sijainnista, tehokertoimesta, verkon kuormista ja impedanssista. Häviöt kasvavat verkossa, jos päto- tai loistehoa joudutaan siirtämään pitkiä matkoja. Verkon häviöiden ja jännitetaso kannalta on tärkeää, miten tuotanto ja kulutus hetkellisesti korreloivat. Mitä useammin ne ovat samansuuruisia, sen parempi se on verkon kannalta. Tuotantoa ja kulutusta vertaillaessa on syytä huomioida nimellis- ja maksimitehon lisäksi myös pysyvyyskäyrien muoto sekä huipun käyttöaika.

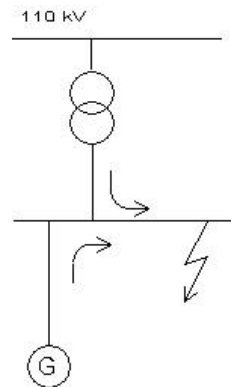
Jakeluverkkoon liitetty pienvoimala pienentää käytännössä aina muuntohäviöitä sähköaseman päämuuntajissa. Keskijänniteverkon osalta häviöt ovat yleensä vähäisiä (poikkeuksena saaristo, haja-asutusalueet) ja sen vuoksi myös tuotannon vaikutukset häviöihin ovat pieniä. Verkkoyhtiöiden häviöistä suurin osa muodostuu pienjänniteverkossa. Omaan liittymisjohtoon liitetty voimala aiheuttaa aina normaaleiden kuluttajien tapaan häviöitä.

Päto- ja loistehon lisäksi pienvoimala generaattorilaitteistosta riippuen joko tuottaa tai kuluttaa loistehoa. Jos voimala ottaa paljon loistehoa verkosta, se lisää verkon häviöitä ja saattaa aiheuttaa verkkoyhtiölle lisälaskun, kun tämä vuorostaan ottaa kanta- tai alueverkosta enemmän loistehoa. Verkkoyhtiön ja tuottajan tulee sopia verkosta otettavan ja siihen syötetyn loistehon enimmäismäärästä sekä mahdollisesta loistehomaksusta, jos tämä määrä ylittyy.

Vaikutukset häviöihin eivät muodosta teknisiä pienvoimalan verkkoon liittämiseksi, vaikutukset ovat enemmänkin taloudellisia. Tekniikan mahdollistaa tehokertoimen säädön, joten verkonhaltijan on vai osattava määrittää tarpeensa. Tämä voi tuoda helpotusta häviö- ja jännitetasokysymyksiin.

### 3.8. Vikavirtatasojen kasvu

Kun pienvoimala toimii rinnan jakeluverkon kanssa, se kasvattaa verkon vikavirtatasoja ja muuttaa vikavirran kulkureittejä (vikapaikkaan voidaan syöttää vikavirtaa kahdesta tai useammasta suunnasta), tämä periaate on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 3. Pienvoimalan rinnankäyttö jakeluverkon kanssa kasvattaa vikavirtatasoja. Kuvan tapauksessa vika syntyy keskijänniteverkossa, johon on liitetty voimala. Näin ollen vikavirtaa syötetään vikapaikkaan kahdesta suunnasta.

Nämä vaikutukset on aina otettava huomioon ja tarvittaviin korjaaviin toimenpiteisiin on ryhdyttävä. On tarkistettava, että komponenttien oikosulkukestoisuus tai katkaisijoiden katkaisukyky eivät ylitä. Suojauksen ja vianpaikannuksen kannalta tilanne on monimutkaisempi, kun vikavirtaa syötetään useammasta suunnasta.

Oikosulkuvirran tarkastelussa on huomioitava virran käyttäytyminen ajan funktiona. Alkuoikosulkuvirran suuruus ja oikosulkupiirin R/X-suhde määrittävät sysäysvirran huippuarvon ja siten suurimmat laitteisiin kohdistuvat oikosulkuvoimat. Termisiä rasituksia laskettaessa on otettava huomioon virran vaimeneminen ajan funktiona. Myös suojaustarkasteluissa on vaimeneminen huomioitava.

Olemassa oleva sähköverkko on mitoitettu tietyllä oikosulkukestoisuustasolle. Tämä mitoitustaso asettaa rajan verkkoon liitettävälle voimalateholle. Raja määräytyy dynaamisen oikosulkukestoisuus mukaan, termisen kestoisuus ei yleensä ole rajoittava tekijä.

### 3.9. Pienvoimalan kytkeminen verkkoon

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  $i_{\text{suhde}}$  on pienvoimalan kytkentävirran suhde nimellisvirtaan  
 $S_k$  on verkon oikosulkuteho ensimmäisessä muun kuluttajan kanssa olevassa yhteisessä verkon pisteessä  
 $S_n$  on pienvoimalan nimellisteho.  
 $U_v$  on verkon vaihejännite

Jos pienvoimalan verkkoon kytkeminen saa standardin mukaisesti aiheuttaa enintään 5 %:n suuruisen jännitemuutoksen, kannattaa suunnittelutasoksi ottaa enintään 4 %. Tällöin yhtälöstä 2 saadaan johdettua vaatimus verkon liittymispisteen oikosulkuteholle sijoittamalla siihen  $\Delta U/U_v=0,04$ . Verkkoon kytkeminen voidaan tällöin normaalisti sallia, jos liittymispisteen oikosulkuteho  $S_k$  toteuttaa yhtälön

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

Suorassa verkkoon kytkennässä esim. epätahtigeneraattoreilla  $i_{\text{suhde}}$  on yleensä luokkaa 3 ... 8. Käyttämällä virtaa rajoittavia pehmokäynnistimiä "tahdistamaan" laitteisto verkkoon, voidaan kytkentävirta rajoittaa nimellisvirran suuruiseksi tai sitäkin pienemmäksi. Jos kytkentöjä on useampia kertoja tunnissa, on niiden määrää ehkä rajoitettava tai ainakin tarkemmin tutkittava täytyykö sähköverkkoon asetetut vaatimukset.

Jos pienvoimala liitetään jakeluverkkoon käyttämällä välimuuntajaa, voi muuntajan impedanssi rajoittaa kytkentävirtaa 25 % tai jopa enemmän.

Pienvoimalan sähköverkkoon kytkemismenetelmästä tulee sopia verkonhaltijan kanssa.

- Jos generaattorilaitteisto täytyy tahdistaa verkkoon, suositellaan käytettäväksi automaattista tahdistuslaitteistoa.
- Epätahtigeneraattorin käynnistyminen suositellaan tapahtuvan lähes synkronisella pyörimisnopeudella, jolloin vältytään suurilta käynnistysvirtapiikeiltä.

Hyvä ohje kaikkien pienvoimaloiden verkkoon kytkemiselle on seuraava: Jakeluverkkoon kytkeminen on pyrittävä tekemään niin, että käynnistys- tai kytkentävirta rajoittuu lähes nimellisvirran suuruiseksi.

## 4. SUOJAUS

### 4.1. Yleistä

Suojaukselle asetettavia perusvaatimuksia ovat: selektiivisyys, aukottomuus ja luotettavuus (toimintavarmuus ja –virheettömyys).

Pienvoimalan liittäminen jakeluverkkoon nostaa esiin monia huomioon otettavia seikkoja koskien verkon suojauksen toimivuutta ja yleistä turvallisuutta. Toimivan suojauksen avulla mahdollistetaan voimalan käyttö jakeluverkossa siten, että siitä ei aiheudu häiriöitä/vaaraa verkolle ja sitä kautta muille kuluttajille tai verkolla työskenteleville henkilöille. Esitetyt suojauksen perusvaatimukset tarkoittavat pienvoimalan tapauksessa seuraavaa:

- Suojauksen on erotettava pienvoimala verkosta silloin, kun verkkoa ei syötetä muualta tai, kun verkon jännite katoaa kokonaan tai osittain. Erottaminen on tarpeen mm. työturvallisuuden varmistamiseksi.
- Verkon uudelleen syöttäminen on voitava aloittaa ilman pienvoimalaan kohdistuvia toimenpiteitä.
- Pienvoimala ei saa aiheuttaa johdon jälleenkytkennän epäonnistumista pitämällä valokaarta yllä vikapaikassa.
- Suojauksen on erotettava pienvoimala verkosta, jos verkon jännite ja taajuus poikkeavat normaalista.
- Pienvoimalaa ei saa kytkeä verkkoon, jos kaikki yleisen jakeluverkon vaiheet eivät ole jännitteisiä.
- Muiden asiakkaiden turhia verkosta erottamisia on vältettävä. Pienvoimalan suojauksen on oltava selektiivinen verkon muun suojauksen kanssa. Myöskään itse voimalan ei tulisi tarpeettomasti erota verkosta.

Seuraavissa kappaleissa käydään läpi jakeluverkkoon liitetyn pienvoimalan vaikutuksia olemassa olevaan verkon suojauksen ja sen toimintaan. Aina on hyvä muistaa, että huolimatta vian tyypistä tai kestosta, voivat herkäät pienvoimalat toimia vikatilanteessa epänormaalisti (menettävät stabiilisuuksensa, toimivat väärällä jännitteellä tai taajuudella). Niinpä suojauksen on oltava kattava ja suojele perustuttava eri tekijöihin.

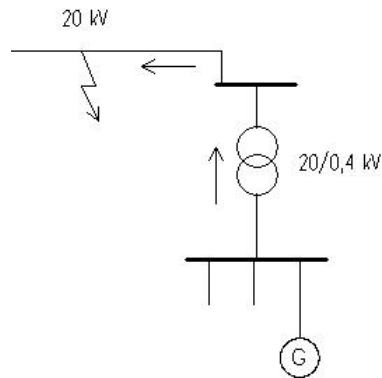
### 4.2. Erialaisten vikatapausten käsittely

#### 4.2.1. Jälleenkytkennän epäonnistumisen aiheuttaminen

Keskijänniteverkkoon pienvoimala kytetään lähes aina muuntajan välityksellä. Yleensä muuntaja on kytketty voimalan puolelta tähteen ja verkon puolelta kolmioon. Tästä syystä voimalan toiminta ei häiriinny maasulun aiheuttamasta vaihejännitteiden epäsymmetriasta. Pienvoimala ei myöskään vaikuta keskijänniteverkon maasulkusuojauksen toimintaedellytyksiin. Ainoastaan johtolähdöillä, joilla on käytössä jälleenkytkentäreleistys, syntyy ongelmia.

Maasta erotetussa avojohtoverkossa noin 90 % maasuluista on selvitettävissä jälleenkytkentöjen avulla. On kuitenkin muistettava, että vaikka johtolähtö erotettaisiin lyhyeksi aikaa, voi vikapaikan alapuolisessa verkossa oleva pienvoimala ylläpitää jännitettä, niin että maasulku ei sammuu itses-

tään ja jälleenkytkentä epäonnistuu. Siten myös voimala on erotettava verkosta jälleenkytkennän jännitteettömänä aikana, jotta valokaari sammuu ja jälleenkytkentä voidaan tehdä onnistuneesti. Tarvittaessa jälleenkytkennän aikahidastusta voi myös kasvattaa.



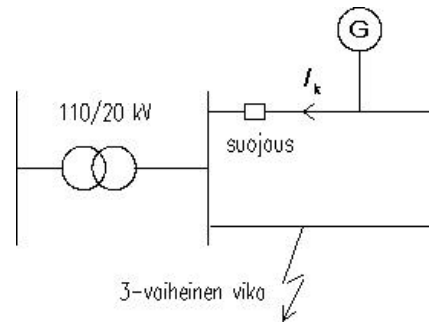
*Kuva 4. Pienitehoinen voimala syöttää vikapaikkaan valokaarta ylläpitävän virran. Virta voi on kuitenkin niin pieni, että ylivirtasuojaus ei toimi. Näin ollen jälleenkytkentä ei voi onnistua, koska vika ei ole poistunut jännitteettömänä aikana.*

Erottaminen on tärkeää myös voimalan kannalta. Pikajälleenkytkentä voi aiheuttaa tahdistamattoman verkkoon kytkennän, minkä seurauksena voi olla laitteistovaurioita.

#### 4.2.2. Terveiden lähtöjen ei-toivottu erottaminen

Verkkoa suojataan oikosuilulta yleensä vakioaikaylivirtasuojilla. Näiden asetteluarvot valitaan pienimmän johtolähdössä esiintyvän oikosulkuvirran mukaan. Ennen pienvoimalan verkkoon liittämistä on varmistuttava, että voimalan viereiseen vialliseen johtolähtöön syöttämän vikavirran arvo ei ylitä terveen lähdön suojauksen asetteluarvoa. Päinvastaisessa tapauksessa terveen lähdön suojaus toimii erottaen kyseisen lähdön turhaan verkosta.

Hankalin tilanne on lähellä sähköaseman kiskostoa tapahtuva 3-vaiheinen oikosulku. Jos samaan johtolähtöön liitettyjen pienvoimaloiden yhteenlaskettu teho pysyy riittävän alhaisena, suojauksen selektiivisyys ei ole vaarassa. Tilanteen ollessa toinen, voimalat voidaan liittää jakeluverkkoon vain, jos ylivirtasuojauksen kykenee havaitsemaan vikavirran suunnan (suuntareleet) ja siten estämään terveiden johtolähtöjen erottamiset.

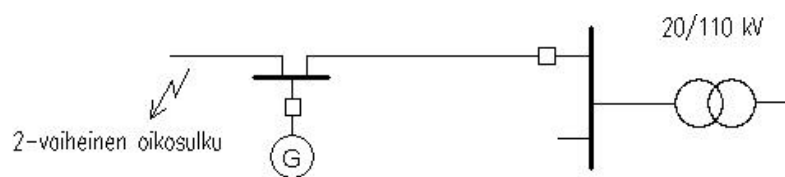


Kuva 5. Terveiden lähtöjen ei-toivottu erottaminen. Jos pienvoimalan vikapaikkaan syöttämä vikavirta  $I_k$  ylittää terveen lähdön suojausasetteluarvon, tapahtuu turha verkosta erottaminen. Tilanteeseen on kiinnitettävä erityistä huomiota, jos pienvoimalan kanssa samalla johtolähdöllä on myös kuluttajia.

Esimerkki. Johtolähdön ylivirtasuojan asetteluarvo on 500 A. Oletetaan, että ko. johtolähdölle liitetyt pienvoimalat syöttävät vikatilanteessa nimellisvirrtaansa nähden 5-kertaisen vikavirran. Näin ollen samalle johtolähdölle saa liittää tuotantoa 100 A verran.

#### 4.2.3. Viallisen johtolähdön ylivirtasuojauksen toiminnan sekoittaminen

Kun suuritehoinen pienvoimala liitetään kauas sähköasemasta ja vika tapahtuu laitteiston lähellä samalla johtolähdöllä, voi verkon oikosulkuimpedanssi vian ja sähköaseman välillä muodostua paljon suuremmaksi kuin vian ja laitteiston välisen verkon oikosulkuimpedanssi. Tällaisessa tapauksessa voi sähköaseman vikapaikkaan syöttämä vikavirta pienentyä hetkellisesti verrattuna tilanteeseen, jolloin jakeluverkossa ei ole tuotantoa. Näin ollen johtolähdön suojaus toiminta voi hidastua.



Kuva 6. Johtolähdön suojaus sekoittaminen. Jos verkon oikosulkuimpedanssi vian ja sähköaseman välillä on paljon suurempi kuin vian ja voimalan välisen verkon oikosulkuimpedanssi, saattaa johtolähdön ylivirtasuojan näkemä vikavirta pienentyä. Tämän seurauksena suojaus toiminta hidastuu tai jopa estyy kokonaan.

Em. tilanteessa pienvoimalan suojaus on ensin erotettava laitteisto verkosta. Näin johtolähdön omille suojalaitteille luodaan edellytykset säilyttää herkkyys. Haittapuolena tässä on se, että vian eliminointiin tarvittava aika pidentyy. Tilannetta helpottavat uudet nopeat releet. Vaihtoehtoisesti pienvoimala voidaan liittää omalla johtolähdöllä suoraan sähköasemaan, jolloin edellä mainittua ongelmaa ei ole.



#### 4.2.4. Kanta- ja siirtoverkon viat

Vian (oikosulku tai maasulku) sattuessa sähköasemaa syöttävällä siirtojohdolla silloin, kun siirtoverkkoa käytetään rengasverkkona, ei aiheuta ongelmia. Viallisen johdon erottamisen seurauksena ei ole pienvoimalan yksin syöttämä verkko. Näin ollen jakeluverkossa olevien voimaloiden ei tarvitse erota verkosta.

Kun siirtoverkko on säteittäiskäytössä ja vika syntyy siirtojohdolla, jää jakeluverkossa olevat pienvoimalat aina siirtoverkon suojauksen toiminnan seurauksena yksin syöttämään verkkoa. Tässä tilanteessa jakeluverkkoon liitetyn pienvoimalan on erottava verkosta. Erottaminen voi tapahtua monilla perusteilla: lähes poikkeuksetta verkon kuormitus on niin suuri, että pieni pienvoimala eroaa verkosta ylikuormituksesta tai jännite- ja taajuusvaihteluiden seurauksena.

#### 4.2.5. Sähköasemaviat

Sähköasemien päämuuntaja ja yläjännitepuolen kiskovioissa suojareleet avaavat syöttävien johtojen katkaisijat. Tämän seurauksena on aina saareke sekä 110 kV verkon rengas- että säteittäiskäytön tapauksissa. Pienvoimalan suojauksen on toimittava ja erotettava laitteisto verkosta.

Keskijännitekiskon oikosulkuviassa johdolla oleva pienvoimala täytyy erottaa vikapaikasta joko sähköaseman kiskosuojan toimesta avaamalla keskijännitelähdön katkaisija tai pienvoimalan oman suojauksen toimesta. Johdolla oleva pienvoimala ei saa syöttää niin suurta alkuoikosulkuvirtaa, että se estäisi ylivirtalogiikkaan perustuvan kiskosuojan toiminnan. Tilanne voitaisiin periaatteessa hoitaa käyttämällä suunnattua ylivirtarelettä pienvoimalan lähdössä. Suunnatun releen mittausaika on kuitenkin huomattavasti pidempi kuin vakioaikaylivirtareleen, joten kiskosuojan aikahidastusta joudutaisiin pidentämään. Aikahidastuksen kasvattaminen muutamilla kymmenillä millisekunneilla lisää oikosulkuvalokaaren tuho vaikutusta jo niin paljon, että suuntareleen käyttö ei ole toivottavaa. Johtolähdön ylivirtareleen asetelusta seuraa siten rajoitus johdolla olevalle generaattoriteholle.

Päämuuntajan alajännitepuolella tai keskijännitekiskostossa tapahtuvassa maasulussa pienvoimalan ei tarvitse erota verkosta, jos maasulkusuojaus on hälyttävä. Tilanne muuttuu, jos suojaus on laukaiseva. Tällöin seurauksen on saareke ja pienvoimalan on erottava verkosta

#### 4.2.6. Keskijännitejohtojen viat

Kun maasulku sattuu jollakin muulla kuin pienvoimaa sisältävällä keskijännitelähdöllä, ei pienvoimalan tarvitse erota verkosta. Terveiden lähtöjen turhat erottamiset maasuluissa on jo estetty suuntareleillä.

Pienvoimalan kanssa samalla johtolähdöllä tapahtuvassa maasulussa on laitteiston suojauksen toimittava, jos verkon maasulkusuojaus on laukaiseva. Tällöin ei ole vaaraa, että pienvoimala jäisi yksin syöttämään verkkoa. Jos kyseisellä lähdöllä on käytössä pikajälleenkytkentä, tulisi laitteiston erota verkosta jännitteettömänä väliaikana eli alle sekunnin kuluttua maasulun syntymisestä.

Pienvoimalan liittymispisteen takana sattuvien maasulkujen varalta olisi hyvä, jos pienvoimalalla olisi myös oma maasulkusuojaus. Näin laitteiston liittymispisteen suojaus toimisi ennen sähköaseman lähdön suuntareleen laukaisevaa toimintaa.

Viereisellä johtolähdöllä tapahtuvassa oikosulussa ei sen keskijännitelähdön ylivirtasuojaus mihin pienvoimala on liitetty (terve lähtö) saa toimia. Keskijännitelähdön ylivirtareleen aikahidastus on normaalisti alle sekunnin mittainen. Jos pienvoimala kestää tämän ajan mittaisen oikosulun ilman stabiilisuuden menetystä, ei sen tarvitse erota verkosta. Vaihtoehtoisesti pienvoimala voi menettää stabiilisuutensa ja sen on erottava verkosta.

Kun oikosulku tapahtuu pienvoimalan kanssa samalla johtolähdöllä, toimii sähköasemalla kyseisen lähdön ylivirtasuoja. Jottei pienvoimala jäisi yksinään syöttämään vikapaikkaa, tulee myös pienvoimalan liittymispisteen oikosulkusuojauksen toimia. Pienvoimalan liittymispisteen takana sattuvissa oikosuluissa on liittymispisteen oikosulkusuojauksen luonnollisesti toimittava aina ennen sähköaseman lähdön ylivirtareleen laukaisua.

#### **4.2.7. Pienjänniteverkon viat**

Keskijänniteverkossa ja 110 kV verkossa sattuvat viat vaikuttavat myös pienjänniteverkkoon liitettyihin pienvoimaloihin. Sen sijaan pienjänniteverkon viat eivät heijastu ylemmille jännitetasoille (olettaen, että suojaus on selektiivinen).

Jos vika sattuu muuntamon alueella muulla kuin pienvoimalan liittymisjohdolla, ei pienvoimalan tarvitse erota verkosta. Sen sijaan muuntajassa, muuntamon pienjännitekeskuksessa ja pienvoimalan liittymisjohdoilla sattuvissa vioissa on ylivirta- tai muun suojauksen toimittava.

### **4.3. Pienvoimalan perussuojaus**

#### **4.3.1. Yleistä**

Edellisen osion vikatapausten lisäksi alussa mainittiin, että "Suojauksen on erotettava pienvoimala verkosta, jos verkon jännite ja taajuus poikkeavat normaalista". Tämä vaatimus suojaa asiakkaiden laitteita epänormaaleilta jännitteiltä ja taajuuksilta. Vastaavasti, jos käytön aikana jännite katoaa yhdestä tai kahdesta vaiheesta, pitää suojauksen toimia. Näin ollen pienvoimalalta vaadittavat suojat ovat seuraavan taulukon mukaiset.

Taulukossa mainittujen suojien lisäksi, on pienvoimalalla ja voimakoneella omat suojalaitteensa, joita ei tässä ohjeessa kuitenkaan käsitellä. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi edellisessä taulukossa mainittuja erityyppisiä releitä sekä tehdään katsaus täydentäviin lisäsuojiin.

Taulukko 2. Taulukon merkkien selitykset: MS = maasulku, OS = oikosulku,  $U_0$  = jännitteen nollakomponentti,  $x$  = perussuoja.

| Suojatyyppi   | 3U <> | f <> | I > | $U_0$ >   |
|---|-------|------|-----|-----------|
| Yksin syötön esto   | X     | X    |     |           |
| OS-suoja verkon OS vastaan                                    |       |      | X   |           |
| MS-suoja kj-verkon MS vastaan                                 |       |      |     | lisäsuoja |
| OS-suoja liittymispisteen takaisia vikoja vastaan             |       |      | X   |           |
| Vajaanapainen kytkentä  | X     |      |     |           |
| Laitteiden suojaus epänormaalilta jännitteeltä ja taajuudelta | X     | X    |     |           |

#### 4.3.2. Jännite- ja taajuusreleet

Perusvaatimuksena relesuojaukselle ovat siis yli- ja alijännitereleet jokaiselle vaiheelle (3U> ja 3U<) sekä yksivaiheiset yli- ja alitaajuusreleet (f> ja f<). Näiden asetteluarvot on valittava siten, että suojaus toimii, jos jännitteelaatu kuluttajilla ei ole hyväksyttävien rajojen sisällä (seurausta yleensä verkon häiriöstä, saareketilanteesta tai pienvoimalan epänormaalista toiminnasta). Jännitereleet tarvitaan jokaiselle vaiheelle, jolloin vältetään epäsymmetrisiä syöttötilanteita.

Ylijännitereleen toiminta-ajan on oltava pidempi kuin päämuuntajan jännitesäätäjän toiminta-ajan. Ylijänniterele on erittäin tärkeä itse voimalalle, jo 15 % ylijännite voi helposti aiheuttaa vaurioita eri komponenteissa. Tästä syystä ylijännitereleellä on syytä käyttää momenttiporrasta. Alijännitereleellä käytetään sopivaa aikahidastusta, jotta nopeasti ohimenevät jännitekuopat eivät aiheuttaisi pienvoimalan verkosta erottamista.

Alijänniterele toimii myös varasuojana. Kun vika syntyy säteittäisjohdolla, johon on liitetty epätahtigeneraattori ja verkon haltijan suojaus toimii erottamisen generaattorin, voi generaattorin syöttämä vikavirta heiketä niin nopeasti, että generaattorin ylivirtasuojauks ei toimi. Erityisesti jos muodostuneessa saarekkeessa on kondensaattoreita, voi pienvoimalan vikavirran syöttö jatkua niin kauan kunnes alijännitereleet toimivat. Tämän takia ei alijännitereleen aikahidastusta kannata kasvattaa liian suureksi.

Taajuusreleet suojaavat pienvoimalaa taajuusvaihteluiden aiheuttamilla termisiltä ja mekaanisilta rasituksilta. Alitaajuus saattaa haitata pienvoimalan jäähdytystä ja aiheuttaa voimakonetta rasittavia värähtelyjä.

*Taulukko 3. Pienvoimalalta vaadittavat suojarahit, joiden avulla suojataan sekä verkkoa että pienvoimalaa. Esitetyt asetteluvarvot ovat tarkoitettu pienjänniteverkkoon ja ovat vain suuntaa-antavia, varsinkin toiminta-ajat on aina päätettävä tapauskohta isesti.*

| RELE       | ASETTELUARVO | TOIMINTA-AIKA |
|------------|--------------|---------------|
| Ylijännite | 230 V + 10 % | 50 ms         |
|            | 230 V + 6 %  | 30 – 60 s     |
| Alijännite | 230 V – 10 % | 2 – 10 s      |
| Ylitaajuus | 51 Hz        | 200 ms        |
| Alitaajuus | 47 Hz        | 200 ms        |

Melko varmasti voidaan sanoa, että pienvoimala, joka on varustettu em. suojuuksella, eroaa verkosta hyvin lyhyen viallisessa saarekkeessa olon jälkeen. Sitä ei kuitenkaan voida estää, etteikö se hyvin harvoissa tilanteissa voisi säilyttää verkosta erotettua tervettä verkon osaa jännitteisenä. Tätä varten on tietyissä tilanteissa käytettävä lisäsuojausta, joka estää yksin syötön.

#### 4.3.3. Ylivirtasuojaus

Oikosulkusuojaukseen käytetään keskijänniteverkkoon liitetyillä pienvoimaloilla katkaisijoilla varustettuja vakioaikaylivirtareleitä tai pienjänniteverkkoon liitetyillä voimaloilla myös sulakkeita. Tavoitteena on, että suojaus ei tekisi virheellisiä laukaisuja. Virheellinen laukaisu voi johtua verkon vioista, vikojen jälkeisissä transienttijaksoista tai pienvoimalan säätöjaksoista.

Ylivirtareleen momenttilaukaisun aika-asettelun on hyvä olla niin pieni kuin mahdollista. Jos pienvoimalan käynnistysvirtaa ei rajoiteta mitenkään voi asetteluarvoa joutua muuttamaan. Sulakesuojausta voidaan käyttää pienjänniteverkkoon liitetyillä voimaloilla. Tällöin on hyvin epätodennäköistä, että kytkentävirta aiheuttaisi sulakkeen palamisen, jos sulakkeen nimellisvirraksi valitaan pienvoimalan nimellisvirta tai heti seuraava suurempi standardien mukainen sulakekoko.

Normaalisti pienjänniteverkossa suojaus on mitoitettu toimimaan pienimmästä verkossa esiintyvässä vikavirrasta niin, että kosketusjännitesuojauksvaatimukset toteutuvat. Ongelmalliseksi suojauksen tekee yleensä pienvoimalan oikosulkuvirran riittämättömyys nopeaan syötön poiskytkentään tilanteissa, joissa yleinen jakeluverkko ei syötä vikavirtaa. Niinpä pienen pienvoimalan tapauksessa ei aina voida toteuttaa määräysten mukaista syötön automaattista poiskytkentää käyttämällä ylivirtasuojia. Tällöin suojaukseen tulee käyttää muita suojalaitteita (esimerkiksi alijänniterele).

#### 4.4. Pienvoimalan lisäsuojaus

##### 4.4.1. Saareke / Yksin syötön estosuojia

Erityistä lisäsuojausta voidaan tarvita tilanteissa, joissa verkkojännite katoaa osittain tai kokonaan ja pienvoimala jää yksinään syöttämään ver-

konosaa. Tällöin on vaarana, että verkkojännitteen palautuessa joko jälleenkytkennän tai muun kytkentätapahtuman seurauksena syntyy tahdistamaton kytkentä. Vaaratilanteita voi syntyä myös verkon kanssa tekemisissä oleville ihmisille, jos jännitteettömäksi luullussa verkossa onkin takajännite. Yksin syötön estosuojauksella on erityisen tärkeää tahtigeneraattorilaitteiston tapauksessa, mutta myös muun tyyppisillä generaattorilaitteistoilla sitä on hyvä käyttää.

Yksin syötön estosuojauksella voidaan toteuttaa monilla eri tavoilla. Helpoin tilanne on silloin, kun pienvoimalan teho on niin pieni, että paikallista kuormaa joudutaan aina syöttämään myös yleisestä jakeluverkosta päin (huipunleikkauslaitteistot). Tällöin suojaus voidaan toteuttaa takatehoreleillä. Yksin syötön aikana liittymispisteestä alkaa virrata tehoa myös jakeluverkkoon päin, jolloin rele antaa katkaisijalle laukaisukäskyn. Takatehoreleen aikahidastus voidaan asettaa hyvin lyhyeksi, joten tältäkin kannalta tapaus on helppo.

Kun pienvoimala syöttää normaalikäytössä tehoa myös yleiseen jakeluverkkoon, ei voida käyttää takatehoreleitä. Tällöin suojaus yleensä perustuu pienvoimalan syöttämän kuorman muutoksen aikaansaamiin ilmiöihin. Kuorman muutostilanteet voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

- a) Kuorma voi kasvaa tai laskea hieman, mutta säilyy kuitenkin sen suuruisena, että pienvoimala voi helposti sitä syöttää. Tilanne voi olla myös sellainen, että kuorma ei muutu ollenkaan.
- b) Kuorma kasvaa suuremmaksi kuin mahdollinen tuotanto, jolloin pienvoimala pyrkii ylläpitämään verkossa kapasiteettinsa mahdollistamaa jännitettä ja virtaa. Tällaisessa tilanteessa suojaus voi perustua ylikuormitus- tai alitaajuusreleisiin, mutta niiden aika-asettelussa on oltava hidastusta, jotta vältytään transienttien aiheuttamilta turhilta erottamisilta. Näin ollen niitä ei voida käyttää, jos vaaditaan nopeaan erottamista.
- c) Kuorma kasvaa moninkertaiseksi tuotantoon verrattuna, jolloin yksin syöttö on helpointa havaita. Tunnistavana releenä voi olla ylikuormitus-, alitaajuus-, ylivirta- tai alijänniterele. Myöskään tässä tapauksessa ei saavuteta nopeaa erottamista.

Tilanne c) tuo mukanaan muutamia ongelmia, mutta niistä selvittää yleensä yhdellä tai useammalla "perinteisellä" suojalaitteella. Tilanne b) on asenteen verran hankalampi, mutta siihenkin on olemassa sopivia suojalaitteita. Suurimman ongelman molemmissa tilanteissa tuo nopean erottamisen tarve, jos pienvoimalan johtolähdöllä on käytössä jälleenkytkentäreleistö. Tilanne a) on kaikista hankalin. Erityisesti silloin, kun kuorman muutos on erittäin pieni, on suuri vaara siihen, että jälleenkytkennän tapahtuessa pienvoimala on yhä verkossa tai se jatkaa toimintaansa saarekkeessa.

Tilannetta a) ja pienvoimalan nopeaa erottamista varten on kehitelty useita erityyppisiä suojareleitä. Releiden toiminta voi perustua muun muassa: taajuuden muutosnopeuteen ( $df/dt$ ), verkon impedanssin ( $Z$ ) muutokseen tai esim. jännitteen myötäkomponenttiin ( $U_1$ ).

Yksin syötön estosuojauksella on tarkoitettu täydentäväksi suojaksi sekä verkon haltijaa että pienvoimalaa varten. Jos yksin syötön estosuojauksella toimii halutulla tavalla ei verkon käyttö ja henkilökunnan työturvallisuus vaarannu,

samalla välttään mahdollisen tahdistamattoman verkkoon kytkennän aiheuttamilta laitevaurioilta. Jokainen jakeluverkkoon liitettävän pienvoimalan tapaus on tutkittava tarkkaan, jolloin voidaan valita tilanteeseen sopivin suojausrele.

Käytännössä toimintavarmuutensa on osoittanut alijänniterele, joka mittaa jännitteen myötäkomponenttia. Relettä käytetään pienvoimalan nopeaan verkosta erottamiseen, jolloin jälleenkytkentä on mahdollinen. Koska toiminta on osoittautunut varmaksi, vältetään pienvoimalan ei-toivottuja verkosta erottamisia. Myötäjänniterele on aseteltava niin, että se laukaisee katkaisijan kaikissa verkon vioissa, joista seurauksen on yksin syöttö. Useissa tapauksissa hyvä asetteluarvo myötäjännitereleelle on noin 70 % nimellijännitteestä.

Myös taajuuden muutosnopeuteen perustuvilla suojoilla ehkäistään tehokkaasti tahdistamattomia verkkoon kytkentöjä. Suojille ovat kuitenkin ominaisia turhat verkosta erottamiset. Niinpä näiden suojojen asetteluarvojen valinta on huomattavasti hankalampaa, pyrittäessä varmaan suojaukseen joka ei tee turhia laukaisuja.

Myöskin maasulkusuojia voidaan käyttää lisäsuojauksessa (lähinnä nollajänniterele). Nollajänniterele on tarkoitettu täydentämään suojausta.

#### 4.4.2. Nollajänniterele

Keskijännitejohdolla tapahtuvassa maasulussa voi jakeluverkossa oleva pienvoimala ylläpitää valokaarta vikapaikassa vaikka kyseinen johto erotettaisiin sähköasemalta. Tämä aiheuttaa ongelmia johdon jälleenkytkennän ja maasulun paikantamisen kanssa.

Koska pienjänniteverkossa oleva pienvoimala ei syötä maasulkuvirtaa, on maasulku havaittavissa vain nollajännitereleellä ( $U_0$ ). Nollajännitettä ei kuitenkaan voida mitata pienjännitepuolelta, joten rele on sijoitettava muuntajan yläjännitepuolelle. Tämä tarkoittaa sitä, että pienjännitelaitteiston tapauksessa rele on verkonhaltijan laitteiston puolella. Myöskään suoraan keskijänniteverkkoon liitetty käyttömaadoittamaton pienvoimala ei havaitse maasulku ilman nollajänniterelettä. Nollajänniterelettä voidaan pitää täydentävä suojausena. Verkon haltijan on tapauskohtaisesti päätettävä tarvitaanko sitä vai ei.

#### 4.4.3. Suuntareleet

Jos pienvoimalan syöttämä ylivirta aiheuttaa terveiden lähtöjen turhia erottamisia verkosta sekoittamalla verkon ylivirtasuojauksella, voidaan verkon ylivirtasuojauksessa käyttää suunnattuja ylivirtareleitä. Suuntareleen käytölle saadaan yksinkertainen ehto: Jos terveen lähdön ylivirtareleen asetteluarvo on aina suurempi kuin pienvoimalan alkukoosulkuutilan aikana syöttämä vikavirta, ei suuntarelettä tarvitse käyttää. Suuntareleet ovat kalliita komponentteja ja niiden niin sanottu "rele aika" on pidempi kuin suuntaamattoman ylivirtareleen. Näin ollen myös sähköaseman kiskosuojan aika-asetteluja olisi vastaavasti pidennettävä. Koska vikatapauksessa syntyvien valokaarituhojen laajuus on riippuvainen jo kymmenistä millisekunneista, ei sähkölaitteisto voi pidentää kiskosuojojen toiminta-aikoja entisestään.

Tämän johdosta tilanne muuttuukin toiseksi. Nyt ei enää saada ehtoa suuntareiden käytölle, vaan samalle johtolähdölle liitetyn yhden pienvoimalan tai -ryhmän suurimmalle mahdolliselle nimellisteholle (vikavirta verrannollinen nimellisvirtaan).

#### 4.4.4. Vianilmaisimet

Jakeluverkossa voi olla käytössä vianilmaisimia, joiden avulla vika saadaan paikannettua helpommin. Pienvoimalan syöttämä vikavirta voi aiheuttaa myös vianilmaisimien turhia toimintoja. Jos vianilmaisimen asetteluarvo on pienempi kuin pienvoimalan syöttämä vikavirta, voi väärä vianilmaisimien havahtua ja vian paikantamiseen tarvittava aika pidentyä.

Vianilmaisimien havahtumisvirtarajat eivät ole kovinkaan tarkkoja, joten vianilmaisimen voidaan olettaa toimivan silloin, kun vikavirta on  $\pm 10\%$  havahtumisvirrasta. Raja pienvoimalan suurimmalle sallitulle koolle voidaan laskea samalla tavoin kuin suuntareiden tapauksessa. Vianilmaisimien toiminnan sekoittaminen ei ole kuitenkaan niin vakava asia, jotta tällainen kokoraja olisi järkevää tehdä. Pääasia on, että mahdolliset vaikutukset tiedetään ja näin ollen niihin voidaan varautua.

## YHTEENVETO

Pienvoimaloiden liittämisesä jakeluverkkoon tärkeintä on hyvä etukäteissuunnittelu, mikä vaatii yhteydenpitoa tuottajan ja verkonhaltijan välillä. Mitä aikaisemmin ennen varsinaista toteutus ensimmäinen yhteydenotto on ollut, sen parempi. Molempien osapuolten on tiedettävä pelisäännöt, asiaan liittyvät ongelmat ja niiden ratkaisutavat.

Tärkeimmät huomioon otettavat seikat ovat seuraavat:

1. **Pienvoimaloiden luokittelu ja tehonlähde.** Tunnistamalla kunkin voimalan tapauksessa, että mihin luokkaan se kuuluu ja mitä erityisominaisuuksia sillä on, helpotetaan asian käsittelyä. Eri luokille voidaan selvästi asettaa omia vaatimuksia. Tuulivoimala toimii saatavilla olevan vaihtelevan tuulen mukaan, kun taas lämpövoimaan perustuvat pienet kaasuturbiinilaitteistot toimivat melko tasaisella kapasiteetilla.
2. **Generaattorilaitteiston tyyppi.** Tyypillä on suora yhteys verkkovaikutuksiin ja suojauksen toimintaan. Onko kyseessä esim. tahti-, epätahti-generaattori, taajuusmuuttajakäyttö vai suoraan verkkoon kytkettävä laitteisto.
3. **Turvallisuus.** Vaaratilanteita syntyy, jos laitteisto jää yksin syöttämään verkkoa ja halutaan tehdä verkkotöitä ko. johdolla. Vaikka johto erotetaan yleisestä verkosta, se voi silti olla toisesta suunnasta pienvoimalan syöttämä ja siten jännitteinen. Em. syystä kaikki jakeluverkossa toimivat laitteistot tulisi olla verkon haltijan tiedossa. Pienvoimalaa syöttäviin johtolähtöihin ja muuntamoihin olisi syytä laittaa varoituskylltti esim. "Takajännitevaara" tai "Varo pienvoimala". Pienvoimala on pystyttävä erottamaan verkosta jakeluverkon haltijan toimesta. Erotuslaite on voitava lukita auki-asentoon.
4. **Sähkönlaatu.** Jännitteen laadun on pysyttävä hyvänä. Jännitetason muutokset on yleensä helposti hallittavissa. Sen sijaan nopeat muutokset ja kytkentäilmiöt kuten välkyntä ja erilaiset virtapiikit voivat johtaa tarkistamattomina ongelmatilanteisiin. Molemmissa tapauksissa on tärkeää, että pienvoimalan liittymispiste on sähköisesti tarpeeksi jäykkä.
5. **Verkkoon kytkeminen.** Laitteiston verkkoon kytkeminen saa aiheuttaa enintään 4 % jännitemuutoksen.
6. **Vikavirtatasojen kasvu.** Verkon eri komponenttien oikosulkukestoisuus tai katkaisijoiden katkaisukyky eivät saa ylittyä.
7. **Suojaus.** Verkon kanssa rinnankäyvän pienvoimalan perussuojaus käsittää ainakin jännite- ja taajuusreleet sekä oikosulkusuojan. Lisäksi tapauskohtaisesti suojausta tulee tarvittaessa täydentää yksin/saareke syötön estämiseksi.
8. **Verkostolaskenta.** On tärkeää, että pienvoimalat otetaan mukaan tehonjako- ja oikosulkuvirtalaskentaan mukaan.



9. **Yliaallot.** Yliaalloille on selvät raja-arvot. Kokonaissärön tulee olla alle 5 %. Yliaaltovirrat  $I_h$  suhteessa referenssivirtaan  $I_R$  (yleensä liittymän nimellisvirta) eivät saa ylittää seuraavan taulukon arvoja

| Yliaallon järjestys-<br>luku $h$ | Parittomat yliaaltovirrat<br>$I_h$ , prosenttia $I_R$ :sta | Parilliset yliaaltovirrat<br>$I_h$ , prosenttia $I_R$ :sta |
|----------------------------------|--|--|
| $h < 11$                         | 4,0 %  | 1,0 %  |
| $11 \leq h < 17$                 | 2,0 %  | 0,5 %  |
| $17 \leq h < 23$                 | 1,5 %  | 0,4 %  |
| $23 \leq h < 35$                 | 0,6 %  | 0,2 %  |
| $35 \leq h < 50$                 | 0,3 %  | 0,1 %  |

10. **Sopimukset.** Ehdoista pienvoimalan liittämiseksi yleiseen jakeluverkkoon on aina sovittava verkonhaltijan kanssa etukäteen. Verkon kanssa rinnankäyvien voimaloiden suunnitelmat, joihin sisältyy teknisten tietojen lisäksi selvitykset verkkoon liittymisautomaatiikasta ja suojauksesta, sekä asiakkaan verkon pää- ja suojauskaaviot, tulee hyväksyttää jakeluverkonhaltijalla ennen laitteiston käyttöönottoa.

## LÄHDELUETTELO

- CIREC. Dispersed generation. 1999. Preliminary report of CIREC working group WG04.
- CIREC. Guidelines for grid connection of wind turbines. 1999. Report.
- DEFU. Relæbeskyttelse ved decentrale decentrale produktionsanlæge med synkrongeneratorer. 1995. Teknisk rapport 293, 2. udgave.
- Electricity Association. Recommendations for the connection of embedded generating plant to the public electricity supplier's distribution systems. 1991. Engineering recommendation G.59/1.
- ERA. Connection protection and control of embedded generators. Birmingham. September 1998. Course notes.
- Public Service Commission. New York State Standardized interconnection requirements, application process, contract & application forms for new distributed generators, 300 kilovolt – amperes or less, connected in parallel with radial distribution lines. 2000.
- Nätplaneringskommitté. Anslutning av mindre produktionsanläggningar till elnätet. 1999. Arbetsgrupp rapport.
- Siltanen Lauri. Sähköntuotantolaitteistojen liittäminen jakeluverkkoon. 1999. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.
- SINTEF Energiforskning AS. Retningslinjer for nettilkobling av vindkraftverk. 1999. Teknisk rapport.
- Suomen standardisoimisliitto. SFS-EN 50160, Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet. 1995.
- Suomen standardisoimisliitto. SFS käsikirja 139, Pienjännitesähköasennukset SFS 6000. 1999.
- Sähköenergialiitto ry. Jakeluverkon sähkön laadun arviointi. Helsinki, 1996. Julkaisusarja.
- Sähköenergialiitto ry. Loistehon kompensointi ja yliaaltojen rajoittaminen. Helsinki. Julkaisusarja.
- Sähkötieto ry. ST kortisto 52.40 Pienjännitteisen moottorigeneraattorin liittäminen sähkölaitteistoon. 1997.