



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

PIENTUOTANNON AIHEUTTAMAT VIAT JA HÄIRIÖT

Antti Tšili

Opinnäytetyö
Toukokuu 2017
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

TSILI, ANTTI:

Pientuotannon aiheuttamat viat ja häiriöt

Opinnäytetyö 105 sivua, joista liitteitä 10 sivua
Toukokuu 2017

Opinnäytetyö toteutettiin Tampereen Sähköverkko Oy:n toimeksiannosta. Opinnäytetyön tarkoituksena oli tarkastella pientuotannon lisääntymisen verkostovaikutuksia ja näiden vaikutusten aiheuttamia vikoja ja häiriöitä sähköverkossa. Tämän lisäksi luotiin pientuotannon liittämisen ohjeistus Tampereen Sähköverkko Oy:lle soveltaen Energiateollisuus ry:n yleistä ohjeistusta pientuotannon liittämisestä jakeluverkkoon.

Pientuotannon käsitteen ymmärtämiseksi pientuotannoksi määritellään sähkömarkkina-lain 588/2013 nojalla kaikki alle 2 megavolttiampeerin tuotantolaitokset ja mikrotuotannoksi kaikki alle 100 kilovolttiampeerin tuotantolaitokset. Pientuotannon nykytilaa tarkasteltiin Suomen jakeluverkkoon liitettyjen alle 1 megawatin tuotantolaitosten kapasiteetin kautta. Hajautetun tuotannon selventämiseksi, käytiin teoreettisesti läpi yleisimmät pientuotannossa hyödynnetyt hajautetun tuotannon muodot sekä niiden toimintaperiaatteet.

Tuotannon liittämisen kannalta oleelliset säädökset, asetukset ja tekniset vaatimukset käytiin läpi pääpiirteittäin, jotta saatiin mahdollisimman kokonaisvaltainen kuva tuotannon liittämisen prosessista. Läpi käytyt säädökset ja vaatimukset koskevat alle 100 kilovolttiampeerin, yli 100 kilovolttiampeerin ja yli 500 kilovolttiampeerin tuotantolaitteistoja, mutta pääpaino oli alle 100 kilovolttiampeerin tuotantolaitteistoilla, sillä suurempien tuotantolaitosten liittämisessä tekniset reunaehdot ja suojauksen asetteluarvot riippuvat liittämiskohdan ominaisuuksista, ja siitä syystä ne määritellään tapauskohtaisesti.

Hajautetun tuotannon verkostovaikutukset luovat tiettyjä haasteita verkon toiminnalle ja suojaukselle. Työssä käytiin läpi tyypillisimmät suojaukseen ja verkon toimintaan liittyvät ongelmat, jotka liittyvät suoraan pientuotannon liittämiseen johtolähdölle. Raportissa esitetyt ongelmakohdat ovat teoreettisia, ja saadut tulokset perustuvat verkkovaikutusten fysikaaliseen arviointiin sekä olemassa olevan verkon mallintamiseen matemaattisen simuloinnin avulla.

Työssä havaittiin, että vaikka tuotannon lisääminen johtolähdölle voi tietyissä tilanteissa johtaa huomattaviin verkon toimintaa häiritseviin ja sähköturvallisuutta vaarantaviin tilanteisiin, nämä tilanteet ovat estettävissä verkon tarkalla suunnittelulla ja lisäinvestoinneilla. Tuotannon vaikutusten selvittäminen kuitenkin vaatii liittyjän ja verkonhaltijan välistä tiedonvaihtoa ja tiivistä yhteistyötä.

Asiasanat: mikrotuotanto, pientuotanto, hajautettu tuotanto, häiriö, jakeluverkko, liittäminen

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Option of Electrical Power Engineering

TSILI, ANTTI:

Faults and Disturbances Caused by Small-Scale-Electricity Production

Bachelor's thesis 105 pages, appendices 10 pages

May 2017

The thesis was commissioned by Tampereen Sähköverkko Oy. The objective of the thesis was to examine the effects of increased small-scale-electricity production in distribution network and the faults and interferences caused by these effects. In addition, a brief technical guideline for connecting small-scale-electricity production to the distribution network of Tampereen Sähköverkko Oy was created.

To understand the concept of small-scale-electricity production, Electricity Market Act 588/2013 ensures that all generation installations with nominal rated capacity of up to 2 megavolt-ampere are small-scale generation and installations with nominal rated capacity of up to 100 kilovolt-ampere are microgeneration. The current state of small-scale-electricity production is examined by analyzing the total production capacity of up to 1 megawatt generation installations in the Finnish distribution network. The most common forms of distributed generation utilized in small-scale-electricity production and their operating principles are examined theoretically.

The most relevant legal acts, regulations and technical requirements for the integration of electricity production are outlined to obtain a general view of the integration process. These acts, regulations and technical requirements apply to generation installations with nominal rated capacity of up to 100 kilovolt-ampere, over 100 kilovolt-ampere and over 500 kilovolt-ampere. However, the focus is on inverter connected installations of less than 100 kilovolt-ampere since other forms of installations with higher nominal power may have additional requirements from the system operator.

The effects of distributed generations create certain challenges for network operation and safety. The thesis covers the most common problems related to network operation and safety, which are directly related to the addition of small-scale-electricity production. The problematic areas presented in the thesis are theoretical and the results are based on evaluations of physical phenomena and modeling of an existing distribution network through mathematical simulation.

The thesis concludes that even though the addition of small-scale-electricity production can in certain situations lead to significant interferences and safety hazards in the distribution network, these situations can be prevented with accurate network planning and additional investments. However, cooperation and exchange of information is critical to assess the effects of electricity generation.

Key words: microgeneration, small-scale-electricity production, distributed generation, fault, electricity distribution network, interconnection

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	8
2	SÄHKÖN PIENTUOTANTO.....	10
2.1	Pientuotannon nykytila Suomessa	11
2.2	Aurinkosähkö.....	14
2.3	Tuulivoima.....	18
2.4	Bioenergia	23
2.5	Vesivoima	26
2.6	Pien-CHP	30
2.7	Pientuotannon tulevaisuuden näkymät	33
3	PIENTUOTANNON LIITTÄMINEN VERKKOON.....	34
3.1	Yleistä	34
3.2	Luvat ja sopimusehdot	35
3.3	Sähkemarkkinavirastolle tehtävät ilmoitukset.....	35
3.4	Sähköverovelvollisuus	36
3.5	Tuet ja vähennykset	37
3.5.1	Syöttötariffit	38
3.6	Ylijäämäsihtin myynti	39
3.7	Sähköntuotannon siirtomaksu.....	40
3.8	Voimalaitosten järjestelmätekniiset vaatimukset.....	41
3.8.1	Vastuut, velvollisuudet ja oikeudet	42
3.8.2	Vaatimusten todentamisprosessi	42
3.8.3	Sähkön mittaus	43
3.8.4	Suojausasettelu	44
3.8.5	Toiminta erilaisilla jännitteillä ja taajuuksilla.....	44
3.8.6	Vaatimuksista poikkeaminen	46
3.9	Uudistettujen rakennusstandardien vaikutukset pientuotantoon.....	46
4	PIENTUOTANNON LIITTÄMISEN TEKNISET RATKAISUT	49
4.1	Yleistä	49
4.2	Tuotantolaitosten luokittelu	49
4.3	Tuotannon liittämisaajat	51
4.4	Tuotannon maksimimäärä liittymässä	52
4.5	Yksivaiheisen tuotannon rajaaminen	54
4.6	Tuotantolaitoksesta ilmoitettavat tekniset tiedot	54
4.7	Sähkön tuotannon mittaus.....	55
4.8	Tuotantolaitosten suojaus ja sähköturvallisuus.....	57
4.9	Liittämistekniikat	59

4.9.1	Epätahtigeneraattorit	59
4.9.2	Tahtigeneraattorit	59
4.9.3	Invertterikäytöt	60
4.10	Sähkön laatuvaatimukset	60
4.11	Loistehosäätö	61
4.12	Pätötehosäätö	62
5	PIENTUOTANNON VAIKUTUKSET VERKON TOIMINTAAN.....	63
5.1	Nopeat jännitteenmuutokset ja välkyntä.....	66
5.2	Jännitekuoppa	67
5.3	Taajuusvaihtelu	69
5.4	Jännitteen nousu.....	70
5.5	Jännitesäädön sekoittuminen	72
5.6	Saareketilanne	73
5.7	Yliaallot	74
5.8	Tehon siirtyminen huipputuotannon aikana	76
5.9	Vikavirtojen kasvu	78
5.10	Suojauksen sokaistuminen	80
5.11	Suojauksen virhelaukaisu	83
5.12	Jälleenkytkennän epäonnistuminen	86
5.13	Kolmivaihejärjestelmän epäsymmetria.....	87
5.14	Ilmoittamattomat tuotantolaitokset	88
6	YHTEENVETO	90
	LÄHTEET.....	92
	LIITTEET	96
	Liite 1. Pientuotannon liittämisen ohjeistus. Tampereen Sähköverkko Oy	96
	Liite 2. Kahvasulakkeiden sulamisarvot (ABB 2012).....	105

LYHENTEET JA TERMIT

A	pinta-ala
g	putoamiskiihtyvyys
H	polttoaineen lämpöarvo
h	putoamiskorkeus
i	kahden tunnin ajanjakson järjestysluku
I_s	käynnistysvirta
I_n	nimellisvirta
I_{\max}	suurin kuormavirta
I_{\min}	pienin yksivaiheinen oikosulkuvirta
$I_{k3\max}$	suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta
m	massa
m_i	ilmavirtauksen massavirta
P_i	ilmavirtauksen teho
P_l	lämmitysteho
P_v	vesivoimalan teho
P_0	muuntajan tyhjäkäyntihäviöt
P_k	muuntajan kuormitushäviöt
P_N	tuotantolaitoksen nimellisteho
P_{st}	lyhytaikainen häiritsevyyssindeksi
P_{lt}	Pitkäaikainen häiritsevyyssindeksi
Q	veden virtaama
R	resistanssi
R_k	oikosulkuresistanssi
S_k	verkon oikosulkuteho
S_n	tuotantolaitoksen nimellisteho
U	jännite
U_{hm}	muuntajassa syntyvä jännitteenalenema
$U_{h\max}$	jännitteenaleneman suurin arvo
U_n	nimellisjännite
u_n	jännitteen epäsymmetriakerroin
U_{12}	vaiheiden 1 ja 2 välinen pääjännite
U_{23}	vaiheiden 2 ja 3 välinen pääjännite

U_{31}	vaiheiden 3 ja 1 välinen pääjännite
v_i	ilmavirtauksen nopeus
W_i	ilmavirtauksen liike-energia
X	reaktanssi
Z_k	oikosulkuimpedanssi
ρ	tiheys
η	hyötysuhde
β	jännitekerroin
CHP	lämmön ja sähkön yhteistuotanto
EPBD	energy performance of buildings directive
CENELEC	european committee for electrotechnical standardization
IEC	international electrotechnical commission
LE	liittymisehdot
MPP	maksimitehopiste
ORC	organic rankine cycle
RES	renewable energy sources directive
RMS	tehollisarvo
ROCOF	rate of change of frequency
THD _I	virran harmoninen kokonaissärö
THD _U	jännitteen harmoninen kokonaissärö
TLE	tuotannon liittymisehdot
TVPE	tuotannon verkkopalveluehdot
VJV	voimalaitosten järjestelmätekniilliset vaatimukset
VPE	verkkopalveluehdot

1 JOHDANTO

Nykyinen sähkönjakelujärjestelmä on suunniteltu siirtämään keskitetyn tuotannon energia suurilta tuotantolaitoksilta sähkön kuluttajille. Tilanne on kuitenkin nopeasti muuttumassa, kun sähkön kulutuksen jatkuva kasvu, teknologian kehittyminen ja nouseva sähkön hinta lisäävät kuluttajien kiinnostusta toimia myös sähkön tuottajina. Eri puolille verkkoa sijoitetut pienet sähköntuotantolaitokset voivat pienentää kuluttajan sähkölaskua ja vähentää haitallisia kasvihuonepäästöjä, mutta samalla ne luovat huomattavia haasteita perinteisen sähköverkon toiminnalle ja suojaukselle. Verkkoyhtiöille hajautetun tuotannon kasvu onkin verkon suunnittelun ja toimintavarmuuden takaamisen näkökulmasta merkittävä haaste.

Pientuotanto on merkittävä osatekijä Suomen ilmastopolitiikassa, sillä tuotantomuodot perustuvat useimmiten uusiutuvan energialähteen lähes päästöttömään paikalliseen hyödyntämiseen. Yksityisasiakkaat eivät kuitenkaan usein ole halukkaita tekemään julkisivua merkittävästi muokkaavia ja taloudellisesti epävarmoja investointeja. Tukitoiminnan ja lainsäädännön avulla pientuotannosta olisi mahdollista tehdä taloudellisesti kannattavaa ottamalla mallia esimerkiksi Saksasta, jossa selkeät toimintamallit ja ylijäämästä maksettava reilu korvaus ovat johtaneet pientuotannon räjähdysmäiseen kasvuun viime vuosien aikana.

Sähkön pientuotannon liittäminen jakeluverkkoon on monelle uusi asia. Liityntää koskevista vaatimuksista ja ehdoista on kuitenkin olemassa hyvät ja selkeät ohjeet, joiden avulla maallikonkin on helppo tutustua aiheeseen. Ohjeet kuitenkin usein käsittelevät vain verkkovaihtosuuntaajalla liitettäviä pieniä laitteistoja, jolloin liityntätavan muuttuessa tai tuotantolaitoksen koon kasvaessa, monia asioita jätetään verkonhaltijan harkinnan varaan.

Vikatilanteet hajautettua tuotantoa sisältävässä sähköverkossa ovat tavallista haastavampia, koska verkon suojaus on toteutettu sillä oletuksella, että vikavirtaa syötetään ainoastaan ylemmältä jänniteportaalta. Tuotantolaitoksen sijoituksesta ja vikapaikasta riippuen vikavirrat voivat kasvaa alueellisesti termisiä kestoajoja suuremmiksi tai alentua suojauksen kohdalla niin paljon, että vikapaikan erottaminen ei onnistu. Myös normaalit

suunnitellut verkon toiminnot, kuten jälleenkytkennät voivat häiriintyä hajautetun tuotannon pitäessä vikaa yllä ja johtolähdön erottaminen verkostotöiden ajaksi voi takasyötön vuoksi johtaa hengenvaarallisen saareketilanteen syntymiseen.

Tulevaisuudessa sähkön tuotanto on jakautunut huomattavasti laajemmalle alueelle ja tuotantomuodot vaihtelevat selvästi enemmän, kuin mihin tähän asti on totuttu. Tästä johtuen yleisen sähköverkon kanssa rinnan toimiville hajautetun tuotannon laitoksille asetetaan entistä kovempia vaatimuksia. Tarkoituksena on varmistaa, esimerkiksi lainsäädännön keinoin hajautetun tuotannon turvallinen integrointi osaksi sähköverkkoa ja puhtaampaa tulevaisuuden sähköjärjestelmää.

Tässä insinööriyössä on tarkoitus selvittää, mitä sähkön hajautetulla pientuotannolla tarkoitetaan, mitä edellytyksiä pientuotannon verkkoon liittämiseksi on asetettu ja mitä vaikutuksia pientuotannon lisääntymisellä on verkon toiminnan ja suojauksen kannalta. Lisäksi pohditaan pientuotannon aiheuttamien vikojen ja häiriöiden ehkäisyä ja verkostovaikutusten hyödyntämistä. Voimassa olevien asetusten, lakien ja suositusten perusteella luodaan lopuksi pientuotannon hankintaa harkitsevalle liityntäohje, jota seuraamalla asiakkaan on helppo saada yleiskuva tuotannon liittamisestä Tampereen Sähköverkko Oy:n jakeluverkkoon (liite 1).

2 SÄHKÖN PIENTUOTANTO

Sähkömarkkinalain 588/2013 määritelmän mukaan, kaikki alle 2 MVA:n tuotantolaitokset luetaan pientuotantolaitoksiksi. Tätä kokoluokkaa suurempia, suoraan kantaverkkoon liitetyjä tuotantolaitoksia kutsutaan keskitetyiksi tuotantolaitoksiksi ja niitä koskevat pitkälti samat säännökset kuin teollisen mittakaavan sähköntuotantoa. (Sähkömarkkinalaki 588/2013 § 3)

Sähkön pientuotanto on yleensä hajautettua sähkön tuotantoa. Hajautetun energiantuotannon kuvaukseen ei ole yksiselitteistä vastausta, sillä se käsittää useita toisiinsa liittyviä konsepteja energian tuotantoon ja kulutukseen liittyen. Keskitetty tuotanto koostuu lähinnä ulkomailta tuotujen raaka-aineiden käyttöön energiantuotannossa, kuten hiili, uraani tai maakaasu. Hajautettu energiantuotanto puolestaan käyttää paikallisia ja suurimmilta osin uusiutuvia luonnonvaroja energiantuotantoon, kuten aurinko-, tuuli- ja vesivoimaa. Hajautetun tuotannon hyödyntämisellä voidaan vähentää ympäristölle haitallisten päästöjen määrää ja lisätä energiaomavaraisuutta. Toistaiseksi Euroopassa ja Suomessa kuitenkin vain pieni osa hajautetun tuotannon potentiaalista hyödynnetään sähkön tuotannossa, sillä suuren kokoluokan keskitetty energiantuotanto on huomattavasti energia- ja kustannustehokkaampi tapa kattaa oma sähkönkulutus. (Vihanninjoki 2015, 3)

Sähköntuotannon hajauttamisen edut ovat jo yleisesti tiedossa. Pienistä hajallaan olevista tuotantolaitoksista koostuva järjestelmä ei ole yhtä haavoittuva kuin keskitetty tuotanto ja koska pientuotanto keskittyy hyödyntämään uusiutuva energianlähteitä, ovat raaka-aineiden kustannukset pienet ja energiavarat kotimaisia. Vaikka hajautetusta pientuotannosta saadut hyödyt ovat moninaiset, täysin ongelmattomia niiden käyttö ei ole. Suomen sähkönsiirtoverkko ei ole rakennettu vastaamaan hajautetun tuotannon tarpeisiin, vaan siirtämään keskitetyn tuotannon energia loppukuluttajille. Tämä ei tietenkään tarkoita, että verkon kehittäminen ei olisi mahdollista, mutta ei se ilmaistakaan ole ja loppujen lopuksi kehittämisen kustannukset maksavat sähkön kuluttajat. Asennettu tuotantolaitteisto myös muuttaa oleellisesti maisemakuvaa, josta voi seurata kiistoja lähinaapureiden kanssa. (Kasvi 2009)

Kuvassa 1 on esitettyä periaatekuva hajautetusta sähköntuotannosta.



KUVA 1. Periaatekuva hajautetusta sähköntuotannosta (Tampereen sähkölaitos)

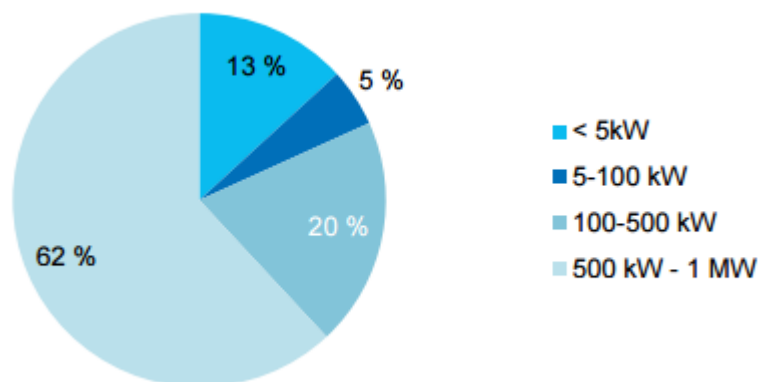
Kuvasta voidaan havaita hajautetun järjestelmän monipuolisuus. Jokien vesien virtausenergia hyödynnetään rakentamalla pienvesivoimaloita, asuntojen ja virastorakennusten kattopinta-alat otetaan hyötykäyttöön asentamalla aurinkopaneeleita ja -keräimiä, sekä aukeiden alojen tuulienergia hyödynnetään rakentamalla tuulivoimalaitoksia. Hajautettua tuotantoa toki on tukemassa perinteinen keskitetty tuotanto, joka paikkaa osan sähköenergian tarpeesta.

2.1 Pientuotannon nykytila Suomessa

Energiavirasto teetti selvityksen sähköverkkoon liitetystä pientuotannosta vuonna 2015, jossa tarkasteltiin Suomen sähköverkkoon liitettyjen alle 1 MW tuotantolaitosten kokonaiskapasiteettia. Tutkimuksen tarkoituksena oli saada tietoa eri tuotantomuotojen yleisyydestä, tuotantomuotojen jakautumisen tasapainosta ja pyrkiä tulosten perusteella ennustamaan pientuotannon määrän kasvua Suomen sähköverkossa. Tutkimustulokset saatiin kyselylomakkeiden perusteella, jotka lähetettiin eri sähköverkkoyhtiöille. Kaikkein pienimpiä verkkoyhtiöitä ja niiden jakeluverkkoihin liitettyä tuotantoa ei otettu huomioon. Voidaan kuitenkin olettaa, että pienimpien tutkimuksen ulkopuolelle jäävien ver-

konhaltijoiden jakeluverkkoihin liitetyn tuotannon osuus kokonaistuotannosta on häviävän pieni, eikä siten vaikuta oleellisesti saatuun tutkimustulokseen. Tämän perusteella voidaan siis todeta, että tehty tutkimus antaa varsin kattavan ja kokonaislaatuisen kuvan tämänhetkisestä pientuotannon määrästä Suomessa. (Pöyry Management Consulting Oy 2017, 8)

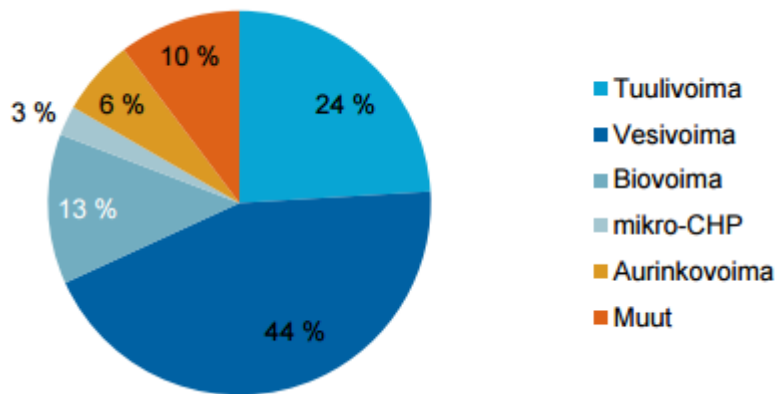
Tutkimuksessa saatiin selville, että kyselyyn osallistuneiden verkkoyhtiöiden jakeluverkoissa pientuotantoa oli liitettynä yhteensä 120 MW. Tutkimustulosten perusteella luotiin kuvio 1, jossa on esitettyä sähkön pientuotannon eri tuotantolaitosten kokoluokkien osuudet liitettyyn 120 MW suhteutettuna. Tässä vaiheessa ei vielä oteta huomioon käytettyä tuotantomuotoa, vaan jako eri teholuokkiin tapahtuu pelkästään tuotantolaitosten nimellistehon perusteella. Kuvioista voidaan havaita, että 62 % eli noin 75 MW tarkastellussa olleesta pientuotannosta oli kooltaan 500 kW – 1 MW. Seuraavaksi suurin pientuotannon kapasiteetti oli 100 kW – 500 kW 20 % eli noin 24 MW osuudella. Pienin osuus oli 5-100 kW tuotantolaitoksilla, joiden osuus oli vain noin 5 %. Alle 5 kW tuotantolaitteistojen osuus oli noin 13 %. Tähän todennäköisesti vaikuttaa se, että monen kotitalouden asennetun pientuotantojärjestelmän nimellisteho on alle 5 kW ja ihmisten ympäristötietoisuuden kasvu, energiaomavaraisuuteen pyrkiminen sekä varavoimalaitteiden yleistymisen ovat lisänneet näiden laitteistojen hankintaa. (Pöyry Management Consulting Oy 2017, 8)



KUVIO 1. Sähkön pientuotannon kokoluokkien osuudet (Pöyry Management Consulting Oy 2017, 8)

Kun verkkoon liitettyä 120 MW hajautetun tuotannon kapasiteettia tarkastellaan eri tuotantomuotojen osuuksien näkökulmasta ja jako luokkiin tehdään tämän perusteella, voi-

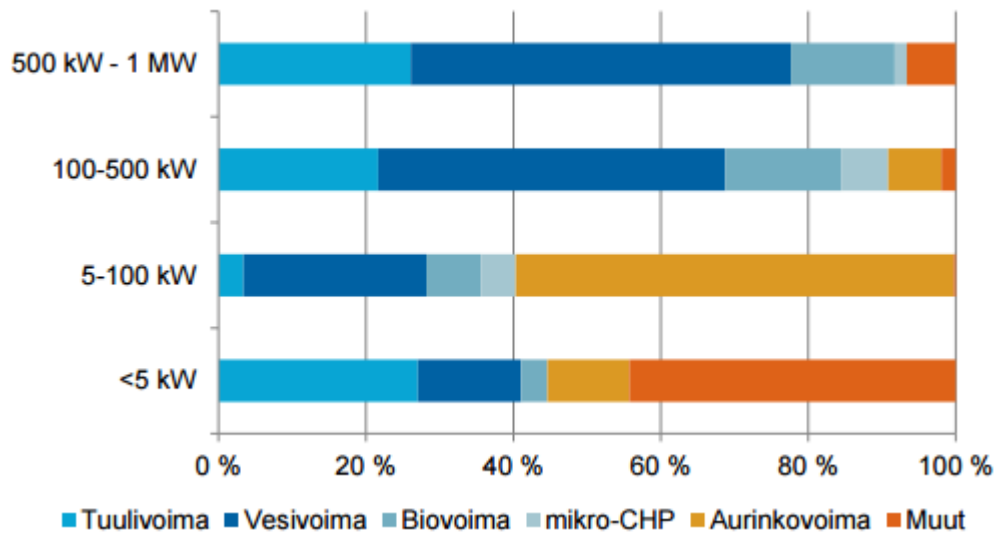
daan saatujen tietojen pohjalta luoda kuvio 2. Kuviossa 2 on esitettyä sähkön pientuotannon tuotantomuotojen osuudet liitetystä kokonaistuotannosta. Kuviossa voidaan havaita, että suurin osa tämänhetkisestä pientuotannon kapasiteetista on vesivoimaa 44 % eli noin 53 MW osuudella. Tämä ei sinällään ole yllättävää, koska vesivoiman pientuotannossakin käytetyt generaattorikoot ovat nimellisteholtaan varsin suuria vaadittujen huomattavien alkuinvestointien vuoksi, jolloin takaisinmaksun takaamiseksi tuotetun energiamäärän on oltava pientuotannoksi huomattava. Seuraavaksi suurin osuus on tuulivoimalla 24 % eli noin 29 MW osuudella. Biovoima nousee kolmanneksi 13 % eli noin 16 MW osuudella. Tähän todennäköisesti vaikuttaa voimakkaasti etenkin maataloudessa biovoiman tukeminen valtion toimesta. Kotitalouksien suosiossa olevan aurinkovoiman osuus on noin 6%. (Pöyry Management Consulting Oy 2017)



KUVIO 2. Sähkön pientuotannon tuotantomuotojen osuudet (Pöyry Management Consulting Oy 2017, 8)

Kun otetaan huomioon sekä pientuotannon kokoluokka, että käytetty tuotantomuoto, voidaan tietojen perusteella luoda kuvio 3. Kuviossa 3 on esitettyä sähkön pientuotannon tuotantomuotojen osuudet eri kokoluokissa. Kuvion perusteella voidaan havaita, että suurimman kokoluokan pienvoimaloista 50 % hyödyntävät vesivoimaa ja 25 % tuulivoimaa. Loppu osuus sähköntuotannosta jakaantuu muiden tuotantomuotojen välille. Syyt näiden kahden tuotantomuodon suureen osuuteen tuotannosta on käyty läpi edellisissä kappaleissa. Myös 100-500 kW luokassa nämä kaksi tuotantomuotoa varaavat suurimman osan tuotannosta ja suurempaan luokkaan verrattuna ei muidenkaan tuotantomuotojen osalta ole paljoa muutosta. 5-100 kW luokassa nähdään kuitenkin huima muutos, kun vesi- ja tuulivoiman yhteisosuus tippuu noin 30 %:iin ja aurinkoenergian osuus kasvaa 60 %:iin. Tämä selittyy sillä, että tähän kokoluokkaan sijoittuvat tuotantolaitokset asennetaan

useimmiten toimistojen ja pienten kauppakeskusten katoille ja ne useimmiten ovat aurinkopaneelijärjestelmiä. Tämä kokoluokka myös kattaa suurempien kotitalouksien aurinkojärjestelmät. Näitä pienempien alle 5 kW järjestelmien kohdalla ei ole määritelty, mitä tuotantomuotoa noin 50 % pientuotantolaitoksista käyttää. (Pöyry Management Consulting Oy 2017, 9)



KUVIO 3. Sähkön pientuotannon tuotantomuotojen osuudet eri (Pöyry Management Consulting Oy 2017, 9)

2.2 Aurinkosähkö

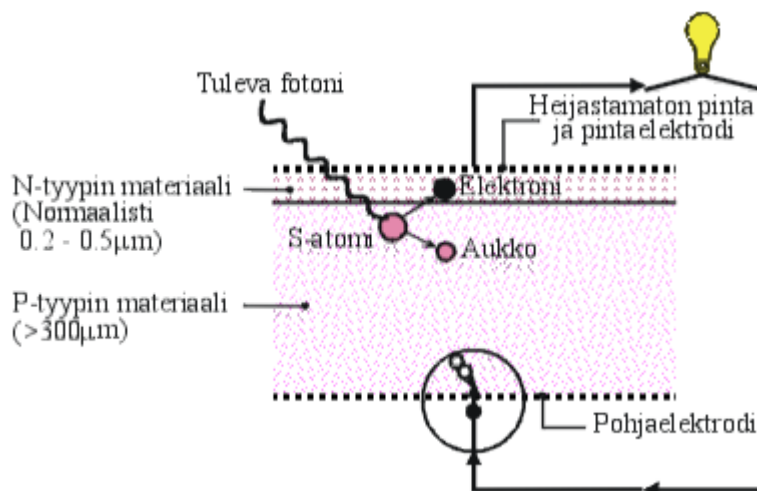
Auringon energiantuotanto perustuu Auringon ytimessä tapahtuvaan fuusioreaktioon, jossa vety muuttuu heliumiksi. Tässä fuusioreaktiossa joka sekunti 600 miljoonaa tonnia vetyä yhdistyy 596 miljoonaksi tonniksi heliumia. Puuttuva neljän miljoonan tonnin massa muuttuu joka sekunti Auringon säteilyenergiaksi. Suhteellisuusteorian mukaan säteilyn energiaksi saadaan $3.6 \cdot 10^{26}$ W. (Korpela 2014, Aurinkosähkön perusteet, 5)

Auringon tuottamasta energiasta, vain pieni osa saapuu maan ilmakehään. Maan ilmakehään saapuvan säteilyn intensiteetti (aurinkovakio) on n. 1353 W/m^2 . Ilmakehän aiheuttama vaimennus johtaa lisäksi siihen, että säteilyn huippuintensiteetti merenpinnan tasolla on n. 1000 W/m^2 . Vuotuinen keskiarvo 24 tunnin syklissä on n. 200 W/m^2 . (Freris & Infield 2008, 36)

Valosähköistä ilmiötä hyödyntävät aurinkokennot käyttävät useimmiten piistä valmistettuja puolijohdekomponentteja, kun säteilyn energia muunnetaan suoraan sähköenergiaksi. Tällaiset aurinkosähköjärjestelmät koostuvat useista sarjaan ja rinnan kytketyistä aurinkopaneeleista, joiden hyötysuhde vaihtelee 12-18 % välillä. Uusilla kennotyypeillä on mahdollista saavuttaa korkeampia hyötysuhdelukuja, mutta kaupallisen toiminnan kannalta ratkaiseva €/W-suhde on vielä toistaiseksi alhaisin perinteisillä piikennoilla. (Freris & Infield 2008, 37)

”Aurinkokenno koostuu kahdesta tasaisesta puolijohdekerroksesta, joita erottaa ns. rajapinta. Kerrosten sisäänrakennetut ominaisuudet eroavat toisistaan. Rajapinnan toisella puolella on n-tyyppinen ja toisella p-tyyppinen puolijohde. Elektronit kasaantuvat toiselle puolelle ja jättävät aukkoja toiselle puolelle. Siten kennon napojen välille syntyy nollasta poikkeava jännite, joka synnyttää virran ulkoiseen piiriin. Valo synnyttää puolijohdemateriaalissa elektroni–aukko-pareja, jotka kennon sisäisen sähkökentän vaikutuksesta voidaan erottaa toisistaan ja käyttää tuottamaan virtaa ulkoiseen kuormaan.” (Aurinkokennot.fi)

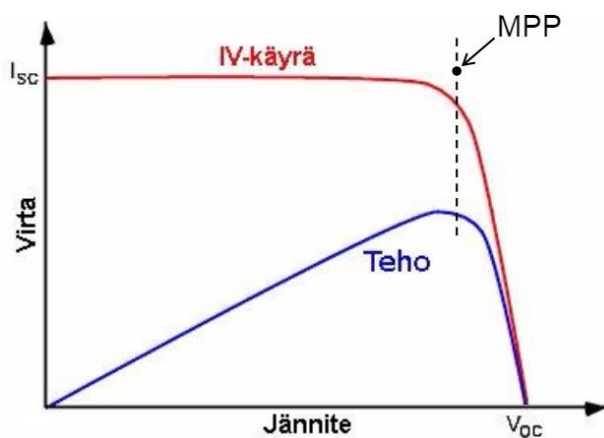
Aurinkokennot tuottavat tasasähköä, joka voidaan varastoida akkuihin tai muuntaa vaihtosähköksi ja hyödyntää saman tien sähkölaitteissa. Aurinkokennon toimintaperiaate on esitettyä kuvassa 2. (Saari, Keikko & Korpinen 1999, 54)



KUVA 2. Aurinkokennon toimintaperiaate (Saari, Keikko & Korpinen 1999, 54)

Aurinkopaneelit koostuvat useista sarjaan kytketyistä kennoista. Aurinkopaneelin teho- tuotantoa voidaan kuvata virta-jännite-käyrän avulla. Virta-jännite-käyrä muodostuu suu-

resta määrästä eri ulkoisen vastuksen arvolla olevista pisteistä. Pisteet vastaavat tasapainotilaa aikayksikköä kohti kertyneiden varausten (jännite) ja ulkoisen piirin kautta purkautuneiden varausten (virta) välillä. Kun ulkoinen vastus on pieni, on varausten purkautuminen voimakkaampaa kuin niiden kertyminen. Tällöin virran arvo on suuri. Ulkoisen vastuksen ollessa suuri, on varausten kertyminen voimakkaampaa kuin niiden purkautuminen. Tällöin jännitteen arvo on suuri. Erittäin tärkeää tällä ominaiskäyrällä on maksimitehopiste. Maksimitehopiste kuvaa niitä virran ja jännitteen arvoja joilla saavutetaan suurin tehontuotanto kulloisissakin käyttöolosuhteissa. Kuviossa 4 on esitettyä aurinkopaneelin virta-jännite-käyrä (IV-käyrä), tehokäyrä ja maksimitehopiste (MPP). (Korpela 2014, Aurinkosähkön perusteet, 45)

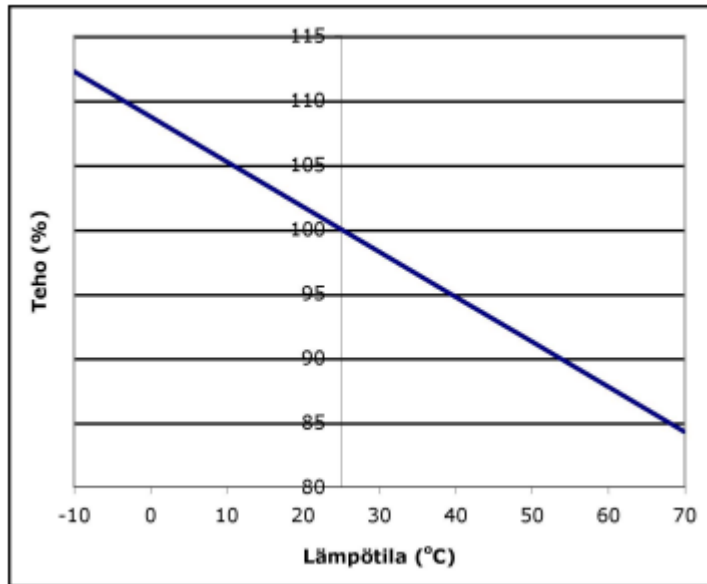


KUVIO 4. Aurinkopaneelin virta-jännite-käyrä ja tehokäyrä (Simulink)

Ulkoisen kuorman ollessa pieni, jää paneelin jännite pieneksi ja täten myös paneelin tuottama teho on kaukana halutusta. Toisaalta liian suuri resistanssi kasvattaa jännitettä, mutta pienentää virtaa, jolloin tehotuotanto taas jää pieneksi. Suurin teho saadaan siis rajatilanteessa, jossa varausten kertyminen ja purkautuminen ovat tasapainossa. Kuvioista 4 voidaan havaita, että tehokäyrä on hyvin terävä. Tämä tarkoittaa, että pienikin heitto optimaalisesta tilanteesta vaikuttaa suuresti paneelista saatavaan tehoon. (Korpela 2014, Aurinkosähkön perusteet, 45)

Paneelin tehotuotantoon vaikuttaa oleellisesti sen lämpötila. Lämpötilan kasvaessa paneelin virta kasvaa, koska lämpötila lisää termisten varaustenkuljettajien määrää. Tämä vaikutus on kuitenkin hyvin pieni, keskimäärin noin $+0,065 \text{ } ^\circ\text{C}$. Sen sijaan paneelin tyhjäkäyntijännite putoaa huomattavasti voimakkaammin lämpötilan noustessa. Piikidekennojen jännitteen lasku on yleensä noin $-0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ja parhaimmillakin kennoilla jännitteen alenema on noin $-0,35 \text{ } ^\circ\text{C}$. Koska jännitteen muutos on paljon voimakkaampi kuin

virran muutos, on tehon alenema lämpötilan noustessa samaa luokkaa kuin jännitteen lasku. Lämpötilan vaikutus aurinkopaneelin tuotantoon on esitettyä kuviossa 5. (Sun-tekno 2012, 6-7).

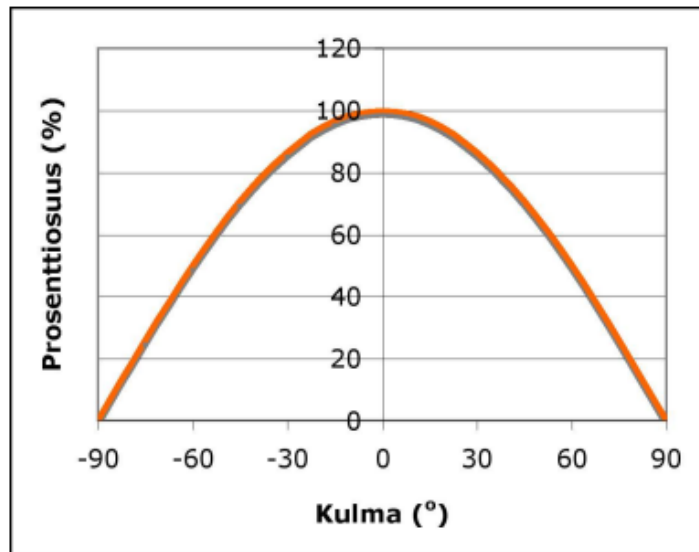


KUVIO 5. Aurinkopaneelin lämpötilan muutoksen vaikutus tehotuotantoon. Nimellinen lämpötila on 25°C, tehon lämpötilakerroin -0,35 %/oC (Suntekno 2012, 7)

Kuvion 5 mukaan lämpötilan ollessa alhaisempi, paneelista saadaan enemmän tehoa. Lämpötilan ollessa esimerkiksi -10 °C, on tehotuotanto 12,5 % suurempaa kuin lämpötilassa 25 °C säteilyn intensiteetin ja tulokulman pysyessä vakiona. Vastaavasti lämpötilan ollessa korkeampi kuin 25°C on tehotuotanto huonompaa. Lämpötilan ollessa esimerkiksi 60°C, on tehotuotanto 12,5 % alhaisempi. Heikkolaatuisella paneelilla tehotuotannon aleneminen lämpötilan vaikutuksesta voi olla tätä selvästi voimakkaampaa.

Lämpötilan lisäksi säteilyn tulokulmalla on suuri vaikutus paneelin tehotuotantoon. Suurin teho saadaan, kun heijastuskulma on 0° eli Aurinko paistaa kohtisuorasti paneelin pinta kohden. Tulokulman muuttuminen on ongelma kiinteästi asennetuille aurinkosähköjärjestelmille. Mikäli paneeli seuraa jatkuvasti aurinkoa, saadaan noin 30 % enemmän energiaa kuin kiinteästi asennetun paneelin avulla aurinkoisena päivänä. Aurinkoa seuraavat järjestelmät vaativat kuitenkin huomattavan lisäsjoituksen, sekä osan tuotetusta sähköstä suuntaavien moottoreiden käyttöön. Tämän lisäksi järjestelmä ei moottoreiden asentamisen jälkeen ole enää huoltovapaa, mikä aiheuttaa lisäkustannuksia ja vähentää järjestelmän asentamisesta saatua taloudellista hyötyä. Pilvisenä päivänä tuotanto on

sama asennustavasta riippumatta, sillä kaikki auringosta saapuva säteily on tällöin hajasäteilyä. Kuviossa 6 on esitettyä säteilyn tulokulman muutoksen vaikutus aurinkopaneelin tehoon. (Suntekno 2012, 8)



KUVIO 6. Säteilyn kulman vaikutus aurinkopaneelin tehoon (Suntekno 2012, 8)

2.3 Tuulivoima

Tuuli on suurten ilmassojen liikettä ilmakehässä. Tämä liike on seurausta ilmakehän epätasaisesta lämpenemisestä. Ilman lämmitessä se nousee ylöspäin, mistä seuraa ilman paineen alenema kyseisellä alueella. Raskaampi kylmä ilma siirtyy tälle alipaineen alueelle tasoittamaan paine-eroa. Tuulienergia on siis epäsuoraa aurinkoenergian hyödyntämistä. (Korpela, 2014, Tuulivoiman perusteet, 3)

Ilmavirtauksen energia on ilmamolekyylien liike-energiaa. Tuulivoimalan avulla tämä liike-energia pyritään muuntamaan generaattorissa sähköenergiaksi. Tuulivoimalasta saatu teho riippuu ilmavirtauksen liike-energiasta aikayksikköä kohden. Ilmavirtauksen liike-energiaa voidaan laskea kaavalla 1

$$W_i = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_i^2, \quad (1)$$

jossa W_i on ilmavirtauksen liike-energia (J), v_i on ilmavirtauksen nopeus (m/s) ja m on ilmavirtauksen massa (kg). (Korpela 2014, Tuulivoiman perusteet, 29)

Jotta saadaan selville ilmavirtauksen teho, on ilmavirtauksen liike-energian kaava derivoitava ajan suhteen, jolloin ilmavirtauksen tehoksi saadaan kaavan 2 mukaisesti

$$P_i = \frac{dW_i}{dt} = \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot v_i^2, \quad (2)$$

jossa m_i on ilmavirtauksen massavirta (kg/s) ja P_i on ilmavirtauksen teho (W). (Korpela 2014, Tuulivoiman perusteet, 29) Tehon laskemiseksi vaaditun ilmavirtauksen massavirta voidaan selvittää kaavan 3 mukaisesti

$$m_i = \rho \cdot A \cdot v_i, \quad (3)$$

jossa ρ on ilman tiheys (kg/m³) ja A on ilmavirtausta kohtisuoraan vastaan oleva pinta-ala (m²). (Korpela 2014, 29) Ilmavirtauksen teho saadaan sijoittamalla ilmavirtauksen tehon kaavaan (kaava 2) ilmavirtauksen massavirta (kaava 3), jolloin ilmavirtauksen tehoksi saadaan kaavan 4 mukaisesti

$$P_i = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_i^3. \quad (4)$$

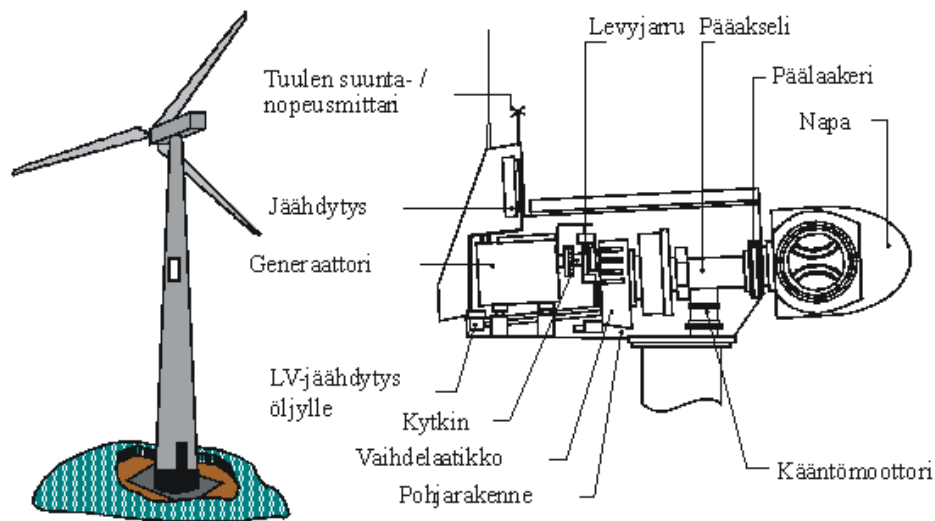
Kaavan 4 perusteella voidaan todeta, että suurin ilmavirtauksen tehoon vaikuttava yksittäinen tekijä on sen nopeus. Ilmavirran nopeuden kaksinkertaistuessa, sen teho kahdeksankertaistuu. (Korpela 2014, Tuulivoiman perusteet, 29)

Ilmavirran energiasta kaikkea ei saada hyödynnettyä sähköntuotannossa. Betzin laki määrittää ideaalisessa tapauksessa teoreettista ylärajaa lapojen ja roottorin, sekä ilmavirtauksen tehon osamäärälle. Ideaalisessa tilanteessa tuulivoimalan teho on n. 59.3 % ilmavirtauksen tehosta. Käytännön tilanteessa tämä luku on n. 40 %. Tämän lisäksi tuulivoimala ei kykene hyödyntämään tuulen koko nopeusalueutta. Kaikilla voimaloilla on käynnistymistuulennopeus, sekä voimalaturvallisuuteen liittyvä pysäytystuulennopeus. Mainittujen tuulennopeusalueiden ulkopuolella voimala ei tuota tehoa. (Korpela 2014, Tuulivoiman perusteet ,34)

Tuulivoimalatyyppejä on käytännössä useita, mutta laajimmin käytössä olevat ja ainoat laajemmassa sähköntuotannossa hyödynnetyt mallit ovat vaaka-akselisia kolmilapaisia potkurimallisia voimaloita. Muita yleisesti tunnettuja malleja ovat mm. kuppi-,

Savonius-, Windside- ja Darrieus-roottorilla varustetut pystyakseliset tuulivoimalat. Potkurimallin yleisyyteen vaikuttaa sen korkeampi hyötysuhde muihin kehitettyihin malleihin verrattuna, sekä laitoksen pyöriessään kattama suuri pyyhkäisyala omaan pinta-alaansa nähden. Näiden ominaisuuksien kautta potkurimallin tuulivoimalaitos kykenee tuottamaan omaan painoonsa nähden huomattavan paljon tehoa. Tuulen suunnan muuttuessa, tämän tyyppiset pienet voimalat kääntyvät peräsimen avulla automaattisesti niin, että roottorin pyyhkäisyala on kohtisuorassa maanpäälliseen tuuleen nähden. Kun tuulen suunta pidetään mahdollisimman tarkasti kohtisuorassa pyyhkäisyala vasten, saadaan ilmavirtauksen energiasta suurempi osa hyödynnettyä sähköntuotannossa. Suuremman kokoluokan voimaloissa roottori ja naselli käännetään moottorin avulla. (Suomen tuulienergia)

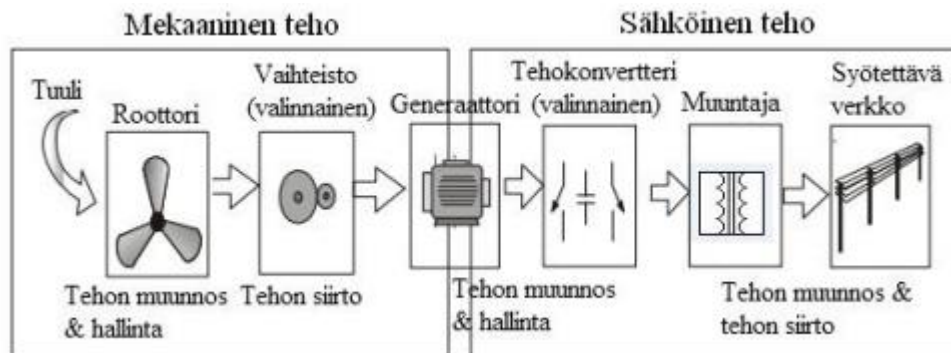
Potkurimallin tuulivoimaloita on yksi- kaksi ja kolmilapaisena. Kolmilapaiset ovat suurimmassa suosiossa tasapainoitettun pyörimisen vuoksi. Kuvassa 3 on esitetty periaatekuva tuulivoimalaitoksesta ja sen pääkomponenteista.



KUVA 3. Kolmelapainen potkurimallinen voimalaitos (Saari, Keikko & Korpinen 1999, 42)

Tuulivoimalan generaattori muuttaa pyörivän roottorin mekaanisen energian sähkömagneettisen induktion avulla sähköenergiaksi. Tuulivoimaloiden roottorien pyörimisnopeus on alhainen, joten vaihteisto on useimmiten tarpeellinen muuttamaan pyörimisnopeuden generaattorille sopivaksi. Vaihteisto tosin aiheuttaa häviöitä. Vaihteiston häviöiden eliminoinemiseksi on kehitetty suoravetoisia (vaihteettomia) voimaloita, joissa on erityisesti

tuulivoimaloihin suunniteltu generaattori, jossa on suuri määrä magneettisia napoja. Tuulivoimaloiden generaattorit ovat yleensä vaihtosähkögeneraattoreita. Tasasähkögeneraattoreita käytetään vain pienen kokoluokan voimaloissa. Generaattorin tuottama teho muunnetaan verkkoon sopivalle taajuus ja jännitetasolle ja syötetään verkkoon tarpeellisten suojalaitteiden kautta. Kuvassa 4 on esitetty, kuinka tuulesta saatu energia muutetaan sähköenergiaksi. (Saari, Keikko & Korpinen 1999, 45)



KUVA 4. Tuulen energian muuntamisprosessi (Palmunmaa 2010, 16)

Tuulivoimaloita on muuttuvanopeuksisina ja vakionopeuksisina. Ero on nimen mukaisesti siinä, muuttuuko roottorin pyörimisnopeus tuulen nopeuden muuttuessa. Vakionopeuksiset tuulivoimalat ovat usein varustettu oikosulkugeneraattorilla ja muuttuvanopeuksiset tahti- tai epätahtigeneraattorilla. (Palmunmaa 2010, 16)

Tuulivoimalan tehotuotantoa joudutaan rajoittamaan liian suurilla tuulen nopeuksilla mekaanisten vaurioiden välttämiseksi. Menetelmiä ovat passiivinen sakkaussäätö, lapakulmasäätö ja aktiivinen sakkaussäätö. Tuotannon rajoittaminen voi aluksi tuntua maalaisjärjen vastaiselta, sillä jo aiemmin todettiin ilmavirtauksen tehon kasvavan nopeuden kolmannessa potenssissa. Suurten tuulen nopeuksien hyödyntäminen ei kuitenkaan ole taloudellisesti kannattavaa, sillä niiden osuus on ajallisesti pieni ja vahvempien rakenteiden seurauksena voimalan kustannukset olisivat liian korkeat. (Korpela 2014, Tuulivoiman perusteet, 55-56)

Passiivisessa sakkaussäädössä lapakulman muuttaminen ei ole mahdollista, sillä roottorin lavat ovat kiinteästi yhdistetty roottorin napaan. Tällöin tehotuotannon rajoittamiseksi, vakionopeuksisen voimalan roottori suunnitellaan sakkaamaan, kun maanpäällinen tuulennopeus kasvaa liian suureksi. Sakkauksessa roottorin aerodynaaminen hyötysuhde

heikkenee, kun ilmavirtaus irtoaa lavan nostopuolella. Sakkaussäädön ansiosta roottoriin kohdistuvat mekaaniset rasitukset pienenevät. (Korpela 2014, Tuulivoiman perusteet, 56)

Lapakulmasäätö on nykyaikaisissa tuulivoimaloissa yleisin tehonsäätömenetelmä, joka perustuu tuulen nopeuden mittaukseen. Roottorin napaan asennettujen moottorien avulla, lapojen kohtauskulmaa voidaan säätää jokaisen lavan kohdalla erikseen tai yhtäaikaisesti, jolloin alhaisilla tuulen nopeuksilla kohtauskulma on mahdollista pitää optimaalisena. Lapakulmasäädön ero muihin esiteltyihin säätömenetelmiin on, että lavat eivät missään vaiheessa sakkaa. Suurilla tuulen nopeuksilla kohtauskulmaa pienennetään, jolloin hyötysuhde ja tehotuotanto laskevat, mutta turbiinin tuottama teho voidaan pitää lähellä generaattorin nimellistehoä. Kun tuulen nopeus kasvaa yli turvallisen rajan, laitos automaattisesti kääntää lavat tuulen suuntaiseksi ja laitos pysähtyy. Lapakulmasäädön heikkoutena on sen hitaus tuulen muutosnopeuteen nähden. Puuskaiset tuulet aiheuttavat nimellistuulennopeuden ja sitä suurempien nopeuksien välillä tehotuotannon vaihtelua, kun säätö ei ehdi reagoida ajoissa tuulen nopeuden muutoksiin. (Korpela 2014, Tuulivoiman perusteet, 56)

Aktiivinen sakkaussäätö on yleisin suurissa tuulivoimaloissa käytetty säätömenetelmä ja sen toimintaperiaatteen voidaan sanoa olevan sakkaussäädön ja lapakulmasäädön yhdistelmä. Alhaisilla tuulennopeuksilla toiminta on vastaavaa kuin lapakulman säädössä. Lapojen kohtauskulmaa tuulen nopeuden mittaustulosten perusteella aktiivisesti säätämällä, pyritään saavuttamaan mahdollisimman korkea hyötysuhde. Nimellistehonopeutta suuremmilla tuulennopeuksilla lapojen kohtauskulmaa kasvatetaan, jolloin sakkaus saadaan aikaan hallitusti. Aktiivisen sakkaussäädön avulla tuulivoimalan hyötysuhde pienillä tuulen nopeuksilla on passiivisen sakkaussäädön menetelmää korkeampi ja suurilla nopeuksilla lapakulmasäädön menetelmää tasaisempi. (Korpela 2014, Tuulivoiman perusteet, 56)

Määritelmän mukaan kaikki tuulivoimalat, joiden lapojen pyyhkäisyypinta-ala on alle 200 m² ja nimellisteho alle 50 kW luetaan pientuulivoimaksi. Pientuulivoimalla voidaan tuottaa osa talouden sähköntarpeesta, mutta sääolosuhteiden vaihtelevuuden vuoksi muualla kuin rannikkoalueilla, se soveltuu vain ajoittaiseen sähköntarpeen paikkaamiseen. Tyypilliset kesämökeille asennettavat laitteet ovat muutaman sadan watin tehoisia laitteita, eli niiden lapojen halkaisija on noin 2 metrin luokkaa. Verkkoon liitettyjen tai lämmityskäytössä olevien voimaloiden teho on tyypillisesti jopa yli 2 kW ja lapojen halkaisija 4

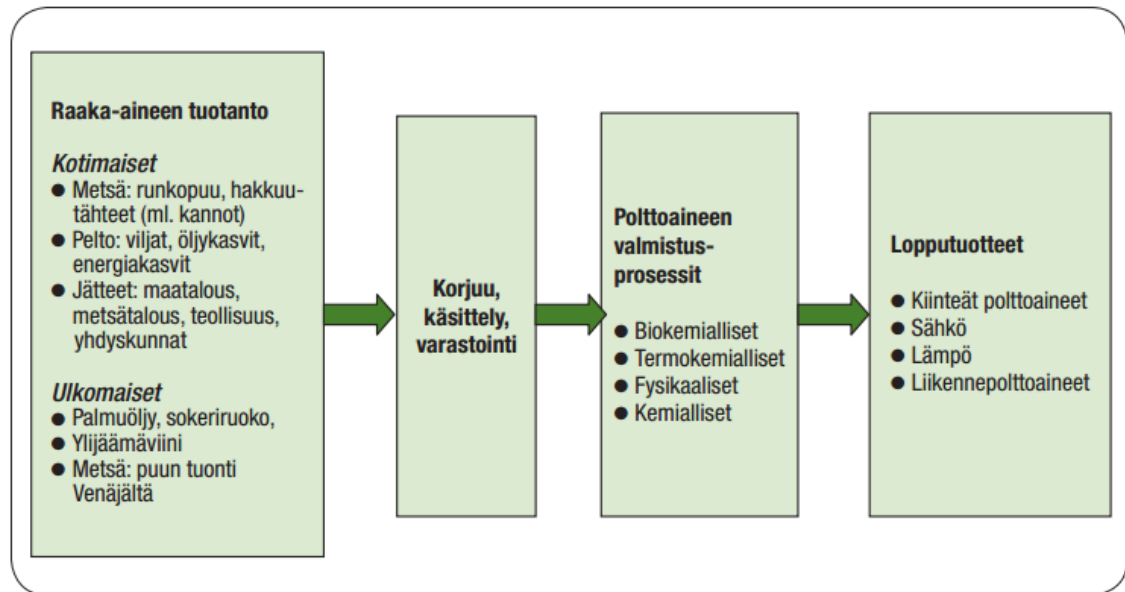
metristä ylöspäin. Pientuulivoimaloiden maston korkeudet ovat tyypillisesti 5 - 30 m. (tuulivoimayhdistys)

2.4 Bioenergia

Bioenergia eroaa suuresti muista hajautetun energian muodoista siinä, että sen tuottamiseen tarvittava biomassa voidaan varastoida samaan tapaan kuin fossiiliset polttoaineet ja ottaa käyttöön tarpeen mukaan. Erona fossiilisiin polttoaineisiin on kuitenkin biomassan rajattu ja alhaisempi energiatiheys, joka johtaa siihen, että biopolttoaine on tuotettava lähellä biovoimalaitosta. Muulloin biopolttoaineen hyödyntämisestä saatu energia voi alittaa sen kuljettamiseen tarvittavan energian. (Freris & Infield 2008, 51)

Bioenergia on biopolttoaineesta saatua energiaa. Biopolttoaine on biomassasta valmistettu kiinteä, nestemäinen tai kaasumainen polttoaine, jota voidaan käyttää korvaamaan fossiilisia polttoaineita ja näin vähentää kasvihuonepäästöjä ja hidastaa ilmastonmuutosta. Biopolttoaineet voidaan jaotella eri ryhmiin esimerkiksi olomuodon, tuotantoprosessin, biomassan laadun ja alkuperän mukaan. Kiinteitä biopolttoaineita ovat muun muassa erilaiset metsäbiomassat, peltobiomassat sekä teollisuus- ja yhdyskuntajätteen eloperäinen osa. Nestemäisiä polttoaineita ovat eri kasveista valmistetut biopolttonesteet ja kaasumaisia polttoaineita ovat biokaasu ja puukaasu. (Vihanninjoki 2015, 16)

Bioenergian tuotantoprosessi on laaja ja pitkälle ulottuva toimintojen ketju, joka kattaa kaiken biomassan kasvatuksesta polttoaineen valmistukseen ja lopulta hyödyntämiseen. Kaikki biopolttoaineet kuten metsä- ja peltobiomassat eivät edellytä kemiallista tai muuta teknologista jalostamista, vaan biomassan mekaaninen käsittely voi riittää ja biomassa saadaan näin helposti ja nopeasti hyötykäyttöön. Samoista raaka-aineista voidaan kuitenkin jalostaa energiapitoisempia sekä helpommin ja monipuolisemmin hyödynnettäviä biopolttoaineita. Tämä kuitenkin johtaa tuotantoprosessin pitenemiseen ja monimutkaisuuteen. Esimerkiksi puuperäistä biomassaa voidaan käyttää suoraan hakkeena tai se voidaan jalostaa biokaasuksi. Kuvassa 5 on esitettyä bioenergian tuotannon päävaiheet. (Antikainen, Tenhunen, Ilomäki, Mickwitz, Punttila, Puustinen, Seppälä & Kauppi 2007, 15-16)



KUVA 5. Bioenergian tuotannon vaiheet (Antikainen, Tenhunen, Ilomäki, Mickwitz, Punttila, Puustinen, Seppälä & Kauppi 2007, 16)

Bioenergiaa voidaan hyödyntää monessa eri muodossa ja tämä asettaa tiettyjä haasteita vaaditulle teknologialle. Pääperiaate on kuitenkin kaikille polttoainetyypeille sama. Energiantuotanto biopolttoaineesta perustuu palamiseen eli biopolttoaineen kemiallisen energian vapauttamiseen. Palamislämpö hyödynnetään joko sellaisenaan tai muutetaan mekaaniseksi liikkeeksi ja edelleen sähköksi. Kun tarkoituksena on sähköntuotanto, mekaanista energiaa tuotetaan pääasiassa polttamalla polttoaine moottorissa tai kaasuturbiinissa tai ohjaamalla palamisen lämmöllä höyrytetty vesi höyryturbiiniin. (Motiva 2017, Bioenergian käyttö)

Kun polttoaine palaa moottorissa tai kaasuturbiinissa, laajentuva palamiskaasu työntää mäntää tai pyörittää turbiinisiipiä. Kaasuturbiini edellyttää kaasumaista polttoainetta, kun taas moottoriin voidaan syöttää joko kaasumaista tai nestemäistä polttoainetta. Tosin nestemäinen polttoaine hajotetaan hienoksi sumuksi syöttöjärjestelmässä, jolloin sillä on lähes samat ominaisuudet kuin kaasumaisella polttoaineella. Höyryturbiinilaitoksissa palamislämpö siirretään lämpöpintojen kautta väliaineeseen, joka voimalaitoksissa on yleensä vesi. Höyrytetty vesi ohjataan paineisena höyryturbiiniin, jossa se laajetessaan pyörittää turbiinisiipiä. (Motiva 2017, Polttotekniikasta yleisesti)

Koska bioenergiaa saadaan polttoprosessin tuotteena, biopolttoaineen lämpöarvo eli palamislämpö H määrittää sen, kuinka paljon palamisreaktiossa vapautuu energiaa poltetun

biopolttoaineen massayksikköä kohden. Polttovoimalan tehotuotantoa on kuvattu kaavassa 5

$$P_1 = \frac{\eta H m}{t}, \quad (5)$$

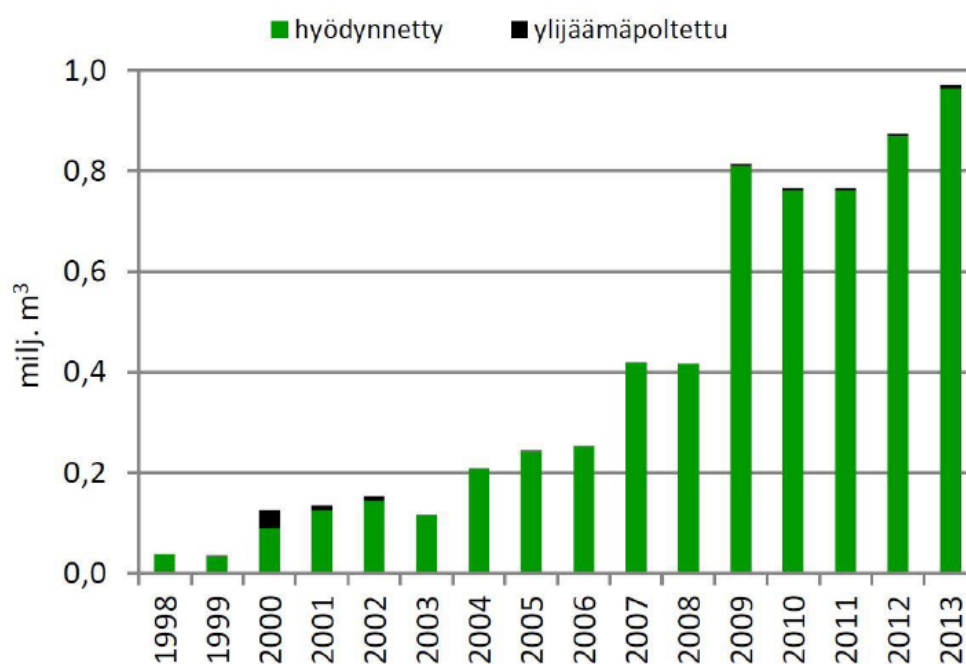
jossa P_1 = lämmitysteho eli hyötyteho, antoteho (W), η = hyötysuhde, H = polttoaineen lämpöarvo (MJ/kg), m = polttoaineen massa (kg) ja t = aika (s). (Nieminen 2016, 4)

Polttoprosessista saatu teho ei kuitenkaan tarkasti kuvaa bioenergian tuotantoprosessin hyötysuhdetta. On muistettava, että biopolttoaineen jalostus kuluttaa myös energiaa ja joidenkin biopolttoaineiden osalta on kyseenalaista, kannattaako niitä käyttää alhaisen hyötysuhteen vuoksi. Tällainen polttoaine on esimerkiksi etanoli, jonka valmistukseen ja kuljetukseen kuluu niin paljon energiaa, ettei saatu energiamäärä välttämättä ylitä sen tuottamiseen vaadittua energiaa. Mitä vähemmän biomassaa tarvitsee jalostaa polttoaineksi, sitä parempana sen hyötysuhde säilyy. (Freris & Infield 2008, 51)

Pienen kokoluokan bioenergian tuotantolaitokset ovat yleensä maataloilla sijaitsevia biokaasulaitoksia, joilla käsitellään maatilalta ja sen lähiseudulta peräisin olevia kasvi- ja eläinperäisiä biomassoja kuten lietelantaa, rehua ja biojätettä. Orgaanisten jätteiden ja sivutuotteiden käsittelyssä, anaerobisen käsittelytavan on havaittu parantavan hygieniää, vähentävän hajuhaittoja ja kasvattavan biokaasun kautta saatavaa taloudellista hyötyä. Biokaasulaitosten rakentaminen maataloille on selvästi vilkastumassa. Kiinnostusta ovat lisänneet parantuva energiaomavaraisuus, mahdollisuus kaasun ajoneuvokäyttöön sekä ympäristönäkökohtien huomioiminen. Taulukossa 1 on esitettyä maatilalaitosten biokaasun tuotantotietoja vuodelta 2014 ja kuviossa 7 on esitettyä maatilalaitoksilla tuotetun ja poltetun biokaasun kehittyminen vuosina 1998–2013. (Huttunen & Kuittinen 2014, 27)

TAULUKKO 1. Maatilalaitosten biokaasun ja sähkön tuotanto vuodelta 2014 (Huttunen & Kuittinen 2014, 27)

Biokaasua tuotettu	1,019	milj. m ³
Biokaasua hyödynnetty	1,011	milj. m ³
Sähköä tuotettu	1106	MWh
Lämpöä tuotettu	4155	MWh
Mekaanista energiaa tuotettu	-	MWh
Metaanipitoisuus	55-71	%



KUVIO 7. Maatiloilla tuotettu ja poltettu biokaasu 1998-2013 (Huttunen & Kuittinen 2014, 27)

2.5 Vesivoima

Vesivoima on epäsuoraa aurinkoenergian hyödyntämistä. Auringon säteilemä energia haihduttaa vettä merestä ja jossain määrin myös maalla sijaitsevista vesialtaista. Höyrystynyt vesi kohoaa ylöspäin ja samalla jäähtyy. Jäähtynyt vesi sen jälkeen tiivistyy ja tulee maahan alas sateena. Osa sateena alas tulevasta vedestä päätyy korkeammalle tasolle, kuin mistä se on peräisin, ja on näin ollen kasvattanut potentiaalienergiaansa säteilystä saamansa energian avulla. Vesivoiman etuina ovat pienet käyttökustannukset ja hyvä sää-

dettävyys. Voimalaitoksen polttoaine on käytännössä ilmaista ja laitokset voidaan rakentaa kauko-ohjattavaksi, jolloin voidaan säästää kustannuksissa. (Freris & Infield 2008, 23)

Vesivoimalaitoksen idea on käytännössä yksinkertainen. Virtaavan veden liike-energia muunnetaan vesivoimalan roottorin avulla ensin pyörimisenergiaksi ja generaattorissa edelleen sähköenergiaksi. Generaattori useimmiten on vaihtovirtatahtigeneraattorin suuren tehon vuoksi. Pienemmissä vesivoimaloissa voidaan myös käyttää tahtigeneraattoreita. Toisin kuin esimerkiksi bioenergiassa, monimutkaisia polttoaineen jalostamis- tai polttoprosesseja ei tarvita, vaan potentiaalienergiaa esiintyy luonnossa ja se on vain saatava hyötykäyttöön. Suomessa luonnostaan esiintyvien vesialtaiden korkeuserot ovat kuitenkin yleensä pieniä ja virtaamat suuria, mikä asettaa haasteen energian laajamittaiselle talteenotolle. Hyödynnettävissä olevan energian määrän kasvattamiseksi, vesivoimaloiden yhteyteen rakennetaan usein patoja, joiden avulla putouskorkeutta pyritään kasvattamaan ja veden putoamispaikka pyritään keskittämään. (Freris & Infield 2008, 23)

Vesivoimalaitokset voidaan jakaa eri tyyppeihin säännöstely- ja käyttötavan, rakenteellisen ratkaisun tai putouskorkeuden mukaan. Säännöstely- ja käyttötavan mukaisessa jaotelussa voimalaitokset jaetaan jokivoimalaitoksiin, säännöstelyvoimalaitoksiin, pumppulaitoksiin ja vuorovesilaitoksiin.

- Jokivoimalaitos on Suomen yleisin pienvoimalaitos, jossa vesialtaan muodostaa voimalaitoksen oma pato. Padon avulla muodostetun varastoaltan avulla on mahdollista vastata nopeisiin kuormituksen muutoksiin.
- Säännöstelyvoimalaitokset muistuttavat rakenteeltaan jokivoimalaitoksia, mutta erona näiden kahden välillä on, että säännöstelyvoimalaitoksilla ei ole omaa padon muodostamaa vesiallasta, vaan ne rakennetaan suurempien säännöstelyaltaiden yhteyteen.
- Pumppuvoimalaitoksissa on kaksi eri allasta, joista alemmasta vesi pumpataan halvan sähkönmarkkinahinnan aikana ylempään ja energian hinnan ollessa korkealla, muunnetaan pumpattu vesi taas sähköenergiaksi.
- Vuorovesivoimalaitoksissa vesi nousee altaaseen korkean vuoroveden vaikutuksesta. (Saari, Keikko & Korpinen 1999, 21)

Rakenteellisen ratkaisun mukaisessa jaottelussa laitokset jaetaan patolaitoksiin, paineputkilaitoksiin ja tunnelilaitoksiin.

- Patolaitos on jokien uomiin tai kaivettuihin kanaviin sijoitettu Suomen yleisin pienvesivoimalatyyppi, jossa koneasema vesiteineen toimii osana patoa.
- Paineputkilaitoksissa voimalan koneasema sijaitsee padon takana teräksestä, puusta tai betonista rakennetun paineputken päässä tai osittain padon sisällä.
- Tunnelilaitoksissa tuloputki on kallion sisään rakennettu pystykuilu, jota pitkin vesi pääsee virtaamaan koneasemalle, joka on rakennettu tuloputken päähän. (Saari, Keikko & Korpinen 1999, 21)

Putouskorkeuden mukaisessa jaottelussa laitokset jaotellaan eri turbiinityyppien käyttöalueiden perusteella.

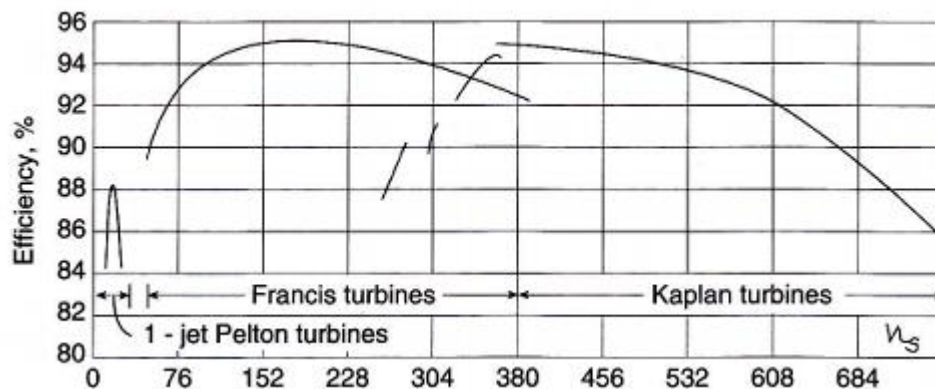
- Pienvesivoimalaitoksissa putouskorkeus on alle 10 metriä,
- keskipainevoimaloissa putouskorkeus on 10-35 metriä,
- keskikorkeapainevoimaloissa 35-250 metriä ja
- korkeapainevoimaloissa 250-1800 metriä. (Saari, Keikko & Korpinen 1999, 21)

Vesivoimalaitoksesta saatava teho riippuu virtaavan veden määrästä, putoamiskorkeudesta ja voimalaitoksen kokonaishyötysuhteesta. Putoamiskorkeuteen ja hyötysuhteeseen voidaan vaikuttaa voimalan suunnittelulla, mutta virtaavan veden määrään on vaikeampi vaikuttaa. Vaihtelua tehotuotannossa aiheuttavatkin vuosittaisten sademäärien vaihtelut ja sadealueiden koot. Jokeen on toki mahdollista rakentaa säännöstelyaltaita, joista vettä päästetään voimalaan alhaisten sademäärien aikana, mutta niiden rakentamiseen ei välttämättä haluta investoida huomattavia rahamääriä tai niiden rakentamiselle ei saada lupaa ympäristön suojelun vuoksi. Suurempien voimaloiden kohdalla tätä ongelmaa ei ole, sillä niiden hyödyntämällä jo olemassa olevilla varastoaltaita voidaan sähkön tuotantoa säädellä jopa vuositasolla. Vesivoimalan teho voidaan laskea kaavan 6 avulla

$$P_v = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot h, \quad (6)$$

jossa P_v on voimalan teho (W), η on voimalaitoksen kokonaishyötysuhde, ρ on veden tiheys (kg/m³), josta käytetään arvoa 1 000 kg/m³, g on putoamiskiihtyvyyys 9,81 m/s², Q on turbiinin läpi virtaava vesimäärä (m³/s) ja h on putouskorkeus (m). (Haapakoski 2011, 2)

Vesivoimalaitoksen kokonaishyötysuhteeseen vaikuttaa käyttökohteeseen valittu turbiinimalli. Eri turbiinimallit toimivat optimaalisesti erilaisilla virtausmäärillä ja putouskorkeuksilla. Turbiinit jaetaan kahteen eri ryhmään sen perusteella, miten väliaineen energia muutetaan mekaaniseksi energiaksi. Impulssiturbiinissa, kuten esimerkiksi Pelton-turbiinissa, suurinopeuksisen väliaineen virtaus suunnataan turbiinin kuppimaisiin siipiin suihkuna, jolloin väliaine osumahetkellä luovuttaa energiaa ja saa aikaan turbiinin pyörivän liikkeen. Reaktioturbiinit, kuten Kaplan ja Francis-turbiinit, ovat vedenpinnan alapuolella ja kehittävät vääntömomenttinsa reagoimalla väliaineen paineeseen, joka laskee väliaineen edetessä. Impulssiturbiinit sopivat kohteeseen, jossa on suuri paine ja veden putouskorkeus, kun taas reaktioturbiinit pyörivät suuremmilla nopeuksilla ja soveltuvat kohteeseen, jossa pudotuskorkeus on pienempi. Kuviossa 8 on esitettyä hyötysuhdekäyrät eri turbiinityypeille nopeuden funktiona. (Freris & Infield 2008, 26)



KUVIO 8. Hyötysuhde käyrät eri turbiinityypeille nopeuden funktiona (Freris & Infield 2008, 26)

Vesivoima soveltuu erinomaisesti säätövoimaksi sen nopean, helpon ja edullisen säädettävyyden ansiosta. Sähköverkon tulee kyetä reagoimaan sähkön kulutuksen vaihteluihin niin lyhyellä kuin pitkälläkin aikavälillä ja erityisesti nopeisiin kulutuksen muutoksiin vastataan vesivoimalla. Sähkön kulutuksen ollessa alhaista, voidaan vesivoimalaitoksen tuotantoa rajoittaa ja varastoaltaiden vesistöjä säännöstellä. Kun kulutus taas kasvaa, päästetään altaista enemmän vettä voimalaitokseen. (Energiateollisuus 2017)

Pienvesivoimalaitokset ovat yleensä yksiturbiinisia pienen virtaaman tuotantolaitoksia ja niiden käyttöikä on 60 – 100 vuotta, kun laitoksia huolletaan säännöllisesti. Ne ovat teholuokaltaan muutamia megawatteja ja pudotuskorkeus hieman alle 10 metriä. Tätä pie-

nemmät tuotantolaitokset ovat mikrotuotantolaitoksia ja yleensä teholtaan muutamia satoja kilowatteja ja pudotuskorkeutta niillä on 2-6 metriä. Suomessa pien- ja mikrovesivoimalaitoksen teho vaihtelee välillä 100 – 1000 kW. Pienvesivoiman etuna on, että näin alhaisia pudotuskorkeuksia esiintyy luonnostaan, joten voimalaitokset eivät tarvitse erillistä vesiallasta (pienvesivoimayhdistys ry).

2.6 Pien-CHP

CHP on lyhenne sanoista *combined heat and power* ja tarkoittaa erilaisiin polttoaineratkaisuihin ja teknologioihin perustuvaa lämmön ja sähkön yhteistuotantoa. Lämmön- ja sähkön yhteistuotannossa kokonaishyötysuhde on huomattavasti erillistuotantolaitoksia korkeampi. Pienen kokoluokan CHP-laitoksen kokonaishyötysuhde on tyypillisesti 80-95 %, kun sähköntuotannon hyötysuhde jää 10-40 % tasolle. Hyötysuhteeseen vaikuttavat oleellisesti käytetty polttoaine ja teknologia. (Wallin 2012, 34)

Sähkön tuotanto CHP-laitteistolla perustuu generaattorin pyörittämiseen erilaisilla moottoreilla, joiden energialähteinä käytetään erilaisia bioperäisiä polttoaineita. Nestemäisiä tai kaasumaisia biopolttoaineita voidaan polttaa diesel- tai kaasumoottorissa, ja kiinteitä polttoainetta erilaisten kattiloiden tulipesissä tai polttokammiossa. CHP-laitoksen sähköntuotanto tapahtuu Stirling-koneen, ORC-yksikön (Organic Rankine Cycle), höyrykoneen, höyryturbiinin, kaasuturbiinin, mikroturbiinin tai ilmakaasu-turbiinin kautta. Vaikka teknologiat toimintatavoiltaan eroavat toisistaan, yksi yhteinen tekijä näille on helppo antaa. Hinta €/kW putoaa kaikissa ratkaisuissa kokoluokan kasvaessa. (Takalo 2013, 4)

Pien-CHP tuotanto jaetaan pääosin neljään perusteknologiaan: polttomoottorit ja kaasuturbiinit, höyryturbiinit ja muut höyryvoimalaitteet, välittäjäaineisiin liittyvät tekniikat ja polttokennot. Taulukossa 2 on esitettyä edellä mainittujen pienimuotoisen CHP-tuotannon tekniikoiden ominaisuuksia. (Takalo 2013, 4)

TAULUKKO 2. Pienimuotoiseen CHP -tuotantoon soveltuvien tekniikoiden ominaisuuksia (Karjalainen 2012, 10)

Tekniikka	Polttomoottorit	Mikroturbiinit	Stirling -moottorit	Polttokennot	Höyrykone ja -turbiini	ORC-prosessi
Tyypillinen koko	1 kWe – 1000 kWe	25 kWe – 250 kWe	10 – 150 kWe	1 kWe – 50 MWe	Höyrykoneella >100 V -turbiineilla >500 kWe	150 kWe – 1 MWe
Sähköhyötysuhde	25 – 40 %	25 -30 %	8 – 22 %			
Lämpöhyötysuhde	45 – 50 %	50 - 60 %	50 – 60 %			
Tyypillinen käyttöaika	15 vuotta	15 vuotta	15 vuotta	1 - 15 vuotta	15 vuotta	>20 vuotta
Kehitysaste	Laajasti käytössä	Varhaiskaupallisessa vaiheessa	Pilot -vaiheessa	Kehitysvaiheessa	Laajasti käytössä	Varhaiskaupallisessa vaiheessa
Tärkein tekninen vahvuus pien CHP -käytössä	Korkea sähköhyötysuhde	Pieni huollon tarve	Pieni huollon tarve	Korkea sähköhyötysuhde	Tekniikan todistettu toimivan	Hyvä sähköhyötysuhde myös osakuormalla
Suurin tekninen heikkous pien CHP -käytössä	Verrattain suuri huollon tarve	Polttoaineen oltava kaasumainen tai nestemäinen	Rajallinen sähköhyötysuhde	Lyhyt kestoikä	Sähköhyötysuhde osakuormalla	Rajallinen sähköhyötysuhde

Polttomoottoreita kutsutaan yleisemmin diesel- tai kaasumoottoreiksi ja niiden toiminta perustuu sisäiseen palamiseen. Polttomoottorin sylinteriin syötetty ilman ja polttoaineen seos palaa voimakkaasti. Paineen kasvu liikuttaa mäntää, joka puolestaan työntää kiertokankea ja aikaansaa kampiakselin pyörimisliikkeen. Pyörimisliike siirretään generaattorille, joka muuntaa liikkeen sähköenergiaksi. Kaasumoottorit ovat käytetyimpiä jatkuva-toimisessa yhteistuotannossa, ja dieselmootoreita käytetään lähinnä varavoimasovelluksissa. Tyypillisiä ominaisuuksia polttomoottoreille ovat korkea sähköhyötysuhde, laaja tehoalue ja monipuolinen polttoainevalikoima. (Takalo 2013, 4-5)

Mikroturbiinit ovat yleensä sähköteholtaan alle 250 kW kaasuturbiineja, joiden polttoaineena voidaan käyttää sekä kaasuja että nesteitä. Tällä hetkellä yleisin polttoaine on maa-kaasu. Polttoaine palaa polttokammiossa, josta kaasu johdetaan kaasuturbiiniin. Kaasun nopeutta nostetaan suuremman pyörimisnopeuden saavuttamiseksi. Kun kaasu osuu turbiinin siipiin, se muuttaa suuntaansa ja pyörittää pyörää. Turbiiniyksikköön kytketty generaattorin muuttaa pyörimisen sähköksi. Mikroturbiinit soveltuvat tasaiseen ja jatkuvaan kuormitukseen. (Takalo 2013, 6)

Stirling-moottori on lämpövoimakone, jonka toiminta perustuu suljettuun kiertoprosessiin, eli moottori saa voimansa lämpötilaerosta ja palaminen tapahtuu sylintereiden ulkopuolella. Moottorin toiminta on jaettu neljään eri perusvaiheeseen, joiden välillä moottorin sisällä oleva kaasu liikkuu jäähtyen ja lämmiten. Tästä jatkuvasta lämpötilavaihtelusta

aiheutuva painevaihtelu muutetaan mekaaniseksi työksi männän ja sylinterin avulla. Koska käytetty työkaasu ei osallistu palamiseen, eikä työkaasu poistu sylinteristä minäkään työvaiheen aikana, lämmöntuotantomenetelmällä ei ole merkitystä. Stirling-mootorit soveltuvat pieniin yhteistuotantolaitoksiin, kuten maataloille. (Karjalainen 2012, 3)

Polttokenno on sähkökemiallinen laite, joka muuntaa polttoaineen suoraan sähköksi ja lämmöksi. Erillistä polttoprosessia ei varsinaisesti ole, vaan polttoaine hapettuu anodilla ja erikseen syötetty hapetin pelkistyy katodilla. Anodin ja katodin välissä oleva elektrolyytti toimii varauksenkuljettajana. Hapettumis-pelkistymisreaktion seurauksena ulkoiseen virtapiiriin syntyy sähkövirta. Polttokennon toiminta muistuttaakin läheisesti akun toimintaa. Ero teknologioiden välillä on, että polttokennon polttoaineensyöttö on jatkuvaa ja se tulee ulkoisesta lähteestä. Yleisimmin käytetty polttoaine on vety, mutta soveltuvia polttoaineita on useita. Nykyisten polttokennojen hyötysuhde on 38-55 %, mutta teknologia on vielä varhaisessa kehitysvaiheessa, joten luku tulee todennäköisesti vielä nousemaan. Pidemmällä aikavälillä polttokennot ja vety tarjoavat mahdollisuuden fossiilisiin polttoaineisiin perustuvan energiatalouden korvaamiseen vetytaloudella. Tällöin vety toimisi energiavarastona, jota voidaan tuottaa puhtaasti vedestä vaikkapa aurinkosähkön avulla. Kun sähköenergiaa tarvitaan, vety voidaan syöttää polttokennoon, joka tuottaa sähköä. (Karjalainen 2012, 7)

Höyrykoneet ja -turbiinit perustuvat Rankine-prosessiin, jossa palaminen ja lämmön tallentaminen tapahtuvat höyrypiirin ulkopuolella erillisessä kattilassa, jolloin polttoaineeksi soveltuu periaatteessa mikä tahansa kiinteä, nestemäinen tai kaasumainen fossiilinen tai biopolttoaine. Höyry voidaan tuottaa myös aurinkoenergialla. Höyrykattilassa paineistettu höyry kulkee turbiinin siipien läpi pyörittäen sitä ja edelleen turbiiniin kytkettyä generaattoria. Höyrykoneessa höyryä käytetään liikuttamaan sylinterissä mäntää, joka yhdistetään generaattoriin. Tähän toimintamalliin perustuu myös ORC-prosessi. Erona prosessien välillä on käytetty kiertoaaine, joka ORC-prosessissa on orgaaninen, kun se höyrykoneissa ja -turbiinissa on vesi. Kiertoaaineena käytetään esimerkiksi tolueenia tai sili-koniöljyä. Orgaanisen kiertoaineen ansiosta prosessi soveltuu paremmin alhaiselle lämpötilatasolle ja pienempään kokoluokkaan kuin vesihöyryprosessi. (Takalo 2013, 6)

Pien-CHP-laitteistoja ja niiden kustannustehokkuutta pitäisi pystyä parantamaan, jotta sähkön ja lämmön yhteistuotanto olisi kannattavaa pientuottajalle. Haasteena tuntuu olevan, ettei tällä hetkellä ole olemassa tuotantoprosessia, jossa sähkö/lämpö -suhde olisi

mahdollisimman suuri tarpeeksi alhaisilla investointikustannuksilla. Pien-CHP-laitteistoja ei myöskään ajeta pelkän sähköntuotannon takia, vaan niiden tehoa säädetään hetkellisen lämmön tarpeen mukaan, jolloin laitteisto on usein vajaakuormalla, mikä heikentää hyötysuhdetta. (Takalo 2013, 28)

2.7 Pientuotannon tulevaisuuden näkymät

Pientuotannon määrä on ollut selvässä kasvussa jo jonkin aikaa. Tätä edistävät tuotantolaitosten hintojen aleneminen ja teknologian kehittyminen, sähkön hinnan nousu ja kuluttajien tietoisuus ympäristöasioista. Useimpien pientuottajien kiinnostuksen taustalla tuntuu olevan ajatus edes osittaisesta energian omavaraisuudesta. Kiinnostusta ovat lisänneet myös ympäristöasiat, jolloin taloudellinen etu on toissijaista. Uhkakuvat fossiilisten polttoaineiden loppumisesta liitettynä sähköenergian kasvavaan tarpeeseen ohjaavat kohti omavaraisempaa tuotantoa. Kiinnostusta on lisännyt myös uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön syöttötariffin määrittelemä verovapaus alle 100 kVA:n voimalaitoksille, kun tuotettu sähkö käytetään ensisijaisesti kotitalouden tarpeisiin. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2010 & Finlex 1397/2010).

Pientuotannon tarkkaa tilaa pitkän ajanjakson päähän on vaikea arvioida alati muuttuvien olosuhteiden ja poliittisen ympäristön vuoksi. Sen kehitystä voidaan kuitenkin ennustaa lähitulevaisuuteen, perustaen päätelmät jo hyväksytyihin tai kehitteillä oleviin toimintasuunnitelmiin. Työ- ja elinkeinoministeriön energiaosaston esitys ”Suomen kansallinen toimintasuunnitelma uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian edistämisestä direktiivin 2009/28/EY mukaisesti” antaa jonkinlaista kuvaa siitä, mikä tilanne voisi muuttaman vuoden kuluttua. Direktiivissä ensisijaisesti tuetut energiantuotantomuodot ovat vesivoima, tuulivoima ja biovoima. Tukitoimet ovat toki vain väliaikainen ratkaisu, mutta niiden avulla voidaan mahdollisesti päästä energiankäytön tehostamis- ja ilmastotavoitteisiin. Äkillinen hajautetun tuotannon lisäys suurilla tukitoiminnoilla asettaa kuitenkin haasteita sähköverkolle, jota ei tällaiseen tuotantoon ole suunniteltu ja verkkoinvestointien maksajiksi päätyisivät verkon käyttäjät. Tosin investointien kasvu toisi mukanaan myös työpaikkoja. Toinen lakiin perustuva muutos voi olla myös vuoden 2018 alussa voimaan tulevat rakennusmääräykset ja tätä pohditaan myöhemmin luvussa 3.9. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2010)

3 PIENTUOTANNON LIITTÄMINEN VERKKOON

Tässä luvussa käsitellään suositusten, standardien ja Suomen lain määrittelemiä ehtoja ja velvoitteita pientuotannon liittämiseksi jakeluverkkoon. Luvussa käsitellään säädöksiä sekä verkonhaltijan, että tuotantolaitoksen omistajan näkökulmasta. Käsiteltävät säädökset koskevat enintään 20 kV jakeluverkkoon liitettäviä 2 MVA tuotantolaitoksia.

3.1 Yleistä

Sähkön tuottaminen on Suomessa kaikille vapaata toimintaa ja jokainen tuottaja on oikeutettu myymään sähköä avoimilla markkinoilla. Sähkömarkkinalaissa on määritelty, että ”verkonhaltijan tulee tehdä asiakkaalle tämän pyynnöstä tarjous sähköverkkoon liittämiseksi ja sähkönsiirtopalveluista. Sähkötuotantolaitoksen liittämistä koskevassa tarjouksessa on esitettävä liittämisen edellytyksenä olevat tekniset vaatimukset.” (Sähkömarkkinalaki 65/2009). Tämä käytännössä tarkoittaa sitä, että kuka tahansa voi ryhtyä sähkön tuottajaksi ja liittää tuotantolaitoksensa verkkoon, mikäli tekniset reunaehdot täyttyvät, laitos on varustettu asetusten mukaisilla mittaus- ja suojausjärjestelmillä ja tuotetulle sähkölle on ostaja.

Verkkoon liitettävien laitteistojen reunaehdot koskevat laitteiston tuottaman sähkön laatua, verkostovaikutuksia ja sähköturvallisuutta ja ne on määritelty erilaisissa standardeissa. Kyseiset standardit ovat käytössä, jotta pientuotantolaitos ei aiheuttaisi häiriöitä verkkoon tai vaaraa verkon käyttäjille, ja jotta tuotantolaitos ei verkon vian takia vaurioituisi. Yleisimmät noudatettavat standardit ovat sähkön laatuvaatimuksia koskeva SFS-EN 50160, tekniset laatuvaatimukset mikrogeneraattoreille määrittelevä SFS-EN 50438, tuotantolaitoksien teknisiä vaatimuksia koskeva saksalainen VDE-AR-N 4105, asennuksissa noudatettavat SFS 6000 ja SFS 6002, sekä näiden lisäksi tuotantolaitosten tulee toteuttaa kansainvälisissä IEC- ja CENELEC-standardeissa määritellyt vaatimukset. (Verkostosuositus YA:13 2016)

3.2 Luvat ja sopimusehdot

Kun liittymään lisätään tuotantoa, tulisi tuotannon osalta tehdä tuotannon liittymissopimus. Sopimuksessa sovelletaan Energiateollisuuden sähköntuotannon liittymisehtoja (TLE 14) ja siinä käydään läpi vaatimukset, jotka tuotantolaitteiston tulee täyttää, ennen kuin laitteisto voidaan kytkeä verkkoon. Tuotannon liittymissopimus ei kuitenkaan oikeuta sähkön tuottajaa syöttämään tuottamaansa sähköä sähköverkkoon, vaan tämä edellyttää tuotannon verkkopalvelusopimuksen solmimista. Verkkopalvelusopimuksessa sovelletaan Energiateollisuuden tuotannon verkkopalveluehtoja (TVPE 11) ja siinä täydennetään olemassa olevaa liityntäpisteen verkkopalvelusopimusta koskemaan liittymän tuotantoa. Edellä mainittujen lisäksi, jokaisessa kulutus- tai tuotantokohteessa tulee olla voimassa oleva sähköverkkoyhtiön kanssa tehty kulutuksen liittymissopimus. (Verkostosuositus YA9:13, 13-14)

Sähköntuotannon liittämisen ja rakennuttamisen lupakäytännöt vaihtelevat kunnittain, joten on suositeltavaa tarkastaa oman kotikunnan lupakäytännöt ennen tuotantolaitoksen hankintaa. Liittyjän tulee myös selvittää, soveltuuko tuotantolaitos liitettäväksi verkonhaltijan verkkoon. Tuotantolaitoksen asennus vaikuttaa maisemakuvaan, joten kunnan rakennusvalvontaviranomaiselta tulee selvittää, edellyttääkö laitoksen sijoittaminen kohteeseen rakennus- tai toimenpidelupaa. (Lehto 2016, Sähkötuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon, 1)

Maatiloille perustettaville biokaasuvoimaloille tai muille polttoainetta hyödyntäville voimaloille vaaditaan lisäksi ympäristölainsäädännön mukainen ympäristölupa, mikäli niiden toiminta ylittää sovelletut rajat. (Heikkinen 2012, 10)

3.3 Sähkömarkkinavirastolle tehtävät ilmoitukset

Sähkömarkkinalaissa 65/2009 on määritelty suoraan, että ”voimalaitoksen haltijan on ilmoitettava sähkömarkkinaviranomaiselle teholtaan vähintään yhden megavoltiampeerin suuruisen:

- 1) voimalaitoksen rakentamista tai voimalaitoksen tehonkorotusta koskevasta päätöksestä kuukauden kuluessa siitä, kun päätös on tehty;

- 2) voimalaitoksen tai voimalaitoksen tehonkorotuksen käyttöönotosta kuukauden kuluessa siitä, kun voimalaitos tai sen tehonkorotus on otettu tuotantokäyttöön;
- 3) voimalaitoksen vähintään vuoden pituisesta tai pysyvästä käytöstä poistamisesta taikka voimalaitoksen pysyvästä tehonalennuksesta kuukauden kuluessa siitä, kun päätös on tehty, kuitenkin vähintään kuusi kuukautta ennen toimenpiteen suunniteltua toteutusajankohtaa.

Ilmoituksessa on käytävä ilmi tiedot voimalaitoksen haltijasta ja omistajasta, voimalaitoksen tehosta ja energialähteistä sekä tärkeimmistä teknisistä ominaisuuksista, sekä voimalaitoksen tai sen tehonkorotuksen käyttöönottoajankohdasta tai, jos kyseessä on voimalaitoksen vähintään vuoden pituinen tai pysyvä käytöstä poistaminen tai voimalaitoksen pysyvä tehonalennus, toimenpiteen suunnitellusta toteutusajankohdasta.” (Sähkömarkkinalaki 65/2009, 7 §) Selvyyden vuoksi on tarkennettava, että laki koskee yhden megavolttiampeerin suuruista sähkön tuotantoon tarkoitettua voimalaitosta. Yhden megavolttiampeerin yhteistuotantolaitoksesta ei kyseistä ilmoitusta tarvitse tehdä, vaan näille on omat käytäntönsä, joihin ei tässä oteta kantaa.

3.4 Sähköverovelvollisuus

Sähköverovelvollisia ovat sähkön tuottajat sekä verkonhaltijat ja sähköverovelvollisuudella tarkoitetaan sähkön valmisteveron ja huoltovarmuusmaksun suorittamista. Pienimmät sähköntuottajat, eli nimellisteholtaan alle 100 kVA tuotantolaitokset, joiden vuosituotanto ei ylitä 800 MWh, on vapautettu kaikista sähköverotuksen velvollisuuksista. Tätä nimellisteholtaan suuremmat tuotantolaitokset joutuvat rekisteröitymään Verohallinnolle verovelvollisiksi. (Verohallinto 2016)

Sähköntuottajat jaetaan verotuksessa nimellistehon ja vuosituotannon mukaan kolmeen kategoriaan.

1. Nimellisteholtaan alle 100 kVA laitokset
 - Eivät ole verovelvollisia ja eivät ole velvoitettuja ilmoittamaan sähköntuotannostaan veroviranomaisille

2. Nimellisteholtaan yli 100 kVA, mutta vuosituotanto alle 800 MWh
 - Rekisteröityvät Verohallinnolle verovelvollisiksi ja ilmoittavat kerran vuodessa tuottamansa sähkön. Eivät kuitenkaan maksa sähköveroa
3. Nimellisteholtaan yli 100 kVA ja vuosituotanto yli 800 MWh
 - Rekisteröityvät Verohallinnolle verovelvollisiksi ja ilmoittavat kuukausittain tuottamansa sähkön. Itse kulutetusta sähköstä on maksettava sähköveroa. (Verohallinto 2016)

Nämä rajat koskevat pientuotantoa, jossa tuotettu sähköenergia kulutetaan itse, tai se siirretään suoraan toiselle kuluttajalle käytettäväksi. Pientuotannolla tuotetun sähkön myynnistä saatu korvaus on veronalaista tuloa. Veroa ei muodostu, jos myynnistä saatu tulo on tuotantokustannuksiin suhteutettuna vähäistä. (Verohallinto 2014)

3.5 Tuet ja vähennykset

Uusiutuvia energianlähteitä hyödyntäviin tuotantolaitoksiin on mahdollista hakea energiatukea, jonka myöntäminen harkitaan jokaisessa kohteessa tapauskohtaisesti. Energiatuen suuruus voi olla enimmillään 40 % tuotantolaitoksen investointikustannuksista. Energiatukea ei kuitenkaan voida myöntää yksityishenkilöille, vaan sitä voivat hakea yritykset, kunnat ja uusiutuvan energian käyttöä edistävät yhteisöt. (Motiva 2016, Pientuotannon tuet)

Yksityishenkilöt voivat kuitenkin saada asentamastaan tuuli- tai aurinkosähköjärjestelmästä kotitalousvähennystä, mikäli laitteisto on hankittu kattamaan omaa sähkönkulutusta. Kotitalousvähennystä voidaan maksaa järjestelmän asennus- ja ylläpitotöistä. Mikäli aikomuksena on myydä yli puolet tuotantolaitoksella tuotetusta sähköenergiasta, kotitalousvähennystä ei myönnetä. Vähennystä ei makseta myöskään silloin, jos asennustyö on tehty uudiskohteeseen. (Verohallinto 2014)

Uusiutuvan energian tukea voivat hakea myös maatilat. Maatilojen biokaasuvoimalat kuuluvat investointirahoituksen piiriin, ja voivat hakea tukea maa- ja metsätalousministeriöstä. (Motiva 2016, Pientuotannon tuet)

3.5.1 Syöttötariffit

Uusiutuvaa sähköntuotantoa edistetään Suomessa tuotantotuella, jota maksetaan syöttötariffina. Syöttötariffin tarkoituksena on lisätä erilaisten uusiutuvien energialähteiden tuotantokapasiteettia ja kasvattaa näiden kilpailukykyä. Tällä hetkellä syöttötariffilla tuetaan tuulivoimaan, metsähakkeeseen, biokaasuun ja puupolttoaineeseen perustuvaa sähkön tuotantoa. Maksettu tuki on laissa määritellyn tavoitehinnan ja sähkön markkinahinnan erotuksen suuruinen. Mikäli polttoaineena on turve, tuki määräytyy päästöoikeuden markkinahinnan ja turpeen veron perusteella. (2010/1396, 2 §)

Jotta voimalaitos voi saada tuotantotukea, sen on täytettävä taulukossa 3 esitetyt tuotantomuotokohtaiset edellytykset. Näiden lisäksi voimalaitoksen on sijaittava Suomen rajojen sisällä ja liityttävä Suomen sähköverkkoon. Nämä ehdot esimerkiksi estävät syöttötariffin maksamisen Ahvenanmaalla sijaitseville tuotantolaitoksille. (Honkasalo & Tuomisto 2012, 15)

TAULUKKO 3. Tuotannolle asetetut edellytykset syöttötariffin piiriin pääsemiseksi (Honkasalo & Tuomisto 2012, 15)

Syöttötariffi	Voimalaitoksen ikä	Rajat nimellisteholle	Lämmöntuotanto	Valtiotuki
Metsähake	-	≥0,1 MVA	-	-
Puupolttoaine	voimalaitoksen on oltava uusi	0,1-8 MVA	Kyllä, hyötysuhteen oltava 50 %, tai 75 % jos yli 1 MVA:n laitos	ei ole saanut valtiontukea
Tuulivoima	voimalaitoksen on oltava uusi	≥0,5 MVA	ei vaatimuksia	ei ole saanut valtiontukea
Biokaasu	voimalaitoksen on oltava uusi	≥0,1 MVA	ei vaatimuksia	ei ole saanut valtiontukea

Mikäli sähkön tuottajan voimalaitos täyttää sille asetetut ehdot syöttötariffijärjestelmään hyväksymiselle, voidaan tuotantolaitoksen haltijalle maksaa tuotetusta sähköstä syöttötariffin mukaista korvausta. Syöttötariffin mukaista korvausta maksetaan enimmillään 12 vuoden ajan ja maksettava korvaus tuotetusta sähköstä määräytyy edellisen kolmen kuukauden sähkön markkinahinnan tai päästöoikeuden markkinahinnan mukaan. (Honkasalo & Tuomisto 2012, 15-16) Syöttötariffista maksettavaan tuen tasoon vaikuttavia tekijöitä on tarkemmin esitettyä taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Syöttötariffin tason määräytyminen (Honkasalo & Tuomisto 2012, 16)

Syöttötariffi	Tuen muoto	Perustuki	Lisätuki	Lisätuen ehdot
	syöttötariffi vähenee lineaarisesti päästöoikeuden hinnan kasvaessa	18 € kun EUA ≤ 10 €/t CO ₂ 0 € kun EUA ≥ 23 €/t CO ₂	-	-
Puupolttoaine	tavoite- ja markkinahinnan erotus	83,5 €/MWh:n ja markkinahinnan erotus. Max 750 000 €/12 kk.	20 €/MWh lämpöpreemio	Hyötysuhde po. 50 %, tai 75 % jos yli 1 MVA
Tuulivoima	tavoite- ja markkinahinnan erotus	83,5 €/MWh:n ja markkinahinnan erotus	105,30 €/MWh:n ja markkinahinnan erotus	Maksetaan 31.12.2015 asti, enintään 3 vuotta
Biokaasu	tavoite- ja markkinahinnan erotus	83,5 €/MWh:n ja markkinahinnan erotus	50 €/MWh lämpöpreemio	Hyötysuhde po. 50 %, tai 75 % jos yli 1 MVA

Syöttötariffeihin liittyy näiden lisäksi monia mutkikkaita yksityiskohtia, joilla on ratkaiseva merkitys syöttötariffin myöntämiselle ja siitä maksettavan tuen tasolle. Esimerkiksi tuulivoiman osalta syöttötariffiin ei enää hyväksytä uusia voimaloita, sillä 2 500 MVA kiintiö tuli täyteen jo vuonna 2015. Syöttötariffin piiriin pääseminen vaatii tuottajalta tuen hakemista lain edellyttämällä tavalla, ja poikkeamat tästä johtavat helposti tuen takaisinperintään. Suurten voimalahankkeiden toteuttaminen nykyisillä sähköhinnoilla ei ole kannattavaa ja EU:n ilmastopolitiikan vain kiristyessä, on uusia tukijärjestelmiä kehitettävä ja vanhoja tariffijärjestelmiä päivitettävä, jotta uusiutuvan energian osuus sähkön tuotannosta saadaan asetusten mukaiselle tasolle aikataulussa. (2010/1396, 51 §)

3.6 Ylijäämäsähkön myynti

Mikäli asennettu tuotantojärjestelmä toimii rinnan yleisen sähkönjakeluverkon kanssa ja siirto verkkoon on mahdollinen, on ylijäämäsähkö mahdollista myydä sähköyhtiölle ja näin saada energia muiden lähialueiden kuluttajien käyttöön. Tuotetulle sähkölle on kuitenkin ennen verkkoon siirtämistä oltava ostaja. Lainsäädäntö ei edellytä mitään osapuolta ostamaan tuotettua sähköä, ja mikäli ostajaa ei ole, syöttö verkkoon ei käytännössä ole sallittua. Verkonhaltijalla ei ole oikeutta sallia syöttöä verkkoon, jos ostajaa ei ole, sillä häviösähkön hankinta on kilpailutettava. Yleensä ostaja on paikallinen sähköyhtiö. Mikään sähköyhtiö ei kuitenkaan toimi pelkästään sähkön ostajana, vaan sähkön ostosopimus on yleensä osa kulutus sopimusta, jossa liittymän omistaja ostaa alijäämäsähkön verkosta. (Verkostosuositus YA:13 2016, 12)

Myydyn sähkön hinta voi hieman vaihdella ostajan mukaan, joten ostajan kilpailuttaminen on usein kannattavaa. Yleensä hinta määräytyy kuitenkin pörssisähkön Suomen hinta-alueen mukaisen tuntihinnan mukaan, jolloin tuottaja saa myymästään sähköenergiasta lähes saman hinnan, minkä hän siitä itse maksaisi. (Motiva 2016, Ylijäämänsähkön myynti)

Ylijäämänsähkön myynti ei kuitenkaan juuri kartuta kenenkään eläkerahastoa. Verkkoon syötetyn energian myyntitulot eivät sisällä siirtomaksua tai veroa, joten taloudellinen hyöty voi jäädä hyvinkin pieneksi. Tosin verkkoyhtiö saattaa kannustaa pientuotantoon tarjoamalla maksuttoman siirron verkkoon, ja verovelvollisuus alkaa vasta luvussa 3.4 esitettyjen ehtojen täytyttyä. kuviossa 9 on esitettyä sähkön osto- ja myyntihinnan rakennevertailu. (Motiva 2016, Ylijäämänsähkön myynti)



KUVIO 9. Sähkön osto- ja myyntihinnan vertailu (Motiva 2016, Ylijäämänsähkön myynti)

Kuviosta havaitaan selvästi, että suurin hyöty saadaan, kun itse tuotettu sähkö myös kulutetaan itse. Myyntiin liittyvät kulut, kuten mahdollinen välittäjäpalkkio, verot ja siirtomaksut pienentävät voittomarginaalia selvästi. (Motiva 2016, Ylijäämänsähkön myynti)

3.7 Sähköntuotannon siirtomaksu

Sähköntuotannon siirtomaksu riippuu verkonhaltijan ja tuotantolaitoksen omistajan välisestä sopimuksesta. Jotkut verkkoyhtiöt tarjoavat maksuttoman siirron verkkoon tiettyyn rajaan asti ja toiset taas ottavat lain salliman suurimman siirtohinnan. Sähkömarkkinalain 65/2009 mukaan liittymän sähköntuotannon vuosittainen siirtomaksu ei saa ylittää 0,07 senttiä kilowattitunnilta. (Sähkömarkkinalaki 65/2009, 5 §)

3.8 Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset

Fingrid on koonnut asiakirjan, jossa se määrittelee Suomen sähköjärjestelmään liitettäville voimalaitoksille järjestelmäteknilliset vaatimukset (VJV). Vaatimukset pohjautuvat pohjoismaiseen sääntökokoelmaan ”Nordic Grid Code”. Järjestelmäteknisten vaatimusten asettamisen perusteena on pyrkimys varmistaa, että voimalaitos kestää sähköverkon jännite- ja taajuusvaihtelut, voimalaitos tukee sähköjärjestelmän toimintaa häiriötilanteissa, voimalaitos ei aiheuta haittaa muille sähköverkon käyttäjille ja, että verkonhaltijalla ja Fingridillä on käytössään ajantasaiset tiedot sähköjärjestelmän tilasta. Tässä luvussa käydään läpi VJV 2013 sisällön pääkohdat. Painopiste on teholuokan 1 voimalaitoksilla, eikä tässä kommentoida eri generaattori- tai voimalaitostyypeille asetettuja vaatimuksia. (Fingrid 2013, 6)

Voimalaitosten järjestelmäteknilliset vaatimukset koskevat vähintään 500 kW verkkoon kytkettyjä ja tahdistettuja tuotantolaitoksia ja ne vaihtelevat hieman voimantuotantomuodon, voimalaitoksen mitoitustehon ja maantieteellisen sijainnin perusteella. Vaatimukset on porrastettu teholuokkiin mitoitustehon perusteella ja nämä teholuokat ovat esitettyinä taulukossa 5. (Fingrid 2013, 10)

TAULUKKO 5. Voimalaitosten teholuokittelu (Fingrid 2013, 10)

Teholuokka	Voimalaitoksen mitoitusteho P_{max}
Teholuokka 1	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 0,5 MW mutta alle 10 MW. ($0,5 \text{ MW} \leq P_{max} < 10 \text{ MW}$)
Teholuokka 2	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 10 MW mutta alle 25 MW. ($10 \text{ MW} \leq P_{max} < 25 \text{ MW}$)
Teholuokka 3	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 25 MW mutta alle 100 MW. ($25 \text{ MW} \leq P_{max} < 100 \text{ MW}$)
Teholuokka 4	1) Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 100 MW ($P_{max} \geq 100 \text{ MW}$) tai 2) Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 10 MW ja laitos liittyy Lapissa Valajaskosken ja Pirttikosken 220 kV:n sähköasemien Isoniemen ja Kokkosnivan johtolähtöjen takana sijaitsevaan sähköverkkoon.

3.8.1 Vastuut, velvollisuudet ja oikeudet

Verkkoon liittyjän vastuulla on vaatimusten täyttäminen, todentaminen, ylläpitäminen ja kustannuksista huolehtiminen niiden vaatimusten osalta, jotka ovat liittämissopimusta tehdessä voimassa. Liittyjällä on vastuu ilmoittaa voimalaitoksen toiminnan ja vaatimusten välisestä ristiriidasta Fingridille ja verkonhaltijalle ja ryhtyä toimiin ristiriidan selvittämiseksi. (Fingrid 2013, 11)

Verkonhaltijan vastuulla on tarkastaa liittyjän ilmoittamat tiedot oikeellisiksi ja valvoa vaatimusten todentamisprosessi, sekä toimia tiedonvälittäjänä liittyjän ja Fingridin välillä (jos joku muu kuin Fingrid). Verkonhaltijalla on oikeus määrittää lisävaatimuksia liitettävälle laitteistolle tarpeen mukaan suojatakseen verkon toiminta tuotantolaitoksen lähellä. Myös verkonhaltijalla on velvollisuus ilmoittaa liittyjälle ja Fingridille havaitsemistaan ristiriidoista tuotantolaitoksen ja vaatimusten välillä. (Fingrid 2013, 11)

3.8.2 Vaatimusten todentamisprosessi

Teholuokan 1 laitteistoissa liittyjän vastuulla on voimalaitoksen vaatimusten todentaminen käyttöönottoastein ja vaadittujen tietojen toimittaminen verkonhaltijalle. Tämän jälkeen verkonhaltija tulee tarkastamaan annettujen tietojen todenmukaisuuden. Hyväksytty todentaminen ilmoitetaan tietoineen Fingridille ja hylätystä ilmoitetaan liittyjälle. Todentaminen on suoritettava 12 kk sisällä siitä hetkestä, kun voimalaitos on ensimmäisen kerran syöttänyt pätötehoa sähköjärjestelmään. (Fingrid 2013, 12-14)

Teholuokkien 2 – 4 voimalaitosten todentaminen suoritetaan liittyjän toimesta taulukon 6 mukaisin vaihein ja aikatauluin. Verkonhaltija tarkastaa ja valvoo todenmukaisuuden jokaisen vaiheen osalta ja antaa tästä lausunnon Fingridille.

TAULUKKO 6. Teholuokkien 2-4 voimalaitosten todentamisprosessi (Fingrid 2013, 14)

Prosessin vaihe	Aikatauluvaatimus
Vaihe 1: Yleisten voimalaitostietojen toimittaminen, VJV-referenssipisteen määrittäminen ja mahdollisten poikkeamien käsitteleminen	Mahdollisimman aikaisin mutta viimeistään voimalaitoksen pääkomponenttien toimittajavalinnan jälkeen.
Vaihe 2: Projektikohtaisten voimalaitostietojen ja Käyttöönottokokeiden suunnittelu	Viimeistään 3 kuukautta ennen Vaatimuksiin liittyvien käyttöönottokokeiden aloittamista.
Vaihe 3: Käyttöönottokokeiden hyväksytyt suorittaminen ja Käyttöönottokokeiden dokumentoiminen	Käyttöönottokokeet on suoritettava hyväksytysti 9 kuukauden sisällä hetkestä, jolloin voimalaitos on syöttänyt ensimmäisen kerran pätötehoa sähköjärjestelmään.
Vaihe 4: Vaatimusten todentamisprosessin hyväksyntä	Todentamisprosessin hyväksyntään vaadittavat tiedot on toimitettava viimeistään kolmen kuukauden kuluessa Vaatimuksiin liittyvien käyttöönottokokeiden jälkeen.
	Vaatimusten todentamiseen liittyvien toimenpiteiden tulee olla hyväksytysti suoritettuina viimeistään 12 kuukauden kuluttua hetkestä, jona voimalaitos on ensimmäisen kerran syöttänyt pätötehoa sähköjärjestelmään.

Teholuokkien 1 – 4 toimitettavat voimalaitostiedot ovat tarkemmin esitettyinä Fingridin ohjeessa.

3.8.3 Sähkön mittaus

Teholuokan 1 yli 1 MW voimalaitosten sähköntuotannosta tuotantolaitoksen omistajan tulee toimittaa reaaliaikainen mittaustieto Fingridille. Mikäli liittyyllä on useampi teholuokan 1 voimalaitos samassa liittytäpisteessä, tuotantotietoja ei tarvitse eritellä voimaloiden välillä, vaan ne voidaan summata yhteen. Tehotuotanto tulee olla mitattavissa ennen pätötehon syötön aloittamista ja liittynnästä tulee tehdä ilmoitus verkonhaltijalle ja Fingridille. (Fingrid 2013, 23)

Teholuokkien 2 ja 3 voimalaitosten tehomittausta koskevat samat säännöt kuin teholuokan 1, mutta tämän lisäksi näillä voimalaitoksilla tulee olla käytöstä vastaava toimija, jonka on kyettävä muuttamaan voimalaitoksen pätö- tai loistehosäädön toimitilaa tai aseteluarvoa 15 minuutin sisään kellon ympäri. (Fingrid 2013, 23)

Teholuokan 4 voimalaitoksia koskevat samat säädökset kuin pienempiäkin laitoksia, mutta tämän lisäksi niihin on asennettava häiriö- ja heilahtelutalenninjärjestelmä. (Fingrid 2013, 23)

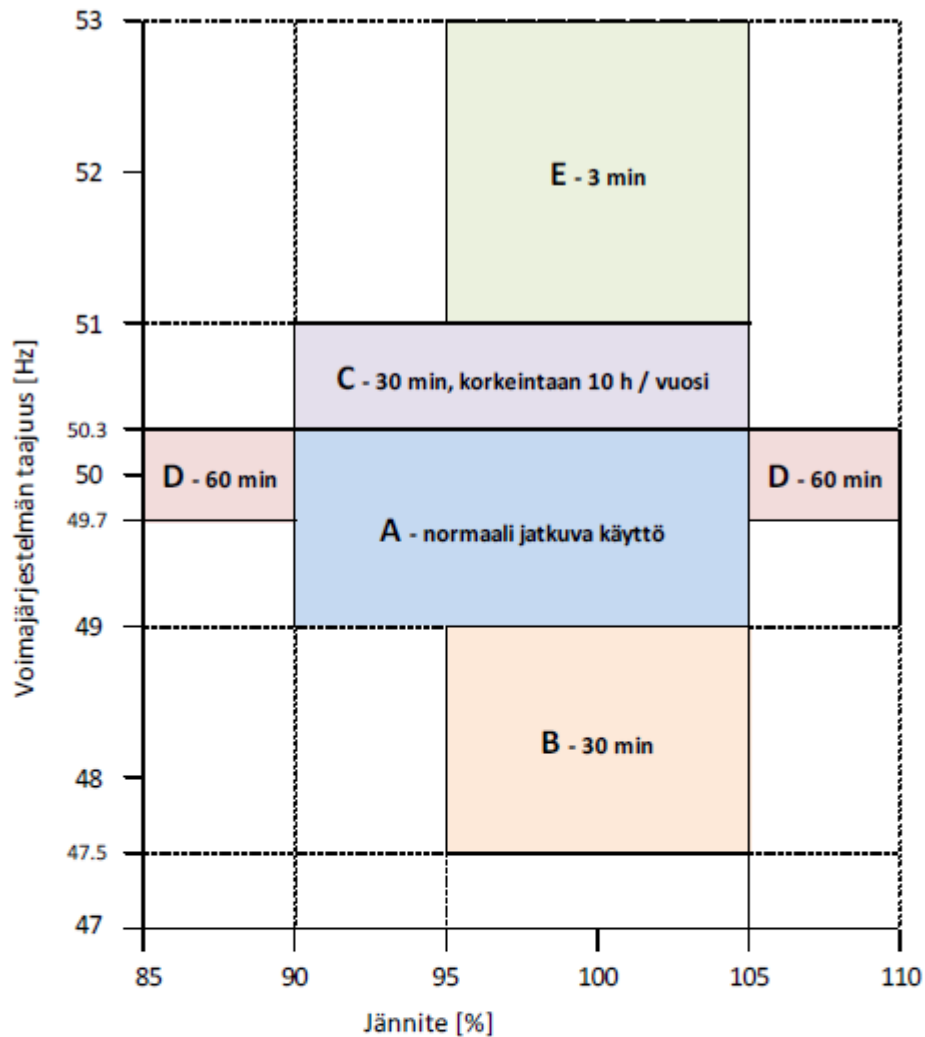
3.8.4 Suojasasettelu

Suojasasettelu määritetään voimalaitoksen referenssipisteessä. Teholuokan 1 referenssipiste on yksittäisen generaattorimuuntajan yläjännitepuolta vastaavassa sähköisessä pisteessä. Liittyjällä on vastuu määrittää suojasasettelut niin, että henkilö- ja laiteturvallisuus taataan ja voimalaitos kykenee pysymään verkossa siinä esiintyvän häiriön ajan, niin kauan kuin se on turvallista. Suojasasettelulla on vaikea määrittää ohjearvoa, joten asettelu katsotaan aina tapauskohtaisesti. (Fingrid 2013, 25)

Teholuokkien 2 – 4 suojaus toteutetaan samalla tavalla kuin teholuokan 1, mutta referenssipiste määritellään eri tavalla ja näihin sisältyy pimeäkäynnistysominaisuuteen kohdistuva vaatimus. (Fingrid 2013, 26)

3.8.5 Toiminta erilaisilla jännitteillä ja taajuuksilla

Sähköverkon ja sitä käyttävien kuluttajien ja tuottajien muodostaman järjestelmän taajuus ja jännite vaihtelevat koko ajan kuormien ja tuotannon muuttuessa. Tietyissä käyttötilanteissa arvot voivat heitellä suurestikin. Teholuokan 1 voimalaitoksen on kyettävä toimimaan jatkuvasti normaalisti, kun referenssipisteen jännite vaihtelee välillä 90 – 105 % ja taajuus 49,0 – 50,3 Hz. Kuviossa 10 on esitettyinä määritetyt ajat, joiden mukaisesti voimalaitoksen on toimittava verkossa, kun taajuus, jännite tai molemmat poikkeavat näistä arvoista. (Fingrid 2013, 27-28)



- A:** Normaali jatkuva käyttö - voimajärjestelmän jännitteestä ja/tai taajuudesta johtuvaa pätötehon tai loistehon tuotantokyvyn alentumista ei sallita
- B:** 30 min yhtäjaksoinen käyttö - tehonalenema sallittu siten, että suurin sallittu alenema 49 Hz'n tasolla on 0% ja 47.5 Hz'n tasolla 15% (välille jäävällä taajuusalueella sallittu alenema määrytyy lineaarisesti rajataajuuksilla sallittujen alenemien perusteella)
- C:** 30 min yhtäjaksoinen käyttö yhteensä korkeintaan 10 tunnin ajan vuosittain - 10% tehonalenema sallitaan mikäli se ei aseta rajoituksia jatkaa toimintaa täydellä teholla taajuuden palaututtua alle 50.3 Hz'n tason
- D:** 60 minuutin yhtäjaksoinen käyttö - tehon sallitaan alenevan enintään 10 % täydestä tehosta
- E:** 3 minuutin yhtäjaksoinen käyttö - voimakas tehonalenema sallittu

KUVIO 10. Voimalaitoksen toiminta-ajat eri referenssipisteen taajuuksilla ja jännitteillä (Fingrid 2013, 28)

Tämän lisäksi voimalaitosten tulee kyetä jatkamaan toimintaansa lyhytaikaisten jännitehäiriöiden aikana ja niiden jälkeen. Laitteiston tulee kyetä myös jatkamaan normaalia toimintaa, saarekesuojauksesta huolimatta, taajuuden muutosnopeuden ollessa alle 2 Hz/s. (Fingrid 2013, 29)

Teholuokkien 2 ja 3 voimalaitosten vaatimukset ovat suurilta osin samat kuin teholuokan 1. Tähän on kuitenkin lisänä ehto, jonka mukaan niiden on kyettävä palauttamaan pätötehon syöttö nopeasti lyhytaikaisen häiriön jälkeen. Mikäli palautus ei onnistu lyhyessä ajassa, on liityntä hyväksyttävä Fingridillä. Teholuokan 4 voimalaitoksia koskevat samat säännöt kuin luokkia 2 – 3, mutta toiminta lyhytaikaisessa häiriössä määritetään hie-man poikkeavalla tavalla. (Fingrid 2013, 30)

3.8.6 Vaatimuksista poikkeaminen

Tuotantolaitoksen omistajalla on mahdollisuus poiketa vaatimuksista, jos tähän ilmenee tarve laitoksen pääkomponentteja hankittaessa. Lupa pyydetään kirjallisesti Fingridiltä, joka voi myöntää poikkeamisluvan jos:

- sähköjärjestelmää ei poikkeuksella vaaranneta
- sähköverkon siirtokapasiteetti ei rajoitu
- voimalaitos ei aiheuta häiriöitä muille sähköverkon osapuolille
- voimalaitos tukee sähköverkon toimintaa vikatilanteessa ja toimii luotettavasti vian aikana ja sen jälkeen
- poikkeama on teknillistaloudellisesti perusteltu
- poikkeaman myöntäminen voidaan vastaavanlaisessa tilanteessa myöntää myös muille. (Fingrid 2013, 22)

Fingrid hyväksyy tai hylkää poikkeuspyynnön ja toimittaa tiedon 60 työpäivän kuluessa.

3.9 Uudistettujen rakennusstandardien vaikutukset pientuotantoon

Suomi pyrkii EU:n ilmasto ja energiapaketin linjausten mukaisesti vähentämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja lisäämään uusiutuvan energian osuutta kokonaiskulutuksesta. Tätä pyritään edistämään mm. rakennusalan lainsäädännön uudistamisella. Vuonna 2013 voimaan tulleen maankäyttö- ja rakennuslain muutoksen 958/2012 mukaisesti, uu-

det määräykset tulevat voimaan vuoden 2018 alussa. Laissa on viiden vuoden siirtymäaika, jonka puitteissa aiempia määräyksiä on lupa soveltaa vuoden 2017 loppuun asti. (Edilex)

Uudistettu maankäyttö- ja rakennuslaki ei suoraan ota kantaa pientuotannon lisäämisen kannattavuuteen uudisrakentamisessa, mutta uudistuksen keskeisessä osassa olevat EU:n direktiivit rakennusten energiatehokkuudesta EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) ja uusiutuvan energian käytön edistämisestä RES (Renewable Energy Sources Directive) viittaavat tähän pyrkimykseen. EPBD-direktiivin mukaan Suomessa rakennettavien uusien julkisten rakennusten tulee olla lähes nollaenergiarakennuksia 31.12.2018 jälkeen ja 31.12.2020 jälkeen, määräys laajenee kattamaan kaikki uudet rakennukset. (Savolahti, Mattinen, Heljo & Kopsakangas-Savolainen 2015, 3)

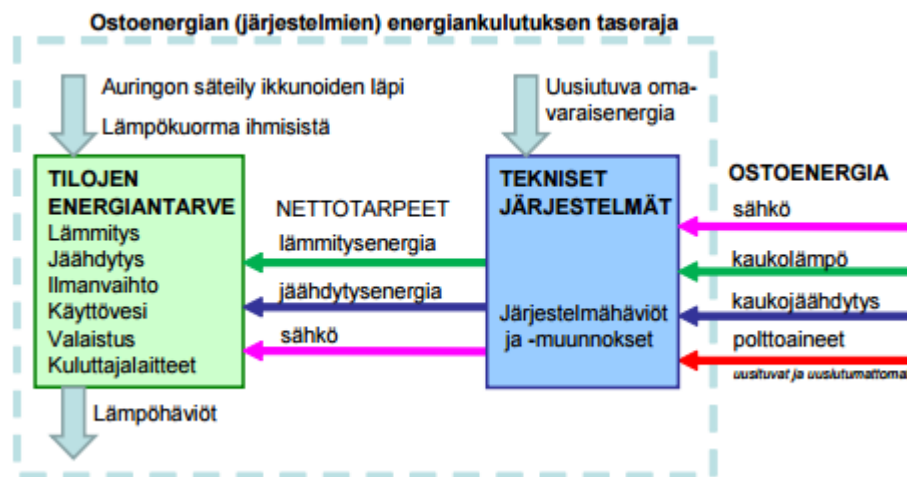
Tällä hetkellä lähes nollaenergiarakentamisen määritelmä on epäselvä. EPBD-direktiivin mukaan lähes nollaenergiarakennuksella on ”erittäin korkea energiatehokkuus”, mutta siihen ei oteta kantaa, miten energiatehokkuus saavutetaan. Epämääräisen kuvauksen mukaan, energiatehokkuus olisi mahdollista saavuttaa esimerkiksi paikan päällä tuotettavalla uusiutuvalla energialla, kuten aurinkosähköllä. FinZEB-hankkeessa, jonka loppuraportti julkaistiin 31.3.2015, oli tarkoituksena muodostaa yhtenäinen määritelmä lähes nollaenergiarakentamiselle ja energiatehokkuusvaatimuksille Suomessa. (Edilex)

FinZEB-hankkeessa etsittiin teknisesti toteutettavissa olevia kustannustehokkaita ratkaisukokonaisuuksia nollaenergiarakentamisen määritelmälle. Pientuotantoa koskevat ratkaisut koskevat lähellä tuotetun energian taserajoja ja E-luvun muodostamisen uudistamista. Hankkeen lopputuloksena päädyttiin esittämään mallia, joka perustuu E-luvun rajojen uudistamiseen taulukon 7 mukaisesti. (Savolahti, Mattinen, Heljo & Kopsakangas-Savolainen 2015, 44) Taulukossa esitetyt rajat hyväksyttiin ja valtioneuvoston päätöksellä kirjattiin maankäyttö- ja rakennuslakiin. Asetus tulee voimaan 1.1.2018 (Maatalous- ja ympäristöministeriö 2017)

TAULUKKO 7. Rakennuksien E-luvun määrittämisessä käytetyt kertoimet (Maatalous- ja ympäristöministeriö 2017)

Vanhat rajat		Uudet rajat	
Sähkö	1,7	Sähkö	1,2
Kaukolämpö	0,7	Kaukolämpö	0,5
Kaukojäähdytys	0,4	Kaukojäähdytys	0,28
Fossiiliset polttoaineet	1,0	Fossiiliset polttoaineet	1,0
Uusiutuvat polttoaineet	0,5	Uusiutuvat polttoaineet	0,5

Eri energialähteille annetut kertoimet kuvaavat luonnonvarojen käyttöä ja niiden avulla pyritään ohjaamaan kohti energiatehokkaampaa rakentamista. Suurempi suhdeluku tarkoittaa energiatehokkuusvaatimuksen kasvamista. Kuvion 11 mukaisesti, suurta energiatehokkuusvaatimusta on kuitenkin mahdollista paikata uusiutuvan omavaraisenergian (esim. aurinkosähkö) avulla. Omavaraisenergialle ei ole annettu kerroinarvoa, koska kertoimet koskevat vain ostoenergiaa. Omavaraisenergia pienentää ostoenergian tarvetta ja näin vähentää kokonaisenergiakulutusta. Verkkoon syötetyn energian määrää ei E-luvun laskennassa oteta erikseen huomioon. (Kalliomäki 2012, 6)



KUVIO 11. Ostoenergian taseraja (Kalliomäki 2012, 6)

4 PIENTUOTANNON LIITTÄMISEN TEKNISET RATKAISUT

Tässä luvussa käsitellään pientuotannon verkkoon liittämisen teknisiä ratkaisuja ja laitteistojen vaatimuksia. Mikäli vaatimus koskee jotakin tiettyä laitteistokokoa tai -tyyppiä, se on kerrottu erikseen. Muuten vaatimukset koskevat kaikkia liitettäviä laitteita.

4.1 Yleistä

Yleiseen sähköverkkoon voidaan kytkeä vain tarkat tekniset vaatimukset täyttävä laitteisto, sillä tuotantolaitoksen ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi sähköverkon toimintaan ja käyttöturvallisuuteen. Itse kytkentä voidaan suorittaa joko liittymällä suoraan sähköverkkoon tai kiinteistön sisäisen tai sitä vastaavan kiinteistöryhmän sähköverkon kautta. Tuotantolaitos voidaan sen koosta riippuen myös liittää oman liittymiskohdan tai kulutuksen yhteisen liittymiskohdan kautta. (Honkasalo & Tuomisto 2012, 10)

Pienvoimalan kytkeminen sähköverkkoon on myös verkon kannalta haasteellista, sillä nykyinen sähköverkko on suunniteltu siirtämään keskitetyn tuotannon tuottama sähköenergia loppukäyttäjille. Syöttävä pientuotantolaitos muuttaa oleellisesti tehovirtauksen suuruutta ja voi mahdollisesti muuttaa sen suuntaakin. Pientuotannon verkostovaikutusten vuoksi sähköverkkoyhtiöt asettavatkin sähkön tuottajille sähkön kuluttajia tarkemmat tekniset vaatimukset verkkoon liittymiselle. (Kasvi 2009)

Sen lisäksi, että pientuotantolaitos vaikuttaa verkon toimintaan ja suojaukseen, verkko ja sen tila vaikuttavat pienvoimalan toimintaan. Huonosti toteutettu suojaus tai ilmoittamatta jätetty liityntä voi johtaa laitteiston toimintahäiriöihin tai mahdollisesti rikkoutumiseen ja näin aiheuttaa jopa tulipalovaaran. (Honkasalo & Tuomisto 2012, 22)

4.2 Tuotantolaitosten luokittelu

Tuotantolaitoksen ominaisuudet vaihtelevat tuotantomuodon mukaan ja näillä ominaisuuksilla on merkittäviä vaikutuksia tuotantolaitoksen toimintaan sähköverkossa. Esimerkiksi käynnistysvirta voi tietyillä tuotantomuodoilla olla jopa 6-8 kertaa nimellisvirtaa suurempi, ja tämä voi olla rajoittava tekijä tuotantolaitoksen liittämiskohtaa suunnit-

teltaessa. Tuotantolaitokset voidaan jakaa nimellistehon mukaan mikro- ja pientuotantoon, mutta määritelmällä ei käytännössä ole vaikutusta voimalan toimintaan. Toimintavarmuuden ja sähköturvallisuuden takaamiseksi, tuotantolaitokset jaotellaan mieluummin käyttötavan ja syöttöjärjestelyjen mukaisesti neljään eri luokkaan. Luokittelun mukaan määräytyvät sähkön tuottajan ja verkonhaltijan välillä tehtävät sopimukset, tuotantolaitosten erikoisvaatimukset sekä tuotantolaitoksen suojaukselle annetut vaatimukset. (Lehto 2012, 2)

Luokittelu käyttötavan ja syöttöjärjestelyjen mukaan tehdään seuraavalla tavalla:

- Luokkaan 1 kuuluvat ne tuotantolaitokset, jotka toimivat erillään yleisestä jakeluverkosta. Tällaisissa kohteissa yli oman tarpeen tuotettua sähköä ei siis ole mahdollista siirtää verkonhaltijan jakeluverkkoon. Luokan 1 laitteistoilta vaaditaan mekaaninen rinnankäynnin esto.
- Luokan 2 tuotantolaitokset toimivat niin sanotusti kulutuspuoleisen varavoimana, eli vaihtoehtona yleiselle jakeluverkolle. Valinta jakeluverkon ja tuotantolaitoksen välillä tapahtuu joko manuaalisesti kytkimien tai automaation avulla. Myös luokassa 2 sähkön siirto verkkoon on estetty, mutta mekaanista erotusta ei vaadita. Koska mekaanista erotusta ei ole, laitos tulee pystyä tahdistamaan verkkoon.
- Luokan 3 tuotantolaitokset ovat tekniseltä yhteensopivuudelta verkonhaltijan jakeluverkon kanssa sitä tasoa, että syöttö verkkoon on mahdollinen. Syöttöä ei kuitenkaan voida sallia, sillä tuotetulle sähkölle ei ole ostajaa. Koska yhteys verkkoon on mahdollinen, luokan 3 laitteisto tulee suojata saareketilanteelta, jossa laitoksen on mahdollista syöttää sähköä jännitteettömään verkkoon.
- Luokan 4 tuotantolaitoksia koskevat samat vaatimukset kuin luokkaa 3, mutta tässä tilanteessa tuotetulle sähkölle on ostaja, joten syöttö verkkoon voidaan sallia. (Sener 2001, 4)

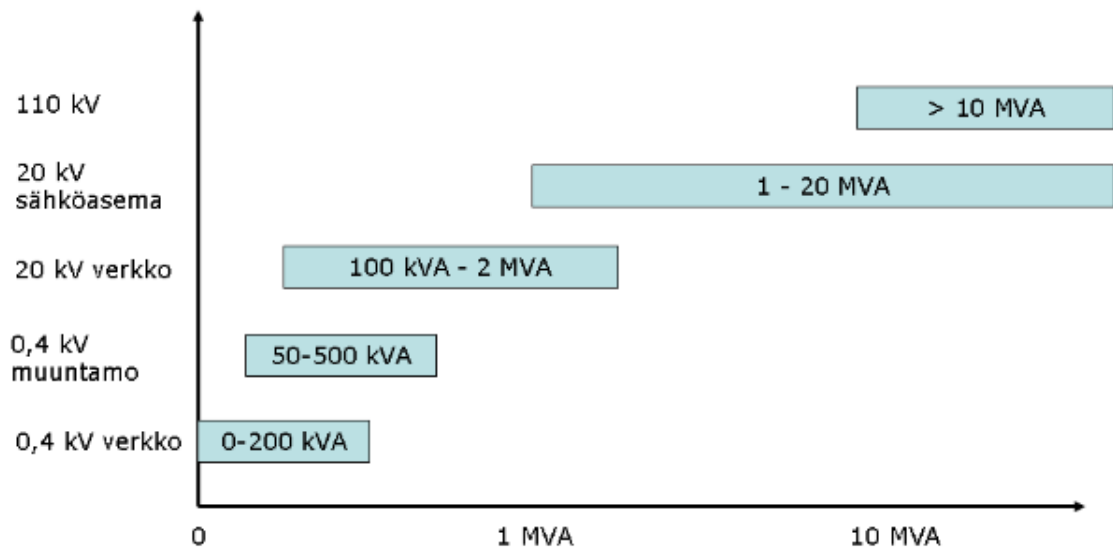
Taulukossa 8 on havainnollistettu erilaisissa käyttötilanteissa olevien tuotantolaitosten luokittelua ja niihin kohdistuvia vaatimuksia. Viimeisessä sarakkeessa käytetyt lyhenteet viittaavat suositeltuihin tuotantolaitoksen sähköverkkoon liittämiseen ja käyttöön vaikuttaviin sopimusehtoihin. Sopimusehtoja taulukossa on lueteltuna VPE 14 eli verkkopalveluehdot, TVPE11 eli tuotantoa koskeva liite verkkopalveluehtoihin, LE14 eli liittymisehdot ja TLE14 eli tuotannon liittymisehdot. (Lehto 2012, 2)

TAULUKKO 8. Tuotantolaitosten luokittelu laitosten käyttötavan ja -tarkoituksen mukaan (Lehto 2012, 2)

	Luokka	Rinnan- käynnin esto	Tahdistus	Yhteen- sopivuus	Saareke- käytön esto	Sopimus- ehdot
Rinnankäyttö estetty mekaanisesti	1	X				LE2014 ja VPE2014
Sähkön siirto jakeluverkkoon estetty	2		X			LE2014 ja VPE2014
Tuotetulle sähkölle ei ole ostajaa	3		X	X	X	LE2014 ja TVPE11
Tuottaja myy sähköä sähkötalokkoina- osapuolelle	4		X	X	X	LE2014 tai TLE2014 ja TVPE11

4.3 Tuotannon liittämisrajat

Tuotantolaitoksen liittämispiste valitaan siten, että laitoksen toiminta ei häiritse muita sähköverkon käyttäjiä. Tästä syystä liityntäjännite arvioidaan tuotantolaitoksen nimellistehon mukaan. Verkon ominaisuudet toki vaikuttavat siihen, kuinka suuri tuotantolaitos verkkoon voidaan kytkeä ja tätä tarkastellaan seuraavissa luvuissa myöhemmin. Energia-teollisuuden ohjeissa on annettu viitteelliset rajat eri kokoisten tuotantolaitosten liittämiseen eri jänniteportaisiin. Yleinen sääntö kuitenkin on, että 0,4 kV pienjänniteverkkoon voidaan kytkeä suurimmillaan muutaman sadan kilowatin tuotantolaitos ja 20 kV keskijänniteverkkoon kokoluokaltaan useampien megawattien kokonaisuuksia. Suuret kymmenien megawattien laitokset vaativat usein oman sähköaseman ja ne voidaan joutua tapauskohtaisesti liittämään 110 kV suurjänniteverkkoon. Tuotannon liittämisrajoja eri jänniteportailla on havainnollistettu kuviossa 12. (Pöyry 2016, 9-10)



KUVIO 12 Tuotannon liittämiserajat (Lehto 2012, 2)

Tuotannon liittäminen asettaa haasteita verkon toiminnalle ja siten saattaa pakottaa verkonhaltijan vahvistamaan tai muuten uudistamaan verkkoa. Verkon vahvistamisen tarve pientuotannon liittämisen seurauksena voi vaatia verkonhaltijalta huomattavankin sijoituksen, jonka se joutuu itse maksamaan. Sähkömarkkinalaissa 588/2013 on verkonhaltijan velvollisuudesta verkon kehittämiseen tässä tilanteessa määritelty, että pientuotannon liittamisestä aiheutuvien verkon vahvistamiskustannusten veloittaminen liittyjältä ei ole sallittua. (Sähkömarkkinalaki 588/2013, 56 §)

4.4 Tuotannon maksimimäärä liittymässä

Pienvoimalan tuotanto voidaan liittää sähköverkkoon liittämösopimuksen ehtojen mukaisesti, mikäli samaan liittämiskohtaan liitettyjen tuotantolaitosten yhtäaikainen käynnistyminen tai verkosta irtikytkentä ei ylitä taulukon 9 mukaista jännitetason muutosta verkossa, ja laitoksen käynnistysvirta ei ylitä liittymissopimuksessa määritellyn maksimitulon virran arvoa. (Lehto 2012, 2)

TAULUKKO 9. Liittymiskohdan ja jännitetasen vaikutus sallittuun jännitemuutokseen (Lehto 2012, 3)

Suurin sallittu jännitteenmuutos	Jännitetaso	Liittymiskohta
2,5 %	KJ-verkko	Johtolähdöllä, johon on liittynyt myös muita asiakkaita
5 %	KJ-verkko	Ainoastaan tuotantoa sisältävällä johtolähdöllä
4 %	PJ-verkko	Missä tahansa pj-verkon osassa, johon on liittynyt myös muita asiakkaita
6 %	PJ-verkko	Liityttäessä vain tuotannon liittämiseen tarkoitettuun jakelumuuntamoon

Pientuotantolaitos voidaan siis kytkeä verkkoon, mikäli liittymä tai irtikytkentä ei aiheuta taulukossa 9 esitettyä jännitteenalenemaa. Sener ry on ohjeessaan ”Pienvoimaloiden liittäminen jakeluverkkoon (2001)” määritellyt, että tuotantolaitos voidaan liittää verkkoon, mikäli liittymän oikosulkuteho toteuttaa yhtälön 7

$$S_k > 25 \cdot S_n \cdot \frac{I_s}{I_n}, \quad (7)$$

jossa I_s on laitteiston käynnistyshetkellä ottama virta [A], I_n on laitteiston nimellisvirta [A], S_k on liittämiskohdalta vaadittava oikosulkuteho [kVA] ja S_n on laitteiston nimellisteho [kVA]. (Sener 2001, 12)

Kaavan 7 mukaan liitettävän tuotantolaitoksen maksimikoko riippuu liittymäpisteen oikosulkutehosta ja on siten riippuvainen etäisyydestä sähköasemaan. Yhtälön toteutuessa voidaan taata, että edellä mainitut jännitteenvaihtelun arvot eivät ylitä missään vaiheessa. (Sener 2001, 12)

Senerin ohje koskee kuitenkin kaikkia pienvoimalatyyppisiä, eikä välttämättä sovellu ehdoksi pientuotannon liittämiseksi. Eri pientuotantotavoilla on erilaiset verkostovaikutukset, eikä yhtälö ota näitä täysin huomioon. Yhtälö kuitenkin soveltuu ohjearvoksi pientuotantolaitosta suunnittelevalle sähköurakoitsijoille, ja sen avulla voidaan vähäisillä alkuarvoilla karkeasti laskea liittymän suurin sallittu liittymäteho. Muita liittymän rajoittavia tekijöitä ovat käytetyn johtimen tyyppi ja paksuus, sekä muut samaan verkon osaan liitetyt tuotantolaitokset. (Verkostosuositus YA:13 2016, 2)

4.5 Yksivaiheisen tuotannon rajaus

Tuotantolaitos voi olla myös yksivaiheinen. Yksivaiheinen syöttö voi kuitenkin olla kolmivaiheista haastavampaa, sillä mikäli tuotantolaitos on liian suuri, aiheuttaa tuotanto verkkoon vaiheiden välille tehoepätasapainon ja näin edesauttaa verkon vikojen syntymistä. Tästä syystä yksivaiheiselle tuotannolle on asetettu raja, jota suurempia tuotantolaitteistoja ei enää saa liittää verkkoon yksivaiheisena. (Lehto 2009, 35)

Pääperiaatteena yksivaiheisen tuotantolaitoksen rajoittamiselle on, että sitä tarkastellaan kuten tavallista kulutuslaitetta. Tällöin yksivaihetuotanto voidaan kytkeä maksimissaan 16 A sulakkeen taakse, jolloin tuotantolaitoksen maksimikoko saa olla enintään 3,7 kVA. (Verkostosuositus YA:13 2016, 3)

Mikäli samalla alueella on useita yksivaiheisia tuotantolaitoksia, on verkonhaltijalla oikeus vaatia tuotannon tasoittamista usean vaiheen välille. Muutoin muuntopiirin vaiheiden välille ei voida taata tasaista kuormitusta. (Lehto 2009, 36)

4.6 Tuotantolaitoksesta ilmoitettavat tekniset tiedot

Tuotantolaitoksen haltijan tulee toimittaa verkonhaltijalle paikkansapitävät tiedot tuotantolaitteiston teknisistä ominaisuuksista. Vajaat tai virheelliset tiedot laitteistosta voivat johtaa virhearviointeihin verkon toimintaa tarkastellessa tai uutta verkon osaa suunniteltaessa. Tuotantolaitoksen haltijan tulee toimittaa verkonhaltijan pyytämät tiedot ennen tuotantolaitoksen liittämistä, sillä näiden tietojen perusteella verkonhaltija antaa luvan verkkoon liittämiseksi. Verkonhaltijalle ilmoitettavat tiedot ilmenevät käytössä olevasta Energiateollisuuden suosittelemasta tuotannon liittämisen lomakkeesta. Lomakkeen sisältö vaihtelee sen mukaan, minkä kokoista tuotantolaitosta ollaan kytkemässä. Alle 100 kVA laitteistojen kohdalla toimitetaan mikrotuotannon yleistietolomake ja yli 100 kVA laitteistojen kohdalla tuotantolaitteiston perustietolomake. (Verkostosuositus YA:13 2016, 14)

Lomakkeessa verkonhaltijalle ilmoitetaan esimerkiksi seuraavia tietoja

- tuotantolaitteiston nimellisteho ja sen syöttämä enimmäisvikavirta
- tuotantolaitoksen sijaintitiedot

- onko laitteiston kytkentä kolmi- vai yksivaiheinen ja mikä vaihe tällöin on käytössä
- tuotantolaitteiston verkkoonliitännälaitteen suojausasettelut ja irtikytketymsijat
- tieto laitoksen erottamisratkaisusta ja erottimen tiedot

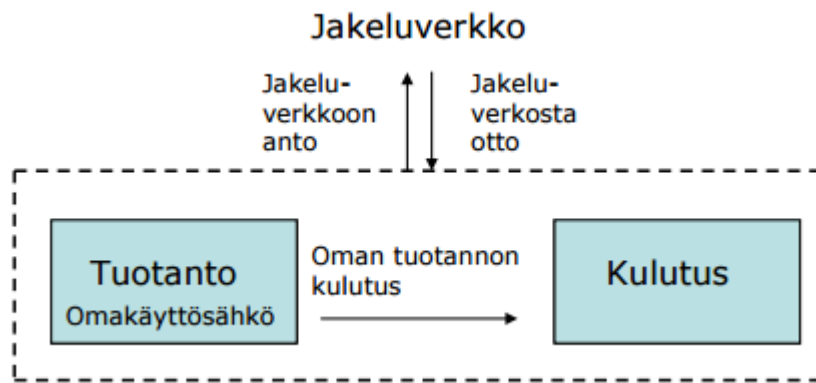
Kun tuotantolaitos on liitetty verkkoon, tulee tuotantolaitoksen haltijan toimittaa pyydetäessä käyttöönottotarkastuspöytäkirja verkonhaltijalle, ennen kuin tuotantolaitos voidaan ottaa käyttöön. Tuotantolaitos voidaan ottaa käyttöön vasta verkonhaltijan annettua siihen luvan. (Lahtela 2015, 44)

4.7 Sähkön tuotannon mittaus

Verkonhaltija on vastuussa verkosta otetun ja siihen syötetyn energian mittauksesta, mittarien asentamisesta ja vaihdosta, sekä mittarien lukemisesta. Itse tuotetun sähkön kulukselta vastaa tuottaja itse. Mittausjärjestelyihin vaikuttaa käytössä olevan tuotantolaitoksen luokitus. Luvussa 4.2 on esitettyä eri tuotantolaitosten luokitukset. Kohteessa, jossa sähkön tuottaja ei syötä sähköä verkkoon päin, eli tuotantolaitosluokat 1,2 ja 3, riittää yksisuuntainen verkosta otetun energian mittaus. Luokan 4 laitoksissa vaaditaan kaksisuuntainen mittaus. Mikäli tuotantokohteen liittymä on alle 3x63 A, voidaan kaksisuuntainen mittaus suorittaa yhdellä etäluettavalla mittarilla, joka rekisteröi verkkoon syötetyn ja verkosta otetun energian erikseen. Tätä suuremmissa liittymissä vaaditaan kaksi erillistä mittaria. (Verkostosuositus YA:13 2016, 13)

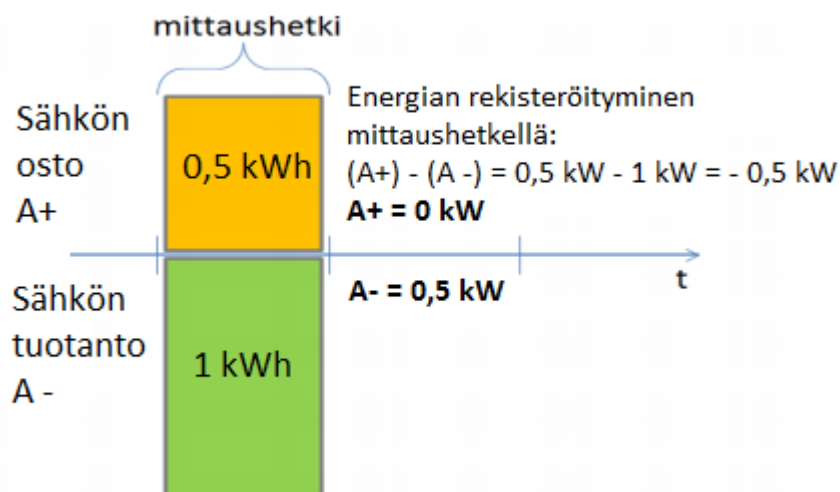
Nimellistehoaltaan alle 100 kVA sähköntuotantolaitoksessa riittää, että olemassa oleva kohteen etäluottava sähkömittari mittaa erikseen verkosta otetun ja siihen syötetyn energian. Yli 100 kVA tuotantolaitos on varustettava erillisellä mittauksella, jonka mukaan lasketaan oman tuotannon kulutus. (Verkostosuositus YA:13 2016, 13)

Kuviossa 13 on esitettyä pientuotannolla ja kaksisuuntaisella syötöllä varustetun sähköliittymän sähkön mittauskäytäntö. Katkoviivalla rajattu alue kuvaa sähköliittymää ja nuolet kuvaavat sähköenergian siirtymistä. Oman tuotannon kulutuksella tarkoitetaan kohteessa itse tuotetun sähkön välitöntä hyödyntämistä.



KUVIO 13. Sähkön tuotannon mittaus (Verkostosuositus YA:13 2016, 13)

Pientuotannon kannattavuutta kotitalouksissa olisi mahdollista parantaa, sallimalla sähkön mittauksen nettominus eri mittaushetkillä. Nettoimisella tarkoitetaan kaikkien kolmen vaiheen verkosta ottaman ja verkkoon syötetyn tehon summaamista. Nykyinen lainsäädäntö sallii samalla hetkellä tapahtuvan verkkoon syötön ja verkosta oton nettoimisen. Tästä esimerkkinä tilanne, jossa aurinkopaneelijärjestelmä on kytketty yksivaiheisesti ja järjestelmän verkkoon syöttämä yksivaiheinen teho on 1000 wattia. Samaan aikaan kaksi muuta vaihetta ottavat verkosta tehoa yhteensä 500 wattia. Tällöin tehot voidaan laskea yhteen, jonka tuloksena verkkoon syötetyn tehon määrä putoaa 500 wattiin, mutta verkosta otetun tehon määrä häviää täysin. Tämä on tärkeää, sillä ostetun sähkön kustannus voi olla jopa viisinkertainen verkkoon syötetystä sähköstä saatuun korvaukseen verrattuna. Tätä on havainnollistettu aiemmin luvussa 3.6. Samalla hetkellä tapahtuvaa nettoimista on havainnollistettu kuviossa 14. (Energiateollisuus 2016, Ohje tuotannon liittämisestä jakeluverkkoon, 17)



KUVIO 14. Sähköenergian nettoiminen mittaushetkellä. (Flink 2014, 3. Muokattu 12.5.2017)

Mikäli kotitalouden energian tuotanto ja kulutus osuvat eri ajanhetkille, verkosta otettua ja verkkoon syötettyä tehoa ei saa netota. Kulutuskohteeseen asennetun mittalaitteen tulee tuntiperusteisen mittauksen aikana rekisteröidä syötetty ja ostettu sähkö eri rekistereihin, jolloin ne sähkön laskutuksessakin käsitellään erikseen. Tämän seurauksena, vaikka verkkoon siirretty energia tunnin aikana ylittäisi verkosta ostetun energian samalla aikavälillä, sähkölasku ei huomattavasti pienene verrattuna tilanteeseen, jossa pientuotantoa ei olisi asennettu lainkaan. (Energiateollisuus 2016, 17) Vihreiden kansanedustaja Johanna Karimäki on jättänyt helmikuussa 2017 eduskunnalle lakialoitteen netottamisperiaatteen hyväksymisestä Sähkömarkkinalakiin 588/2013. (Karimäki, 2017)

4.8 Tuotantolaitosten suojaus ja sähköturvallisuus

Verkkoon kytketyt pientuotantolaitokset tulee suojata asianmukaisesti sähköverkon mahdollisilta häiriötilanteilta. Samoin suojauksen avulla varmistetaan, ettei tuotantolaitoksen toiminta aiheuta häiriöitä tai vaaraa muille verkon käyttäjille. Vikasuojauksen lisäksi suojaus varmistaa, että tuotantolaitos ei syötä verkkoon huonolaatuista sähköä, joka voisi vahingoittaa muiden verkonkäyttäjien laitteita tai aiheuttaa turvallisuusriskejä muille verkon käyttäjille. (Lehto 2016, Tekninen liite 1, 3)

Taulukossa 10 on esitettyä alle 100 kVA verkkovaihtosuuntaajalla liitetyn tuotantolaitoksen suojauksen asetteluarvot, jotka ovat määriteltynä standardissa SFS-EN 50438. Tämän standardin lisäksi hyväksytään myös Saksan mikrotuotantonormin VDE-AR-N-4105 täyttävät laitteet. Muille kuin vaihtosuuntaajalla liitettäville tuotantolaitoksille verkonhaltijalla voi olla lisävaatimuksia, joten tapauskohtainen käsittely voi olla tarpeen etenkin nimellisteholtaan suurissa laitoksissa. (Lehto 2016, Tekninen liite 1, 3)

TAULUKKO 10. Tuotantolaitoksen suojauksen asetteluarvot alle 100 kVA laitteistossa (Lehto 2016, 3)

Parametri	Toiminta-aika	Asetteluarvo
Ylijännite	0,2 s	$U_n + 10 \%$
Alijännite	0,2 s	$U_n - 15 \%$
Ylitaajuus	0,2 s	51,5 Hz
Alitaajuus	0,2 s	47,5 Hz
Saarekekäyttö	enintään 5 s	

Laitteisto ei myöskään saa turhaan irrottautua verkosta, joten sen tulee kyetä sietämään jonkin verran ääriarajoilla tapahtuvia verkon taajuuden muutoksia. Laitteiston tulee kyetä pysymään verkossa vähintään 30 minuuttia taajuusvaihtelualueella 47,5 – 49,0 Hz ja 51,0 – 51,5 Hz ja laitteiston tulee kyetä jatkamaan normaalia toimintaa, saarekesuojauksesta huolimatta, taajuuden muutosnopeuden ollessa alle 2 Hz/s. (Lehto 2016, Tekninen liite 1, 3)

Suuremmille yli 100 kVA tuotantolaitoksille ei ole saatavilla tarkkoja asetteluarvoja samalla tavalla kuin pienemmille alle 100 kVA tuotantolaitoksille, vaan asetteluarvot määritellään aina tapauskohtaisesti, jotta ne täyttävät kuvion 10 mukaiset vaatimukset. 100 – 500 kVA laitteistoja koskevat kaikki kuvion 10 ehdot, jotka ovat kestoltaan 30 minuuttia tai enemmän. Yli 500 kVA tuotantolaitokset noudattavat kaikkia kuvan rajoja ja tämän lisäksi niitä koskevat lisävaatimukset säätöominaisuuksista, jotka ovat esitettyinä luvuissa 4.11 ja 4.12. (Lehto 2016, Tekninen liite 2, 3)

Tuotantolaitoksessa on oltava suojalaitteet, jotka kytkevät irti laitoksen tai laitoksen syöttämän saarekkeen jakeluverkosta, jos yhteys yleiseen jakeluverkkoon katkeaa tai taajuuden ja jännitteen arvot laitteiston liittämiskohdassa poikkeaa suojausasettelussa määritellyistä arvoista. Tuotantolaitos ei myöskään saa kytkeytyä uudelleen verkkoon, mikäli jännite tai taajuus ei ole määritellyissä rajoissa. Alle 100 kVA tuotantolaitosten on verkosta irtauduttuaan odotettava uudelleenkytkeytymistä siihen asti, kunnes jännitteen ja taajuuden arvot ovat pysyneet annetuissa rajoissa vähintään 60 sekuntia. Tätä suuremmilla laiteksilla odotusaika on useita minutteja tai pitempään. (Lehto 2016, Tekninen liite 2, 3 & Verkostosuositus YA:13 2016, 8)

Pienjänniteverkkoon kytketyt tuotantolaitokset on voitava kytkeä irti verkosta tarpeen mukaan esimerkiksi verkon tai kiinteistön sähkötöiden ajaksi. Käytettävä erotuslaite on myös oltava mahdollista lukita auki asentoon verkkoon kytkeytymisen estämiseksi. Verkonhaltijalla tulee olla esteetön pääsy erotuslaitteelle, joka voi olla mekaaninen tai etähallittava. Laitteiston olemassaolosta sähköverkossa on myös varoitettava liittämällä takasyötön riskin ilmaiseva merkintä muuntamon tai jakokaapin yhteyteen. (Verkostosuositus YA:13 2016, 4)

4.9 Liittämistekniikat

Hajautetun tuotannon laitokset voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään sen perusteella, miten ne on liitetty verkkoon ja millä tavalla ne verkkoon sähköä syöttävät: suoraan verkkoon liittyvät epätahti- ja tahtigeneraattorit, sekä invertterikäytöt. Suuremmat tuotantolaitokset ovat useimmiten suoraan kytkettyjä pyöriviä epätahti- ja tahtigeneraattoreita, ja pienet tuotantolaitokset taas ovat inverttereiden kautta liitetty verkkoon. Liityntätapojen verkko vaikutukset eroavat toisistaan huomattavasti. (Lehto 2009, 38)

4.9.1 Epätahtigeneraattorit

Epätahtigeneraattorit ovat suoraan verkkoon liitettyjä ja toimivat pitkälti samalla periaatteella kuin epätahtimoottorit. Poikkeuksena tähän on se, että normaalikäytössä epätahtigeneraattoreiden pyörimisnopeus on hieman siihen liitetyn sähköjärjestelmän tahtinopeutta suurempi. Epätahtigeneraattorit ottavat verkosta tai jostakin toisesta rinnakkaisesta järjestelmästä tarvitsemansa magnetointitehon ja käyttävät siksi paljon reaktiivista loistehoa, mikä aiheuttaa verkossa häviöitä ja jännitteenalenemaa. Tämän vuoksi epätahtigeneraattoreiden rinnalle on syytä hankkia loistehon kompensointilaitteisto. Epätahtigeneraattorit ovat ongelmallisia verkon vikatilanteissa, sillä ne pystyvät syöttämään vikapaikkaan nimellistään monta kertaa suurempaa vikavirtaa. Vikavirta kuitenkin pienee nopeasti, sillä vian sattuessa epätahtigeneraattori ei enää saa verkosta sen tarvitsemää magnetointitehoa. (Lehto 2009, 38)

4.9.2 Tahtigeneraattorit

Tahtigeneraattorit eivät tarvitse rinnakkaista järjestelmää syöttämään sille magnetointitehoa, vaan ne voivat toimia itsenäisesti. Kun tahtigeneraattoria käytetään rinnan ulkoisen sähköverkon kanssa, tulee suojausten olla riittävä ja generaattorin taajuuden, vaihekulman ja jännitteen olla tahdistettu verkon kanssa. Koska tahtigeneraattorit toimivat ilman ulkoista energiansyöttöä, niiden tehotuotantokaan ei katkea sähköverkon pudottua pelistä, vaan ne jatkavat vikavirran syöttämistä vikapaikkaan. Tästä syystä tahtigeneraattoreiden kanssa on saarekesuojaukseen kiinnitettävä erityistä huomiota. (Lehto 2009, 39)

4.9.3 Invertterikäytöt

Invertterit toimivat tuotantolaitoksen tai energiavaraston ja sähköverkon välillä ja niiden tarkoituksena on muuttaa tuotettu sähkö verkolle sopivaan muotoon. Invertterit on myös varustettu sisäisellä ohjausyksiköllä, joka havaitsee normaalista poikkeavat jännitteet, virrat ja taajuudet. Mikäli ohjausyksikkö havaitsee epänormaaleja arvoja, se suojaustoimintona irrottaa laitoksen verkosta. Invertterit koostuvat tehoelektronikalla toteutetuista kytkimistä, joten ne eivät sisällä mekaanisia liikkuvia osia, vaan puolijohdekytkimiä. Inverttereiden suojaustoiminta riippuu lähes täysin niiden suunnittelusta ja parametroidista. (Lehto 2009, 38)

4.10 Sähkön laatuvaatimukset

Sähkön laadulla tarkoitetaan jännitteen ja virran ominaisuuksia ja niiden raja-arvot on määritelty SFS-standardissa EN-50160. Standardissa esitetyt tärkeimmät laatuvaatimukset koskevat mm. taajuutta, jännitetason vaihtelua ja nopeita muutoksia, jänniteylijältojen määrää, keskeytyksiä ja ylijännitteitä. Taulukossa 11 on esitettyä tärkeimpien laatuvaatimusten raja-arvot.

TAULUKKO 11. Sähkön laatuvaatimukset (SFS-EN-50160)

Taajuuden laatuvaatimukset	
Hyvä laatu:	50 Hz ± 1%
Normaali laatu:	50 Hz ± 1%
Jännitteen laatuvaatimukset	
Hyvä laatu:	$U_n \pm 4\%$ ja keskiarvo $U_n \pm 2,5\%$.
Normaali laatu:	$U_n \pm 10\%$
Nopeiden jännitteenmuutosten laatuvaatimukset	
Hyvä laatu:	$P_{st,3max} \leq 1$ $P_{lt, max} 0,74$
Normaali laatu:	$P_{lt, max} \leq 1$
Harmonisten yliaaltojännitteiden laatuvaatimukset	
Hyvä laatu:	$THD \leq 3\%$
Normaali laatu:	$THD \leq 3\%$
Jännitteen epäsymmetrian kriteerit	
Hyvä laatu:	Kaikki u_{nSh} -arvot $\leq 2\%$.
Normaali laatu:	Kaikki u_{nSh} -arvot $\leq 2\%$.
Standardilaatu	Mitatuista u_{nSh} -arvot $\leq 2\%$.

Taulukossa P_{st} on lyhytaikainen häiritsevyyssindeksi, P_{lt} on pitkäaikainen häiritsevyyssindeksi ja u_{nSh} on näytteistä laskettu 10 minuutin arvo.

Sähköverkkoon liitettävät tuotantolaitokset lisäävät ja voimistavat verkossa tapahtuvia muutosilmiöitä ja ilmiöt ovat sitä voimakkaampia, mitä suurempi tuotannon nimellisteho on suhteessa verkon oikosulkutehoon (verkon jäykkyys). Suurimmassa osassa tapauksia tuotannon koko on sen verran pieni verrattuna verkon oikosulkutehoon, että tuotantolaitoksen vaikutus sähkön laatuvaatimuksiin verkossa on pieni. Tämä voi kuitenkin tulevaisuudessa muodostua ongelmaksi, mikäli heikkoon verkkoon lisätään suuria tuotantolaitoksia. (Sener 2001, 6)

4.11 Loistehosäätö

Jotta sähköverkon siirtokapasiteettia voitaisiin paremmin hyödyntää ja käyttövarmuutta ylläpitää, sähköverkkoon liitettyjen yli 500 kVA laitteistojen on kyettävä osallistumaan sähköverkon jännitteen ylläpitämiseen kuluttamalla tai tuottamalla verkon loistehoa.

Näin ollen suuremmilla tuotantolaitoksilla on oltava tietty loistehokapasiteetti ja loistehon dynaaminen säätöominaisuus verkon jännitetason ja loistehotasapainon ylläpitämiseksi ja säätämiseksi. (Lehto 2016, tekninen liite 2, 7)

Tuotantotehon vaihdellessa ja loistehosäädön ollessa 0 kVar, loisteholle sallitaan vaihtelu alueella, joka vastaa 5 % tuotantolaitoksen nimellistehosta. Loistehon vaihtelu ei kuitenkaan saa missään tilanteessa ylittää 10 % raja-arvoa. Tuotantolaitoksen loistehokapasiteettia ei keinotekoisesti saa rajoittaa, vaan sen tulee perustua generaattorin luontaiseen loistehokapasiteettiin. Verkonhaltijalla on oikeus käyttää tuotantolaitoksen loistehokapasiteettia sen säätöominaisuuksien mahdollistamalla tavalla. (Lehto 2016, tekninen liite 2, 7-8)

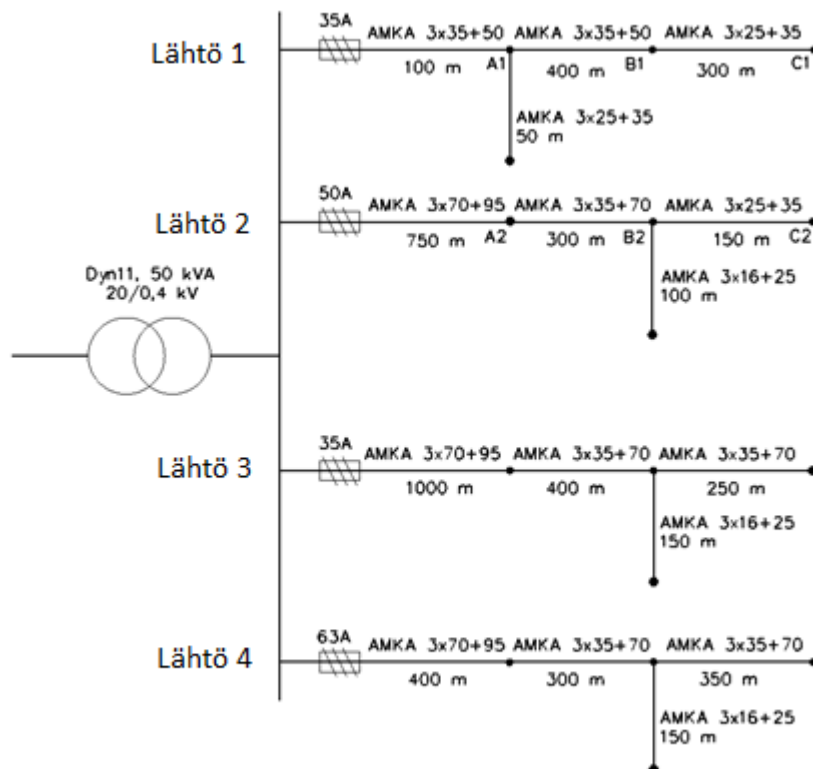
Tuotantolaitoksella tulee olla vähintään joko vakioloistehosäätö tai vakiotehokerroin-säätö. Muitakin loistehon säätöön osallistuvia järjestelmiä saa olla, mutta mikäli loistehosäätöön osallistuvia säätömekanismia on enemmän kuin yksi, verkonhaltijalla on oikeus edellyttää toiminnon käyttöä luontaisen tehokapasiteetin puitteissa. Loistehosäädön käyttötavan määrittää verkonhaltija tuotantolaitoksen säätöominaisuuksien perusteella. (Lehto 2016, tekninen liite 2, 8)

4.12 Pätötehosäätö

Alle 10 MVA tuotantolaitoksissa ei edellytetä automaattista pättötehosäätöä tuotetun tehon säätöön ja tehotason ylläpitoon. Mikäli nämä kuitenkin kuuluvat tuotantolaitoksen olemassa oleviin ominaisuuksiin, on verkonhaltijalla oikeus vaatia niiden käyttöä pättötehon tai taajuuden säätöön häiriötilanteen varalta. (Lehto 2016, tekninen liite 2, 8)

5 PIENTUOTANNON VAIKUTUKSET VERKON TOIMINTAAN

Tässä luvussa käydään läpi pientuotannon lisääntymisen vaikutuksia sähköverkossa. Jälleenkytkennän epäonnistumisen ja jännitesäädön sekoittumisen tarkastelua lukuun ottamatta, kaikki esitetyt viat ja häiriöt tapahtuvat pienjänniteverkossa. Pientuotannon lisääntymisen vaikutukset käydään läpi fysikaalisten ilmiöiden kautta ja sen jälkeen näiden ilmiöiden vaikutusta tarkastellaan sähköverkon toiminnan ja suojauksen kannalta. Vaikutukset käydään aluksi läpi teoreettiselta pohjalta, jonka jälkeen suoritetaan matemaattinen simulointi pienjännitteisessä esimerkkiverkossa. Esimerkkiverkko esittää karkeasti olemassa olevaa verkon osaa, koska kaapelipituuksista ei ollut tarkkaa tietoa. Tiedossa oli vain lähdön kokonaispituus ja käytetyt kaapelit. Virheiden välttämiseksi, Trimble NIS-verkkojärjestelmästä saadut pienimmät oikosulkuvirtojen arvot ja jännitteenalenemat on vielä simuloitu tehdyssä verkkomallissa. Pientuotannon vaikutukset ja vaikutusten voimakkuudet sähköverkkoon vaihtelevat tuotantomuodosta ja verkonosan ominaisuuksista riippuen, joten työn rajaamiseksi käydään läpi tuotantomuodoille yhteisiä vaikutuksia, ellei toisin mainita. Simuloinneissa käytetyn pienjänniteverkon yksinkertaistettu verkkokuva on esitettyä kuvassa 6.



KUVA 6. Simuloinneissa käytetyn esimerkkiverkon verkkokuva

Pientuotannon vaikutuksia verkkoon tarkastellaan matemaattisen simuloinnin avulla Simulink-ohjelmistolla, jossa hyödynnetään Power systems lisäosaa. Simuloinnin tarkoituksena ei ole antaa tarkkoja lukuarvoja, vaan havainnollistaa pientuotannon liittämisen ja lisääntymisen vaikutuksia ja näistä syntyviä vikoja. Simuloinneissa käytetyn pienjänniteverkon kuvaan merkityt pisteet (A1, B1 jne.) kuvaavat mahdollisia tuotantolaitoksen liittämiskohtia ja näihin tullaan viittaamaan myöhemmin, sillä ne vaihtelevat tarkastelutilanteen mukaan, jotta vikojen vaikutukset saadaan parhaalla mahdollisella tavalla esiin. Tuotantolaitosten liittämiskohta kerrotaan simuloitavan vian kohdalla erikseen.

Taulukoissa 12 ja 13 on esitettyinä ne verkon johtolähtöjen ja verkkoa syöttävän muuntajan tiedot, jotka ovat simuloinnille oleellisia. Tiedot on saatu Trimble NIS-verkkotietojärjestelmästä. Jotta simulointi voitaisiin pitää riittävän yksinkertaisena, simulointia tehdään vain lähdöille 1 ja 2. Lähdöt 3 ja 4 on rakennettu verkkomalliin, sillä ne vaikuttavat verkon toimintaan.

TAULUKKO 12. Muuntajan tekniset tiedot

Nimellisteho S_n	50 kVA
Oikosulkuimpedanssi Z_k	4,2 %
Jännitteenalenema U_{hm}	2,6 %
Oikosulkuresistanssi R_k	1,758 %
Tyhjäkäyntihäviöt P_0	150 W
Kuormitushäviöt P_k	879 W
KytKentäryhmä	Dyn11
Mitoitusjännitteet	20,5 / 0,41 kV
I_{k3max}	1629 A ($c = 1,00$, $t = 20$ °C)

TAULUKKO 13. Johtolähtöjen tiedot Trimble NIS-verkkotietojärjestelmästä

Lähtö 1	
Pääsulake	35 A
Suurin virta I_{\max}	29 A
Suurin pätöteho	19 kW
Pienin oikosulkuvirta I_{\min}	133 A
Suurin jännitteenalenema U_{\max}	10,2 %
Lähtö 2	
Pääsulake	50 A
Suurin virta I_{\max}	19 A
Suurin pätöteho	12 kW
Pienin oikosulkuvirta I_{\min}	140 A
Suurin jännitteenalenema U_{\max}	5,2 %
Lähtö 3	
Pääsulake	35 A
Suurin virta I_{\max}	20 A
Suurin pätöteho	13 kW
Lähtö 4	
Pääsulake	63 A
Suurin virta I_{\max}	22 A
Suurin pätöteho	14 kW

Jotta simulointimallia voidaan hyödyntää vikojen analysoinnissa, tulee verkkomallin simulointitulosten vastata Trimble NIS-verkkojärjestelmästä saatuja tietoja. Mikäli simuloitujen tulokset vastaavat järjestelmästä saatuja arvoja, voidaan todeta rakennetun mallin toimivan kuvassa 6 esitetyn esimerkkiverkon mukaisesti. Taulukossa 14 on esitettyä simuloitujen alkutulokset lähdöille 1 ja 2 ja tulosten ero taulukon 13 arvoihin.

TAULUKKO 14. Simuloidut johtolähtöjen tiedot

Lähtö 1	Simuloitu	Ero
Pääsulake	35 A	-
Suurin virta I_{\max}	29,3 A	1,02 %
Suurin pätöteho	18,6 kW	2,10%
Pienin oikosulkuvirta I_{\min}	135,2 A	1,63 %
Suurin jännitteenalenema U_{hmax}	9,9 %	0,30 %
Lähtö 2		
Pääsulake	50 A	-
Suurin virta I_{\max}	18,7 A	1,57 %
Suurin pätöteho	12,3 kW	2,50 %
Pienin oikosulkuvirta I_{\min}	141,5 A	1,06 %
Suurin jännitteenalenema U_{hmax}	4,75 %	0,45 %

Taulukon 14 tulosten perusteella voidaan havaita, että verkkotietojärjestelmästä saatujen tietojen ja simulointitulosten välinen ero on hyvin pieni. Voidaan siis todeta, että luotu simulointimalli vastaa riittävällä tarkkuudella kuvassa 6 esitettyä verkkoa.

Simulointi suoritetaan luvuissa 5.4, 5.9, 5.10 ja 5.11 käsitellyille vioille. Valinta on tehty arvioimalla pientuotannon liittämisen välittömät vaikutukset, ottamalla samalla huomioon ohjelmiston ja rakennetun verkkomallin rajoitukset.

5.1 Nopeat jännitteenmuutokset ja välkyntä

Sähkökäyttäjälle yksi tärkeimmistä sähkön laatutekijöistä on jännitteen taso. Liian alhainen jännitetaso pienentää johtimien siirtokapasiteettia ja liian korkea jännite voi johtaa laitteiden tai eristysrakenteiden hajoamiseen. Sähkön stabiilisuus korostuu kuluttajan liittymiskohtaa lähestyttäessä, sillä esimerkiksi tietotekniset laitteet ovat hyvin herkkiä sähkön laadun muutoksille. (ABB 2000, 4)

Nopea jännitteenmuutos on jännitteen tehollisarvon nopea muutos tasolta toiselle ja takaisin välillä $U_n \pm 10\%$. Tässä tapauksessa U_n on nimellisjännite. Normaalisissa käyttötilanteissa jännitteen muutos ei ylitä 5 % nimellisjännitteestä. Nopeat jännitteenmuutokset johtuvat nopeista kuormituksen tai tuotannon muutoksista tai verkossa tehdyistä kytkennöistä. (Pekkonen 2013, 17)

Tietyllä aikavälillä tapahtuvat useat peräkkäiset nopeat jännitetason muutokset aiheuttavat välkyntää, eli lamppujen luminanssin muutosta. Välkyntä ei sinällään ole vakavaa, eikä juurikaan aiheuta vahinkoa tavallisille sähkölaitteille, mutta välkyntä voi voimakkaana olla häiritsevää. Välkyntän häiritsevyyttä tarkastellaan lyhytaikaisella häiritsevyyksindeksillä P_{st} , joka mitataan kymmenen minuutin aikajaksolle välkyntämittarilla. Mitatun lyhytaikaisen häiritsevyyksindeksin pohjalta, voidaan muodostaa pitkäaikainen häiritsevyyksindeksi P_{lt} kahdestatoista kahden tunnin ajanjaksolta saadusta lyhytaikaisen häiritsevyyksindeksin arvosta kaavalla 8

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}}, \quad (8)$$

jossa P_{sti} on lyhytaikainen peräkkäinen häiritsevyyksindeksi, P_{lt} on pitkäaikainen häiritsevyyksindeksi ja i on kahden tunnin ajanjakson järjestysluku. (Laaksonen 2004, 8-9)

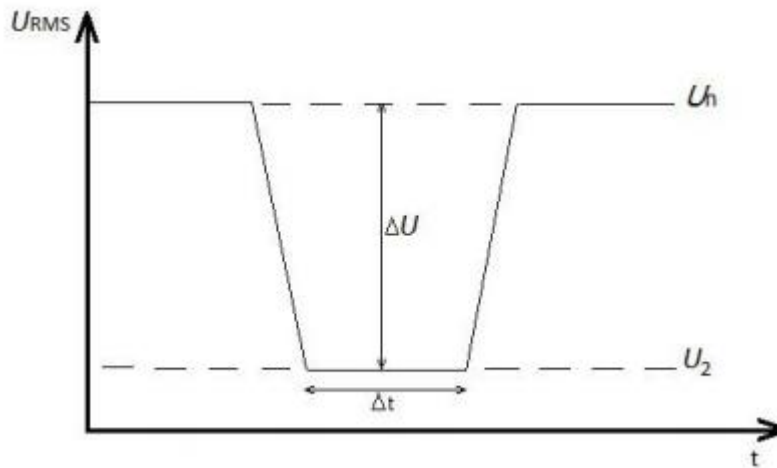
Standardissa SFS-50160 on pitkäaikaiselle välkyntälle annettu kriteeri, jonka mukaan pitkäaikaisen häiritsevyyksindeksin tulisi 95 % ajasta olla $P_{lt} \leq 1$ (SFS-EN-50160, 22)

Tuotantolaitoksen nopeat tehotuotannon muutokset, sekä toistuvat verkkoon kytkennät ja verkosta pois kytketyt aiheuttavat nopeita jännitetason muutoksia. Pientuotantomuodoista etenkin tuulivoima voi aiheuttaa heikossa verkossa välkyntää. Tuulen puuskaisuus, tuulenoisuuden pystysuuntainen muutos ja voimalan päälle- ja poiskytkentä aiheuttavat nopeita tuotantotehon muutoksia. Tästä syystä tietyillä alueilla voi olla tarpeen rajoittaa joidenkin tuotantomuotojen kuten tuulivoiman liittämistä verkkoon ja korvata tuotantoa tasaisemmillä hajautetun tuotannon lähteillä. (Laaksonen 2004, 9)

5.2 Jännitekuoppa

Mikäli jännitteen arvo laskee yli 10 % nimellisjännitteestä, on kyseessä jännitekuoppa. Jännitekuopat johtuvat yleensä asiakkaan laitteiden ja järjestelmien kytkennöistä, sekä oikosulkuvioista ja ne ovat tyypillisesti kestoltaan 10 ms – 10 min. Jännitekuopan kesto riippuu käytetyn suojauksen toiminta-ajasta. Jännitekuopan syvyyteen vaikuttavat verkon rakenne, etäisyys havaintopisteestä, sekä vian resistanssi. Standardi SFS- 50160 määrittää jännitekuopat satunnaisiksi alle sekunnin kestoisiksi ilmiöiksi, joissa nimellisjännite ei

laske yli 60 % tehollisarvosta. Joillakin alueilla verkon ominaisuuksista riippuen saattaa esiintyä useinkin 10 – 15 % jännitekuoppia. Kuviossa 15 on esitettyä jännitekuopan määrittäminen. (Energiateollisuus 2014, 15)



KUVIO 15. Jännitekuopan määrittäminen. U_n järjestelmän nimellijännite, ΔU =jänniteero nimellijännitteen ja kuopan jännitteen välillä, Δt =kuopan kestoaika ja U_2 = jännitekuopan aikana. (Makkonen 2014, 9)

Jännitekuoppa sähköverkossa johtaa sähkölaitteiden toimintakyvyn heikkenemiseen ja pahimmassa tapauksessa toimintakatkoon. Toimintakatkot ovat etenkin IT- ja automaatiojärjestelmien kannalta haitallisia, sillä ne aiheuttavat häiriöitä signaaliin ja voivat näin ollen vääristää siirrettyä dataa. Näiden lisäksi 30 – 50 % lasku nimellijännitteessä yhden jakson aikana voi johtaa sähkökäytöissä käytettävien kontaktoreiden tai releiden avautumiseen väärään aikaan, mikä etenkin teollisuudessa voi johtaa prosessien keskeytymiseen ja suuriinkin taloudellisiin menetyksiin. (Jaanila 2014, 11)

Pientuotantoa liittäessä verkkoon perusedellytys on, että liittämiskohdan oikosulkuteho on riittävän suuri. Tällöin voimala ei itse aiheuta jännitekuoppaa, kuten esimerkiksi tuulivoimalan käynnistystilanteessa. Käynnistystilanteen lisäksi voimala aiheuttaa jännitekuopan, mikäli sen tuotanto täydellä teholla lakkaa äkisti pysäytyksen tai verkosta irtoamisen vuoksi. (Saloranta 2011, 68) Riittävän syvä ja pitkäkestoinen jännitekuoppa, joka aiheutuu esimerkiksi viereisen lähdön viasta tai jakeluverkon jälleenkytkennästä voi aiheuttaa alhaisen liityntäpisteen jännitteen vuoksi tuotantolaitoksen alijännitesuojan laukeamisen tai ylikuormitussuojan toimimisen verkkosuuntaajan virran kasvaessa sallittua rajaa suuremmaksi ja kytkeä johtolähdöllä olevan tuotantolaitoksen tarpeettomasti irti verkosta. (Repo, Laaksonen, Mäkinen, Järventausta 2003, 9)

5.3 Taajuusvaihtelu

Taajuus on sähkön laadun kannalta yksi tärkeimmistä ominaisuuksista, sillä kaikki verkon osat toimivat samalla nimellistaajuudella. Suomessa verkon nimellistaajuus on 50 Hz. Sähköverkon taajuus on sidoksissa verkon tehoon ja tehotasapainoon. Mikäli sähköenergiaa tuotetaan kulutukseen verrattuna liian vähän, taajuus alkaa laskea. Tuotannon ollessa liian suurta kulutukseen nähden, taajuus alkaa puolestaan kasvaa. Taajuuden kontrollointi on tärkeä osa verkon toimintaa, sillä heilahdukset verkkotaajuudessa häiritsevät helposti erilaisten laitteiden toimintaa. (Jaanila 2013, 21)

Taajuuden muutoksen suuruus on riippuvainen sähköverkon epätasapainon suuruudesta. Suurempi epätasapaino johtaa suurempaan taajuuden muutokseen ja helpommin erilaisiin verkon ongelmiin. Jäykissä verkoissa taajuuden muutokset ovat erittäin epätodennäköisiä, sillä normaalit kuormanmuutokset ovat pieniä verrattuna koko verkon kuormaan. Tämä on kuitenkin mahdollista erilaisten sähkön jakelun tai tuotannon häiriöiden seurauksena. Myös suuren kuorman äkillinen tippuminen verkosta aiheuttaa suuren hetkellisen kuorman muutoksen, mikä vaikuttaa taajuuteen. (Jaanila 2013, 22)

Taajuusvaihtelu pientuotannon vaikutuksesta on epätodennäköistä alueilla, jotka ovat liitettyinä yleiseen sähköverkkoon, edellisessä kappaleessa mainitusta syystä johtuen. Yleensä taajuusvaihtelua esiintyy pienillä jakelualueilla, kuten saarilla varavoimakonekäytössä tai saarekekäytössä. Nopeat tuotannon tai kuormituksen muutokset tai näiden välinen epätasapaino sähkön tuotannon muuttuessa ovat pienen jakelualueen kokonaiskuormaan nähden merkittäviä ja ongelmat näissä tilanteissa syntyvät, kun muuttuvaan kuormaan tai tuotantoon ei osata varautua tai siihen ei reagoida tarpeeksi nopeasti. (ABB 2000, 4)

Standardissa SFS-EN 50160 taajuuden vaihtelulle on määritelty raja-arvot normaaleissa olosuhteissa. Sallittu vaihteluväli riippuu siitä, tarkastellaanko yhteiskäytössä olevaa verkkoa vai erillisverkkoa. Vaihteluväli määritetään 10 s ajanjaksojen mittausten keskiarvoista.

Yhteiskäytössä olevassa verkossa taajuuden vaihtelun pitää täyttää seuraavat kriteerit

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

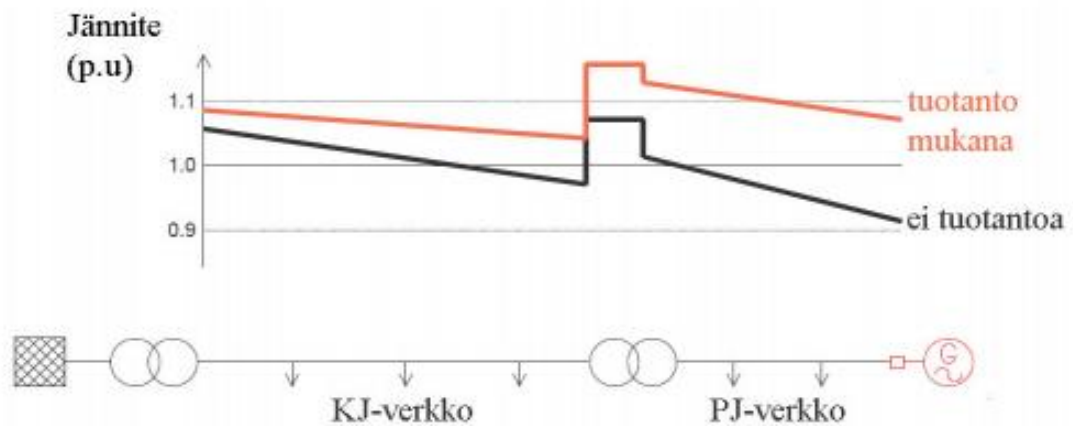
Erillisverkoissa taajuuden vaihtelun pitää täyttää seuraavat kriteerit

- 50 Hz \pm 2 % (eli 49 Hz...51 Hz) 95 % viikosta
- 50 Hz \pm 15 % (eli 42,5 Hz...57,5 Hz) 100 % ajasta.

(SFS-EN-50160, 30)

5.4 Jännitteen nousu

Verkon jännite on pienimmillään johtolähdön kaukaisimmassa pisteessä suurimman kuormituksen aikana ja suurimmillaan johtolähdön alussa pienimmän kuormituksen aikana. Tilanne kuitenkin muuttuu merkittävästi, kun johtolähtöön lisätään tuotantoa. Verkkoon liitetty tuotanto aiheuttaa jännitteen arvon nousua lähialueillaan. Ilmiö voidaan rinnastaa normaaliin jännitteenalenemaan, mutta tehon syötön ollessa päinvastainen, jännite nousee tuotantolaitoksen liittämiskohdassa. Jännitteen nousun voimakkuus riippuu verkon kuormasta ja tuotantotehosta. Jäykillä kaupunkiverkoilla tuskin tulee olemaan ongelmia jännitetason nousun kanssa, toisin kuin haja-asutusalueilla. Kaapeliverkkojen siirto-kykyä rajoittaakin yleensä terminen sietokyky, eivätkä jänniteominaisuudet. Kuviossa 16 on esitettyä pientuotannon aiheuttama jännitteen nousu liittämiskohdan ja muuntajan välillä. (Repo, Laaksonen, Mäkinen & Järventausta 2003, 5)



KUVIO 16. Hajautetun tuotantolaitoksen aiheuttama jännitteennousu. Ylempi viiva kuvaa jännitetasoa hajautetun tuotannon kanssa ja alempi ilman tuotantoa. (Kivinen J. 2008, 10)

Tasaiseen tuotantotehoon kykenevän tuotantolaitoksen aiheuttamaa jännitteen nousua voidaan hyödyntää alueilla, joissa jännitteenalenema on ongelma. Sijoittamalla tuotanto-

laitos johtolähdön loppupäähän, nousee jännite tuotantolaitoksen lähialueilla alkupään jakelumuuntajan tasolle. Tällaisessa ratkaisussa ehtona on, että tuotantolaitos kykenee syöttämään tehoa verkkoon myös maksimikuormituksen aikana. (Kivinen J. 2008, 12)

Jännitteen nousun voimakkuutta tuotantolaitoksen liittämiskohdan ja sähköaseman tai muuntajan välillä voidaan arvioida kaavan 9 avulla

$$\Delta U = \frac{P_N \cdot (R \cdot \cos\varphi + X \cdot \sin\varphi)}{U^2}, \quad (9)$$

jossa R on liittymispisteen ja aseman välinen resistanssi, X on liittymispisteen ja aseman välinen reaktanssi, U on aseman kiskojännite, P_N voimalan nimellisteho ja $\cos \varphi$ on voimalan tehokerroin. (Lehto 2011, 2)

Jännitteenmuutos ΔU on prosenttilukuna esitettävä raja-arvo suurimmalle sallitulle jännitteenmuutokselle. Suurimmat sallitut tuotantolaitoksen aiheuttamat jännitteenmuutoksen arvot eri liittämiskohdissa ja eri jännitetasoilla on esitetty aiemmin luvussa 4.4 taulukossa 9. Mikäli tuotantolaitoksen liittämisestä johtuva arvioitu jännitteen nousu ylittää taulukossa annetut rajat, voidaan nousua hillitä vaihtamalla siirtävä johto paksumpaan tai siirtämällä suunnitteilla oleva tuotantolaitos verkonhaltija päätöksellä lähemmäksi muuntajaa. Lisäksi tuotantotehon rajoituksella voidaan vaikuttaa aiheutuneeseen jännitteen nousuun. (Kivinen J. 2008, 12)

Jännitteen nousun simuloinnissa, kaikkiin kuvaan 6 merkattuihin liittämiskohtiin on asennettuna 3 kW tuotantoa. Liityntä on tehty verkkovaihtosuuntaajalla, mutta tässä simulointitilanteessa liittämistavalla ei ole merkitystä. Simuloinnissa tarkastellaan jokaiseen pisteeseen liitetyn tuotantolaitoksen vaikutuksia niiden välittömässä läheisyydessä, sekä muissa liittämiskohdissa. Simulointi suoritetaan molemmille lähdöille erikseen, eli molemmilla lähdöillä ei samanaikaisesti ole tuotantoa. Aluksi suoritetaan simulointi ilman tuotantoa vertailupisteen saamiseksi. Tämän jälkeen tuotantolaitokset liitetään verkkoon yksi kerrallaan ja vaikutuksia verrataan ilman tuotantoa saatuun tulokseen. Lopuksi simuloidaan kaikkien johtolähdöllä sijaitsevien tuotantolaitosten yhteisvaikutus eri liittämiskohdissa. Simuloinnin tulokset ovat esitettynä taulukoissa 15 ja 16.

TAULUKKO 15. Lähdön 1 jännitteen nousu eri mittauspisteissä

	Ilman tuotantoa (V)	A, Jännitteen nousu (%)	B, Jännitteen nousu (%)	C, Jännitteen nousu (%)	YHT, Jännitteen nousu (%)
A1	392,5	0,81	0,66	0,41	1,60
B1	374,7	0,43	1,89	1,68	2,78
C1	361,3	0,39	1,42	2,32	3,29

TAULUKKO 16. Lähdön 2 jännitteen nousu eri mittauspisteissä

	Ilman tuotantoa (V)	A, Jännitteen nousu (%)	B, Jännitteen nousu (%)	C, Jännitteen nousu (%)	YHT, Jännitteen nousu (%)
A2	396	0,63	0,55	0,43	0,80
B2	386,1	0,49	1,20	1,03	2,10
C2	381,1	0,24	1,12	1,52	2,28

Taulukoista 15 ja 16 voidaan havaita, että missään liittämiskohdassa ei ylitetä sallittua 4 % jännitteen nousu rajaa, joko yksittäisten tuotantolaitosten ollessa kytkettynä tai yhteistuotannon aikana. Kummallekin johtolähdölle olisi tässä tilanteessa mahdollista lisätä tuotantoa. Tuloksista voidaan myös havaita, että yksittäisten tuotantolaitosten jännitteen nousun summaaminen ei anna oikeaa kuvaa todellisesta jännitteen noususta, vaan laskenta on suoritettava kokonaisuutena. Tulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että tulevaisissa simulointitilanteissa ei tuotantolaitoksen nimellisteho voi olla paljoa yhteistuotantoa suurempi, jotta sallitut rajat eivät ylity. Tulosten perusteella johtolähtöjen suurimaksi tuotannon määräksi tulevaisissa simuloinneissa määritellään 10 kW.

5.5 Jännitesäädön sekoittuminen

Jakeluverkon jännitettä säädetään päämuuntajan käämikytkimen avulla, joka mahdollistaa jännitesäädön asteikolla ± 15 %. Sääto tapahtuu verkon kuormituksen aiheuttaman jännitteenaleneman mukaisesti eli kompondisäädön avulla tai sähköaseman kiskojännitteen perusteella. Kiskojännitteen perusteella tehtävä sääto ei häiriinny hajautetusta tuotannosta, mutta kompondisääto voi sekaantua, sillä johtolähdölle sijoitettava tuotantolaitos vähentää kuormitusvirtaa sähköasemalla paikkaamalla liittyjän kulutusta omalla tuotannolla, josta aiheutuu virhe kompondisäädössä. Koska kuormitusvirta on sähköasemalla laskenut, säädin olettaa, että jännite on korkealla ja säätoää päämuuntajan käämikytkimä pienentämään jännitettä, josta seuraa mahdollisesti suurikin jännitteenalenema lähdöllä, joissa ei ole omaa tuotantoa. Sääto vaikuttaa myös niihin johtolähtöihin, joilla on

tuotantoa, mutta vaikutus on vähäisempi alhaisen kuormitusvirran vuoksi. (Äijälä 2008, 5-6)

Kompondisäädöllä normaalissa tilanteessa johtolähtöjen jännitetaso pysyy annetuissa rajoissa paremmin kuin vakiojännitesäädöllä, mutta jännitteensäätäjän asetteluarvot on asetettava huolella, jotta jännitteen vaihtelun rajoja ei ylitetä. Mikäli jännitteen arvoja ei saada pysymään normaaleissa vaihtelun rajoissa asetteluarvoja muuttamalla, kuormitusvirtasignaalia voidaan muokata tuotantolaitosten tuotantovirran avulla, jos verkkoyhtiöllä on reaaliaikainen virtamittaus tuotannon liityntäpisteessä. (Repo, Laaksonen, Mäkinen & Järventausta 2003, 6)

5.6 Saareketilanne

Saarekkeella tarkoitetaan tässä tilannetta, jossa verkon rinnalla toimiva tuotantolaitos jää syöttämään verkkoa tai sen osaa, kun yhteys muuhun sähköjärjestelmään on katkennut vian tai suunnitellun erotustoiminnon seurauksena. Saareketilanne voi muodostua keski- tai pienjänniteverkkoon ja on vakava turvallisuusriski verkostotöiden kannalta, kun jännitteettömäksi oletetussa verkon osassa onkin takajännite. Turvallisuusriskin lisäksi, hajautetun tuotannon laitokset eivät yksistään kykene säilyttämään sähkön laatutasoa riittävän korkealla, jolloin verkkoon kytkettyjen laitteiden rikkoutumisriski on suuri. Lisäksi takasyöttö aiheuttaa verkon palautuessa jännitteiseksi tahdistamattoman kytkennän verkkoon. Tahdistamaton kytkentä voi aiheuttaa jännite-, virta- ja vääntömomenttitransientteja, jotka voivat aiheuttaa rasituksia muille verkon komponenteille. (Ylä-Outinen 2011, 22-23)

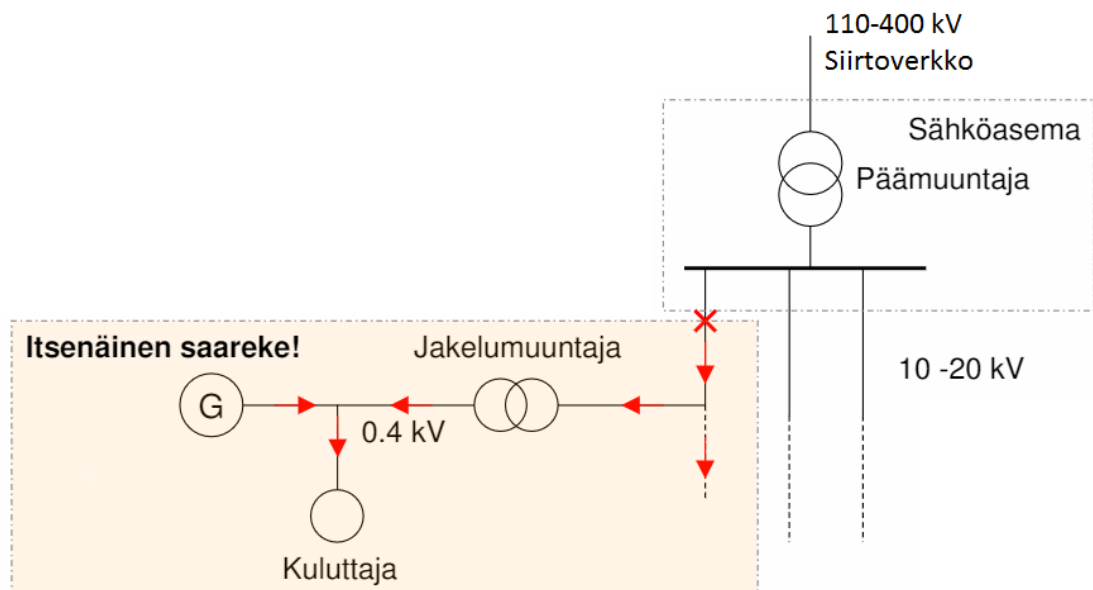
Tuotantolaitoksen tulee aina irrottautua verkosta, kun syöttävän verkon jännite häviää. Saareketilanteen muodostumisen estämiseksi tuotantolaitokset on varustettava saarekekäytönestosuojauksella. Helpoin tilanne suojauksen kannalta ovat järjestelmät, joissa tuotantolaitoksen teho on niin pieni, että se ei normaalitilanteessakaan syötä lainkaan tehoa verkkoon päin. Tällöin suojaus toteutetaan takatehoreleillä, jotka yksinsyötön tilanteessa havaitsevat tehon virtaussuunnan muutoksen ja erottavat tuotantolaitteiston saarekkeesta nopeasti. (Sener 2001, 20)

Suuremmilla tuotantolaitoksilla, jotka normaalitilanteessakin voivat syöttää verkkoon päin tehoa, suojaus useimmiten toteutetaan relesuojauksella, joka perustuu taajuuden ja

jännitteen tason muutoksen havaitsemiseen kuorman muutoksen johdosta. Saarekkeen jännite ja taajuus romahtavat, kun tuotantolaitokset eivät yksinään kykene syöttämään koko saarekkeen kuormaa tai niiden arvot kasvavat, kun syöttötehoa on kuormaan nähden liikaa. Tällöin tuotantolaitoksen suojalaitteet erottavat tuotantolaitoksen verkosta. (Sener 2001, 20)

On mahdollista, että saarekkeen kuorma on lähes sama kuin tuotantolaitosten yhteenlaskettu tuotanto. Tällöin laitos ei kykene havaitsemaan verkon vikaa ja ei erota sitä saarekkeesta. Tämä on kuitenkin harvinaista, sillä kuorma ja tuotanto vaihtelevat saarekkeessa huomattavasti. Tilanteissa, joissa kuorma ja tuotanto vastaavat kohtalaisesti toisiaan, suojaus toteutetaan ROCOF-tyyppisillä suojareleillä (Rate Of Change of Frequency), joiden toiminta perustuu taajuuden muutosnopeuden havaitsemiseen. (Mäki 2009, 29)

Kuviossa 17 on esitettyä itsenäisen saarekkeen muodostuminen jakeluverkkoon johtolähdön erottamisen tai vikasuojauksen toiminnan seurauksena. Johtolähtöön liitetty tuotantolaitos syöttää saarekkeeseen sähköä, vaikka yhteys muuhun verkkoon on katkennut.



KUVIO 17. Saarekkeen muodostuminen jakeluverkkoon (Mäki 2009, 28)

5.7 Yliaallot

Yliaallot ovat sinimuotoisen jännitteen ja virran normaalin verkkotaajuuden monikertoja ja niitä synnyttävät verkkoon kytketyt epälineaariset kuormat, ylikuormitetut muuntajat ja tehoelektroniikan komponentit. Yliaallot ovat yleensä harmonisia eli verkkotaajuuden

kokonaisia monikertoja. Ne voivat olla myös epäharmonisia, eli ne voivat muodostaa yliaaltoja koko taajuuden spektriltä. Epäharmonisten yliaaltojen osuus ja vaikutus tällä hetkellä on niin pientä, ettei sitä tässä oteta huomioon. Yliaaltojen aiheuttamat ongelmat eivät rajoitu vain niiden tuottajalle, vaan ne leviävät helposti ympäri verkkoa ja aiheuttavat ongelmia, mihin ei välttämättä ole osattu varautua. (Jaanila 2013, 15-16)

Yliaallot aiheuttavat jännitteen ja virran säröä, jolla tarkoitetaan harmonisten taajuuksien energiamäärän suhdetta perustaajuuden energiaan (THD). Särö taas aiheuttaa virran ja jännitteen signaalin poikkeamisen sinimuodosta. Tämä on ongelmallista, sillä yhä useampi sähkölaite vaatii toimiakseen lähes virheetöntä jännitettä. Särö voi laitteiden toimintahäiriöiden lisäksi aiheuttaa johtimien ylikuumenemista ja suojarleiden vikalaukaisuja. Särökertoimen arvo jännitteelle voidaan laskea kaavalla 10 ja virralle kaavalla 11

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_{1,RMS}}, \quad (10)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_{1,RMS}}, \quad (11)$$

joissa U_n on jännite, $U_{1,RMS}$ on jännitteen perusaallon tehollisarvo, I_n on virta ja $I_{1,RMS}$ on virran perusaallon tehollisarvo. (Virtanen 2015)

Pientuotannon lisääntyessä yliaaltolähteiden, eli tässä tapauksessa verkkovaihtosuuntaajien määrä kasvaa huomattavasti. Verkossa yliaallot aiheuttavat mm. häviöiden kasvua, virhelukemia mittareissa, kuormitettavuuden alenemista ja muuntajien ylikuormitusta. Kaikkein haitallisin yliaaltojen aiheuttama ilmiö verkon kannalta on kuitenkin resonanssi. Resonanssitilanne syntyy, kun verkon resonanssitaajuus on lähellä jotakin yliaallon taajuutta. Resonanssi verkon osien välillä johtaa yliaaltovirtojen tai -jännitteiden moniker- taistumiseen normaaliin käyttötilanteeseen verrattuna. (Korpinen, Mikkola, Keikko & Flack, 22)

Standardissa SFS 50160 on määritelty sallitut raja-arvot harmoniselle jännitesärölle normaalissa käyttötilanteessa. Standardin mukaan yliaaltojen mittaus suoritetaan 1 tai 5 minuutin jaksoissa viikon ajan. Mitattujen jännitteen yliaaltojen keskimääräinen tehollisarvo tulee 95 % tapauksista olla yhtä suuri tai alle taulukon 17 arvojen. Tämän lisäksi

yliaaltojen kokonaissärökertoimen tulee olla alle 8 % järjestyslukuun 40 asti. (SFS-EN-50160, 34)

TAULUKKO 17. Harmonisen jännitesärön raja-arvot (SFS-EN-50160, 34)

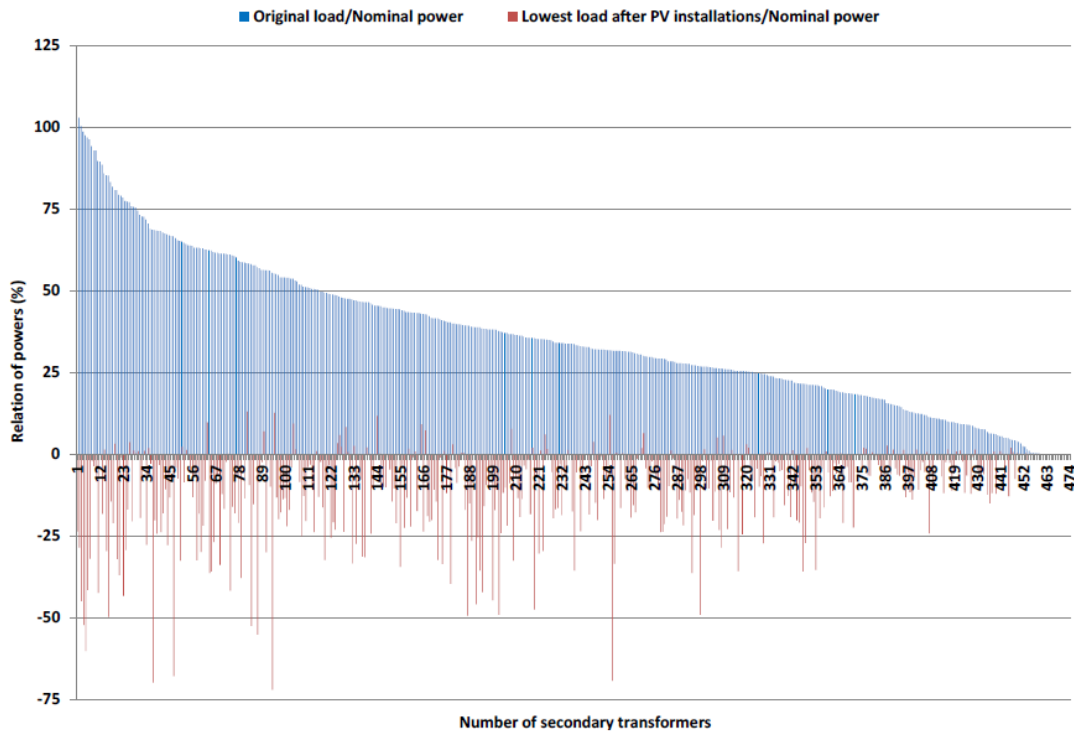
Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
kolmella jaottomat		kolmella jaolliset			
järjestysluku h	suhteellinen jännite	järjestysluku h	suhteellinen jännite	järjestysluku h	suhteellinen jännite
5	6 %	3	5 %	2	2 %
7	5 %	9	1,5 %	4	1 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3 %	21	0,5 %		
17	2 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Epäharmoniselle jännitesärölle ei tällä hetkellä ole asetettu raja-arvoja niiden vähäisyyden vuoksi. Myöskään järjestysluvultaan yli 25 harmoniselle yliaallolle ei ole tarvetta asettaa raja-arvoa vähäisen esiintymismäärän ja arvaamattomien resonanssitilanteiden vuoksi. (SFS-EN-50160, 34)

5.8 Tehon siirtyminen huipputuotannon aikana

Hajautettu tuotanto tulee oleellisesti muuttaman verkon dynamiikkaa lähitulevaisuudessa. Pientuotantolaitosten yleistyminen, syöttöpisteiden lisääntyminen ja laitteiden energiatehokkuuden parantuminen johtavat tehon virtaussuunnan vaihtumiseen, mikäli sähkön tuotanto alueella ylittää sähkön kulutuksen. Talvikuukausien aikana energian kulutus on huipussaan, jolloin verkkoon syötetyn sähkön määrä yleensä on olematon. Kesäkuukausien aikana tilanne voi olla täysin toisenlainen. Pieni kulutus ja suuri tuotanto voivat johtaa siihen, että jakelumuuntajan kuorma kääntyy negatiiviseksi, eli alue tuottaa energiaa siirrettäväksi jakeluverkkoon, mihin järjestelmää ei ole suunniteltu. (Tuunanen 2015, 153)

Kuviossa 18 on havainnollistettu hajautetun tuotannon vaikutus jakelumuuntajan kuormaan. Kuviossa sinisellä on esitettyä alkuperäinen muuntajan kuorma ilman hajautettua tuotantoa. Punaisella on esitettyä hajautetun tuotannon suurin hetkellinen vaikutus. Kyseisessä tutkimuksessa on oletettu, että tutkittavana olevien alueiden liittyjistä 25 % asentaa tuotantoa. Tuotannon nimellistehoteho on 5 kW. Asennuksissa ja mitoituksissa noudatetaan voimassa olevia määräyksiä ja liityntä on tehty verkkovaihtosuuntaajan välityksellä. (Tuunanen 2015, 154)



KUVIO 18. Pientuotannon vaikutus jakelumuuntajan kuormaan (Tuunanen 2015, 154)

Kuviosta voidaan havaita, että asennettu tuotanto tietyissä tilanteissa johtaa tehon syöttämiseen verkkoon päin. Syötetyn tehon määrä ei kuitenkaan ole huomattava ja verkkoa syöttävän muuntajan nimellistehoon verrattuna syötetty teho harvoin ylittää 50 % rajan. Suurimman osan ajata syötetty teho on alle 25 % muuntajan nimellistehoon verrattuna. Lisäksi voidaan todeta, että tuotettu teho hyvin harvoissa tilanteissa ja vain hetkellisesti ylittää suurimman kuormituksen arvon.

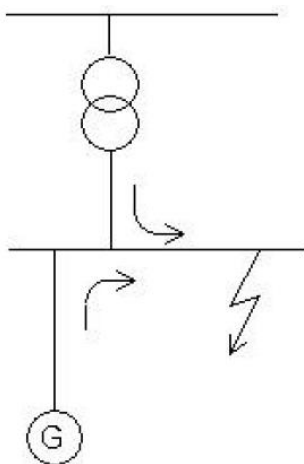
Vähäinen energian syöttö verkkoon ei aiheuta ongelmia. Syötetyn energian todennäköisesti käyttää joku toinen kuluttaja samalla pienjännitealueella. Mikäli tuotantoa kuitenkin on niin paljon, että tehon virtaussuunta vaihtuu, voi johdon suojaus laueta. Mikäli suojaus on toteutettuna sulakkeilla, ongelmia ei tule ennen kuin ylikuormalla. Mikäli suojaus on

toteutettu releillä ja suojausasetteluja määritettäessä ei ole otettu virran suuntaa huomioon, voi johtolähtö irrota verkosta turhaan. (Sener 2001, 21-22)

Voimakas tuotannon kasvu johtaa verkkoon syötettävän tehon määrän kasvuun. Tällöin ylikuorman riski kasvaa. Jatkuva suuri ylikuorma johtaa verkon komponenttien termisten rajojen ylitykseen ja näin aiheuttaa komponenttivaurioita ja laitteiden eliniän lyhene- mistä. Oikein suunnitelluissa verkoissa tämä kuitenkin ei muodostu ongelmaksi, sillä verkon komponentit on suunniteltu ja asennettu johtolähdön oletetun huippukuorman mu- kaan. Tällöin tuotannon kasvaessa liian suureksi ja ylikuorman rajan tullessa vastaan, suojaus irrottaa ylikuormaa syöttävän laitoksen verkosta.

5.9 Vikavirtojen kasvu

Pientuotantolaitos syöttää verkkoon vikavirtaa ja näin kasvattaa kokonaisylikapasiteettivir- toja vikapaikan lähellä, sillä tuotantolaitoksen liittäminen mahdollistaa vikavirran syöttä- misen vikapaikkaan useasta eri suunnasta. Olemassa oleva sähköverkko on suunniteltu tietylle oikosulkukestoisuuden arvolle ja kasvanut vikavirta voi olla niin suuri, että kom- ponenttien oikosulkukestoisuus tai katkaisijoiden katkaisukyky ylittyy. Myös vikapaikan paikannus hankaloituu, kun vikavirtaa syötetään useammasta suunnasta. Vikavirtojen ai- heuttamia ongelmia voidaan hallita vaihtamalla komponentit suurempia virtoja kestäviin tai jakamalla verkko pienempiin osiin. Kuviossa 19 on esitettynä verkossa tapahtuva vika, johon syötetään vikavirtaa sekä verkosta, että tuotantolaitokselta. (Sener 2001, 11)



KUVIO 19. Pientuotantolaitoksen syöttämä vikavirta (Sener 2001, 11)

Tuotantolaitoksen syöttämän oikosulkuvirran arvo riippuu tuotantolaitteiston ominaisuuksista. Hajautetun tuotannon muodoista oikosulkuvirtoja kasvattavat eniten suoraan verkkoon liitetyt kompensointilaitteistolla varustetut epätahtigeneraattorit, joita käytetään yleisesti pienvesivoimaloissa. Suoraan verkkoon kytketty epätahtigeneraattori kykenee syöttämään verkkoon jopa kuusinkertaisen vikavirran nimelliseen nähden. Normaalisti epätahtikoneen oikosulkuvirta laskee nopeasti alkuarvostaan, sillä ne eivät kykene pitämään yllä suuria vikavirtoja pitkiä aikoja. Kompensointilaitteiston avulla vikavirran arvo pysyy kuitenkin korkeana pidempään. (Ylä-Outinen 2011, 19)

Lukumäärällisesti suurin osa tuotantolaitteistoista on liitetty verkkoon tehoelektronikan välityksellä. Invertterikäyttöjen kyky syöttää vikavirtaa verkkoon on pieni verrattuna suoraan verkkoon kytkettyihin tahti- ja epätahtigeneraattoreihin tehopoulijohteiden termisten rajoitusten takia. Invertterin kautta liitetyn tuotantolaitoksen syöttämä oikosulkuvirta on tyypillisesti hieman nimellisvirtaa suurempi. (Repo, Laaksonen, Mäkinen, Järventausta 2003, 13)

Vikavirtojen kasvun simuloinnissa, tuotantoa on asennettuna molempien lähtöjen liittämiskohtiin C. Vika on kolmivaiheinen oikosulku, joka tapahtuu molemmissa lähdeissä pisteessä B. Simulointi suoritetaan kahdella eri nimellisteholla selvemmän tuloksen saamiseksi. Tuotantolaitosten nimellisteho on ensimmäisessä simuloinnissa 5 kW ja toisessa 10 kW. Simulointi tehdään sekä suoraan verkkoon liitettynä, että verkkovaihtosuuntaajan välityksellä kytkettynä. Verkkovaihtosuuntaajan oikosulkuvirran oletetaan tässä olevan 1,5 kertainen nimellisvirtaan verrattuna. Saatuja tuloksia verrataan vikapaikan alkuperäiseen oikosulkuvirtaan. Simuloinnin tulokset ovat esitettynä taulukossa 18.

TAULUKKO 18. Vikavirtojen kasvun simulointitulokset

	Ilman tuotantoa (A)	5 kW suuntaajalla kytketty (A)	10 kW suuntaajalla kytketty (A)	5 kW suoraan kytketty (A)	10 kW suoraan kytketty (A)
Lähtö 1	281,6	292,6	298,7	320,8	363,2
Lähtö 2	292,1	305,1	310,2	333,5	380,1

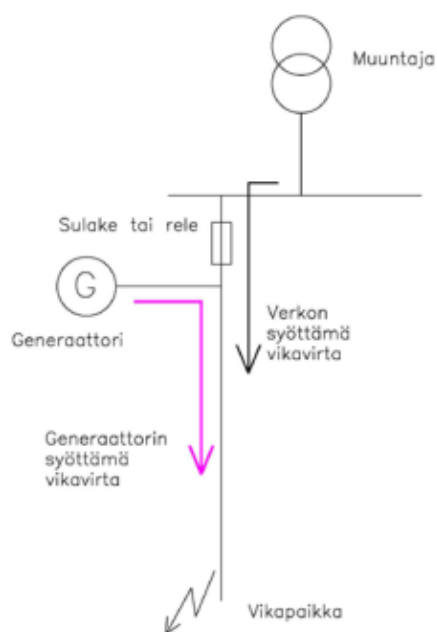
Simuloinnin tuloksista voidaan havaita se, mikä teoriassa on todettu. Johtolähdölle sijoitettu tuotantolaitos kasvattaa vikapaikan oikosulkuvirtaa laitteiston ominaisuuksien mu-

kaisesti. Verkkovaihtosuuntaaja rajoittaa huomattavasti tuotantolaitoksen syöttämää oikosulkuvirtaa, joten vaikutus on hyvin pieni. Suoraan kytkettyjen tuotantolaitosten kohdalla vaikutukset ovat suuremmat, mutta eivät aiheuta oikosulkukestoisuuden ylitystä ja siten laitteiston liittämisen yhteydessä ei ole tarvetta toimenpiteille.

5.10 Suojauksen sokaistuminen

Suojauksen sokaistuminen on suojauksen herkkyysoongelma ja tarkoittaa vikasuojauksen toiminnan hidastumista tai toiminnan estymistä alentuneen suojauksen läpi kulkevan vikavirran vuoksi. Sokaistuminen voi tapahtua tilanteessa, jossa johtolähdölle lisätään tuotantoa ja käytettyjen suojalaitteiden asetteluarvoja ei säädetä tilannetta vastaavaksi. Suojauksen toiminnan hidastuminen tai toiminnan estyminen voi johtaa merkittäviin vaaratilanteisiin verkossa ja aiheuttaa käytettyjen johtimien ja komponenttien oikosulkukestoisuuden menetyksen. (Suvela 2016, 22)

Yksittäisen tuotantolaitoksen syöttämä vikavirta etenkin yksivaiheisessa oikosulussa on usein pieni, eikä aiheuta ongelmia. Tilanne on kuitenkin toinen, kun tuotantolaitoksia on liitettyä useita tai yksittäisen tuotantolaitteiston syöttämän vikavirran arvo on suuri. Myös tuotantolaitoksen sijainnilla on oma vaikutuksensa. Vikapaikkaa lähellä sijaitseva suuritehoinen tuotantolaitos pystyy tuottamaan vikapaikkaan siirtyvän vikavirran lähes täysin itse, jolloin suojauksen havaitsema vikavirta jää mitättömän pieneksi. Suuritehoisen tuotantolaitoksen sijoittaminen etäälle muuntajasta voi johtaa tilanteeseen, jossa verkon impedanssi vikapaikan ja muuntajan välillä kasvaa merkittävästi suuremmaksi kuin verkon impedanssi tuotantolaitoksen ja vikapaikan välillä. Tämä omalta osaltaan pienentää verkon syöttämää vikavirtaa entisestään. Kuviossa 20 on esitettyä muuntajan ja vian väliin jäävän tuotantolaitoksen syöttämä vikavirta. (Ahonen 2012, 46)



KUVIO 20. Suojauksen sokaistuminen (Santala 2011, 31)

Vika tapahtuu johtolähdön päässä, jolloin keskijänniteverkosta alkaa johtolähdön suo-
jauksen läpi virrata vikavirtaa kohti vikapaikkaa. Normaalisissa tilanteissa johtolähdön
suojaus tekee vikapaikan jännitteettömäksi suojauselle asetetun aikamäärän puitteissa.
Vikapaikan ja suojausväliin jäävät tuotantolaitokset pienentävät suojausväliä kul-
kevaa virtaa syöttämällä itse vikapaikkaa, jolloin kaikki vikavirta ei kulje suojausväliä.
Mikäli tuotantoa on riittävästi ja hajautettujen tuotantolaitosten syöttämä vikavirta on
suuri, suojausväliä kulkeva vikavirta voi laskea niin paljon, ettei lähdön suojaus enää
reagoi. (Santala 2011, 31)

Yksinkertaisin tapa ylivirtasuojauksen sokaistumisen ratkaisemiseksi on lisätä pitkälle
johtolähdölle välikatkaisijoita, joiden asetteluarvot ovat tuotantolaitoksen suojausta tiu-
kemmat. Näin tehtäessä luodaan porrastettu suojaus, jonka ansiosta johtolähdön kaukai-
simmassakaan pisteessä tapahtuva vika ei jää havaitsematta. Toinen vaihtoehto on rajoit-
taa johtolähtöön liitettävien suurta oikosulkuvirtaa syöttävien tuotantolaitosten määrää,
ja suosia mieluummin verkkovaihtosuuntaajalla liitettäviä tuotantolaitoksia. (Ahonen
2012, 46)

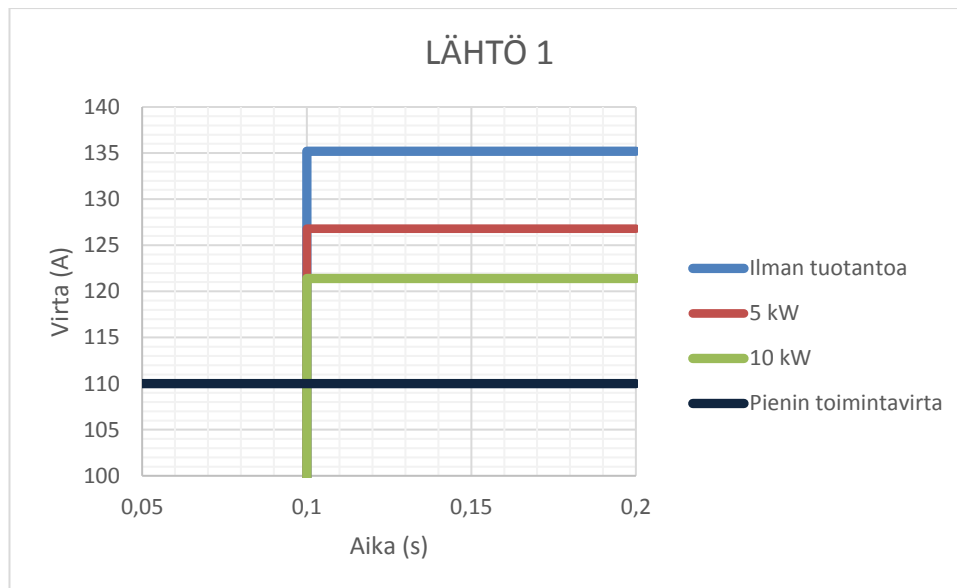
Suojausväliä sokaistumisen simuloinnissa, tuotantoa on asennettu molempien lähtöjen
liittymiskohtiin B. Vika on yksivaiheinen oikosulku, joka tapahtuu molemmissa lähtöissä
pisteessä C. Simulointi suoritetaan kahdella eri nimellisteholla selkeämmän tuloksen saa-
miseksi. Tuotantolaitosten nimellisteho on ensimmäisessä simuloinnissa 5 kW ja toisessa

10 kW. Simulointi tehdään vain suoraan verkkoon kytketyillä tuotantolaitoksilla, sillä aiemmissa simulointituloksissa todettiin verkkovaihtosuuntaajalla kytketyn tuotantolaitoksen vikavirran olevan huomattavan pieni. Simuloinnin tuloksia verrataan johtolähdön suojaukseen käytetyn sulakkeen pienimpään 5 sekunnin toimintavirtaan. Simuloinnin tulokset ovat esitettyinä taulukossa 19 kuvioissa 21 ja 22.

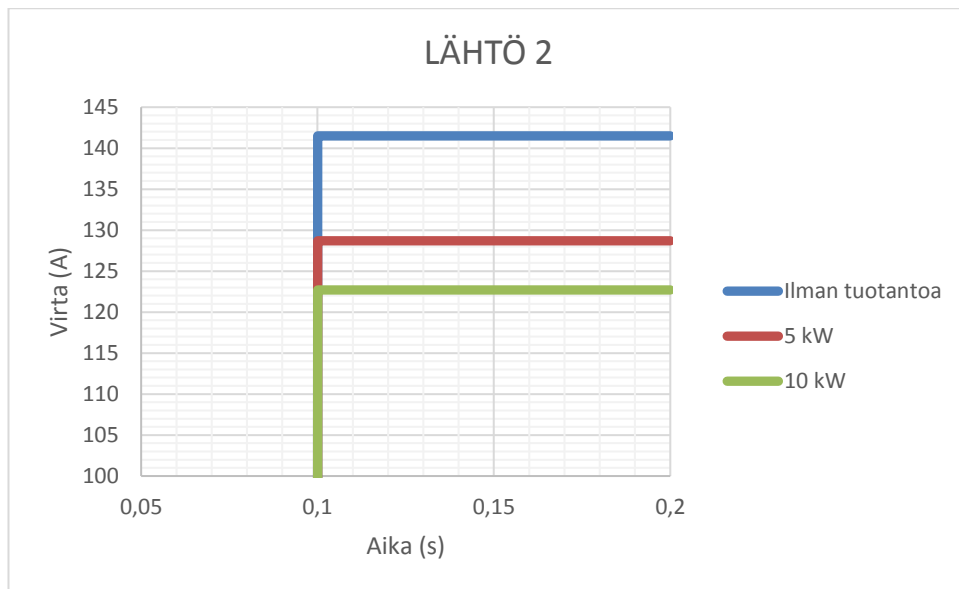
TAULUKKO 19. Suojauksen sokaistumisen simulointitulokset

	Ilman tuotantoa (A)	5 kW suoraan kytketty (A)	10 kW suoraan kytketty (A)
Lähtö 1	135,2	126,8	121,4
Lähtö 2	141,5	128,7	122,7

Taulukon arvot ovat lähdön suojausten havaitsema pienin oikosulkuvirta. Kuvioissa 21 ja 22 on graafisesti havainnollistettu simulointitulosta ja kuvioon 21 on lisätty käytetyn sulakkeen pienin toimintavirta (liite 2). Kuvioon 22 ei ole lisätty johtolähdön sulaketta, sillä pienimmän oikosulkuvirran mukainen suojaus ei toteudu johtolähdön alussa normaalisakaan tilanteessa. Tämä on erikseen toteutettu välisulakkeilla.



KUVIO 21. Suojauksen havaitsema vikavirta, lähtö 1

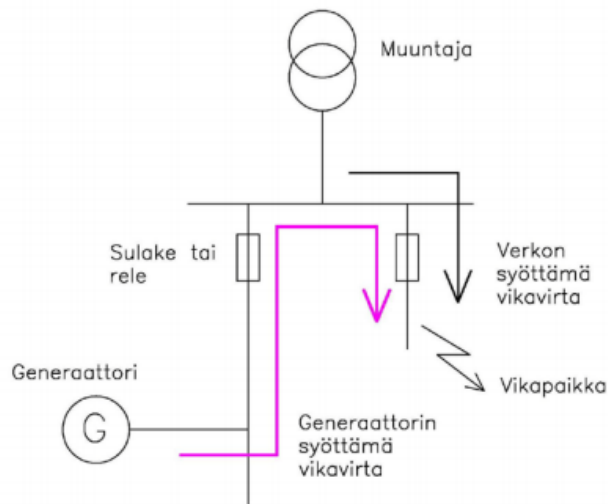


KUVIO 22. Suojauksen havaitsema vikavirta, lähtö 2

Molempien lähtöjen simulointituloksissa havaitaan johtolähtöjen suojauksen havaitseman virran tippuminen. Kuvioista 21 voidaan havaita, että tässä tilanteessa lähdön 1 suojaus toimii normaalilla tavalla liitetystä tuotannosta huolimatta. Mikäli pientuotantolaitokset olisivat verkkovaihtosuuntaajan välityksellä liitettynä, suojauksen havaitsema virran ero liittymän jälkeen olisi lähes olematon. Lähdön 2 suojauksen havaitsema oikosulkuvirta putoaa enemmän, koska etäisyys syöttävään muuntajaan on suurempi ja etäisyys vikaan pienempi. Kummassakaan tapauksessa tuotannon lisääminen lähdölle ei vaadi lisätoimia.

5.11 Suojauksen virhelaukaisu

Tuotantolaitos voi aiheuttaa terveeseen johtolähdön erottamisen verkosta tarpeettomasti. Nämä erottamiset ovat mahdollisia esimerkiksi viereisen lähdön vian vuoksi. Verkon suojaus toteutetaan yleensä sulakesuojauksena, jolloin ongelmaa ei esiinny. Mikäli suojaukseen käytetään esimerkiksi vakioaikaylivirtarelettä, vika on mahdollinen, sillä suojausreleet eivät havaitse vikavirran suuntaa. Tämä verkon suojauksen toiminnan ja käytön kannalta ei-toivottu tilanne voi tapahtua kuvion 23 mukaisessa tilanteessa. (Sener 2001, 14)



KUVIO 23. Suojauksen virhelaukaisu (Santala 2011, 32)

Viereisellä johtolähdöllä tapahtuu vika, jonka seurauksena verkko alkaa syöttää vikavirtaa ylemmältä jänniteportaalta kohti vikapaikkaa. Verkon syöttämä vikavirta kulkee viikaantuneen johtolähdön suojaus läpi. Vikaantuneen johtolähdön rinnalla toimii tuotantolaitoksella varustettu johtolähtö. Tällä johtolähdöllä ei ole tapahtunut vikaa, mutta liitetty tuotantolaitos alkaa syöttää tuotantolaitteiston ominaisuuksien mukaisesti omaa vikavirtaansa kohti viereisen lähdön vikapaikkaa. Tuotantolaitoksen vikavirta kulkee vikapaikkaan molempien johtolähtöjen suojaus läpi. Mikäli tuotantolaitoksen vikavirran suuruus ylittää ylivirtasuojauksen toiminta-arvon tai käytetty suojarele ei tunnista virran suuntaa, suojaus irrottaa tuotantoa sisältävän terveen lähdön verkosta. (Santala 2011, 31-32)

Suojauksen virhelaukaisu tuotantolaitoksen syöttämän vikavirran vuoksi voidaan ehkäistä käyttämällä suojauksessa suuntaylivirtarelettä. Suojareleiden vaihto jokaiseen tuotantoa sisältävään johtolähtöön on kuitenkin kallista. Tämä tilanne on joka tapauksessa hyvä ottaa huomioon verkkoa suunniteltaessa, sillä tavallisen ylivirtareleen ja suuntavirtaylivirtareleen hintaero verkon rakennuskustannuksiin suhteutettuna on mitätön, joten verkkoa rakennettaessa tähän on mahdollista varautua siedettävien kustannuksien. Vaihtoehtoisesti käytössä olevan ylivirtasuojauksen havahtumisaikaa voidaan asettaa hitaammaksi lähdöillä, joilla on tuotantoa. (Sener 2001, 15)

Suojauksen virhelaukaisun simuloinnissa, tuotantoa on asennettuna molempien johtolähtöjen liittämiskohtiin A. Vika on yksivaiheinen oikosulku, joka tapahtuu viereisessä lähdössä pisteessä A. Simulointi suoritetaan kahdella eri nimellisteholla selvemman tuloksen

saamiseksi. Tuotantolaitosten nimellisteho on ensimmäisessä simuloinnissa 5 kW ja toisessa 10 kW. Simulointi tehdään vain suoraan verkkoon kytketyillä tuotantolaitoksilla. Saatuja tuloksia verrataan molempien lähtöjen suojauksen suurimpaan ilman tuotantoa havaittuun virtaan. Simuloinnin tulokset ovat esitettynä taulukossa 20.

TAULUKKO 20. Suojauksen havaitsema vikavirta viereisen lähdön oikosulussa tuotantolaitosten ja vikojen sijaitessa lähtöjen alkupäässä

	Ilman tuotantoa (A)	5 kW suoraan kytketty (A)	10 kW suoraan kytketty (A)
Lähtö 1	29,6	36,4	46,4
Lähtö 2	19,2	29,8	45,9

Simuloinnin tuloksista havaitaan selvä suojauksen havaitseman virran nousu viereisen lähdön vikatilanteessa. Suuri virran nousu selittyy osin sillä, että sekä viat että tuotantolaitokset sijaitsevat lähellä johtolähdön alkua. Simulointi suoritettiin vertailun vuoksi myös tilanteessa, jossa sekä viat että tuotantolaitokset sijaitsevat verkon kauimmaisissa pisteissä. Simuloinnin tulokset ovat esitettynä taulukossa 21.

TAULUKKO 21. Suojauksen havaitsema vikavirta viereisen lähdön oikosulussa tuotantolaitosten ja vikojen sijaitessa kaukaisimmissa pisteissä

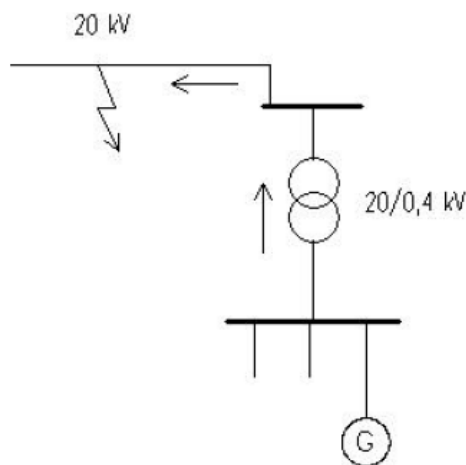
	Ilman tuotantoa (A)	5 kW suoraan kytketty (A)	10 kW suoraan kytketty (A)
Lähtö 1	29,6	32,2	37,1
Lähtö 2	19,2	22,7	26,8

Vertaamalla taulukon 21 arvoja taulukon 20 arvoihin, voidaan virran havaita vähenevän huomattavasti etäisyyden kasvaessa, mikä oli odotettavissa. Tulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta tuotantolaitosten syöttävän viereisen lähdön vikaa omalla vikavirrallaan asetteluista huolimatta. Koska suojaus on pienjänniteverkossa useimmiten toteutettu sulakkeilla, simuloinnissa saatujen tulosten mukaan ei ole tarvetta lisätoimille. Mikäli suojaus olisi toteutettu releillä, jotka eivät havaitse virran suuntaa, virhelaukaisu olisi mahdollinen ja ylivirtarele olisi mahdollisesti vaihdettava suunta-ylivirtareleeseen.

5.12 Jälleenkytkennän epäonnistuminen

Suurin osa avojohtoverkon maasuluista ja valokaarioikosuluista on korjattavissa jälleenkytkennän avulla. Toiminta on automaattinen ja perustuu siihen, että verkko kytketään riittävän pitkäksi ajaksi jännitteettömäksi, jotta valokaarta ylläpitävä ilman ionisaatio ehtii hävitä ja ilman sähkölujuus palautua normaaliksi. Vian korjaannuttua ja tilanteen palauttua normaaliksi, sähköt kytketään uudelleen päälle. (Saloranta 2011, 75)

Jälleenkytkennän epäonnistuminen voi tapahtua tilanteessa, jossa keskijänniteverkossa tapahtunut vika pyritään korjaamaan jälleenkytkennän avulla, mutta verkkoon kytketty tuotantolaitos syöttää verkkoon jännitettä, jolloin jännitteetön aika ei ole riittävän pitkä ja valokaari ei sammu itsestään. Epäonnistuneen jälleenkytkennän jälkeen, verkon automaattikka antaa katkaisijoille käskyn suorittaa jälleenkytkentä uudelleen ennalta määritellyn aikahidastuksen jälkeen. Mikäli tuotantolaitos ei ole pudonnut verkosta ja syöttö vikaan jatkuu, epäonnistuu jälleenkytkentä uudelleen. Epäonnistuneet jälleenkytkennät lisäävät verkon pysyviä korjausta vaativia vikoja ja näin huonontavat verkon jakeluvarmuutta. Jälleenkytkennän epäonnistuminen keskijänniteverkossa on esitettyä kuviossa 24. (Saloranta 2011, 75)



KUVIO 24. Jälleenkytkennän epäonnistuminen (Sener 2001, 14)

Jälleenkytkennän epäonnistuminen on sitä todennäköisempää, mitä lähempänä jakelu-
muuntajaa vika tapahtuu ja mitä suurempi on tuotantolaitoksen syöttämä vikavirta. Sen lisäksi, että pientuotanto pitää yllä valokaarta pikajälleenkytkennän aikana, aiheuttaa se suurella todennäköisyydellä tahdistamattoman verkkoon kytkennän, joka voi johtaa lait-

teistovaurioihin. Tämän lisäksi verkkoyhtiön on ryhdyttävä lisätoimiin vian korjaamiseksi verkossa, joka johtaa pitkittyneeseen jännitekatkokseen asiakkaalle ja keskeytyskustannuksia verkonhaltijalle. Tästä syystä on erityisen tärkeää, että hajautetun tuotannon laitos kytkeytyy pois verkosta joko jälleenkytkentää vaativan vian tai saarekesuojauksen kautta. (Sener 2001, 14)

5.13 Kolmivaihejärjestelmän epäsymmetria

Ideaalitapauksessa verkon kuorma on jakautunut tasaisesti kaikkien kolmen vaiheen välille, jolloin vaiheiden välinen kulma on 120° ja tehollisarvot lähes identtiset. Kuitenkin pienjänniteverkossa tilanne harvoin on tällainen, sillä vaiheet kuormittuvat epätasaisesti yksivaiheisten sähkölaitteiden vuoksi. Tämä aiheuttaa epäsymmetriaa, jolla tarkoitetaan vaihejännitteiden tehollisarvon tai vaihekulman eroa muista vaihejännitteiden arvoista. Kuormitus voi olla epäsymmetrinen myös vian, kuten yksivaiheisen oikosulun tai yhden vaiheen sulakkeen laukeamisen vuoksi. (Lehto 2009, 44)

Epäsymmetriaa voivat aiheuttaa myös yksivaiheiset tuotantolaitokset. Yksivaiheisesti kytketyt laitteet aiheuttavat vaiheiden välille epätasapainoa, joka aiheuttaa verkkoon tehohäviöitä, turhaa lämpenemistä ja erisuuruisia jännitteitä verkon jakelupisteissä. Tällaisen tilanteen välttämiseksi yksivaiheiselle tuotannolle liittymässä on määritetty maksimiarvo ja verkonhaltijalla on oikeus määrätä, mihin vaiheeseen yksivaiheinen tuotantolaitos voidaan liittää. (Lehto 2009, 45)

Epäsymmetria määritetään standardissa SFS-50610 nolla- ja vastakomponentin suhteena myötäkomponenttiin kaavan 13 mukaisesti. Tätä varten on kuitenkin ensin määritettävä kolmivaihejärjestelmän jännitekerroin kaavan 12 avulla. Tässä standardissa epäsymmetrialla tarkoitetaan vain kolmivaihejärjestelmän epäsymmetriaa. (ABB 2000, 4)

$$\beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)} \quad (12)$$

$$u_n = \frac{\sqrt{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}}{\sqrt{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (13)$$

jossa u_n on epäsymmetriakerroin, β on jännitekerroin, U_{12} on jännite vaiheiden L1 - L2 välillä, U_{23} on jännite vaiheiden L2 - L3 välillä ja U_{31} on jännite vaiheiden L3 - L1 välillä. (Alanen & Hätönen, 19)

Standardissa SFS-50160 on määritelty, että ”Normaaleissa käyttöolosuhteissa, kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana, jokaisen, jakelujännitteen (perustaajuisen) vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvon keskiarvoista 95 % tulee olla välillä 0...2 % (perustaajuisesta) myötäkomponentista.” Tästä poikkeuksena ovat alueet, joissa osa liittynöistä on yksi- tai kaksivaiheisia, jolloin sallitaan liittämiskohdassa 3 % epäsymmetria. (SFS-EN-50160, 42)

5.14 Ilmoittamattomat tuotantolaitokset

Sähkön kuluttajille pientuotantolaitokset ovat rinnastettavissa normaaleihin sähkölaitteisiin, eivätkä ne oikein asennettuna aiheuta sähköturvallisuutta vaarantavaa riskiä. On siis muistettava, että kaikki tuotantolaitteiston sähköasennukset on teetättävä siihen pätevytyneellä henkilöllä ja itsetehtyjä tuotantolaitosten tai varageneraattoreiden asennuksia ei voida hyväksyä vaatimusten mukaisiksi. (Karppanen 2013, 89)

Vaikka tuotantolaitosten ilmoittaminen on vaatimus verkkoon kytkennälle, luvottomasti asennettua tuotantoa löytyy myös Suomen sähköverkoista. Haja-asutusalueilla pitkät sähkökatkot voivat johtaa epävirallisten varavoimalaitteiden asentamiseen paikkaamaan sähköntuotantoa. Tällaiset voimalaitokset tai varavoimakoneet kytketään verkkoon juuri vian aikaan, ja pahimmassa tapauksessa silloin, kun vikaa ollaan paikan päällä korjaamassa. Tätä ei voida edes varmistaa ennen töiden aloittamista mittauksin, sillä laitos voidaan kytkeä verkkoon kesken korjaustoimien. Pienjänniteverkon verkostotöissä ei standardin SFS-EN 6002 mukaan tarvitse tehdä työmaadoitusta, ellei jännitteiseksi tulosta ole riskiä. Useimpien verkkoyhtiöiden ohjeistuksen mukaan, riski kuitenkin otetaan töitä tehdessä aina huomioon työturvallisuuden takaamiseksi. (Karppanen 2013, 90)

Normaaleissa käyttöolosuhteissa ilmoittamatonta tuotantoa on lähes mahdotonta havaita, joten luvottomat tuotantolaitokset eivät yleensä paljastu ennen kuin tapahtuu sähkötapaturma. Verkonhaltijalle pääasia on, että verkossa ei ole tuntematonta tuotantoa, joten verkkoyhtiöt voivat mahdollisesti maksaa verkkoon liittynästä korvauksen. (Karppanen 2013, 90)

Tuotantolaitokset vaikuttavat oleellisesti verkon toimintaan, joten niiden asennuksessa ja sijoituksessa verkonhaltija pyrkii säilyttämään verkon normaalin toimintatilan. Ilmoittamattomien laitosten kohdalla verkonhaltijaan ei todennäköisesti olla yhteydessä lainkaan, jolloin verkon tai tuotantolaitoksen toimintaan vaikuttavista sähköverkon ominaisuuksista ei ole otettu selvää. Varavoimakäyttöön liitetyt laitteistot ovat usein nimellisteholtaan pieniä, joten vaikutukset normaalissa tilanteessa ovat pieniä. Verkossa voi kuitenkin olla jo ennestään tuotantoa ja näiden yhteisvaikutus voi johtaa aiemmin mainittuihin ongelmiin.

6 YHTEENVETO

Tässä Tampereen Sähköverkko Oy:n teettämässä opinnäytetyössä tarkasteltiin pientuotannon yleisimpiä muotoja ja niiden toimintaperiaatteita, perehdyttiin pientuotannon liittämisen lainsäädäntöön, teknisiin reunaehtoihin ja yleisiin suosituksiin, sekä selvitettiin pientuotannon lisääntymisen verkostovaikutuksia ja näiden vaikutusten aiheuttamia viikoja ja häiriöitä sähköverkossa.

Vaikka sähköenergiaa on hajautetusti mahdollista tuottaa monin eri tavoin tehokkaasti ja ympäristöystävällisin menetelmin, tiettyjen tuotantomuotojen, kuten vesi-, tuuli ja biovoiman yhteenlaskettu osuus kaikista käytetyistä tuotantomuodoista kattaa yli 80 % pientuotannon 120 megawatin kapasiteetista vuoden 2015 tilastojen mukaan. Tätä epätasapainoa synnyttävät kyseisten tuotantomuotojen soveltuvuus nimellisteholtaan suurien tuotantolaitosten rakentamiseen ja tukijärjestelmien takaama tuotetusta sähköstä maksettava kiinteä korvaus. Tilanne voi kuitenkin tulevaisuudessa muuttua, kun nykyisten tukijärjestelmien kiintiöt alkavat täyttyä ja yksityisten henkilöiden asentamien tuotantojärjestelmien, etenkin aurinkosähkön, määrä kasvaa ympäristötietoisuuden lisääntymisen, energiaomavaraisuuspyrkimysten, sekä lain tarjoamien verohelpotusten kautta. Ainakin toistaiseksi voidaan kuitenkin olettaa, että muutos on todennäköisesti maltillista, kunnes pientuotannosta saadaan yksityishenkilöille taloudellisesti kannattavaa. Taloudellista kannattavuutta olisi helposti parannettavissa esimerkiksi sallimalla sähkön mittauksen netottaminen eri mittaushetkillä.

Työssä käsiteltiin pientuotannon hyödyntämiselle sekä liittämislle asetettuja lainsäädännöllisiä- ja teknisiä vaatimuksia tuotantolaitteiston haltijan, sekä verkonhaltijan näkökulmasta. Suurimpana yksittäisenä tiedonlähteenä käytettiin Energiategollisuus ry:n vuonna 2016 uudistamia liittämisen ohjeistuksia, joita useimmat verkkoyhtiöt hyödyntävät liittynän suunnittelun tukena. Pientuotannoksi rajattiin sähkömarkkinalain 588/2013 nojalla kaikki alle 2 megavoltiampeerin tuotantolaitokset ja mikrotuotannoksi kaikki alle 100 kilovoltiampeerin tuotantolaitokset. Säädoksiä ja suosituksia tarkasteltaessa havaittiin, että nimellisteholtaan pienien ja verkkosuuntaajan välityksellä kytkettyjen tuotantolaitosten liittämislle on annettu selkeät toimintaohjeet ja rajat, mutta kun nimellisteho kasvaa ja liityntämuoto muuttuu, on liittämiskohta ja suojausasetukset useimmiten tarkasteltava tapauskohtaisesti.

Verkkoon kytketty tuotantolaitos toimii uutena sähkön syöttöpisteenä, jonka toiminta muuttaa oleellisesti verkon dynamiikkaa. Nykyinen verkon suojausmalli perustuu vikavirtojen suuruuksien tuntemiseen, jolloin pientuotannon lisääminen johtolähdölle aiheuttaa haasteita uusien vikavirran syöttöreittien muodostuessa. Vian ja tuotantolaitoksen sijainnista riippuen, syötetyn vikavirran taso voi paikallisesti nousta niin suureksi, että terminen kestävyys menetetään, tai suojauksen havaitsema vikavirta voi olla niin alhainen, että suojauksen toiminta viivästyy tai estyy kokonaan.

Pientuotanto saattaa myös aiheuttaa vikoja, joita ei ennen verkossa ole havaittu. Viereisen johtolähdön oikosulun johdosta, liitetty tuotantolaitos alkaa syöttää tuotantolaitteiston ominaisuuksien mukaisesti omaa vikavirtaansa kohti viereisen lähdön vikapaikkaa. Mikäli releillä toteutetun suojauksen asetteluarvoja ei ole tarkistettu, voi tuotantolaitoksen syöttämä vikavirta tarpeettomasti erottaa normaalisti toimivan johtolähdön verkosta ja näin aiheuttaa merkittävää haittaa asiakkaille ja taloudellisia tappioita verkkoyhtiölle.

Pientuotannon verkostovaikutuksia on myös mahdollista hyödyntää alueilla, joissa esimerkiksi suuri jännitteenalenema on ongelma. Sijoittamalla tasaiseen tuotantotehoon kykenevä tuotantolaitos johtolähdön loppupäähän, nousee jännite tuotantolaitoksen lähialueilla alkupään jakelumuuntajan tasolle, jolloin suositukset ylittävä jännitteenalenema saadaan korjattua ilman lisäinvestointeja.

Työn lopputuloksena saatiin kattavasti selville erilaisten pientuotannon aiheuttamien vikojen luonne, sekä vaikutukset sähköverkon normaaliin toimintaan ja suojaukseen. Pientuotannon ei havaittu tuottavan merkittäviä toiminnallisia tai sähköturvallisuuden vaarantavia riskejä, mikäli tuotantolaitoksen liittämistä suunniteltaessa tehdään tiivistä yhteistyötä verkonhaltijan kanssa ja noudatetaan tuotannon liittämistä koskevia määräyksiä. Lisäksi luotiin maallikoille suunnattu pientuotannon liittämisen ohjeistus Tampereen Sähköverkko Oy:lle soveltaen Energiateollisuus ry:n yleistä ohjeistusta pientuotannon liittämiseksi jakeluverkkoon.

LÄHTEET

Sähkömarkkinalaki. 2013. 2013/588

Vihanninjoki, V. 30.6.2015. Hajautettu energiantuotanto Suomessa. Suomen ympäristökeskus SYKE. Kulutuksen ja tuotannon keskus.

Kasvi, J. 2009. Hajautettu sähköntuotanto vaatii sähköverkkojen kehittämistä. Uusi Suomi. <https://www.uusisuomi.fi/>. Luettu 12.2.2017

Pöyry Management Consulting Oy. 2017. Hajautetun uusiutuvan energiatuotannon potentiaali, kannattavuus ja tulevaisuuden näkymät Suomessa. Valtioneuvoston selvitys ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 5/2017. Luettu 3.2.2017

Korpela, A. 2014. Aurinkosähkön perusteet.

Aurinkoenergia. Mikä on aurinkokenno. <http://www.aurinkokennot.fi/mika-on-aurinkokenno/>. Viitattu 20.2.2017

Saari, P. Keikko T & Korpinen, L. 1999. Sähkön tuotanto ja kulutus, Tampereen teknillinen yliopisto. Opintomoniste 2-99

Suntekno. 2012. Aurinkopaneelit. <http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf>. Luettu 4.2.2017

Korpela, A. Tuulivoiman perusteet, 2014

Suomen tuulienergia – FWT Oy. Perustietoa tuulivoimalaitoksista. http://www.suomentuulienergia.fi/perustietoa_1.html. Luettu 22.1.2017

Palmunmaa, P. 2010. Tuulivoiman verkkomääräykset Euroopassa ja Yhdysvalloissa sekä niiden kehittyminen tulevaisuudessa älykkäiden verkkojen kannalta. Diplomi-työ. Lappeenrannan yliopisto

Tuulivoimayhdistys. Pientuulivoima. <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/pientuulivoima>. Viitattu 13.2.2017

Kuittinen, T. 2012 Biopolttoaineiden ominaisuudet. Energiatekniikan koulutusohjelma. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kandidaatintyö.

Freris, L. & Infield, D. 2008. Renewable energy in power systems. John Wiley & Sons, Ltd

Antikainen, R. Tenhunen, J. Ilomäki, M. Mickwitz, P. Punttila, P. Puustinen, M. Sepälä, J. Kauppi, L. 2007. Bioenergian uudet haasteet Suomessa ja niiden ympäristönäkökulmat. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 11/2007.

Motiva. 2017. Bioenergian käyttö. www.motiva.fi. Luettu 15.2.2017

Motiva. 2017. polttotekniikasta yleisesti. www.motiva.fi. Luettu 16.2.2017

Nieminen, A. 2016 Energian tuottamisen fysikaalinen perusta. <http://www.koti-posti.net/ajnieminen/entu.pdf>. Luettu 16.2.2017

Haapakoski, P. 2011. Vesivoimalaitosten rakenneratkaisut. Sähkö- ja energiatekniikan koulutusohjelma. Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö

Energiateollisuus. 2017. Vesivoimalla eniten uusiutuvaa sähköntuotantoa. http://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/vesivoima. Luettu 18.1.2017

Pienvesivoimayhdistys ry. Yleistä. <http://pienvesivoimayhdistys.com/yleista-2/>. Luettu 2.2.2017

Wallin, M. 2012. Pienen kokoluokan CHP-laitoksen tuotannon kannattavuus kunnallisen lämpölaitoksen yhteydessä. Energiatekniikan koulutusohjelma. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö

Karjalainen, T. 2012. Pienimuotoisen lämmön ja sähkön yhteistuotannon tilannekatsaus – laitteet ja niiden käyttöönotto. Oulun yliopisto

Valtioneuvoston asetus uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta 1397/2010. Annettu Helsingissä 30.12.2010. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2010/20101397>. Viitattu 28.2.2017

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2010. Suomen kansallinen toimintasuunnitelma uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian edistämisestä direktiivin 2009/28/EY mukaisesti. Viitattu 28.2.2017

Valtioneuvoston asetus sähkömarkkinoista 65/2009. Annettu Helsingissä 5.2.2009. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090065>. Viitattu 1.3.2017

Energiateollisuus. Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon. Verkostosuositus YA:13.

Lahtela, J. 2015. Mikrotuotannon liittäminen jakeluverkkoon. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Lapin ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö

Lehto, I. 2016. Sähkötuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon. Energiateollisuus.

Heikkinen, M. 2012. Maatilan biokaasulaitokseen tarvittavat luvat. Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma. Oulun seudun ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Verohallinto. 2016. Sähkön ja eräiden polttoaineiden vero 2016. www.vero.fi. Viitattu 4.3.2017

Verohallinto. 2014. Kotitalouden sähköntuotannon tuloverotus. www.vero.fi. Viitattu 4.3.2017

Motiva. 2016. Pientuotannon tuet. www.motiva.fi. Viitattu 4.3.2017

Valtioneuvoston asetus uusiutuville energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta 2010/1396 & 2010/1397 <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2010/20101396>. Viitattu 5.3.2017

Honkasalo, N & Tuomisto, A. 2012. Opas sähkön pientuottajalle. Motiva

Motiva. 2016. Ylijäämänsähkön myynti. www.motiva.fi. Luettu 6.3.2017

Fingrid. 2013. Voimalaitosten järjestelmäteknilliset vaatimukset

Lehto, I. 2016. Tekninen liite 1 ohjeeseen sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon - nimellisteholtaan enintään 100 kVA laitoksen liittäminen. Energiateollisuus

Lehto, I. 2016. Tekninen liite 2 ohjeeseen sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon - nimellisteholtaan yli 100 kVA laitoksen liittäminen. Energiateollisuus

Lehto, I. 2009. Mikrotuotannon liittäminen yleiseen sähkönjakeluverkkoon. Sähkötekniikan laitos. Teknillinen korkeakoulu. Diplomityö

Lahtela, J. 2015. Mikrotuotannon liittäminen jakeluverkkoon. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Kemin ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö

SESKO ry. 2010. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. SFS-EN-50160. Viitattu. 10.3.2017

ABB Oy. 2000. ABB Teknisiä tietoja ja taulukoita-käsikirja 2000-7.

Pekkonen, H. 2013. Sähkön mikrotuotanto – häiriöt ja suojaus. Sähkötekniikka. Metropolia ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö

Energiateollisuus. 2014. Sähköntoimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje. Viitattu 15.3.2017 & 4.4.2017

Laaksonen, H. 2004. Hajautetun tuotannon tilastollisuuden ja keskijänniteverkon aktiivisen jännitesäädön huomioiminen verkostolaskennassa. Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö

Makkonen, T. 2014. Jännitekuoppien vaikutus oikosulkumoottorien käyttäytymiseen. Karelia-ammattikorkeakoulu. Julkaisusarja C.

Jaanila, J. 2013. Sähkön laatu toimistoverkossa. Sähkötekniikka. Metropolia ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Repo, S. Laaksonen, H. Mäkinen, A & Järventausta, P. 2003. Hajautetun tuotannon huomioiminen sähkönjakeluverkon suunnittelussa. Tampereen teknillinen yliopisto

Saloranta, K. 2011. Tuulivoimalan suojauskysymyksiä. Tekniikka ja liikenne. Vaasan yliopisto. Opinnäytetyö

Kivinen, J. 2008. Hajautetun sähköntuotannon verkostovaikutukset. Sähkötekniikan osasto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

- Äijälä, I. 2008. Jännitteen säätö hajautetun tuotantoyksikön verkkovaihtosuuntaajalla. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Projektityö
- Ylä-Outinen. 2011. Hajautetun sähkön pientuotanto pienjännitteisten jakeluverkkojen suojauksen kannalta. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kandidaatintyö
- Mäki, K. 2009. Tuulivoima ja sähköverkko. Tampereen teknillinen yliopisto.
- Virtanen, K. 2015. Epäsinimäinen virta ja jännite, särö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Luentokalvot 5S00BM11 Tehoelektroniikka.
- Korpinen, L, Mikkola, M, Keikko, T & Flack, E. Yliaalto-opus. <http://www.leenakorpi-nen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>. Luettu 15.4.2017
- Tuunanen, J. 2015. Modelling of changes in electricity end-usage and their impacts on electricity distribution. Electrical engineering. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Tohtorintutkinto
- Suvela, T. 2016. Sähköverkkoyhtiön käyttökeskustoiminnan kehittäminen. Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö
- Santala, S. 2011. Oma energiantuotanto ja sen kytkeminen sähköverkkoon. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu
- Ahonen, J. 2012. Palvelutuotteen kehittäminen tuulivoimaloiden verkkoon liittämiseksi. Automaatiotekniikan koulutusohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.
- Alanen, R & Hätönen, H. 2004. sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta. Selvitys. VTT
- Karppanen, J. 2012. Sähköntuotannon pienjänniteverkkoon liittäminen – määräykset ja sähköturvallisuus. Sähkötekniikka. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö
- Karimäki, J. 2017. Lakialoite laiksi sähkömarkkinalain muuttamisesta. Lakialoite LA 4/2017 vp. Viitattu 12.5.2017
- Flink, A. 2014. Pientuotannon mittarointiohjeet. Vantaan energia. Viitattu 12.5.2017
- Energiateollisuus. 2016. Tuntimittauksen periaatteita. Luettu 12.5.2017
- Kalliomäki, P. 2012. Rakennusten energiatehokkuus – Määräykset ja ohjeet 2012. Rakennetun ympäristön osasto. Ympäristöministeriö
- Edilex. Rakentamismääräykset. <https://www.edilex.fi/rakentamismaaraykset>. Luettu 14.5.2017
- Mikko, S. Mattinen, M, Heljo, J & Kopsakangas-savolainen, M. 2015. Lähes nollaenergiarakentamisen ympäristövaikutusten arviointi. Suomen ympäristökeskus
- Maatalous- ja ympäristöministeriö. 2017. Valtioneuvoston asetus rakennuksissa käytettävien kertoimien lukuarvoista. Viitattu 14.5.2017

LIITTEET

Liite 1. Pientuotannon liittämisen ohjeistus. Tampereen Sähköverkko Oy



PIENTUOTANNON LIITTÄMINEN TAMPEREEN SÄHKÖVERKKO OY: N JAKELUVERKKOON



Tämän ohjeen tarkoituksena on antaa sähköntuotantolaitoksen hankintaa harkitsevalle perustiedot sähkön pientuotannosta ja sen liittamisestä Tampereen sähköverkko Oy:n sähköjakeluverkkoon ja täydentää Energiateollisuuden antamia yleisiä ohjeita tuotannon liittämiseksi. Jakeluverkolla tarkoitetaan tässä tapauksessa enintään 110 kV sähköverkkoa.

1. Liittymisprosessi

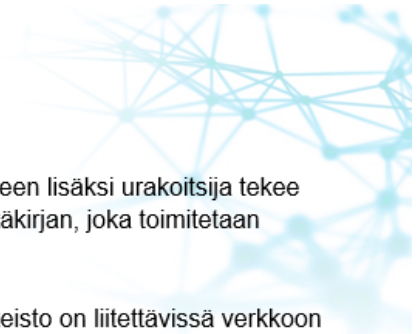
Ennen tuotantolaitteiston hankintaa on suositeltavaa varmistaa, että suunnitteilla oleva laitteisto voidaan liittää jakeluverkkoon. Liitettävän laitteiston tulee olla Energiateollisuuden antamien ohjeiden, joista uusimmat versiot on julkaistu huhtikuussa 2016, tai saksalaisen mikrotuotantonormin VDE-AR-N 4105 mukainen.

Näin vältetään tilanne, jossa hankittu laitteisto ei täytäkään liittymiskohdan vaatimuksia ja kytkentä verkkoon joudutaan kieltämään. Yleiseen sähköverkkoon voidaan kytkeä vain tarkat tekniset vaatimukset täyttävä laitteisto, sillä tuotantolaitoksen ominaisuudet vaikuttavat olennaisesti sähköverkon toimintaan ja käyttöturvallisuuteen. Lisäksi tulee tarkastaa, vaatiiko suunniteltu tuotantolaitos rakennus- tai toimenpidelupaa tai onko asennukselle asetettu erikoisvaatimuksia.

Kun laitteisto on hankittu, se tulee asentaa voimassa olevien standardien ja säädösten mukaisesti. Noudatettavat standardit koskevat verkon rinnalla toimivien mikrogeneraattoreiden teknisiä vaatimuksia (**SFS-EN 50438**), työturvallisuutta (**SFS-EN 6002**) ja pienjänniteasennuksia (**SFS-EN 6000**). Tuotantolaitteiston kuten muutkin sähkölaitteet saa asentaa vain sellainen henkilö tai yritys, jolla on tehtävästä riittävä kokemus ja sähköurakointioikeudet. Itsetehdyt asennukset voivat olla vakava sähköturvallisuusriski laitteiston omistajalle ja muille verkon käyttäjille.

Kun liittymään lisätään tuotantoa, tulisi tuotannon osalta tehdä tuotannon liittymissopimus. Sopimuksessa sovelletaan Energiateollisuuden sähköntuotannon liittymisehtoja (**TLE 14**) ja siinä käydään läpi vaatimukset, jotka tuotantolaitteiston tulee täyttää, ennen kuin laitteisto voidaan kytkeä verkkoon. Tuotannon liittymissopimus ei kuitenkaan oikeuta sähkön tuottajaa syöttämään tuottamaansa sähköä sähköverkkoon, vaan tämä edellyttää tuotannon verkkopalvelusopimuksen solmimista. Verkkopalvelusopimuksessa sovelletaan Energiateollisuuden tuotannon verkkopalveluehtoja (**TVPE 11**) ja siinä täydennetään olemassa olevaa liityntäpisteen verkkopalvelusopimusta koskemaan liittymän tuotantoa.

Laitteiston verkkoon liittämiseksi järjestelmän haltijan tulee täyttää alle 100 kVA laitteistoissa mikrotuotannon yleistietolomake ja yli 100 kVA laitteistoissa tuotantolaitteiston perustietolomake. Lomakkeen voi täyttää haltijan puolesta valtuutettu asentaja tai urakoitsija. Lomakkeen allekirjoittaja vakuuttaa annetut tiedot oikeiksi ja



laitteiston sekä asennukset standardien mukaiseksi. Lomakkeen lisäksi urakoitsija tekee käyttöönottotarkastuksen ja täyttää käyttöönoton testauspöytäkirjan, joka toimitetaan sähköverkkoyhtiölle.

Lomakkeiden saavuttua verkkoyhtiön tarkastetaan, että laitteisto on liitettävissä verkkoon ja että kohteessa on vaatimusten mukainen kaksisuuntaisesti mittaava etäluettava sähkömittari. Sähkömittari on verkkoyhtiön omistuksessa, joten mikäli mittari joudutaan vaihtamaan, tästä ei tuotantolaitoksen haltijalle koidu lisäkuluja.

Verkkoyhtiön tehtyä varoitusmerkinnät takasyötöstä ja vaihdettua energiamittari kahteen suuntaan mittaavaksi, verkkoyhtiön sopimusurakoitsija antaa kytkemiseen luvan, jolloin laitteiston rakentanut urakoitsija kytkee laitteiston verkkoon.

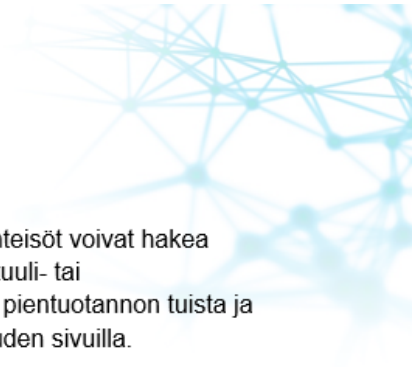
2. Verovelvollisuus

Sähköverovelvollisia ovat sähkön tuottajat sekä verkonhaltijat ja sähköverovelvollisuudella tarkoitetaan sähkön valmisteveron ja huoltovarmuusmaksun suorittamista. Pienimmät sähköntuottajat, eli nimellisteholtaan alle 100 kVA tuotantolaitokset, joiden vuosituotanto ei ylitä 800 MWh on vapautettu kaikista sähköverotuksen velvollisuuksista. Tätä nimellisteholtaan suuremmat tuotantolaitokset joutuvat rekisteröitymään Verohallinnolle verovelvollisiksi.

Sähköntuottajien velvollisuudet verotuksessa jaetaan nimellistehon ja vuosituotannon mukaan kolmeen kategoriaan.

1. Nimellisteholtaan alle 100 kVA laitokset
 - Eivät ole verovelvollisia ja eivät ole veloitettuja ilmoittamaan sähköntuotannostaan veroviranomaisille
2. Nimellisteholtaan yli 100 kVA, mutta vuosituotanto alle 800 MWh
 - Rekisteröityvät Verohallinnolle verovelvollisiksi ja ilmoittavat kerran vuodessa tuottamansa sähkön. Eivät kuitenkaan maksa sähköveroa
3. Nimellisteholtaan yli 100 kVA ja vuosituotanto yli 800 MWh
 - Rekisteröityvät Verohallinnolle verovelvollisiksi ja ilmoittavat kuukausittain tuottamansa sähkön. Itse kulutetusta sähköstä on maksettava sähköveroa.

Nämä rajat koskevat pientuotantoa, jossa tuotettu sähköenergia kulutetaan itse, tai se siirretään suoraan toiselle kuluttajalle käytettäväksi. Pientuotannolla tuotetun sähkön myynnistä saatu korvaus on veronalaista tuloa. Veroa ei muodostu, jos myynnistä saatu tulo on tuotantokustannuksiin suhteutettuna vähäistä.



3. Tuet ja vähennykset

Yritykset, kunnat ja uusiutuvan energian käyttöä edistävät yhteisöt voivat hakea energiatukea. Yksityishenkilöt voivat hakea asentamastaan tuuli- tai aurinkosähköjärjestelmästä kotitalousvähennystä. Lisätietoa pientuotannon tuista ja vähennyksistä on saatavilla verohallinnon ja Energiateollisuuden sivuilla.

4. Ilmoituksen hyvitysmaksu

Ilmoittamattomat tuotantolaitokset sähköverkossa ovat huomattava riski sähköturvallisuudelle. Tästä syystä Tampereen sähköverkko Oy kannusta asiakkaitaan ilmoittamaan verkkoon kytketystä tuotannosta tarjoamalla kertaluontoisen hyvitysmaksun.

Hyvitysmaksu maksetaan vain kerran käyttöpaikkaa kohden ja korvauksen suuruus riippuu liitettävän pientuotantolaitteiston nimellistehosta.

alle 2 kW	30 €
2 – 5 kW	80 €
yli 5 kW	130 €

Tampereen sähköverkko Oy maksaa ilmoituksen ja hyväksytyt käyttöönoton perusteella asiakkaan käyttöpaikan seuraavilla siirtolaskuilla kertahyvityksen pientuotantolaitteiston hyväksytystä käyttöönotosta, mikäli tuotannon käyttöpaikalle on tehty sähkönostosopimus sähkönmyyjän kanssa.

Hyvitysmaksua ei makseta varavoimalaitteista, tilapäisiin liittymiin liitetyistä tuotantolaitteistoista tai verkosta erillään olevien saarekkeiden järjestelmistä.

5. Ylijäämäsiähkön myynti

Verkon rinnalla toimivat tuotantolaitokset voivat tuottaa sähköenergiaa yli oman tarpeen. Tällöin ylijäämäsiähkö on mahdollista siirtää sähköverkkoon muiden lähiseudun kuluttajien käytettäväksi. Sähkön ostaja on yleensä sama kuin sähkön myyntiyhtiö.

Sähkön myyntisopimus on usein osa sähkön kulutussopimusta, eli kun pientuotantolaitteiston (esimerkiksi aurinkopaneelijärjestelmä) tuottama sähköenergia ei riitä kattamaan kiinteistön sähkönkulutusta, ostaa liittynä puuttuvan osan energiasta sähkön myyntiyhtiöltä. Toisaalta, mikäli järjestelmä tuottaa sähköä yli oman tarpeen, ostaa sama taho ylijäämäsiähkön. Myydystä sähköstä maksettu korvaus riippuu osapuolten välisestä sopimuksesta.

Esimerkiksi Tampereen Sähkölaitos Oy ostaa yli oman tarpeen tuotetun sähköenergian, mikäli käyttöpaikan haltija on tehnyt OmaSähkö-sopimuksen.

Ylijäämänsähkön osalta on aina tehtävä sähkön myyntisopimus, vaikka tuotetun sähkön määrä olisi vähäinen. Verkonhaltijalla ei ole oikeutta päästää verkkoon päin sähköä, jolla ei ole ostajaa. Tilanteessa jossa tuotetulle sähkölle ei ole ostajaa, syöttö verkkoon tulisi estää.

6. Sähköntuotannon siirtomaksu

Sähköntuotannon siirtomaksu riippuu verkonhaltijan ja tuotantolaitoksen omistajan välisestä sopimuksesta. Sähkömarkkinalain 65/2009 mukaan liittymän sähköntuotannon vuosittainen siirtomaksu ei saa ylittää 0,07 senttiä kilowattitunnilta. Tampereen Sähköverkko Oy ei voimassa olevan siirtohinnaston mukaan veloita siirtomaksua alle 100 kVA laitteiston tuottamasta sähköstä.

7. Enintään 2 MVA tuotantolaitoksen liittymismaksu

Enintään 2 MVA:n tuotantolaitoksilta (tuotantolaitoskokonaisuuksilta) peritään ne rakentamiskustannukset, jotka muodostuvat yksinomaan tuotantolaitosta palvelevan verkonosan ja laitteistojen rakentamisesta, mutta ei verkon vahvistamiskustannuksia. Liittymisjohdon rakentaminen ei sisälly em. maksuun. Kohteissa, joissa on sähköntuotannon ohella sähkönkulutusta, veloitetaan sähkönkulutuksen osalta liittymismaksu sähkönkäyttökohteita koskevien hinnoitteluperiaatteiden mukaisesti. Mikäli kohteen sähkönkulutus on yhtä suuri tai suurempi kuin tuotetun energian verkkoon anto, peritään kohteelta normaalit käyttökohteita koskevat liittymismaksut. Tuotannon liittämässä noudatetaan alan yleisiä voimassa olevia liittymisen ehtoja.

Erillinen hinnasto Tampereen sähkölaitoksen verkkosivuilla.

8. Yli 2 MVA tuotantolaitoksen liittymismaksu

Yli 2 MVA tuotannon (tuotantolaitoskokonaisuuden) liittymismaksu määräytyy tapauskohtaisesti liittämisestä aiheutuneiden todellisten kustannusten mukaan. Kapasiteettivarausmaksu on riippuvainen liityntä- jännitteestä sähkönkäyttöpaikkojen liittämishinnaston mukaisesti. Liittymisjohdon rakentaminen ei sisälly liittymismaksuun.

Erillinen hinnasto Tampereen sähkölaitoksen verkkosivuilla.



9. Alle 100 kVA tuotantolaitteiston liittäminen

Alle 100 kVA tuotantolaitteiston eli mikrotuotantolaitoksen liittämisessä verkkoon noudatetaan Energiateollisuuden ohjeita "ohje sähköntuotantolaitoksen liittämisestä jakeluverkkoon", "tekninen liite 1 enintään 100 kVA" ja "mikrotuotannon liittäminen jakeluverkkoon, verkostosuositus YA9:13". Liitettävän laitteiston tulee täyttää teknisiltä vaatimuksiltaan standardien VDE-AR-N 4105 ja SFS-EN 50438 mukaiset vaatimukset. Lisäksi pientuotantolaitoksen asennuksineen tulee täyttää pienjännitteisiä sähköasennuksia ja sähköturvallisuutta koskevat standardit SFS-EN 6000 ja SFS-EN 6002. Tuotantolaitoksia, jotka eivät täytä vaatimuksia ei voida ottaa käyttöön tai kytkeä verkkoon.

Verkkoon kytketyt pientuotantolaitokset tulee suojata asianmukaisesti sähköverkon mahdollisilta häiriötilanteilta. Samoin suojauksen avulla varmistetaan, ettei voimalaitoksen toiminta aiheuta häiriöitä tai vaaraa muille verkon käyttäjille.

Energiateollisuuden tekninen liite 1 esittää standardin SFS-EN 50438 vaatimukset vaihtosuuntaajalla liitettäville tuotantolaitoksille, kuten aurinkosähkölaitoksille. Vaatimukset ovat esiteltynä taulukossa 1. Muille kuin vaihtosuuntaajalla liitettäville tuotantolaitoksille verkonhaltijalla voi olla lisävaatimuksia, joten tapauskohtainen käsittely voi olla tarpeen etenkin nimellisteholtaan suurissa laitoksissa.

TAULUKKO 1. Tuotantolaitteiston suojauksen asetteluarvo alle 100 kVA laitteistossa

Parametri	Toiminta-aika	Asetteluarvo
Ylijännite	0,2 s	$U_n + 10 \%$
Alijännite	0,2 s	$U_n - 15 \%$
Ylitaajuus	0,2 s	51,5 Hz
Alitaajuus	0,2 s	47,5 Hz
Saarekekäyttö	enintään 5 s	

Laitteisto ei myöskään saa turhaan irrottautua verkosta. Laitteiston tulee kyetä pysymään verkossa vähintään 30 minuuttia taajuusvaihtelualueella 47,5 – 49,0 Hz ja 51,0 – 51,5 Hz ja laitteiston tulee kyetä jatkamaan normaalia toimintaa, saarekesuojauksesta huolimatta, taajuuden muutosnopeuden ollessa alle 2 Hz/s.



10. Yli 100 kVA tuotantolaitteiston liittäminen

Yli 100 kVA tuotantolaitteiston liittämisessä verkkoon noudatetaan Energiateollisuuden ohjeita "ohje sähköntuotantolaitoksen liittämisestä jakeluverkkoon" ja "tekninen liite 2 yli 100 kVA". Tämän kokoluokan tuotantolaitokset voivat vaikuttaa merkittävästi verkon toimintaan, joten liittymiskohta ja suojausasettelut määritellään tapauskohtaisesti.

11. Yli 500 kVA tuotantolaitteiston liittäminen

Yli 500 kVA tuotantolaitteistojen liittämisessä noudatetaan samoja käytäntöjä kuin yli 100 kVA laitteistojen liittämisessä, mutta kantaverkkoyhtiö Fingridillä on tämän kokoluokan tuotantolaitoksille omat lisävaatimuksensa. Nämä vaatimukset käyvät ilmi Fingridin kokoamasta asiakirjasta "Voimalaitosten järjestelmätekniilliset vaatimukset".

Mikäli voimalaitoksen nimellisteho ylittää yhden megavoltiampeerin, on sen haltijan tehtävä ilmoitus sähkömarkkinaviranomaiselle. Lisätietoa tästä on saatavilla sähkömarkkinalain 65/2009 7 §.

12. Sähköntuotannon mittaus

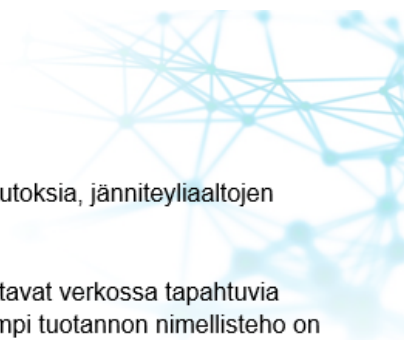
Verkonhaltija on vastuussa verkosta otetun ja siihen syötetyn energian mittauksesta, mittarien asentamisesta ja vaihdosta, sekä mittarien lukemisesta. Itse tuotetun sähkön kulutuksen mittauksesta vastaa tuottaja itse. Mittausjärjestelyihin vaikuttaa käytössä olevan tuotantolaitoksen luokitus. Kohteessa, jossa sähkön tuottaja ei syötä sähköä verkkoon päin riittää yksisuuntainen verkosta otetun energian mittaus.

Laitteistoissa jotka voivat syöttää sähköä verkkoon, vaaditaan kaksisuuntainen mittaus. Mikäli tuotantokohteen liittymä on alle 3x63 A, voidaan kaksisuuntainen mittaus suorittaa yhdellä etäluettavalla mittarilla, joka rekisteröi tunneittain verkkoon syötetyn ja verkosta otetun energian erikseen.

Nimellisteholtaan alle 100 kVA sähköntuotantolaitoksessa riittää, että olemassa oleva kohteen etäluettava sähkömittari mittaa erikseen verkosta otetun ja siihen syötetyn energian. Yli 100 kVA tuotantolaitos on varustettava erillisellä mittauksella, jonka mukaan lasketaan oman tuotannon kulutus.

13. Tuotetun sähkön laatu

Sähkön laadulla tarkoitetaan jännitteen ja virran ominaisuuksia ja sen raja-arvot ovat määritelty SFS standardissa EN 50160. Standardissa esitetyt tärkeimmät laatuvaatimukset



koskevat mm. taajuutta, jännitetason vaihtelua ja nopeita muutoksia, jänniteylliaaltojen määrää, keskeytyksiä ja ylijännitteitä.

Sähköverkkoon liitettävät tuotantolaitteistot lisäävät ja voimistavat verkossa tapahtuvia muutosilmiöitä ja ilmiöt ovat sitä voimakkaampia, mitä suurempi tuotannon nimellisteho on suhteessa verkon oikosulkutehoon

Suurimmassa osassa tapauksia tuotannon koko on sen verran pieni verrattuna verkon oikosulkutehoon, että tuotantolaitoksen vaikutus sähkön laatutekijöihin verkossa on pieni. Tämä voi kuitenkin tulevaisuudessa muodostua ongelmaksi, mikäli heikkoon verkkoon lisätään suuria tuotantolaitoksia.

Liitetty tuotantolaitos ei vikatilanteissakaan saa aiheuttaa vaaraa tai häiriötä muille verkonkäyttäjille. Vian ilmetessä laitteiston omistajan tulee kytkeä laite pois verkosta välittömästi vian huomattuaan. Verkonhaltija voi kytkeä irti häiriötä aiheuttavan laitteiston ja kieltää sen kytkemisen verkkoon, kunnes on selvitetty häiriön aiheuttajan syy.

14. Yksivaiheisen tuotannon rajaus

Tuotantolaitos voi olla myös yksivaiheinen. Yksivaiheinen syöttö voi kuitenkin olla kolmivaiheista haastavampaa, sillä mikäli tuotantolaitos on liian suuri, aiheuttaa tuotanto verkkoon vaiheiden välille tehoepätasapainon, ja näin edesauttaa verkon vikojen syntymistä.

Pääperiaatteena yksivaiheisen tuotantolaitoksen rajoittamiselle on, että sitä tarkastellaan kuten tavallista kulutuslaitetta. Tällöin yksivaihetuotanto voidaan kytkeä maksimissaan 16 A sulakkeen taakse, jolloin tuotantolaitoksen maksimikoko saa olla enintään 3,7 kVA.

Mikäli samalla alueella on useita yksivaiheisia tuotantolaitoksia, on verkonhaltijalla oikeus vaatia tuotannon tasoittamista usean vaiheen välille. Muutoin muuntopiirin vaiheiden välille ei voida taata tasaista kuormitusta.

15. Erottaminen verkosta

Verkkoon kytketyt tuotantolaitteet on voitava kytkeä irti verkosta tarpeen mukaan esimerkiksi verkon tai kiinteistön sähkötöiden ajaksi. Käytettävä erotuslaite on myös oltava mahdollista lukita auki asentoon verkkoon kytkeytymisen estämiseksi. Verkonhaltijalla tulee olla esteetön pääsy erotuslaitteelle, joka voi olla mekaaninen tai etähallittava.



16. Varoitusmerkinnät

Verkon kanssa rinnan toimivasta tuotantolaitoksesta on kiinnitettävä varoitusmerkintä sellaiseen paikkaan, josta henkilö, joka on aikeissa käsitellä jännitteisiä osia, huomaa varoitusmerkinnän.

Varoitusmerkintä tulee sijoittaa vähintään seuraaviin kohtiin:

- liittymän pääkeskukseen
- kaikkiin sähkökeskuksiin, jotka ovat pääkeskuksen ja generaattorin välillä
- kaikkiin kohteisiin, joista generaattori voidaan erottaa jakeluverkosta
- generaattoriin

Liite 2. Kahvasulakkeiden sulamisarvot (ABB 2012)

