



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Aaro Aaltonen

Hajautetun pien- ja mikrotuotannon vaikutus jakeluverkon mitoitukseen

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Kandidaatin tutkinto
Sähkö- ja energiatekniikka

Vaasa 2026

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Aaro Aaltonen		
Tutkielman nimi:	Hajautetun pien- ja mikrotuotannon vaikutus jakeluverkon mitoitukseen		
Tutkinto:	Kandidaatin tutkinto		
Oppiaine:	Sähkö- ja energiatekniikka		
Työn ohjaaja:	Kimmo Kauhaniemi		
Valmistumisvuosi:	2026	Sivumäärä:	35

TIIVISTELMÄ:

Hajautetun mikro- ja pientuotannon liittäminen jakeluverkkoon on ollut huomattavassa kasvussa viime vuosina. Ilmastonmuutos ja päästöjen vähentäminen on ajanut monet kuluttajat pohtimaan omia kulutustottumuksiaan ja energian käyttöään, jonka takia oman pientuotannon hankinta on yleistynyt. Myös hankintahinnat ja laitteistojen parempi saatavuus on lisännyt hankintoja. Kehitys muuttaa jakeluverkkoyhtiöiden toimintaympäristöä, sillä pienjänniteverkot on perinteisesti suunniteltu tilanteeseen, jossa sähköntuotanto on ollut vähäistä ja teho on siirtynyt pääosin yksisuuntaisesti verkosta asiakkaille.

Tässä kandidaatintutkielmassa tarkastellaan hajautetun pientuotannon vaikutuksia jakeluverkon mitoitukseen. Tavoitteena on selvittää, miten pientuotannon yleistymisen muuttaa jakeluverkon suunnittelun lähtökohtia ja mitoitusperiaatteita. Teoriaosuudessa käsitellään Suomen sähköjärjestelmän rakennetta ja toimintaa, vertaillaan keskitettyä ja hajautettua energiantuotantomallia, määritellään pientuotannon käsite sekä kuvataan pientuotannon muotoja ja kehitystä Suomessa. Lisäksi esitetään jakeluverkon mitoituksen perusteita. Tutkimusosuudessa tarkastellaan kirjallisuuteen ja aineistoon pohjautuen pientuotannon keskeisiä verkostovaikutuksia ja niiden merkitystä pienjänniteverkon mitoitukselle.

Tulosten perusteella hajautetun pientuotannon kasvu asettaa uusia vaatimuksia jakeluverkon mitoitukselle, eivätkä perinteiset, keskitettyyn tuotantoon perustuvat käytännöt enää kaikilta osin vastaa nykytilannetta. Mitoituksen kannalta merkittävin vaikutus liittyy jännitetaso hallintaan. Pientuotannon yleistyessä kriittisin mitoitus tilanne ei välttämättä ole huippukuormitus tilanne, vaan tilanne, jossa paikallinen kuormitus on vähäistä ja tuotanto suurta. Tällöin jännitteennousu voi muodostua mitoitusta rajoittavaksi tekijäksi erityisesti hajautusalueilla ja pitkien johtolähtöjen päissä.

Komponenttitasolla rajoitteeksi voi joissain tapauksissa muodostua jakelumuuntajien kuormitettavuus, mutta Suomessa tämä on usein toissijaista, koska jakeluverkot on mitoitettu talven huippukuormien perusteella. Suojaukseen kohdistuvat vaikutukset ovat nykyisissä pienjänniteverkoissa yleensä rajallisia eivätkä tyypillisesti yksin määritä mitoitusta, mutta niiden merkitys voi korostua, jos pientuotanto keskittyy samalle lähdölle tai tuotantoteho kasvaa suureksi suhteessa kuormitukseen.

Tutkielman tuloksena todetaan, että pientuotannon verkostovaikutukset on huomioitava jakeluverkkoyhtiöiden suunnitteluperiaatteissa. Jännitteennousun hallinnassa ensisijaisena keinona korostuu loistehon säätö, koska se mahdollistaa jännitteen hallinnan ilman pätoetehon rajoittamista ja siten ilman suoraa vaikutusta tuotannon kannattavuuteen. Mikäli säätömenetelmät eivät riitä vaatimusten täyttämiseen, verkon vahvistaminen muodostuu vaihtoehtoiseksi ratkaisuksi.

AVAINSANAT: Sähköjakeluverkko, pientuotanto, mitoitus

Sisällys

1	Johdanto	6
2	Suomen sähkönjakelujärjestelmä	8
2.1	Nykytilanne ja kehitystrendit	8
2.2	Sähköverkkorakenteen muutos	9
2.2.1	Keskitetty, perinteinen energiantuotanto	9
2.2.2	Hajautettu energiantuotanto	10
3	Hajautettu pien- ja mikrotuotanto	13
3.1	Aurinkovoima	13
3.2	Tuulivoima	14
3.3	Vesivoima	15
3.4	Muut	15
3.5	Hajautettu pientuotanto Suomessa	16
4	Jakeluverkon mitoitus	18
4.1	Jakelumuuntajan mitoittaminen	18
4.2	Pienjänniteverkon suunnittelu	19
4.3	Runkokaapelin mitoitus	21
4.4	Liittymiskaapelin mitoitus	22
5	Hajautetun pientuotannon vaikutus jakeluverkon mitoitukseen	25
5.1	Jännitemuutoksien vaikutus mitoitukseen	25
5.2	Verkon suojauksen toiminnan muutoksien vaikutus mitoitukseen	27
5.3	Hajautetun pientuotannon liitettävyyden vaikutus jakeluverkkoon mitoituksen kannalta	28
6	Yhteenveto	32
	Lähteet	34

Kuvat

Kuva 1. Keskitetty, perinteinen energiantuotanto. Muokattu kohteesta Ehsan & Yang, 2018.	10
Kuva 2. Hajautettu energiantuotanto. Muokattu kohteesta Ehsan & Yang, 2018.	11
Kuva 3. Suomen sähkönjakeluverkkoon liitettyjen pientuotantoyksiköiden nimellistehot vuosina 2016–2024. Pientuotanto kW (nimellisteholtaan alle 1 MW tuotantoyksiköt) (Energiavirasto, 2025).	17

Taulukot

Taulukko 1. Suomen sähkönjakeluverkkoon liitettyjen pientuotantoyksiköiden nimellistehot vuosina 2020–2024. Pientuotanto kW (nimellisteholtaan alle 1 MW tuotantoyksiköt) (Energiavirasto, 2025).	16
Taulukko 2. AXMK-kaapelien sähköisiä arvoja (Muokattu kohteesta Prysmian Group AXMK-PLUS 0,6/1 kV Datalehti, 2025).	20
Taulukko 3. Runkokaapelien suurimmat sallitut tai suositellut ylivirtasuojat. (Muokattu kohteesta Verkostosuositus, SA:21).	22
Taulukko 4. Yleisten asuinrakennusten pätehomitoitus P_{\max} pääsulakkeiden avulla. (Muokattu kohteesta Verkostosuositus, SA 4:22)	23
Taulukko 5. Aurinkosähkön liitettävyyys suhteessa mitoitusoikosulkuvirtaan. (Muokattu kohteesta Verkostosuositus, YA 9:23)	30

Merkinnät ja lyhenteet

I_{k1}	yksivaiheinen mitoitusoikosulkuvirta [A]
I_p	pätövirta [A]
I_q	loisvirta [A]
l	johdon pituus [m]
P	pätöteho [W]
Q	loisteho [Var]
r	johtimen ominaisresistanssi [Ω /km]
S	näennäisteho [VA]
S_k	oikosulkuteho [VA]
U_v	vaihejännite [V]
ΔU	jännitteenalenema [%]
x	johtimen ominaisreaktanssi [Ω /km]
$\cos\varphi$	tehokerroin
PJ	pienjännite
KJ	keskijännite

1 Johdanto

Energiasektori on läpikäymässä merkittävää muutosta verkkoon liitetyn hajautetun mikro- ja pientuotannon määrän kasvaessa voimakkaasti. Ilmastonmuutos on saanut kuluttajat valveutumaan luonnonvarojen säästämistä ja kasvihuonepäästöjen vähentämisestä. Uusiutuviin energialähteisiin pohjautuvien sähköntuotantojärjestelmien hankintahintojen lasku ja parempi saatavuus on kiihdyttänyt entisestään tuotannon määrää. Tämän kasvun voidaan olettaa jatkuvan, joten sähkönjakeluverkkoyhtiöidenkin tulee kiinnittää yhä enemmän huomiota pientuotantolaitteistojen verkostovaikutuksiin.

Kuluttajan roolin muuttuminen passiivisesta sähkönkuluttajasta aktiiviseksi markkinaosapuoleksi on nostanut esiin kysymyksen verkon ja liittymispisteen oikeanlaisesta ja kustannustehokkaasta mitoittamisesta. Jakeluverkkoyhtiöiden tuleekin tunnistaa hajautetun mikro- ja pientuotannon aiheuttamat riskit ja muutokset niiden toimintaympäristössä. Pientuotannon lisääntyessä sähköverkkojen suunniteltu toiminta muuttuu, sillä pienjänniteverkkoon ei ole aikaisemmin ollut liitettynä sähköntuotantoa. Jakeluverkko onkin perinteisesti suunniteltu siirtämään tehoa vain yhteen suuntaan sähköaseman päämuuntajalta jakelumuuntajalle ja edelleen kuluttajalle. Kuitenkin pienjänniteverkkoon kytketyn tuotannon lisääntyessä voidaan ajautua tilanteeseen, jossa tehoa siirtyy kahteen suuntaan, kun tuotannon määrä on kulutusta suurempaa. Tämän takia tuleekin jakeluverkkoyhtiössä tarkastella hajautetun tuotannon verkostovaikutuksia.

Tässä kandidaatintutkielmassa keskitytään pienjänniteverkkoon liitetyn hajautetun tuotannon verkostovaikutuksiin ja niiden vaikutukseen pienjänniteverkon mitoittamisessa. Työn keskeinen tutkimuskysymys on, mitkä hajautetun pientuotannon verkostovaikutukset muodostuvat pienjänniteverkon mitoitusta rajoittaviksi tekijöiksi nykyisissä suomalaisissa jakeluverkoissa.

Työssä perehdytään aluksi sähköverkon rakenteeseen, jonka jälkeen katsotaan, miten sähköverkon topologia muuttuu hajautetun tuotannon lisääntyessä perinteisestä

keskitetystä mallista hajautettuun malliin. Tämän jälkeen käydään läpi eri pientuotantomuotoja sekä pientuotannon määrää Suomessa. Lopuksi perehdytään jakeluverkkojen mitoittamiseen ja pientuotannon vaikutukseen mitoituksessa.

Työ rajataan koskemaan pienjänniteverkkoon liitettyä hajautettua pientuotantoa, jonka määrä on ollut viime vuosina voimakkaassa kasvussa. Erityisesti aurinkosähköjärjestelmien yleistymisen on lisännyt pientuotannon määrää pienjänniteverkoissa ja tehnyt sen verkostovaikutuksista ajankohtaisen ja käytännön suunnittelua koskevan kysymyksen.

2 Suomen sähkönjakelujärjestelmä

Tässä luvussa käsitellään Suomen sähkönjakelujärjestelmää, sen nykytilannetta ja kehitystrendejä sekä tarkastellaan millaisia muutoksia sähköverkon rakenteeseen, tulee hajautetun pientuotannon yleistyessä.

2.1 Nykytilanne ja kehitystrendit

Sähkönjakelujärjestelmän tehtävänä on siirtää kantaverkon (400 kV, 220 kV, 110 kV) kautta tuleva tai suoraan jakeluverkkoon liitettyjen voimalaitosten tuottama sähköenergia sähkön kuluttajille (Lakervi & Partanen, 2008, s. 11). Sähkönjakelujärjestelmään kuuluvat suurjännitteinen jakeluverkko eli alueverkko (110 kV ja 45 kV), sähköasemat (110/20 kV tai 45/20 kV), keskijänniteverkko (20 kV), jakelumuuntamot (20/0,4 kV) sekä pienjänniteverkko (0,4 kV). Suomessa jakeluverkot ja alueverkot on jaettu alueittain jakeluverkonhaltijoiden kesken (Puolakanaho, 2022, s. 12).

Sähkönjakelujärjestelmän primäärikomponentteja ovat alueverkko, sähköasemat, jakelumuuntajat sekä keski- ja pienjänniteverkot. Lakervi ja Partanen (2008, s. 11) esittävät nämä jakelujärjestelmän keskeisiksi osiksi. Suurin osa jakeluverkoista on perinteisesti toteutettu ilmajohdoilla, mutta uuden sähkömarkkinalain astuttua voimaan jakeluverkkoyhtiöiden on pitänyt parantaa sähkönjakelun toimitusvarmuutta. Piispanen (2019, s. 7) toteaa, että tämän seurauksena jakeluverkkojen maakaapelointi on yleistynyt huomattavasti, mikä on lisännyt jakeluverkkoihin kohdistuvien investointien määrää.

Ilmastonmuutos ja siihen vastaaminen ovat asettaneet uusia haasteita Suomen sähköjärjestelmälle. Valtioneuvoston (2020) mukaan hallituksen tavoitteena on saavuttaa hiilineutraalius vuoteen 2035 mennessä, mikä edellyttää merkittäviä muutoksia energiantuotannossa ja -kulutuksessa. Tämä tarkoittaa muun muassa fossiilisista polttoaineista luopumista sekä entistä suurempaa panostusta uusiutuviin energialähteisiin ja energiatehokkuuteen.

2.2 Sähköverkkorakenteen muutos

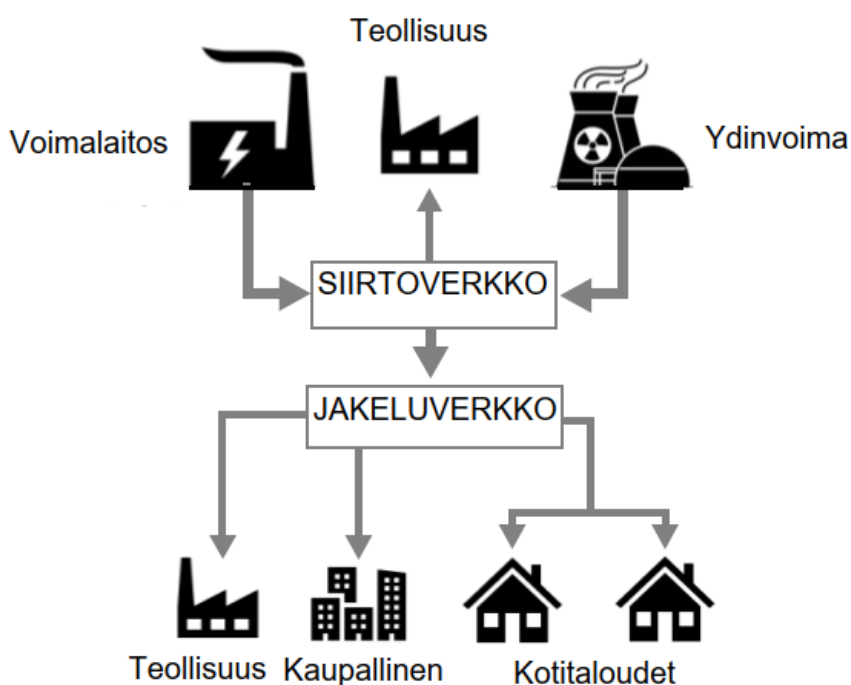
Alaluvuissa tarkastellaan ensin perinteistä keskitetyn energiantuotannon mallia, jonka lähtökohdista jakeluverkot on alun perin mitoitettu ja suunniteltu. Tämän jälkeen siirrytään analysoimaan hajautetun pientuotannon yleistymisen myötä muodostunutta hajautetun energiantuotannon rakennetta ja sen vaikutuksia verkon suunnitteluperiaatteisiin.

2.2.1 Keskitetty, perinteinen energiantuotanto

Perinteisesti sähkönjakeluverkot on suunniteltu keskitetyn tuotannon tilanteeseen, jossa sähkö tuotetaan suuritehoisissa voimalaitoksissa ja siirretään siirtoverkon kautta jakeluverkkoon ja edelleen kuluttajille (Lassila & muut, 2019, s. 20). Tämän seurauksena jakeluverkkojen tehtävänä on ollut pääosin yksisuuntainen tehonsiirto ylemmiltä jännitetasoilta alemmille. Viime vuosien kehitys, erityisesti uusiutuvan pientuotannon yleistyminen, muuttaa kuitenkin tätä toimintamallia ja lisää tuotantoa myös jakeluverkkoihin.

Keskitetyssä mallissa sähköenergiaa tuotetaan suuritehoisissa voimalaitoksissa, jotka on kytketty siirtoverkkoon. Ristimäki (2020, s. 3) kuvaa, että voimalaitoksissa tuotettu sähkö siirretään 110 kV–400 kV suurjännitteellä siirtoverkkoa pitkin jakeluverkkoon, josta se etenee kuluttajille. Jakeluverkossa sähköenergiaa siirretään 20 kV keskijännitteellä, jonka jälkeen jännite muunnetaan alemmille jännitetasoille. Keskijänniteverkkoon on mahdollista liittää sekä tuotantoa että kulutusta, ja keskijänniteverkosta jännite muunnetaan pienjännitteiseksi. Suomessa yleisesti käytetään 400 V pääjännitettä, ja muunnos toteutetaan jakelumuuntajilla, jotka sijaitsevat lähellä kulutuspisteitä. Maakaapeliverkossa jakelumuuntajat sijaitsevat yleensä puistomuuntamoissa, rakennusten yhteydessä tai erillisissä muuntamorakennuksissa ja ilmajohtoverkossa tyypillisesti pylväsmuuntamoissa (Ristimäki, 2020, s. 3).

Yleisesti sähköverkot on suunniteltu keskitetyn energiantuotantomallin pohjalta, jolloin sähköenergian on ajateltu virtaavan ainoastaan korkeammalta jännitetasolta alemmalle (Ristimäki, 2020, s. 3). Tällöin tuotantoa on liitettyä vain alue- ja siirtoverkkoon. Kuitenkin uusiutuvan energiantuotannon lisääntyessä yhä enemmän tuotantoa liitetään myös pien- ja keskijänniteverkkoon, jolloin sähköenergian virtaamissuunnat vaihtelevat. Kuva 1 esittää keskitetyn energiantuotannon peruseriaatteen. Nuolilla on kuvattu energian siirtymissuunta ja siirrettävän energian suuruutta. Suurissa voimalaitoksissa tuotettu energia syötetään siirtoverkkoon, josta se siirretään edelleen jakeluverkkoon kuluttajille tai vaihtoehtoisesti suoraan teollisuuden käyttöön.



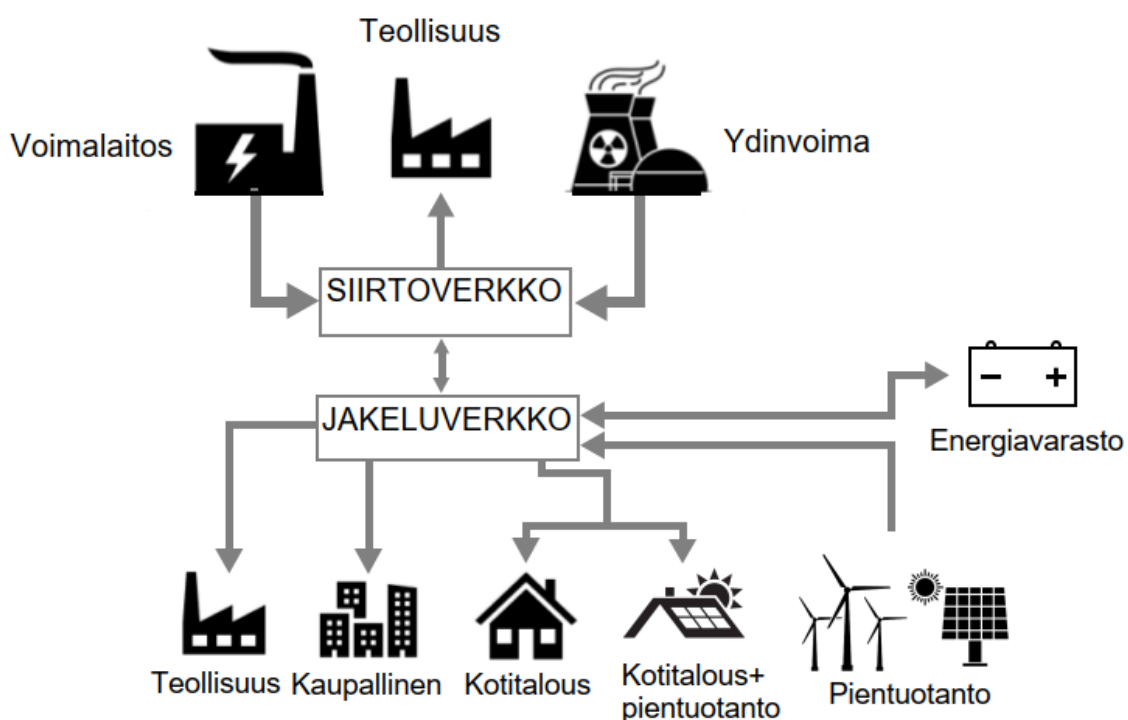
Kuva 1. Keskitetty, perinteinen energiantuotanto. Muokattu kohteesta Ehsan & Yang, 2018.

2.2.2 Hajautettu energiantuotanto

Vastakohtana keskitetylle mallille, hajautettu energiantuotanto käsittää useita pienempiä tuotantoyksiköitä, jotka sijaitsevat lähellä energian kulutuspisteitä. Uusiutuvien energiantuotantolaitteistojen yleistymisen ohjaa sähköntuotantoa kohti

hajautetumpaa rakennetta, jolloin tuotantoa kytkeytyy aiempaa enemmän myös jakeluverkkoihin eri jännitetasoille (Puolakanaho, 2022, s. 13). Tämän seurauksena tuotantolaitteistot ovat hajautettuna sähköverkossa eri jännitetasoille, jolloin sähköenergian virtaussuunnat vaihtelevat.

Hajautetussa mallissa voi syntyä tilanteita, joissa paikallinen tuotanto ylittää kulutuksen. Tällöin sähköenergiaa siirtyy pienjänniteverkosta takaisin keskijänniteverkkoon. Tämä voi aiheuttaa haasteita, koska perinteisiä jakeluverkkoja ei ole alun perin suunniteltu suurten tuotantomäärien liittämiseen pienjänniteverkossa (Piispanen, 2019, s. 14). Kuvassa 2 on esitetty hajautetun energiantuotannon malli. Sähköntuotantoa on liitetty suoraan jakeluverkkoon, minkä seurauksena tehon siirtyminen ei ole enää yksisuuntaista, vaan energian virtaus voi tapahtua molempiin suuntiin.



Kuva 2. Hajautettu energiantuotanto. Muokattu kohteesta Ehsan & Yang, 2018.

Hajautetun energiantuotannon mallissa sähköverkkoon on mahdollista myös kytkeä energiavarastoja (Ristimäki, 2020, s. 4). Energiavarastojen avulla tuotettua

sähköenergiaa voidaan varastoida myöhemmin kulutettavaksi. Esimerkiksi sähköautojen akkujen hyödyntäminen pientuotannon energiavarastona on mahdollista. Myös suuremmat energiavarastoratkaisut ovat yleistymässä jakeluverkkoyhtiöissä.

3 Hajautettu pien- ja mikrotuotanto

Tässä luvussa määritellään ensin mikro- ja pientuotanto, sillä käsitteiden rajaukset vaihtelevat huomattavasti eri lähteissä. Tämän jälkeen tarkastellaan keskeisiä pientuotantomuotoja, ja lopuksi esitetään katsaus pientuotannon nykyiseen laajuuteen Suomessa.

Hajautetulle mikro- ja pientuotannolle on esitetty useita, lähteestä riippuen toisistaan poikkeavia määritelmiä. Sähkömarkkinalain (588/2013) mukaan pienimuotoisella tuotannolla tarkoitetaan voimalaitosta tai voimalaitosten muodostamaa kokonaisuutta, jonka nimellisteho on enintään 2 MVA. Energiateollisuus ry:n verkostosuosituksen YA 9:23 mukaan pientuotannon enimmäisteho on 1 MW, ja mikrotuotantolaitoksella tarkoitetaan sähköntuotantolaitosta, jonka ensisijaisena tarkoituksena on tuottaa sähköä kulutuskohteeseen (YA 9:23). Standardissa SFS-EN 50438 mikrotuotantolaitoksen enimmäistehoksi määritetään 11 kW.

Sähkön pientuotantoa kutsutaan myös esimerkiksi termeillä hajautettu pientuotanto, mikrotuotanto ja pienimuotoinen tuotanto kuten Sandell (2021, s. 12) on tutkimuksessaan todennut. Tässä työssä asian yksinkertaistamiseksi kutsutaan molempia hajautettua pien- ja mikrotuotantoa hajautetuksi pientuotannoksi.

3.1 Aurinkovoima

Energiaviraston (2021) artikkelissa todetaan, että aurinkovoima on yksi nopeimmin kasvavista hajautetun energiantuotannon muodoista. Lukumäärällisesti suurin osa jakeluverkkoon kytketystä pientuotannosta onkin aurinkovoimaa. Aurinkoenergiasta voidaan tuottaa lämpö- ja sähköenergiaa, mutta tässä työssä keskitytään aurinkopaneelien tuottamaan sähköenergiaan.

Aurinkovoima perustuu aurinkopaneeleihin, jotka muuttavat auringon säteilyenergian suoraan sähköenergiaksi. Aurinkovoiman suurimpia haasteita on tuotannon vaihtelu, sillä sen tuottamaan tehoon vaikuttavat suoraan vuodenaika, vuorokaudenaika sekä sääolosuhteet. Nämä vaikuttavat aurinkopaneelille saapuvan aurinkosäteilyn määrään ja näin ollen tuotetun sähköenergian määrään (Ristimäki, 2020, s. 6).

Aurinkosähköjärjestelmien hankintahintojen pienentyminen ja parempi saatavuus ovat kasvattaneet järjestelmien määrää myös Suomessa. Aurinkosähköjärjestelmien lisääntyessä on tärkeää huomioida sen vaikutukset sähköjärjestelmään (Puolakanaho, 2022. 57).

3.2 Tuulivoima

Toinen merkittävä hajautetun pientuotannon muoto on tuulivoima. Tuulivoimalan toiminta perustuu tuulen kineettisen energian muuttamiseen pyörimisenergiaksi. Tuulivoimalan turbiiniin kiinnitetyt lavat pyörivät tuulen kineettisen energian avulla, jolloin pyörimisenergia voidaan muuttaa generaattorilla sähköenergiaksi. Tuulivoimalan tuottama teho on suoraan verrannollinen niin tuulen nopeuteen kuin lapojen pyyhkäisyypinta-alaan (Sandell, 2021, s. 13; Ristimäki, 2021, s. 11).

Sandell kertoo (2021, s. 13), että pientuulivoimaksi lasketaan yleensä nimellisteholtaan alle 50 kW tuotantolaitokset. Yleensä tämän kokoisia tuulivoimaloita käytetään maatalouksissa ja teollisuudessa. Muutaman sadan tai tuhannen watin tehoisia tuulivoimaloita asennetaan yleensä mökkien tai kiinteistöjen yhteyteen. Suuremmat, nimellisteholtaan noin 3–4 MW, yksittäiset tuulivoimalat ovat yleensä osana tuulivoimapuistoa, joiden kokonaistehot voivat olla yli 100 MW. Näitä tuulivoimapuistoja ei voi enää siis laskea pientuotannoksi (Ristimäki, 2021, s. 11).

Yleisin pientuulivoimalan asennuskohde on mökillä, joka ei ole yhteydessä jakeluverkkoon. Yleensä pientuulivoimaa käytetäänkin vain omaan tuotantoon, kuten

akkujen lataukseen, lämmitysenergian tuottamiseen ja suoraan sähköntuotantoon omassa sähköverkossa (Tuomi, 2024).

3.3 Vesivoima

Vesivoimalan toiminta perustuu vesimassojen potentiaalienergiaan ja tämän energian talteenottoon, kun virtaavaa vettä juoksutetaan turbiinin läpi. Esimerkiksi jokia patoamalla voidaan varastoida veden potentiaalienergiaa. Kun vesi pudotetaan korkeammalta tasolta matalammalle, muuttuu ensin potentiaalienergia liike-energiaksi. Tämän jälkeen voidaan liike-energia muuttaa pyörimisenergiaksi turbiinin avulla, minkä jälkeen turbiini pyörittää generaattoria ja energia muutetaan sähköenergiaksi. (Sandell, 2021, s. 15; Ristimäki, 2021, s. 13).

Pientuotannon vesivoimalat voidaan jakaa kahteen luokkaan, minivesivoimaloihin ja pienvesivoimaloihin. Sandellin mukaan (2021, s. 15) minivesivoimalan nimellisteho on alle 1 MW ja pienvesivoimalan nimellisteho 1–10 MW. Toisaalta Ristimäki määrittelee pienvesivoimalat nimellisteholtaan 10 kW-30 MW kokoisiksi. Kuitenkin huomataan, että pienvesivoimaloiden nimellistehot ovat huomattavasti suurempia, kuin esimerkiksi aurinkovoimaloissa. Vesivoiman etuihin kuuluu sen kyky tuottaa tasaisesti energiaa, mikä tekee siitä luotettavan ja ennustettavan energialähteen.

3.4 Muut

Muita pientuotannon tyyppisiä ovat pien-CHP (Combined Heat and Power) -laitokset ja polttokennoihin perustuvat laitokset. Myös verkkoon liitettyjä energiavarastoja voidaan pitää hajautetun pientuotannon kohteina. CHP-laitokset perustuvat lämmöntuotantoon polttoprosessilla. Tuotettu lämpöenergia voidaan muuttaa edelleen sähköenergiaksi generaattorin avulla. Polttokennossa polttoaineen, kuten vedyn tai maakaasun, sekä hapettimen kemiallinen energia muutetaan lämpö- ja sähköenergiaksi (Piispanen, 2019, s. 14).

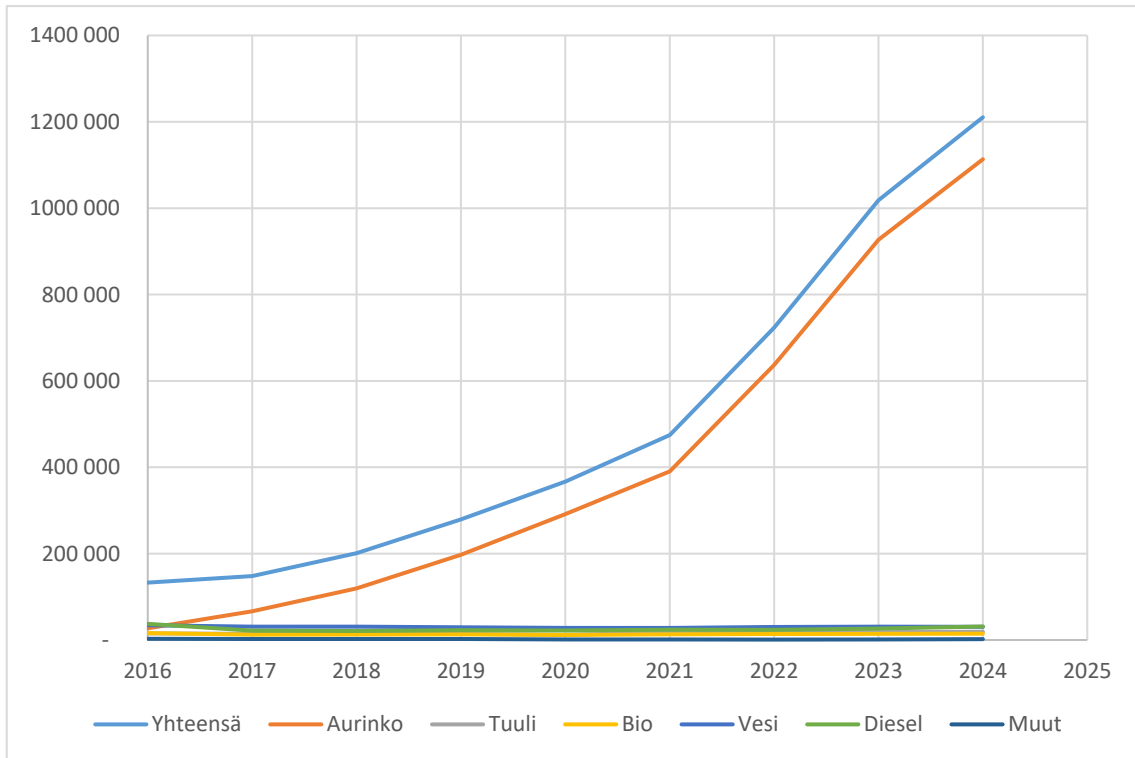
3.5 Hajautettu pientuotanto Suomessa

Sandell kertoo (2021, s.25), että sähköverkkoon liitetyn pientuotannon määrä Suomessa on vähäistä verrattuna sähköntuotannon kokonaiskapasiteettiin. Energiaviraston käyttämän määrittelyn mukaisesti pientuotannoksi luetaan nimellisteholtaan alle 1 MW tuotantolaitteistot. Suomen sähköverkkoon liitettyä sähköntuotantokapasiteettia Energiaviraston (2019) mukaan on yli 17 500 MW. Taulukossa 1 on esitettynä jakeluverkkoon liitettyjen pientuotantoyksiköiden nimellistehot vuosina 2020–2024. Näiden tietojen perusteella vuonna 2021 vain noin 2,7 % kokonaistuotannosta on ollut peräisin pientuotantolaitoksista.

Taulukko 1. Suomen sähköjakeluverkkoon liitettyjen pientuotantoyksiköiden nimellistehot vuosina 2020–2024. Pientuotanto kW (nimellisteholtaan alle 1 MW tuotantoyksiköt) (Energiavirasto, 2025).

Vuosi	Yhteensä	Aurinko	Tuuli	Bio	Vesi	Diesel	Muut
2020	366 561	291 446	11 781	11 740	28 019	22 183	1 392
2021	474 467	390 381	17 815	12 969	28 075	23 996	1 232
2022	723 261	637 078	17 770	13 804	30 232	23 400	978
2023	1 018 217	926 869	18 498	14 165	31 032	26 455	1 198
2024	1 210 473	1 113 234	19 148	14 441	30 549	31 119	1 983

Taulukon 1 tietojen perusteella huomataan, että pientuotannon määrä on suuressa kasvussa. Vuoteen 2020 verrattuna pientuotannon kokonaisnimellisteho on kasvanut 230,2 %. Näistä tuotantomuodoista aurinkoenergian kapasiteetti on kasvanut huomattavasti eniten, noin 820 MW viiden vuoden aikana. Myös tuulivoiman kapasiteetti on kasvanut yli 60 %, mutta sen osuus kokonaispientuotannosta on vielä pientä. Kuva 3 havainnollistaa tilannetta vielä paremmin, siitä huomataan, että kokonaismäärä on lähes täysin aurinkovoimasta peräisin.



Kuva 3. Suomen sähkönjakeluverkkoon liitettyjen pientuotantoyksiköiden nimellistehot vuosina 2016–2024. Pientuotanto kW (nimellisteholtaan alle 1 MW tuotantoyksiköt) (Energiavirasto, 2025).

4 Jakeluverkon mitoitus

Tämän luvun tarkoituksena on selvittää, miten jakeluverkon mitoitus tapahtuu ja mitä vaikuttavia tekijöitä siihen on.

Sähkönjakeluverkkojen suunnittelu muodostuu monista eri tehtävistä ja suunnittelun aikajänne voikin olla jopa kymmeniä vuosia. Kaikissa suunnitteluvaiheissa tavoitteena on löytää sellainen teknisesti toimiva ratkaisu, jonka pitkän aikavälin kokonaiskustannukset ovat mahdollisimman pienet (Lakervi & Partanen, 2008, s. 63). Tästä syystä jakeluverkon mitoittaminen on teknistaloudellinen haaste, jossa on huomioitava teknisestä näkökulmasta johtojen kuormitettavuus, jännitteenalenema, oikosulkukestoisuus ja standardin SFS 6000-8-801 vaatimukset syötön automaattisen poiskytkennän avulla toteutettavasta suojauksesta. Taloudellisesta näkökulmasta on huomioitava kuormitusten kehittyminen tulevaisuudessa, investointikustannukset ja käyttökustannukset.

Olemassa olevan verkon kuormitettavuuden riittävyys voidaan tarkistaa, kun tiedetään johdinten pituus ja sähköiset ominaisuudet sekä suojalaitteiden toimintavirrat ja -ajat, johtolähdön kuormitusten tyypit, huipputehot sekä kuormitusten kasvuprosentit (Hakala, 2014, s. 17). Jakeluverkon mitoitus aloitetaan kuormitusprofiilien ja kuormitusten kehittymisen analysoinnilla, jotta voidaan määrittää tarvittavat huipputehot. Kuormitusanalyysi auttaa varmistamaan, että jakeluinfrastruktuuri pystyy vastaamaan tehotarpeeseen.

4.1 Jakelumuuntajan mitoittaminen

Jakelumuuntajan mitoituksen lähtökohtana on selvittää sen syöttävän pienjänniteverkon kuormituksen eli huipputehon suuruus (Simonen, 2006 s. 54). Yleensä huipputeho saadaan selvitettyä verkkotietojärjestelmästä, joka laskee muuntopiiriin kytkettyjen

käyttöpaikkojen kuormitusmallien perusteella huipputehon. Kun huipputeho on saatu selville, voidaan arvioida jakelumuuntajan kuormitettavuutta.

Muuntajan normaali käyttöikä perustuu jatkuvaan nimelliskuormitukseen +20 °C jäähdytyslämpötilassa, jolloin eristeet vanhenevat normaalilla nopeudella. Käytännössä kuormitus vaihtelee, ja kevyen kuorman aikana vanheneminen hidastuu. Tämän vuoksi muuntajaa voidaan hetkellisesti kuormittaa nimellisteho suuremmalla teholla, kunhan kuormitus ei ylitä 1,5-kertaista nimellisteho (Verkostosuositus, SA 2:92). Jakelumuuntajien mitoittamisessa tulee lisäksi huomioida niiden aiheuttamat häviökustannukset (Simonen, 2006 s. 54).

4.2 Pienjänniteverkon suunnittelu

Pienjänniteverkon suunnittelutehtävä perustuu useimmiten yksittäisen sähköntarvitsijan verkkoon liittämiseen, uudisrakennusalueen sähköistämiseen tai olemassa olevan verkon kunnossapitotöistä. Useimmiten jakeluverkon suunnittelu kohdistuu suureen osaan muuntopiiriä, jolloin ei voida rajoittua pelkästään johtimen mitoittamiseen, vaan myös verkkomuotovaihtoehtoja tulisi vertailla. Etenkin keskijänniteverkko pyritään silmukoimaan, mutta myös pienjänniteverkon runkojohtojen silmukoimista tulee pohtia, sillä vikatilanteissa jakorajojen muuttamisella voidaan viat rajata koskettamaan mahdollisimman pientä osaa kuluttajista (Lakervi, Partanen s. 163).

Pienjänniteverkossa mitoitetaan runko- ja liittymisjohdot sekä suojalaitteet. Johdon sähköinen kuormitettavuus määräytyy suurimmasta johdolle sallittavasta lämpötilasta (Hakala, 2014, s. 17). Johdon ylikuumeneminen vahingoittaa sen eristeitä ja heikentää johdin materiaaleja. Pienjänniteverkossa johdoilla on myös vaatimukset syötön nopeasta poiskytkennästä. Vikatilanteessa suojauksen on kytkettävä syöttö nopeasti ja automaattisesti pois.

Uutta kaapelia suunniteltaessa kiinnitetään eniten huomiota sopivimman poikkipinnan valintaan käytettävistä kaapelityypeistä. Mitoituksessa joudutaankin yleensä valitsemaan kahden eri poikkipinta-alan omaavan kaapelin väliltä taloudellisin vaihtoehto. Tämä valinta toteutetaan määrittämällä rajateho, jota suuremmilla tehoilla suurempi poikkipintaisen, mutta kalliimman poikkipinnan käyttäminen käyttökustannuksien osalta on järkevämpää. Tämän takia teho- ja energiahäviöiden huomioon ottaminen mitoitusprosessissa lisää merkittävästi sen tarkkuutta (Lakervi & Partanen, 2008, s. 163).

Kaapelityypeille on määritelty asennustavan mukaiset suurimmat sallitut kuormitusvirrat normaalissa käyttötilanteessa sekä oikosulkukestoisuudet yhden sekunnin arvona (Hakala, 2014, s. 17). Taulukossa 2 on esitettyä yleisesti käytettyjen AXMK-kaapelien sähköisiä arvoja ja kuormitettavuuksia.

Taulukko 2. AXMK-kaapelien sähköisiä arvoja (Muokattu kohteesta Prysmian Group AXMK-PLUS 0,6/1 kV Datalehti, 2025).

Kaapelin tyyppi			AXMK PLUS 4G25 1 kV	AXMK PLUS 4G50 1 kV	AXMK PLUS 4G120 1 kV	AXMK PLUS 4G185 1 kV	AXMK PLUS 4G240 1 kV
Sähköisiä arvoja							
Vaihe- ja PEN-johtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	1,20	0,641	0,253	0,164	0,125
Vaihe- ja PEN-johtimen vaihtovirtaresistanssi	johdin 65°C	Ω/km	1,5	0,77	0,31	0,20	0,16
Induktanssi vaihetta kohti		mH/km	0,28	0,28	0,26	0,26	0,25
Käyttökapasitanssi		μF/km	0,28	0,29	0,25	0,28	0,27
Kuormitettavuus [A]							
Asennustapa D	johdin 65°C		100	150	255	330	375
Asennustapa E	johdin 90°C		810	122	220	291	343
	johdin 70°C		101	152	274	361	425
Terminen oikosulkukestoisuus [kA]							

Suurin sallittu 1 sekunnin oikosulkuvirta	vaihe- ja PEN-johdin	2,4	4,8	11,4	17,5	22,6
---	----------------------	-----	-----	------	------	------

Kaapelin suurin sallittu kuormitusvirta voidaan laskea mitoitusstehon avulla kaavasta,

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{\sqrt{3}U_N \cos \varphi}, \quad (1)$$

jossa P_{max} on mitoitussteho, U_N on pääjännite ja $\cos \varphi$ on kuorman tehokerroin.

Vikatilanteessa oikosulkuvirran tulee pysyä käytettävän kaapelin maksimioikosulkuvirtaa pienempänä, mutta sen tulisi olla riittävän suuri, jotta syötön nopea poiskytkentä toimisi ja suojalaitteet pystyisivät erottamaan sen normaalitilan kuormitusvirrasta (Hakala, 2014, s. 18)

4.3 Runkokaapelin mitoitus

Runkokaapeleina käytetään yleisesti jakeluverkkoyhtiöstä riippuen AXMK 4x120S – AXMK 4x300S kaapeleita. Runkokaapelilla tarkoitetaan maakaapelia, joka syöttää muuntopiiriin jakokaappeja (Verkostosuositus SA, 2:21). Se lähtee jakelumuuntamosta ja voi jatkua jakokaapilta toiselle ja päättyy joko päättyvään jakokaappiin tai jakorajaan. Kaapelien kuormitettavuuksia määrättäessä pyritään sen vanhenemisnopeus pitämään normaalina. Taulukon 3 mukaisesti kuormitettavuus riippuu pääosin asennuksen olosuhteista. Asennustapa D tarkoittaa asennusta umpinaiseen johtokanavaan tai putkeen maassa, ja asennustapa E kaapelin asennusta vapaasti ilmaan.

Poikkeuksellisissa tilanteissa palonkestävälle kaapelille voidaan määrittää hätäkuormitettavuus. Poikkeuksellisia tilanteita ovat yleensä kaapeliviat, jolloin vian aiheuttamat haitat pyritään jakorajoja muuttamalla pitämään mahdollisimman pieninä. Tällöin joidenkin runkokaapelien kuormitusvirrat nousevat ja saattavat nousta suurimman sallitun kuormitettavuuden yli. Kuitenkin hätäkuormitustilanteiden määrä

tulisi pitää pienenä sillä kaapelin käyttöikä pienenee aina kun kuormituksesta aiheutuva lämpötila kasvaa yli sallitun (Verkostosuositus, SA:21).

Jakeluverkon runkokaapelit asennetaan yleisesti siten, että sen ylikuormituksesta ei aiheudu vaaraa. Tällöin ylikuormitussuojausta ei vaadittaisi. Kuitenkin jakeluverkossa käytetään standardin SFS-EN 60269 mukaisia gG-sulakkeita, jotka toimivat sekä ylikuormitus- että oikosulkusuojana. Runkojohdoille määritetään yleensä poikkipintakohtaiset oikosulkusuojasulake arvot, jotka yleensä ovat ylikuormitussuojasulakkeita yhden portaan suuremmat (Verkostosuositus, SA:21).

Taulukko 3. Runkokaapelien suurimmat sallitut tai suositellut ylivirtasuojat. (Muokattu kohteesta Verkostosuositus, SA:21).

Kaapelityyppi	Ylikuormitussuoja	Oikosulkusuoja		
		Liittymisjohdoille		Runkojohdolle
	Kuluttajan pääsulake (I_N)	Jakokaapissa/ MMO (I_N)	Runkojohdolla (I_N)	(I_N)
AXMK 300 mm ²	315	400	-	400
AXMK 240 mm ²	315	400	-	400
AXMK 185 mm ²	250	315	-	315
AXMK 120 mm ²	200	250	400 (500)	250

4.4 Liittymiskaapelin mitoitus

Liittymiskaapelilla tarkoitetaan jakeluverkon ja sähköliittymän välistä kaapelia, joka syöttää liittymää. Liittymiskaapeleina käytetään yleisesti uusissa asennuksissa jakeluverkkoyhtiöstä riippuen AXMK 4x25S – AXMK 4x50S kaapeleita. Vanhoissa maakaapeliliittymissä yleisiä käytettyjä kaapeleita on MCMK 3x6+6 - MCMK 3x16+16 ja AMCMK 3x16+16. Tästä syystä mitoituksessa tulee ottaa myös huomioon vanhat kaapelit, jos kokonaan uutta liittymiskaapelia ei asenneta.

Liittymisjohdon poikkipintaa valittaessa tulee huomioida suojausheitojen toteutuminen, jännitteenalenema, jakeluverkkoyhtiön kaapelisuositukset ja johdon kuormitettavuus. Liittymispisteiden huipputehojen määrittämisessä voidaan käyttää verkostosuosituksen tehomitoitustaulukoita, näissä taulukoissa ei kuitenkaan oteta huomioon suunniteltavan kohteen laitevalintoja tai pientuotannon mahdollisuuksia, vaan ne perustuvat historiatietoihin. Kun liittymiskaapelia pyritään mitoittamaan taloudellisin perustein, käytetään mitoitusohjeena Verkostosuosituksen SA 1:87 mukaisia keskiarvohuipputehoja P_{ke} . Taulukossa 4 on esitettyä yleisten asuinrakennuksien pätötehomitoituksen arvoja.

Taulukko 4. Yleisten asuinrakennusten pätötehomitoitus P_{max} pääsulakkeiden avulla. (Muokattu kohteesta Verkostosuositus, SA 4:22)

Liittymän pääsulake (A)	$\Delta U=2\%$ Pätöteho (kW), $\cos\varphi 0,96$	$\Delta U=2\%$ Pätöteho (kW), $\cos\varphi 0,86$	Esimerkkejä asuinrakennuksista
25	17	15	Normaali omakotitalo, lämmin ala < 150 m ² . Sähkölämmitys/ei sähkölämmitys
35	23	21	Normaali omakotitalo, lämmin ala < 150 m ² . Sähkölämmitys/ei sähkölämmitys
50	33	30	Suuri omakotitalo, paritalo, lämmin ala > 250 m ² . Sähkölämmitys/ei sähkölämmitys
63	42	37	Suuri omakotitalo, paritalo, lämmin ala > 250 m ² . Sähkölämmitys/ei sähkölämmitys

Standardissa SFS 6000:2017 on määritelty liittymisjohdon suojausvaatimukset. Oikosulkuvirran minimiarvo pj-liittymän päävarokkeilla tulee olla vähintään 250 A, liittymän pääkeskuksella tulee olla toteutettavissa pääsulakkeiden osalta 5 s laukaisuaika ja ryhmäjohtojen osalta 0,4 s aina 32 A lähtöihin asti. Liittymän rakentaja on vastuussa valitsemaan liittymisjohdon vahvuuden siten, että se ei alenna jakeluverkosta saatavaa

oikosulkuvirtaa tarpeettoman voimakkaasti (Verkostosuositus SA 4:22, Hakala, 2014 s. 19.).

Hakala toteaa (Hakala, 2014 s. 19), että kuormitettavuuden ja suojauksen toimivuuden lisäksi mitoituksessa on huomioitava sähkönlaatuun vaikuttava jännitteenalenema. Liittymiskaapeleiden mitoituksessa tuleekin ottaa huomioon Standardin SFS 50160 asettamat vaatimukset jakelijännitteen ominaisuuksille. Standardin mukaan liittymispisteessä jakelijännitteen ei tulisi normaaleissa käyttöolosuhteissa vaihdella enempää kuin $230 \text{ V} \pm 10 \%$. Kuitenkin monilla jakeluverkkoyhtiöillä on tätä tiukemmat raja-arvot jännitteelle. Jännitteenaleneman likiarvo voidaan määrittää syöttöpisteestä asiakkaan liittymispisteeseen seuraavalla kaavalla,

$$\Delta U'_h = \sqrt{3}l(I_p r + I_q x) \cdot \frac{100\%}{U_N}. \quad (2)$$

5 Hajautetun pientuotannon vaikutus jakeluverkon mitoitukseen

Jakeluverkkoon liitetyn hajautetun pientuotannon määrän kasvaessa, tulee ottaa niiden verkostovaikutukset huomioon. Piispanen kertookin (2019, s. 26), että hajautetun tuotannon lisääminen verkkoon muuttaa keski- ja pienjänniteverkkojen topologiaa sekä asettaa uusia vaatimuksia tehon mahdollisten syöttösuuntien lisääntymisen myötä. Hajautetulla pientuotannolla onkin useita verkostovaikutuksia, jotka tulee ottaa huomioon suunnitteluvaiheessa.

Hajautetun pientuotannon verkostovaikutuksista merkittävimmät mitoitukseen vaikuttavat tekijät ovat muutokset jännitteissä, komponenttien kuormituksissa ja verkon suojauksen toiminnassa. Komponenttitasolla lähinnä jakelumuuntajien kuormituskestoisuus on rajoittavana tekijänä. Suomessa jakeluverkossa on suhteellisen suuri tehonsiirtokyky talven huippukuormien takia, jolloin sähkönlaadulliset haasteet jakeluverkossa tulevatkin ensimmäisenä vastaan (Haakana ja muut, 2021, s. 38). Lisäksi pienjänniteverkkoon kytketyt tuotantolaitteistot vaikuttavat keskijänniteverkkoon Ristimäen (2020, s. 42) tutkimuksen perusteella niin vähän, että pienjänniteverkon rajoitukset tulevat vastaan ennen keskijänniteverkkoa.

5.1 Jännitemuutoksien vaikutus mitoitukseen

Hajautettu pientuotantolaitos käyttäytyy kuten negatiivinen kuormitus. Sähköä tuottaessaan tuotantolaitos nostaa lähellä olevissa verkon osissa jännitettä, koska tuotettu ylimääräinen sähköenergia syötetään jakeluverkkoon. Tämä saattaa nostaa jakeluverkon jännitteen liian korkeaksi. Erityisesti tilanteissa, joissa samaan muuntopiiriin on kytkettynä paljon tuotantoa jännitteet saattavat nousta standardin SFS-EN 50160 asettamien rajojen yläpuolelle. Toisaalta pientuotanto voi etenkin pidemmällä johtolähdöllä tukea jakeluverkon toimintaa, kun se pienentää jännitteenalenemaa. (Ristimäki, 2020, s. 15),

Ristimäen tutkimustuloksista (Ristimäki, 2020, s. 55) huomataan, että on epätodennäköistä, että jäykässä kaupunkiverkossa pientuotannosta aiheutuisi ylijännitteitä tai ylikuormituksia. Kuitenkin tutkimuksessa huomattiin, että haja-asutusalueilla jännitteet nousivat hyvin nopeasti liian korkeiksi. Tämä johtuu siitä, että pidempien johtolähtöjen päässä resistanssit ovat paljon suurempia, jolloin jännitevaikutuskin on suurempi. Myös Haakanan ja muiden tutkimustulosten mukaan (Haakana ja muut, 2021, s. 37) jännitteen nousu on jo nykyisin ollut haaste yksittäisissä maaseutuverkoissa, joissa pitkän johtolähdön perään on asennettu pientuotantolaitteistoja. Tutkimustuloksista huomataan lisäksi, että aurinkosähköjärjestelmät nostavat jakeluverkon jännitettä pienen kuormituksen aikana.

Hajautettua pientuotantoa sisältävissä jakeluverkoissa on Sandellin (2021, s. 40) mukaan jännitteenousun ja ylijännitteen välttämiseksi tutkittu ongelman keskeisyyden ja laajuuden vuoksi useita vaihtoehtoja. Perinteisenä metodina jännitetason hallintaan on käytetty jakeluverkon vahvistamista. Tämä on kuitenkin yleensä hyvin kallis tapa rakentamiskustannuksien takia. Sen takia saatu hyöty ei todennäköisesti vastaa investointikustannuksia, varsinkin jos pientuotannon aiheuttamat jännitevaikutukset ovat satunnaisia. Muita vaihtoehtoja on lois- ja pätötehon säätö, energiavarastojen liittäminen tuotannon tueksi ja jakelumuuntajien varustaminen käämikytkimillä. Näistä keinoista edullisin on pätö- ja loistehon säätö.

Verkostosuosituksen (Verkostosuositus, YA 9:23) mukaan verkkoon liitettävien tuotantolaitteiden suojausasetteluissa suositellaan otettavaksi käyttöön sekä loistehon $Q(U)$ että pätötehon $P(U)$ jänniteriippuvainen säätö. Kuitenkin pätötehon rajoittaminen vaikuttaa suoraan pientuotantolaitteiston kannattavuuteen, joten sitä olisi hyvä välttää, vaikka suuressa osassa tapauksia tuotetun energian kannalta menetykset olisivat hyvin vähäisiä. Useimmissa tapauksissa $Q(U)$ -säädöllä saavutetaan merkittävä parannus tuotantolaitteiden mahdollisiin maksimitehoihin (Puolakanaho, 2022 s. 30, s.54).

Käytännössä siis jakeluverkkoyhtiöiden tulisi määritellä omaan verkkoon sopivat vaatimukset liitäntälaitteistoille, jotta niitä voidaan käyttää jännitteen säätämiseen.

Mitoituksessa tulee huomioida, että suuri määrä samaan muuntopiiriin kytkettyä pientuotantoa voi pakottaa kasvattamaan kaapeleiden poikkipintaa, lyhentämään johtolähtöjen pituutta tai lisäämään uusia jakelumuuntamoita, jotta verkon impedanssi pienenee ja jännitteenousu pysyy sallituissa rajoissa. Esimerkiksi haja-asutusalueella, jossa verkon normaalitilan jännite on jo kuormituksen vuoksi lähellä ylärajaa, usean kiinteistön pientuotantolaitosten kytkeminen verkkoon voi nostaa johtolähdön loppupään jännitteen yli sallittujen rajojen. Suunnittelijan on huomioitava jännitemuutoksien vaikutukset ja valittava eri tilanteissa teknistaloudellisesti tarkoituksenmukaisin ratkaisu.

5.2 Verkon suojauksen toiminnan muutoksien vaikutus mitoitukseen

Perinteisesti jakeluverkon suojaukset on suunniteltu siten, että vikapaikan vikavirtaa syöttää vain yksi piste esimerkiksi sähköasemalla. Hajautettu tuotanto on kuitenkin osallisena syöttämässä vikavirtaa vikatilanteessa ja vikavirtaa syötetään useasta suunnasta (Puolakanaho, 2022 s. 30).

Pientuotantolaitos voi aiheuttaa verkon suojauksen epäselektiivisen laukaisun, mikäli viereinen keskijännite- tai pienjännitelähtö syöttää vikapaikkaa myös vikaan nähden toisen suoja-alueen tai sulakkeen läpi. Nykyisin kuitenkin pienjänniteverkkoon yleisesti liitettyjen tuotantolaitteiden ominaisuuksien perusteella virhelaukaisun todennäköisyys on lähtökohtaisesti pieni (Piispanen, 2019 s. 40).

Tilanteessa, jossa vika ja hajautettu tuotanto sijaitsevat saman sulakkeen takana johtolähdöllä, hajautetun tuotannon syöttämä vikavirta voi aiheuttaa suojauksen sokaistumisen. Hajautetun tuotannon syöttämä vikavirta pienentää taustaverkon syöttämää vikavirtaa, jolloin suojaus ei välttämättä havaitse vikaa eikä viiallisen lähdön syöttö katkea (Puolakanaho, 2022 s. 30). Pienjänniteverkkoon yleisesti liitetyt

invertteriliitännäiset aurinkosähköjärjestelmät ovat yksittäin tarkasteltuna nimellistehoiltaan tyypillisesti liian pienitehoisia aiheuttaakseen suojausten sokaistumista. Suojausten toiminnan hidastumiseen tai sokaistumiseen liittyviä ongelmia voi kuitenkin syntyä tilanteissa, joissa samalle pienjännitelähdölle on liitetty useita pientuotantokohteita. Kooltaan suurimmat, edelleen pientuotannoksi luokiteltavat laitokset liitetään pienjänniteverkossa yleensä omille lähdöilleen, mikä johtuu jo pelkästään liittymän edellyttämästä suuremmasta sulakekoosta (Piispanen, 2019 s. 39).

Edellä esitetyn perusteella voidaankin todeta, että hajautetun pientuotannon vaikutukset jakeluverkon suojausten toimintaan ovat nykyisissä pienjänniteverkoissa pääosin rajallisia, eivätkä ne useimmiten yksinään määrää verkon mitoitus. Vaikutukset voivat kuitenkin korostua tilanteissa, joissa pientuotanto keskittyy samalle lähdölle tai tuotantotehot kasvavat merkittäviksi suhteessa kuormitukseen. Tämän vuoksi suojausten toiminta ja vikavirtojen jakautuminen on huomioitava mitoituksessa erityisesti verkon laajennus- ja muutostilanteissa sekä alueilla, joilla hajautetun tuotannon määrä on suuri.

5.3 Hajautetun pientuotannon liitettävyyden vaikutus jakeluverkkoon mitoituksen kannalta

Hajautetun pientuotannon liitettävyyden vaikutus jakeluverkkoon on yhdistelmä lainsäädännöllisiä velvoitteita ja teknisiä reunaehtoja. Sähkömarkkinalain ja Energiaviraston laintulkinnan mukaan verkonhaltija ei voi lähtökohtaisesti kieltäytyä pientuotannon liittämisestä tai rajoittaa sitä muutoin kuin tilapäisesti verkon vahvistustarpeen vuoksi, ja tällöinkin enintään vahvistamisen edellyttämäksi kohtuulliseksi ajaksi. Verkonhaltijalla on velvollisuus vahvistaa verkkoa tarvittaessa siten, että siirtokyky on riittävä ja verkkoon voidaan liittää asiakkaan tarpeen mukainen määrä tuotantoa (Verkostosuositus, YA 9:23).

Mitoituksen näkökulmasta hajautetun pientuotannon liitettävyyden vaikutus jakeluverkkoon määräytyy sen perusteella, voidaanko tuotantolaitteisto liittää siten, että verkon

suunnittelukriteerit täyttyvät kaikissa olennaisissa käyttö- ja kytkentätilanteissa. Perinteisen mitoittamisen lisäksi onkin huomioitava sekä olemassa olevat että tulevien pientuotantolaitoksien vaikutukset (Ristimäki, 2000, s. 14). Energiategollisuuden verkostosuosituksissa on määritetty jakeluverkkoon liitettävyydelle suunnitteluperiaatteet.

Tuotantolaitteiston tai sähkövaraston käynnistyminen tai verkosta irtoaminen ei saa aiheuttaa mitoitusoikosulkuvirran perusteella liian suurta jännitemuutosta, ja sähkön laadun liittämiskohdassa on pysyttävä normaalitilanteessa standardin SFS-EN 50160 rajoissa. Lisäksi käynnistysvirrat eivät saa ylittää liittymissopimuksen tai verkkopalvelusopimuksen mukaista maksimitehoa vastaavaa virran huippuarvoa, verkossa on oltava riittävästi vapaata kapasiteettia myös poikkeavissa kytkentäjärjestelyissä, ja turvallisuutta varmistavien ehtojen on toteuduttava kaikkien asiakkaiden kannalta (Verkostosuositus, YA 9:23).

Liittymän koko asettaa suoran ylärajan liitettävälle tuotantoteholle. Jos tuotantolaitteisto ylittää olemassa olevan liittymän koon, liittymää on suurennettava. Verkostosuosituksissa on erikseen määritetty yksinkertaistettu kaava invertterikytketyn aurinkosähkötuotannon laskennallisen liitettävyyssrajan määrittämiseksi:

$$\text{Aurinkosähkötuotannon laskennallinen liitettävyyssraja} = I_{k1} \cdot 44 \text{ W/A}, (3)$$

Tämän kaavan avulla on johdettu yleisimmille pienjänniteliittymiin kytkettävän aurinkosähkötuotannon määrä perustuen kunkin liittymäkoon standardinmukaiseen yksivaiheiseen mitoitusoikosulkuvirtaan:

Taulukko 5. Aurinkosähkön liitettävyyden suhteessa mitoitusoikosulkuvirtaan. (Muokattu kohteesta Verkostosuositus, YA 9:23)

Liittymäkoko	Yksivaiheinen mitoitusoikosulkuvirta I_{k1}	Aurinkosähkötuotannon liitettävyyden
3x25A	250 A	11 kW
3x35A	250 A	11 kW
3x63A	320 A	14,1 kW
3x125A	715 A	31,5 kW
3x160A	950 A	41,8 kW

Taulukkoa käytettäessä on huomioitava, että vanhoissa tai kaukana jakelumuuntajasta sijaitsevista liittymistä oikosulkuvirrat voivat olla taulukon arvoa pienempiä, jolloin aurinkosähköä voi liittää pienemmän määrän. Esimerkiksi Ristimäki (2020, s. 59) kertoo, että Tampereen sähköverkon jakeluverkossa haja-asutusalueella sallitaan 3x25A liittymälle 180 A oikosulkuvirta.

Muilla tuotantolaitteistoille voidaan soveltaa kaavaa, jonka mukaan näennäistehon S_N suuruisen tuotantolaitteiston verkkoon kytkeminen voidaan normaalisti sallia, jos liittämiskohdan oikosulkuteho S_k toteuttaa epäyhtälön:

$$S_k \geq 20 \cdot i_{suhde} \cdot S_N, \quad (4)$$

jossa

i_{suhde} = käynnistysvirtakerroin (käytetään esimerkiksi tahtikoneiden kohdalla)

Tämän yhtälön perusteella esimerkiksi 3x25 A liittymälle, jonka oikosulkuvirta on 250 A, voidaan kytkeä tuotantolaitos, jonka suurin sallittu näennäisteho on enintään

$$S_N \leq \frac{S_k}{20}, \quad \frac{S_k}{20} = \frac{3 \cdot U_v \cdot I_{k1}}{20} = \frac{3 \cdot 230 \text{ V} \cdot 250 \text{ A}}{20} \approx \frac{173 \text{ kVA}}{20} \approx 8,65 \text{ kVA}$$

$$\Rightarrow S_N \leq 8,65 \text{ kVA}.$$

Edellä esitettyjä kaavoja ja taulukkoa voidaan hyödyntää arvioimisessa, kuinka suuri tuotantolaitteisto on tyypillisesti mahdollista kytkeä verkkoon ilman erillisiä verkon vahvistustoimenpiteitä. Nämä eivät kuitenkaan ota huomioon, että verkkoon on mahdollisesti aikaisemmin kytketty voimalaitoksia, joilla on jännitettä nostava vaikutus. Tämän vuoksi verkon mitoitus ja tuotannon liitettävyyden on aina varmistettava tapauskohtaisilla tarkasteluilla.

6 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa tarkasteltiin hajautetun pientuotannon vaikutuksia jakeluverkon mitoitukseen. Tavoitteena oli selvittää, miten hajautetun pientuotannon yleistyminen muuttaa jakeluverkon suunnittelun lähtökohtia ja erityisesti mitoitusperiaatteita. Tulokset osoittavat, että hajautetun mikro- ja pientuotannon kasvu asettaa uusia vaatimuksia jakeluverkon mitoitukselle, eikä keskitettyyn tuotantoon ja tehon yksisuuntaiseen siirtymiseen perustuvat perinteiset käytännöt enää vastaa täysin nykyisiä tarpeita. Tämän takia jakeluverkon mitoituksessa vaaditaan uusia lähestymistapoja ja ratkaisuja.

Hajautetun pientuotannon yleistyminen muuttaa pienjänniteverkon mitoituksen lähtökohtia. Perinteisesti keskeinen rajoite on ollut jännitteenalenema, mutta pientuotannon myötä mitoitusta rajoittaa yhä useammin jännitteenousu, jolloin mitoituksen painopiste siirtyy kuormitukseen perustuvasta tarkastelusta yhä enemmän myös tuotantotilanteiden huomiointiin. Verkon huippukuormitustilanne ei siis enää yksiselitteisesti määrää mitoitusta vaan kriittisemmäksi tilanteeksi voi muodostua tilanne, jossa paikallinen kuormitus on vähäistä, mutta tuotanto suurta.

Suunnittelussa on huomioitava hajautetun pientuotannon verkostovaikutukset, joista mitoituksen kannalta keskeisimpiä on jännitetason muutokset, komponenttien kuormitukset ja suojauksen toiminta. Jännitteenousun riski korostuu etenkin haja-asutusalueilla ja pitkien johtolähtöjen päissä, missä verkon impedanssi on suuri. Komponenttitasolla rajoitteeksi voi muodostua jakelumuuntajien kuormitettavuus, vaikka Suomen olosuhteissa tämä on yleensä epätodennäköistä, koska jakeluverkko on mitoitettu talven huippukuormien mukaan. Verkon suojaukseen kohdistuvat vaikutukset nykyisissä pienjänniteverkoissa ovat vähäisiä eivätkä tyypillisesti ole määräävä tekijä mitoituksessa. Vaikutukset voivat kuitenkin korostua, kun pientuotanto keskittyy samalle lähdölle tai tuotantoteho kasvaa suureksi suhteessa kuormitukseen.

Haasteiden ratkaisemiseksi jakeluverkkoyhtiöiden tulee huomioida pientuotannon aiheuttamat verkostovaikutukset osana mitoitus- ja suunnitteluperiaatteitaan. Jännitemuutokset ovat merkittävin tekijä mitoituksen kannalta. Jännitteennousun rajoittamisessa ensisijaisena keinona korostuu loistehon säätö, sillä se mahdollistaa jännitteen hallinnan ilman tuotantolaitoksen pätötehon rajoittamista ja siten ilman suoraa vaikutusta tuotannon kannattavuuteen. Mikäli säätömenetelmät eivät riitä vaatimusten täyttämiseen, verkon vahvistaminen muodostuu vaihtoehtoiseksi ratkaisuksi.

Pienjänniteverkon mitoitus tulee muuttumaan tulevaisuudessa yhä haastavammaksi, sillä pienjänniteverkkojen rooli tulee muuttumaan yhä dynaamisemmaksi sähköautojen latauksen, energiavarastojen ja muiden joustoresurssien yleistyessä. Asiakkaalla voi samassa liittymässä olla sekä suuria kuormituksia että yhä suurempaa tuotantoa, mikä lisää jännitetason vaihtelua ja haastaa perinteisiin mitoitusilanteisiin nojaavan suunnittelun.

Lähteet

- Ehsan A, Yang Q. (2018). *Optimal integration and planning of renewable distributed, generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques*.
Noudettu 15.12.2025
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261917315519>
- Energiavirasto. (2021). *Tilastotietoa Suomen sähköverkoista - Laajemmat tilastotiedot vuosittain (Excel)*. Noudettu 10.1.2026. Saatavilla [Verkkotoiminnan julkaisut | Energiavirasto](#)
- Energiavirasto. (2021). Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti kasvoi 45 prosenttia vuonna 2020 - pientuotantoa lähes 300 megawattia. Saatavilla <https://energiavirasto.fi/-/aurinkosahkon-tuotantokapasiteetti-kasvoi-45-prosenttia-vuonna-2020-pientuotantoa-lahes-300-megawattia>.
- Energiateollisuus ry. (n.d.). *Pienjänniteverkon ja jakelumuuntajan sähköinen mitoittaminen* (SA 2:21). Verkostosuositus. Noudettu 15.12.2025
<https://adatoextra.fi/serve/sa2-21-pienjanniteverkon-ja-jakelumuuntajan-sahkoinen-mitoittaminenpdf>
- Energiateollisuus ry. (n.d.). *Pienjänniteverkon mitoitusohjeet ja -energiat* (SA 1:87). Verkostosuositus. Noudettu 15.12.2025 <https://adatoextra.fi/serve/sa1-87v2>
- Energiateollisuus ry. (n.d.). *Pientuotannon ja sähkövarastojen liittäminen sähkönjakeluverkkoon* (YA 9:23). Verkostosuositus. Noudettu 15.12.2025. [YA-9-23-Pientuotannon-liittäminen-sahkonjakeluverkkoon-paivitetty-20250602-Final.pdf](#)
- Energiateollisuus ry. (2022). *Kaapeloitujen pj-liittymisjohtojen mitoitus ja suojaus*. (SA 4:22) Verkostosuositus. Noudettu 15.12.2025.
<https://adatoextra.fi/serve/sa4-22kaapeloitujenpj-liittymisjohtojenmitoitusjasuojauspdf>
- Haakana, J., Pinomaa, A., Karppanen, J., Tikka, V., Räisänen, O., Haapaniemi, J., Mashlakov, A., & Lassila, J. (2021). *Joustava ja toimintavarma sähkönjakeluverkko - Joustoresurssit käyttötoiminnassa*. LUT-yliopisto. Noudettu 13.12.2025
<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-689-4>.

- Lakervi, E., & Partanen, J. (2008). *Sähkönjakelutekniikka* (3. painos). Gaudeamus Helsinki.
- Partanen, J., Lassila, J., & Haakana, J. (2020). *Sähkönjakeluverkkoliiketoiminnan sääntely ja kehittäminen*. LUT Scientific and Expertise Publications Tutkimusraportit – Research Reports. Noudettu 13.12.2025 <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335618-4>
- Piispanen, A. (2019). *Hajautetun pientuotannon vaikutus käyttötoimintaan*. Diplomityö, Tampereen yliopisto. Noudettu 15.12.2025 <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-201910153881>.
- Prysmian Group. (2025). *AXMK-PLUS 0,6/1 kV*. Web Catalogue. Datalehti
Noudettu 15.12.2025 [https://fi-catalogue.prysmian.com/s/#/family/AXMK-PLUS 0,6-1 kV](https://fi-catalogue.prysmian.com/s/#/family/AXMK-PLUS_0,6-1_kV)
- Puolakanaho, J. V. (2022). *Aurinkosähköjärjestelmien verkostovaikutukset pienjänniteverkossa*. Diplomityö, Vaasan yliopisto. Noudettu 13.12.2025 <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2022062950565>.
- Ristimäki, J. (2020). *Hajautetun pientuotannon vaikutukset jännitteeseen pien- ja keskijänniteverkoissa*. Diplomityö, Tampereen yliopisto. Noudettu 13.12.2025 <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202010207411>.
- Sandell, T. (2021). *Sähkön hajautetun pientuotannon kehitys jakeluverkoissa ja vaikutukset verkon käyttöön*. Diplomityö, Aalto-yliopisto. Noudettu 13.12.2025 <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202106207547>.
- Simonen, M. (2006). *Sähkönjakeluverkon suunnitteluperusteet*. Diplomityö, Lappeenrannan yliopisto. Noudettu 19.12.2025 <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201501031007>.
- Suomen valtioneuvosto. (2017). *Hajautetun uusiutuvan energiantuotannon potentiaali, kannattavuus ja tulevaisuuden näkymät Suomessa*. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja, 5/2017. Saatavilla <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-332-3>.
- Tuomi, T. (2024). *Yleistä pientuulivoimasta*, artikkeli, Lähienergia. Noudettu 19.12.2025 <https://lahienergia.org/yleista-pientuulivoimasta/>