

**Aurinkosähköinverteri sähkönjakeluverkon loistehon
hallinnassa ja jännitteensäädössä**
**Solar inverter in reactive power control and voltage reg-
ulation of power distribution network**

Joonas Rannanmaa

TIIVISTELMÄ

LUT-yliopisto
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Joona Rannanmaa

Aurinkosähköinvertteri sähkönjakeluverkon loistehon hallinnassa ja jännitteensäädössä

2019

Kandidaatintyö.

24 s.

Tarkastaja: TkT Juha Haakana

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää aurinkosähköinvertterin käyttöä sähkönjakeluverkon loistehon hallinnassa ja jännitteensäädössä. Tutkimuksessa tarkasteltiin erilaisia inverttereiden ohjauskeinoja, sekä erilaisia säädöksiä liittyen inverttereiden verkkoon liittämiseen. Työssä tutkittiin myös mitä hyötyä aurinkosähköinverttereiden käytöstä olisi tavalliselle kuluttajalle ja sähköverkkoyhtiöille. Työ tehtiin kirjallisuustutkimuksena.

Inverttereiden ohjauskeinoina tutkittiin $\cos(\varphi)P$, $\cos(\varphi)$ ja $Q(U)$ ohjauksia, sekä työssä selvitettiin, olisiko kannattavinta toteuttaa ohjaukset keskitettynä vai paikallisena. $Q(U)$ -ohjauksessa on mahdollista, etteivät alkupään invertterit osallistu kompensointiin, jos jännite ei nouse tarpeeksi suureksi. Tämä voidaan välttää $\cos(\varphi)P$ -ohjauksella, jossa kompensoinnin määrä määräytyy tuotetun paikallisen pätötehon mukaan, mutta tällöin saattaa aiheutua turhaa kompensointia huippukuorman ja huipputuotannon tapahtuessa samaan aikaan. Tätä taas ei tapahdu $Q(U)$ -ohjauksessa, koska se toimii verkon jännitteen mukaan.

Inverttereiden hyödyntäminen voisi vähentää loistehoon liittyviä kuluja sähköverkkoyhtiöille, mikä taas voisi välttää sähkönsiirtomaksujen kasvattamisen ja hidastaa verkon päivittämisen tarvetta. Tosin pientuotanto voi toimia vain avustavana säätönä johtuen pienjänniteverkon suuresta R/X -suhteesta.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Joona Rannanmaa

Solar inverter in reactive power control and voltage regulation of power distribution network

2019

Bachelor's Thesis.

24 p.

Examiner: D.Sc. Juha Haakana

The aim of this study was to investigate the use of a solar inverter in the control of reactive power and voltage regulation of the electricity distribution network. The benefits of using a photovoltaic inverter for ordinary consumers and electricity network companies were also explored. The work was done as a literary study.

The examined controls for inverters were the $\cos(\varphi)P$, $\cos(\varphi)$ and $Q(U)$ controls, and whether it would be most optimal to execute controls in a centralized or local manner. In $Q(U)$ -control, it is possible that the upstream inverters will not participate in the compensation if the voltage doesn't rise high enough. This can be avoided by the $\cos(\varphi)P$ -control, where the amount of compensation is determined by the local power output. However, it may result in unnecessary compensation if peak load and peak production occur at the same time.

In power generation, utilizing this technology could reduce the costs associated with reactive power for electricity network companies, which in turn could avoid increasing electricity transmission charges and slowing down the need for network upgrades. However, small-scale production can only function as an auxiliary control due to the high R/X ratio of the low voltage network.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	6
2.	Loistehon kompensointi aurinkosähköinvertterillä.....	7
2.1	Loisteho	7
2.2	Inverttereiden käytön etuja	7
2.3	Inverttereiden sijoitus	9
2.4	Yliaallot	9
3.	Aurinkosähkön syöttäminen sähköverkkoon.....	10
3.1	Vastakkaisuuntainen teho.....	10
3.2	Aurinkosähkö	10
3.3	Saarekkeiden havaitseminen	11
3.3.1	Passiiviset menetit	12
3.3.2	Aktiiviset menetit	12
3.4	Mikrotuotannon ongelmia.....	13
4.	Inverttereiden ohjaus.....	14
4.1	Paikallinen ja keskitetty ohjaus.....	14
4.1.1	SCADA-ohjain	14
4.2	Ohjauskeinot	15
5.	Aurinkosähköinverttereiden hyödyt loistehon kompensoinnissa	17
5.1	Loissähköikkuna.....	17
5.2	Edut yhtiöille ja kuluttajille.....	18
6.	Muita jännitteensäädön keinoja	19
7.	Johtopäätökset.....	20
	Lähteet.....	22

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

$\cos(\varphi)$	Tehokerroin
$\cos(\varphi)_{\min}$	Pienin tehokerroin, jolla invertteri voi toimia
P	Pätöteho
P_{\min}	Pienin pätötehotaso, jonka liittymispisteen takaiset voimalaitokset voivat tuottaa ilman aikarajaa
P_n	Nimellinen tuotettu pätöteho
Q	Loisteho
Q_D	Loissähkön ottoraja kulutettaessa pätötehoa
Q_{D1}	Loissähkön antoraja kulutettaessa pätötehoa
Q_G	Loissähkön ottoraja tuotettaessa pätötehoa
Q_{G1}	Loissähkön antoraja tuotettaessa pätötehoa
Q_{\max}	Suurin mahdollinen loisteho, jonka invertteri voi tuottaa
Q_{\min}	Pienin mahdollinen loisteho, jonka invertteri voi tuottaa
U	Jännite
U_n	Nimellisjännite

Lyhenteet

AMI	Advanced metering infrastructure
HD	Harmonic detection
NDZ	Non detection zone
OTLC	On load tap changer
OUF	Over/under frequency detection
OUV	Over/under voltage detection
PJD	Phase jump detection
STS	Static transfer switch

1. JOHDANTO

Aurinkosähkön tuotanto lisääntyy nopeaa tahtia. Tulevaisuudessa hajautettu tuotanto tulee lisääntymään älykkäiden sähköverkkojen johdolla. Asennettu aurinkosähkön kapasiteetti kasvoi vuonna 2017 noin 29 % verrattuna aikaisempaan vuoteen, jolloin arviolta asennettua kapasiteettia maailmassa oli noin 402.5 GW (IEA 2018).

Hajautetun tuotannon lisääntyminen voi kuitenkin olla suuri haaste nykyisen sähkönjakeluverkon kannalta. Nykyinen sähkönjakeluverkko on suunniteltu yksisuuntaiseen tehonsiirtoon, mutta hajautetun tuotannon takia kaksisuuntainen tehonvirtaus lisääntyy, mikä voi johtaa liian suuriin jännittemuutoksiin jakeluverkossa. Liian korkeat jännitteet voivat alentaa verkon jännitteen laatua ja näin aiheuttaa vaurioita verkkoon kytkettyihin laitteisiin.

Tosin hajautetussa tuotannossa on myös myönteisiä puolia. Ohjaamalla kunkin tuotantolaitoksen verkkoon syötettyä tehoa, voidaan hallita verkossa kulkevaa loistehoa. Aurinkosähköinvertterit voidaan ohjata kompensoimaan loistehoa verkon tarpeen mukaan, jolloin invertterit voivat auttaa verkon jännitteensäädössä. Lisäksi kompensoinnin tapahtuessa tuotantopisteen lähellä myös verkon lämpöhäviöt pienenevät.

Inverttereiden ohjaus voidaan toteuttaa joko paikallisesti tai keskitetysti. Keskitetyssä tuotannossa pystyttäisiin mittaamaan sähkön arvoja monesta eri pisteestä ja näin ohjaamaan kukin invertteri toimimaan optimaalisesti ja mahdollisimman pienellä ali- tai ylikompensoinnilla. Tosin käytännössä tätä rajoittaa kommunikaatiosta aiheutuva latenssi, sillä aurinkosähköjärjestelmän tuotanto voi muuttua nopeasti riippuen säästä. Paikallisessa ohjauksessa taas ei pystytä ohjaamaan kompensointia yhtä optimaalisesti, koska paikallisella ohjauksella toimivalla invertterillä ei ole tietoa muun verkon tilasta, jolloin invertteri saattaa yrittää kompensoida loistehoa turhaan.

Tässä tutkimuksessa perehdytään voiko aurinkosähköinverttereitä käyttää sähköverkon loistehon ja jännitteen hallintaan. Tutkimuksessa selvitetään myös inverttereiden erilaisia ohjauskeinoja ja tarkastellaan mitä muita keinoja on olemassa liian suurien jännitteen vaihteluiden estämiseksi.

2. LOISTEHON KOMPENSOINTI AURINKOSÄHKÖINVERTTERILLÄ

Tässä kappaleessa käydään läpi loistehon kompensointia verkossa ja inverttereiden käytön etuja loistehon kompensoinnissa.

2.1 Loisteho

Loisteholla tarkoitetaan näennäistehon kompleksista osaa, jota muodostuu verkon induktiivisissa tai kapasitiivisissa osissa. Kapasitiivisen ja induktiivisen loistehon suhdetta verkossa kuvataan luonnollisella teholla. Kun verkossa syntyvä induktiivinen ja kapasitiivinen loisteho ovat yhtä suuria, verkko kompensoi itse kaiken tuottamansa loistehon, jolloin se käy luonnollisella teholla. (Elovaara 2011)

Loistehon siirto verkossa ei ole kovin kannattavaa johtuen sen siirtämisen aiheuttamasta energia- ja jännitehäviöistä. Tosin jotkin laitteet, kuten tietyt moottorit ja lamput vaativat loistehoa toimiakseen. Lisäksi loistehon avulla voidaan säätää verkon jännitettä, sillä loistehon muutoksella on suurempi merkitys jännitteen itseisarvoon, kuin jännitteen kulmaan (Elovaara 2011)

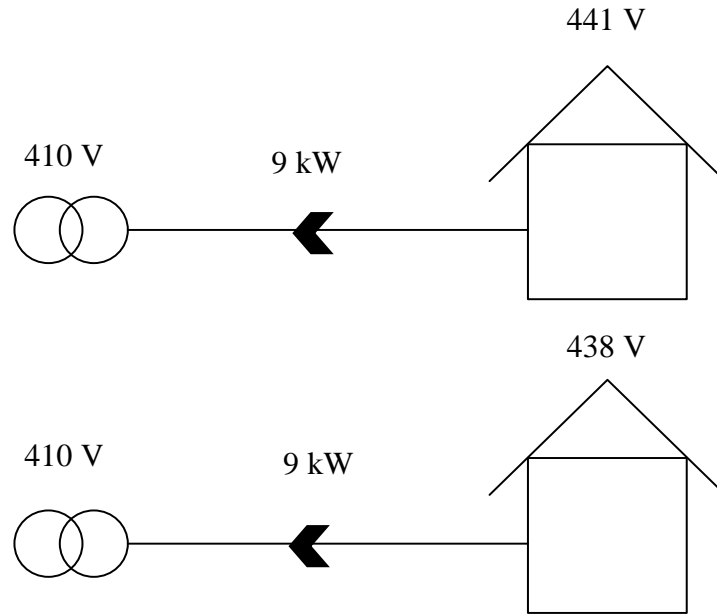
2.2 Inverttereiden käytön etuja

Verkossa olevan loistehon määrää voidaan ohjata tahtigeneraattoreilla, kondensaattoripaketeilla, kuristimilla ja keloilla. Tulevaisuudessa olisi tosin mahdollista harkita aurinkosähköinverttereiden käyttämistä loistehon kompensointiin. Nykyään käytössä olevat tahtigeneraattorit ovat hyvä ja tehokas keino tasapainottaa verkkoa suurjänniteverkossa. Generaattorit tosin eivät pysty vaikuttamaan jakeluverkon päässä olevaan loistehoon tasapainoon tarpeeksi tehokkaasti, jotta ne olisivat yksinään riittäviä. (Turitsyn 2011)

Verkossa käytetään myös rinnakkain kytkettyjä kondensaattoripaketteja. Niiden tarkoituksena on hallita verkon jännitettä ohjaamalla verkon loistehoa tilanteen mukaan (Elovaara 2011). Jännitteen alentuessa kondensaattorilla voidaan nostaa jännitettä hyväksyttävälle tasolle. Kondensaattoripakettien poiskytkeminen tosin voi aiheuttaa voimakkaan transientin verkkoon, joka voi tuhota verkkoon kytkettyä laitteistoa (Turitsyn 2011).

Inverttereiden käyttö jakeluverkon loistehon kompensoinnissa ja jännitteensäädössä on mahdollinen keino hillitä kaksisuuntaisen tehonvirtaamaan aiheuttamaa ylijännitettä jakeluverkossa. Niitä hyödyntämällä voitaisiin ainakin vähentää verkkoyhtiöiden tarvetta rajoittaa aurinkosähkön syöttöä verkkoon. Eli tilanteessa, jossa jonkin alueen jännite nousee liian suureksi, alueella olevat invertterit voitaisiin ohjata kompensoimaan verkon loistehoa ja näin säätämään sen jännitettä. Lisäksi tuotantopisteen lähellä tapahtuva kompensointi vähentää verkon lämpöhäviöitä ja kompensoinnin hajauttaminen vähentäisi verkon riippuvuutta suurista kompensointilaitteista (Turitsyn 2011).

Kompensointi inverttereillä perustuu inverttereiden tuottaman loistehon hallintaan. Kun inverttereitä ohjataan tuottamaan induktiivista loistehoa, verkossa oleva kapasitiivinen loisteho kompensoituu. Tätä hyödyntämällä voidaan esimerkiksi estää ylijännitteen muodostuminen pienjänniteverkoissa huipputuotannon aikana. On myös tärkeää ohjata inverttereitä välttämään ylikompensointia, sillä se voi aiheuttaa turhia häviöitä verkossa. On myös mahdollista ohjata inverttereitä verkon jännitteen kasvattamiseen alijännitteisessä verkossa kasvattamalla kapasitiivisen loistehon tuotantoa. Kuvassa 2.1 nähdään mitä ohjaus käytännössä tekisi. Kompensoinnin ollessa käynnissä nähdään, että verkon jännite alenee eikä tällöin ole tarvetta rajoittaa verkkoon syötettyä tehoa.



Kuva 2.1. Kuvassa ylempänä näkyy verkko, jossa on ylijännitettä ja pätötehon virtaama on muuntajalle päin noin 9 kW ja siinä ei ole inverttereiden kompensointi käytössä. Alemmassa tapauksessa verkkoon liitettyssä invertterissä on kompensointi päällä ja siinäkin on pätötehon virtaama muuntajalle 9 kW, mutta invertteri tuottaa myös kompensoivaa loistehoa, mikä avulla saadaan jännite laskettua sallittuihin rajoihin. Tosin tästä jo huomataan, ettei inverttereiden käyttö jänniteensäädössä ole kovin tehokasta johtuen verkon suuresta R/X-arvosta, mutta niitä voidaan silti käyttää jännitteen hallinnassa apuna.

2.3 Inverttereiden sijoitus

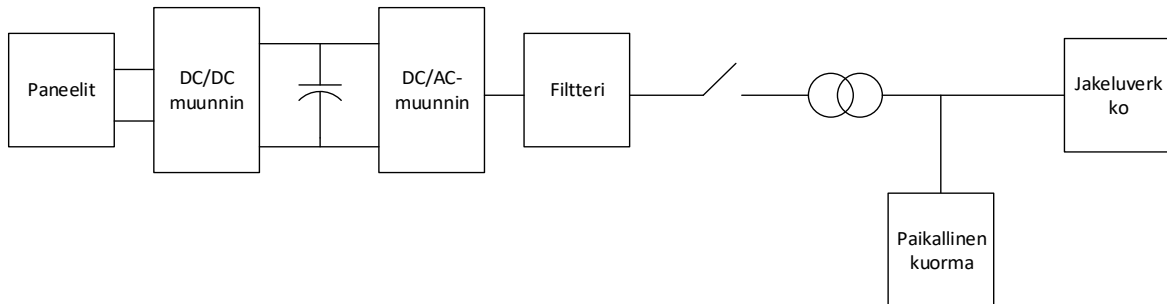
Kun pientuotannon verkon liittymispiste on lähellä jakeluverkon muuntajaa, loisteholla on suurempi merkitys verkon jännitteessä kuin pätöteholla. Tämä johtuu muuntajan oikosulku-reaktanssin ja sähkölinjan resistanssin suuruudesta. Muuntajan lähellä verkon reaktanssi on suurempi kuin verkon resistanssi, joka aiheuttaa loistehon suuremman vaikutuksen verkon jännitteen suuruudessa (Demirok 2011). Kauemmaksi muuntajalta mentäessä taas verkon resistanssista johtuen pätöteholla on suurempi merkitys jännitteessä. Tosin yleensä jänniteensäädölle on tarvetta verkon loppupäässä eikä alkupäässä.

2.4 Yliaallot

Yliaallot voidaan jakaa harmonisiin yliaaltoihin ja epäharmonisiin yliaaltoihin. Harmoniset yliaallot ovat verkon perustaajuuden (50 Hz) kerrannaisia, kun taas epäharmonisia yliaaltoja ovat muut kuin perustaajuuden kerrannaisia yliaaltoja. Harmonisia yliaaltoja syntyy esimerkiksi tasasuuntaajissa ja summautuvat verkkotaajuuteen aiheuttaen laitteiden lämpenemistä. (Elovaara 2011)

3. AURINKOSÄHKÖN SYÖTTÄMINEN SÄHKÖVERKKOON

Tässä kappaleessa käsitellään aurinkosähköinverttereitä ja inverttereitä yleisesti, sekä kuinka niiden avulla voidaan ohjata sähköverkossa olevaa loistehoa sekä jännitettä. Tarkastellaan myös kuinka erilaiset aurinkosähköjärjestelmät käyttäytyvät keskenään sähköverkossa ja kuinka vikatilanteissa invertterit voivat havaita saarekekäytön. Kuvassa 3.1 on esitettyä yksinkertaistettu versio aurinkosähköjärjestelmän kytkennästä jakeluverkkoon.



Kuva 3.1. Yksinkertaistettu malli normaalista aurinkosähköjärjestelmän kytkennästä. Aurinkosähköjärjestelmä koostuu yleensä paneeleista, DC/DC-muuntimesta DC/AC-muuntimesta ja LC-filtteristä, erotusmuuntajasta ja STS-kytkimestä (Static Transfer Switch). (Khan 2017)

3.1 Vastakkaissuuntainen teho

Nykyinen sähköjakelu järjestelmä on suunniteltu lähinnä yksisuuntaiseen tehonsiirtoon. Lisääntyvän aurinkosähkön pientuotannon takia verkkoon syötetään aurinkosähköjärjestelmien ylimääräinen sähkö, joka aiheuttaa kahdensuuntaista tehonvirtaamaa verkossa. Kaksisuuntainen tehonvirtaus voi aiheuttaa ylijännitteitä verkossa, erityisesti aurinkosähköjärjestelmien tuoton ollessa huipussaan, mutta kulutuksen ollessa pienimmillään (Hashemi 2017). Tällöin verkkoon syntyvä ylijännite voi nousta niin suureksi, että se aiheuttaa tuhoja verkon asiakkaille ja verkon laitteille, kuten muuntajille.

3.2 Aurinkosähkö

Tulevaisuudessa sähköntuotanto ei tule olemaan nykyisen kaltaista. Älykkäiden sähköverkkojen avulla keskitetyn tuotannon osuus vähenee ja hajautettu sähköntuotanto tulee kasvamaan. Tässä aurinkosähköllä tulee olemaan oma osansa. Aurinkosähkön tuotannon kapasiteetti on kasvanut maailmalla merkittävästi. Vuonna 2017 kasvua tapahtui 29%, joka nosti asennetun kapasiteetin arviolta jopa 402.5 GW (IEA 2018). Nykyiset verkot on suunniteltu

pääasiassa tehon siirtämisen vain yhteen suuntaan ja tästä syystä tulevaisuudessa on haasteena vastakkaisuuntaisen tehon aiheuttamat ongelmat, kuten ylijännite.

3.3 Saarekkeiden havaitseminen

Saarekkeella tarkoitetaan tilannetta, jossa jakeluverkon haltija on erottanut osan verkkoa saadakseen sen jännitteettömäksi, mutta kaikki verkkoa syöttävät laitokset eivät ole lopettaneet syöttöä. Tällöin verkko on edelleen jännitteellinen, mikä voi aiheuttaa ongelmia tai jopa hengenvaaran, jos joku olettaa verkon olevan jännitteetön. Tästä syystä pientuotantojärjestelmien tulee havaita saarekkeiden muodostuminen ja irrottaa itsensä verkosta turvallisuuden vuoksi. Saarekkeiden havaitsemiseen voidaan käyttää passiivisia metodeja, aktiivisia metodeja tai erillisiin ohjaimiin perustuvia metodeja. Passiiviset ja aktiiviset menetot perustuvat pääasiassa inverttereiden toimintaan. Metodien toimivuutta tarkastellaan tutkimalla niiden tunnistusikkunan suuruutta (NDZ) invertterin ja verkon liittymiskohdassa. Tunnistusikkuna tarkoittaa, kuinka suuri tulee saarekkeen aiheuttaman häiriön olla, jotta metodi tunnistaa sen. Yli/ali jännitteen tai taajuuden havaitseminen on pakollinen kaikissa verkkoon kytketyissä aurinkosähköjärjestelmissä. Suomessa taajuuden ja jännitteen vaihtelurajat näkyvät taulukossa 3.1. Taulukon lisäksi on hyvä huomioida, että pienjänniteverkoissa ei saa syntyä yli 4% jännitteen muutosta, mikäli tuotantolaitos käynnistyy tai putoaa verkosta (Energiateollisuus 2016).

Taulukko 3.1. Suomessa alle 100 kVA sähköntuotantolaitoksiin tulee asentaa suojauslaite, joka irrottaa laitoksen yleisestä jakeluverkosta, mikäli taulukon parametrit ylittyvät verkonliittymiskohdassa. Lisäksi laitteet saa liittää takaisin verkkoon vasta, kun verkon jännite ja taajuus ovat pysyneet tietyn aikaa sallittujen rajojen sisällä. Suomessa tämä aika on 60 s. (Energiateollisuus 2016).

Parametri	Toiminta-aika	Asetteluarvo
Ylijännite	0.2 s	$U_N + 10\%$
Alijännite	0.2 s	$U_N - 15\%$
Ylitaajuus	0.2 s	51.5 Hz
Alitaajuus	0.2 s	47.5 Hz
Saarekekäyttö	Enintään 5 s	

Kun aurinkosähköjärjestelmän tuottama päto- ja loisteho ovat tasapainossa kulutuksen kanssa, verkosta otettu teho tällöin olematon. Mikäli tällaisessa tilanteessa verkko menisi jännitteettömäksi, invertteri ei välttämättä havaitseisi sitä, sillä liittymispisteessä ei kuluteta

tehoa verkosta. Tällöin verkon tilan muutokset eivät olisi kovin helposti havaittavissa invertterille, jolloin invertteri ei irtoaisi verkosta. Lisäksi taajuudelle ja jännitteelle on pakko jättää varaa vaihdella, jottei jakeluverkossa luonnollisesti tapahtuvat muutokset, kuten ylijännite tai taajuuden vaihtelut aiheuta virheellistä havaintoa. (Teodorescu 2011)

3.3.1 Passiiviset metodit

Passiivisissa metodeissa inverttereihin on asennettu algoritmi, joka seuraa eri parametreja, jotka tyypillisesti muuttuvat verkon ollessa saarekkeessa. Passiivisia metodeja ovat edellä mainitut ali/yli jännitteen (OUV) tai taajuuden havaitseminen (OUF), vaihejännitteen muutoksen havaitseminen (PJD) ja yliaaltojen havaitseminen (HD). PJD metodin toiminta perustuu invertterin mittaamaan vaihe-eroon napajännitteen ja lähtövirran välillä. Tämä vaiheero muuttuu saarekekäytön aikana loistehon tuotantosuhteen muutoksen takia. (Teodorescu 2011)

HD metodissa pyritään tarkastelemaan erilaisia yliaaltoja, joita invertteri tuottaa. Menetelmässä tarkastellaan yliaaltojen suuruutta. Verkon ollessa normaalitilassa invertterin tuottamat yliaallot ovat niin pieniä, että niitä on vaikea havaita, kun taas saarekekäytössä olevassa verkossa yliaallot ovat suurempia johtuen verkon impedanssin muutoksesta, jolloin ne ovat helpommin havaittavissa. Kun invertteri havaitsee tietyn tasoisia yliaaltoja, voidaan tällöin ohjata invertteri irrottautumaan verkosta. Tosin verkossa voi esiintyä muista lähteistä tulevia yliaaltoja, jotka voivat aiheuttaa virheellisiä havaintoja (Teodorescu 2011).

3.3.2 Aktiiviset metodit

Aktiivisissa metodeissa ideana on tuottaa invertterillä jonkinlainen häiriö verkkoon, joka ei normaaliolosuhteissa vaikuta verkon tilaan, mutta järjestelmän ollessa saarekekäytössä se aiheuttaa jonkin verkon parametrin voimakkaan muutoksen, joka laukaisee jonkin passiivisista metodeista. Invertteri voidaan ohjata tuottamaan hieman korkeampaa taajuutta ja nostamaan taajuutta jokaisen syklin jälkeen. Tämä invertterin tuottama virhe on niin pieni normaaliolosuhteissa, ettei mitattu taajuus muutu, mutta saarekekäytössä invertterin tuottama ”virhe” kasvaa, koska jakeluverkko ei pysty estämään taajuuden nousua, jolloin ylitaajuus irrottaa invertterin verkosta

Luonnollisesti on myös mahdollista ohjata invertteriä tuottamaan häiriöitä, jotka saareketilassa havaitaan jännitteen muutoksina tai tarpeeksi suurina yliaaltoina. Jännitteen amplitudin muutokset voidaan havaita ohjaamalla invertterin vähentämään sen verkkoon syöttämää tehoa ja mikäli verkon kuormalle syöttämä teho on vähentynyt merkittävästi, alijännitesuoja laukeaa ja irrottaa järjestelmän verkosta. (Teodorescu 2011)

3.4 Mikrotuotannon ongelmia

Mikrotuotannolla tarkoitetaan sähköntuotantolaitosta pienjänniteverkossa, joka on kulutuskohteeseen liitettynä ja sen ensisijainen tarkoitus on sähköntuotanto kyseiseen kulutuskohteeseen. Mikrotuotanto voi aiheuttaa verkon suojauslaitteiden häiriintymistä erilaisissa vika-tilanteissa. Esimerkiksi tilanteessa, jossa muuntaja syöttää kahta eri lähtöä ja toiseen niistä tulee vika, tuotantolaitos voi alkaa syöttää vikavirtaa vikapaikkaan. Tällöin tuotantolaitoksen puoleinen suojalaite voi lauaeta, mikäli vikavirta kasvaa liian suureksi eikä laite havaitse sitä. (Energiateollisuus 2016)

Toinen mahdollinen ongelma voi tapahtua, jos vika tapahtuu kaukana muuntajan syötöstä ja väliin jää runsaasti mikrotuotantoa. Tällöin verkon suojaus ei välttämättä toimi, koska vikapaikkaan syötetään oikosulkuvirtaa kahdesta paikasta, jolloin syötöltä tuleva vikavirta ei riitä laukaisemaan verkon suojaa. Tätä sanotaan suojauksen sokaistumiseksi. (Energiateollisuus 2016)

4. INVERTTEREIDEN OHJAUS

Loistehoa kompensoivien invertterien ohjauskeinojen toimivuuteen vaikuttaa eniten verkon resistanssin ja reaktanssin suhde. Suur- ja keskijänniteverkoissa R/X-suhde on pieni, minkä ansiosta loistehon kompensointi on tehokas keino jännitteensäädössä. Pienjänniteverkoissa taas R/X-suhde on yleensä suurempi suur- ja keskijänniteverkkoihin verrattuna, minkä takia loistehon kompensointi ei ole yhtä tehokasta pienjänniteverkossa. Inverttereiden $\cos(\varphi)$ on yleensä noin 0.9, mikä johtaa inverttereiden hyvin rajalliseen loistehontuotanto kykyyn. Tämän parantamiseksi inverttereiden ylimitoitus on keino, jolla saadaan niiden loistehontuotanto kapasiteettia suurennettua. (Hashemi 2017)

4.1 Paikallinen ja keskitetty ohjaus

Inverttereiden ohjaus voi tapahtua joko paikallisesti tai keskitetysti. Keskitetyssä ohjauksessa voitaisiin säätää jokaiselle sähkönkuluttajalle optimaalinen tasapaino jännitteen vaihteluiden sekä häviöiden kanssa. Tosin keskitetyssä ohjauksessa on omat huonot puolensa. Riippuen ohjaimen sijoituksesta sen kyky reagoida vaiheluihin ei olisi latenssista johtuen samaa luokkaa, kuin paikallisessa ohjauksessa. Lisäksi tällainen järjestelmä olisi paljon alttiimpi erilaisille häiriöille ja katkoille tiedonsiirrossa. Koska keskitetyt ohjaimet vaativat kommunikaatiota inverttereiden kanssa, kommunikaation toteuttaminen vaatii huomattavan sijoituksen, jolloin niistä saatava hyöty voi olla marginaalinen paikalliseen ohjaukseen nähden (Hashemi 2017). Paikallisessa ohjauksessa taas järjestelmä toimisi yleisesti luotettavammin, muttei pystyisi täydellisesti arvioimaan muiden verkon haarojen kulutusta, eikä näin toimisi aina optimaalisesti. (Turitsyn 2011)

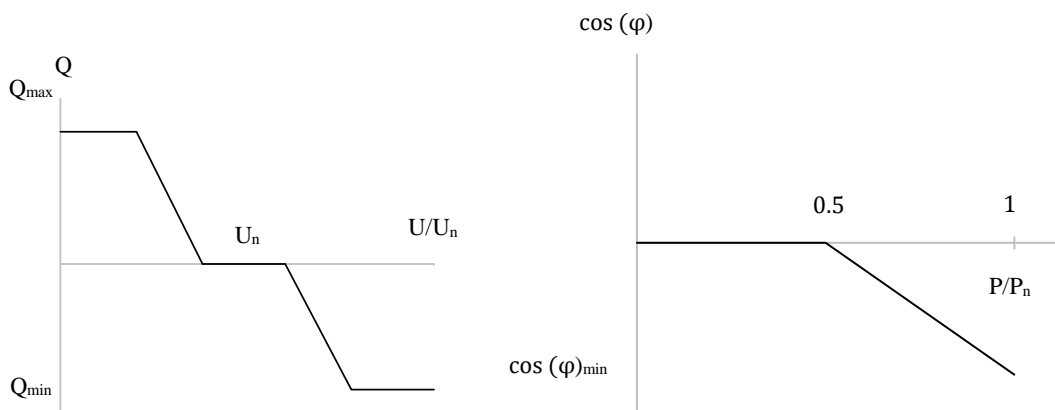
4.1.1 SCADA-ohjain

Keskitettynä ohjaimena voisi käyttää SCADA-ohjainta. Ohjain tarkkaillee verkon eri pisteiden jännitettä, verkon eri laitteiden tilaa, sekä inverttereiden toimintaa ja niiden tuottaman energian määrää. Ohjain kommunikoi inverttereiden kanssa käyttäen solukoverkkoon perustuvaa viestintä järjestelmää ja jo olemassa olevaa AMI-järjestelmää (Advanced Metering Infrastructure). Invertterit lähettävät noin viiden minuutin välein niiden mittaaman jännitteen tehon ja virran ohjaimelle, joka tallentaa datan tarkastelua varten. Ohjain vaatii operaattorin, joka pystyy ohjaamaan jopa yksittäisiä invertteritä esimerkiksi tuottamaan tietyn määrän loistehoa, rajoittamaan verkkoon syöttämää tehoa ja myös kytkemään invertterin pois

päältä. Vaikka SCADA-ohjain pystyy ohjaamaan inverttereitä automaattisesti, oikeanlaisen automaation asettaminen on vaativaa ja aikaa vievää. Ongelmia tulee etenkin liitettäessä inverttereitä lisää ohjaimen hallintaan, mikä vaikeuttaa inverttereiden asettamista ryhmiin, joissa niitä tulisi ohjata. (Gonzalez 2018)

4.2 Ohjauskeinot

Inverttereiden käyttöä loistehon kompensointiin voidaan ohjata $Q(U)$ -, $\cos(\varphi)P$ - ja $\cos(\varphi)$ -ohjauskeinolla. Ohjauksien ideana on ohjata invertteriä kompensoimaan loistehoa ja tätä kautta säätämään jännitettä. $Q(U)$ -ohjauksessa on ideana ohjata invertteriä kompensoimaan loistehoa paikallisen verkon jännitteen mukaan. Mitä suuremmaksi verkon jännite kunkin invertterin kohdalla kasvaa, sitä enemmän loistehoa pyritään kompensoimaan. $\cos(\varphi)P$ -ohjauksessa loistehon kompensointi määräytyy tuotannon mukaan. Invertterille määrätään jonkinlainen ohjauksikäyrä, jossa tuotannon kasvaessa invertterin tehokerrointa pienennetään, jotta kompensoivan loistehon tuotanto lisääntyisi. $\cos(\varphi)$ -ohjauksessa taas invertterille on säädetty vain tietty tehokerroin, jonka mukaan lisätehoa tuotetaan, eikä arvo muutu. Kuvassa 4.1 voi nähdä kuinka $Q(U)$ - ja $\cos(\varphi)P$ -ohjauksen ohjauksikäyrät periaatteessa toimivat.



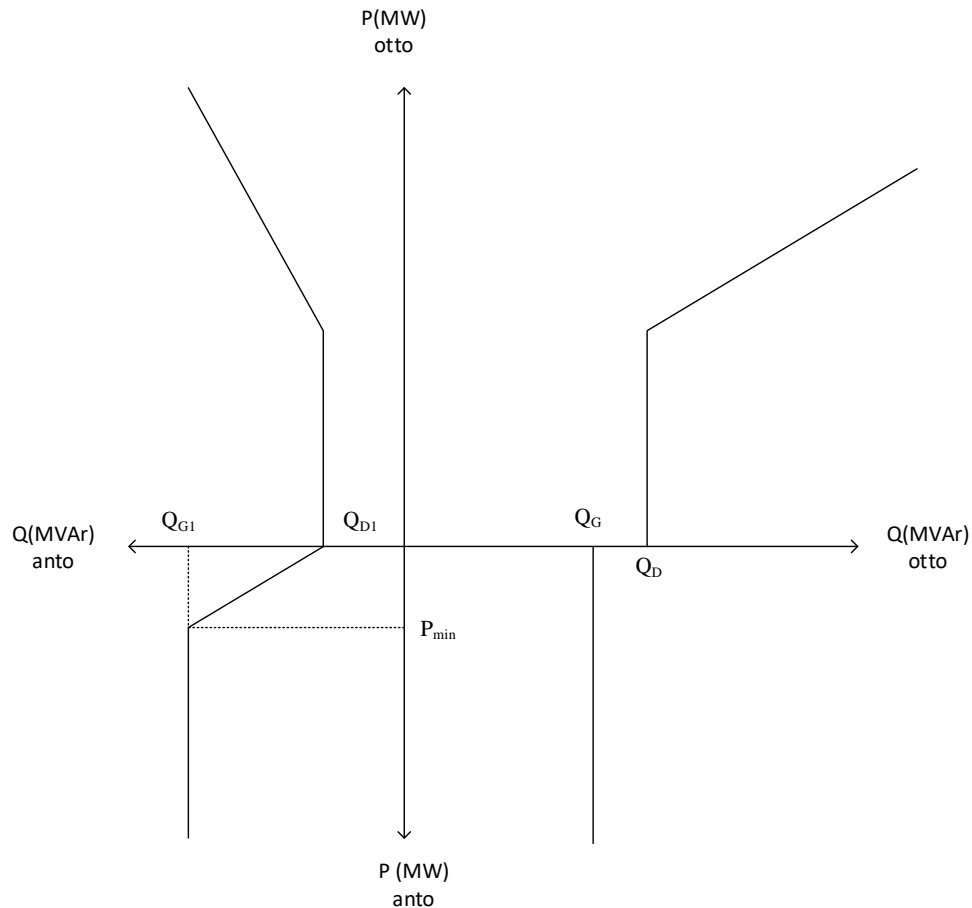
Kuva 4.1. $\cos(\varphi)P$ -(oikealla) ja $Q(U)$ -ohjauksen(vasemmalla) käyrät, joiden mukaan ne toimivat. $Q(U)$ -ohjauksessa nähdään kuinka mitä suuremmaksi U/U_n arvo kasvaa sitä pienempi on tuotettu loisteho. Taas $\cos(\varphi)P$ -ohjauksessa taas kompensointi alkaa, kun tarpeeksi suuri P/P_n arvo saatutetaan, jolloin tehokerroin alkaa pienentymään. Nämä eivät ole ainoat keinot toteuttaa kyseiset ohjaukset, vaan niiden käyttäytymistä on mahdollista muokata. (Kulmala 2017)

Q(U)-ohjaus on hyvä keino ohjata inverttereitä, koska siinä invertteri toimii verkon tilan mukaan toisin kuin $\cos(\varphi)P$ - ja $\cos(\varphi)$ -ohjauksissa. Tällöin vältetään turhalta kompensoinnilta, jota voi tapahtua $\cos(\varphi)$ - ja $\cos(\varphi)P$ -ohjauksella kun huipputuotanto ja kuorma tapahtuvat samaan aikaan, jolloin invertteri pyrkii turhaan kompensoimaan loistehoa. Tosin Q(U)-ohjauksessa kompensointi jakautuu epätasaisesti. Jos oletetaan, että aurinkosähköjärjestelmiä on jakautunut tasaisesti johonkin verkkoon, verkon alkupäässä jännitteenousu tapahtuu hitaammin verrattuna verkon loppupäähän. Mitä kauemmaksi verkon alkupäästä mennään jännitteen nousun vaara kasvaa ja tämä johtaa suurempaan kompensointitaakkaan verkon loppupään inverttereille, koska alkupään invertterit eivät vielä huomaa jännitteen nousua, vaikka niitä tarvittaisiin verkon jännitteen hallintaan. Tämä voi johtaa loppupään invertteerien lyhyempään käyttöikänsä. $\cos(\varphi)P$ -ohjauksella ei ole tätä ongelmaa, mutta sillä voi tapahtua turhaa kompensointia kuten jo edellä mainittiin. (Demirok 2011)

5. AURINKOSÄHKÖINVERTTEREIDEN HYÖDYT LOISTEHON KOMPENSOINNISSA

Kappaleessa tarkastellaan hyötyjä, joita saadaan aurinkosähköinverttereiden käytöstä kompensoinnissa loistehoikkunan ja jännitteensäädön kannalta.

5.1 Loissähköikkuna



Kuva 5.1. Loissähköikkuna kertoo loistehon otto- ja syöttörajat (Fingrid 2017).

Loissähköikkunalla tarkoitetaan sähköverkkoon syötetyn ja kulutetun loistehon rajoja, joilla ei tarvitse maksaa erillistä korvausta. Kuvasta 5.1 nähdään loissähköikkunan periaate. Eli mitä enemmän kulutetaan tai tuotetaan pätötehoa verkkoon, sitä enemmän voidaan ottaa tai syöttää loistehoa verkkoon ilman erillistä korvausta. Y-akselilta katsotaan tuotettu tai kulutettu pätöteho, jonka jälkeen voidaan lukea x-akselilta loistehon otto ja antorajat. Ylityksistä johtuvat maksut määräytyvät rajat ylittäneestä tuotannosta.

Rajat loistehon annolle ja otolle perustuvat kyseisen liittymispisteen vuotuisesta pätötehon ottoenergiasta ja sen takaisten voimalaitosten nettosähkötehosta. Näitä rajoja ei tosin sovelleta, mikäli liittymispisteellä on yksi tai useampia voimalaitoksia alle 15 km päässä, voimalaitokset osallistuvat verkon jännitteensäätöön tai liittymän takaisen kulutuksen vuosienergia on $\frac{1}{4}$ liittymän takaisen tuotannon vuosienergiasta. (Fingrid 2017)

Loissähköikkuna asettaa siis rajat verkkoon syötetylle ja kulutetulle loisteholle. Jos inverttereitä käytetään loistehon kompensointiin, verkkoyhtiöiden loistehon kompensointitarve vähenee, mikä taas vähentää loissähköikkunan ylityksestä tulevia maksuja.

5.2 Edut yhtiöille ja kuluttajille

Hajautettu tuotanto lisää verkon kuormitusta. Tämä vaatii sähkönjakelu yhtiötä päivittämään verkkoa. Tästä syystä olisi suotuisaa antaa enemmän aikaa yhtiöille päivittää verkkoa, jotta suuret siirtomaksujen nousut pysyttäisiin välttämään.

Jos aurinkosähkön pientuotanto lisääntyy tulevaisuudessa, olisi järkevä pyrkiä hyödyntämään aurinkosähköinverttereitä verkon jännitteen hallinnassa. Niitä hyödyntämällä voidaan ainakin rajoittaa jännitteen nousua hetkellisesti, mikä voi antaa lisää aikaa tehokkaamman ratkaisun löytämiseksi. Jos aurinkosähköinvertterit valjastettaisiin loistehon hallintaan, pysyttäisiin loisteho kompensoimaan sen tuottopaikassa ja näin vähentämään loistehon kompensointia verkossa, mikä johtaisi pienempiin kustannuksiin jakeluverkkoyhtiöille. Etenkin kun tarkasteltaessa loissähköikkunaa, inverttereiden käyttö kompensoinnissa voi pienentää loissähköikkunan ylityksistä aiheutuvia kustannuksia verkkoyhtiöille käytännössä ilmaiseksi.

Loistehon määrä jakeluverkossa tulee kasvamaan tulevaisuudessa maakaapeloinnin lisääntyessä, kun sähkönjakeluyhtiöt pyrkivät tekemään verkoistaan vikakestoisempia välttääkseen jakelun katkeamisesta johtuvat korvaukset. Korvausten suurus määräytyy 588/2013 Sähkömarkkinalain mukaan (Sähkömarkkinalaki 588/2013). Maakaapeloitu verkko tuottaa huomattavasti enemmän kapasitiivista loistehoa verrattuna ilmaverkkoon. Tätä loistehoa tulee kompensoida eri laitteilla ja jossa inverttereiden hyödyntäminen kompensoinnissa voi olla apuna.

6. MUITA JÄNNITTEENSÄÄDÖN KEINOJA

Hajautetun tuotannon aiheuttamaa kuormituksen ja jännitteen nousua voitaisiin aluksi helpottaa käyttämällä verkon laaja-alaista hallintaa. Siinä on tavoitteena muuntaa sähköasemalta keskijänniteverkkoon syötetty jännitetaso sellaiseksi, että vältetään aurinkosähkön hajautetusta tuotannosta johtuva ylijännite. Muita keinoja ovat esimerkiksi johdinten poikkipinta-alan kasvattaminen, rinnakkaiset johtimet ja suuremmat jakelumuuntajat. Myös verkon topologian muutokset ovat mahdollisia. (Bayer 2017)

Ylijännitettä voidaan myös hallita muuntajien käämikytkimillä. Käämikytkimillä voidaan muuttaa muuntajien muuntosuhdetta ja näin alentaa muuntajan toisiopuolen jännitettä. Käämikytkinten käyttö keski-/pienjänniteverkkojen muuntajissa on vähäistä niiden korkean investointihinnan takia etenkin jos kytkiminä käytettäisiin OLTC (On Load Tap Changer)-tyypin käämikytkimiä. Jotta OLTC:lla varustettu muuntaja voi taata hyvän jännitteenlaadun verkkoon, tulee sen tietää verkon eri pisteiden jännitteet, joka vaatisi jonkinlaisen tietoverkon rakentamista verkkoon. Tämä kasvattaisi jo ennestään suurta investointihintaa muuntajankäämikytkimille. (Hashemi 2017)

Inverttereiden kompensoinnin ja käämikytkimien käyttäminen samaan aikaan voi aiheuttaa turhia käämikytkimen asennon muutoksia muuntajassa. On mahdollista, että invertterin syöttöpisteessä jännite nousee, mutta lähellä muuntajaa jännite laskee johtuen erilaisista R/X-suhteista. Tällöin voi syntyä tilanne, jossa invertteri pyrkii laskemaan jännitettä kompensoimalla loistehoa, kun taas muuntajan käämikytkimet pyrkivät nostamaan jännitettä. Tämä johtaa turhiin kytkimen asennon muutoksiin, joka lisää muuntajien huoltokustannuksia. (Kulmala 2016)

Jännitteen hallintaan voidaan myös käyttää kysyntäjoustoa. Kysyntäjoustossa ideana on tehdä eräänlainen kommunikaatioverkko erilaisten laitteiden, kuten jääkaappien ja lämmitimien välille, joka ohjaisi niitä käynnistymään matalan kuorman aikaan, jolloin voidaan vähentää hajautetun tuotannon energian syöttöä verkkoon. Yksinään tämän vaikutus on suhteellisen pieni, koska tällainen teknologia on vasta tulossa markkinoille ja harvalla on vielä laitetta, jossa olisi mahdollisuus kommunikaatiolle muiden laitteiden välillä. (Hashemi 2017)

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tulevaisuudessa lisääntyvä aurinkosähkön hajautettu tuotanto tulee aiheuttamaan ongelmia verkoissa vastakkaissuuntaisen tehon nostaessa verkon jännitettä, joten inverttereiden hyödyntäminen jännitteen nousun hallitsemisessa voi olla tärkeä osa tulevaisuuden älykkäiden sähköverkkojen kannalta. Verkon johtimien tai muuntajien koon kasvattaminen on yksi keino ratkaista ongelmia, mutta inverttereiden käyttö loistehon hallinnassa on myös hyvä keino rajoittaa jännitteen nousua.

Aurinkosähköinvertteireitä voidaan käyttää verkon loistehon ja jännitteensäädössä, mutta tähän liittyy vielä ongelmia. Inverttereille voidaan käyttää erilaisia ohjauskeinoja, joissa kullakin ovat omat hyvät ja huonot puolensa. $Q(U)$ -ohjaus toimii verkon jännitteen perusteella ja $\cos(\varphi)P$ -ohjaus toimii sen hetkisen pätötehotuotannon mukaan. $Q(U)$ -ohjauksella voidaan välttää turhaa kompensointia, jota tapahtuu $\cos(\varphi)P$ -ohjauksella huipputuotannon ja huippukuorman tapahtuessa samaan aikaan, kun taas $\cos(\varphi)P$ -ohjauksella verkon kukin invertteri osallistuu verkon jännitteensäätöön, mikä ei välttämättä tapahdu $Q(U)$ -ohjauksella käytävillä inverttereillä verkon alkupäässä. Inverttereiden käyttö jännitteensäädössä ei tosin ole pienjänniteverkoissa kovin tehokasta johtuen verkon suuresta R/X -suhteesta, mutta ne voivat kuitenkin avustaa verkon jännitteen hallinnassa, jotta saadaan pidennettyä nykyisten verkkojen käyttöikä.

Ohjauksen voisi toteuttaa keskitettynä tai paikallisena ohjauksena, joista käyttämällä keskitettyä ohjausta voitaisiin saavuttaa teoriassa optimaalisempi lopputulos kuin paikallisella ohjauksella, mutta johtuen sen suurista kustannuksista ja mahdollisesta latenssista, jota voisi esiintyä ohjauksessa, paikallinen ohjaus on luultavasti käytännössä parempi vaihtoehto, sillä se ei vaadi kommunikaatiota muiden laitteiden välillä ja on näin edullisempi ja yksinkertaisempi toteuttaa, vaikkei sillä saavuteta välttämättä yhtä optimaalista lopputulosta verkon jännitteensäädön kannalta. Ohjauksessa on myös tärkeä huomioida inverttereiden kyky havaita saarekekäyttö, jotta ne osaavat irtautua verkosta tarvittaessa. On myös tärkeä pyrkiä minimoimaan virheelliset saarekehavainnot turhien irtautumisien estämiseksi.

Muita tulevaisuudessa mahdollisesti käytettäviä jännitteensäädön keinoja ovat esim. muuntajien käämikytkimet ja kysynnänjousto. Näiden käyttö inverttereiden hyödyntämisen

kanssa voivat auttaa rajoittamaan jännitteen nousua verkossa. Tosin käämikytkimet ja invertterit eivät välttämättä toimi keskenään hyvin ilman jonkinlaista kommunikaatiota toistensa välillä. Kysynnänjoustoon kykenevät laitteet taas eivät ole vielä niin monella käytössä, että niistä saataisiin todellista hyötyä. Lisäksi on mahdollista, ettei kysyntäjoustolla ei saavuteta pitkälläkään aikavälillä niin suurta vaikutusta, että sen käytöstä saatava hyöty on suurempi kuin siihen vaadittavien ohjaimien investointi.

Koska invertterit eivät yleensä pysty toimimaan kovinkaan pienillä tehokertoimilla, on niiden nimellistehonkasvattaminen eräs keino parantaa niiden kompensointia. Jo pienellä koon kasvattamisella inverttereiden potentiaali loistehon kompensoinnissa kasvaa huomattavasti. Yleensä inverttereiden pienin mahdollinen tehokerroin on 0.9 luokkaa, joka ei välttämättä riitä jännitteiden nousun rajaamiseen. Tällöin on mahdollista, että verkkoyhtiöiden on pakko rajoittaa syötettyä tehoa ja päivittää jakeluverkkoa vahvemmaksi, jottei jännitteiden vaihtelut kasva liian suureksi.

Inverttereiden käytöstä kompensoinnista hyötyisivät eniten sähköverkkoyhtiöt. Inverttereiden kompensoima loisteho vähentäisi heidän tarvettansa kompensoida itse, jolloin mahdolliset loistehoikkunan ylitykset tulisivat keskimäärin pienemmiksi. Lisäksi tulevaisuuden kannalta inverttereiden hyödyntäminen jännitteensäädössä voi antaa verkkoyhtiöille enemmän aikaa päivittää verkkoaan ja kehittämään uusia ratkaisuja estämään liian suuret jännitteen nousut, joita voi tapahtua lisääntyvän kaksisuuntaisen tehonsiirron takia. Näistä hyötyvät myös epäsuorasti kuluttajat, sillä pienemmät kustannukset verkkoyhtiöille johtavat pienempiin sähkönsiirtohintoihin kuluttajille.

LÄHTEET

Bayer, B., Matschoss P., Thomas, H., Marian, A. 2017. The German experience with integrating photovoltaic systems into the low-voltage grids. [Verkkodokumentti] [Viitattu 17.8.2019] Saatavilla:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117311461>

Coster, E. J., Myrzik, J. M. A., Kruimer, B., Kling, W. L. 2011. Integration Issues of Distributed Generation in Distribution Grids. Proceedings of the IEEE Volume: 99, Issue: 1, Jan, s. 28-39.

Demirok, E., González, P. C., Frederiksen, K. H. B., Sera, D., Rodriguez, P., Teodorescu, R. 2011. Local Reactive Power Control Methods for Overvoltage Prevention of Distributed Solar Inverters in Low-Voltage Grids. IEEE Journal of Photovoltaics Volume: 1, Issue: 2 Oct. S. 174 – 182.

Elovaara, J., Haarla, L. 2011. Sähköverkot I Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Otatieto

Gonzalez, L. C., Becker, F. 2018. Case Study: Arizona Public Service Solar Partnership Program and the Powerful SCADA Controller that Made it Work. 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Denver, CO, USA. 16-19 April.

Hashemi, S., Østergaard, J. 2017 Methods and strategies for overvoltage prevention in low voltage distribution systems with PV. IET Renewable Power Generation 17th January S. 205-214

IEA. 2018. Snapshot of global photovoltaic markets. [Verkkodokumentti] [Viitattu 10.5.2019] Saatavilla:

[http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS -
_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2017.pdf](http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2017.pdf)

Khan, H., Fernandes, B. G., Kulkarni, A. 2017. Unified controller for overvoltage prevention, Islanding detection and LVRT at high penetration of PV systems connected to a LV grid 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting Chicago, IL, USA 16-20 July. S. 1-5.

Kulmala A., Repo S., Bletterie B. 2016. Avoiding adverse interactions between transformer tap changer control and local reactive power control of distributed generators. 2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. Ljubljana, Slovenia 16th February 2017

Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon. 2016 Energiateollisuus Ry. [Verkkodokumentti] [Viitattu 13.8.2019]. Saatavilla:

https://energia.fi/files/762/Mikrotuotannon_liittaminen_sahkonjakeluverkkoon_YA9_13_verkostosuositus_paivitetty_20160427.pdf

Loissähkön toimitus ja loistehoreservin ylläpito. 2017. Fingrid Oy. [verkkodokumentti] [viitattu 5.11.2018]. Saatavilla

<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kayttovarma-sahkonsiirto/lois-sahkon-toimituksen-ja-loistehoreservin-yllapito.pdf>

Sähkömarkkinalaki 588/2013. Finlex. 2013. Sähkömarkkinalaki. [Verkkodokumentti] [Viitattu 18.8.2019] Saatavilla:

<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588#Pidp446601344>

Teodorescu, R., Liserre, M., Rodrâiguez, P. 2011. Grid converters for photovoltaic and wind power systems

Tekninen liite 1 ohjeeseen sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon - nimellisteholtaan enintään 100 kva laitoksen liittäminen. 2016. Energiateollisuus Ry. [verkkodokumentti] [viitattu 4.1.2019] Saatavilla:

https://energia.fi/files/1249/tekninen_liite_1_-_enintaan_100_kva_PAIVI-TETTY_20160427.pdf

Turitsyn, K., Sulc, P., Backhaus, S., Chertkov, M. 2011. Options for Control of Reactive Power by Distributed Photovoltaic Generators. Proceedings of the IEEE Volume: 99, Issue: 6. 16 May. S. 1063 – 1073.