

Jukka Johansson

YLEISTYVÄN PIENTUOTANNON JÄNNI- TEVAIKUTUKSET SÄHKÖVERKOSSA JA VERKKOYHTIÖN KORJAAVAT TOI- MENPITEET

Diplomityö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Sami Repo
Pertti Pakonen
Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Jukka Johansson: Yleistyvän pientuotannon jännitevaikutukset sähköverkossa ja verkkoyhtiön korjaavat toimenpiteet

Diplomityö

Tampereen yliopisto

Sähkötekniikan DI-tutkinto-ohjelma

Toukokuu 2022

Yleistyvän pientuotannon odotetaan tuovan ongelmia jännitetasossa ja nopeissa jännitteen muutoksissa. Elenialle tehdyissä diplomitöissä on käytännössä päästy toteamaan ongelman syntyminen, mutta korjaavia toimenpiteitä ei ole esitetty. Työn tarkoituksena oli päivittää tarkastelutapaa tuotannon liittämisen ja päivittää sähköverkon mitoitusohjetta niiden osalta. Työssä oli tarkoitus esitellä erilaisia korjaustoimenpiteitä jännitteen laadun korjaamiseksi ja valita niistä sovat verkkoyhtiön käyttöön.

Työn alussa kerrottiin, minkä takia pientuotanto on yleistymässä, ja minkälaisia vaikutuksia tuotantolaitteistoilla on jännitteen laatuun. Alkuun esiteltiin myös nykyinen prosessi tuotannon liittämistarkasteluissa, ja minkä takia tähän malliin olisi hyvä saada muutoksia.

Jännitteen laadun korjaustoimenpiteitä löydettiin useita, jotka jaettiin pehmeisiin ja koviin keinoihin. Pehmeät keinot eivät vaadi suurta alkuinvestointia, ja ne ovat usein aktiivisia säätömenetelmiä. Tulevaisuuden sähköverkossa tulee olla joustoa sääriippuvan tuotannon yleistymässä, jota saadaan pehmeiden keinojen myötä. Kovat toimenpiteet ovat perinteisiä investointeja, joilla tehdään verkosta vahvempaa parantamalla sähköisiä arvoja.

Tutkimusosuudessa tarkasteltiin tyypillisiä ongelmia aiheuttavia verkkokohteita ja niihin pyrittiin löytämään kustannustehokkaat ratkaisut teknistaloudellisen analyysin myötä. Kohteiksi valikoitui pienjänniteverkon laskentadatan perusteella heikon verkon liittymä, yksittäinen suuri tuotantoyksikkö ja ylikuormitettu muuntopiiri.

Tarkasteluiden myötä saatiin päivitettyä nykyistä mallia tuotannon liittämistarkasteluissa ja kehitysehdotuksia nopeiden jännitteenmuutosten tarkasteluihin. Näiden uudistusten myötä tuotannon liittämistä tarkastellaan kokonaisvaltaisemmin ja investointeja saadaan vähennettyä. Uuden laskentamallin soveltuvuutta tulee tarkastella vielä jatkotutkimuksissa. Tulevaisuudessa verkosta tullaan saamaan paremmin dataa uusien sähkömittareiden myötä ja ymmärrys tuotannon verkko-vaikutuksista paranee.

Avainsanat: hajautettu tuotanto, aurinkosähkö, sähköverkko, jännitteen laatu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Jukka Johansson: Voltage effects in the distribution grid caused by residential energy production and actions to improve distribution grid voltage stability

Master's thesis

Tampere University

Master's degree on Electrical Engineering

May 2022

Small scale energy production, especially residential solar PV is becoming more common, and it's expected to cause problems in voltage quality. Few theses have been made to Elenia, but they have basically stated the problems. The object of this thesis was to update the policy of connecting residential solar PV to the distribution grid. Also presenting the actions to improve voltage quality for distribution company was intended.

The reasons why residential PV is becoming more common and issues occurring from high penetration of residential PV were presented at the beginning of the thesis. The current model of inspecting a new grid connected PV system and the problems of the model were also presented.

Many solutions to improve voltage quality were found and they were divided to soft and hard means. Soft means are usually actively adjusting to the voltage profile, and they don't require big initial investments. Future grid likely needs soft means to adjust the grid as the weather dependent electricity production takes larger share of total production. More traditional way to improve network stability is strengthening the distribution grid by installing parallel cables for example.

The research part of the thesis consists of technical-economic analysis of typical prosumer customers in Elenia's distribution grid. Different kind of soft and hard means were applied to fix voltage problems in different cases to find best solutions for a distribution company.

As the result of the thesis a new model for checking the grid connectivity of a new solar PV system was presented. Also, improvements to the current model of inspecting voltage fluctuations were explained. These results reduce the needs to strengthen the network at many cases and therefore offer economical surplus compared to the current model. Thesis presents a new solution to evaluate rapid voltage fluctuations, but the suitability of the method must be studied after the thesis. Next generation smart meters offer more data from the distribution grid and the understanding from the effects of residential PV gets better.

Keywords: distributed energy production, solar PV, distribution grid, voltage quality

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Elenia Oy:lle. Työn tarkastajina toimivat Tampereen yliopiston puolelta professori Sami Repo ja tohtori Pertti Pakonen. Elenian puolella ohjaajana toimi suunnittelupäällikkö Erno Leväniemi. Haluaisin kiittää etenkin Ernoa hyvistä keskusteluista aiheen parissa ja kannustuksesta alusta loppuun asti. Kiitän myös muita Elenian henkilöitä, joilta olen saanut apua ja dataa työn tekemiseen. Lisäksi haluan kiittää Eleniaa mielenkiintoisesta aiheesta ja mahdollisuudesta tehdä diplomityö.

Suuret kiitokset kuuluvat myös opiskelutovereilleni, joilta sain apua ja joiden kanssa vietin pitkiä iltoja opintojeni aikana harjoitustehtävien ja muiden suoritteiden parissa.

Tampereella, 25.5.2022

Jukka Johansson

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SÄHKÖN JAKELU JA LAATU	3
2.1 Sähkönjakelujärjestelmä	3
2.1.1 Hajautettu tuotanto.....	4
2.1.2 Pienjänniteasiakkaat	6
2.2 Sähkön laatu ja verkostosuunnittelu sekä VTJ-laskenta.....	9
2.2.1 Sähkön laatu.....	9
2.2.2 Yliaallot	12
2.2.3 Jännitteenmuutokset.....	15
2.3 Nykyinen prosessi tuotannon liittämässä	20
3. MENETELMÄT JÄNNITTEEN LAADUN KORJAAMISEEN	22
3.1 Pehmeät toimenpiteet jännitteensäätöön.	22
3.1.1 Inverterin lois- ja pätötehon säätö	22
3.1.2 Käämi – ja väliottokytkin sekä jännitteensäätömuuntaja.....	27
3.1.3 Kulutusjousto	30
3.1.4 Verkkotopologian muuttaminen.....	32
3.2 Kovat toimenpiteet jännitteensäätöön	34
3.2.1 Verkon vahvistus.....	34
3.2.2 Kompensointilaitteet.....	36
3.2.3 Energiavarastot.....	37
4. MENETELMIEN SOVELTUVUUS ERILAISIIIN TUOTANTOKOhteisiin	39
4.1 Liittymien luokittelu verkkodatan perusteella	40
4.2 Tarkasteltavien kohteiden valinta	43
4.3 Kohdetarkastelut.....	45
4.3.1 Tyypillinen heikon ilmajohtoverkon liittymä.....	45
4.3.2 Saneeraukseen tuleva heikon ilmajohtoverkon liittymä	50
4.3.3 Yksittäinen suuri tuotantoliittymä.....	53
4.3.4 Ylikuormitettu muuntopiiri.....	57
5. TUOTANNON LIITETTÄVYYSTARKASTELU JA VERKON VAHVISTUSTOIMENPITEIDEN VALINTA.....	64
5.1 Tuotannon liittämisen prosessi verkon suunnittelussa	64
5.2 Verkon vahvistustoimenpiteiden valinta.....	68
6. YHTEENVETO.....	71
LÄHTEET	74

LYHENTEET JA MERKINNÄT

<i>EV</i>	<i>Energiavirasto, työssä käytetään EV:n yksikkö hinnastoa, joka perustuu verkkoyhtiöiden keskimääräisiin kustannuksiin</i>
<i>KJ</i>	<i>keskijännite</i>
<i>kV</i>	<i>kilovoltti, jännitteen yksikkö</i>
<i>kVA</i>	<i>kilovolttiampeeri, näennäistehon yksikkö</i>
<i>kWh</i>	<i>kilowattitunti, energian yksikkö</i>
<i>PJ</i>	<i>pienjännite</i>
<i>VJT</i>	<i>verkkotietojärjestelmä</i>
<i>E</i>	<i>energia</i>
<i>I</i>	<i>virta</i>
<i>I_k</i>	<i>oikosulkuvirta</i>
<i>P</i>	<i>pätöteho</i>
<i>Q</i>	<i>loisteho</i>
<i>S</i>	<i>näennäisteho</i>
<i>S_k</i>	<i>oikosulkuteho</i>
<i>U</i>	<i>jännite</i>

1. JOHDANTO

Yhteiskunnan lisääntyvä energiariippuvuus kasvattaa sähkön tarvetta ja merkitystä. Samaan aikaan huolet ilmastonmuutoksesta ja sitä myötä poliittiset päätökset ajavat perinteistä fossiilista tuotantoa alas. Puuttuva tuotantokapasiteetti tulee luonnollisesti korvata vaihtoehtoisilla ratkaisuilla, joita tällä hetkellä ovat pääosin tuuli- ja aurinkovoima. Sääriippuvaiset tuotantomuodot muodostavat toisenlaisia ongelmia, kuten yllättävistä teho- vaihteluista aiheutuvia jännitteenmuutoksia. Sähkö on tavalliselle kuluttajalle käytännössä tuote, jolle on yleisissä standardeissa määritelty vaatimukset, jotka verkkoyhtiön tulee täyttää. Aiemmin ongelmana on ollut liian alhainen jännitteen arvo jakeluverkon päättävillä haaroilla. Tulevaisuudessa loppuasiakkaat toimivat useammin myös tuottajina, jolloin jännitteen nousu saattaa olla rajoittava tekijä.

Työn tavoitteena on löytää kustannustehokkaita vahvistustoimenpiteitä, jotka soveltuvat käyttöön verkkoyhtiötasolla. Tavoitteena on myös saada mitoituslaskentaan tarvittavat lähtöarvot, kuten esimerkiksi arvio rinnakkaisten tuotantoliittymien aiheuttamille tehonmuutoksille. Uusien lähtötietojen myötä tavoitteena on nykyisen laskentamallin kehittäminen ja uuden mallin esittäminen. Työn tarkoituksena on edellä kuvattujen keinojen myötä järkevöittää pientuotannon liittämistä aiheutuvia verkostoinvestointeja.

Tässä työssä on tarkoitus taustoittaa ongelmaa asiakkaiden kulutustottumusten ja kausiluontoisen tuotannon osalta. Luvussa 2 esitetään pientuotannon vaikutuksia sähkön laatuun ja nykyisiä suunnitteluperiaatteita. Sähkön laadusta kerrotaan sekä yliaalloista että jännitteen muutoksista. Työn kannalta merkittävimmät ovat jännitteen nopeat muutokset ja jännitteen nousu.

Pohjatuksen jälkeen esitetään erilaisia jännitteensäätökeinoja. Pehmeät keinot ovat niimensä mukaisesti ratkaisuja, jotka eivät vaadi merkittäviä investointeja kuten verkostokomponenttien vaihtoja. Tällaisia ovat esimerkiksi kulutusjousto, tuotannon leikkaaminen ja loistehon säätö. Kovia keinoja voisivat olla esimerkiksi ilmajohtoverkon saneeraaminen kaapeliverkoksi tai muuntajakoneen vaihto. Luvussa esitetään keinojen toiminnallisuutta ja millaisiin tilanteisiin ne ovat sopivia. Jännitteen nousua parantavat keinot eivät

aina korjaa nopeisiin jännitteenmuutoksiin liittyviä ongelmia, joten tuotannon liittämistä rajoittava tekijä on aina selvitettävä.

Kohdetarkasteluihin valittiin tyypillisiä tuotantoliittymiä, jotka ovat vaatineet toimenpiteitä. Kohteet pyrittiin valitsemaan siten, että niihin soveltuisivat erilaiset korjaustoimenpiteet. Tarkastelun tueksi tehdään teknistaloudellista laskentaa, jonka perusteella voidaan antaa ehdotuksia operatiivista tekemistä varten. Teknisen laskennan osuudessa kerrotaan laskentaan tarvittavat lähtötiedot ja laskentaparametrit. Laskennan toimivuutta täytyy arvioida kuitenkin kriittisesti, sillä tuloksia ei ole tarkasteltu muilla simulointiohjelmilla tai todellisilla mittauksilla.

Työn tulosten perusteella tehtiin uusi tarkasteluprosessi pientuotannon liittämistä varten, ja nykyiseen malliin esitetään kehitysehdotuksia. Uuden mallin myötä tuotannon liittämistä tarkastellaan kokonaisvaltaisemmin, ja kehitysehdotuksilla on saavutettavissa rahallista hyötyä. Käytettävissä olevat vahvistustoimenpiteet asetetaan järjestykseen kustannustehokkuuden perusteella.

Yhteenvedossa kootaan työn keskeiset tulokset ja avoimet kysymykset. Jatkotutkimuskohteet esitetään perustellusti ja tulevaisuuden ongelmakohdat ja näkymät nostetaan esille.

2. SÄHKÖN JAKELU JA LAATU

Ilmastonmuutos on saanut energia-alalle suuria muutoksen tarpeita, jotka koskettavat kaikkia osapuolia ympäri maailmaa. Yleinen energiantarve on kasvussa, ja öljyn sekä muiden fossiilisten energiamuotojen roolia pyritään pienentämään erinäisillä direktiiveillä ja säädöksillä. Tulevaisuudessa perinteisen tuotannon karsimisen aiheuttama kapasiteettivaje täytyy täyttää vaihtoehtoisilla tuotantotavoilla ja toimintatapojen muutoksilla. Uusiutuvien energiantuotantomuotojen osuuden kasvaminen kokonaistuotannossa ja niiden sääriippuvuus aiheuttaa omanlaiset ongelmat sähköntuotannon vaihteluiden takia. EU:n energiapolitiikan pohjana toimii energiansaannin turvaamisen takaaminen ja energiasektorin kestävä kehitys. (Euroopan parlamentti, 2018)

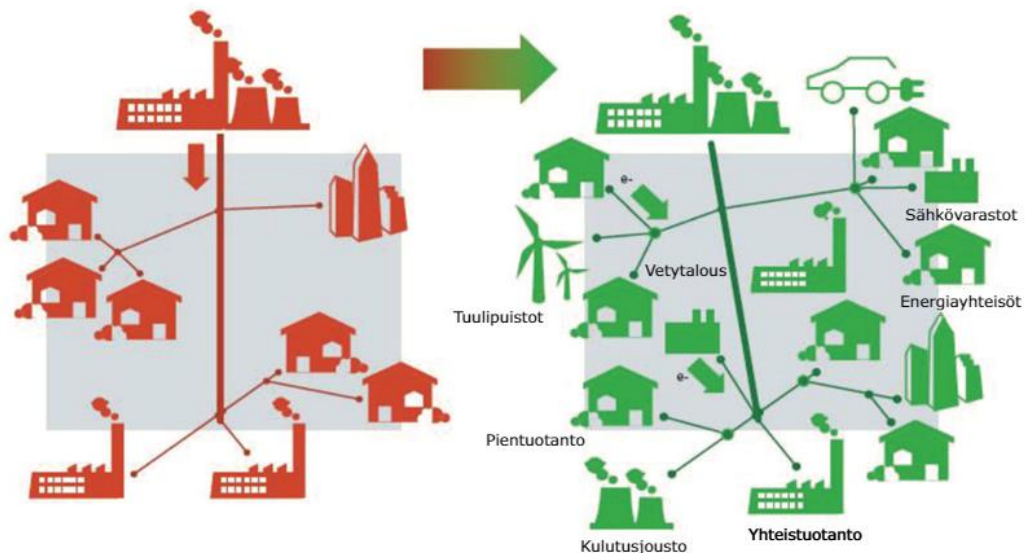
Tässä luvussa käsitellään energiasektorin muutoksen näkymistä asiakkaiden kulutustottumuksissa ja investoinneissa, vaihtelevan tuotannon vaikutuksia sähkön laadussa ja nykyisiä jakeluverkon suunnitteluperiaatteita pientuotannon liittämässä.

2.1 Sähkönjakelujärjestelmä

Perinteisesti sähköjärjestelmän on ajateltu siirtävän sähköenergiaa yksisuuntaisesti tuotantolaitoksilta loppukäyttäjille kantaverkon ja jakeluverkon avulla. Keskitetyssä tuotantomallissa suuret, satojen megawattien tuotantolaitokset, syöttävät kantaverkkoon (400kV, 220kV tai 110kV) tehoa. Tuottavat yksiköt saattavat sijaita kaukana kulutuspiisteiltä, kuten kaupungeista tai suurista tehtaista, joten sähköä siirretään korkealla jännitteellä teknisten häviöiden pienentämiseksi. (Fingrid, 2020a) Sähköasemilla suurjännite muunnetaan keskijännitteeksi (20kV), josta sitä jakeluverkon avulla siirretään joko suoraan kuluttajille tai jakelumuuntamoille. Pienemmät tuotantolaitokset voivat liittyä myös jakeluverkkoon, mikäli se sijaitsee sopivalla paikalla. Suomessa matalin jännitetaso on 0,4 kV, johon esimerkiksi kotitaloudet kytketään. (STUK, 2021)

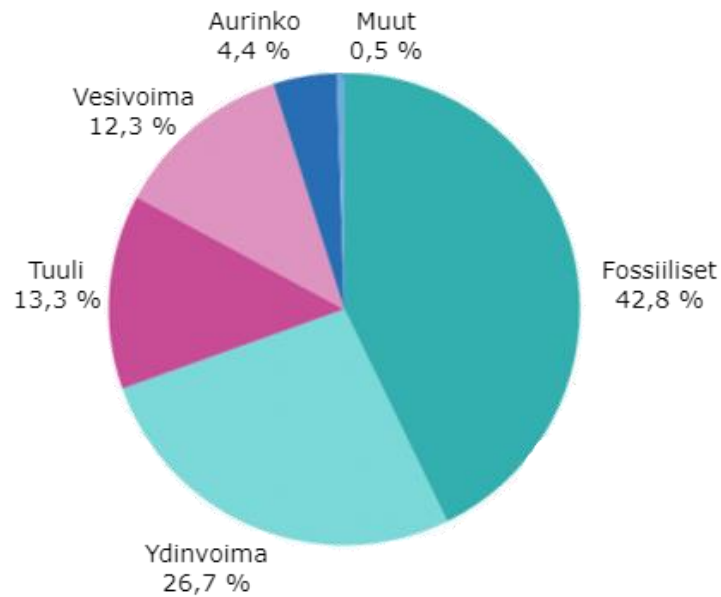
2.1.1 Hajautettu tuotanto

Tulevaisuuden sähköverkko näyttää hyvinkin erilaiselta tuotannon hajaantuessa niin alueellisesti kuin tehollisesti. Varsinkin tuuli- ja aurinkovoiman kehitys on ollut valtavaa. Uusiutuvien energianlähteiden määrä tulee jatkossakin kasvamaan EU:n tavoitteiden saavuttamiseksi. Vuoteen 2030 mennessä uusiutuvan energian osuus kokonaiskulutuksesta tulisi olla vähintään 35 %. Myös ydinvoiman rooli fossiilisten syrjäyttämässä on merkittävä sen osuuden ollessa noin 30 % kokonaiskulutuksesta. Päätösvalta ydinvoiman tuotannosta on jäsenmailla, mutta EU tähtää lainsäädännöllään parantamaan turvallisuutta ja jätteenkäsittelyä ydinvoimaloissa. Eri maiden poliittisilla kannoilla on kuitenkin eriäväisiä näkemyksiä ydinvoiman suhteen, joten esimerkiksi Saksa ajaa tällä hetkellä ydinvoiman tuotantoaan alas. Ydinvoimaa toki lisätään myös monissa maissa, mutta mikäli energiantarve jatkaa kasvuaan, täytyy myös uusiutuvan energian tuotantoa lisätä. (Euroopan parlamentti, 2018). Tuuli- ja aurinkosähkön sääriippuvuuden takia sähköverkko tarvitsee joustavuutta erilaisten energiavarojen ja säätömahdollisuuksien kautta. Joustavuuden ohjaamista varten tarvitaan lisäksi älykkäitä sähköverkon komponentteja. Kuvassa 1 esitetään periaatteellinen sähköverkko tehonvirtausnuolilla sekä keskitetyllä että hajautetulla tuotantomallilla.



Kuva 1. Keskitetyn ja hajautetun tuotannon verkkomallit (Muokattu, Utahin yliopisto, 2020).

Kuvassa 2 on esitetty EU:n jäsenmaiden energiantuotanto sektoreittain vuonna 2019.

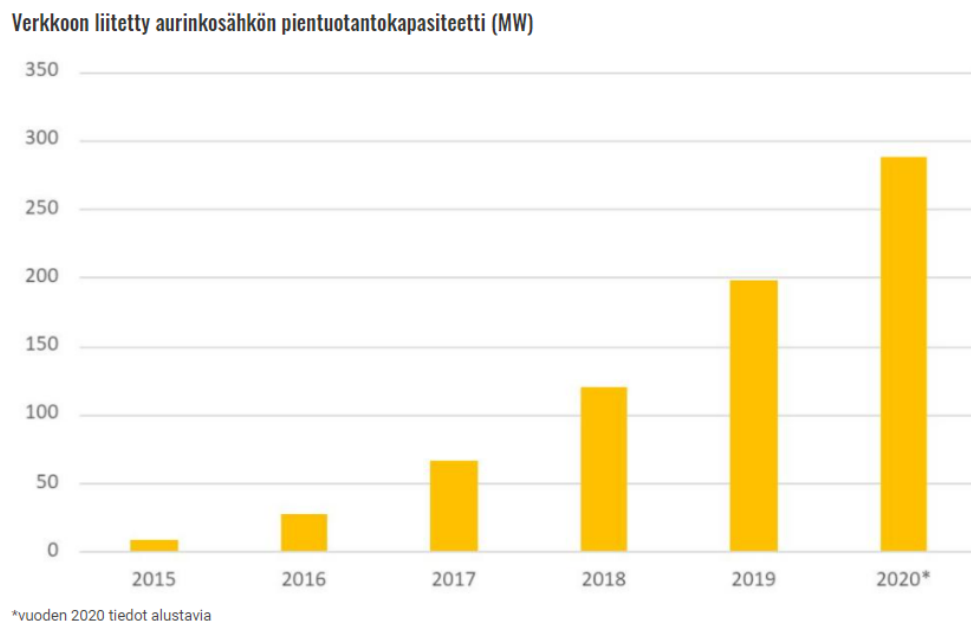


Kuva 2. Euroopan energiantuotantomuodot 2019 (Muokattu, Euroopan komissio, 2020).

Vaikka Suomessa aurinkosähkön osuus tuotannosta on vielä hyvin pieni (0,3 % vuonna 2020), on Euroopan tasolla havaittavissa jo selkeä osuus. Euroopan maista Saksa, Italia ja Espanja kuuluvat maailman 10 suurimman aurinkosähkön tuottajamaan joukkoon. (Euroopan komissio, 2020)

2.1.2 Pienjänniteasiakkaat

Uusiutuvat energian liittäminen verkkoon ei ole ainoastaan suurten toimijoiden tehtävä. Nykyisin yhä useammat kotitaloudet ovat lisänneet omaa tuotantoaan, useimmiten aurinkoenergian myötä. Pientuotannon lisäämiselle on monia eri syitä, esimerkiksi ilmasto-tietoisuus, sähkölaskun pienentäminen, vero- ja kotitalousvähennykset. Kuvasta 3 nähdään, että vuoden 2020 aikana pientuotannon kapasiteetti kasvoi 45 % vuoteen 2019 verrattuna. Trendin mukaisesti odotettavissa on samantasoista kasvua.



Kuva 3. Verkkoon liitetyn aurinkosähkön kapasiteetti Suomessa (alle 1MW) (Energiavirasto, 2021).

Siirtohintojen nousut ja median nostama kohu aiheen ympärille saa osan kuluttajista harkitsemaan aurinkosähkölaitteita tai hankkimaan sellaisen oman nettokulutuksensa pienentämiseksi. Syksyllä 2021 myös sähköenergian hinta alkoi nousemaan, saavuttaen yhä korkeampia huippuja (Nordpool, 2021). Samanaikaisesti aurinkopaneelien hinnat ovat laskussa, jolloin aurinkosähkölaitteiden takaisinmaksuaika lyhenee ja investoinnista tulee entistä kannattavampi.

Jotkut valtiot, kuten Suomi tarjoavat suoraa tukea järjestelmän hankintaan. Tuen tyyppi ja suuruus riippuvat tukea hakevasta tahosta ja hankkeesta. (Motiva, 2021) Suurille, miljoonaluokan projekteille voi hakea työ- ja elinkeinoministeriön energiatukea, jonka suuruus on noin 20 % investointikustannuksista (Elinkeino- ja elinkeinoministeriö, 2021). Pienjänniteasiakkaille oleellisempia ovat kuitenkin energia-avustus ja kotitalousvähennys. Asuinrakennuksen omistajalle tai taloyhtiölle voidaan myöntää ARA:n (Valtion asuntorahasto)

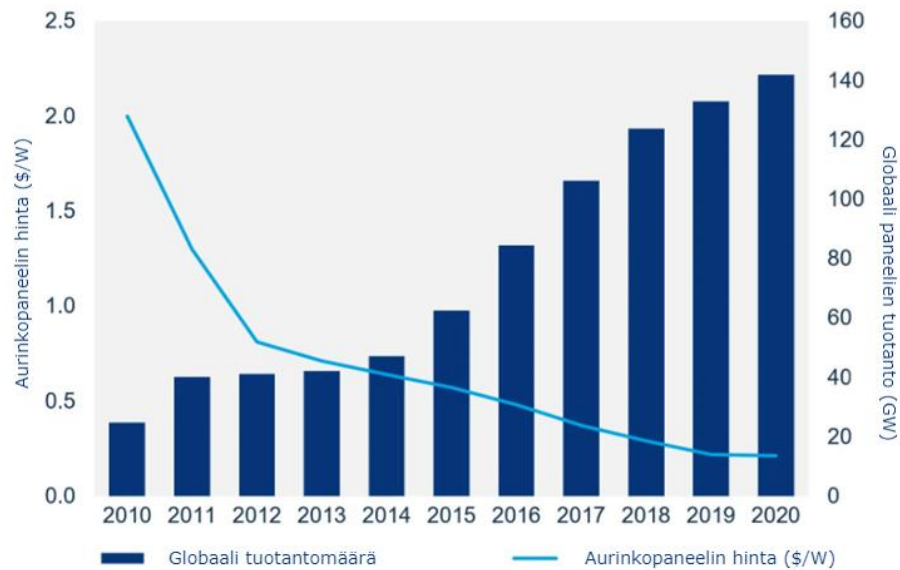
energia-avustusta energiatehokkuutta parantavista korjaushankkeista, kuten aurinkosähköjärjestelmän hankkimisesta tai öljylämmityksen muuttamisesta maalämpöön. Avustuksen suuruus voi olla jopa 50 % avustettavaksi hyväksytyistä kustannuksista. (ARA, 2021) Yksinkertaisin ja tavallisin tuen muoto aurinkosähköjärjestelmään on verohelpotus kotitalousvähennyksen myötä. Kotitalousvähennyksellä yksityishenkilöt saavat vähentää verotuksessaan 40 % työn osuudesta, maksimivähennyksen ollessa 2250 euroa. (Verohallinto, 2021)

Ruokaviraston investointituen vuoksi ongelmia on syntynyt etenkin maataloille, joihin on liitetty liittymän kokoon tai kulutukseen nähden huomattavan ylimitoitettu järjestelmä. Energiantuotantoon liittyvien investointien suuruus on 40 % ja valtiolta on mahdollista saada enintään 500 000 euron lainantakaus investointia varten. (Ruokavirasto, 2021) Nykyisen verkostomitoitusohjeiden mukaisesti näihin ylimitoitettuihin järjestelmiin tehdään suuria verkostoinvestointeja.

Näiden kannustimien avulla suomen valtio pyrkii lisäämään ihmisten kiinnostusta pien- tuotantoa ja energiatehokkuutta kohtaan. On tärkeä selvittää ajankohtaiset säädökset ja käytännöt ennen järjestelmän hankintaa, sillä ne muuttuvat jatkuvasti (Motiva, Työ- ja Elinkeinoministeriö, 2021).

Yrityksille on tarjolla yksinkertaisia palveluita, joiden myötä voimalan hankinta on nopeaa ja usein vaivatonta. Esimerkiksi aurinkosähköratkaisuja toimittava Solarigo tarjoaa pitkä- aikaisella sopimuksella järjestelmän, jossa asiakas maksaa ainoastaan tuottamastaan sähköstä ennalta sovitun hinnan (Solarigo, 2021). Asiakasyritys ei siis itse omista heille asennettavaa tuotantoyksikköä vaan ikään kuin vuokraa sen. Tällainen investointivapaa palvelu madaltaa kynnystä oman tuotannon lisäämisestä. Mikäli palvelua saadaan räätälöityä yksityisasiakkaille, voidaan olettaa kapasiteetin kasvun kiihtyvän entisestään.

Aurinkosähköjärjestelmä saattaa kiinnostaa kuluttajia myös muista syistä, esimerkiksi ystävien tai naapureiden hyvistä kokemuksista. Tällöin on mahdollista muodostua alueita, joissa tuotantoa sisältävien liittymien osuus on poikkeuksellisen suuri.



Kuva 4. Paneelien hintakehitys \$/W (Muokattu, Solar Learning center, 2021).

Kuvasta 4 nähdään, että viimeisen kymmenen vuoden aikana paneelien hinnat ovat laskeneet lähes 90 %. Jos tarkastellaan vielä pidempää aikaväliä, huomataan laskun olevan eksponentiaalista. Globaalit valmistusmäärät ovat myös kasvaneet merkittävästi. Muun Suomen mukaisesti kapasiteetin kasvu ollut rajua myös Elenian alueella, ja edellä mainittujen asioiden takia on oletettavaa. Uusiutuvan energian lisäämisen kannalta tämä on hyvä asia, mutta verkkoyhtiöillä tulee olemaan haasteita sääriippuvan tuotannon liittämisessä. Seuraavissa luvuissa käsitellään lisääntyvän aurinkosähkön tuotannon vaikutusta sähkön laatuun ja esitetään nykyiset suunnitteluperiaatteet.

Sähköverkkoon liitetty sähkön pientuotanto (alle 1 MW yksiköt) tuotantomuodittain vuosien 2019 ja 2020 lopussa

Tuotantomuoto	Nimellisteho MW* 31.12.2020	Nimellisteho MW 31.12.2019	Muutos %
Aurinko	288	197	+46 %
Tuuli	12	14	-18 %
Bio	12	13	-11 %
Vesi	28	29	-5 %
Diesel	22	23	-1 %
Muut	1	2	-42 %
Yhteensä	364	278	+30 %

*Vuoden 2020 lopun tiedot ovat alustavia ja voivat vielä muuttua tietoja tarkistettaessa.

Kuva 5. Pientuotannon jakautuminen tuotantomuotojen välillä (Energiavirasto, 2021).

Tässä työssä pientuotannolla tarkoitetaan pääsääntöisesti aurinkovoimaa, ja sen osuus verkkoon liitetystä pientuotannosta nähdään yllä olevasta kuvasta.

2.2 Sähkön laatu ja verkostosuunnittelu sekä VTJ-laskenta

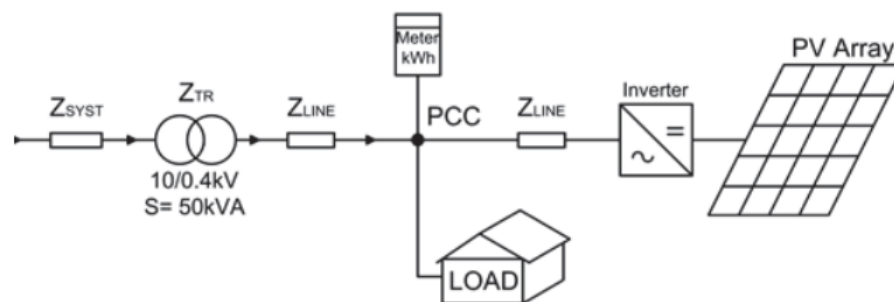
Sähkö on nykymaailmassa kuluttajalla tuote, jolle on tarkkaan määritelty laadulliset vaatimukset. Verkkoyhtiön tulee pitää huoli, että jokainen asiakas on laatuvaatimusten piirissä. Tässä luvussa perehdytään yleisellä tasolla, kuinka aurinkosähköjärjestelmän liittäminen vaikuttaa sähkön laatuun liittämispisteessä ja muilla asiakkailta pienjänniteverkossa etenkin jännitteen osalta. Laskentoihin perustuvaa tilannetta tarkastellaan työssä myöhemmin.

Sähkömarkkinalain mukaan alle 2 MVA:n tuotantoyksiköistä käytetään nimitystä pientuotanto. Näiden tuotantoyksiköiden liittämisestä jakeluverkon haltija (verkkoyhtiö) ei saa periä verkon vahvistamiskustannuksia (Sähkömarkkinalaki, 2013). Tämä vaikuttaa varmasti monen verkkoyhtiön nykyisiin suunnitteluperiaatteisiin. Liittymistehoa suurempien tuotantoyksiköiden osalta verkkoyhtiö saa kuitenkin veloittaa kapasiteettivarausmaksun verran (Energiateollisuus, 2021a). Elenia Verkko Oyj ei peri tällä hetkellä kapasiteettivarausmaksua liittymistä, joiden tuotantoteho on liittymistehoa suurempi, kun tuotantolaitteiston suuruus on enintään 2 MVA.

2.2.1 Sähkön laatu

Pientuotannosta voidaan vielä eriyttää enintään 50 kVA:n yksiköt mikrotuotannoksi. Lähes kaikki kotitalousasiakkaiden tuotantolaitteistot kuuluvat tähän kategoriaan, yksikkökoon ollessa tyypillisesti noin 4 kVA (Elenia, 2021a). Tässä työssä keskitytään suurimmilta osin pienjänniteverkon kohteisiin, joten on sopivampaa puhua mikrotuotannosta.

Yksinkertaistettu malli pienjänniteverkossa sijaitsevasta tuotantoliittymästä on esitetty kuvassa 6. Todellisuudessa verkon muuntopiireissä on usein enemmän liittymiä, joista osalla voi olla myös mikrotuotantoa.



Kuva 6. Yksittäinen tuotantoliittymä aurinkosähköllä kytkettynä pienjänniteverkkoon. (Hurmeydan & al., 2016).

Kuvasta nähdään, että ennen liittymispistettä (PCC) verkossa on impedanssia, jotka aiheutuvat KJ-verkosta, muuntajasta ja PJ-verkosta. Verkkoyhtiö pienentää näitä impedanssin arvoja vahvistamalla verkkoaan oikosulkuvirtojen ja -tehojen kasvattamiseksi.

Aurinko- ja tuulivoimalle suuri haaste on tuotannon ennustettavuus ja nopeat tehonmuutokset. Sääolosuhteita, ja sitä myötä tuotantoa on vaikea selvittää tarkasti etukäteen, mikä on sähkömarkkinoiden kannalta oleellista. Puuskatuulet ja pilvisyys aiheuttaa puolestaan äkillisiä tehonmuutoksia, joka vaikuttaa paikallisesti jännitteeseen. Datahubin myötä on mahdollista ottaa käyttöön lyhyempi taseselvitysjakso, joka sopii paremmin uusiutuvan energian tuotantorakenteeseen. Nykyisestä tunnin mittaisesta taseselvitysjaksosta siirrytään 15 minuutin jaksoon vuonna 2023. (Fingrid, 2021b) Nopeiden jännitteenmuutosten kannalta tämä ei ole merkittävää, mutta sähkömarkkinoiden toiminta kuitenkin paranee.

Aurinkotuotannon osalta nopeita tehonmuutoksia aiheuttavat varjot, jotka pienentävät paneelille saapuvan säteilyn määrää. Varjot aiheutuvat tyypillisesti pilvistä, rakennuksista tai puista, mutta myös putoavista oksista ja kertyvästä lumesta voi syntyä varjoja. Puolipilvisellä säällä on luonnollisesti odotettavissa paljon nopeita tehonmuutoksia. Nimellistehon suuruudesta muutoksesta on harvemmin kyse, sillä pilvet eivät estä säteilyä täysin. Mittausten mukaan täysi pilvestä aiheutunut varjo pienentäisi tehoa kahteenkymmeneen prosenttiin (Lobera & al., 2013).

Puolipilvisellä säällä säteilyintensiteetti voi olla huomattavasti selkeää säätä korkeampi, pilvien aiheuttaman heijastusefektin (Cloud Enhancement, "CE") vuoksi. Tällöin on mahdollista, että ilmoitettu paneelin nimellisteho ylittyy, jolloin tehonmuutokset voivat olla vielä rajumpia. Tutkimuksen mukaan CE:n vaikutukset tasoittuvat voimalan nimellistehon kasvamisen myötä, sillä sähköä tuottava pinta-ala kasvaa, eikä pilven reuna saavuta koko voimalaa samanaikaisesti. (Järvelä & al., 2020) Aurinkosähköjärjestelmän mitoitukselta riippuen tehoa rajoittava tekijä voi olla myös verkkoon kytkettävä invertteri. Invertteri onkin suotavaa mitoittaa hieman paneelitehoa pienemmäksi, jotta saadaan hyötysuhdetta kasvatettua ja leikattua pois CE:n aiheuttamat piikit huipputehossa.

Tampereen yliopiston aurinkovoimalasta saatiin dataa yhdelle paneelille saapuvasta säteilyintensiteetin määrästä. Aurinkopaneelien nimellisteho mitataan standardin mukaisissa olosuhteissa, jossa säteilyintensiteetti on $1000 \frac{W}{m^2}$ (IEC 61215, IEC 61646). Aurinkovoimalan tuottaman tehon muutos on käytännössä suoraan verrannollinen intensiteetin muutokseen.

Säteilyintensiteettiä on mitattu 1 s mittausvälillä, jolloin saadaan selville yhden paneelin tehonmuutokset sekunnin tarkkuudella. Edellä mainitusti pilven reuna ei saavuta koko

voimalaa samanaikaisesti, mutta pienemmissä kohteissa voidaan olettaa intensiteetin muutoksen vaikuttavan koko järjestelmään. Yhden sekunnin aikana tapahtuva tehonmuutos on mittausten intensiteetin muutoksen perusteella pahimmillaan noin 20–30 % nimellistehosta. Kahden sekunnin aikana tehonmuutos oli enintään noin 50 %. Lähelle nimellistehon suuruista muutosta päästiin vasta, kun kasvatettiin mittausväliä n. 10 sekuntiin. Tehonmuutos oli tällöin 80–90 %.

Nopeille jännitteenmuutoksille on määritelty mittaustapa standardissa SFS-EN 61000-4-30:2015. Standardin mukaan nopea jännitteenmuutosta arvioidaan mittaamalla jännitetaso keskiarvo 50 tai 100 jakson sarjasta, mikä tarkoittaa Suomen 50 Hz verkossa 1–2 sekunnin aikaa. Tätä keskiarvoa verrataan seuraavien sarjojen keskiarvoihin. Suuremmat arvot saadaan mittaamalla sadan jakson sarjoja, jolloin jännitetasoon vaikuttaa 2 sekunnin tehonmuutokset. Pilvisyyden aiheuttamien nopeiden jännitteenmuutosten tarkastelussa voidaan siis käyttää noin 50 % nimellisteho.

Haja-asutusalueella muuntopiirit saattavat olla pinta-alallisesti suuria, vaikka liittyjiä on vähän. Liittymien sijaitessa kaukana toisistaan, ei pilvisyyden aiheuttamilla tehonmuutoksilla ole merkitystä nopeissa jännitteenmuutoksissa. Pilven reuna ei silloinkaan saavuta eri sijainneissa olevia paneeleita täysin samanaikaisesti, jolloin yhteenlaskettu nopea tehonmuutos ei ole suoraan verrannollinen nimellistehoihin.

2.2.2 Yliaallot

Jakeluverkon nimellistaajuus on Suomessa 50 Hz. Nykyisessä sähköjärjestelmässä tehoelektronikan määrä on kasvussa, ja monien laitteiden kuormitus on epälineaarista. Epälineaaristen kuormien myötä verkkoon muodostuu yliaaltoja, jotka ovat vaihtojännitteitä tai -virtoja joiden taajuus on suurempi kuin 50 Hz. Yksittäisiä yliaaltoja mallinnetaan sini-muotoisina, mutta kokonaisuudessaan ne aiheuttavat perustaajuuteen säröä. Verkossa näkyvä säröytynyt taajuus havainnollistetaan kuvassa 7. Yliaallot voivat olla harmonisia, jolloin niiden taajuus on nimellistaajuuden monikerta. Epäharmonisten yliaaltojen taajuu-det ovat puolestaan harmonisten yliaaltojen väleissä.



Kuva 7. 5. ja 7. yliaallon aiheuttama särö perustaajuudessa (Männistö & al., 2006).

Yleisimpiä yliaaltoja syntyy verkon epälinearisista kuormista, kuten kuluttajan elektronikasta, puolijohdetekniikasta ja valokaarista. Myös muuntajista ja moottoreista voi syntyä yliaaltoja. Yliaaltoja esiintyy käytännössä joka puolella verkkoa, ja tehoelektronikan yleistymisen myötä yhä enemmän. (Männistö & al., 2006, 30–32).

Yliaallot jakautuvat pyörimissuuntansa mukaan kolmeen ryhmään. Epälineaariset, kolmivaiheiset kuormitukset aiheuttavat parittomia yliaaltojen kertalukuja 5, 7, 11, 13, jne. Yksivaiheisista epälinearisista kuormituksista syntyy näiden lisäksi myös 3:ttä yliaaltoa ja sen kerrannaisia. (Männistö & al., 2006). Parilliset yliaallot ovat harvinaisempia, mutta niitä voi syntyä esimerkiksi muuntajan kytkentävirtasäyksestä. Näitä tasavirtoja aiheu-

tuu puoliaaltotasasuuntaajista, jotka leikkaavat vaihtojännitteestä joko positiiviset tai negatiiviset jaksot pois. (Korpinen & al., 1998) Alla olevassa taulukossa on jaoteltu yliaallot pyörimissuuntiensa mukaisesti.

Taulukko 1. Yliaaltojen jako pyörimissuunnan mukaan.

Kertaluku	$1 + 3n,$ $n = 0, 1, 2, 3...$	$2 + 3n$ $n = 0, 1, 2, 3...$	$0 + 3n$ $n = 1, 2, 3...$
Taajuus (Hz)	50, 200, 350, ...	100, 250, 400, ...	150, 300, 450, ...
Merkki / Pyörimissuunta	+	-	0

Yliaaltojen haittavaikutukset riippuvat niiden pyörimissuunnasta. Myötäjärjestelmän yliaaltovirrat (+) pyrkivät kiihdyttämään moottorikäyttöjä sekä aiheuttavat lämpenemistä ja sitä myötä häviöitä. Vastajärjestelmän (-) aiheuttamat samoin häviöitä, mutta pyrkivät hidastamaan moottoreita. Kolmas yliaalto ja muut kolmella jaolliset yliaallot (0) ovat symmetrisiä joka vaiheessa, jolloin se vastaa 50 Hz:n taajuuden nollakomponenttia. Ne eivät aiheuta ongelmia moottorikäyttöille, mutta summautuvat nollajohtimeen kuormittaen sitä. Pienjänniteverkossa on paljon 1-vaiheisia kuormia, joten 3:n yliaallon osuus voi olla merkittävä. Pahimmassa tapauksessa nollajohdin voi kuormittua vaihejohtinta enemmän ja kuumentua niin paljon, että aiheuttaa tulipalon. (Elovaara & al., 2011)

Yksittäisten yliaaltojen suhteellisille osuuksille perusjännitteestä on annettu laatustandardissa (SFS-EN 50160) raja-arvot. Kolmannen ja seitsemännen yliaallon osuus perusjännitteestä ei saa ylittää 5 %. Viides yliaalto enintään 6 % ja toinen enintään 2 %. Yksittäisten raja-arvojen lisäksi tarkastellaan kokonaissärökerrointa (THD), joka ottaa huomioon kaikki harmoniset yliaallot tiettyyn kertalukuun asti. Käytännössä yliaaltoja tulisi tar-

kastella äärettömään kertalukuun asti, mutta todellisuudessa tarkastelut rajataan käytännön syistä 40:een tai 50:een yliaaltoon. Kokonaissärökerroin D_{th} lasketaan kaavalla 1.

$$D_{th} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} U_k^2}}{U_1}, \quad (1)$$

jossa eri kerrannaisten (k) yliaaltojen aiheuttamat jännitteet U_k lasketaan yhteen ja niitä verrataan perusjännitteen U_1 suuruuteen. Tuloksena on suhteellisarvo, jonka tulee olla alle 8 % täyttääkseen laatuvaatimuksen. (Elovaara & al., 2011)

Puolijohdetekniikkaa käytetään hyväksi tasasuuntaajissa, jonka avulla muutetaan vaihtovirta tasavirraksi. Tasasuuntaajia sijaitsee esimerkiksi sähköautojen latausasemilla, joilla verkon sähköenergia siirretään auton akkuihin. Vaihtosuuntaaja, eli invertteri muuttaa puolestaan tasavirran vaihtovirraksi. Täysin puhdasta 50 Hz siniaaltoa komponenteilla ei pystytä tekemään, joten syntyy yliaaltoja. Kuluttajien omistamat aurinkopaneelit tuottavat tasavirtaa, ja ne kytketään kiinni sähköverkkoon inverttereiden kautta. (Männistö & al., 2006) Tämän työn kannalta puolijohdetekniikka, etenkin invertteri on merkittävin yliaaltojen aiheuttaja. Suuntaajat ovat isossa roolissa myös yleisesti yliaaltojen tutkimisessa, kun sähköautojen ja aurinkovoimaloiden määrät kasvavat kuluttajasektorilla.

Standardeissa on määritelty invertterille yliaaltojen aiheuttaman kokonaissärön maksimi. Invertterit ovat laadukkaita, eikä yksittäisen invertterin aiheuttamat verkkovaikutukset ole merkittäviä. Ongelma voi korostua, kun samaan muuntopiiriin kytketään useita aurinkosähköjärjestelmiä inverttereineen. Sama ongelma pätee luonnollisesti myös latauspisteille. Kuluttajien laitteistojen häiriöt johtuvat usein heidän muiden kuormien aiheuttamista yliaaltovirroista.

2.2.3 Jännitteenmuutokset

Jännitteenvaihteluita voidaan tarkastella muutamalla tavalla, hitaalla tai nopealla muutoksella sekä välkynnällä (Baggini, 2008). Eurooppalaisen SFS-EN 50160 standardin suomessa vahvistetussa käännöksessä on määritelty erilaisia raja-arvoja jännitteen muutoksille. Nämä on esitetty taulukossa 2. Taulukon nopeat jännitteenmuutokset ja jännitekuopat ovat viitteellisiä arvoja standardin liitteestä B.

Taulukko 2. Standardin SFS-EN 50160 mukaiset rajat jännitteenmuutoksille.

Suure	PJ-verkko	KJ-verkko	Huomio
Nimellisjännite	230 V (400V)	sopimuksen mukaan (esim. 20 kV tai 45 kV)	
Nimellisjännitteen vaihtelu	$\pm 10\%$ + 10% / -15%	$\pm 10\%$ -	95% 10min keskiarvo viikoittain Koko vuoden 10min ka.
Nopea jännitteenmuutos	< 5%	< 5%	10 % (PJ) ja 6 % (KJ) muutoksia voi esiintyä muutamia kertoja päivässä
Välkyntä	$P_{lt} < 1$	$P_{lt} < 1$	95% viikon arvoista
Jännitekuopat	10-1000kpl, < 1s, u > 40%	10-1000kpl, < 1s, u > 60%	

Taulukon mukaan normaalitilanteen jännitteen tulisi olla pääosin $\pm 10\%$ nimellisjännitteestä. Standardi sallii tämän lisäksi hieman alijännitteitä (-15 %) poikkeustapauksissa, joissa jakeluverkkoa ei ole liitetty yleiseen siirtoverkkoon. Näistä poikkeuksista tulisi aina informoida jakeluverkon käyttäjiä Yleisesti jännitteen vaihtelut aiheutuvat kuormituksen tai tuotannon vaihteluista ja siitä seuraavan tehonsiirron muutoksista (Elovaara & al., 2011, s.439). On huomioitava, että normaalitilassa ei ole vikaa tai jännitekatkoa. Vikoihin

ja keskeytyksiin on määritelty erikseen rajat, jotka löytyvät sähkömarkkina-alaista toimitusvarmuuden alta.

Verkon komponentit, kuten ilmajohtot ja muuntajat aiheuttavat impedanssiensa takia jännitteenalenemää, joka on laskettavissa kaavalla

$$U_{hva} \approx R * I_p + X * I_q = R * I * \cos \varphi + X * I * \sin \varphi, \quad (2)$$

jossa R kuvaa haaran komponenttien resistiivisyyttä ja X reaktiivisuutta. Jännite verkon haarojen perällä on tästä syystä matalampi. Jännitteenaleneman kaavasta huomataan, että kuormitusvirta vaikuttaa aleneman suuruuteen. Käytännössä mitä enemmän kuormaa verkkoon kytketään, sitä enemmän jännitteenalenema kasvaa. Elenia ja monet muut verkkoyhtiöt ovat määritelleet standardia tiukempia rajoja jännitteenalenemalle verkon suunnittelussaan. Uudessa verkossa liittymispisteen jännitteenalenema saa olla enintään 5,0 % ja vanhassa verkossa 8,0 %. (Elenia, Pienjänniteverkon mitoitus ja sähköinen suojaus, 2016)

Nopeat jännitteenmuutokset voivat olla jännitteen äkillistä nousua tai laskua. Molemmat näistä saattavat aiheuttaa häiriöitä ja virhetoimintoja elektroniisiin laitteisiin sekä turhia suojalaitteiden laukeamisia. Perinteisesti nopeat jännitteenmuutokset ovat aiheutuneet kuormitusten muutoksista, kuten valokaariuunista, moottorien käynnistyksistä tai käämikytkimen asennon muutoksista. (Elovaara & al., 2011, s.439) Nykyisin myös sääriippuva tuotanto aiheuttaa nopeita jännitteenmuutoksia. Esimerkiksi puolipilvisellä säällä aurinkovoimalaan osuva säteilyintensiteetti ja sitä myötä voimalan tuotanto vaihtelee päivän mittaan äkillisesti useaan otteeseen. Lisäksi tuotantoyksikön tai suuren kuorman yllättävä verkosta irtoaminen voi aiheuttaa nopeita jännitteenmuutoksia.

Nopeiden muutosten haittavaikutuksia voidaan havaita laiterikkojen lisäksi paljaalla silmällä valaistuksen välkkymisessä hehkulamputissa. On huomattu, että nimenomaan jännitteen amplitudin muutos vaikuttaa välkyntään eniten. Jokainen henkilö kokee välkynnän aiheuttaman häiriön yksilöllisesti ja siihen vaikuttaa vuorokaudenaika ja psyykinen tila. Standardissa SFS-EN 50160 on määritelty, että välkynnän pitkäaikainen häiritsevyyssindeksi on 1, ja 95 % ajasta tulisi olla enintään se. Välkyntää voi esiintyä jo prosentin kymmenesosien suuruisilla jännitteenmuutoksilla, jos muutostaajuudet ovat 8–10 Hz. (Elovaara & al., 2011, s.439–453)

Kolmivaiheisessa järjestelmässä jokaisen vaiheen jännitteen tulisi olla itseisarvoltaan yhtä suuret ja niiden väliset vaihekulmat 120 astetta. Symmetrisessä 3-vaihejärjestelmässä jännitteillä on ainoastaan myötäkomponentit. Epäsymmetriassa joko vaiheiden välisen kulman ja/tai vaiheen itseisarvon suuruus on muuttunut. Silloin muodostuu joko nolla- tai vastakomponenttia tai molempia. Vastakomponentti pyörii myötäkomponenttia

vastakkaiseen suuntaan ja aiheuttaa häviöitä. Standardissa SFS-EN 50160 on määriteltäviin ikään raja-arvo epäsymmetrialle. 95 % ajasta 10 minuutin mittausjaksoilla vastakomponentti ei saa ylittää 2 % myötäjännitteestä. Epäsymmetriaa esiintyy pienjänniteverkossa asiakkaiden kuormien ollessa usein yksivaiheista. Aurinkosähköjärjestelmät voivat olla kytkettynä 1-vaiheisesti, ja epätasaisesti liitettynä vaiheisiin, se aiheuttaa epäsymmetriaa.

Jakeluverkon ominaisuudet vaikuttavat paljon tehonmuutoksista aiheutuneisiin jännitteenmuutoksiin. Elenian verkkoalue sijaitsee suurilta osin haja-asutusalueella, jossa PJ-verkon haarat ovat tavallisesti pitkiä ja sähköiset ominaisuudet huonommat. Energiategollisuuden suosituksen mukaan pienjänniteliittymälle voidaan kytkeä tuottava yksikkö, jonka suuruus on korkeintaan

$$S_{max} = \frac{S_k}{25} = \frac{3 \cdot U_v \cdot I_k}{25}, \quad (3)$$

jossa S_k on liittymän oikosulkuteho, U_v on vaihejännite ja I_k on oikosulkuvirta. (Energiategollisuus, 2019a)

Elenian mitoitusohjeen mukaan verkon sähköiset arvot täytyvät olla vähintään niin hyvät, että pääsulakekoon 5 sekunnin suojauksen edellyttämä arvo täyttyy. Pienemmille liittymille on määriteltäviin minimioikosulkuvirraksi 250 A standardissa SFS-6000-8-801. 180 A katsotaan myös riittäväksi, mikäli 250 A:iin pääseminen vaatii merkittävämpiä investointeja. Nämä luvut ovat esitetty seuraavan sivun taulukossa 3. (Elenia, 2021b)

Taulukko 3. Pienjänniteliittymille vaaditut minimioikosulkuvirrat.

Liittymän koko (A)	Yksivaiheinen oikosulkuvirta I_k
3X25	250 A (180A vanhassa verkossa)
3X35	250 A (180A vanhassa verkossa)
3X50	250 A
3X63	320 A
3X80	425 A
3X100	580 A
3X125	715 A
3X160	950 A
3X200	1250 A

Oikosulkuvirta lasketaan puolestaan kaavalla

$$I_k = \frac{1,1 \cdot U_v^2}{Z_f + Z_i}, \quad (4)$$

jossa U_v on verkon vaihejännite, Z_f vikaimpedanssi ja Z_i verkon impedanssi vikakohdassa (Elovaara & al., s.175). IEC-standardi 60909 suosittelee käytettäväksi 1,1 kertaista jännitettä impedanssien epätarkkuuksien vuoksi. Kaavasta nähdään, että oikosulkuvirta kasvaa impedanssin pienentyessä. Lähellä muuntamoja sijaitsevien liittymien oikosulkuvirrat ovat suurempia, sillä niiden ja muuntamon välillä on vähemmän impedanssia kasvattavia komponentteja. Pienjänniteliittymän oikosulkuvirran kasvu edelleen kasvattaa liittymän oikosulkutehoa, mikä mahdollistaa suuremman tuotantoyksikön liittämisen verkkoon. Liittymien oikosulkuvirrat ovat uudehkossa verkossa yleensä taulukon 3 minimiarvoja suuremmat, mutta ne saattavat muuttua muutostöiden yhteydessä tuotannon kytkemisen jälkeen. Verkkotietojärjestelmässä kirjataan tällaisissa tapauksissa liittymälle poikkeava I_k arvo, joka täytyy huomioida myöhemmin mahdollisissa verkon muutostöissä.

Parhaassa tapauksessa pientuotanto tukee verkkoa edellä mainituissa ongelmissa. Mikäli tuotanto on kytketty rinnan pienjänniteverkon liittymän kanssa, asiakkaan tehontarve usein pienenee. Tästä seuraa suoraan pienempi kuormitusvirta ja sitä myötä pienemmät siirtohäviöt verkossa. Toisaalta siirtohäviöt kasvavat samalla tapaa, mikäli tuotanto sijaitsee muualla. Koska tuotanto on käytännössä negatiivista kulutusta, pientuotannon avulla

voidaan pienentää jännitteenalenemaa verkon haaroilla, ja jopa parantaa sähkön laatua. Jotta edellä mainitut hyödyt saavutetaan, kulutuksen ja tuotannon tulisi osua samoihin ajankohtiin. Häviöitä ei pienennä päivällä tuotettu aurinkosähkö, jos asiakkaalla on siirtotariffina yösähkö ja suurimmat kulutukset yöaikaan.

Asiakkaan omistamat tuotantolaitokset ovat verkkoyhtiön hallitsemattomissa. Eleniällä on yli 430 000 asiakasta sekä laaja verkkoalue, joten on vaikea arvioida minkä kokoista tuotantoa on tulossa tai mihin sitä tullaan liittämään. Asiakkaat saattavat ylimitoittaa aurinkosähköjärjestelmänsä tuntitehoonsa nähden, joka tuo lisää haasteita verkkoyhtiölle etenkin verkon etäisissä kohteissa, joissa oikosulkuvirran arvot ovat pienempiä. Tuotantoliittymien osuuden kasvaessa, saattaa muodostua keskittymiä, joissa ongelmat korostuvat. Kuten yliaaltojen ilmaantuvuuden kanssa, jännitteen vaihtelut kasvavat lisääntyvän pientuotannon myötä.

2.3 Nykyinen prosessi tuotannon liittämässä

Nykyinen prosessi pientuotannon liittämiseen alkaa asiakkaan ilmoituksesta yleistietolomakkeella. Lomakkeeseen kirjataan oleelliset tiedot voimalasta, kuten tuotannon tyyppi, invertterin tyyppitiedot, nimellisteho, nimellisvirta ja oikosulkuvirta. Tämän lisäksi asiakas ilmoittaa suojaukseen liittyvät tiedot. (Energiateollisuus, 2019b) Asiakkaan olisi hyvä selvittää liitettävyyden ennen tuotantoyksikön hankintaa, mutta valitettavan usein laitteistot ovat tässä vaiheessa jo odottamassa käyttöönottoa.

Automaatio tallentaa yleistietolomakkeen datan ja siirtää sen eteenpäin. Mikäli kolmivaiheiselle liittymälle liitettävän tuotantoyksikön nimellisteho on alle 6,9 kVA, annetaan sille suoraan käyttöönottolupa. Muussa tapauksessa kohteet siirtyvät liittymämyyjän avaaman tehtävän kautta sähköiseen suunnitteluun yksittäistarkasteluihin. Tällä hetkellä tarkastelut liitettävyydestä tehdään kaavalla 3:

$$S_{max} = \frac{S_k}{25} = \frac{3 \cdot U_v \cdot I_k}{25} = \frac{3 \cdot 230V \cdot 250A}{25} = 6,9 \text{ kVA}$$

Liitettävyyttä tarkasteleva kaava perustuu nopeaan jännitteenmuutokseen, joka aiheutuisi tuotantoyksikön nimellistehon suuruudesta tehonmuutoksesta. Elenialle tehtiin aiheeseen liittyvä diplomityö vuonna 2020, jonka simuloinneissa todettiin kaavan olevan osittain virheellinen (Kari, 2020). Etenkin suurilla voimaloilla kaavan vaatimat oikosulku-tehon arvot olivat liian suuria. Kaavassa huomioidaan yksittäisen tuotantoliittymän vaikutus nopean jännitteenmuutokseen. Se ei osaa huomioida, mikäli rinnakkaisilla liittymillä tapahtuu tehonmuutoksia esimerkiksi pilvisyyden takia.

Toinen ongelma on jännitteen nousu tuotannon yleistyessä, johon ei suunnitteluvaiheessa oteta vielä kantaa. Työssä perehdytään jännitteensäätömenetelmiin, joilla pienennetään mahdollisia jännitteen nousun vaikutuksia.

Verkostosuunnittelija saa tehtävältä käyttöpaikan sijainnin sekä voimalan nimellistehon. On esiintynyt tapauksia, joissa pientuotanto ei sijaitsekaan käyttöpaikan välittömässä läheisyydessä, vaan esimerkiksi useiden satojen metrien päässä varastorakennuksessa. Pientuotannon sähköiset vaikutukset muuttuvat tällöin merkittävästi, ja asiakkaan tulisi mainita asiasta yleistietolomakkeella (Elenia, 2021c). Suunnittelija suorittaa Trimble NIS-verkkotietojärjestelmän avulla vikavirtalaskennan, jolla selvittää liittymispisteen oikosulkuvirran tai käyttää liittymälle dokumentoitua mittausarvoa. Oikosulkuvirran avulla voidaan kaavalla 3 laskea maksimiteho liitettävälle tuotantoyksikölle. Mikäli asiakkaan ilmoittama teho on matalampi kuin maksimiteho, voidaan sille myöntää käyttöönottolupa. Jos teho on puolestaan suurempi, on verkkoa vahvistettava oikosulkuvirran kasvattamiseksi. Käyttöönottolupaa ei tuolloin voida myöntää nimellisteholla toimivalle yksikölle,

mutta fyysisellä erotuksella voimalla voidaan ottaa osittain käyttöön vahvistustoimenpiteiden ajaksi. Poikkeuksia on sovittu yhden liittymän muuntopiireissä, joissa sähkön laadua ei ole voitu taata. Tällöin sopimukselle on kirjattava maininta mahdollisesta laadun heikkenemisestä, jottei asiakas lähde tekemään siitä myöhemmin reklamaatiota.

Jokainen pientuotantokohde tarkastellaan erikseen, ja mahdollisia vahvistustoimenpiteitä on yleensä useita. Tyypillisiä verkon vahvistamista vaativia kohteita ovat mökkiliittymät pienjänniteverkon haarojen päädyissä tai suuret yksittäiset pientuottajat. Jotkut asiakkaat ylivoimittavat tuotantonsa tehon omaan kuormitukseensa nähden, jolloin verkko-yhtiö voi joutua tekemään suuria muutostöitä. Liittyjät todennäköisesti arvioivat tuotantoyksikön tarpeen vuosituoton ja vuosikulutuksen perusteella, jolloin tuotantotehot voivat olla hyvinkin paljon suurempia kuin kuormitustehot. Tällöin verkkoon siirtyvän energian määrä on suurempi, eikä asiakas saa investoinnistaan välttämättä niin kannattavaa. Prosessia tullaan kehittämään myös Elenian puolella, sillä oikeanlaisilla mitoituksilla molemmat osapuolet hyötyvät. Vahvistukset pyritään tekemään pääsääntöisesti aina halvimman vaihtoehdon myötä, eikä mahdollisia tuotantokapasiteetin kasvua ole otettu huomioon. Taustana tähän saattaa olla sähkömarkkinalain mukainen linjaus pientuotannon liittämistä, jonka mukaan alle 2 MVA:n yksiköiden vahvistukset on tehtävä verkonhaltijan kustannuksella. Toisaalta yhden suuremman investoinnin tekeminen voi pitkällä aikavälillä osoittautua järkevämmäksi. Jakeluverkkotoiminnan regulaatio ohjaa kuitenkin Elenian tekemiä investointeja hyvin vahvasti ja yksittäisten liittymätöiden ja verkon vahvistusten ohella tehtäviin lisäsaneerauksiin suhtaudutaan tällä hetkellä melko kriittisesti. Tällaisten kohteiden suunnittelussa tulee käyttää maalaisjärkeä laajuuden määrittelyyn.

Vanhaa verkkoa saneerataan tällä hetkellä verkon strategisen kehityksen Säätö- ja varma-kaapelointiohjelmalla. On siis hyvin mahdollista, että vahvistusta vaativa kohde on joka tapauksessa tulossa saneeraukseen lähivuosina. Tämä tulee tarkastaa aina ennen kuin lähdetään suunnittelemaan vahvistusta, koska yleistyessään yksittäiset vahvistukset saattavat vaikuttaa jo strategiseen suunnitteluun. Työssä pyritään selvittämään syyt, milloin voidaan aikaistaa investointia tai lykätä sitä.

Suunnitteluvaiheen jälkeen saneeraustyö tilataan Elenian alueurakoitsijalta. Kun verkko on sähköisiltä ominaisuuksiltaan riittävä, asiakkaalle annetaan käyttöönottolupa, ja tuotantolaitos saadaan kytkeä verkkoon.

3. MENETELMÄT JÄNNITTEEN LAADUN KORJAAMISEEN

Aiemmin mainitusti tuotannon liittäminen saattaa heikentää jännitteen laatua ja standardien raja-arvojen saavuttamiseksi on tarvittaessa tehtävä korjaavia toimenpiteitä. Jännitteen säätöön ja yliaaltojen suodattamiseen on omat keinonsa, ja tässä luvussa esitetään jännitteen säädön menetelmiä. Yliaaltojen ei ole havaittu aiheuttavan merkittäviä ongelmia, kun verkkoon liitettävän tuotantolaitteiston vaatimuksissa on esitetty yläraja invertterin luomalle särölle.

3.1 Pehmeät toimenpiteet jännitteensäätöön.

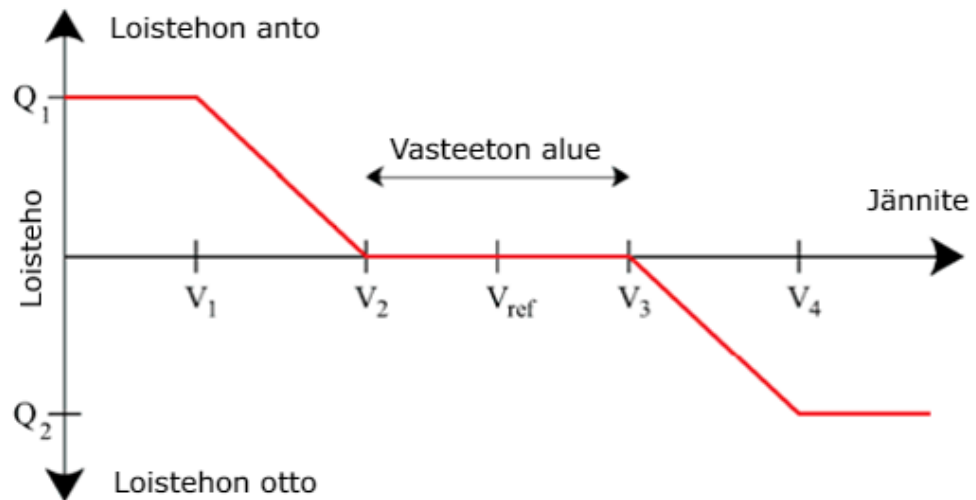
Pehmeillä keinoilla tarkoitetaan toimenpiteitä, joista ei aiheudu merkittävää investointi- tai käyttökustannuksia. Pehmeät keinot ovat monesti ns. aktiivisia menetelmiä, eli säätö muuttuu automaattisesti eri tilanteiden mukaan. Dataa säätöä varten ne voivat kerätä erilaisilta mittareilta joko paikallisesti tai eri puolilta verkkoa. Verkko saattaa olla lähivuosina saneerauksen kohteena, joten esimerkiksi tilapäinen tuotannon rajoittaminen voi olla järkevää, jotta suunniteltuja korvausinvestointeja ei tarvitse aikaistaa.

3.1.1 Invertterin lois- ja pätötehon säätö

Teoreettisesti yksinkertaisin tapa hallita pientuotannon aiheuttamia jännitteenmuutoksia olisi pientuotannon loistehon ja pätötehon säätäminen. Jännitteen mittausta tapahtuu paikallisesti, ja invertterin asetteluarvot säätävät loistehoa niiden mukaisesti. Tarpeen vaatiessa tuotettua pätötehoa voidaan myös rajoittaa. Usein jo pelkkä invertterin tehonsäätö lisää verkkoon liitettävän pientuotannon potentiaalista kapasiteettia. (Kulmala & al., 2014) Jännitteeseen vaikuttava komponentti riippuu verkon R/X arvosta, eli resistiivisyyden ja reaktanssin suhteesta. Pienjänniteverkon komponentit eivät ole kovin reaktiivisia, joten loistehon säädön vaikutukset jännitteeseen ovat vastaavaa pätötehon säätöä pienemmät. (Kabiri R. & al., 2015) Pienjänniteverkon reaktanssi sijaitsee pääosin jakelumuuntajassa, jolloin loistehon säädöllä muokataan muuntajakoneen jännitehäviöitä. Loistehon säätö näkyy silloin myös muille PJ-verkon asiakkaille.

Loisteho voi olla induktiivista (otetaan verkosta) tai kapasitiivista (syötetään verkkoon), ja tätä voidaan hyödyntää jännitteen aleneman tai nousun korjaamiseksi. Invertterin tehokerroin vaihtelee induktiivisen ja kapasitiivisen välillä, sen mukaan kumpaan suuntaan

loistehoa siirretään. Kuvassa 8 havainnollistetaan lois- ja pätötehon säätö jännitteen funktioina. (Rashid & al., 2020)



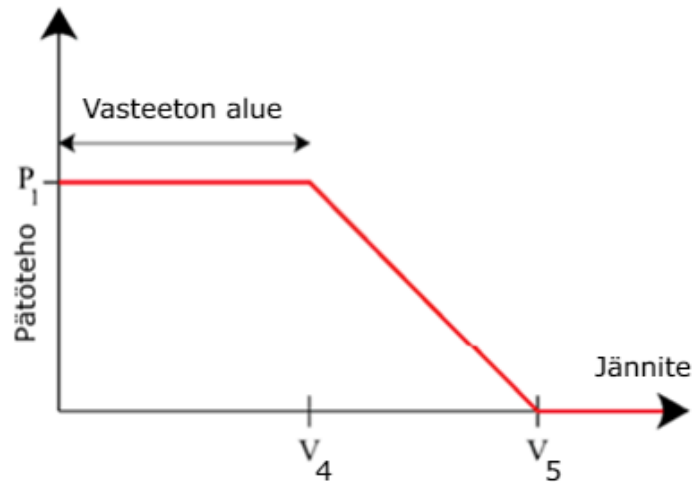
Kuva 8. Loistehon säätö jännitteen funktiona. (Muokattu, Rashid & al., 2020).

Asetteluparametreina voisi esimerkiksi olla V_{ref} (nimellisjännite 1,0 pu), V_1 jännitteen arvolla 0,95 pu ja V_4 1,05 pu. V_2 ja V_3 ovat jännitteen arvoja, jolloin säätöä ei tarvita. Standardin SFS-EN 50160 mukaisiin arvoihin on hyvä olla pelivaraa, ja Elenia onkin suunnittelussaan asettanut tiukempia rajoja, kuten luvussa 2.2.3 todettiin. Kuvassa Q_1 ja Q_2 kuvaavat loistehon säätökapasiteettikykyä.

Normaalissa tilanteessa ilman minkäänlaista tuotantoa tai kompensointia, jännitteet laskevat nimellisjännitteen alapuolelle kaavan 2 mukaisesti. Mikäli jännite laskee V_2 alapuolelle, invertterin tehokerroin muuttuu kapasitiiviseksi ja se alkaa syöttämään verkkoon loistehoa nostaakseen jännitettä. Raja-arvolla V_1 invertteri käyttää kaiken loistehokapasiteettinsa verkon tukemiseksi pätötehoa vähentämättä.

Jännitteen noustessa V_3 yläpuolelle, invertterin tehokerroin kääntyy induktiiviseksi, jolloin se kuluttaa loistehoa. Jännitteet nousevat esimerkiksi kesäpäivänä, kun kuormitus on pientä ja aurinkovoimaloiden tuottama teho on suurta. Invertteri pyrkii lisäämään kuormitusta kuluttamalla loistehoa. Jännitteen noustessa V_4 yläpuolelle, loistehon kulutus on

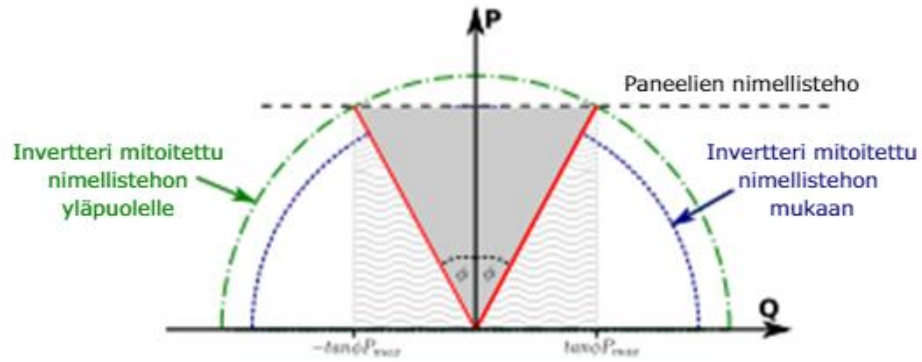
maksimissaan. Jos jännite vielä jatkaa nousuaan, täytyy rajoittaa vielä pätötehoa. Tuotanto leikataan lopullisesti viimeistään standardin raja-arvossa, ja tämän jälkeen on tehtävä muita toimenpiteitä. Kuvassa 9 esitetään pätötehon säätöä.



Kuva 9. Pätötehon leikkaus jännitteen funktiona. (Muokattu, Rashid & al., 2020).

Pätötehoa ei ole tarve leikata ennen kuin loistehon säätökapasiteetti on kokonaisuudessaan otettu käyttöön. Ohjauksen koordinointi on haastavaa, kun pyritään säätämään loistehoa, ennen kuin lähdön viimeiset liittymät joutuvat leikkaamaan tuotantoaan. Tästä syystä pätötehon säädössä V_4 asetteluarvon tulisi olla hieman suurempi loistehon säätöön verrattuna, jolloin muut invertterit ehtivät säätää loistehoa ennen kuin pätötehoa aletaan rajoittamaan.

Kaupallisten inverttereiden hyötysuhteet ovat tyypillisesti 93–96 %, pieni osa voimalan tuottamasta tehosta muuttuu hukkalämmöksi ja osa invertterin käyttöön. Kuluttajalle korkea hyötysuhde on tärkeä ominaisuus, jotta hankitun voimalan tuotannosta saadaan maksimoitua hyöty. Invertteri olisi hyvä mitoittaa hieman tuotannon tehoa suuremmaksi, jotta nimellistuotannolla olisi vielä varaa loistehon säätöön.



Kuva 10. Invertterin mitoituksen vaikutus loistehon säätökapasiteettiin. (Muokattu, Rashid & al., 2020).

Kuvasta nähdään selvästi, miten hieman voimalan nimellistehoa suuremmalla invertterillä (vihreä kaari) vapautetaan loistehon säätöön kapasiteettia tehokertoimen mukaan. X-akselilla on kuvattu loistehon määrää, ja mitä suurempi kulma ϑ tehokertoimella on, sitä enemmän kapasiteettia varataan loistehon tuottoa tai ottoa varten. Todellisuudessa huipputeho voi olla pienempi esimerkiksi suuntauskulmien tai pölyn takia, jolloin invertterin olisi mahdollista säätää hieman loistehoa, vaikka se olisi mitoitettu paneelitehon mukaan. PJ-verkon korkean R/X suhteen takia jännitteensäätöön vaadittu loisteho on kohtuullisen suuri, joten jännitteensäätö onnistuu käytännössä vain mitoittamalla invertterin näennäisteho paneelien nimellistehoa suuremmaksi (Teshome & al., 2019). Näennäistehon mukaan tehty mitoitus huomioi samalla vaatimuksen loistehokapasiteetista.

Invertterin lois- ja pätötehon säätö olisi verkkoyhtiön kannalta lähes ideaali säätömenetelmä, sillä se ei vaatisi juurikaan lisäinvestointeja ja säätö onnistuisi hyvin paikallisesti. Käytännön haasteet vaikeuttavat tehonsäädön käyttöönottoa. Asiakas vastaa itse laitteistostaan, joten invertterin ja aurinkosähköjärjestelmän mitoitukseen ei voida vaikuttaa. Tämän lisäksi asetteluarvojen konfigurointi täytyy tehdä jokaiselle invertterille erikseen. Energiaviraston tämänhetkinen suositus invertterin tehokertoimelle on 1, mutta tulevaisuudessa suositus voi muuttua ja maahantuojat voisivat asettaa valmiit säätöparametrit inverttereihin. Asettelut voidaan tarvittaessa suojata salasanoilla, jotta yksittäiset käyttäjät eivät muuttelisi niitä jälkikäteen oman tahtonsa mukaan.

Tutkimuksessaan (Rashid & al., 2020) havaitsivat, että ylijännitetilanteessa tehonsäätö ja -leikkaus toimi erittäin hyvin, mutta haarojen perällä olevilta liittymiltä jouduttiin leikkaamaan enemmän pätötehoa. Sähkömarkkinalaissa on määritelty tasa-arvoinen kohtelu kaikille sähkön käyttäjille, mutta mikäli toisen asiakkaan tuotantoa joudutaan leikkaamaan sijainnin takia enemmän kuin toisen, syntyy epätasa-arvoa käyttäjien välille.

Verkkoyhtiö voi kompensoida epätasa-arvoa koordinoimalla säätöä ja taloudellisilla hyvityksillä. Lisäksi uusiutuvan energian tuotannon rajoittaminen on yhteiskunnan ja ilmastomuutoksen kannalta epäeettistä.

Asiakas saa myydä ylimääräistä tuotantoaan takasin verkkoon päin, jolloin tuotannon leikkaamisesta tulisi maksaa asiakkaalle kohtuullinen korvaus. Luvussa 4 tullaan laskemaan tarkemmin säätömenetelmien investointi ja operointikustannuksia.

3.1.2 Käämi – ja väliottokytkin sekä jännitteensäätömuuntaja

Käämikytkin sijaitsee muuntajakoneessa, ja sen toiminta perustuu muuntosuhteen vaihtamiseen valmiiksi määritellyillä portailla. Käämikytkimellisiä muuntajakoneita on yleisesti käytössä keski- ja suurjännitepuolella. Muuntosuhteen vaihtamisella voidaan nostaa tai laskea toisen puolen jännitettä, ja muutoksen suuruus riippuu portaan koosta. Rakenne monimutkaistuu portaiden lukumäärän kasvaessa, mutta jännitteensäädöstä tulee samaan aikaan tarkempaa. Hinnat ovat olleet korkeita, mutta niiden odotetaan laskevan kehityksen ja tarpeen lisäyksen myötä. Yleistyvien jänniteongelmien takia on käynnistetty useita kehityshankkeita käämikytkimellisiin jakelumuuntajiin. Nykyisin jakelumuuntajissa on käytössä väliottokytkimiä, joiden periaate on sama, mutta muuntosuhde tulee vaihtaa jännitteettömänä, eikä sitä voida ohjata kaukokäyttöisesti. (Reese & al., 2012)

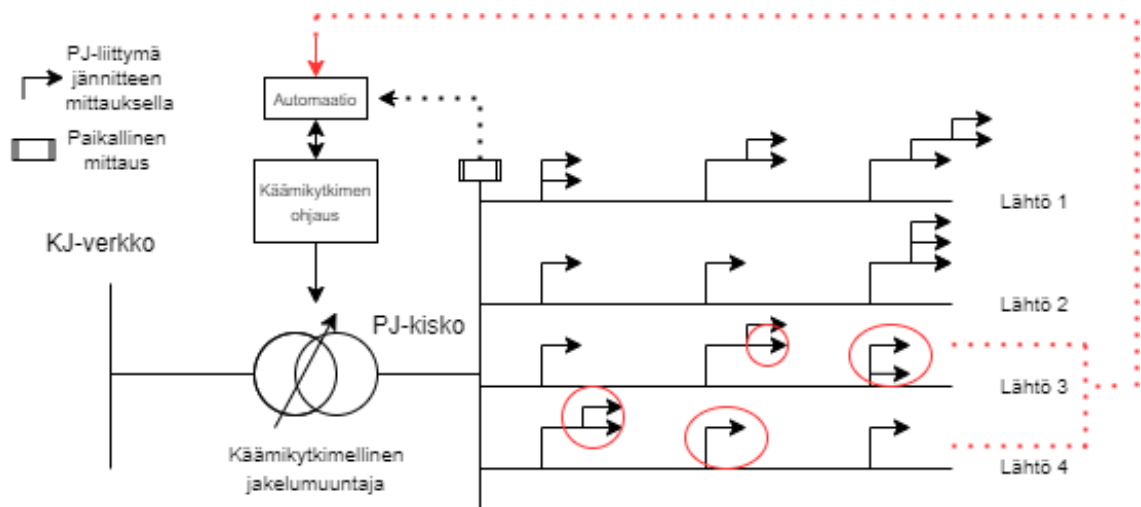
Keskijänniteverkon aiheuttama jännitteenalenema riippuu kaavan 2 mukaisesti muuntopiirin sijainnista KJ-lähdöllä. Tämän lisäksi muuntajakoneen impedanssin aiheuttama alenema on noin 1 %. Sähköaseman lähellä olevalla muuntajalla voidaan teoriassa laskea PJ-puolen jännite SFS-EN 50160 standardin sallimille alarajoille (-10 %), jolloin pientuotanto saisi aiheuttaa jopa 20 % jännitteenousua. Tilanne on esimerkiksi talvella käänteinen, kun aurinkosähkön tuotanto on vähäistä ja verkon kuormitus suurta. Silloin olisi mahdollista nostaa PJ-puolen jännite käämikytkimen avulla ylärajalle (+10 %), jolloin jännitteet saisi puolestaan laskea 20 %. Käämikytkimellinen jakelumuuntaja mahdollistaisi PJ-verkon mitoittamiseen sallitun ± 10 % jänniteenvaihtelun käyttöön sekä joustavan säädön KJ-topologian muuttuessa.

Samanlaiset portaat olisi mahdollista saavuttaa väliottokytkimellä, mutta asennon muuttaminen vaatisi aina katkon sähkönjakelussa ja manuaalisen työn. Yksittäisissä kohteissa voisi käyttää kausivaihtelua, jossa asettelua muutettaisiin talven korkean kulutuksen tai kesän jännitteenousuongelmien mukaan. Laaja-alaiseen käyttöön keino ei sovellu, mutta sillä voitaisi teoriassa saavuttaa 1–2 vuotta lisää aikaa odottamaan esimerkiksi suunniteltua kaapelointia. Yhteistyössä sähköaseman käämikytkimen kanssa voidaan tehdä sopivat toimenpiteet molempien ääripäiden muuntopiireille jännitteen pitämiseksi sallituissa rajoissa saman KJ-lähdön sisällä.

Jakeluverkkoa käytetään säteittäisesti, ja yhden jakelumuuntajan alla voi olla useita pienjännitehaaroja. Pientuotanto saattaa olla keskittynyt yhdelle tai kahdelle haaralle, jolloin ainoastaan niillä on ongelmia korkean jännitteen kanssa. Samanaikaisesti muiden haarojen jännitteet saattavat olla standardin alarajoilla. Jos tällaisessa tapauksessa laskeaan PJ-kiskon jännitettä käämikytkimen avulla, tippuvat jännitteet sallittujen rajojen

alapuolelle. Tämän vuoksi on melko varmaa, että tietyille lähdöille keskittyneeseen tuotantoon käämikytkin ei yksinään toimi jännitteen säätäjänä. (Long, Ochoa, 2016)

Kuva 11 havainnollistaa tilannetta, jossa lähtöjen 3 ja 4 liittymien jännitteet nousevat liitetyn pientuotannon takia (punaisella ympyröidyt liittymät). Älykkäät sähkömittarit lähettävät tiedon korkeasta jännitteestä automaattiselle jännitteensäätöreleelle, joka on kytkettynä ohjaukseen, jolla muutetaan käämikytkimen asentoa ja pienennetään PJ-kiskon jännitettä. Lähtöjen 1 ja 2 liittymillä ei ole tuotantoa, joten kaavan 2 mukaisesti niiden jännitteen laskee entisestään, pahimmillaan sallittujen rajojen alapuolelle.



Kuva 11. Käämikytkimen periaatteellinen toiminta jännitteen mittauksen avulla. (Muokattu, Long & al., 2016).

Paikallisen mittauksen ja lähtöjen 1 sekä 2 liittymien datan avulla tulisi varmistaa, ettei minkään pisteen jännite laske niin alas, eikä automaatiolle lähtisi käskyä muuttaa käämikytkimen porrasta toiseen suuntaan. Turhat muutokset kuluttavat mekaanisesti jakelumuuntajaa ja lyhentävät sen käyttöikä. (Long, Ochoa, 2016)

Eri jännitetasojen käämikytkinten välille voi syntyä ristiriitaa, kun toinen laskee jännitettä, niin toinen pyrkii nostamaan sitä. Pahimmassa tapauksessa tilanne toistuu käänteisesti tämän jälkeen yhä uudestaan. Haittaa voidaan estää asettamalla jakelumuuntajan käämikytkimelle aikaviive, jolloin sähköasemalla tapahtuva muutos on kerennyt tapahtua. Vaihtoehtoisesti voidaan lisätä kommunikaatioyhteys sarjassa olevien käämikytkinten välille, jotta ne ovat tietoisia toisen asennon muutoksesta, ettei turhaa säätöä tapahtuisi. Tällä tavoin saavutettaisiin myös nopea ja optimoitu käyttö käämikytkimille. (Sarimuthu & al., 2016)

Verkon oikosulkuvirtaa käämikytkimellinen jakelumuuntaja ei lisää, jollei sen nimellisteho ole vanhaa muuntajakonetta suurempi. Jännitejäykkyys ei välttämättä parane, joten nopeiden jännitteenmuutosten kannalta käämikytkimellisen jakelumuuntaja ei ole oikea ratkaisu. Pientuotannon ollessa hajautettuna tasaisesti muuntopiirin lähdöille, käämikytkin on toimiva ratkaisu jännitteenousun estämiseen.

Käämikytkimellinen jakelumuuntaja on osittain pehmeä ja osittain kova keino. Uuden verkon suunnittelussa ja rakentamisessa niitä voidaan käyttää suoraan, mutta olemassa olevaan verkkoon ne täytyy vaihtaa vanhojen jakelumuuntajien tilalle.

Mikäli tuotantoa ja jännitteen nousua esiintyy vain yksittäisellä lähdöllä, voidaan sille asettaa jännitteensäätömuuntaja käämikytkimellisen jakelumuuntajan sijaan. Muuntajan avulla voidaan kompensoida tuotantolaitteiston aiheuttamaa jännitteenousua. Nykyisin niitä käytetään jännitteen korottamiseen kohteissa, joissa etäisyys syöttävältä muuntamolta on pitkä ja jännitteenalenemat suuria.

Jännitteensäätömuuntajalla voidaan ratkaista yli- ja alijännitteiden ongelmat yksittäisillä lähdöillä, sillä se säätää automaattisesti jännitteen halutulle tasolle. Mekaanisesti kuormittuvan komponentin pitäisi kestää yli miljoona asetteluarvon muutosta. (Hitachi, 2019) Myöskään jännitteensäätömuuntaja ei kasvata jännitejäykkyyttä, koska verkon oikosulkuteho ei parane sen asentamisen myötä. On myös huomioitava, että jos samaan muuntopiiriin kytkeytyy tuotantoa eri lähdöille, ei toiseen lähtöön kytketty jännitteensäätömuuntaja paranna niiden sähkön laatua. Haja-asutusalueelle ratkaisu saattaa hyvinkin olla kustannustehokas toimenpide. Lisäksi jos verkkoon liitetään lopulta niin paljon tuotantoa, että sitä joudutaan vahvistamaan, voidaan jännitettä säätävät komponentit siirtää toiseen sijaintiin parantamaan sähkön laatua.

3.1.3 Kulutusjousto

Kulutusjousto tai kysynnän jousto on useille tuttu käsite, jonka tarkoituksena on aiemmin ollut kulutuspiikkien tasaaminen ja siirto halvemmille ajankohdille. Asiakkaat voivat valita mieluisen siirtotariffin, jonka mukaan sähkön siirrosta laskutetaan. Elenia tarjoaa tällä hetkellä kolme erilaista vaihtoehtoa: yleissiirto, yösiirto ja vuodenaikasiirto. Yleissiirrolla maksu on sama vuoden jokaisena hetkenä, kun yösiirrolla se on nimensä mukaisesti halvempaa yöllä (22–07). Yösiirron avulla verkkoyhtiöt ovat pyrkineet siirtämään osan päivän kulutuksesta yölle, jolloin siirtovolyymit ovat tyypillisesti pienempiä. Vuodenaikasiirrolla pyritään pienentämään talven suurta kuormitusta kesäaikaan, jolloin siirtomaksu on alhaisempi. (Elenia, 2021d)

Yhä tarkemmalle kulutusjoustolle on syntynyt tarve sähkömarkkinoiden muutoksen myötä, kun sääriippuvainen tuotanto on lisääntynyt. Statistiikkaan perustuvien kuormituskäyrien ja kausivaihteluiden tasaaminen ei välttämättä riitä sähkön laadun ylläpitoon. Älykkäiden sähkömittareiden avulla, joita Elenia alkoi massavaihtamaan tänä vuonna, edesautetaan entistä tarkempaa kuorman ohjausta asiakkaiden kokemaa mukavuutta pienentämättä. Kuormanohjaukseen voidaan kytkeä esimerkiksi omakotitalon lämmitystä tai lämminvesivaraajaa, joiden hetkellisestä poiskytkemisestä ei ole haittaa. Sähkömarkkinat mahdollistavat asiakkaiden osallistumisen yhä paremmin, ja saavuttamalla rahallista hyötyä asiakkaat ovat suhtautuneet erittäin myönteisesti kulutusjouston kaltaisiin menetelmiin.

Yksittäisen liittyjän kuormanohjaus on kapasiteetiltaan suhteellisen pientä, joten yhdistämällä useamman liittyjän kapasiteetit, saadaan toimiva kulutusjousto. Elenian 2020 toteutetussa pilottihankkeessa n. 70 asiakkaalle asennettiin kuormaa ohjaavat älymittarit, joiden avulla saatiin tehonmuutos etäyhteydellä noin 3 minuutissa (Elenia sisäinen, 2020). Ohjauksen tulisi toimia vieläkin nopeammin, jotta se hyödyttäisi nopeissa jännitteenmuutoksissa. Paikallisella mittauksella ja ohjauksella se voisi toimia, mutta silloinkin asetteluarvot tulisi säätää kohteisiin erikseen. Jännitteen nousun kannalta lämmityksen kuormanohjaus ei ole optimaalinen keino, sillä ongelmat keskittyvät kesäaikaan, jolloin lämmityskuormat ovat valmiiksi kytkettyinä pois. Jos jännitteenousu vaikuttaa päivittäiseltä ongelmalta, kuormanohjaus tuskin on asiakaslähtöisin tapa korjata asia.

Tulevaisuutta varten olisi hyvä löytää säätömahdollisuuksia myös päälle kytkettävistä kuormista. Tällä hetkellä sellaisia kuormia voisivat olla sähköautojen lataukset. Yösiirtoa

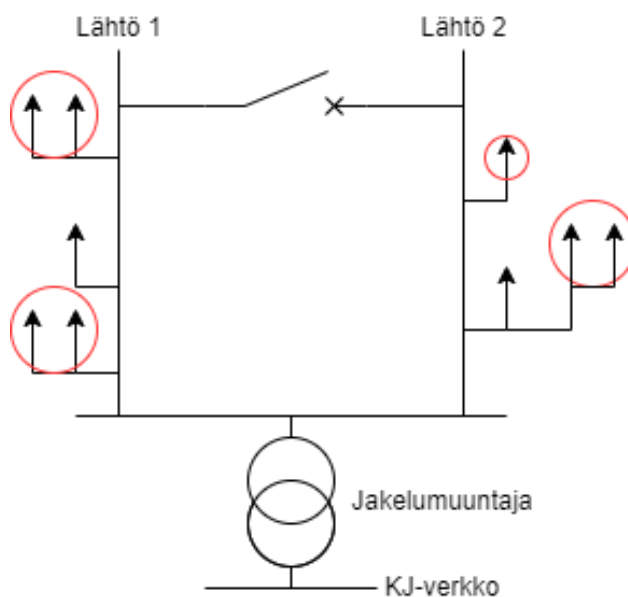
käyttävien tuottaja-asiakkaiden kuormitusta kuten lämminvesivaraajia olisi hyvä ohjata tulevaisuudessa myös tuotannon huippuhetkille.

3.1.4 Verkkotopologian muuttaminen

Pientuotannon sijaintiin ei voida vaikuttaa, joten on mahdollista, että muodostuu alueita, joissa kaikki tuotanto sijaitsee yhden muuntopiirin sisällä. Tällaisissa tapauksissa voidaan muuttaa verkon syöttötopologiaa jakamalla tuotantoliittymät kahden tai useamman muuntopiirin alaisuuteen. (Bayer & al. 2018) Keinossa on tekniset haasteensa, sillä jakeluverkkoa käytetään säteittäisesti, eikä valmista rengasyhteyttä välttämättä ole rakennettu. Rengasyhteyden rakentaminen tarkoittaa keinon muuttamista käytännössä verkon vahvistamiseksi. Toisekseen haja-asutusalueen muuntopiirit sijaitsevat usein irrallaan toisistaan, eikä topologian muuttamisella ole sähköteknisesti mahdollista parantaa siirtokapasiteettia tuotannon lisäämiseksi.

Potentiaalisissa kohteissa verkko olisi rakennettu valmiiksi varasyöttöineen, alueella olisi useampi jakelumuuntamo ja tuotanto olisi keskittynyt yhteen muuntopiiriin. On hyvin mahdollista, että tulevaisuudessa verkkoa olisi tarve vahvistaa. Muutaman vuoden lykkäämisen ansiosta voidaan parhaassa tapauksessa tehdä järkevämpiä verkkoinvestointeja. Mahdollisuutta topologian muuttamiseen tulisi tarkastella mitoituksen yhteydessä, sillä lähtökohtaisesti siitä ei synny muita kustannuksia kuin kytkennän muuttamisesta aiheutunut työ.

Teoriassa topologian muuttaminen on mahdollista yhdenkin muuntopiirin sisällä. Alla olevassa kuvassa punaisella ympyröidyt liittymät sisältävät tuotantolaitteiston. Alkuperäisessä kytkentätilanteessa lähtöjen välinen kytkin on ollut kiinni ja lähdön 2 alkupään kytkin auki.



Kuva 12. Muuntopiirin lähdön jako erillisiksi lähdöiksi.

Jakokaapilla on avattu kytkin lähdön sisällä, jolloin lähtö on jaettu kahteen osaan. Edellytyksenä lähtö olisi alun perin rakennettu mahdollisuudella syöttää verkkoa molemmista suunnista, mutta muuntamalla toinen kytkin olisi auki. Tällä keinolla olisi mahdollista jakaa yhdelle lähdölle keskittynyttä tuotantoa. Todellisuudessa verkko on taajamissa usein valmiiksi kuvan mukainen ja varayhteydet ovat rakennettu mahdollisia vikatilanteita varten.

3.2 Kovat toimenpiteet jännitteensäätöön

Kovat toimenpiteet ovat keinoja, joista aiheutuu suuria investointikustannuksia, eli käytännössä verkon vahvistamista ja säätökomponenttien lisäämistä. Aiemmin todettiin oikosulkutehon ja siten oikosulkuvirran olevan yhteydessä nopean jännitteenmuutoksen suuruuteen, joten oikosulkuvirtaa kasvattamalla pystytään liittämään tehokkaampaa tuotantoa. Johtimen poikkipinta-alan kasvaessa sen resistiivisyys pienenee, jolloin jännitteenalenemaa voidaan pienentää kaapelin poikkipinta-alaa kasvattamalla. Sama pätee jännitteen nousun kannalta, jolloin jännitettävä nostava vaikutus pienenee. Vahvemmat komponentit kestävät virtaa paremmin, joten verkkoa voidaan kuormittaa myös enemmän.

3.2.1 Verkon vahvistus

Perinteinen tapa jännitteen laadun parantamiseksi on ollut verkon vahvistus. Verkkotietojärjestelmällä on helppo suunnitella ja laskea verkon muutosten vaikutukset oikosulkuvirran arvoihin, joita on käytetty mitoittamisen perustana pientuotantokohteille. Pienetkin oikosulkuvirtaa kasvattavat muutostyöt, kuten kaapeleiden tai ilmajohtojen tuplaukset ja muuntajakoneen vaihdot maksavat tuhansia euroja. (Energiavirasto, yksikköhinnasto 2021) Puhutaan siis huomattavasti suuremmasta kustannuksesta, kuin esimerkiksi tuotannon hetkellisessä rajoittamisessa jännitteen noustessa sallittujen rajojen yläpuolelle.

Energiavirasto teki muutoksia sähköjakelun valvontamenetelmiin kesken valvontajaksion, ja pidensi toimitusvarmuustavoitteiden aikataulua ja poisti siihen liittyvän kannustimen. (Energiavirasto, 2021) Käytännössä tämä tarkoittaa, että aiemmin mainitun laajan kaapelointiohjelman edistyminen hidastuu investointien leikkausten myötä. Tulevaisuutta ajatellen tämä hankaloittaa hieman pientuotannon liittämistä, sillä vanhan verkon sähköiset ominaisuudet ovat yleensä huonompia. Vanha verkko on joka tapauksessa tulossa ikänsä päähän ja saneerattavaksi, mutta leikkausten myötä projekteja siirretään myöhemmäksi. Pakolliset työt, kuten uusien liittymien rakentaminen ja verkon vahvistus pientuotantoa varten syövät kokonaispottia investoinneista, mikä edelleen lykkää suurempien projektien toteutusta. Mahdollisen lisäkapasiteetin varauksiin tulee suhtautua kriittisesti edellä mainituista syistä, ja voi olla järkevää toimia edelleen edullisimman vaihtoehdon kautta. Sekaverkossa vahvistamiseen yksi edullinen ratkaisu on ilmajohtojen tuplaaminen, jossa lisätään rinnakkainen johdin olemassa oleviin pylväisiin (Energiavirasto,

yksikköhinnasto, 2021). Ilmalinjan kaapelointi ja purut voivat odottaa silloin mahdollisesti suunniteltua kaapelointiohjelmaa.

Muuntajakoneen vaihto suuremmaksi lisää PJ-puolella liitettävän tuotannon kapasiteettia myös muilla lähdöillä. Kaapelisaneeraus hyödyttää vain kyseistä lähtöä, ja mikäli ei ole tietoa mille lähdölle on tulossa tuotantoa, tulisi koko muuntopiiri saneerata. Sekään ei ole välttämättä kannattavaa, koska pienet tuotantoyksiköt saadaan todennäköisesti muutenkin liitettyä. Toisaalta yhden lähdön oikosulkuvirran kasvattaminen pienentää lähdöllä tapahtuvaa jännitteennousua, mikä pienentää myös takaisinpäin säteileviä jännitevaikutuksia.

Verkon vahvistus voi olla kustannustehokkaampi toimenpide monessa tapauksessa, mikäli lisääntyvän tuotannon takia verkko tulisi joka tapauksessa saneerata lähivuosina. (Bayer & al., 2018) Jos ei ole odotettavissa tuotannon tai liittymien määrän kasvua (esimerkiksi haja-asutusalueella), on hyvä tarkastella vaihtoehtoisia ratkaisuja.

Aiemmin työssä todettiin vahvistuksen kuuluvan verkkoyhtiön vastuulle. Joissain tapauksissa asiakkaan omistama liittymisjohto toimii oikosulkuvirran pullonkaulana muuhun verkkoon nähden, ja jopa estää tietyn suuruisen tuotantolaitteiston liittämisen. Tällöin asiakkaan tulisi uusia liittymisjohtonsa, jottei laitteisto aiheuta sähkönlaadullisia ongelmia muille verkkokäyttäjille. Jos asiakas on ainoa liittynyt lähdöllä tai muuntopiirissä, niin silloin asiakkaan tulisi hyväksyä oman laitteistonsa aiheuttama sähkön laadun heikkeneminen, mikäli ei halua omaa kaapeliaan uusia.

3.2.2 Kompensointilaitteet

Loistehoa on induktiivista ja kapasitiivista (otetaan verkosta tai annetaan verkkoon) ja ne syövät verkon siirtokapasiteettia. Kompensointiparistoilla on tyypillisesti kompensoitu loistehoa kulutuspuolelta läheisyydessä. Paristolle portaita eri kompensointitasoilla, jotta loisteho saadaan mahdollisimman tarkasti kompensoitua. Verkkoyhtiö hyötyy loistehon kompensoinnista, kun verkkoon ei tarvitse varata kapasiteettia sen siirtoa varten. Loistehoa tuottavat tai kuluttavat asiakkaat kompensoivat usein oman loistehonsa, sillä verkkoyhtiöt perivät loistehomaksuja. Esimerkiksi Elenia veloittaa 6,30 €/kVAr/kk tehosiirtoluokassa 1 (Elenia, 2021b)

Samantyyppisiä laitteita voisi käyttää hyödyksi jännitteensäädössä pienjännitepuolella. Asentamalla kompensointiparistoja ja -keloja, voidaan laskea tai nostaa verkon jännitettä samalla tavalla kuin käyttämällä invertterin loistehon säätöä. Luvussa 3.1.1 todettiin, että invertterillä ei ole loistehon säätömahdollisuutta maksimituotannolla, mikäli se on mitoitettu paneelien nimellistehon mukaan. (Teshome & al., 2019).

Reaktorilla on mahdollista ottaa verkosta riittävä määrä loistehoa jännitteiden laske-
miseksi korkean tuotannon aikana. Elenialla on käytössä reaktoreita jo KJ-verkossa, jossa kaapeleiden tuottamaa loistehoa on kompensoitu verkon siirtokapasiteetin parantamiseen. Pienjännitepuolella tarve tulee puolestaan jännitteensäätöä varten, kun pien-
tuotantolaitteistojen määrä kasvaa.

Perinteisesti verkkoa suunniteltaessa tarkastellaan jännitteenaleneman suuruutta arvioimalla kulutuspuolelta kuormitusta tai käyttämällä olemassa olevaa mittausdataa. Suurin jännitteenalenema esiintyy tyypillisesti talvella, jolloin tuotantoa on rajallinen määrä ja verkon kuormitus on suurempaa. Jos verkosta otetaan samanaikaisesti loistehoa reaktorin avulla, jännitteenalenema voi kasvaa liian suureksi. Korkeat jännitteet ilmenevät sen sijaan kesäaikaan, jolloin olisi tarvetta loistehon otolle. Mikäli verkkoon asennetaan sammutusreaktoreita, niiden tulisi siis olla portaittain säädettäviä, sillä ne ottavat jatkuvasti verkosta loistehoa. (Teshome & al., 2019)

Aurinkovoimalan tuottama teho vaihtelee puolipilvisellä säällä todella paljon, joten jännitteensäätöön vaadittavan loistehon määrä vaihtelee. Reaktorin portaiden jatkuva vaihto on mekaanisesti kuluttavaa, mutta kaupallisesti on saatavilla kytkimiä, joiden pitäisi kestää noin 1 000 000 muutosta. Elektronisilla kytkimillä vältetään mekaaninen rasitus, mutta niiden kustannukset ovat suuremmat. Niillä on mahdollista myös vaihtaa kytkimen asentoa hyvin nopeasti, joten reaktoria olisi mahdollista hyödyntää nopeissa jännitteenousuissa. (Teshome & al., 2019) Teshomen tutkimuksen mukaan kytkimien

kulumista olisi mahdollista vähentää merkittävästi käyttämällä ensin invertterien loistehoa jännitteensäätöön ja tarpeen vaatiessa muuttaa reaktorin säätöä. PJ-verkon korkean R/X-suhteen vuoksi reaktorin mitoitus pitäisi olla käyttötarkoitukseen nähden kohtuuttoman suuri.

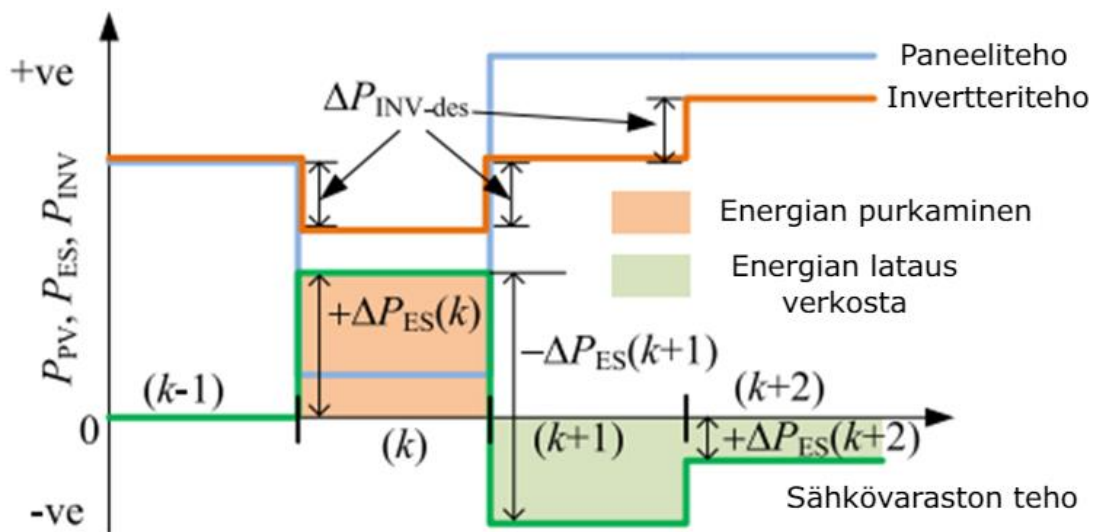
3.2.3 Energiavarastot

Sähkö on tuotteena hankalasti varastoitava, mutta sähköenergia voidaan muuttaa toiseen muotoon kuten veden potentiaalienergiaksi tai akkujen kemialliseksi energiaksi. Tarpeen tullen tämä energia voidaan muuttaa takaisin sähköenergiaksi. Akut ovat käteviä tapoja varastoida energiaa pienissä määrin, mikä soveltuu hyvin jakeluverkkotasolle. Energiaa voidaan ladata akkuun ylituotannon aikana, ja purkaa kun sille on tarvetta. Akkujen toiminta-ajat ovat hyvin nopeita, joten niillä pystyttäisiin kompensoimaan äkillisistä tehonmuutoksista tapahtuvat nopeat jännitteenmuutokset. (Alam & al., 2021) Sähkömarkkinalaissa on kuitenkin eritelty sähköenergian siirto ja myynti. Tämä tarkoittaa, ettei verkkoyhtiö voi myydä sähköenergiaa kuluttajille. Joskus sama konserni voi tarjota sekä siirtoa että sähköenergiaa, mutta palvelua tarjoava yritys on eri. Tästä syystä energiavaraston lisääminen verkkoon on hieman monimutkaisempi prosessi kuin esimerkiksi verkon vahvistus.

Monet asiakkaat pyrkivät omavaraisuuteen, ja voivat lisätä pientuotantonsa rinnalle akkujärjestelmän. Yhdistelmä tuotannosta ja varastosta pienentäisi asiakkaan tarvetta verkosta otetulle energialle ja pienentäisi verkkoon syötetyn tehon määrää tuotannon ylittäessä kulutuksen. Pientuotannon aiheuttama jännitteen nousu pienentyisi, kun invertteriltä vastaanotettava teho vähenee. (Alam & al., 2021) Akuston ohjaustapa tulisi selvittää verkon mitoitusta suunniteltaessa. Asiakas voisi pyrkiä maksimoimaan taloudellisen hyötynsä, ja myydä energiaa verkkoon kahden invertterin kautta (paneelit + energiavarasto) pörssisähkön hinnan ollessa korkealla. Silloin laitteiston äkillinen irtoaminen voisi aiheuttaa invertterin ja laitteiston yhteenlasketun tehonmuutoksen, mikä vaatisi jälleen ylimääräistä vahvistustarvetta. Hybridi-invertterillä sekä tuotanto että varasto on kytketty yhteen invertteriin, joka määrää kokonaistehon. Myös hyötysuhde kasvaa hybridi-invertterin

myötä, koska energiaa ei tarvitse ensin vaihtosuunnata paneelien invertterillä ja sen jälkeen tasasuunnata akun omalla invertterillä.

Akustosta olisi hyötyä myös vikatilanteessa, milloin tuotanto kytketään pois verkosta turvallisuussyistä. Oikeanlaisilla kytkennöillä ja saarekkeen muodostavalla invertterillä asiakas pystyisi pitämään sähköt itsellään, kunnes akun kapasiteetti on käytetty tai verkon vika korjattu.



Kuva 13. Invertteritehon tasaaminen sähkövaraston avulla. (Muokattu lähteestä Alam & al., 2021).

Kuvasta 13 nähdään, että verkkoon syötetty teho on summa paneelien ja energiavaraston tehosta. Akuston nopealla reagoitajalla voidaan pienentää paneelien äkillisiä tehonmuutoksia, ja tasata invertterin verkkovaikutuksia.

Yleistietolomakkeelle (Elenia Oy, 2021) kirjataan mahdollinen energiavarasto, mutta tällä hetkellä niitä on vielä melko vähän. Nopeita jännitteenmuutoksia varten tuotantoyksikön tehoa on suhteutettu liittymän oikosulkuvirtaan. Jatkossa energiavaraston tehon voisi vähentää tuotannon nimellistehosta, kun arvioidaan todellista maksimitehoa. Parhaassa tapauksessa voidaan välttää jopa muuten vaadittu verkkoinvestointi. Kuvasta 13 voidaan kuitenkin päätellä, että energiavarasto ei saisi olla tyhjä eikä täysi, jotta sitä voitaisi hyödyntää tehon tasapainottamiseen. Akut voivat sopivalla varaustasolla pienentää nopeita jännitteenmuutoksia, mutta asiakas kokee akustaan hyötyä tasapainottamalla omaa tuotantoa ja kulutustaan. Nopeita tehonmuutoksia varten akussa tulisi olla tehokapasiteettia vastaamaan äkillisiä muutoksia, mutta jännitetason mahdollista nousua varten tarvitaan todennäköisesti myös energiakapasiteettia.

4. MENETELMIEN SOVELTUVUUS ERILAISIIIN TUOTANTOKOORTEISIIN

Edellisessä luvussa kuvailtiin jännitteen laadun korjaustoimenpiteitä. Tässä luvussa esitellään tyypilliset kohteet Elenian verkkoalueella, johon valitaan erilaiset jännitteensäätömenetelmät. Tyypikohteet saadaan valittua pienjänniteverkon laskentadatan perusteella, josta suodatetaan keskiarvo liittymien etäisyydestä muuntamoon. Tämän lisäksi suodatusta jatketaan oikosulkuvirran ja kuormituksen keskiarvojen perusteella. Kohdetarkasteluissa lasketaan tyyppitapauksille indeksikustannus, joka sen jälkeen suhteutetaan koko verkkoalueen tasolle. Käämikytkimellinen jakelumuuntaja, jännitteensäätömuuntaja, verkon vahvistus ja tuotannon leikkaus ovat aiempien lukujen ja arvioidun käytännöllisyyden perusteella valitut säätökeinot.

Tässä luvussa esitetään vaihtoehtoiset tavat nopeiden jännitteenmuutosten ja jännitteen nousun tarkastelemiseen. Uusilla laskentatavoilla olisi mahdollista päästä irti erillisistä laskukaavoista ja taulukoista, johon Eleniallakin on pyritty suunnitteluprosessin sulavoittamiseksi. Verkkotietojärjestelmän laskennan avulla olisi mahdollista huomioida verkon topologia paremmin verrattuna matemaattiseen kaavaan, vaikka esimerkiksi oikosulkuvirran arvo riippuukin verkon rakenteesta.

Uusien mittareiden myötä saadaan tuntisarjat tuotannolta, joten liittymälle muodostuu oikeanlainen kuormitus, tällöin suunnittelussa saadaan lisättyä suoraan tuotannon teho käyttöpaikalle. Datahubin myötä taseselvitysjakso muuttuu viiteentoista minuuttiin, jonka myötä saadaan parempi kuva tehonvaihteluista. Toisaalta uudet mittarit voivat antaa vieläkin tarkempaa dataa verkkoyhtiön käyttöön.

4.1 Liittymien luokittelu verkkodatan perusteella

Tarkasteltavat kohteet valitaan Elenia Verkko Oyj:n datan avulla. Kohteet haetaan suodattamalla liittymiä oikosulkuvirran, huipputehon, tuotantotehon ja kuluttajatyypin mukaan. Kuten työssä aiemmin todettiin, pieni oikosulkuvirta, ja sitä myötä oikosulkuteho on usein rajoittava tekijä tuotannon liittämässä. Alla esitetyissä taulukoissa esitetty analyysiä yksivaiheisten oikosulkuvirtojen perusteella.

Taulukko 4. Pienen 1v-oikosulkuvirran liittymät.

Liittymien lkm	Oikosulkuvirta I_k
317	< 100 A
9 887	< 180 A
14 880	< 200 A
29 998	< 250 A
50 016	< 300 A
75 949	< 360 A

Elenian 3x25A ja 3x35A liittymien vaatimusten alapuolisia oikosulkuvirtoja on Elenian verkossa noin 30 000 kappaletta. Vanhassa verkossa 180 A katsotaan taulukon 3 mukaisesti riittävän oikosulkuvirraksi, jolloin heikon oikosulkuvirran liittymien määrä tippuu noin kolmannekseen. Täten alle 180A I_k liittymien osuus kaikista liittymistä on $\frac{9887}{285\,684} * 100\% = 3,4\%$. Vuosienergiat ja huipputehot näiltä liittymiltä olivat pääosin hyvin pieniä. Mikäli tehohuippuja esiintyi 3x35A liittymän sallimien rajojen yläpuolella, vuosienergia oli käytännössä mitätön.

Mediaani kaikkien liittymien oikosulkuvirroista on 525 A, jolla saadaan nopeiden jännitteenmuutosten puitteissa liitettyä 14,5 kVA suuruinen tuotantoteho. Arvo vaikuttaa tuotannon liittämisen kannalta varsin hyvältä, kun huomioidaan että mediaaniteho liitettävistä tuotantoyksiköistä on 4,4 kVA.

Liittymätyypit ja kulutusryhmät ovat hyvin erilaisia keskenään, joten tarkastelua tulee tehdä myös niiltä osin. Alla esitetty liittymäjakaumat eri liittymätyyppien mukaan.

Taulukko 5. Liittymien jakautuminen tyypeittäin.

Liittymien lkm	Tyyppi
10 074	Kerros- ja rivitalot
167 210	Omakotitalot ja paritalot
10 791	Maatalouden rakennukset
66 594	Vapaa-ajan asunnot
3 433	Teollisuus
6 244	Palvelut/ravintolat
12 699	Yhteiskunnalliset palvelut
8 763	Muut
285 684	Yhteensä

Elenian verkko on suurilta osin haja-asutusalueella ja taulukosta 5 nähdään suurimman osan liittymistä olevan asuinrakennuksia. Etenkin omakotitalojen ja vapaa-ajan asuntojen määrä on huomattavan suuri. Maatalous korostuu myös yksittäisenä ryhmänä, ja työssä mainittiin niiden aiheuttavan ongelmia suurten tuotantolaitteistojen takia.

Tarkastellaan tuotantoliittymien jakaumaa liittymätyyppien kesken.

Taulukko 6. Tuotantoliittymien jakautuminen liittymätyyppien kesken.

Tuotantoliittymien lkm	Tyyppi
43	Kerros- ja rivitalot
5 331	Omakotitalot ja paritalot
436	Maatalouden rakennukset
598	Vapaa-ajan asunnot
66	Teollisuus
168	Palvelut/ravintolat
133	Yhteiskunnalliset palvelut
161	Muut
6 936	Yhteensä

Vaikka kerros- ja rivitaloliittymien sekä maatalouden liittymien määrä on lähes sama, tuotantoa on kytketty maatalouden yhteyteen huomattavasti enemmän. Maaseudulla on usein aurinkovoimalan vaatima tila vapaana, kun kaavoitetulla alueella tontit ovat lähellä toisiaan, eikä mahdollisuutta tuotannon lisäämiseen aina ole. Kerrostalojen kattojen pinta-alat ovat suhteellisen pieniä, eikä sinne saada nimellisteholtaan liittymään nähden suurta tuotantoyksikköä. Verkko on kaavoitetulla alueella usein vahvempaa, ja pienet yksikkökoot eivät aiheuta ongelmia jännitteeseen. Tämän lisäksi viereiset rakennukset varjostavat herkemmin naapuritalojen kattoja taajama-alueella, eikä huipputehoja välttämättä saavuteta.

Taulukosta 6 nähdään, että tuotantoliittymät keskittyvät selvästi omakotitaloihin, vapaa-ajan asuntoihin ja maatalouden rakennuksiin. Näiden ryhmien osuus heikkojen oikosulkuvirtojen liittymistä on myös merkittävä. Alle 180A I_k arvon liittymistä $\frac{9243}{9887} * 100\% = 93,5\%$ kuuluu samoihin ryhmiin. Myös kaikki alle 180A yksivaiheisen oikosulkuvirtojen olemassa olevat tuotantoliittymät kuuluvat näihin liittymätyyppihin.

4.2 Tarkasteltavien kohteiden valinta

Ensimmäiset kaksi kohdetta ovat samankaltaisia, joista toinen on suunniteltu saneerattavaksi lähivuosina. Suodatus tehtiin edellisen luvun datan avulla, ja heikosta verkosta valittiin tyyppikohteet keskiarvojen ja mediaanien avulla. Vielä hankalampia ongelmata-pauksiakin varmasti löytyy, mutta se ei edusta suurta massaa yhtä hyvin. Kaapeloitavaksi suunniteltu kohde tarkastettiin Elenian KAIKU-järjestelmästä, josta nähdään lähivuosien säävarmahankkeet.

Kustannusarviota varten heikosta verkosta otettiin keskiarvo liittymien etäisyyksistä muuntamolta, joka on noin 840 m. Mediaanietäisyys on 792 m, joten etäisimmät liittymät nostavat selvästi keskiarvoa. Suurimmat etäisyydet ovat selvästi yli 2 000 m, joten on todennäköistä, ettei pelkällä pienjänniteverkon vahvistuksella saada tuotantoa liitettyä. Tästä syystä laskennassa käytetään vahvistuksen pituutena 800 metriä. Tämän jälkeen liittymät suodatettiin vuosienergian ja huipputehon perusteella jälleen keskiarvon lähistölle. Jäljelle jääneistä liittymistä otettiin oikosulkuvirran mediaani, joka oli 142 A. Kun vielä suodatettiin oikosulkuvirran mediaaniarvon ympärille, jäljelle jäi noin 20 liittymää, jotka kuvastavat heikon pienjänniteverkon tyyppi liittymiä. Näin liittymät pystytään tarkastelemaan verkkotietojärjestelmästä manuaalisesti. Jännitteen korjausta varten toimenpiteiksi valittiin ilmajohtoverkon vahvistus ja tuotannon leikkaus. Regulaation vaikutukset näkyvät investointitasoissa, joten laajempien kaapelointien odotetaan tapahtuvan normaalin investointiohjelman mukaisesti.

Suuret yksittäiset tuotantoyksiköt tunnistettiin ongelmaksi omien ja muiden suunnittelijoiden havaintojen perusteella. Esimerkiksi 42 kVA nimellistehoinen voimala vastaa 3x63 A pääsulakkeiden oikeuttamaa tehoa. Tuotantoyksikkö vaatii kuitenkin noin 1520 A I_k arvon, kun tavalliselle kulutusliittymälle riittää suojauksia varten 320 A. Verkkoa tarvitsee lähtökohtaisesti vahvistaa kohtuuttoman paljon liittymän kokoon nähden. Useissa tapauksissa muuntajakoneen kuormitukset jäävät todella vähäiselle saneerauksen jälkeen, kun verkko mitoitetään edellä kuvatusti nopeiden jännitteenmuutosten mukaan.

Viimeinen työssä tarkasteltava kohde keskittyy valmiiksi kaapeloituun ja vahvaan verkkoon, jossa tuotantoliittymien määrä on merkittävä. Odotusarvoisesti jännitteen nousu on ensisijainen ongelma nopeiden jännitteenmuutosten sijaan. Kohdetarkastelussa pyritään arvioimaan tuotannon vaikutusta jännitteen nousuun. Seuraavan sukupolven mittareiden myötä käyttöpaikoille on mahdollista syöttää erikseen liittymän kuormitus ja tuotanto, josta Trimble NIS saa muodostettua kokonaiskuvan. Valitut jännitteensäätömenetelmät ovat käämikytkimellinen jakelumuuntaja ja jännitteensäätömuuntaja, sillä työssä

haluttiin selvittää niiden kustannustehokkuus perinteisiin vahvistustoimenpiteisiin verrattuna. Invertterin loistehosäätöä ei valittu tarkasteluihin voimassa olevan tehokerroinsuosituksen takia. Menetelmät valitaan sen mukaan, miten tuotanto on jakautunut lähtöjen välillä. Verkkodatasta ei saatu eriteltyä tällaisia muuntopiirejä, mutta ongelman nähdään yleistyvän tulevaisuudessa tuotantoliittymien osuuden kasvaessa. Työn kannalta ei ole relevanttia, onko tällaisia muuntopiirejä vielä olemassa, vaan tarkastelu voidaan tehdä erilaisin skenaarioin.

4.3 Kohdetarkastelut

Verkonvahvistuksen kustannusarvioon tekemiseen käytetään EV:n yksikköhinnaston mukaisia keskimääräisiä kustannuksia komponenteille ja työlle, sekä valmistajalta saatuja komponenttihintoja. Keinoissa joudutaan arvioimaan myös tehonleikkauksesta aiheutuvia kustannuksia ja esimerkiksi ylirajoituksesta aiheutuvia energiahäviöitä.

Laskelmissa joudutaan käyttämään joitain vahvoja oletuksia. Yksittäisessä tapauksessa oletukset eivät ole välttämättä merkittäviä, mutta yhtiötasolla tarkasteltaessa virhemarginaali kasvaa huomattavasti. Tuloksia voidaan kuitenkin pitää suuntaa antavina.

4.3.1 Tyypillinen heikon ilmajohtoverkon liittymä

Edellisessä luvussa kuvailtiin kohteiden ominaisuuksia. Rajatuista kohteista lähes kaikkiin riittää lähtökohtaisesti PJ-ilmajohdon vahvistaminen. Liittymät sijaitsevat verkossa, jonka runkona toimii pääosin yksinkertainen riippukierrejohto, jonka poikkipinta-ala on 25–50 mm².



Kuva 14. Heikon oikosulkuvirran tyypilliliittymä.

Kuvaan 14 on merkitty tyyppiliittymä keltaisella ympyrällä, ja oranssilla värillä ympyröity saman haaran kaksi muuta liittymää, joilla oikosulkuvirta on alle 180 A. Keltaisella värillä korostettu PJ-runko, jota vahvistamalla saavutetaan vaaditut sähköiset arvot.

Joissain kohteissa saattaa olla useita satoja metrejä vesistökaapelointia, jolloin vahvistus täytyy tehdä luonnollisesti toisella tavalla. Koska tyyppiliittymien rajauksissa käytettiin myös vuosienergiaa ja tehoja, niin samojen PJ-haarojen varrella on muitakin heikon oikosulkuvirran liittymiä, jotka eivät välttämättä sisälly kyseiseen rajaukseen. Tyyppiliittymät ovat pääosin linjojen loppupäässä, joten ilmalinjan vahvistus parantaa samalla usean liittymän sähköisiä ominaisuuksia. Näin ollen kustannuksia suhteuttaessa ei tarvitse tarkastella jokaista liittymää erikseen, vaan oletetaan haaralla olevan useampi heikon sähkönlaadun liittymä. Keskiarvoisesti tyyppiliittymien kanssa samalla PJ-verkon haaralla on 2,7 liittymää, joiden oikosulkuvirta on alle 180 A. Haaroilla oli useampia noin 200 A I_k arvon liittymiä, mutta niitä ei oteta huomioon kustannuslaskennassa tyyppiliittymien suodatuksissa käytetyn rajan takia.

Kaikkiin ilmajohtoverkon tyyppiliittymiin saatiin käytännössä 250A oikosulkuvirta ainoastaan ilmajohtoverkkoa vahvistamalla. Vain muutamassa kohteessa jäätiin noin 10 A päähän vaaditusta arvosta. Alle 1 MW tuotantolaitteistojen mediaaniteho on 4,4 kVA, joten tällä ei ole käytännön merkitystä. Täten voidaan olettaa tyyppiliittymän vahvistukseksi riittävän ilmajohtoverkon vahvistus.

Peruskustannus vahvistukselle saadaan kertomalla EV:n yksikköhinta etäisyyden kanssa. Laskuissa käytetyt poikkipinta-alojen todennäköisyydet on arvioitu tarkastelemalla jokainen tyyppiliittymä manuaalisesti verkkotietojärjestelmän dokumentointiin perustuen.

Taulukko 7. Ilmajohtojen yksikköhinnat (Energivirasto, 2021).

Poikkipinta-ala	Yksikköhinta $\frac{\text{€}}{\text{km}}$
AMKA 16–25 mm	16 600
AMKA 35–50 mm	17 300
AMKA 70 mm	19 600

$$C_{AMKA} = 0,8 \text{ km} * (0,9 * 17,3 + 0,05 * 16,6 + 0,05 * 19,6) \frac{\text{k€}}{\text{km}} = 13,904 \text{ k€}$$

Tällä indeksikustannuksella saadaan keskimäärin parannettua liittymän oikosulkuvirta standardin SFS-6000-8-801 vaatimuksiin ja liitettyä tavallinen tuotantolaitteisto verkkoon. EV:n yksikköhinnat sisältävät johtimien lisäksi pylväät ja asennustyön, joten todelliset luvut ovat jonkin verran pienempiä. Vahvistusta tehdään usein myös toisista paikoista purkautuneilla ilmajohdoilla, joten tarkkoja hintoja on hankala arvioida. Suhteutetaan kustannus koko verkkoalueen heikkojen oikosulkuvirtojen liittymiin ottamalla saman haaran liittymät huomioon. Alla olevan kokonaiskustannuksen laskemiseen on käytetty paljon oletuksia ja pyörityksiä, joten sen tarkkuus ei ole hyvä. Tarkoituksena on havainnollistaa kustannusten näkyminen verkkoyhtiölle yksittäisen asiakkaan sijasta.

$$C_{AMKA,total} = \frac{9887}{2,7} * 13,904 \text{ k€} \approx 50,91 \text{ M€}$$

Tässä tilanteessa käytännössä koko verkkoalueen heikot ilmajohtoliittymät olisi vahvistettu tuotantoa varten. Tällä hetkellä tuotantoliittymiä on 100 kappaletta heikon oikosulkuvirran liittymistä, eli noin 1 % verran. Heikon verkon tuotantoliittymien osuus kaikista tuotantoliittymistä on puolestaan $\frac{100}{6936} * 100\% \approx 1,44\%$. Kokonaiskustannuksia voidaan arvioida myös suhteuttamalla kaikkien tuotantoliittymien määrää heikon verkon tuotantoliittymiin eri skenaarioiden mukaan. Tärkeämpänä tuloksena voidaan pitää arvioitua vahvistuksen yksikköhintaa, joka on keskimääräinen vahvistustoimenpide heikolle verkolle.

Joissain tapauksissa tuotantoyksikön teho on sen verran suuri, että muuntajakone joudutaan vaihtamaan. Muuntajakoneen vaihto suuremmaksi korkeampaa oikosulkutehoa varten aiheuttaa kasvavia tyhjäkäyntihäviöitä. Oletettavasti tyhjäkäyntihäviöt kasvavat tällä hetkellä jo tuotannon liittämisen myötä, kun ne kompensoivat asiakkaiden kulutusta. Jos tuotantoliittymiä alkaakin olla enemmän, kääntyy tehonvirtaus lähes kokonaan ja muuntajakoneen kuormitus kasvaa toiseen suuntaan. Tyhjäkäyntihäviöitä ei oteta huomioon tämän luvun tarkasteluissa, mutta niiden olemassaolo tiedostetaan verkon suunnittelussa ja vahvistustoimenpiteiden valinnassa.

Yhden tuotantoliittymän aiheuttama jännitteennousu voidaan puolestaan laskea jännitteenalenen kaavalla 5, kun tiedetään verkon impedanssi ja tuotannon nimellisteho. Pahimmassa tilanteessa laitteisto syöttää koko nimellistehollaan sähköä verkkoon. Jos lähdöllä on useampi tuotantoliittymä, yhteenlaskettua verkkoon siirtyvää tehoa voi olla vaikea määrittää etukäteen, mutta vaikutusta voidaan silti tarkastella. On hyvin epätodennäköistä, että useampi tuotantoliittymä syöttäisi samanaikaisesti nimellistehollaan tehoa verkkoon, sillä kaikkien liittymien kuormitus pitäisi olla samanaikaisesti olematon.

Alla olevalla kaavalla voidaan laskea yksittäisen tuotantoyksikön aiheuttama jännitteenousu pahimmassa tilanteessa (Lakervi ja Partanen, 2008).

$$\Delta U = \frac{P_n}{U^2} * (R * \cos\theta + X * \sin\theta) * 100\%, \quad (5)$$

jossa P_n on voimalan nimellisteho, U on verkon jännite, R on verkon resistiivisyys ja X on verkon reaktanssi tuotannon liittymispisteessä. Tehokerrointa kuvataan kulmalla θ .

Trimble NIS laskentatiedoista löydetään käytettävien johtolajien resistanssit ja reaktanssit yksiköllä $\frac{\Omega}{km}$. Tehokerroin voi olla verkkoon liitettävien tuotantolaitteistojen standardien mukaan 0,9–1. Laskennassa voidaan käyttää arvoa 1, pahimman tilanteen arvioimiseksi. Pienillä impedanssin arvoilla tehokertoimen vaikutus laskentatulokseen ei ole kovin merkittävä.

Tyypikohteisiin tehdyn vahvistuksen jälkeen, heikoimmat sähköiset arvot tulivat kaksinkertaisella AMKA $25mm^2$ johtimella. Arvioidaan kaavan 5 avulla tällaiseen kohteeseen liitetyn 8 kVA tuotantoyksikön aiheuttamaa jännitteenousua. Tämänkokoinen järjestelmä on usein jo asiakkaan tarpeisiin nähden ylimitoitettu ja selvästi keskiarvon yläpuolella.

$$\Delta U = \frac{8000 VA}{(400 V)^2} * \left(0,8 km * 0,6 \frac{\Omega}{km} * \cos(1) + 0,8 km * 0,053 \frac{\Omega}{km} * \sin(1) \right) * 100\% \\ \approx 2,4\%$$

Vaikka käytettävä johdin olisi yksinkertainen AMKA $25mm^2$, jännitteenousu olisi pahimmassa tilanteessa alle 5 %. 8 kVA aurinkosähköjärjestelmää varten tulisi oikosulkuvirran olla noin 290 A, jotta nopeat jännitteenmuutokset pysyisivät sallituissa rajoissa. 800 m etäisyydellä tarvitaan poikkipinta-alaltaan vähintään $2 \times AMKA 35mm^2$ johtimet. Paksummilla johtimilla impedanssi ja sitä myötä jännitteenousu pienentyy. Tällä esimerkillä havainnollistettiin, että heikossa verkossa nopeat jännitteenmuutokset ovat ensisijainen rajoittava tekijä yksittäiselle tuotantoliittymälle, eikä kohteita ole nyt tarvetta avata yksityiskohtaisemmin. Käytännössä oikosulkuvirran kasvattaminen nopeita jännitteenmuutoksia varten takaa jännitteen pysyvän sallituissa rajoissa. Heikossa verkossa jännitteenalennemat ovat usein Elenian mitoitusohjeiden alapäässä eli noin 8 %. Tuotannon aiheuttamat muutamien prosenttien nousut jännitteessä parantavat sähkön laatua tällaisissa kohteissa ja ovatkin jopa positiivinen ongelma.

Tarkastelua voidaan laajentaa useammalle tuotantoliittymälle, mutta jokaisen liittymän jännitettä nostava vaikutus tulisi laskea erikseen. Ei ole realistista käyttää myöskään jokaiselle tuotantoyksikölle nimellistehoa jännitettä nostavana tehona. Laskentateknisesti

tuotannon vaikutus jännitteeseen on sama kuin kuormituksella, mutta tulokset ovat käänteisiä. Luvussa 2.2.3 esitettiin standardin SFS-EN 50160 jänniterajat, ja myöhemmin kerrottiin Elenian käyttävän tiukempia rajoja omassa mitoituksessaan. Elenian käyttämällä verkon mitoituksella ei saisi nykyään esiintyä yli 8 % jännitteenalennuksia maksimikuormituksella. Verkkoa ei tietenkään mitoiteta ajatuksella, että jokainen liittymä kuluttaisi liittymistehonsa verran yhtäaikaaisesti, sillä tämä johtaisi ylimitoituksiin. Jos tarkastellaan yhdelle lähdölle keskittyntä tuotantoa, voidaan laskea tuotantolaitteistojen nimellistehot yhteen ja verrata lähdön maksimikuormitukseen. Oletusarvoisesti suurin yhteistuotanto on kesäaikaa, ja suurimmat kulutukset talvella. Mikäli verkko on Elenian periaatteiden mukaan suunniteltu ja tuotannon yhteenlaskettu nimellisteho on pienempi kuin lähdön huippukuormitus, jännitteiden ei pitäisi ylittää standardin sallimia rajoja. Vaikka tuotannon nimellisteho olisi lähdön huippukuormitusta suurempi, jännitteet eivät kovin helpolla nouse sallitun +10 % yläpuolelle tiukempien suunnittelukriteerien mukaan, vaikka hetkellinen kulutus olisi 0. Uudessa verkossa suurimmat jännitteenalennukset huippukuormilla ovat noin 5 %, joten tuotantoa saisi käytännössä liittää kaksinkertaisen määrän tähän kuormaan verrattuna, ennen kuin sallitut rajat ylittyisivät. Tarkasteluissa tulisi huomioida vielä liittymien pohjakuormitukset, jotka laskevat jännitettä ja auttavat tuotannon määrän lisäämistä.

4.3.2 Saneeraukseen tuleva heikon ilmajohtoverkon liittymä

Suunnitellut säävarma-projektit ovat yleensä tiedossa korkeintaan 2 vuotta ennen toteutusta. Täten on hyvin hankala arvioida tarkkoja määriä saneerauksen kohteena olevista liittymistä. Määriä on mahdollista arvioida karkeasti kaapelointiasteen mukaan, joka on tällä hetkellä noin 65 % pienjänniteverkossa. Toimitusvarmuuden täyttymiseksi ei ole välttämätöntä tehdä kaapelointia joka paikkaan, joten jotkut muuntopiirit jäävät saneerauksen jälkeen vielä osittain ilmajohtoverkoksi. Kaapelointiaste ei siis kerro täyttä tuotusta.

Tuotannon rajauksesta aiheutuvien kustannusten laskemiseksi ei varsinaisesti tarvita liittymien määrää, vaan kustannusta voidaan verrata suoraan verkon vahvistuksesta aiheutuviin investointikustannuksiin. Vertailulla on mahdollista pohtia investoinnin lykkäämisen kannattavuutta. Kun tehdään tarkasteluita liitettävyydestä ja todetaan voimalan nimellistehon olevan liian suuri, tarkastellaan suurinta liitettävissä olevaa tehoa. Sähköverkkoalan kohtuullinen tuotto määritellään osittain verkon arvon kautta, joten Elenian voi olla kannattavampaa tehdä turha investointi muutamaksi vuodeksi. Maksamalla korvauksia asiakkaalle, vältetään mahdollisesti suurempi investointi, mutta verkon arvoa ei kasvateta.

Asiakkaalle maksettavan hyvityksen suuruus riippuu sähköenergian hinnasta ja leikattavan tuotannon määrästä. Laskuissa voidaan käyttää joko asiakkaan sopimuksen mukaista hintaa tai kiinteää, hieman korkeampaa hintaa. Paremman hyvityksen myötä ratkaisu on myös kuluttajalle kannattavampi, ja yhteisymmärrys on helpommin saavutettavissa. Hyvitys ei voi olla liian suuri, koska jotkut kuluttajat voisivat käyttää sitä hyödykseen ja saada parempaa tuottoa hankkimalla kohtuuttoman kokoisen tuotantoyksikön. Ylimoitusta voi tapahtua myös, mikäli sähköenergian hinta pysyy korkeana ja kuluttajia mahdollisesta osallistumaan suoraan sähkömarkkinoille. Omasta tuotannosta olisi tällöin mahdollista saada vielä parempi korvaus välikäsien poistuttua.

Vuosittain leikattavan tuotannon määrä on syytä laskea järjestelmän nimellistehon muuttamisella, vaikka fyysisellä erotuksella tehty huipputehon pienennys pienentää tuotannon määrää aikoina, jolloin leikkausta ei tarvitsisi tehdä. Asiakkaan paneeliteho saattaa olla invertteritehoa korkeampi, joten säteilyintensiteetin perusteella laskettu tuotannon

leikkaus voi antaa liian pieniä määriä. Leikattavan energian määrä ja kustannus on todennäköisesti melko pieni vahvistuskustannuksiin verrattuna, joten laskelmissa käytetään huonointa mahdollista tilannetta suuruusluokan havainnollistamiseksi.

Euroopan komissio tarjoaa PVGIS työkalun vuosituotannon ja säteilyintensiteetin laskemiseen. Työkaluun syötetään laitteiston tarkka sijainti, nimellisteho ja sen häviöt. Laitteiston häviöiksi voidaan laskuissa käyttää optimistista arvoa 10 %, kun PVGIS:n dataan perustuva arvo on 14 %. Suunnan ja kallistuskulman pystyy myös antamaan lähtötiedoiksi, mutta mikäli niitä ei tiedetä, voidaan käyttää optimoituja arvoja. Tämän jälkeen työkalulla voidaan laskea rajoittamattoman ja rajoitetun yksikön vuosituotto.

Leikatun tuotannon korvaus lasketaan kaavalla,

$$\begin{aligned} C_{hyvitys} &= E_{hyvitettävä} * c_{energia} + E_{hyvitettävä} * c_{siirtomaksu} \\ &= E_{hyvitettävä}(c_{energia} + c_{siirtomaksu}) \end{aligned}$$

jossa c on laskussa käytettävän sähköenergian hinta. Laskussa oletetaan, että asiakas käyttäisi itse kaiken tuottamansa energian. Tällöin leikkauksen takia siirrettävästä energiasta hyvitetään myös siirtomaksun osuus.

Monet sähkön myyjät, jotka ostavat kuluttajan ylijäämän, ovat valmiita maksamaan siitä markkinoiden mukaisen spot-hinnan. Osa myyjistä vähentää hinnasta välityksestä aiheutuvan osuuden. Kustannuslaskelmaa varten on valittu kiinteä hinta $5 \frac{\text{snt}}{\text{kWh}}$, joka on hieman vuosien 2020 ja 2019 pörssisähkön keskihintaa korkeampi. Vuonna 2021 hinnat olivat hyvin volatiileja ja korkeampia, mutta mahdollisesti sähkön hinta pysyy korkealla vielä pidempään. Tällöin hyvitystä tulisi maksaa enemmän, kuten $8 \frac{\text{snt}}{\text{kWh}}$.

Esimerkkikohde on luvun 4.3.1 tyyppiliittymä, johon on nykyisellä mitoituksella mahdollista noin 4 kVA tuotantotehoa. Asiakas haluaisi liittää 6 kVA tehoisen yksikön. Oletetaan, että kohteeseen on suunniteltu toteutettavaksi säävarmahanke kahden vuoden päähän.

Selvitetään työkalun avulla vuosituotannot eri nimellistehoille, ja lasketaan vuodessa leikkattavan energian määrä.

$$E_{hyvitettävä} = E_{rajoittamaton} = E_{rajoitettu}$$

$$E_{hyvitettävä} = 5124 \text{ kWh} - 3416 \text{ kWh} = 1708 \text{ kWh}$$

Leikkauksesta aiheutunut kustannus kahdelta vuodelta eri hinnoilla

$$C_{hyvitys,0,05\text{€}} = 2 * 1708 \text{ kWh} * (0,05 + 0,08) \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 444,1 \text{ €}$$

$$C_{hyvitys,0,08\text{€}} = 2 * 1708 \text{ kWh} * (0,08 + 0,08) \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 546,6 \text{ €}$$

Hyvityshinnalla $8 \frac{\text{snt}}{\text{kWh}}$ leikkattavan tuotannon määrän pitäisi olla 87 MWh, jotta vuosikustannus olisi sama kuin yksikköhinta ilmajohtoverkon vahvistukselle. Kyseinen energiamäärä vaatisi Suomessa noin 100 kVA leikkauksen nimellistehosta, mitä ei heikkoon ilmajohtoverkkoon voida liittää. Tuotannon leikkausta voidaan käyttää kuitenkin hyödyksi suuremmissa yksiköissä, jotka ovat tulossa saneeraukseen lähivuosina. Suunnittelijan vastuulla on tehdä ehdotus tuotannon rajoittamisesta tai verkon vahvistuksesta. Apuna voi käyttää PVGIS:n laskuria tuotetulle energialle ja vahvistussuunnitelman kustannuslaskentaa. Jos tuotannon leikkaus otetaan keinona käyttöön, tulee laskuissa käytettävä hyvitysenergian hinta tarkastaa esimerkiksi vuosittain.

Tuotannon leikkauksen kustannukset ovat kertaluokkia pienemmät kuin verkon vahvistuskustannukset, mutta taloudellinen näkökanta on vain yksi osa tarkastelua. Kuten aiemmin mainittiin, uusiutuvan energian rajoittaminen on ilmastonäkökulmalta epäeettistä ja tarkasteluun voidaan ottaa mukaan lisärajoite leikkattavan tuotannon määrästä. Sähkömarkkinalaissa ei ole ainakaan vielä määritelty raja-arvoja kuinka paljon tuotantoa saisi leikata vuodessa ennen kuin verkkoyhtiön tulee vahvistaa verkkoaan.

4.3.3 Yksittäinen suuri tuotantoliittymä

Kuten tarkasteltavien kohteiden valinnassa kerrottiin, liittymistehon mukaan mitoitettujen tuotantolaitteistot aiheuttavat verkon kannalta hankalia tilanteita. Maatalouden liittymät ovat tunnistettu yleisiksi kohteiksi, joissa laitteiston tehot ovat useasti liittymien kuormitustehoja suurempia. Tämä johtunee osin työn alussa puhutusta valtion tukijärjestelmästä. Mitoituksen kannalta liittymätyypillä ei toisaalta ole väliä, vaan tuotantotehon suhde kuormitukseen on tärkeämpää. Maatalouden liittymät voivat olla pääsulakekooltaan esimerkiksi 3x63 A, jolle suojausvaatima oikosulkuvirta on 320 A. Vastaavan tehoisen (42 kVA) tuotantolaitteiston vaatima oikosulkuvirta Elenian nykyisten mitoitusperiaatteiden mukaan on 1520 A, joka käytännössä vaatii todella vahvaa PJ-verkkoa. Pelkän kulutusliittymän vaatima I_k arvo on puolestaan suhteellisen helposti saavutettavissa. Liittymistehon kokoiset tuotantoyksiköt vaativat käytännössä noin 3–5 kertaa vahvempaa verkkoa, ja vahvistuskustannukset menevät tällä hetkellä täysin Elenian maksettavaksi. Esimerkiksi 3x63 A liittymään kytketty liittymistehoinen tuotantoyksikkö vaatii nykyisten mitoitusperiaatteiden mukaan vastaavan verkon kuin pääsulakekooltaan 3x250 A kulutusliittymä. Hinnoitteluvyöhykkeellä 2 vastaavat liittymismaksut ovat 5 580 € ja 22 150 €, jotka ovat laskettu keskiarvoisista verkonrakentamisen kustannuksista (Elenia, 2021c). Näillä hinnoilla on myös helppo havainnollistaa ylimitoituksesta aiheutuvat kustannukset verkkoyhtiölle.

Joel Karin diplomityössä todettiin etenkin suurissa yksikkötehoissa Senerin kaavan antavan liian vaativia oikosulkuvirran arvoja, mikä johtaa kalliimpiin verkkoinvestointeihin (Kari, 2020). Järkevämmällä tarkastelutavalla olisi jopa mahdollista välttää turhat investoinnit ja parantaa toiminnan kannattavuutta. Alla esitetään vaihtoehtoinen tapa nopeiden jännitteenmuutosten tarkastelemiseen.

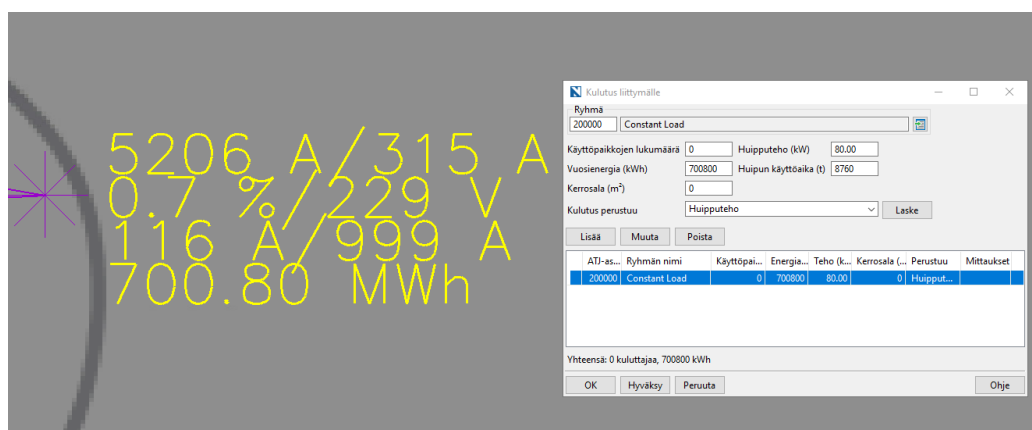
Taulukko 8. Senerin kaavan vaatimat oikosulkuvirrat.

Nimellisteho	Oikosulkuvirta
17 kVA	615 A
42 kVA	1520 A
67 kVA	2425 A
100 kVA	3630 A

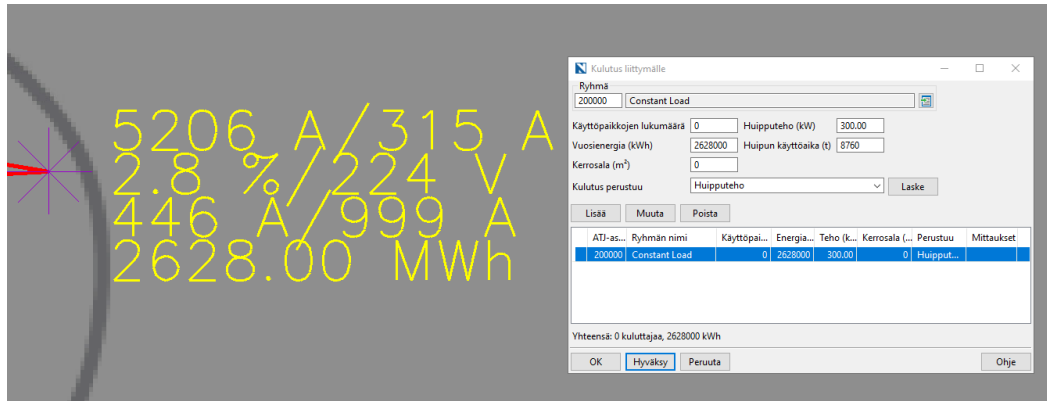
Taulukon 8 mukaisesti suuremmat yksiköt vaativat arvoja, joita yleensä mitataan vain muuntamon läheisyydessä. Suurimpia yksiköitä varten investoinnit ovat usein erilaisia, soveltavia ja kalliita.

Trimble NIS tehonjakolaskenta antaa kuormitustilanteen mukaisen jännitteen liittymispisteelle. Äkillistä tuotannon irtoamista voidaan kuvata lisäämällä tuotantoyksikön nimellistehon mukainen kuorma liittymälle ja tekemällä uusi tehonjakolaskenta. Tällöin saadaan uusi jännitteen arvo, jonka avulla voidaan laskea prosentuaalinen muutos. Tehonjakolaskentaan on myös helppo lisätä saman muuntopiirin tuotantoliittymien aiheuttamia yhteisvaikutuksia, jota Senerin kaava ei pysty huomioimaan. Tampereen yliopiston aurinkosähködataan perustuvan tutkimuksen tuloksista huomataan, että pilvisyyden takia aiheutuvat säteilyintensiteetin muutokset olivat pahimmillaan noin 80 % (Lobera & al., 2013). Tarkemman mittausdatan ja nopeiden jännitteenmuutosten määrittelyn pohjalta voidaan laskennassa kuitenkin käyttää vielä pienempää tehoa, kuten 50 % nimellistehoa. Täten useamman tuotantoyksikön muuntopiirissä ei ole syytä käyttää kaikkien yksiköiden nimellistehoa nopeiden jännitteenmuutosten laskemisessa. Yksittäisten laitteistojen tarkasteluissa tulee huomioida nimellisteho, koska vikaantumisesta voi aiheutua äkillinen irtikykytyminen maksimituotannon aikaan.

Olemassa olevien liittymien kulutusprofiileissa on usein jonkin verran loistehoa, ja kun tuotannon äkillistä irtoamista kuvataan kuormituksen lisäämisellä, niin loistehon määrä kasvaa samassa suhteessa. Tämä voi aiheuttaa virheitä laskennassa, joten tilalle voidaan luoda uusi kuormituspiste pelkällä pätöteholla. Kun laskenta käyttää oletusarvona tasaista pätötehoa, kuormituksen muutoksella saadaan laskettua nopeat jännitteenmuutokset.



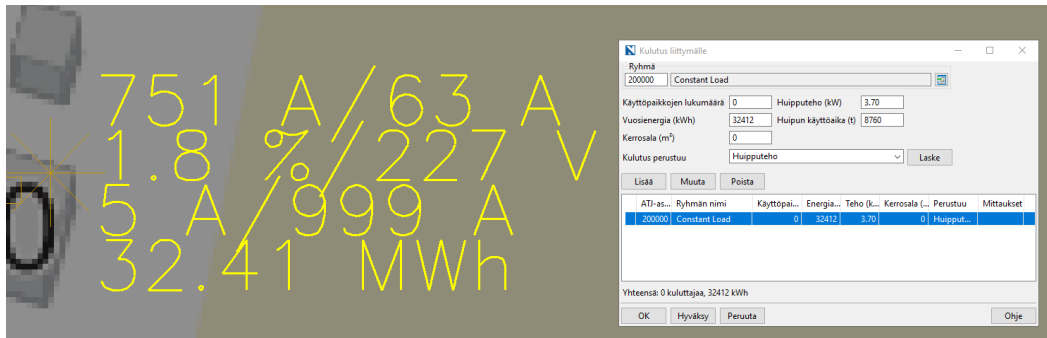
Kuva 15. Nopean jännitteenmuutoksen laskemisen alkutilanne 220kVA.



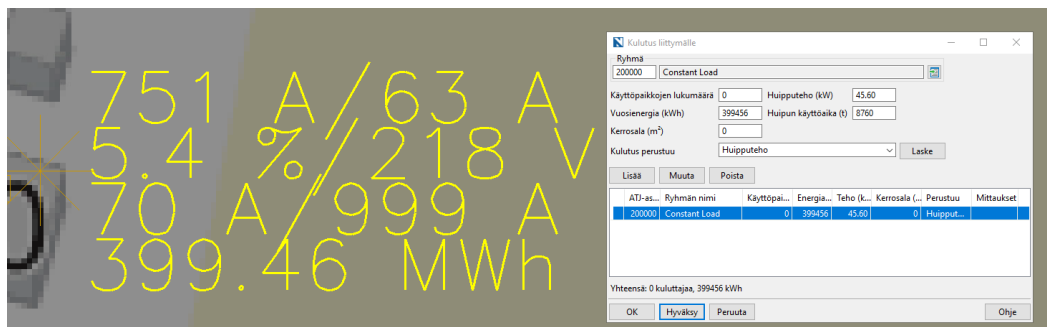
Kuva 16. Nopean jännitteenmuutoksen laskemisen lopputilanne 220kVA.

Tuotannon liittämistarkasteluita varten laskennan lukuarvoista tärkeimmät ovat kaksi ylimmäistä riviä. Ylimmäältä riviltä saadaan yksivaiheinen oikosulkuvirta ja liittymää suojaavan sulakkeen suuruus. Toiselta riviltä voidaan lukea jännitteenaleneman suuruus prosentteina ja liittymispisteen jännite.

Senerin kaavalla saatu jännitteenmuutos 220kVA:n nimellistehoiseksi voimalalle on 6,12 %, ja tehonjakolaskennan avulla saatu muutos on $\frac{229-224}{229} * 100\% = 2,18\%$.



Kuva 17. Suurimman nimellistehon liitettävyyden tarkastelu alkutilanne.



Kuva 18. Suurimman nimellistehon liitettävyyden tarkastelu lopputilanne.

Tehonjakolaskennalla tehty tarkastelu antaa kuvien 17 ja 18 liittymälle mahdollisuuden noin 42 kVA tuotantotehoon, kun nykyinen mitoitusohje mahdollistaisi vain noin 21 kVA nimellistehoisen tuotantolaitteiston.

$$\Delta U = \frac{227 - 218}{227} * 100\% = 4,05\%$$

Tätä mallia käytetään vain tehonmuutoksesta aiheutuvan nopean jännitteenmuutoksen tarkasteluun, eikä liian suuria jännitteenalennuksia tarvitse tässä huomioida.

Nähdään, että pelkän tarkastelumallin ja laskentatavan muutos mahdollistaa huomattavasti suuremman nimellistehon liittämisen. Väärää mallia käytettäessä saatetaan ajautua tilanteeseen missä verkkoa vahvistetaan järjettömästi, vaikka todellisuudessa ei olisi tarvetta. Toisaalta optimistisen tarkastelun myötä saatetaan hyväksyä liian suuria tuotantolaitteistoja, mikä johtaa laatustandardin SFS-EN 50160 rajojen rikkomiseen ja turvallisuuden laiminlyömiseen. Luotettavat tulokset saataisi rakentamalla tarkka kopio verkosta simulointiohjelmaan, kuten PowerWorldiin, mutta se veisi liikaa aikaa ja resursseja. Toinen vaihtoehto on mallintaa tuotantolaitteisto Trimble NIS:in puolelle, mutta sitä ei työn aikana tutkittu.

Tehonjakolaskennan tulosten oikeellisuutta arvioidaan jatkotarkasteluin diplomityön valmistumisen jälkeen. Työn aikana huomattiin, että keino ei sellaisenaan toimi ainakaan heikon oikosulkuvirran verkoissa nopeiden jännitteenmuutosten laskemiseen. Laskenta saattaa vaatia Trimble NIS:in puolella säätöä laskentaparametreihin. Verkon jännite ei myöskään käyttäydy täysin symmetrisesti jännitteen noustessa ja laskiessa, ja edellä kuvattu tapa laskee jännitettä. Myös tämä aiheuttaa tuloksiin epäluotettavuutta.



4.3.4 Ylikuormitettu muuntopiiri

Ylikuormitettu muuntopiiri on oikosulkuvirroilta ja -tehoilta vahva, mutta siihen on kytketty paljon tuotantoa. Suurimmassa osassa Elenian verkkoaluetta nopeat jännitteenmuutokset ovat rajoittava tekijä, mutta pientuotannon yleistyessä voi ilmentyä tapauksia, joissa jännitteet nousevat sallittujen rajojen yläpuolelle. Ongelma voi johtua korkeasta tuotantoliittymien määrästä, ylimitoitetuista tuotantolaitteistoista tai niiden yhdistelmästä. Tuotantolaitteiston tulee täyttää SFS-EN 50549-1:2019 standardin pohjalta tehdyt pientuotannon tekniset vaatimukset. Kyseisen standardin mukaan invertteri alkaa rajoittamaan pätötehoa jännitteen noustessa liian korkealle liityntäpisteessä. Sähkön laadun kannalta tilanne ei ole yhtä kriittinen kuin nopeissa jännitteenmuutoksissa, joita on hyvin hankala poistaa muutoin kuin verkkoa vahvistamalla. Yli- ja alijännitteiden suhteen laatustandardi SFS-EN 50160 on myös anteeksi antavaisempi, sillä raja-arvot voivat toisinaan ylittyä. Nopeiden jännitteenmuutosten osalta raja ei Elenian käytännön mukaan saa ylittyä.

Jännitteen noustessa tarvitaan erilaisia vahvistuskeinoja laadun korjaamiseksi. Verkkoa vahvistamalla voidaan myös pienentää jännitteen nousua, mutta valmiiksi vahvalla alueella se voi tarkoittaa todella rajuja vahvistustoimenpiteitä. Jännitteen laskemiseksi voidaan käyttää esimerkiksi hajautettua kompensointia invertterien avulla, väliotto- tai käämikytkimellistä jakelumuuntajaa tai jännitteensäätömuuntajaa. Kuten luvussa 3.1.1 mainittiin invertterien paikallinen loistehon säätö olisi lähes ideaali jännitteensäätötapa, mutta käytännön haasteet vaikeuttavat sen käyttöönottoa. Väliottokytkimen käytettävyys on hyvin rajallinen, joten kustannuslaskentaa varten keinoksi valittiin käämikytkimellinen jakelumuuntaja.

Kustannuslaskentaa varten komponentin hintatietoa kysyttiin suoraan valmistajan tehtaalta. Hitachi ABB ilmoitti pienimmäksi käämikytkimelliseksi muuntajakoneeksi nimellisteholtaan 315 kVA koneen. Muuntajakoneen teho rajoittaa jo käytännöllisyyttä melko paljon, sillä suurin osa Elenian verkkoalueen muuntajakoneista ovat teholtaan pienempiä. Nimellisteholtaan 315 kVA ja suurempia jakelumuuntajia on Elenian verkossa vain 3 315 kappaletta, kun pelkästään 50 kVA koneita on 12 459. Taulukossa 9 on esitetty budjettitarjouksesta saadut hinnat. [REDACTED]

Taulukko 9. Hitachi ABB:n budjettitarjous.

<p>Muuntajakone 315 kVA, 20/0,4 kV</p> <p>Jännitteensäätö $\pm 10 \%$</p>	
<p>Jännitteensäätömuuntaja (63, 125 tai 250 kVA)</p> <p>Jännitteensäätö $\pm 6 \%$</p>	

Käämikytkimellisen muuntajakoneen vaihtoehtoinen laadunkorjaus voisi olla topologian muuttaminen jakamalla kuorma kahteen erilliseen muuntopiiriin. Käytännössä tämä vaatii uuden muuntamon, joihin osa alkuperäisien muuntopiirin liittymistä kytkettäisiin. Muuntopiirin jaolla liittymien määrä pienenee, ja joissain tilanteissa verkosta tulisi kulutukseen nähden ylimitoitettu, vaikka jännitteenousu pienentyisi. Tyhjäkäynti tulevat ylimitoituksen myötä kasvamaan, mutta häviöiden kustannukset ovat useita kertaluokkia pienemmät kuin investointikustannukset. Muuntopiirin jakamisella saadaan myös varayhteydet paremmaksi vikatilanteita varten. Toisaalta keino on hyvin passiivinen ja tulevaisuuden sähköverkkoa varten joustavuuden lisääminen tässä kohtaa voi osoittautua myöhemmin oikeaksi ratkaisuksi.

EV:n yksikkö hinnastosta saadaan uutta muuntamoa varten komponenttihinnat. Nämä esitetty alla olevissa taulukossa.

Taulukko 10. Muuntamokomponenttien yksikköhinnat.

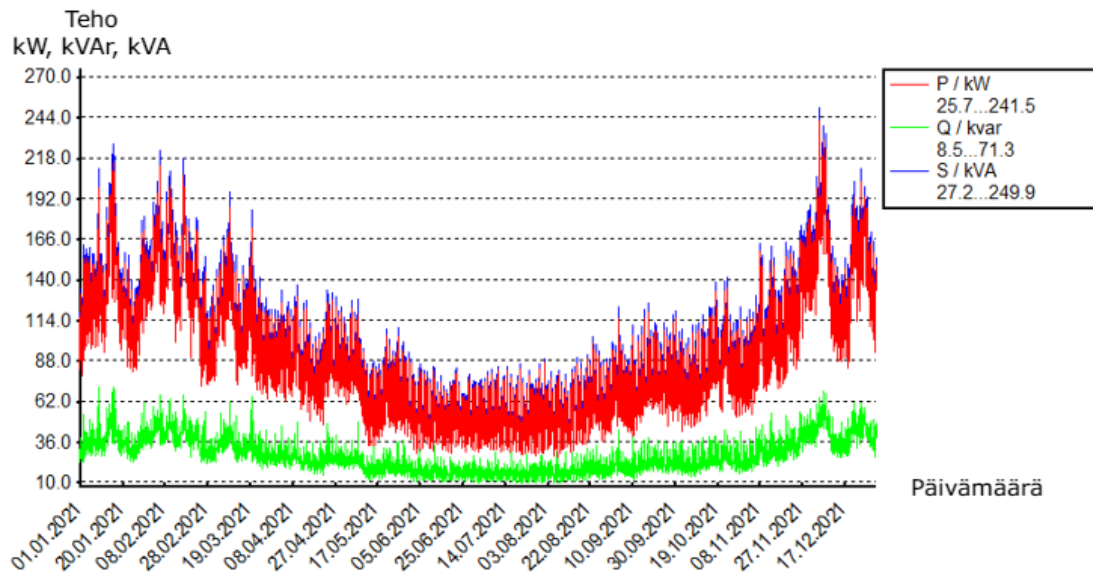
Komponentti	Yksikköhinta
Puistomuuntamo, kevyt	8 600 €
Puistomuuntamo, PJ keskus max 630A	22 900 €
Puistomuuntamo, PJ keskus yli 630A	28 700 €
Muuntajakone 315 kVA	7 800 €
Muuntajakone 500 kVA	9 600 €
Muuntajakone 630 kVA	11 500 €
Muuntajakone 800 kVA	13 300 €
Muuntajakone 1000 kVA	16 000 €

Uuden muuntamon rakentaminen Elenian valitsemalla rakentamistavalla vaatii vähintään muuntamokopin ja muuntajakoneen. [REDACTED]

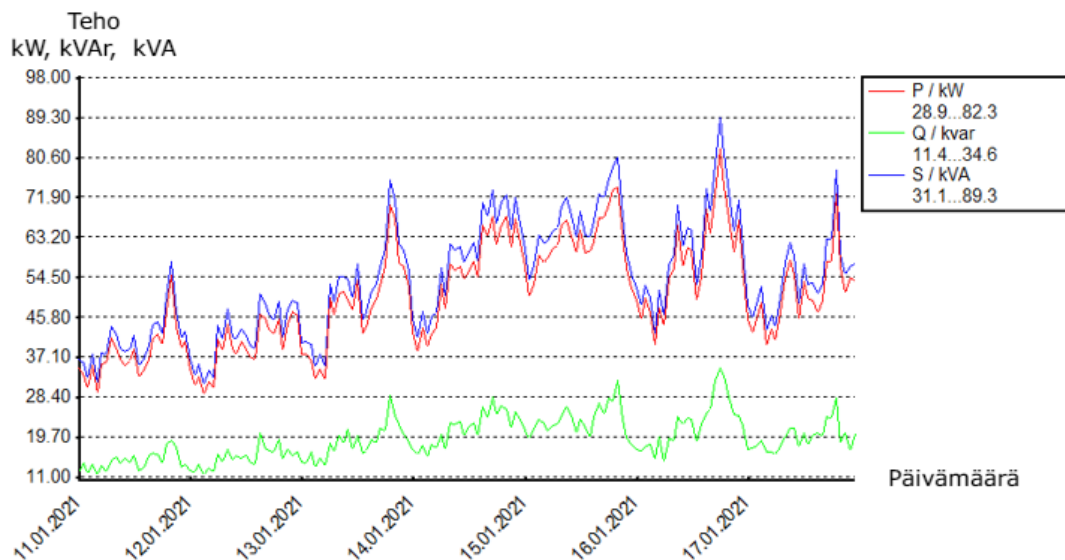
[REDACTED] Yleensä uuden muuntamon rakentamista varten tarvitaan vielä muutamia kymmeniä tai satoja metrejä uutta keskijännitekaapelia, josta aiheutuu lisäkustannuksia. [REDACTED]

[REDACTED] Vaikka kaapelointia pitäisi tehdä, kustannukset pysyvät tästä syystä lähes samoina. Budjettitarjouksessa saatu hinta oli ainoastaan käämikytkimelliselle 315 kVA muuntajakoneelle, joten oletettavasti nimellisteholtaan suuremmat ovat myös kalliimpia.

Jännitetason nousua tarkastellaan seuraavaksi yleisellä tasolla nykyisiin kuormituksiin perustuen, ja tämän jälkeen yksityiskohtaisemmin verkkotietojärjestelmän laskennan avulla.



Kuva 19. Muuntopiirin vuosittainen kuormituskäyrä.



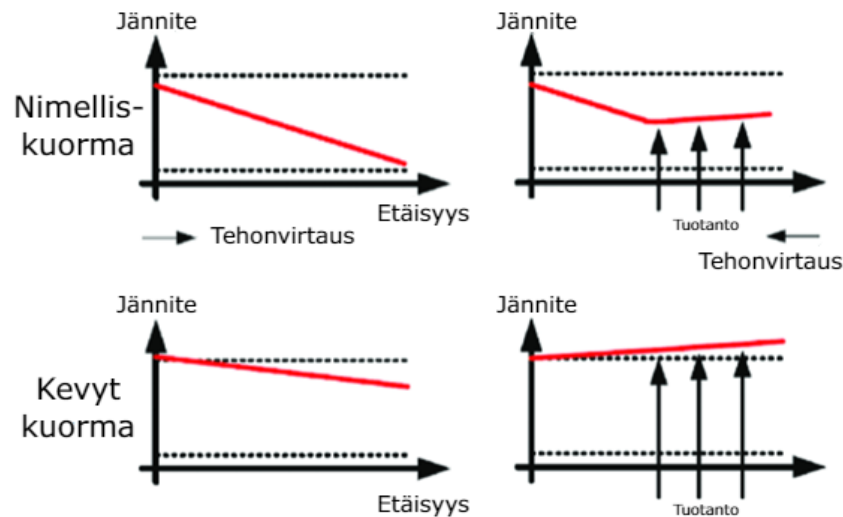
Kuva 20. Muuntopiirin lähdön kuormituskäyrän maksimiviikko.

Kuvista 19 ja 20 havaitaan, ettei muuntamon lähdön maksimi- tai minimikuormitus ei aina ole samanaikainen koko muuntopiirin kanssa. Lähdön huippukuormitus esiintyy tammi-kuussa ja muuntopiirin huippukuorma marraskuussa. Lähdön jännitteenalenemien tarkasteluihin tulisi käyttää kyseisen lähdön huippukuormituksen ajanhetkeä tehonjakolaskennassa. Usein erot laskennan oletusajankohdan tehoihin ovat pieniä, eikä jännitteenaleneman arvo tule muuttumaan.

Kuvan 19 kuormituskäyrä on tyypillinen ympärivuotisessa asutuksessa olevien liittymien muuntopiireille. Käyrästä huomataan hyvin, kuinka talven kylmät säät nostavat kuormituksen 2–3 kertaiseksi lämmityskuorman kasvaessa. Vapaa-ajan asunnot voivat olla tal-

vet kylmillään tai pienellä lämmityksellä, joten kuormitukset muuntopiirien väleillä vaihtelevat paljon. Liitettävyytstarkasteluiden kannalta merkityksellistä on vain huippukuormituksen aikainen jännitteenalenema ja kesän huipputuotannon aikaiset minimitehot.

Taajamaa-alueiden verkot ovat talviaikaan kuormitettuja ja mitoitus tehty tästä syystä vahvaksi. Jos lähdön maksimikuormitus on noin 80 kW ja jännitteenalenema noin 5 %, voidaan kytkeä 160 kVA edestä tuotantotehoa ilman sallittujen jänniterajojen ylittymistä. Tällöinkin on vielä mahdollista lisätä hieman tuotantokapasiteettia, mikäli lähdöllä on jatkuvaa kuormitusta. Jänniteprofiili riippuu toki tuotannon jakautumisesta, mutta tilannetta voidaan tarkastella käänteisesti kuormituksen jakamisella. Alla olevasta kuvasta nähdään, miten tavallisella kuormituksella tuotanto lähinnä parantaa jännitteen alenemaa. Kun kuormitusta ei ole tai se on vähäistä, jännitteet alkavat nousta.

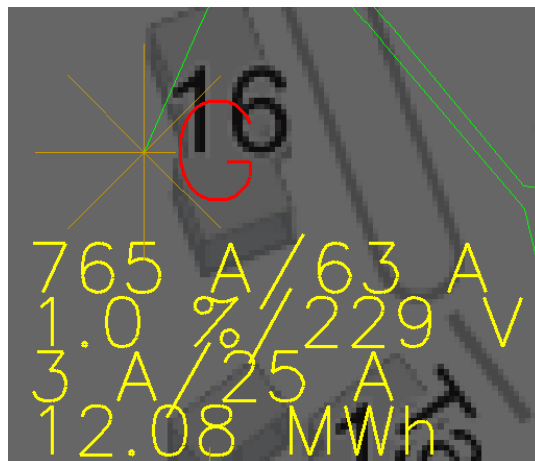


Kuva 21. Jännitteen käyttäytyminen tuotannon lisäämisellä eri kuormitustilanteisiin (Muokattu, Passey & al., 2011).

Mitoitustarkastelua tehdessä tulee kiinnittää huomiota luonnollisesti myös komponenttien kuormitettavuuteen. Jo yksittäisen liittymän kohdalla korkea tuotantoteho voi olla liittymisjohdolle rajoittava tekijä. Jakelumuuntaja tai kaapelit voivat ylikuormittua, mikäli muuntopiirin tuotantoteho ylittää tai jopa tuplaa huippukuormituksen. Lisäksi suojalaitteiden toimintaan voi tulla ongelmia, mutta ne eivät kuulu tämän työn laajuuteen. Laajoissa tuotannon tarkasteluissa suunnittelija saattaa keskittyä liikaa jännitteen laatuun ja perusasiat voivat jäädä huomioimatta.

Työn aikana Elenialla oli käynnissä uuden Trimble NIS version testausta. Testiympäristössä negatiivisen kuormituksen syöttäminen liittymälle vaikutti toimivan, ja jännitteenaleneman sai käännettyä negatiiviseksi. Tuotantoliittymien nykyisiin kuormituskäyriin ei

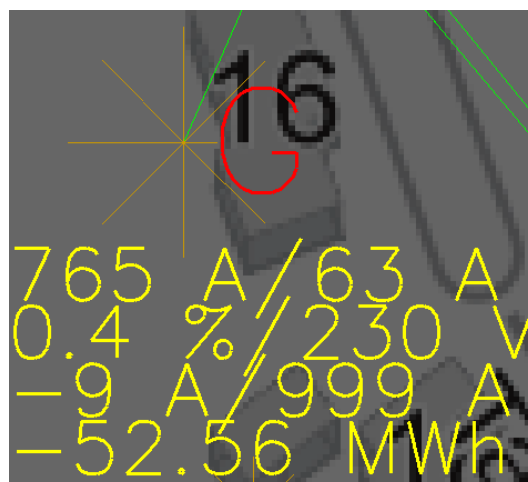
saada vielä lisättyä suoraan negatiivista kuormitusta, mutta luomalla uuden liittymäpisteeseen nykyisen tilalle tämä onnistui. Suunnittelijan vastuulla on tarkastaa mahdollinen verkkoon siirtyvä huipputeho, eli vähentää pohjakuormat nimellistehosta. Useamman tuotantoliittymän tapauksessa, jossa jännitteet olisivat lähellä ylärajoja, kuormituksia tulee tutkia tarkemmin ja selvittää onko käytännön tilanne edes mahdollinen. Laskennan oletusparametrit tarkastelevat tilannetta muuntajakoneen huippukuormituksen ajalta, joten tehokuvaaajien perusteella laskennan ajankohta tulee muuttaa pienen kuormituksen tunnille.



Kuva 22. Jännite alkutilanteessa.

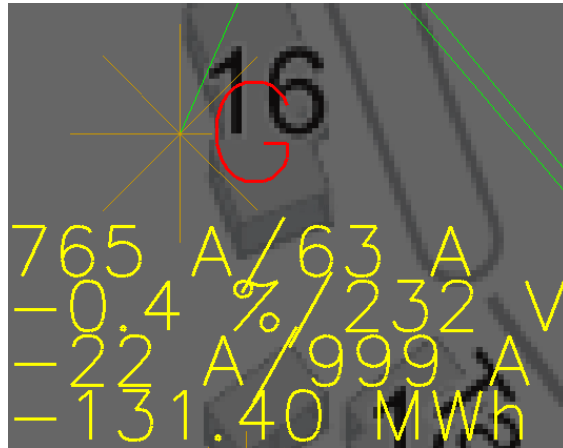
Kuvassa 22 on tilanne kesäpäivältä, kun liittymälle ei ole mallinnettu tuotantoa. Jänniteenalenema PJ-verkossa on 1,0 %, ja sähköiset arvot ovat muutenkin kunnossa.

Kuvassa 23 liittymälle on lisätty 6 kW tuotantolaitteisto, joka syöttää vakiotehoa verkkoon. Huipunkäyttöajoilla tai vuosienenergioilla ei ole laskentateknisesti merkitystä, kun tarkastellaan tuotantolaitteiston aiheuttamaa jännitteen nousua.



Kuva 23. Liittymä 6 kW tuotantolaitteistolla.

Kuvaan 24 liittymän tuotantotehoa on kasvatettu 15 kW:iin, joka ei ole 3x25A liittymälle enää nykyisin poikkeavaa. Asiakkaat usein asentavat liittymistehon tai jopa suuremman kokoluokan laitteistoja. Huomataan, että liittymispisteen jännitteenalenema kääntyy negatiiviseksi ja jännite on laskennan oletusjännitettä korkeampi.



Kuva 24. Liittymä 15 kW tuotantolaitteistolla.

Samalla menetelmällä on mahdollista lisätä tuotantoa rinnakkaisille liittymille, ja tarkastella matalan kuormituksen tuntien jännitteitä. Menetelmä on huomattavasti tarkempi, kuin huipputuotannon suhteuttaminen kuormitukseen, mutta huomattavasti hitaampi. Aiemmin todettiin tuotantoa tarvittavan todella paljon, jotta jännitteet nousisivat rajojen yläpuolelle. Negatiivisen kulutuksen keinoa voidaan käyttää varmuuslaskentana, jos tilanne alkaa näyttää huolestuttavalta.

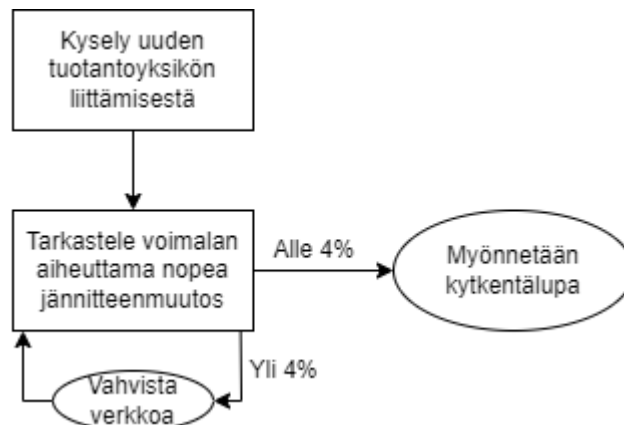
5. TUOTANNON LIITETTÄVYYSTARKASTELU JA VERKON VAHVISTUSTOIMENPITEIDEN VALINTA

Nykyisellä toimintatavalla tarkasteluissa huomioidaan vain nopeat jännitteenmuutokset. Vaikka kohdetarkasteluiden perusteella ne ovatkin rajoittava tekijä tuotannon liittämiseen, tulee mahdollisia jännitteenousun ongelmia ja komponenttien kuormituksia tarkastella.

Tässä luvussa kuvataan nykyinen prosessi liittämistarkasteluissa ja esitetään uuden prosessin malli. Prosessin uudistamisen jälkeen tutkimuksen perusteella valikoidut vahvistustoimenpiteet asetetaan järjestykseen.

5.1 Tuotannon liittämisen prosessi verkon suunnittelussa

Alla esitetyissä kaavioissa on kuvattu tuotantoyksikön liittämistarkastelun vaiheet sähköisen suunnittelun tiimin osalta.



Kuva 25. Nykyinen tarkasteluprosessi yksinkertaistettuna.

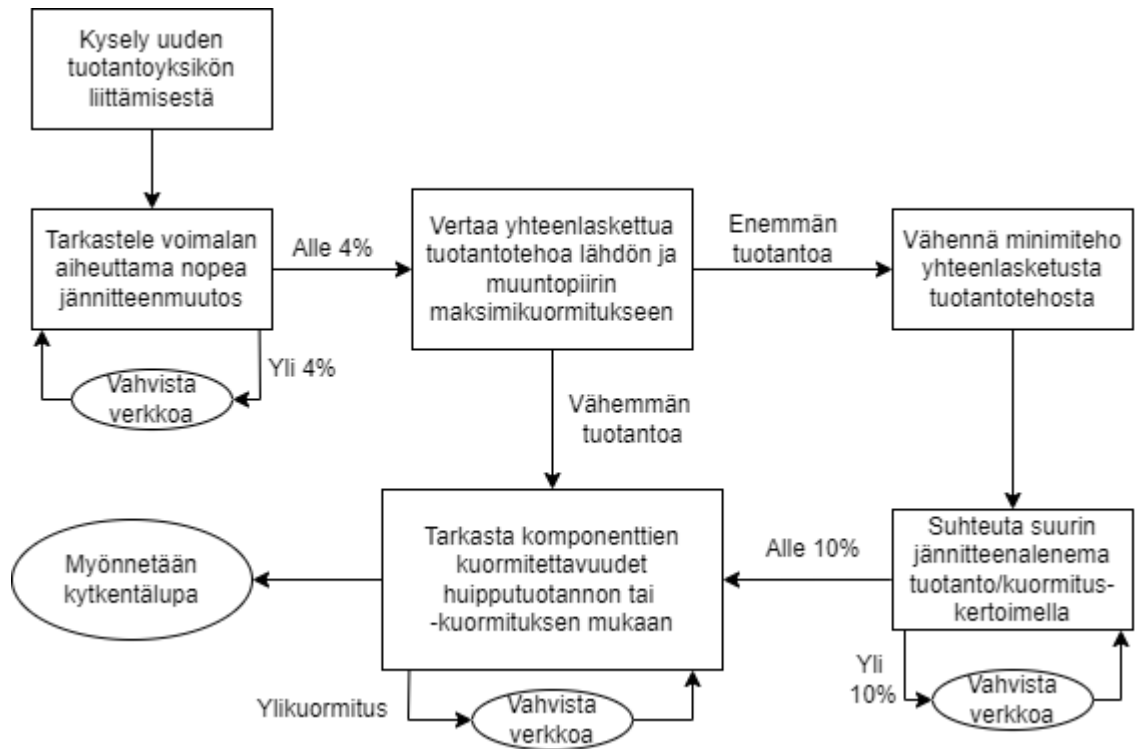
Nykyisellä toimintatavalla on tehty tarkasteluja osittain ristiin nopeiden jännitteenmuutosten ja jännitteenousun välillä. Lieventävinä keinoina on hyödynnetty liittymän pohjakuormaa, mikä ei itsessään liity millään tavalla tuotantoyksikön aiheuttamaan nopeaan jännitteenmuutokseen. Tehonmuutoksen suuruus on yhtä suuri, oli liittymällä kuormitusta tai ei. Jännitteenousua tarkasteltaessa pienimmän pohjakuorman voi vähentää nimellistehosta.

Eri suuntaan suunnattujen paneelien arvioitua huipputehoa voidaan käyttää lieventävänä keinona yhteenlaskettuun nimellistehoon verrattuna. Arviointi on tällä hetkellä han-

kalaa, sillä monet työkalut tarjoavat hetkittäisen säteilytehon sijaan säteilyenergian määrää. Tyypillisin tilanne on todennäköisesti paneelien asettelut kaakkoon ja lounaaseen, jolloin keskipäivän aurinko paistaa epäsuorasti molempiin. Aurinkovoimalaitosten toimittajalta saatiin arvioksi maksimaalisen huipputehon olevan 70–80 % nimellistehosta, riippuen mahdollisista heijastuksista. Koilliseen ja etelään suunnattujen paneelien huipputehoksi (Sheffieldin Yliopisto, 2014) on määrittänyt 85 % yhteenlasketusta nimellistehosta. Sheffield sijaitsee toki hieman Suomea etelämpänä, mutta arvoa voidaan käyttää viitteellisenä. Nämä luvut ovat suhteessa toisiinsa, ja niitä voidaan käyttää ja onkin jo käytetty Elenialla huipputehon määrittämiseen. Invertteriteho saattaa olla paneelitehoa pienempi, jolloin suuntausta ei voida aina käyttää lieventävänä tekijänä. Tästä syystä yleistietolomakkeelle olisi hyvä saada sekä paneeli- että invertteriteho.

SFS-EN 50160 raja nopeille jännitteenmuutoksille on ohjeellinen, ja standardin ei velvoittavassa liitteessä mainitaan jopa 10 % muutosten olevan sallittua päivätasolla. Työssä hyödynnettiin Tampereen Yliopiston aurinkopaneeleista saatua dataa, ja sen perusteella todettiin esimerkiksi pilvisyydestä aiheutuvan nopean tehonmuutoksen olevan pahimmillaan noin 50 %. Käytännössä nimellistehon suuruiset muutokset ovat siis mahdollisia vain invertterin äkillisessä verkosta irtoamisessa, jota tuskin päivätasolla tapahtuu. Verkkoon kytkeytymisestä aiheutuvat piikit saadaan rajattua pois käyttämällä porastettua käynnistystä. Energiatoteutuksen suosituksessakin ohjeistetaan käyttämään niin sanottua pehmokäynnistystä verkkoon kytkennässä, jolloin invertteri kytkeytyy 10 %/min teholla verkkoon. Käyttämällä nimellistehoa pienempää tehoa nykyisessä tarkastelumallissa nopeiden jännitteenmuutosten osalta, välttäisi merkittävältä määrältä investointeja. Mikäli pienjänniteasiakkaiden kiinnostus aurinkosähköä kohtaan jatkuu samanlaisena, ja valtion tukijärjestelmään ei tule suuria muutoksia, järkevien mitoitusperiaatteiden merkitys tulee korostumaan.

Jännitteen nousu on tuskin rajoittava tekijä, vaikka nopeiden jännitteenmuutosten tarkasteluissa käytettäisiin esimerkiksi 50–80 % nimellistehoa. Komponenttien kuormitettavuutta ei voi tällä perusteella määrittää, sillä etenkin suuremmissa järjestelmissä muuntajakoneiden ylikuormitukset jäisivät huomioitta.



Kuva 26. Uuden tarkasteluprosessin vaiheet.

Prosessi alkaa aina alusta, kun asiakas tiedustelee uuden tuotantolaitteiston liittämistä. Ensimmäisessä vaiheessa tarkastellaan yksittäisen tuotantolaitoksen sekä saman lähdön ja muuntopiirin kaikkien tuotantoyksiköiden vaikutusta. Senerin kaavalla ei voida tarkastella useamman tuotantoliittymän aiheuttamia nopeita jännitteenmuutoksia, joten uusi tarkastelumalli on välttämätön. Luvun 4.3.3 tehonjakolaskentaa ja laskennan alustusta tarkastellaan jatkotutkimuksissa. Samassa luvussa esitettyä kuormitusmallia voidaan käyttää hyväksi jännitteen nousua arvioitaessa. Jos lähdöllä tai muuntopiirissä on tuotantotehoa maksimikuormitusta enemmän, teoreettinen jännitteenousu on suurempi kuin laskennan ilmoittama jännitteenalenema. Käytännössä kuormitus on todella harvoin kaikilla liittymillä nollassa, eli minimikuormituksen voi vähentää maksimituotannon määrästä silloin kun tarkastellaan jännitteenousua. Kun saadaan selville mahdollisen verkoon päin siirtyvän tehon huippu selville, voidaan määrä suhteuttaa alkuperäiseen kuormitushuippuun ja tämä suhdeluku kertoo suurimman jännitteenaleneman suuruudella. Tilannetta tulee tarkastella erikseen muuntopiirin ja lähdön kesken, koska kuormitukset eivät jakaudu tasaisesti. Jännitteen nousu riippuu myös pitkälti tuotantolaitteistojen tehoista ja sijainneista, mutta mikäli tuotantotehoa on hyvin vähän, pikainen tarkastelu riittää.

Verkko on usein rakennettu vahvaksi talven kuormituspiikkejä varten, mutta tilanne voi olla toinen vapaa-ajan asunnoilla. Vuoden kuormituskäyrät saattavat olla hyvinkin erilaisia perinteiseen asutuskeskukseen nähden. Jännitteenalenemat huippukuormituksella

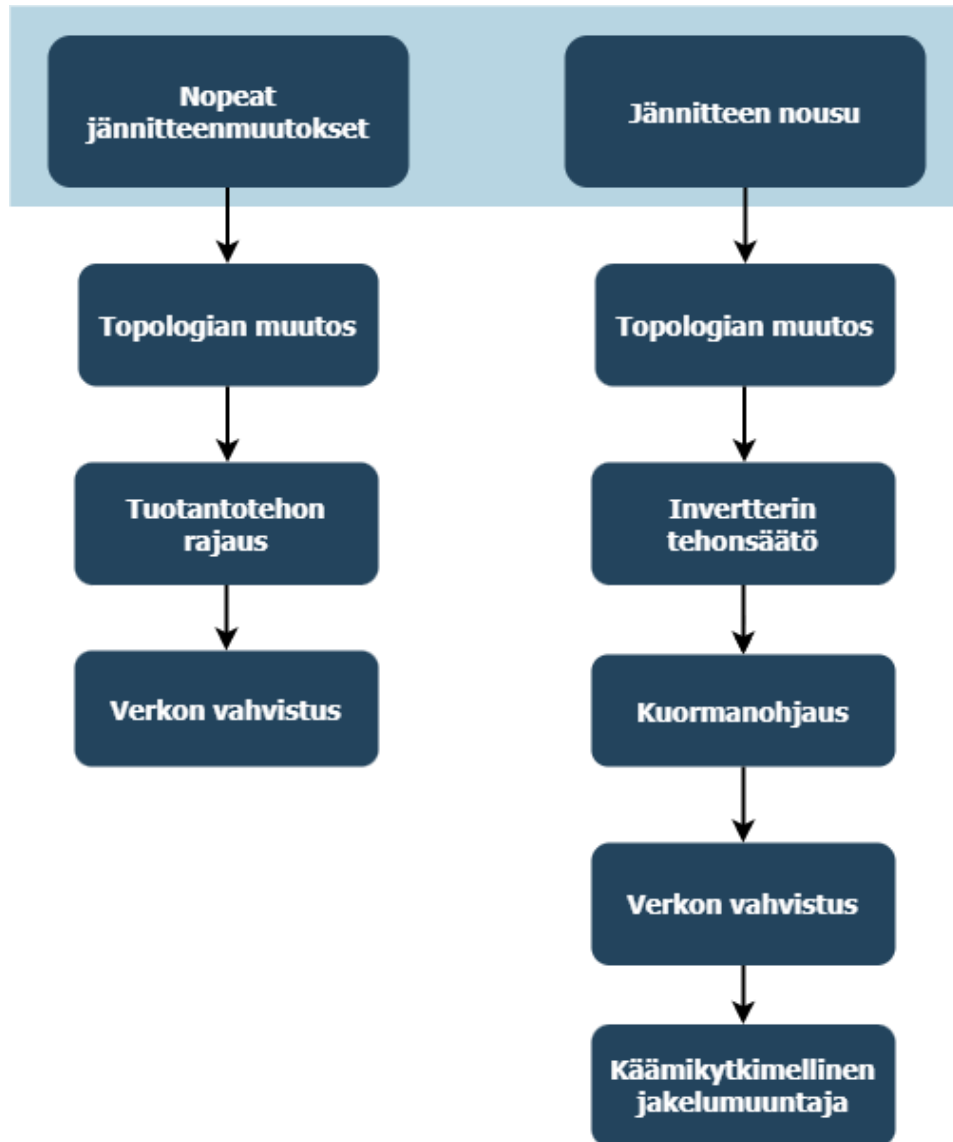
ovat usein valmiiksi 7–10 % tasolla. Tällaisissa tilanteissa tuotantoa ei tarvita kovinkaan paljoa jännitteen nousun rajojen rikkomiseksi. Luvussa 4.3.1 todettiin nopeiden jännitteenmuutosten olevan käytännössä heikon verkon rajoittava tekijä, mutta kyseinen väite perustuu nykyiseen tarkastelumalliin. Mikäli käyttöön saadaan uusi malli, jännitteen noususta voi tulla rajoittava tekijä ja käyttöön voidaan ottaa enemmän työssä esitettyjä laadunkorjauskeinoja. Kuten työssä aiemmin mainittiin, jännite ei käyttäydy täysin symmetrisesti tuotannon ja kulutuksen välillä. Tuloksia voidaan pitää jälleen suuntaa antavina, ja jännitetason tarkempiin tarkasteluihin kannattaa käyttää aikaa vasta, kun tilanne näyttää tiukemmalta.

Lopuksi tarkastellaan vielä komponenttien ylikuormitukset. Ylikuormittumista ei pitäisi muuntopiiritasolla pääsääntöisesti tapahtua, jos tuotantoteho on huippukuormitusta pienempää. SFS-EN 50160 rajat jännitteen nousulle mahdollistavat Elenian mitoitusperiaatteiden mukaisesti kytkettäväksi jopa tuplamäärän tuotantoa maksimikuormitukseen nähden. Suurella todennäköisyydellä komponenttien kestävyys ja muuntajakoneiden nimellistehot rajoittavat siinä kohtaa tuotantoyksiköiden liittämistä. Yksittäisen liittymän kohdalla suuri tuotantoyksikkö voi aiheuttaa esimerkiksi liittymisjohdon ylikuormittumisen, mutta tällöin yksikön pitäisi olla jo liittymistehoa suurempi. Elenia vahvistaa verkkoa maksetun liittymistehon mukaisesta tuotantotehosta, ja loput vahvistukset voidaan laskea tai siirtää asiakkaan vastuulle. Liittymisjohto on usein pienillä liittymillä myös rajoittava tekijä.

Suuremmille, yli 50 kVA pientuotantoyksiköille tehdään vielä tarkastelua verkon suojausasetteluiden puolesta, mutta ainakaan tällä hetkellä se ei kuulu sähköisen suunnittelun tiimin tekevän liitettävyydestä tarkastelun puolelle.

5.2 Verkon vahvistustoimenpiteiden valinta

Uuden tuotantoyksikön liittämistarkasteluiden lisäksi työssä esitetään ehdotus vahvistustoimenpiteiden valitsemiselle. Toimenpiteet ovat jaettu pehmeisiin ja koviin keinoihin luvussa 3, ja osaa keinoista on tutkittu tarkemmin kohdetarkasteluissa luvussa 4.



Kuva 27. Vahvistustoimenpiteiden valintakaavio.

Elenian verkon mitoitusperiaatteet ovat olleet hyvin valittuja, ja niiden myötä mahdollistetaan laajaa tuotannon liittämistä. Nopeiden jännitteenmuutosten osalta tarkastelumlissa on kehitettävää, sillä tuotantolaitteistot vaativat nykyohjeistuksen mukaan todella vahvaa verkkoa jännitejäykkyyden osalta. Kuvassa 27 on esitetty toimenpiteitä sen mukaan, mistä jänniteongelmasta on kyse. Työssä on muutamaan otteeseen todettu nopeiden jännitteenmuutosten olevan ensisijainen ongelma, ja vahvistustoimenpiteet ovat nii-

den osalta jo valmiina käyttöönotettaviksi. Työn perusteella jännitetason nousun ei uskota aiheuttavan ongelmia lähivuosina, ja esitetyissä vahvistustoimenpiteissä on vielä käytännön haasteita.

Topologian muutokset tulee tarkastaa aina kun tuotannon liittämistarkasteluissa havaitaan ongelmia. Jakorajan muuttamisella voidaan parhaassa tapauksessa saavuttaa parempaa sähkönlaatua vahvemmallalla oikosulkuteholla tai jakamalla kuormitusta. Keinon käytettävyys on haja-asutusalueella hyvin rajallinen, mutta tiiviisti rakennetussa taajamassa rengasyhteyksiä toisiin muuntopiireihin on useampia.

Tuotantotehon rajaus vaikuttaa kustannuslaskennan kannalta tehokkaalta keinolta, jos tulevia saneerauksia on tiedossa. Keinon tavoite eroaa invertterin pätötehon leikkauksesta siten, että tuotantotehon rajoituksella haetaan suurinta liitettävissä olevaa yksikkökoko nopeiden jännitteenmuutosten puitteissa. Pätötehon leikkauksella puolestaan esitetään jännitteen nousu sallittujen rajojen yläpuolelle. Tekninen toteutus näissä olisi helppointa invertterin asetusten kautta. Lähtökohtaisesti tuotantoa ei aloiteta rajoittamaan, jos saneerausta ei ole tiedossa lähivuosina. Pätötehon leikkauksella pidetään jännitteenousu sallituissa rajoissa jännitteen funktiona luvun 3.1.1 mukaisesti. Nopeat jännitteenmuutokset eivät ole sidoksissa jännitetasoon, ja muutos voi tapahtua aina yllättävästä irtikytkennästä.

Verkon vahvistus investointien myötä on pitkälti tapauskohtaista, eikä yhtä mallia voida soveltaa jokaiseen liittymään. Ilmajohdoverkon vahvistus olemassa oleviin pylväisiin täyttää usein verkon vaatimukset tyypilliselle tuotantoliittymälle, mutta vahvistussuunnitelmassa tulee huomioida vanhan verkon kunto. Verkkotietojärjestelmästä ei tietenkään heti pysty kertomaan esimerkiksi kuinka lahoja pylväät ovat, mutta komponenttien valmistusvuoden perusteella voidaan arvioida nykytilaa. On turha lähteä nostamaan uutta ilmajohtoa purkukuntoisiin pylväisiin, jolloin on järkevämpää tehdä uudet suunnitelmat tavoiteverkko ja maasto huomioiden.

Invertterin loistehonsäädöllä saavutetaan paikallista jännitetason hallintaa, ja siirtohäviöitä saadaan pienenettyä. Keinon käyttöönottoa hankaloittaa toimintaparametrien asetelu, joka tulee tehdä jokaiselle invertterille erikseen. Tällä hetkellä energiaviraston suositus verkkoon liitettävän invertterin tehokertoimelle on 1, eikä loistehoa voida tällöin säätää. On mahdollista, että lähivuosina suosituksiin tulee muutoksia, ja esimerkiksi laitteistojen maahantuojat asettelevat parametrit valmiiksi inverttereihin. Valmiiden asetteluiden myötä verkkoyhtiö säästyisi käytännön haasteilta ja saisi liitettyä vieläkin enemmän tuotantoa. Toisaalta Suomen olosuhteisiin rakennetuissa jakeluverkoissa tuotantoa tulisi

olla paikoittain jopa tuplasti maksimikuormitukseen nähden, jotta sallitut jänniterajat ylityisivät. Silloinkin komponenttien kuormitettavuudet voivat olla jo rajoittava tekijä. Lisäksi muilla tehokertoimen arvoilla invertterit syöttäisivät tai kuluttaisivat jatkuvasti loistehoa ja täten aiheuttaisivat hieman häviöitä.

Kuormanohjaus on myös keino, joka tulee olemaan tulevaisuudessa suuremmissa käytössä. Seuraavien vuosien aikana Elenia tulee vaihtamaan seuraavan sukupolven mittarit jokaiselle liittymälle ja kulutusjouktoon sekä kuormanohjaukseen suuntautuvia palveluita tullaan kehittämään. Omaa tuotantoa hankkivat asiakkaat ovat oletettavasti myös niitä kuluttajia, joita kiinnostaa liikenteen sähköistyminen. Sähköautojen akut tulevat todennäköisesti olemaan roolissa sähköverkon tehotasapainon hallinnassa. Yksittäiset asiakkaat voivat jo ajoittaa auton akuston lataamisen esimerkiksi keskipäivään, jolloin aurinkosähkön tuotanto on oletettavasti parhaimmillaan. Kuormanohjaukseen vaikuttaa asiakkaan oma kiinnostus ja sähkömarkkinoiden kehittymisen myötä saavutettava rahallinen hyöty.

Käämikytkimellinen jakelumuuntaja toimii muuntopiireillä, joissa jännitetasot nousevat tai laskevat tasaisesti. Komponentti kuuluu aktiivisen sähköverkon malliin, mutta tällä hetkellä hankintakustannukset ovat [REDACTED], ja sen korjaama ongelma ei ole vielä ajankohmainen. Eri jännitetasojen väliset kommunikaatioyhteydet tulee olla myös kunnossa tai jännitteensäädön viiveet aseteltu sopivasti, jottei kaksi käämikytkintä toimi automaattisesti toisiaan vastaan.

6. YHTEENVETO

Työssä käsiteltiin yleistyvän pientuotannon aiheuttamia jännitevaikutuksia ja mahdollisia korjaustoimenpiteitä. Invertterin tehonleikkaus ja verkkotopologian muutokset ovat työn pohjalta ensisijaiset pehmeät keinot, jonka jälkeen siirrytään verkon vahvistamiseen. Keinojen soveltuvuutta käyttöön arvioitiin ensin luvussa 3, ja luvussa 4 vertailtiin keinojen kustannuksia.

Kohdetarkasteluihin valittiin verkon laskentadatan perusteella heikon verkon tyyppiinliittymiä, joihin voitiin kohdistaa tarkempaa teknistä laskentaa. Verkkodatan mukaan pienen oikosulkuvirran (180 A) liittymiä on noin 10 000 kappaletta, mutta niihin luvataan automaattisesti 250 A:n oikosulkuvirran mukainen tuotantoteho. Tämä voi pahimmassa tapauksessa aiheuttaa jännitteen laatuun monia ongelmia, eikä tällöin huomioida lainkaan verkon ylikuormittumista. Ongelma ratkeaisi, jos kaikki tuotantoyksiköt kävisivät läpi manuaalisen tarkastuksen, sillä suurin osa pienistä laitteistoista on joka tapauksessa heti kytkettävissä verkkoon.

Tuotantotehon rajaus todettiin hyväksi vaihtoehdoksi, jos tiedossa on verkon saneerausta. Hyvitettävä korvaus saadaan laskettua leikattavan vuosienergian ja hyvitysenergian hinnan perusteella, joka selvitetään verkkoon kytkettävän tehon ja asiakkaan haluan tehon erotuksesta. Elenian tulee hyväksyä hyvityslaskennassa käytettävät arvot, mutta työssä esitettiin suuntaa antavia kustannusarvioita. Hyvityslaskenta voi olla osittain tapauskohtainen, sillä osalla asiakkaista tuotanto kuluisi omaan kulutukseen ja myös siirtomaksu olisi syytä hyvittää. Tällä hetkellä verkon vahvistusta odottavat tuotannon rajaukset eivät ole hyvityksen alaisia, mutta käytännöt tai regulaatio saattavat muuttua tulevaisuudessa. On myös todennäköistä, että verkon vahvistus on yhtiötasolla kannattavampaa, kuin korvausten maksaminen, sillä vahvistuksella saadaan kasvatettua verkon arvoa.

Työssä ei saatu suoraan uutta tarkastelutapaa nopeiden jännitteenmuutosten käsitteilyyn, mutta Trimble NIS tehonjakolaskennan soveltuvuutta tullaan tarkastelemaan jatkotutkimuksissa. Verkkotietojärjestelmään pohjautuva laskentamalli nopeuttaisi suunnittelijan operatiivista tekemistä. Myös Trimblen kanssa on tarkoitus keskustella suunnittelijan käytännön tekemisestä ja kokemuksesta.

Mitoituksessa käytettäviin lieventäviin tekijöihin löydettiin konkreettisia lukuja pilvisyyden aiheuttamien nopeiden jännitteenmuutosten suuruudesta ja paneelien suuntauksen vaikutuksesta huipputehohon. Niiden käyttöönotto nykyisessä laskentamallissa pienentää tarvittavien investointien laajuutta ja määrää. Laatustandardin SFS-EN 50160 viitteelliset rajat nopeille jännitteenousuille tulisi silti täyttyä. Vaikka nykyiseen malliin otettaisi käyttöön 50 % teho, mutta tarkasteluraja olisi edelleen 4 %, niin äkillisessä irtoamisessa ei pahimmassakaan tapauksessa tapahtuisi yli 10 % nopeaa jännitteenmuutosta. Invertterin irtoaminen täydellä teholla on todennäköisesti todella harvinainen tapahtuma, joten se voidaan tulkita sallittavaksi SFS-EN 50160 liitteen B arvojen mukaisesti.

Jännitteenousun ei uskota työn tarkasteluiden myötä tuottavan ongelmia lähivuosina, sillä nykyiset verkon mitoitusohjeet Elenialla ovat standardin SFS-EN 50160 rajoja tiukemmat. Verkko mitoitetaan kestämään talven pakkaskuormat, jolloin tuotantoa pitäisi olla todella paljon jännitteen nousemiseksi sallittujen rajojen yläpuolelle. Käytännössä uudessa verkossa, tuotantoa tarvittaisi kaksinkertainen määrä talven huippukuormiin rajojen ylittämiseksi. Monet tutkimukset aiheeseen liittyen on tehty Etelä-Euroopassa, jossa olosuhteet ovat täysin erilaiset, eikä verkkoa jouduta mitoittamaan talven kuormien mukaan. Aiemmassa diplomityössä oli simuloitu pahinta tilannetta, jossa kuormitus oli 0. Jännitteet nousivat yli sallittujen rajojen, mutta käytännössä muuntopiireissä on aina jonkin verran jännitettä laskevaa pohjakuormitusta. Liikenteen sähköistyminen ja öljylämmityksestä luopuminen osin lisää kuormitusta, joka edelleen pienentää jännitteen nousua.

Tuotantolaitteistojen hintojen laskiessa yksikkökoot tulevat todennäköisesti kasvamaan, ja nopeiden jännitteenmuutosten tarkasteluun voi löytyä tarkempia keinoja. Tällöin verkkoa ei vahvisteta nopeiden jännitteenmuutosten takia ja jännitteenoususta tulisi rajoitettava tekijä. Työssä esiteltiin tätä varten käännyttämisen jakelumuuntajan periaate, mutta [REDACTED]

Liittämistarkastelun prosessi kuvattiin nykyisellään ja siihen tehtiin lisäyksiä tulevia tarkasteluita varten. Vahvistustoimenpiteet asetettiin järjestykseen, jonka mukaan ne olisi hyvä käydä läpi kustannusten minimoimiseksi luvun 4 laskelmiin perustuen. Verkkotopologian muutoksen, invertterin loistehonsäädön ja kuormanohjauksen ei oleteta aiheuttavan kustannuksia verkkoyhtiölle, vaikka näihinkin on tuotettava jonkinlaista asiantuntijapalvelua. Nämä työkalut ovat valmiina käyttöönotettaviksi päivittäisessä tekemisessä.

Työn tavoitteisiin päästiin kohtalaisen hyvin, vaikka uutta mitoitusotetta ei löydetty, sillä pelkän laskentamallin kehittäminen olisi ollut itsessään haastava tehtävä. Lopputuloksena saatiin konkreettisia hyötyjä ja vinkkejä mitoitusotettuihin, ja siten mahdollisia

säästöjä kustannuksissa. Työn aikana havaittiin, että aiempi päätös tarkastella liitettävyyttä nopeiden jännitteenmuutosten osalta on ollut oikea, sillä ne ovat nykyisellään rajoittava tekijä. Tarkastelussa tulee huomioida kuitenkin myös muita asioita, etenkin pientuotannon vahvan yleistymisen myötä.

On mielenkiintoista, kuinka pientuotannon tilanne kehittyy tulevaisuudessa, ja millaisia ratkaisuja niiden aiheuttamiin ongelmiin kehitetään. Uuden sukupolven mittareiden avulla voidaan seurata paremmin liittymien kulutusta ja tuotantoa sekä kehittää tarkempia malleja pientuotannon käyttäytymisestä. Myös muut älykkäät sähköverkon komponentit helpottavat ilmenevien haasteiden käsittelyssä. Energia-alan regulaatio ohjaa kuitenkin vahvasti verkkoyhtiöiden investointeja, mikä puolestaan näkyy strategisessa suunnittelussa ja jokapäiväisessä tekemisessä.

LÄHTEET

ABB, Line Voltage Regulator increases grid capacity for renewable energies, 2021. Saatavilla: <https://new.abb.com/events/cired/line-voltage-regulator>

Baggini A., Handbook of power quality, 2008

Bayer B., Matschoss P., Thomas H., Marian A., Institute for Advanced Sustainability Studies, The German experience with integrating photovoltaic systems into the low-voltage grids, 2018. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117311461>

Elenia, Tietoa meistä, 2021a. Saatavilla: <https://www.elenia.fi/elenia/elenia-yrityksena/tietoa-eleniasta>

Elenia, Liittymishinnasto, 2021b. Saatavilla: <https://www.elenia.fi/palvelut/sahkoliittymat/nain-hankit-sahkoliittymän/liittymishinnasto-ja-ehdot>

Elenia Oy, Aurinkosähkö ja pientuotanto, 2021c. Saatavilla: <https://www.elenia.fi/palvelut/kotiin-ja-mokille/aurinkosahkon-ja-pientuotannon-liittaminen>

Elenia Oy, Verkkopalveluhinnasto, 2021d. Saatavilla: [Verkkopalvelutuotteet ja -maksut - Elenia](#)

Elovaara J., Haarla L., Sähköverkot II, Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011

Energiateollisuus, Mikrotuotannon liittäminen sähköjakeluverkkoon, Verkostosuositus YA9:13, 2019a

Energiateollisuus, Tekninen liite 1 ohjeeseen sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon – nimellistehoaltaan enintään 100 kVA laitoksen liittäminen, 2019b

Energiavirasto, Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti kasvoi 45 prosenttia vuonna 2020. Saatavilla: <https://energiavirasto.fi/-/aurinkosahkon-tuotantokapasiteetti-kasvoi-45-prosenttia-vuonna-2020-pientuotantoa-lahes-300-megawattia>

Energiavirasto, Energiavirasto on määrittänyt muutokset sähköjakelun valvontamenetelmiin, 2021. Saatavilla: <https://energiavirasto.fi/-/energiavirasto-on-maarittanyt-muutokset-sahkonjakelun-valvontamenetelmiin->

Euroopan komissio, Electricity generation statistics, 2020. Saatavilla: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_generation_statistics_%E2%80%93_first_results&oldid=498612#Production_of_electricity

- Euroopan Parlamentti, Energy policy: general principles. Saatavilla: <https://www.euro-parl.europa.eu/factsheets/en/sheet/68/energy-policy-general-principles>
- Fingrid, Suomen sähköjärjestelmä, 2021a. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/kanta-verkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/>
- Fingrid, Varttitase eli 15 minuutin taseselvitysjakso, 2021b. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/pohjoismainen-tasehallinta/varttitase/>
- Hitachi, Line voltage regulator for low voltage grids, 2019. Saatavilla: <https://www.hitachienergy.com/offering/product-and-system/transformers/dry-type-transformers/line-voltage-regulators/line-voltage-regulator-for-low-voltage-grids>
- Hurmeidan S., Rosin A., Vinnal T., Effects of PV Microgeneration on Rural LV Network Voltage Quality, 2016. Saatavilla: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7763083>
- Kari Joel, Diplomityö, Tampereen Yliopisto, Hajautetun tuotannon vaikutus pienjänniteverkkoon ja pienjänniteverkon suunnitteluun, 2020
- Korpinen L., Mikkola M., Keikko T., Falck E., Yliaalto-opus, 1998. Saatavilla: <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>
- Lobera D., Mäki A., Huusaari J., Lappalainen K., Suntio T., Valkealahti S., Department of Electrical Engineering, Operation of TUT Solar PV Power Station Research Plant Under Partial Shading Caused by Snow and Buildings, 2013
- Motiva, Aurinkosähkötuotannon taloudellinen tukeminen, 2021. Saatavilla: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/aurinkosahkotuotannon_taloudellinen_tukeminen
- Männistö M., Hietalahti L., Seesvuori R., Seesvuori V., Wilen T., Yliaallot ja kompensointi, 2006.
- Nordpool, Market Data, 2021. Saatavilla: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/#/nordic/table>
- Rashid M., Knight A., Combining Volt/Var & Volt/Watt modes to increase PV hosting capacity in LV distribution networks, 2020
- Reese C., Buchhagen C., Hofmann L., Voltage Range as Control Input For OLTC-equipped Distribution Transformers, 2012
- Passey R., Spooner T., MacGill I., Watt M., Syngellakis K., The Potential Impacts Of Grid-connected Distributed Generation And How To Address Them, 2011

Ruokavirasto, Maatalouden investointituet, 2021. Saatavilla: <https://www.ruokavirasto.fi/viljelijat/tuet-ja-rahoitus/maatalouden-investointituet/>

Sarimuthu C., Ramachandaramurthy V., Mokhlis H., A Review On Voltage Control Methods Using On-load Tap Changer Transformer For Networks With Renewable Energy Sources, 2016

Sheffield Solar, Comparison of East-West arrays, 2014. Saatavilla: <https://www.solar.sheffield.ac.uk/panel-data/comparison-of-east-west-arrays/>

Solar Learning Center, Solar Panel Cost, 2021. Saatavilla: <https://www.solar.com/learn/solar-panel-cost/>

Solarigo, Palvelut, 2021. Saatavilla: <https://www.solarigo.fi/palvelut>

Säteilyturvakeskus, sähkönsiirto ja voimajohdot, 2021. Saatavilla: <https://www.stuk.fi/aiheet/sahkonsiirto-ja-voimajohdot/sahkonsiirto-ja-jakelu>

Työ- ja elinkeinoministeriö, Energiatuki, 2021. Saatavilla: <https://tem.fi/energiatuki>

Verohallinto, kotitalousvähennys, 2021. Saatavilla: <https://www.vero.fi/henkiloasiakkaat/verokortti-ja-veroilmoitus/tulot-ja-vahennykset/kotitalousvahennys/>