

Hannu Pekkonen

Sähkön mikrotuotanto –

häiriöt ja suojaus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri AMK

Sähkötekniikka

Opinnäytetyö

27.5.2013

Tekijä Otsikko	Hannu Pekkonen Sähkön mikrotuotanto - häiriöt ja suojaus
Sivumäärä Aika	29 sivua 27.5.2013
Tutkinto	insinööri AMK
Koulutusohjelma	sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka
Ohjaaja	lehtori Osmo Massinen
<p>EU:n ilmasto- ja energiasäännösten asettamien tavoitteiden mukaisesti Suomen tulee lisätä uusiutuvien energialähteiden osuutta kaikista energialähteistä 38 prosenttiin nykyisestä 30 prosentista. Tämä on yksi syy, miksi sähkön mikrotuotanto on Suomessa kasvussa.</p> <p>Tässä insinööriyössä on selvitetty, mitä tarkoitetaan sähkön mikrotuotannolla ja mitä asioita on otettava huomioon mikrotuotantolaitosta perustettaessa. Näiden lisäksi tarkasteltiin, minkälaisia häiriöitä mikrotuotantolaitoksessa voi olla ja miten niiltä pystytään suojautumaan.</p> <p>Työssä käsiteltiin tarkemmin aurinkoenergiaa ja tuulivoimaa sähkön mikrotuottajina. Mikrotuotantolaitoksen verkkoon kytkeytymisen eri vaatimuksia käsiteltiin yhdessä sähkön laadun ja sähköturvallisuuden kanssa. Sähköverkon ja mikrotuotannon vioista esiteltiin yleisimmät ja suojauksessa paneuduttiin pääasiassa relesuojaukseen.</p> <p>Mikrotuotantolaitosta suunniteltaessa on otettava huomioon eri säädetyt lait sekä standardit, jotka velvoittavat asianmukaiseen suojaukseen, jotta mikrotuotantolaitos voisi toimia verkossa moitteettomasti.</p>	
Avainsanat	sähkön mikrotuotanto, mikrotuotantolaitos, viat, suojaus

Author Title	Hannu Pekkonen Microgeneration – Fault Situations and Protection
Number of Pages Date	29 pages 27 May 2013
Degree	Bachelor in Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructor	Osmo Massinen, Senior Lecturer
<p>The European Union has set long-term energy and climate objectives. According to these objectives Finland should achieve a national target in which the renewable energy objective is that renewable consumption should be 38% of final consumption instead of 30 %. This is one of the reasons why microgeneration production in Finland is on the rise.</p> <p>The purpose of this thesis was to define microgeneration and to describe what issues should be considered in setting up a small scale electricity production. This thesis gathers most common network protecting problems and the solutions how to protect against them and other fault situations.</p> <p>Solar energy and wind power are presented in this thesis. The different requirements of switching a microgeneration into network are also presented together with the quality of electricity and the electrical safety issues. The most common faults in the microgeneration production are taken into consideration. Protection by using relays is also examined.</p> <p>There are different kinds of laws and standards which should be taken into consideration when setting up a microgeneration production. When these laws are followed, the production operates properly in the network.</p>	
Keywords	Electrical microgeneration, microgeneration, fault, protection

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Mikrotuotanto	1
2.1	Mikrotuotannon määrittely	1
2.2	Aurinkoenergia	2
2.3	Tuulivoima	2
2.4	Biovoimalat	5
3	Sähköverkon ja mikrotuotannon komponentit	5
3.1	Aurinkoenergialaitoksen komponentit	7
3.2	Tuulivoimalaitoksen komponentit	8
4	Mikrotuotantolaitoksen kytkeytyminen verkkoon	9
4.1	Yleisiä vaatimuksia verkkoon liittämiseksi	10
4.2	EMC-vaatimukset	12
4.3	Sähkön laatu	13
4.4	Sähkötyöturvallisuus ja sähköturvallisuus	14
4.5	Laitoksen erottaminen	15
5	Sähköverkon ja mikrotuotannon viat	16
5.1	Oikosulku	16
5.2	Maasulku ja johdinkatkeamat	16
5.3	Nopeat jännitemuutokset ja välkyntä	17
5.4	Epäsymmetria	17
5.5	Harmoniset ja epäharmoniset yliaaltojännitteet	18
5.6	Taajuusvaihtelut	18
5.7	Jännitekuopat ja lyhyet keskeytykset	19
6	Mikrotuotantolaitoksen suojaus	19
6.1	Suojareleet	19
6.1.1	Jännitereleet	20
6.1.2	Taajuusreleet	21
6.1.3	Virtareleet	21
6.1.4	Suunta- ja tehoreleet	22
6.1.5	Differentiaalireleet	22

6.1.6	Distanssireleet	23
6.1.7	Epäsymmetriareleet	23
6.1.8	ROCOF-rele	23
6.1.9	Muut suojalaitteet	24
6.2	Jälleenkytkennät	25
7	Lopuksi	25
	Lähteet	27

1 Johdanto

Kuluttajien halu pienentää sähkölaskuaan sekä ympäristötietoisuuden lisääntyminen yhdessä pienten energiantuotantolaitosten hintojen halpenemisen kanssa ovat lisänneet kuluttajien kiinnostusta sähkön mikrotuotantoon. Suunniteltaessa mikrotuotantolaitoksen liittämistä yleiseen sähköverkkoon ja käytettäessä sitä rinnan yleisen sähköverkon kanssa, on ensisijaisen tärkeää varmistua siitä, että tuotantolaitos on turvallinen eikä aiheuta häiriöitä verkkoon ja siten mahdollisesti riko muiden sähkönkäyttäjien sähkölaitteita. Näistä syistä tuotantolaitoksia koskevat tietyt tekniset vaatimukset.

Tässä insinööriyössä selvitetään, mitä tarkoitetaan sähkön mikrotuotannolla ja tarkastella, mitä mahdollisia häiriöitä mikrotuotannossa ja sähköverkossa voi olla ja miten niiltä pystytään suojautumaan. Lisäksi selvitetään, mitä muita asioita on otettava huomioon suunniteltaessa mikrotuotantolaitoksen liittämistä yleiseen sähköverkkoon. Opinnäytetyössä myös käsitellään sähkön laatua ja sen huomioon ottamista mikrotuotantolaitosta suunniteltaessa.

2 Mikrotuotanto

2.1 Mikrotuotannon määrittely

Mikrotuotanto on sähköntuotantoa, joka on tarkoitettu ensisijaisesti kuluttajan omaan käyttöön ja syöttö verkkoon on satunnaista tai vähäistä. Mikrotuotantolaitokseksi katsotaan enintään 30 kVA:n laitokset. Tyypillisimmin ne ovat kooltaan 1 - 10 kW. Nämä mikrotuotantolaitokset yleensä sijaitsevat käyttökohteiden lähellä. Yleisimpiä mikrotuotantolaitoksia on tuulivoima, aurinkovoima ja pienbiovoima. Sähkömarkkinalaki määrittelee pienimuotoisen sähkötuotannon olevan sähköntuotantolaitoksen tai usean sähköntuotantolaitoksen muodostamaa kokonaisuutta, jonka teho on enintään 2 MVA.

Energiateollisuuden suosituksen mukaan yksivaiheiselle tuotannolle liittymisen maksimulakekooksi annetaan 16 A. Tämän avulla voidaan laskea yksivaiheisen mikrotuotantolaitoksen maksimiteho:

$$P = U I = 16 \text{ A} * 230 \text{ V} = 3\,680 \text{ W} = 3,68 \text{ kW}$$

Kuitenkin mikrotuotantolaitoksen nimellistehon suuruus on pienempi ja riippuu laitoksen ominaisuuksista. Liian suurta yksivaiheista tuotantoa verkkoon ei saa liittää, koska se aiheuttaa verkkoon epätasapainoa ja samalla vaarantaa verkon turvallisuuden ja luotettavuuden. Mikrotuotanto voidaan enintään liittää verkkoon $3 * 16 \text{ A}$:n sulakkeilla ja näin ollen mikrotuotantolaitoksen maksimitehoksi voidaan määritellä noin 11 kW.

Yksivaiheisen mikrotuotannon kytkemisestä verkkoon tulee mikrotuottajan ilmoittaa verkonhaltijalle mille vaiheelle yksivaiheinen tuotanto kytketään. Verkonhaltijalla tulee halutessaan olla mahdollisuus vaikuttaa vaiheeseen. [3; 4.]

2.2 Aurinkoenergia

Aurinkoenergia on lämpö- tai valoenergiaa säteilystä. Sitä voidaan hyödyntää joko passiivisesti tai aktiivisesti. Passiivisella tarkoitetaan, että auringon valo ja lämpö käytetään suoraan ilman erillistä laitetta ja aktiivisessa hyödyntämisessä auringonsäteily muunnetaan joko sähköksi aurinkopaneeleilla tai lämmöksi aurinkokeräimillä. Molemmat tavat ovat sopivia mikrotuotantoon. Aurinkoteknillisen yhdistyksen mukaan aurinkovoimalan tuotanto on optimisuuntauksella noin 900 - 1000 kWh vuodessa yhden kW:n paneelitehoa kohden. Siten esimerkiksi 1 kW:n laitos tuottaisi vuodessa noin 1 MWh sähköä. Tyypillisen asuinkiinteistöön liitetyn laitteiston koko on huipputeholtaan taas n. 1 - 2 kW.

Aurinkoenergian käytöllä on useita etuja. Sekä lämmitykseen ja sähköntuotantoon käytettävät laitteet ovat pitkäikäisiä ja ne voivat kestää jopa vuosikymmeniä. Niitä ei tarvitse juuri huoltaa ja niiden luomiseen käytettävät materiaalit ovat yleensä kierrätettäviä materiaaleja kuten kuparia ja alumiinia. Lisäksi aurinkolämpö sopii yhteen lähes minkä tahansa muun lämmitysjärjestelmän kanssa ja siten voidaan vähentää esimerkiksi öljylämmityksestä aiheutuvaa öljynkulutusta. [5.]

2.3 Tuulivoima

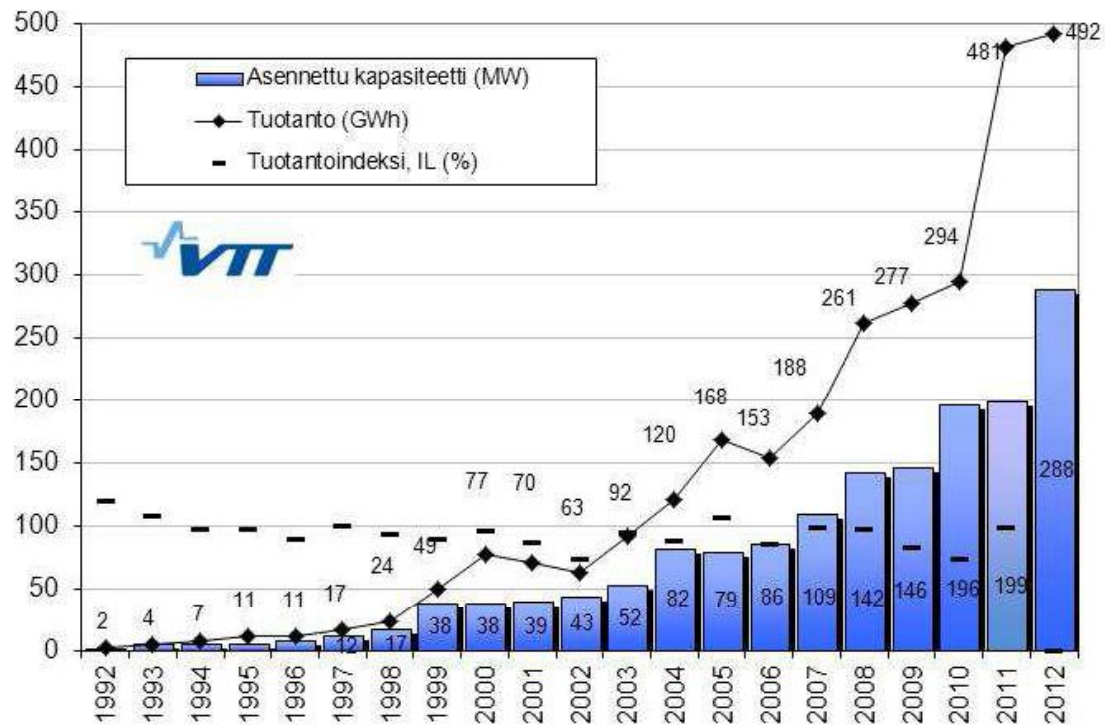
Tuulivoimalan toiminta perustuu tuulen liike-energian muuntamista tuuliturbiineilla sähköksi. Tuuli pyörittää tuulivoimalan siipiä, jotka taas pyörittävät akselia, joka on

kytkettynä generaattoriin. Generaattorissa pyörimisenergia muutetaan sähköksi, joka muuntajan kautta syötetään sähköverkkoon tai akkuihin. Verkkoon kytkettäessä käytetään erillistä verkkokytkintä. Verkkokytkin huolehtii syötettävän sähkönn jännite- ja taajuustasosta sekä liittymän suojauksesta.

Tuulivoimalan tuotanto on riippuvainen tuulen voimakkuudesta. Jotta tuulivoimala käynnistyisi pienellä tuulenopeudella, peruskuorman on oltava pieni. Erittäin kovassa tuulessa tuulivoimalan lapojen pyörimisnopeutta täytyy rajoittaa, jotta välttyttäisiin laitevaurioilta. Tuulen tehosisältö on verrannollinen tuulen nopeuden kolmanteen potenssiin, joten tuulivoimalaitoksen tuottama hetkellinen teho kasvaa jyrkästi tuulen nopeuden kasvaessa. Tuulivoima ei voi toimia ainoana energialähteenä epävakaisuutensa takia, sillä sen tuotanto vaihtelee jopa tunneittain tuulisuuden mukaan, siksi se tarvitsee muuta sähköntuotantoa tasaamaan kulutuksen ja tuotannon välisen eron. Tuulivoimala koostuu lavoista, konehuoneesta (mm. generaattori ja vaihteisto), muuntajasta, tornista ja perustuksista. [5.]

Suomessa oli vuoden 2012 lopussa 163 tuulivoimalaa, joiden yhteenlaskettu teho on 288 MW. Ne tuottavat noin 0,6 % Suomessa kulutetusta sähköstä [7]. Yhden laitoksen koko on keskimäärin 2 - 3 MW, mutta suurimmat voimalat yltyvät jo lähes 5 MW:iin. Suomen ilmasto- ja energiastrategiassa (2008) on asetettu tavoitteeksi tuulivoimalla tuotetun sähkönn osuuden nostaminen kuuteen terawattituntiin vuoteen 2020 mennessä. Tämä tarkoittaa sitä, että tuotantokapasiteettia olisi nostettava noin 2000 MW:iin tänä kyseisenä ajanjaksona. Kuvassa 1 esitellään Suomen tuulivoimatuotannon määrä vuositasolla (kts seuraava sivu). [8.]

Suomessa tuulivoimaloille soveltuvia alueita on erityisesti rannikolla, merialueilla ja Lapin tuntureilla. Suomessa tosin sääolot asettavat omat haasteensa tuulivoimaloiden toiminnalle, sillä kylmät ja jäiset olosuhteet vaativat omia teknisiä ratkaisujaan.



Kuva 1. Tuulivoimatuotanto Suomessa vuositasolla [7].

Pientuulivoimaloita on useita eri malleja käyttötarpeiden mukaan. Tavallisesti pientuulivoimala lataa akkuja, joista energia muutetaan invertterin avulla käyttö sähköksi. Käyttöjännite vaihtelee akkukäytössä 12 ja 360 V:n välillä ja akkukapasiteetti voi vaihdella runsaastikin. Esimerkiksi mökkijärjestelmässä tyypillinen akkukapasiteetti on noin 200 Ah, kun taas koko talon tai mökin sähköistämiseen tarvitaan tuhansia ampeeritunteja. Suuret tuulivoimalat liitetään yhä useammin sähköverkkoon. Tällöin käytetään erillistä verkkokytkintä, joka huolehtii syötettävän sähkö jännite- ja taajuustasosta sekä liittymän suojauksesta. Tuulivoimayhdistyksen mukaan alle 10 kW:n nimellistehoiset tuulivoimalat tuottavat yleensä 1 000 - 20 000 kWh vuodessa. [6; 9.]

Tuulivoima vaikuttaa ympäristöönsä aiheuttamalla äänihaittoja, maiseman muutoksia sekä aiheuttamalla mahdollisia haittoja alueen eläimistöön, kuten vaikkapa linnustoon. Tuulivoiman etuna on muun muassa se, ettei sen tuotannossa synny hiilidioksidi- eikä muitakaan päästöjä. [8.]

2.4 Biovoimalat

Bioenergiaa eli biopolttoaineita saadaan metsissä, soilla ja pelloilla kasvavista biomassoista sekä yhdyskuntien, maatalouden ja teollisuuden energian tuotantoon soveltuvisista orgaanisista kiinteistä, nestemäisistä ja kaasumaisista biojätteistä. Bioenergia on puhdasta ja ympäristöystävällistä uusiutuvaa kotimaista energiaa ja sen käytön lisääminen vähentää erityisesti kasvihuonekaasu- ja rikkipäästöjä ilmakehäämme.

Biokaasua voidaan tuottaa eloperäisestä aineesta, sitä syntyy esimerkiksi kaatopaikoilla jätteiden hajotessa sekä maataloudessa lietteestä. Sitä voidaan käyttää sekä sähkön että lämmön tuotannossa. Yleensä biokaasua tuottavat yksiköt ovat pieniä ja niissä käytetään usein kaasumootoreita sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Turvetta käytetään myös bioenergian tuottoon. Turvemaita Suomessa on yhteensä 9,4 miljoonaa hehtaaria ja näistä turvetuotannossa on noin 60 000 ha suota. Turve on hitaasti uusiutuvaa polttoainetta ja sitä käytetään alueittain paljon sekä lämmön että sähköntuotantoon taajamissa ja teollisuudessa. Noin 6 % energiantuotannosta on peräisin turvetuotannosta. Muita bioenergiamuotoja ovat mm. biopolttonesteet, jotka ovat biomassoista jalostamalla saatuja nestemäisiä polttoaineita. Myös peltobiomassat, jotka ovat pelloilla tai soilla kasvatettavia energiakasveja, joista voidaan jalostaa kiinteitä tai nestemäisiä polttoaineita.

Suomi on allekirjoittanut kansainvälisen ilmastopöytäkirjan, jossa se on sitoutunut vähentämään hiilidioksidin ja muiden kasvihuonekaasujen päästöjä. Tähän tavoitteeseen pääsemiseksi on bioenergialla ja muilla uusiutuvilla energialähteillä suuri merkitys. Suomessa bioenergia edustaa lähes 90 % uusiutuvista energialähteistä (aurinko-, tuuli-, vesi- ja bioenergia). [10.]

3 Sähköverkon ja mikrotuotannon komponentit

Mikrotuotantolaitos tarvitsee jakeluverkkoon kytkeytyäkseen laitoksen koosta ja jakeluverkkojännitteestä riippuen yleensä sekä pien- (400 V tai 690 V) että keskijännitekojeistot eli *sähköasemat* (10 kV tai 20 kV). Näihin sähköasemiin tuodaan kytkettävät kaapelit niin jakeluverkosta, generaattorilta kuin mahdollisista kulutuspisteistä. Ne toimivat eräänlaisina sähköverkon solmupisteinä, joihin sijoitetaan myös erilaiset mittalaitteet, suojareleet ja katkaisijat.

Eri jännitetasojen yhdistämiseen tarvitaan *jakelumuuntajia*. Jakelumuuntaja voi kuulua mikrotuotantolaitoksen omistukseen tai se voi olla jakeluverkkoyhtiön toimittama riippuen siitä, onko mikrotuotantolaitoksen liittymispiste muuntajan ylä- vai alajännitepuolella.

Mikrotuotantolaitoksen sähkön tuotantoon voidaan käyttää erilaisia *generaattoriratkaisuja*. Tällaisia ovat esimerkiksi tahtigeneraattori, epätahtigeneraattori ja kaksoissyötetty epätahtigeneraattori. Joissain tuotantomuodoissa kuten aurinkoenergian tuotannossa ei ole ollenkaan perinteistä generaattoria, vaan esimerkiksi aurinkokennot, jotka liitetään verkkoon taajuusmuuntajien kautta. Perinteisenkin generaattorin ja verkon välissä voi joissain tapauksissa olla taajuusmuuttajat, joiden avulla generaattorin nopeus voidaan pitää erillään verkon määräämästä nopeudesta. Generaattori on kuitenkin aina liitetty katkaisijan kautta kaapeleilla kojeistoon. Jos mikrotuotantolaitoksella on tahtigeneraattori, se on tahdistettava verkkoon tahdistuslaitteen avulla. Epätahtigeneraattori taas suositellaan liitettävän verkkoon liitännällä, jossa on lähes synkroninen pyörimisnopeus, jolloin vältetään suurilta käynnistysvirtapiikeiltä. Tavoitteena yleisesti onkin, että käynnistys- tai kytkentävirta rajoittuisi lähelle nimellisvirtaa.

Erottimen tehtävänä on muodostaa turvallinen avausväli erotettavan virtapiirin ja muun laitoksen välille ja siten sen avulla mikrotuotantolaitoksen osa saadaan jännitteettömäksi turvallista työskentelyä varten. Erotin sijoitetaan katkaisijan ja syöttävän kiskon väliin, mikäli energia virtaa vain yhteen suuntaan. Jos energian syöttö on mahdollista molemmista suunnista, erottimia on käytettävä katkaisijan molemmin puolin.

Verkonosien pitää olla synkronissa laiterikkojen välttämiseksi, kun mikrotuotantolaitos liitetään verkkoon. Tämän vuoksi on laitoksen yhteyteen hankittava myös *tahdistuslaitteisto*, jonka avulla generaattori ohjataan samaan tahtiin jakeluverkon kanssa ennen verkkoon liittämistä.

Mikrotuotantolaitoksen *automaatiojärjestelmän* avulla voidaan hoitaa mm. laitoksen tuotantoa, mittauksia ja verkkoon kytkeytymistä automaattisesti. Osa järjestelmistä voi olla kaukoluettavia ja -käytettäviä. Tämä helpottaa mm. laitoksen valvontaa sekä huoltoa. Nämä automaatiotoiminnot on aiemmin toteutettu usein keskitetysti erillisillä, itsenäisesti toimivilla laitteilla. Paikallinen automaatiojärjestelmä on saattanut olla yhdistettynä kaukokäyttöön, jolloin automaatiojärjestelmän antamat hälytykset on voitu välittää valvomoon.

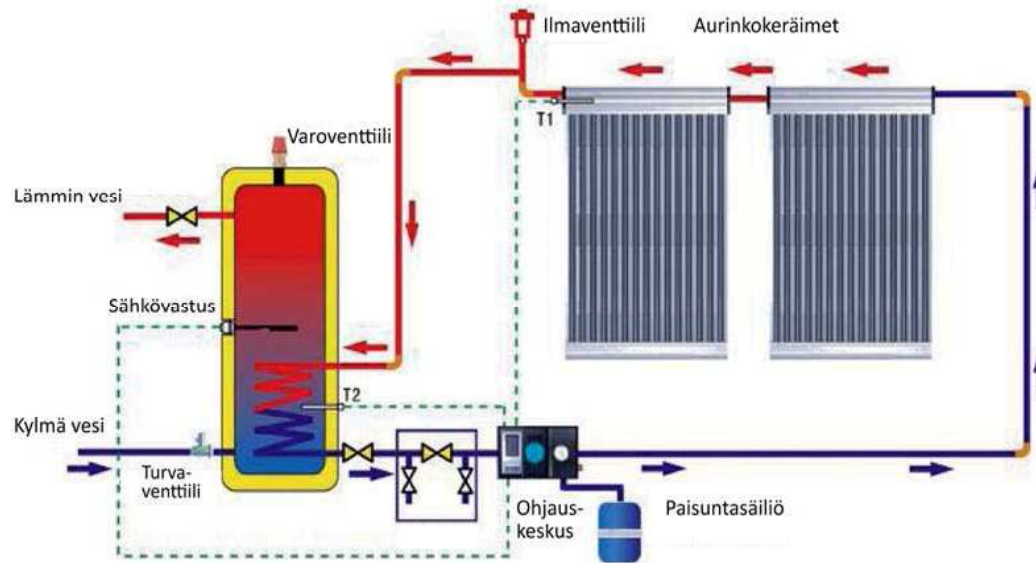
Nykyaikaisissa mikroprosessoripohjaisissa sovelluksissa paikallisautomaatiojärjestelmä toimii kiinteässä yhteistyössä käytönvalvontajärjestelmän kanssa tai se voi myös olla kokonaan integroitunut siihen.

Suojausjärjestelmät ovat myös yksi tärkeä mikrotuotantolaitoksen komponenteista. Niiden avulla suojataan laitosta verkosta tulevilta häiriöiltä ja samalla suojataan muita sähkönkäyttäjiä laitoksen aiheuttamilta mahdollisilta häiriöiltä. Tyypillisiä verkkoyhtiön vaatimia suojalaitteita mikrotuotantolaitokselle ovat mm. ylijännite-, alijännite-, ylitaajuus-, alitaajuus-, ylivirta- ja maasulkusuojat. [11; 12; 13.]

3.1 Aurinkoenergialaitoksen komponentit

Aurinkoenergia jaetaan auringosta saatavaan sähköön sekä lämpöön. Aurinkosähkö tuotetaan aurinkopaneeleilla. Paneelit koostuvat aurinkokennoista, joissa aurinkokennoin muutettu aurinkoenergia saa aikaan sähköjännitteen. Kide, monikide ja amorfinen pii ovat yleisimpiä aurinkokennojen valmistusmateriaaleja. Kennojen toiminta perustuu puolijohdekomponentteihin, johon auringonsäteily synnyttää kennon ala- ja yläpinnan välille jännitteen. Kytkemällä tarpeellinen määrä kennoja sarjaan saadaan tuotettua haluttu tasajännite taso. Auringonsäteilyn voimakkuus on suoraan verrannollinen virran suuruuteen. Pilvisellä päivällä säteilyn voimakkuus on huomattavasti heikompaa kuin kirkkaalla auringon paisteella.

Aurinkopaneelien tuottama sähkö varastoidaan yleisimmin akkuihin. Tyypillinen akkujännite on 6, 12 tai 24 V. Akku on kiinni ohjausyksikössä, joka huolehtii akkujen latauksesta. Lataussäädin säättää järjestelmän jännitettä. Verkkoon kytkennöissä paneelien tuottama tasavirta muutetaan vaihtosuuntaajalla eli invertterillä. Verkkoon kytketyt aurinkosähköjärjestelmät syöttävät ensisijaisesti omia kuormia. Aurinkopaneeleilla säteilyn määrästä voidaan muuttaa noin 15 prosenttia sähköksi. Aurinkopaneelia voidaan käyttää myös ilman akkua, jolloin energia on käytettävä suoraan esimerkiksi rakennuksen ilmastointiin tai veden pumppaamiseen vesisäiliöön tai kasteluun.



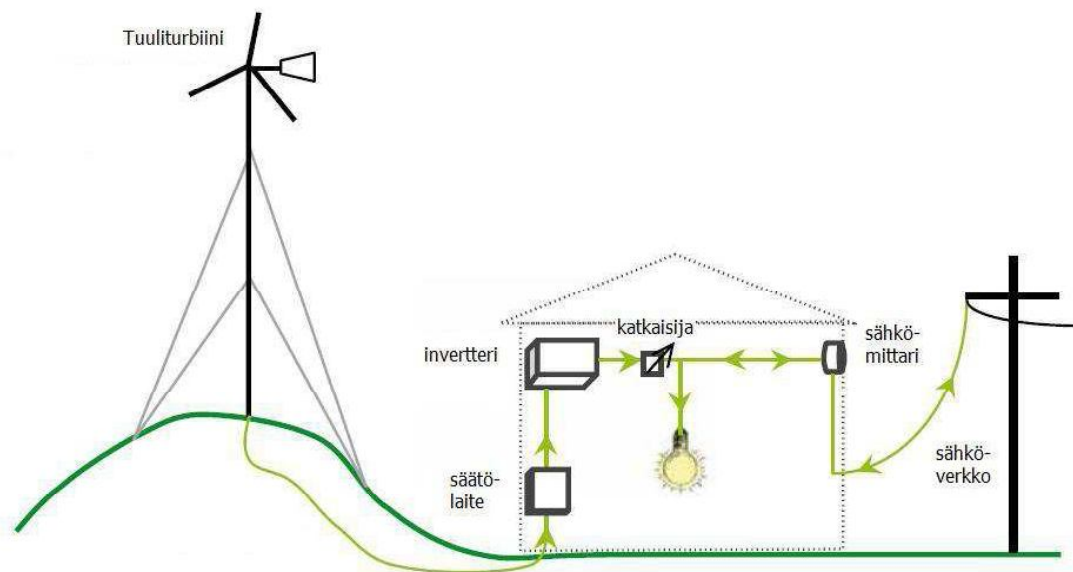
Kuva 2. Aurinkokeräin [14].

Aurinkokeräimellä pysytään muuttamaan auringonsäteily lämmöksi. Aurinkokeräimen suojapinnan alla on absorbaattoripinta, joka lämpenee auringon säteilyn vaikutuksesta. Keräimen sisällä kierrätetään vesi-glykoliseosta. (Ks. kuva 2.) Aurinkolämpö sopii hyvin lämmitysjärjestelmään, jossa on jo vesivaraaja tai myös lämpöpumppujärjestelmiin. Aurinkokeräimillä voidaan lämmöksi muuttaa noin 25 - 35 %, ja niiden etu on se, että saadusta energiasta vain murto-osa palautuu ympäristöön. Tästä on erityisesti hyötyä silloin, kun aurinko säteilee heikosti esimerkiksi syksyisin ja keväisin. [5; 9; 15.]

3.2 Tuulivoimalaitoksen komponentit

Tuulivoimalaitoksessa tuuliturbiini on kone, jolla virtaavan ilman liike-energiaa muutetaan turbiinin akselin pyörimisenergiaksi eli mekaaniseksi energiaksi. Akseli pyörittää edelleen sähköä tuottavaa generaattoria. Kaupalliset 1 - 5 MW:n tuulivoimalaitokset ovat nykyisin vaaka-akselisia ja kolmelapaisia ja niissä on etutuulipotkuri. Tämä on energiantuotannossa yleisin käytetty tyyppi ja taloudellisesti edullisin. Sen pyyhkäisyypinta-ala on suuri, suurimmillaan lähes hehtaari, ja tuotto on suoraan verrannollinen pyyhkäisyypinta-alaan. Lavat valmistetaan yleisimmin komposiittimateriaaleista, ja ne toimivat myös laitoksen tehonsäätö- ja pysäytysmekanismina. Tehoa säädetään joko sakkaukseen tai lapakulman säätöön perustuen. Pysäytykseen käytetään myös levyjarrua joko hitaalla tai nopealla akselilla tai molemmilla.

Tuulivoimalaitoksen konehuoneessa sijaitsevat vaihteisto, generaattori sekä säätö- ja ohjausjärjestelmät. Vaihteiston tarkoituksena on muuttaa roottorin matala kierrosluku (10 - 40 rpm) generaattorille sopivaksi (1 000 - 1 500 rpm). Generaattori on yleisimmin 4- tai 6-napainen epätahtigenaattori, jolloin sen pyörimisnopeus määräytyy sähköverkon taajuudesta. Erilliset moottorit kääntävät konehuonetta tuulen suuntaan suunta-anturin ja säätölaitteen avulla. [16.] Kuvassa 3 esitellään kaavio tuulivoimalaitoksen toiminnasta.



Kuva 3. Tuulivoimalaitos [17].

4 Mikrotuotantolaitoksen kytkeminen verkkoon

Suomen sähköverkko muodostuu valtakunnallisesta 110 - 400 kV:n kantaverkosta, 110 kV:n alueverkosta sekä 0,4 - 70 kV:n jakeluverkoista. Näitä verkkoja hallinnoivat kanta-, alue- ja jakeluverkonhaltijat. Sähkötalouden mukaan sähköverkkotoiminta on luvanvaraista toimintaa ja siihen vaaditaan Energiatietokeskuksen myöntämä verkkolupa. Kuitenkaan sellaiseen sähköverkkotoimintaan, jossa yhteisön tai laitoksen hallinnassa olevalla sähköverkolla hoidetaan vain kiinteistön tai sitä vastaavan kiinteistöryhmän sisäistä sähkönjakelua, ei tarvita lupia. [11.]

4.1 Yleisiä vaatimuksia verkkoon liittämiseksi

Kun mikrotuotantolaitteisto yhdistetään verkkoon, on se varustettava suojalaitteilla, jotka kytkvät sen irti yleisestä verkosta, mikäli verkkosyöttö katkeaa tai jos jännite tai taajuus generaattorilaitteiston navoissa poikkeaa mikrotuotantolaitteiston sallitulle toiminnalle asetelluista jännite- ja taajuusarvoista. Toisin sanoen, mikrotuotantolaitteisto ei saa milloinkaan olla kytkettynä verkkoon, kun verkon taajuus tai jännite ei ole sallituissa rajoissa. Nämä rajat määritellään standardissa EN 50438 Requirements for the connection of micro-generators in parallel with low-voltage distribution networks ja ovat nähtävissä taulukossa 1.

Taulukko 1. Liittymän suojauksen asetteluarvot, kaksiportainen suojaus. U_n on nimellisjännite.
*Loss of Mains –suojauksen eli saarekekäytönestosuojauksen tulee käyttää jakeluverkkoon sopivia havaitsemistekniikoita. [18.]

Parametri	Toiminta-aika	Asetteluarvo
Ylijännite –taso 1	1,5 s	$U_n + 10 \%$
Ylijännite –taso 2	0,15 s	$U_n + 15 \%$
Alijännite –taso 1	5 s	$U_n - 15 \%$
Alijännite –taso 2	0,15 s	$U_n - 50 \%$
Ylitaajuus	0,2 s	51 Hz
Alitaajuus	0,5 s	48 Hz
Loss of Mains*	0,15 s	

Mikäli suojauslaitteistolla ei pystytä toteuttamaan kaksia yli- ja alijänniterajoja, tulee taulukon rajoista yhdisteillä yhdet rajat. Siten vaatimukset muuttuvat tiukemmiksi, mikäli käytössä on vain yhdet jänniterajat. Nämä rajat esitellään taulukossa 2. Tässä taulukossa esitellyt arvot poikkeavat Suomelle asetelluista maakohtaisista arvoista standardissa EN 50438. Taulukon arvot on määritelty ottaen huomioon laitosten koko ja ominaisuudet sekä olemassa olevista asennuksista saadut kokemukset. Verkonhaltija voi kuitenkin poiketa arvoista tapauskohtaisesti. [18; 26.]

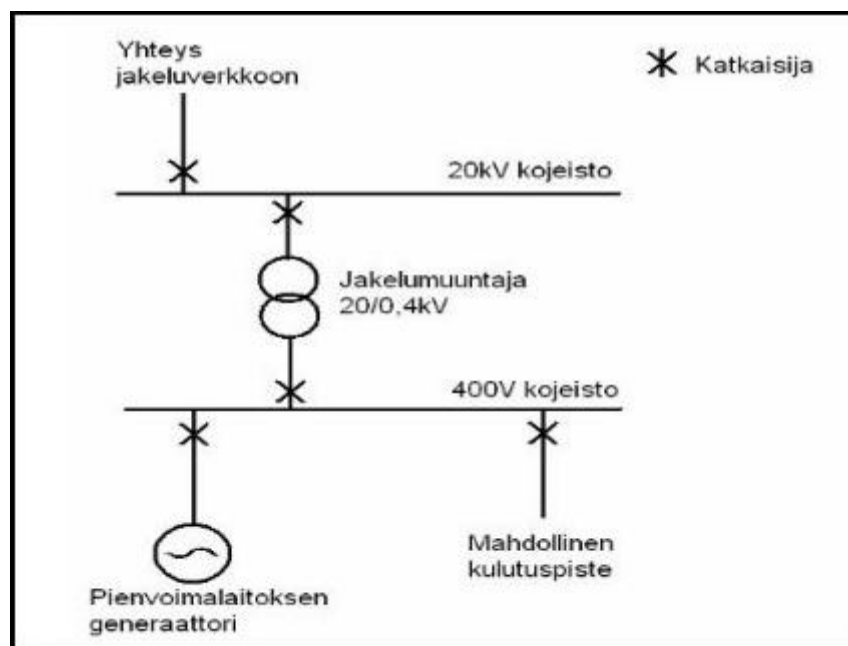
Taulukko 2. Liittymän suojauksen asetteluarvot, yksiportainen suojaus. U_n on nimellisjännite.
* Loss of Mains –suojauksen eli saarekekäytönestosuojauksen tulee käyttää jakeluverkkoon sopivia havaitsemistekniikoita. [26.]

Parametri	Toiminta-aika	Asetteluarvo
Ylijännite	0,2 s	$U_n + 10 \%$
Alijännite	0,2 s	$U_n - 15 \%$
Ylitaajuus	0,2 s	51 Hz
Alitaajuus	0,5 s	48 Hz
Loss of Mains*	enintään 5 s	

Mikrotuotantolaitoksen tulee aina irrota verkosta Loss of Mains (LoM) -tilanteessa, eli tilanteessa, jolloin verkon jännite katoaa. Mikrotuotantolaitos ei milloinkaan saa jäädä yksin syöttämään saarekettä. Jos verkonsyöttö verkkoliitälaitteessa on vaihtovirran sijasta virtaukseltaan pulssimuotoista, ei verkkoonliitälaitteisto kykene jäämään saarekekäyttöön vaan tarvitsee alati verkon jännitettä tahdistuakseen. Tällaisilla laiteratkaisuilla ei tarvita erillistä LoM-suojausta, mutta laitteisto on kuitenkin tyyppitestattava myös LoM-tilanteessa. LoM-suojaksi suositellaan ROCOF-relettä, jonka toiminta-aika on 0,15 s tai jotain muuta suojausmetodia, joka on yhtä nopea ja luotettava kuin ROCOF-rele. (Ks. 6.1.8 Rocof-rele.)

Laitteiston toimittajan vastuulla on taata, että laitteiston suojaus täyttää lain ja standardien asettamat irtoamisvaatimukset. Mahdolliset suojauslaitteet voivat olla erillisiä laitteita tai ne voivat olla liitettynä mikrotuotantolaitoksen laitteisiin. Suojauslaitteiston tulee erottaa mikrotuotantolaitos verkosta sopivilla mekaanisilla kontaktoreilla tai elektronisilla kytkimillä. Mikäli elektroninen kytkin ei toimi, tulee laitoksen lakata tuottamasta sähköä tai irrota verkosta muulla tavoin. Elektroninen kytkinlaite tulee spesifioida mikrotuotantolaitoksen valmistajan määrittelemän ylijänniteluokituksen mukaan ja vuotovirta auki kytkettynä ei saa olla enempää kuin 0,1 mA riippumatta terminaalijännitteestä.

Mikrogeneraattorin synkronoinnin verkon kanssa on oltava täysin automatisoitua. Liittymän suojauksen on taattava, että tehon syöttö verkkoon alkaa vain jännitteen ja taajuuden ollessa suojauksen sallimissa rajoissa vähintään tietyn minimiajan. Minimiaika generaattoreille on 3 minuuttia ja taajuusmuuttajilla liitetyille järjestelmille 20 sekuntia. Tahdistuminen takaisin verkkoon vian jälkeen olisi hyvä suorittaa porrastetusti, varsinkin, jos saman liityntäpisteen takana on paljon mikrotuotantolaitteistoja. Kuvassa 4 on nähtävissä kaavio pienvoimalan liittämistä 400 V:n verkkoon. [18.]



Kuva 4. Pääkaavio pienvoimalan liittämiseksi 400 V:n verkkoon [19].

4.2 EMC-vaatimukset

Sähkölaite ei saa toimiessaan kohtuuttomasti häiritä ympäristönsä laitteita ja toisaalta sen on samalla riittävästi siedettävä muualta tulevia häiriöitä. Erilaiset sähkömagneettiset häiriöt voivat vahingoittaa tai häiritä tietoteknisiä järjestelmiä ja laitteita sekä elektronisia komponentteja tai piirejä sisältäviä laitteita. Häiriöttömän toiminnan takaa samaan käyttöympäristöön tarkoitettujen laitteiden sähkömagneettinen yhteensopivuus eli EMC, jonka häiriöttömän toiminnan takaamiseksi on olemassa erilaisia direktiivejä. Häiriöitä voivat aiheuttaa erilaiset luonnolliset ja tekniset lähteet. Luonnollisia häiriöitä aiheuttavat mm. salamaniskut ja auringon sekä muiden kosmisten lähteiden säteily aiheuttamat taustakohinat. Teknisiä häiriöitä taas aiheuttavat mm. staattisen sähkön purkaukset, digitaalisten pulssien lyhyiden nousu- ja laskuaikojen aiheuttamat nopeat sähkö- ja magneettikenttien muutokset. Myös sähköverkon kuormien kytkemisen yhteydessä tapahtuvat jännitteiden muutokset voivat aiheuttaa häiriöitä. Langattoman viestinnän lisääntyminen on myös osaltaan aiheuttanut kasvua ns. vapailla taajuuksilla tapahtuviin häiriöihin.

Mikrotuotantolaitosta suunniteltaessa on siis otettava huomioon myös EMC-vaatimukset. Standardi EN 50438 määrittelee, että mikrogeneraattori tulee vastata yleisten EMC-standardien EN 61000-6-1 *Electromagnetic compatibility (EMC) Generic*

standards Immunity for residential, commercial and light-industrial environments vaatimuksia. Lisäksi teknisessä raportissa EN61000 osassa 3-15 *Electromagnetic compatibility (EMC) Limits - Assessment of low frequency electromagnetic immunity and emission requirements for dispersed generation systems in LV network* oleva luonnos määrittelee erikseen erityisiä EMC-vaatimuksia invertterikäyttöisille pienjännitegeneraattorijärjestelmille. Siinä annetaan rajat häiriön siedolle ja häiriön päästölle sekä asetetaan rajat matalataajuisille sähkömagneettisille tekijöille pienjänniteverkoissa.

Vuodesta 2007 lähtien käytössä ollut EMC-direktiivi 2004/108/EY määrittelee, että laitteistojen on oltava EMC-direktiivien vaatimusten mukaisia, kun ne saatetaan markkinoille ja/tai otetaan käyttöön. Vaadittava suojaustaso määritellään direktiivissä tarkemmin suojaustavoitteilla sähkömagneettisen yhteensopivuuden alalla ja sen päätavoitteena on varmistaa, että laitteistojen aiheuttamat sähkömagneettiset häiriöt eivät estä muita laitteita eivätkä radio- tai televerkkoja, niihin liittyviä laitteistoja ja sähkönjakeluverkkoja toimimasta virheettömästi. Lisäksi sen tehtävänä on varmistaa, että laitteistojen oma sähkömagneettisten häiriöiden sietokyky on riittävä, jotta ne voivat toimia niille tarkoitetulla tavalla. [20; 21; 22.]

4.3 Sähkön laatu

Yleisesti ottaen hyvä sähkön laatu tarkoittaa sitä, että asiakas saa maksamansa laskun vastineeksi toimituspisteeseensä hyvälaatuisen jännitteen ilman toimituskeskeytyksiä. Sähkön laatua tarkasteltaessa voidaan nykyään puhua erikseen sähkötoimituksen laadusta ja verkkotoimituksen laadusta, jolloin sähkötoimitus on kokonaisuus, joka sisältää sekä verkkopalvelun että sähköenergian myynnin.

Sähkön laatua pyritään takaamaan lainsäädännöllä sekä ulkopuolisen viranomaisen suorittamalla verkkoyhtiön valvonnalla. Yksi menetelmä, jolla laatua pyritään ylläpitämään, on verkkoyhtiöiden maksamat korvaukset asiakkaalle, mikäli laatu ei pysy asetetulla tasolla. Sähkön laatuun vaikuttavat jännitteen taso nimellisjännitteeseen verrattuna sekä jännitteen hitaat vaihtelut ja jännite-epäsymmetriat. Myös jännitteen nopeat vaihtelut eli jännitehäiriöt, jännitteen käyrämuodon vääristymät, taajuuden poikkeamat nimellisarvosta, sähkötoimituksen keskeytykset sekä sähkönkäyttöoikeuden rajoitukset vaikuttavat osaltaan sähkön laatuun. [22.]

Mikrotuotantolaitoksen vaikutus jakeluverkon sähkön laatuun riippuu mm. laitoksen nimelliskoosta, laitoksessa käytetystä tekniikasta sekä jakeluverkon ominaisuuksista liittymispisteessä. Mikrotuotanto ei saa verkon kanssa rinnan toimiessaan aiheuttaa häiriöitä verkkoon eikä muihin sähköasennuksiin. Häiriötilanteissa verkkoyhtiön on puuttava tilanteeseen ja mahdollisesti poistaa laite käytöstä. Verkon jäykkyys on yksi tärkeä jakeluverkon ominaisuus, joka vaikuttaa mahdollisuuksiin liittää mikrotuotantolaito verkkoon. Mitä jäykempi verkko, sitä suurempi oikosulkuvirtataso. Verkon jäykkyys heikkenee, kun etäisyys sähköasemalta kasvaa. Siten, mitä kauempana sähköasema on, sitä heikompi verkko on ja sitä enemmän pienvoimala vaikuttaa jakeluverkon sähkönlaatuun. Verkon jäykkyyttä voidaan lisätä kasvattamalla jakeluverkon johtimien poikkipinta-alaa.

Kun käyttöpaikkaan liitetään mikrotuotantolaitos, tulee jännitteen laadun säilyä liittämiskohdassa standardin SFS-EN 50160 Yleisen jakelujännitteen ominaisuudet vaatimusten mukaisena. Standardi SFS-EN 50160 on eurooppalainen standardi, joka määrittelee normaaleissa käyttöolosuhteissa jakelujännitteen pääominaisuudet yleisten pien- ja keskijännitejakeluverkkojen siinä kohdassa, jossa verkon käyttäjä liittyy verkkoon [22]. Liittämiskohdassa saa harmoninen kokonaissärö olla maksimissaan 8 %. Kokonaissärö ei saa ylittyä, vaikka liittymään liitettäisiinkin mikrotuotantoa. Standardissa on myös annettu rajat liittämiskohdasta mitattaville yksittäisille harmonisille yliaalloille, välkynnälle ja jännitetason vaihtelulle. [9; 11; 18.]

4.4 Sähkötyöturvallisuus ja sähköturvallisuus

Mikrotuotantolaitoksen verkkoon liittämiseen liittyy useita turvallisuuskysymyksiä ja –riskejä. Vakavin ongelma on takasyötön mahdollisuus, joka asettaa verkossa työskentelevät asentajat vaaraan. Oikeilla turvalaitteilla ja työtavoilla pystytään kuitenkin takasyöttötilanteet välttämään. Mikrotuotantolaitos tulee aina asentaa ja huoltaa valmistajan ohjeen mukaisesti. Sähkötyöturvallisuutta ja oikeita asennustapoja käsitellään useissa standardeissa. Asennuksissa tulee noudattaa standardia EN 50438, SFS 6000 sarjaa, työturvallisuusstandardia SFS 6002 sekä valmistajan asennusohjeita.

Laitoksen mikrotuotantolähdöt tulee merkitä asianmukaisesti sekä itse laitoksen että verkon puolella. Kaikki sellaiset paikat, jotka mikrotuotantolaitos voi tehdä jännitteisiksi, tulee merkata. Lisäksi varoituskilpien tulee olla selkeitä ja informatiivisia sekä sijaita asianmukaisissa paikoissa, ja niiden tulee olla suomeksi kirjoitettuja.

Mikrotuotantolaitos tulee myös merkata verkonhaltijan omaan seurantajärjestelmään, jotta asentaja saa jo ennen työmaalle lähtöä tietoonsa mikrotuotannon liittymispisteet. Varoituskilvet tulee sijoittaa ainakin mikrogeneraattoriin kytkettyyn kytkinlaitteeseen, kaikkiin kytkinlaitteisiin kuluttajan käyttöyksikön ja mikrogeneraattorin välillä, itse mikrogeneraattoriin sekä kaikkiin mikrogeneraattorin erotuspaikkoihin. Varoituskilpien sijaintiin tulee myös kiinnittää huomiota. Mikrogeneraattori on vielä varustettava tietokilvellä asentajaa varten, jossa ilmenee valmistajan nimi tai merkki, tyyppinumero tai vastaava, nimellisteho, nimellisjännite, nimellistaajuus, vaiheet ja tehokerroin. Nämä tiedot tulee myös olla dokumentoituna muuallekin.

Asennustyössä on luonnollisestikin tärkeää huolehtia asianmukaisesta työmaadoittamisesta sekä aina varmistautua työkohteen jännitteettömyydestä. Koska mikrotuotanto voi aiheuttaa takasyöttöjännitteitä, asianmukaisella työmaadoittamisella voidaan myös suojautua työkohteen alajännitepuolella.

Kiinteistön sisäiseen sähköturvallisuuteen ja laitteiston käyttöturvallisuuteen sisältyy myös mikrotuotannossa haasteita. Mikrotuotantolaitteiston johtolähdöillä tulee olla kiinteistökeskuksessa tai vastaavassa paikassa selkeä erotin, joka on luotettava ja erotusasento on selkeästi nähtävissä. Mahdollisia kosketusjännitteitä pystytään estämään asianmukaisella maadoittamisella sekä vikavirtasuojauksella, joka tulee mikrotuotantolaitteistoissa olla B-tyypin vikavirtasuojaja. [9; 18.]

4.5 Laitoksen erottaminen

Sähköturvallisuusstandardien (SFS6002) mukaan mikrotuotantolaitoksen täytyy olla erotettavissa verkosta ja erotuslaitteessa tulee olla näkyvä ilmaväli ja lisäksi erottimen käyttömekanismin täytyy olla lukittavissa. Tämän lisäksi jakeluverkon haltijalla on oltava joko rajoittamaton pääsy erottimelle tai kaukokytkentämahdollisuus (SFS6000). Erottimena voidaan käyttää erillistä mikrotuotantolaitoksen yhteyteen asennettua erotinta, jossa on näkyvä ilmaväli tai luotettava mekaaninen asennonosoitin, tai kohteen sähkökeskuksen pääsulakkeet voidaan irrottaa. Verkon korjaus- ja huoltotilanteissa on varmistuttava siitä, että erottimia käytetään asianmukaisesti ja myös siitä, ettei mikrotuotantolaitos ylläpidä verkon jännitettä.

Erotuslaite voi olla myös verkonhaltijan verkossa ennen liittämiskohtaa oleva kytkin. Tällaisen kytkinlaitteen asentamisesta voidaan laskuttaa mikrotuottajaa vain silloin, jos

tällaista kytkintä ei olisi verkkoon muussa tilanteessa asennettu ja ettei mikrotuottaja ole asennuttanut asianmukaista erotinta mikrotuotantolaitoksensa yhteyteen. Mikäli erotinta ei haluta käyttää, vaihtoehtoisesti sähkötyöt on tehtävä asianmukaisina jännite-töinä tai muuten yhtä turvallisella tavalla. [1; 18.]

5 Sähköverkon ja mikrotuotannon viat

Sähköverkoissa voi esiintyä erilaisia vikoja, joiden syntymistä yritetään estää ja niiden esiintyessä vikojen kestoajat pyritään minimoimaan suoja- ja katkaisijoiden avulla. Tässä kappaleessa käsitellään mikrotuotannosta aiheutuvia vikoja sekä verkosta aiheutuvia vikoja. Muun muassa oiko- ja maasulut sekä maasululliset ja maasulutomat johdinkatkeamat ovat sähköverkon tyypillisiä vikoja. [23.]

5.1 Oikosulku

Oikosulkuksi kutsutaan sitä, kun verkon virtapiiri sulkeutuu valokaaren tai vikaimpedanssin kautta. Oikosulkuja on kaksi- ja kolmivaiheisia ja ne ovat aina vaiheiden välisiä. Kolmivaiheiset oikosulut ovat symmetrisiä vikoja kaikkien muiden tapauksien ollessa epäsymmetrisiä. Symmetrisessä viassa kaikkien vaiheiden jännitteet ja virrat ovat yhtä suuret, kun taas epäsymmetrisessä viassa vaiheiden virrat ja jännitteet eivät käyttäydy symmetrisesti. Oikosulun voi aiheuttaa esimerkiksi eristysvika tai muu ulkoinen kosketus. Oikosulkuvirta jaetaan kolmeen osaan: alku-, muutos- ja jatkuva tila. Oikosulkuvirta on suurimmillaan heti vian jälkeen alkutilassa ja samaan aikaan verkon impedanssi on pienimmillään. Alkutilassa ilmenevää oikosulkuvirran suurinta hetkellisarvoa kutsutaan sysäyoikosulkuvirraksi i_s , ja se esiintyy ensimmäisen puolijakson kuluttua vian ilmenemisestä. Muutostilassa oikosulkuvirta on vielä huomattavasti suurempi kuin nimellisvirta ja siksi suojaus pyritään tekemään muutostilan aikana. Koska suojauksen pitäisi toimia ennen jatkuvaan tilaan siirtymistä, jatkuvan tilan oikosulkuvirta I_k ilmenee hyvin harvoin. [23.]

5.2 Maasulku ja johdinkatkeamat

Eristyksen pettäessä kaapelin johtimiin voi päästä vettä ja se aiheuttaa läpilyönnin, joka aiheuttaa maasulun. Maasulkuja on yksi- ja kaksivaiheisia ja lisäksi kaksoismaasulkuja,

jolloin verkossa on maasulku kahdessa eri pisteessä. Maasulullisissa johdinkatkeamisissa johdin katkeaa ja jännitteinen pää maahan ulottuessaan aiheuttaa maakosketuksen. Maasuluttomissa johdinkatkeamisissa taas johdin katkeaa, muttei osu maahan. Johdinkatkeamia voi olla yksi-, kaksi- tai kolmevaiheisia. Ne ovat harvinaisia ja johtuvat lähinnä kaivintöistä. [23.]

5.3 Nopeat jännitemuutokset ja välkyntä

Kun tehollisarvo putoaa nopeasti tasolta toiselle välillä $U_n \pm 10\%$ (U_n on nimellisjännite) puhutaan nopeasta jännitteenmuutoksesta. Tyypillisesti jännitteen muutos ei ylitä 5 % nimellisjännitteestä. Jännitteen laskiessa yli 10 % tason U_n alapuolelle puhutaan jännitekuopasta. Nopeat jännitemuutokset ovat usein asiakkaan laitteiden tai järjestelmän kytkennöistä johtuvia.

Välkyntää, joka johtuu lamppujen luminanssin muutoksista, aiheuttavat useat peräkkäiset nopeat jännitetason muutokset. Näitä voivat aiheuttaa esimerkiksi yksivaiheiset hitsauslaitteet, valokaariuunit ja kompressorit, eli laitteet, joilla on huomattavan epätasainen kuormitusvirta. Joidenkin pientuuliturbiinien on myös havaittu aiheuttavan verkkoon jännitevaihteluita sekä välkyntää. [9; 22.]

5.4 Epäsymmetria

Pienjänniteverkossa epäsymmetriaa aiheutuu pääasiassa siitä, että vaiheet kuormittuvat epätasaisesti yksivaiheisten sähkölaitteiden takia. Epäsymmetriassa vaihejännitteiden tehollisarvot tai niiden väliset kulmat eivät ole yhtä suuria. Myös maasulku tai yhden vaiheen sulakkeen palaminen voivat aiheuttaa epäsymmetriaa.

Epäsymmetria u_u määritellään yhtälöllä:

$$u_u = \frac{\text{jännitteenvastakomponentti}}{\text{jännitteenmyötäkomponentti}} * 100\%$$

Mikäli mikrogeneraattori on kytketty verkkoon yksivaiheisesti, se saattaa aiheuttaa epätasapainoa verkkoon. Siksi onkin tärkeää, että jakeluverkonhaltija saa määrätä, mihin vaiheeseen yksittäinen mikrogeneraattori liitetään. [9.]

5.5 Harmoniset ja epäharmoniset yliaaltojännitteet

Harmoninen yliaaltojännite on sinimuotoinen jännite, jonka taajuus on perusaallon taajuus kerrottuna kokonaisluvulla. Yksittäistä harmonista yliaaltojännitettä kuvataan vertaamalla sen suhteellista amplitudia perustaajuiseen jännitteeseen. Yksittäisiä harmonisia yliaaltojännitteitä u_h voidaan yhdessä kuvata harmonisella kokonaissäröllä (THD), joka lasketaan seuraavasti:

$$THD = \sqrt{\sum_{k=2}^{40} (u_k)^2}$$

THD saa olla liittymiskohdassaan maksimissaan 8 %. Kokonaissärön määrä ei saa ylittyä, vaikka liittymään liitettäisiinkin mikrotuotantoa.

Epäharmonisessa yliaaltojännitteessä taajuus on harmonisten yliaaltojen välissä. Epäharmoniset yliaallot voivat esiintyä joko yksittäin tai laajakaistaisena spektrinä. Epäharmonisille ylijännitteille ei ole mahdollista asettaa vaatimustasoa nykyisellä tietotasolla. [9.]

5.6 Taajuusvaihtelut

Vaihtelu syötetyssä tehossa voi aiheuttaa vaihteluita verkon jännitteeseen tai taajuuteen. Taajuusvaihtelut liittyvät usein kuorman ja tuotannon väliseen epätasapainoon, mutta myös oikosulut aiheuttavat vaihteluita taajuuteen. Taajuutta säädetään verkossa ja sen vaihtelu nimellisarvosta pyritään pitämään alle 0,1 Hz:n suuruisena.

Standardissa SFS-EN 50160 määritetään raja-arvot jännitteen taajuudelle normaaleissa olosuhteissa. Yhteiskäyttöverkossa taajuuden tulee olla (10 sekunnin keskiarvo) välillä:

- 50 Hz \pm 1 % (eli 49,5 Hz - 50,5 Hz) 99,5 % ajasta vuoden aikana
- 50 Hz + 4 % / -6 % (eli 47 Hz - 52 Hz) 100 % ajasta

Taajuuden muutos vaikuttaa joihinkin kuormiin, mutta osa kuormista kuten resistanssi-kuorma ei muutu taajuuden muuttuessa. [9; 22.]

5.7 Jännitekuopat ja lyhyet keskeytykset

Jännitekuopassa jännite alenee äkillisesti 1 - 90 % nimellisjännitteestä, jonka jälkeen se palautuu lyhyen ajan kuluttua normaalille tasolle. Kuopan kesto voi olla 0,01 sekunnista 3 minuuttiin, tyypillisesti noin puolesta jaksosta minuuttiin. Ne johtuvat usein verkossa tai asiakkaan asennuksissa tapahtuvissa vioista, kuten oiko- ja maasuluista, mutta myös suurempien kuormien kytkennät voivat olla syynä jännitekuoppaan. Jännitekuopat voivat olla symmetrisiä tai epäsymmetrisiä; kolmivaiheiset oikosulut aiheuttavat symmetrisen jännitekuopan ja muut oiko- ja maasulut aiheuttavat erilaisia epäsymmetrisiä jännitekuoppia. Standardeissa ei ole annettu raja-arvoja jännitekuoppien määrälle tai kestolle. [9; 22.]

6 Mikrotuotantolaitoksen suojaus

Tässä luvussa käsitellään mikrotuotannon suojausta ja verkon suojausta. Tuotantolaitoksen suojauksen perustan muodostavat yli- ja alijännitesuojaus, yli- ja alitaajuus-suojaus sekä ylivirtasuojaus. Tuotantolaitokset pitää lisäksi varustaa Loss of Mains -suojalla, joka tarvitaan suunnittelemattoman saarekekäytön estämiseksi. [9.]

6.1 Suojareleet

Suojareleiden tarkoituksena on suojata sähköverkon laitteita vaurioitumiselta erilaisissa vikatilanteissa. Suojarele on laite, joka toimii sähköverkossa tapahtuneen muutoksen johdosta. Sen tehtävänä on tarkkailla yhtä tai useampaa verkon suuretta, kuten virtaa tai jännitettä, ja kun kyseinen suure ylittää sille asetetun toiminta-arvon, suojarele havaituu ja lähettää toimintakäskyn kytkinlaitteelle ja asetetun toiminta-ajan jälkeen kytkinlaite irrottaa viallisen osan verkosta. Suojarele tulee olla selektiivinen, eli se havaitsee viat, mutta laukaisee vasta, kun vika on omalla suojausalueella. Sen on myös toimittava nopeasti ja havaittava viat herkästi. Suojareleitä on kolmea eri sukupolvea, sähkömekaanisia, staattisia ja numeerisia suoja. Erilaisia suojareleitä ovat mm. jännite-reet, taajuusreet ja virtareleet, joita käsitellään seuraavissa aliluvuissa.

Ensimmäiset toisiopuolelle liitettävät suojareleet ovat olleet sähkömekaanisia laitteita, joiden toimintaperiaate on perustunut erilaisiin jousiin, vipuihin ja muihin mekaanisiin komponentteihin. Jokaisessa suojaustoiminnossa on ollut oma suojareleensä. Lisäksi käytössä on tarvittu erilaisia piirien vakavointi- ja mittauslaitteita sekä myöskin aika- ja apureleitä. Suomessa on jonkin verran vanhoja sähkömekaanisia suojareleitä käytössä, mutta uusintatöiden yhteydessä ne yleensä vaihdetaan uudempiin numeerisiin suojiin.

Staattisissa eli elektronisissa suojareleissä on nimensäkin mukaisesti elektroniikkaa mukana. Näihin kuuluvat analogiset tai digitaaliset releet, joissa on käytetty analogisia piirejä tai komponentteja. Ne koostuvat usein erillisistä moduuleista ja jokainen suojaustoiminto on tarvinnut oman moduulinsa. Staattisia suojareleitä on Suomessa käytössä vielä kohtalaisen laajalti, mutta nykyään nekin usein vaihdetaan uusintatöiden yhteydessä numeerisiin suojiin.

Nykyisin käytössä oleva suojarelesukupolvi on numeeriset suojat. Niitä voidaan kutsua myös kennoterminaaleiksi tai monitoimisuojiksi. Numeerisilla suojiilla on useita etuja verrattuna sähkömekaanisiin ja staattisiin suojareleisiin.

Numeeriset suojareleet perustuvat mikroprosessoritekniikkaan eivätkä sisällä liikkuvia osia tai huoltoa tarvitsevia komponentteja. Lisäksi yksittäinen laite sisältää useita suojaus- ja mittaustoimintoja, jolloin käytössä tarvittavien laitteiden määrä vähenee. Tämän lisäksi laitteisiin voidaan sisällyttää myös erilaisia ohjaustoimintoja sekä muita signaalituloja ja -lähtöjä. Siten numeeristen suojien tilantarve on pienempi kuin sähkömekaanisilla tai staattisilla suojareleillä, koska yhdellä laitteella voidaan haluttaessa toteuttaa koko tarvittavan kohteen suojaus. Myös kunnossapidon ja huoltojen määrä vähenee itsevalvontatoimintojen ansiosta, koska laite osaa itse ilmoittaa vikaantumisestaan eikä sitä tarvitse erikseen tarkastaa. Numeerisissa suojareleissä erilaiset tapahtuma- ja häiriöpäiväkirjat tallentavat tietoja käyttö- ja vikatilanteista, jolloin niiden tarkastelu jälkikäteen on mahdollista. [12; 23; 24.]

6.1.1 Jännitereleet

Jännitereleitä on sekä ali- että ylijännitteitä varten. Alijännitereleitä käytetään ylikuormituksen välttämiseksi ja niiden tehtävänä on minimoida vauriot alijännitteiden aikana.

Nollajännitereleitä käytetään maasulkujen havaitsemiseen aikahidastettuina sekä suunnatun maasulun varasuojana. Tahtigeneraattoreilla ylijännitereleitä käytetään suojaamaan vaarallisilta jännitteenousuilta. Ylijännitereleillä voidaan myös suojata moottoreita vaihekatkoksilta ja vääriltä vaihejärjestyksiltä vastajännitettä mittaamalla. Niitä voidaan myös käyttää jännitteensäätäjän vikaantumistilanteissa, jolloin jännite joko laskee tai nousee. [23.]

6.1.2 Taajuusreleet

Taajuusreleitä on sekä yli- että alitaajuustilanteita varten. Niitä käytetään verkon häiriötilanteissa kuormien irtikytkemiseen, eli kun taajuus laskee alle toiminta-arvon. Alitaajuusreleiden tärkein sovellus on valtakunnallinen tehonvajaussuojaus. Ylitaajuusreleitä taas käytetään pääasiassa generaattoreiden suojaukseen. [23.]

6.1.3 Virtareleet

Virtareleitä on neljää eri tyyppiä: hetkellinen ylivirtarele, vakioaikaylivirtarele, käänteisaikaylivirtarele ja termiseen suojaukseen tarkoitettu lämpörele. Ylivirtareleistä vakioaika- ja hetkellistä ylivirtarelettä käytetään pääasiassa oikosulkusuojaukseen. Vakioaikaylivirtarele toimii asetellun vakiotoiminta-ajan kuluttua toiminta-arvon ylittymisestä, kun taas hetkellinen ylivirtarele toimii, kun virta ylittää toiminta-arvon. Käänteisaikaylivirtarelettä käytetään nopean portaan releenä ylivirtasuojauksessa sekä yhteistoiminnassa sulakkeiden kanssa. Sen toiminta perustuu virran suuruuteen, eli rele toimii sitä nopeammin, mitä suurempi virta on. Lämpöreleitä taas käytetään ylikuormitusuojina mm. moottoreiden, generaattoreiden, muuntajien sekä muiden tärkeiden komponenttien yhteydessä. Lämpöreleen läpi kulkee kuormitusvirta ja suojattavan kohteen lämpeneminen on mallinnettu releeseen. Kun releen lämpötila nousee toimintarajan yli, rele laukaisee katkaisijan. Lämpöreleen ja suojattavan kohteen lämpenemisaikavakioiden on oltava lähes yhtä suuret, jotta ne vastaisivat mahdollisimman tarkasti toisiaan ja suojaus olisi mahdollisimman tarkka.

Ylivirtareleiden asettelemista varten täytyy tuntea verkon rakenne tarkkaan, koska se vaatii niiden sijaintipaikan pienimmän ja suurimman oikosulkuvirran tuntemista. Ylivirtareleet asetellaan muutosoikosulkuvirran mukaan. Ylivirtareleitä voidaan käyttää

myös suunnattuina, jolloin vikavirran suunta vaikuttaa releen laukaisuun. Kuitenkin esimerkiksi releen lähellä tapahtuvissa kolmivaiheisissa vikaimpedanssittomissa oikosuluissa releen mittaama jännite on hyvin pieni ja se saattaa vaikeuttaa vikavirran suunnan havaitsemista. Tällöin releen tulisi toimia ainakin suuntaamattomana, jotta vika saataisiin poistettua verkosta. [12; 23.]

6.1.4 Suunta- ja tehoreleet

Suunta- ja tehoreleet mittaavat jännitettä ja virtaa ja muodostavat näistä suojattavan kohteen läpi kulkevan tehon. Suuntareleet mittaavat myös virran ja jännitteen välistä kulmaa. Suunnatussa ylivirtasuojauksessa, jota yleensä käytetään silmukoiduissa verkoissa, suojaus perustuu vaihevirtojen ja pää- jännitteiden vaihe-erojen suuruuteen sekä vaihevirtojen arvoihin. Suunnatussa maasulkusuojauksessa, jota taas käytetään maasta erotetussa tai kompensoidussa verkossa, perustuu suojaus nollavirran ja -jännitteen suuruuteen sekä niiden välisen vaihe-eron suuruuteen. Suunnatun suojauksen ansiosta rele toimii vain sille asetellun suojausalueen viassa ja siten pystytään estämään mm. turhat laukaisut viereisen johtolähdön viassa. Takatehorele mittaa taas päätötehon suuntaa ja estää siten generaattorin sekä sitä pyörittävän voimakoneen toimimisen moottorina. Sitä käytetäänkin erityisesti generaattoria pyörittävän tuuliturbiinin suojana. [12; 23.]

6.1.5 Differentiaalireleet

Differentiaalireleet mittaavat suojausalueellensa tulevien ja lähtevien virtojen erovirtaa. Vian ilmetessä virtojen amplitudit, vaihekulmat tai molemmat poikkeavat toisistaan huomattavasti. Differentiaalireleet ovat siten täysin selektiivisiä eli ne suojaavat vain vioilta, jotka ovat niiden omalla suojausalueellansa. Näin ollen ne eivät toimi muiden alueiden varasuojana, mutta tarvitsevat kuitenkin itselleen varasuojan. Differentiaalireleet tarvitsevat myös havahtumiseen sitä suuremman erovirran mitä suurempi kuormitusvirta on eli toisin sanoen ne ovat vakavoituja kuormitusvirran suhteen. Differentiaalireleet ovat hyviä suojaamaan muuntajia, generaattoreita ja kiskostoja, koska ne ovat nopeimpia oikosulkusuojia. [12; 23.]

6.1.6 Distanssireleet

Distanssireleet mittaavat jännitteitä ja virtoja ja laskevat niistä impedanssin, joka on verrannollinen etäisyyteen ja siksi niitä kutsutaan myös etäisyysreleiksi. Niitä käytetään yleensä silmukoidun siirtoverkon selektiiviseen suojaamiseen. Niiden toiminta-aika on sitä lyhyempi mitä lähempänä vika sijaitsee ja niiden toiminta perustuu oikosulkua lähimmän katkaisun laukaisuun ja vain viallisen verkon osan irrottamiseen. Distanssireleellä on usein monta eri toimintavyöhykettä, jolloin pystytään kattamaan suojattavaa aluetta suurempi alue ja samalla saadaan myös varasuojaus viereisille suojausalueille. Ne toimivat hyvin mm. johtosuojina, sillä viestiyhteys ei ole välttämätön. Siitä on kuitenkin hyötyä ja sitä käytetäänkin usein laukaisun nopeuttamiseksi ja selektiivisyyden parantamiseksi. Distanssirelettä voidaan käyttää samanaikaisesti sekä oikosulku- että maasulkusuojaukseen, mutta silloin siinä on oltava erilliset havahtumiselimet molemmille vikatyypeille jokaisessa vaiheessa. [12; 23.]

6.1.7 Epäsymmetriareleet

Kun kuormitusvirtaan tulee myötäkomponentin lisäksi vastakomponentti, kolmivaihejärjestelmän kuormitus muuttuu epäsymmetriseksi eli toisin sanoen vinoksi. Epäsymmetrisen kuormitusvirran johdosta syntyy jännitehäviöitä ja jännitteeseen syntyy vastakomponentti. Virran vastakomponentti aiheuttaa koneissa päävuota vastaan pyörivän magneettivuon ja pyörivä magneettivuo synnyttää moottorin pyörintää vastustavan vääntömomentin, josta aiheutuu vaarallista tärinää ja ylikuumenemista. Tätä varten koneita suojataan epäsymmetriareleillä. Vinoja kuormituksia syntyy useimmiten yhden tai kahden vaiheen katkeamisen vuoksi tai yksi- ja kaksivaiheisten oikosulkujen seurauksena. Oikosulut saadaan kuitenkin yleensä helpostihoidettua oikosulkusuojilla nopeasti, mutta johdinkatkeamien havaitseminen on vaikeampaa ja siksi epäsymmetriareleitä ei voida asetella kovinkaan herkälle, jotta ne eivät turhaan laukaise kuormitustilanteiden muuttuessa. [12,23.]

6.1.8 ROCOF-rele

ROCOF-rele (*Rate Of Changes Of Frequency*) on taajuuden muutosnopeutta tarkasteleva rele. Rele havaitsee nopeat taajuusvaihtelut ja irrottaa generaattorin verkosta mikäli taajuuden vaihtelu on liian suurta. ROCOF-relettä pidetään tällä hetkellä ainoana

suojaustapana, joka aina toimii luotettavasti 0,15 sekunnissa. Suomessa on ehdotettu käytettäväksi ROCOF-relettä, jonka asettelu on $1df/dt$ eli 1 Hz/s. Siten, jos taajuuden vaihtelu on yli 1 hertsiä sekunnissa, laite irtautuu aina. ROCOF-releiden on havaittu aiheuttavan laitosten turhia irtoamisia verkon taajuuden muutoksissa. Suomen verkossa verkkotaajuus on kuitenkin hyvin stabiili, joten tätä ongelmaa ei ole. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös muuta suojausmetodia ROCOF-releen tilalla, mutta sen tulee olla yhtä nopea ja luotettava eikä se saa aiheuttaa lisäongelmia, kuten tuotannon tarpeettomia irtoamisia verkkoon. [9; 25.]

6.1.9 Muut suojalaitteet

Edellä mainittujen releiden lisäksi saatetaan verkon suojauksessa tarvita myös muita suojalaitteita kuten valokaarisuojaa sekä erilaisia valvoja. Valokaaren syttyessä lämpötila ja paine nousevat ja se saattaa siten aiheuttaa tulipalon. Valokaarisuojaa käytetäänkin usein sähköasemilla täydentämään oikosulkusuojausta. Valokaarisuojassa on valokuidulla toisiinsa kytketyt valoanturit, jotka kiertävät kojeistossa. Valokaarirele mittaa joko pelkkää valoa tai valoa yhdessä ylivirran kanssa. Ne toimivat erittäin nopeasti ja yhdessä sähköaseman oikosulkusuojauksen kanssa suojauksesta saadaan selektiivinen.

Erilaisia valvoja käytetään suojauksessa releiden tavoin eli ne ohjaavat katkaisijoita, mutta eivät kuitenkaan mittaa mitään sähköisiä suureita. Niitä käytetään mm. paineen ja kierrosnopeuden mittaukseen. Yksi tunnettu valvoja on tehomuuntajissa käytetty Buchholz-kaasurele, joka sijoitetaan muuntajasäiliön ja paisuntasäiliön väliseen yhdysputkeen. Putkessa on normaalitilanteessa muuntajaöljyä, mutta esimerkiksi valokaaren sattuessa öljy kaasuuntuu ja rele havahtuu sulkien samalla laukaisupiirin. Toinen tärkeä valvoja on tahdissaolon valvoja, joka tarkistaa jännite-, taajuus- ja kulmaeron katkaisijan molemmin puolin antaen luvan kytkennälle, mikäli nämä suureet ovat asetelluissa rajoissa. Tahdissaolon valvojaa käytetään aina 220 kV:n ja 400 kV:n järjestelmissä ja tarvittaessa sitä voidaan myös käyttää 110 kV:n järjestelmissä. Sen pitää olla käytössä myös silloin, kun katkaisija joudutaan kytkemään käsin. Valvoja käytetään myös muuntajan käämissä valvomaan käämin lämpötilaa. Sen toiminta perustuu muuntajaöljyn lämpötilan ja kuormitusvirran mittaukseen. Niiden avulla voidaan määrittää muuntajan kuumimman pisteen lämpötila, joka määrittää muuntajan kuormittavuuden. [23.]

6.2 Jälleenkytkennät

Jakeluverkossa käytetään automaattista jälleenkytkentää poistamaan väliaikaiset oikosulut ja maasulut. Tilastollisesti jopa 90 % vioista poistuu automaattisella jälleenkytkennällä. Mikäli mikrotuotantolaitos ei kytkeydy irti jälleenkytkennän aikana, se voi ylläpitää verkon jännitettä ja syöttää vikavirtaa oikosuluissa. Näin ollen vikapaikan valokaa-ri ei pääse sammumaan, ja vika jää pysyväksi. Mikäli jälleenkytkentä on epäonnistunut, sillä on merkittäviä seurauksia. Se vähentää verkon luotettavuutta pidempien käyttökeskeytyksien muodossa sekä se johtaa myös jännitekuoppien määrien kasvamiseen ja häiriöihin muualla verkossa. [9.]

7 Lopuksi

Oma energiantuotanto kannustaa ihmisiä kuluttamaan energiaa järkevämmiin ja sillä on myös merkittävä myönteinen vaikutus talouteen. EU:n vuonna 2008 asettamien ilmas- to- ja energiasäännösten ansiosta mikrotuotannon suosio on selvästi nousussa. EU velvoittaa lisäämään uusiutuvien energialähteiden osuutta kaikista energialähteistä EU:ssa 20 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä. Suomen tulee näiden säännösten mu- kaisesti lisätä uusiutuvien energialähteiden osuus 38 prosenttiin nykyisestä (2012) 30 prosentista. [27; 28; 29.]

Sähkön pientuotanto sekä siihen liittyvä palvelu-, asennus- ja huoltoliiketoiminta mah- dollistavat uusien työpaikkojen synnyn. Mikäli uusiutuvan energian tuotanto lisääntyy EU:n tavoitteiden mukaisesti, saadaan sen avulla Suomeen 3000 lisätyöpaikkaa. Sa- malla bruttokansantuote nousee 0,2 prosenttia ja kasvihuonepäästöt laskevat 6-10 prosenttia vuoteen 2010 verrattuna. [27.]

Kuten jo eri mikrotuotantomuodoista kertovassa luvussa todettiin, on aurinko- ja tuuli- voimalla myös muita huomattavia etuja. Esimerkiksi tuulivoiman tuotannossa ei synny ollenkaan hiilidioksidi- tai muita päästöjä ja aurinkoenergian tuotannossa käytettävät aurinkokennot ovat hyvin pitkäikäisiä ja lähes huoltovapaita [8]. Sitran teettämässä Saisiko olla lähien energiapalveluja? –kyselyssä (2011) selvitettiin, onko asunnonomistajil- la ja mökkiläisillä kiinnostusta eri energiaratkaisuja ja lähien energiapalveluja kohtaan.

Kyselyn mukaan aurinkosähköpaneelit ja lämpökeräimet olivat toiseksi suosituimmat energian tuotantoratkaisut maalämmön jälkeen. [27; 30.]

Näistä edellä mainituista syistä mikrotuotannon kasvua olisi syytä tukea ja siksi esimerkiksi Motiva on perustanut kaksi työryhmää edistämään mikrotuotantoa. Toinen työryhmistä, verkkotyöryhmä, pyrkii edistämään mikrotuotantolaitteistojen verkkoonliittämistä ja toinen ryhmä, kauppatyöryhmä, taas keskittyy edistämään mikrotuotetun sähkön markkinoille pääsyä. Energiategollisuuden vähittäismarkkinatoimikunta on lisäksi valmistellut ohjetta mikrotuotannon ostosopimusten tekemistä varten. Ohjeessa listataan, mitä asioita sähkönmyyjän on hyvä huomioida laatiessaan sopimusta pientuotannon ostosta. Ohjeen tarkoituksena on siten tukea ja kannustaa myyjiä ostamaan pientuotettua sähköä. [31.]

EU:n energia- ja ilmastopakettien tavoitteiden saavuttamiseksi on myös asetettu valtioneuvoston pitkän aikavälin energia- ja ilmastostrategia, jota on päivitetty viimeksi maaliskuussa 2013. Strategian mukaan Suomi olisi tehdyillä toimenpiteillä ylittämässä asetetun tavoitteen uusiutuvan energian kohdalla, eli vuonna 2020 saavutettaisiin tavoite, jossa energian loppukulutuksesta olisi 38 % uusiutuvaa energiaa. Valtio on tukenut tavoitteiden saavuttamista mm. varaamalla 20 miljoonan euron erillistuen merituulivoiman tukemiseen vuodelle 2015. Lisäksi tuulivoimaa tuetaan kehittämällä suunnittelua ja lupamenettelyjä ja jatkamalla tuulivoiman investointeihin liittyvien esteiden poistamista. [32.]

Lähteet

- 1 Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon. 2009. Verkkodokumentti. Energiateollisuus.
<http://energia.fi/sites/default/files/mikrotuotannon_liittaminen_verkostosuositus_lopullinen_2009.pdf> Luettu 7.4.2013.
- 2 Tekninen liite 1 ohjeeseen sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon – nimellisteholtaan enintään 50 kVA laitoksen liittäminen. 2013. Verkkodokumentti. Energiateollisuus.
<http://energia.fi/sites/default/files/tekninen_liite_1_-_enintaan_50_kva_paivitetty_20130228.pdf> Luettu 20.4.2013.
- 3 Sähkömarkkinalaki. 2013. Verkkodokumentti. Finlex.
<<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1995/19950386>> Luettu 13.3.2013.
- 4 Pienimuotoisen tuotannon verkkoon liittäminen, muistio verkonhaltijoiden käyttöön. 2008. Verkkodokumentti.
<http://energia.fi/sites/default/files/Pienimuotoisen_tuotannon_verkkoon_liitt%C3%A4minen_muistio_20081112.pdf> Luettu 15.2.2013.
- 5 Auringosta lämpöä ja sähköä. 2012. Motiva Oy. Verkkodokumentti.
<http://www.motiva.fi/files/6137/Auringosta_lampoa_ja_sahkoa2012.pdf> Luettu 1.3.2013.
- 6 Tuulivoima. 2008. Verkkodokumentti. Energiateollisuus.
<<http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energiالاhteet/tuulivoima>> Luettu 1.3.2013.
- 7 Suomen tuulivoimatilastot. 2012. Verkkodokumentti. VTT.
<<http://www.vtt.fi/proj/windenergystatistics/index.jsp>> Luettu 2.3.2013.
- 8 Tuulivoima. 2013. Verkkodokumentti. Motiva Oy.
<http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/tuulivoima> Luettu 1.3.2013.
- 9 Lehto, Ina. 2009. Mikrotuotannon liittäminen yleiseen sähkönjakeluverkkoon. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.
- 10 Bioenergiassa on myönteisyyttä. 2010. Verkkodokumentti. Finbio ry.
<<http://www.finbioenergy.fi/default.asp?sivuID=9164>> Luettu 2.3.2013
- 11 Sähkön pientuotannon liittäminen verkkoon. 2006. Verkkodokumentti. Motiva Oy.
<http://www.motiva.fi/files/232/Sahkon_pientuotannon_liittaminen_verkko_on.pdf> Luettu 4.3.2013.
- 12 Elovaara, Jarmo & Haarla, Liisa. 2011. Sähköverkot II. Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto.

- 13 Sähköverkon automaatio ja suojaus. 2007. Verkkodokumentti.
<http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/5sahkoverkon_automaatio_ja_suojaus.pdf> Luettu 13.4.2013.
- 14 Aurinkoenergia. 2009. Verkkodokumentti. Kahil Oy.
<<http://www.gree.fi/index.php?page=1022&lang=1>> Luettu 13.4.2013.
- 15 Aurinkokeräin. 2012. Verkkodokumentti. Jodat Ympäristöenergia Oy.
<<http://www.y-energia.com/aurinkolampo/aurinkokerain/aurinkokerain.html>> Luettu 13.4.2013.
- 16 Tuulivoimaloiden rakenne. 2013. Verkkodokumentti. Suomen Tuulivoimayhdistys Ry. <<http://www.tuulivoimatieto.fi/rakenne>> Luettu 13.4.2013.
- 17 Victorian Consumer Guide to Small Wind Turbine Generation. 2013. Verkkodokumentti. Enhar.
<http://www.enhar.com.au/index.php?page=small_wind_turbine_consumer_guide> Luettu 30.4.2013.
- 18 Mikrotuotannon liittäminen sähköjakeluverkkoon. 2010. Verkkodokumentti. Energiateollisuus.
<<http://www.vantaanenergia.fi/fi/Sahko/SahkoverkotVantaalla/Documents/Energiateollisuuden%20verkostosuositus%20mikrotuotannon%20liitt%C3%A4minen.pdf>> Luettu 1.4.2013.
- 19 Tiihala, Antti. 2009. Pienvesivoimalaitokset. Kandidaatintyö. Lappeenrantaan teknillinen yliopisto.
- 20 Rakennusten sähköasennusten EMC-vaatimukset. 2008. Verkkodokumentti. Sähköala.fi.
<http://www.sahkoala.fi/ajankohtaista/artikkeleita/saadokset_ja_maaraykset/fi_FI/emc-vaatimukset/> Luettu 18.4.2013.
- 21 EMC-direktiivin 2004/108/EY soveltamisopas. 2010. Verkkodokumentti. Tukes.
<http://www.tukes.fi/Tiedostot/sahko_ja_hissit/ohjeet/EMC_dir10804_sovopas.pdf> Luettu 13.4.2013]
- 22 Elovaara, Jarmo & Haarla, Liisa. 2011. Sähköverkot I. Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Otatieto.
- 23 Koivunen, Tiina. 2010. Tuulipuiston sähköverkon suojaus. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
- 24 Häsä, Sanna. 2009. Generaattorisuojauksen uusinta. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.
- 25 Installation and Operating Instructions R.O.C.O.F Protection Relay. 2008. Verkkodokumentti. Tyco Electronics UK Limited.
<http://energy.te.com/china/crompton_doc/rocof.pdf> Luettu 25.4.2013.

- 26 Tekninen liite 1 ohjeeseen sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon – nimellisteholtaan enintään 50 kVa laitoksen liittäminen. 2013. Verkkodokumentti. Energiateollisuus.
<http://energia.fi/sites/default/files/tekninen_liite_1_-_enintaan_50_kva_paivitetty_20130228.pdf> Luettu 19.4.2013.
- 27 Aurinkosähkön ja muun uusiutuvan sähkön pientuotannon edistäminen Suomessa. 2012. Verkkodokumentti. Sitra.
<http://www.sitra.fi/sites/default/files/u489/sahkon_pientuotanto_keskustelupaperi_2012-9-3.pdf> Luettu 8.5.2013.
- 28 EU:n energia- ja ilmastopaketti. 2012. Verkkodokumentti. Valtion Ympäristöhallinto.
<<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=264826&lan=FI#a6>> Luettu 8.5.2013.
- 29 Energian kokonaiskulutus laski 2 prosenttia vuonna 2012. 2013. Verkkodokumentti. Tilastokeskus.
<http://www.stat.fi/til/ehk/2012/04/ehk_2012_04_2013-03-22_tie_001_fi.html> Luettu 8.5.2013.
- 30 Saisiko olla lähienergiapalveluja? Kyselytutkimus. 2011. Verkkodokumentti. Sitra. <<http://www.sitra.fi/julkaisut/Selvityksi%C3%A4-sarja/Selvityksia60.pdf>> Luettu 9.5.2013.
- 31 Energiateollisuuden ajankohtaiskatsaus. 2013. Verkkodokumentti. Energiateollisuus.
<http://www.adato.fi/portals/2/Koulutus/Onnistunut%20asiakas%202013/Esitys_Lehto.pdf> Luettu 9.5.2013.
- 32 Kansallinen energia- ja ilmastostrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 20. päivänä maaliskuuta 2013. 2013. Verkkodokumentti. Työ- ja elinkeinoministeriö.
<http://www.tem.fi/files/36266/Energia_ja_ilmastostrategia_nettijulkaisu_SUOMENKIELINEN.pdf> Luettu 9.5.2013.